

Integration von Holzqualität und Holzsortierung in behandlungssensitive Waldwachstumsmodelle

**Integration of wood quality, grading and bucking in forest growth models
sensitive to silvicultural treatment**

Vollständiger Abdruck der vom Promotionsausschuss der Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement an der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München genehmigten Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr. rer. silv.

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr. H. Pretzsch
2. Prof. Dr. G. Becker
3. Prof. Dr. D. Quednau

Die Dissertation wurde durch den Promotionsausschuss der Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement an der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München am 7.7.2003 angenommen. Datum der mündlichen Prüfung: 27.6.2003

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand von 1998 bis 2003 am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Technischen Universität München unter der Leitung von Professor Dr. H. Pretzsch. Ihm möchte ich vielmals für die Themenstellung, die wissenschaftliche Anleitung und Betreuung der Arbeit danken. Mein besonderer Dank gilt ihm für die Gelegenheit unter vorzüglichen Arbeitsbedingungen am Lehrstuhl arbeiten zu können.

Bei meiner Arbeit bin ich durch kollegiale Hilfe und aufmunternde Worte von allen Mitgliedern des Lehrstuhls unterstützt worden, denen mein herzlicher Dank für dieses gute Arbeitsklima gilt. Nicht zuletzt der immerwährenden Diskussionsbereitschaft vieler Kollegen sind viele Ideen und Ansätze dieser Arbeit zu verdanken. Besonders bedanke ich mich für die Mühe meiner Betreuer Dr. Martin Bachmann, Dr. Peter Biber, Dr. Rüdiger Grote und Dr. Markus Kahn. Es ist schwer einzelne Personen herauszugreifen. Deshalb gilt mein Dank allen jetzigen und früheren Lehrstuhlmitgliedern (in alphabetischer Reihenfolge).

Christina Bauer, Julian Breibeck, Hans Herling, Korbinian Kreilinger, Markus Meschederu, Ralf Moshammer, Martin Nickel, Dr. Arne Pommerening, Alexander Peters, Dr. Miriam Pott, Dr. Thomas Rötzer, Dr. Ronggo Sadono, Marga Schmid, Dr. Thomas Schneider, Gerhard Schütze, Rainer Sodtke, Rajko Schermer, Leonhard Steinacker, Dr. Heinz Utschig, Dr. Markus Weiss, Philip Wipfler, Helge Zoltner. Jeder von ihnen hat einen Beitrag am Zustandekommen dieser Arbeit. Ein besonderer Dank gilt meiner Kollegin Dr. Elke Küsters für ihre Unterstützung beim Korrekturlesen und ihre Aufmunterung in der letzten Phase, sowie meinen ehemaligen Kollegen Dr. Christoph Hendrich, Dr. Folkert Müller und Dr. Ronggo Sadono für viele interessante Diskussionen und Anregungen, ebenso wie auch Dr. Peter Schumacher.

Ich möchte mich ganz besonders bei meinen Eltern und Geschwistern bedanken für das Korrekturlesen vor der Abgabe und die moralische Unterstützung. Diese Arbeit wäre ohne meine Geschwister Stefan und Erich Seifert nicht möglich gewesen. Ihre unermüdlichen Hilfestellung in vielfältigen Programmierfragen, in mathematischen Belangen und im Layout der Arbeit möchte ich hier besonders herausstellen. Nicht zuletzt die Nachtschichten in den letzten Tagen vor Abgabe, in denen sie mir zur Hand gingen und ihre stete Diskussionsbereitschaft, die mich in vielen Dingen inspiriert hat.

Weiterhin bin ich folgenden Personen für hilfreiche Diskussionen und Hinweise zum Dank verpflichtet: Dr. Ch. Deleuze, Prof. Dr. P. Glos, Dr. D. Grosser, Prof. Dr. Holdenrieder, PD Dr. T. Knoke, Dr. K. J. Lang, Dr. J.-M. Leban, Prof. Dr. R. Matyssek, Dr. G. Nepveu, Dr. R. Pausch, Dr. H. J. Schuck und Prof. Dr. G. Wegener.

Für die Bereitstellung ihrer Astdaten bedanke ich mich bei Dr. Stefan Schaffner und Dr. Reinhard Lässig ganz herzlich. Zudem bei allen meinen Hilfskräften, die unermüdlich Äste gemessen und Stammscheiben ausgewertet haben. Dabei gilt mein herzliches Vergelt's Gott Florian Loher, der in seiner Diplomarbeit die Grundauswertung des Datenkollektivs D durchführte und etliche Stunden im Keller bei der Messung von Astscheiben verbrachte.

Schließlich danke ich der Staatsforstverwaltung Bayern für die Finanzierung meiner Arbeit im Rahmen der Kuratoriumsprojekte „V40 – Rationelle Fichtenpflege“ und „X33-Einfluss der Bestandesbehandlung auf die Holzqualität von Fichte und Buche in Rein- und Mischbeständen“ sowie der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft, Rheinland-Pfalz für die Mittel und Daten im Projekt „Das Baumwachstum von kronenspannungsfrei gewachsenen Fichten, unter besonderer Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Stammholzeigenschaften und der forstökonomischen Konsequenzen“. Ich möchte mich auch ausdrücklich bei Dr. M. Bücking, Herrn Michael Jochum, Dr. Peter Reck und Frau PD Dr. Ute Seeling für die Datenbereitstellung und Zusammenarbeit im Rahmen diese Projektes bedanken.

Inhalt

Vorwort	i
Deutsche Zusammenfassung	xv
Englische zusammenfassung	xvii
1. Einleitung	1
1.1. Gründe für eine Integration von Holzqualität in Waldwachstums- simulatoren	1
1.2. Beitrag der Arbeit zur Integration der Holzqualität in Waldwachstums- simulatoren	3
1.3. Aufbau der Arbeit	5
2. Stand des Wissens	7
2.1. Begriffsdefinitionen	7
2.2. Waldwachstumsmodelle	8
2.3. Holzkundliche Modelle	9
2.3.1 Modelle zur Strukturbeschreibung	11
2.3.2 Modelle zur Strukturbewertung	13
2.3.3 Modelle zur Prozessbeschreibung	13
2.4. Ökonomische Marktmodelle	14
2.5. Verknüpfung von Waldwachstums- und Holzmodellen	14
3. Entwicklung des Modellansatzes	17
3.1. Definition von „Holzqualität“	17
3.2. Analyse der Qualitätskriterien	18
3.2.1 Normen zur Holzqualität	18
3.2.2 Identifikation und Auswahl sortierrelevanter Kriterien	19
3.3. Modellrahmen – der Waldwachstumssimulator SILVA	22
3.3.1 Modellansatz	22
3.3.2 Anwendungsbereich	25
3.3.3 Gültigkeitsbereich	26
3.3.4 Eingaben	28
3.3.5 Programmsteuerung	29
3.3.6 Ausgaben	30
3.4. Ansatz für die Integration von Qualitätsmodellen in SILVA	30
3.4.1 Anpassung der Skalenbereiche	31
3.4.2 Wahl der grundsätzlichen Modellmethodik	31
3.4.3 Programmstruktur von SILVA mit den integrierten Holzqualitätsmodellen	35
3.4.4 Interaktion der Untermodelle	36
3.4.5 Abgleich der Ein- und Ausgaben	37

4. Modellierung der Astigkeit	39
4.1. Ziele der Astmodellierung	40
4.2. Datengrundlage	42
4.2.1 Kollektiv A: „Freising“	43
4.2.2 Kollektiv B: „kronenspannungsfrei gewachsene Fichten“	47
4.2.3 Kollektiv C: „Solitär-fichten“	50
4.2.4 Kollektiv D: „Zusmarshausen“	52
4.2.5 Kollektiv E: „Vohenstrauß“	55
4.2.6 Datenkollektiv F: „Bestandesfichten aus Rein- und Mischbeständen“	59
4.3. Einflüsse auf das Kronen- und Astwachstum	64
4.3.1 Beschreibung der Astigkeit	64
4.3.2 Vertikale Astposition	65
4.3.3 Horizontale Astposition	71
4.3.4 Astlänge	76
4.3.5 Astdurchmesser	85
4.3.6 Astansatzwinkel	95
4.3.7 Aststerben	104
4.3.8 Natürliche Astreinigung	109
4.3.9 Künstliche Astreinigung durch Astung	112
4.4. Modellansatz des Astmodells AMOK	117
4.4.1 Modell zur Konkurrenzberechnung	119
4.4.2 Entwicklung eines flexiblen Kronenmodells	130
4.4.3 Rekonstruktion des Kronen- und Baumwachstums	132
4.4.4 Modelle zur Prognose der vertikalen Astposition	140
4.4.5 Modelle zur Prognose der horizontalen Astposition	140
4.4.6 Modelle zur Prognose des Astwinkels	142
4.4.7 Modelle zur Prognose der Astlänge	147
4.4.8 Modelle zur Prognose des Astdurchmessers	156
4.4.9 Modelle zur Prognose des Aststerbens	165
4.4.10 Modelle zur Nachbildung der natürlichen Astreinigung und Astung	167
4.5. Modellimplementation von AMOK	171
4.5.1 Der Ablauf der Astsimulation im Überblick	171
4.5.2 Simulationsablauf der Rekonstruktion	172
4.5.3 Simulationsablauf der Fortschreibung	177
4.5.4 Zusammenfassung der Gesamtsimulation	179
5. Modellierung der Rotfäuleausbreitung im Stamm	181
5.1. Einführung	181
5.2. Ökonomische Relevanz	183
5.2.1 Primärschaden	183
5.2.2 Sekundäre Schäden	185
5.2.3 Schadquantifizierung	191
5.3. Ausbreitung von Rotfäule im Stamm	192
5.3.1 Beschreibung des Fäuleausmaßes im Stamm	192

5.3.2	Hypothese A: Das Faulflächenprozent ist für alle befallenen Bäume eines Bestandes konstant.	195
5.3.3	Hypothese B: Das Faulflächenprozent ist unabhängig vom Standort.	198
5.3.4	Hypothese C: Über das Faulflächenprozent kann bei gegebenem Alter, Durchmesser und Standort auf die Fäulehöhe im Baum geschlossen werden	199
5.3.5	Hypothese D: Die Fäuleausdehnung folgt der Stammform und wird vor allem durch das Splintholz limitiert, das der Pilz nicht gut besiedeln kann.	201
5.3.6	Hypothese E: Die Ausdehnung einer Stammfäule ist, auch wenn die Infektion über die Wurzeln erfolgt, ähnlich einer Wundfäule nach dem CODIT-Schema zu erklären.	205
5.3.7	Hypothese F: Die Kernfäule breitet sich vor allem radial vom Mark nach außen aus.	207
5.3.8	Hypothese G: Der Fäulegrad zeigt einen statistischen Zusammenhang zur Fäuledimension.	208
5.4.	Modellansatz des Rotfäuleausbreitungsmodells RAM	210
5.4.1	Modellgrundlagen	210
5.4.2	Zielgrößen von RAM	213
5.4.3	Modelle zur Prognose des Fäuledurchmessers	213
5.4.4	Modelle zur Prognose der Fäulehöhe	215
5.4.5	Modell zur Prognose des Fäulegrads	220
5.4.6	Modell zur Prognose der Fäuleform	221
5.4.7	Modellierung der fäulebedingten Wuchsdepression des Baumes	222
5.5.	Modellimplementation	224
5.5.1	Benutzerdefinierte Eingangsgrößen	224
6.	Modellierung der Rundholzsortierung unter Berücksichtigung der Holzqualität	227
6.1.	Überblick über existierende Sortiermodelle	227
6.2.	Sortiermodell SILVSORT	230
6.2.1	Bewertung der Holzqualität des Stammes nach einer Rundholznorm	231
6.2.2	Monetäre Bewertung	234
6.2.3	Optimierung der Sortimentsaushaltung	237
7.	Simulationsergebnisse	243
7.1.	Ergebnisse der Konkurrenzberechnung	243
7.1.1	Ergebnisinterpretation	243
7.1.2	Verhalten bei unterschiedlichen Rasterauflösungen	245
7.1.3	Zeitverhalten	246
7.2.	Ergebnisse der Astsimulation	247
7.2.1	Simulation eines Solitärs	247
7.2.2	Simulation von Bestandesbäumen anhand eines Konkurrenzgradienten zum Bestandesrand	255
7.2.3	Simulation unterschiedlicher Pflanzverbände	261
7.3.	Ergebnisse der Simulation der Rotfäuleausbreitung	264
7.3.1	Simulation der Fäuleausbreitung im Stamm	266

7.3.2	Simulation der fäulebedingten Wuchsdepression des Baumes	269
7.4.	Kombinierter Simulationslauf mit Ast-, Rotfäule- und Sortiermodell	270
8.	Diskussion	275
8.1.	Darstellung des Simulationssystems und Bewertung der Simulationsergebnisse	275
8.2.	Abgrenzung von bisherigen Modellansätzen	278
8.3.	Anwendungsmöglichkeiten des Modells	280
8.4.	Verbesserungsmöglichkeiten	281
8.5.	Gesamtbetrachtung	283
9.	Literatur	285
	Anhang A	305
	Anhang B	310
	Anhang C	313

Content

Preface	i
German abstract	xv
English abstract	xvii
1. Introduction	1
1.1. Reasons for the integration of wood quality in forest growth simulators	1
1.2. Contribution of this thesis to the integration of wood quality into forest growth simulators	3
1.3. Structure of this thesis	5
2. Overview on existing model approaches	7
2.1. Definitions	7
2.2. Forest growth models	8
2.3. Wood quality models	9
2.3.1 Models describing structures	11
2.3.2 Models evaluating structure	13
2.3.3 Models describing processes	13
2.4. Economic models for the wood market	14
2.5. Combination of forest growth and wood quality models	14
3. Model approach	17
3.1. Definition of “wood quality”	17
3.2. Analysis of quality criteria	18
3.2.1 Wood quality in grading rules	18
3.2.2 Identification and selection of parameters relevant for grading	19
3.3. Model frame – the growth simulator SILVA	22
3.3.1 Model approach of SILVA	22
3.3.2 Fields of application	25
3.3.3 Range of validity	26
3.3.4 Input	28
3.3.5 User interface	29
3.3.6 Output	30
3.4. Approach for the integration of wood quality models in SILVA	30
3.4.1 Adaption of scales	31
3.4.2 Model principles	31
3.4.3 Program structure of SILVA with wood quality models	35
3.4.4 Interaction between submodels	36
3.4.5 Adjustment of input and output	37

4. Modeling branchiness	39
4.1. Objectives of modeling branches	40
4.2. Data base	42
4.2.1 Data collective A: “Freising”	43
4.2.2 Data collective B: “spruce grown under low crown tension”	47
4.2.3 Data collective C: “solitary trees”	50
4.2.4 Data collective D: „Zusmarshausen“	52
4.2.5 Data collective E: “Vohenstrauß”	55
4.2.6 Data collective F: “stand grown trees from pure and mixed stands”	59
4.3. Influencing factors on crown and branch growth	64
4.3.1 Description of branchiness	64
4.3.2 Vertical branch position	65
4.3.3 Horizontal branch position	71
4.3.4 Branch length	76
4.3.5 Branch diameter	85
4.3.6 Branch inclination angle	95
4.3.7 Branch mortality	104
4.3.8 Natural pruning	109
4.3.9 Artificial pruning	112
4.4. Model approach for the branching model AMOK	117
4.4.1 Competition model	119
4.4.2 Development of a flexible crown model	130
4.4.3 Reconstruction of former crown and tree growth	132
4.4.4 Models for prediction of the vertical branch position	140
4.4.5 Models for prediction of the horizontal branch position	140
4.4.6 Models for the simulation of branch angle	142
4.4.7 Models for prediction of branch length	147
4.4.8 Models for the simulation of branch diameter	156
4.4.9 Models for the simulation of branch mortality	165
4.4.10 Models for the simulation of natural pruning	167
4.5. Model implementation of AMOK	171
4.5.1 Overview over the simulation process	171
4.5.2 Simulation of reconstruction	172
4.5.3 Simulation of projection into future	177
4.5.4 Overview on the branch simulation	179
5. Modeling the extent of decay in the stem	181
5.1. Introduction	181
5.2. Economic relevance	183
5.2.1 Primary losses by red rot	183
5.2.2 Secondary losses by red rot	185
5.2.3 Quantification of losses	191
5.3. Spread of red rot in the stem	192
5.3.1 Description of the extent of decay in the stem	192

5.3.2	Hypothesis A: The relative rot area at stem base is constant for all trees in the same stand.	195
5.3.3	Hypothesis B: The relative rot area FFP is not influenced by the site.	198
5.3.4	Hypothesis C: The relative rot area can be used to predict rot height in the stem under given age, dbh and site conditions.	199
5.3.5	Hypothesis D: The extent of decay follows stem form and is limited by sapwood, which cannot be colonized easily by the fungus.	201
5.3.6	Hypothesis E: The extent of decay in the stem can be explained by the CODIT-concept, even if infection comes from the roots.	205
5.3.7	Hypothesis F: A rot originating from root infection shows a concentric spreading pattern in the stem.	207
5.3.8	Hypothesis G: The degree of decay is statistical correlated with the dimension of the decay	208
5.4.	Model approach of the red rot model RAM	210
5.4.1	Foundations of the model	210
5.4.2	Modeled variables	213
5.4.3	Rot diameter models	213
5.4.4	Rot height models	215
5.4.5	Models for the degree of decay	220
5.4.6	Models for the form of decay	221
5.4.7	Models for the rot induced growth depression of infected trees	222
5.5.	Model implementation	224
5.5.1	User defined input	224
6.	Modeling grading and bucking by taking into account wood quality	227
6.1.	Overview on existing grading models	227
6.2.	The grading and bucking model SILVSORT	230
6.2.1	Grading based on a grading rule	231
6.2.2	Monetary assessment	234
6.2.3	Optimization of bucking	237
7.	Simulation results	243
7.1.	Results of the competition calculation	243
7.1.1	Interpretation of results	243
7.1.2	Influence of different rasters on the result	245
7.1.3	Time response	246
7.2.	Results of the branch simulation	247
7.2.1	Simulation of a solitary tree	247
7.2.2	Simulation of stand grown trees with a gradient of competition towards the stand's edge	255
7.2.3	Simulation of different initial spacings	261
7.3.	Results of the simulation of the extent of red rot in the stem	264
7.3.1	Simulation of the spread of decay in the stem	266
7.3.2	Simulation of the red rot induced growth depression of infected trees	269

7.4. Integrated Simulation of branch model, red rot model and grading/bucking model	270
8. Discussion	275
8.1. Discussion of the simulation results	275
8.2. Comparison to existing model approaches	278
8.3. Application range of the models	280
8.4. Possible future enhancements	281
8.5. Overall view	283
9. Literature	285
Appendix A	305
Appendix B	310
Appendix C	313

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Integration von Modellen zur Nachbildung der Holzqualität und qualitätsgesteuerten Rundholzsortierung in einen einzelbaumorientierten, distanzabhängigen Waldwachstumssimulator.

Durch die Einbeziehung der Holzqualität zusätzlich zum produzierten Holzvolumen soll die Aussagequalität von Waldwachstumssimulatoren verbessert werden. Dies befriedigt das gesteigerte Informationsinteresse der Forstwirtschaft, die auf eine detaillierte Information über die Ressource Rundholz angewiesen ist. Ebenso ist die Holzbranche an einer genauen Kenntnis des Rundholzes auf dem Markt interessiert. Durch die Integration von Holzqualitätsgrößen in Waldwachstumssimulatoren soll hier ein Beitrag dazu geleistet werden.

Die Integration wird beispielhaft für die Baumart Fichte (*Picea abies* (L.) KARST.) durchgeführt. Diese besitzt als ökonomisch wichtigste Baumart Mitteleuropas einen hohen Stellenwert und eignet sich aufgrund ihrer regelmäßigen Kronenstruktur besonders zur Simulation der Holzqualität.

Als wichtigste Einflussgrößen auf die Rundholzqualität der Fichte lassen sich die Astigkeit und die Gesundheit definieren, die etwa 80 bis 90 Prozent des Sortierergebnisses bei der Rundholzsortierung nach gängigen Normen bestimmen. Dementsprechend befasst sich diese Arbeit auch mit der Erstellung und Integration von Simulationsmodellen zur Nachbildung der Astigkeit und der Rotfäuleausbreitung durch *Heterobasidion annosum* [FR.] BREF. im Stamm. Ein besonderes Augenmerk wurde in der Entwicklung des Ast- und Rotfäulemodells auf die Nachbildung der Effekte der waldbaulichen Behandlung auf die Holzqualität gelegt. Damit bildet die Wirkung der Konkurrenz im Bestand, insbesondere auf die Astdimensionen als primär beeinflussbare Größen, einen wichtigen Aspekt dieser Arbeit. Als Modellrahmen dieser Integration dient der einzelbaumorientierte Waldwachstumssimulator SILVA (PRETZSCH 1992), der bereits durch seine Modellstruktur vielfältige waldbauliche Behandlungsmaßnahmen nachbilden kann und sich wegen seines räumlichen Modellansatzes als Integrationsplattform besonders eignet.

Der Modellablauf ist in zwei grundlegende Phasen gegliedert. In der ersten Modellphase werden mit dem Wachstum der Äste und der Rotfäuleentwicklung im Stamm zwei Wachstumsvorgänge modelliert. Das Ergebnis sind definierte Holzmerkmale des Stammes. Im zweiten Schritt werden die Holzmerkmale in einem Sortiermodell nach gängigen Rundholznormen bewertet. Damit erfolgt der Übergang von den biologisch interpretierbaren Holzmerkmalen zu einer normativen Holzqualität. Die Trennung der „biologischen Simulation“ von der Bewertung ermöglicht ein flexibles Austauschen der Sortiermodelle nach Bedarf.

Der entwickelte Ansatz sieht vor, die Holzqualitätsgrößen, und hier in erster Linie die Astentwicklung, so zu simulieren, dass sich die räumliche Konkurrenzsituation im Bestand entsprechend in der Aststruktur widerspiegelt. Die Astgrößen werden deshalb ebenfalls dreidimensional simuliert. Das entwickelte Astmodell AMOK simuliert die Position, die Dimension und den Status jedes einzelnen Astes im Bestand. Zur Beschreibung der Astposition werden Modelle für den Astwinkel sowie die vertikale und horizontale Lage des Astes entwickelt. Die Astdimension wird im Modell durch die Astlänge und den Astdurchmesser beschrieben. Der Aststatus zeigt an, ob ein Ast lebt oder tot ist, bzw. ob er nach dem Absterben bereits überwallt ist.

Die geforderte Reaktionsfähigkeit auf waldbauliche Eingriffe setzt eine genaue Beschreibung der Konkurrenz im Bestand voraus. Zu diesem Zweck wird das hemisphärische Konkurrenzmodell HEMIS entwickelt, das eine räumlich differenzierte Berechnung der Konkurrenz erlaubt. Die Astlänge wird über die Kronenform bestimmt, die wiederum direkt auf die Konkurrenz im Bestand reagiert. Dazu wird das ursprüngliche, rotationssymmetrische Kronenmodell des Waldwachstumssimulators SILVA durch ein horizontal und vertikal segmentiertes Modell ersetzt, das

eine flexible Reaktion gemäß der Konkurrenz ermöglicht. Die weiteren Astgrößen werden in Abhängigkeit vom Kronen- und Baumwachstum sowie der direkten Konkurrenz geschätzt. So ergeben sich realistische Astdimensionen, die auf Konkurrenzänderung reagieren. Für die Astlänge und den Astdurchmesser werden dynamische Modelle zur Fortschreibung entwickelt. In der Simulation wird nicht nur eine Prognose der Entwicklung in die Zukunft vorgesehen, sondern auch eine Rekonstruktion der Ast- und Baumentwicklung in die Vergangenheit. Dies ist zu einer dreidimensionalen Beschreibung der Holzqualität im Inneren des Stammes unablässig. Dadurch unterscheidet sich das vorgestellte Modell vom üblichen Simulationsziel der Waldwachstumsmodelle, die in der Regel keine Rekonstruktion vorsehen.

Das Rotfäulemodell RAM simuliert die Ausbreitung der Rotfäule im Stamm des Baumes nach dessen Infektion. Die Infektion selbst ist nicht Gegenstand dieses Modells. Die räumliche Simulation der Fäulehöhe, des Fäuledurchmessers und damit der Fäuleform wird in RAM ebenso nachgebildet wie der Zersetzungsgrad. Ein Ansatz für die Simulation der Auswirkungen der Fäule auf das Baumwachstum wird vorgestellt.

Die Datengrundlage für die Rotfäulemodellierung gründet auf Literaturwerten, während als Datenbasis zur Simulation der Astentwicklung mehrere tausend Äste von Fichten unterschiedlicher Standorte in Süddeutschland gemessen wurden. Die Messwerte decken ein weites Behandlungsspektrum vom Dichtstand bis zum Solitär ab.

Für das Sortiermodell wird ein genetischer Algorithmus eingesetzt, der nach der Rundholzsortierung und der Zuweisung von Preisen und Kosten die erlösoptimale Sortenstruktur für einen Stamm ermittelt. Dabei wird nach HKS und ENV 1927-1 sortiert. Die Kosten werden nach dem „Erweiterten Sorten Tarif“ (EST) berechnet.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das entwickelte Astmodell plausible Ergebnisse für die Simulation von konkurrenzfreien bis stark konkurrenzierten Situationen ermöglicht. Nur bei jungen Ästen unter hohem Konkurrenzdruck überschätzt das Modell die Astdurchmesser. Einseitige Konkurrenzsituationen, wie an Bestandesrändern, werden plausibel simuliert. AMOK ermöglicht durch die flexible Kronenformberechnung eine nach Himmelsrichtung getrennte Simulation der Kronenansatzhöhe, die für Bäume mit asymmetrischer Konkurrenz typisch ist. Die Rotfäulesimulation führt ebenfalls zu realistischen Ergebnisgrößen bei der Fäuleausdehnung im Stamm. Auswirkungen der Fäule auf das Baumwachstum werden nicht befriedigend nachgebildet. Hier besteht ein weiterer Forschungsbedarf.

Erste Ergebnisse der Ast- und Rotfäuleberechnung werden präsentiert. Die Anwendungsbereiche und die Schwächen der Modelle werden diskutiert, weitere Entwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Diese Zusammenführung von waldwachstumskundlichen und holzkundlichen Modellen in ein einziges Simulationssystem stellt einen neuen Ansatz dar, der neue Möglichkeiten in der Anwendung von Waldwachstumssimulatoren eröffnet. Die durchgehend dreidimensionale Beschreibung der Holzmerkmale als Ergebnis der Umgebungsstruktur des Baumes und seines Wachstums legt das Modell den Grundstein für eine Anknüpfung weiterer Simulationsmodelle, die eine Verarbeitung des Rundholzes nachbilden. Als Beispiele seien hier Säge- und Furniersimulatoren genannt. Durch den Aufbau einer solchen Modellkette analog zur Produktion, kann man dem Informationsbedarf der Holzindustrie gerecht werden. So leistet die präsentierte Integration der Holzqualität und der Holzsortierung in behandlungssensitive Waldwachstumssimulatoren einen Informationsbeitrag für Forstwirtschaft und Holzwirtschaft.

Abstract

The objective of this thesis is the integration of wood quality and grading models in a position dependent single-tree forest growth simulator. The integration has the potential to enhance the precision of monetary evaluation of existing and simulated forest stands because it enables the decision maker to take into account not only volume but also quality aspects. This meets the increasing demand of forestry and wood industry for detailed information on the timber resource.

The integration of wood quality models is exemplarily demonstrated for Norway spruce (*Picea abies* [L.] KARST. This tree species was chosen because it is the economically most important tree species in Middle Europe and shows a homogeneous geometrical crown architecture which supports quality modeling approaches based on crown morphology.

Two models for the simulation of wood properties were implemented: a model for the simulation of the extent of decay in the stem caused by *Heterobasidion annosum* [FR.] BREF. and a model for the prediction of branchiness and knottiness. Branchiness and absence of decay by red rot represent the most important round wood properties for spruce wood and explain 80 to 90 percent of round wood quality with regard to common German grading rules. Special attention was paid to the sensitivity of the wood properties models to silvicultural treatment. Therefore the spatially explicit simulation of competition between trees on resulting wood properties is a main aspect of this work.

The model framework for the new wood quality models is the position-dependending single-tree growth simulator SILVA (PRETZSCH 1992). This simulator was chosen as the integrational model platform because it is able to simulate various modes of silvicultural treatment and provides a position dependent modelling approach where every tree's specific position in the stand is considered.

The wood quality simulation process follows two basic steps. In the first step two growth models for branch and rot development are simulated. The result is a three-dimensional definition of the stem's wood properties. The second step is an evaluation of the roundwood properties according to common grading rules. This means a transformation of the biologically interpretable wood properties to a normative wood quality. The separation of 'biological simulation' and evaluation allows a flexible exchange of single modules whenever it is necessary.

The developed branch model 'AMOK' is able to provide the position, dimension and the status of each branch over the time. Models for the simulation of branch angle as well as the horizontal and vertical position of the branch at the stem were developed. Branch dimension is characterized by branch length and branch diameter. The status of a branch defines, whether it is alive or dead as well as if it is already naturally pruned and if the stub is occluded after its death.

The branch length is determined by the crown hull, which is a direct result of competition in the stand. The simulation of the tree crown's ability to react to silvicultural treatments demands an accurate description of the competition in the stand as a presupposition. Therefore a hemispheric competition model, named 'HEMIS' was developed. It allows a spatially explicit competition calculation based on stand structure. The original rotational symmetric crown model of the growth simulator SILVA is modified to a vertically and horizontally segmented model which allows an adaption of the crown shape in a plastic way according to spatial competition from different directions. The result is dynamic crown and branch model with a explicit sensitivity to competition. The simulation model AMOK is able to predict future growth of branches and also to reconstruct the past growth of tree and branches. This retrospective aspect of the model distinguishes it from other common forest growth simulators, which usually confine to the prospective prognosis aspect. Reconstruction is necessary for a three-dimensional description of wood properties inside the whole stem. The parameterization data for branch models was measured on different stands and sites all over southern Germany and consists of several thousand branches.

The stands cover a broad spectrum of silvicultural treatment reaching from dense untreated stands to solitary trees. Simulation results of the branching model AMOK show plausible results for a broad range of competition situations from solitary to very dense stands. Only for very young branches under high competition the branch diameter was underestimated. The simulation of one-sided competition, e.g. at the edge of a stand, shows plausible results as well. The flexible crown model of AMOK makes it possible to simulate crown recession separately for different compass directions, which is an important feature for situations with asymmetric geometrical competition.

The red-rot model 'RAM' simulates the extent of decay in the stem after its infection. The infection process from tree to tree is not covered in this model. The model contains modules for the simulation of height, diameter, form, and degree of decay. Furthermore, an approach for the simulation of the impact of red rot on tree growth is presented. The simulation of rot diameter and height is based on two steps: After infection the decay grows linearly with no interaction with tree growth. When reaching a certain extent, the decay's further extension is limited by the tree. This reflects the natural pathogen-tree-interaction and results in a decay form which is independent from tree growth in initial stages and increasingly influenced by stem form in advanced stages of rot. The red-rot model RAM is based on published data of other authors which were combined and statistically re-analyzed. It is based on minimal input data which makes an adjustment to specific stand situations possible. The red-rot model proves itself realistic to reveal the real decay extent in the simulation. Scenario simulation with a prediction of loss by decay is possible. The results of the impact of red-rot were not able to fulfill the expectations and show further need of research.

A genetic algorithm is used in the bucking model to find a price optimal bucking solution for the simulated stems. It is combined with a grading routine which applies common grading rules (HKS, ENV 1927-1) to defined logs and transforms the wood dimensions and properties into quality classes. Another submodule calculates the harvesting costs per log, following a common German cost calculation method for motor manual harvest (EST). Having prices and costs for every combination of logs of one stem, the genetic algorithm is used to optimize the bucking pattern on a single stem basis regarding the monetary proceeds.

Most existing model approaches dedicated to wood quality and growth simulation are based on serial coupling of separately developed models. The presented approach goes one step beyond that concept by fully integrating wood quality and forest growth models in one simulation system. This approach admits a higher degree of interaction between the models.

It opens new application fields for growth simulators. The consistent spatially explicit description of wood properties resulting from the tree's three-dimensional competition is the basis for a coupling of further models which are able to simulate following processing steps like sawing and veneering.

The coupling of many models to a model chain enables the simulation of the value added chain of wood. This satisfies the demand for information of the wood processing industry and helps to create an informational feed-back to forestry. In this way the integration of wood quality to forest growth simulators contributes to the informational demands of forestry and wood industry.

1 Einleitung – Introduction

1.1 Gründe für eine Integration von Holzqualität in Waldwachstumssimulatoren

Reasons for the integration of wood quality in forest growth simulators

Die vorliegende Arbeit soll Wege zur Einbindung der Rundholzqualität und einer qualitätsorientierten Rundholzsartierung in Waldwachstumssimulatoren aufzeigen und damit eine Informationslücke schließen, die hinsichtlich der produzierten und erreichbaren Qualität von Rundholz und ihrer Abhängigkeit vom Baum- und Bestandeswachstum besteht.

Das Rundholz als Produkt und Rohstoff schafft die Verbindung zwischen Forstwirtschaft und der holzbearbeitenden und holzverarbeitenden Industrie. Es beeinflusst sowohl Produzenten als auch Rohstoffabnehmer, denn auf beiden Seiten müssen Managemententscheidungen auf der Basis von Quantität und Qualität des Rundholzes getroffen werden. Deshalb besteht sowohl im forstwissenschaftlichen als auch im holzwirtschaftlichen Sektor ein Informationsbedarf über die Holzqualität.

Informationsbedarf der Forstwirtschaft

In der Forstwirtschaft wird die Quantität des produzierten Rundholzes mit modernen Informationssystemen, wie sie forstliche Wachstumsmodelle, Betriebs- und Holzmarktmodelle darstellen, gut abgebildet. Damit kann bereits eine deutliche Verbesserung der Informationsgrundlage für Managemententscheidungen und eine Flexibilisierung der Planung gegenüber herkömmlichen Planungsmethoden erreicht werden.

Im Gegensatz dazu bereitet die Berücksichtigung der Qualität des produzierten Rundholzes in forstlichen Informationssystemen immer noch Probleme, weshalb ihr meist nicht Rechnung getragen wird. Stattdessen werden bei monetären Berechnungen durchschnittliche Qualitäten herangezogen und damit die Holzqualität als wichtiger Informationsfaktor vernachlässigt.

Ein Grund für diese Vernachlässigung ist der Mangel an Kenntnissen über den Einfluss von Behandlung, Standort und Genotyp auf die Holzqualität (Abb. 1-1). Es gibt zwar eine Vielzahl an holzkundlichen, ertragskundlichen oder waldbaulichen Arbeiten zu Ausschnitten des in Abbildung 1-1 dargestellten Faktorenkomplexes, quantifizierte Ursache-Wirkungs-Beziehungen, die beispielsweise eine definierte Behandlung einer bestimmten erreichten Holzqualität gegenüberstellen, sind jedoch eher die Ausnahme. Die Aufklärung der zugrundeliegenden Zusammenhänge wird dabei durch deren Komplexität erschwert.

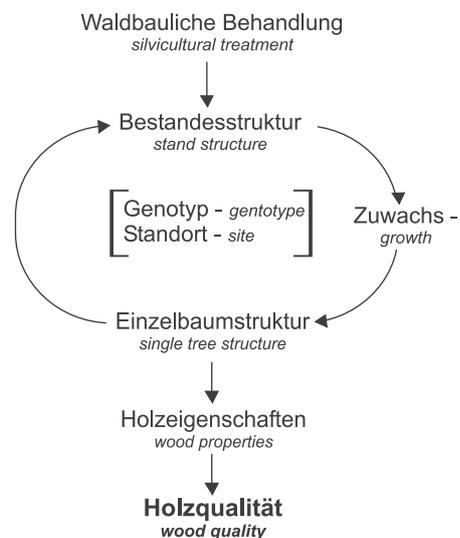


Abbildung 1-1: Holzqualität als Ergebnis des Regelkreises aus Waldwachstum und Einzelbaum- bzw. Bestandesstrukturen, welcher gezielt durch waldbauliche Behandlung gesteuert werden kann. *Wood quality as a result of the feedback cycle between growth and single tree and stand structure which can be controlled by silvicultural treatment.*

Ein weiterer Hinderungsgrund für eine Einbindung in forstliche Informationssysteme ist die Tatsache, dass es schwierig ist, eine allgemein gültige Definition für „Holzqualität“ zu finden. Den Rundholzanbietern steht eine heterogene Abnehmerschaft gegenüber, die verwendungsorientiert unterschiedliche Qualitätsvorstellungen von ihrem Rohstoff hat. Dies spiegelt sich auch in den verschiedenen Normen wider, welche sich nicht selten in den berücksichtigten Qualitätskriterien und definierten Grenzwerten deutlich voneinander unterscheiden. Das Resultat ist eine unterschiedliche Bewertung von Holz mit objektiv gleichen Eigenschaften, je nach Verwendungsbereich und Norm.

Informationsbedarf der Holzwirtschaft

In der holzbearbeitenden und -verarbeitenden Industrie besteht ein Interesse an gesicherten Informationen über die Verfügbarkeit definierter Holzqualitäten, da sie auf eine bedarfsgerechte Rohstoffversorgung in benötigter Qualität angewiesen ist. Die Qualitätsbestimmung von Rundholz ist allerdings mit einigen Unsicherheitsfaktoren behaftet. Da empirische Untersuchungen zur Holzqualität eines jeden Stammes in der Praxis zu aufwändig und kostenintensiv sind, müssen vor der Verarbeitung Schlüsse aus dem äußeren Erscheinungsbild eines Stammes auf dessen innere Eigenschaften gezogen werden. Diese sind um so präziser, je mehr Hintergrundinformationen über Behandlung, Standort und Genetik vorliegen. Bei steigender Aussagekraft der Qualitätsansprachen erhöht sich in der Ver- und Bearbeitung von Rundholz die Ausbeute, da die Allokation der Rundholzsortimente und die Optimierung der Verarbeitungsschritte stärker qualitätsgesteuert erfolgen können.

Ansatz zur Problemlösung

Um die Holzqualität als wichtige Informationsgrundlage für die Planung in der Forstwirtschaft und der holzbearbeitenden und -verarbeitenden Industrie zu erschließen, bietet sich die Einbindung von Holzqualitätsmodellen in Waldwachstumssimulatoren an. Dadurch erweitert sich die Informationsbasis für Entscheidungen zur forstlichen Produktion von einer rein volumenorientierten zu einer zusätzlich qualitätsdifferenzierten Betrachtung. Ein wichtiger Punkt hierbei ist die Klärung grundlegender Zusammenhänge. So werden über eine solche Integration Holzeigenschaften als Resultat von Wachstumsprozessen modellierbar, da forstliche Wuchssimulatoren bereits in der Lage sind, die Beziehungen zwischen Standort, Struktur und Wachstum nachzubilden. Ein behandlungssensitiver Ansatz, wie er hier vorgestellt wird, kann dazu beitragen, das Wissen über die Beeinflussbarkeit der Holzqualität durch waldbauliche Maßnahmen auszubauen (siehe Abb. 1-1). So kann die Bestandessteuerung mit einem derartigen Informationssystem im Hintergrund zielgerichteter erfolgen. Über Szenarioanalysen können Behandlungsprogramme hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Holzqualität überprüft werden; Planungsalternativen werden auf diese Weise vergleichbar.

Zudem ist in der betrieblichen Planung die Kenntnis der Qualität der Holzressourcen grundlegend für eine monetäre Bewertung der forstlichen Produktionsergebnisse und kann sowohl in der qualitativen Beurteilung der vorhandenen Holzressourcen als auch bei der Abschätzung zukünftig zu erwartender Veränderungen der Holzqualität die Einsatzmöglichkeiten von Waldwachstumssimulatoren deutlich erweitern. Dies schließt auch eine verstärkt absatzorientierte Durchführung der Ernte- und Pflegemaßnahmen mit ein, so dass Käufer mit definierten Qualitäten bedient werden können.

Der Vorteil der Holzindustrie an einem forstlichen Informationssystem, das die Holzqualität berücksichtigt, liegt in einer detaillierteren Information über den angebotenen Rohstoff. Dadurch lässt sich eine verbesserte Rohstoffallokation erwarten, da sich die Holzkäufer gezielter mit den benötigten Sortimenten versorgen können und geringere Kosten durch Nachsortierung und Fehlallokation anfallen.

Über die Verwirklichung eines dreidimensionalen Modellansatzes, in den alle wichtigen Holzqualitätsgrößen integrierbar sind, wird auch eine Anbindung an weitere holzkundliche Modelle geschaffen. Damit lässt sich die Modellkette „Holz“ um ein wichtiges Glied erweitern, das die Lücke zwischen volumenorientierten Wachstumssimulatoren und weiterführenden Modellen zur Ermittlung der Schnittholz-, Furnier- oder Papierqualität schließt, indem es diesen nachgeschalteten Modellen verlässliche quantitative Informationen zur Rundholzqualität bereitstellt. In jenen nachgeschalteten Modellen können dann beispielsweise verfahrenstechnische Fragestellungen von Verarbeitungsschritten kostengünstig am Computer geprüft werden oder es lässt sich auch das Potenzial von Optimierungsschritten im Verarbeitungsprozess per Simulation evaluieren. Deshalb kann eine dreidimensionale Simulation der Rundholzqualität in einem Waldwachstumssimulator auch eine Wissensbrücke zwischen Forst- und Holzwirtschaft bilden, mit deren Hilfe Abhängigkeiten der beiden Bereiche im Hinblick auf die Rundholzqualität geklärt werden können.

Die hier im forstlichen und weiterverarbeitenden Sektor aufgezeigten, bisher größtenteils ungenutzten, zusätzlichen Wertschöpfungsmöglichkeiten durch Informationen über die Holzqualität setzen die Integration von Holzqualitätsaspekten in Waldwachstumssimulatoren voraus und können ein entscheidender Wettbewerbsvorteil für Rohstoffanbieter und -verbraucher sein.

1.2 Beitrag der Arbeit zur Integration der Holzqualität in Waldwachstumssimulatoren

Contribution of this thesis to the integration of wood quality into forest growth simulators

Das Ziel dieser Arbeit ist die Integration wichtiger Modelle zur Simulation von Holzeigenschaften in einen einzelbaumorientierten Waldwachstumssimulator. Dabei sollen charakteristische Variablen zur Beschreibung der Holzqualität bei der Baumart Fichte (*Picea abies* (L.) KARST.) identifiziert und modelliert werden.

Die Fichte wurde als Baumart ausgewählt, weil sie aufgrund ihres Anteils an der Waldfläche die wichtigste Baumart in Mitteleuropa darstellt. Sie zählt daher zu den am besten waldwachstumskundlich und holzkundlich beschriebenen Baumarten und bietet sich durch den vorhandenen Datenfundus und ihren relativ leicht beschreibbaren Kronenaufbau für eine Modellierung der Holzqualität an.

Im Mittelpunkt der Arbeit steht die Entwicklung einer geeigneten Methodik zur dreidimensionalen Nachbildung der Holzeigenschaften eines jeden Bestandesbaumes über der Zeit und in Abhängigkeit von der Bestandesbehandlung. Zur Beschreibung und quantitativen Nachbildung der Zusammenhänge werden Methoden der statistischen Modellbildung eingesetzt, mit deren Hilfe vorhandenes Wissen über die Einflussfaktoren auf das Wachstum und die Holzeigenschaften von Fichten mit den Ergebnissen eigener empirischer Aufnahmen vernetzt werden kann. Eigene Aufnahmen ergänzen hier das bisherige Wissen vor allem hinsichtlich der Reaktion des Ast- und Kronenwachstums der Fichte auf unterschiedliche Konkurrenzsituationen im Bestand. Die Erarbeitung eines qualitätsorientierten Sortiermodells für Fichtenrundholz zur preislichen Bewertung der Holzeigenschaften nach gebräuchlichen Rundholznormen stellt einen weiteren Aspekt der Arbeit dar. Um die erstellten statistischen Modelle in der Praxis nutzbar zu machen, werden alle Modellteile in Computerprogramme überführt und in einen existierenden Waldwachstumssimulator eingebaut.

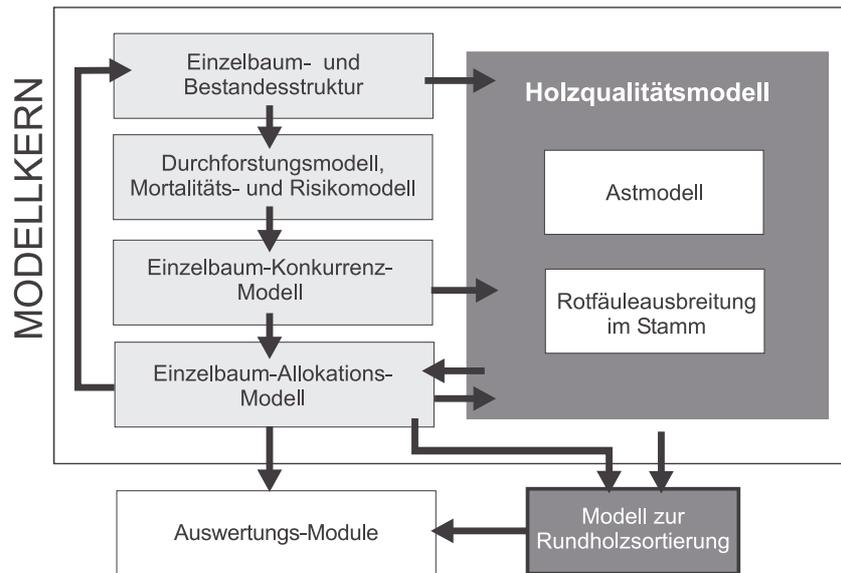


Abbildung 1-2: Integrationschema der Holzqualität in einen distanzabhängigen, einzelbaumorientierten Wachstumssimulator. *Integration concept of wood quality into a position dependent single tree simulator.*

Abbildung 1-2 zeigt schematisch die Integration des Astmodells und des Modells zur Rotfäuleausbreitung im Einzelbaum in einen positionsabhängigen, einzelbaumorientierten Waldwachstumssimulator. Diese beiden neu entwickelten, dunkelgrau hinterlegten Module ergänzen die bereits etablierten waldwachstumskundlichen Modellteile des Simulators (hellgrau), welche auch dessen eigentlichen Modellkern bilden. In diesem Modellkern wird der Waldbestand als dreidimensionale Struktur nachgebildet. Die Position und Dimension jedes einzelnen Baumes im Bestand ist dabei bekannt. Im nächsten Modellteil wird das natürliche oder durchforstungsbedingte Ausscheiden von Einzelbäumen berechnet, das die Bestandesstruktur modifiziert und zu einer Konkurrenzänderung für jeden Einzelbaum führt, deren Quantifizierung im dritten Schritt erfolgt. Daraus ergibt sich – unter Berücksichtigung des Standorts – ein Zuwachs, der im Einzelbaum-Allokationsmodell jedem Baum zugewiesen wird. Die aus dem Wachstum der Einzelbäume und der Mortalität resultierenden Veränderungen der Bestandesstruktur bilden wiederum die Initialisierungsgröße für die nächste Rechenperiode.

Bereits etablierte kybernetische Rückkopplungsprinzipien des Simulationssystems, die in der Prognose des Holzvolumens erfolgreich Verwendung finden, werden auch bei den neuen Modellteilen fortgeführt. Das Astmodell und das Rotfäuleausbreitungsmodell erweitern und ergänzen dabei die etablierten Modellteile des Waldwachstumssimulators und interagieren mit ihnen.

Ein weiterer wichtiger Schritt außerhalb des eigentlichen Modellkerns ist die Ergänzung der Ausgabefunktion des Waldwachstumssimulators um eine Sortierung nach Kriterien der Rundholzqualität (dunkelgrau), welche die bisherige rein volumenorientierte Sortierung ersetzt und den Auswertungsmodulen die benötigten Informationen zur Holzqualität zur Verfügung stellt.

Mit diesem Gesamtmodell aus Waldwachstumssimulator und Holzqualitätsmodell wird die Simulation der Rundholzqualität von Fichten hinsichtlich der zwei wichtigsten qualitätsbestimmenden Holzmerkmale „Astigkeit“ und „Gesundheit“ möglich. Damit soll ein Beitrag zur lückenlosen Nachbildung der Wertschöpfungskette „Holz“ in einer analogen Modellkette geleistet werden, die von der forstlichen Produktion bis zum fertigen Produkt alle bedeutsamen Einflussgrößen berücksichtigt. Diese Modellkette muss ein langfristiges gemeinsames Ziel der

Forstwirtschaft und der Holz- und Papierindustrie sein, um die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Gliedern der Wertschöpfungskette verstehen und berücksichtigen zu können (LEBAN et al. 1999, LEMM und ERNI 1998, WILHELMSSON et al. 1999).

1.3 Aufbau der Arbeit – *Structure of this thesis*

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in acht Kapitel. Im folgenden zweiten Kapitel wird ein Überblick über den Stand des Wissens im Bereich der Modellierung von Holzqualität gegeben und versucht, die publizierten Modellansätze zu strukturieren sowie gegenüber ähnlichen Modellfamilien abzugrenzen. Ein Schwerpunkt liegt hierbei im Vergleich und in der Synthese von Wachstumsmodellen und Holzmodellen.

Im dritten Kapitel werden in einer Analyse von gängigen Normen die wichtigsten Qualitätskriterien für Fichtenrundholz herausgearbeitet und die Auswahl der im Modell benutzten Größen begründet. Nach einer Schilderung des zur Verfügung stehenden Modellrahmens wird das Konzept für die Integration des Qualitätsmodells erläutert. Die Kapitel vier bzw. fünf haben als Kernteil der Arbeit eine eingehende methodische Modellbeschreibung des Astmodells bzw. des Rotfäulemodells zum Inhalt, wobei auch die verwendete Datenbasis und die zugrundeliegenden biologisch-statistischen Zusammenhänge vorgestellt werden. Die Erstellung eines qualitätssensitiven Sortiermodells zur Bewertung von Rundholz in einem Wuchssimulator wird im sechsten Kapitel behandelt. Im siebten Kapitel folgen die Simulationsergebnisse aller Teilmodelle einzeln und im Zusammenspiel. Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt anschließend in Kapitel acht. Dabei wird schließlich ein Ausblick auf das zukünftige Entwicklungspotenzial integrierter Modelle mit waldwachstumskundlichen und holzqualitativen Komponenten gegeben und versucht, den weiteren Forschungsbedarf darzustellen.

2 Stand des Wissens – *Overview on existing model approaches*

Der Schwerpunkt des folgenden Kapitels liegt in der Beschreibung gängiger holzkundlicher Modellansätze, für die auch der Versuch einer strukturierten Gliederung in verschiedene Gruppen unternommen wird. Für die waldwachstumskundlichen Modelle liegen solche Gliederungsansätze bereits vor (PRETZSCH 2001, ROBINSON und EK 2000), weshalb diesem Teil in diesem Kapitel nur ein relativ kurzer Abschnitt gewidmet ist.

Es wird vor allem auf die zielbedingt unterschiedlichen Herangehensweisen der waldwachstumskundlichen und holzkundlichen Modelle abgehoben und der Stand des Wissens hinsichtlich einer Modellkopplung zwischen den zwei Modellfamilien mit den auftretenden Problemen skizziert.

Einleitend erfolgen einige Begriffsdefinitionen aus dem Themenfeld der Modellierung, die in dieser Arbeit einheitlich Verwendung finden.

2.1 Begriffsdefinitionen – *Definitions*

Modell

Modelle sollen hier allgemein als Abstraktionen von real existierenden oder vorstellbaren Strukturen und Prozessen verstanden werden.

Die Definition nach VDI-Richtlinie 3633 (1996) lautet: „Ein Modell ist eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder real existierenden Originalsystems und -prozesses in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild.“

Analog wird in der forstlichen Modellbildung nach PRETZSCH (2001) unter „Modell“ meist ein Systemmodell verstanden, also eine mathematisch bzw. statistisch formulierte Beschreibung von realen Zusammenhängen, die als vereinfachte quantitative Nachbildung eines Systems wichtige Informationen zum Systemaufbau und Systemverhalten liefert.

Modellintegration

Vereinigt ein Modell mehrere Teilmodelle in sich, soll in der vorliegenden Arbeit von Modellintegration gesprochen werden. Bei einer horizontalen Modellintegration stehen dabei mehrere unabhängige Teilmodelle gleichberechtigt nebeneinander, während eine vertikale Modellintegration nacheinander geschaltete Teilmodelle beinhaltet, die voneinander abhängen. Ein Beispiel für eine horizontale Modellintegration wäre eine gleichzeitige Berechnung von unabhängigen Holzqualitätsmerkmalen (z.B. Harzgallen und Fäule) in einem Gesamtmodell. Eine horizontale Modellintegration liegt auch dann vor, wenn ein Modell beispielsweise die Konkurrenz für Einzelbäume berechnet und ein weiteres aus diesen Werten die Mortalität ableitet.

Dynamisches Modell

Dynamische Modelle bilden Systeme nach, in denen zeitabhängige Prozesse ablaufen und eine Abhängigkeit zwischen zeitlich aufeinander folgenden Ereignissen besteht (PRETZSCH 2001). Das Gegenteil sind statische Modelle.

Hierarchisches Modell

ROBINSON und EK (2000) betrachten jedes Modell, das aus Teilmodellen besteht als hierarchisch, sobald die Ausgabewerte eines Teilmodells als Eingabewerte für ein weiteres dienen. Dieser Sachverhalt soll im Weiteren als *vertikale Modellintegration* (s. o.) bezeichnet werden. Als „hierarchisch“ sollen hier Modelle definiert werden, die in ihrem Grundgedanken dem von GRACE et al. (1997) und ULRICH (1999) benutzten Systemhierarchie-Begriff folgen. Ein hierarchisches Modell ist demnach gekennzeichnet durch die übergreifende Nachbildung unterschiedlicher, räumlicher oder zeitlicher Skalenebenen, bei denen Rückkopplungsmechanismen zwischen unterschiedlichen Hierarchieebenen wirken.

Simulation

Unter Simulation versteht man „die modellhafte Darstellung oder Nachbildung eines vorhandenen oder zu entwickelnden kybernetischen Systems, insbesondere auch seines Zeitverhaltens.“ (BROCKHAUS-ENZYKLOPÄDIE 1993). Die VDI-Richtlinie 3633 (1996) definiert Simulation folgendermaßen: „Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen (dynamischen) Prozessen in ein experimentierfähiges Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“

Nach PRETZSCH (2001) entsteht durch die Überführung eines Systemmodells in mathematische Grundgleichungen und in einen ausführbaren Computercode ein formales quantitatives Simulationsmodell. In dieser Arbeit soll der Ausdruck „Simulation“ in Anlehnung an PRETZSCH (2001) als Nachbildung eines Systemverhaltens mit Rechenanlagen gebraucht werden.

2.2 Waldwachstumsmodelle – *Forest growth models*

Ein gemeinsames Charakteristikum von forstlichen Wuchsmodellen ist nach ROBINSON und EK (2000) eine prospektive Herangehensweise. Es wird dabei versucht, Aussagen über die zukünftige Waldentwicklung zu treffen. Ein weiterer Aspekt neben der Prognose liegt in der kausalen Systemanalyse von Waldökosystemen.

Mit den Ertragstafeln werden in der forstlichen Praxis schon seit vielen Jahren Modelle in Tabellenform eingesetzt, die unter den vorgegebenen Bedingungen die Nachhaltigkeitsplanung der Forstwirtschaft unterstützen und als Hauptinformationsquelle für naturale und wirtschaftliche Kalkulationen dienen. Seit die ersten Computer verfügbar sind, werden Simulationsmodelle erstellt, um die Planung der forstlichen Produktion zu unterstützen. Über Szenariorechnungen und Prognoseläufe zur zukünftigen Bestandesentwicklung erlauben Waldwachstumssimulatoren weitreichendere Aussagen über den Einfluss von Bestandesbehandlung, Standort und weiteren Faktoren auf das Baumwachstum. Sie sind den Ertragstafeln vor allem dadurch überlegen, dass sie nahezu beliebige Behandlungsvarianten, Bestandesstrukturen und Standortsituationen nachzubilden vermögen. Dies macht sie zu flexiblen Planungswerkzeugen. Die meisten Wachstumssimulatoren beschränken sich dabei jedoch auf die Nachbildung der Volumenleistung von Waldbeständen und Einzelbäumen und lassen die Holzqualität außer Acht.

Eine ausführliche Darstellung der historischen Entwicklung und der unterschiedlichen Modellsätze für forstliche Wuchsmodelle findet sich in PRETZSCH (1992, 2001), ein weiterer systematischer Klassifizierungsansatz in ROBINSON und EK (2000). PRETZSCH schlägt eine Einteilung nach der räumlichen Informationseinheit, der modellierten Altersstruktur, der nachgebildeten Baumartenzusammensetzung und der Verwendung von Abstandsmaßen vor.

Die räumlichen Informationseinheiten sind der Bestand, die Kleinfläche, der Einzelbaum oder Baumkompartimente. Die modellierte Alterstruktur lässt ungleichaltrige, strukturierte Bestände zu oder beschränkt sich auf gleichaltrige. Bei der Baumartenzusammensetzung als Gliederungskriterium können Reinbestandssimulatoren von solchen unterschieden werden, die in der Lage sind, gemischte Bestände nachzubilden. Die Verwendung von Abstandsmaßen trennt schließlich positionsabhängige von positionsunabhängigen Modellansätzen.

Moderne Waldwachstumssimulatoren folgen häufig dem Einzelbaumkonzept (MITCHELL 1969, ARNEY 1972, HASENAUER 1994, NAGEL 1994, 1999, DHÔTE 1999) und bilden flexibel gleichaltrige wie ungleichaltrige Einzelbäume in Rein- und Mischbeständen nach (EK und MONSERUD 1974, PRETZSCH 1992, BIBER 1996). Positionsabhängige Simulationsmodelle (MITCHELL 1969, EK und MONSERUD 1974, PRETZSCH 1992, HASENAUER 1994, BIBER 1996) nutzen dabei die Anordnung der Bäume im Bestand, was den Aussagebereich gerade für räumliche Strukturen wie Pflanzverbände, Durchforstungen und natürlichen Bestandesstörungen deutlich erhöht. Positionsabhängige Simulatoren haben allerdings den Nachteil, dass umfangreichere Datensätze mit räumlichen Informationen zur Parametrisierung und als Eingangsdaten für die Simulationsrechnungen benötigt werden.

Zusätzlich spielt für die Einordnung verschiedener Wachstumsmodelle auch der zeitliche Umfang und die zeitliche Auflösung der simulierten Bestandesentwicklung eine Rolle. Die Zeitskala kann von Sekunden bis zu mehreren Umtriebszeiten reichen und ist ebenso wie die räumliche Auflösung vom Modellzweck und dem Aussageziel abhängig. Auf physiologischen Prozessen basierende Modelle benötigen beispielsweise eine hohe zeitliche Auflösung zur Nachbildung der Stoffflüsse (BOSSEL 1994, LE DIZÉS et al. 1997, GROTE 1998). Meist wird aus rechen- und modelltechnischen Gründen auf einen weiten zeitlichen Umfang der Simulation verzichtet. Übliche Zeiträume bewegen sich in Jahren bis Jahrzehnten.

In Sukzessionsmodellen (SHUGART 1984, BUGMANN et al. 1996) hingegen werden bei geringer zeitlicher Auflösung sehr lange Zeiträume betrachtet. Zeitliche Prognosen, die eine Umtriebszeit überschreiten, machen die Nachbildung von Verjüngung nötig (EK und MONSERUD 1974, STERBA et al. 1997). Die Anwendung von Waldwachstumsmodellen zum „upscaling“ weitet die Aussagedimension von der Bestandesentwicklung auf Forstbetriebsniveau oder die regionale Ebene aus und erlaubt den praktischen Einsatz als übergreifendes Planungsinstrument sowie die Unterstützung betrieblicher Entscheidungen (DURSKÝ 2000). Durch die Abbildung der Waldentwicklung ganzer Regionen sind regionale Aussagen beispielsweise zur erwarteten anfallenden Holzmenge, zum Erholungswert oder zur Entwicklung der Biodiversität möglich, die wiederum zur Entscheidungsfindung und großräumigen Planung herangezogen werden können.

2.3 Holzkundliche Modelle – *Wood quality models*

Die Ziele der holzkundlichen Modellierung sind sehr vielseitig und die Ansätze dementsprechend unterschiedlich. Eine stringente Einordnung der Modelle ist aus diesem Grunde schwierig. Eine ausschließliche Gliederung nach den Zielgrößen (Rohdichte, Astigkeit, Faserlänge, Elastizitätsmodul, etc.) erscheint einerseits aufgrund der hohen Anzahl modellierter Größen unpraktikabel und andererseits wenig trennscharf, da viele Modelle mehrere Größen nachbilden. Eine reine Gliederung nach der methodischen Modellkonstruktion (Neuronale Netze, Fuzzy-Ansätze, Regressionsmodelle, Varianzkomponentenmodelle etc.), wie sie sich beispielsweise für einen Abriss der historischen Modellentwicklung anbietet, führt durch die Vielzahl der existierenden Modelle und verwendeten Ansätze ebenfalls zu einer unpraktikabel hohen Anzahl von Modellkategorien und sagt über den Modellzweck selbst nichts aus.

In dieser Arbeit wird deswegen eine Gliederung der holzkundlichen Modelle nach dem Modellzweck vorgeschlagen. Wie in Tabelle 2-1 dargestellt, werden strukturbeschreibende und prozessbeschreibende Modelle unterschieden. Erstere bilden die strukturelle Gestalt von Holz- oder Holzprodukten als Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt ab, die zweite Modellkategorie beschreibt die zeitabhängige Zustandsänderungen dieser Gestalt.

Tabelle 2-1: Gliederungsschema für holzkundliche Modelle nach dem Modellzweck – *classification of wood models according to their purpose*

	Struktur – <i>structure</i>	Prozess – <i>process</i>
Beschreibung <i>description</i>	<p>Modelle zur Strukturbeschreibung bilden die Gestalt bzw. den Zustand des Holzes oder von Holzprodukten zu bestimmten Zeitpunkten nach <i>models for structural description simulate shape or status of wood or its products for a certain point in time</i></p> <p>Z(t)</p>	<p>Modelle zur Prozessbeschreibung bilden zeitabhängige Zustandsänderungen des Holzes oder von Holzprodukten nach <i>models for process description simulate time dependent changes of the status of wood or its products</i></p> <p>Z(t) → Z(t+1)</p>
Bewertung <i>assessment</i>	<p>Modelle zur Strukturbewertung (Sortiermodelle) bewerten Zustände und transformieren dabei von einer objektiv messbaren in eine normative Skala <i>models for structural assessment (grading models) evaluate a status and transform from a measurable into a normative description</i></p> <p>Z(t) = Qualitätsklasse A, B, C (<i>grading classes A, B, C</i>)</p>	

Die holzkundlichen Modelle zur Strukturbeschreibung lassen sich weiter in zwei verschiedene Unterkategorien differenzieren, die sich hinsichtlich des Aussageziels grundlegend voneinander unterscheiden (Tabelle 2-2). Die erste Kategorie setzt sich aus beschreibenden Modellen zusammen, welche die Strukturen des Holzes bzw. weiterführender Produkte anhand objektiv messbarer Kriterien beschreiben und diese messbaren Holzeigenschaften nachbilden. Die zweite Kategorie sind bewertende Modelle wie Sortiermodelle, die Strukturen nach definierten Normen bewerten. Dabei wird der Schritt von metrischen Größen zu normativen Güte- oder Qualitätsklassen vollzogen, was eine zweckgerichtete Bewertung von Holzeigenschaften ermöglicht. Eine Unterscheidung beschreibender und bewertender holzkundlicher Prozessmodelle wäre zwar denkbar, aber in der Praxis werden fast ausschließlich beschreibende Ansätze zur Prozessmodellierung verwendet, da die Zielgröße in der Regel der Bewertungsgegenstand ist und weniger der Prozess an sich. Die Zielgröße wird deshalb effizienter über ein Strukturmodell bewertet. Die vorgeschlagene Gliederung der holzkundlichen Modelle erlaubt eine Strukturierung aller Teile der Modellkette vom Rundholz bis zum bearbeitetem Produkt inklusive einer abschließenden Produktbewertung. Weitere benutzte Parameter zur Charakterisierung von holzkundlichen Modellen sind in Tabelle 2-2 aufgeführt. Mithilfe dieser Parameter ist eine genauere Einordnung der Modelle nach der räumlichen Auflösung oder dem Bearbeitungsgrad der modellierten Zielgröße bzw. nach der zeitlichen Prozessauflösung und der Prozessursache möglich.

Tabelle 2-2: Zusätzlich geeignete Beschreibungsgrößen zur genaueren Charakterisierung von holzkundlichen Modellen. *Additional criteria for a further description of wood models*

Modellzweck <i>model purpose</i>	Räumliche Auflösung der Zielgröße <i>spatial resolution</i>	Technologischer Bearbeitungsgrad der Zielgröße <i>degree of technological processing</i>	Zeitliche Auflösung des Prozesses <i>temporal resolution</i>	Prozessursache <i>causal agent</i>
Strukturbeschreibung <i>structural description</i>	Ultrastruktur – <i>ultra structure</i> Mikrostruktur – <i>micro structure</i> Makrostruktur – <i>macro structure</i>	Rundholz – <i>round wood</i> Halbwaren – <i>semi-finished products</i> Produkte – <i>products</i>		
Strukturbewertung <i>structure assessment</i>	Mikrostruktur – <i>micro structure</i> Makrostruktur – <i>macro structure</i>	Rundholz – <i>round wood</i> Halbwaren – <i>semi-finished products</i> Produkte – <i>products</i>		
Prozessbeschreibung <i>process description</i>	Ultrastruktur – <i>ultra structure</i> Mikrostruktur – <i>micro structure</i> Makrostruktur – <i>macro structure</i>	Rundholz – <i>round wood</i> Halbwaren – <i>semi-finished products</i> Produkte – <i>products</i>	Sekunden – <i>seconds</i> Stunden – <i>hours</i> Tage – <i>days</i> Jahre – <i>years</i> Jahrzehnte – <i>decades</i>	anthropogen – <i>anthropogenic</i> umweltbedingt – <i>environmental</i>

2.3.1 Modelle zur Strukturbeschreibung – *Models describing structures*

Modelle zur Strukturbeschreibung bilden Strukturen des Holzes oder weiterverarbeiteter Halbwaren und Produkte in Abhängigkeit von unterschiedlichen Einflussfaktoren nach. Bei einigen Modellen wird dabei von äußerlich messbaren Baum- bzw. Rundholzparametern auf die innere Holzeigenschaften geschlossen, um beispielsweise eine möglichst exakte Vorsortierung beim Rundholzkauf und der Rundholzallokation im Holzbetrieb zu erreichen (SAMSON 1993, GUILLEY und NEPVEU 1999). Auch die Qualitätsbewertung stehenden Holzes in Inventurverfahren kann über solche Modellansätze abgedeckt werden (NEPVEU 1994, LEBAN et al. 1999). Dies spielt besonders in Ländern eine Rolle, in denen das Holz auf dem Stock verkauft wird oder Einschlagskonzessionen vergeben werden, ist aber auch generell für die Bilanzierung der vorhandenen Ressourcen von großem Interesse (LEBAN und JAEGER 1999). In der Bilanzierung vorhandener Holzressourcen überschneiden sich die Zielsetzungen holzkundlicher mit denen waldwachstumskundlicher Modelle. Beide unterscheiden sich jedoch in einigen Punkten deutlich von einander. Während forstliche Waldwachstumsmodelle Aussagen vor allem in die Zukunft orientiert treffen, beschreiben holzkundliche Strukturmodelle Strukturzustände zu einem definierten Zeitpunkt (siehe Tabelle 2-1). Hierbei ist bei holzkundlichen Strukturmodellen eher eine retrospektive Betrachtungsweise üblich, welche den Schluss von Merkmalen am Stammäußeren auf innere, in der Vergangenheit gebildete, Holzmerkmale sucht. Eine zeitliche Wuchsdynamik wird deshalb nur manchmal rekonstruiert, um den Ist-Zustand treffender zu charakterisieren.

Für eine genauere Definition holzkundlicher Modelle zur Strukturbeschreibung bieten sich vor allem die räumliche Auflösung und der technische Bearbeitungsgrad als Beschreibungskriterien an (Tabelle 2-2). Dabei ist zu beachten, dass viele Modelle nur durch beide Aspekte treffend zu charakterisieren sind.

Gliederung von Modellen zur Strukturbeschreibung nach der räumlichen Auflösung der Zielgröße

Dieser Gliederungsaspekt richtet sich nach der modellierten räumlichen Auflösung der biologischen Holzstruktur. Nach DAHLBLOM et al. (1999) lassen sich Modelle zur Nachbildung der Ultra-, Mikro- und Makrostruktur des Holzes unterscheiden.

Ultrastrukturmodelle modellieren Strukturen auf dem Niveau von Gewebestrukturen oder mit noch höherer Auflösung. So stellen zum Beispiel CHANTRE und BOUVET (1999) aus Röntgen-Dichteprofilen gewonnene Modelle vor, die für die Zellstoffproduktion relevante Fasereigenschaften von *Pinus pinaster* AIT. nachbilden. COWN et al. (1999) modellieren über multiple Regressionsmodelle für *Pinus radiata* [D.] DON. den Mikrofibrillenwinkel und dessen Einfluss auf den E-Modul. Auch CASTÉRA (1999) modelliert den Mikrofibrillenwinkel und zeigt für unterschiedliche Baumarten auf der Ultrastrukturebene Zusammenhänge zwischen Mikrofibrillenwinkel und Zugfestigkeit von Holzfasern auf. GRIL et al. (1999) versuchen über mechanische Berechnungen auf Zellwandniveau Rückschlüsse auf innere Spannungen im Holz durch Wachstum und Trocknung zu ziehen.

Mikrostrukturmodelle nutzen als Bezugsskala den Jahrring und bilden Zielgrößen wie Spätholzanteil (BERGÉS 1999, WILHELMSSON et al. 1999, LAROCQUE und MARSHALL 1995) oder Rohdichte nach (OLESEN 1976, DEBELL et al. 1994, GUILLY et al. 1999, HERVÉ 1999).

Bei Makrostrukturmodellen werden größere Holzbereiche erfasst. Die betrachtete Einheit ist häufig der Stamm oder größere Teile daraus, an denen Eigenschaften wie Astigkeit (BJÖRKLUND 1997, MEREDIEU et al. 1998, LEMIEUX et al. 1997, VESTØL 1998), Anteil des juvenilen Holzes (WILHELMSSON et al. 1999), Verkernung (HAPLA und SABOROWSKI 1994, GJERDRUM 1999, KNOKE und SCHULZ-WENDEROTH 2001), Faserwinkel (LEBAN und DUCHANOIS 1989), longitudinale Stammform (SMALTSCHINSKI 1983, KUBLIN und SCHARNAGL 1988, SCOTTI 1999) oder radiale Stammform (MÜLLER 1957, SIOSTZRONEK 1958, SAINT-ANDRÉ und LEBAN 2000) modelliert werden.

Gliederung von Modellen zur Strukturbeschreibung nach dem technologischen Bearbeitungsgrad der Zielgröße

Mit einem technologisch orientierten Gliederungsschema lassen sich die Modelle nach dem Grad der Bearbeitung der Zielgröße – unabhängig von der betrachteten räumlichen Modellauflösung – in Rundholzmodelle, Modelle für Halbwaren und Modelle für Produkte gliedern.

Rundholzmodelle beschreiben den initialen Rohstoff. Sie versuchen aus äußerlich messbaren Parametern auf innere Eigenschaften zu schließen (LEBAN et al. 1999) oder nutzen Scannerinformationen als Eingangsgrößen, um Grundinformationen über den inneren Stammaufbau zu gewinnen (ÖHMANN 1998, BHANDARKAR et al. 1999), die als Eingangsgrößen für die Modellierung weiterer Parameter wie zum Beispiel Rohdichte oder Faserlänge dienen.

Modelle für Halbwaren beschäftigen sich mit der Abbildung der Eigenschaften bereits weiterverarbeiteter Stoffe, wie den Eigenschaften von Schnittholz (FORSBERG 1999, SVENSSON und MÄRTENSSON 1999), Zellstoff (CHANTRE und BOUVET 1999), Furnier (BOS et al. 1999, LIU et al. 1999) oder Spanplatten.

Modellansätze zur Nachbildung der Eigenschaften von fertigen Produkten, wie z.B. Papier oder Möbel sind nicht immer eindeutig von Halbwarenmodellen zu trennen, da beispielsweise Schnittholz sowohl ein Endprodukt, etwa in der Form eines Dachsparrens sein kann als auch eine Halbware, wenn es zu Brettschichtholz weiterverarbeitet wird.

2.3.2 Modelle zur Strukturbewertung – *Models evaluating structure*

Modelle zur Strukturbewertung sind Sortiermodelle, mit denen sich Strukturen von Holz oder Holzprodukten zu einem definierten Zeitpunkt bewerten lassen (Tabelle 2-1). Sie vollziehen den Schritt von den objektiv messbaren Holz- bzw. Produkteigenschaften zur normativ bewerteten Holz- bzw. Produktqualität und bilden damit die Brücke von der biologischen Anschauungsebene des Wachstums und der Holzstruktur zu einer verwendungsorientierten Bewertung, die sich in Normsystemen wie beispielsweise Rund- oder Schnittholznormen niederschlägt. Erst durch die Nachbildung gängiger Sortiernormen wird die Voraussetzung für eine monetäre Bewertung der verschiedenen Qualitäten geschaffen.

Die meisten Modelle zur Strukturbewertung haben dabei von der räumlichen Auflösung der Zielgröße her Rundholz oder Schnittholz auf makrostruktureller Ebene zum Bewertungsgegenstand. Zur qualitativen Bewertung werden aber unter anderem auch mikrostrukturelle Kriterien wie Jahrringbreitenangaben herangezogen (Tabelle 2-2).

Modellansätze existieren für unterschiedliche Stufen der technischen Bearbeitung (Tabelle 2-2), beispielsweise für die Qualität von Rundholz (KUBLIN 1982, GOUDIE 1999) oder Schnittholz (VÄISÄNEN et al. 1989, LEMIEUX und BEAUDOIN 1999).

2.3.3 Modelle zur Prozessbeschreibung – *Models describing processes*

Holzkundliche Modelle zur Prozessbeschreibung bilden zeitabhängige Zustandsänderungen des Holzes oder von Holzprodukten (siehe Tabelle 2-1) nach. Sie grenzen sich von den auf ökophysiologischen Prozessen basierten Modellen dadurch ab, dass sie Zustandsänderungen an bereits geerntetem Holz nachbilden, also Änderungen der Struktur von totem Holz oder von Folgeprodukten. Dabei können zwei grundlegende Gruppen nach der Prozessursache unterschieden werden: Prozessmodelle für die anthropogen und für die umweltbedingten physikalisch-chemische Veränderungen von Holz und holzbasierten Produkten (Tabelle 2-2).

Eine weitere Gliederung dieser Modellkategorie lässt sich über die zeitliche Auflösung der Nachbildung des Prozesses und den modellierten Bearbeitungsgrad der Zielgrößen erreichen. Auch bei Prozessmodellen müssen für eine treffende Modellbeschreibung meist alle dieser Kriterien berücksichtigt werden.

Prozessmodelle zur Beschreibung anthropogen bedingter Veränderungen von Holz und holzbasierten Produkten

Diesen Modellen ist gemeinsam, dass sie anthropogene Manipulationen des Holzes und seiner Folgeprodukte nachbilden. Dazu gehört die optimale Sortenbildung durch Ablängen der Stammschnitte (GLÜCK und KOCH 1973, ENG et al. 1986, SESSIONS et al. 1989) ebenso, wie die Einschnittsimulation, die verschiedene Sägevarianten eines Stammes modellhaft nachbildet. Einschnittsimulationen finden auch praktischen Einsatz in Sägewerken, da mit ihrer Hilfe ein volumenoptimales Rundholzeinschnittmuster nach äußeren Maßen eines Stammes festgelegt werden kann (MANESS 1989, TODOROKI, C. 1990, USENIUS 1999).

Auch Furniersimulatoren zur Nachbildung der optischen und technologischen Qualität der Furnieroberfläche bei verschiedenen Schäl- oder Messerfurniertechniken (RJASANOWA und RÖSCH 1995, BHANDARKAR et al. 1999, BOS et al. 1999) sind hier zu nennen sowie Modelle zur Produktion von Faser- und Verbundplatten (STEFFEN et al. 2001). In der Zellstoffherstellung eingesetzte Prozessmodelle fallen ebenfalls in diese Modellkategorie (MASURA 1998, 1999).

Prozessmodelle zur Beschreibung umweltbedingter Veränderungen von Holz und holzbasierten Produkten

Der zweite Modellbereich beschäftigt sich mit der Simulation umweltbedingter zeitabhängiger physikalischer und chemischer Prozesse im Rund- bzw. Schnittholz, im Zellstoff und in anderen Holzprodukten. So kann am Computer das Auftreten von Spannungsrissen am Rundholz (LAGHDIR et al. 1999) ebenso simuliert werden wie Schwindverhalten und Formstabilität (CONSTANT et al. 1999, YAMAMOTO 1999), die Standzeit von Holz unter Belastung (FUGLSANG NIELSEN 2000) oder das Kriechverhalten und die Wasserabsorption von Spanplatten (MUNDY et al. 1998).

2.4 Ökonomische Marktmodelle – *Economic models for the wood market*

Ökonomische Modelle zur Nachbildung des Holzmarktes (BARTELHEIMER 2002) zählen weder zu den waldwachstumskundlichen noch zu den holzkundlichen Modellen. Allerdings sind auch Holz und daraus erzeugte Halbwaren und Produkte Gegenstand der Betrachtung, weshalb diese Modellgruppe hier der Vollständigkeit halber mit aufgeführt werden soll. Die Aussagegrößen solcher Simulationsmodelle sind marktbeeinflussende Warenströme und daraus resultierende Preise in einem dynamischen Marktsystem aus Angebot und Nachfrage. Ökonomische Marktmodelle sind nicht Teil dieser Arbeit, können aber wichtige ökonomische Modellparameter für waldwachstumskundliche und holzkundliche Modelle liefern, indem sie Aufschluss über die zu erwartenden Absatzpreise der produzierten Rohstoffe, Halbwaren und Produkte geben. Gerade die Berücksichtigung verschiedener Holzqualitäten in solchen Marktmodellen ergäbe eine weitere wichtige Schnittstelle.

2.5 Verknüpfung von Waldwachstums- und Holzmodellen

Combination of forest growth and wood quality models

Mit zunehmender Kenntnis der zugrundeliegenden Zusammenhänge werden Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Zielgrößen von Einzelmodellen deutlich. Dadurch steigen auch die Ansprüche an die abzubildende Informationsfülle.

Mit fortschreitender Entwicklung der Methodik und leistungsfähigen Rechnersystemen wird versucht, diesen Ansprüchen gerecht zu werden, wobei sowohl innerhalb der holzkundlichen als auch der waldwachstumskundlichen Modelle die Modellintegration und die skalenübergreifende Modellierung voranschreiten.

Bei waldwachstumskundlichen Simulatoren etablieren sich zunehmend vertikal und horizontal integrierte Modellstrukturen. Neben den eigentlichen Wuchsmodellen werden beispielsweise Mortalitäts- und Risikomodelle (DURSKÝ 1997, PÄÄTALO et al. 1998), Stammformmodelle (ARNEY 1972, SLOBODA et al. 1997, KUBLIN und SCHARNAGL 1988), Strukturerezeugungs-routinen (PRETZSCH 1993, 1997, BIBER 1997, LEWANDOWSKI und VON GADOW 1997, POMMERENING 2000), Durchforstungsmodelle (KAHN 1995a, PUKKALA und MIINA 1998) und Annahmen zur Erntekostenberechnung eingesetzt. Dadurch bilden sich horizontal und vertikal strukturierte Gesamtmodelle mit Wechselwirkungen, die den Wald als kybernetisches System

nachbilden. An die Wachstumsprognose anschließende Sortier- und Sortenbildungsalgorithmen erlauben schließlich die preisliche Bewertung verschiedener Volumensortimente (KUBLIN und SCHARNAGL 1988). Durch die bereits beschriebene Erfassung unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Skalenebenen bilden sich skalenübergreifende Modellkomplexe heraus, die räumliche Strukturen von Baumkompartimenten bis zur Regionalebene nachbilden (DURSKÝ 2000) und als hierarchische Modelle zum Teil Rückkopplungseffekte zwischen verschiedenen Hierarchieebenen berücksichtigen wie beispielsweise Baum und Bestand (PRETZSCH 2001).

Auch aktuelle holzkundliche Simulationsprogramme beschränken sich nicht auf die Modellierung eines einzelnen qualitätsbestimmenden Holzmerkmals, sondern integrieren auf horizontaler Ebene mehrere Modelle zu einem Modellkomplex, um parallele Einflüsse verschiedener Parameter auf die Holzqualität abschätzen zu können und eventuelle Wechselwirkungen zwischen den Parametern zu erfassen (COWN et al. 1999, SCOTTI 1999, WILHELMSSON et al. 1999). Von einigen holzkundlichen Simulatoren werden auch Strukturen verschiedener aufeinander folgender Bearbeitungsstufen mit den nötigen Konversionsprozessen modellhaft nachgebildet, womit eine vertikale Modellintegration erreicht wird (CONSTANT et al. 1999, LEMIEUX und BEAUDOIN 1999).

Für gängige holzkundliche wie auch waldwachstumskundliche Modelle gilt, dass sie immer mehr Teilprozesse mit abbilden und nur noch in der Form komplexer Simulationsprogramme befriedigend realisiert werden können. Es bedarf zusätzlich jedoch einer Verknüpfung von waldwachstumskundlichen mit holzkundlichen Modellansätzen, um die Modellkette vom Rundholz bis zum Endprodukt zu schließen.

Die Notwendigkeit einer solchen Modellverbindung ist inzwischen erkannt (HOULLIER et al. 1995, DAHLBLOM et al. 1999, LEBAN et al. 1999). Die wenigen bereits existierenden Kopplungsansätze (VÄISÄNEN et al. 1989, HOULLIER et al. 1995, GOUDIE 1999, LEBAN et al. 1999, MEREDIEU et al. 1999, NEPVEU et al. 1999) sind als erste Schritte zu betrachten, da sie entweder nur eine geringe Anzahl waldwachstumskundlicher und holzkundlicher Parameter nachbilden oder bei der Kopplung nur wenig interagieren. Die Gründe für den geringen Integrationsgrad liegen zum einen darin, dass Simulationsansätze noch nicht allzu lange in der forstlichen und holzkundlichen Forschung etabliert sind und sich die fächerübergreifende Modellbildung noch nicht durchgesetzt hat. Zum anderen existieren einige technische Hürden bei der Zusammenführung von Modellkomponenten und Einzelmodellen in integrierte Modellumgebungen, die sowohl modelltechnischer als auch programmtechnischer Natur sind. Die modelltechnischen Schwierigkeiten der Zusammenführung liegen in der Harmonisierung der nötigen Eingabe- und Ausgabewerte sowie der Fehlerfortpflanzung bei einer Kopplung (DAQUITAINE et al. 1999, ROBINSON und EK 2000). Mögliche Abhängigkeiten und Wechselwirkungen von Teilmodellen werden in solchen Fällen oft erst durch eine Integration in ein Gesamtmodell relevant.

Ein weiteres Problemfeld ist in den verschiedenen räumlichen und zum Teil auch zeitlichen Skalenniveaus der vorhandenen Modelle zu sehen, was häufig Skalierungsschritte bei der Modellkopplung nötig macht (GRACE et al. 1997, ROBINSON und EK 2000). Empirisch basierte Modelle sind über ihre Parametrisierungsdatensätze zudem auch immer an einen definierten regionalen Gültigkeitsbereich gebunden, der eine Verknüpfung unterschiedlicher Modelle mit nicht deckungsgleichen Gültigkeitsbereichen zu heterogen parametrisierten Gesamtmodellen problematisch erscheinen lässt.

Eher programmtechnische Probleme einer Modellverknüpfung liegen in der Schnittstellendefinition beim Datenaustausch der Teilmodelle. Es gilt eine zweckadäquate Wahl zwischen den unterschiedlichsten Möglichkeiten des Datenaustausches zu treffen. Als Beispiele seien hier Dateien, Datenbanken oder Interprogramm-Kommunikationsschnittstellen wie CORBA, COM, OLE oder DLL genannt. Eine weitere Hürde für die Modellkopplung ist in der Vielfalt und

Uneinheitlichkeit der unterschiedlichen, benutzten Softwarearchitekturen, Betriebssysteme und Programmiersprachen zu sehen, die besonders die Interaktion zwischen Teilmodellen erschwert.

Insgesamt befindet sich die Komplettierung und Verdichtung des multidimensionalen Modellnetzes, bzw. einer linearen Modellkette als isoliert betrachtetem Ausschnitt daraus, noch in ihren Anfängen. In etlichen Bereichen müssen noch Lücken durch neue Modelle gefüllt und in anderen Bereichen Verknüpfungen vorhandener Modelle vollzogen werden, um eine solide Informationsbasis für die gegenwärtigen und zukünftigen Anforderungen der Forst- und Holzindustrie bereitzustellen.

3 Entwicklung des Modellansatzes – *Model approach*

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, ein plausibles Simulationsmodell für die Nachbildung der Rundholzqualität der Fichte in Abhängigkeit von waldbaulichen Eingriffen und dem individuellen Wuchsraum des Baumes zu entwickeln. Dies bedingt die Forderung, jeden Bestandesbaum als dreidimensionalen Stamm zu beschreiben, so dass weitere Qualitätsmodelle daraus abgeleitet werden können. Damit wird auch die Grundlage für eine spätere Weiterentwicklung des Modells zu einer differenzierteren Qualitätsbewertung der inneren Holzeigenschaften, z.B. bei Schmittholz oder Furnier, geschaffen.

Die Brauchbarkeit eines Modellansatzes zur Prognose der Holzqualität wird dabei durch die Relevanz der verwendeten Zielgrößen zur Charakterisierung der Holzqualität und die Wahl adäquater Methoden bei der Modellbildung und der Implementation bestimmt. Sowohl die Zielgrößen als auch die Methoden zur Einbindung der Holzqualität müssen strikt am Bedarf der Anwender und den Möglichkeiten des Modellrahmens orientiert werden, in den das Modell integriert werden soll.

3.1 Definition von „Holzqualität“ – *Definition of “wood quality”*

Für eine Analyse von relevanten Kriterien zur Beschreibung von Holzqualität bedarf es zuerst einer Definition des Holzqualitätsbegriffes. Was ist also „Holzqualität“ und wie kann man sie fassen?

Im Jahre 1934 definierte Hermann Knuchel „Holzfehler“ als „Abweichungen von der normalen Beschaffenheit des Holzes“ (KNUCHEL 1934, S.17). Diese Definition impliziert, dass es eine „normale“ Beschaffenheit bzw. Holzqualität gibt oder diese definiert werden kann. TRENDELENBURG und MAYER-WEGELIN (1955) greifen in Ihrer Darstellung schon etwas weiter und differenzieren die Qualität nach den Ansprüchen der Holzverwender.

Holz ist ein Rohstoff mit einer beträchtlichen Variabilität in seinen Eigenschaften. Diese sind objektiv messbar und ergeben sich durch die Interaktion von genetischer Ausstattung und Umwelteinflüssen (siehe Abbildung 1-1). Die hohe Variabilität führt zu einer unterschiedlichen Verwendbarkeit des Holzes. Man kann deshalb „Holzqualität“ als Maß für die Verwendbarkeit zu einem bestimmten Zweck ansehen. Die Qualität von Holz ist also nicht als objektive, sondern als normative Größe zu betrachten, die durch den Verwendungszweck und das Angebot bestimmt wird. Je nach Einsatz des Holzes im Bauwesen, für Furniererzeugung, Spanplatten- oder Zellstoffproduktion, um nur einige Verwendungsbereiche zu nennen, spielen bei der Bewertung der Holzqualität jeweils andere Kriterien eine Rolle. Während in der Furnierherstellung ein besonderer Augenmerk auf optische Eigenschaften der Holzoberflächen gelegt wird, sind im Bauwesen neben der Dimensionsstabilität vor allem mechanische Festigkeitsparameter von Interesse. Bei der Zellstoffproduktion sind in erster Linie die Holzfasernlänge und die Anteile der chemischen Komponenten im Holz relevant, während beim Einsatz für Spanplatten die Eigenschaften sehr stark variieren können und auch ein gewisser Fäuleanteil toleriert wird. Indem Holz zu Marktpreisen gehandelt wird und der Konkurrenz durch andere Rohstoffe ausgesetzt ist, ändert sich die Vorstellung über die Qualität von Holz definierter Eigenschaften im Laufe der Zeit. Durch Änderungen in der forstlichen Produktion, die biologischen, sozialen und ökonomischen Zwängen unterliegt, kommt es zu Modifikationen in der Qualitätsbewertung von Holz. Werden beispielsweise bestimmte Qualitätssortimente nicht in ausreichenden Mengen angeboten, werden sie bei potenziellen Abnehmern gar nicht realisiert bzw. durch andere Rohstoffe substituiert. Das biologisch und technisch mögliche Angebot gibt hierbei die Bandbreite der Bewertungsskala vor.

Auch auf der Abnehmerseite ändern sich Produktionstechniken in der Be- und Verarbeitung oder es kommt durch eine wechselnde Nachfrage beim Endverbraucher zu generellen Verschiebungen des Holzmarktes mit geänderten Produktströmen.

Die Einordnung von Holz bestimmter Merkmale in Qualitäten wird somit sowohl durch die Ansprüche der Holzverarbeitenden Abnehmer und Endkunden als auch durch das Angebot bestimmt.

Aus den bisherigen Ausführungen ergeben sich folgende Begriffsdefinitionen, die in der vorliegenden Arbeit durchgehend in diesem Sinne verwendet werden:

Holzeigenschaften

Solange von objektiv messbaren Größen des Holzes gesprochen wird, werden diese als „Holzeigenschaften“ bezeichnet. Beispiele sind der Faserwinkel, die Stammform, die Rohdichte, die Biegefestigkeit, die Faserlänge oder die Astigkeit.

Holzqualität

„Holzqualität“ ist die wertende Beurteilung der Holzeigenschaften nach allgemein anerkannten Maßstäben, den Normen. Das Ergebnis ist die Einstufung in Qualitäts- oder Güteklassen, welche die Eignung des Rohstoffes für verschiedene Verwendungsbereiche charakterisieren.

Als Beispiele von Normen zur Holzqualität seien hier die Handelsklassensortierung (HKS), die Europäische Vornorm zur Sortierung von Nadelrundholz (ENV 1927) und die Norm zur Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit (DIN 4074) genannt.

Durch die Differenzierung von Holzeigenschaften und Holzqualität ergibt sich, dass auch normativ festgelegte „Holzfehler“ besser als „unerwünschte Eigenschaften“ definiert werden, welche die Verwendung für einen bestimmten Zweck ausschließen oder erschweren. Für andere Verwendungsbereiche können dieselben Eigenschaften durchaus erwünscht sein. Ein Beispiel ist die Astigkeit: Bei konstruktivem Holzgebrauch eher eine unerwünschte Holzeigenschaft, da die Festigkeit beeinträchtigt wird, ist die Astigkeit im dekorativen Bereich, z. B. bei Wandpaneelen in Zirbelstuben, durchaus gewollt.

3.2 Analyse der Qualitätskriterien – *Analysis of quality criteria*

3.2.1 Normen zur Holzqualität – *Wood quality in grading rules*

Um im Holzhandel den Erlös bzw. die Kosten des Holzes bestimmen zu können, existieren Normen für Rund- und Schnittholz wie beispielsweise die Handelsklassensortierung für Rundholz „HKS“ (1962), die europäische CE-Vornorm für Rundholz „ENV 1927-1“ (1998) oder die DIN 4074 für die Beurteilung von Schnittholz zu konstruktiven Zwecken. Je spezieller und damit verwendungsorientierter solche Normen formuliert sind, wie etwa viele Schnittholznormen (DIN 21329: Grubenschnittholz, DIN 68360: Holz für Tischlerarbeiten bei Innenanwendung, DIN 68362: Holz für Leitern), desto schwieriger ist die Übertragbarkeit des dort definierten Qualitätsbegriffes auf andere Verwendungsbereiche.

Da Rundholz als Hauptprodukt der Forstwirtschaft und initialer Rohstoff der weiterverarbeitenden Holzindustrie für diverse Verwendungsbereiche mit unterschiedlichen Qualitätsanforderungen benötigt wird, bewerten Rundholznormen die von dem Großteil der Abnehmer als wichtig erachteten Holzeigenschaften. Sie sind aus diesem Grunde relativ breit ausgelegt, so dass sie eine Holzqualität definieren, die als Grundkonsens der Verwender anzusehen ist.

In der vorliegenden Arbeit werden deshalb die Rundholznormen HKS und ENV 1927-1 als pragmatische Kriterienfilter herangezogen, um allgemein relevante Qualitätskriterien von weniger relevanten zu trennen. Man muss sich in diesem Zusammenhang allerdings verdeutlichen, dass damit nicht die Qualitätsansprüche sämtlicher Holzverwender abgedeckt sind, sondern eine eher grobe Bewertung der Rundholzqualität zugrunde gelegt wird, welche nicht unbedingt detaillierte Aussagen über die Schnittholzqualität zulässt (HECKER et al. 2000). Da dies aber der üblichen Bewertungsgrundlage der forstlichen Praxis für Rundholz entspricht, wird dieses Verfahren gewählt.

3.2.2 Identifikation und Auswahl sortierrelevanter Kriterien

Identification and selection of parameters relevant for grading

In einem Vergleich der HKS und der ENV 1927-1 lassen sich die Kriterien gegenüberstellen, die in diesen Normen benutzt werden, um die Qualität von Nadelrundholz zu charakterisieren (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung der Kriterien zur Beurteilung von Rundholzqualität der Sortiennormen für Fichtenrundholz, HKS, Vereinbarung zur HKS (Sachsen) und ENV 1927-1, auf dem Stand des Normentwurfes ENV 1927-1 (vgl. Holzzentralblatt 74, vom 20. 6. 1997). *Criteria of different German and European grading rules*

Kriterium	HKS	HKS-Sachsen	ENV 1927-1
Vorhandensein von Ästen – <i>existence of branches</i>	*	**	**
Astdurchmesser – <i>branch diameter</i>	*	**	***
Astbeulen – <i>swellings</i>	*	*	
Jahrringbreite – <i>year ring width</i>	*	*	**
Drehwuchs – <i>spiral grain</i>	*	**	**
Exzentrizität – <i>excentricity</i>	*	*	**
Reaktionsholz – <i>reaction wood</i>	* 2)	** 2)	**
Krümmung – <i>stem curvature</i>	* 2)	**	*** 2)
Abholzigkeit – <i>taper</i>	*	**	*** 2)
Querschnittsform (Ovalität) – <i>ovality</i>	*	*	
Markrisse (Kernrisse) – <i>core cracks</i>	*	*	*** 2)
Mantelrisse – <i>peripheral cracks</i>	*	*	
Ringschäle – <i>radial cracks</i>	*	*	*** 2)
Insektenbefall – <i>insect damage</i>	*	*	**
Fäule – <i>decay</i>	*	** 2)	*
Verfärbungen – <i>discoloration</i>	*	*	*
Harzgallen – <i>resin pockets</i>			**

* Merkmal in Norm erfasst, aber nur unscharfe Abgrenzung, z. B. „grobastig“
criterion used, but fuzzy, e.g. “thick branches”

** Merkmal metrisch bzw. intervallskaliert erfasst, z. B. „Astdurchmesser bis 4 cm“ bzw. „eine Harzgalle“
criterion in a metric or interval scale, e.g. “branch diameter up to 4 cm” or “one resin pocket”

*** Merkmal metrisch erfasst und noch genauer differenziert, z. B. „fest verwachsene Äste bis 4 cm“
criterion in a metric scale with additional definition defined

2) bezeichnet Kriterien, die in der Norm vom Stammdurchmesser abhängen –
criterion evaluation depends on stem diameter

HKS und ENV 1927-1 unterscheiden sich in der Trennschärfe ihrer Grenzen für die Qualitätssortierung. In der HKS werden nur unscharfe Begriffe zur Normierung der Güteklassen verwendet, die regional unterschiedlich ausgelegt werden und auch marktabhängigen Schwankungen unterworfen sein können. Als Beispiel wäre hier die Astigkeit zu nennen, die in der HKS durch Begriffe wie „Äste mit kleinem und mittlerem Durchmesser“ oder „grobastig“ definiert ist.

Diese unscharfe Formulierung der HKS erklärt die Existenz von ergänzenden Vereinbarungen zwischen den Landesforstverwaltungen und den Verbänden der Holzindustrie auf Landesebene, in welchen metrische Grenzen für Sortierkriterien definiert werden, um eine Präzisierung und Vergleichbarkeit der Sortierergebnisse zu erhalten. Solche Vereinbarungen finden sich zum Beispiel in Baden-Württemberg und Sachsen. In Tabelle 1 ist im Vergleich die Vereinbarung der HKS in Sachsen aufgeführt (SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, ERNÄHRUNG UND FORSTEN 1997).

In der ENV 1927-1 sind die Sortierkriterien wesentlich schärfer formuliert und fast durchgängig metrisch oder intervallskaliert, wodurch der Interpretationsspielraum klein gehalten wird.

Wie aus Tabelle 3-1 ersichtlich, verwenden die Normen vielfach dieselben Kriterien. Dennoch gibt es ausgeprägte Unterschiede. Einer davon ist die Einbeziehung von Harzgallen als Qualitätskriterium in der ENV 1927-1, die in der HKS nicht vorgesehen sind. Dagegen ist die Ovalität des Stammquerschnittes ein Sortierkriterium in der HKS, während es in der ENV 1927-1 nicht berücksichtigt wird. Insgesamt werden in der ENV 1927-1 die Astparameter differenzierter als die HKS betrachtet, in welcher sich eher vage Sortiergrenzen zu astreinen Stammschichten und eine grobe Unterscheidung verschiedener Astdurchmesser finden. Die ENV 1927-1 spezifiziert quantitativ und kennt neben dem bloßen Vorhandensein von Ästen, als Sortierkriterien auch definierte metrische Durchmessergrößen für verwachsene, nicht verwachsene und faule Äste. Damit wird in der ENV 1927-1 noch stärker differenziert als in der sächsischen Auslegung der HKS. Astbeulen als Sortierkriterium für Fichtenrundholz werden hingegen nur in der HKS, aber nicht in der ENV 1927-1 benutzt.

Auch die Gesundheit des Stammes wird unterschiedlich angesprochen. Während in der HKS zwischen „Verfärbung“, „Stammtrockenheit“ und „Fäule“ unterschieden wird, differenziert die Sortiervorgabe der ENV 1927-1 in „Streifigkeit“, „Hartfäule“ und „Weichfäule“. Diese Unterschiede in der Nomenklatur der Sortierkriterien bei der „Gesundheit“ von Rundholz machen einen Vergleich schwierig, da in der Realität außer Rotstreifigkeit auch andere Verfärbungen bei Fichte vorkommen. Initiale Rotfäule geht nicht selten mit Verfärbungen einher. Eine partielle Stammrockenheit mag als Hinweis auf eine Hartfäule gelten, kann aber auch andere Ursachen haben.

Zur Sortierung der Kriterien nach ihrer Relevanz wurde eine Untersuchung von SCHUMACHER et al. (1997) herangezogen. Darin werden die beiden Normen gegenübergestellt und im Rahmen von Probesortierungen an Rundholz der Einfluss der Qualitätskriterien auf das Sortierergebnis quantitativ erfasst (Abb. 3-1). Es werden jeweils jene Kriterien quantifiziert, die bei Probesortierungen nach der ENV 1927-1 entscheidend für die Abstufung in die jeweilige Klasse waren.

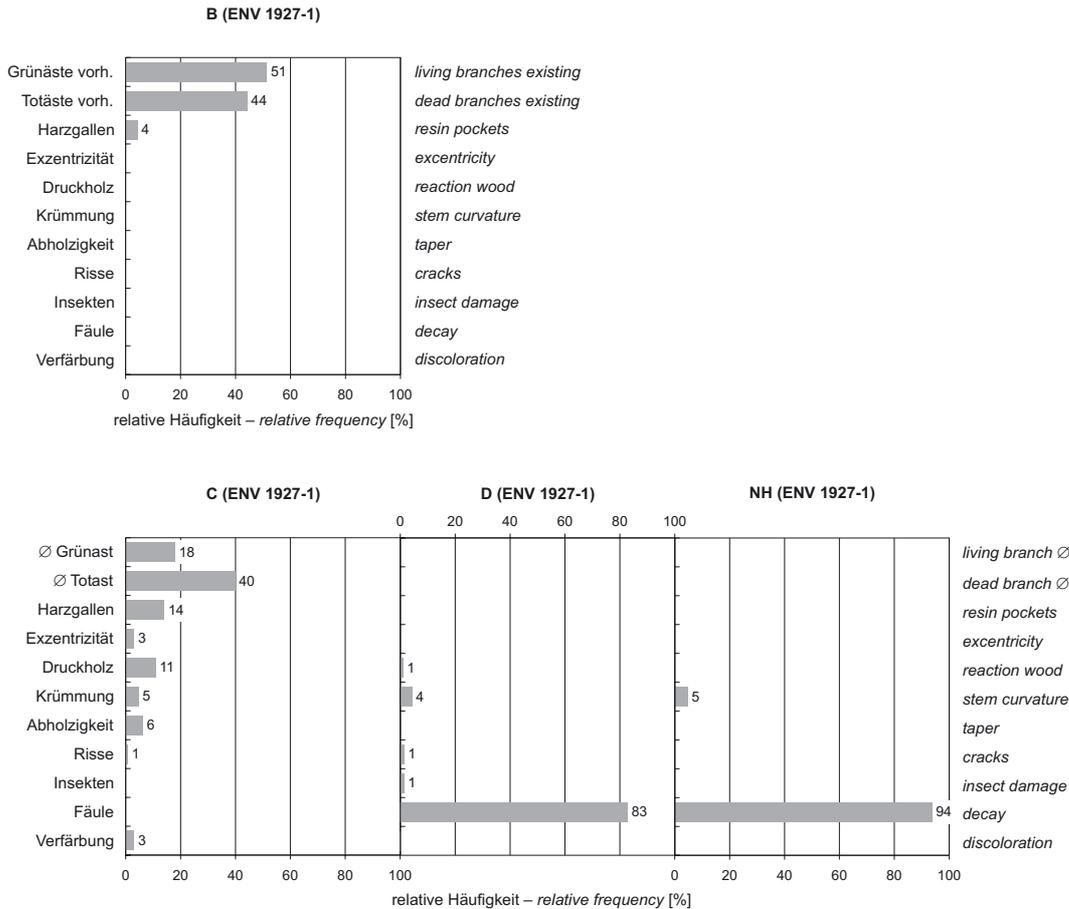


Abbildung 3-1: Häufigkeit der Abstufung durch ein bestimmten Qualitätsmerkmale in die angegebene Qualitätsklasse bei der Rundholzsortierung nach ENV 1927-1 (SCHUMACHER et al. 1997). *Frequency of wood quality traits responsible for down grading into the defined grading class in a roundwood grading according to ENV 1927-1*

In dieser Untersuchung zeigen SCHUMACHER et al. deutlich, dass in den besseren Qualitätsklassen A und B der europäischen Norm vor allem Äste eine Rolle spielen und dadurch ein Großteil des Sortierergebnisses erklärt werden kann. Allein das Vorhandensein grüner oder toter Äste verursacht die Abstufung von ca. 96 % der Stämme in die Qualitätsklasse B, die ansonsten Qualitätsklasse A erreicht hätten. Der Grün- und Totastdurchmesser ist in fast 60 % der Fälle für eine Abstufung von Qualitätsklasse B nach C verantwortlich. In den schlechteren Qualitätsklassen ist das Kriterium mit der höchsten Sortierrelevanz die Gesundheit des Stammes; mit anderen Worten das Vorhandensein von Fäule, die mehr als 90 % der Abstufung von Qualitätsklasse C nach D bestimmt und mit ca. 95 % für die Aussortierung ins NH verantwortlich ist. Andere Kriterien bleiben im Erklärungswert marginal.

Als Fazit dieser Untersuchung ergeben sich zwei übergeordnete Qualitätsgrößen von Rundholz, die auf jeden Fall in einem Qualitätsmodell nachgebildet werden müssen – die Astigkeit und die Gesundheit.

Im Rahmen dieser Arbeit werden deshalb Modelle für die Astigkeit und zur Ausbreitung der Rotfäule im Stamm entwickelt, um diese zwei Hauptkriterien für die Sortierung abzudecken und einen möglichst hohen Erklärungswert bei einer Rundholzsartierung zu erreichen.

3.3 Modellrahmen – der Waldwachstumssimulator SILVA

Model frame – the growth simulator SILVA

In dieser Arbeit steht als Modellrahmen der Waldwachstumssimulator „SILVA“ (PRETZSCH 1992, 2001, KAHN und PRETZSCH 1997) zur Verfügung. Das Funktionsprinzip und die einzelnen, bereits etablierten Modellteile in SILVA bestimmen den Aufbau des in dieser Arbeit entwickelten Ansatzes zur Integration der Holzqualität und sind daher zum Verständnis der gewählten Methodik bei der Holzqualitätsmodellierung nötig. Aus diesem Grund wird SILVA im folgenden Abschnitt entsprechend den Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft Modellevaluierung der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten charakterisiert (SEKTION ERTRAGSKUNDE IM DVFFA 2000), wobei auf einige für diese Arbeit weniger relevante Punkte nicht oder nur knapp eingegangen wird. In den Kapiteln 4, 5 und 6 werden dagegen besonders wichtige Modellstrukturen von SILVA bei der Beschreibung der Teilmodelle zur Holzqualität eingehend diskutiert.

Der Waldwachstumssimulator SILVA wird seit 1989 am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Ludwig-Maximilians-Universität München bzw. ab Oktober 1999 der Technischen Universität München entwickelt (PRETZSCH 1992).

Ursprüngliches und zentrales Ziel der Forschungslinie ist es, ein Instrument zu schaffen, mit dem auch stark strukturierte Rein- und Mischbestände unter verschiedenen Standortbedingungen nachgebildet werden können und das Vergleiche unterschiedlichster Behandlungsvarianten zulässt.

Als flexibler Waldwachstumssimulator liefert SILVA die benötigte Information, mit der die zukünftige Entwicklung von Waldbeständen abgeschätzt und die forstliche Nachhaltigkeitsplanung unterstützt werden kann. SILVA soll mittel- bis langfristig die bisher zu diesem Zweck eingesetzten Ertragstafeln ablösen, die sich aufgrund ihrer stark vereinfachenden summarischen Betrachtung und der implizit vorgegebenen Bestandesbehandlung für viele Aussagebereiche als nicht mehr ausreichend erweisen (PRETZSCH 1992).

Bis zum jetzigen Zeitpunkt hat sich SILVA zu einem umfangreichen Simulations- und Auswertungssystem für Forstbetriebe und Waldökosysteme entwickelt, dessen Aussagegrößen neben der naturalen Produktion auch ökonomische und ökologische Bewertungen von Wäldern zulassen (PRETZSCH und KAHN 1996, KAHN und PRETZSCH 1997).

Der Modellrahmen „SILVA“ bestimmt, welche Steuergrößen dem Holzqualitätsmodell von etablierten Modellteilen des Simulators zur Verfügung stehen, welche Interaktionen zwischen Modellteilen des Waldwachstums und der Holzqualität möglich sind und in welchem räumlich-zeitlichen Skalenbereich sich die Simulation abspielen kann. Deshalb sollen in diesem Abschnitt die Modellparadigmen und -prinzipien dargestellt werden, auf denen SILVA basiert.

3.3.1 Modellansatz – *Model approach of SILVA*

Räumliche Auflösung

SILVA beschreibt als distanzabhängiger, einzelbaumorientierter Waldwachstumssimulator Waldbestände räumlich, indem Einzelbäume simuliert werden, die in ihrer Dimension und Position bekannt sind. Diese dreidimensionale Bestandsrepräsentation, bestehend aus einem Mosaik von Einzelbäumen, erlaubt die Berechnung der Konkurrenzsituation jedes individuellen Baumes in Abhängigkeit von der Besetzung des ihn umgebenden Raumes. Dies ermöglicht die Nachbildung von räumlichen Eingriffen wie Durchforstungen, Rückegassen oder Bestandeslücken durch ausgefallene Bäume.

Diese räumliche, einzelbaumorientierte Modellkonstruktion von SILVA kommt der angestrebten behandlungssensitiven, dreidimensionalen Nachbildung von Holzeigenschaften sehr entgegen. Dadurch ist es möglich, die räumliche Konkurrenzsituation, die SILVA als Steuergröße für das Wachstum nutzt, auch als erklärende Variable in der Modellierung der Holzeigenschaften zu verwenden. Die Konkurrenzberechnung lässt sich von der Kalkulation eines Summenwertes pro Baum auch zu einer himmelsrichtungsabhängigen Konkurrenzberechnung erweitern, weil die entsprechende dreidimensionale Bestandesstruktur im Modellrahmen bereits vorgesehen ist. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für eine plausible dreidimensionale Nachbildung von wichtigen Holzeigenschaften wie beispielsweise der Astigkeit.

Altersbezug

SILVA ist ein altersunabhängiger Waldwachstumssimulator (PRETZSCH 1992). Das bedeutet, dass das tatsächliche Baumalter zwar als Planungsgröße im System mitgeführt wird, aber nicht als Steuergröße für das Wachstum benutzt wird. Vielmehr wird ein allometrisches Alter aus den Baumdimensionen abgeleitet, welches das Wachstum als Weiser für die Reaktionsfähigkeit des Baumes auf Wuchsraumänderungen beeinflusst. Dieses Modellkonzept ist eine wesentliche Voraussetzung, um stark strukturierte Bestände nachbilden zu können, bei denen Bäume mit gleichem Alter oft sehr unterschiedliche Wachstumsgänge und dementsprechend auch unterschiedliche Dimensionen aufweisen können. Diese Altersunabhängigkeit lässt in SILVA beispielsweise eine Tanne nach 80-jährigem Unterstand bei ihrer Freistellung trotz des hohen tatsächlichen Alters eine deutliche, dem physiologischen Alter entsprechende Wuchsreaktion zeigen, wie sie auch in der Natur zu beobachten ist.

Komponenten des Modellkerns

SILVA bildet das Wachstum von Bäumen und Waldbeständen in 5-Jahresschritten ab. Für jeden Baum wird in einem solchen Schritt das Höhenwachstum, das Durchmesserwachstum, die Kronenbreite und die Kronenlänge sowie seine Mortalität prognostiziert.

Das Höhenwachstum wird in SILVA über ein standortabhängiges Zuwachspotenzialmodell nach dem „potential modifier principle“ nachgebildet. Unter Potenzial ist der auf einem Standort maximal mögliche Zuwachs eines Baumes mit einer bestimmten Ausgangshöhe zu verstehen. Ausgehend von diesem standortspezifischen Höhenzuwachspotenzial wird im Modell der Zuwachs jedes Individuums, in Abhängigkeit von seiner Konkurrenz, auf den tatsächlich vorhergesagten Zuwachs reduziert. Diese Konkurrenz eines Baumes wird über einen Konkurrenzindex charakterisiert, der auf Positionen und räumliche Dimensionen aller als Konkurrenten in Frage kommenden Bäume zurückgreift und auch Effekte von Baumartenmischungen berücksichtigt. Neben dem Konkurrenzindex gehen in die Potenzialreduktion noch Parameter zur Baumdimension ein, die den aktuellen Entwicklungszustand des Baumes charakterisieren.

Das Durchmesserzuwachspotenzial wird standortunabhängig über die Baumdimension geschätzt. Die anschließende Reduktionsfunktion basiert allerdings neben dem angesprochenen Konkurrenzindex und einigen Dimensionsgrößen auch auf Standortparametern.

Eine wichtige Modelleigenschaft ist die Unabhängigkeit von Höhen- und Durchmesser-schätzung in SILVA, die eingeführt wurde, um Ertragsniveauunterschiede nachbilden zu können. Bestände mit hohem Ertragsniveau besitzen bei gleicher Bestandeshöhe höhere Stammzahlen oder größere Mitteldurchmesser als Bestände mit niedrigem Ertragsniveau. Eine Kopplung von Durchmesser- und Höhenwachstum in einem Modell ließe die Nachbildung von solchen standortsbedingten Effekte nicht zu.

Höhen- und Durchmessermodell sind auch für die Modellierung der Holzeigenschaften von entscheidender Bedeutung, da daraus die Jahrringstruktur hervorgeht, die wiederum ein qualitätsrelevantes Holzmerkmal in der Rundholzsortierung ist. Des Weiteren ist die Jahrringbreite auch eine wichtige Eingangsgröße für andere Holzqualitätsmodelle zum Beispiel zur Nachbildung der Überwallungsgeschwindigkeit von Ästen und der Ausbreitung der Rotfäule im Stamm. Durch die Nutzung der Jahrringstruktur als Eingangsgröße in der Modellierung von Holzeigenschaften lässt sich eine Kopplung der Holzqualitätsmodelle an die Wachstumsmodelle von SILVA erreichen. Über diese Modellkopplung kann auch der Standort als Einflussgröße in der Holzqualitätsmodellierung Eingang finden.

Die Prognose der Entwicklung der Kronenparameter als wichtige Dimensionsgrößen erfolgt über eine Direktschätzung aus den primären Dimensionsgrößen des Baumes, der Höhe und den Brusthöhendurchmesser. Eine dynamische Fortschreibung über die Zeit ist derzeit nicht direkt realisiert, sondern über die Anbindung des Kronenmodells an Baumhöhe und Brusthöhendurchmesser, die dynamisch modelliert werden.

Die Mortalität von Einzelbäumen wird in SILVA abhängig von Konkurrenz und Baumdimensionen gesteuert (DURSKÝ 1997). Für jeden Baum ergibt sich aus diesen Parametern eine Mortalitätswahrscheinlichkeit. Über einen Zufallsprozess, der diese Wahrscheinlichkeit berücksichtigt, wird entschieden, ob der jeweilige Baum die aktuelle Fünfjahresperiode überleben wird.

Deterministische und stochastische Modellkomponenten

Stochastische Modellkomponenten kommen in Waldwachstumssimulatoren häufig zum Einsatz, da eine bei der Datenanalyse beobachtete Reststreuung zwar mit dem verwendeten Modell nicht zu erklären ist, diese Streuung aber im Modell miteinbezogen werden muss, um die Wirklichkeit adäquat nachbilden zu können.

Die Simulation der Streuung in Residuenmodellen wird in SILVA beim Höhen- und Durchmesserzuwachs, beim Mortalitätsmodell sowie im Strukturgenerator und Durchforstungsmodul eingesetzt. Über computerberechnete Zufallszahlen bilden diese Teilmodelle neben dem Mittelwert auch die beobachtete Residualstreuung nach einer vorgegebenen Verteilung im Simulator nach. Durch diese Technik verhält sich das Modell nicht deterministisch, so dass auch bei gleichen Einstellungen mehrere Probeläufe für einen Bestand zu jeweils etwas unterschiedlichen Ergebnissen führen. Damit wird die vom Regressionsmodell nicht erklärte Residualstreuung, die zum guten Teil auf mikrostandörtliche und genetisch bedingte Unterschiede und kaum vorhersagbare kurzfristige Wettereinflüsse zurückzuführen ist, nicht ignoriert, sondern genutzt, um die Wirklichkeit besser nachzubilden.

Die stochastische Modellierung bringt mit sich, dass sich in der Simulation erst durch wiederholte Simulationsläufe ein stabiler Mittelwert ergibt. Allerdings wird es möglich, die Präzision des Ergebnisses zu quantifizieren und statistisch fundierte Vertrauensintervalle für die Schätzung anzugeben.

Ablaufschema

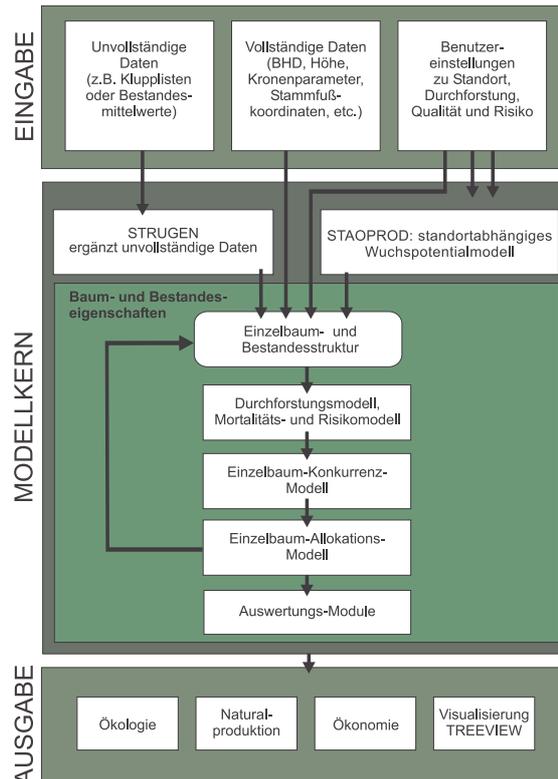


Abbildung 3-2: Ablaufschema des einzelbaumorientierten Waldwachstumssimulators SILVA. *Flowchart of the single tree growth simulator SILVA.*

3.3.2 Anwendungsbereich – *Fields of application*

Räumliche Dimension

SILVA wurde ursprünglich konstruiert, um Aussagen auf Bestandesebene treffen zu können. Es simuliert dabei wie beschrieben die Entwicklungen der Einzelbäume in bezug auf die Baumdimensionen BHD, Höhe, Kronenansatzhöhe und Kronenbreite und aggregiert die Werte aller Einzelbäume zu Bestandaussagen, wobei es die Einzelbaumdaten stets mitführt.

Durch einen automatisierten Betriebsmodus lassen sich auch Prognosen für Listen von Beständen rechnen, ohne dass der Benutzer für jeden Bestand die Menüsteuerung einsetzen muss. Zusammen mit der Möglichkeit, Daten von Stichprobeninventuren zu behandeln, bereitet dies den Weg für eine Ausweitung der räumlichen Dimension auf Betriebs- oder Regionalebene bis hin zur Großregion, wobei meist sinnvoller Weise eine Stratifizierung der Gesamtfläche in Bestände ähnlichen Typs erfolgt, um den Rechenaufwand zu begrenzen.

Mit den Möglichkeiten von SILVA, Simulationen auf Einzelbaum-, Bestandes- und Betriebs-ebene zu rechnen, eröffnet sich für die Holzqualitätsmodelle bei entsprechender Integration in den Modellrahmen auch die Nutzung dieser Skalenebenen bis hin zur Betriebsebene. Die hochauflösende Nachbildung der Holzqualität erfordert allerdings die Erweiterung des Skalenspektrums hin zu Baumorganen, wie zum Beispiel in einem Astmodell. Der Einzelbaumansatz des Waldwachstumssimulators ist hier von Vorteil, da nicht direkt vom Bestandesniveau auf das Organniveau skaliert werden muss, was Probleme hinsichtlich des Skalenübergriﬀs im Modell mit sich bringen kann.

Zeitliche Dimension

SILVA arbeitet in Prognoseschritten mit einer Höchstauflösung von fünf Jahren. Außer dem Rechenzeitaufwand liegt ein weiterer Grund für die Begrenzung der zeitlichen Auflösung in der Tatsache, dass die zur Parametrisierung verwendeten Daten größtenteils ebenfalls im fünfjährigen Turnus aufgenommen wurden. So wird eine zeitliche Kongruenz zwischen Datensatz und Modell hergestellt.

Die fünfjährige Zeitauflösung von SILVA ist für die Modellierung der Holzeigenschaften nicht ausreichend, da für die Holzqualitätsmodelle in der Regel jährliche Auflösungen benötigt werden. Die Zeitauflösung ist meist durch die Sortiernormen vorgegeben, welche Holzmerkmale, wie zum Beispiel die Jahrringbreite, in annueller Auflösung verlangen. In diesen Fällen ist die Interpolation zwischen den Fünfjahresperioden notwendig.

Anwendungsmöglichkeiten

Die Anwendungsmöglichkeiten von SILVA reichen von der operationalen Planung, zum Beispiel bei kurzfristigen Prognosen für die Forsteinrichtung, bis zu mittel- und langfristigen Prognosen in der strategischen Planung, beispielsweise zur Erstellung von Pflegemodellen, Holzaufkommens- und Sortimentsentwicklungsprognosen.

Der Simulator ermöglicht ein Variantenstudium in Form von Szenarioanalysen mit einem multikriteriellen Vergleich verschiedener Bestände und Behandlungskonzepte, bei dem Pflegekonzepte nach ihrer naturalen Produktion und ihrer ökonomischen sowie ökologischen Leistung bewertet werden können. Neben diesen planerischen Aspekten kann SILVA auch als Forschungswerkzeug dienen, wobei der Rahmen von waldbaulich-ökonomischen Fragestellungen bis hin zu Aspekten der Klimafolgenforschung reicht. Schließlich kann der Simulator als Hilfsmittel in Lehre und Ausbildung eingesetzt werden, beispielsweise wenn Studenten, Forstbeamten oder Waldbesitzern die Auswirkungen unterschiedlicher waldbaulicher Optionen quantitativ und qualitativ nähergebracht werden sollen.

Das skizzierte Anwendungsspektrum von SILVA macht die Notwendigkeit eines behandlungssensitiven Modellansatzes der Holzqualitätsmodelle nochmals deutlich. Nur über eine explizite Berücksichtigung von Behandlungseffekten lassen sich beispielsweise die ökonomischen Konsequenzen von Pflegemodellen verbessern oder die nachhaltige Bereitstellung der benötigten Holzqualität neben dem reinen Volumenaspekt in Managementkonzepten berücksichtigen.

3.3.3 Gültigkeitsbereich – *Range of validity*

Der Gültigkeitsbereich eines empirisch fundierten Modells richtet sich in erster Linie nach den Daten, die zur Parametrisierung eingesetzt wurden. Die Datengrundlage ist für SILVA heterogen, je nach dem parametrisierten Modellteil und der zu Verfügung stehenden Datenauflösung.

Regionalbezug

Das Standort-Leistungsmodell (KAHN 1994), das für die Baumarten Buche, Eiche, Fichte, Kiefer und Douglasie parametrisiert ist, basiert auf etwa 330 Versuchspartzellen, von denen die älteste seit dem Jahre 1873 unter Beobachtung gehalten wird. Die Parametrisierung des Standort-Leistungsmodells deckt die Regionen Schweiz, Bayern, Saarland, Rheinland-Pfalz, Hessen, Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und Schleswig-Holstein ab (KAHN und PRETZSCH 1997).

Eine solch breite Absicherung mit empirischen Daten ermöglicht eine Modellanwendung im weiten Teilen Mitteleuropas und lässt in begrenztem Maße auch Vorhersagen von Wachstumsreaktionen auf Standortveränderungen zu (KÜSTERS 2001).

Die Wuchsmodelle zur Kronen- und Stammdurchmesserentwicklung sind überwiegend mit süddeutschen Daten parametrisiert (KAHN und PRETZSCH 1997, PRETZSCH und KAHN 1998). Es liegen für die Baumarten Fichte 16000, für Buche 13000, für Kiefer 14000, für Tanne 2000 und für Eiche 3000 Datensätze aus Bayern zugrunde. Diese Datensätze enthalten Informationen über die Entwicklung von Durchmesser, Höhe, Kronenansatzhöhe und Kronenbreite in Abhängigkeit von Standort, Wuchskonstellation und Vitalität der Einzelbäume. Insgesamt basieren die Zuwachsmodelle auf einem Parametrisierungsdatensatz aus 288 Versuchspartikeln mit 528 Aufnahmezeitpunkten, der mehr als 155000 Bäume umfasst.

Die breite Datenbasis, auf der die Parametrisierung von SILVA beruht, stellt gesicherte Informationen für die Modellierung der Holzeigenschaften zur Verfügung, die als Eingangsgrößen für Holzqualitätsmodelle genutzt werden können oder auch als Schranken für eine plausible Ausgabe in Modellen zur Nachbildung von Holzeigenschaften, die eine höhere räumliche Auflösung benötigen. Ein Beispiel ist hierbei die Kronendimension von SILVA, die für eine plausible Begrenzung von Astlängen im Astmodell herangezogen werden kann.

Bei der Nachbildung von Stammform und Rindenstärke greift das Modell SILVA 2.2 auf das von Kublin und SCHARNAGL (1988) entwickelte Programm BDAT zurück. Über Spline-Funktionen bildet dieses Programm die Stammpерipherie in Abhängigkeit von Durchmesser- und Höhenangaben ab. Die enthaltenen Stammform-Beziehungen basieren auf etwa 30000 sektionsweise vermessenen Stämmen aus den alten Bundesländern (5100 Fichten, 3900 Tannen, 1200 Douglasien, 3500 Kiefern, 2600 Lärchen, 5900 Buchen, 4000 Eichen und 3400 Roteichen), so dass bei allen Hauptbaumarten von einer guten datenmäßigen Absicherung der Stammformfunktionen ausgegangen werden kann.

Zur Berechnung der Stammform und der Jahrringstruktur kann auf diesen wichtigen Modellbaustein von SILVA auch von den Modellen zur Nachbildung der Holzeigenschaften zurückgegriffen werden, so dass kein separates Stammformmodell entwickelt werden muss.

Standortbezug

Es sind in den oben genannten Parametrisierungsdaten alle flächenmäßig bedeutsamen Standorteinheiten, mit Ausnahme von Extremstandorten wie beispielsweise Moorflächen, abgedeckt. Ein flexibles Standort-Leistungsmodell (KAHN 1994) erlaubt die Nachbildung dieser verschiedenen Standorteinflüsse.

Die Möglichkeit der Nutzung dieser breiten Datenbasis für die Holzqualitätsmodellierung ist über die Modellintegration von Wachstum und Holzqualität möglich, wie bereits im Abschnitt 3.3.1 erwähnt.

Mischungsformen und Bestandesaufbau

Die Datenbandbreite deckt von einschichtigen Reinbeständen bis zu Plenterwäldern alle Mischungsformen und Strukturtypen ab. So ist auch im Simulator ein breites Variantenspektrum an Bestandesstrukturen nachbildbar.

Die Abdeckung eines breiten Behandlungsspektrums ist das Hauptziel dieser Arbeit, die sich ausschließlich mit der Nachbildung der Holzqualität der Fichte befasst. Allerdings soll das entwickelte Modell so flexibel sein, dass es methodisch in weiten Teilen auf andere Baumarten übertragbar ist. Dies setzt bei der Implementation eine allgemeine Formulierung vieler Programmteile voraus, was durch den Einsatz einer objektorientierten Programmiersprache erreicht wird.

Abgedeckte Behandlungsvarianten

Über die Versuchsflächendaten des Bayerischen Forstlichen Versuchsflächennetzes fließen zahlreiche Behandlungsvarianten wie zum Beispiel Nieder- und Hochdurchforstung, Auslesebaum- und Z-Baumverfahren, Zielstärkennutzung und Hiebsruhe in den Parametrisierungsdatensatz von SILVA ein. Die Spannweiten der zugrundeliegenden Stammzahl- bzw. Grundflächenhaltungen sind sehr groß. Beispielsweise reichen sie bei der Fichte bis zu Bestandesdichten von 80 m²/ha und über 1400 VfmD/ha. Bei der Kiefer sind maximale Stammzahlen von über 17000 Bäumen pro Hektar im Datensatz enthalten.

Im Simulator können die einzelnen Verfahren im Hinblick auf Art, Stärke und Eingriffszeitpunkt flexibel definiert und untereinander kombiniert werden (KAHN 1995). Allerdings sind nicht alle Behandlungsvarianten bei allen Baumarten und Bestandesformen gleich abgedeckt. Lücken gibt es beispielsweise bei extrem freigestellten Laubholzbeständen. Mittel- und Niederwald ist ebenso nicht im Parametrisierungsdatensatz enthalten.

Dieser hohen Bandbreite an Behandlungsvarianten und Bestandesformen muss für die Simulation der Holzqualität der Fichte Rechnung getragen werden, indem bei der Parametrisierung der Modelle zur Beschreibung der Holzeigenschaften verschiedenste Wuchsräume vom Dichtstand bis zum Solitär zu erfassen sind. Besonders gilt dies im Hinblick auf das Astmodell. Eine zu schmale Datenbasis, besonders in den extremen Bestandesformen, hätte unwillkürlich eine unzureichende Nachbildung der Zusammenhänge zur Folge und würde den Einsatzbereich des Simulators mit dem Holzqualitätsmodell stark einschränken.

Verfügbare Baumarten

In SILVA 2.2 sind Wachstumsprognosen für die Baumarten Fichte (*Picea abies* [L.] KARST.), Weißtanne (*Abies alba* MILL.), Kiefer (*Pinus sylvestris* L.), Buche (*Fagus sylvatica* L.) und Eiche (*Quercus petraea* [MATT.] LIEBL., *Quercus robur* L.) in Rein- und Mischbeständen möglich. Damit sind die wirtschaftlich relevanten Hauptbaumarten im Parametrisierungsgebiet abgedeckt. Vorläufige Parametrisierungen für Ahorn (*Acer pseudoplatanus* L., *Acer platanoides* L.), Erle (*Alnus glutinosa* L. GAERTN.) und Esche (*Fraxinus excelsior* L.) runden die abgedeckte Artenpalette weiter ab.

3.3.4 Eingaben – Input

SILVA baut, wie bereits beschrieben, räumliche Bestände immer explizit aus Einzelbäumen auf. Trotzdem kann der Simulator mit Eingabedaten unterschiedlichster Auflösung umgehen. SILVA verarbeitet auf der einen Seite sehr detaillierte Eingangsdaten und gewährleistet so, dass die zur Prognose verwendeten Startwerte möglichst genau der Wirklichkeit entsprechen. So können für alle Bäume Stammfußkoordinaten, BHD, Höhe, Kronenansatzhöhe und Kronenbreite vorgegeben werden. Ebenso ist es möglich, mit einer Kennung das Ausscheidungsdatum bzw. den Entnahmezeitpunkt jedes Baumes vorab zu spezifizieren.

Auf der anderen Seite reichen auch wenige Minimaleingaben zur Flächenbeschreibung aus. Diese umfassen die Flächengröße mit rechteckiger Form und die Vorgabe von zwei aus drei Bestandesmittelwerten (Durchmesser des Grundflächenmittelstammes, Stammzahl pro Hektar und Grundfläche pro Hektar) für jede simulierte Baumart. Über eine Strukturzeugungsroutine werden aus diesen Bestandesmittelwerten dann plausible Bestände aufgebaut.

Eine weitere Möglichkeit, Bestände aus relativ wenigen Daten zu erzeugen, stellt die integrierte Inventurschnittstelle bereit, die aus einfachen oder konzentrischen Probekreisdaten Bestände generieren kann. Dabei werden Kopien mit der Struktur des Probekreises nach zufälliger Rotation in der Himmelsrichtung auf der Fläche ausgestreut, bis der Platz besetzt ist. Dann werden nach plausiblen Punktprozess-Mustern Bäume in die verbleibende Zwischenbereiche ausgebracht.

Diese Eingabemöglichkeiten in variablen Auflösungen sind möglich, da fehlende Informationen über den eingebauten Strukturgenerator STRUGEN plausibel ergänzt werden (PRETZSCH 1993). So generiert SILVA stets die relativ genau beschriebenen Bestände, die zur Simulation nötig sind, aus den zur Verfügung stehenden Daten, wobei es durch seine flexible vielskalige Einlesemöglichkeiten einen maximalen Teil an realen Daten einbringt und so die Beschreibungsgenauigkeit der Ausgangsbestandes so groß wie möglich hält.

Modelle zur Beschreibung von Holzeigenschaften benötigen durch die hohe räumliche Auflösung der Zielgrößen meist mehr Daten über die Baummorphologie als verfügbar sind. Der Erzeugung von plausiblen Startwerten kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Je enger diese Startwerte an leicht messbare Baumdimensionen geknüpft werden, desto einfacher ist es, eine ausreichende empirische Datenbasis zur Fortschreibung zur Verfügung zu haben.

Obligatorisch müssen Standorteinstellungen angegeben werden, die in unterschiedlicher Auflösung eingehen können. Als Minimalanforderung ist eine Wuchsbezirkszugehörigkeit anzugeben. Die Standortangaben sind bewusst auf einem Niveau gehalten, das mit den Informationen der üblichen Standortkartierung abgedeckt werden kann.

Die Standorteinstellungen können aber auch sehr genau an die jeweilige Situation angepasst werden. Durch eine detaillierte Angabe von Standortparametern, wie Niederschlag in der Vegetationsperiode, Länge der Vegetationszeit oder CO₂-Gehalt der Luft kann eine breite Palette an Standortvariablen in ihrer Wirkung auf den Zuwachs abgebildet werden.

3.3.5 Programmsteuerung – User interface

Es sind zwei Bedienungsvarianten für SILVA möglich, eine automatisierte Variante, die über Dateien gesteuert wird und der Verarbeitung großer Datenmengen dient und eine menügesteuerte Variante, die eine effektive Bedienung für bestandesbezogene Prognosen erlaubt.

Die automatisierte Bedienungsvariante sieht ausschließlich eine algorithmische Steuerung der Behandlung vor, während in der menügesteuerten Bedienungsvariante wahlweise auch Bäume manuell am Stammverteilungsplan zur Entnahme gekennzeichnet werden können. Eine wissenschaftliche Programmversion ermöglicht zusätzlich ein realitätsnahes Auszeichnen der Entnahmebäume im virtuellen dreidimensionalen Bestand.

Ein interaktives Ändern von Modellgleichungen und Koeffizienten ist in SILVA nicht vorgesehen, um Fehleinstellungen zu vermeiden.

Das Abspeichern von Zwischenergebnissen ist dank der Datenbankschnittstelle problemlos realisierbar.

3.3.6 Ausgaben – Output

Das Konzept variabler Auflösung, das für die Eingabe beschrieben wurde, ist auch in der Ausgabe umgesetzt. Auch hier wird durch die Datenbankschnittstelle ein schneller normierter Zugriff auf die Daten ermöglicht, der eine Voraussetzung für die weitere Bearbeitung und Visualisierung der Daten ist. Bei der Datenausgabe ist nicht nur eine Anpassung des Formates an die Benutzerbedürfnisse entscheidend, sondern auch eine flexible Ausgabe verschiedener Zielgrößen.

In SILVA können die Daten der Entwicklung aller Einzelbäume als Textdatei ausgegeben werden. Eine Datenaggregation ist auf der Basis von Bestandessummenwerten möglich. So stehen 17 Bestandeskennwerte zur naturalen Produktion zur Wahl, deren Entwicklung im Verlauf der Simulation grafisch oder als Textdatei ausgegeben werden kann. Die Bestandeskennwerte beschreiben wichtige Wachstumsgrößen für den verbleibenden und ausscheidenden Bestand wie den Vorrat, die Durchmesser- und Grundflächenentwicklung oder die Höhenentwicklung. Neben Kennwerten zur Naturalproduktion können auch solche zur Ökonomie (zum Beispiel Sortimentanfänge, Wertleistung, Wertzuwachs) und Indizes zu Bestandesstruktur und -diversität (z.B. Artprofil-Index, Aggregationsindizes, Mischungsindizes, Paar- und Markenkorrelationsfunktionen) für einen simulierten Waldbestand ausgegeben werden. Weiterhin können über Schätzfunktionen aus den Baumdimensionen Biomassefraktionen hergeleitet werden. Damit gliedert sich die Ausgabe der Simulationsergebnisse in drei große Teilbereiche. Sie deckt Größen der Naturalproduktion, der Ökonomie und strukturbeschreibende Aussagegrößen ab, auf deren Grundlage eine ökologische Bewertung der Bestandesentwicklung möglich ist.

Im automatisierten Betriebsmodus lassen sich Bestandeskennwerte zusätzlich zum Beispiel für einen gesamten Forstbetrieb als Grafik oder als Datei abrufen. Bei Prognosewiederholungen wird auch die enthaltene Streuung angegeben.

An Visualisierungsmöglichkeiten der Ergebnisse bietet SILVA neben zweidimensionalen Ergebnisgrafiken auch Kronenkarten, Schrägansichten und frei drehbare dreidimensionale Bestandesansichten. Eine erweiterte Darstellung von Beständen ist über die Anbindung an das Visualisierungsprogramm Treeview (PRETZSCH und SEIFERT 1999, SEIFERT, S.1998) möglich, das ein dreidimensionales Begehen und „Durchfliegen“ des Bestandes in Echtzeit erlaubt.

3.4 Ansatz für die Integration von Qualitätsmodellen in SILVA

Approach for the integration of wood quality models in SILVA

Der Waldwachstumssimulator SILVA bildet die Brücke zwischen der Simulation der Bestandesbehandlung und der resultierenden Holzqualität. Die Modellierung der Holzqualität soll deshalb methodisch unter der Prämisse einer möglichst weitgehenden Nutzung der Informationen und der Funktionalität des Waldwachstumssimulators erfolgen, um eine optimale Interaktion der Modellteile zu gewährleisten.

Konkret bedeutet dies, dass eine räumliche und zeitliche Kompatibilität der Auflösung der waldwachstumskundlichen und den holzkundlichen Modellteile vorgesehen werden muss. Dadurch können einerseits die Eingangsgrößen und vorhandenen Modellstrukturen von SILVA bestmöglich in der Holzqualitätsmodellierung genutzt und andererseits die Ergebnisse der Qualitätsprognose wieder in SILVA weiter verwendet werden.

Wichtige methodische Fragen, die in diesem Zusammenhang geklärt werden müssen, sind:

- Wie müssen die benötigten zeitlichen und räumlichen Skalen des Wuchssimulators SILVA und des Qualitätsmodells angepasst werden?
- Mit welchen methodischen Ansätzen der Modellierung lassen sich die definierten Ziele erreichen?
- Wie müssen die Untermodelle von SILVA und des Qualitätsmodells interagieren, um eine realistische Reaktionsfähigkeit gegenüber dem Wuchsraum und der Wuchsraumänderung zu erhalten. Welche Schnittstellen sind zu definieren? Welche Eingangswerte braucht das Qualitätsmodell zusätzlich? Wie lassen sich die Ergebnisse des Qualitätsmodells in SILVA integrieren?

3.4.1 Anpassung der Skalenbereiche – *Adaption of scales*

SILVA bildet räumliche Strukturen im Skalenbereich vom Forstbetrieb bis hin zum Baumkompartiment ab (Abb. 3-3). Der Stamm und die Krone als Baumkompartimente werden bereits in SILVA nachgebildet. Die benötigten räumlichen Skalen für das angestrebte Qualitätsmodell liegen in der Beschreibung des Stammes und der Äste auf der Ebene der Baumkompartimente bzw. Baumorgane.

Äste sind in SILVA ursprünglich allerdings nicht vorgesehen und müssen im Rahmen des Holzqualitätsmodells eingeführt werden. Es gilt demnach die räumliche Auflösung des Gesamtmodells in der Richtung der Baumkompartimente von reinen Kronengrößen zu einer Astbeschreibung hin zu erweitern.

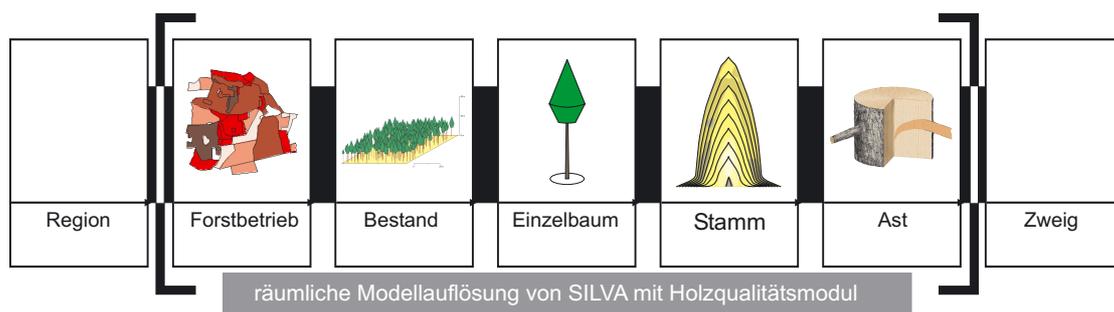


Abbildung 3-3: Räumliche Modellskalen in SILVA nach Integration der Holzqualitätsmodelle – *spatial model range of SILVA with integrated wood quality model*

Die zeitliche Auflösung von SILVA ist auf fünfjährige Simulationsschritte beschränkt. Höhere zeitliche Auflösungen sind nicht vorgesehen, aber bei einer Qualitätsbeurteilung wünschenswert, wenn zum Beispiel genaue Aussagen über die Fäuleausbreitung im Stamm getroffen werden sollen oder die Astposition in jährlich gebildeten Quirlen entlang der Stammachse definiert werden muss. Durch Interpolation zwischen den Fünfjahresintervallen lässt sich eine Auflösung in Jahresschritten erreichen.

3.4.2 Wahl der grundsätzlichen Modellmethodik – *Model principles*

Die verwendete Modellmethodik leitet aus empirischen Aufnahmen Zusammenhänge ab, die statistisch, mathematisch formuliert werden. BOSSEL (1992) nennt diese Art der statistischen Modellbildung „systembeschreibend“, da in der Regel lediglich eine Verhaltensübereinstimmung von Modell und Wirklichkeit angestrebt wird, nicht jedoch ein Verständnis der

zugrunde liegenden Wirkungsstrukturen wie bei „verhaltensklärenden Modellen“ (BOSEL 1992, S. 37). Der Übergang zwischen beiden Ansätzen ist jedoch fließend. Je mehr erklärende Eingangsgrößen in empirisch fundierte, verhaltensbeschreibende Modelle einbezogen werden, desto mehr nähern sie sich den verhaltensklärenden, oft als „mechanistisch“ bezeichneten Modellen an. Die verhaltensklärenden Modelle bedürfen hingegen ihrerseits auch auf einer gewissen Ebene der empirischen Parametrisierung.

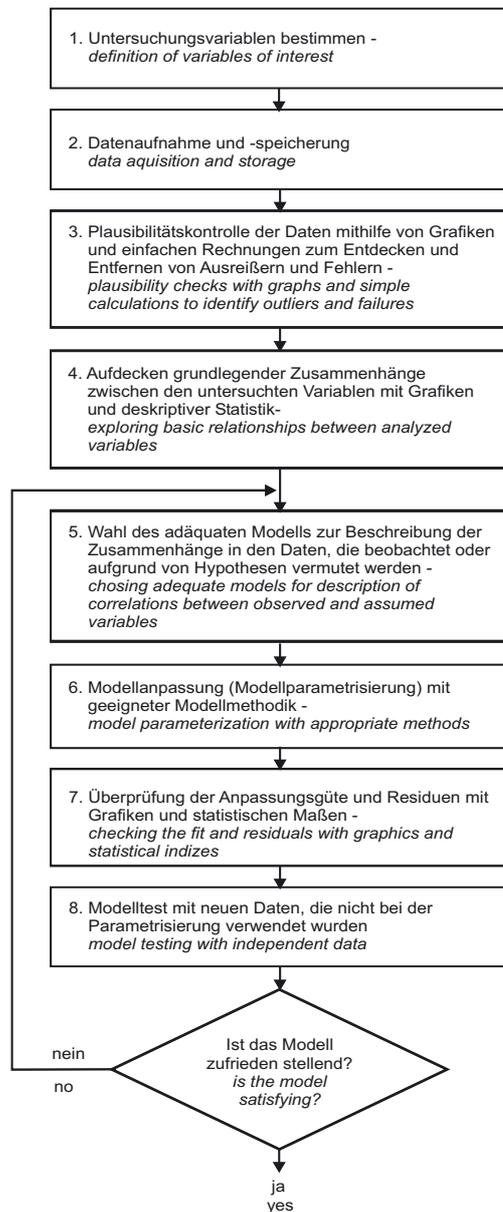


Abbildung 3-4: Prozess der statistischen Modellbildung. Verändert nach KOLOSOVA und BERESTIZHEVSKY (1998). *Process of statistical modeling (modified after KOLOSOVA and BERESTIZHEVSKY 1998)*

Das Ziel dieser Arbeit ist, neben der Nachbildung der Holzeigenschaften selbst, auch die Identifizierung und Quantifizierung der relevanten Einflussgrößen. Nur so lassen sich Ergebnisse erzielen, die über die untersuchten Bäume und Bestände hinaus übertragbar sind. In der vorliegenden Arbeit werden deshalb zahlreiche empirische Modelle entwickelt, um einzelne Holzeigenschaften zu beschreiben, die anschließend in Computercode implementiert werden und dann als Teil des Simulators fungieren. Die prinzipielle Vorgehensweise bei der Konstruktion der Einzelmodelle ist im Anhang an KOLOSOVA und BERESTIZHEVSKY (1998) in Abbildung 3-4 beschrieben:

Der in Abbildung 3-4 beschriebene Ablauf der statistischen Modellbildung bezieht sich auf die Erstellung eines Einzelmodells. In der Simulation wirken allerdings zahlreiche Einzelmodelle zusammen, um eine ausreichende Beschreibung eines Holzmerkmals zu gewährleisten. Als Beispiel sei hier die Astmodellierung angeführt, bei der Einzelmodelle zur Astposition, zur Astdimension und zum Aststatus zusammen zur Charakterisierung der Astigkeit benötigt werden. Diese Einzelmodelle sind zum Teil derart miteinander verknüpft, dass die Ergebnisgröße des einen Modells im nächsten Teilmodell wiederum als Eingangsgröße benutzt wird. Durch diese vertikale Modellintegration bei der Simulation gilt es auch besonders das Zusammenspiel der Teilmodelle zu berücksichtigen und auf eine Passfähigkeit der verwendeten Methodik in der Simulation zu achten.

Ein Aspekt betrifft dabei die Implementation linearer oder nichtlinearer Regressionsansätze im Simulator, wie sie in dieser Arbeit zur quantitativen statistischen Modellierung der Holzeigenschaften herangezogen werden.

Zur Simulation werden Regressionsmodelle verwendet, um die Abhängigkeit eines Merkmals von einer oder mehreren Variablen funktional auszudrücken. Eine allgemeine Formulie-

ung für einen regressionsanalytisch bestimmten Zusammenhang beschreibt den Erwartungswert \hat{E} der Zielgröße als Funktion der unabhängigen Variablen x und der durch das verwendete Modell nicht erklärten Residualstreuung ε (Formel 3-1).

$$\hat{E} = f(x) + \varepsilon \quad \text{Formel 3-1}$$

Die Nachbildung in der Simulation kann dabei rein deterministisch oder zusätzlich mit stochastischen Modellkomponenten erfolgen. Aus deterministischen Ansätzen resultieren ausschließlich Erwartungswerte ohne Reststreuung, was in wiederholten Simulationsläufen bei gleichen Eingangswerten immer zum selben Ergebnis führt (Formel 3-2).

$$\hat{E} = f(x) \quad \text{Formel 3-2}$$

Modelle mit stochastischen Komponenten berücksichtigen zusätzlich die natürliche Streuung der Holzeigenschaften und geben diese Streuung auch im Simulationsergebnis wieder. Es können dabei Aussagen über die zu erwartenden Wahrscheinlichkeiten verschiedener Ausprägungen von Holzeigenschaften und deren Streuung getroffen werden.

In der Simulation wird dazu ein Regressionsmodell zur Nachbildung des Erwartungswertes (Formel 3-2) mit einem Modell kombiniert, das mit Hilfe der Residuen aus dem ersten Modell eine Wahrscheinlichkeitsverteilung generiert und in einem randomisierten Prozess schließlich die Zielgröße nach dieser Wahrscheinlichkeitsfunktion bestimmt (Formel 3-3). Meist wird als Verteilung eine Normalverteilung herangezogen, die über den Erwartungswert \hat{E} und die Standardabweichung σ^2 definiert wird. Die Zielgröße \hat{y} streut bei einer Wiederholung der Simulation um den Erwartungswert im festgestellten Streubereich, wobei Simulationsergebnisse \hat{y} um den Erwartungswert am wahrscheinlichsten reproduziert werden und die Wahrscheinlichkeit eines Simulationsergebnisses mit der Entfernung von \hat{E} nach der Normalverteilungsfunktion abnimmt.

$$\hat{y} = N(\hat{E}, \sigma^2) \quad \text{Formel 3-3}$$

Bei Regressionsmodellen, welche Dimensionsgrößen eines biologischen Merkmals aus der Dimension eines anderen biologischen Merkmals schätzen (z. B. den Astdurchmesser aus der Astlänge) treten häufig heteroskedastische Residuenverteilungen auf. Dies bedeutet, mit zunehmender Größe des Erwartungswertes steigt die Streuung der Residuen. Diese Abhängigkeit der Streuung vom Erwartungswert wird durch ein Residuenmodell nachgebildet, das den Zusammenhang in einem weiteren deterministischen Regressionsmodell ausgleicht (Formel 3-4).

$$\sigma^2 = g(\hat{E}) \quad \text{Formel 3-4}$$

Bei der Simulation wird nun zuerst der Erwartungswert (Formel 3-2) bestimmt, dann wird in einem zweiten Schritt aus dem Residuenmodell (Formel 3-4) die zugehörige Standardabweichung σ^2 berechnet. Über diese zwei Kenngrößen wird nun die Wahrscheinlichkeitsverteilung definiert und mit der Hilfe eines Zufallsgenerators ein Simulationswert \hat{y} ermittelt (Formel 3-3).

Da die Varianz der Holzmerkmale in der Regel eine wichtige Rolle für die Holzqualität spielt, werden in dieser Arbeit stochastische Modellansätze nach dem vorgestellten mehrstufigen Ansatz deterministischen bei der Simulation vorgezogen. Damit fügt sich das Holzqualitätsmodell in dieser Hinsicht nahtlos in den methodischen Ansatz von SILVA ein.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Simulation liegt in der Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung eines Holzmerkmals. Dabei wird zwischen statischen und dynamischen Modellen unterschieden. Bei der statischen Modellierung wird die Zielgröße direkt aus den Ergebnissen anderer Teilmodelle geschätzt. Bei Veränderung der übrigen Modellgrößen wird auch die Zielgröße nach dem benutzten funktionalen Zusammenhang neu gesetzt. Ein Beispiel wäre die Direktschätzung der Kronenansatzhöhe KA aus der Baumhöhe H , dem BHD und dem H/D-Wert HD (Formel 3-5).

$$KA = f(H, BHD, HD) \quad \text{Formel 3-5}$$

Direktschätzungen haben häufig den Nachteil, zeitliche Veränderungen sehr sprunghaft darzustellen und können somit zu biologisch unplausiblen Modellverhalten führen, wenn die Entwicklung einer Zielgröße über die Zeit simuliert wird. So kann es beispielsweise bei der Simulation der Kronenansatzhöhe zu unplausibel starken Kronenansatzverlagerungen kommen, obwohl mit den Eingangsgrößen BHD , Höhe und H/D-Wert dynamisch geschätzte Modellkomponenten vorliegen, die sich selbst plausibel verhalten.

Eine Lösung bietet eine dynamische Modellierung der Zielgröße über die Zeit. Für die Schätzung der Kronenansatzhöhe KA wäre dies beispielsweise durch ein Modell möglich, das die Höhe der Kronenbasis aus der Kronenansatzhöhe der Vorperiode KA_{t-1} und der Konkurrenz CI vorhersagt.

$$KA_t = f(KA_{t-1}, CI) \quad \text{Formel 3-6}$$

Diese dynamische Modellierung des Kronenansatzes als primäre Zielgröße verhindert unplausible Sprünge in der Simulation, da die Kronenansatzhöhe der Vorperiode schon ins Modell eingeht und die Schranken für die weitere Entwicklung setzt.

Für die Fortschreibung werden in dieser Arbeit deshalb, wenn möglich, Modelle eingesetzt, welche die Zielgröße selbst dynamisch über Zuwachsfunktionen schätzen. Direktschätzungen kommen nur dann zum Einsatz, wenn es gilt, Startwerte für die Simulation zu erzeugen, weil die Vorgeschichte der Zielgröße nicht zur Verfügung steht. Diese Herangehensweise verlangt die Änderung einiger etablierter Teilmodelle in SILVA, wie zum Beispiel die Modelle zur Schätzung der Kronenansatzhöhe und Kronenbreite.

3.4.3 Programmstruktur von SILVA mit den integrierten Holzqualitätsmodellen

Program structure of SILVA with wood quality models

Der Modellrahmen von SILVA mit einem Modellteil zur Eingabe, einem Modellkern und einem Ausgabeteil, wie er ursprünglich angelegt war (vgl. Abb. 3-3), kann auch in der Version mit integrierter Holzqualität voll genutzt werden (Abb. 3-5).

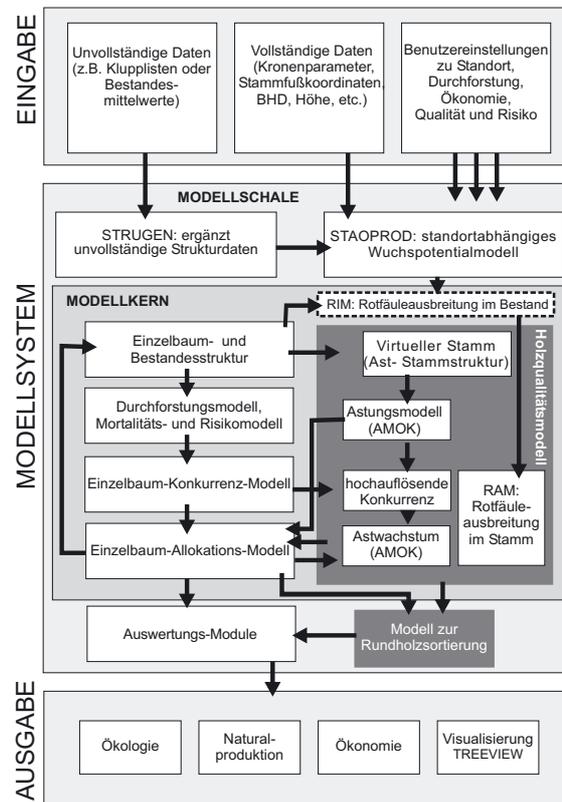


Abbildung 3-5: Programmstruktur von SILVA mit integrierter Holzqualitätsmodellen (dunkelgrau). *Program structure of SILVA with integrated wood quality models in dark gray*

Wie in Abbildung 3-5 dargestellt, bleibt der grundsätzliche Ablauf der Waldwachstumssimulation gleich. Zuerst werden Daten zur Einzelbaum- und Bestandesstruktur eingelesen und wenn nötig in STRUGEN um fehlende Strukturinformationen ergänzt. Zusammen mit den Benutzereinstellungen zu Standort, Durchforstung, Ökonomie und Risiko sind für den Benutzer jetzt auch Eingaben zur Holzqualität und hier vor allem zur Rotfäule und zur Sortierung möglich. Nachdem im Standort-Leistungs-Modell STAOPROD das Wachstumspotential der Bäume auf dem gegebenen Standort festgelegt wurde, beginnt die eigentliche Simulation im Modellkern von SILVA, bei der vier grundlegende Modellschritte für jede fünfjährige Prognoseperiode der Wachstumssimulation durchlaufen werden:

- Zuerst werden dabei die Strukturdaten genutzt, um dreidimensionale Bestände aus Einzelbäumen aufzubauen.
- Im nächsten Schritt berechnen Durchforstungs-, Mortalitäts- und Risikomodelle, ob sich die Bestandesstruktur durch den Ausfall oder die Entnahme von Bäumen ändert.

- Im dritten Schritt wird im Einzelbaum-Konkurrenz-Modell für jeden Baum der Konkurrenzwert ermittelt, dem er aufgrund seiner räumlichen Umgebung ausgesetzt ist.
- Im letzten Schritt wird dem Baum im Einzelbaum-Allokationsmodell sein Höhen-Durchmesser- und Kronenzuwachs für die Periode zugewiesen. Dieser ergibt sich aus dem standörtlichen Potenzial und der Konkurrenzsituation, die im vorangegangenen Schritt berechnet wurde.

Die Modellschritte im eigentlichen Modellkern werden solange durchlaufen, bis die voreingestellte Simulationsdauer erreicht ist.

Auswertungsmodule, die dem Modellkern nachgeschaltet in der Modellschale angesiedelt sind, fassen die Ergebnisse der Wachstumsprognose zum Teil mithilfe der vorher getätigten Benutzereinstellungen zusammen und führen die Prognoseergebnisse den eigentlichen Ausgabefunktionen des Simulators zu. SILVA stellt dabei Ausgabewerte zur Naturalproduktion, Ökologie und Ökonomie zur Verfügung und bietet zudem die Möglichkeit einer dreidimensionalen Waldvisualisierung.

Wie in der Abbildung 3-5 durch eine dunkelgraue Schraffur dargestellt, wird SILVA um drei neue Modellteile erweitert. Erstens einen Modellteil zur Simulation der Rotfäuleausbreitung im Einzelbaum „RAM“, einen Modellteil zur Simulation der Astentwicklung unter Konkurrenz „AMOK“ und ein Sortiermodell zur Bewertung von Rundholzqualität. Die Teile des Holzqualitätsmodells, sind in der Abbildung entsprechend den Modellschritten in SILVA in funktionale Gruppen aufgeteilt. Auf der linken Seite ist der SILVA-Ablauf illustriert, auf der rechten die analogen Schritte im Modell zur Prognose der Holzeigenschaften. Das Holzqualitätsmodell arbeitet dabei parallel zum gesamten SILVA-Ablauf im Programmkern.

3.4.4 Interaktion der Untermodelle – *Interaction between submodels*

Auf der Ebene der Einzelbaum- und Bestandesstrukturen findet sich ein Teilmodell zur Beschreibung der Aststrukturen. Dieser Modellblock ist Teil des Astmodells „AMOK“. Zusammen mit Informationen aus anderen Modellteilen zum Stammvolumen, der Stammform, dem Jahrringbau und der Gesundheit differenziert nach Weich- und Hartfäule erlaubt es den Aufbau eines „virtuellen Stammes“ für jeden Baum. Dieser ist die Kernstruktur für alle qualitätsrelevanten Holzmerkmale im Holzqualitätsmodell.

Das Astungsmodell, ebenfalls ein Teilmodell von AMOK, definiert waldbauliche Eingriffe durch Astung analog zum Durchforstungsmodell von SILVA. Dabei werden Benutzereingaben zu Astungshöhe und -zeitpunkt und den Astungsbäumen benötigt.

Das Modell von SILVA zur Berechnung der Konkurrenz jedes Einzelbaumes wird durch ein Modell zur hochauflösenden, richtungsabhängigen Konkurrenzberechnung ergänzt, welches die Voraussetzung für das Astwachstum im Rahmen von AMOK bietet.

Auf der gleichen Ebene angesiedelt ist das Rotfäuleausbreitungsmodell RAM, welches zwar keine direkte Konkurrenzabhängigkeit nutzt, jedoch ein Wachstum der Rotfäule im Stamm in Abhängigkeit vom Baumwachstum nachbildet. Das Rotfäuleausbreitungsmodell RAM nutzt ebenfalls Benutzereinstellungen zur Qualität und ist gekoppelt an das Rotfäuleinfektionsmodell „RIM“, welches die Ausbreitung des Wurzelschwammes im Bestand nachbildet.

Zur Ergebnisaggregation und -bewertung wird SILVA noch um ein Modell zur qualitätssensitiven Rundholzsortierung erweitert, das außerhalb des eigentlichen Programmkerns angesiedelt ist und die Holzeigenschaften jedes modellierten Bestandesbaumes normativ nach Dimensions- und Güteigenschaften bewertet. In diesem Modellteil werden wiederum Benutzereingaben benötigt, um die anzuwendende Sortiernorm und die Sorten festzulegen.

Folgende etablierte Modellteile von SILVA werden im Rahmen der Erweiterung angepasst:

- Einzelbaum-Struktur
- Einzelbaum-Konkurrenz-Modell
- Einzelbaum-Allokations-Modell
- Auswertungs-Module

Nachstehende Schnittstellen von etablierten Untermodellen in SILVA (links) mit den hinzu gekommenen Teilmodellen der Holzqualitätsprognose (rechts) müssen definiert werden:

Einzelbaumstruktur \leftrightarrow Astmodell AMOK
Rotfäuleinfektionsmodell RIM \leftrightarrow Rotfäuleausbreitungsmodell RAM
Einzelbaumzuwachs \leftrightarrow Rotfäuleausbreitungsmodell RAM
Einzelbaumzuwachs \leftrightarrow Astungsmodell (AMOK)
Massensortierung (BDAT) \leftrightarrow Qualitätssortierung

Innerhalb der neuen Modellteile selbst ergeben sich folgende Interaktionen:

Hochauflösende Konkurrenz \leftrightarrow Astmodell AMOK
Astwachstum (AMOK) \leftrightarrow Astungsmodell (AMOK)
AMOK \leftrightarrow Qualitätssortierung
RAM \leftrightarrow Qualitätssortierung

Eine eingehendere Charakterisierung der Schnittstellen und Interaktionen findet sich in den folgenden Kapiteln 4, 5 und 6, die der Modellbeschreibung gewidmet sind.

3.4.5 Abgleich der Ein- und Ausgaben – *Adjustment of input and output*

SILVA stellt die grundlegenden Eigenschaften für die dreidimensionale Beschreibung der Bestandes- und Einzelbaumstrukturen zur Verfügung. Zusätzlich definiert der Nutzer in SILVA den Standort sowie die Bestandesbehandlung. Weitere Einstellungen sind nötig, um die Astung und die Rotfäuleausbreitung im Einzelbaum zu simulieren. Ergänzt werden müssen auch die Vorgaben der Sortimentsbildung, so dass neben Dimensionsgrößen Sortimente auch gütedifferenziert definiert werden können. Deren preisliche Bewertung, die bisher in SILVA nur nach einem Durchschnittspreis für definierte Dimensionen möglich ist, muss ebenso angepasst werden.

Die Ergänzung der Ausgabe in SILVA durch die Integration der Holzqualität betrifft in erster Linie ökonomische Größen, die eine nach Qualität differenzierte Bestandesbewertung zulassen. Die neuen Ausgaben umfassen vor allem die genaue Sortenstruktur nach Dimension und Qualität, den simulierten Holzverlust durch Rotfäule und den Verlauf der Rotfäuleausbreitung im Stamm.

Zudem können auch Beiträge zur Verbesserung des Visualisierungsmoduls Treeview (SEIFERT, S. 1998) geleistet werden, das auf das Astmodell zur realitätsnahen Darstellung von Fichten zurückgreifen kann.

Durch den hohen Integrationsgrad von SILVA mit dem Qualitätsmodell wird die Kommunikation der Einzelmodelle zu einem hohem Maße intern abgewickelt, so dass die sequenzielle Verarbeitung von externen Dateien über Ein- und Ausgabevorgänge minimiert ist. Stattdessen werden bereits vorhandene Ein- und Ausgaberroutinen genutzt und bei Bedarf an das zusätzliche Informationsangebot angepasst.

4 Modellierung der Astigkeit – *Modeling branchiness*

Dieses Kapitel widmet sich der Entwicklung eines Simulationsmodells, das für die Fichte die Astigkeit dreidimensional als Ergebnis der waldbaulichen Behandlung nachbildet. Es gliedert sich in drei Unterkapitel.

Das Unterkapitel 4.1 dient der Definition wichtiger Begriffe und einer kurzen Darstellung der Bedeutung von Krone und Ästen. Die Datengrundlage, auf denen die Untersuchung der zugrunde liegenden Zusammenhänge und die Modellbildung in den folgenden Unterkapiteln basieren, wird kurz im Unterkapitel 4.2 vorgestellt. Das Unterkapitel 4.3 gibt dem Leser einen Überblick über relevante statistische Zusammenhänge des Kronen- und Astwachstums, als Basis für die Modellbildung. Es werden dabei die wichtigen Größen zur Beschreibung der Aststruktur herausgearbeitet und relevante Einflussfaktoren auf diese Größen beschrieben, die im Rahmen dieser Arbeit gewonnen werden konnten. Diese werden in den Kontext des bekannten Wissens eingeordnet. Im Unterkapitel 4.4 werden die aus diesen Zusammenhängen entwickelten Zielgrößen und der Modellansatz vorgestellt. Die auf dieser Basis erarbeiteten Modelle zur Simulation der Astigkeit werden im Einzelnen besprochen und mathematisch formuliert. Die Modelle bilden in ihrer Gesamtheit das „Astmodell unter Konkurrenzeinfluss“ (AMOK). Auf die eigentliche Modellimplementation von AMOK in die Simulationsumgebung und die Benutzerschnittstelle des Programms wird schließlich im Unterkapitel 4.5 eingegangen.

4.1 Ziele der Astmodellierung – *Objectives of modeling branches*

Ein Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist die plausible Nachbildung der Astigkeit der Fichte. Dabei liegt ein Schwerpunkt auf der räumlichen Modellierung konkurrenzabhängiger Einflüsse auf die Astentwicklung. Einige wichtige Begriffe zu dieser Thematik sollen im Folgenden definiert werden:

Äste

Wenn im Rahmen dieser Arbeit von „Ästen“ gesprochen wird, sind immer Seitenverzweigungen erster Ordnung (S1-Achsen) darunter zu verstehen (SCHÜTT et al. 1992). Nur solche Äste sind bei der Bestimmung der Holzqualität der Fichte relevant. Seitenverzweigungen zweiter (S2-Achsen) oder höherer Ordnung, die von SCHÜTT et al. (1992) als „Zweige“ bezeichnet werden, sind nicht mit dem Stamm verwachsen und haben dadurch auch keinen direkten Einfluss auf seine Holzqualität.

Biogruppe

Der Begriff der Biogruppe wird nicht einheitlich gebraucht. Im Gegensatz zu GREGER (1995), der in der Biogruppe Bäume sieht, welche durch Wurzelfusionen eine Versorgungsgemeinschaft bilden, wird in dieser Arbeit einer abweichenden Definition gefolgt.

Unter „Biogruppe“ sollen hier der Betrachtungsbaum und jene Konkurrenten verstanden werden, von denen angenommen werden kann, dass sie durch Kronenkontakt oder Lichtkonkurrenz das Wachstum des Baumes beeinflussen. Eine innige Verzahnung der Kronen oder gar Wurzelfusionen, die in den seltensten Fällen tatsächlich bestimmt werden können, sind nicht Voraussetzung für die Zuweisung eines Baumes zur Biogruppe. Unter einer Biogruppe wird demnach in dieser Arbeit eine gemessene Baumgruppe mit einem Probebaum und den zugehörigen Konkurrenten verstanden.

Konkurrenz

„Konkurrenz“ im biologischen Sinne ist der „Wettstreit zwischen Organismen um Nahrung, Lebensraum, Wasser, Licht und andere ökologische Erfordernisse, die nur begrenzt verfügbar sind“ (BROCKHAUS 1991).

In der vorliegenden Arbeit soll unter „Konkurrenz“ besonders die Konkurrenzwirkung anderer Bäume auf einen Betrachtungsbaum verstanden werden. Sie ergibt sich aus der räumlichen Wuchskonstellation von Betrachtungsbaum und Konkurrenten und begrenzt das Wachstum des Betrachtungsbaumes. Wird von symmetrischer Konkurrenz bzw. asymmetrischer Konkurrenz gesprochen, ist dies in diesem Zusammenhang als räumlich nach der Himmelsrichtung differenzierte Konkurrenzwirkung zu verstehen.

Waldbauliche Bestandesbehandlung

Unter „waldbaulicher Bestandesbehandlung“ ist die gezielte Steuerung oder Regelung der Konkurrenzsituation der Bestandesbäume zu verstehen. Dies geschieht in erster Linie durch die Wahl des Pflanzverbandes und über Durchforstungseingriffe.

Die Wechselwirkung zwischen Konkurrenz und Baumzuwachs erläutern HARI (1985) und PRETZSCH (1992), die das System als Regelkreis auffassen, in dem sich Bestandesstruktur, Wuchskonstellation und Einzelbaumzuwachs wechselseitig beeinflussen. BURTON (1993) legt dar, dass die aus der Wuchssituation resultierende Konkurrenz das Wachstum nicht alleine steuert, sondern vielmehr ein standörtlich und genetisch vorgegebenes Potenzial limitiert, das der Baum nur ohne Konkurrenz voll auszuschöpfen vermag. Eine konkurrenzabhängige Sensitivität

auf Standortsänderungen stellen CESCATTI und PIUTTI (1997) fest, sodass auch Wechselbeziehungen zwischen Genetik, Standort und Konkurrenz im Einfluss auf das Baumwachstum anzunehmen sind.

Als besonders wichtiges konkurrenzgesteuertes Baumkompartiment besitzt die Krone in vieler Hinsicht eine zentrale Bedeutung für Wachstum und Holzqualität. Über die Krone versorgt sich der Baum mit Assimilaten, besetzt den Raum, regelt das Mikroklima und beschattet Konkurrenten (ASSMANN 1961, KRAMER 1988, MITSCHERLICH 1970). Enge Zusammenhänge zwischen den Kronendimensionen (ausgedrückt durch das Kronenprozent, die Kronenmantelfläche oder das Kronenvolumen) und dem Wachstum des Baumes, wie sie zum Beispiel ASSMANN (1961), BURGER (1939), EBERT und DEUSCHLE (2000), PRETZSCH (1992) und SPATHELF (1998) belegen, sind ein Ausdruck für die große Bedeutung der Krone.

Die Krone beeinflusst den Baum auch in mechanischer Hinsicht, da sie über die Verteilung der Ast- und Laubmasse den Baumschwerpunkt mit bestimmt und einen wichtigen Einfluss auf das Schwingungsverhalten bei Wind ausübt (BRÜCHERT und BECKER 2000). Solche biomechanischen Kriterien haben Auswirkungen auf das Wachstum in quantitativer und qualitativer Hinsicht, weil der Baum nicht nur danach streben kann, möglichst viele Ressourcen für sich zu beanspruchen, sondern auch mechanischen Restriktionen unterliegt, die sein Wachstum mit beeinflussen (MATTHECK 1992, METZGER 1893).

Die vielfältige Bedeutung der Baumkrone führt dazu, dass sie bei der Bestandesbehandlung für den Forstpraktiker die Hauptgröße darstellt, über die er die Konkurrenzsituation von Bäumen beurteilt und regelnd ins Bestandesgefüge eingreift. Durch die Entnahme von Konkurrenten wird dabei die Kronenentwicklung ausgewählter Bäume gezielt gefördert. Damit ist die Kronenpflege und die Beeinflussung der Kronenentwicklung ein waldbauliches Schlüsselinstrument, um Wachstum, Qualität und Stabilität von Einzelbäumen und Beständen zu steuern.

Doch die Baumkrone ist kein morphologisch oder physiologisch abgrenzbares Organ, sondern vielmehr eine abstrahierte Hilfsgröße. Sie kann als ein Baumkompartiment verstanden werden, das aus dem oberen Stamm und den Ästen besteht. Die Äste spannen die Baumkrone auf und verleihen ihr durch ihre Dimension und Position die typische Form.

Die Baumkrone ist somit eine aggregierte Beschreibung für die äußere Aststruktur (MÄKINEN 1999). Daher werden in dieser Arbeit die Baumkrone und die Aststruktur als zwei Sichtweisen derselben biologischen Grundstruktur verstanden und auch dementsprechend modelliert.

4.2 Datengrundlage – Data base

Die Datengrundlage für die einzelnen in den Unterkapiteln 4.3 und 4.4 beschriebenen Zusammenhänge und Modelle gründet auf Aufnahmen in Fichtenbeständen aus Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz. Die umfangreichen morphometrischen Analysen der Kronen- und Aststruktur decken dabei Fichten aus Beständen mit einer großen Bandbreite an Baumaltern, Standorten und Behandlungsvarianten ab (Abb. 4-1, Tabelle 4-1).

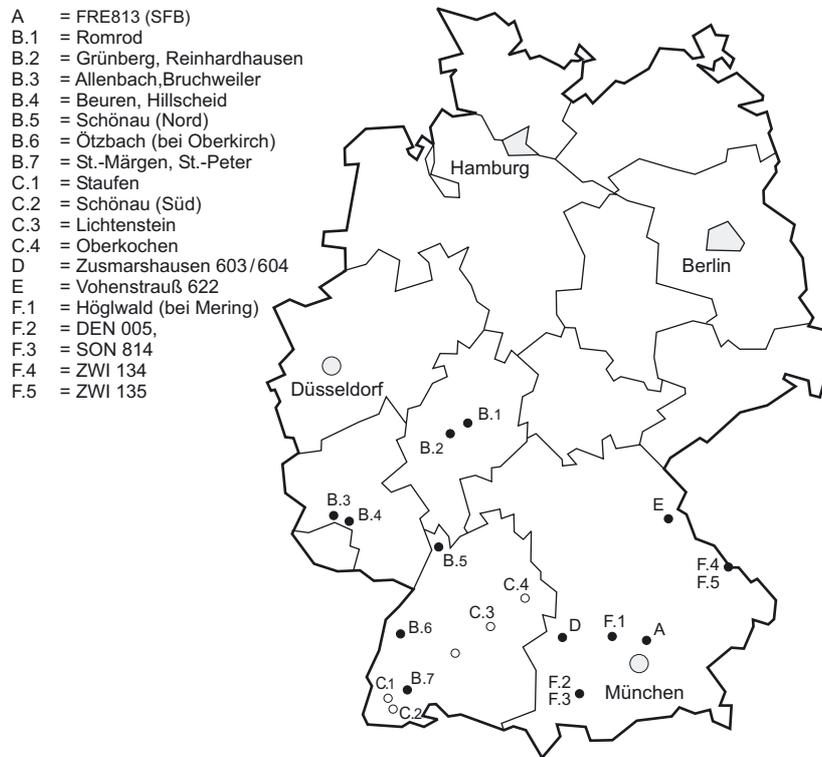


Abbildung 4-1: Übersicht über die Lage der beprobten Bestände. *Overview on the sampled stands*

Tabelle 4-1: Übersicht der Probenkollektive. *Summary of the sample trees*

Datenkollektiv <i>dataset</i>	Baumzahl N	Alter bei der Fällung <i>Age at felling date</i>	Waldbauliche Behandlung	<i>silvicultural treatment</i>
A Freising 813	11	60	gestaffelte Durchforstung	<i>staggered thinning</i>
B.1 Romrod	1	139	solitär	<i>solitary</i>
B.2 Grünberg, Reinhardshain	2	57–130	kronenspannungsarm	<i>low crown tension</i>
B.3 Allenbach, Bruchweiler	10	79–137	kronenspannungsarm	<i>low crown tension</i>
B.4 Beuren, Hillscheid	5	94–132	kronenspannungsarm	<i>low crown tension</i>
B.5 Schönau (Nord)	6	97–99	kronenspannungsarm	<i>low crown tension</i>
B.6 Ötzbach (bei Oberkirch)	2	115–120	solitär	<i>solitary</i>
B.7 St.-Märgen, St.-Peter	11	65–131	kronenspannungsarm	<i>low crown tension</i>

Tabelle 4-1: Übersicht der Probenkollektive. *Summary of the sample trees* (Forts.)

Datenkollektiv <i>dataset</i>	Baumzahl N	Alter bei der Fällung <i>Age at felling date</i>	Waldbauliche Behandlung	<i>silvicultural treatment</i>
C.1 Staufen	29	40–81	solitär	<i>solitary</i>
C.2 Schönau (Süd)	15	21–102	solitär	<i>solitary</i>
C.3 Lichtenstein	20	23–97	solitär	<i>solitary</i>
C.4 Oberkochen	21	19–92	solitär	<i>solitary</i>
D Zusmarshausen 603 / 604	17	37	geometrische Durchforstung/ Z-Baumdurchforstung	<i>geometrical / future tree thinning</i>
E Vohenstrauß 622	35 [281]	23 [28]	geometrische Durchforstung/ Z-Baumdurchforstung	<i>geometrical / future tree thinning</i>
F.1 Höglwald	5	85–94	Niederdurchforstung, Hiebsruhe	<i>Thinning from below, no thinning</i>
F.2 Schongau 814	13	51–104	Niederdurchforstung	<i>thinning from below</i>
F.3 Denklingen 005	4	143	Keine Durchforstung	<i>no thinning</i>
F.4 Zwiesel 134	12	81–100	Auslesedurchforstung	<i>selection thinning</i>
F.5 Zwiesel 135	4	70–73	Auslesedurchforstung	<i>selection thinning</i>

Zur Aufklärung wichtiger Zusammenhänge werden neben den Ergebnissen der eigenen Untersuchungen auch veröffentlichte Resultate anderer Autoren herangezogen. Dieses Wissen wird in der Modellbildung mit den eigenen Untersuchungsergebnissen vernetzt.

Die Datengrundlage ist hinsichtlich des Detailgrades der Erfassung der Ast- und Kronenstruktur unterschiedlich. Die Auflösung der Messungen reicht von der Kronenbeschreibung nach holzmesskundlichen Standardverfahren an vielen Bäumen bis zur detaillierten Messung der Asttrieblängen an einer wesentlich geringeren Baumzahl.

Durch diese Herangehensweise können gefundene Zusammenhänge sowohl auf Asebene als auch auf Einzelbaumebene überprüft werden. Im Folgenden werden die einzelnen Datenkollektive charakterisiert, um einen Überblick über Alter, Standort, Behandlung und die erfassten Astgrößen zu vermitteln.

4.2.1 Kollektiv A: „Freising“ – *Data collective A: “Freising”*

Im Fichten-Buchen-Mischbestand Freising 813 wurden in der Flächenumfassung auf der Parzelle 1 im Frühjahr 1999 sechs Fichten im Alter von 60 Jahren entnommen und vermessen. Im Frühjahr 2000 erfolgte eine Entnahme von weiteren vier Bäumen auf der Parzelle 2. Der Versuchsbestand ist, wie auch die Bestände der Probestaumkollektive D und E, Teil des Ertragskundlichen Versuchflächennetzes in Bayern, das am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Technischen Universität München betreut wird. Die folgenden Angaben zur Versuchsfläche sind überwiegend dem Exkursionsführer zur Wuchreihe Freising entnommen (KAHN et al. 1997).

Lage und Standort

Der Versuchsbestand befindet sich in Kranzberg, nahe Freising im Tertiären Hügelland Bayerns (Wuchsgebiet 12). Er gehört nach der bayerischen Wuchsgebietssystematik zum Wuchsbezirk 09.12.8 „Oberbayerisches Tertiärhügelland“.

Das Ausgangsgestein der Bodenbildung besteht aus tertiärem Material der oberen Süßwassermolasse, aus der vor allem Bodentypen wie Pseudogleye, Braunerden und Parabraunerden hervorgehen. Die frischen Feinlehme auf der beprobten Versuchsfläche neigen stellenweise zur Verdichtung im Unterboden. Ansonsten werden die Böden im Operat der Standorterkundung von 1979 als tiefgründig bis sehr tiefgründig mit geringem Skelettanteil und guter bis sehr guter Nährstoffversorgung beschrieben. Die potenzielle natürliche Waldgesellschaft ist demgemäß ein Hainsimsen-Buchen-Wald (Luzulo-Fagetum).

Mit 814 mm im Jahr bietet das Klima der Fichte ausreichende Niederschläge, die zum Großteil in der Vegetationszeit von Mai bis September niedergehen (476 mm).

Die Jahresmitteltemperatur beträgt 7,7°C und in der Vegetationszeit 15°C, mit ca. 155 Tagen pro Jahr, in denen die Temperatur 10°C übersteigt.

Versuchsziel und ertragskundliche Eckwerte der beprobten Parzellen

Die Anlage der Parzellen der Fläche FRE 813 erfolgte 1994 in ebenem Gelände, mit dem Ziel, zusammen mit fünf weiteren Flächen eine Wuchreihe aufzubauen, mit der die Wuchsdynamik in Fichten-Buchen-Mischbeständen erfasst werden kann. Gleichzeitig sollte auch eine Datenbasis zur Nachbildung von Mischbeständen in Waldwachstumssimulatoren geschaffen werden. Es wurden bewusst Flächen gewählt, die seit längerer Zeit nicht durchforstet worden waren. Man kann jedoch davon ausgehen, dass die bis zur Anlage durchgeführte Behandlung dem Konzept der gestaffelten Durchforstung der bayerischen Staatsforstverwaltung entspricht, das bis zum Stangenholzalter eine Auslesedurchforstung vorsieht und dann auf eine Niederdurchforstung umschwenkt. Tabelle 4-2 bietet einige grundlegende ertragskundliche Charakteristika der beprobten Parzellen mit dem Stand der Aufnahme von 1999, die eine Vegetationsperiode nach der Entnahme der Probestämme von Parzelle 1 und zeitgleich mit der Probebaumentnahme auf Parzelle 2 durchgeführt wurde.

Tabelle 4-2: Ertragskundliche Kennwerte der beprobten Parzellen 1 und 2 auf dem Fichten-Buchen-Mischbestandsversuch FRE 813 zur Aufnahme im Herbst 1999. *Characterisation of the sampled plots 1 and 2 of the spruce-beech mixed forest trial FRE 813 in fall 1999.*

Fläche <i>trial</i>	Parzelle <i>plot</i>	Baumart <i>species</i>	N/ha	H ₀ [m]	D ₀ [cm]	H ₀ /D ₀	MGH	GG [m ²]
813	1	Fichte	522	27,9	41,3	67	30,9	33,4
813	1	Buche	307	25,1	36,5	68	13	13,8
813	1	Gesamt	829				43,9	47,2
813	2	Fichte	532	33,3	46,2	72	50,0	52,1
813	2	Buche	41	33,7	72,5	46	10,4	10,7
813	2	Gesamt	573				60,4	62,7

N = Stammzahl pro Hektar vor der Probenahme, H₀ bzw. D₀ = Höhe bzw. Durchmesser des Grundflächenmittelstammes der 20% stärksten Bäume, MGH = mittlere Grundflächenhaltung; GG = Gesamtgrundfläche, DGZ = durchschnittlicher Gesamtzuwachs

N = stems per ha before sampling, H₀ and D₀ resp. = height and diameter resp. of the 20% dominant trees, MGH = average basal area, GG = total basal area

Die Parzelle 1 bildet gleichzeitig auch die intensiv untersuchte Kernversuchsfläche des von der Deutschen Forschungsgesellschaft geförderten Sonderforschungsbereiches 607 „Wachstum und Parasitenabwehr“ (PRETZSCH et al. 1998)

Messgrößen am Einzelbaum

Ziel der Probebaumentnahme im Frühjahr 1999 war die Klärung der grundlegenden Aststruktur von Fichten mittleren Alters. Dabei sollte über die Erfassung spezifischer morphologischer Astparameter eine Datenbasis zur Modellierung der Astverhältnisse von Fichten geschaffen werden.

Die 6 entnommenen Probebäume aus Parzelle 1 befanden sich alle im reinen Fichtenteil des Bestandes. Bei der Probebaumauswahl wurden vorherrschende, herrschende, mitherrschende und ein beherrschter Baum gewählt, um das soziale Spektrum im Bestand abzudecken. In Tabelle 4-3 sind die entnommenen Probebäume waldwachstumskundlich charakterisiert.

Tabelle 4-3: Waldwachstumskundliche Charakterisierung der 1999 entnommenen Probebäume aus FRE 813 P1 mit der Angabe der Stichprobenzahlen der Astmessungen. Da es sich um Umbaumhandlungen handelt, sind die Baumnummern rein entnahmebedingt vergeben. Bei der Anzahl der Astwerte pro Baum sind die Schichten der Stichproben (SP 1, SP 2, SP 3) angegeben, für die jeweils unterschiedliche Größen gemessen wurden.

Characterisation of the growth of the sample trees with the sampled branches. For the sampled branch numbers the three sample stages (SP 1, SP 2, SP 3) are given, which denote for different variables and sample densities.

Fläche	Parzelle	Nr.	BHD o.R. [cm]	H [m]	H/D	KA [m]	Kronen- Prozent [%]	Astwerte SP 1	Astwerte SP 2	Asttriebe SP 3	
<i>trial</i>	<i>plot</i>	<i>No.</i>	<i>DBH under bark [cm]</i>	<i>height [m]</i>	<i>H/D</i>	<i>crown base</i>	<i>crown percentage</i>	<i>branch sample 1</i>	<i>branch sample 2</i>	<i>branch sample 3</i>	
813	1	100	36,3	30,3	83	13,35	44	167	71	164	
813	1	200	34,3	26,8	78	14,5	54	115	47	172	
813	1	300	28,5	27,2	95	16,6	61	89	34	122	
813	1	400	28,7	23,9	83	13,18	55	98	41	132	
813	1	500	33,3	25,0	75	7,9	32	154	74	186	
813	1	600	19,5	19,8	101	10,15	51	87	40	147	
		Bäume: 6						Summe:	710	307	923

Die 5 Bäume aus Parzelle 2 (Tabelle 4-4) waren zum Teil von Fichten und von Buchen umgeben. Die soziale Stellung der Probebäume auf Parzelle 2 wurde als herrschend charakterisiert.

Tabelle 4-4: Waldwachstumskundliche Charakterisierung der 1999 entnommenen Probebäume aus FRE 813 P2 mit der Angabe der Stichprobenzahlen der Astmessungen. Bei der Anzahl der Astwerte pro Baum sind die Schichten der Stichproben (SP 1, SP 2) angegeben, für die jeweils unterschiedliche Größen gemessen wurden.

Characterisation of the growth of the sample trees with the sampled branches. For the sampled branch numbers the three sample stages (SP 1, SP 2) are given, which denote for different variables and sample

Fläche	Parzelle	Nr.	BHD o.R. [cm]	H [m]	H/D	KA [m]	Kronen- Prozent [%]	Astwerte SP 1	Astwerte SP 2	
<i>trial</i>	<i>plot</i>	<i>No.</i>	<i>DBH under bark [cm]</i>	<i>height [m]</i>	<i>H/D</i>	<i>crown base</i>	<i>crown percentage</i>	<i>branch sample 1</i>	<i>branch sample 2</i>	
813	2	25	31,8	32,1	100,9	17,4	46	146	54	
813	2	76	32,1	34,9	108,7	17,9	49	126	39	
813	2	115	36,5	34,5	94,5	16,9	51	433	44	
813	2	350	28,2	31,3	110,9	23,3	26	130	58	
813	2	408	34,0	31,7	93,2	19,6	38	200	44	
		Bäume: 5						Summe:	1035	239

Bei den Aufnahmen wurde zuerst die Konkurrenzsituation der Probebäume charakterisiert, indem die Position aller Konkurrenz bäume nach einem Biogruppenkonzept (s. Unterkapitel 4.1) relativ zum Probebaum eingemessen wurde. Danach erfolgte die Fällung des Probebaums mit anschließender Triblängenrückmessung der Terminalachse. Anschließend wurde die Grüne Krone in einzelne Astquirle zerlegt, die zur Astvermessung wieder in ihre ursprüngliche Lage aufgerichtet wurden, sodass die Äste am Quirl frei hängen konnten.

Es wurde bei der Astmessung in einem geschichteten Stichprobenverfahren vorgegangen. An allen grünen Ästen wurden als erste Stichprobenschicht (SP 1) die in Tabelle 4-5 aufgeführten Größen gemessen.

Tabelle 4-5: Stichprobe 1 (SP 1) der Astmessung. *Sample stage 1 (SP 1)*

Messgrößen <i>variables</i>	Einheit <i>unit</i>	Messwerte <i>value</i>	Beschreibung <i>description</i>
Azimet	[°]	672	Himmelsrichtung der Äste
ADvert	[mm]	703	Astansatzdurchmesser, stammachsenparallel gemessen
Aststatus	nominal	710	Bemerkung, ob der Ast tot war oder Schäden aufwies

Zusätzlich dazu wurden an den Ästen jedes zweiten Quirls, die in Tabelle 4-6 aufgelisteten Größen als zweite Stichprobenschicht (SP 2) erfasst oder aus den übrigen Größen berechnet.

Tabelle 4-6: Stichprobe 2 (SP 2) der Astmessung. *Sample stage 2 (SP 2)*

Messgrößen <i>variables</i>	Einheit <i>unit</i>	Messwerte <i>value</i>	Beschreibung <i>description</i>
ADvgrün	[mm]	251	Astdurchmesser am Nadelansatz, stammachsenparallel
Llin	[cm]		Lineare Astlänge vom Astansatz zur Astspitze
Lproj	[cm]		Horizontalprojektion von Llin
AWreal	[°]	307	Astabgangswinkel auf den ersten 20 cm, gemessen von unten
AWlin	[°]		Astwinkel von Llin zur Stammachse nach unten
Position	[cm]		Sechs Messgrößen zur räumlichen Bestimmung der Astkrümmung

Bei der Messung der Position wurden die horizontalen und vertikalen Koordinaten des Astansatzes, des Ansatzes des ersten grünen Zweiges an der S1-Achse (Hauptachse des Astes) und der Astspitze erhoben. Alle Werte wurden relativ zum Astquirl bestimmt. Optional erfolgte bei einigen Ästen mit wechselnder Krümmung der Astachse auch eine Positionserfassung des Wendepunktes dieser Krümmung, um Aussagen zur Astkrümmung treffen zu können. Aus den Positionswerten des Astansatzes und der Astspitze wurden die in Tabelle 4-6 aufgeführte lineare Astlänge (Llin), die Horizontalprojektion davon (Lproj) und der lineare Astwinkel berechnet, sodass sich eine separate Messung dieser Werte erübrigte.

Etwa zehn Äste pro Baum bilden die Stichprobenschicht 3 (SP 3). An diesen Ästen wurden die Trieb­längen der S1-Achse und der weiteren Achsen vermessen. In dieser Arbeit wird auf die Astlänge aus den Trieb­längenmessungen (Ltrieb) und die horizontal – also 90° zur Stammachse – gemessenen Astansatzdurchmesser (ADhor) zurückgegriffen (Tabelle 4-7). Zusätzlich beinhaltet die Messung noch Informationen zum Durchmesser am Nadelansatz (ADhgrün).

Tabelle 4-7: Stichprobe 3 (SP 3) der Astmessung Trieb­längen und zusätzlich erhobene Astgrößen.
Sample stage 1 (SP 2). Branch growth unit length and additional parameters

Messgrößen <i>variables</i>	Einheit <i>unit</i>	Messwerte <i>value</i>	Beschreibung <i>description</i>
ADhor	[mm]	74	Astansatzdurchmesser, 90° zur Stammachse
ADhgrün	[mm]	71	Astdurchmesser am Nadelansatz, 90° zur Stammachse
Ltrieb	[cm]	60	Astlänge berechnet aus der Trieb­längensumme der Äste

4.2.2 Kollektiv B: „kronenspannungsfrei gewachsene Fichten“

Data collective B: “spruce grown under low crown tension”

Die Daten aus diesem Untersuchungskollektiv stammen aus Untersuchungen an 35 entnommenen, besonders langkronigen Fichten aus zehn Beständen in Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz, die bei der Beprobung 1999 ein Altersspektrum von 58 bis 139 Jahren aufwiesen. Durch eine frühe, meist durch Schneebruch bedingte Freistellung, sind die untersuchten Fichten durch überdurchschnittlich lange grüne Kronen mit Bekronungsgraden von 0,58 bis 0,83 gekennzeichnet.

Lage und Standort

Einen Überblick über die Standorte der beprobten Flächen gibt Tabelle 4-8. Die Standortdaten wurden aus WERNSDÖRFER (2001) bzw. RECK (2002) entnommen.

Tabelle 4-8: Standörtliche Beschreibung der 10 beprobten Bestände mit Angaben über das Freistellungs­alter der Bäume. Ein Probestand aus St. Peter wurde dem St. Märgener Standort zugeordnet. *Site conditions of the 10 sampled stands including information on the age when competitors were removed. One sample tree from St. Peter was assigned to St. Märgen*

Bundesland	Baden-Württemberg	Hessen	Rheinland-Pfalz						
Revier/ Waldort <i>location</i>	Schönau	St. Märgen	Ötzbach	Romrod	Reinhards-hain.	Allenbach	Bruchweiler	Beuren	Hill-scheid
Höhe [m ü.NN] <i>elevation</i>	340–350	1000	260–330	345–355	290–300	650–680	695–715	625–650	530–575
Höhenstufe <i>height level</i>	subm.	montan	kollin/ subm.	submon-tan	submon-tan	montan	montan	montan	submon-tan
Geologie <i>geology</i>	mittl. Bunt-sandstein	Paragneis , per. Schuttdecken	Gneis, z.T. m. Löss-auflagen	Basalt mit Löss-lehm	Löss	Quarzite	Quarzite	Quarzite	alluvialer Gehänge-schutt

Tabelle 4-8: Standörtliche Beschreibung der 10 beprobten Bestände mit Angaben über das Freistellungsalter der Bäume. Ein Probebaum aus St. Peter wurde dem St. Märgener Standort zugeordnet. *Site conditions of the 10 sampled stands including information on the age when competitors were removed. One sample tree from St. Peter was assigned to St. Märgen* (Forts.)

Bodenfrische <i>soil water supply</i>	mäßig frisch	mäßig frisch	mäßig frisch bis frisch	wechsel-feucht	frisch	mäßig frisch bis frisch	vernäs-send	frisch	frisch
Nährstoff-versorgung <i>nutrient supply</i>	meso-troph	meso-troph	meso-troph – eutroph	eutroph	meso-troph	oligo-troph	oligo-troph	oligo-troph	oligo-troph
Niederschl. [mm/a] <i>precipitation</i>	1100	1850	900–1000	650	750	1100	>950	>950	750–950
Baumnum-mern <i>No.</i>	100–600	20088, 10088, 30088–90088	100088–110088	1300	1400–1500	700–1200	1600–1900	2000–2300	2400
Freistel-lungsalter <i>age of removing most com-petitors</i>	32–35	24/44–52/90	solitär-ähnlich erwach-sen	solitär-ähnlich erwach-sen	Keine Angabe	15–17	59–73	38–50	solitär-ähnlich erwach-sen

Insgesamt decken die beprobten Bestände ein weites Standortspektrum mit unterschiedlicher Wasser- und Nährstoffversorgung und Temperaturbedingungen ab.

Untersuchungsziel und Eckwerte der beprobten Biogruppen

Das Ziel der Untersuchung der Probebäume war eine morphologische und waldwachstums-kundliche Charakterisierung von besonders langkronigen Bestandesfichten, die nach einer jugendlichen Dichtstandsphase dauerhaft freigestellt wurden.

Da die Probebäume bis auf einige wenige nicht auf langfristig beobachteten Versuchsflächen entnommen wurden, sondern aus regulär bewirtschafteten Forsten stammten, sind kaum Infor-mationen über ihre historische Entwicklung dokumentiert. Die Probebäume müssen als Zufalls-ergebnis der regulären Forstwirtschaft betrachtet werden. Daher unterscheiden sich die ertrags-kundlichen Eckwerte der Biogruppen auch beträchtlich. Der Anteil der Mischbaumarten in den Biogruppen variiert beispielsweise deutlich. Neben reinen Fichtenbeständen wurden vor allem auch Mischbestände mit Buche beprobt. Auch das Alter der untersuchten Fichten streut in wei-tem Rahmen (siehe Tabelle 4-9). Allen Probebäumen gemein ist ein überdurchschnittlich großer Wuchsraum. Mit einem mittleren Abstand von 8,5 m zu ihren nächsten Konkurrenten liegen sie deutlich über vergleichbar alten Bäumen aus traditionell niederdurchforsteten Beständen. Dort stehen im Alter von 90 Jahren teilweise noch ca. 600 Individuen auf einem Hektar (vgl. RÖHLE 1995, S. 248, 251), woraus sich bei einem homogenen Bestandaufbau und einem unterstellten Reihenverband ein mittlerer Abstand von etwa 4 m errechnet. Moderne Z-Baumvarianten gehen von 200 Bäumen je Hektar aus (ABETZ und KLÄDTKE 2002). Dies entspricht einem mittleren Abstand von etwa 7,1 Metern im Endbestand und liegt immer noch deutlich unter dem mittleren Abstand in den Biogruppen. Dadurch markieren die untersuchten Probebäumen hinsichtlich ihres Wuchsraums ein Extrem bei Bestandesfichten in unseren bewirtschafteten Hochwäldern.

Messgrößen am Einzelbaum

In Tabelle 4-9 sind die 35 entnommenen Fichten waldwachstumskundlich charakterisiert.

Tabelle 4-9: Einzelbaumdaten der 35 langkronigen Probestämme. *Single tree data of the 35 sample trees*

Fläche <i>stand</i>	Baumnr. <i>No.</i>	BHD m.R.[cm] <i>DBH over bark</i>	H [m] <i>height [m]</i>	H/D <i>H/D</i>	KA[m] <i>crown-base</i>	Kronen- anteil <i>crown %</i>	Alter <i>age</i>	Astwerte SP 1 <i>branch sample 1</i>	Astwerte SP 2 <i>branch sample 2</i>	Astwerte SP 3 <i>branch sample 3</i>
Schönau	100	65,6	40,2	61	13,3	67	97	227	58	30
Schönau	200	77,3	40,2	52	14,1	65	99	323	64	21
Schönau	300	67,5	39,9	59	16,1	60	98	304	40	37
Schönau	400	69,2	39,1	57	13,3	66	96	308	72	44
Schönau	500	68,3	39,2	57	12,7	68	98	370	104	58
Schönau	600	60,3	35,6	59	15,1	58	98	270	75	50
Allenbach	700	71,0	32,2	45	6,8	79	81	272	69	49
Allenbach	800	73,0	33,3	46	9,9	70	81	277	72	51
Allenbach	900	72,0	31,8	44	9,5	70	81	303	64	43
Allenbach	1000	63,0	33,0	52	7,5	77	82	321	89	66
Allenbach	1100	62,0	31,0	50	9,3	70	80	214	64	37
Allenbach	1200	56,0	32,7	58	9,2	72	79	249	75	54
Romrod	1300	106,5	38,9	37	13,3	66	139	261	52	30
Rheinhardshain	1400	80,0	28,8	36	8,4	71	130	149	43	29
Grünberg	1500	49,7	30,0	60	8,8	71	57	216	54	38
Bruchweiler	1600	76,1	37,1	49	14,2	62	137	233	44	0
Bruchweiler	1700	71,0	37,9	53	9,8	74	123	285	81	0
Bruchweiler	1800	82,5	38,3	46	10,1	74	133	345	100	0
Bruchweiler	1900	69,5	37,6	54	13,4	64	135	256	69	0
Beuren	2000	85,5	34,3	40	9,3	73	97	301	85	0
Beuren	2100	70,8	32,0	45	11,3	65	99	335	96	0
Beuren	2200	67,0	27,8	41	10,4	63	98	223	54	0
Beuren	2300	74,1	30,9	42	9,8	68	94	299	68	0
Hillscheid	2400	54,0	36,5	68	9,8	73	132	218	59	0
St.-Märgen	10088	66,0	30,8	47	6,7	78	85	294	83	62
St.-Peter	20088	72,8	33,0	45	5,5	83	65	389	118	83
St.-Märgen	30088	71,1	36,4	51	10,6	71	131	329	100	74
St.-Märgen	40088	62,3	29,8	48	7,7	74	88	278	82	65
St.-Märgen	50088	59,6	32,5	55	8,2	75	87	146	49	6
St.-Märgen	60088	63,6	30,2	48	7,4	76	87	308	90	47
St.-Märgen	70088	68,5	31,9	47	7,6	76	87	277	81	67
St.-Märgen	80088	61,7	33,1	54	9,0	73	93	318	85	68
St.-Märgen	90088	63,9	32,3	51	8,5	74	87	413	144	118
Ötzbach	100088	75,3	33,0	44	13,7	58	115	423	367	0
Ötzbach	110088	76,7	36,1	47	11,7	68	120	282	72	42
Bäume:	35						Σ	10016	2922	1269

Zur Erfassung modellrelevanter Astgrößen wurde nach einem Messprogramm vorgegangen, das weitgehend dem bereits beschriebenen Messungen am Kollektiv A entsprach. Wieder wurden Biogruppen ausgeschieden und vermessen, die Probebäume anschließend gefällt und zerlegt. An allen Ästen wurden in einer ersten Stichprobenschicht (SP 1) der Azimut, der vertikale Astansatzdurchmesser und der Aststatus erfasst (Tabelle 4-10).

Tabelle 4-10: Stichprobe 1 (SP 1) – *sample stage 1 (SP 1)*

Messgröße <i>variables</i>	Einheit <i>unit</i>	Messwerte <i>values</i>	Beschreibung <i>description</i>
Azimut	[°]	10016	Himmelsrichtung der Äste
Advert	[mm]	9910	Astansatzdurchmesser, stammachsenparallel gemessen
Aststatus	nominal	10016	Bemerkung, ob der Ast tot war oder Schäden aufwies

Die Anzahl der an einer Teilgruppe aller Äste gemessenen Astwinkel (SP 2), des Astdurchmessers am Ansatz der ersten grünen Seitenzweige, die Astlänge sowie die Astkrümmung, ausgedrückt durch die Positionswerte (SP 3), ist in Tabelle 4-11 aufgeführt. Die Variablen linearer Astwinkel (AWlin) und lineare Astlänge (Llin) wurden aus den Positionswerten errechnet.

Tabelle 4-11: Stichproben 2 und 3 – *Sample stages 2 and 3 (SP 2, SP 3)*

Messgröße <i>variables</i>	Einheit <i>unit</i>	Messwerte <i>value</i>	Beschreibung <i>description</i>
ADvgrün	[mm]	1941	Astdurchmesser am Nadelansatz, stammachsenparallel
Llin	[cm]	1269	Lineare Astlänge vom Astansatz zur Astspitze
Lproj	[cm]	1269	Horizontalprojektion von Llin
AWreal	[°]	2922	Astabgangswinkel auf den ersten 20 cm, gemessen von unten
AWlin	[°]	1269	Astwinkel von Llin zur Stammachse nach unten
Position	[cm]	1269	Sechs Parameter zur räumlichen Bestimmung der Astkrümmung

Insgesamt konnte am Probenkollektiv B durch das Vorhandensein besonders alter Äste von teilweise außerordentlich großer Dimension eine Datenbasis zur Modellierung gewonnen werden, die das obere Alter- und Dimensionsspektrum von Ästen bei der Fichte abdeckt.

4.2.3 Kollektiv C: „Solitärfichten“ – *Data collective C: “solitary trees”*

Die Solitärdaten wurden dem Verfasser freundlicherweise von Herrn Dr. LÄSSIG zur Verfügung gestellt und gründen auf Untersuchungen an Solitärfichten in Baden-Württemberg. Sie beinhalten Messungen auf der Astebene. Es stehen aus dieser Untersuchung 325 Äste von 87 Bäumen zur Verfügung. Der Datensatz repräsentiert dabei Äste, die sich ohne Konkurrenz durch andere Bäume entwickeln konnten. Sie decken vor allem das obere Altersspektrum der Äste ab und können als das maximal mögliche Potenzial der Astdimensionen auf den jeweiligen Standorten betrachtet werden. Eine ausführliche Darstellung des Datenmaterials findet sich in LÄSSIG (1991).

Lage und Standort

Tabelle 4-12 gibt eine Übersicht über die Lage und die Standorte der von Lässig beprobten Fichtensolitäre.

Tabelle 4-12: Standörtliche Parameter der beprobten Solitärerfichten von LÄSSIG (1991).
Site parameters of the solitary spruces sampled by LÄSSIG (1991).

	Schwarzwald		Schwäbische Alb	
Fläche <i>stand</i>	Schönau	Staufen	Oberkochen	Lichtenstein
Lokalname	Wiesenteil	Münstertal	NSG Volkmarsberg	NSG Greuthau
Fbz.-Nr. <i>register</i>	339	3424	179	427
Wuchsbezirk <i>growth region</i>	EWB Südschwarz- wald, TB West-/Südteil (3/10)	EWB Südschwarz- wald, TB West-/Südteil (3/10)	WB Albuch (6/01a)	WB Mittlere Kuppenalb (6/04a)
Geogr. Koord. (ö. Lg. / n. Br.) <i>co-ordinates</i>	7° 54' / 47° 46'	7° 50' / 47° 51'	9° 5' / 48° 48'	9° 15' / 48° 24'
Höhe ü. NN [m] <i>elevation [m]</i>	520–1100	640–940	680–740	750–790
Geologie <i>geology</i>	Kristallines Grund- gebirge (Anatexite, Paragneis)	Kristallines Grund- gebirge (Granit, Paragneis)	Jura epsilon	Jura delta
Böden <i>soil</i>	flach- und mittel- gründige Brauner- den	flach- und mittel- gründige Bauner- den	(Mergel-) Rendsinen <i>Terrae fuscae</i>	Mergel- Rendsinen <i>Terrae fuscae</i>
Regional- gesellschaft <i>natural forest type</i>	montaner Buchen- Tannenwald <i>montane beech-fir type</i>	montaner Buchen- Tannenwald <i>montane beech-fir type</i>	kontinental montaner Buchenwald <i>continental montane beech type</i>	kontinental montaner Buchenwald <i>continental montane beech type</i>
Niederschlag pro Jahr [mm] <i>Precipitation per year</i>	1580	1162	1072	947
Niederschlag- Veg.-Zeit [mm] <i>precipitation in veg. period</i>	790	685	596	583
Temperatur Jahr [°C] <i>temperature</i>	5,5–7,5	6,3–8,1	6	6,3

Untersuchungsziel

Das Untersuchungsziel Lässigs ist die morphologische Charakterisierung von Solitär-fichten und die Untersuchung ihres Schaft-, Ast- und Kronenwachstums vor dem Hintergrund der Erstellung eines Kronen- und Schaftwachstumsmodells für Solitär-fichten (LÄSSIG 1991). Damit soll zur Klärung der Eckwerte des Fichtenwachstums beigetragen werden.

Messgrößen am Einzelbaum

An jedem Baum wurden an mindestens einem Astquirl Äste gemessen, die bis zur Kronenperipherie ragten und möglichst unbeeinträchtigt von Brüchen oder Verzweiselungen waren. An einigen Bäumen wurden bis zu drei Quirle beprobt. Der Datensatz enthält vor allem alte Äste mit großen Dimensionen. Für eine Beschreibung der Einzelbaumwerte und des genauen Aufnahme-konzeptes sei auf LÄSSIG (1991) verwiesen. Insgesamt ist die Messmethodik vergleichbar mit den bereits geschilderten Aufnahmen der anderen Versuchskollektive.

Tabelle 4-13: Stichprobe 1 und 2 (SP 1, SP 2) – *sample stage 1 and 2 (SP 1, SP 2)*

Messgröße <i>variables</i>	Einheit <i>unit</i>	Messwerte <i>value</i>	Beschreibung <i>description</i>
Azimet	[°]	325	Himmelsrichtung der Äste
Advert	[mm]	325	Astansatzdurchmesser, stammachsenparallel gemessen
AWreal	nominal	325	Astansatzwinkel
Lproj	[cm]	325	Horizontalprojektion von Llin
AWreal	[°]	325	Astabgangswinkel auf den ersten 50 cm, gemessen von unten
Ltrieb	[cm]	325	Astlänge, berechnet aus der Trieb-längensumme der Äste
Trieb-längen	[cm]	238	Jahreszuwächse des Astes

Für alle 325 Äste wurden das Alter, der Azimet, der Astdurchmesser, der Astansatzwinkel und die Astlänge als Trieb-längensumme erfasst (Tabelle 4-13).

Zusätzlich stehen für eine Teilmenge von 238 Ästen einzelne Trieb-längendaten zur Verfügung (SP 2).

4.2.4 Kollektiv D: „Zusmarshausen“ – *Data collective D: „Zusmarshausen“*

Das Probebaumkollektiv D besteht aus 17 herrschenden und mitherrschenden Fichten, die 2001 im Alter von 37 Jahren auf den Fichten-Standraumversuchen ZUS 603 und 604 entnommen wurden.

Die folgende Versuchsbeschreibung sowie etliche der später beschriebenen Versuchsergebnisse basieren auf einer Diplomarbeit, die am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Technischen Universität München angefertigt wurde, um Zusammenhänge zwischen Konkurrenz und der Entwicklung von Ästen, Stamm und Wurzeln zu klären und eine für die Modellbildung notwendige Datengrundlage zu erarbeiten (LOHER, 2002).

Lage und Standort

Die Versuchsflächen ZUS 603 und 604 befinden sich etwa 30 km westlich von Augsburg in den Waldflächen des Bayerischen Forstamtes Zusmarshausen in einer Höhenlage von etwa 500 m über dem Meeresspiegel und gehören zum Versuchsflächennetz des Ertragskundlichen Versuchswesens in Bayern, das vom Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Technischen Universität München im Auftrag der Bayerischen Staatsforstverwaltung betreut wird.

Die Versuchsflächen gehören nach der Bayerischen Klassifikation zum Wuchsbezirk 12.7 „Mittelschwäbisches Schotterriedel- und Hügelland“, der wiederum Teil des Wuchsgebietes 12 „Tertiäres Hügelland“ ist. Der Naturraum der Versuchsflächen ist die „Iller-Lech Schotterplatte“ mit tertiären Molassesedimenten im Untergrund. Ausgehend von einer äolischen Deckschicht aus Feinsanden und Schluffen haben sich tiefgründige, gut durchlüftete Braunerden beziehungsweise Parabraunerden mit hohem Nährstoffangebot entwickelt.

Das Klima ist subatlantisch geprägt und zeichnet sich durch einen mittleren Jahresniederschlag von 800 mm, davon 450–500 mm in der Vegetationszeit, aus. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 7,0–7,9°C. Die mittlere Dauer der Vegetationsperiode beträgt 210–220 Tage. An 140–150 Tagen davon herrscht ein Tagesmittel über 10°C.

Versuchsziel und ertragskundliche Eckwerte der beprobte Parzellen

Das Ziel der beiden Standraum- und Durchforstungsversuche, die in unmittelbarer Nachbarschaft zueinander liegen, ist die Untersuchung des Einflusses von Pflanzverband und unterschiedlicher Durchforstung auf Struktur, Leistung und Qualität von Fichtenbeständen. Dazu wurden 1968 Parzellen mit unterschiedlichen Ausgangsverbänden auf beiden Versuchsflächen begründet.

ZUS 603 liegt an einem Südhang mittlerer Neigung. Beprobte wurden zwei Parzellen mit einer Abmessung von je 34,0 m mal 30,0 m, die in einem Pflanzverband von 2,0 m mal 2,0 m und 1,0 m x 1,0 m begründet wurden.

ZUS 604 liegt an einem leicht geneigtem Nordhang. Beprobte wurden hier zwei Parzellen mit einer Abmessung von je 20,0 m mal 20,0 m, die mit einem Pflanzverband von 2,0 m mal 1,0 m bzw. 1,4 m mal 1,4 m angelegt wurden. Die wichtigsten ertragskundlichen Kennwerte der Versuchspartellen sind in Tabelle 4-14 aufgeführt.

Tabelle 4-14: Ertragskundliche Kennwerte der vier beprobten Parzellen auf den Fichtenstandraum- und Durchforstungsversuchen ZUS 603 und 604. Entnommen aus LOHER (2002).
Growth parameters of the four sampled plots of the spacing and thinning trial ZUS 630 and 604 resp. (LOHER 2002)

Fläche trial	Parzelle plot	N/ha	H ₀ [m]	D ₀ [cm]	H ₀ /D ₀	MGH [m ²]	DGZ [m ³]	GG [m ²]
603	4	1814	21,5	26,2	82	38,8	14,1	43,9
603	6	549	24,3	35,5	68	40,3	17,2	46,2
604	2	1270	22,4	30,2	74	43,9	17,3	49,8
604	3	3025	20,4	24,1	84	45,4	15,7	51,2

Das Behandlungsprogramm bis zum Zeitpunkt der Entnahme der Probebäume umfasst auf ZUS 603 eine geometrische Durchforstung 1979, mit der Entnahme jeder zweiten Reihe und vier Z-Baumdurchforstungen in fünfjährigem Eingriffsintervall.

Die Versuchsfläche ZUS 604 wurde nahezu analog behandelt, nur dass dort keine Reihenentnahme stattfand. Eine ausführliche Beschreibung der Behandlung ist in LOHER (2002) nachzulesen.

Messgrößen am Einzelbaum

Die Entnahme der Probebäume hatte zum Ziel, den Konkurrenzeinfluss auf Ast-, Stamm- und Wurzelentwicklung zu klären. Die 17 Probebäume wurden dabei im Rahmen einer Auslesee-durchforstung im Frühjahr 2001 als Bedränger von Z-Bäumen entnommen.

Das Messprogramm schließt die Charakterisierung der Konkurrenzsituation im Biogruppensystem mit ein. Bei diesem wurden, wie schon in den Kollektiven A und B, die Konkurrenten um den Probebaum über ihre Höhe, ihren Durchmesser, die Kronenansatzhöhe und die Kronenausdehnung in acht Himmelsrichtungen erfasst.

Die morphologischen Grundparameter der Probebäume und die Anzahl der analysierten Proben sind in Tabelle 4-15 dargestellt, die aus LOHER (2002) entnommen wurde.

Tabelle 4-15: Waldwachstumskundliche Charakterisierung der entnommenen Probebäume aus ZUS 603 und 604 mit der Angabe der gewonnenen Probekörper (verändert nach LOHER, 2002). *Growth characteristics of the sample trees with the number of sample discs per tree (see LOHER 2002).*

Fläche <i>trial</i>	Parzelle <i>plot</i>	Baumnr. <i>No.</i>	BHD o.R.[cm] <i>DBH</i>	H [m] <i>height</i> [m]	H/D <i>H/D</i>	KA[m] <i>crown</i> <i>base</i>	Kronen- prozent <i>crown</i> <i>percentage</i>	Stamm- proben <i>stem</i> <i>discs</i>	Astproben <i>branch</i> <i>discs</i>	Asttrieb- werte <i>branch</i> <i>units</i>
603	4	88	13,3	18,40	123	9,16	50	15	13	95
		195	18,1	19,90	101	11,92	40	14	12	69
		247	22,9	21,80	89	8,41	53	22	18	121
		502	14,3	17,35	109	8,75	46	16	13	93
		606	20,9	21,40	93	9,60	50	17	15	108
		628	15,7	18,15	103	9,15	47	15	13	94
		612	20,3	19,10	110	9,11	48	15	13	85
604	6	94	27,0	23,20	80	9,05	57	20	18	163
		40	26,9	23,86	81	8,81	63	20	17	147
		73	25,9	22,94	82	9,18	60	21	18	132
		157	30,5	23,89	71	7,57	68	25	22	186
604	2	91	25,8	21,33	76	9,59	59	18	15	131
		108	20,6	20,75	94	9,87	52	17	9	78
		155	25,0	20,90	78	11,0	47	17	14	97
		193	22,1	21,58	90	12,0	52	17	14	87
	3	174	21,3	18,98	81	10,36	45	18	14	80
198		14,3	18,43	118	10,94	41	16	13	86	
Bäume:		17					Summe:	303	251	1852

An den Probebäumen wurden nach der Fällung die Terminaltrieblängen zurückgemessen, um die Höhenentwicklung rekonstruieren zu können. Nach der Sektion in einzelne Quirle wurde in der grünen Krone von je einem Ast pro Quirl die lineare Länge (L_{lin}) vom Ansatz bis zur Spitze aufgenommen, so wie der zugehörige Winkel zur Stammachse (AW_{lin}). Der Azimutwinkel wurde ebenfalls bestimmt. Anschließend erfolgte die Vermessung der Trieb-längen der S1-Achse eines jeden Probeastes mit genauer Datierung jedes Einzeltriebes. Eine Aufstellung der Anzahl der gewonnenen Messwerte kann aus Tabelle 4-16 entnommen werden.

An jedem Probeast wurde am Ansatz eine Scheibe entnommen. Der Stamm wurde unterhalb jedes Astquirles ebenfalls beprobt, sodass vom Ast und vom Stamm Jahrringe zur Verfügung standen, die im selben Jahr gebildet worden waren. Zusätzlich wurden für weitere Untersuchungen noch Wurzelscheiben gewonnen.

Tabelle 4-16: Astparameter der beprobten Fichten in ZUS 603 und 604. *Branch parameters of the sample trees on ZUS 603 and 604.*

Messgröße <i>variables</i>	Einheit <i>unit</i>	Messwerte <i>value</i>	Beschreibung <i>description</i>
Azimut	[°]	267	Himmelsrichtung
ADvprox	[mm]	267	Astdurchmesser am Astansatz, stammachsenparallel
AWlin	[°]	267	Astwinkel von Llin zur Stammachse nach unten
Ltrieb	[cm]	260	Triebgrößensumme des Astes
Trieblänge	[cm]	1852	Länge der einzelnen Jahrestriebe des Astes
Triebstatus	nominal	1852	Beschreibung, ob Trieb tot, fehlend oder beschädigt war

N = Stammzahl pro Hektar vor der Probenahme, Ho bzw. Do = Höhe bzw. Durchmesser des Grundflächenmittlerstammes der 20% stärksten Bäume, MGH = mittlere Grundflächenhaltung; GG = Gesamtgrundfläche, DGZ = durchschnittlicher Gesamtzuwachs

N = stems / ha before sampling, Ho and Do resp = height and diameter resp. of the 20% trees with the highest diameter, MGH = average basal area, DGZ = average volume increment, GG = current basal area

4.2.5 Kollektiv E: „Vohenstrauß“ – *Data collective E: “Vohenstrauß”*

Bei dem kombinierten Klon- und Pflanzabstandsversuch Vohenstrauß 622, ebenfalls Teil des Ertragskundlichen Versuchsfächennetzes Bayerns, wurden Ende 1997 im Rahmen einer Auslesedurchforstung 35 Fichten im Alter von 23 Jahren entnommen. Bei dem Versuch handelt es sich um einen von der Sektion Ertragskunde im Forstlichen Verband Forstlicher Versuchsanstalten initiierten Verbandsversuch mit analogen Wiederholungen in Hessen und Niedersachsen.

Lage und Standort

Die Versuchsfläche Vohenstrauß 622 liegt in Nordostbayern, im Wuchsgebiet Oberpfälzer Wald, im Wuchsbezirk 10.4 (Innerer Oberpfälzer Wald) auf einer Höhe von 720 bis 740 m über NN an einem nordostexponierten Hang geringer Neigung.

Der Jahresniederschlag beträgt laut der Standortserkundung der Bayerischen Staatsforstverwaltung 904 mm. Davon gehen 375 mm in der Vegetationszeit (Mai bis September) nieder, was zu einer im Oberhang günstigen und am Unterhang optimalen Wasserversorgung der Fichte führt. Die Versuchsfläche ist in regionaltypischer Weise von Nassschnee und Duftanhang betroffenen. Die Schäden treten plätzwweise als Schneedruck und -bruch oder als Wipfelbruch von Einzelbäumen auf, der vor allem durch Duftanhang in Zusammenhang mit starkem Wind ausgelöst wird.

Die Durchschnittstemperatur im Jahr liegt bei nur 6°C, in der Vegetationszeit bei 12–13°C. Die Jahrestemperaturamplitude, berechnet aus dem wärmsten und dem kältesten Monatsmittel, beträgt 19°C.

Das Ausgangsgestein sind biotithaltige Gneise, auf denen sich nährstoffreiche, sandig-glimmerige Bodentypen über Gneiszersatz bzw. Braunerde ausbilden. Die Versuchsfläche stockt auf frischen, nährstoffreicheren Gneisverwitterungsböden mit tiefer Verlehmungszone am Unter-

hang bzw. auf mäßig frischen, nährstoffreicheren Gneisverwitterungsböden mit mittlerer Verlehmungszone am Oberhang. Der Oberhang weist einen geringen bis mittleren Skellettanteil auf. Der Unterhang, dem die beprobten Parzellen zuzurechnen sind, ist skelettreich, aber trotzdem bis zu einer Tiefe von einem Meter gut durchwurzelbar. Die Durchlüftung des Bodens ist ebenfalls als gut einzustufen. Als Humusform liegt Rohhumus bis mullartiger Moder vor. Die potenzielle natürliche Vegetation ist ein Buchen-Tannen-Fichten-Wald (WALENTOWSKI et al. 2001).

Versuchsziel und ertragskundliche Eckwerte der beprobte Parzellen

Das Versuchsziel in Vohenstrauß sieht den Vergleich unterschiedlicher Klonfichten von 140 Genotypen aus dem ganzen Gebiet der ehemaligen Bundesrepublik Deutschland vor.

Der Versuchsaufbau ermöglicht die gleichzeitige Beurteilung von Genotyp und Wuchsraum, charakterisiert durch den Pflanzverband und die Durchforstung.

Insgesamt wurden Parzellen mit vier unterschiedlichen Pflanzverbänden aus Klonmaterial begründet, sodass für jede Pflanzverbands-Variante ein A-Grad und eine behandelte Fläche zur Verfügung steht. Zusätzlich wurden eine engständige Variante ohne Wiederholung und zwei Parzellen mit lokalen Herkünften als Referenz begründet.

Untersucht wurden die Parzellen 6 bis 9. Die Bestandescharakteristika der Parzellen im Alter 22 sind in Tabelle 4-17 zusammengestellt.

Die Stammzahlen pro Hektar reichen zum Entnahmezeitpunkt 1997 von knapp 700 bis 2600 Bäumen bei einer Grundflächenstreuung von 14,3 bis 28,8 m².

Tabelle 4-17: Ertragskundliche Eckwerte der beprobten Parzellen. *Overview on the growth and yield parameters of the plots, where sample trees were harvested.*

Fläche <i>trial</i>	Parzelle <i>plot</i>	Verband <i>spacing</i>	N/ha	H ₀ [m]	D ₀ [cm]	H ₀ /D ₀	MGH [m ²]	DGZ[m ³]	GG[m ²]
622	6	2,50 x 2,50	1476	12,5	17,7	70	17,2	4,6	21
622	7	5,00 x 2,50	686	12,3	22,6	54	10,9	3,2	14,3
622	8	2,50 x 1,25	1210	12,5	17,0	73	20,2	4,2	23,6
622	9	1,25 x 1,25	2600	11,2	13,3	84	24,9	3,7	28,8

N = Stammzahl pro Hektar vor der Probenahme, H₀ bzw. D₀ = Höhe bzw. Durchmesser des Grundflächenmittels der 20% stärksten Bäume, MGH = mittlere Grundflächenhaltung; GG = Gesamtgrundfläche, DGZ = durchschnittlicher Gesamtzuwachs

N = stems /ha before sampling, Ho and Do resp = height and diameter resp. of the 20% trees with the highest diameter, MGH = average basal area, DGZ= average volume increment, GG=current basal area

Messgrößen am Einzelbaum

Die 35 Probebäume wurden im Rahmen einer Auslesedurchforstung entnommen. Die untersuchten Klonfichten beschränken sich auf fünf bayerische Genotypen, die auf jeder Fläche in dreifacher Wiederholung vorhanden waren, sofern nicht Einzelindividuen vorher ausgefallen waren. Durch den Ausfall ergaben sich schließlich 35 Probebäume, die auf den Parzellen 6, 8 und 9 entnommen wurden und weitere 8 Probanden auf Parzelle 7, an denen Bohrkern gewonnen wurden. An allen Probebäumen wurde das Höhenwachstum sowie die Kronen- und Ast-

struktur untersucht. Die Fehlwerte bei drei Bäumen sind auf einen Datenverlust bei der Aufnahme zurückzuführen. Als weitere Messungen wurden Asttrieblängenmessungen an den 35 gefällten Fichten durchgeführt.

Tabelle 4-18: Baumparameter und Aststichproben der Probebäume. *Tree parameters and branch sample size of the sample trees.*

Fläche	Parzelle	Baumnr.	BHD m.R. [cm]	Höhe [m]	h/d [%]	KA [m]	Kronen- prozent [%]	Stichprobe 1 SP 1	Stichprobe 2 SP 2 (Astriebe)
<i>trial</i>	<i>plot</i>	<i>No.</i>	<i>DBH</i>	<i>height</i>	<i>H/D</i>	<i>crown base</i>	<i>crown percentage</i>	<i>branch sample 1</i>	<i>branch sample 2 (branch units)</i>
VOH 622	6	2	10,7	8,2	76	2,2	73	13	63
VOH 622	6	6	14,7	9,7	66	0,4	96	11	70
VOH 622	6	12	12,8	11,0	86	1,3	88	12	68
VOH 622	6	27	15,8	11,9	75	0,9	92	10	51
VOH 622	6	36	11,8	11,5	97	1,5	87	12	62
VOH 622	6	42	16	11,1	69	1,1	90	14	78
VOH 622	6	64	11,6	8,9	77	1,6	82	12	53
VOH 622	6	86	9,2	9,6	104	1,8	82	12	35
VOH 622	6	100	15,9	12,0	76	0,7	94	13	77
VOH 622	6	110	17,8	12,8	72	1,3	90	12	60
VOH 622	6	118	6	6,6	110	0,8	88	10	43
VOH 622	6	122	14	13,1	93	0,9	93	13	63
VOH 622	6	124	12,1	10,5	87	1,5	85	13	63
VOH 622	6	146	16,4	14,3	87	0,7	95	10	42
VOH 622	7	2	26,2	13,0	50	0,8	94	6	–
VOH 622	7	10	15,7	9,3	59	0,7	92	7	–
VOH 622	7	12	18,7	13,9	74	0,4	97	4	–
VOH 622	7	23	19,6	–	–	–	–	3	–
VOH 622	7	27	17	12,3	72	0,5	96	5	–
VOH 622	7	30	15	13,3	89	0,3	98	4	–
VOH 622	7	64	10,6	8,6	81	0,5	94	6	–
VOH 622	7	79	17,9	–	–	0,3	–	8	–
VOH 622	8	54	9,3	8,5	91	0,7	92	11	53
VOH 622	8	59	4,4	3,3	74	1,2	62	11	38
VOH 622	8	63	11,1	9,2	83	1,5	84	14	77
VOH 622	8	127	13,5	11,1	82	1,3	88	11	55
VOH 622	8	131	12,5	9,9	79	1,2	88	13	52
VOH 622	8	139	14,5	11,5	79	1,7	85	11	54
VOH 622	8	183	13,7	11,0	80	1,7	85	12	46
VOH 622	8	216	12,2	9,3	76	0,5	95	12	53
VOH 622	8	231	12,3	9,1	74	0,1	99	6	42
VOH 622	8	295	4,3	3,6	85	0,7	82	13	53
VOH 622	9	27	7,5	7,6	102	2,3	70	10	39
VOH 622	9	115	9,1	8,4	92	1,7	80	11	44

Tabelle 4-18: Baumparameter und Aststichproben der Probebäume. *Tree parameters and branch sample size of the sample trees.* (Forts.)

Fläche	Parzelle	Baumnr.	BHD m.R. [cm]	Höhe [m]	h/d [%]	KA [m]	Kronen- prozent [%]	Stichprobe 1 SP 1	Stichprobe 2 SP 2 (Astriebe)
<i>trial</i>	<i>plot</i>	<i>No.</i>	<i>DBH</i>	<i>height</i>	<i>H/D</i>	<i>crown base</i>	<i>crown percentage</i>	<i>branch sample 1</i>	<i>branch sample 2 (branch units)</i>
VOH 622	9	123	6,5	7,4	114	2,7	64	11	30
VOH 622	9	127	6,8	7,5	111	2,1	73	8	26
VOH 622	9	131	7,9	8,8	111	1,5	83	8	–
VOH 622	9	251	15,3	11,4	74	2,9	74	13	50
VOH 622	9	295	12	10,8	90	2,0	81	12	84
VOH 622	9	339	9	8,2	91	2,1	74	11	27
VOH 622	9	411	10,2	9,5	93	1,7	82	12	58
VOH 622	9	415	10,6	–	–	–	–	10	45
VOH 622	9	563	7,8	7,0	90	2,4	67	11	31
Anzahl		43					Summe	441	1785

Im Gegensatz zu den Kollektiven A, B und D wurden die Astparameter nur an zwei Astquirlen pro Baum gemessen: am Astquirl, an dem die Krone die größte durchschnittliche Breite aufwies und am Kronenansatz, definiert durch den Astquirl mit dem letzten grünen Ast. Eine Biogruppenmessung wie bei den übrigen Kollektiven wurde nicht durchgeführt.

Die Erfassung schloss in der ersten Stichprobe (SP 1) die Astzahl pro Quirl, den Azimut, den Aststatus, den vertikalen Astansatzdurchmesser, die lineare Distanz von Astansatz zur Astspitze mit dem zugehörigen Winkel sowie die reale Astlänge und den Astabgangswinkel auf den ersten 25 cm mit ein (Tabelle 4-19). Zusätzlich wurden noch die Asttrieblängen der S1-Achse bei allen lebenden Ästen erfasst. An jedem Ast wurde in der zweiten Stichprobe (SP 2) eine Triebhängenrückmessung durchgeführt.

Tabelle 4-19: Astparameter der Stichproben SP 1 und SP 2. *Branch parameters of sample SP 1 and SP 2*

Messgröße <i>variables</i>	Einheit <i>unit</i>	Messwerte <i>value</i>	Beschreibung <i>description</i>
Azimut	[°]	441	Himmelsrichtung der Äste
Advert	[mm]	441	Astansatzdurchmesser, stammachsenparallel gemessen
Aststatus	nominal	441	Bemerkung, ob der Ast tot war oder Schäden aufwies
Llin	[cm]	406	Lineare Astlänge vom Astansatz zur Astspitze
Lreal	[cm]	440	Astlänge entlang der Stammachse
Trieblänge	[cm]	1785	Längen der Jahrestriebe der S1-Achse
AWreal	[°]	410	Astabgangswinkel auf den ersten 20 cm, gemessen von unten
AWlin	[°]	406	Astwinkel von Llin zur Stammachse nach unten

Für weitere Aussagen über die genetische Komponente bei Größen des Ast- und Baumwachstums wurden im Herbst 2002 noch Aufnahmen an stehenden Bäumen ausgewertet. Dort wurden an 14 Klonen mit insgesamt 281 Bäumen über alle neun Parzellen des Versuchs die Baumparameter (BHD, Höhe, Kronenansatzhöhe, Kronenradien) erfasst. Zusätzlich wurden in 2 m und 5 m alle Quirläste des nächsten Quirls im Durchmesser gemessen und ihr Status bestimmt. Aus dieser Untersuchung liegen 3321 Astdurchmesserwerte vor.

4.2.6 Datenkollektiv F: „Bestandesfichten aus Rein- und Mischbeständen“ – *Data collective F: “stand grown trees from pure and mixed stands”*

Das Datenkollektiv F umfasst 37 Fichten aus bayerischen Rein- und Mischbeständen, welche mit Ausnahme der fünf Bäume aus dem Höglwald aus Versuchsflächen des Bayerischen Ertragskundlichen Versuchsflächennetzes stammen. Die Probestämme wurden im Rahmen eines Projektes zur Untersuchung der Holzqualität von Fichten und Buchen in Rein- und Mischbeständen entnommen.

Lage und Standort

Die standörtlichen Parameter der Flächen sind in Tabelle 4-20 dargestellt. Die Untersuchungsbestände decken Flächen im Bayerischen Wald (Zwiesel 134/135), im oberbayerischen Tertiärhügelland (Höglwald) sowie im Schongau (Denklingen 005, Schongau 814) ab.

Tabelle 4-20: Standörtliche Beschreibung der 5 beprobten Bestände. *Site conditions of the 5 sampled stands.*

Versuchsbestand	Geographische Lage	Temperatur (in Veg.-Zeit) Niedersch. (in Veg.-Zeit)	Höhe Exposition Hangneigung	Geologie	Böden	Bestandesform	N
<i>experiment</i>	<i>geographical region</i>	<i>temperature (in veg. period) precipitation (in veg. period)</i>	<i>altitude exposition inclination</i>	<i>geology</i>	<i>soil</i>	<i>stand type</i>	<i>N</i>
005	„Denklingen“ WG 13.4 Schwäbisch-bayerische Schotterplatten und Altmoränenlandschaften WB Vorallgäu	6,9°C (13,7°C) 1332 mm (630 mm)	720 m NN eben – <i>flat</i>	Aus Jung- und Altmoränen entstandene Flussschotterterrassenlandschaft	tiefgründige Lehmböden	Fi	4
Höglwald	„Höglwald“ WG 12.8 Tertiäres Hügelland WB Oberbayerisches Tertiärhügelland	8,5°C (15,5°C) 888 mm (510 mm)	540 m NN eben – <i>flat</i>	Feinsediment des Obermiozän, Lößlehm	saure Parabraunerden	Fi	5
814	„Schongau“ WG 14.4.1 Schwäbisch-Bayerische Jungmoräne und Molassevorberge WB Oberbayerische Jungmoräne TWB Westliche kalkalpine Jungmoräne	6,8°C (13,9°C) 1114 mm (648 mm)	Exp. unterschiedlichmäßig geneigt bis eben <i>light slope or flat</i>	Günz-Mindel Deckenschotter	Braunerden	Fi	12
134	„Zwiesel“ WG 11.3 Bayerischer Wald, WB Innerer Bayerischer	5,0°C (13°C) 1100 mm (490 mm)	700 m NN Westmäßig geneigt – <i>light slope</i>	Granite und Gneise	mächtige Braunerden häufig podsoliert	Fi/Bu	12
135	„Zwiesel“ WG 11.3 Bayerischer Wald, WB Innerer Bayerischer	5,0°C (13°C) 1100 mm (490 mm)	700 m NN Westmäßig geneigt – <i>light slope</i>	Granite und Gneise	mächtige Braunerden häufig podsoliert	Bu/Fi	4

Bu = *Fagus sylvatica*, Fi = *Picea abies*

Versuchsziel und ertragskundliche Eckwerte der beprobten Parzellen

Der Versuch Denklingen 005 wurde als klassischer Fichten-Durchforstungsversuch angelegt, während die Versuchsflächen in Zwiesel und im Schongau als Mischbestandsversuche aus Fichte und Buche konzipiert sind.

Der Versuch in Denklingen wurde bereits 1990 aufgelöst. Die Flächenangaben beziehen sich auch auf dieses Datum. Die Probestämme wurden aus einer bis 1990 undurchforsteten Fläche gewonnen und standen dann bis zur Entnahme 1999 in einer einseitig freigestellten Wuchskonstellation am Bestandesrand. Der Versuch Schongau 814 ist wie auch der Versuch Freising 813 (Datenkollektiv A) Teil einer Mischbestandswuchsreihe, auf deren Parzellen Mischbestände unterschiedlichen Alters auf vergleichbaren Standorten untersucht werden. Auf den Versuchen Zwiesel 134 und Zwiesel 135 sind dagegen bei ähnlichem Alter auf den verschiedenen Parzellen unterschiedliche Mischungsanteile von Fichte und Buche realisiert, um die Auswirkung der Mischung auf die einzelnen Bäume und die Bestandesleistung zu untersuchen. Eine ertragskundliche Übersicht über die beprobten Parzellen findet sich in Tabelle 4-21. Für den Versuch Höglwald liegt keine Flächencharakterisierung vor, da es sich nicht um eine langfristig ertragskundlich beobachtete Fläche handelt.

Tabelle 4-21: Ertragskundliche Eckwerte der beprobten Versuchsflächen und Parzellen. *Overview on the growth and yield parameters of the experimental plots, where sample trees were harvested.*

Fläche	Parzelle	Verband	N/ha	H _o [m]	D _o [cm]	H _o /D _o	MGH [m ²]	DGZ [m ³]
DEN 005	1	Fichte	508	42,6	63,7	67	87,29	89,2
SON 814	1	Buche	149	33,7	48,4	70	14,2	14,7
		Gesamt	466				66,5	68,5
		2	Fichte	346	37,8	60,2	63	63,6
		Buche	96	35,2	47,4	74	8,3	8,6
		Gesamt	442				71,9	74,3
	4	Fichte	1035	29,5	42,1	70	58,2	62,4
		Buche	136	27,6	40,6	68	8,1	8,7
		Gesamt	1171				66,3	71,1
	5	Fichte	231	32,5	48,6	67	24,2	25,4
		Buche	267	36,2	46,9	77	23,8	25,2
Gesamt		498				48	50,6	
ZWI 134	1	Fichte	173	38,4	46,9	82	31,1	32,0
		Buche	230	34,2	26,1	131	12,6	13,1
		Gesamt	403				43,7	45,2
	2	Fichte	210	40,7	59,3	69	44,4	45,8
		Buche	120	35,1	33,7	104	5,1	5,3
		Gesamt	330				49,5	51,1
	3	Fichte	213	39,4	60,3	65	48,4	49,6
		Buche	160	31,7	31,5	101	4,5	4,7
		Gesamt	373				52,9	54,3
	5	Fichte	263	34,7	49,5	70	32,8	34,0
		Buche	257	30,1	39,9	75	12,7	13,1
		Gesamt	520				45,5	47,2

Tabelle 4-21: Ertragskundliche Eckwerte der beprobten Versuchsflächen und Parzellen. *Overview on the growth and yield parameters of the experimental plots, where sample trees were harvested.* (Forts.)

Fläche	Parzelle	Verband	N/ha	H ₀ [m]	D ₀ [cm]	H ₀ /D ₀	MGH [m ²]	DGZ [m ³]
ZWI 135	2	Fichte	17	39,6	59,9	66	2,9	3,0
		Buche	543	27,1	39,9	68	26,8	28,5
		Gesamt	560					31,4
	3	Fichte	43	31,8	57,6	55	6,4	6,7
		Buche	687	25,1	36,7	68	26	27,6
		Gesamt	730					34,3
	5	Fichte	213	31,4	29,1	108	20,2	21,1
		Buche	620	24,3	19,2	127	18,3	19,4
		Gesamt	833					40,6

N = Stammzahl pro Hektar vor der Probenahme, H₀ bzw. D₀ = Höhe bzw. Durchmesser des Grundflächenmittelstammes der 20% stärksten Bäume, MGH = mittlere Grundflächenhaltung; GG = Gesamtgrundfläche, DGZ = durchschnittlicher Gesamtzuwachs

N = stems /ha before sampling, H₀ and D₀ resp = height and diameter resp. of the 20% trees with the highest diameter; MGH = average basal area, DGZ = average volume increment, GG = current basal area

Messgrößen am Einzelbaum

An allen Bäumen wurde das bereits für das Datenkollektiv A (Abschnitt 4.2.1) beschriebene Messprogramm durchgeführt. Die Probestämme sind in Tabelle 4-22 charakterisiert. Angegeben sind jeweils typische Dimensionsgrößen der Einzelbäume und die Anzahl der Stichproben in den Stichprobenschichten SP 1 und SP 2. Die Gesamtsumme der gemessenen Astwerte für die einzelnen Stichprobenparameter ist für die Stichprobenschicht SP 1 in Tabelle 4-23 und für die Stichprobenschicht SP 2 in Tabelle 4-24 aufgeschlüsselt.

Tabelle 4-22: Waldwachstumskundliche Charakterisierung der entnommenen Probestämme mit der Angabe der Stichprobenzahlen der Astmessungen. Bei der Anzahl der Astwerte pro Baum sind die Schichten der Stichproben (SP 1, SP 2) angegeben, für die jeweils unterschiedliche Größen gemessen wurden.

Characterisation of the dimension of the sample trees with the sampled branches. For the sampled branch numbers the three sample stages (SP 1, SP 2) are given, which denote for different parameters and sample densities.

Fläche	Parzelle	Nr.	BHD o. R.	H [m]	H/D	KA [m]	Kronen-	Astwerte	Astwerte	
<i>trial</i>	<i>plot</i>	<i>No.</i>	<i>DBH under bark [cm]</i>	<i>height [m]</i>	<i>H/D</i>	<i>crown base</i>	<i>prozent [%]</i>	<i>branch sample 1</i>	<i>branch sample 2</i>	
005	1	15	67	41,85		25,08	40	377	69	
		47	62,4	38,4		24,60	36	652	124	
		248	52,5	38,62		25,06	35	337	73	
		343	49,6	38,15		26,65	30	746	84	
		Bäume:	4					Summe:	2112	350
Höglwald	0	252	50,4	37,2		73,8	24,82	33	343	244
		268	56,6	38,6		68,2	23,77	38	217	166
		270	56,8	37,8		66,6	21,84	42	361	220
		285	47,5	36,5		76,8	24,91	32	331	209
		286	41,1	36,3		88,4	24,67	32	372	280
Bäume:	5					Summe:	1624	1119		

Tabelle 4-22: Waldwachstumskundliche Charakterisierung der entnommenen Probebäume mit der Angabe der Stichprobenzahlen der Astmessungen. Bei der Anzahl der Astwerte pro Baum sind die Schichten der Stichproben (SP 1, SP 2) angegeben, für die jeweils unterschiedliche Größen gemessen wurden.

Characterisation of the dimension of the sample trees with the sampled branches. For the sampled branch numbers the three sample stages (SP 1, SP 2) are given, which denote for different parameters and sample densities.

Fläche	Parzelle	Nr.	BHD o.R. [cm]	H [m]	H/D	KA [m]	Kronen- prozent [%]	Astwerte SP 1	Astwerte SP 2	
<i>trial</i>	<i>plot</i>	<i>No.</i>	<i>DBH under bark [cm]</i>	<i>height [m]</i>	<i>H/D</i>	<i>crown base</i>	<i>crown percentage</i>	<i>branch sample 1</i>	<i>branch sample 2</i>	
814	1	59	53,8	33,1	61,5	18,4	44	336	34	
		2	15	47	33,9	72,1	22,7	33	353	7
			50	51,1	35,4	69,3	25,8	27	273	22
			108	56,7	37,2	65,6	25,2	32	379	30
			140	42,5	32,3	76,0	22,0	32	321	42
	4	79	34,9	28,2	80,8	16,6	41	336	51	
		148	27,7	25,6	92,4	17,2	33	364	93	
		473	27,5	24,2	87,9	14,3	41	353	95	
		531	37,7	29,8	79,0	9,2	69	242	103	
		579	31,3	26,8	85,6	20,4	24	380	88	
	5	5	40	29,3	73,1	17,2	41	364	47	
		99	53,2	29,7	55,8	12,2	59	282	0	
		124	43,8	29,9	68,3	15,8	47	270	32	
	Bäume	13					Summe:	4253	644	
134	1	115	33,4	33,8	101,2	33,4	50			
		8	44,6	31,6	70,9	44,6	58	87	55	
		72	41,2	33,3	80,9	41,2	44	329	111	
	2	127	39,9	38,9	97,5	39,9	61			
		21	38,6	35,8	92,7	38,6	43	76	49	
		50	49,3	37,8	81,6	46,3	32	92	54	
		66	46,1	37,2	80,7	46,1	44	108	70	
		70	49,6	40,4	81,5	49,6	51	122	70	
		93	42,3	35,0	82,7	42,3	57	94	49	
	3	36	44,2	38,5	87,1	44,2	71	88	53	
		80	46,3	34,0	73,4	46,3	51	95	61	
	5	41	37,3	37,7	101,1	37,3	66	111	61	
		92	32,3	32,2	100,0	32,3	51	114	62	
141		43,5	33,4	76,8	43,5	48	121	58		
	Bäume:	14					Summe:	1437	753	
135	3	304	41,1	30,88	75,1	15,3	50	110	66	
		5	288	40,3	30,45	75,6	12,03	60	130	67
		312	32,7	28,29	86,5	11,15	61	122	74	
		446	35,1	30,44	86,7	17,6	42	138	80	
	Bäume:	4					Summe:	500	287	

Bei den Aufnahmen wurde zuerst die Konkurrenzsituation der Probebäume charakterisiert, indem die Position alle Konkurrenzbaume nach einem Biogruppenkonzept (s. Unterkapitel 4.1) relativ zum Probebaum eingemessen wurde. Danach erfolgte die Fällung des Probebaums mit

anschließender Triebblängenrückmessung der Terminalachse. Anschließend wurde die grüne Krone in einzelne Astquirle zerlegt, die zur Astvermessung wieder in ihre ursprüngliche Lage aufgerichtet wurden, sodass die Äste am Quirl frei hängen konnten.

Es wurde bei der Astmessung in einem geschichteten Stichprobenverfahren vorgegangen. An allen grünen Ästen wurden als erste Stichprobenschicht (SP 1) die in Tabelle 4-23 aufgeführten Größen gemessen.

Tabelle 4-23: Stichprobe 1 (SP 1) der Astmessung. *Sample stage 1 (SP 1)*

Messgröße <i>variables</i>	Einheit <i>unit</i>	Messwerte <i>value</i>	Beschreibung <i>description</i>
ADvgrün	(mm)	1550	Astdurchmesser am Nadelansatz, stammachsenparallel
Llin	(cm)		Lineare Astlänge vom Astansatz zur Astspitze
Lproj	(cm)		Horizontalprojektion von Llin
AWreal	(°)	4928	Astabgangswinkel auf den ersten 20 cm, gemessen von unten
AWlin	(°)		Astwinkel von Llin zur Stammachse nach unten
Position	(cm)		Sechs Parameter zur räumlichen Bestimmung der Astkrümmung

Zusätzlich dazu erfolgte die Erfassung der Äste jedes zweiten Quirls, nach den in Tabelle 4-24 aufgelisteten Größen als zweite Stichprobenschicht (SP 2).

Tabelle 4-24: Stichprobe 2 (SP 2) der Astmessung. *Sample stage 2 (SP 2)*

Messgröße <i>variables</i>	Einheit <i>unit</i>	Messwerte <i>value</i>	Beschreibung <i>description</i>
Azimut	(°)	10466	Himmelsrichtung der Äste
ADvert	(mm)	9926	Astansatzdurchmesser, stammachsenparallel gemessen
Aststatus	nominal	10466	Bemerkung, ob der Ast tot war oder Schäden aufwies

Bei der Messung der Position wurden die horizontalen und vertikalen Koordinaten des Astansatzes, des Ansatzes des ersten grünen Zweiges an der S1-Achse (Hauptachse des Astes) und der Astspitze erhoben. Die Bestimmung der Werte erfolgte relativ zum Astquirl. Optional wurde bei einigen Ästen mit wechselnder Krümmung der Astachse auch die Position des Wendepunktes dieser Krümmung erfasst. Aus den Positionswerten des Astansatzes und der Astspitze werden die in Tabelle 4-24 aufgeführte lineare Astlänge (Llin), die Horizontalprojektion davon (Lproj) und der lineare Astwinkel berechnet, sodass sich eine separate Messung dieser Werte erübrigte.

4.3 Einflüsse auf das Kronen- und Astwachstum

Influencing factors on crown and branch growth

4.3.1 Beschreibung der Astigkeit – *Description of branchiness*

Bei der Definition von Astigkeit wird häufig nach „innerer“ und „äußerer“ Astigkeit unterschieden. Unter innerer Astigkeit (englisch: „knottiness“) wird die Verteilung und Dimension der Äste im Holz verstanden. Die äußere Astigkeit (englisch: „branchiness“) definiert die äußerlich messbare Verteilung und Dimension der Äste am Stamm. Beide Begriffe beschreiben damit ein und denselben Sachverhalt aus unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Blickwinkeln, da die außen an der Rinde messbaren Äste bei der Fichte in der Regel bis ins Mark des Stammes reichen und daher auch die innere Astigkeit reflektieren. Durch den sukzessiven Einschluss der stammnahen äußeren Astteile im Zuge des radialen Stammwachstums ergibt eine Betrachtung der äußeren Astigkeit über die Zeit nach Abzug des Rindenanteils zwangsläufig die innere Astigkeit.

Charakterisierung der Astigkeit durch Indexwerte

Zur quantitativen Charakterisierung der Astigkeit von Holzkörpern und ganzen Stämmen werden unter anderem aggregierende Indexwerte herangezogen, wie der gebräuchliche „Knot Area Ratio“ oder KAR (TREDWELL 1973), der die Querschnittsfläche der Äste zur Gesamtoberfläche des Holzkörpers in Beziehung setzt. Der KAR wird vor allem bei Schnittholz angewandt, kann aber auch für Rundholz berechnet werden.

Eine Erweiterung dieses Index auf drei Dimensionen wird von VAN LAAR (1976) eingeführt. Er setzt das Astvolumen zum Stammvolumen in Beziehung und hat damit eine geeignete Größe zur Charakterisierung der Astigkeit zur Verfügung, die den dreidimensionalen Aspekt des Asteinflusses im Holz betont. Analog zum „KAR“ wird hier „KVR“ („Knot Volume Ratio“) als Ausdruck für diesen Indexwert vorgeschlagen.

Es existieren jedoch noch etliche weitere Indizes. ILSTEDT und ERIKSSON (1986) beispielsweise setzen die Summe aller Astdurchmesser eines Baumes mit seinem Brusthöhendurchmesser in Beziehung, um die Astigkeit zu charakterisieren.

Ein weiterer Index ist der Aststärkenindex „ASIX“ nach STRUCK und DOHRENBUSCH (2000), bei dem der Durchmesser des stärksten Astes zum Brusthöhendurchmesser des Baumes in Relation gesetzt wird. Der abgeleitete Index kann vor allem dazu eingesetzt werden, Bäume gleichen Durchmessers hinsichtlich ihrer äußeren Astigkeit zu vergleichen, da starke Äste an Bäumen geringeren Stammdurchmessers die Holzqualität stärker beeinflussen als an Bäumen mit hohen Brusthöhendurchmessern. VESTØL et al. (1999) setzen die drei stärksten Äste pro Höhenabschnitt mit dem Brusthöhendurchmesser in Beziehung und erreichen damit eine ähnliche Aussage, die zusätzlich nach Höhe differenziert.

Detaillierte Beschreibung der Aststruktur

Wenn wie in dieser Arbeit eine detaillierte Beschreibung der Aststruktur angestrebt wird, reichen aggregierende Indexwerte nicht mehr aus. Zur exakten Charakterisierung der Astposition und -dimension bieten sich als objektiv vergleichbare, metrische Beschreibungsgrößen die Astlänge, der Astdurchmesser, der Astwinkel sowie die horizontale und die vertikale Astposition an. Wichtig ist neben dieser Beschreibung nach Dimensionsgrößen und topologischen Merkmalen noch der Status des Astes. Darunter versteht man, ob der Ast noch lebendig und damit fest

mit dem Baum verwachsen ist oder als Totast keine gewachsene Verbindung mehr mit dem Holz des Stammes besitzt und lediglich vom Stamm umschlossen wird. Die einzelnen hier genannten Größen werden in den folgenden Abschnitten genauer definiert und charakterisiert.

4.3.2 Vertikale Astposition – *Vertical branch position*

Erfassung und Charakterisierung der vertikalen Astposition

Die vertikale Astposition charakterisiert die Anzahl und Verteilung der Äste entlang der Stammachse. Diese hängt bei der Fichte unter anderem von der Länge des Terminaltriebes und der Anzahl der Seitentriebe am Terminaltrieb ab. Ähnlich wie viele andere Koniferen bildet die Fichte eine deutliche Quirlstruktur aus, bei der zwei Quirle in der Regel durch den jährlichen Höhenzuwachs der Stammachse getrennt sind (Abb. 4-2, Teil A). Zwischen den Astquirlen (Nodien) existieren mehr oder weniger astfreie Internodialbereiche. Die vertikale Verteilung der Äste ist in einem solchen Fall stark geklumpt. Treiben an den Internodien weitere Triebe, so genannte Internodialtriebe, aus (Abb. 4-2, Teil B), nähert sich die vertikale Verteilung der Asttriebe am Stammtrieb zunehmend einer Gleichverteilung an.

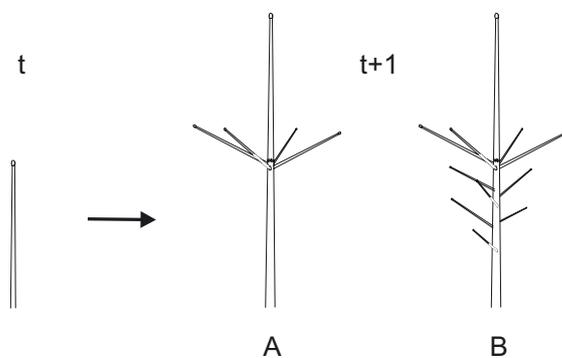


Abbildung 4-2: Die Quirlbildung bei der Fichte: A zeigt die ausschließliche Entwicklung von Quirlästen, B den Austrieb von Internodialästen, deren Längenentwicklung gemäß einer akrotonen Förderung zur Triebspitze hin aufweist. *Whorl formation at Norway spruce: A shows the exclusive development of whorl branches, B shows the formation of internodial branches with a promotion of length growth towards the tip caused by acrotony.*

Die Erfassung der vertikalen Astposition bei der Triblängenrückmessung an der Stammachse erfolgt meist im Rahmen von Probebaumfällungen. Das Ende eines Jahrestriebes der Stammachse ist dabei durch die Knospenschuppennarben der ehemaligen Terminalknospe zu erkennen, die allerdings nur noch bei jungen bis mittelalten Trieben deutlich sichtbar sind. Die Entfernung der Äste von der Triebspitze kann dann einfach gemessen werden. Bei älteren Trieben kann davon ausgegangen werden, dass der Quirl sich so eindeutig differenziert hat, dass die obersten Äste aus den apikalen und subapikalen Knospen entstammen und damit die Triebspitze als Referenzpunkt für die vertikale Astverteilung benutzt werden kann.

Einfluss des Standorts

Der standörtliche Einfluss auf das Höhenwachstum, der die vertikale Astposition stark bestimmt, ist seit langer Zeit bekannt und besonders am Beispiel der Fichte ausführlich diskutiert (vgl. z.B. ASSMANN 1955, KAHN 1994, KRAMER 1963, MOOSMAYER 1974, UTSCHIG 2000, WENK und GEROLD 1984). Nach dem Stand dieses Wissens kann davon ausgegangen werden, dass der standörtliche Einfluss auf das Höhenwachstum der Fichte vor allem von der Wasserversorgung bestimmt wird. Temperatur und Nährstoffversorgung spielen jedoch auch eine Rolle.

Dieser enge Zusammenhang zwischen Standort und Höhenwachstum wird in der Praxis zum Vergleich der Produktivität verschiedener Standorte benutzt und dient in den Ertragstafelwerken zur Abschätzung der Bestandesleistung im Rahmen der forstlichen Planung (z. B. ASSMANN und FRANZ 1963, VON GUTTENBERG 1915, WENK et al. 1985, WIEDEMANN 1936/42). Standort-Wachstums-Zusammenhänge sind auch in Waldwachstumssimulatoren integriert, da für Prognoserechnungen möglichst genaue Adaptionen der Eingangsgrößen an bestimmte Standorte benötigt werden (KAHN 1994, 1995b, PRETZSCH und KAHN 1998, PRETZSCH 2001). Das Standort-Leistungs-Modell in SILVA ist ein Beispiel dafür (siehe Kapitel 3.3).

Wie LEWARK (1981) feststellt, ist nicht nur der Höhenzuwachs standörtlich beeinflusst, sondern auch die Anzahl der Internodialäste. Damit stützt er den bereits von VAN LAAR (1976) beschriebenen Standorteinfluss auf die Astzahl pro Baum. LEWARK benutzt allerdings die Wuchsleistung zur Charakterisierung und nicht direkt standörtliche Variablen. Die Wuchsleistung beinhaltet jedoch Effekte von Konkurrenz, Genetik und Standort, was eine Beurteilung des rein standörtlich bedingten Anteils nicht ermöglicht.

Einfluss des Genotyps

Der genetische Einfluss auf den Höhenzuwachs und damit den Quirlabstand bei Koniferen ist vielfach belegt. In zahlreichen Provenienzversuchen können deutliche Unterschiede im Höhenwachstum verschiedener Herkünfte festgestellt werden (z. B. BACHMANN 2000, SCHOBER 1988, UTSCHIG und STIMM 1994). Einige Provenienzen weisen auf gleichem Standort zwar ein schnelles Jugendwachstum auf, werden aber später von anderen Herkünften überholt. Dies unterstreicht, dass unterschiedliche Genotypen unterschiedlichen Reaktionsmustern auf bestimmten Standort- und Konkurrenzbedingungen folgen. LIESEBACH (1994) bestätigt dies, indem er bei der Höhenentwicklung von Fichten ein mehrfaches Wechseln der Rangfolge verschiedener Genotypen feststellt. Weiter untermauert werden genetisch bedingte Unterschiede im Höhenwachstum auch durch Ergebnisse an Klonmaterial. So können KRAMER et al. (1970) hochsignifikante Unterschiede im Höhenwachstum von freiständig erwachsenen jungen Klonfichten je nach Klonzugehörigkeit nachweisen. Die gleichen Beobachtungen machen KLEINSCHMIT und SVOLBA (1998). Sie beobachteten bei ausgewählten 18-jährigen Fichtenklonen einen Höhenvorsprung von 14,1% gegenüber dem Vergleichskollektiv. Eigene Untersuchungen an den Klonfichten des Kollektivs E bestätigen den Effekt der Genetik auf das Höhenwachstum. Mittels Varianzkomponentenanalyse lässt sich bei undurchforsteten Parzellen der genetisch bedingte Anteil der Gesamtvarianz auf 17% quantifizieren. Damit liegt der genetische Einfluss auf das Höhenwachstum noch über dem des Pflanzverbandes (11%), wie in Abb. 4-3 zu erkennen ist. Die Unterschiede zwischen den Klonen sind dabei höchstsignifikant.

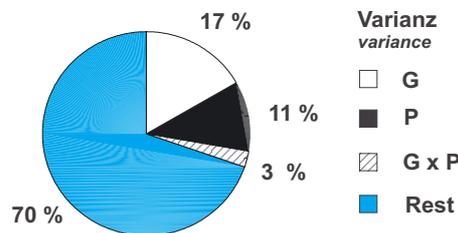


Abbildung 4-3: Einflussgrößen auf das Höhenwachstum ermittelt durch eine Varianzkomponentenanalyse an dem 28-jährigen Klonfichtenversuch VOH 622. G=Genetischer Effekt, P=Pflanzverband (Konkurrenzeffekt), G x P=Interaktion von Genetik und Konkurrenz, Rest=unerklärte Reststreuung.

Factors influencing height growth, investigated for the 28-year old clone experiment VOH 622 by means of variance component analysis. G=genetical effect, P=planting density (competition effect), G x P= interaction between G and P, Rest=unexplained variance.

Auch die Anzahl der gebildeten Asttriebe am Leittrieb scheint bei der Fichte einem genetischen Einfluss zu unterliegen. ZOBEL und JETT (1995) konstatieren einen moderaten genetischen Einfluss auf die vertikale Astposition, der ihrer Meinung nach unter anderem auf den Grad der Quirlbildung zurückgeht.

Laut LEWARK (1981) unterliegt die Zahl der Internodialäste einem ähnlich hohen genetischen Einfluss wie die Zahl der Quirläste. Einige Klone zeigen deshalb mehr Internodialäste als andere. Auch LIESEBACH (1994) findet einen genetischen Einfluss auf die Anzahl an Internodialästen. Er stützt sich dabei auf Untersuchungen an einem internationalen Fichten-Provenienzversuch.

ILSTEDT und ERIKSSON (1986) gelingt es, anhand von Kreuzungsexperimenten in Schweden signifikante Unterschiede der Astzahl auf den untersten zwei Metern des Stammes zwischen verschiedenen Genotypen zu belegen. Der genetisch erklärbare Anteil an der Gesamtvarianz liegt dabei im Durchschnitt in einem Bereich von 1,9–12,3%. Gemessen wurden Äste über 10 mm Durchmesser. Allerdings bleibt in dieser Untersuchung offen, ob sich die Unterschiede auf eine unterschiedliche Astzahl der Quirläste, der Internodialäste oder auf Unterschiede im Quirlabstand zurückführen lassen.

Einfluss des Alters

Ein Alterseinfluss auf die vertikale Astposition beruht in erster Linie auf einem geänderten Höhenzuwachsverhalten des Baumes mit zunehmendem Alter, da die vertikale Verteilung der Astquirle überwiegend durch den jährlichen Höhenzuwachs des Stammes bestimmt ist. Nach einem starken Anstieg des Höhenzuwachses in der Jugend folgt nach ASSMANN (1961) eine Vollkraftphase mit Zuwächsen auf hohem Niveau bis zu einer Altersphase mit sinkenden Jahreshöhenzuwächsen.

Dieser idealtypische Wachstumsverlauf kann jedoch von standörtlichen Bedingungen und der spezifischen Konkurrenzsituation modifiziert werden, wie beispielsweise KÜSTERS (2001), PRETZSCH (1985) für Kiefer und SEIFERT et al. (2002) für Fichte nachweisen.

Einfluss der Konkurrenz

Die Konkurrenz wirkt auf die vertikale Astposition auf mehreren Ebenen. Eine Wirkungsebene ist der Einfluss der Konkurrenz auf das Höhenwachstum und damit die Quirlabstände. Der Konkurrenzeinfluss auf den Höhenzuwachs des Baumes soll hier anhand eines Beispielsbaumes verdeutlicht werden, bei dem eine Konkurrenzänderung zu einer deutlichen Abweichung vom alterstypisch zu erwarteten Zuwachsverhalten führt (SEIFERT et al. 2002). Dargestellt ist der Zuwachsverlauf des Baumes 2300 aus dem Datenkollektiv B (Abb. 4-4).

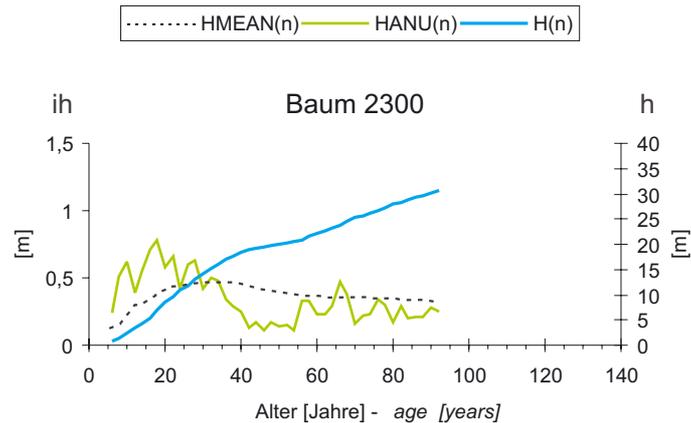


Abbildung 4-4: Atypisches Höhenwachstum einer Fichte nach einer starken Freistellung im Alter 45. HMEAN = mittlerer jährlicher Höhenzuwachs, HANU = jährliches Höhenzuwachs, H = Höhenwachstum (rechte Skala). *Atypical height growth pattern of a spruce tree after rigorously removing competitors at age 45.* HMEAN = average annual height increment, HANU = annual height increment, H = tree height (right scala)

Der jährliche Höhenzuwachs des Baumes folgt zuerst leicht zeitversetzt in der Aufschwung- und Vollkraftphase dem idealtypischen Verlauf nach ASSMANN (1961). In der Phase, in der ein Abschwung zu erwarten wäre, bildet der Probebaume jedoch durch eine starke Freistellung im Alter 45 einen zweiten Zuwachsgipfel aus und wächst deutlich stärker zu als zu erwarten wäre.

Neben dem Einfluss auf die Quirlabstände lässt sich jedoch auch ein Konkurrenzinfluss auf die Astzahl feststellen. Das häufigere Vorhandensein von Internodialtrieben im oberen Kronenbereich spiegelt Konkurrenzunterschiede entlang der Baumkrone wieder. Laut VON DROSTE ZU HÜLSHOFF (1969) werden bei herrschenden und vorherrschenden Fichten in der oberen Lichtkrone viele Internodialäste („Zwischentriebe“) gebildet, die aber nach einigen Jahren wieder absterben. Sein Probebaum mit niedriger sozialer Stellung zeigt folgerichtig eine geringe Neigung zur Ausbildung von Zwischentrieben.

Die Anzahl von Ästen bzw. Trieben bestimmt sich aus der gebildeten Knospenzahl und dem Anteil, der davon austreibt und mittel- bis langfristig überlebt. Das bedeutet, dass bei der Betrachtung der vertikalen Astposition zu einem bestimmten Zeitpunkt auch eine Mortalitätskomponente zu berücksichtigen ist. Zudem ist die Anzahl und die Vitalität der gebildeten Knospen auch vom Standort abhängig, so dass immer mehrere Einflussfaktoren gleichzeitig wirken. SCHILL (1993) schildert ausführlich Bildung von Knospen an jungen Fichten, die sich wie folgt zusammenfassen lassen: Die vertikale Verteilung der Knospen über den Leittrieb der Stammachse entspricht bis auf eine Häufung an der Triebbasis einer Gleichverteilung. Dies gilt aber nur, wenn (bei jungen Bäumen) im Vorjahr kein sylleptischer (vorzeitiger) Austrieb der Knospen erfolgt ist und die Knospen somit für einen regulären Austrieb im laufenden Jahr zur Verfügung stehen. In ihrer Größenentwicklung folgen die Knospen am Leittrieb der Stammachse einer starken apikalen Dominanz. Die Knospen an der Triebspitze sind deutlich größer als weiter unten am Trieb. SCHILL (1993) beobachtet weiter eine deutlich stärkere Streckung der apikalen (spitzennahen) Triebe gegenüber angrenzenden basipetalen (grundständigen) Trieben. Die Triebe zeigen damit eine kontinuierliche Längenabnahme von der Spitze zur Basis des Haupttriebs analog den Knospengrößen, wobei die basipetalen Triebe nur noch 25% der subapikalen Triebe erreichen (siehe Abb. 4-2). Daraus ergibt sich ein morphologischer Hinweis für die Quirlbildung bei der Fichte und das Absterben der meisten Internodialäste, die durch ihre geringere Länge und Wuchskraft von den darüber liegenden apikalen Quirlästen ausgedunkelt

werden. Die späteren Quirle sind nicht leicht abgrenzbar, da sich die Quirläste über eine vertikale Triebblänge von ca. 20–25 cm erstrecken können, indem sich neben den apikalen auch weitere subapikale Triebe durchsetzen.

Eigene Untersuchungen belegen, dass die Anzahl der Internodialäste, die zwischen den Astquirilen vorhanden sind, von der Baumspitze nach unten mit zunehmender Konkurrenz deutlich abnimmt, wie an 600 Ästen aus den Untersuchungen am Datenkollektiv A demonstriert werden kann (Abb. 4-5).

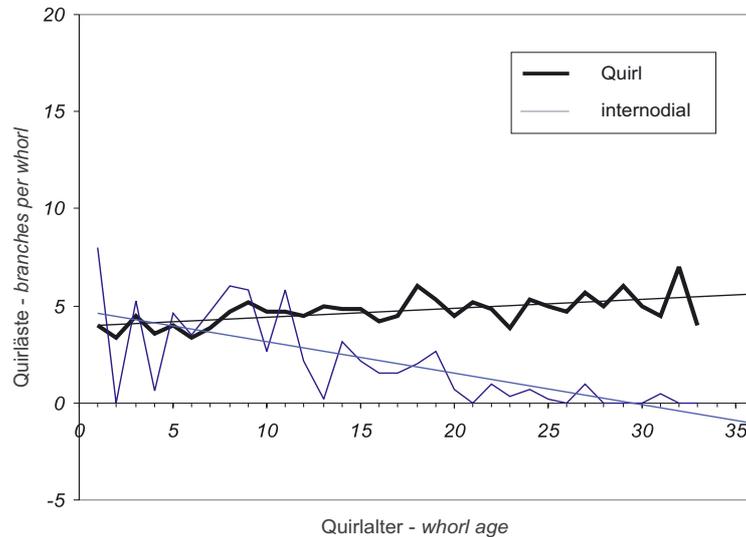


Abbildung 4-5: Veränderung der Astzahl pro Quirl mit zunehmendem Astalter bei Fichten im Bestandesschluss: die Zahl der Internodialäste nimmt deutlich ab, während die Anzahl der Quirläste mehr oder weniger konstant bleibt. *Branch frequency changing with branch age for stand grown Norway spruce: while branch frequency is rather constant for whorl branches it decreases obviously for internodal branches.*

Fehlt diese Konkurrenz, wie es bei den konkurrenzarm gewachsenen Fichten aus dem Datenkollektiv B der Fall ist, überleben tendenziell mehr Internodialäste. Die Folge ist die Ausbildung einer zweiten Astschicht in der grünen Krone, die sich aus Ästen geringen Durchmessers zusammensetzt (SEIFERT et al. 2002). In Abbildung 4-6 ist beispielhaft die Astdurchmesserstruktur einer konkurrenzarm erwachsenen Fichte einer im Kronenschluss erwachsenen Fichte gegenüber gestellt. Deutlich ist beim konkurrenzarm erwachsenen Baum eine zweite Astschicht geringeren Durchmessers zu erkennen, die sich bei einem Baum im Kronenschluss nicht ausbildet.

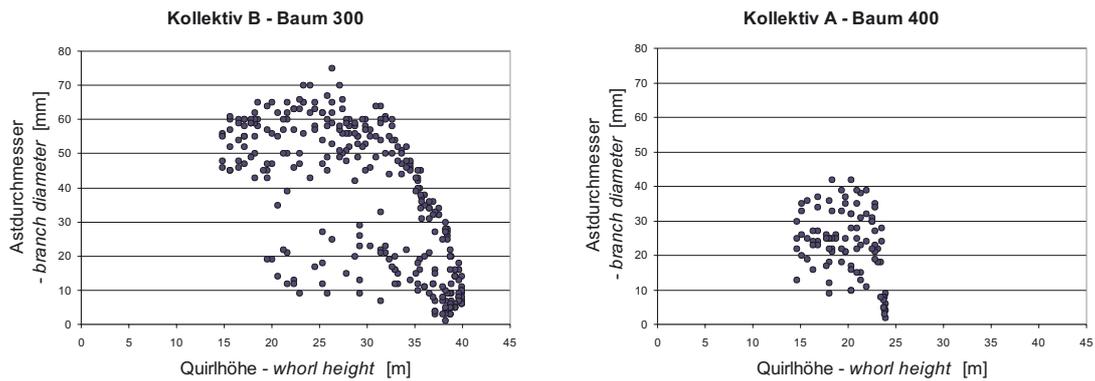


Abbildung 4-6: Astdurchmesserverteilung entlang der Stammachse einer besonders konkurrenzarm gewachsenen Fichte (links) und einer im Dichtstand gewachsenen Fichte (rechts) im Vergleich: Während der engständig erwachsene Baum eine homogene Astverteilung in der Krone aufweist, ist beim konkurrenzarm gewachsenen Baum eine deutliche Zweiteilung in ein Durchmesserkollektiv dünner und ein Kollektiv dickerer Äste zu erkennen.

Distribution of branch diameter of a widely open grown spruce (left) compared to a usual stand grown tree (right): While the stand tree shows a homogenous diameter distribution, the open grown tree's branches can be clearly separated in two groups according to their diameter.

Einfluss der vertikalen Lage

Nach LEHTONEN (1978) variiert die Astzahl pro Quirl bei der Fichte nicht mit der Höhe am Baum. BUES (1990) kommt zum gleichen Resultat. Auch bei der Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) bemerkt MÄKINEN (1999) zwar jährliche Schwankungen der Astzahl entlang der Stammachse, allerdings keine vertikale Tendenz.

VON DROSTE ZU HÜLSHOFF (1969) hingegen konstatiert für die Fichte eine exponentielle Zunahme der Astzahlen in der Krone von unten nach oben. BJÖRKLUND (1997) macht analoge Beobachtungen bei der Kiefer.

Diese unterschiedlichen Befunde lassen sich mittels einer differenzierten Betrachtung der Äste in Quirläste und Internodialäste erklären. Die Aussagen von LEHTONEN und MÄKINEN sind nachvollziehbar, wenn man ausschließlich Quirläste betrachtet.

In eigenen Untersuchungen am Datenkollektiv A wird deutlich, dass die Frequenz der Quirläste entlang der Stammachse kaum eine vertikale Tendenz aufweist, während die Anzahl an Internodialästen von der Baumspitze mit zunehmendem Quirlalter deutlich absinkt. Da es sich um einen Konkurrenzeffekt handelt, wird diese Beobachtung beim Konkurrenzeinfluss auf die vertikale Astposition eingehender diskutiert.

Dieses Resultat stützt auch die Ergebnisse von SAUTER und FAHRBACH (1993), die bei einer Untersuchung der Astzahl pro Meterabschnitt vom Stammfuß aufwärts ebenfalls eine in etwa konstante Astzahl über die Stammlänge beobachten. Sie finden lediglich einen leicht erhöhte Astzahl im Bereich von 2 bis 4 m über dem Boden, was sich durch einen etwas geringeren Höhenzuwachs in dieser Wuchsphase erklären lässt, sodass bei einer Aufnahme in diskreten Abständen tendenziell mehr Quirle als in höheren Stammabschnitten erfasst werden.

Fazit

Die vertikale Astposition ist bestimmt durch das Zusammenspiel des Höhenwachstums des Baumes und der Astriebbildung an den Jahrestrieben der Stammachse. Die Triebbildung am Jahrestrieb zeigt Zusammenhänge zum Längenzuwachs des gleichzeitig oder im Vorjahr gebildeten Terminaltriebes, dessen Längenentwicklung von Standort-, Alters- und Konkurrenzeffekten

ten bestimmt wird. Lange, vitale Terminaltriebe führen im Schnitt zu vitaleren Knospen und folglich zu mehr überlebensfähigen Trieben. Ein genetischer Einfluss auf das Höhenwachstum von Bäumen ist belegt und ein weiterer, standortunabhängiger Einfluss auf die Häufigkeit der Internodialtriebe und deren Verteilung erscheint wahrscheinlich. Die Konkurrenzsituation in der Krone regelt neben dem Quirlabstand auch den Grad der Quirlbildung. Je mehr Konkurrenz ein Leittrieb ausgesetzt ist, desto mehr Internodialtriebe sterben ab oder treiben erst gar nicht aus und desto deutlicher bildet sich die Quirlstruktur heraus.

4.3.3 Horizontale Astposition – *Horizontal branch position*

Erfassung und Charakterisierung der horizontalen Astposition

Die horizontale Astposition ist bei der Fichte bestimmt aus der Astzahl pro Quirl und der horizontalen Astverteilung um den Stamm. Die Astverteilung charakterisiert die Anzahl der Äste nach der Himmelsrichtung (dem Azimut) und kann über einen Kompass erfasst werden. Als Messmethode hat sich eine Sektion der Stämme in einzelne Quirle bewährt. Dabei wird nach einer einmaligen Einnordung des Stammes und der Markierung der Nordrichtung der Azimutwinkel in einer 12-stündigen Uhrskala gemessen, wobei Norden bei 0 Uhr liegt. Im Gelände sind ohne weitere Hilfsmittel dabei Genauigkeiten von etwa einer halben Stunde möglich, was auf eine 360°-Skala umgerechnet 15° entspricht.

LEWARK (1981) untersucht an 10- bis 26-jährigen Klonfichten die obersten fünf Quirle und gibt durchschnittlich 5,1 bis 7,1 Äste pro Quirl als Mittelwert an. Die von ihm beobachtete Verteilung besitzt eine deutlich linkssteile Form, so dass es etliche Quirle mit deutlich mehr Ästen gibt und nur wenige mit einer geringeren Astzahl. In dieses Bild passen auch die Ergebnisse von BUES (1990), nach denen die mittlere Astzahl bei 6 Ästen pro Quirl liegt. Die Untersuchung umfasst die Äste von 52 Fichten aus gepflanzten Reinbeständen im Altersspektrum von 25 bis 120 Jahren, die auf den unteren 15 m des Stammes gemessen wurden.

Die mittlere Astzahl bei den eigenen Aufnahmen am Kollektiv B liegt bei 4,12 Ästen pro Quirl bei einer Standardabweichung von 1,77 und einer Streubreite von 0 bis 19.

Einfluss des Standorts

Laut LEWARK (1981) ist die Quirlastzahl der Fichte vom Standort bzw. der Wachstumsleistung abhängig. Er führt beispielhaft an, dass schlechtere Standorte im Mittel zu weniger Ästen pro Quirl führen. Für die besseren Standorte seiner Untersuchung nennt er eine mittlere Astzahl von 6,6 bis 7,0 am jeweils fünften Quirl eines Baumes, für die schlechteren 5,1 bis 6,2. Er beschreibt die Verteilung für alle Bestände als linkssteil, mit 4 bis 5 Ästen als häufigstem Wert.

Bei anderen Koniferen lassen sich Zusammenhänge zwischen Höhenwachstum und Astzahl pro Quirl finden. Bei Kiefern (*Pinus sylvestris* L.) in schwedischen Beständen gelingt es BJÖRKLUND (1997) einen Zusammenhang der Astzahl pro Quirl zur Ertragsklasse (H100) zu belegen ($R^2 = 0,68$). MÄKINEN (1999) weist ebenfalls für Kiefern (*Pinus sylvestris* L.) eine gleich gut statistisch gesicherte Abhängigkeit der Astzahl von der Länge des Terminaltriebes im gleichen Jahr und von der Trieb länge im Vorjahr nach. Dies liegt daran, dass im Vorjahr die Terminal- und Seitenknospen für das darauf folgende Jahr angelegt werden. In guten Jahren werden dementsprechend sowohl vitalere Terminal- als auch Seitenknospen gebildet, die auch zu längeren Ästen austreiben. Dieser statistische Zusammenhang zwischen Jahrestrieb länge und Astzahl unterliegt laut MÄKINEN (1999) allerdings keinem signifikanten Einfluss durch die Ertragsklasse (H100) oder das Baumalter.

COLIN und HOULLIER (1992) bestätigen bei Fichten den Zusammenhang zwischen Astzahl und Länge des Terminaltriebes. Sie formulieren ein Modell unter der Annahme, dass die Terminaltrieblänge in aggregierter Form klimatisch bedingte Schwankungen der Astzahl widerspiegelt. Ein Alterseffekt wird zusätzlich ins Modell aufgenommen.

Insgesamt ist die Terminaltrieblänge als Proxi-Variable für den Standort auch vom Alter und der Konkurrenzsituation abhängig und ebenso vom genetischen Potenzial des Individuums.

Eigene Untersuchungen am Datenkollektiv B belegen einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Terminaltrieblänge der Vorjahres, in dem die Knospenanlage erfolgt, und der Anzahl der Äste pro Quirl (Abb. 4-7). Untersucht werden alle Äste eines Quirls, insgesamt 9030 Äste an 2323 Quirlen. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei 0,11. Ein nur geringfügig schlechterer Zusammenhang ($R^2=0,09$) findet sich zwischen der Astzahl und der Terminaltrieblänge des Austriebsjahres.

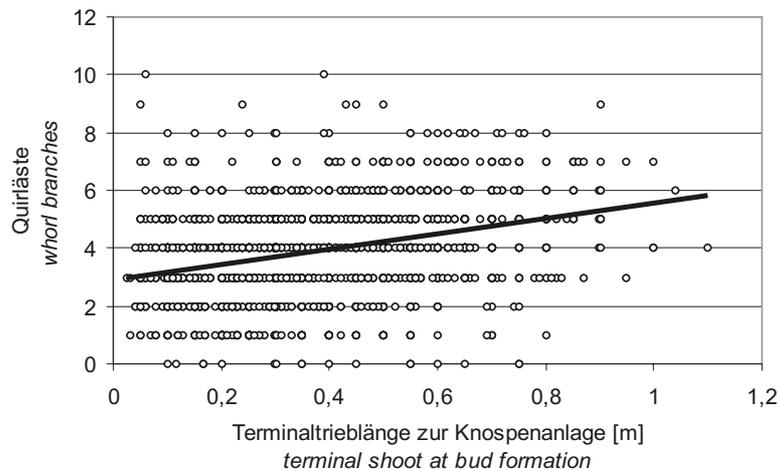


Abbildung 4-7: Anzahl der Äste pro Quirl in Abhängigkeit von der Trieblänge des Terminaltriebs im Vorjahr. *Influence of the terminal shoot length of the preceding year on the number of branches per whorl.*

Diese Ergebnisse mögen ein Hinweis darauf sein, dass die Anzahl der austreibenden Knospen schon zum Teil bei Knospenanlage festgelegt wird. Nach Erkenntnissen von SCHILL (1993) hängt die Länge von einjährigen Ast- und Terminaltrieben bei der Fichte deutlich von der Knospengröße ab, da das Triebängenwachstum vor allem auf einer Streckung der bereits in der Knospe angelegten Zellen beruht.

Relativ hohe Autokorrelationen zwischen Asttrieblängen aufeinander folgender Jahre (DELEUZE et al. 1996) legen nahe, dass ein Ast, der aus einer besonders vitalen Knospe entsteht, auch über mehrere Jahre einen Wuchsvorsprung gegenüber anderen Ästen halten kann. Die ähnlich hohe Korrelation der Astzahl zum gleichzeitig austreibenden Terminaltrieb der Stammachse ist ebenso durch eine deutliche Autokorrelation der Terminaltriebe zurückzuführen. In einem guten Jahr bildet die Fichte demnach einen langen Terminaltrieb mit einer vitalen Spitzenknospe und vitalen Seitenknospen. Der nächstjährige Leittrieb und die gleichzeitig gebildeten Asttriebe profitieren beide von der guten Situation des Vorjahres, was zu höheren Astzahlen bei längeren Terminaltrieben im selben Betrachtungsjahr führt.

Werden bei der Betrachtung des Zusammenhanges zwischen der Terminaltrieblänge und der Astzahl, entsprechend einer Untersuchung von COLIN und HOULLIER (1992), nur Quirläste mit einem gewissen Mindestdurchmesser herangezogen, so ergibt sich ein zusehends strafferer Zusammenhang. Zugrunde liegt wieder der bereits in Abbildung 4-7 dargestellte Datensatz. Das

Bestimmtheitsmaß bei linearem Ausgleich steigt bei der Betrachtung von Quirlästen über 5 bzw. 10 mm auf $R^2=0,16$ bzw. $R^2=0,20$. Dieser Fokussierung auf Äste oberhalb eines definierten Mindestdurchmessers führt zu einer besseren Vergleichbarkeit von Astzahlmessungen an jungen und alten Quirlen, da Äste unter einem gewissen Mindestdurchmesser meist frühzeitig sterben und abfallen und bei älteren Quirlen nicht mehr zur Quirlastzahl gerechnet werden.

Einfluss des Genotyps

Bei einigen Koniferen ist ein genetischer Einfluss auf die Astzahl pro Quirl bekannt. So führen ZOBEL und JETT (1995) für Weihrauchkiefern (*Pinus taeda* L.) deutliche genetisch bedingte Unterschiede in der Astzahl an. NILSON (1968) und REMRÖD (1976) bestätigen eine genetische Kontrolle der Quirlastzahl auch für die Gemeine Kiefer (*Pinus sylvestris* L.).

Für die Fichte belegt LEWARK (1981) anhand eines kombinierten Standort-Klonexperiments einen deutlichen genetischen Einfluss auf die Astzahl pro Quirl. Er stellt beispielhaft die Genotyp-Standort-Interaktion der einzelnen Klone grafisch dar, behält sich aber eine weiterführende Quantifizierung vor.

Eigene Untersuchungen am Fichtenklonversuch Vohenstrauß 622 (Kollektiv E) zeigen deutliche Unterschiede in der Astzahl pro Quirl zwischen verschiedenen Klonen (Abb. 4-8), die höchstsignifikant sind.

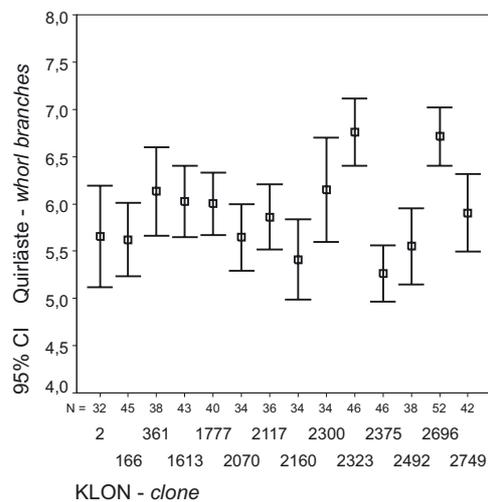


Abbildung 4-8: Genetisch bedingte Unterschiede der Astzahl pro Quirl bei der Fichte charakterisiert an Datenmaterial des Fichtenklonversuchs VOH 622. Dargestellt ist der Mittelwert und das 95 %- Konfidenzintervall.

Differences in number of whorl branches between different clones of Norway spruce on the experiment VOH 622 characterized by the mean value and its 95 confidence interval.

Bei einer Betrachtung der Varianzkomponenten liegt der Effekt des Genotyps auf die Astzahl pro Quirl über alle Parzellen bei 9,4% der Gesamtvarianz. Bei einer Aufschlüsselung des Datensatzes nach durchforsteten und undurchforsteten Parzellen (Abb. 4-9) zeigt sich, dass der genetisch bedingte Varianzanteil bei den undurchforsteten Parzellen mit 8,2% niedriger liegt als bei den behandelten Parzellen mit 14,5%.

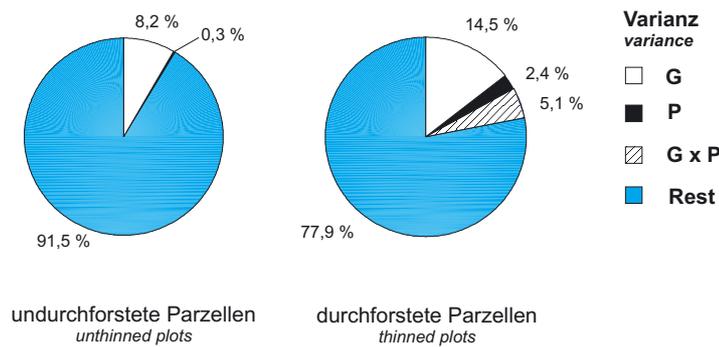


Abbildung 4-9: Untersuchung des genetischen Einflusses und des Konkurrenzeinflusses auf die Astzahl pro Quirl mittels Varianzkomponentenanalyse am 28-jährigen Klonfichtenversuch VOH 622. Der genetische Einfluss dominiert deutlich. G=Genetischer Effekt, P=Pflanzverband (Konkurrenzeffekt), G x P=Interaktion von Genetik und Konkurrenz, Rest=unerklärte Reststreuung.

The 28-year old clone experiment VOH 622 by means of variance component analysis. The domination of the genetic effect is evident. G=genetical effect, P=planting density (competition effect), G x P= interaction between G and P, Rest=unexplained variance.

Sowohl bei den durchforsteten als auch bei den undurchforsteten Parzellen sind die Abweichungen zwischen den Klonen signifikant.

Einfluss des Alters

COLIN und HOULLIER (1992) beschreiben einen Einfluss des Baumalters auf die Astzahl bei der Fichte. Die Autoren bilden die Zusammenhänge in einem Modell nach, das in diesem Abschnitt unter dem Punkt „Einfluss des Standorts“ erläutert wird.

Die Auswertung der kronenspannungsfrei gewachsenen Fichten des Probenkollektivs B zeigen hingegen, dass sich die Anzahl der Quirläste über dem Alter kaum ändert (Abb. 4-10) und bestätigen die bereits am Datenkollektiv A gezeigten Ergebnisse (Abb. 4-5). Wird das leichte Absinken der Ausgleichsgeraden bei höheren Quirlaltern als das Ergebnis von Mortalitätsprozessen interpretiert, durch die an alten Quirlen einige Äste nach dem Absterben abfallen und nach der Überwallung nicht mehr bei der Messung erfasst werden, so ist die Astzahl praktisch konstant.

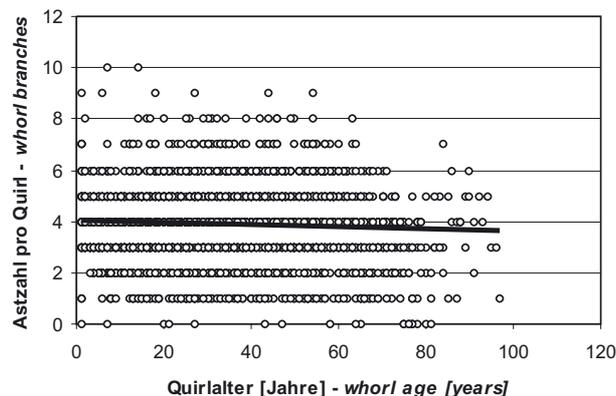


Abbildung 4-10: Die Astzahl pro Quirl verhält sich bei steigendem Ast- und auch Baumalter nahezu konstant. The branch number per whorl seems not to be influenced by branch age or tree age resp.

Einfluss der Konkurrenz

Bei Koniferen ist der Einfluss des Wuchsräumens auf die Astzahl pro Quirl mehrfach nachgewiesen. BUES (1994) führt an Standraumversuchen bei Kiefern (*Pinus sylvestris* L.) eine Zunahme der Astzahl pro Quirl um ein bis zwei Äste bei einer Reduktion der Pflanzanzahl von 20000 auf 2500 pro Hektar an.

JOHANSSON (1992) schildert für den 30-jährigen Pflanzabstandsversuch T61 Tönnersjöheden in Südost-Schweden eine wuchsräumbedingte Variation der Astzahl pro Quirl auf dem Stammschnitt von ein bis zwei Meter über dem Boden. Die Astzahlen steigen von 4,7 bei einem Pflanzverband von 1,8 auf 1,8 m kontinuierlich mit dem Pflanzverband bis auf 7,4 Äste bei einem Pflanzverband von 2,5 auf 2,5 m. Als Grund für diese wuchsräumbedingte Tendenz nennt er die gewählte Messschwelle von zehn Millimetern Mindestdurchmesser, sodass auf den engeren Parzellen auch mehr Äste vorhanden waren, aber diese aufgrund des zu geringen Durchmessers nicht erfasst wurden.

Dagegen stellt BUES (1990) bei der Fichte keinen Einfluss des Pflanzabstandes auf die Quirlastzahl fest. Er untersucht an 52 Fichten verschiedenen Alters die Astzahl pro Quirl in verschiedenen Höhen am Stamm.

Eigene Untersuchungen an den undurchforsteten Parzellen des Kollektivs E in Vohenstrauß ergeben keinen signifikanten Einfluss des Pflanzverbandes. Es wurden wie bei JOHANSSON nur Äste mit einem Mindestdurchmesser von 10 mm einbezogen. Die Ergebnisse von JOHANSSON können damit nicht bestätigt werden. Allerdings zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen unterschiedlich stark durchforsteten Parzellen.

Werden die Varianzkomponenten aller Quirläste betrachtet, ergibt sich eine interessante Interaktion zwischen Konkurrenz und Genetik (siehe Abb. 4-10), wie bereits oben erwähnt.

Der genetisch bedingte Einfluss scheint die Quirlastzahl stärker bei einer Änderung der Konkurrenzsituation zu prägen. Eine längerfristige Differenzierung des Wuchsräumens, wie bei den undurchforsteten Flächen, deren Begründungszahl von 400 bis 3200 Pflanzen pro Hektar reicht, führt zu einem deutlich geringeren genetischen Effekt auf die Quirlastzahl.

Der hohe Anteil der nicht erklärten Varianz in der Varianzkomponentenanalyse belegt zudem die starke endogene Kontrolle der Quirlastzahl bei der Fichte.

Einfluss der Himmelsrichtung

VAN LAAR (1976) findet bei vier Probefichte keinen statistischen Nachweis für eine Abweichung der radialen Astverteilung von einer Gleichverteilung, was durch die Untersuchungen an 693 Ästen aus dem Probekollektiv A bestätigt wird. (Abb. 4-11).

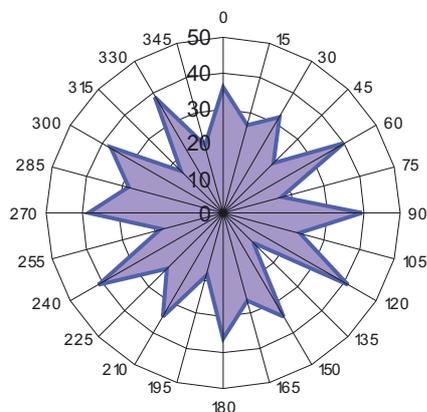


Abbildung 4-11: Azimutverteilung der Äste am Stamm – *radial distribution of branches at the stem.*

Ein auf die zyklische Datenstruktur angepasster U^2 -Test (ZAR 1984) lässt keine signifikante Abweichung von der Gleichverteilung erkennen.

Fazit

Aufgrund des bisherigen Wissens und der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeichnet sich folgendes Bild: Die Äste der Fichte verteilen sich radial gleichmäßig um die Stammachse. Eine Abhängigkeit der horizontalen Verteilung von der Himmelsrichtung kann nicht festgestellt werden.

Die Astzahl pro Quirl zeigt Zusammenhänge zum Baumalter, zum Standort und zur Konkurrenzsituation. Auch ein genetischer Einfluss scheint gegeben zu sein. Der Zusammenhang zwischen der Länge des Terminaltriebs und der Astzahl an diesem Trieb kann als belegt gelten. Der Triebgrößenzuwachs spiegelt dabei als aggregierte Größe, neben einer genetischen Komponente, den Einfluss des Standorts und den der Konkurrenz wider. Insgesamt zeigt sich, dass die Astzahl pro Quirl einer starken endogenen Kontrolle unterliegt.

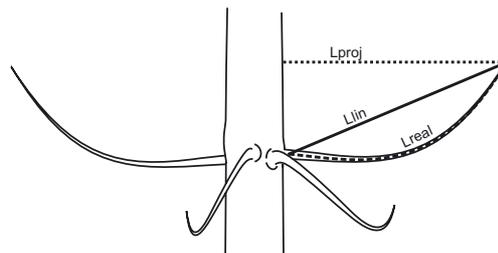
4.3.4 Astlänge – *Branch length*

Ermittlung der Astlänge

Die Astlänge wird meist aus zwei Perspektiven gemessen: einmal betrachtet als äußere Astigkeit und einmal als innere Astigkeit. Aus der Betrachtung der äußeren Astigkeit über die Zeit ergibt sich jedoch die innere Astigkeit. Umgekehrt können aus der inneren Astigkeit Rückschlüsse auf die äußere Astentwicklung gezogen werden.

Die Erfassung der Astlänge bei der Bestimmung der äußeren Astigkeit erfolgt meist vom Astansatz zur Astspitze. Der Astansatz ist dabei als die Austrittsstelle des Astes aus dem Stamm definiert. Die Distanz vom Astansatz zur Astspitze lässt sich unterschiedlich messen, wie in Abb. 4-12 dargestellt. Die Messung kann durch eine lineare Verbindung (L_{lin}) erfolgen, als Horizontalprojektion (L_{proj}), astachsenfolgend (L_{real}) oder über Triblängenserien (L_{trieb}). Die verschiedenen Messmethoden führen dabei zu unterschiedlichen Astlängen und sind deshalb bei Beschreibungen der Astlänge anzugeben. Die gemessenen Astlängenwerte nehmen in folgender Reihenfolge, gemäß der Messmethode, ab: $L_{trieb} > L_{real} > L_{lin} > L_{proj}$

Seitenansicht:



Aufsicht:

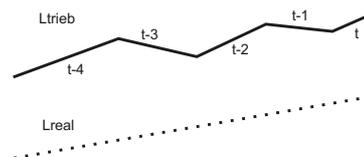


Abbildung 4-12: Definition verschiedener äußerer Astlängen – *Different branch length definitions (upper part: side perspective, lower part: perspective from above)*

Der Längenunterschied zwischen L_{real} und L_{trieb} besteht vor allem darin, dass die Jahrestriebe der Hauptachse des Astes häufig an der Jahresgrenze leichte Winkel aufweisen und nicht linear weiterlaufen (Abb. 4-12 unten), sodass tendenziell Astlängen aus Triebblängenserien etwas länger ausfallen als stammachsenfolgend mit dem Maßband gemessene Astlängen. Dies gilt insbesondere für alte Äste.

Durch eine Analyse von 242 Ästen aus dem Datenkollektiv A konnte eine Umrechnungsfunktion aufgestellt werden, mit der von gemessenen Triebblängensummen die lineare Astlänge geschlossen werden kann (Formel 4-1)

$$L_{lin} = L_{trieb}^{0,9828} \quad \text{Formel 4-1}$$

Die Funktion besitzt kein Konstantglied und ein Bestimmtheitsmaß von 0,99.

Zur Berechnung der horizontalen Projektionslänge aus der linearen Länge wird eine einfache trigonometrische Funktion benutzt (Formel 4-2). Als zweite Eingangsgröße wird der lineare Astwinkel benötigt (siehe Abschnitt 4.3.6), den der Ast vom Ansatz bis zur Spitze gegenüber der Stammachse darunter aufspannt.

$$L_{proj} = \cos(A_{wlin}) \cdot L_{lin} \quad \text{Formel 4-2}$$

In Astlängenmessungen zur Charakterisierung der inneren Astigkeit wird in der Regel zwischen einer Grünastlänge, in welcher der Ast fest mit Holz des Stammes verwachsen ist und einer Totastlänge differenziert (z.B. BUES 1994, SCHUMACHER 1993, SPATHELF 1998). Letztere bezeichnet den Teil des Astes, der nicht mit dem Stammholz verwachsen ist (Abb. 4-13). Meist werden wie in der Abbildung nur die projizierten Längen benutzt, da bei dem Großteil der Untersuchungen, die sich mit der inneren Astigkeit befassen, vor allem die Sägeausbeute im Zentrum des Untersuchungsinteresses steht. Da im Sägewerk praktisch ausschließlich in Längsrichtung des Stammes geschnitten wird, ist die Betrachtung der Projektionslängen ausreichend.

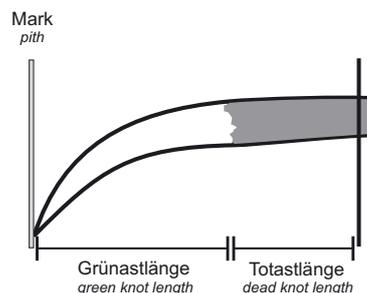


Abbildung 4-13: Beschreibung der inneren Astlänge. *Description of knot parameters*

LÄSSIG (1991) ermittelt aus Triebblängenrückmessungen bei Solitär-fichtenästen (s. Datenkollektiv B, Abschnitt 4.2.3) maximale Längen von 9,25 m (in der Horizontalprojektion 8,55 m). Diese Länge wird von einem 70-jähriger Ast erreicht. Eigene Untersuchungen auf der

Grundlage des Datenkollektivs B belegen maximale lineare Astlängen von 7,92 m (7,84 m in der Horizontalprojektion). Dieser Astlänge weist ein 68-jähriger Ast des besonders stark freigestellten Baumes 1300 des Datenkollektivs B auf.

Einfluss des Standorts

SCHILL (1993) beobachtet einen signifikanten Standortseinfluss auf die Längenentwicklung von Seitentrieben. Seine Datengrundlage bilden Düngungsexperimente mit Kalkammonsalpeter an Jungfichten. Gesteigerte Düngegaben führen nach seinen Erkenntnissen zu längeren Seitentrieben. Auch LÄSSIG (1991) schildert standörtliche Unterschiede im Trieblängenwachstum von Solitär-fichten. Diese Beobachtungen auf Triebebene werden durch die Ergebnisse HASENAUERS (1997) auf Baumebene ergänzt, der einen signifikanten Standorteinfluss auf die Kronenbreite bei Solitär-fichten in Österreich belegt. Auch MITCHELL (1969) beschreibt eine Abhängigkeit der Kronenbreite vom Standort. Eine standörtlich bedingte Einflusskomponente auf die Astlängenentwicklung darf daher als sehr wahrscheinlich betrachtet werden.

Einfluss des Genotyps

Nach KARKI (1980) lässt sich der große Formenreichtum bei Baumkronen unter anderem durch eine starke genetische Steuerung der Astlänge und damit auch der Kronenform erklären.

Die Untersuchungen von BINDSEIL (1933), GRUBER (1992), PRIEHÄUSSER (1958), RUBNER (1943) und SCHMIDT-VOGT (1972) belegen das Vorkommen von Fichtentypen, die sich hinsichtlich ihrer Kronen und Astformen deutlich voneinander unterscheiden. Als unterschiedliche Verzweigungsgrundtypen gelten Kamm-, Bürsten- und Plattenfichten (SCHMIDT-VOGT 1977). Plattenfichten zeigen laut SCHMIDT-VOGT überwiegend eine schlanke walzenförmige Kronenform, während für Kammfichten breite, paraboloiden Formen typisch sind. Dies äußert sich auch in einer deutlich größeren Kronenschirmflächen bei Kammfichten im Vergleich zu Plattenfichten, was dementsprechend auch höhere Astlängen zur Folge hat.

Weiterhin ist bekannt, dass autochthone Fichten aus schneereichen Regionen häufig schmalere Kronen aufweisen als Bäume aus nicht schneebruchgefährdeten Gebieten (SCHMIDT-VOGT 1987). Eine starke genetische Steuerung der Kronen- und Astentwicklung liegt daher nahe. So führt auch SCHMIDT-VOGT (1987) die anteilige Zunahme schmalkroniger Platten- und Bürstentypen im Fichtenareal von Süden nach Norden und mit der Meereshöhe auf erbliche Faktoren zurück. Er weist allerdings ausdrücklich auf den standörtlichen Einfluss bei der Ausbildung der verschiedenen Kronen- und Verzweigungstypen hin.

Einfluss des Alters

Das Astlängenwachstum zeigt einen Zusammenhang vom Alter des Astes. Dass alte Fichtenäste einen geringeren jährlichen Trieblängenzuwachs leisten als junge Äste, kann besonders deutlich an Solitär-fichten gezeigt werden, da hier die Konkurrenzwirkung auf das Astlängenwachstum minimal ist und somit der Alterseffekt besonders deutlich wird. Äste von Solitären sind lediglich der Konkurrenz durch die darüber liegenden Äste des gleichen Baumes ausgesetzt. LÄSSIG (1991) stellt das jährliche Trieblängenwachstum über dem Alter für Solitär-fichten aus Südwestdeutschland dar (Abb. 4-14) und gleicht den Zusammenhang funktional über ein negativ logarithmische Funktion aus (Formel 4-3). Es ist zu erkennen, dass der Trieblängenzuwachs in den ersten Jahren rasch abfällt. Danach verlangsamt sich die Tendenz, bis der Zuwachs schließlich über Jahre hinweg nur mehr sehr langsam abnimmt.

$$\Delta l = 298,77 - 53,08 \cdot \ln(\text{Astalter})$$

Formel 4-3

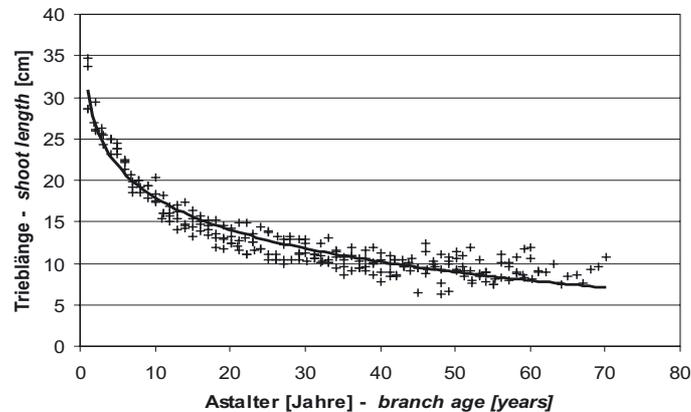


Abbildung 4-14: Entwicklung der Asttrieblänge mit dem Astalter bei Solitärerle (LÄSSIG 1991).
Development of branch shoot increment with increasing branch age of solitary spruce (LÄSSIG 1991)

Für derartige Alterungsvorgänge existieren unterschiedliche Erklärungsansätze. Ein Ansatz begründet die Vorgänge physiologisch über die zunehmende Verschlechterung des Verhältnisses von produzierender Blattmasse zum tragenden und leitenden Astgewebe mit steigendem Alter und Wachstum der Äste. Der Ansatz fußt auf einer grundlegenden Erkenntnis RUBNERS (1902), der bei Lebewesen beobachtet, dass sich die assimilierenden, oberflächenabhängigen Prozesse im Wachstum quadratisch entwickeln, während die dissimilierenden, volumenabhängigen Vorgänge einer kubischen Entwicklung folgen. Dadurch verschlechtert sich im Laufe des Wachstums mit dem Oberflächen-Volumen-Verhältnis auch sukzessive das Verhältnis von aufbauenden und verbrauchenden Prozessen und das Wachstum sinkt.

Bei diesem Erklärungsansatz geht man von einer weitgehenden Assimilatautonomie des Astes aus (SPRUGEL et al. 1991, NÄGELI 1952), sodass RUBNERS Gesetzmäßigkeit, die eigentlich für Organismen gilt, angewendet werden kann. Ein Ast wird nach dieser Theorie nicht über den Stamm von den übrigen Ästen alimentiert, sondern muss sich selbst erhalten.

LYR et al. (1992) weisen darauf hin, dass über diese von Rubner beschriebene altersbedingte Verschlechterung der Versorgung hinaus bei Bäumen noch weitere Mechanismen zur Alterung führen müssen, da ansonsten der Alterungseffekt an neu bewurzelten oder gepfropften Stecklingen nicht auftreten dürfte, was aber häufig der Fall ist.

Ein Begründung dafür könnte eine hydraulische Limitierung des Astes mit dem Alter sein. Wie RUST und ROLOFF (2001) beispielsweise bei der Eiche aufzeigen, unterliegt die Astalterung einem sich aufschaukelnden Prozess. Wenn im Alter kürzere Triebe gebildet werden, steigt die Anzahl an Triebübergängen, welche die Wasserleitung behindern. Dies führt wiederum zu geringerer Photosyntheseleistung und noch kürzeren Trieben. Ähnliches beobachten PROTZ et al. (2000) bei der amerikanischen Drehkiefer (*Pinus contorta* DOUGL.). Die reduzierte hydraulische Leitfähigkeit mit dem Alter führen sie auf eine reduzierte Leitfähigkeit des Astsplintholzes zurück, die auf geringeren Tracheidenlumina und einer Abnahme des Frühholzanteils mit dem Astalter gründet.

Ein weiterer Alterseffekt bezüglich des Astlängenwachstums liegt in der Veränderung der Akrotonieverhältnisse während der Alterung des Baumes. SCHÖPF (1954) führt am Beispiel der Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) das Wuchsverhältnis des Terminaltriebes zum jährlichen Astlängen-

zuwachs als einen Hauptfaktor zur Entwicklung der Kronenform von Koniferen an. Er untersucht den Alterseinfluss auf dieses Verhältnis und stellt dabei eine abnehmende Tendenz mit steigendem Baumalter fest, welche sich aber von Baum zu Baum stark unterscheidet. Damit begründet er die Bildung unterschiedlicher Kronenformen.

Eigene Untersuchungen bestätigen diesen Alterseffekt auch für Fichten. Ein geeignetes Maß für diese kronenbestimmenden Effekte ist der Akrotoniegrad, der das Verhältnis der Länge des Terminaltriebes zur Länge des Seitentriebes gleichen Alters am selben Quirl beschreibt (Abb. 4-15).

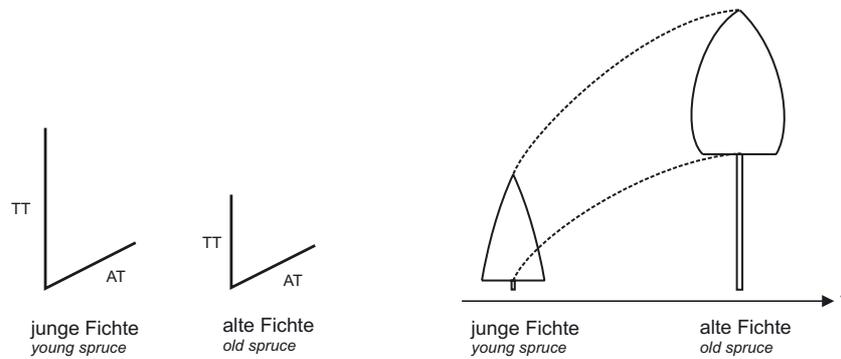


Abbildung 4-15: Änderung des Akrotoniegrades mit dem Alter (links) und die Auswirkungen auf die Kronenform (rechts). *Changing acrotony relations (left) and their implications for crown form (right).*

Der erste Seitentrieb wird stets in der Baumspitze gebildet und ist deshalb bei herrschenden und mitherrschenden Fichten kaum konkurrenzbeeinflusst. Der oben beschriebene Einfluss des Astalters wird durch die ausschließliche Verwendung des stammnächsten Seitentriebes konstant gehalten. Somit lassen sich die Werte unterschiedlich alter Bäume vergleichen. Wie aus Abb. 4-16 deutlich wird, sinkt der Akrotoniegrad mit steigendem Baumalter. Das bedeutet, alte Fichten bilden im Verhältnis zum ersten Seitentrieb desselben Betrachtungsjahres relativ kürzere Terminaltriebe, was sich in einer Abflachung der Krone mit zunehmendem Alter ausdrückt.

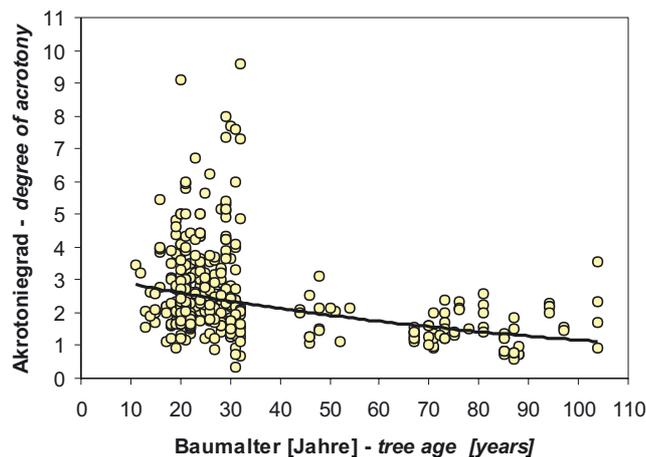


Abbildung 4-16: Änderung des Akrotoniegrades mit zunehmendem Baumalter. *Changing degree of acrotony with increasing tree age.*

Der in Abbildung 4-16 dargestellte Zusammenhang kann durch eine Exponentialfunktion ausgedrückt werden (Formel 4-4). Durch das geringe Bestimmtheitsmaß von 0,2 wird die hohe Streuung der Werte um die Ausgleichsfunktion deutlich, worin sich die Variabilität der Fichte bei der Ausformung der Krone widerspiegelt.

$$y = \frac{\text{TermL}}{3,1877 \cdot e^{-0,0101 \cdot \text{Baumalter}}} \quad \text{Formel 4-4}$$

- B0* = Akrotoniegrad [cm/cm]
TermL = Potenzielle Länge des Terminaltriebes [cm]
Baumalter [Jahre]

Die Prüfung des Zusammenhanges erfolgt an Bestandesfichten unterschiedlichen Alters von verschiedenen Standorten. Die Datengrundlage ist in Tabelle 4-25 dargestellt.

Tabelle 4-25: Datengrundlage zum Akrotoniegrad. Die Daten von den Kollektiven A und D wurden durch Aufnahmen auf weiteren Versuchsflächen des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde der TU München ergänzt. *Data base for the calculated degree of acrotony. The data from the data collectives A and D are completed with data from other permanent plots of the Chair of Forest Yield Science, TU München.*

Fläche	Baumzahl	Astzahl	Baumalter	Datenkollektiv
<i>experimental plot</i>	<i>No of trees</i>	<i>No of branches</i>	<i>tree age</i>	<i>data collective</i>
ZWI 134	3	8	81–88	
ZWI 135	4	10	70–73	
ZUS 603	11	181	11–32	D
ZUS 604	6	83	18–32	D
SON 623	4	35	20–22	
FRE 813	8	325	11–78	(A)
SON814	4	13	71–104	
Höglwald	4	17	85–94	

Korrelation zum Terminaltrieb

Auch die Länge des Terminaltriebes zeigt einen Zusammenhang zur Länge der im selben Jahr gebildeten Asttriebe in unterschiedlichen Baumhöhen. Dabei spielt allerdings das topologische Alter des betrachteten Asttriebes eine wichtige Rolle. Unter „topologischem Alter“ soll im Weiteren die Stellung des Asttriebes am Ast verstanden werden. Der stammnächste Asttrieb besitzt das topologische Alter eins, während der folgende Asttrieb das Alter zwei besitzt und so fort (Abb. 4-17).

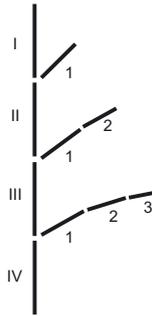


Abbildung 4-17: Topologisches Alter der Asttriebe: arabische Ziffern stehen für das topologische Asttriebalter, römische Ziffern für das Alter des Terminaltriebs. *Topological age of the branch shoots: arabic digits denote the topological age of the branch shoots, roman digits the age of the terminal shoot.*

In Abbildung 4-18 sind Asttriebe eines chronologischen Jahrganges mit den im selben Jahr gebildeten Terminaltrieben korreliert. 1852 Asttrieblängen aus dem Datenkollektiv D liegen der Auswertung zugrunde. Als Ergebnis lässt sich feststellen: Je näher ein Trieb am Stamm liegt, also je geringer sein topologisches Alter ist, desto höher ist der korrelative Zusammenhang zum gleichjährigen Terminaltrieb.

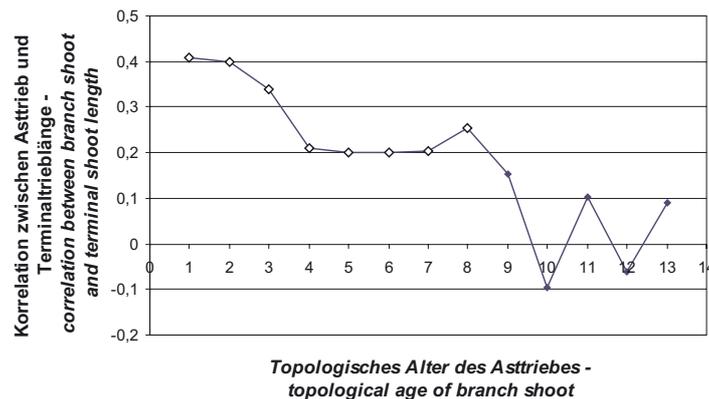


Abbildung 4-18: PEARSONScher Korrelationskoeffizient zwischen gleichaltrigen Ast- und Terminaltrieben aufgetragen über dem topologischen Alter; auf den ersten acht topologischen Altersstufen finden sich signifikante Korrelationen – *Pearsons correlation coefficient for terminal and branch shoots of the same age and its development with the topological branch age; correlations are significant up to a topological age of eight.*

Bis zum achten Trieb, vom Stamm aus gesehen, ist dieser Zusammenhang statistisch signifikant. Das Absinken der PEARSONSchen Korrelationskoeffizienten mit zunehmendem topologischen Astalter lässt sich durch die steigende Entfernung des Asttriebes zum gleichzeitig gebildeten Terminaltrieb erklären. Je näher die zwei Triebe räumlich stehen, desto ähnlicher sind die Wachstumsbedingungen. Je weiter sich Asttrieb und Terminaltrieb voneinander räumlich entfernen, desto unabhängiger ist ihr Wachstum.

Nach den Untersuchungen von MADGWICK et al. (1986) und DELEUZE et al. (1996) ist der erste Asttrieb am Stamm meist etwas kürzer als der zweite folgende, was DELEUZE et al. als „Basiseffekt“ bezeichnen. Dieser Basiseffekt tritt auch an den Asttrieben des Datenkollektivs D auf (N = 1852), wie in Abbildung 4-19 eindeutig zu erkennen ist.

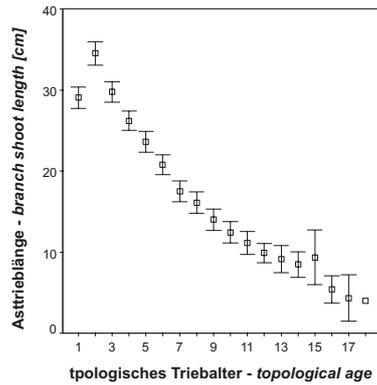


Abbildung 4-19: Basiseffekt: Mit zunehmender Entfernung von der Stammachse (zunehmendem topologischen Alter) sinkt die Asttrieblänge. Einzige Ausnahme bildet der 1. Asttrieb, der in aller Regel kürzer als der 2. ist. *Basis effect: branch shoot length is decreasing with increasing distance to the stem (increasing topological age). The only exception is the first shoot which is generally shorter than the second one.*

Man könnte die Ursache dieses Basiseffekts im akrotonen Wachstum der Fichte sehen, bei dem der erste Asttrieb gegenüber dem Terminaltrieb gehemmt bzw. weniger gut versorgt wird, um dem Leittrieb keine Konkurrenz entstehen zu lassen. Demnach wäre besonders im ersten Jahr der Triebbildung eine weniger gute Korrelation zwischen Terminaltrieblänge und Seitentrieblänge zu erwarten. Dies lässt sich anhand der dargestellten Korrelation (Abb. 4-18) jedoch nicht nachvollziehen, sodass andere Faktoren verantwortlich sein müssen.

Einfluss der Konkurrenz

Eine Möglichkeit den Konkurrenzeinfluss auf die Astlänge zu testen, ist die Untersuchung von Astlängen in Pflanzabstands- bzw. Durchforstungsversuchen. Man kann dabei Äste zwischen benachbarten Bäumen derselben Pflanzreihe (Reihenäste) und zwischen zwei benachbarten Pflanzreihen (Gassenäste) vergleichen. BUES (1990) leitet lineare Zusammenhänge zwischen der Gassenbreite und der Länge des stärksten Gassenastes, der drei stärksten Gassenästen und aller Gassenästen pro Quirl her. Dieselbe Methode wendet er auf Reihenäste an. In Abb. 4-20 sind die Zusammenhänge grafisch dargestellt.

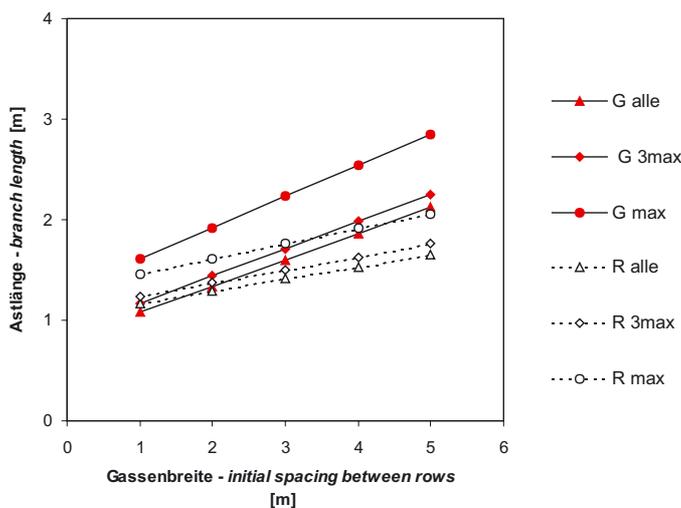


Abbildung 4-20: Längen von Reihen- (R) und Gassenästen (G) in Abhängigkeit von der Gassenbreite nach BUES (1990): alle = alle Quirläste, 3max = die drei stärksten Äste pro Quirl, max = stärkster Quirlast. *Influence of different initial spacings on branch length in the row (R) and between the rows (G): alle = all whorl branches, 3max = the three biggest per whorl, max = the biggest per whorl*

Das Ergebnis von BUES zeigt, dass durch einen erhöhten Gassenabstand sowohl Gassen- als auch Reihenäste im Längenwachstum profitieren. Es zeigt sich eine Abstufung der Längen von den stärksten Ästen bis zum Mittel, allerdings ist die Tendenz gleich.

Unter der Annahme, dass die halbe Gassenbreite etwa der Entfernung bis zum Berühren der ersten Äste der gegenüber liegenden Gassenseiten entspricht, greifen die Äste zuerst stärker ineinander, um jedoch bei zunehmender Gassenbreite die Verzahnung mehr und mehr aufzugeben. Dieses Ergebnis korrespondiert gut mit einer Untersuchung von MERKEL (1967), der den gleichen Zusammenhang analysiert.

Eine weitere Methode der Quantifizierung für jeden einzelnen Ast wurde bei den Bäumen des Datenkollektivs D durchgeführt. Nach einer detaillierten räumlichen Erfassung der Einzelbäume des Bestandes (s. Abschnitt 4.2.4) wurde der Bestand im Computer dreidimensional rekonstruiert. Auf dieser Grundlage wurde mithilfe des entwickelten Konkurrenzmodells HEMIS (s. Abschnitt 4.4.1) für alle Bestandesbäume die Konkurrenz alle 30 cm entlang der Stammachse in acht Himmelsrichtungen berechnet. Anschließend wurden die Astlängenzuwächse der 17 gefälltten Bäume den entsprechenden Konkurrenzwerten gegenübergestellt (Abb. 4-21). Für die Grafik wurden ausschließlich die Asttrieblängenzuwächse der letzten drei Jahre vor der Fällung verwendet, da hier von einer hohen Korrelation zur berechneten Konkurrenz ausgegangen werden kann.

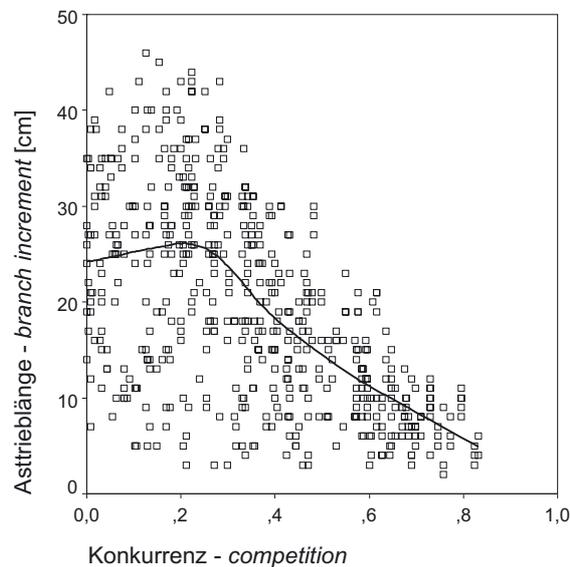


Abbildung 4-21: Jährlicher Asttrieblängenzuwachs in Abhängigkeit von der Konkurrenz. *Yearly branch shoot growth depending on the competition (1 denotes highest possible competition)*

Ein Konkurrenzwert von 1 bedeutet vollkommene Abschattung während ein Konkurrenzwert von 0 für eine konkurrenzfreie Situation steht. Die Asttrieblängenzuwächse zeigen ein Maximum bei einer HEMIS-Konkurrenz von ca. 1,8. Dieses Zuwachsmaximum lässt sich einer nach Einzelbäumen getrennten Darstellung des Datensatzes ebenso feststellen. Dadurch ist nicht von einem Effekt der Datenüberlagerung verschiedener Bäume auszugehen. Vielmehr ist für das Triebblängenwachstum eine geringe Konkurrenz förderlich. Dies mag auch eine mögliche Erklärung für den beschriebenen Basiseffekt sein.

Als Ausgleichslinie ist eine nichtparametrische Anpassung nach dem „locally weighted scatter plot smoothing“ (LOWESS) eingezeichnet, die von dem Statistikpaket SPSS zur Verfügung gestellt wird (CLEVELAND 1979, CLEVELAND und DEVLIN 1988, HÄRDLE, 1990). Das LOWESS-Verfahren stellt eine iterative, lokal gewichtete Methode der kleinsten Quadrate dar, die in der

Regel flexibler als parametrische Regressionen auf lokale Änderungen des Mittelwertes reagiert, ohne das, für parametrischen Regressionen mit Polynomen höherer Ordnung typische „Überschwingen“ aufzuweisen. Für diese nichtparametrische Regression wurden 50% der Werte bei dreifacher Iteration benutzt. Dadurch, dass Werte nahe dem lokalen Mittel stärkeren Einfluss nehmen als weiter entfernte Werte, reagiert das Verfahren relativ robust auf Ausreißer und wird deshalb verwendet, um die zentrale Tendenz eines Datensatzes entlang eines Gradienten darzustellen. Die Ausgleichkurve bestätigt den leichten Anstieg bei geringer Konkurrenz mit einem anschließenden Abfallen bis ab einem Konkurrenzwert von 0,85 kein Längenzuwachs mehr geleistet wird (s. auch LOHER 2002).

Die große Streubreite der Werte erklärt sich durch die Überlagerung des Konkurrenzeffekts durch den bereits beschriebenen Alterseinfluss.

Einfluss der vertikalen Lage des Astes

In ihrer Gesamtheit definieren die Astlängen entlang der Stammachse die Kronenform eines Baumes. Die vertikale Lage eines Astes an der Stammachse reflektiert dessen Alter und seine Konkurrenzsituation, die beide die eigentlichen Einflussgrößen für seine Längenentwicklung darstellen.

Zusammenhang mit dem Astdurchmesser

Ähnlich dem Zusammenhang zwischen Baumhöhe und Brusthöhendurchmesser existiert ein straffer statistischer Zusammenhang zwischen Astlänge und Astdurchmesser. Diese Beziehung wird im folgenden Abschnitt 4.3.5 eingehend behandelt.

Fazit

Primäre Einflussfaktoren auf das Astlängenwachstum stellen das Astalter und die Konkurrenz dar. Steigendes Alter wie auch steigende Konkurrenz führen zu einem geringeren Astlängenwachstum. Damit reagieren alte Äste vergleichsweise weniger auf Konkurrenzänderung. Genetische und standörtliche Effekte modifizieren das Astlängenwachstum zusätzlich und geben einen Rahmen vor, innerhalb dessen sich das Astwachstum bewegen kann. Gute Standorte ermöglichen dementsprechend längere Äste und breitere Kronen als weniger gute.

Eine Korrelation des Asttrieblängenwachstums zum Wachstum des Terminaltriebs in den ersten Jahren kann ebenfalls als gesichert angenommen werden.

4.3.5 Astdurchmesser – *Branch diameter*

Charakterisierung und Erfassung des Astdurchmessers

Der Astdurchmesser kann bezogen auf die innere oder die äußere Astigkeit charakterisiert werden. Er stellt ein Haupteinflusskriterium auf die Rundholzqualität dar, wie in Kapitel 3 gezeigt wurde und beeinflusst viele Aspekte der Holzverwendung wie beispielsweise die mechanische Festigkeit von Schnittholz (GLOS und TRATZMILLER 1997, SEELING 2001, SCHUMACHER 1993) und Furnier (OLISCHLÄGER 1970a, RECK 2002) oder die Zellstoffausbeute (ZOBEL und BUIJTENEN 1989, S. 137).

Unter „Astdurchmesser“ wird bei Beschreibungen der äußeren Astigkeit meist der Astansatzdurchmesser verstanden, der stammnah nach dem Astkragen im rechten Winkel zur Astachse gemessen wird. Dieser Durchmesser bestimmt die Holzqualität, da er in den nächsten Jahren

vom Stammmantel umschlossen wird. Allerdings lässt sich der Astdurchmesser genauso an jeder weiteren Stelle entlang der Astachse messen (BRÜNDL et al. 1999), was Aussagen zur Astform für mechanische und physiologische Untersuchungen ermöglicht.

Der Astdurchmesser wird bei Koniferen am zweckmäßigsten mit einer Schieblehre gemessen. Koniferen bilden auf der Astunterseite Druckholz, um ein horizontales Wachstum aufrechterhalten zu können. Dies führt zu ovalen Astquerschnitten, die bei der Erfassung berücksichtigt werden müssen. Der vertikale Astdurchmesser ist nach MERKEL (1967), bei 1500 Fichtenästen in der Stichprobe, im Mittel um 6% größer als der horizontale Astdurchmesser. SAUTER und FAHRBACH (1993) stellen an 10 Versuchsbäumen einen um 5,7% höheren Vertikaldurchmesser am jeweils stärksten Ast in 14–15 m Höhe fest. Eigene Stichproben an 67 Ästen des Datenkollektivs A ergeben lediglich einen mittleren Durchmesservorteil von 2,9% für den vertikalen Astdurchmesser, welcher sich vor allem auf Äste in der Schattenkrone gründet (4,0%), während die Lichtkronenäste kaum größere Vertikaldurchmesser aufweisen (0,6%).

Bei der Messung der äußeren Astigkeit spielt es zudem eine Rolle, ob der Ast mit oder ohne Rinde gemessen wird. DUMM (1971) gibt als doppelte Rindenstärke bei dünnen Ästen ca. 11% des Gesamtdurchmessers mit Rinde an. Eine Rindenstärkenfunktion für trockene und frische Äste entwickelt MERKEL (1967).

Die maximal erreichten Astdurchmesser mit Rinde (Vertikalmessung) liegen bei solitären erwachsenen Fichten im Bereich von 16,5 cm. Der gemessene Ast war 57 Jahre alt und stammt vom konkurrenzarm erwachsenen Baum 2300 aus dem Datenkollektiv B, der noch weitere Äste mit ähnlich hohem Durchmesser aufwies. Im Datenkollektiv überschritten die Maximaldurchmesser etlicher Probestämme eine Marke von zwölf Zentimetern, sodass die für Fichtensolitäre von LÄSSIG (1991) angegeben 10,5 cm nicht das erreichbare Durchmessermaximum bezeichnen.

Bei der Betrachtung der inneren Astigkeit wird der Astdurchmesser häufig über die Sektion von Astquirlen bestimmt (BUES 1990, MAGUIRE und HANN 1987). Ein wichtiges Kriterium dabei ist die Identifikation des maximalen Astdurchmessers im Radialschnitt, der sich meist an der Übergangszone von Grünast- und Trockenast findet, da Äste nach dem Absterben durch Abbauprozesse an Durchmesser verlieren (DIETRICH 1973).

Weitere Methoden der Durchmessererfassung beschreiben den Astdurchmesser an Kanthölzern in tangentialer, radialer und longitudinaler Dimension (z.B. GLOS und TRATZMILLER 1997, SCHUMACHER 1993, SEELING 2001) oder nutzen Schäl furniere zur Charakterisierung der Astdurchmesser in unterschiedlichen Stammregionen (LEMIEUX 1995, 1997). Bei beiden letztgenannten Verfahren ist eine Rekonstruktion des Astes aus den Einzelschnitten notwendig, wenn man die Astdurchmesserentwicklung über die Zeit analysieren will. Modernere Verfahren arbeiten auf Röntgenbasis (OJA 1997, 2000) und nutzen Computertomographie zur mehrdimensionalen Astdurchmessererfassung im Holz.

Einfluss des Standorts

MÄKINEN et al. (2001) untersuchen die Wirkung von Düngung auf den Astdurchmesser. Dabei stellen sie fest, dass durch die Düngung der Astdurchmesser von Ästen, die neu austreibenden und Ästen, die bereits vorher gebildet wurden, gleichermaßen gefördert werden. Allerdings zeigt sich kein Einfluss auf das Verhältnis von Astdurchmesser zu Brusthöhendurchmesser. Die durch den Dünger modifizierten Standortbedingungen wirken demnach also gleichermaßen auf das Stamm- wie auf das Astwachstum. Durch die hohe Korrelation zwischen Astlänge und Astdurchmesser lassen sich die in Abschnitt 4.3.4 standörtlichen Einflüsse auf das Astlängenwachstum entsprechend auf das Astdurchmesserwachstum übertragen.

Einfluss des Genotyps

BUES (1990) erachtet eine genetische Komponente in der Astdurchmesserentwicklung der Fichte für wahrscheinlich. Er führt ein Beispiel an, bei dem ein Bestandesbaum durch überdurchschnittliche Grobastigkeit auffällt. Die Aststärken liegen sogar über jenen eines angrenzenden Randbaumes, der einseitig konkurrenzfrei erwachsen konnte.

In Kreuzungsexperimenten zwischen skandinavischen und deutschen Fichtenherkünften, die zum Untersuchungszeitpunkt 20–28 Jahre alt waren, belegen ILSTEDT und ERIKSSON (1986) einen genetischen Einfluss auf die Summe aller Astdurchmesser pro Baum und deren Verhältnis zum Brusthöhendurchmesser. Der genetisch erklärbare Anteil an der Varianz des Merkmals liegt im Durchschnitt auf den drei Untersuchungsbeständen zwischen 2,6 und 10,1%. Der genotypisch erklärbare Varianzanteil des Durchmesser des stärksten Astes wird im Mittel mit 1,0–5,9% angegeben. Der genetisch bedingte Varianzanteil des mittleren Astdurchmessers liegt mit durchschnittlich 1,2–5,9% im selben Bereich. Die Angaben beziehen sich dabei auf die unteren 2 m des Stammes.

KRAMER et al. (1970) können anhand von kronenspannungsfrei erwachsenen Fichtenklonen zwar hochsignifikante Unterschiede im Astdurchmesser in 1,3 m Höhe nachweisen; bei weiteren Berechnungen zeigte sich allerdings, „daß bei Unterstellung eines gleichen Brusthöhendurchmessers kein genetisch beeinflusster Unterschied der Aststärken besteht.“

Die genetische Ausstattung eines Baumes scheint demnach bei freiständig erwachsenen Bäumen einen im Verhältnis ähnlichen Einfluss auf das Brusthöhen- und das mittlere Astdurchmesser-Wachstum auszuüben.

Der enge Zusammenhang zwischen Astdurchmesser und Brusthöhendurchmesser bei der Fichte wird von VESTØL et al. (1999) anhand des mittleren Durchmessers der drei stärksten Quirläste bestätigt. Allerdings weisen VESTØL et al. einen signifikanten genetischen Einfluss auf das Verhältnis von Astdurchmesser und Brusthöhendurchmesser nach. Der genetisch bedingte Effekt ist umso größer, je weniger Konkurrenz auf den Baum wirkt. Das bedeutet, dass bei einer Freistellung bestimmte Genotypen bei gleichem Dickenwachstum des Stammes stärker im Astwachstum gefördert werden als andere, während sie unter größerer Konkurrenz nur sehr geringe Unterschiede im Astdurchmesser aufweisen, da der Konkurrenzeffekt den genetischen Effekt überprägt. VESTØL et al. sehen die Wirkung des genetischen Effektes also als Modifikation eines Wuchspotenzials, das je nach Konkurrenz mehr oder weniger ausgeschöpft wird.

Eigene Auswertung anhand der undurchforsteten Flächen des Datenkollektivs E zeigen einen genetischen Varianzanteil von fünf Prozent beim maximalen Astdurchmesser (Abb. 4-22 links). Der Wert liegt damit im von ILSTEDT und ERIKSSON (1986) angegebene Bereich. Weitere drei Prozent der beobachteten Streuung werden durch die Interaktion von Astdurchmesser und Pflanzverband erklärt. Der Konkurrenzeinfluss dominiert die Astdurchmesserentwicklung jedoch stark.

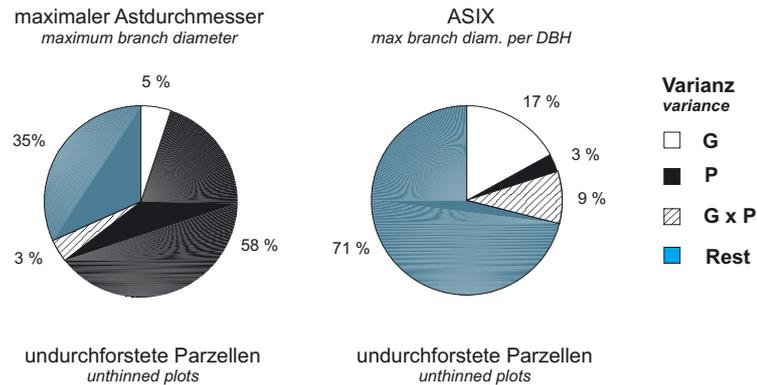


Abbildung 4-22: Erklärungsanteil von genetischen und Konkurrenzeffekten auf den Astdurchmesser (links) und das Verhältnis der stärksten Astes pro BHD (ASIX, rechts) in undurchforsteten Parzellen des 28-jährigen Fichtenklonversuchs VOH 622, getestet durch eine Varianzkomponentenanalyse. G=Genetischer Effekt, P=Pflanzverbandeffekt (Konkurrenzeffekt), G × P=Interaktion von Genetik und Konkurrenz, Rest=unerklärte Reststreuung.

Genetic and competition effects on branch diameter and the relationship of the branch with the highest diameter to the DBH of the same tree (ASIX, right). Results from unthinned plots of the 28-years old clone experiment VOH 622, tested with an analysis of variance components. G=genetical effect, P=planting density (competition effect), G × P= interaction between G and P, Rest=unexplained variance.

Dagegen wird der ASIX-Index, der das Verhältnis von stärkstem Ast zum Stammdurchmesser in Brusthöhe beschreibt (s. Abschnitt 4.3.1) und als Weiserwert für die Astigkeit gesehen werden kann, nur gering vom Pflanzverband beeinflusst (Abb. 4-22 rechts). Der ASIX-Index wird mit 17% der Gesamtvarianz deutlich von der genetischen Grundausstattung des Baumes geprägt. Dazu kommt noch die Wechselwirkung zwischen Pflanzverband und genetischem Einfluss in der Höhe von neun Prozent. Der genetisch bedingte Anteil auf den ASIX ist signifikant, was die Ergebnisse von VESTØL et al. (1999) bestätigt.

ZOBEL und JETT (1995) weisen zusätzlich auf einen Zusammenhang zwischen Astdurchmesser und Astanzahl hin, der anscheinend in einem bestimmten Rahmen einer genetischen Kontrolle unterliegt. In Züchtungsexperimenten an Weihrauchkiefer (*Pinus taeda* L.) zeigt sich, dass Bäume mit vielen Ästen dementsprechend geringere Astdurchmesser aufweisen.

Eine andere Erklärungsmöglichkeit wird von den Autoren allerdings nicht diskutiert: Bäume mit vielen Ästen können durch Eigenbeschattung und physiologische bzw. mechanische Konkurrenz innerhalb der eigenen Krone weniger starke Äste entwickeln.

Einfluss des Alters

Das Astalter übt einen wichtigen Einfluss auf das Durchmesserwachstum des Astes aus. Je älter der Ast ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass er auch einen entsprechenden Durchmesser entwickeln konnte.

Untersuchungen an zwölf gering konkurrenzierten Ästen des Probenkollektivs B zeigen analog zum Astlängezuwachs einen deutlichen Abfall der Astdurchmesserzuwächse ohne Rinde mit dem Astalter auch unter sehr geringer Konkurrenz. (Abb. 4-23)

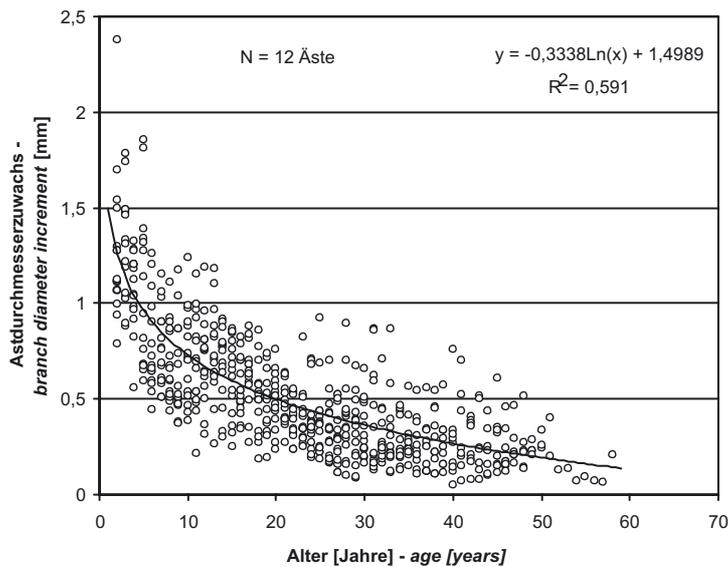


Abbildung 4-23: Alterseffekt auf den Astdurchmesserzuwachs bei konkurrenzarm erwachsenen Fichten, gemessen ohne Rinde. *Age effect on branch shoot growth of widely open grown spruce trees measured under bark.*

Der Alterseffekt auf den Durchmesserzuwachs ist in denselben Prozessen zu suchen wie sie bereits beim Astlängenzuwachs (s. Abschnitt 4.3.4) beschrieben wurden. Zum einen eine Abnahme des Oberflächen-Volumen-Verhältnisses mit zunehmender Astdimension, sodass der assimilierenden Oberfläche relativ mehr Astmasse gegenübersteht, die miternährt werden muss. Zum anderen eine Einschränkung der Wasserleitfähigkeit des Astes mit dem Alter, sodass er an physiologischer Effizienz einbüßt.

Einfluss der Konkurrenz

Der Einfluss der Bestandesdichte auf den Astdurchmesser ist in seiner Tendenz gut dokumentiert. Beispielsweise stellen ABETZ und UNFRIED (1983), BUES (1990), JOHANSSON (1992) sowie PETERSEN und SPELLMANN (1993) durchweg ein Ansteigen der Astdurchmesser bei geringerer Stammzahl pro Fläche fest.

Differenzierte Hinweise auf den Konkurrenzeinfluss gibt BUES (1990), der ein stärkeres Wachstum der Gassenäste im Vergleich zu den Reihenästen von Verbandsversuchen nachweist. Bei einer Vergrößerung der Gassenbreite profitieren demnach sowohl Reihen- als auch Gassenäste, wobei interessanterweise erstere eine stetige Durchmesserzunahme verzeichnen, während die Gassenäste ab einer Gassenbreite über zwei Meter den Wuchsraum nicht mehr so deutlich nutzen wie vorher und jenseits der Zweimeter-Grenze mit wieder fallenden Zuwachsraten reagieren.

KENK (1990) weist im Zusammenhang mit dem Einfluss des Pflanzverbandes darauf hin, dass der Pflanzverband schon ab 5–7,5 m Höhe am Schaft keinen Einfluss mehr auf die Astigkeit ausübt, da ab dieser Höhe der individuelle Wuchsraum eines Baumes meist durch die Freistellung geprägt ist.

Als Beleg für die in der Literatur beschriebene starke Konkurrenzwirkung auf den Astdurchmesser kann hier auch das in Abbildung 4-22 links dargestellte Ergebnis der Untersuchung der Varianzkomponenten an Klonfichten gelten. 58% der Gesamtvarianz werden hier durch den Pflanzverband erklärt, weit mehr als durch die genetische Varianzkomponente.

Auch der Konkurrenzeinfluss auf die als relative Aststärke bezeichnete Beziehung aus Brusthöhendurchmesser des Stammes und den Astdurchmesser ist untersucht. Der Einfluss des Pflanzverbandes auf diesen Zusammenhang ist bei jungen Fichten laut JOHANSSON (1992) minimal. Wie bereits beim Zusammenhang mit der Stammform angesprochen, scheint hier eine gleichgerichtete Förderung von Ast- und Stammwachstum vorzuliegen.

VESTØL et al. (1999) hingegen schildern einen signifikanten Einfluss des Ausgangsverbandes auf das lineare Verhältnis zwischen Brusthöhendurchmesser des Stammes und den Mitteldurchmesser der drei stärksten Äste am Baum. Je höher die Ausgangsdichte, desto weniger groß sind die relativen Astdurchmesser. Der Effekt des Ausgangsverbandes modifiziert allerdings das Verhältnis lediglich in geringem Umfang.

Diese Aussage lässt sich mit den Ergebnissen am Fichtenklonversuch Vohenstrauß stützen (Abb. 4-22 rechts). Während ein Gutteil der erklärten Varianz durch genetische Effekte verursacht wird, bleibt der ASIX-Wert (stärkster Ast pro BHD) mit 3% Varianzbeitrag von Pflanzverband weitgehend unbeeinflusst. Eine Förderung des Stammwachstums durch Freistellung ist bei Fichten demnach unweigerlich auch mit stärkerem Astdurchmesser verbunden.

Bei der Untersuchungen der 17 Bäume des Probekollektivs D wird, wie schon bei der Untersuchung des Astlängenzuwachses (s. Abschnitt 4.3.4), ein Konkurrenzwert auf der Basis einer dreidimensionalen Bestandesrekonstruktion im Rechner ermittelt. Der Konkurrenzwert, beschreibt die relative Beschattung des Astes. Werte von 0 entsprechen einer konkurrenzfreien Situation, ein Wert von 1 einer absoluten Beschattung. In Abbildung 4-24 sind 383 jährliche Astdurchmesserzuwächse ohne Rinde über den korrespondierenden Konkurrenzwerten aufgetragen. Benutzt werden nur die Zuwachswerte 3 Jahre vor der räumlichen Bestandesvermessung, um eine gute Korrelation zu den berechneten Konkurrenzwerten zu gewährleisten.

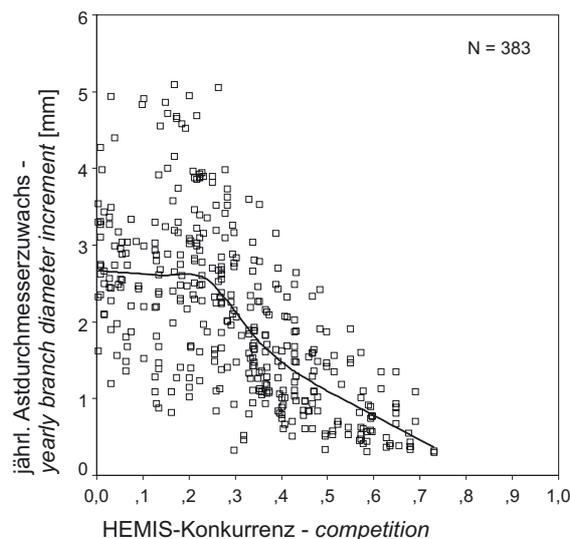


Abbildung 4-24: Einfluss der Konkurrenz auf den Astdurchmesserzuwachs ohne Rinde. *Influence of competition on yearly branch diameter increment under bark [competition of 1 is highest].*

Die Maximalwerte von fünf Millimetern Durchmesserzuwachs spiegeln die hohe Wuchskraft des Standorts wider und werden nur von Ästen mit sehr geringer Konkurrenz erreicht. Im Schnitt sind bei dem Untersuchungsmaterial bei geringer Konkurrenz Durchmesserzuwächse von unter drei Millimetern typisch, wie ein Ausgleich über eine LOWESS-Kurve zeigt, der als lokal gewichtetes Mittel gut die zentrale Tendenz der Daten charakterisiert. Im Gegensatz zum Längenzuwachs deutet sich kein Ansteigen der Zuwachswerte von konkurrenzfreien zu schwachkonkurrenzierten Situationen an.

Bis zu einem Konkurrenzwert von etwa 2,5 verläuft die Kurve mit geringer negativer Steigung, um dann abzufallen, bis bei Konkurrenzwerte von 0,7 das Astdurchmesserwachstum eingestellt wird. Schon KÖSTER (1934) beschreibt, wie der Ast unter starker Konkurrenz kein Dickenwachstum mehr zeigt, auch wenn er in diesem Stadium noch einige Zeit am Leben bleiben kann. Während dieser Absterbephase werden an den äußersten Jahrringen des Astes nur noch wenige Zellreihen gebildet, wie RUBNER (1910) feststellt. Von der Astspitze zur Astbasis hin reduziert sich die gebildete Jahrringbreite zunehmend. Entlang der Astachse setzen die Jahrringe sporadisch ganz aus, wobei besonders stammnahe Triebe betroffen sind, was auch PRETZSCH (1985) für die Kiefer schildert. Er kann zeigen, dass bei Kiefernästen im unteren Kronendrittel der Ausfall von ein bis zwei Jahrringen durchaus häufiger vorkommt. Er beobachtet das Fehlen von Jahrringen vor allem in stammnahen Astabschnitten. Hier fehlen Jahrringe, die in der Astspitze noch voll ausgebildet sind.

Insgesamt wirken Konkurrenz- und Alterseffekt gleichgerichtet und zeigen hohe Korrelationen untereinander. Deshalb fällt die Trennung der beiden Einflussfaktoren bei der Einschätzung ihres Einflusses auf den Durchmesserzuwachs schwer. Mithilfe einer Varianzkomponentenanalyse anhand des in Abbildung 4-24 dargestellten Datensatzes wird deutlich, dass der Alterseffekt dominiert. Er erklärt 55,8% der Varianz, während der Konkurrenzeffekt lediglich für 8,8% der Varianz verantwortlich zeichnet. Allerdings beschränken sich diese Aussagen auf das Datenkollektiv D, das nicht das gesamte Konkurrenzspektrum und nur ein geringes Altersspektrum abdeckt.

Einfluss der vertikalen Lage des Astes

DIETRICH (1973) schildert zwei grundsätzliche Phasen des Wachstums an Tannenästen, die sich analog auf Fichtenäste übertragen lassen: Eine Zuwachsphase, in welcher der Ast an Durchmesser zunimmt und die über seinen Maximaldurchmesser entscheidet sowie eine konkurrenzbedingte Kümmerphase, bei der nur noch wenig Radialzuwachs geleistet wird. Die Phasen lassen sich sowohl retrospektiv im Holz (innere Astigkeit) als auch aktuell an einem Höhengradienten am Baum als äußere Astigkeit bei Ästen unterschiedlichen Alters belegen.

Die Ergebnisse zum Zusammenhang des Einflusses der vertikalen Astposition auf den Astdurchmesser bei Fichte sind uneinheitlich. ABETZ und MERKEL (1968), BERNHART (1960), BUES (1990) zeigen zunehmende Astdurchmesser mit steigender Höhe auf. MERKEL (1967) stellt hingegen keine Veränderungen entlang der Stammachse fest.

Die uneinheitlichen Ergebnisse gründen darin, dass die vertikale Astposition selbst offensichtlich keinen direkten Einfluss auf das Durchmesserwachstum des Astes hat. Die eigentlichen Ursachen sind vielmehr eine veränderte Konkurrenz-, und Ernährungssituation sowie Seneszenzvorgänge im Ast. Es gelten hier analog die Feststellungen, die bereits bei der Astlänge gemacht wurden.

Einfluss der radialen Orientierung

VAN LAAR (1976) stellt im Vergleich von vier Bestandes- und Solitär-fichten keinen statistisch gesicherten Einfluss der Himmelsrichtung auf den Astdurchmesser fest.

BUES (1990) hingegen kann bei der Prüfung des Einflusses der Himmelsrichtung auf den Astdurchmesser in Quadratverbänden eine deutliche Abhängigkeit der stärksten und zweitstärksten Quirläste von der Himmelsrichtung belegen. Diese sind in der überwiegenden Zahl der Fälle nach Süden orientiert. Die Nord- und Westsektoren weisen in etwa einen erwarteten Anteil der dominierenden Äste am Quirl auf, wogegen die starken Quirläste unterdurchschnittlich selten nach Osten orientiert waren.

Zusammenhang mit dem Stammdurchmesser und Schlankheitsgrad

JOHANSSON (1992) schildert einen engen Zusammenhang zwischen dem Brusthöhendurchmesser (BHD) und der Aststärke bei jungen Fichten. Auch KRAMER et al. (1970) beschreiben einen straffen Zusammenhang ($r=0,913$) zwischen Brusthöhendurchmesser und den mittleren bzw. maximalen Aststärken in 1,3 m Höhe bei kronenspannungsfrei erwachsenen jungen Fichten. Auch für die Tanne lassen sich enge Zusammenhänge zwischen Stammdurchmesser und Astdurchmesser finden, wie die Untersuchungen DIETRICH (1973) ergeben. Er gibt ein mittleres Verhältnis des Stammdurchmessers am Astansatz zum maximalen Astdurchmesser in derselben Höhe von fünf zu eins an. Ähnliches können VON PECHMANN und SCHAILE (1955) für die Fichte berichten. Sie sprechen von einem Zusammenhang zwischen Jahrringbreiten des Stammes im Jahr der Astbildung und Astdurchmessern in derselben Betrachtungshöhe am Stamm. In schlechten Jahren, in denen am Stamm wenig Radialzuwachs geleistet wird, bilden sich am Terminaltrieb demnach auch dünnere, wenig vitalere Äste, die in homogenen Reinbeständen den Wachstumsrückstand zu stärkeren Ästen auch kaum mehr aufholen.

Aufgrund des Alterseinflusses auf das Astwachstum ist die Astansatzhöhe jeweils eine wichtige Größe, die zur Angabe von BHD-Astdurchmesser-Beziehungen herangezogen werden muss. Ältere Äste haben am gleichen Baum länger Zeit, um Durchmesser aufzubauen als jüngere Äste. Ein geeigneterer Weiser für die auftretenden maximalen Astdurchmesser als der absolute Stammdurchmesser ist der Schlankheitsgrad, weil er als Index von Baumdurchmesser zu Baumhöhe eine längerfristige Entwicklung des Baums wiedergibt, die sich auch in der Astdurchmesserentwicklung spiegelt. Es besteht eine Beziehung zwischen H/D-Wert und der mittleren Aststärke der stärksten drei Äste (ABETZ und UNFRIED 1983). Die Autoren finden steigende Astdurchmesser bei sinkendem Schlankheitsgrad. KENK (1990) bestätigt diesen Zusammenhang. SCHMIDT (2001) nutzt unter anderem den Schlankheitsgrad als Aussagegröße zur Vorhersage des maximalen Astdurchmessers.

Geht man von einer weitgehenden standörtlichen Kontrolle der Höhenentwicklung bei Fichten aus, so resultiert ein Zusammenhang zwischen dem Stammdurchmesser und der Astigkeit aus einem gleichgerichteten Zuwachsgewinn als Reaktion auf geringere Konkurrenz.

Zusammenfassend ist das Stammwachstum als eine integrierte Einflussgröße aufzufassen, die Alterseffekte sowie genetische und standörtliche Effekte beinhaltet und in besonderem Maße durch die Konkurrenz beeinflusst ist.

Zusammenhang mit der Astlänge

Zwischen dem Astdurchmesser und der linearen Astlänge besteht ein straffer Zusammenhang (Abb. 4-25). Mit steigender Astlänge steigt der Durchmesser an. Datenbasis sind 3855 Wertepaare von allen Datenkollektiven.

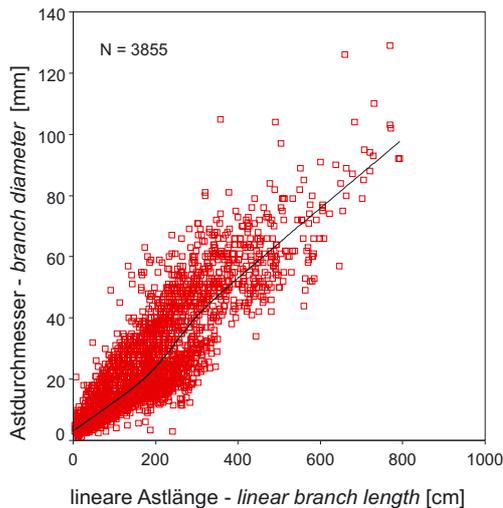


Abbildung 4-25: Zusammenhang zwischen Astdurchmesser und linearer Astlänge.
Relation between branch diameter and linear branch length.

Der Ausgleich über die LOWESS-Kurve zeigt eine Dominanz der Äste mit hohen Durchmesserwerten pro Astlänge an, die vor allem bei Astlängen über 300 cm zu beobachten ist. Es ist eine etwas abgesetzte Punktelcke im unteren Längenbereich von weniger als 350 cm erkennbar, die überwiegend unterhalb der Ausgleichs-Kurve liegt. Hierbei handelt es sich um die Astdaten von jüngeren Bestandesbäumen aus den Datenkollektiven A, D und E, die sich von den übrigen Ästen durch geringere Astlängen und hohen L/D-Werten abgrenzen. Der übrige Datensatz setzt sich aus älteren Bestandesbäumen mittlerer bis keiner Konkurrenz zusammen. Dadurch haben sich höhere Durchmesser pro Astlänge entwickelt.

Auch der Astdurchmesserzuwachs hängt von der Astlänge ab, wie in Abbildung 4-26 anhand von 1676 Wertepaaren illustriert ist. Als Datenbasis wurde das Datenkollektiv D herangezogen

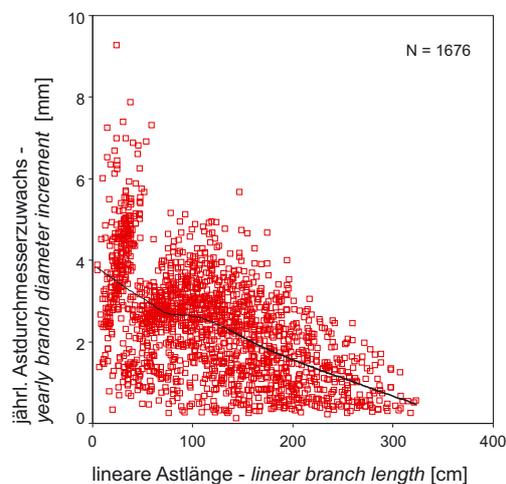


Abbildung 4-26: Astdurchmesserzuwachs bei unterschiedlichen linearen Astlängen. Ergebnisse an 17 Fichten des Datenkollektives D. Branch diameter increment at different linear branch lengths. Results of 17 spruce trees of data collective D.

Um die mittlere Tendenz darzustellen, wurde ein LOWESS-Ausgleich eingezeichnet. Maximale Zuwächse von sechs bis zehn Millimetern werden nur bei Austrieb des Astes erreicht, wenn er noch sehr kurz ist. Danach nimmt der Zuwachs mit steigender Astlänge ab. Die Streuung ist hoch. Ein linearer Regressionsausgleich erbringt ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,25$.

Die Astlänge beeinflusst das Astdurchmesserwachstum bzw. Astdurchmesser nicht direkt. Sie ist vielmehr als eine Proxi-Größe zu betrachten, welche eine Kombination anderer Effekte, vor allem dem Alter und der Konkurrenz darstellt. Diese Größen wirken auf die Astlänge und den Astdurchmesser. Allerdings reagieren Astlänge und -durchmesser nicht gleich, sodass sich ihr Verhältnis, der L/D-Wert, unter dem Einfluss des Astalters und der Konkurrenz verändert, wie LOHER (2001) feststellt.

Anhand des Datenkollektivs D kann der Einfluss der Konkurrenz auf das Längen-Durchmesser-Verhältnis (Abb. 4-27 links) und die Veränderung des Längenzuwachses im Verhältnis zum Durchmesserzuwachs (Abb. 4-27 rechts) demonstriert werden. Um eine dem H/D-Wert des Stammes vergleichbare Größenrelation zu erhalten, gehen Durchmesser und Länge beide im Millimetern in die Berechnung des L/D-Wertes des Astes ein. Zur Berechnung werden 381 Wertepaare von 17 Bäumen herangezogen

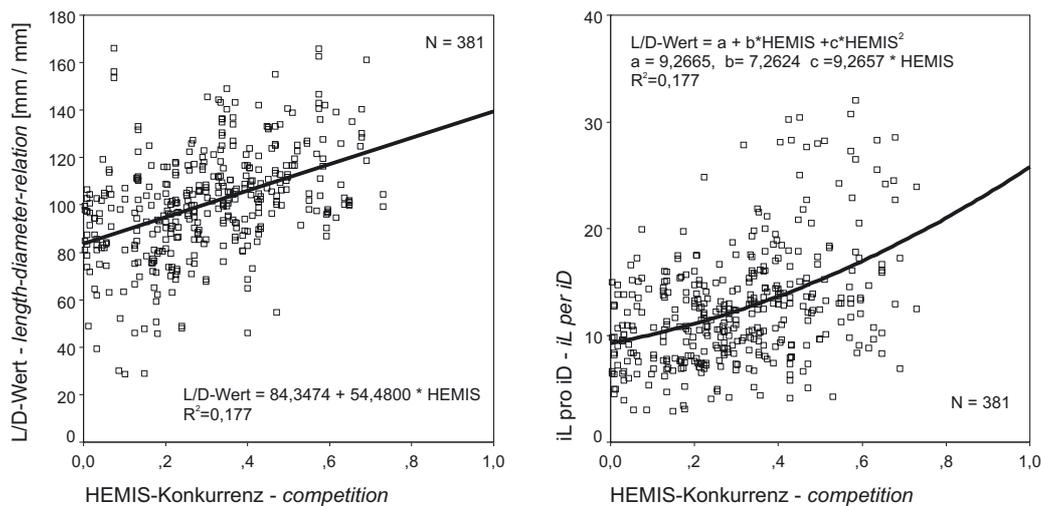


Abbildung 4-27: Einfluss der Konkurrenz auf das Längen-Durchmesser-Verhältnis (links) und das Verhältnis von Längenzuwachs zu Durchmesserzuwachs (rechts) bei 381 Fichtenästen des Datenkollektivs D. *Influence of competition on the length-diameter relation (left) and the relation of length increment to diameter increment shown for 381 spruce branches of data collective D.*

Die L/D-Werte reichen von 30 bis etwa 170 und zeigen ein deutliches Absinken bei zunehmender Konkurrenz. Ein linearer Regressionsausgleich der L/D-Beziehung in Abhängigkeit von der Konkurrenz zeigt ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,17$. Das Wachstum des Astdurchmessers reagiert empfindlicher auf Konkurrenz als das Astlängenwachstum.

Dies stützt auch die Analyse der Zuwachsrelation von Länge und Durchmesser. Mit steigender Konkurrenz investiert der Ast, analog zum Baum als Gesamtorganismus, überproportional mehr in das Längenwachstum als in sein Durchmesserwachstum. Der quadratische Ausgleich der relativen Veränderung des Längenzuwachses zum Durchmesserzuwachs (iL pro iD) in Abhängigkeit von der Konkurrenz erklärt 17,7% der beobachteten Gesamtstreuung.

Fazit

Der Astdurchmesser wird in erster Linie von der Konkurrenz und vom Astalter bestimmt. Diese modifizieren ein standörtlich und genetisch vorgegebenes Potenzial. Der genetische Einfluss auf den Astdurchmesser erscheint belegt, jedoch vergleichsweise gering.

Es zeigen sich Zusammenhänge zwischen dem Durchmesser der stärksten Äste und Brusthöhendurchmesser zum Brusthöhendurchmesser des Baumes. Diese Beziehung scheint keinem standörtlichen, jedoch einem genetischen Einfluss zu unterliegen. Weitere Zusammenhänge bestehen zwischen dem Schlankheitsgrad und den Aststärken bei der Fichte, was als eine konkurrenzbedingte Parallelentwicklung von Stammform und Astdurchmesser gedeutet werden kann. Der Einfluss der Himmelsrichtung auf die Astentwicklung ist noch unklar.

Wie schon bei der Astlänge, mit welcher der Astdurchmesser eng korreliert ist, wirken Astalter und Konkurrenz in Kombination und ermöglichen ein hohes Maß an Eingriffsmöglichkeiten durch den Bewirtschafter. Die Trennung diese beiden korrelierten Einflussgrößen fällt jedoch schwer und kann auch hier nicht geklärt werden, da dazu nötige Solitärdaten zum Astdurchmesserszuwachs fehlen.

4.3.6 Astansatzwinkel – *Branch inclination angle*

Erfassung und Charakterisierung des Astwinkels

Der Astwinkel definiert die Lage des Astes zur Stammachse. Der an der Stammpерipherie messbare Winkel des Astes wird in den kommenden Jahren beim Einschluss des Astes in den Stamm fixiert und beeinflusst die Holzqualität. Der Astwinkel bestimmt die vertikale Einflusszone des Astes im Stamm, indem er die Faserrichtung im Stamm ändert. Um den Ast entsteht eine Störzone im Stamm, da die Holzfasern um den eingeschlossenen Ast gelenkt werden (BÖHLMANN 1970, MATTHECK 1992, TRENDELENBURG und MAYER-WEGELIN 1955). Die durch den Astwinkel beeinflusste Störzone verringert die mechanische Festigkeit des Holzes (vor allem Zug- und Biegefestigkeit) und auch die Formstabilität bei der technischen Trocknung (SEELING 2001). Hohe Astwinkel verlangsamen zudem die Astüberwallung (ŽUMER 1966), da ein größerer Bereich überwallt werden muss (s. Abschnitt 4.3.9). Hinzu kommt noch eine Harzanreicherung im Astbereich im Verlauf der natürlichen Astreinigung, sodass die Astwurzel und das Astholz selbst sich auch durch eine andere chemische Zusammensetzung vom astfreien Stammholz abgrenzen (TRENDELENBURG und MAYER-WEGELIN (1955).

Bei der Astwinkeldefinition kann zwischen innerem Astwinkel und äußerem Astwinkel unterschieden werden. Der innere Astwinkel wird durch Aufschneiden des Stammes oder durch berührungsfreie Röntgentechniken (BHANDARKAR et al. 1999, OJA 1997, 2000) erfasst und beschreibt die Krümmung des Astes im Holz (DIETRICH 1973).

In dieser Arbeit wird ausschließlich der äußere Astwinkel betrachtet, da der innere Astwinkel beim Einwachsen des Astes in den Stamm aus dem äußeren Astwinkel hervorgeht. Es wird zwischen dem realen Astansatzwinkel (AW_{real}) und dem „linearen Astwinkel“ (AW_{lin}) unterschieden, die beide als Winkel zur der Stammpерipherie gemessen werden. Die Winkeldefinitionen sind graphisch in Abbildung 4-28 dargestellt.

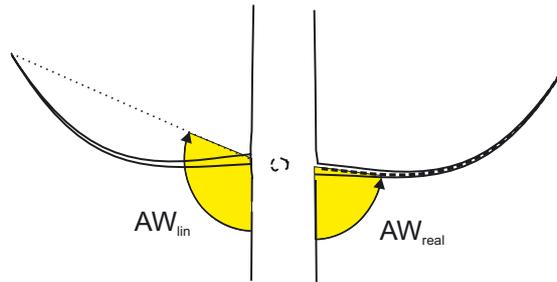


Abbildung 4-28: Astwinkeldefinitionen: AW_{real} entspricht dem Astansatzwinkel, AW_{lin} steht für den linearen Astwinkel. Beide Messungen erfolgen von der Astunterseite zur Astseele – *Definitions of branch angles: AW_{real} is the insertion angle, AW_{lin} is the linear angle from stem to the line from the branch tip to the branch base. Both are measured from below to the central core of the branch.*

Der reale Astansatzwinkel ist der Winkel, den die Astseele auf den ersten 25 cm vom Astansatz zur Stammoberfläche beschreibt. Dieser Astteil wächst nach und nach in den Stamm ein und repräsentiert dadurch über die Zeit auch die zu erwartende Astkrümmung im Stamm.

Der lineare Astwinkel soll hier als der Winkel definiert werden, den die lineare Verbindung vom Astansatz an der Stammpерipherie zur Astspitze einbeschreibt.

Der Unterschied zwischen dem linearen Astwinkel und dem Astansatzwinkel ist ein Ergebnis der Astkrümmung. Bei einem vollkommen geraden Ast wären die beiden Winkel identisch. Für die hier dargestellten Untersuchungen wurden alle Winkel in Altgrad von unten, von der Stammpерipherie zur Astseele gemessen. Damit besitzen waagerechte Äste genau 90° . Nach oben ragende Äste besitzen Werte größer 90° und nach unten hängende dementsprechend kleinere Werte.

Die Auswertung der langkronigen Fichten des Probenkollektivs B belegen, dass sich für den Astansatzwinkel (Abb. 4-29 links) eine symmetrische Verteilung aller Äste um einen Mittelwert von etwa 94° ergibt, während der lineare Astwinkel eine deutlich rechtssteile Verteilung mit einer Dominanz steilerer Äste über 90° aufweist (Abb. 4-29 rechts). Das bedeutet, dass die untersuchten Fichten des Kollektivs B eher zu einem Aufrichten der Astspitzen neigen.

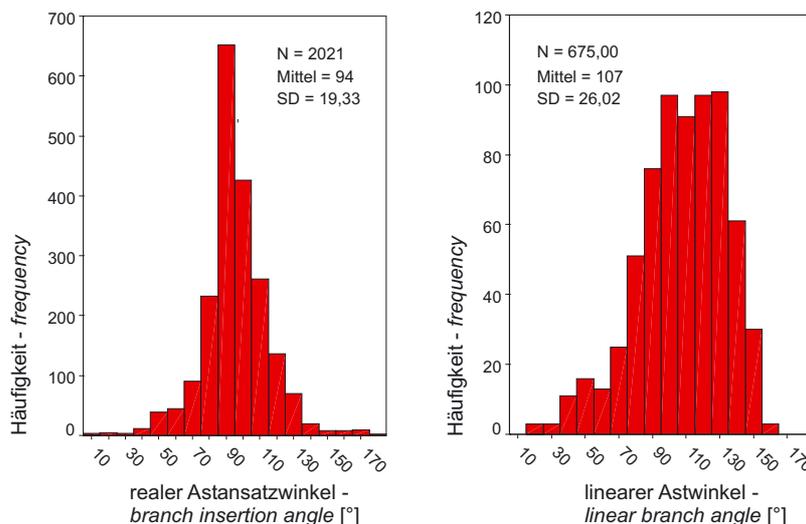


Abbildung 4-29: Häufigkeit vorkommender Astansatzwinkel (AW_{real} , links) und linearer Astwinkel (AW_{lin} , rechts) im Datenkollektiv B. *Frequency of branch insertion angles (AW_{real} , left) and linear branch angles (AW_{lin} , right) in data collective B.*

Einfluss von Klima und Standort

Die Fichte besiedelt ein relativ großes Areal mit einer breiten Standortpalette. Die morphologische Differenzierung der Fichte ist als evolutionärer Anpassungsprozess an bestimmte standörtliche und klimatische Bedingungen anzusehen. So finden sich in schneegefährdeten subalpinen Lagen mehr schmalkronige Fichten mit hängenden Astwinkeln als im montanen Bereich als Ergebnis einer natürlichen Auslese (SCHMIDT-VOGT 1987).

Klimafaktoren nehmen noch unabhängig vom Wuchstyp Einfluss auf den Winkel des Astes.

KÖSTER (1934) bemerkt bei toten Ästen einen deutlichen Einfluss des Wassergehaltes auf die Astform und den Astwinkel. Trockene Äste hängen mehr, während feuchte eher nach oben stehen. Dies erklärt sich dadurch, dass bei toten Ästen die Fasersättigungsfeuchte unterschritten wird und es zu Schwindvorgängen kommt, die auf der Astoberseite und Astunterseite unterschiedlich stark wirken. Die von Druckholzeinlagerung geprägte Unterseite von Koniferenästen schwindet stärker als die Astoberseite. Dadurch biegt sich der Totast bei Trockenheit nach unten, während er bei hoher Feuchte eher zur Baumspitze gerichtet ist.

KÖSTER weist darauf hin, dass der Zersetzungsgrad der toten Äste die Reaktion auf den wechselnden Wassergehalt ebenfalls beeinflusst, weil die Sorptionsfähigkeit des Astes durch die Vermorschung modifiziert wird.

MACHATSCHKE (2000) macht ähnliche Beobachtungen hinsichtlich des Einflusses der Umgebungsfeuchte und des Luftdrucks auf den Astwinkel toter Äste und beschreibt sogar die traditionelle Konstruktion eines einfachen Barometers mittels toter Fichtenäste in manchen Gegenden der Alpen. Er schildert ein ähnliches Verhalten des Astwinkels auf die Umgebungsfeuchte bei lebenden Fichtenästen.

Dies ist eher unwahrscheinlich, da nur im toten Holz die Fasersättigungsfeuchte unterschritten wird und es so zu Quell- und Schwindvorgängen kommen kann. Bei lebenden Ästen verringert sich in erster Linie das Gewicht des Astes bei Trockenheit durch Wasserverlust in der Laubmasse, sodass es bei Grünästen im Vergleich zu den Totästen zu einer gegengerichteten Veränderung des Astwinkels kommen muss. Mit hoher Umgebungsfeuchte werden die lebenden Äste schwerer und hängen tendenziell mehr nach unten.

Ein weiterer Einfluss auf den Astwinkel üben Schnee und Eisanhang aus, die den Ast zusätzlich zu seinem Eigengewicht belasten.

Einfluss des Genotyps

Der genetische Einfluss auf den Astwinkel ist lange Zeit bekannt. ZOBEL und JETT (1995) heben hervor, dass über etliche Baumarten hinweg ein starker genetischer Einfluss auf den Astwinkel besteht. Bei der Fichte zeichnen sich schmalkronige Bäume aus den Hochlagen oder aus Skandinavien durch besonders stark hängende Äste mit geringen realen und linearen Astwinkeln aus. Untersuchungen wie sie zum Beispiel von BINDSEIL (1933), GRUBER (1992), PRIEHÄUSSER (1958), RUBNER (1943) und SCHMIDT-VOGT (1987) veröffentlicht wurden, belegen das Vorkommen von etlichen Fichtentypen, die sich hinsichtlich ihrer Kronen und Astformen deutlich voneinander unterscheiden. SCHMIDT-VOGT (1987) stellt insgesamt zwölf verschiedene Fichtentypen vor, die sich durch ihre Kronenform und insbesondere ihre linearen Astwinkel und Astansatzwinkel differenzieren lassen. Als Verzweigungsgrundtypen gelten Kamm-, Bürsten- und Plattenfichten (PRIEHÄUSSER 1958). Wobei die Äste typischer Kammfichten fast im rechten Winkel ohne starke Krümmung vom Stamm ablaufen, während sich typische Bürstenfichten in der ganzen Krone durch eine starke Astkrümmung nach oben typisieren lassen. Dies führt zu Astansatzwinkeln um 90 Grad, jedoch zu linearen Astwinkeln, die vor allem im Wipfelbereich deutlich darüber liegen. Plattenfichten zeigen eher einen hängenden Astansatzwinkel mit einer Krümmung nach unten, was lineare Astwinkel unter 90 Grad zur Folge hat.



Abbildung 4-30: Genetisch bedingter Unterschied im Astwinkel zweier gleich alter Fichten. Links eine Kammfichte, rechts eine typische Bürstenfichte. *Genetical induced difference of branch angles of two Norway spruce trees of the same age. The left one shows horizontal branch angles, the branches of the right tree bow up.*

In Abbildung 4-30 sind zwei annähernd gleich alte Fichten von vergleichbarem Durchmesser auf demselben Standort am Campusgelände des Wissenschaftszentrums Weihenstephan der Technischen Universität München dargestellt. Der linke Baum (Alter 54 Jahre) repräsentiert eine typische, flach streichende Kammform der Äste. Der rechte Baum (Alter 57 Jahre) hingegen weist eine typische Bürstenform mit stark nach oben gebogenen Ästen auf. Da die beiden Bäume sich in Standort und Wuchssituation gleichen, ist der Unterschied in der Aststellung nur durch genetische Einflussfaktoren erklärbar.

Der quantitative Nachweis eines genetischen Einflusses auf den Astwinkel bei der Fichte gelingt ILSTEDT und ERIKSSON (1986), die den genetisch bedingten Varianzanteil beim Astwinkel mit einer Größenordnung von 0,6 bis 11,6% beziffern. Auch LIESEBACH (1994) kann eine Variation des Astwinkels in 1,3 m Höhe zwischen unterschiedlichen Fichtenprovenienzen aufzeigen.

Einfluss des Astalters

Bei der Fichte lässt sich ein dem Gradient des linearen Astwinkels der grünen Äste von der Spitze zum Kronenansatz analog zum Astalter feststellen (COLIN und HOULLIER 1992). Die jungen Äste an der Baumspitze sind nach oben gerichtet und weisen hohe Astwinkel auf. Der Astwinkel sinkt mit zunehmendem Astalter und abnehmender Distanz von der Baumspitze jedoch ab und erreicht am Kronenansatz in der Regel sein Minimum.

Der reale Astansatzwinkel zeigt einen ähnlichen Verlauf. Allerdings sind besonders geringe Astwinkel am Kronenansatz in der Regel weniger ausgeprägt. Dort setzen die Äste oft fast waagrecht oder mit geringer Abwärtsneigung an. Die Astspitzen hängen allerdings nicht selten nach unten.

Untersuchungen am Datenkollektiv B zeigen, wie sich bei lebenden Ästen der Astansatzwinkel (Abb. 4-31 rechts) mit zunehmendem Astalter verringert. Typische Werte reichen von 140 bis 70 Grad. Die Äste mit Astwinkeln über 140 Grad sind meist Steiläste, Äste unter 70 Grad stellen häufig Internodialäste dar, die nie ein plagiotropes Wachstum entwickeln. Stärkere Äste mit niedrigen Astwinkeln können sich auch entwickeln, wenn ein Ast nachdem er angebrochen wurde überlebt und weiter wächst.

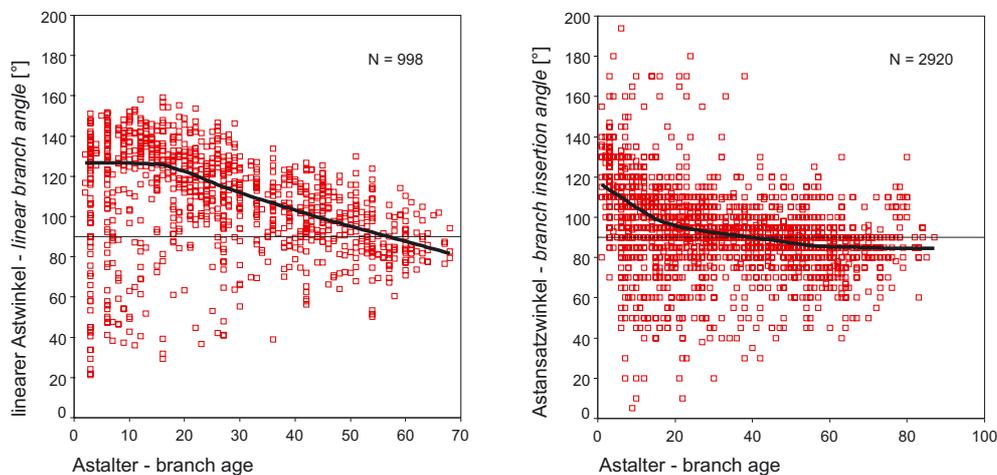


Abbildung 4-31: Veränderung des linearen Astwinkels (links) und des Astansatzwinkels (rechts) mit dem Astalter. *Changing linear branch angle (left) and branch insertion angle (right) with increasing branch age.*

Beim linearen Astwinkel (Abb. 4-31 links) zeigt der LOWESS-Ausgleich eine Phase, in der er sich nur wenig verändert. Die mittleren linearen Astwinkel bewegen sich zwischen 120 und 130 Grad. Danach fällt er mit zunehmendem Alter linear ab bis auf etwa 80 Grad im Alter 70. Wie schon beim Astansatzwinkel sind auch bei Betrachtung des linearen Astwinkels auffällig stark hängende Äste im Datensatz enthalten. Diese sind wiederum auf die „schlangenförmig“ am Baum hängenden Internodial- und seltener auch Nodialäste zurückzuführen, die kein plagiotropes Wachstum ausbilden. Meist handelt es sich um Äste geringen Durchmessers.

Einfluss der Konkurrenz

An Kiefern (*Pinus sylvestris* L.) findet BUES (1994) in Standraumversuchen keinen Einfluss des Wuchsräumens auf die Astwinkel.

Bei einer Betrachtung der lebenden Äste, die im Datenkollektiv D gemessen wurden, lassen sich beim linearen Astwinkel zwar signifikante Unterschiede zwischen den Parzellen ausmachen, jedoch ergibt sich über alle vier Parzellen kein eindeutiger Einfluss der Bestandesdichte (Abb. 4-32 links)

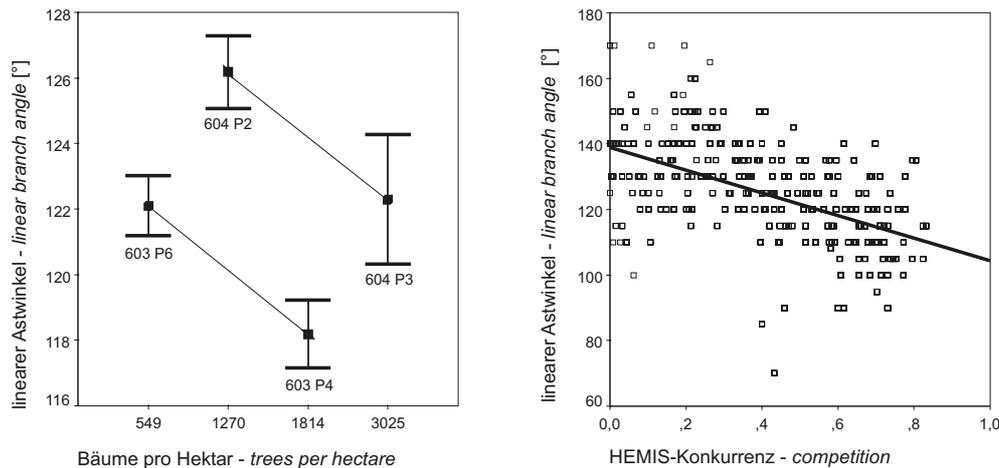


Abbildung 4-32: Einfluss der Konkurrenz auf den linearen Astwinkel, betrachtet auf Bestandesebene (links) und Einzelastebene (rechts). *Influence of competition on the linear branch angle shown for stands of different density (left) and on a single branch resolution (right).*

Innerhalb der Einzelversuche 603 und 604 weist jedoch die Parzelle mit der höheren aktuellen Bestandesdichte im Durchschnitt stärker hängende Äste auf. Die Parzellen, die zum selben Versuch gehören, sind zur besseren Kenntlichmachung durch Linien verbunden.

Am einzelnen Ast liefert ein berechneter HEMIS-Konkurrenzwert einen eindeutigen statistischen Zusammenhang zwischen der Konkurrenzsituation des Astes und dem Astwinkel (Abb. 4-32 rechts). Ein linearer Regressionsausgleich erklärt 26,4 Prozent der Varianz (Formel 4-5)

$$AW_{\text{lin}} = 138,918 - 34,563 \cdot \text{HEMIS} \quad \text{Formel 4-5}$$

Dabei stellt HEMIS den berechneten Konkurrenzwert dar, der bei 1 für eine maximale, bei 0 für keine Konkurrenz steht. Doch welcher Anteil auf die Konkurrenz und welcher Anteil auf das Entwicklungsstadium des Astes zurückgeführt werden kann, ist mit dieser Untersuchung nicht zu beantworten.

Mechanische und physiologische Einflüsse auf den Astwinkel

Nach HORN (1971, S. 108) braucht ein Ast wesentlich mehr Energie für ein horizontales Wachstum als für ein davon abweichendes. Da junge Äste ein nach oben gerichtetes und damit energetisch günstigeres Astwachstum aufweisen, müssen bestimmte Faktoren für ein allmähliches Abfallen des Astansatzwinkels verantwortlich sein. Durch das sekundäre Dickenwachstum der jungen Triebe ergeben sich mechanische Spannungen zwischen den Seitentrieben und dem Terminaltrieb, welche die zunehmende Abnahme des Astansatzwinkels bei jungen Ästen erklären. Die Äste werden im Laufe des Dickenwachstums der ersten Jahre vom Terminaltrieb weggedrückt.

Bei älteren Ästen stellt ein mehr oder weniger horizontales Astwachstum eine Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Raumbesetzung dar, da sich die Fichte aufgrund ihres akrotonen, monopodialen Verzweigungssystems nicht wie zum Beispiel Laubbäume durch Gabelung und

Ausbildung mehrerer besonders starker Äste den Raum erschließen kann. Die Wuchsstrategie der Fichte besteht in der Bildung einer Zentralachse nach oben, von der aus die Äste horizontal den Raum besetzen (BINDSEIL 1933). Dieses plagiotrope, waagerechte Astwachstum wird durch die Bildung eines größeren Astdurchmessers und durch mechanisch angepasstes Druckholz auf der Astunterseite möglich.

Anhand des Probebaumkollektivs A wurden an 76 Ästen der Stichprobenschicht SP 3 biomechanische Untersuchungen durchgeführt, um Aufschluss über die mechanischen Einflussgrößen auf den Astwinkel zu erhalten. Wie in Abbildung 4-33 zu sehen ist, steigt das Frischgewicht der Äste mit zunehmendem Durchmesser exponentiell an.

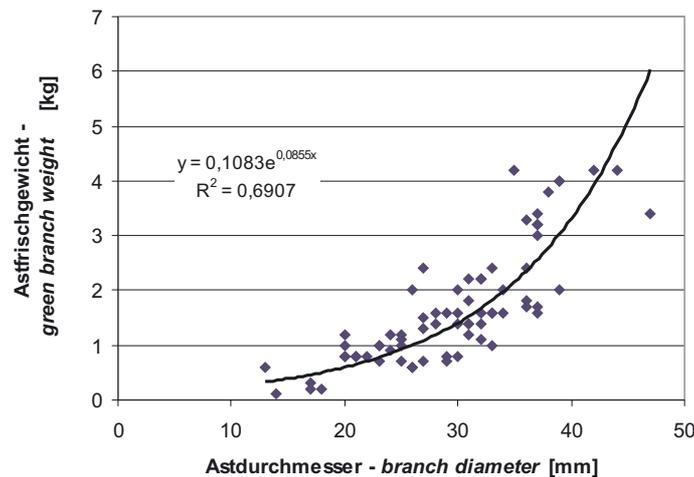


Abbildung 4-33: Astfrischgewicht in Abhängigkeit vom Astdurchmesser. *Fresh branch weight depending on branch diameter.*

Für dieselben Proben wurde empirisch das Biegemoment am Astansatz bestimmt, also die Kraft, die längs des Stammes wirkt und den Ast der Schwerkraft nach zu Boden zieht. Gegen dieses Biegemoment muss der Ast eine Gegenkraft aufbauen, ansonsten würde er abbrechen. Das Biegemoment könnte deshalb besonders den realen Astansatzwinkel beeinflussen. Zur Biegemomentbestimmung wurden der reale sowie der lineare Astwinkel in ihrer natürlichen Stellung gemessen und danach der Ast vom Stamm getrennt. Der Ast wurde gewogen und schließlich am Ansatz in einem Metallschuh eingespannt, dessen Gelenk nur eine vertikale Auslenkung gestattete. Die Kraft, die nötig war, um den Ast in die ursprüngliche Lage zu bewegen, wurde gemessen und mit der Distanz vom Astansatz zur Messstelle multipliziert, um das Biegemoment zu erhalten.

Es ergibt sich erwartungsgemäß eine lineare Abhängigkeit des Biegemoments vom Astgewicht (Abb. 4-34).

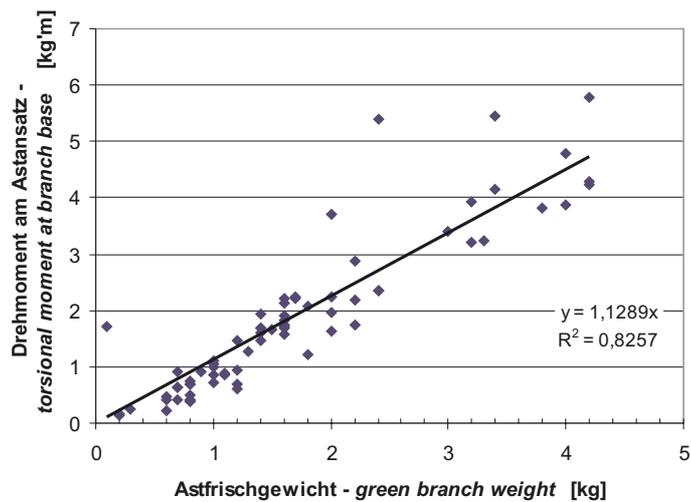


Abbildung 4-34: Biegemoment am Astansatz in Abhängigkeit des Astfrischgewichts. *Bending moment at branch base subject to fresh branch weight.*

Allerdings steigt das Astgewicht exponentiell mit dem Astdurchmesser an (Abb. 4-33). Dies bedeutet, dass der Astdurchmesser, der einem gewissen Biegemoment gegenüber steht, unterproportional steigt (Abb. 4-35)

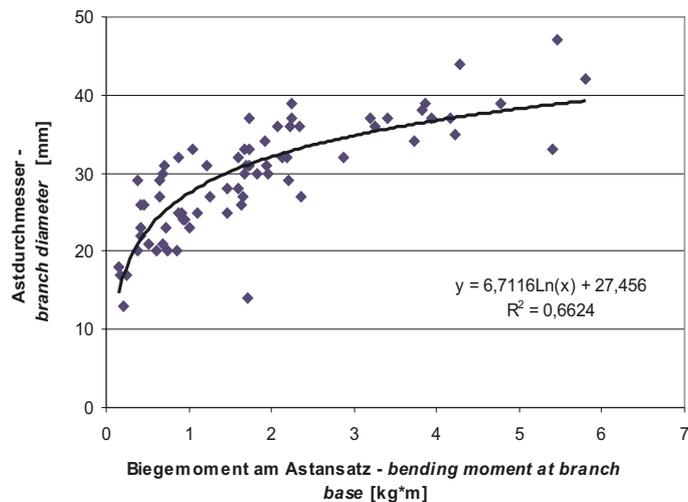


Abbildung 4-35: Astdurchmesser zur Kompensation eines gewissen Biegemoments am Astansatz. *Branch diameter for compensation of a certain bending moment at branch base.*

Es wäre zu erwarten, dass bei hohen Biegemomenten eher hängende Äste mit geringen Astwinkelwerten auftreten. Betrachtet man jedoch den Einfluss, den das Biegemoment auf den linearen und den realen Astansatzwinkel ausübt, so ist kein Zusammenhang feststellbar (Abb. 4-36).

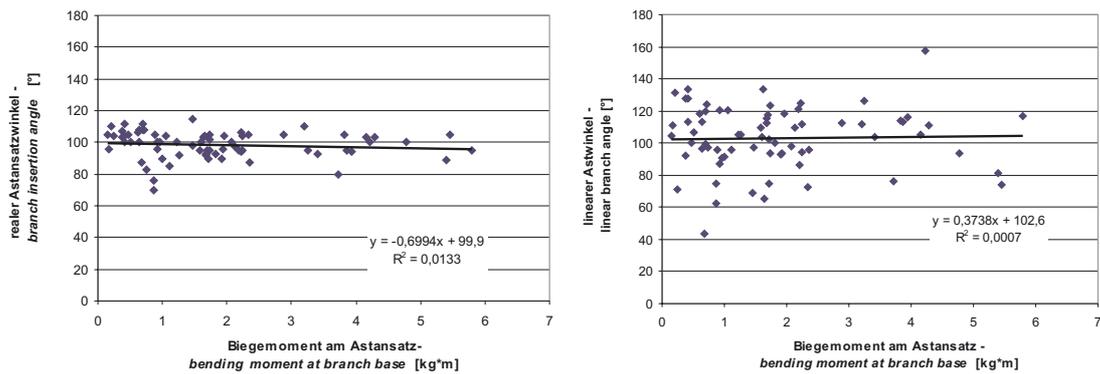


Abbildung 4-36: Der reale Astansatzwinkel (links) und der lineare Astwinkel (rechts) zeigen sich mehr oder weniger unbeeinflusst vom gemessenen Biegemoment. *The bending moment shows no influence on the branch inclination angle (left) and branch insertion angle (right).*

Dies lässt den Schluss zu, dass der Ast dem mechanischen Reiz eines höheren Biegemoments entgegenwirkt, indem er seinen Astdurchmesser vergrößert. Dieses Ergebnis mag als Hinweis auf eine adaptive, mechanisch induzierte Wachstumsstimulation des Astdurchmessers gelten, wie sie MATTHECK (1992) postuliert. Er geht in seinem „Axiom konstanter Spannung“ davon aus, dass erhöhter mechanischer Stress durch Mehrwachstum an den betroffenen Zonen ausgeglichen wird.

Allerdings beeinflusst das Verhältnis von Biegemoment zu Astdurchmesser den realen Astansatzwinkel zwar gering, aber doch signifikant (Abb. 4-37), sodass davon ausgegangen werden muss, dass in manchen Fällen keine vollständige Anpassung des Astdurchmessers an den mechanischen Reiz erfolgt.

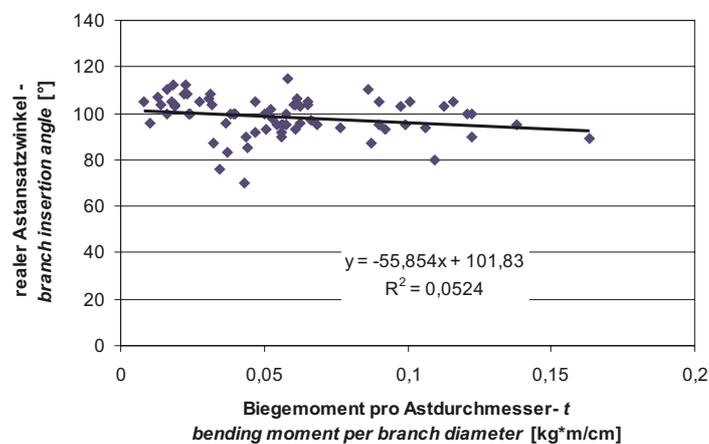


Abbildung 4-37: Signifikante Änderung des Verhältnisses vom Astansatzwinkel zum Astdurchmesser bei unterschiedlichem Biegemoment. *Significantly changing relation between branch insertion angle and branch diameter with increasing bending moment.*

Eine Erklärung ist, dass Äste in unteren Kronenbereichen durch Beschattung pro Länge weniger grüne Nadelmasse besitzen, d. h. sie können weniger assimilieren. Weniger Assimilation bedeutet eine geringere physiologische Notwendigkeit im Durchmesser zu wachsen, um die Wasserversorgung der Nadeln sicherzustellen. Parallel dazu stehen dem Ast auch weniger eigene Bau-

stoffe aus der Assimilation zur Verfügung, um in physiologisch nicht rentables Reaktionsholz zu investieren, wenn man der Theorie der Kohlenstoffautonomie folgt (s. Abschnitt 4.3.7). Folglich verringert sich der Astwinkel, da die Investition in die nötige Reaktionsholzbildung und das notwendige Durchmesserwachstum zur Aufrechterhaltung der Plagiotropie unterbleiben. Damit spielen mechanische und physiologische Prozesse auf Astebene eine Rolle bei der Entwicklung des Astwinkels.

Weiterhin ist anzunehmen, dass auch die mechanische Last durch Schnee, Eis oder andere, aufliegende Äste den Astwinkel beeinflussen kann. Lastet das Gewicht eines anderen Astes oder langdauernder Schneedruck auf einem Ast, wäre es möglich, dass der Astwinkel sich dauerhaft verändert. Vor allem bei Solitärfichten lassen sich im unteren Kronenbereich Äste ausmachen, auf die darüber liegende Äste durch ihr Gewicht mechanischen Druck ausüben und als Hinweis für ein Absinken der untersten Äste dienen können. BRÜNDL et al. (1999) messen Schneelasten von 4,7 kg pro Ast, was etwa dem durchschnittlichen Eigengewicht eines Fichtenastes von 4,4 cm Durchmesser entspricht (siehe Abb. 4-34).

Um nicht zu brechen, muss sich der Ast entweder durch Durchmesserwachstum und Reaktionsholzanlagerung der Belastungssituation anpassen (MATTHECK 1992, METZGER 1893) oder dem Druck ausweichen, indem er seinen Astwinkel verringert. In beiden Fällen muss er längerfristige statische Belastungen weit über der Normalbelastung durch sein Eigengewicht ausgleichen. Kurzfristige dynamische Belastungssituationen durch das Abrutschen von Schnee aus höheren Kronenbereichen oder das Zusammentreffen von Wind und Nassschnee bzw. Raueis legen den Schluss nahe, dass der Ast deutlich mehr als für seine statische Eigenlast in mechanische Stützstrukturen investieren muss.

Eine eingehendere Betrachtung der Astmechanik finden sich bei BRÜNDL et al. (1999), CANELL und MORGAN (1989) sowie MORGAN und CANELL (1988), welche die Astkrümmung auf mechanischer Basis berechnen.

Fazit

Der Astwinkel lebender Äste streut bei der Fichte in breitem Rahmen. Dies ist unter anderem auf den deutlichen genetischen Einfluss zurückzuführen zu dem gesicherte Ergebnisse vorliegen. Klimatische Faktoren modifizieren den Winkel von toten Ästen. Bei lebenden Ästen sind klimatische Einflüsse als wahrscheinlich anzusehen. Deutliche Zusammenhänge mit dem Astwinkel weist auch das Astalalter auf. Ein altersunabhängiger Konkurrenzeinfluss auf den Astwinkel ist nicht eindeutig belegt. Bedeutsam scheint das Zusammenspiel aus physiologischen und mechanischen Einflusskomponenten, deren Klärung zum Verständnis der Astwinkelveränderung weiter beitragen kann. Letzten Endes stellt das Astalalter allerdings nur eine Proxi-Größe dar, welche die wirklichen physiologischen und mechanischen Effekte widerspiegelt.

4.3.7 Aststerben – *Branch mortality*

Wachstum und Holzqualität werden gleichermaßen durch die Astmortalität geprägt. Sie beeinflusst unter anderem die Kronenlänge des Baumes, die sich aus dem Höhenwachstum und der Höhe des Kronenansatzes bestimmt (SPATHELF 1998). Damit nimmt die Astmortalität Einfluss auf die Länge der assimilierenden Krone, einem Hauptfaktor im Wachstum von Bäumen (ASSMANN 1961). Die Astmortalität stellt zudem einen qualitätsrelevanter Prozess dar, da tote Äste nicht mehr mit dem Holz verwachsen und als so genannte „Durchfalläste“ bei vielen Holzverwendungen unerwünscht sind.

Das Absterben von Ästen ist ein biologischer Vorgang, den SCHÖPF (1954) folgendermaßen beschreibt: „Dem Absterben der Äste geht ein mehr oder minder langes Kümmernisstadium voraus. Die Längentriebe dieser absterbenden Äste werden zunehmend kürzer und die Jahrringe

immer enger. Häufig kommt dabei die Jahrringbildung an der Astbasis bereits einige Jahre vor dem Absterben des Astes völlig zum Erliegen“ (SCHÖPF 1954 S. 285f). Um die physiologischen Vorgänge beim Wachstum und vor allem beim Absterben von Ästen verstehen zu können, wird oft von einer so genannten „Astautonomie“ ausgegangen.

Konzept der Astautonomie

Äste bei Koniferen werden nur in den ersten Jahren nach dem Austrieb noch vom Stamm mit Assimilaten versorgt (SPRUGEL et al. 1991). Danach gilt für jeden Ast nach der Auffassung der Befürworter des Autonomiekonzeptes der Autonomiegrundsatz hinsichtlich der Kohlenstoffversorgung, solange das Licht der wachstumslimitierende Faktor ist.

NÄGELI (1952) kritisiert die Annahme, dass Äste deshalb stürben, weil sie von der oberen Krone zu wenig versorgt würden und beschreibt diese Kohlenstoffautonomie folgendermaßen: „In Wirklichkeit erhält aber ein Ast überhaupt nie eine solche Zufuhr von Bildungstoffen von oben her. Jeder Ast ist vielmehr ausschließlich auf seine eigene Stoffproduktion angewiesen, wobei Überschüsse, die der Stammholzbildung zugute kommen, gleichfalls nur noch abwärts transportiert werden.“ Nägeli begründet diesen Standpunkt ausführlich mit dem morphologischen und anatomischen Bau der Holzfasern und des Bastes, die eine Ernährung des Astes von oben her sehr erschweren. BÖHLMANN (1970) belegt in anatomisch-histologischen Untersuchungen, dass bei den Pinaceen eine direkte Verbindung zwischen Haupt- und Seitenachse nur während den ersten eineinhalb Jahren besteht. In dieser Zeit kann eine Assimilatversorgung der Knospe bzw. des frisch ausgetriebenen Triebes durch die Stammachse erfolgen. Danach verhindert dies eine Sperrzone und der Ast ist auf sich alleine gestellt.

Folgt man dieser Astautonomie hinsichtlich der Kohlenstoffversorgung, lassen sich Äste als Metapopulation auffassen, als weitgehend selbstständige Module, die nicht vom Gesamtorganismus mit Assimilaten alimentiert werden, sondern sich durch Selbstversorgung am Leben halten müssen (BÖHLMANN 1970, SPRUGEL et al. 1991). Die produzierten Überschüsse werden als „Tributzahlungen“ an den Gesamtorganismus betrachtet (siehe NÄGELI 1952).

Der Grad der Astautonomie wird jedoch von einigen Autoren in neueren Untersuchungen auch als deutlich geringer eingeschätzt. Als Argument wird dabei angeführt, dass Schattenäste von unterdrückten Bäumen mit wesentlich weniger Licht auskommen als Schattenäste von dominanten Individuen (SPRUGEL 2002). Insgesamt scheint der Stressgradient entlang der Stammachse des Baumes eine Rolle dabei zu spielen. Sind alle Äste einem ähnlich hohen Stress ausgesetzt, überleben auch Äste, die bei einem deutlichen Stressgradienten schon abgestorben wären. Dies spricht für eine gewisse Assimilatverteilung innerhalb des Baumes und damit nur für eine eingeschränkte Gültigkeit des Autonomiegrundsatzes. Weitere Ergebnisse anderer Autoren stützen diese These der Assimilatverteilung von Ast zu Ast, die es dem Gesamtorganismus Baum erlaubt, Äste mit einer höheren Überlebenserwartung zu fördern (HENRIKSSON, 2001, STOLL und SCHMID 1998).

Erfassung des Aststerbens

Die Erfassung des Aststerbens kann beispielsweise durch die Messung der Kronenansatzhöhe geschehen. Dabei wird die Kronenansatzhöhe bei Koniferen meist als die Höhe des untersten lebenden Primärastes (PRETZSCH 1992) oder des untersten Quirls mit mindestens drei lebenden Ästen (KRAMER 1962) definiert. Ein Ast gilt als lebend, wenn er noch grüne Nadeln trägt. Der Vorteil der Methode ist die zerstörungsfreie Anwendbarkeit bei geringem Zeitbedarf in stehenden Beständen. Ein Nachteil liegt in einer relativ groben Erfassung der Astmortalität, da vor allem bei Nadelbäumen der Astquirl und nicht der einzelne Ast betrachtet wird.

Um ein exaktes Bild der Astmortalität zu erhalten, muss jedoch der einzelne Ast erfasst werden.

Mithilfe der Sektion von Baumstämmen ist eine detailliertere Charakterisierung der Absterbeverhältnisse individueller Äste möglich. Die Sektion erfolgt am zweckmäßigsten durch radiale oder longitudinale Schnitte an Stammstücken entlang der Markröhre eines Astes (CIESLAR und JANKA 1902, BRUNN 1931, DIETRICH 1973, MAGUIRE und HANN 1987). Dabei werden mehrere radiale Zonen im Holz definiert. Vom Mark des Stammes nach außen zeigt sich zuerst eine Grünastzone, in welcher der Stamm den Ast eingeschlossen hat, solange der Ast lebendig war. Hier ist der Ast mit dem Holz des Stammes fest verwachsen. Es schließt sich eine Zone an, in welcher der Ast nicht mehr mit dem Holz verbunden ist. Diese wird nach dem Absterben des Astes gebildet. Schließlich lassen sich eine Überwallungszone und eine astfreie Zone identifizieren, die entstehen, wenn die Astreinigung erfolgt ist und genug Zeit zum Überwallen des Astes vergangen ist. Die Einflussfaktoren auf die Bildung der beiden letzten Zonen werden in Abschnitt 4.3.8 besprochen.

Durch die Identifikation der Grenze zwischen Grünast- und Totastzone ist eine Datierung des Aststerbens möglich. Die Sektions-Methode ist jedoch aufwändig und erfordert die Fällung des Baumes. Die beim Vergleich der Sektionsmethode mit den Ergebnissen periodischer Kronenansatzhöhenmessungen auftretenden geringen Unterschiede werden von MAGUIRE und HANN (1987) diskutiert. Modernere Methoden zur Erfassung der inneren Astigkeit basieren auf dem Einsatz von Computertomographen, um den aufwändigen Sektionsprozess zu umgehen. Mit der Durchstrahlung des Stammes mittels Röntgenstrahlung und der anschließenden dreidimensionalen Rekonstruktion sind ähnliche Ergebnisse wie bei einer Sektion erzielbar (OJA 1997, 2000)

Einfluss des Standorts

HASENAUER (1997) stellt einen signifikanten konkurrenzunabhängigen Einfluss der Höhenlage auf die Kronenansatzhöhe bei Solitärfichten fest. Auch DURSKÝ (2000) belegt anhand von Kronenansatzdaten aus einer bayernweiten Inventur einen standörtlichen Einfluss auf die Kronenansatzhöhe. Bei konstanter Dimension von Baumhöhe und Brusthöhendurchmesser hängt die Kronenansatzhöhe signifikant von der Bodenfrische und der Nährstoffversorgung ab. Auf trockenen Standorten lassen sich kürzere Kronen nachweisen als auf feuchten und nassen Standorten. Ein steigendes Nährstoffangebot führt ebenfalls zu tendenziell kürzeren Kronen. Eine physiologische Begründung des feuchtebedingten Standorteinflusses liegt nahe. Bei Wasserstress trennt sich der Baum von wenig produktiven Ästen im unteren Schattenkronenbereich.

Einfluss des Genotyps

ILSTEDT und ERIKSSON (1986) beziffern den mittleren genetisch bedingten Anteil bei Varianz der Kronenansatzhöhe von Fichten in einem Interprovenienz-Kreuzungsversuch in Schweden auf 0,6–16,4%. Untersucht werden Nachkommen von skandinavischen und deutschen Provenienzen im Alter von 20–28 Jahren.

Eigene Untersuchungen an 195 Klonfichten aus dem Versuchskollektiv E mittels einer Varianzkomponentenanalyse der undurchforsteten Flächen weisen keinen genetisch bedingten Einfluss nach. Die Unterschiede in der Kronenansatzhöhe zwischen den Klonen sind nicht signifikant. Auch mittels einer varianzanalytischen Untersuchung der Anzahl toter Äste an den untersuchten Quirlen in zwei und fünf Metern Höhe lassen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Genotypen nachweisen.

Einfluss des Alters

Alte Äste befinden sich meist tief am Baum. Durch ihre Lage sind sie in der Regel einem höheren Konkurrenzdruck ausgesetzt als jüngere Äste weiter oben in der Krone. So ist die Absterbewahrscheinlichkeit von alten Ästen auch dementsprechend höher als die von jungen.

Zusätzlich wirken auch die bereits in Abschnitt 4.3.4 und 4.3.5 beschriebenen Seneszenzvorgänge, die bei dem Ast mit dem Alter zu immer schlechteren physiologischen Lebensbedingungen führen, so dass er schon bei einer geringen Verschlechterung der Lichtbedingungen stirbt. Zusätzlich steigt mit dem Alter die Wahrscheinlichkeit für einen Ast durch ein Zufallsereignis abzusterben. In Frage kommen hier mechanische Brüche, Pathogene, Fraßschäden oder Ähnliches. Dies hat zur Folge, dass auch bei geringer Konkurrenz Äste in der grünen Krone absterben, obwohl ihre Lichtversorgung ausreichend ist. Zu beobachten ist dies an den stark freigestellten Fichten des Datenkollektivs B. Auch weit oberhalb des Kronenansatzes lassen sich einzelne tote Äste finden (SEIFERT et al. 2002).

Einfluss der Konkurrenz

JOHANSSON (1992) kann in einem 30-jährigen Pflanzabstandsversuch bei Fichten einen signifikanten Einfluss des Pflanzabstands auf die Kronenansatzhöhe belegen.

BUES (1990) beschreibt zudem Unterschiede in der Kronenansatzhöhe zwischen Reihen- und Quadratverbänden, wobei erstere tiefer ansetzende Kronen aufweisen. Dies spricht für einen Einfluss der Geometrie der Konkurrenzwirkung und stützt in gewissem Maße die These einer unvollständigen Astautonomie, da die tiefere Bekronung der Fichten aus dem Reihenverband möglicherweise durch eine Assimilatverteilung von den absterbenden Reihenästen zu den vitaleren Gassenästen zustande kommt, die dadurch länger überleben. Nach KRAMER (1962) gleichen sich solche Unterschiede jedoch mit zunehmendem Baumalter an.

SPATHELF (1998) charakterisiert die Kronenansatzveränderung im Vergleich zum Höhenwachstum über das Kronenprozent und stellt im Vergleich von freigestellten zu nicht geförderten Bestandesbäumen ein Absinken des Kronenprozents bei zunehmender Baumhöhe fest. Diese negative Entwicklung des Kronenprozents zeigt sich verstärkt bei nicht geförderten Fichten. Spathelf nennt dabei die Konkurrenz als Einflussfaktor auf die absolute Veränderung der Kronenansatzhöhe. Er zeigt dabei einen indirekten Zusammenhang mit dem Höhenwachstum des Baumes auf. Steigt die Baumhöhe, so beschleunigt sich durch erhöhte Konkurrenz von den ebenfalls wachsenden Konkurrenten auch die Veränderungsrate der Kronenansatzhöhe. Spathelf führt für Fichten mit starker Konkurrenz mittlere Kronenveränderungsraten von 47,2 cm pro Jahr an, bei mittlerer Konkurrenz ergeben sich 27,9 cm pro Jahr und bei geringer Konkurrenz 19,9 cm pro Jahr. Mit zunehmender Konkurrenz kann er auch eine Veränderung des Verhältnisses zwischen Höhenwachstum des Baumes und der Kronenansatzveränderungsrate belegen. Das Verhältnis wird kleiner; das Kronenprozent sinkt.

PRETZSCH (1992) konstatiert, dass die Kronenansatzhöhe im Vergleich zum Höhenwachstum des Baumes eher träge auf Konkurrenz reagiert. SPATHELF (1998) führt dies auf die vergleichsweise hohe Dauer der Astabsterbeprozesse zurück, die häufig von einer längeren Kümmerphase geprägt sind, in welcher der Ast kaum mehr wächst, jedoch noch lebt.

Wie bereits in den Abschnitten 4.3.4 und 4.3.5 erwähnt, wurde bei HEMIS-Konkurrenzwerten von 0,85 bzw. 0,7 bei keinem Ast des Kollektivs D ein Längen- bzw. Durchmesserwachstum festgestellt. Das Sterben von Ästen beginnt jedoch häufig wesentlich früher. Bei der Untersuchung der Konkurrenz direkt unterhalb des Kronenansatzes an 56 Bäumen der Datenkollektivs D ist zu erkennen, dass bei einigen Bäumen bereits bei HEMIS-Konkurrenzwerten von 0,62 kein lebender Ast mehr vorhanden ist (Abb. 4-38).

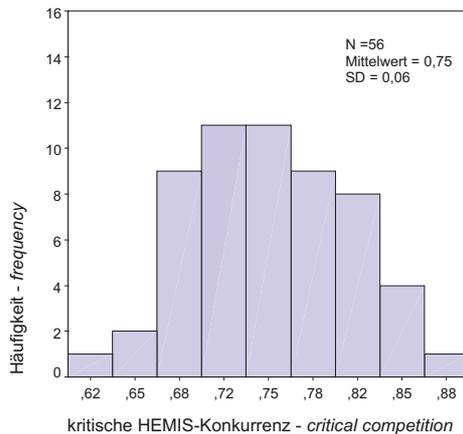


Abbildung 4-38: kritischer HEMIS-Konkurrenzwert, ab dem Astmortalität eintritt – *critical HEMIS competition value for branch mortality*

Der mittlere kritische HEMIS-Konkurrenzwert, bei der die Astmortalität eintritt, liegt bei 0,75. Bei einigen Bäumen reicht er bis 0,88. Die hohe Streuung kann durch inhomogene Lichtverhältnisse im Bestand erklärt werden, bei denen durch „Lichtschächte“ (BINDSEIL 1933) einzelne Äste noch gerade die lebendnotwendige Lichtmenge erhalten, während andere Äste in der direkten Nachbarschaft aus Lichtmangel sterben, weil sie nicht in einem solchen Lichtschacht liegen. Eine weitere Ursache für die hohe Streuung könnte in einer gezielten Assimilatverteilung liegen, durch die der Baum gezielt hoch konkurrenzstarke Äste opfert, um besser mit Licht versorgte zu fördern.

Da sich der Kronenansatz nicht stetig, sondern quirlweise nach oben verlagert und nachdem der Absterbeprozess des Astes in der Regel einige Zeit dauert, kann eine weitere Ursache für die hohe Streuung darin liegen, dass bei Momentaufnahmen der Konkurrenz einige Äste zu Beginn der Absterbephase und einige in weiter fortgeschrittenen Mortalitätsstadium verglichen werden.

Zusammenhang mit dem Astdurchmesser und der Astposition

Bei Untersuchungen an Tannenästen (*Abies alba* MILL.) erkennt DIETRICH (1973) einen positiven Zusammenhang zwischen dem Astdurchmesser und der Überlebenszeit von Ästen. Es bleibt jedoch fraglich, was hierbei Ursache und was Wirkung ist. Einerseits ist bekannt, dass alte Äste durch ein längeres Wachstum auch einen entsprechend höheren Durchmesser entwickeln können. Andererseits sterben dünne Äste früher ab, da sie meist auch kürzer sind und damit von anderen Ästen ausgedunkelt werden. Mit den Ergebnissen von VON PECHMANN und SCHAILE (1955) bestätigt sich der Zusammenhang zwischen Astdurchmesser und der Zeit bis zum Absterben des Astes für Fichten. Aus ihrer grafischen Darstellung des Zusammenhanges mit der Überlebensdauer des Astes auf der Abszisse und dem Astdurchmesser auf der Ordinate lässt sich eine degressiv steigende Beziehung interpretieren.

Allerdings ist in diesem Kontext zu bedenken, dass in jungen Beständen der Astdurchmesser häufig mit der Höhe am Stamm zunimmt (siehe Abschnitt 4.3.5). Die Konkurrenz nimmt in einschichtigen Reinbeständen nach oben hin gemeinhin ab. Dies könnte zu Artefakten in der Betrachtung des Durchmesserinflusses auf die Überlebenszeit führen.

SCHÖPF (1954) weist darauf hin, dass bei jungen Kiefern (*Pinus sylvestris* L.) die Lebensdauer der Äste mit der Ansatzhöhe am Stamm gleichsinnig mit dem Astdurchmesser und der Astlänge zunimmt. SPATHELF (1998) kann den Zusammenhang zwischen Lebensdauer und Ansatzhöhe am Schaft für Fichtenäste bestätigen. Diesem Zusammenhang muss jedoch eine starke Abhän-

gigkeit von der Behandlung und damit von der historischen Konkurrenzentwicklung des Betrachtungsbaumes unterstellt werden. Einen signifikanten Einfluss der Himmelsrichtung auf die Lebensdauer von Fichtenästen findet SPATHELF (1998) nicht.

Fazit

Die Astmortalität ist ein überwiegend konkurrenzbestimmter Vorgang, der jedoch von standörtlichen und astinternen physiologischen Bedingungen modifiziert wird. Das Konzept der Astautonomie hinsichtlich der Kohlenstoffversorgung scheint nur bedingt zu gelten. Eine Assimilatverteilung von stark konkurrenzten Ästen zu gering konkurrenzten Ästen modifiziert die Konkurrenzwirkung, so dass keine deutliche Konkurrenzgrenze für das Absterben von Ästen definiert werden kann. Über den Umfang dieser Assimilatverteilung im Baum ist jedoch noch wenig bekannt. Ein nennenswerter genetischer Einfluss auf das Absterben von Ästen scheint nach dem Stand des Wissens nicht gegeben zu sein.

4.3.8 Natürliche Astreinigung – *Natural pruning*

Charakterisierung der Astreinigung

Die Astreinigung bezeichnet das Abbrechen und Abfallen abgestorbener Äste. Sie bestimmt die astreinen Schichten im Holz und besitzt damit einen erheblichen Einfluss auf die Ausbeute hoher Qualitäten in der Schnittholzproduktion und Furnierherstellung. Die Astreinigung erfolgt nach WINKLER (1930) in folgenden fünf Stufen:

1. Schwächung der Zweige, *weakening of twigs*
2. Infektion durch holzzersetzende Pilze, *infection by wood-decaying fungi*
3. Vermorschen des Holzes, *proceeding decay of wood*
4. Abbrechen der Äste, *breaking of branches*
5. Überwallen der Wunde, *occlusion of the stub.*

Der Absterbevorgang der Äste wurde bereits in Abschnitt 4.3.7 behandelt und soll in dieser Arbeit nicht zur Astreinigung gezählt werden, wie es beispielsweise NÄGELI (1952) tut. Unter Astreinigung sollen ausschließlich die auf den Asttod folgenden Vorgänge bis zur Überwallung verstanden werden.

Als Hauptursache der Astreinigung beschreibt KÖSTER (1934) die pilzbedingte Zersetzung der Äste in einem Vermorschungsprozess. Diese ist zeitabhängig und unterliegt wie die meisten Zersetzungsprozesse einem nichtlinearen Zusammenhang, wie ihn auch DIETRICH (1973) bei Untersuchungen der Astreinigung an Tannenästen feststellt. Nach KÖSTER und DIETRICH erfolgt das Abbrechen der Äste meist stückweise. KÖSTER gibt für Fichtenreinbestände Beispielwerte von 92 Jahren bis zum endgültigen Abfallen auch dünner Äste an. Er beschreibt ein stückweises „Abbröckeln von der Spitze“ mit mittleren Längen der Bruchstücke von 33 cm bei einem Durchmesser größer als 4 cm.

Einfluss des Standorts

Nach KÖSTER (1934) wird die Zersetzung durch Pilze von einem warm-feuchten Klima begünstigt. Zusätzlich wirken auch Wind, Schnee und Dimensionsänderungen des Astes durch Quellen und Schwinden sowie Frost förderlich auf die Astreinigung. Er dokumentiert detaillierte Jahresverläufe der Astreinigung an einem Beispielbestand und schildert auch kombinierte Effekte wie z.B. zwischen Wind und Regen bzw. Frost. Die Windwirkung auf die Astreinigung nimmt demnach bei Regen zu, da feuchte Äste eine geringere mechanische Stabilität aufweisen. Frost hebt hingegen die Stabilität und schaltet die Windwirkung weitgehend aus. Dies ist auf einen erhöhten E-Modul des Holzes bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt zurückzuführen (BRÜNDL et al. 1999). Starker Schneeanhang wiederum bricht unabhängig vom Frost viele, besonders dünnere Äste ab (KÖSTER 1934).

Einfluss des Genotyps

Der genetische Einfluss auf die Astzahl, den Astdurchmesser und den Astwinkel wurden bereits beschrieben. Diese Größen beeinflussen die Zeit bis zur völligen Astreinigung eines Stammstücks mit. Auch das Durchmesserwachstum des Stammes unterliegt einem genetischen Einfluss (s. Abschnitt 4.3.9) und hat einen hohen Effekt auf die Überwallungszeit. Es ist auch anzunehmen, dass es bei verschiedenen Fichtengenotypen, z.B. durch eine genetisch bedingte Varianz in der Harzproduktion oder unterschiedliche Festigkeitswerte der Äste, zu einem genetischen Einfluss auf die Astreinigung kommt.

Einfluss der Konkurrenz

BUES (1990) untersucht die untersten Stammhöhen an denen noch Totäste vorkommen (Totastansatzhöhe [TAA]) und stellt einen hochsignifikanten Einfluss des Pflanzverbandes fest. Die Bandbreite seiner untersuchten Pflanzverbände reicht von 1,0 x 1,0 m bis 4,0 x 4,0 m, die korrespondierenden Totastansatzhöhen reichen von ca. 5 m bis 0,5 m. Die Beziehung gleicht BUES durch eine degressiv fallende Kurve mit einem Polynom 3. Ordnung aus. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei 0,996, allerdings ist die Datengrundlage mit 8 Bäumen gering und scheint nicht auf andere Bestände übertragbar zu sein, was auf weitere, eventuell standortsabhängige Effekte hindeutet. Zudem wird bei der ausschließlichen Betrachtung der Totastansatzhöhe weder die zur Verfügung stehende Zeit vom Absterben bis zur Überwallung, noch der Einfluss des Stammzuwachses bei unterschiedlichen Pflanzverbänden berücksichtigt.

Einfluss der vertikalen und Lage des Astes

DIETRICH (1973) kommt zu dem Ergebnis, dass der Zeitraum vom Absterben bis zur Überwallung eines Astes bei Weißtanne (*Abies alba* MILL.) mit der Höhe am Baum zunimmt. Dies kann analog auf Fichte übertragen werden und ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen, die getrennt voneinander zu betrachten sind. Ein möglicher Einfluss der vertikalen Astposition auf die Astreinigung ist ein höherer Astdurchmesser in größeren Höhen, wie ihn DIETRICH für seine Probestämme schildert. Dickere Äste brechen weniger schnell ab und werden langsamer überwallt. Ein weiterer Einflussfaktor könnte im Stammwachstum liegen. Wird der Baum stark freigestellt, verlagert er sein Durchmesserwachstum vor allem auf die unteren Meter (ASSMANN 1961, KRAMER, 1988, SEIFERT et al. 2002). Zusätzlich ist eine schlechtere Astreinigung in größerer Höhe am Stamm auf das Fehlen mechanischer Faktoren zurückzuführen, die weiter unten zum Abschlagen oder Abbrechen der Äste führen. Hier kommen vor allem abrutschender Schnee oder Äste anderer Bäume als Einflussgrößen in Frage.

Einfluss des Stammwachstums

Das Stammwachstum in der Höhe des Astes bestimmt die Geschwindigkeit der Überwallung nach dem Abbrechen des Astes mit, wie sich aus Astungsversuchen (METZLER 1997, ŽUMER 1966) ableiten lässt. Nachdem über die Konkurrenz des Baumes seine Stammform beeinflusst wird (ASSMANN 1961, FARRAR 1961), lässt sich über diesen Weg auch die Astüberwallung steuern. Etliche Untersuchungen belegen ein größeres Kronenprozent und einen geringeren Schlankheitsgrad bei niedriger Konkurrenz (z. B. KRAMER et al. 1970, SEIFERT et al. 2002).

Das Wachstum findet stets im Wechselspiel zwischen mechanischen und physiologischen Adaptionen des Baumes an die Umwelt statt. Das Wirkungsgefüge kann man sich folgendermaßen vorstellen: Nachdem die Krone für die Bildung der Assimilate verantwortlich ist, herrscht bei weitständigen Wuchssituationen mit geringer Konkurrenz ein großes Angebot an Assimilaten, das der Baum in den Kronenausbau und die Sicherung seiner mechanischen Stabilität investieren kann. Der Ausbau der individuellen mechanischen Stabilität ist aufgrund der geringeren kollektiven Stabilität ebenso überlebensnotwendig (BRÜCHERT et al. 2000, MARSCH 1989) wie die Versorgung der großen aktiven Kronenmasse durch ein entsprechendes Leitgewebe, um die Wasserversorgung sicherzustellen (HUBER 1928, PRESSLER 1865, SHINOZAKI 1964a/b).

Unterhalb des Kronenraumes ist der Stamm auf die Überschüsse angewiesen, die von oberhalb bezogen werden können. Der lang bekronte, freistehende Baum kann viel in den unteren Stammbereich investieren. Kommt der Baum nun in die Phase des Bestandesschlusses mit erhöhter Konkurrenz, sterben die unteren Äste der Krone ab. Die produktive Assimilationsmasse entfernt sich zunehmend mit dem Kronenansatz vom unteren Stamm. Die Versorgung konzentriert sich nun auf den Kronenraum. Das geringere Kronenprozent hat weniger überschüssige Assimilate zur Folge. Der Baum investiert deshalb nur das notwendige Maß in die Wurzeln und die untere Stammregion und versucht seine Konkurrenzsituation im Kronenraum zu verbessern. Dies führt zu einem relativ verstärkten Durchmesserzuwachs im Bereich des Kronenraumes unter zunehmendem Konkurrenzdruck (MITSCHERLICH 1970). Die Stammform wird unter Konkurrenzdruck vollholziger, was auch ABETZ (1976) anhand der Ergebnisse einer Untersuchung des Standraumversuchs Riedlingen/Donau zeigt.

Zusammenhang mit dem Astdurchmesser

Bezüglich des Zusammenhangs von Astreinigung und Astdurchmesser existieren für Koniferen keine einheitlichen Ergebnisse. In einer Untersuchung von Kiefern (*Pinus sylvestris* L.) aus unterschiedlichen Begründungsdichten kann laut BUES (1994) „kein praxisrelevanter Zusammenhang [zwischen Astdurchmesser und der Länge der Totäste] nachgewiesen werden“.

KÖSTER (1934) schildert eine von Durchmesser abhängige Vermorschungsdauer bei Fichtenästen unter 12–13 mm. Äste größeren Durchmessers vermorschen seinen Ergebnissen nach unabhängig vom Durchmesser. Die Dauer bis zur endgültigen Überwallung eines Astes ist von dessen Astdurchmesser abhängig, wie VON PECHMANN und SCHAILE (1955) an Fichten zeigen. Je stärker der Ast, desto länger dauert es bis zur endgültigen Überwallung. Die grafische Darstellung der publizierten Daten lässt einen nichtlinearen Zusammenhang vermuten.

Fazit

Die Astreinigung stellt immer noch eine zu wenig untersuchte Größe dar. Es scheint eine deutliche Abhängigkeit von klimatischen Bedingungen zu bestehen, die eventuell durch genetische Faktoren modifiziert wird. Nach herrschender Auffassung ist die Klimawirkung komplex, da viele Faktoren eine Rolle spielen, die nur schwer zu trennen sind. Auch die Konkurrenzsituation scheint eine gewisse Rolle bei der Astreinigung zu spielen. Ein Zusammenhang zwischen Ast-

durchmesser und Astreinigung wird von einigen Autoren bestätigt. Andere Autoren schildern zumindest für die Astzersetzung keine Abhängigkeit. Insgesamt bestehen bei der Aufdeckung der Zusammenhänge und Einflussfaktoren noch deutliche Wissenslücken.

4.3.9 Künstliche Astreinigung durch Astung – *Artificial pruning*

Charakterisierung der Astung

Die Fichte gehört zu den so genannten „Totasterhaltern“, bei denen die natürliche Astreinigung sehr langsam verläuft. Eine künstliche Beschleunigung durch das Abschneiden bzw. Absägen der Äste im Rahmen einer Astung kann laut OLISCHLÄGER (1970b) zu einer Wertsteigerung von 40 bis 90% des Fichtenschnittholzes führen. Bei Messerfurnier sind sogar 300% erreichbar. Damit steht, neben der Steuerung des Wuchsräume, mit der Astung ein weiteres Instrument der Bestandesbehandlung zur Verfügung, um die Holzqualität zu beeinflussen.

Grundsätzlich ist zwischen Trockenastung und Grünastung zu unterscheiden. Bei ersterer werden ausschließlich tote Äste entfernt, bei der Astung grüner Äste wird auch in den Assimilationsapparat des Baumes eingegriffen. Damit nimmt man mit der Grünastung nicht nur die natürliche Astreinigung vorweg, sondern auch das Absterben der Äste.

Die Trockenastung hat den Vorteil, dass das Kambium des Baumes bei sachgemäßer Durchführung nicht verletzt wird und kein Eingriff in den Assimilationsapparat erfolgt. Ihr Nachteil liegt darin, dass der Baum, im Vergleich zur Grünastung, schon eine relativ große innere Astigkeit besitzt (KRAMER 1988).

Der qualitätsentscheidende Faktor bei beiden Arten der Astung ist die Zeit bis zum vollständigen Überwallen der Aststummel. Bei der Grünastung sind zusätzlich noch die Auswirkungen auf das Baumwachstum zu beachten, da man mit der Entfernung lebender Äste in den Assimilationsapparat des Baumes eingreift. PETRUNCIO et al. (1997) und ŽUMER (1966) weisen darauf hin, dass nicht nur die Länge des Aststummels überwältigt werden muss, sondern zusätzlich auch Harzkrusten oder Rindeneinschlüsse, die sich an der Schnittstelle bilden.

Die übliche Überwallungsdauer bei jungen, wüchsigen Fichten liegt bei 5–7 Jahren (OLISCHLÄGER 1970b).

Einfluss der vertikalen Lage des Astes

ŽUMER (1966) untersucht die Überwallung nach Grünastung in unterschiedlichen Baumhöhen und führt an, dass tieferliegende Äste langsamer überwältigt werden, da sich der Radialzuwachs am Stamm bei Grünastung stärker in die Kronenregion verlagert. Unterstützt wird diese These von KLÄDTKES und YUES (1997) Ergebnissen.

Die vertikale Lage des Astes beeinflusst jedoch nicht nur die Überwallungszeit, sondern auch die Zeit für die Ausführung der Astung, was sich finanziell niederschlägt (JACKE 1995, KRAMER 1988). ŽUMER (1966) beschreibt ein überproportionales Ansteigen der Astungszeiten mit zunehmender Astungshöhe bei manueller Grünastung.

Von der vertikalen Lage des Astes hängt im Allgemeinen auch der Aststatus ab. Je tiefer der Ast am Stamm ansetzt, desto wahrscheinlicher ist sein Absterben, wie bereits in Abschnitt 4.3.8 diskutiert wurde. Sein Status bestimmt laut PETRUNCIO et al. (1997) auch seine Überwallungsgeschwindigkeit mit. Die Autoren konnten in einer Analyse an geasteten Douglasien (*Pseudotsuga menziesii* (MIRB.) FRANCO) eine schnellere Überwallung bei Grünastung als bei Trockenastung aufzeigen.

Einfluss des Alters und des Brusthöhendurchmessers auf den Astungszeitpunkt

Baumalter und Durchmesser, bei denen die Astung durchgeführt wird, bestimmen den astfreien Holzmantel am Stamm und damit die Ausbeute beim späteren Einschnitt des Holzes. SCHULZ (1961) führt an, dass bei einer Stärkeklasse von 3 und 4 und einem angestrebten astfreien Schnittholzanteil von 50% der astige Stammkern höchstens ein Drittel des Erntedurchmessers betragen darf. Das optimale Astungsalter ist nach ŽUMER (1966) dabei abhängig vom Standort und dem Wuchsraum der Bäume (siehe unten).

Wie PETRUNCIO et al. (1997) bei Douglasien (*Pseudotsuga menziesii* (MIRB.) FRANCO) zeigen, verlängert sich mit dem Stammdurchmesser auch die Länge der Zone, die überwallt werden muss, da stärkere Stämme meist eine höhere Rindenstärke und dickere Astkragen bedingen, sodass der Astungsschnitt weiter entfernt vom Schaft geführt werden muss. Dies zieht längere Überwallungszeiten nach sich.

Für wirtschaftliche Betrachtungen ist das Baumalter zum Astungszeitpunkt und vor allem die Zeitspanne bis zur Baumernte ein entscheidender Faktor, da bei einer Zinsberechnung neben den Investitionskosten die Investitionsdauer beachtet werden muss.

Einfluss von Konkurrenz und Durchmesserwachstum des Baumes

Die Hauptdeterminante für die Überwallungszeit ist laut ŽUMER (1966) das Durchmesserwachstum am Stamm: Je breiter die gebildeten Jahrringe, desto schneller kann die Astwunde verschlossen werden. Deshalb hält ŽUMER (1966) auf sehr guten Standorten bei Weitverbänden eine Grünastung für angebrachter als eine Trockenastung, weil die Fichten dort einerseits schnell in Durchmesserbereiche wachsen, die als eine obere Grenze für die Astung anzusehen sind, andererseits der Kronenansatz sich nicht so schnell nach oben verschiebt, dass eine Trockenastung durchgeführt werden kann. Je mehr Radialwachstum der Stamm im Bereich der Astwunden anlegt, desto rascher geht die Überwallung vonstatten. METZLER (1997) findet je nach Radialzuwachs Überwallungszeiten von 4,6 bis 6,9 Jahre, bei einem Mittel von 5,5 Jahren.

Der unter Abschnitt 4.3.5 diskutierte Konkurrenzeinfluss auf das Durchmesserwachstum des Stammes in verschiedenen Höhen gilt bei der künstlichen Astung im selben Maße.

Zusätzlich findet bei der Grünastung eine Beeinflussung des Stammwachstums statt. Wie bereits beim Einfluss der vertikalen Lage der Äste beschrieben wurde, führt die Grünastung ebenso zu einer verstärkten Konzentration der Assimilate in der Kronenregion und damit zu einer Ausbildung eher vollholziger Stämme, wie KOZLOWSKI und PALLARDY (1997) sowie ŽUMER (1966) anführen. KLÄDTKE und YUE (1997) bestätigen eine von unten nach oben abnehmende Zuwachsreaktion. Durch das künstliche Entfernen von Teilen des Assimilationsapparates wird das natürliche, konkurrenzbedingte Absterben der Äste vorweggenommen. Der Effekt auf den Radialzuwachs in verschiedenen Höhen ist derselbe wie bei einer natürlichen Kronenverkürzung. Die Grünastung hat vollholzigere Stämme zur Folge. Je abholziger die Stammform vor der Astung war, desto stärker ausgeprägt ist der Effekt, da bei konkurrenzarm erwachsenen Bäumen mit niedrigem H/D-Wert bei identischer Astungshöhe auch sehr produktive Äste entnommen werden. Dies hat unter Umständen sogar ein Absinken der sozialen Stellung im Bestand nach der Astung zur Folge (ŽUMER 1966, KLÄDTKE und YUE 1997), da die Wuchsdepression die Konkurrenzkraft des Baumes im Vergleich zu ungeasteten Bedrängern schwächt. Es gibt auch Untersuchungen, bei denen eine Grünastung den Schlankheitsgrad nicht signifikant beeinflusst, wie KRAMER (1976) zeigt.

Einfluss von Astdimension, Astwinkel und Astungsqualität

ŽUMER (1966) stellt fest, dass der Astdurchmesser einen weit geringeren Einfluss auf die Überwallungsdauer ausübt als der Radialzuwachs des Stammes. Auch METZLER (1997) schreibt dem Astdurchmesser bei der Grünastung einen niedrigen Erklärungswert zu, der mit zunehmender Höhe am Stamm noch absinkt. Bis 4 m erklärt er weniger als 9% der Überwallungszeit, ab 8 m liegt sein Erklärungswert bei nur mehr ca. 2%. Im Vergleich zur durchschnittlichen Überwallungszeit von 5,12 Jahren hatten Astdurchmesser größer als 30 mm ohne Rinde eine Erhöhung der durchschnittlichen Überwallungszeit auf 6,46 Jahre zur Folge (METZLER 1995).

Bei einem Astungsversuch an Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (MIRB.) FRANCO) in den USA finden PETRUNCIO et al. (1997) einen deutlichen Einfluss des Astdurchmessers auf die Überwallungszeit, da er die Breite der Überwallungszone mitbestimmt. Der Grund ist, dass sich an stärkeren Ästen stärkere Astkragen bilden, was das stammnahe Abschneiden behindert. Dies dürfte für die Fichte auch zutreffen, wenn auch in geringerem Maße als bei der Douglasie.

ŽUMER (1966) beschreibt auch den Astwinkel (s. Abschnitt 4.3.4) als wichtige Größe bei der Astüberwallung. Je steiler der Astwinkel, desto länger ist die Überwallungszeit, weil ovale Astquerschnitte entstehen, die länger zur Überwallung benötigen. JACKE (1995) identifiziert den Astdurchmesser neben der Astzahl als einen Haupteinflussfaktor auf die benötigte Zeit für die Ausführung der Astung, was sich in den Kosten niederschlägt und bei ökonomischen Betrachtungen herangezogen werden muss.

Die Qualität der Astung stellt ein weiteres Kriterium für die Überwallungsdauer dar. Rindenverletzungen führten bei der Untersuchung von Metzler zu einer Erhöhung der Überwallungsdauer von durchschnittlich 5,12 auf 7,33 Jahre. Zu lange Aststummel (1–2 cm) zogen sogar Überwallungszeiten von 8,03 Jahren nach sich. Wurde bei der Grünastung der Astkragen entfernt, war mit einer Überwallungszeit von 5,47 Jahren hingegen kaum ein negativer Effekt erkennbar. Die Sorgfalt der Astung besitzt damit einen größeren Einfluss auf die Überwallungszeit als die Astdimension. Die Autoren bemerken allerdings, dass sich keine besonders grobstämmigen Fichten im Untersuchungskollektiv befinden. PETRUNCIO et al. (1997) schreiben bei einem Astungsversuch an Douglasie der Astungsqualität einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die zu überwallende Zone und damit auf die Überwallungszeit zu.

Auswirkungen der Grünastung auf das Baumwachstum

Die Auswirkungen der Grünastung auf das Durchmesser- und Höhenwachstum bei der Fichte sind gut dokumentiert (KLÄDTKE und YUE, 1997, KRAMER 1976, MAR-MOLLER 1960, MITSCHERLICH und VON GADOW 1968, ŽUMER 1966)

Einen deutliche Reduktion des Durchmesserzuwachses geasteter Bäume wird von KRAMER (1976), MITSCHERLICH und VON GADOW (1968) und ŽUMER (1966) konstatiert. Der Umfang des Zuwachsverlustes hängt dabei vom Grad der Kronenreduktion ab, wie in Abbildung 4-39 (rechts) nach MITSCHERLICH und VON GADOW (1968) dargestellt, die verschiedenste Untersuchungsergebnisse anderer Autoren zusammengestellt haben.

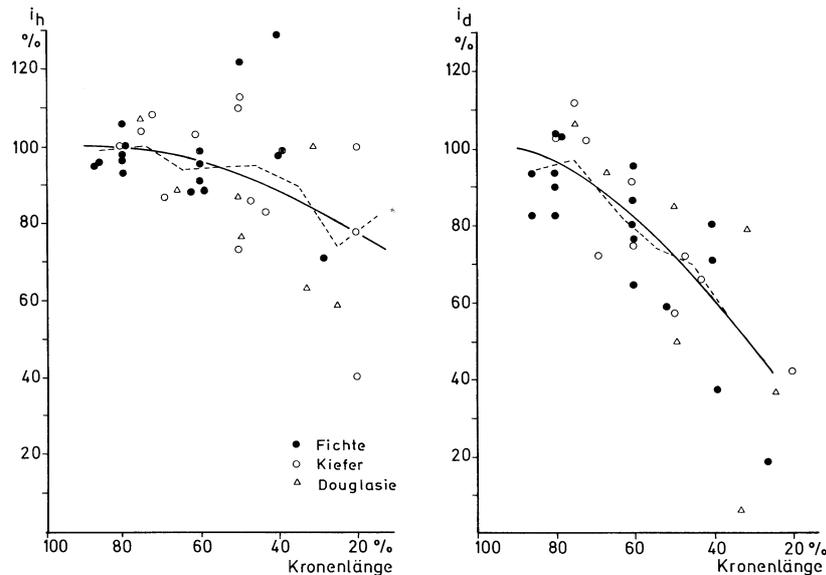


Abbildung 4-39: Wuchsdepression der Baumhöhe (links) und des Stammdurchmessers in Brusthöhe durch Grünastung mit der Entnahme unterschiedlicher Anteile der grünen Krone (aus MITSCHERLICH und VON GADOW 1968). *Growth depression of height (left) and diameter at breast height caused by artificial pruning with different removal of green crown percentage (from MITSCHERLICH und VON GADOW 1968)*

ŽUMER (1966) bemerkt, dass ein zu starke Kronenreduktion zu einer langanhaltenden Depression des Durchmesserzuwachses führt. Die untersuchten Probestämme zeigen selbst nach sieben Jahren noch keine endgültige Erholung. KLÄDTKE und YUE (1997) finden eine deutliche negative Reaktion des Radialzuwachses am BHD, der bereits nach drei Jahren wieder abgeklungen ist. Die Autoren führen die relativ schnelle Erholung des Radialzuwachses auf den mäßigen Eingriff in die grüne Krone zurück, denn es verblieben immer mindestens neun grüne Quirle am Baum. Klädke und Yue stellen auch geringe positive Zuwachseffekte bei mäßiger Grünastung fest, die sie allerdings auf eine gleichzeitige Freistellung zurückführen. Insgesamt reichen die Reaktionen von +5 bis -10 mm und zeigen einen höchstsignifikanten Zusammenhang mit dem Grad der Kronenreduktion. Ab 20% Kronenreduktion ist im Mittel mit einer Wuchsdepression zu rechnen, ab 40% gibt es nur noch negative Effekte. Die Durchmesserdepression ist in den Untersuchungen von KLÄDTKE und YUE am BHD am größten, nimmt bis 8 m ab und ist ab 10 m Stammhöhe nicht mehr nachweisbar. Die beobachtete Dauer der Durchmesserzuwachsdepression reicht von einem Jahr (Kronenreduktion von maximal 25%) bis über 3 Jahre (Kronenreduktion von mehr als 40%).

KRAMER (1976) belegt den Nutzen einer Düngung, um die Zuwachsverluste auszugleichen. In einem Astungsversuch im niedersächsischen Hardeggen konnte damit der negative Einfluss einer Grünastung sogar teilweise überkompensiert werden.

Die Höhenzuwächse reagieren weniger stark auf Grünastung und erreichen bald wieder das Niveau der nicht geasteten Kontrollbäume, wie Abbildung 4-39 (links) nach MITSCHERLICH und VON GADOW (1968) illustriert. Dargestellt sind die Zuwachsrelationen von grüneasteten im Vergleich zu ungeasteten Bäumen bei verschiedenen Astungsstärken. ŽUMER (1966) führt die geringere Reaktion des Höhenzuwachses darauf zurück, dass die Assimilate für den Leittrieb vor allem lokal im oberen Kronenbereich gebildet werden, der bei der Grünastung intakt bleibt. KOZLOWSKI und PALLARDY (1997) kommen zu dem selben Schluss. Sie können zeigen, dass sich bei der Amerikanischen Rotkiefer (*Pinus resinosa* AIT.) nach der Entfernung von 30–

70% der grünen Krone das Höhenwachstum nur geringfügig reduziert. KLÄDTKE und YUE (1997) sowie KRAMER (1976) finden keinen signifikanten Einfluss auf das Höhenwachstum, was die Aussage ŽUMERS ebenfalls stützt.

KRAMER (1988) führt Untersuchungen an, die bei schwachen Eingriffen in die grüne Krone sogar eine leichte Steigerung des Höhenzuwachses feststellen. Eine Erklärung dafür ist die Tatsache, dass die Äste an der Kronenbasis kaum mehr einen Beitrag zur Versorgung des Stammes leisten oder sogar kurzzeitig Nährstoffe vom Baum abziehen (OLIVER und LARSON 1990). Dies widerspricht nicht zwingend der Astautonomie hinsichtlich der Assimilatversorgung (NÄGELI 1952, SPRUGEL et al. 1991), sondern kann andere Ursachen haben, wie zum Beispiel eine Einlagerung von Harzstoffen in den Astbereich, wie sie DIETRICH (1973), TRENDELENBURG und MAYER-WEGELIN (1955) sowie ŽUMER (1966) mit zunehmender Astalterung beschreiben, die den Baum Energie kostet. Werden diese energieverbrauchenden Einlagerungsprozesse durch das vorzeitig Abtrennen der Äste verringert, so scheint ein positiver Zuwachseffekt möglich. Es bleibt jedoch offen, ob die Grünastung die Harzbildung vorweg nimmt oder wirklich verringert. Die Zuwachssteigerungen könnten auch Artefakte sein, bei denen das eigentliche Zuwachsplus durch Konkurrenzverminderung beispielsweise durch gleichzeitig durchgeführte Durchforstungen, also durch Konkurrenzminderng entsteht.

Die Auswirkungen der Astung auf die Stammform wurden bereits weiter oben im Abschnitt über die Auswirkungen von Konkurrenz und Wachstum auf die Überwallungszeit diskutiert.

Fazit

Als Fazit lässt sich eine innige Wechselbeziehung von Baumwachstum und Astungserfolg feststellen, die in der Literatur gut dokumentiert ist. Der Einfluss des Baumwachstums liegt vor allem in der Überwallungszeit, die mit steigendem Durchmesserzuwachs sinkt. Dies gilt für Trocken- und Grünastung gleichermaßen. Die Zusammenhänge bei der Trockenastung sind weniger gut dokumentiert. Bei zu starken Eingriffen in die Krone im Rahmen einer Grünastung sind Zuwachsrückgänge im Radial- und eventuell im Höhenzuwachs zu erwarten. Eine Änderung der Stammform kann ebenfalls als belegt gelten.

Dadurch sind die Interaktionen von Astung und Durchforstung bei der Bestandesbehandlung von Fichtenbeständen zu berücksichtigen.

4.4 Modellansatz des Astmodells AMOK

Model approach for the branching model AMOK

Modellkomponenten

Die Modellkomponenten des „Astmodells unter Konkurrenzeinfluss“ AMOK sind in Abb. 4-40 dargestellt. Ein wichtiger Teil ist die Konkurrenzberechnung im Modellmodul HEMIS, mit dessen Hilfe die Konkurrenz entlang der Stammachse eines jeden Baumes dreidimensional berechnet wird und in der Simulation als eine Haupttriebkraft für die Astentwicklung zur Verfügung steht.

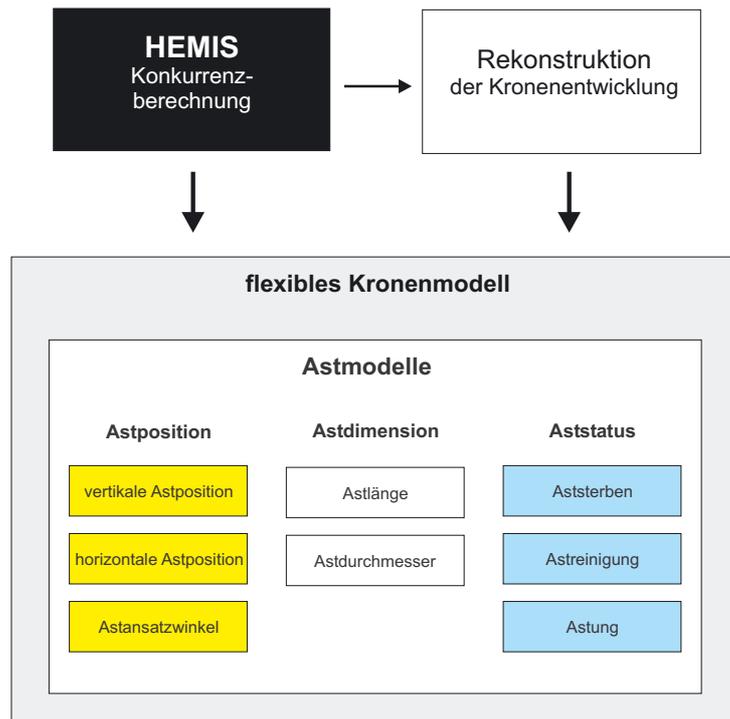


Abbildung 4-40: Modellkomponenten des Astmodells AMOK. *Model components of the branch model AMOK*

Als Voraussetzung für die Konkurrenzberechnung wird ein flexibles Kronenmodell als übergeordnete Struktur für die Äste vorgestellt, dessen Aufgabe vor allem in der Begrenzung des Rechenaufwandes liegt. Das Kronenmodell basiert auf den Einzelmodellen des Astwachstums, welche die äußere Aststruktur von Fichten dreidimensional gemäß der Astdimension, der Astposition und des Aststatus beschreiben.

Gleichzeitig bildet die Krone die Hülle für das Astlängenwachstum. Diese innige Wechselbeziehung zwischen Krone und Ästen ist ein typisches Merkmal von AMOK.

Grundprinzip der Simulation in AMOK

Im Folgenden soll kurz der Simulationsablauf von AMOK skizziert werden, um einen Überblick über das Zusammenspiel der Einzelmodelle zu geben. Der Simulationsablauf in AMOK unterscheidet sich von dem typischen Ablauf einer Waldwachstumssimulation, da AMOK prospektive wie auch retrospektive Simulationskomponenten vereint.

In Waldwachstumssimulatoren wird das Hauptaugenmerk auf die prospektive Prognose der Baum- und Bestandesentwicklung gelegt (siehe Kapitel 2.2). Die Prognose wird dabei meist von einem Startbestand aus begonnen, dessen Bäume bereits eine gewisse Dimension besitzen. Die Entwicklung dieser Bäume in der Vergangenheit bleibt in der Waldwachstumssimulation meist unbetrachtet, da die Zielgröße in waldwachstumskundlichen Managementmodellen in der Regel das Stammvolumen ist und nicht die inneren Stammeigenschaften.

Beim hier vorgestellten Simulationsmodell steht aber gerade eine dreidimensionale Betrachtung der inneren Stammeigenschaften über den gesamten Stammquerschnitt im Betrachtungszentrum. Deshalb ist für eine dreidimensionale Simulation der Äste über die Zeit sowohl eine Fortschreibung des zukünftigen Wachstums als auch eine Rekonstruktion der vergangenen Entwicklung notwendig. Ansonsten wäre die Astigkeit im Inneren des Stammes vor Beginn der Prognose unbekannt. Für eine vollständige Nachbildung müsste die Prognose immer mit Sämlingen beginnen, damit die innere Stammstruktur mit allen Ästen nachgebildet wäre.

Da das Baum- und Astwachstum jedoch meist von einem Startbestand in einem definierten Alter t in die Zukunft simuliert wird, wird in AMOK die Aststruktur bis zu diesem Startzeitpunkt rekonstruiert. Erst danach erfolgt die Prognose. Dazu wird nach dem in Abbildung 4-41 vorgestellten Schema vorgegangen.

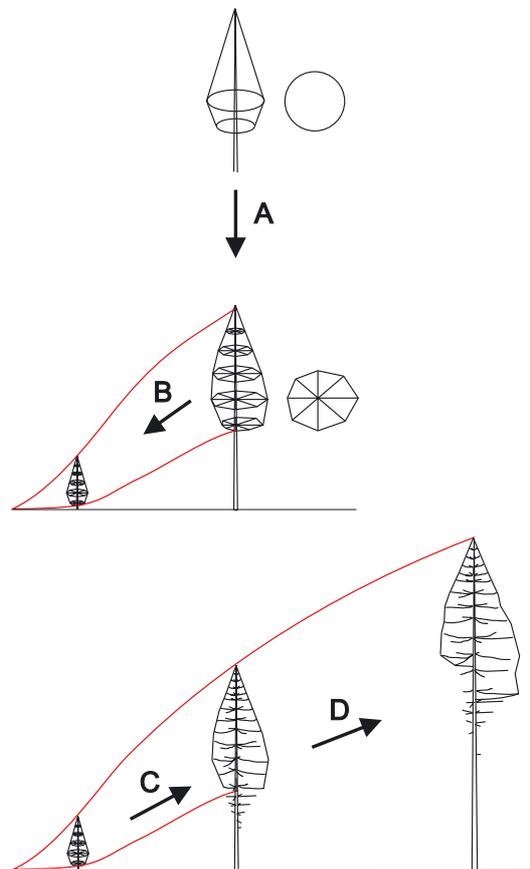


Abbildung 4-41: Schema der Astsimulation in AMOK: A=Anpassung des ursprünglichen SILVA-Kronenmodells anhand der aktuellen Konkurrenz, B=Rekonstruktion der Baumdimensionen, C=Rekonstruktion der Astentwicklung auf Basis der rekonstruierten Baumdimensionen, D=Fortschreibung der Astentwicklung. *Schema of the branch simulation in AMOK: A=crown refinement according to the current spatial competition, B=reconstruction of the tree dimensions, C=reconstruction of the past branch development based on the tree reconstruction, D=prediction of future branch growth.*

Ausgangspunkt ist der Startbestand, der in seiner dreidimensionalen Struktur auch im Waldwachstumssimulator der Startpunkt der Prognose ist. Zuerst werden die ursprünglich rotations-symmetrischen Kronen des Startbestandes in verschiedene vertikale und horizontale Sektionen unterteilt und anschließend in Abhängigkeit von der aktuellen Konkurrenz im Bestand plastisch verformt (Abb. 4-41 Schritt A). Ausgehend davon werden die Baum- und Kronengrößen bis zum Keimen des jungen Baumes rekonstruiert (Abb. 4-41 Schritt B), um einen plausiblen Rahmen für die spätere Astrekonstruktion zu schaffen. Anschließend wird mithilfe der rekonstruierten Kronengrößen jeder Ast vom Alter eins bis zum Startzeitpunkt simuliert (Abb. 4-41 Schritt C). Damit ist die Baum- und Astentwicklung bis zum Startzeitpunkt rekonstruiert. Der letzte Schritt der Astsimulation besteht in der Prognose der zukünftigen Astentwicklung in Abhängigkeit von der Konkurrenz (Abb. 4-41 Schritt D).

Dieser Modellansatz vereint damit die prospektiven Modellkonzepte der Waldwachstumssimulation mit der retrospektiven Herangehensweise holzkundlicher Ansätze (siehe Kapitel 2). Dabei führt er das räumliche Modellkonzept durchgehend fort und bildet die Brücke zwischen Bestandesbehandlung, Konkurrenz und der resultierenden Ast- und Kronenentwicklung.

Gliederung des Unterkapitels 4.4

Das Unterkapitel 4.4 beginnt, dem skizzierten Simulationsablauf entsprechend, mit der Beschreibung des entwickelten Modells zur räumlichen Nachbildung der Konkurrenz (Abschnitt 4.4.1). Im nächsten Unterkapitel wird die Entwicklung eines flexiblen Kronenmodells beschrieben, das auf Konkurrenz reagieren kann und den Rahmen für die Astentwicklung vorgibt (Abschnitt 4.4.2). Darauf erfolgt die Beschreibung der eingesetzten mathematischen Modelle und Interpolationsroutinen zur Rekonstruktion der Baum- und Kronendimensionen (Abschnitt 4.4.3).

In den darauf folgenden Abschnitten 4.4.4 bis 4.4.10 werden die Modelle für jede der nachgebildeten Astgrößen vorgestellt, wobei jeweils zwischen Modellen zur Rekonstruktion und zur Prognose unterschieden wird.

4.4.1 Modell zur Konkurrenzberechnung – *Competition model*

Die Konkurrenz ist die zentrale Größe zur Quantifizierung des Einflusses der waldbaulichen Behandlung auf das Kronen- und Astwachstum und nimmt deshalb auch im Rahmen des hier vorgestellten Astmodells AMOK eine entsprechende Rolle ein. Da die Konkurrenzbeschreibung von so hoher Wichtigkeit ist, sind bereits etliche Verfahren zur Konkurrenzquantifizierung in Waldbeständen bekannt.

Verfahren zur Konkurrenzquantifizierung

Die Kenntnis der Wuchskonstellation eines Baumes kann dabei zur Analyse realer und zur Simulation virtueller Bestände benutzt werden, um die Konkurrenz mathematisch zu quantifizieren, der ein Baum ausgesetzt ist.

Gebräuchliche quantitative Konkurrenzmaße sind beispielsweise Konkurrenzindizes, die abhängig oder unabhängig von der Position der Bäume zueinander einen aggregierten Konkurrenzwert für einen Baum oder einen Punkt im Bestand liefern. Davon eignen sich vor allem positionsbezogene Ansätze zur Beschreibung der Wuchssituation, da sie das Verteilungsmuster von Bäumen berücksichtigen (BACHMANN 1998, BIBER 1996). Eine ausführliche Darstellung verschiedenster Konkurrenzindizes findet sich zum Beispiel bei BACHMANN (1998) sowie bei BIGING und DOBBERTIN (1992), die eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren auf ihre Aussa-

gekraft hinsichtlich des Baumwachstums vergleichen. Konkurrenzindizes werden bereits erfolgreich in vielen Waldwachstumssimulatoren genutzt, um die Konkurrenz auf Einzelbaum-basis zu quantifizieren (CESCATTI und PIUTTI 1997, HASENAUER 1994, PRETZSCH 1992, 1995 a, PUKKALA und KOHLSTRÖM 1987).

Ein grundlegend anderer Ansatz zur Konkurrenzberechnung nutzt Analogien zu physikalischen Feldern, indem den Bestandesstrukturen (Stämmen, Kronen, Wurzeln, etc.) eine Konkurrenzwirkung zugeschrieben wird, die sich in einer Analogie zu physikalischen Feldern beschreiben lassen. Die Feldstärke nimmt dabei mit wachsendem Abstand zum Konkurrenzobjekt nach einer definierten Funktion ab. Dadurch wird die Ressourcenverfügbarkeit von Licht, Wasser und Nährstoffen nachgebildet. Ein erster Ansatz geht auf WU et al. (1985) zurück, die ihn als „Ecological Field Theory“ bezeichnen. Diese Konkurrenzfelder werden jedoch bislang nur zweidimensional berechnet, indem alle Konkurrenzfelder auf einer Ebene abgebildet werden, wie es für Verjüngungsstudien sinnvoll ist und auch zur Berechnung der zweidimensionalen Konkurrenzstruktur im Bestand eingesetzt werden kann (MOU et al. 1993, PUKKALA 1989). Die dritte Dimension ist allerdings nur implizit über die Dimensionen der Konkurrenzobjekte berücksichtigt. Eine wirklich dreidimensionale Konkurrenzbeschreibung, welche für eine Konkurrenzänderung mit der Höhe im Bestand nötig wäre, liefern diese Ansätze bislang nicht. Eine dreidimensionale Berechnung der Konkurrenzfelder könnte dies eventuell erbringen.

Wie bereits erläutert, sind also weder ein aggregierter Indexwert zur Konkurrenzbeschreibung noch ein zweidimensionaler Ecological-Field-Ansatz geeignet, wenn für einen beliebigen Punkt im Bestand Konkurrenzwerte in Abhängigkeit von der Himmelsrichtung (Azimut) und dem Neigungswinkel (Inklination) ausgegeben werden sollen. Dazu ist die Berechnung einer Konkurrenzmatrix nötig, welche für jeden Azimut und jede Inklination die Konkurrenz beinhaltet. Einige Algorithmen, die räumliche Informationen in geeigneter Auflösung berechnen, können aus den Gebieten der Wärmelehre und Computergrafik abgeleitet werden. Dort werden sie meist zur Quantifizierung der Wärmeabstrahlung und zur Beleuchtungsberechnung in virtuellen Welten benutzt. Passt man diese Verfahren den Erfordernisse der Konkurrenzberechnung an, lassen sich zwei grundsätzliche Methoden zur Ermittlung von räumlicher Konkurrenz unterscheiden: Suchstrahlverfahren und Projektionsverfahren.

Suchstrahlverfahren zur Konkurrenzberechnung

Suchstrahlmethoden schicken Suchstrahlen in den Raum und prüfen, wann der Strahl einen Körper trifft. Es spielt dabei keine Rolle, ob die Suchstrahlen in festen Winkeln oder zufällig, über Monte-Carlo-Prozesse gesteuerte Winkel, verteilt werden. In der Computergrafik findet sich dieses Grundkonzept bei den Ray-Tracing-Verfahren. Forstliche Anwendungen des Ray Tracing zur Lichtberechnung demonstrierten beispielsweise BRUNNER (1998), MESCHEDERU (1997) und HENDRICH (2000).

Die Vorteile der Suchstrahlverfahren bestehen vor allem darin, dass Abbruchbedingungen durch Licht-Extinktion einfach formuliert werden können. Trifft ein Strahl einen Körper, dann durchdringt er diesen nur zu einem Teil. Es ist mit dieser Methodik möglich, zu bestimmen, wann der Strahl so stark geschwächt ist, dass er nicht mehr weiter berechnet werden muss. Dies schränkt den Rechenaufwand ein. Ein weiterer Vorteil ist die entfernungsadaptive Auflösung. Nahe Gegenstände werden mit höherer Genauigkeit betrachtet als weiter entfernt liegende, da die Suchstrahlen meist von einem Punkt in den Raum auseinanderlaufen, sodass nahe Objekte eine höhere Treffer-Wahrscheinlichkeit besitzen. Der Hauptnachteil ist der hohe Rechenaufwand dieser Methoden. Um die nötige Auflösung zu gewährleisten, müssen sehr viele Suchstrahlen ausgeschickt werden, da sonst vor allem weiter entfernte Objekte nicht erfasst werden.

Projektionsverfahren zur Konkurrenzberechnung

Unter Projektionsverfahren zur Konkurrenzbestimmung kann man Methoden subsumieren, die Objekte auf Körpern abbilden. Meist werden dafür sphärische Körper wie beispielsweise Halbkugeln verwendet. Im Gegensatz zu den Suchstrahl-Algorithmen werden keine Suchstrahlen vom Untersuchungspunkt weg geschickt, sondern die Silhouetten der Objekte zum Untersuchungspunkt hin projiziert. In der Computergrafik finden sich Analogien in den Radiosity-Verfahren. Es existieren bereits erste Ansätze diese Radiosity-Modelle zur Lichtberechnung in virtuellen Waldbeständen zu nutzen. (DAUZAT et al. 1998, CHELLE und ANDRIEU 1998). Unter die Gruppe der Projektionsverfahren fallen auch Fisheye-Projektionen, die im forstlichen Bereich bereits erfolgreich zur Konkurrenzberechnung eingesetzt werden (BIBER 1996, WAGNER 1994). In Projektionsverfahren werden weiter entfernte Objekte kleiner auf dem meist sphärischen Körper abgebildet als näher gelegene. Dadurch gehen sie in geringerem Maße in die Konkurrenz ein. Die Rechenzeit wird in erster Linie von der Zahl der Objekte und deren geometrischer Komplexität bestimmt, da jedes Objekt in seiner Silhouette abgebildet wird. Derartige Ansätze sind vor allem in stark strukturierten Beständen von Vorteil, da auch weiter entfernte Objekte ohne drastische Erhöhung der Rechenzeit erfasst werden. Zudem lassen sich projizierende Algorithmen mathematisch leichter handhaben als Suchstrahlverfahren, indem sie auf einfache Punktprojektionen reduziert werden können, während in Suchstrahlverfahren die Berechnung von Schnitten zwischen Geraden und Flächen bzw. Volumenkörpern nötig ist.

Modellansatz zur Konkurrenzberechnung „HEMIS“

Ziel des hier präsentierten hemisphärischen Ansatzes „HEMIS“ ist die Entwicklung eines Konkurrenzalgorithmus, der in beliebiger horizontaler wie auch vertikaler Auflösung die Konkurrenzsituation an einem frei wählbaren Punkt im Bestand bzw. am Baum beschreiben kann. Der Ansatz soll Lichtkonkurrenz und, soweit möglich, auch mechanische Effekte durch das Abschlagen von Zweigen erfassen. Seine Komplexität soll allerdings nicht zu hoch sein, sodass er eine Berechnung vieler Bäume pro Bestand im benutzten Managementmodell SILVA noch in vertretbarer Zeit möglich macht. Explizite Lichtmodelle (z. B. KRANIGK 1996, PFREUND 1988) oder Ansätze mit separater Schätzung unterschiedlicher Konkurrenzkomponenten für direkte und diffuse Strahlung sowie mechanischer Konkurrenz, wie sie STROBEL (1997) vorschlägt, sind sehr rechenaufwändig und dadurch nur in der Lage, die Konkurrenz für wenige Bäume in vertretbarer Zeit zu berechnen. Daher ist die Verwendung solcher Modelle in managementorientierten Waldwachstumssimulatoren auf derzeit verfügbaren Personal-Computersystemen eingeschränkt.

In dieser Arbeit wird für die Konkurrenzberechnung aufgrund der geschilderten Vorteile ein Projektionsverfahren ausgewählt, das als eine Weiterentwicklung des Fisheye-Ansatzes von BIBER (1996) betrachtet werden kann. Den Kern des Algorithmus bildet die Projektion von Baumsilhouetten auf eine Halbkugel (Abb. 4-42).

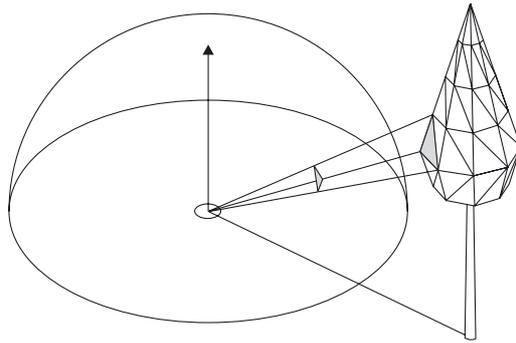


Abbildung 4-42: Prinzip der hemisphärischen Berechnung der Abschattung in HEMIS durch die Projektion der Konkurrenzbaume auf eine Halbkugel um den definierten Zentralpunkt. *Competition calculation in HEMIS by projection of the competitors' silhouettes on a hemisphere around a defined point.*

Zur mathematischen Vereinfachung wird dafür jede Baumkrone in Dreiecke zerlegt. Die Eckpunkte aller Dreiecke eines Baumes werden dann auf eine Halbkugel mit dem Radius eins (Einheitskugel) projiziert. Zum Einsatz kommen hier in erster Linie Methoden der zentrischen Streckung.

Berechnungen auf der gekrümmten Kugeloberfläche sind nicht trivial und rechenintensiv. Sie lassen sich jedoch vereinfachen, indem man eine erneute Projektion der Polygoneckpunkte von der Kugeloberfläche auf eine Ebene nutzt. Dabei können die projizierten Punkte entweder nach außen auf die Innenseite eines Zylinders (Abb. 4-43 A) oder nach unten auf eine Kreisfläche (Abb. 4-43 B) projiziert werden.

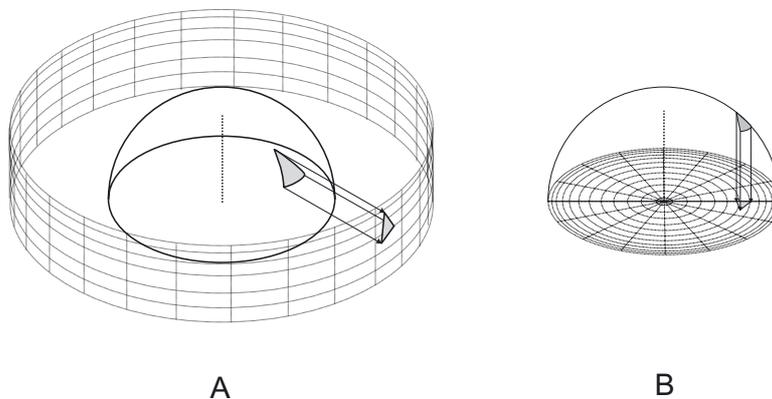


Abbildung 4-43: Zwei unterschiedliche Möglichkeiten der Transformation der hemisphärischen Werte. *Two different possibilities of transforming the hemispherical data.*

Bei der Zylinderprojektion ergibt sich eine planare Darstellung auf einem Band, das durch die Zylinderdarstellung einen Ring bildet, aber durch ein imaginäres Auftrennen an einer Schnittstelle zur Ebene wird. Der Azimut liegt auf der horizontalen x-Achse des Bandes, die Inklination auf der vertikalen y-Achse, bei welcher der frühere Zenit der Halbkugel auf die Oberkante des Bandes projiziert wird.

Das Ergebnis der Kreisflächenabbildung ist eine planare Darstellung der Punkte auf einer Kreisfläche, bei welcher der Kreisradius dem Inklinationswinkel entspricht und der Kreismittelpunkt den Zenit der Halbkugel repräsentiert. Der Azimut folgt der Kreisbahn.

Beide Abbildungen haben eine unterschiedliche Auflösung der projizierten Polygonpunkte durch die Kugelkrümmung zur Folge. Teilt man wie in Abbildung 4-44 die Kugeloberfläche in Bereiche, die auf der Oberfläche gleich weit entfernt sind, wird klar, warum es bei einer Parallelprojektion zu dieser Verzerrung kommt.

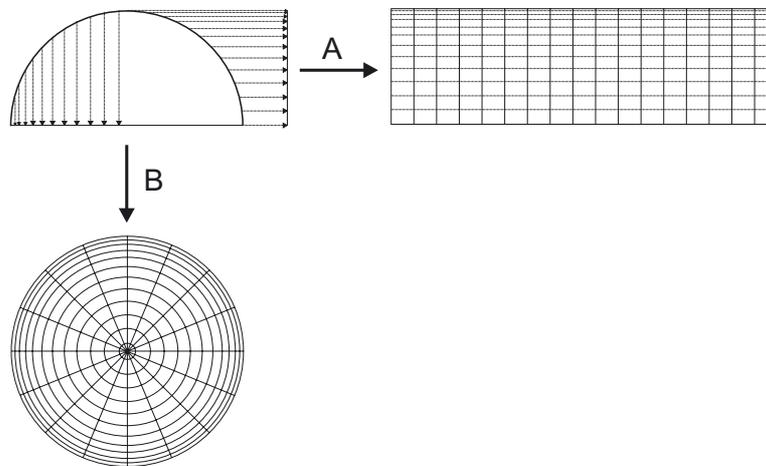


Abbildung 4-44: Verzerrungen, verursacht durch die beiden in Abb. 4-43 vorgestellten Projektionsarten. *Spatial distortions caused by the two presented projection methods.*

Bei der Zylinderprojektion (Abb. 4-44 A) nach außen liegen die projizierten Punkte, die auf der Halbkugel gleich weit entfernt sind, näher zusammen, je weiter man zum Scheitel der Halbkugel kommt, wie im rechten Teil der Abbildung zu sehen ist. Die Auflösung sinkt, da auf der Ebene nach oben hin eine geringere Fläche für dieselbe Zahl an projizierten Eckpunkten zur Verfügung steht. Bei der Projektion auf einen Kreis nach unten (Abb. 4-44 B) tritt derselbe Effekt auf, je weiter man sich vom Halbkugel-Mittelpunkt nach außen bewegt. Im Kreis steht für dieselbe Zahl an Punkten nach außen zur Kreisperipherie eine immer kleinere Auflösung zur Verfügung. Eine Lösung bietet eine Abbildung, die gleich weit entfernten Punkten auf der Halbkugel auch eine gleiche radiale Entfernung auf der projizierten Kreisebene zuweist, wie in Abbildung 4-45 zu sehen ist. Man kann sich das Verfahren so vorstellen, als würde die Kugeloberfläche wie ein runder Stempel nach oben abgerollt.

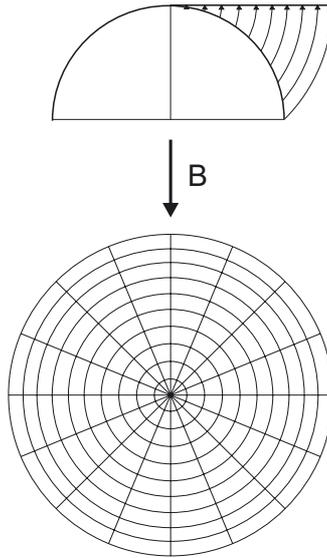


Abbildung 4-45: Die mittelabstandstreue Projektion ermöglicht eine weitgehend verzerrungsfreie Abbildung. *The displayed projection preserves the mean distance on the hemisphere surface and minimizes the distortion effects.*

Das Ergebnis ist eine mittelabstandstreue Abbildung der Kugeloberfläche (Abb. 4-45).

Die Dreieckspunkte müssen anschließend auf der Ebene wieder verbunden und die einbeschriebenen Flächen gefüllt werden. Die Abbildung der Dreiecke auf einer Kreisebene wird in HEMIS der Zylinderabbildung dabei vorgezogen, weil durch das Durchtrennen des Zylinders und der Darstellung als Streifen zyklische Probleme beim Verbinden der Dreieckspunkte und beim Füllen der Dreiecke auftreten können. Umfasst ein Dreieck den Bereich auf dem Zylinder an dem das Zylinderband „durchtrennt“ wird, ist nicht eindeutig bestimmbar, in welcher Reihenfolge die Dreieckspunkte nach der Abbildung zu verbinden sind. Bei einer Abbildung auf einen Kreis bleibt die Zyklizität erhalten und das Problem tritt nicht auf. Sobald allerdings rasterorientiert gearbeitet werden muss, wie beim Ausfüllen der Dreiecke durch den Computer, hat diese Abbildungsvariante einen Nachteil. So muss zum Ausfüllen der Dreiecke am Rechner auf ein Raster im kartesischen Koordinatensystem zurückgegriffen werden, da der Computer generell auf die Darstellung von Grafikinformatoren in x-y-Koordinaten limitiert ist. Dazu wird der Kreis mit den projizierten Eckpunkten der Dreiecke mithilfe eines x-y-Rasters diskretisiert, wie in Abbildung 4-46 dargestellt.

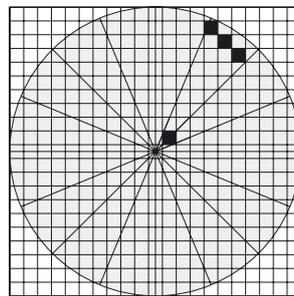


Abbildung 4-46: Transformation der hemisphärischen Daten in ein diskretes x-y-Raster. *Transformation of the hemispherical data in a x-y-grid.*

Die Projektion wird durch die Anwendung der Formeln 4-6 und 4-7 zur Berechnung der x-y-Koordinaten erreicht, wie sie auch BIBER (1996) verwendet:

$$X_p = r \cdot \left(1 - \left(\alpha / \frac{\pi}{2}\right)\right) \cdot \cos\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) + X_m \quad \text{Formel 4-6}$$

$$Y_p = r \cdot \left(1 - \left(\alpha / \frac{\pi}{2}\right)\right) \cdot \sin\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) + Y_m \quad \text{Formel 4-7}$$

Dabei stehen X_p und Y_p für die neuen x-y-Koordinaten, r für den Radius auf der Kreisebene, α für die Inkliniation, β für den Azimut und X_m , Y_m für die Lage des Mittelpunktes der Kreisdarstellung im neuen Raster. Danach können die Punkte verbunden und die Flächen gefüllt werden. Zum Füllen der Flächen wird dabei auf einen Scanline-Algorithmus zurückgegriffen (FOLEY et al. 1996), der freundlicher Weise von Herrn Dipl. Inf. (FH) Stefan Seifert zur Verfügung gestellt wurde, wofür ich ihm an dieser Stelle danken möchte. Das Ergebnis bis zu diesem Schritt ist faktisch eine virtuelle Fisheye-Fotografie des Umgebungsbestandes (Abb. 4-47).

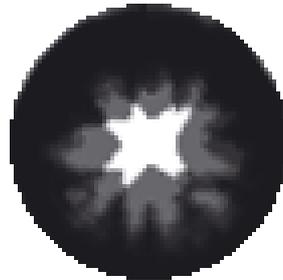


Abbildung 4-47: „Fish-eye-Bild“ als Ergebnis der hemisphärischen Konkurrenzberechnung. *“Fish-eye photo” resulting from the hemispherical competition calculation.*

Die Inkliniation im dreidimensionalen Raum ist dabei in radialer Richtung abgebildet, der Azimut der Kreisbahn folgend. Allerdings ist die Darstellung, wie beschrieben, in x-y-Koordinaten diskretisiert. Die diskrete Kreisdarstellung der Daten dient der Vereinfachung der Berechnungen. Sie bietet allerdings noch keine rechtwinklige Matrix mit Konkurrenzinformationen, wie sie für die benötigte Konkurrenzbeschreibung vorausgesetzt wird. Der Kreis liegt zwar in einer diskreten Pixeldarstellung in x-y-Koordinaten vor, aber die geometrischen Daten selbst müssen noch von ihrer Kreisform in eine rechtwinklige Form gebracht werden. Bildlich kann man sich eine solche Koordinatentransformation so vorstellen, als würde man den Kreis von der Peripherie zum Mittelpunkt an einer Stelle aufschneiden und zu einem rechteckigen Band aufziehen. Damit wäre der Azimut die x-Achse der neuen Matrix und die Inkliniation die y-Achse.

Mathematisch ist die Koordinatentransformation nach STÖCKER (1999) folgendermaßen zu formulieren:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \beta = \begin{cases} \arctan \frac{y}{x} + 2\pi, & \text{falls } x > 0, y < 0 \\ \arctan \frac{y}{x}, & \text{falls } x > 0, y \geq 0 \\ \frac{\pi}{2}, & \text{falls } x = 0, y > 0 \\ 0, & \text{falls } x = 0, y = 0 \\ \pi + \arctan \frac{y}{x}, & \text{falls } x < 0 \\ \frac{3\pi}{2}, & \text{falls } x = 0, y < 0 \end{cases}$$

Verhinderung von Verzerrungen

Bei der Transformation ergeben sich allerdings Verzerrungen im Kreiszentrum. Dort stehen bei der Diskretisierung weniger Pixel für denselben Kreiswinkel zur Verfügung als an der Kreisperipherie, wie in Abbildung 4-46 grafisch gezeigt wird.

Verwendet man beispielsweise eine Auflösung von 360 Pixeln für den Azimut (x-Achse) der späteren Matrix, so ergibt sich bei einer Koordinatentransformation für den Kreismittelpunkt ein einziges Pixel, das die Information für 360 horizontale Pixel in der rechtwinkligen Darstellung liefert. Zur Kreisperipherie hin nimmt die Verzerrung ab. Der Verzerrungseffekt kann dazu führen, dass nicht für jedes Pixel auf der rechtwinkligen Matrix eine Entsprechung auf der Kreisdarstellung gefunden werden kann. Die Folge wären unplausible Lücken in der Konkurrenzmatrix.

Zusätzlich wird eine bilineare Interpolation über 4 Pixel verwendet (FOLEY et al. 1996), um in der rechtwinkligen Konkurrenzmatrix auflösungsbedingt fehlende Pixel plausibel zu ergänzen. Der dabei zum Einsatz kommende Algorithmus berücksichtigt die Zyklizität bei der Interpolation und korrigiert plausibel Randeffekte. Er wurde dem Autor freundlicherweise von Herrn Erich Seifert zur Verfügung gestellt, wofür diesem nochmals ausdrücklich gedankt sei. Mit zwei Ansätzen kann dieser Effekt kompensiert werden. Durch „Oversampling“ und Interpolation. Unter Oversampling versteht man die Berechnung einer höheren Auflösung als jene, die in der Ergebnisdarstellung eigentlich benötigt wird. Im vorgestellten Ansatz wird bei der Rasterung der Kreisdarstellung eine höhere Auflösung eingesetzt als bei der Ausgabe der kartesischen Konkurrenzmatrix, um Diskretisierungsprobleme zu begrenzen.

Konkurrenzwirkung der Nachbarbäume

Mit dem vorgestellten Algorithmus können Konkurrenzwerte für beliebige Orte im Bestand berechnet werden. Für jeden Punkt, an dem die Konkurrenz zu bestimmen ist, wird pro Konkurrent eine eigene Konkurrenzmatrix errechnet. Allen gefüllten Pixeln der Konkurrenzbaummatrizen wird dabei der Konkurrenzwert eins zugewiesen. Die Konkurrenzmatrizen aller Konkurrenzbaume werden anschließend multiplikativ miteinander zu einer endgültigen Ergebnismatrix

verknüpft. Stehen in einer Richtung mehrere Konkurrenz bäume hintereinander, so schattet der erste einen definierten Prozentsatz des Horizontes auf diesem Pixel ab, der zweite reduziert die übrigen Prozente nochmals um denselben Prozentsatz und so weiter (Formel 4-8).

$$\text{Trans}(n) = \text{Trans}(n - 1) \cdot \text{TM} \quad \text{Formel 4-8}$$

Trans = übrige Strahlung nach dem Durchtritt durch die Baumkrone – radiation after penetration
n = Anzahl der durchdrungenen Bäume – number of penetrated crowns
TM = Transmissionskoeffizient – coefficient of light transmission

Dabei repräsentiert *Trans* die übrige Strahlung nach dem Durchtritt durch die Baumkrone, *TM* den Transmissionskoeffizienten und *n* die Baumzahl, die durchstrahlt wird.

In Formel 4-9 ist die Transmissionsgleichung mathematisch in nichtrekursiver Form formuliert.

$$\text{Trans} = \text{TM}^n \quad \text{Formel 4-9}$$

Trans = übrige Strahlung nach dem Durchtritt durch die Baumkrone – radiation after penetration
n = Anzahl der durchdrungenen Bäume – number of penetrated crowns
TM = Transmissionskoeffizient – coefficient of light transmission

Eine vollständige Abschattung von 1,0 würde in HEMIS von einem absolut lichtundurchlässigen Körper verursacht. Einen ähnlichen Algorithmus wenden JANSEN et al. (1995) zur vertikalen Lichtabschwächung innerhalb des ganzen Kronendachs an.

Durch die rekursive Abschwächung um einen bestimmten Faktor wird eine exponentielle Extinktion des Lichts beim Durchtritt durch die Baumkronen nachgeahmt, ohne dass mit dem Algorithmus ein rechenaufwändiges Lichtmodell implementiert werden muss. Der HEMIS-Algorithmus stellt vielmehr ein einfaches Abschattungsmodell dar, das auf die Berücksichtigung der inhomogenen Biomasseverteilung in der Baumkrone, die explizite Berechnung des Strahlungseinfall, der Reflexion und von Phänomenen wie Penumbra und Sonnenflecken zugunsten einer Rechenzeitminimierung verzichtet.

Die Konkurrenz wird dabei, aus Geschwindigkeitsgründen in 256 Helligkeitsstufen normiert, von 0 bis 1 dargestellt. Stehen in einer Richtung mehrere Konkurrenten hintereinander, bestimmt der Transmissionsfaktor, ab wie vielen Konkurrenten eine Vollabschattung eintritt und damit die räumliche Tiefenwirkung des Konkurrenzalgorithmus. In Abbildung 4-48 ist illustriert, wie viele Bäume hintereinander den Konkurrenzwert noch nennenswert beeinflussen. Die Kurven stehen dabei für unterschiedliche Transmissionskoeffizienten.

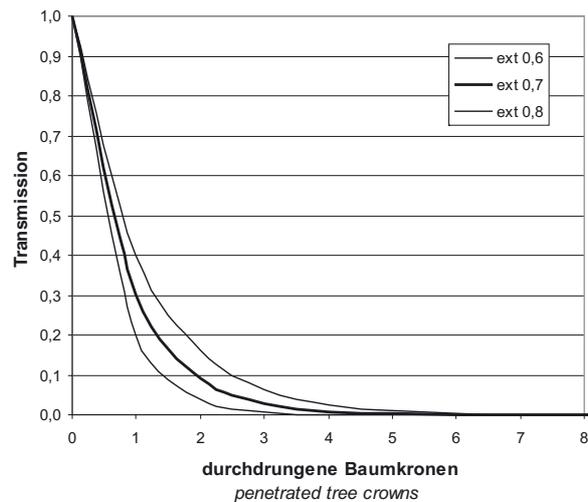


Abbildung 4-48: Abschwächung des Lichts mit der Anzahl der durchdrungenen Baumkronen. *Light attenuation according to the number of penetrated tree crowns.*

Der benutzte mittlere Transmissionskoeffizient für Fichtenkronen von 0,3 ist mithilfe von Fotos geschätzt, auf denen Fichten in verschiedenen Entfernungen und Winkeln gegen den Himmel aufgenommen wurden. Die Kronen wurden in einem Bildbearbeitungsprogramm am Computer auf die Anteile der Abdeckung des Horizontes hin untersucht. Dabei erfolgte die Abgrenzung der Kronen auf den Fotos durch Hüllen mit einer definierten Anzahl an Stützpunkten, analog zu dem in dieser Arbeit eingeführten Kronenmodell. Die Analysen erbrachten Transmissionskoeffizienten von 0,2 bis 0,4 bei voll benadelten Fichten im Bestandesschluss. Die Werte bedeuten, dass die definierten Kronenkörper auf den Fotos 60 bis 80% des Himmels dahinter verdecken. Der Baumstamm wird als lichtundurchlässig betrachtet und besitzt folglich den Transmissionskoeffizienten 0,0.

Das Ergebnis der Konkurrenzberechnung bis zur Transformation in eine rechtwinklige Matrix ist für eine definierte Höhe am Baum zwölf, auf der Versuchsfläche ZUS 604, Parzelle 6 dargestellt (Abb. 4-48). Je dunkler die Farbe, desto höher der Konkurrenzwert. Weiß entspricht einem HEMIS-Wert von 0.



Abbildung 4-49: Die Panoramadarstellung der Konkurrenz geht aus einer Transformation der Kreisdarstellung hervor. *The panorama view is the result of a transformation on the circular „fish-eye“.*

Deutlich ist erkennbar, dass mehrere Bäume hintereinander zu höherer Konkurrenz führen

Anwendung des Konkurrenzmodells HEMIS

Im Überblick über den Ablauf des Konkurrenzalgorithmus ergeben sich also folgende Schritte:

1. Triangulation der Baumkronen (Abb. 4-42),
2. Projektion der Dreieckspunkte auf eine Halbkugel (Abb. 4-42, Abb. 4-43 B),

3. Mittelabstandstreue Abbildung der Punkte auf eine diskretisierte Kreisebene (Abb. 4-45, Abb. 4-46),
4. Verbinden der Punkte und Füllen der Dreiecke und
5. Transformation der Kreisdarstellung in eine rechtecklige Abbildung mit Oversampling und Interpolation (Abb. 4-49).

Der Konkurrenzalgorithmus HEMIS wird im Rahmen dieser Arbeit sowohl zur Konkurrenzanalyse des Ist-Zustandes real existierender Bäume, als auch in der Prognose eingesetzt. Für die Konkurrenzanalyse in realen Beständen wird die Konkurrenz entlang der Stammachse der Probebäume für jeden Astquirl berechnet, um eine maximale Auflösung bei der Konkurrenzbeschreibung zu erhalten, die dann mit den Kronen- bzw. Astdaten korreliert werden kann (Abb. 4-50 A)

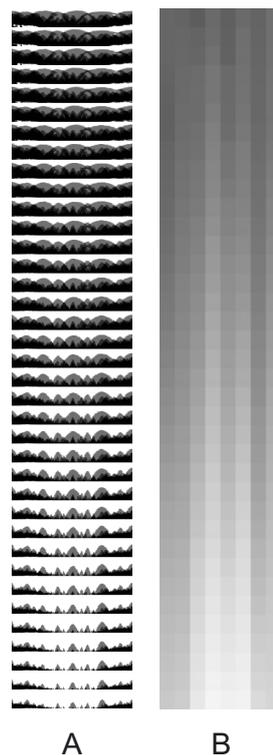


Abbildung 4-50: Aggregation der hochauflösenden HEMIS-Berechnung (A) in 8 Himmelsrichtungen (B). Die Abbildung stellt die Konkurrenz entlang der Stammachse dar. Die Richtung ist dabei umgekehrt, so dass der unterste Wert in der Grafik der Baumspitze entspricht. *Aggregation of the high-res HEMIS results (A) into 8 compass directions (B). The graphic shows the competition calculation along the stem axis, the lowest point in the picture denotes the tree tip.*

Bei einer Simulation wird die Konkurrenzmatrix für jeden Bestandesbaum entlang der Stammachse nur für jene Höhen der Krone berechnet, für die auch Stützstellen vorliegen, um Rechenzeit zu sparen. Die Kronenstützstellen werden in festen Abständen jeden Meter festgelegt (siehe Abschnitt 4.4.2). Zusätzlich erfolgt noch eine weitere Berechnung am Kronenansatz, um ein konkurrenzbedingtes Absterben der untersten Äste mit möglichst hoher Genauigkeit vorhersagen zu können. Für die Simulation der Konkurrenz wird nur die Azimutkomponente der Matrix in acht Himmelsrichtungen genutzt. Aus jeder Spalte der Matrix wird der Mittelwert der Pixel berechnet, sodass als Ergebnis eine einzige Zeile mit der Konkurrenz für die Himmelsrichtungen entsteht. Durch Mittelwertbildung lässt sich diese wiederum in acht Werte für die Haupt-

und Nebenhimmelsrichtungen zusammenfassen (Abb. 4-50 B). Die Aggregation der Matrix in acht Konkurrenzwerte ist ausreichend, da exakt in den berechneten Himmelsrichtungen auch die Kronenradien in Abhängigkeit von der Konkurrenz fortgeschrieben werden.

Mit dem entwickelten Konkurrenzmodell HEMIS lassen sich für beliebige Punkte im Bestand Konkurrenzwerte aus verschiedenen Himmelsrichtungen in hoher Auflösung ermitteln. Damit liefert HEMIS in der Simulation räumlich differenzierte Konkurrenzwerte für die weiteren Modelle in AMOK.

4.4.2 Entwicklung eines flexiblen Kronenmodells

Development of a flexible crown model

Für eine plausible Nachbildung der äußeren Astigkeit und deren zeitlicher Entwicklung ist es nötig ein flexibles Kronenmodell zu schaffen, dessen Struktur ein plastisches Verhalten der Krone, sowohl in der horizontalen als auch in der vertikalen Ebene zulässt. Ein solches Kronenmodell dient als Grundstruktur, um Behandlungseffekte nachzubilden und den Einfluss der Konkurrenz auf die Kronen- und Astentwicklung zu simulieren.

Bis zur Einführung des hier vorgestellten Kronenmodells wurde die Krone in SILVA mithilfe dreier Modelle beschrieben: ein Modell zur Schätzung der Kronenansatzhöhe, ein Modell zur Schätzung der Kronenbreite an der breitesten Stelle und ein Kronenformmodell, das einen baumartentypischen Kronendurchmesser je nach relativer Position in der Krone berechnet (PRETZSCH 1992, 2001, PRETZSCH und KAHN 1998). Die Fichtenkrone wird dabei durch rotationssymmetrische Körper angenähert, wobei der obere Kronenteil aus einem Kegel und der untere Kronenteil aus einem Kegelstumpf besteht (Abb. 4-51).

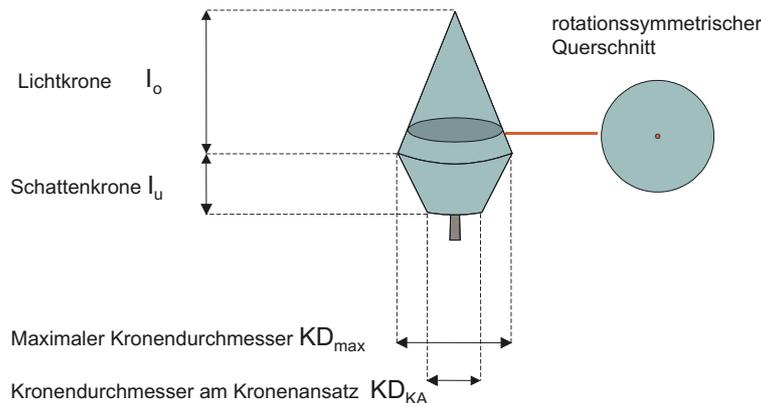


Abbildung 4-51: Ursprüngliches, rotationssymmetrisches Kronenmodell von SILVA. *Original rotational symmetric crown model of SILVA*

Das Längenverhältnis von Licht- zu Schattenkrone ist unveränderlich. Als Datengrundlage für die unterstellte Kronenform der Fichte dienen vor allem Untersuchungen von ASSMANN (1961) und BURGER (1939).

Mithilfe dieser zusammengesetzten Rotationskegel ergibt sich eine Kronenbeschreibung mit deren Hilfe sich der Durchmesser- und Höhenzuwachs des Stammes auf Einzelbaumbasis plausibel schätzen lässt. Das rotationssymmetrische Kronenmodell erlaubt allerdings außer der Veränderung des Verhältnisses von Kronenlänge zum Kronendurchmesser an der breitesten Stelle keine Adaption der Kronenform. Das feste Verhältnis der Länge des oberen und des unteren Kronenteils fixiert die breiteste Kronenstelle auf eine feste relative Höhe in der Krone. Zudem

ist das Verhältnis der Kronenbreite an der breitesten Kronenstelle und der Kronenbreite am Kronenansatz fest vorgegeben. Diese beiden fixen Verhältniszahlen schränken die Anpassungsmöglichkeiten der Kronenform in der Vertikalen deutlich ein und verhindern weitgehend eine konkurrenz- oder altersbedingte Änderung der Kronenform.

Zusätzlich limitiert die rotationssymmetrische Form stark die Reaktionsmöglichkeiten der simulierten Krone auf asymmetrische Konkurrenz aus verschiedenen Himmelsrichtungen. Radial asymmetrische Kronenformen sind in der Natur eher die Regel als die Ausnahme. Annähernd rotationsförmige Kronen kommen nur bei Bäumen mit sehr geringer und gleichmäßiger Konkurrenz im Kronenraum vor. Insgesamt erweist sich das bisherige Kronenmodell als zu unflexibel, um davon auf die Aststruktur in der Krone zu schließen.

Die beschriebenen Einschränkungen des ursprünglichen SILVA-Kronenmodells machen den Entwurf eines neuen Kronenmodells nötig, das in vertikaler und horizontaler Richtung plastisch reagieren kann und so asymmetrischen Konkurrenzsituationen ausreichend Rechnung trägt (Abb. 4-52).

Ein erster Schritt dazu ist die Abkehr von rotationssymmetrischen geometrischen Grundkörpern bei der Kronenbeschreibung. Eine geeignetere Alternative bietet ein vertikal und horizontal segmentiertes Kronenmodell. Vertikal wird die Krone dazu in definierten Abständen unterteilt. Jeder dieser vertikalen Stützstellen wird dabei in der Horizontalen durch acht Radien beschrieben, die nach den Haupt- und Nebenhimmelsrichtungen orientiert sind.

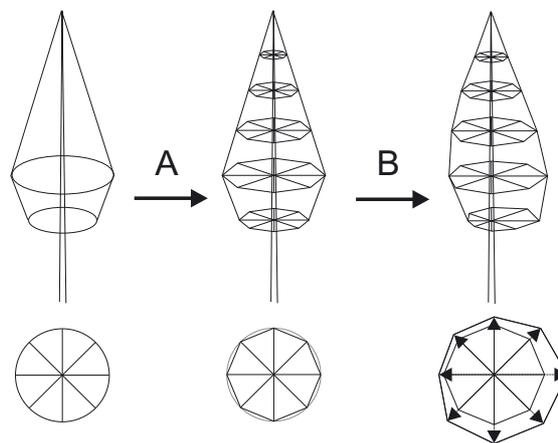


Abbildung 4-52: Definition eines flexiblen Kronenmodells durch Unterteilung in horizontale und vertikale Abschnitte. *Definition of a flexible crown model by division of the crown in horizontal and vertical sectors.*

Die Kronenoberfläche wird linear derart interpoliert, dass die Radien übereinander liegender Stützstellen mit der gleichen Himmelsrichtung zusammenhängen. Die Enden der Radien innerhalb einer Stützstelle werden ebenfalls linear zu einem Polygon verbunden.

Damit ergibt sich für jedes Segment, das von einer vertikalen Stützstelle zur nächsten reicht ein Pyramidenstumpf mit acht Ecken (Abb. 4-52 Schritt A).

Durch die Segmentierung können einzelne Kronenteile je nach Himmelsrichtung und vertikaler Lage in der Krone unabhängig voneinander verändert werden (Abb. 4-52 Schritt B). In Abhängigkeit von der Konkurrenz wachsen einzelne Kronenradien zu, wogegen andere wenig wachsen bzw. stagnieren. Eine asymmetrische Kronenexpansion in Freiräume nach einer einseitigen Freistellung ist mit dem Kronenmodell beispielsweise ebenso nachbildbar wie einseitige Kronenformen an Waldrändern. Für die Nachbildung einer Veränderung der Kronenform über die Zeit, wie sie bei der Fichte beobachtet werden kann (MITSCHERLICH 1970, PRETZSCH und KAHN 1998), ist das entworfene Modell ebenfalls geeignet.

Die Auflösung des Kronenmodells ist frei wählbar, da die Anzahl der vertikalen Stützstellen und der Radien frei vorgegeben werden kann. So lässt sich die geometrische Komplexität der Bäume skalieren und an die zur Verfügung stehende Rechenzeit anpassen.

4.4.3 Rekonstruktion des Kronen- und Baumwachstums

Reconstruction of former crown and tree growth

Wie bereits im Unterkapitel 3.3 beschrieben, hat SILVA als Waldwachstumssimulator die Möglichkeit Startbestände zu erzeugen oder einzulesen. Es verfügt jedoch über keine Modelle, um das vergangene Wachstum der Bäume in einem solchen Startbestand plausibel zu rekonstruieren.

Da für eine dreidimensionale Nachbildung der Holzeigenschaften jedoch Informationen über das Stamminnere und die innere Astigkeit notwendig sind, werden im Folgenden Methoden entwickelt, die eine Rekonstruktion der Entwicklung von Baumhöhe, Durchmesser, Kronenbreite und Kronenansatzhöhe ermöglichen.

Als Eingangsdaten stehen aus dem Waldwachstumssimulator SILVA Standortinformation und die räumliche Situation des Baumes im Startbestand zur Verfügung. Im Weiteren soll dem Zustand des Startbestandes, von dem aus später die Prognose begonnen werden soll, der Zeitpunkt t zugeordnet werden. Alle Baumdimensionen, die der Baum vor dem Zeitpunkt t hatte, gilt es damit zu rekonstruieren. Die Zeitzustände vor dem Zeitpunkt t werden mit $t-n$ bezeichnet, alle nach t mit $t+n$.

Rekonstruktion der Höhenentwicklung und des Baumalters

Der entwickelte Modellansatz zur Rekonstruktion der Höhenentwicklung nutzt das Höhenwachstumsmodell des Waldwachstumssimulators (s. Unterkapitel 3.3). Dieses Kernmodell von SILVA verwendet nicht das Baumalter, sondern bestimmt den Baumzuwachs aus den Baumdimensionen, dem Standort und der Konkurrenz. Der Standort kann vereinfacht als zeitlich unveränderlich angenommen werden. Als Unbekannte bleiben jedoch das tatsächliche Baumalter, die vergangene Baumdimension und die Konkurrenz, der der Baum in der Vergangenheit ausgesetzt war. Deshalb ist es notwendig, über die Baumhöhe und die standortsabhängige Höhenkurve das Alter und die jährlichen Höhenzuwächse bis zum Startzeitpunkt der Simulation abzuleiten.

Dabei wird auf das Standort-Leistungsmodell von SILVA zurückgegriffen, das für einen bestimmten Standort das potenzielle Höhenwachstum eines Baumes über die Zeit durch eine Chapman-Richards-Funktion schätzt (Abb. 4-53).

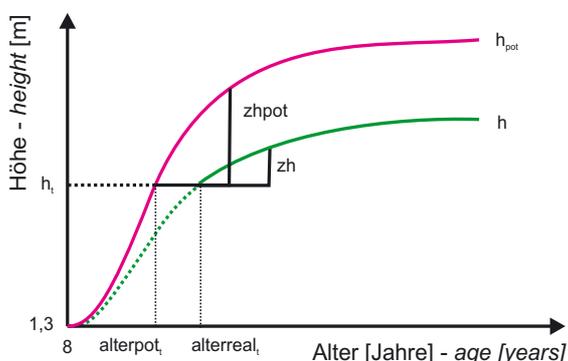


Abbildung 4-53: Potenzielles Höhenwachstum (h_{pot}) und tatsächlich erreichtes Höhenwachstum (h). Die Höhenentwicklung wird rekonstruiert, indem das aktuelle Verhältnis von zh zu zh_{pot} für die Vergangenheit als konstant angenommen wird. Unter Nutzung der aktuellen Höhe zum Zeitpunkt t (h_t) kann das Alter zum Zeitpunkt rekonstruiert werden ($alter_{real,t}$). *Potential height growth (h_{pot}) and real height growth (h). The height growth development is reconstructed by assuming a constant ratio of zh and zh_{pot} . By using the actual height (h_t) a reconstruction of the age at time t is possible.*

Die Potenzialkurve repräsentiert eine Baumhöhe h_{pot} , die unter optimalen Bedingungen ohne Konkurrenz auf diesem Standort von einem Baum erreicht werden kann. Eine direkte Ableitung des Alters aus dieser Kurve ist nicht möglich, da die Wachstumsbedingungen, denen der Baum in der Vergangenheit ausgesetzt war, nicht bekannt sind und deshalb die zum Erreichen der Potenzialkurve nötigen Optimalbedingungen nicht vorausgesetzt werden können. Eine Ableitung des Alters aus der Potenzialkurve (siehe $alter_{pot_t}$ Abb. 4-53) würde bei gegebener Höhe h_t zum Startzeitpunkt t deshalb unweigerlich zu einer Altersunterschätzung im Vergleich zum tatsächlichen Alter (siehe $alter_{real_t}$ Abb. 4-53) führen.

Die tatsächliche Baumhöhenentwicklung h in der Simulation liegt in der Regel zu jeder Zeit deutlich unter der Potenzialkurve, ist jedoch vor dem Beginn der Simulation nicht bekannt (gestrichelter Teil der Höhenkurve h in Abbildung 4-53). Die Konkurrenzsituation und die Kronendimensionen des Betrachtungsbaumes lassen sich zwar zum Startzeitpunkt t berechnen, nicht jedoch ihre vergangene Entwicklung, da die räumliche Stellung der Nachbarn in der Vergangenheit nicht problemlos zu rekonstruieren ist, ohne genau die Position und Dimension der noch stehenden und vor allem auch der ausgeschiedenen Bäume zu kennen. Diese Daten können für Startbestände in der Regel nicht vorausgesetzt werden.

Zur Lösung dieses Problems wird die Information aus der Potenzialkurve verwendet, um für einen Baum von definierter Starthöhe h_t einen Höhenzuwachs zh zu bestimmen (Formel 4-10 nach PRETZSCH und KAHN 1998). Es wird dabei vom Zeitpunkt t , zu dem als Startgrößen der Standort, die Baumdimensionen und die Konkurrenz vorliegen, der Höhenzuwachs zh in einer Periode vom Zeitpunkt t in die Zukunft bis zum Zeitpunkt $t+1$ simuliert.

$$zh = zh_{pot} \cdot a \cdot WKrone \cdot WKonkurrenz \quad \text{Formel 4-10}$$

zh = prognostizierter Höhenzuwachs [m / 5 Jahre] – predicted height increment [m / 5 years]
 zh_{pot} = standortabhängiges Höhenzuwachspotenzial – site depending height increment potential
 $WKrone$ = Wirkung der Kronenmantelfläche auf den Zuwachs – effect of crown surface area on increment
 $Wkonkurrenz$ = integrierte Wirkung der Konkurrenz auf den Zuwachs – integrated effect of competition
 a = Regressionsparameter – regression parameter

Aus dem Verhältnis des real geleisteten Zuwachses zh zum potenziell möglichen Zuwachs zh_{pot} wird nun ein Faktor AP nach Formel 4-11 abgeleitet, der für den Zeitpunkt t bis zur nächsten Prognoseperiode die Ausschöpfung des möglichen Potenzials beschreibt:

$$AP = \frac{zh_t}{zh_{pot_t}} \quad \text{Formel 4-11}$$

AP = Ausschöpfung des Potenzials zum Zeitpunkt t – index of real value to potential value at time t
 zh_t = prognostizierter Höhenzuwachs zum Zeitpunkt t [m] – predicted height increment at time t [m]
 zh_{pot_t} = standortabhängiges Höhenzuwachspotenzial zum Zeitpunkt t [m] – site depending height increment potential at time t [m]

Um zu einem Alter bei der Höhe zur Startwertberechnung h zu gelangen, wird nun davon ausgegangen, dass die Möglichkeiten des Baumes zur Ausschöpfung des potenziellen Höhenzuwachses und somit der Faktor AP in der Vergangenheit konstant waren. Da der Kurvenursprung der Potenzialkurve bei einer Baumhöhe von 1,3 m definiert ist, wird der fehlende Teil darunter

mit einem konstanten Höhenzuwachs von 0,162 m pro Jahr vorgegebenen, was einem achtjährigen Wachstum bis zum Erreichen der 1,3 m-Marke entspricht. Ab dem Beginn der Potenzialkurve bei 1,3 m Baumhöhe wird nun nach Formel 4-12 das periodische Höhenwachstum des Baumes berechnet, bis die vorgegebene Höhe h_t erreicht ist.

$$zh_t = zhpot_t \cdot AP \quad \text{Formel 4-12}$$

- ZAP = Ausschöpfung des Potenzials zum Zeitpunkt t – index of real value to potential value at time t
 zh_t = prognostizierter Höhenzuwachs zum Zeitpunkt t [m] – predicted height increment at time t [m]
 $zhpot_t$ = standortabhängiges Höhenzuwachspotenzial zum Zeitpunkt t [m] – site depending height increment potential at time t [m]

Die gesamte Anzahl interpolierter Jahreszuwächse wird im nächsten Schritt addiert (gestrichelter Kurventeil in Abbildung 4-53) und zusätzlich die acht Jahre bis zur 1,3 m-Schwelle hinzugerechnet. Daraus ergibt sich das geschätzte Baumalter zum Zeitpunkt t ($alter_{real,t}$). Damit ist über die Simulation der vergangenen Höhenentwicklung das Baumalter, die Anzahl der Astquirle, deren Höhe am Stamm und folglich die vertikale Verteilung der Äste definiert.

Rekonstruktion der Kronenansatzentwicklung

Die Kronenansatzhöhe wird nach einem ähnlichen Verfahren rekonstruiert wie die Baumhöhe. Ausgehend vom Kronenansatz im Startbestand zum Zeitpunkt t wird der Bekronungsgrad zum Zeitpunkt t nach Formel 4-13 berechnet.

$$BG_t = \frac{KA_t}{h_t} \quad \text{Formel 4-13}$$

- BG_t = Bekronungsgrad zum Zeitpunkt t – relative crown length at time t
 KA_t = Kronenansatz zum Zeitpunkt t [m] – height of crown base at time t [m]
 h_t = Baumhöhe zum Zeitpunkt t [m] – tree height at time t [m]

Unter der Annahme, dass ein Baum im Jahr seiner Keimung voll bekront ist und damit einen Bekronungsgrad von eins besitzt, wird der Bekronungsgrad entlang der rekonstruierten Baumhöhenkurve vom Zeitpunkt t zum Zeitpunkt 1 nach Formel 4-14 interpoliert.

$$KA_{t-n} = BG_t \cdot \frac{h_{t-n}}{h_t} \cdot h_{t-n} \quad \text{Formel 4-14}$$

- KA_{t-n} = Kronenansatz zum Zeitpunkt $t-n$ [m] – height of crown base at time $t-n$ [m]
 BG_t = Bekronungsgrad zum Zeitpunkt t – relative crown length at time t
 h_{t-n} = Baumhöhe zum Zeitpunkt $t-n$ [m] – tree height at time $t-n$ [m]
 h_t = Baumhöhe zum Zeitpunkt t [m] – tree height at time t [m]

Der Baum vergrößert damit seinen Bekronungsgrad in dem Maße, in dem sich seine tatsächliche Höhenentwicklung im Verhältnis zu seiner Höhe zum Zeitpunkt verringert. Damit wird zur Rekonstruktion der Kronenansatzhöhe die Tatsache genutzt, dass die Entwicklung der Kronen-

ansatzhöhe eine Korrelation zur Höhe eines Baumes zeigt, wie SPATHELF (1998) für Fichten belegt. Unter der Annahme gleicher relativer Wachstumsbedingungen über die Baumentwicklung hinweg, bleibt dieses allometrische Verhältnis konstant. Dieser Zusammenhang wird in der Rekonstruktion der Kronenansatzhöhe genutzt.

Rekonstruktion der Durchmesserentwicklung

Die Durchmesserentwicklung wird mithilfe der Originalfunktion des Waldwachstumssimulators SILVA nachgebildet, welche den potenziellen Durchmesserzuwachs als Funktion des erreichten Durchmessers des Baumes mit einem Potential-Modifier-Modell schätzt (PRETZSCH 2001).

Benutzt wird die integrierte Form des Potenzialmodells, die das potenzielle Durchmesserwachstum beschreibt (Abb. 4-54, Formel 4-15).

$$zdpot_{int} = \frac{A \cdot p \cdot (1 - e^{(-k \cdot BHD)})^{(p+1)}}{(p+1)} \quad \text{Formel 4-15}$$

- $zdpot_{int}$ = integrierter potenzieller Durchmesserzuwachs [cm] – integrated potential diameter increment [cm]
 BHD = Brusthöhendurchmesser [cm] – diameter at breast height [cm]
 A, k, p = Regressionsparameter – regression parameters

SILVA geht als altersunabhängiger Waldwachstumssimulator davon aus, dass auf demselben Standort Bäume mit dem gleichen allometrischen Status, definiert durch Durchmesser und Kronendimension, unabhängig von ihrem Alter, auch einen gleichen Durchmesserzuwachs leisten und damit auch den gleichen Anteil des Durchmesserzuwachspotenzials ausschöpfen.

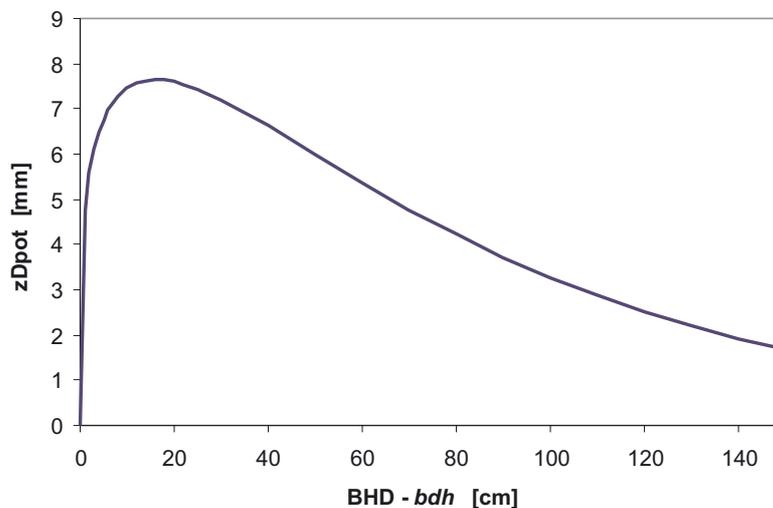


Abbildung 4-54: Modell zur Schätzung des potenziellen Durchmesserzuwachses (zdpot) in Abhängigkeit vom Brusthöhendurchmesser in SILVA. Beispiel für den Standort „Oberbayerisches Tertiärhügelland“.
Model for the prediction of the potential diameter increment (zdpot) depending on DBH in SILVA. Example for site “Oberbayerisches Tertiärhügelland” in Bavaria.

Dies bedeutet, dass das Alter die tatsächliche Wachstumskurve lediglich entlang der x-Achse skaliert (Abb. 4-54). Ein bestimmter, auf dem Standort möglicher Durchmesser wird von jedem Baum früher oder später erreicht, wenn die Konkurrenz und ein vorzeitiges Absterben dies nicht verhindern. Deshalb kann das Alter anstelle des Durchmessers als unabhängige Variable auf der Abszisse eingesetzt werden, sofern Alter und Durchmesser zur Skalierung bekannt sind. Dazu wird als Interpolationsfaktor zuerst das Verhältnis vom Bezugsalter $t-n$ zum Alter des Startbestandes t gebildet (Formel 4-16). Das Alter zum Zeitpunkt t wird hierbei um acht Jahre reduziert, um die Zeit bis zum Erreichen der BHD-Schwelle auszugleichen (siehe Rekonstruktion der Baumhöhe).

$$\text{AlterProzent}_{t-n} = \frac{\text{Alter}_{t-n}}{\text{Alter}_t - 8} \quad \text{Formel 4-16}$$

AlterProzent_{t-n} = Interpolationsfaktor zur Berechnung des prozentualen Alters zum Alter t
 - interpolation factor for calculation of relative age to age t
Alter_{t-n} = Alter zum Zeitpunkt $t-n$, zu dem der Durchmesser geschätzt werden soll
 - age at time $t-n$, for which the diameter is predicted
Alter_t = Alter zum Zeitpunkt t , dem Endzeitpunkt der Rekonstruktion
 - age at time t , the end time of reconstruction

Der Durchmesser zum Zeitpunkt $t-n$ wird nach Formel 4-17 berechnet, indem die Potenzialkurve mit dem aktuellen Durchmesser d_t und dem berechneten Interpolationsfaktor AlterProzent skaliert wird, sodass der Kurvenverlauf zur Interpolation vom Startalter bis zum Alter eins des Baumes verwendet werden kann.

$$d_{t-n} = \frac{\text{zdpot}_{\text{int}}(\text{AlterProzent}_{t-n} \cdot d_t) \cdot (d_t - 1)}{\text{dpot}_t} + 1 \quad \text{Formel 4-17}$$

d_{t-n} = BHD zu einem Zeitpunkt n vor t [cm] – dbh at time n before t [cm]
dpot_t = potenzieller BHD zum Zeitpunkt t [cm] – potential dbh at time t [cm]
d_t = BHD zum Zeitpunkt t [cm] – dbh at time t [cm]
AlterProzent_{t-n} = Interpolationsfaktor zur Altersberechnung – interpolation factor for age calculation

Damit wird durch Skalierung der Potenzialfunktion deren Kurvenverlauf für die Rekonstruktion des vergangenen Durchmesserwachstums d_{t-n} genutzt.

Rekonstruktion der Kronendurchmesserentwicklung

Nur in seltenen Fällen liegen Kronenablotungen als gemessene Eingangsdaten für den Startbestand vor. Deshalb wird für die Rekonstruktion der Kronendurchmesserentwicklung eine Methode vorgestellt, um aus geschätzten mittleren Kronendurchmessern und den Konkurrenzbedingungen eines Baumes zum Startzeitpunkt eine plastische Kronenform zum Startzeitpunkt zu erzeugen und retrospektiv bis zu Baumalter eins zu interpolieren.

Die Rekonstruktion der Kronendurchmesserentwicklung erfolgt deshalb in zwei Hauptschritten. Der erste besteht aus der plastischen Verformung der SILVA-Krone im neuen Kronenmodell mithilfe der Konkurrenz. Der zweite Schritt stellt eine Interpolation zum Alter null dar.

Voraussetzung für den ersten Hauptschritt ist die Ableitung der artspezifischen Kronenplastizität der Fichte, charakterisiert durch die Streuung innerhalb der acht Kronenradien. Zur Klärung der Kronenplastizität bei der Fichte erfolgt in einer Querschnittsanalyse die Auswertung von Kronenablotungsdaten von 5656 Fichten aus dem Bayerischen Ertragskundlichen Versuchsflächenetz, das vom Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der TU München betreut wird. Die untersuchten Fichten umfassen ein großes Alters- und Konkurrenzspektrum und decken alle wichtigen Fichtenstandorte in Bayern ab. Pro Baum liegen jeweils acht Kronenradienwerte aus der Kronenprojektion in die Haupt- und Nebenhimmelsrichtungen vor. Mit dieser Datenbasis lässt sich die Standardabweichung als Streuungsmaß der Kronenradien vom Quadratischen Mittelwert berechnen. Das quadratische Mittel wird herangezogen, da es im Gegensatz zum arithmetischen Mittel eine annähernde Flächenkongruenz zur Kronenprojektionsfläche gewährleistet.

Da die Standardabweichung als absolutes Streuungsmaß mit steigendem mittleren Kronenradien ansteigt, wird der Datensatz nach der Länge des mittleren Kronenradius in sieben Klassen eingeteilt und die Standardabweichung für diese Klassen berechnet. Der funktionale Ausgleich der Standardabweichung über dem Kronenradius ist in Abbildung 4-55 und Formel 4-18 dargestellt.

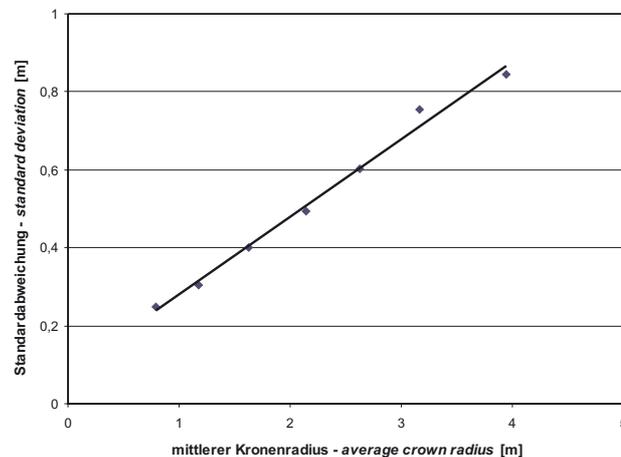


Abbildung 4-55: Darstellung des Regressionsausgleichs der Standardabweichung mit steigendem Kronenradius. *Regression line to describe the standard deviation over the increasing crown radius.*

$$sd = 0,1997 \cdot KR_{\text{mitt}} + 0,0803 \quad \text{Formel 4-18}$$

sd = Standardabweichung – standard deviation
KR_{mitt} = quadratisches Mittel aller 8 Kronenradien – quadratic mean from 8 crown radii

Durch die Kenntnis der Streuung der Kronenradien kann der Bereich festgelegt werden, in dem die Krone plastisch reagiert. Dazu wird die dreifache Standardabweichung zum Mittelwert addiert bzw. davon subtrahiert, um die maximale bzw. minimale Streuung um den Mittelwert zu erhalten. Unter der Prämisse der Normalverteilung befinden sich etwa 99% der Werte im Intervall zwischen der 3fachen Standardabweichung um den Erwartungswert (STÖCKER 1999, S. 674). Die übrigen Werte können als maximale bzw. minimale Kronenradien betrachtet werden.

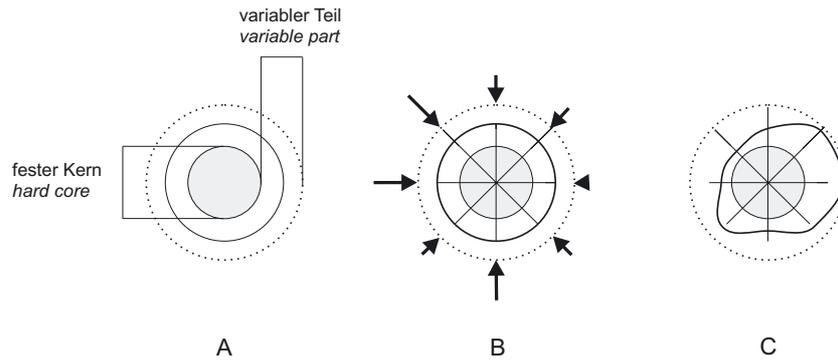


Abbildung 4-56: Modifikation der ursprünglich rotationssymmetrischen Krone aus SILVA über die aktuelle Konkurrenz: (A) Definition der variablen Kronenzone (weiß) und des unveränderlichen Kerns (grau). (B) Berechnung der Konkurrenz aus verschiedenen Himmelsrichtungen. (C) Plastische Verformung über die relative Konkurrenzwirkung unter der Prämisse der Flächenkongruenz zum ursprünglichen Modell in A.

Adaption of the original rotational symmetric crown of SILVA to the current competition: (A) Definition of the variable crown zone (white) and of the invariable core (grey). (B) Spatial competition calculation. (C) Plastic deformation according to the relative competition while preserving an area congruent to the original model of A.

Damit sind die Eckwerte der plastischen Kronenreaktion bestimmt. Das berechnete Minimum der Radienlänge (in der Abbildung grau dargestellt) wird praktisch von jedem Radius erreicht und definiert damit einen harten unveränderlichen Kern (Abb. 4-56 A), der keiner plastischen Kronenverformung im Leben des Baumes unterliegt. Der Bereich vom Minimum zum Maximum (gestrichelte Linie) dagegen ist veränderbar. In diesem Bereich streuen die Werte um den Mittelwert, der in der Abbildung 4-56 A mit durchgezogener Linie dargestellt ist.

Das Modell zur Veränderung der Kronenform durch Konkurrenz baut nun auf den mittleren Kronenradien auf, die der Waldwachstumssimulator SILVA berechnet. Diese entsprechen dem durchgezogenen Kreis in Abbildung 4-56 A zwischen Minimum und Maximum der Streuung. Zur Nachbildung der Konkurrenzwirkung wird nun die Krone so verformt, dass ihre Fläche äquivalent zur Fläche der SILVA-Krone in derselben Betrachtungshöhe bleibt.

Dazu wird zuerst für jeden Radius die Konkurrenz aus der entsprechenden Himmelsrichtung mit dem HEMIS-Modell berechnet (s. Abschnitt 4.4.1).

In Abbildung 4-56 B ist dargestellt, wie die Konkurrenz aus verschiedenen Himmelsrichtungen auf den schematisierten Baumquerschnitt wirkt. Lange Pfeile stehen für eine hohe Konkurrenz aus dieser Himmelsrichtung, kurze für eine geringe.

Für die Anpassung der Kronenradien an die Konkurrenz werden die HEMIS-Werte, die jeweils von 0 bis 1 reichen, für alle acht Radien aufsummiert und so skaliert, dass sie in ihrer Summe eins ergeben. Das Ergebnis ist ein relativer Konkurrenzwert für jeden Radius anteilig an der Gesamtkonkurrenz aller 8 Radien (Formel 4-19).

$$KFaktor_i = \frac{HEMIS_i}{\sum_{i=1}^n HEMIS_i} \quad \text{Formel 4-19}$$

$KFaktor_i$ = relativer Konkurrenzwert für den Radius i – relative competition index at radius i

$HEMIS_i$ = HEMIS-Wert für den Radius i – HEMIS value for radius i

In Abbildung 4-56 C ist das Ergebnis der Radienanpassung illustriert. Die acht ursprünglichen Radien der radiärsymmetrischen Krone sind dabei mit eingezeichnet. Da das quadratische Mittel aller acht Radien nach Formel 4-20 berechnet wird, muss die plastisch angepasste Krone dieselbe Quadratsumme der Radien r_i aufweisen, um annähernd flächenkongruent zur mittleren Krone (Abbildung 4-56 B) zu sein.

$$R_{\text{mitt}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 r_i^2}{8}} \quad \text{Formel 4-20}$$

R_{mitt} = quadratisches Mittel aller 8 Kronenradien [m] – quadratic mean of 8 crown radii [m]
 r = Einzelradius [m] – single crown radius

Der neue Radius berechnet sich demgemäß nach der Formel 4-21. Dabei wird der „harte Kern“ bzw. das untere 1%-Perzentil und der „variable Teil“ der Kronenradien unterschieden, der sich aus der Differenz zwischen dem 99%-Perzentil und dem 1%-Perzentil nach Formel 4-21 unter Nutzung der dreifachen Standardabweichung errechnet.

$$\text{Radius}_{\text{plast } i} = \sqrt{\frac{QS_{\text{harter Kern}} + QS_{\text{variabler Teil}} \cdot \text{KFaktor}_i^2}{8}} \quad \text{Formel 4-21}$$

$\text{Radius}_{\text{plast } i}$ = neuer Kronenradius an der Stelle i [m] – new crown radius at position i [m]

$QS_{\text{harter Kern}}$ = Summe der Radiusquadrate des „Harten Kerns“ [m²] – sum of squares of the „invariant core“ [m²]

$QS_{\text{variabler Kern}}$ = Summe der Radiusquadrate des „variablen Kerns“ [m²] – sum of squares of the „plastic core“ [m²]

KFaktor_i = relativer Konkurrenzwert für den Radius i – relative competition value for radius i

Der Quadratsumme des „Harten Kerns“, welche die unveränderliche Radienlänge beschreibt, wird die Quadratsumme des variablen Teils hinzugezählt, die vorher mit dem quadrierten Konkurrenzfaktor gewichtet wird. So wird den Radien in Himmelsrichtungen mit hoher Konkurrenz eine größere Länge zugewiesen und den Radien in Himmelsrichtungen mit niedriger Konkurrenz eine kleinere. Auch wird dabei die gesamte Projektionsfläche des Kronenschnittes gleich der Projektionsfläche der rotationsförmigen SILVA-Krone gehalten, bei der alle Radien gleich lang waren.

Diese Konkurrenzanpassung der Krone durch nachträgliches Einführen einer Streuung der Kronenradien wird für jeden Baum in der Höhe seines breitesten Durchmessers der ursprünglichen SILVA-Krone durchgeführt (Abschnitt 4.4.2). Zum Kronenansatz und zur Spitze hin werden diese Werte linear interpoliert, wobei am Kronenansatz eine verkleinerte Abbildung des verformten Kronenquerschnitts zur Interpolation benutzt wird.

Somit ergibt sich eine plastisch verformte Krone des Baumes zum Startzeitpunkt, die das neu entwickelte Kronenmodell nutzt.

Die Kronenradien werden anschließend linear bis zum Alter eins interpoliert, womit die Kronendurchmesserentwicklung in verschiedenen Himmelsrichtungen rekonstruiert ist.

4.4.4 Modelle zur Prognose der vertikalen Astposition

Models for prediction of the vertical branch position

Die Modellierung der vertikalen Astposition beschränkt sich auf die Nachbildung der Abstände zwischen den Astquirlen. Internodialäste oder Unterschiede der Quirläste in ihrer vertikalen Position am Quirl selbst werden nicht nachgebildet, da der Einfluss auf die Holzqualität wenig relevant ist.

Wie bei allen Modellteilen in AMOK ist für eine dreidimensionale Simulation über die Zeit sowohl eine Fortschreibung als auch eine Rekonstruktion der Äste notwendig. Da das Baum- und Astwachstum meist von einem Startbestand in einem definierten Alter t in die Zukunft simuliert wird, muss die Verteilung und Position der Äste bis zu diesem Startzeitpunkt rekonstruiert werden. Erst danach erfolgt die Prognose. Dementsprechend gliedert sich auch die Prognose der vertikalen Astposition in zwei Komponenten: eine Prognosekomponente, die in die Zukunft gerichtet ist und eine Rekonstruktionskomponente, die aufgrund der Ausgangsdimension des Baumes und weiterer Informationen eine plausible Simulation der in der Vergangenheit gebildeten Astquirle erlaubt.

Rekonstruktion der Quirlabstände

Die jährliche Bildung eines Astquirles bei der Fichte erleichtert die Simulation der Quirlabstände, die am Baum vor Beginn der Fortschreibung angelegt werden, beträchtlich. Durch die bereits durchgeführte Rekonstruktion des Höhenwachstums in Jahresschritten (Abschnitt 4.4.3) werden die Quirle gemäß den berechneten jährlichen Triebblängen des Stammes verteilt. Damit sind die vertikalen Astpositionen rekonstruiert.

Fortschreibung der Quirlabstände

Bei der Prognose der Quirlabstände wird sehr ähnlich vorgegangen, mit dem Unterschied, dass bei der Berechnung der neu gebildeten Quirlabstände voll auf das Höhenwachstumsmodell des Waldwachstumssimulators SILVA zurückgegriffen werden kann (siehe Unterkapitel 3.3). Der simulierte Höhenzuwachs des Baumes gibt wie bei der Rekonstruktion die Quirlabstände vor. Über Interpolation wird dabei auf den jährlichen Zuwachs geschlossen, da der Höhenzuwachs von SILVA in 5-jährigen Intervallen simuliert wird. Für eine plausible Berechnung zwischen den 5-Jahres-Schritten wird nicht linear, sondern entlang der Höhenpotenzialkurve vorgegangen.

4.4.5 Modelle zur Prognose der horizontalen Astposition

Models for prediction of the horizontal branch position

Die horizontale Astposition wird in AMOK ausschließlich für Quirläste von einem Mindestdurchmesser von 5 mm bestimmt, da dünnere Äste bei der Fichte meist nicht lange leben und aufgrund des geringen erreichten Durchmessers wenig qualitätsrelevant sind.

Die Berechnung der horizontalen Astposition setzt dabei eine Schätzung der Astzahl pro Quirl sowie der Verteilung der Äste im Azimut voraus.

Da beide Größen nicht direkt in Abhängigkeit von der Konkurrenz modelliert werden, kommen in der Rekonstruktion und der Prognose dieselben Modellkomponenten in der Simulation von Astzahl und -verteilung zum Einsatz.

Modellierung der Astzahl pro Quirl

Die Astzahl pro Quirl ist abhängig von den neu zu Trieben ausgetriebenen Knospen an der Baumspitze und der Mortalität, die in einem eigenen Modellteil besprochen wird.

Als Datensatz zur Modellentwicklung dient das Kollektiv B, das sich durch lange grüne Kronen und entsprechend alte Äste (bis 97 Jahre) besonders zur Modellierung eignet.

Von den 2272 erfassten Astquirlen werden 70% (1603 Quirle) zur Parametrisierung herangezogen. An den übrigen 30% der Daten (669 Quirle) erfolgt die Modellvalidierung.

Der verwendete lineare Modellansatz bildet die Astzahl pro Quirl als Funktion der Länge des Vorjahrestriebes nach (Formel 4-22).

$$nAst_t = a \cdot b + TL_{t-1} \quad \text{Formel 4-22}$$

$nAst_t$ = Astzahl pro Quirl (Äste > 5 mm) zum Zeitpunkt t – number of branches (> 5mm) per whorl
 TL_{t-1} = Trieblänge im Vorjahr – shoot length of proceeding year
 a, b = Regressionsparameter – regression parameters

Die Regressionsparameter sind in folgender Tabelle dargestellt:

	nicht standardisierte Koeffizienten <i>non-standardized coefficients</i>		T	Signifikanz <i>significance</i>
	B	Standardfehler <i>standard error</i>		
a	2,83350609	0,07969695	35,55350746	0,000
b	4,027260221	0,199655659	20,17102968	0,000

Das Modell erreicht ein korrigiertes Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,202$, was deutlich macht, dass die Astzahl pro Quirl überwiegend endogen kontrolliert ist und durch exogene Einflüsse nur in begrenztem Rahmen beeinflusst wird. Die Modellanpassung und die Residuenverteilung sind in Abbildung 4-57 illustriert.

Einige nichtlineare Modelle zur Berechnung der Astzahl pro Quirl, unter anderem eines, das von COLIN und HOULLIER (1992) vorgeschlagen wird, wurden als Alternativen getestet. Es ergaben sich jedoch geringere Bestimmtheitsmaße, sodass sie verworfen wurden.

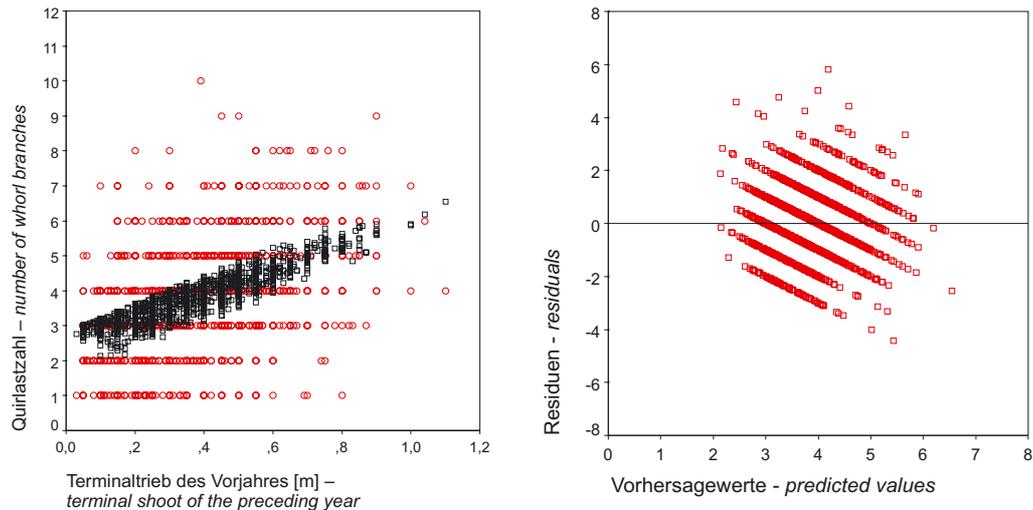


Abbildung 4-57: Modellanpassung (links) und Residuenverteilung (rechts) des Modells zur Schätzung der Astzahl pro Quirl. *Fit (left) and residuals (right) of the branch frequency model.*

Um den hohen Anteil der nicht erklärten Schwankung der Astzahl bei der Simulation berücksichtigen zu können, wird die beschriebene Modellierung des Erwartungswertes um ein Residuenmodell ergänzt (Methodik siehe Abschnitt 3.4.2). Mit dessen Hilfe kann in der Simulation die natürlich beobachtete Streuung der Werte um die Regressionskurve über einen Zufallsprozess bei der Erzeugung der Astzahlen berücksichtigt werden.

Die Residuen zeigen eine homoskedastische Verteilung (Abb. 4-57 rechts), sodass für das Residuenmodell ein Ansatz benutzt wird, der die simulierten Astzahlwerte in einer Normalverteilung um den Erwartungswert ausstreut. Die Verteilungsfunktion wird dabei über die Standardabweichung aller Werte skaliert, die bei 1,33 liegt.

Modellierung der Azimutverteilung am Quirl

Die Verteilung der Äste am Quirl nach der Himmelsrichtung wird so modelliert, dass zuerst die Astzahl am Quirl geschätzt wird und die Äste anschließend im gleichen Winkelabstand um den Stamm verteilt werden. Diese Annahme beruht auf der beobachteten Gleichverteilung der Äste (s. Kapitel 4.3.3). Formel 4-23 gibt den Berechnungsweg wieder.

$$\text{Winkelabstand zwischen den Ästen} = \frac{360^\circ}{\text{Anzahl}} \quad \text{Formel 4-23}$$

4.4.6 Modelle zur Prognose des Astwinkels

Models for the simulation of branch angle

Zur Berechnung des Astwinkels werden zwei Modelle vorgestellt, die gleichermaßen in der Rekonstruktion und in der Fortschreibung eingesetzt werden. Ein Modell für den linearen Astwinkel vom Astansatz bis zur Astspitze und eine Modell für den realen Astansatzwinkel auf den ersten 25 cm vom Stammmantel entlang der Astachse.

Linearer Astwinkel

Der lineare Astwinkel AW_{lin} wird zur Umrechnung der linearen Astlänge L_{lin} in die Projektionslänge L_{proj} benötigt. Die Datengrundlage zur Erstellung des Modells bilden die kronenspannungsfrei gewachsenen Fichten des Datenkollektivs B.

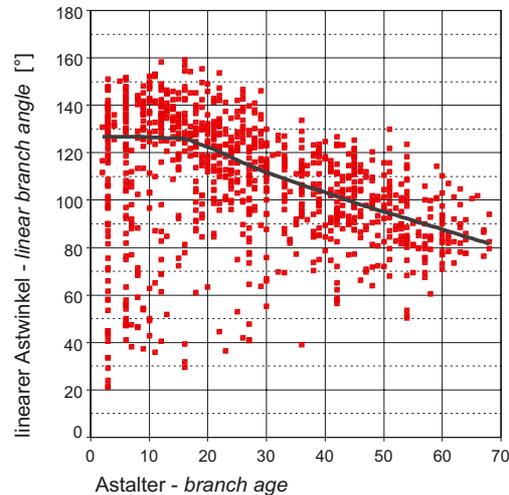


Abbildung 4-58: Linearer Astwinkel in Abhängigkeit vom Astalter. Die mittlere Tendenz der Daten ist über einen LOWESS-Ausgleich ermittelt. *Linear branch angle over branch age. The overall tendency of the data is given by a non-parametric LOWESS regression.*

Wie in Abbildung 4-58 zu sehen ist, ist der Datensatz geprägt von vielen sehr kleinen Winkelwerten im oberen, jungen Kronenbereich. Diese stark hängenden Äste weichen stark von der üblichen Astwinkelstruktur ab und sind eher unwichtig für den Kronenaufbau der Fichte. Sie kommen zustande, wenn Äste anbrechen und wieder festwachsen oder wenn Äste gar kein plagiotropes Wachstum entwickeln und „gummiartig“ am Baum hängen. Dies kommt besonders häufig bei schwachen Ästen und Internodialästen vor, sodass der Einfluss solcher Äste auf die Holzqualität auch nur von untergeordneter Bedeutung ist. Eine LOWESS-Anpassung mit 60% der Werte zeigt die eigentliche zentrale Tendenz der Daten, der ein Modell folgen sollte, um verzerrungsfreie Ergebnisse für die große Mehrheit aller Astwinkel zu liefern. Auch nach der Entfernung aller Internodialäste bei der parametrischen Regression verhindern die Ausreißer noch eine Annäherung der parametrischen Regressionskurve an LOWESS-Anpassung.

Zur Ausschaltung des Einflusses der Ausreißer werden diese klassifiziert und aus dem Datensatz entfernt. Dies geschieht durch eine Klassifizierung der Daten in sieben gleich große Gruppen nach dem Astalter mit der Berechnung der 5%-Perzentile jeder Klasse. Ein linearer Ausgleich dieser Perzentilwerte nach Formel 4-24 bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,72 ergibt eine Klassifizierungs-Grenze, die dazu dient, auffällig kleine Astwinkel als Ausreißer zu erkennen und aus der Regression auszuschließen.

$$AW_{lin}perzentil = a_1 \cdot Aalter + a_0$$

Formel 4-24

Methode zum Ausschluss der Ausreißer - *Method for the exclusion of outliers:*

$AW_{lin}perzentil$ = linearer Ausgleich der Astwinkelperzentile – linear percentil of branch angle

Aalter [Jahre] – branch age [years]

$$a_0 = 92,495$$

$$a_1 = -0,469$$

Dieser bereinigte Datensatz, der noch 879 Einzelwerte enthält, wird zur Regression herangezogen. Ein lineares Modell (Formel 4-25) zeigt einen plausiblen Ausgleich (Abb. 4-59) mit weitgehend unverzerrter Schätzung bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,47. Die LOWESS-Annäherung wird gut getroffen, wie im rechten Teil der Abbildung zu sehen ist. Nichtlineare Ausgleichsfunktionen erbrachten keine besseren Bestimmtheitsmaße.

$$AW_{lin} = b_0 \cdot Aalter + b_1$$

Formel 4-25

AW_{lin} = linearer Astwinkel [°] – linear branch angle [°]

Aalter [Jahre] – branch age [years]

$$b_0 = -0,7981$$

$$b_1 = 136,915$$

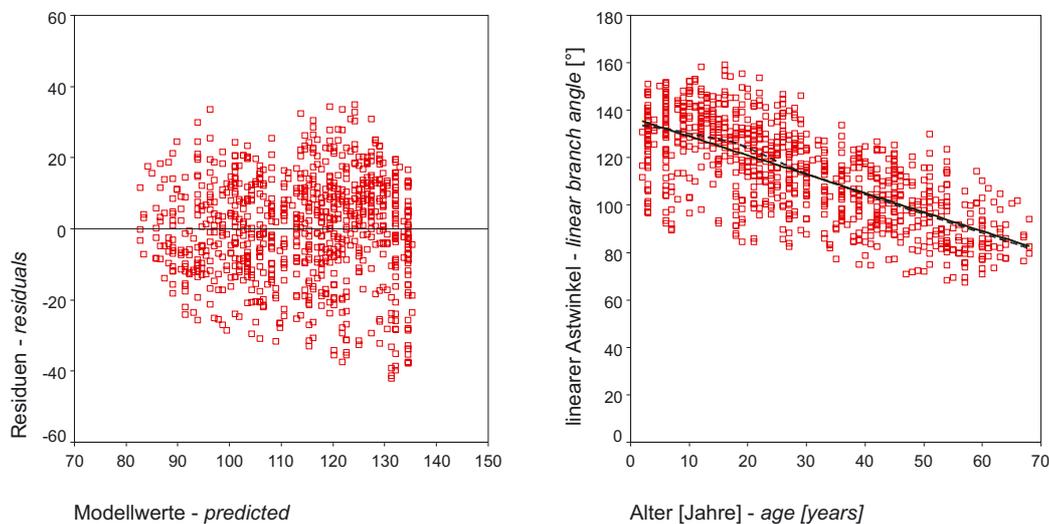


Abbildung 4-59: Residuen (links) und Modellanpassung (rechts) des Modells zur Schätzung des linearen Astwinkels. Die zusätzlich eingezeichnete LOWESS-Kurve zeigt ein weitgehend verzerrungsfreies Modell, bis auf den Bereich von 10 bis 25 Jahren. Dort wird der Astwinkel leicht unterschätzt.

Residuals (left) and fit (right) of the model for estimation of the linear branch angle. The LOWESS curve shows an model nearly free of distortions, except the range between 10 to 25 years. There the branch angle is slightly underestimated.

Die Funktion schneidet die x-Achse bei 170 Jahren. Eine Alternative wäre ein Modell mit Wendepunkt, die sich asymptotisch der x-Achse annähert. Da dieses Astalter in der Simulation jedoch nie erreicht wird, wird die Modelleinschränkung durch den linearen Modellansatz in Kauf genommen.

Durch das Astalter als einzige Variable hat der simulierte Astwinkel eine eindeutige Entwicklungsrichtung und kann bei einer Simulation nur fallen, aber niemals steigen, wenn der Ast älter wird. Dies bildet das typische Erscheinungsbild von Fichten nach, bei denen die Äste an der Baumspitze nach oben gerichtet sind und sich mit zunehmendem Astalter immer mehr nach unten neigen.

Da der lineare Astwinkel in der Simulation lediglich zur Umrechnung der Astlängen herangezogen wird und selbst keinen direkten Einfluss auf die holzqualitätsrelevanten Astparameter ausübt, wird kein Residuenmodell zur Nachbildung der Reststreuung erstellt. Damit bleibt die Richtungswirkung eindeutig und unplausible negative Astlängenzuwächse aufgrund eines zufällig deutlich höheren oder niedrigeren Winkelwertes im Zuge einer Residuenverteilung werden vermieden.

Realer Astansatzwinkel

Der Astansatzwinkel (AW_{real}) auf den ersten 25 cm von der Stammachse wird benutzt, um den Astwinkel zu definieren, der in der nächsten Periode in den Stammmantel des Baumes einwächst und damit die innere Astigkeit mitbestimmt.

Der Datensatz für die Modellbildung enthält 834 Astwinkelwerte aus dem Datenkollektiv der kronenspannungsfrei gewachsenen Fichte (Kollektiv B).

$$AW_{real} = a_0 + a_1 \cdot \ln(ld) + a_2 \cdot \ln(\text{Astalter}) + a_3 \cdot \ln(AD) \quad \text{Formel 4-26}$$

AW_{real} = Astansatzwinkel auf den ersten 25 cm am Stamm – branch insertion angle on the first 25 cm

ld = Längen-Durchmesser-Verhältnis [cm/mm] – length/diameter relation of the branch [cm/mm]

Astalter = branch age [years]

AD = Astdurchmesser [mm] – branch diameter [mm]

a_0, a_1, a_2, a_3 = Regressionsparameter – regression parameters

Die Koeffizientenstatistik des Modells (Tabelle 4-26) weist einen höchstsignifikanten Einfluss aller drei Variablen nach. Über den Beta-Wert der standardisierten Koeffizienten lässt sich ableiten, dass das Alter den Haupteinfluss auf den Astwinkel ausübt, gefolgt vom Astdurchmesser, der im Gegensatz zu den anderen beiden Variablen eine positive Wirkung auf den Astwinkel besitzt.

Tabelle 4-26: Koeffizientenstatistik AW_{real}

Parameter	Nicht standardisierte Koeffizienten <i>non-standardized coefficients</i>		Standardisierte Koeffizienten <i>standardized coefficients</i>		
	B	Standardfehler <i>standard error</i>	Beta	T	Signifikanz <i>significance</i>
a_0	124,979	4,467		27,979	0,000
a_1	-7,204	1,357	-0,207	-5,307	0,000
a_2	-13,498	0,898	-0,819	-15,024	0,000

Tabelle 4-26: Koeffizientenstatistik AW_{real}

Parameter	Nicht standardisierte Koeffizienten <i>non-standardized coefficients</i>		Standardisierte Koeffizienten <i>standardized coefficients</i>		
	B	Standardfehler <i>standard error</i>	Beta	T	Signifikanz <i>significance</i>
a_3	10,787	0,894	0,518	12,072	0,000

Interpretiert man die Wirkungsrichtung der einzelnen Variablen, so führt ein höheres Astalter zu geringeren Astwinkeln, das heißt alte Äste hängen stärker nach unten als junge. Lange, schlanke Äste, die hoher Konkurrenz ausgesetzt sind und deshalb mehr in ihr Längenwachstum als in das Durchmesserwachstum investieren, besitzen ebenfalls geringere Astwinkel. Dies korrespondiert gut mit dem positiven Einfluss des Astdurchmessers. Je höher dieser ist, desto höher die mechanische Stabilität des Astes und sein Widerstand gegen die Schwerkraft. Die Anpassung des Astwinkelmodells ist für alle Variablen in Abbildung 4-60 illustriert.

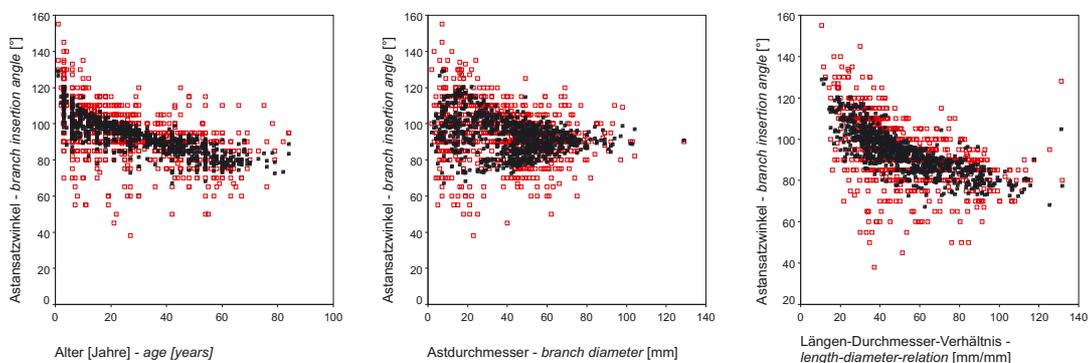


Abbildung 4-60: Modellanpassung des Astansatzwinkelmodells. Dargestellt sind die eingehenden Variablen Astalter (links), Astdurchmesser (mitte) und Längen-Durchmesser-Verhältnis (rechts). *Model fit for the branch insertion angle. Partial model fit for three main input variables, branch age (left), branch diameter, and the length-diameter-relation (right).*

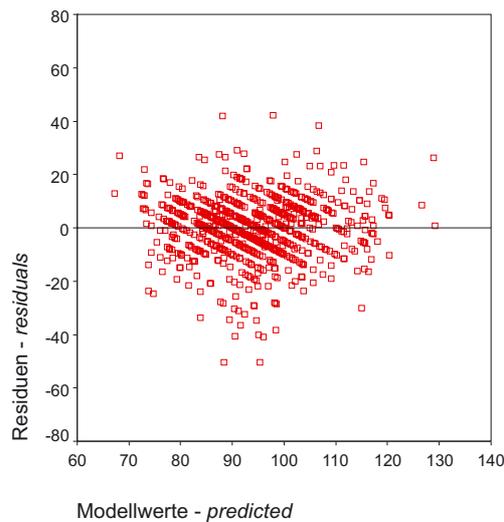


Abbildung 4-61: Die Residuen des Astansatzwinkelmodells verteilen sich homoskedastisch. *The residuals of the branch insertion angle are homoscedastically distributed.*

Im Residuenmodell wird zur Verteilung der Reststreuung eine Normalverteilung verwendet, die über den Erwartungswert aus Formel 4-26 und über die Standardabweichung bestimmt wird. Durch die homoskedastische Residuenstruktur (Abb. 4-61) wird eine einheitliche Standardabweichung von 10,35 für alle Ausprägungen der Erwartungswerte angenommen.

4.4.7 Modelle zur Prognose der Astlänge

Models for prediction of branch length

Das Modellprinzip zur Nachbildung der Astlänge bzw. des Astlängenzuwachses besteht in der Begrenzung der Astlänge durch die Kronenhülle. Anstatt die Längenentwicklung eines jeden Astes als Ergebnis der Konkurrenz zu simulieren, werden in definierten Vertikalabständen von einem Meter Kronenschnitte konkurrenzabhängig in acht horizontalen Radien fortgeschrieben. Durch die Summe der Radien über alle Kronenschnitte hinweg wird die Kronenhülle definiert (siehe Abschnitt 4.4.2). Jedem einzelnen Ast wird aus der Dimension und der Wachstumsrate der zwei nächstgelegenen Kronenradien eines Schnittes seine Länge und sein Längenzuwachs mittels Interpolation zugewiesen.

Da bei dieser Vorgehensweise die Astlänge in ihrer Horizontalprojektion dem Kronenradius an dieser Stelle entspricht, werden die Begriffe Astlänge und Kronenradius im folgenden Kontext synonym gebraucht.

Rekonstruktion der Kronenradien und Äste

Für die Rekonstruktion der vergangenen Astlängenentwicklung wird auf die Rekonstruktion der Kronenradien zurückgegriffen, die bereits im Abschnitt 4.4.3 bei der Rekonstruktion der Baum- und Kronenmerkmale erläutert wurde.

Die Zuweisung einer projizierten Astlänge für jeden Ast erfolgt mittels Interpolation über eine kubische Splinefunktion entlang des Astazimuts für jeden Kronenschnitt. Zwischen den vertikalen Kronenschnitten wird über die Astansatzhöhe linear interpoliert. Die Berechnung der linearen Astlängen aus der projizierten Astlänge erfolgt trigonometrisch über Formel 4-27.

$$L_{\text{lin}} = \frac{L_{\text{proj}}}{\cos \varphi}$$

Formel 4-27

- L_{lin} = lineare Astlänge [cm] – linear branch length [cm]
 L_{proj} = Horizontalprojektion der Astlänge [cm] – horizontal projection of branch length [cm]
 φ = Winkelabweichung von 90° mit $\varphi = ((AW_{\text{lin}} - 90^\circ) / 180^\circ) \pi$ – deviation of angle from 90°

Dynamische Fortschreibung der Kronenradien und Äste

Die Längenveränderung der Kronenradien wird über ein mehrstufiges Modell nach dem „Potential Modifier Principle“ geschätzt. Es basiert auf der Annahme, dass das Längenwachstum von Fichtenästen durch die Hauptfaktoren Standort, Astalter, Baumalter und Konkurrenz bestimmt wird, wie bereits in Abschnitt 4.3.5 diskutiert wurde. Das vorgestellte Modell geht nicht explizit auf genetische Einflüsse ein, sondern berücksichtigt diese nur im statistischen Rauschen der Reststreuung.

Das Potenzial für den Trieb­längen­zu­wachs der Äste wird aus Messungen an Solitär­fichten hergeleitet, die von LÄSSIG (1991) untersucht wurden (siehe Abschnitt 4.3.4). Solitäre unterliegen definitionsgemäß keiner Konkurrenz durch andere Bäume. Es wird angenommen, dass solche konkurrenzfrei gewachsenen Äste das standörtliche Potenzial hinsichtlich ihres Längenwachstums voll ausreizen können, weshalb sich anhand von Solitär­ästen ein solches Potenzial ableiten lässt.

Der Ast­längen­zu­wachs ist jedoch vor allem vom Alter des Astes abhängig. LÄSSIG stellt den Einfluss des Astalters auf den jährlichen Trieb­längen­zu­wachs von Solitären grafisch dar und gleicht den Zusammenhang mit einer logarithmischen Funktion aus, die jedoch bei höheren Astaltern die tatsächlich beobachteten Trieb­längen unterschätzt (Abb. 4-62).

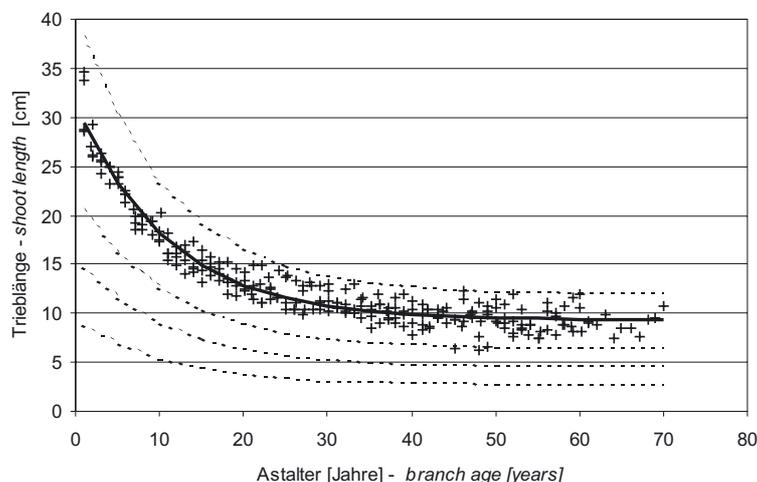


Abbildung 4-62: Ast­längen­zu­wachs von konkurrenz­frei­en Solitär­ästen mit zunehmendem Astalter (nach LÄSSIG 1991). Branch length increment of competition-free solitary branches with increasing branch age (LÄSSIG 1991).

Die mithilfe von data-retrieving-Methoden aus der Grafik von LÄSSIG (1991) 240 exzerpierten Wertepaare lassen sich mit einem höheren Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,942$ und einer besseren Kurvenanpassung durch eine Exponentialfunktion beschreiben (Formel 4-28, Abb. 4-62).

$$zl = a + b \cdot e^{(-c \cdot \text{Astalter})}$$

Formel 4-28

zl = jährlicher Trieblängenzuwachspotenzial [cm] – potential of yearly branch length increment [cm]
 Astalter [Jahre] – branch age [years]
 a, b, c = Regressionsparameter – regression parameters

Parameter <i>parameters</i>	Schätzwert <i>estimate</i>	asymptotischer Standardfehler <i>asymptotic standard error</i>	asymptotisches 95%-Konfidenzintervall <i>asymptotic 95% confidence interval</i>		Bestimmtheitsmaß <i>coefficient of determination</i>
			unteres – <i>lower</i>	oberes – <i>upper</i>	
a	9,329521160	0,143077106	9,047655826	9,611386494	R ² = 0,94244
b	20,125348570	0,352619957	19,430678789	20,820018352	
c	10,923689920	0,401265288	10,133187668	11,714192171	

Deutlich zeigt sich eine anfängliche rasche Abnahme der Trieblängenzuwächse bis zu einem Einschwingen der Werte (Abb. 4-62, durchgezogene Linie). Die Funktionsparameter in Formel 4-28 lassen sich folgendermaßen interpretieren:

Der y-Achsen-Abschnitt a definiert eine untere Asymptote, der sich die Trieblängenwerte mit zunehmendem Astalter nähern. Über die Summe der Parameter a und b lässt sich auf die maximale Trieblänge schließen, die von dem betrachteten Ast erreicht werden kann. Der Parameter c beschreibt die rein altersbedingte Dämpfung des Längenwachstums.

Da die Daten Lässigs nur einen Bruchteil der vorkommenden Fichtenstandorte repräsentieren, gilt das darüber beschriebene Potenzial ebenfalls nur auf diesen Standorten.

Um auch Standorte mit höherem oder geringerem Wuchspotenzial nachbilden zu können, wird der Akrotoniegrad als Brücke genutzt, um das Astlängenzuwachstmodell an das Standort-Leistungs-Modell von SILVA zu koppeln und so Aussagen zum Astlängenwachstum für alle Standorte treffen zu können, die auch mit dem Standort-Leistungsmodell abgedeckt werden.

Der Akrotoniegrad, der als das Verhältnis des jährlichen Höhenzuwachses am Terminaltrieb zum jährlichen Längenzuwachs des ersten Seitentriebes definiert ist, wie bereits im Abschnitt 4.4.7 gezeigt wurde, lässt sich anhand von Bestandesbäumen ableiten.

Der Terminaltrieb und der einjährige Seittrieb entstammen einer sehr ähnlichen, in der Regel nahezu konkurrenzfreien Wuchssituation. Unter der Annahme, dass bei herrschenden und mit-herrschenden Fichten im Bestand die Konkurrenz an der Baumspitze minimal ist, sind diese Triebe mit Trieben an Solitären vergleichbar. SILVA besitzt bereits mit dem integrierten Standort-Leistungs-Modell ein bewährtes Instrument zur Prognose des Höhenwachstums in Abhängigkeit vom Standort. Mithilfe dieses SILVA-Modells und dem Akrotoniemodell ist es möglich, standortspezifische Potenzialfunktionen für das Astlängenwachstum zu definieren, welche die ganze Standortbreite abdecken, die auch in SILVA nachgebildet werden kann. In Abbildung 4-62 ist dies durch die gestrichelten Kurven angedeutet.

Ein Faktor, der in diesem Modell berücksichtigt werden muss, ist die Veränderung der Akrotonie mit dem Baumalter. Je älter eine Fichte wird, desto geringer wird ihr Akrotoniegrad. Alte Fichten bilden im Verhältnis zum ersten Seittrieb relativ kürzere Terminaltriebe, was sich in einer Abflachung der Krone mit zunehmendem Alter ausdrückt (s. Abschnitt 4.4.7).

Für die Modellierung der Akrotonie werden 366 Akrotoniebeziehungen von unterschiedlich alten Fichten aus den Datenkollektiven A, B und D herangezogen. Der funktionale Ausgleich des Zusammenhangs lässt sich durch eine Exponentialfunktion darstellen (Formel 4-29).

$$AG = b_1 \cdot e^{\left(\frac{(b_2 \cdot \text{Baumalter} - b_0) \cdot \text{TermL}}{\text{Baumalter}}\right)} \quad \text{Formel 4-29}$$

AG = Akrotoniegrad – degree of acrotony

TermL = Länge des Terminaltriebes [cm] – length of terminal shoot of the stem [cm]

Baumalter = Baumalter [Jahre] – tree age

b₀, b₁, b₂ = Regressionsparameter – regression parameters

Parameter <i>parameters</i>	Schätzwert <i>estimate</i>	asymptotischer Standardfehler <i>asymptotic standard error</i>	asymptotisches 95%-Konfidenzintervall <i>asymptotic 95% confidence interval</i>		Bestimmtheitsmaß <i>coefficient of determination</i>
			unteres – <i>lower</i>	oberes – <i>upper</i>	
<i>b₀</i>	0,069594234	0,027012642	0,016473317	0,122715152	R ² = 0,31559
<i>b₁</i>	1,263965810	0,086162638	1,094525205	1,433406416	
<i>b₂</i>	0,013210984	0,001736519	0,009796082	0,016625885	

Zusätzlich zum Einfluss des Baumalters zeigt sich auch ein signifikanter Einfluss der Terminaltrieblänge zu einem bestimmten Baumalter. Der Terminaltrieblängenzuwachs weist einen standorttypischen zeitlichen Verlauf mit einer früheren Kulmination auf guten Standorten auf und wird durch die Konkurrenz modifiziert, welcher der Baum ausgesetzt ist. Deshalb spiegelt das Verhältnis des Terminaltrieblängenzuwachses zu einem bestimmten Baumalter den standörtlich und konkurrenzbedingten allometrischen Entwicklungsstatus des Baumes wieder, wodurch neben dem Alter eine biologisch interpretierbare Einflussgröße ins Modell eingeht. Abbildung 4-63 zeigt die Residuen der Modellfunktion über den Modellwerten.

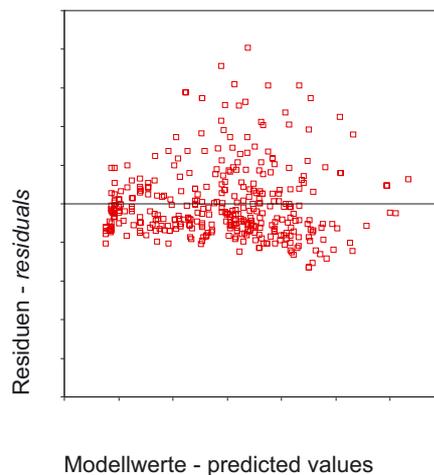


Abbildung 4-63: Residuenverteilung des Akrotoniemodells. *Residual distribution of the acrotony model.*

Der Modellausgleich über dem Baumalter und über der Terminaltrieblänge ist in Abbildung 4-64 dargestellt. Die Messwerte (nicht ausgefüllte Vierecke) sind dabei den Modellwerten (ausgefüllte Vierecke) hinterlegt, um die Modellanpassung beurteilen zu können.

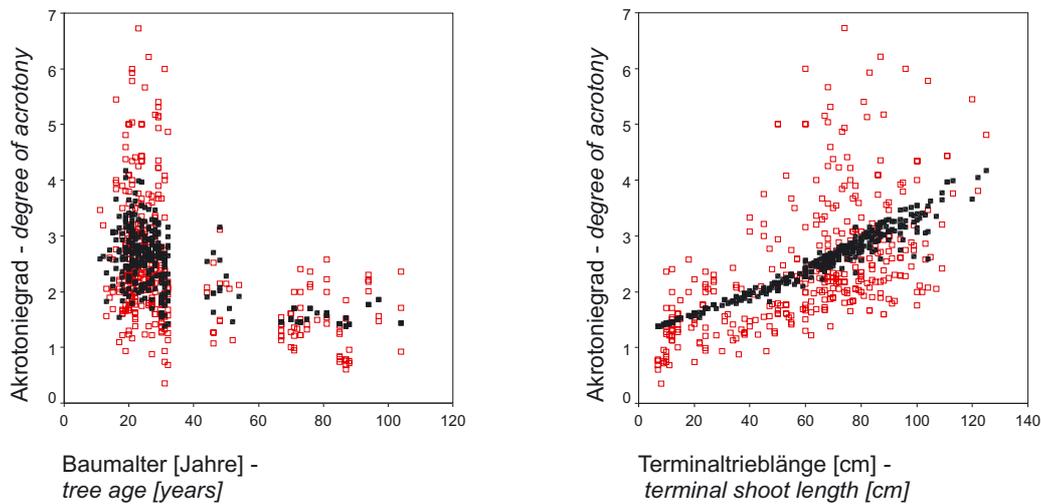


Abbildung 4-64: Modellanpassung des Akrotoniemodells: Dargestellt ist die Anpassung gegenüber den zwei Einflussvariablen Baumalter (links) und Terminaltrieblänge (rechts). *Fit of the acrotony model. The variables tree age (left) and terminal shoot length (right) are shown.*

Während ein steigendes Baumalter die Akrotonie wie erwartet abschwächt, führen lange Terminaltriebe zu einer niedrigeren Akrotonie. Das bedeutet, dass in Phasen, in denen der Terminaltrieb besonders stark wächst, die einjährigen Asttriebe nur einen unterproportionalen Zuwachs aufweisen. Auf die Autokorrelation der beiden Größen wird später noch eingegangen.

Die fehlenden Akrotoniewerte für Baumalter um 40 bzw. 60 Jahre im Parametrisierungsdatensatz beeinflussen die Kurvenform des Modells nur mäßig, da die Eckwerte im besonders jungen und alten Baumstadium abgedeckt sind. Allerdings wäre eine Ergänzung des Datensatzes trotzdem wünschenswert, da dadurch der funktionale Ausgleich noch stabiler würde.

Insgesamt zeigt das Modell eine plausible Schätzung, jedoch unterliegt der nachgebildete Zusammenhang einer hohen individuellen Varianz, was sich in dem relativ geringen Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,32$ widerspiegelt.

Unter der Annahme, dass der empirische abgeleitete Akrotoniegrad auch für die potenziellen Längen des Terminaltriebes und des Seitentriebes gilt, kann aus der Akrotoniefunktion (Formel 4-29) der mittlere potenzielle Akrotoniegrad bestimmt werden, indem statt der tatsächlich erreichten Terminaltrieblänge die potenzielle Terminaltrieblänge aus dem Standort-Leistungs-Modell von SILVA eingesetzt wird (Formel 4-30).

$$zl_{\text{pot}} = \frac{\text{TermL}}{\text{AG}} \quad \text{Formel 4-30}$$

- zl_{pot} = potenzielle Asttrieblänge im Astalter 1 [cm] – potential branch shoot increment at age 1 [cm]
- TermL = Terminaltrieblänge [cm] – length of the terminal shoot of the main axis of the stem [cm]
- AG = Akrotoniegrad – degree of acrotony

In Beispielrechnungen zeigt sich, dass bei Verwendung des mittleren potenziellen Akrotoniegrades das standörtliche Astlängenwachspotenzial unterschätzt wird, da nicht die längsten Äste pro Terminaltrieblänge erfasst werden. Deshalb wird in der Simulation der mittlere Akrotoniegrad um die 1,3fache Standardabweichung reduziert, wodurch sich plausible Potenzialwerte reproduzieren lassen. Abbildung 4-65 zeigt die Akrotoniefunktion und die darunter liegende Funktion abzüglich der 1,3fachen Standardabweichung, bei der sich die Schätzung der projizierten Astlänge mit dem Kronenradiusmodell in SILVA im Mittel deckt.

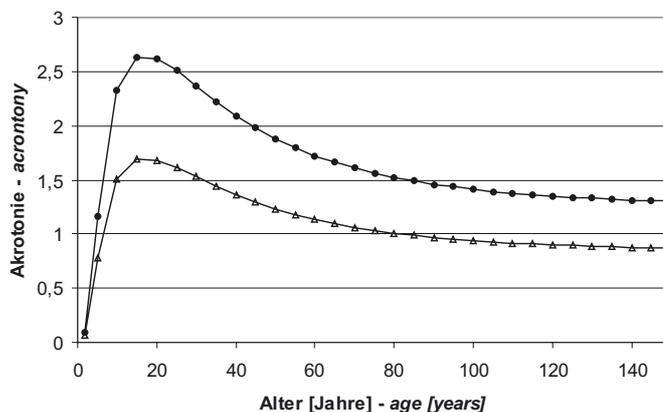


Abbildung 4-65: Akrotoniefunktion und die Funktion abzüglich der 1,3fachen Standardabweichung. *Acrotony function and the function reduced by 1.3th of the standard deviation.*

Die eingipflige Kurve über dem Astalter ist einem Autokorrelationseffekt zwischen der Terminaltrieblänge und dem Baumalter zuzuschreiben, da die Terminaltrieblängenentwicklung einer unimodalen Zuwachskurve über dem Baumalter folgt.

Die in der Simulation verwendete Funktion zur Schätzung des standörtlich möglichen Astlängenwachses ist in Formel 4-31 dargestellt.

$$\text{potatl} = \frac{\text{TermL}}{\text{AG} - 1,3 \cdot (a_1 \cdot \text{AG}^{a_2})} \quad \text{Formel 4-31}$$

- potatl* = potenzieller Asttrieblängenzuwachs [cm] – potential branch length increment [cm]
- TermL* = Terminaltrieblänge [cm] – length of the terminal shoot of the main axis of the stem [cm]
- AG* = Akrotoniegrad – degree of acrotony
- a₁* = 0,322
- a₂* = 1,1082

Damit ist das auf dem gegebenen Standort mögliche Potenzial für die Länge eines einjährigen Asttriebes beschrieben.

Im nächsten Schritt werden die Effekte von Standort und Ast- bzw. Baumalter kombiniert und ein potenzieller Asttrieblängenzuwachs bei einem definierten Astalter durch das Einsetzen von Formel 4-31 in Formel 4-28 geschätzt (Formel 4-32).

$$\text{Alterpot} = \text{potatl} \cdot \left(a_0 + a_1 \cdot e^{\left(\frac{1}{a_2} \cdot (\text{Schnittalter} - 1) \right)} \right) \quad \text{Formel 4-32}$$

Alterpot = altersgewogenes Astzuwachspotenzial [cm] – age dependent growth potential without competition

potatl = potenzieller Asttrieblängenzuwachs [cm] – potential branch length increment [cm]

Schnittalter = Alter des Baumes in Asthöhe – tree age at branch insertion height

a_0 = 0,31673951

a_1 = 0,68326048

a_2 = -10,923689920

Dieses altersgewogene Astzuwachspotenzial beinhaltet den Einfluss des Baumalters über die Akrotoniefunktion, den Standorteinfluss über die Kopplung zum Standort-Leistungs-Modell und den Einfluss des Astalters über die Dämpfungsfunktion aus den Solitärdaten. Damit lässt sich das standortspezifische Astlängenwachstum eines Solitärs bereits nachbilden.

Die noch fehlende Modellkomponente ist die Reaktion auf Konkurrenz. Das Nachlassen des Asttrieblängenwachstums bei zunehmender Konkurrenz wird anhand des Datenkollektivs D aus Zusmarshausen mit 537 Werten parametrisiert. Dabei wird eine Funktion aufgestellt, die das altersgewogene Potenzial in Abhängigkeit von der Konkurrenz reduziert (Formel 4-33).

$$zl = \text{Alterpot} \cdot ((\text{HEMIS} + a_0)^{a_1} - a_2 \cdot (\text{HEMIS} + a_0)) \quad \text{Formel 4-33}$$

zl = jährlicher Triebblängenzuwachs [cm] – yearly branch length increment

Alterpot = altersgewogenes Astzuwachspotenzial [cm] – age dependent growth potential without competition

HEMIS = HEMIS-Konkurrenzwert – HEMIS competition value

a_0, a_1, a_2 = Regressionsparameter – regression parameters

Parameter <i>parameters</i>	Schätzwert <i>estimate</i>	asymptotischer Standardfehler <i>asymptotic standard error</i>	asymptotisches 95%-Konfidenzintervall <i>asymptotic 95% confidence interval</i>		Bestimmtheitsmaß <i>coefficient of determination</i>
			unteres – <i>lower</i>	oberes – <i>upper</i>	
a_0	0,006220243	0,006221183	-0,006000803	0,018441289	$R^2 = 0,42552$
a_1	0,158619913	0,010344124	0,138299660	0,178940165	
a_2	0,913184609	0,034232065	0,845938294	0,980430925	

Der Parameter a_0 erwies sich als nicht signifikant. Er wurde jedoch trotzdem im Modell belassen, weil sich so deutlich bessere Anpassungswerte im Bestimmtheitsmaß und bei den mittleren quadratischen Abweichungen des Gesamtmodells erreichen ließen.

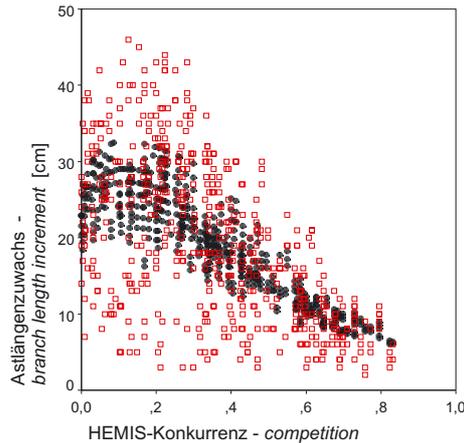


Abbildung 4-66: Anpassung des Modells zur Schätzung des Asttrieblängenzuwachses in Abhängigkeit von der Konkurrenz. *Adaptation of the shoot growth model against competition.*

In Abbildung 4-66 ist der funktionale Ausgleich des mittleren Asttrieblängenzuwachses bei definiertem Konkurrenzeinfluss dargestellt. Zusätzlich ist die Streuung des gesamten Datensatzes hinterlegt. Das Bestimmtheitsmaß des Ausgleichs beträgt 0,426. Das höchste Astlängenwachstum wird demnach nicht bei konkurrenzfreien Situationen, sondern bei mäßiger Konkurrenz im Bereich eines HEMIS-Wertes von 0,2 erreicht. Für die nicht erklärte Reststreuung wird ein Residuenmodell aufgestellt (Methodik siehe Abschnitt 3.4.2), das in einem stochastischen Prozess die Streuung als Normalverteilung um den Mittelwert simuliert. Dabei muss die heteroskedastische Residuenstruktur berücksichtigt werden, die ein Ansteigen der Streuung mit steigenden Schätzwerten reflektiert (Abb. 4-67).

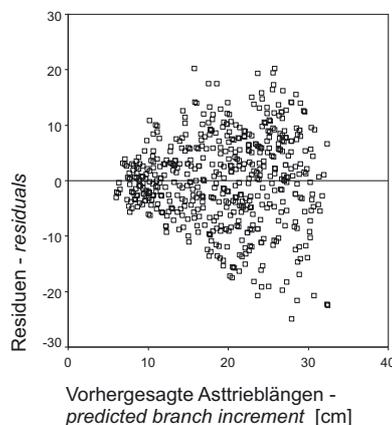


Abbildung 4-67: Residuenverteilung des Astlängenzuwachsmodells. *Residual distribution of the branch length increment model.*

Zur Nachbildung der Heteroskedastizität werden die Erwartungswerte des Modells aus Formel 4-33 in 10 Klassen unterteilt und die Standardabweichungen über den mittleren Erwartungswerten der einzelnen Klassen regressionsanalytisch ausgeglichen (Abb. 4-68, Formel 4-34)

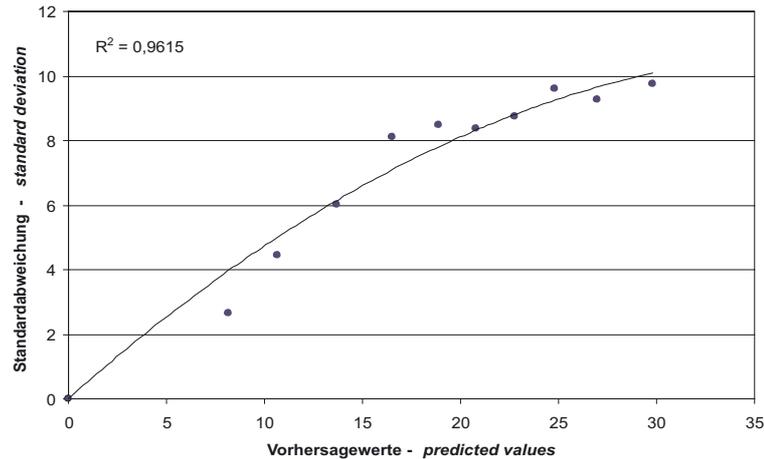


Abbildung 4-68: Residuenmodell zur Nachbildung der heteroskedastischen Residuenstruktur des Längenzuwachsmodells (Formel 4-33). *Residual model for prediction of the heteroscedastic residual structure of the branch length increment model (Formel 4-33).*

$$SD = a_2 \cdot PRED^2 + a_0 \cdot PRED \quad \text{Formel 4-34}$$

- SD = Standardabweichung – standard deviation
- $PRED$ = Vorhersagewerte – predicted values
- a_2 = $-0,0068$
- a_0 = $0,5423$

Die Zuweisung des tatsächlichen Längenzuwachses in der Simulation erfolgt nach einer Normalverteilung um den Erwartungswert mit der errechneten Standardabweichung aus Formel 4-34. Zuwächse nahe dem Erwartungswert besitzen dabei eine höhere Wahrscheinlichkeit als deutlich größere oder kleinere Werte, sodass das Mittel der Verteilung aller simulierter Astlängenzuwächse wieder dem Erwartungswert entspricht.

Das hier vorgestellte Modell wird zur Fortschreibung der linearen Länge der Kronenradien an den definierten Stützstellen verwendet, die wie Äste simuliert werden. Die Zuweisung des Längenzuwachses auf die einzelnen Äste erfolgt als Interpolation der linearen Astlängen benachbarter Kronenradien. Hierbei wird eine kubische Interpolation in der Horizontalen und eine lineare in der Vertikalen verwendet. Da die Astradien jedoch nur waagrecht definiert sind, muss der Astlängenzuwachs trigonometrisch nach Formel 4-35 in die Projektionslänge umgerechnet werden.

$$L_{proj} = L_{lin} \cdot \cos \varphi \quad \text{Formel 4-35}$$

- L_{proj} = Horizontalprojektion der Astlänge [cm] – horizontal projection of branch length [cm]
- L_{lin} = lineare Astlänge [cm] – linear branch length from insertion to tip
- φ = Winkelabweichung von 90° mit $\varphi = ((AW_{lin} - 90) / 180) \pi$ – deviation of angle from 90

Damit ist ein dynamisches Längenzuwachstmodell erstellt, das anhand des Baumalters, des Astalters und der Konkurrenz das Asttrieblängenwachstum nachbildet. Es ist über das Höhenwachstum des Baumes an das Standort-Leistungs-Modell gekoppelt und besitzt deshalb einen Aussagebereich, der alle in SILVA nachbildbaren Standorte umfasst.

Das Modell schreibt nicht die eigentlichen Einzeläste fort, sondern Kronenradien, die in Meterabständen der Krone angelegt sind und in acht Himmelsrichtungen berechnet werden. Das Längenzuwachstum der Einzeläste wird durch Interpolation der Kronenradien bestimmt.

4.4.8 Modelle zur Prognose des Astdurchmessers

Models for the simulation of branch diameter

Der Astdurchmesser wird bei der Rekonstruktion und der Fortschreibung auf unterschiedliche Art und Weise simuliert. Bei der Rekonstruktion wird der Astdurchmesserzuwachs in Abhängigkeit vom Astlängenzuwachs, von der Astlänge und der Position des Astes in der Krone geschätzt. Bei der Fortschreibung, für die Konkurrenzwerte aus dem HEMIS-Modell vorliegen, kommt ein Modell zum Einsatz, in das zusätzlich die Konkurrenzsituation mit eingeht.

Astdurchmesserrekonstruktion

Für die retrospektive Astdurchmessersimulation bei der Rekonstruktion wird ein dynamisches Modell entwickelt (siehe Abschnitt 3.4.2). Eine dynamische Modellierung des Astdurchmessers setzt Zuwachswerte zur Parametrisierung voraus. Da jedoch nur für die Äste des Datenkollektivs D und eine geringe Anzahl von Ästen des Datenkollektivs B gemessene Astjahrringdaten verfügbar sind, wird der straffe Zusammenhang zwischen der projizierten Astlänge und dem Astdurchmesser (s. Abschnitt 4.3.5) genutzt, um durch mathematische Differenzierung der Wachstumsdaten künstliche Zuwachswerte zu erzeugen. Die erste Ableitung der Wachstumsfunktion ergibt die für das dynamische Modell benötigte Zuwachskurve. Durch dieses Vorgehen steht eine breitere Datenbasis zur Verfügung, die auch alte Äste von großer Dimension auf den verschiedenen Standorten mit einschließt.

Der erste Schritt bei der Modellkonstruktion besteht in einem regressionsanalytischen Ausgleich des Astdurchmessers in Abhängigkeit von der projizierten Astlänge mittels einer Mitscherlich-Funktion (Formel 4-36). Dadurch lässt sich ein mittlerer Astdurchmesser in Abhängigkeit von der Astlänge schätzen. Es wird dieselbe Funktion getrennt für die Licht- und die Schattkrone parametrisiert, da sich die Längen-Durchmesser-Beziehung zwischen den Kronenteilen deutlich unterscheidet (siehe Tabelle 4-27). Die Kronenteile wurden anhand der Nadelmorphologie bei der Messung eingeteilt. Das Modell für die Lichtkrone baut auf 410, das Modell für die Schattkrone auf 188 Einzeldaten der Datenkollektive A und C auf. Ein vorgegebener mittlerer Mindestdurchmesser von 5 mm verbesserte die Modellanpassung deutlich und kann auch empirisch belegt werden, da bereits die Knospe eine entsprechende Dimension besitzt.

$$AD = a_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{L_{proj}}{a_2}} \right) + 5 \quad \text{Formel 4-36}$$

AD = Astdurchmesser [mm] – branch diameter [mm]

L_{proj} = projizierte Astlänge [m] – horizontal projection of branch length [m]

a₁, a₂ = Regressionsparameter – regression parameters

Tabelle 4-27: Parameterstatistik – *Parameter statistics*

Parameter <i>parameters</i>	Schätzwert <i>estimate</i>	asymptotischer Standardfehler <i>asymptotic standard error</i>	asymptotisches 95%-Konfidenzintervall <i>asymptotic 95% confidence interval</i>		Bestimmtheitsmaß <i>coefficient of determination</i>
			unteres – <i>lower</i>	oberes – <i>upper</i>	
Lichtkrone – <i>light crown</i>					
a ₁	114,61590365	5,681626117	103,44698935	125,78481796	R ² = 0,87461
a ₂	566,39676782	45,740269745	476,48075742	656,31277822	
Schattenkrone – <i>shade crown</i>					
a ₁	39,777794548	2,170371812	35,496084789	44,059504306	R ² = 0,76311
a ₂	206,38407717	21,683558439	163,60675061	249,16140373	

Das Bestimmtheitsmaß liegt bei dem Modell für die Lichtkronenäste mit $R^2=0,87$ über dem Bestimmtheitsmaß des Modells für die Schattenäste ($R^2=0,76$). Das Lichtkronenmodell (Abb. 4-69 links) zeigt eine heteroskedastische, das Schattenkronenmodell (Abb. 4-69 rechts) eine homoskedastische Residuenstruktur.

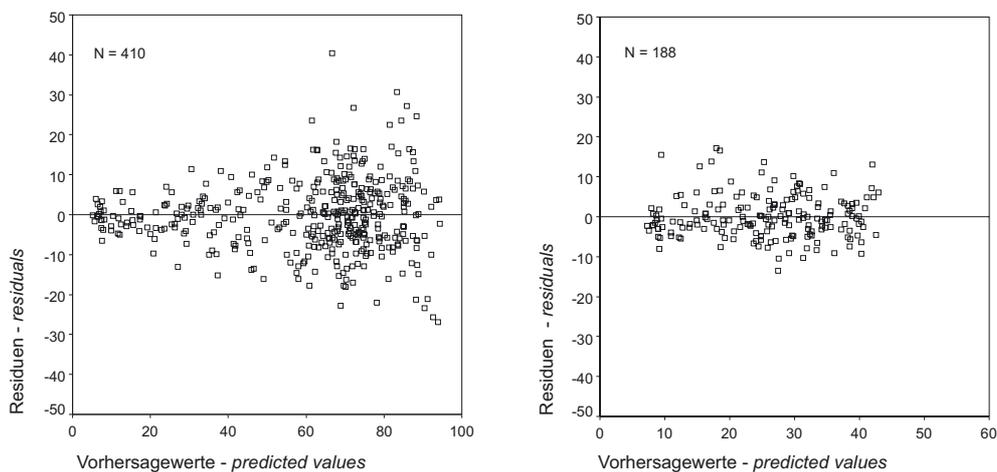


Abbildung 4-69: Residuenverteilung des in der Rekonstruktion verwendeten Modells zur Astdurchmesserschätzung in Abhängigkeit von der Astlänge für die Licht- (links) und die Schattenkrone (rechts). *Distribution of residuals for the branch diameter model subject to the branch length for light crown (left) and shadow crown (right).*

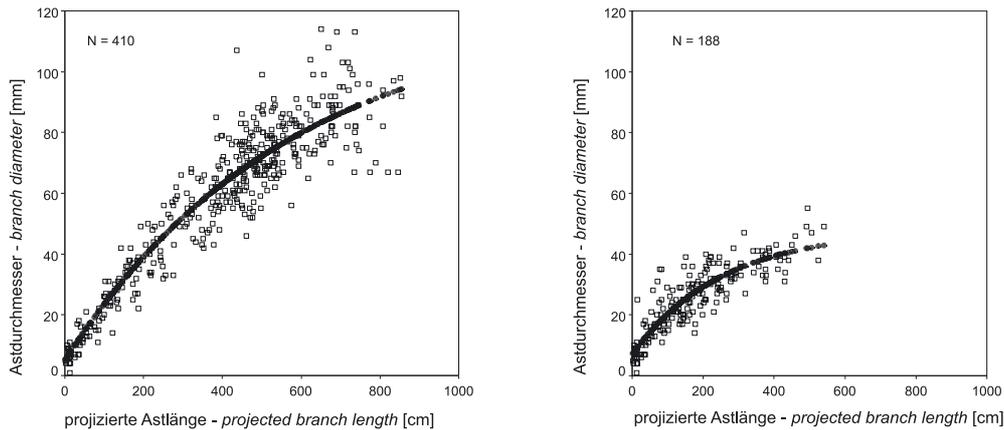


Abbildung 4-70: Modellanpassung des in der Rekonstruktion verwendeten Modells zur Astdurchmesserschätzung in Abhängigkeit von der Astlänge für die Licht- (links) und die Schattkrone (rechts). *Model fit of the branch diameter model subject to the branch length for light crown (left) and shadow crown (right).*

Bei der Darstellung der beiden Modellanpassungen wird deutlich, dass die Schattenäste (Abb. 4-70 rechts) im Vergleich zu den Lichtästen (Abb. 4-70 links) deutlich niedrigere Astdurchmesser bei gleicher Länge ausbilden.

Durch Ableitung der Funktion nach der Astlänge ergibt sich je eine Zuwachskurve (Formel 4-37), für die die Parameter der Licht- und Schattkrone aus Tabelle 4-27 gelten. Diese werden als Basis für das dynamische Modell benötigt.

$$zAD = \frac{a_1}{a_2} \cdot e^{-\frac{L_{proj}}{a_2}} \quad \text{Formel 4-37}$$

- zAD = Astdurchmesserzuwachs [mm/m] – branch diameter increment [mm/m]
- L_{proj} = projizierte Astlänge [m] – horizontal projection of branch length [m]
- a_1, a_2 = Regressionsparameter – regression parameters

Die Funktionen beschreiben den Astdurchmesserzuwachs pro Längenzuwachs bei einer gewissen projizierten Astlänge. Dadurch gehen sowohl der Astlängenzuwachs als auch die absolute Astlänge als Variablen in das Modell ein.

In Anhalt an PRETZSCH (1992) wird bei der Simulation die Baumkrone in einen Licht- und einen Schattenteil unterteilt, wobei die Lichtkrone die oberen zwei Drittel einnimmt. Diese Einteilung folgt der Kronenformmodellierung von SILVA. Entsprechend wird bei der Simulation die Formel 4-37 mit dem korrespondierenden Parametersatz für Licht- und Schattkrone verwendet.

Die Astdurchmessersimulation für die Rekonstruktion beschränkt sich auf eine Berechnung des mittleren ermittelten Astdurchmessers ohne Modell zur stochastischen Nachbildung der Residualstreuung. Dennoch beinhaltet das vorgestellte Modell eine gewisse Streuung, die vor allem auf unterschiedlichen Astlängenzuwächsen und der Verschiebung von Licht- und Schattkrone beruht. Damit steht ein Modell zur Rekonstruktion des Astdurchmesserwachstums vor Beginn der Prognose zur Verfügung.

Fortschreibung des Astdurchmessers

Das Modell zur Fortschreibung des Astdurchmessers ist ähnlich aufgebaut wie das Modell zur Astdurchmesser-Rekonstruktion, jedoch wird über eine Modellierung der Varianzkomponenten zusätzlich die Konkurrenz als Variable mit einbezogen. Das Vorgehen bei der Modellierung kann in vier Schritten charakterisiert werden. Zuerst wird analog zur Rekonstruktion ein Modell zur Nachbildung des Astdurchmesserzuwachses in Abhängigkeit vom Astlängenzuwachs und der Astlänge erstellt. Im zweiten Schritt werden durch eine Varianzkomponentenanalyse die Einflussfaktoren Astlängenwachstum und Konkurrenz getrennt und die unerklärte Reststreuung ermittelt. Im dritten Schritt erfolgt die Parametrisierung eines Modells zur Beschreibung des Konkurrenzeinflusses auf das Astdurchmesserwachstum anhand von gemessenen Zuwachswerten. Der vierte Schritt stellt die Zusammenführung der ersten Schritte in einem Varianzkomponentenmodell dar.

Es werden analog zur Rekonstruktion des Astdurchmessers Längen-Durchmesser-Beziehungen vieler Äste benutzt, um eine mittlere Beziehung zwischen Astdurchmesser und Astlänge zu ermitteln. In diesem Modell wird auf die lineare Astlänge zurückgegriffen. Dazu stehen 3855 Werte aus allen Datenkollektiven zur Verfügung. Nach Beseitigung unplausibler Ausreißer wird durch eine zufällige Auswahl die Hälfte der Werte als Parametrisierungsdatensatz ausgewählt. Die andere Hälfte der Daten bleibt der Modellvalidierung vorbehalten. Aus dem Datensatz sind alle toten, gebrochenen und internodialen Äste eliminiert. Insgesamt zehn Datenpaare wurden zusätzlich als Ausreißer verworfen, da sie auffällig hohe Astdurchmesser pro Astlänge aufwiesen. Es handelte sich dabei um Steiläste und Seitenäste, die nach einem erfolgten Wipfelbruch durch Akrotoniestörungen besonders im Durchmesserwachstum gefördert waren.

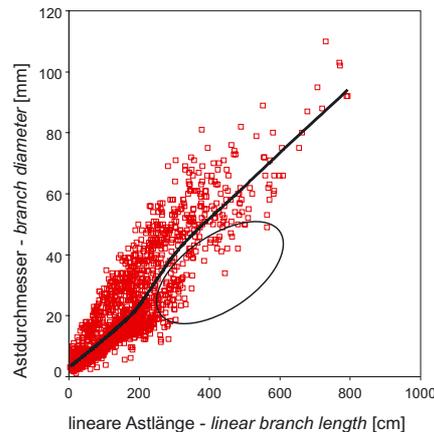


Abbildung 4-71: Parametrisierungsdatensatz des Astdurchmessermodells bei der Fortschreibung. Die Ausgleichsgerade nach dem LOWESS-Verfahren zeigt, dass lange Äste mit geringem Durchmesser unterrepräsentiert sind. Der Fehlbereich ist mit der Ellipse markiert. *Parameterization data of the branch diameter model for dynamic simulation. The LOWESS fit line shows that long branches with a small diameter are underrepresented. The region with the lack of data is marked by an ellipse.*

In Abbildung 4-71 sind die zur Parametrisierung herangezogenen Astdurchmesser-Längenpaare dargestellt. Zusätzlich eingezeichnet ist ein LOWESS-Ausgleich, der die mittlere Tendenz der 1750 Wertepaare aufzeigt. Offensichtlich liegt ein Datensatz vor, der eine unbalancierte Datendichte entlang der x-Achse aufweist, was durch den Knick in der LOWESS-Kurve deutlich wird. Dieser Effekt kommt, trotz des großen Datenumfangs, durch das naturbedingte Fehlen länger Äste mit hohen Längen-Durchmesser Werten (L/D-Werten) zustande. Diese sterben im

Laufe der Zeit ab, bevor sie eine ausreichende Länge erreichen können. Der Fehlbereich ist in der Abbildung durch die Ellipse hervorgehoben. Da schlanke Äste mit höheren Astlängen unterrepräsentiert sind, bringt dies eine Dominanz von gering konkurrenzierten Ästen mit geringen L/D-Werten in diesem Bereich mit sich. Dieses Problem der Datenverteilung führt dazu, dass sich nichtlineare Wachstumsfunktionen ohne Wendepunkt, wie die Mitscherlich-Funktion oder Potenzfunktionen, nicht an die Daten anpassen lassen. Deshalb wird auf eine Chapman-Richards-Funktion zurückgegriffen (Formel 4-38), die mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,78 eine gute Anpassung an den Datensatz ermöglicht (Abb. 4-72, links). Jedoch kann auch diese Funktion die Dominanz der gering konkurrenzierten Äste bei hohen Astlängen nicht gänzlich kompensieren, was in Abbildung 4-72 (rechts) durch die Verzerrung im Bereich der Vorhersagewerte von etwa 20 bis 40 mm durch die LOWESS-Kurve angezeigt wird.

$$AD = a_0 + a_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{L_{lin}}{a_2}} \right)^{a_3} \quad \text{Formel 4-38}$$

AD = Grünastdurchmesser mit Rinde [mm] – green branch diameter over bark [mm]
 L_{lin} = lineare Astlänge [cm] – linear branch length [cm]
 a_0, a_1, a_2 = Regressionsparameter – regression parameters

Parameter parameters	Schätzwert estimate	asymptotischer Standardfehler asymptotic standard error	asymptotisches 95%-Konfidenzintervall asymptotic 95% confidence interval		Bestimmtheitsmaß coefficient of determination
			unteres – lower	oberes – upper	
a_0	6,440757944	0,520353244	5,420176846	7,461339042	$R^2 = 0,78067$
a_1	82,539604859	4,387754471	73,933798464	91,145411255	
a_2	246,54364874	23,185799622	201,06879276	292,01850473	
a_3	2,406902700	0,198808086	2,016975709	2,796829691	

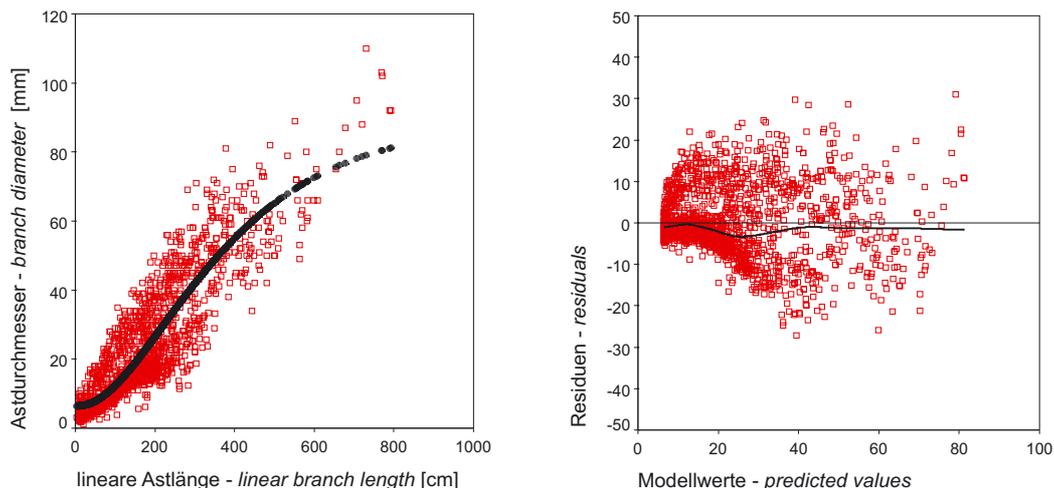


Abbildung 4-72: Anpassung (links) und Residuen (rechts) des Astdurchmessermodells – *model fit (left) and residuals (right) of the model for the prediction of branch diameter from branch length.*

Zur Nachbildung der nicht erklärten Reststreuung wird ein Residuenmodell entwickelt. Dazu werden die vorhergesagten Werte in zehn Klassen eingeteilt und die mittlere Standardabweichung der Residuen pro Klasse berechnet. Ein regressionsanalytischer Ausgleich der Standardabweichung über die Klassen hinweg charakterisiert den Verlauf der Streuung in Abhängigkeit vom vorhergesagten Mittelwert. Dafür wird ein sigmoider Ausgleich mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,957$ gewählt (Formel 4-39).

$$SD = e^{\left(a_1 + \frac{a_2}{PRED}\right)} \quad \text{Formel 4-39}$$

SD = einfache Standardabweichung – standard deviation

$PRED$ = Erwartungswert – expectation value

a_1 = 2,6851

a_2 = -11,634

Im nächsten Schritt wird ein oberer bzw. ein unterer Streubereich entlang des Erwartungswertes definiert, indem die einfache Standardabweichung aus Formel 4-39 zum Erwartungswert (Formel 4-38) addiert bzw. von ihm subtrahiert wird.

Anschließend erfolgt die Differenzierung des Erwartungswertes nach der Astlänge (Formel 4-40), wodurch sich eine Zuwachsfunktion ergibt, die für eine bestimmte Astlänge die Veränderung des Astdurchmessers pro Änderung des Längenzuwachses schätzt (Abb. 4-73). Durch die zusätzliche Differenzierung der oberen und unteren Standardabweichungskurven wird auch die Veränderung der Streuung pro Längenänderung bei einer bestimmten Astlänge geschätzt (Formel 4-41).

$$D(h,x) = \frac{a_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{x}{a_2}}\right)^{a_3} \cdot a_3 \cdot e^{-\frac{x}{a_2}}}{a_2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{x}{a_2}}\right)} \quad \text{Formel 4-40}$$

$$D(h \pm SD) = D(h,x) \pm \frac{\left(a_1 \cdot b_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{x}{a_2}}\right)^{a_3} \cdot a_3 \cdot e^{-\frac{x}{a_2}} \cdot e^{\left(b_0 + \frac{b_1}{a_0 + a_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{x}{a_2}}\right)^{a_3}} \right)} \right)}{\left(a_0 + a_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{x}{a_2}}\right)^{a_3} \right)^2 \cdot a_2 \cdot 1 - e^{-\frac{x}{a_2}}} \quad \text{Formel 4-41}$$

SD = Standardabweichung – standard deviation

$D(h,x)$ = Durchmesserzuwachs pro Astlängenzuwachs bei einer bestimmten Astlänge

(durch Ableitung von Formel 4-38 nach der Astlänge) –

branch diameter increment per branch length growth at a defined branch length

by differentiation of Formel 4-38.

$D(h \pm SD)$ = $D(h,x)$ zuzüglich bzw. abzüglich der Standardabweichung – $D(h,x) \pm$ standard deviation

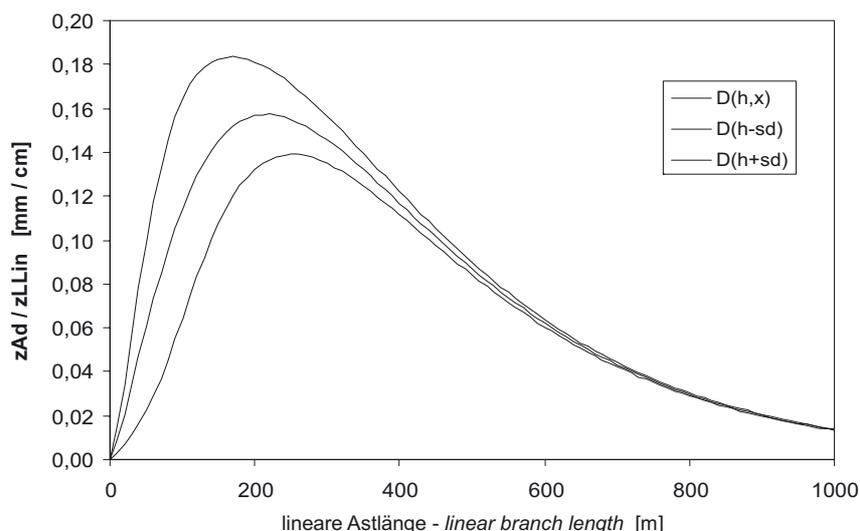


Abbildung 4-73: Durch Differenzierung erhaltene Funktionen für den Erwartungswert und Streubereich als Basis für ein dynamisches Modell zur Schätzung des Astdurchmesserzuwachses. *By differentiation we receive an expected value and a range of dispersion as a base for a dynamic model for branch diameter increment prediction.*

Die durch Differenzierung erhaltene Zuwachsfunktion ist die Basis für das dynamische Zuwachsmo­dell. Um die Konkurrenz­wirkung auf den Astdurchmesserzuwachs ins Modell mit einbeziehen zu können, bedarf es zuerst einer Analyse des Anteils am Astdurchmesserzuwachs, der durch die Konkurrenz erklärt wird und einer Trennung von anderen Einflussfaktoren. Ein geeignetes statistisches Verfahren ist die Varianz­komponentenanalyse. Anhand der Analyse des Datenkollektivs D, für das gemessene Astdurchmesser- und -längenzuwächse sowie HEMIS-Konkurrenzwerte vorliegen, geht hervor, dass sich mit etwa 63% der Großteil der Varianz im Astdurchmesserwachstum durch den Astlängenzuwachs erklären lässt. Unabhängig davon werden 17% Prozent durch die Konkurrenz bestimmt. Die nächste Varianz­komponente beinhaltet die Interaktion zwischen Konkurrenz und Astlängenzuwachs. Durch sie lassen sich weitere 10% der Varianz des Astdurchmesserzuwachses erklären. Damit ergibt sich ein Varianzmodell wie in Formel 4-42 dargestellt.

$$\sigma^2_G = \sigma^2_{zL} + \sigma^2_K + \sigma^2_{zL \times K} + \sigma^2_R \quad \text{Formel 4-42}$$

- σ^2_G = Gesamtvarianz – total variance
- σ^2_{zL} = Varianz, erklärt durch den Astlängenzuwachs (63% der Gesamtvarianz) – variance explained by branch length increment (63%)
- σ^2_K = Varianz, erklärt durch die Konkurrenz (17% der Gesamtvarianz) – variance explained by competition (17%)
- $\sigma^2_{zL \times K}$ = Varianz, erklärt durch die Interaktion zwischen Astlängenzuwachs und Konkurrenz (10% der Gesamtvarianz) – variance explained by the interaction of branch length increment and competition (10%)
- σ^2_R = unerklärte Restvarianz (10% der Gesamtvarianz) – unexplained variance (10%)

Der nächste Schritt besteht in der regressionsanalytischen Quantifizierung der Konkurrenzwirkung. Dazu wird auf der Datengrundlage von 384 Wertepaaren des Datenkollektivs D der Astdurchmesserzuwachs in Abhängigkeit von der Konkurrenz über ein sigmoides Modell ausgeglichen (Formel 4-43).

$$zAD = \frac{a_1}{1 + (e^{HEMIS - a_2})^{a_3}} \quad \text{Formel 4-43}$$

- zAD = Astdurchmesserzuwachs [mm] – branch diameter increment [mm]
 $HEMIS$ = Konkurrenzwert (0,0=min...1,0=max) – competition value
 a_1, a_2, a_3 = Regressionsparameter – regression parameters

Parameter <i>parameters</i>	Schätzwert <i>estimate</i>	asymptotischer Standardfehler <i>asymptotic standard error</i>	asymptotisches 95%-Konfidenzintervall <i>asymptotic 95% confidence interval</i>		Bestimmtheitsmaß <i>coefficient of determination</i>
			unteres – <i>lower</i>	oberes – <i>upper</i>	
a_1	3,051203940	0,155835037	2,744796976	3,357610904	$R^2 = 0,43657$
a_2	0,418944528	0,000000000	0,418944528	0,418944528	
a_3	7,979614108	0,018657136	7,942929956	8,016298261	

Der Regressionsausgleich weist ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,44$ auf. Die Modellanpassung und die heteroskedastische Residuenstruktur sind in Abbildung 4-74 dargestellt.

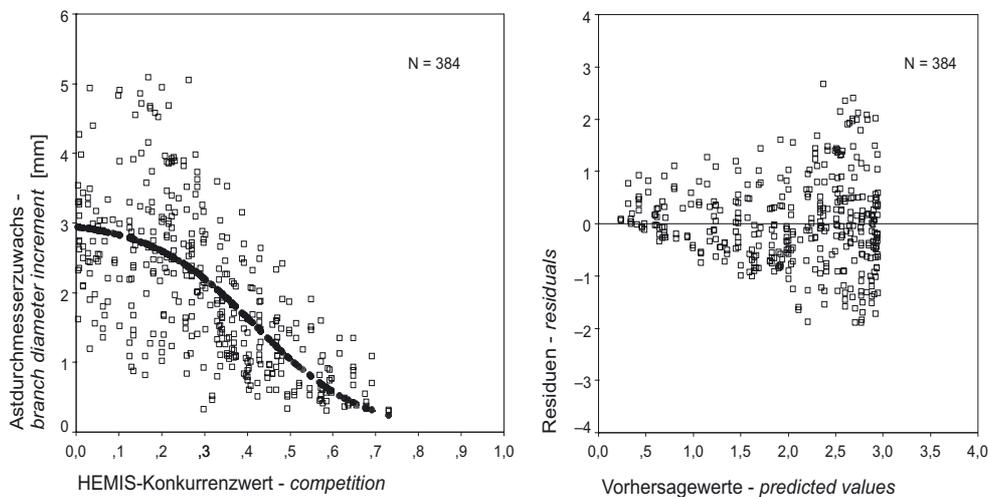


Abbildung 4-74: Modellanpassung (links) und Residuenverteilung bei definierten Vorhersagewerten (rechts).
Model fit (left) and residual distribution depending on predicted values (right).

Zur Modellierung der Varianzanteile wird in der Simulation schließlich so verfahren, dass zuerst der Erwartungswert über Formel 4-40 aus dem Asttrieblängenzuwachs und der linearen Astlänge geschätzt wird.

Anschließend wird die Gesamtvarianz, charakterisiert durch die einfache Standardabweichung für den geschätzten Erwartungswert, ermittelt und in ihre Komponenten getrennt.

Da 63% der Streuung durch den Längenzuwachs des Astes erklärt werden und dieser explizit ins Modell eingeht, wird die Gesamtvarianz um 63% reduziert. Siebzehn Prozent der Gesamtstreuung werden durch die Konkurrenz erklärt. Um dies nachzubilden, wird der berechnete Erwartungswert in diesem Streubereich je nach HEMIS-Konkurrenzwert verändert. Dazu wird der in Formel 4-43 berechnete Zusammenhang benutzt. Der konkurrenzbestimmte Streubereich bewegt sich in einem Bereich von 8,5% der Standardabweichung um den Erwartungswert (Abb. 4-75). Dies entspricht der Hälfte des Varianzanteils, der durch die Konkurrenz erklärt wird.

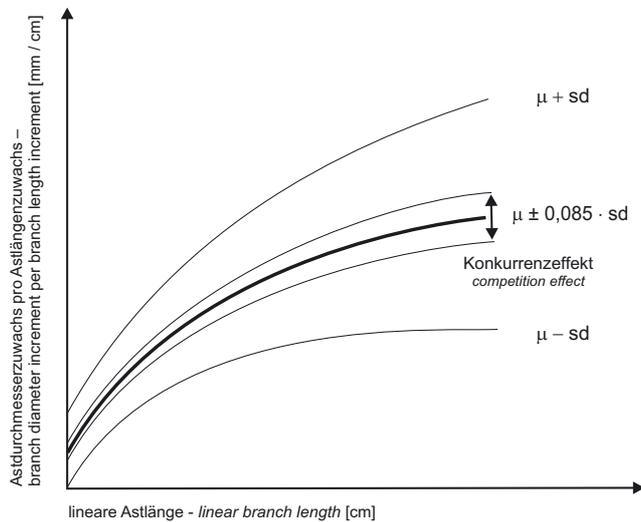


Abbildung 4-75: Modifikation des Erwartungswertes um die Varianzkomponente, die durch die Konkurrenz erklärt wird. *Modification of the predicted value in the range of the competition induced variance.*

Bei einem HEMIS-Konkurrenzwert von eins wird der Erwartungswert 8,5% der Standardabweichung nach unten versetzt, bei einem Konkurrenzwert von null um denselben Betrag nach oben. Bei allen Konkurrenzwerten dazwischen wird entlang der Wirkkurve aus Formel 4-43 interpoliert.

Die verbleibende unerklärte Restvarianz sowie die Varianz-Interaktion zwischen Asttrieblängenzuwachs und Konkurrenz werden schließlich zusammengefasst und über eine Normalverteilung in einem stochastischen Prozess verteilt. Als Eingangsparameter für die Normalverteilung dient der modifizierte Erwartungswert und die Restvarianz, ausgedrückt durch 18% der ursprünglichen Standardabweichung.

Mit diesem Varianzkomponentenansatz zur Simulation des Astdurchmesserzuwachses ist ein Modell erstellt, das die verschiedenen Einflussgrößen Asttrieblängenwachstum und Konkurrenz über ihren Erklärungsanteil differenziert in die Simulation einbringt. Durch die Verwendung einer großen Menge von Durchmesser-Längenbeziehung zur Parametrisierung der Mittelwertfunktion und Gesamtstreuung deckt der Parametrisierungsdatensatz einen weiten Bereich an Standorten und Baumaltern ab. Der Standort wirkt im Modell insbesondere über den Astlängenzuwachs, der in Abhängigkeit vom Standort modelliert wird und als die Variable mit dem höchsten Erklärungswert in das Astdurchmesserzuwachsmmodell eingeht.

Rindenabzugsfunktion

Da die Astdurchmessermodelle in diesem Abschnitt auf Daten mit Rinde beruhen, wird ein von MERKEL (1967) vorgeschlagenes lineares Modell benutzt, um die Aststärke ohne Rinde zu berechnen (Formel 4-44).

$$AD_{\text{ohne Rinde}} = 0,91 \cdot AD_{\text{mit Rinde}} - 0,7 \quad \text{Formel 4-44}$$

Damit lässt sich der innere, ins Holz eingewachsene Astdurchmesser berechnen. Auch in der Rundholzsartierung wird der Astdurchmesser ohne Rinde herangezogen, weshalb diese Größe für das in Kapitel 6 erläuterte Sortiermodell benötigt wird.

4.4.9 Modelle zur Prognose des Aststerbens

Models for the simulation of branch mortality

In AMOK wird die Astmortalität getrennt nach konkurrenzabhängigen und konkurrenzunabhängigen Sterbevorgängen modelliert. Für beide Mortalitätskomponenten werden Ansätze für die Rekonstruktion der vergangenen Entwicklung wie auch die Prognose in die Zukunft vorgestellt.

Modellierung der konkurrenzabhängigen Astmortalität

Die Astmortalität wird in der Rekonstruktion über die Verschiebung des Kronenansatzes nachgebildet, dessen Rekonstruktion bereits in Abschnitt 4.4.3. beschrieben wurde. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass unterhalb des Kronenansatzes alle Äste tot sind und oberhalb alle Äste grün. So ergibt sich ein quirlweises Absterben der Äste entsprechend der Kronenansatzbewegung.

Die Prognose der Astmortalität bei der Fortschreibung erfolgt differenzierter für jeden einzelnen Ast, sodass die Neubildung einseitiger Kronen möglich wird, bei denen sich die Kronenansatzhöhe in einer Himmelsrichtung von der in einer anderen Himmelsrichtung unterscheiden kann. Das Modell stützt sich theoretisch dabei auf eine weitgehende Kohlenstoffautonomie des Astes (s. Abschnitt 4.3.7), sodass alleine die Konkurrenzsituation des Einzelastes über sein Leben oder Sterben entscheidet und nicht die Konkurrenzsituation des Gesamtbaumes. Eine Einbeziehung von Kohlenstoff-Umverteilungsprozessen wird nicht berücksichtigt, da die notwendige Datengrundlage fehlt.

Um die natürliche Trägheit der Sterbevorgänge in der Simulation nachzubilden, wird keine feste Konkurrenzschwelle gesetzt, ab der ein Ast stirbt. Stattdessen wird ein Konkurrenzbereich definiert, ab dem ein Sterbeprozess einsetzt. Dieser wird normativ bei HEMIS-Wert von 0,65 vorgegeben. Bei diesem Wert wurde auch das Einsetzen der Astmortalität im Datenkollektiv D beobachtet. Liegt der Ast in der Simulation länger als fünf Jahre unter diesem Wert, stirbt er ab. Damit wird nachgebildet, dass ein Ast durchschnittlich fünf Nadeljahrgänge besitzt. Wird die Neubildung von Nadeln aufgrund zu hoher Konkurrenz eingestellt, stirbt der Ast ab.

Im Modell ist dies über einen Puffer gelöst, der die „Vitalität“ des Astes repräsentiert. Der Puffer, der ist für jeden Ast vollständig aufgefüllt, bis der Ast die kritische Konkurrenz von 0,65 erreicht. Jedes Jahr, das der Ast im kritischen Konkurrenzbereich verbringt, wird ein Fünftel des Puffers abgezogen. Ist der Puffer leer, wird der Ast über eine Kennung als „tot“ eingestuft. Allerdings führt eine zwischenzeitliche Verbesserung der Konkurrenzsituation, z. B. durch die

Freistellung des Baumes dazu, dass sich der Puffer wieder aufbauen kann. Dies soll eine Erholung des Astes durch die Neubildung von Nadeln nachbilden. Jährlich kann sich ein Zehntel des Pufferspeichers regenerieren.

Mit diesem deterministischen Modell wird in der Forstschreibung die Astmortalität in Abhängigkeit von der Konkurrenzsituation modelliert, wobei die beobachtete Trägheit des Absterbeprozesses und eine Regenerationsmöglichkeit des Astes nachgebildet werden.

Modellierung der konkurrenzunabhängigen Astmortalität

Äste können auch absterben, wenn sie nicht einer kritischen Konkurrenz durch Beschattung von anderen Bäumen ausgesetzt sind. Mögliche Absterbeursachen für eine derartige Astmortalität in der grünen Krone wurden bereits in Abschnitt 4.3.7 diskutiert.

Zur Nachbildung von einer konkurrenzunabhängigen Kronenmortalität wird ein statistisches Sterbetafel-Modell verwendet, das die Absterbewahrscheinlichkeit eines Astes mit steigendem Alter unabhängig vom Konkurrenzinfluss schätzt. Die Datenbasis besteht aus 7157 Ästen von 35 Fichten aus dem Datenkollektiv B, das sich durch lange und im oberen Bereich weitgehend konkurrenzfreie Kronen auszeichnet. Um eine Beeinflussung der Ergebnisse durch die Konkurrenzwirkung anderer Bäume auszuschließen, gehen nur Äste in die Modellbildung ein, die oberhalb des ersten Astquirls ohne Totäste liegen. Die ersten sieben Astquirls oberhalb des Kronenansatzes werden dabei in jedem Fall ausgeschlossen.

Mit diesem Datensatz wird eine Funktion zur Beschreibung der Mortalitätswahrscheinlichkeit mit steigendem Alter erstellt, die das Statistikpaket SPSS in der Funktion „Sterbetafel“ bereitstellt. Dabei wird der vorgegebene Beobachtungszeitraum, hier das Astalter, in gleich große Intervalle zerlegt und dann werden verschiedene Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten des Todes berechnet (BÜHL und ZÖFEL 2002, S. 544ff).

Die im Modell benutzte Hazard-Rate gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass ein Ast in einem bestimmten Alter stirbt. Nach BÜHL und ZÖFEL (2002) wird sie nach Formel 4-45 berechnet.

$$p_{\text{hazard}} = \frac{p_1}{\left(1 - \frac{p_1}{2}\right)} \cdot b \quad \text{Formel 4-45}$$

Dabei ist p_{hazard} die Hazard-Rate, p_1 definiert den Quotienten der im Intervall verstorbenen Fälle zu den Fällen, die dem Mortalitätsrisiko noch ausgesetzt sind. Der Faktor b steht für die Intervallbreite, die hier in Jahresschritten berechnet wird.

Das Ergebnis der Hazard-Rate ist eine Tabelle mit Wahrscheinlichkeiten für jedes Jahr. Diese Einzelwerte werden regressionsanalytisch mit einem Polynom 3. Ordnung ausgeglichen (Formel 4-46, Abb. 4-76). Das Bestimmtheitsmaß des Ausgleichs beträgt dabei $R^2=0,777$.

$$p_{\text{mort}} = a_0 + a_1 \cdot \text{Astalter} + a_2 \cdot \text{Astalter}^2 + a_3 \cdot \text{Astalter}^3 \quad \text{Formel 4-46}$$

p_{mort} = Mortalitätswahrscheinlichkeit – probability of death

Astalter [Jahre] – branch age [years]

a_0 = -0,00010000

a_1 = 0,00008900

a_2 = -0,00000600

a_3 = 0,00000013

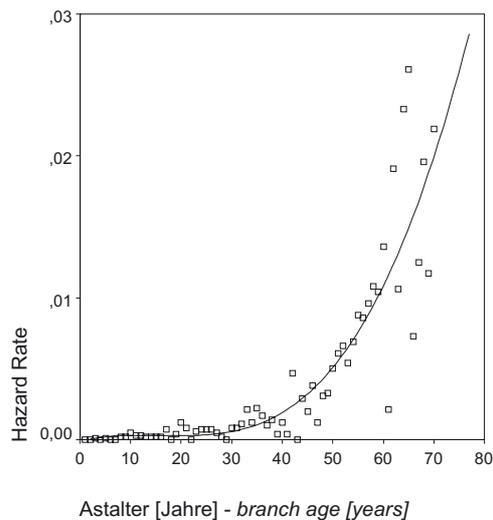


Abbildung 4-76: Hazard-Rate zur Beschreibung des nicht konkurrenzbedingten Mortalitätsrisikos von Ästen. *The Hazard rate describes the mortality risk of branches not caused by competition.*

Ein Modell zur Nachbildung der Residualstreuung wird nicht erstellt. Mit diesem Modell wird die Absterbewahrscheinlichkeit von Ästen in der grünen Krone mit steigendem Alter ohne den Konkurrenzeinfluss anderer Bäume nachgebildet.

4.4.10 Modelle zur Nachbildung der natürlichen Astreinigung und Astung – *Models for the simulation of natural pruning*

Die Modellierung der Astreinigung und Astung wird in diesem Abschnitt gemeinsam behandelt. Wie bei allen übrigen Modellen von AMOK ist eine Simulation der Astreinigung und Astung sowohl für die Rekonstruktion als auch für die Fortschreibung nötig.

Modelle zur Nachbildung der natürlichen Astreinigung

Das Modell zur Nachbildung der natürlichen Astreinigung beschreibt den kompletten Astreinigungsvorgang eines abgestorbenen Astes bis zu seiner vollständigen Überwallung als Funktion von Astdurchmesser und Zeit nach dem Absterben. Weitere Faktoren werden nicht berücksichtigt, da sie im Datensatz nicht zur Verfügung stehen.

Die Nachbildung der Astreinigung erfolgt für die Rekonstruktion und die Fortschreibung mit demselben Modell. Dies ist möglich, da die Astmortalität für jeden Ast bereits rekonstruiert ist (s. Abschnitt 4.4.9). Somit ist der Absterbezeitpunkt durch das Mortalitätsmodell bereits definiert. Als Modelldatensatz wird auf Astdaten von PECHMANN und SCHAILE (1955, Abb. 7) zurückgegriffen, die mit data-retrieving-Methoden aus der veröffentlichten Abbildung exzerpiert wurden. Der Datensatz umfasst 171 Äste von 2 Bäumen.

Das daraus entwickelte Modell beschreibt die vom Absterben bis zur Überwallung benötigte Zeit als Funktion des Astdurchmessers (Formel 4-47).

$$T_{\text{astrein}} = a_0 + a_1 \cdot \ln(\text{AD})$$

Formel 4-47

T_{astrein} = Zeit vom Absterben bis zur vollständigen Astüberwallung [Jahre] – time from death to occlusion
 ad = Astdurchmesser [mm] – branch diameter [mm]
 a_0, a_1 = Regressionsparameter – regression parameters

Das Modell schätzt den Zusammenhang zwischen Astdurchmesser und Überwallungszeit mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,43$.

Parameter <i>parameters</i>	Schätzwert <i>estimate</i>	asymptotischer Standardfehler <i>asymptotic standard error</i>	asymptotisches 95%-Konfidenzintervall <i>asymptotic 95% confidence interval</i>		Bestimmtheitsmaß <i>coefficient of determination</i>
			unteres – <i>lower</i>	oberes – <i>upper</i>	
a_0	11,501005284	4,568352702	2,482618172	20,519392397	$R^2 = 0,42946$
a_1	23,773268703	2,107771615	19,612315815	27,934221591	

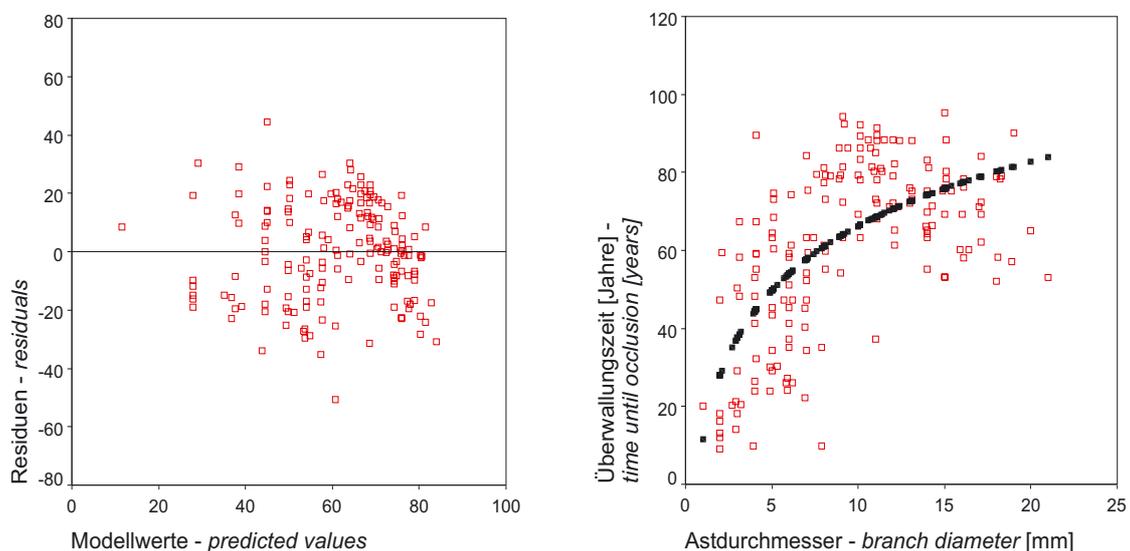


Abbildung 4-77: Diese Grafiken zeigen die Residuenverteilung des Astreinigungmodells über dem vorhergesagten Modellwert (links) und die Modellanpassung (rechts), die den Messwerten gegenübergestellt ist. *These figures show the residual distribution of the branch occlusion model over the predicted model value (left) and the model fit (right) against the measured values.*

Da im Parametrisierungsdatensatz nur Äste bis zu einem Maximaldurchmesser von 25 mm enthalten sind, muss für Äste größeren Durchmessers extrapoliert werden. Das Modell liefert einen plausiblen Verlauf bei der Extrapolation, wie Abbildung 4-78 veranschaulicht.

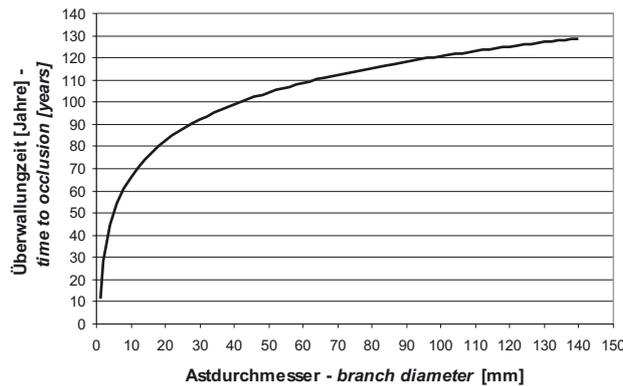


Abbildung 4-78: Verhalten des Astreinigungsmodells im Extrapolationsbereich. *Behaviour of the branch occlusion model in the extrapolation range.*

Auf ein Residuenmodell wird verzichtet, da der Datensatz zwar eine heteroskedastische Streuung aufweist, aber durch die geringe Datenzahl kein plausibles Residuenmodell erstellt werden konnte, das gleichzeitig die geforderte Extrapolationsfähigkeit sicherstellt. Alle Versuche die Residuen über den Modellvorhersagewerten auszugleichen, führten zu fallenden Kurven bzw. Geraden, bei denen die Streuung bei steigenden Erwartungswerten abnimmt, bis sie schließlich einen Wert von null erreicht. Diese Einschränkung der Extrapolationsfähigkeit des Residuenmodells ist auf das bereits angesprochene Fehlen von Ästen mit großen Durchmessern im Parametrisierungsdatensatz zurückzuführen.

Um die Extrapolationsfähigkeit des Gesamtmodells trotzdem zu gewährleisten, kommt ein reines Mittelwertmodell ohne Residualstreuung zum Einsatz.

Modellierung der Astung

Das Astungsmodell bildet das Abschneiden von Ästen und die anschließende Überwallung nach. Dabei wird nicht zwischen Trocken- und Grünastung unterschieden. Für die Rekonstruktion und die Fortschreibung kommt dasselbe Modell zum Einsatz. Nach der Definition der Astungshöhe wird die Kennung aller darunter liegenden Äste auf „tot“ gesetzt, sodass kein weiteres Wachstum mehr stattfindet.

Die zu überwallende Astlänge wird durch den Stammdurchmesser mit Rinde in der Ansatzhöhe des Astes und den Astkragen zum Zeitpunkt der Astung bestimmt (Formel 4-48).

$$\text{Überwallungsstrecke} = \text{Stammradius}_{m.R.} + \text{Astkragen} \quad \text{Formel 4-48}$$

Überwallungsstrecke = zu überwallende Strecke [cm] – projected stub length, which has to be occluded [cm]

Stammradius_{m.R.} = Stammradius mit Rinde [cm] – stem radius over bark [cm]

Astkragen = Astkragenlänge [cm] – length of branch collar [cm]

Der Astkragen wird bei fachgerechter Astung nicht abgetrennt. Er verlängert den zu überwallenden Aststumpf über den Stammmantel hinaus und wird nach Formel 4-49 als Funktion des Astdurchmessers berechnet (Abb. 4-79).

$$\text{Astkrängenlänge} = 0,0061 \cdot \text{AD}^2 + 0,2840 \cdot \text{AD}$$

Formel 4-49

Astkrängenlänge = Länge des Astkrängens [cm] – length of branch collar [cm]
AD = Astdurchmesser [mm] – branch diameter [mm]

Verwendet wurden Stichproben an Bäumen des Datenkollektivs A sowie ergänzende Messungen an Randbäumen. Der Regression liegen 65 Messungen zugrunde. Das Bestimmtheitsmaß des Ausgleichs beträgt $R^2 = 0,913$.

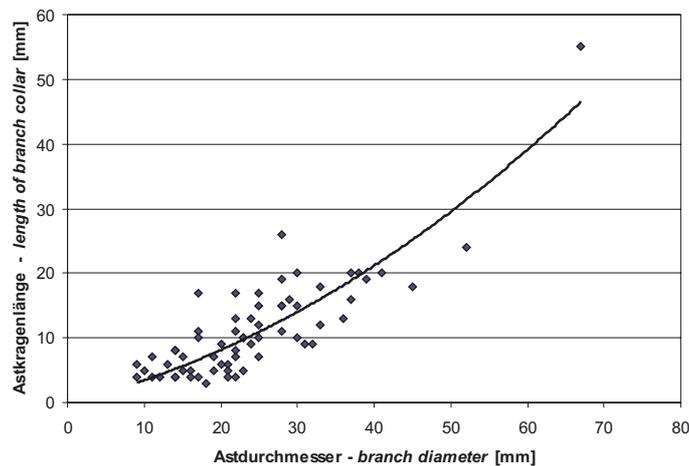


Abbildung 4-79: Modell zur Bestimmung der Astkrängenlänge in Abhängigkeit des Astdurchmessers. *Model for prediction of branch collar length in relation to the branch diameter.*

Durch die Simulation der Stammform über die Zeit in SILVA lässt sich die Dauer bis zum Überwallen des Astes berechnen. Der Ast gilt als überwallt, wenn der Stammdurchmesser ohne Rinde an der Betrachtungsstelle einen größeren Wert erreicht hat als die vorher berechnete Überwallungsstrecke.

Mit diesem Astungsmodell wird die Überwallungszeit nach einer Astung als Kombination des Astdurchmessers und der Stammform bei der Astung sowie des Stammwachstums in den Folgejahren nachgebildet. Äste mit stärkerem Durchmesser werden so tendenziell langsamer überwallt. Das Modell berücksichtigt, dass eine Anregung des Stammdurchmesserzuwachses durch Freistellung bei gleichem Astdurchmesser zu einer schnelleren Überwallung führt. Somit ist eine Sensitivität auf waldbauliche Behandlungsmaßnahmen auch im Astungsmodell implementiert.

4.5 Modellimplementierung von AMOK

Model implementation of AMOK

In diesem Unterkapitel wird der gesamte Simulationsablauf des Astmodells AMOK noch einmal zusammenfassend besprochen, nachdem die Konstruktion der Einzelmodelle bereits in den vorangegangenen Unterkapiteln beschrieben wurde. Einen Überblick über den Simulationsablauf bietet der Abschnitt 4.5.1. In den Abschnitten 4.5.2 bzw. 4.5.3 werden der Ablauf der Rekonstruktion des vergangenen bzw. die Prognose des zukünftigen Ast- und Kronenwachstums im Detail besprochen.

4.5.1 Der Ablauf der Astsimulation im Überblick

Overview over the simulation process

Einen zusammenfassenden Überblick über den Simulationsablauf gibt das Flussdiagramm in Abbildung 4-80.

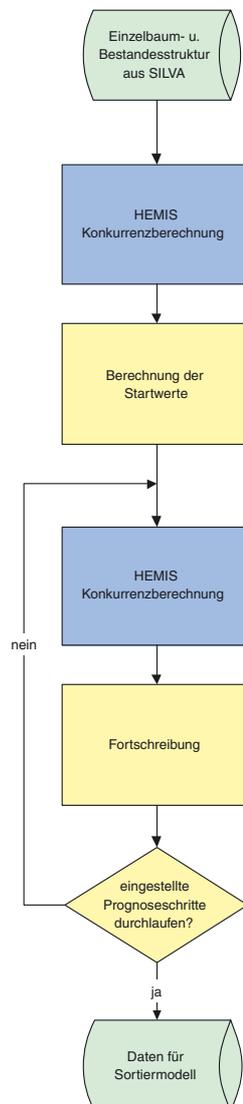


Abbildung 4-80: Übersicht über den Programmablauf bei der Astmodellierung in AMOK. *Overview of the program flow of the branch simulation model AMOK.*

Die Simulation startet, ausgehend von einem Startbestand mit definierter Einzelbaum- bzw. Bestandesstruktur. Diese wird vom Wachstumssimulator SILVA übernommen und beinhaltet die räumliche Bestandesstruktur mit Baumdimensionen für jedes Individuum.

Nach dem Einlesen der Daten und dem Aufbau der räumlichen Strukturen im Computer folgt die Berechnung der räumlichen Konkurrenzverteilung für jeden Baum mit dem HEMIS-Algorithmus (s. Abschnitt 4.4.1).

Mithilfe dieser Konkurrenzinformationen wird aus der aktuellen Bestandesstruktur die historische Entwicklung jedes Baumes rekonstruiert. Die Kronenform wird entsprechend der Konkurrenz angepasst und das Baumalter wird geschätzt.

Der nächste Simulationsschritt stellt bereits die Fortschreibung der künftigen Bestandesentwicklung dar. Dazu wird erneut die HEMIS-Konkurrenz berechnet und das Astwachstum solange fortgeschrieben, bis die definierte Anzahl an Prognoseschritten erreicht ist. Das Höhen- und Durchmesserwachstum des Stammes wird dabei von SILVA vorgegeben. Alle kronenabhängigen Größen werden bei der Fortschreibung durch das Astmodell AMOK berechnet.

Nach Durchlauf aller Prognoseschritte erfolgt schließlich die Bereitstellung der Ast- und Stammdaten für das Sortiermodell SILVSORT.

4.5.2 Simulationsablauf der Rekonstruktion

Simulation of reconstruction

Im Folgenden wird der Ablauf der Rekonstruktion des vergangenen Ast- und Baumwachstums anhand des Flussdiagramms (Abb. 4-81) eingehend erläutert. Die Nummern in der Grafik entsprechen den im Text dargestellten Simulationsschritten. Um einen schnellen Zugriff auf die Einzelmodelle zu ermöglichen, sind im Text die jeweiligen Abschnitte der Arbeit angegeben, in denen die Modelle eingehend beschrieben sind.

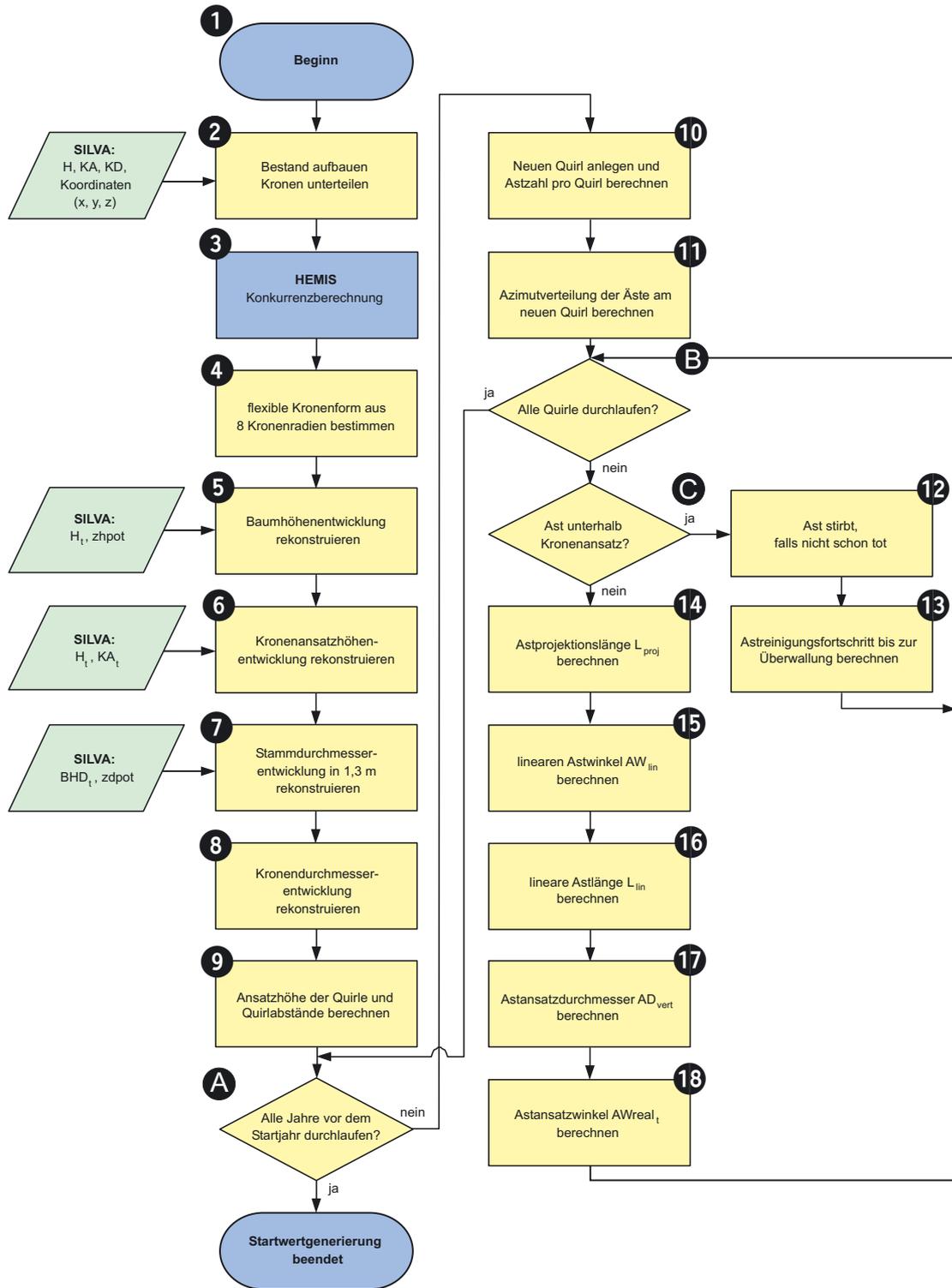


Abbildung 4-81: Ablauf der Simulation bei der Rekonstruktion in AMOK –
Simulation flow for reconstruction in AMOK

(1) Startwerte

Voraussetzung und Eingangsgröße ist ein Startbestand zum Zeitpunkt t , für den die Position (X-, Y-, Z-Koordinaten) und die grundlegenden Dimensionsgrößen (BHD, Höhe, Kronenansatzhöhe) für jeden Baum bekannt sind. Einzelbaumorientierte, positionsabhängige Waldwachstumssimulatoren wie SILVA stellen genau diese Informationen bereit. So kann diese Information vom Waldwachstumssimulator bezogen werden. Eventuelle Strukturergänzungen werden bereits im Vorfeld durch den Waldwachstumssimulator durchgeführt.

(2) Bestand aufbauen, Kronen unterteilen (Abschnitt 4.4.2)

Aus den Strukturdaten wird ein räumlicher Bestand im Rechner erzeugt und die rotationssymmetrischen Kronen werden in das neue Kronenmodell überführt, das eine horizontale und vertikale plastische Reaktion auf Konkurrenz nachbilden kann.

(3) HEMIS-Konkurrenzberechnung (Abschnitt 4.4.1)

In diesem Simulationsschritt wird die HEMIS-Konkurrenz für jeden Baum entlang der Stammachse in 1m-Schritten berechnet. Der HEMIS-Wert gibt eine relative Beschattung an. Dabei wird die Konkurrenzstärke aus acht Himmelsrichtungen differenziert kalkuliert.

(4) flexible Kronenform aus 8 Kronenradien bestimmen (Abschnitt 4.4.2 / 4.4.3)

Auf der Grundlage der Konkurrenzwerte wird die Kronenform jedes Baumes flexibel angepasst. Starke Konkurrenz verringert die Kronenbreite an dieser Stelle, schwache Konkurrenz erhöht sie. Die Verformung erfolgt in der Rekonstruktion primär an der breitesten Kronenstelle. In Richtung des Kronenansatzes werden die Kronenradien nach derselben Relation angepasst. Zur Kronenspitze wird interpoliert, so dass die Krone nach oben mit abnehmender Konkurrenz immer rotationssymmetrischer wird.

(5) Rekonstruktion der vergangenen Baumhöhenentwicklung (Abschnitt 4.4.3)

Im nächsten Schritt wird die Baumhöhenentwicklung in Jahresschritten rekonstruiert. Dazu wird vom Wachstumssimulator die Höhe eines jeden Baumes zum Startzeitpunkt t sowie der potenzielle Höhenzuwachs angefordert, der vom Standort abhängig ist. Mit diesen Werten wird das Höhenwachstum des Baumes bis zum Alter null durch Interpolation ermittelt. Interpoliert wird dabei über die Form des typischen Wachstumsgangs, der auf diesem Standort zu erwarten ist. Sie geschieht unter der Annahme, dass die relative Konkurrenzsituation des Baumes, ausgedrückt durch den tatsächlichen Höhenzuwachs pro Zuwachspotenzial zum Zeitpunkt t , in der Vergangenheit als konstant angesehen werden kann.

(6) Kronenansatzhöhenentwicklung rekonstruieren (Abschnitt 4.4.3)

Die Rekonstruktion der Kronenansatzhöhe erfolgt nach einem ähnlichen Schema wie die Rekonstruktion der Höhe. Aus einer Kronenansatzhöhe zum Zeitpunkt t erfolgt die Interpolation zum Zeitpunkt null. Hier wird die Annahme getroffen, dass der Baum beim Austrieb zu 100% bekront ist. Das Kronenprozent zum Zeitpunkt t wird demnach gegen 100% im Zeitpunkt null interpoliert. Die Interpolation erfolgt entlang des rekonstruierten Höhenwachstums.

(7) Stammdurchmesserentwicklung in 1,3 m rekonstruieren (Abschnitt 4.4.3)

Die Rekonstruktion des Brusthöhendurchmessers zum Zeitpunkt null erfolgt als Interpolation. Die Interpolationsform wird durch eine Reskalierung der potenziellen Zuwachsfunktion des Waldwachstumssimulators abgeleitet, um einen typischen Wachstumsverlauf nachzubilden.

(8) Kronendurchmesserentwicklung rekonstruieren (Abschnitt 4.4.3)

Ausgangspunkt ist die konkurrenzangepasste Krone aus Schritt (4). Die acht 8 Kronenradien zum Zeitpunkt t werden bis zum Alter null in der Weise interpoliert, dass die Symmetrie der Krone mit zunehmendem Alter steigt, bis eine rotationsförmige Kronenform im Alter null erreicht ist. Die Rekonstruktion erfolgt an der breitesten Kronenstelle. Mit diesem Schritt ist die Rekonstruktion des Baumwachstums abgeschlossen. Die weiteren Schritte befassen sich mit der Rekonstruktion auf Astebene.

(9) Ansatzhöhe der Quirle und Quirlabstände berechnen (Abschnitt 4.4.3)

Anhand des rekonstruierten Höhenzuwachses aus Schritt (5) lässt sich die exakte Quirlhöhe bestimmen. Nach jedem jährlichen Höhezuwachs wird ein Quirl erzeugt. Das Quirlalter wird gespeichert.

(A) Alle Jahre vor dem Startjahr durchlaufen?

Hier findet eine Prüfung statt, ob bereits alle Jahre vom Zeitpunkt null bis zum Startbestand des Zeitpunkts t rekonstruiert sind. Ist dies der Fall, wird die Rekonstruktion abgebrochen und die Fortschreibung beginnt. Ist dies nicht der Fall, wird mit Schritt (11) fortgefahren.

(10) neuen Quirl anlegen und Astzahl pro Quirl berechnen (Abschnitt 4.4.4 / 4.4.5)

In jedem weiteren Jahr wird ein neuer Astquirl angelegt und eine plausible Astzahl pro Quirl wird durch einen gesteuerten Zufallsprozess berechnet.

(11) Azimutverteilung der Äste am neuen Quirl berechnen (Abschnitt 4.4.5)

Die horizontale Astposition wird ermittelt, indem der Azimut des ersten Astes zufällig bestimmt wird und anschließend alle Äste eines Quirls gleichmäßig um den Stamm verteilt werden.

(B) Alle Quirle durchlaufen?

Die Abfrage prüft, ob bereits alle Äste durchlaufen sind. Ansonsten wird die Simulation bei Schritt (C) fortgesetzt.

(C) Ast unterhalb Kronenansatz?

Hier wird geprüft, ob sich der Ast unter dem in Schritt (6) definierten Kronenansatz befindet. Wenn dies der Fall ist, wird mit Schritt (12) fortgefahren, andernfalls mit Schritt (14).

(12) Ast stirbt, falls nicht schon tot

In diesem Schritt erfolgt die Berechnung der Mortalität. Der Aststatus wird auf „tot“ gesetzt.

(13) Astreinigungsfortschritt bis zur Überwallung berechnen (Abschnitt 4.4.10)

Für jeden toten Ast wird der Fortschritt der Astreinigung berechnet. Entweder kommt das Modell zur natürlichen Astreinigung oder das Modell zur Überwallung nach Astung zum Einsatz. Danach erfolgt in der Simulation ein Rücksprung zu Schritt (B).

(14) Astprojektionslänge L_{proj} berechnen (Abschnitt 4.4.2 / 4.4.3)

Die Astprojektionslänge wird als kubische Interpolation aus den Kronenradien der beiden nächstgelegenen (Neben-) Himmelsrichtungen berechnet. Entlang der Stammachse wird zwischen den übereinanderliegenden Kronenradien linear interpoliert. Damit wird die Astlänge direkt aus der Kronenform abgeleitet.

(15) linearen Astwinkel AW_{lin} berechnen (Abschnitt 4.4.6)

Der lineare Astwinkel wird als Funktion des Astalters geschätzt.

(16) lineare Astlänge L_{lin} berechnen (Abschnitt 4.4.7)

Über eine trigonometrische Berechnung wird aus dem linearen Astwinkel und der Projektionslänge des Astes die lineare Astlänge berechnet.

(17) Astansatzdurchmesser AD_{vert} berechnen (Abschnitt 4.4.8)

Der Astansatzdurchmesser wird dynamisch aus der Astlänge, dem Astlängenzuwachs und der Position in der Krone geschätzt.

(18) Astansatzwinkel AW_{real} berechnen (Abschnitt 4.4.6)

Der Astansatzwinkel wird als Funktion des Astalters, des Längen-Durchmesser-Verhältnisses sowie des Astdurchmessers geschätzt, die in vorangegangenen Simulationsschritten berechnet wurden. Danach sind alle Äste am Quirl rekonstruiert und es erfolgt ein Rücksprung zu Schritt (B)

4.5.3 Simulationsablauf der Fortschreibung

Simulation of projection into future

Der folgende Abschnitt erläutert den Simulationsablauf der Fortschreibung anhand des Flussdiagramms (Abb. 4-82). Die Fortschreibung stellt die Prognose der zukünftigen Ast- und Kronenentwicklung dar und baut auf den Daten der Rekonstruktion auf.

Die Nummern in der Grafik entsprechen den im Text dargestellten Simulationsschritten. Um einen schnellen Zugriff auf die Einzelmodelle zu ermöglichen, sind im Text die jeweiligen Abschnitte der Arbeit angegeben, in denen die Modelle eingehend beschrieben sind.

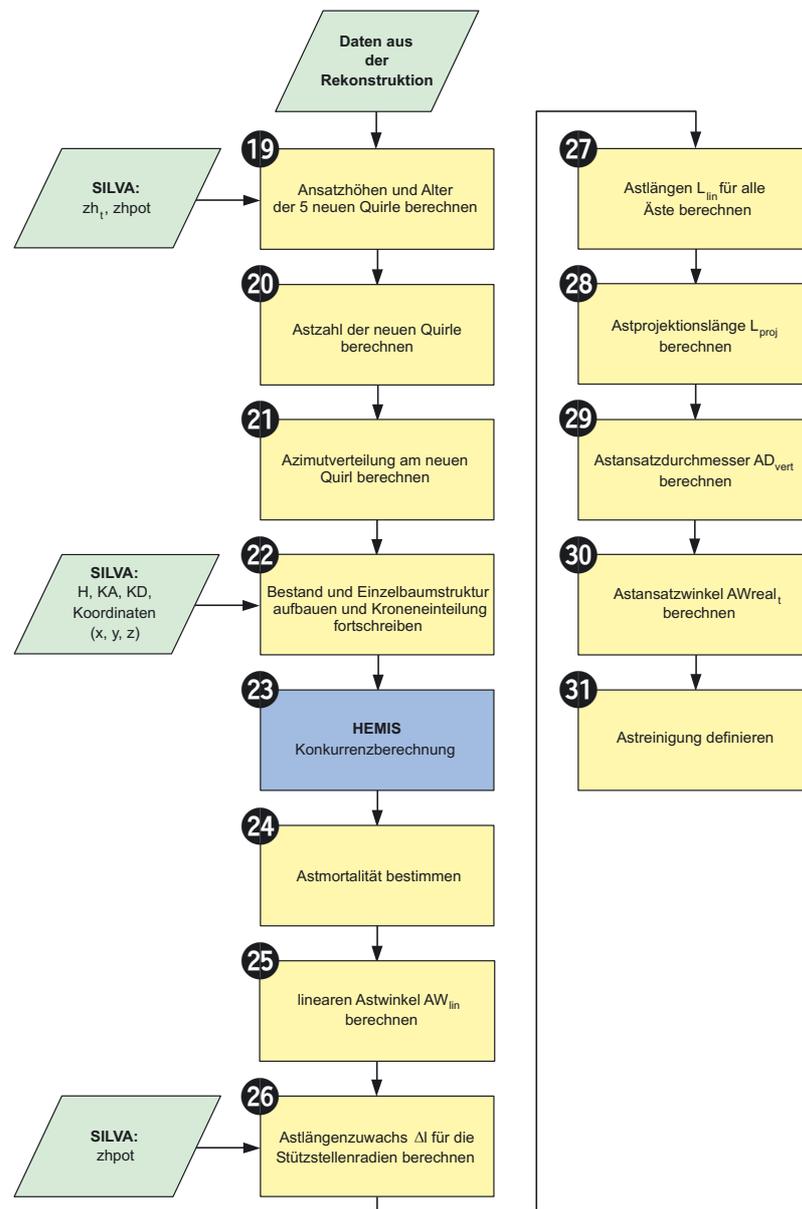


Abbildung 4-82: Ablauf der Simulation bei der Fortschreibung in AMOK – Simulation flow for prognosis in AMOK

(19) Ansatzhöhen der 5 neuen Quirle und Quirlalter berechnen (Abschnitt 4.4.4)

Zu Beginn der Fortschreibung wird der von SILVA bereitgestellte periodische Höhenzuwachs des Baumes zh_t benutzt, um die Ansatzhöhen der Quirle zu bestimmen. Da SILVA in 5-Jahres-Schritten simuliert, wird ein jährlicher Zuwachs interpolativ bestimmt. Als Interpolationsfunktion wird die Höhenpotenzialkurve von SILVA benutzt. Anschließend wird dem neuen Quirl ein Alter zugewiesen, indem der Prognosezeitraum zum letzten geschätzten Alter vor dem Fortschreibungszyklus addiert wird.

(20) Astzahl der neuen Quirle berechnen (Abschnitt 4.4.5)

Im nächsten Schritt erfolgt eine Berechnung der Astzahl über einen gesteuerten Zufallsprozess, analog zum Schritt (10) der Rekonstruktion.

(21) Azimutverteilung am neuen Quirl berechnen (Abschnitt 4.4.5)

Auch für die Berechnung der Astverteilung um die Stammachse wird auf dasselbe Modell wie in der Rekonstruktion (Schritt 11) zurückgegriffen.

(22) Bestand und Einzelbaumstruktur aufbauen und Kroneneinteilung fortschreiben (Abschnitt 4.4.2)

In diesem Schritt wird die räumliche Bestandesstruktur aufgebaut. Dazu wird die bereits in der Rekonstruktion in den Schritten (2) und (4) aufgebaute dreidimensionale Bestandesstruktur mit ihren Koordinaten und Dimensionsgrößen benutzt.

Ein wichtiger Aspekt ist hier die Fortschreibung der Kronenunterteilung, weil durch das Wachstum des Baumes eventuell neue vertikale Stützstellen angelegt werden müssen.

(23) HEMIS-Konkurrenzberechnung (Abschnitt 4.4.1)

Die Konkurrenzberechnung für jede Stützstelle im Bestand erfolgt nach demselben Schema wie in Schritt (3) beschrieben. Für jede Stützstelle in der Baumkrone wird die Konkurrenz differenziert in 8 Himmelsrichtungen berechnet.

(24) Astmortalität bestimmen (Abschnitt 4.4.9)

In diesem Schritt wird für jeden Ast entschieden, ob er am Leben bleibt oder stirbt. Es wird dabei geprüft, ob die Konkurrenz eine kritische Grenze überschritten hat. Ist dies der Fall, wird die „Vitalität“ des Astes um ein Fünftel der möglichen Maximalvitalität reduziert. Geschieht dies mehrere Jahre hintereinander, fällt die Vitalität auf null und der Aststatus wird auf „tot“ gesetzt. Auf der anderen Seite kann bei einem noch lebenden Ast die „Vitalität“ jährlich um ein Zehntel des Maximalwertes regeneriert werden, falls die Konkurrenz sich wieder unter dem Schwellwert bewegt. Die Vitalität kann jedoch nie größer als der Ursprungswert werden.

(25) lineare Astwinkel AW_{lin} berechnen (Abschnitt 4.4.6)

Der lineare Astwinkel wird als Funktion des Astalters analog zu Schritt (15) geschätzt.

(26) Astlängenzuwachs Δl für die Stützstellenradien berechnen (Abschnitt 4.4.7)

Die dynamische Berechnung des Astlängenzuwachses für die Stützstellen entspricht der Fortschreibung der 8 Radien pro Stützstelle und wird in 1 m-Schritten entlang der Stammachse für alle Stützstellen durchgeführt.

Der jährliche Astlängenzuwachs wird dabei in Abhängigkeit vom Standort, dem Baumalter, dem Astalter und der Konkurrenz geschätzt. Anschließend wird nach einer trigonometrischen Funktion von der linearen Astlänge auf die projizierte Astlänge unter Verwendung des linearen Astwinkels aus Schritt (25) umgerechnet.

(27) Astlängen L für alle Äste berechnen (Abschnitt 4.4.7)

In diesem Schritt wird den Einzelästen durch Interpolation zwischen den Stützstellenradien ein individueller Längenzuwachs zugeordnet.

(28) Astprojektionslänge L_{proj} berechnen (Abschnitt 4.4.7)

Der Zuwachs an Projektionslänge L_{proj} wird zur Fortschreibung der Kronenradien an jeder Stützstelle berechnet und zur Vorjahreslänge addiert.

(29) Astansatzdurchmesser AD_{vert} berechnen (Abschnitt 4.4.8)

Der Astansatzdurchmesserzuwachs wird dynamisch auf der Basis des Astlängenzuwachses der linearen Astlänge und der Konkurrenz geschätzt und zum Astdurchmesser des Vorjahres addiert.

(30) Astansatzwinkel AW_{real} berechnen (Abschnitt 4.4.6)

Der Astansatzwinkel wird als Funktion des Astalters, des Astdurchmessers und des Längen-Durchmesser-Verhältnisses des Astes analog zu Schritt (18) geschätzt.

(31) Astreinigung definieren

Zum Schluss wird für jeden toten Ast noch geprüft, ob er schon überwallt ist. Entweder kommt das Modell zur natürlichen Astreinigung oder das Modell zur Überwallung nach Astung zum Einsatz. Ist der Ast überwallt, so wird sein Status auf „überwallt“ gesetzt.

Die Modelle zur Astfortschreibung werden solange durchlaufen, bis die definierte Simulationsdauer erreicht ist.

4.5.4 Zusammenfassung der Gesamtsimulation

Overview on the branch simulation

Nach dem Schema, das in den vorangegangenen Abschnitten erläutert wurde, erzeugt das Astmodell AMOK alle wichtigen Astpositions- und Astdimensionsgrößen sowie Informationen zum Aststatus. Dabei wird, ausgehend von einem Startzeitpunkt, die vergangene Entwicklung ebenso simuliert wie die zukünftige.

Es gehen sowohl Standortfaktoren, Alterseffekte als auch Konkurrenzeffekte in das Modell ein. Damit ist die Simulation der Reaktion auf waldbauliche Behandlung unterschiedlich alter Bäume auf einer großen Palette an Standorten möglich. Die genetische bedingte Varianz der morphologischen Größen wird nicht explizit als Modellvariable erfasst. Er wird jedoch im Rahmen der Reststreuung mit Residuenmodellen nachgebildet.

Die bereitgestellten Astinformationen liegen für jeden Ast vor, so dass er dreidimensional definiert ist und gehen im Weiteren in die Rundholzsartierung ein, die im Kapitel 6 beschrieben wird.

5 Modellierung der Rotfäuleausbreitung im Stamm

Modeling the extent of decay in the stem

In diesem Kapitel soll, nach einer kurzen Charakterisierung des verursachten ökonomischen Schadens und der Beschreibung einiger wichtiger Zusammenhänge bei der Pilzausbreitung, ein Modell zur Simulation der Ausbreitung von *Heterobasidion annosum* [FR.] BREF. im Stamm von Fichten vorgestellt werden. Es schätzt die zu erwartende radiale und longitudinale Ausdehnung einer von der Wurzel ausgehenden Fäule im Stamm, den Zersetzungsgrad sowie die Reaktion des Baumwachstums auf den Fäulebefall. Damit bietet das Modell in Verbindung mit einem epidemiologischen Infektionsmodell auf Bestandesbasis und einem Waldwachstumssimulator eine Schätzmethode zur Quantifizierung der nicht verwertbaren oder qualitativ entwerteten Stammsortimente ganzer Bestände.

5.1 Einführung – Introduction

Die Gesundheit des Rundholzes ist wie die Astigkeit eine kritische Größe bei der Rundholzsor-tierung nach HKS oder ENV 1927-1. Einen dominanten Einfluss auf die Gesundheit üben Fäulen aus, die bereits den stehenden Baum befallen und das Holz zersetzen. Je nach Art dringen diese Pilze, überwiegend Basidiomyceten, bevorzugt über die Wurzeln oder über Stammwunden ins Holz ein und zerstören es durch die Zersetzung von Lignin und Zellulose. Nach DÖRFELT (1989) können Fäulen über das morphologisch-anatomische Erscheinungsbild, den physiologisch-chemischer Ablauf und nach dem Ort bzw. der Art des Eindringens beschrieben werden.

In dieser Arbeit soll einer funktionalen Einteilung nach dem Ort und der Art des Eindringens der Fäule der Vorzug gegeben werden. Man unterscheidet dabei „Wundfäulen“ und „Kernfäulen“ (ZYCHA et al. 1967). Eine Unterscheidung erscheint angebracht, da bei den beiden Fäulegruppen unterschiedliche Pathogene und auch sehr unterschiedliche Schadbilder auftreten (VON PECHMANN und VON AUFSSESS 1971, VON PECHMANN et al. 1973).

Bei Wundfäulen dringt der Erreger über Wunden am Stamm, den Wurzelanlauf oder abgestorbene Äste in den Baum ein, womit sich ein starker Einfluss von Rücke-, Fäll- und Schäl-schäden auf die Häufigkeit ergibt. Wundfäulen sind nicht Gegenstand des hier beschriebenen Modellansatzes.

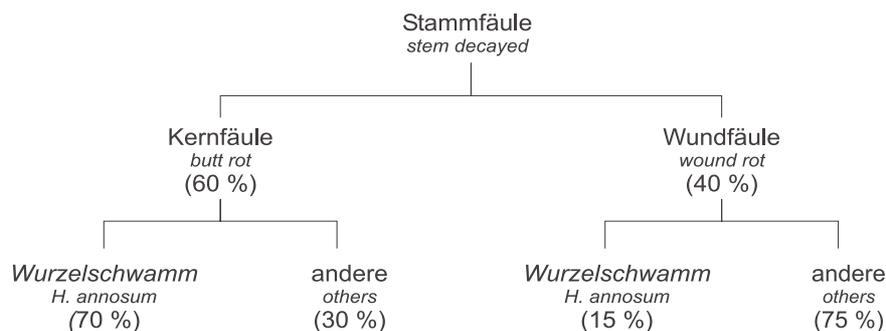


Abbildung 5-1: Fäulearten und der Anteil von *Heterobasidion annosum* nach Daten von VON PECHMANN und VON AUFSSESS (1971) – *Different causes for decay and the share which is caused by Heterobasidion annosum.*

Bei Kernfäulen erfolgt der Befall durch bereits infizierte Nachbarbäume oder Wurzelstöcke über das Wurzelsystem, von wo aus sich der Pilz auch im Stamm ausbreiten kann. Bisher galt die Kernfäule als weitgehend standortsbestimmt und invariant gegenüber anthropogenen Ein-

wirkungen, die nicht den Standort verändern. Allerdings zeigen neuere Untersuchungen, dass Wurzelschäden durch einen verstärkten Maschineneinsatz im Wald durchaus Einwirkungen auf die Kernfäule haben könnten (SCHMID-HAAS und BACHOFEN 1991a).

In Abbildung 5-1 sind nach VON PECHMANN und VON AUFSESS (1971) die Anteile von Wund- und Kernfäule an den gesamten Stammfäulen dargestellt. Die Untersuchung umfasst 920 Fichten aus 23 Beständen in Bayern. Als wirtschaftlich bedeutendster Schaderreger tritt bei den Kernfäulen der Wurzelschwamm (*Heterobasidion annosum* [FR.] BREF.) auf. Ähnliche Ergebnisse liefern auch weitere Untersuchungen anderer Autoren (Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Literaturübersicht über den Anteil von *Heterobasidion annosum* in rotfaulen Bäumen. *Literature overview on the share of Heterobasidion annosum in decayed trees.*

Autor author	Region Investigated region	Anzahl kernfauler Bäume trees with butt rot	% <i>H. annosum</i>
DIMITRI 1966	Hessen	335	20%
KATÓ 1967a	Niedersachsen	433	48%
ZYCHA u. KATÓ 1967	Niedersachsen, Hessen	767	75%
SCHÖNHAR 1969	Baden-Württemberg	436	80%
VON PECHMANN u. VON AUFSESS 1971	Bayern	470	70%
		2441 (Summe)	63% (Gewichtetes Mittel)
KALLIO und NOROKORPI 1972	Finnland	128	78

Heterobasidion annosum ist ein Lignin und Zellulose zersetzender Weißfäuleerreger, der vor allem durch die Wurzeln in den Baum eindringt, in geringerem Umfang aber auch über Stammwunden infizieren kann. Der praxisübliche Name „Rotfäule“ kommt von der rotbraunen Verfärbung des zersetzten Holzes und hat nichts mit der zersetzten Holzsubstanz zu tun.

Im englischsprachigen Raum wird der Wurzelschwamm als Annosum root disease, root rot oder red rot bezeichnet. Weitere Synonyme sind *Fomes annosus* (FR.) COOKE, *Fomitopsis annosa* (FR.) KARSTEN, *Polyporus annosus* FR., *Ungulina annosa* und *Trametes radiciperda* HARTIG. Das anamorphe Stadium ist *Spiniger meineckellus* (synonym: *Oedocephalum lineatum*, *Cunninghamella meineckella*). Innerhalb der Ordnung der *Aphyllphorales* gehört der Basidiomycet zur Familie der *Polyporaceae*.

JORGENSEN (1961) gibt eine weltweite Verbreitung von *Heterobasidion annosum* an. Der Schwerpunkt erstreckt sich von Nordamerika über Europa bis nach Asien und liegt vor allem in den gemäßigten Breiten. Auf der Südhalbkugel findet man *Heterobasidion annosum* in Australien und vereinzelt in den südamerikanischen Anden. Das Wirtsspektrum umfasst ungefähr 150 Baumarten, bei denen es sich meist um Koniferen handelt (WOODWARD et al. 1998). Für eine eingehendere Darstellung der Biologie des Pilzes sei auf HASSEBRAUK et al. (1962) und WOODWARD et al. (1998) verwiesen. Eine Schilderung der amerikanischen Verhältnisse bieten TAINTER, F. H. und BAKER F. A. (1996).

5.2 Ökonomische Relevanz – *Economic relevance*

Durch *Heterobasidion annosum* entsteht der Forstwirtschaft in mehrfacher Hinsicht ökonomischer Schaden. ARVIDSON (1954) teilt die Schäden in Primärschäden und Sekundärschäden ein. Als Primärschaden sieht er den direkten Fäuleschaden am Holz. Sekundärschäden definiert er als Verluste durch die Änderung der Stammform und das geringere Wachstum der befallenen Bäume. In der vorliegenden Arbeit soll der Definition ARVIDSONS für die Primärschäden gefolgt werden, wogegen die Sekundärschäden weiter gefasst werden.

5.2.1 Primärschaden – *Primary losses by red rot*

Rundholz

Der Primärschaden besteht in der Entwertung des Holzes durch Verfärbung und Zersetzung im unteren, ökonomisch besonders interessanten Stammabschnitt. Bei hohen Zersetzungsgraden wird das rotfaule Rundholz als unverkäufliches NH-Holz, im besten Falle noch als Brennholz genutzt. Ist das Fäuleausmaß bzw. der Zersetzungsgrad des Stammes weniger weit fortgeschritten, werden nach den gebräuchlichen Richtlinien zur Rundholzsortierung noch Qualitäts- bzw. Güteklassen ausgeschieden, die verkäuflich sind, aber eine wesentliche Wertminderung im Vergleich zu gesundem Holz zur Folge haben. Für Fichte können auf Basis der Holzpreisstatistik der Bayerischen Staatsforstverwaltung für 1997 (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN 1998) folgende Preisrelationen für qualitätsortiertes, gerücktes Holz in Rinde im Vergleich zu Güteklasse B (HKS) angegeben werden: C-Holz (C/EWG) erreicht im Schnitt bei den Abschnitten nach Heilbronner Sortierung (HL) 80% bzw. bei Fixlängen nach Mittenstärkensortierung (L) 91%, D-Holz (D/EWG) lediglich 49% bzw. 51% im Vergleich zu gesundem Holz der Güteklasse B nach HKS. Dies zeigt den deutlichen Wertverlust des rotfäulegeschädigten Holzes. Schlüsselst man den prozentualen Wertverlust nach Sorten auf, wie beispielhaft für HL-Abschnitte in Abbildung 5-2 dargestellt, so zeigt sich beim C-Holz eine weitgehende Sortenunabhängigkeit, beim D-Holz jedoch ein starker prozentualer Erlösverfall mit zunehmenden Stammdimensionen.

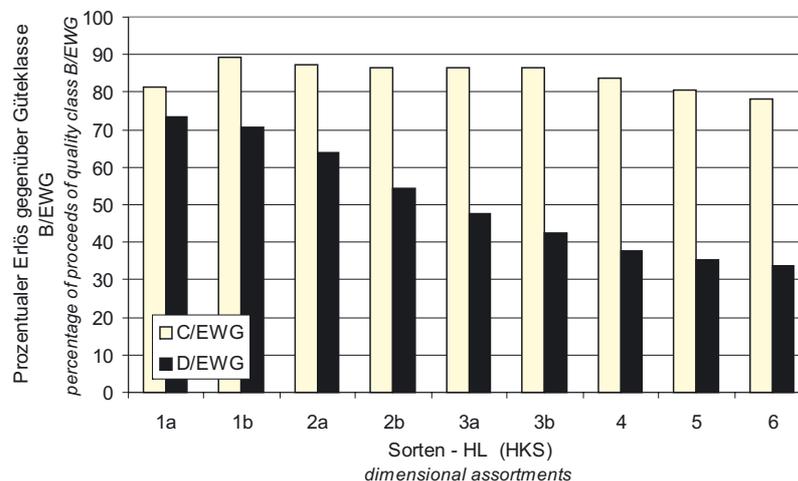


Abbildung 5-2: Prozentualer Erlös der Güteklassen C (EWG) und D (EWG) im Vergleich zu Güteklasse B (EWG), dargestellt für die unterschiedlichen Stärkeklassen von HL-Sortimenten (HKS) – *percentage of the proceeds of quality classes C (EWG) and D (EWG) compared to B (EWG), displayed for different assortments of logs of the class HL according to the German „Handelsklassensortierung“ (HKS).*

Dieser Sachverhalt wiegt finanziell beim Starkholz besonders schwer, da die rotfäulebedingte Holzentwertung eben in den stärkeren unteren Stammteilen auftritt und häufig als D-Abschnitt abgetrennt werden muss, um den übrigen Stamm als B oder wenigstens C verkaufen zu können. Dies scheint eine praxisübliche Maßnahme zu sein, wenn man die Daten der Holzpreisstatistik der Bayerischen Staatsforstverwaltung (Bezugsbasis 1997) heranzieht und den Sortenanfall an Abschnitten (HL) aufgeschlüsselt nach Güteklassen betrachtet. Bei den Abschnitten (HL) werden ca. 80% als C- und D-Qualität verkauft, mit einem Anstieg des D-Holz-Anteils mit der Sortenstärke von ca. 2% bei Stärkeklasse 1a auf über 40% bei Stärkeklasse 6 (Abbildung 5-3).

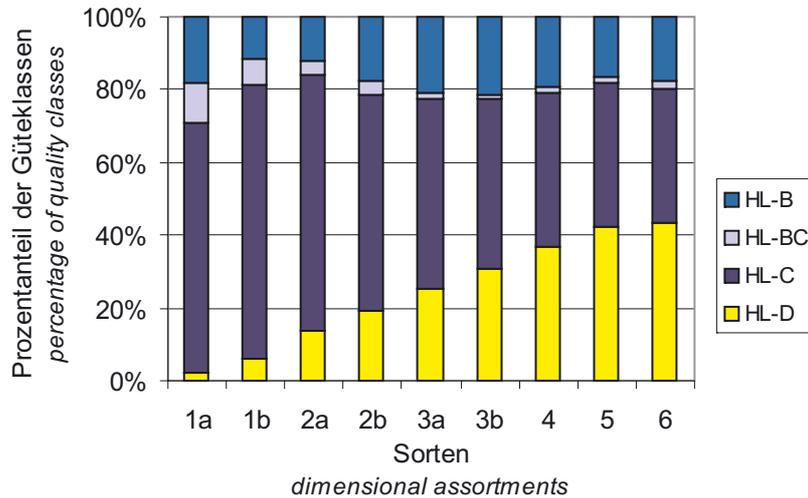


Abbildung 5-3: Veränderung der Güteklassenanteile (HKS) bei steigender Dimension für HL-Abschnitte – *shares of quality classes (D is worst) with increasing log dimension.*

Zur Entwertung des unteren, faulen Abschnittes kommt noch eine rechnerische Stärkeklassenverschiebung des Durchmessers des oberen, gesunden Stammabschnittes bei der Sortierung, die zu weiteren Verlusten führen kann. Die Verluste sind durch die Verschiebung des Mittenstärkendurchmessers zu geringeren Stammdurchmessern begründet, wodurch es zu Sortensprüngen kommen kann. Laut JOHANN (1988) müssen diese Verluste mit 4–7% angesetzt werden. Auch GRABER (1996) beziffert den Verlustanteil durch Deklassierung auf 7%. Dieser Verlust muss zusätzlich zu den Verlusten durch Holzentwertung berücksichtigt werden.

Folgeprodukte

PRATT (1979b) zeigt die Auswirkungen von unterschiedlichen Fäulegraden auf Festigkeitsparameter von Sitka-Fichten. Dabei stellt er bei fortgeschrittenem Fäulegrad eine Reduktion des E-Moduls um 39% fest, was das Holz für alle wesentlichen konstruktiven Zwecke ausschließt. Als Rohstoff für Holzschliff wird Rotfäule in der Regel von den Produzenten ebenfalls abgelehnt.

Eine Verwendung von C-Holz und D-Holz ist in gewissen Mengen zum Beispiel im Zellstoff- und vor allem im Spanplattensektor möglich. Bei der Zellstoffherstellung wird der anteilige Einsatz von rotfäulehaltigem Holz immer mehr eingeschränkt, da bei modernen umweltschonenden Herstellungsverfahren und dem damit einhergehenden Verzicht auf Chlor als Bleichungsmittel kaum mehr Faulanteile im Holz toleriert werden. In einer Untersuchung des FINISH PULP AND PAPER RESEARCH INSTITUTE (1981) werden Einbußen in der Zellstoffausbeute sowie ein erhöhter Anteil von störendem Lignin und hydrophilen Extraktstoffen in Holz mit fortgeschrittener Fäule durch *Heterobasidion annosum* bestätigt. Zudem zeigt sich eine Verringerung der Reißfestigkeit des erzeugten Zellstoffs.

5.2.2 Sekundäre Schäden – *Secondary losses by red rot*

Sekundäre Schäden ergeben sich bei rotfaulen Bäumen unter anderem durch eine Erhöhung des Windbruch- und Windwurfrisikos, verminderte Wuchsleistung befallener Bäume, erhöhte Fäll-, Aufarbeitungs- und Transportkosten und Kosten für eventuelle Bekämpfungsmaßnahmen.

Windwurf- und Windbruch

Eine deutliche Erhöhung des Windbruch- und Windwurfrisikos rotfäulebefallener Bäume wird von etlichen Autoren beschrieben (BAZZIGHER und SCHMID 1969, DIMITRI and TOMICZEK, 1998, KREHAN et al. 1990, 1991, PERSSON 1975, SCHMID-HAAS 1993a/b, 1994, SCHMID-HAAS und BACHOFEN 1991a, SCHMIDT-VOGT 1989, STEYRER und TOMICZEK 1998, 1999, TOMICZEK und STEYRER 1998, WANGLER 1974).

Mit einer Schadensinventur nach der Sturmkatastrophe 1967 in der Schweiz konnten BAZZIGHER und SCHMID (1969) anhand von 9503 Bäumen zeigen, dass der Anteil rotfäulegeschädigter Individuen bei der Fichte ca. 63% betrug. Für das Sturmereignis 1990 in Österreich wird von KREHAN et al. (1990, 1991) ein Rotfäuleanteil von ca. der Hälfte aller vom Sturmschaden betroffenen Bäume angeführt. SCHMID-HAAS und BACHOFEN (1991a) nennen ebenfalls eine Größenordnung von 50%, weisen aber darauf hin, dass der Rotfäuleanteil am Gesamtbestand bei derartigen Untersuchungen meist unbekannt ist. BAZZIGHER und SCHMID (1969) geben in diesem Zusammenhang zu bedenken, dass die tatsächliche Zahl rotfäulebefallener Bäume in ihrer Untersuchung wohl eher unterschätzt wurde, da nicht jeder rotfaule Baum als solcher erkannt wurde.

Tabelle 5-2: Anteil rotfauler Bäume bei einem Windwurfereignis. –
Part of decayed trees in a damage caused by storm.

	Wurf <i>thrown</i>	Wurzelbruch <i>root broken</i>	Stockbruch <i>butt broken</i>	Stammbruch <i>stem broken</i>
insgesamt <i>total</i>	6	66	17	17
davon prozentual rotfaul <i>percentage of decayed trees</i>	0	65	95	33

Im Vergleich mit der oft als stabiler geltenden Weißtanne (*Abies alba* MILL.) muss die Fichte nach rechnerischer Ausschaltung der Rotfäule laut BAZZIGHER und SCHMID sogar als weniger gefährdet eingeschätzt werden. Sie legen weiter dar, dass nur ein geringer Teil des Sturmenschadens auf „Windwurf“ basiert. Der größte anteilige Schaden kommt als Bruch durch das mechanische Versagen unterschiedlicher Baumteile zustande, wobei ein nicht unwesentlicher Teil der Bäume Rotfäuleschäden aufweist (Tabelle 5-2).

Differenziert man anhand der publizierten Daten von BAZZIGHER und SCHMID die Schäden noch genauer nach dem Rotfäulebefall und dabei nach dem Ort des Baumversagens (Abbildung 5-4), so zeigt sich, dass der Rotfäulebefall besonders im Wurzel- und Stockbereich

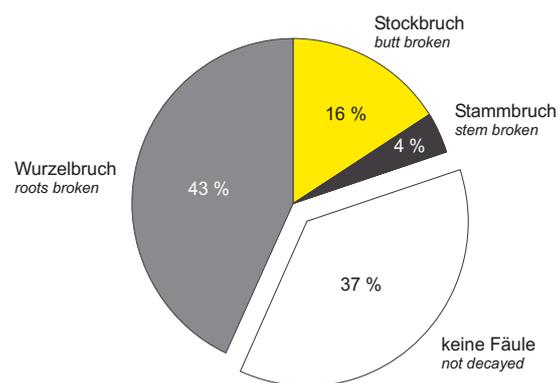


Abbildung 5-4: Position des Bruchs rotfauler Fichten (nach BAZZIGHER und SCHMID 1969).
Position of mechanical breakdown of decayed Norway spruce based on BAZZIGHER and SCHMID 1969.

zum Versagen der mechanischen Integrität des Baumes führt. Bei einer Folgeuntersuchung zur Analyse des Sturmes 1990 finden SCHMID-HAAS und BACHOFEN (1991a) einen weit größeren Anteil an Stammbrüchen (47%), den sie aufgrund der Höhe der Bruchstelle vor allem der Fäule zuschreiben (Abbildung 5-5), da die Bruchhäufigkeit von befallenen Stämmen stark mit der Fäuleausdehnung korrespondiert.

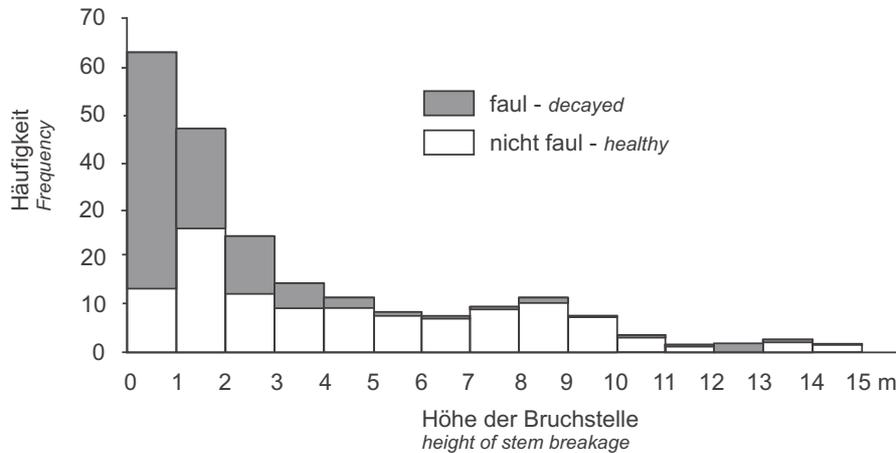


Abbildung 5-5: Häufigkeit verschiedener Bruchhöhen gesunder und rotfäuler Fichten nach SCHMID-HAAS und BACHOFEN 1991a – *Frequency of different breakage heights of healthy and decayed Norway spruce (from SCHMID-HAAS and BACHOFEN 1991a)*

Die Ergebnisse mechanischer Biegeversuche in Untersuchungen von STEYRER und TOMICZEK (1998, 1999) bzw. TOMICZEK und STEYRER (1998) bestätigen dies. Wegen der geringeren mechanischen Stabilität des beschädigten Wurzel- und Stammgewebes zeigt das Holz rotfäulegeschädigter Bäume deutlich geringere Widerstände gegenüber einem Wurf oder Bruch. SCHMID-HAAS et al. (1997) kommen über die Untersuchung der Biege- und Bruchfestigkeit von Holzproben aus befallenen Wurzeln zu ähnlichen Ergebnissen. Ein Rotfäulebefall führt zu signifikant geringeren Festigkeiten im Wurzelholz.

Zusätzlich zu den Kosten durch die Holzerstörung und den Anfall von ungeplanten Sortimenten durch Sturmereignisse müssen auch die deutlich erhöhten Planungs- und Aufarbeitungskosten für Sturmwürfe in die Schadensrechnung einfließen. Oft ergeben sich auch noch Folgeschäden durch eine Verminderung der Bestandesstabilität, erhöhte Begründungskosten auf Sturmwurfflächen oder Schäden am stehenden Bestand.

Für diese Verluste durch rotfäule Fichten finden sich allerdings noch keine Bewertungsansätze in der Literatur, die explizit einen Schaden durch die Rotfäule in Verbindung mit Windschäden aufzeigen.

Wachstumsreduktion von infizierten Bäumen

In der komplexen Wechselwirkung zwischen Pilz und Baum werden auch Wachstumsreaktionen des Baumes durch den Pilz beeinflusst. Die Abwehr und Hemmung des Pilzes kosten den Baum Ressourcen, die für das Wachstum nicht mehr zur Verfügung stehen. Des Weiteren führt der Befall des Wurzelsystems mit der einhergehenden Störung des Wasser- und Assimilat-Austausches der Baumorgane zu einer Verschlechterung der Versorgungslage. Diverse Studien belegen, dass ein ausgeprägter Rotfäulebefall bei Bäumen zu einer Reduktion des Höhen- bzw. Dickenwachstums und folglich zu einer geringeren Volumenleistung des Einzelbaumes führt. In Tabelle 5-3 findet sich eine Übersicht quantitativer Studien zum Rotfäuleeinfluss auf das Baumwachstum bei Fichte.

Tabelle 5-3: Quantitative Untersuchung der Auswirkungen der Fäule auf das Baumwachstum. *Quantitative investigation on impact of decay on tree growth*

Autor	Pathogen	Wuchsdepression	Land	Untersuchungszeitraum
<i>author</i>	<i>pathogen</i>	<i>depression</i>	<i>state</i>	<i>investigated period</i>
HENRIKSEN und JØRGENSEN 1952	<i>H. annosum</i>	Durchmesser Höhe Stammform	Dänemark	1933–1949
ARVIDSON 1954	<i>H. annosum</i>	Durchmesser Höhe Stammform	Schweden	1917–1952
KALLIO und TAMMINEN, 1974	<i>H. annosum</i>	Durchmesser Höhe Volumen	Finnland	10 Jahre
TAMMINEN 1985	<i>H. annosum</i>	Durchmesser	Finnland	–
BENDZ und STENLID 1994, BENDZ-HELLGREN und STENLID, 1995	<i>H. annosum</i> <i>Stereum spec. Armillaria spec.</i>	Durchmesser	Schweden	1954–1983
BENDZ-HELLGREN und STENLID 1997	<i>H. annosum</i>	Durchmesser Höhe Volumen Stammform	Schweden	1972–1991
SCHMID-HAAS et al. 1997	<i>H. annosum</i> als Wurzelfäule	Durchmesser Benadelung	Schweiz	unterschiedlich

Über Paarvergleiche im Rahmen der Schwedischen Waldinventur zwischen 329 gesunden und 329 befallenen Fichten mit paarweise ähnlichem Alter, ähnlichem Durchmesserzuwachs in einer 9-jährigen Bezugsperiode und auch sonst weitgehend übereinstimmenden Wuchsbedingungen zeigt sich ein signifikantes Zurückbleiben des Durchmesserwachstums der Rotfäulebäume in Brusthöhe (BENDZ-HELLGREN und STENLID 1995). Die Wuchsdepression befallener Fichten steigt in den folgenden 30 Jahren auf mehr als 10% an. In dieser Untersuchung gingen allerdings auch Fäuleschäden durch *Armillaria*, *Stereum* und andere Spezies ein, weil keine Artbestimmung der Fäule verursachenden Pilze durchgeführt wurde. Da die Studie auf einer Einzelbaumbetrachtung basiert, ist unklar, inwieweit diese beobachtete Zuwachsdepression der befallenen Individuen auf Bestandesebene durch die gesunden Bäume kompensiert wird, die sich einer geringeren Konkurrenz gegenüber sehen (BENDZ und STENLID 1994). Bei weiteren Untersuchungen, in denen gesunde Konkurrenten von rotfaulen Bäumen mit gesunden Bäumen ohne rotfaule Nachbarn verglichen wurden, konnte allerdings kein besseres Wachstum von Bäumen in der Nachbarschaft rotfauler Fichten festgestellt werden, was gegen ein kompensatorisches Wachstum auf Bestandesebene spricht (BENDZ-HELLGREN und STENLID 1997). SCHMID-HAAS et al. (1997) beschreiben auf Einzelbaumebene hoch signifikante Zusammenhänge zwischen deutlichen Nadelverlusten und Wuchseinbußen bei Fichten mit rotfäulebefallenen Wurzeln, stellen aber auf Bestandesebene keinen statistisch absicherbaren Einfluss von Wurzelfäulen auf das Wachstum von Fichten fest, was die These einer Kompensation durch gesunde Bäume im Bestand stützt. Reine Stock- und Stammfäulen ohne Befall des Wurzelsystems hingegen zeigen nach ihren Erkenntnissen keinen signifikanten Einfluss auf das Durchmesserwachstum. Dies mag als Hinweis darauf gelten, dass insbesondere aus den Wurzeln aufsteigende Kernfäulen deutliche Wuchsdepressionen an Fichten hervorrufen, da sie das

Wurzelsystem angreifen und dadurch die Wasser- und Nährelementaufnahme stören. Die Autoren beschreiben nur für 50% der Bäume mit Stockfäulen auch Wurzelfäulen. Dies könnte einerseits auf die verwendete Stichprobenentnahme mittels Bohrung zurückzuführen sein, mit der ein sicherer Fäulenachweis nicht möglich ist (STENLID und WÄSTERLUND 1986). Andererseits kann es sich aber auch um Wundfäule handeln, wenn man an den hohen Anteil von Wundfäulen denkt, die in manchen Beständen beobachtet werden (SCHMID-HAAS et al. 1997, KATÓ 1967b, 1969, VON PECHMANN et al. 1973). In der Regel kann davon ausgegangen werden, dass eine Kernfäule am Stamm auch eine Wurzelfäule bedingt, wobei der Erreger eventuell in der Wurzel schon abgestorben sein kann, während er im Stamm noch nachweisbar ist. Bei Wundfäulen muss sich die Fäule nicht in jedem Falle auf die Wurzeln ausdehnen, auch wenn die Fäule am BHD durch Bohrung feststellbar ist. Denn je höher die Wundstelle am Stamm liegt, desto länger dauert ein Vordringen des Pilzes zu den Baumwurzeln und umso unwahrscheinlicher ist es, dass das Pathogen dort durch Bohrung nachgewiesen werden kann.

Mittels einer Energiebilanz-Betrachtung der Hemmstoffbildung in der Reaktionszone zwischen Splintholz und befallenem Reifholz beziffern BENDZ-HELLGREN und STENLID (1995) den Anteil des Durchmesserverlustes in Brusthöhe (insgesamt 1,4 mm), der auf die erhöhte Hemmstoffbildung zurückzuführen ist, auf 0,82 mm. Das bedeutet 59% der Wuchsdepression gehen auf die Hemmstoffbildung des Baumes zur Pilzabwehr zurück. Demnach müssten die übrigen 41% durch den gestörten Nährstoff- und Wasseraustausch zwischen Wurzel, Stamm und Krone zustande kommen, wenn man von einem erhöhten Konkurrenzdruck der gesunden Nachbarbäume durch deren relativ besseres Wachstum absieht.

Auf die Interdependenzen zwischen der Reaktionszonenbildung, der Splintfläche und einer Verschiebung der Nährelementallokation sowie die Konsequenzen für das Baumwachstum weisen SCHMID-HAAS und BACHOFEN (1991a) hin und stellen ein Beziehungsnetz zwischen den Faktoren auf (Abbildung 5-6).

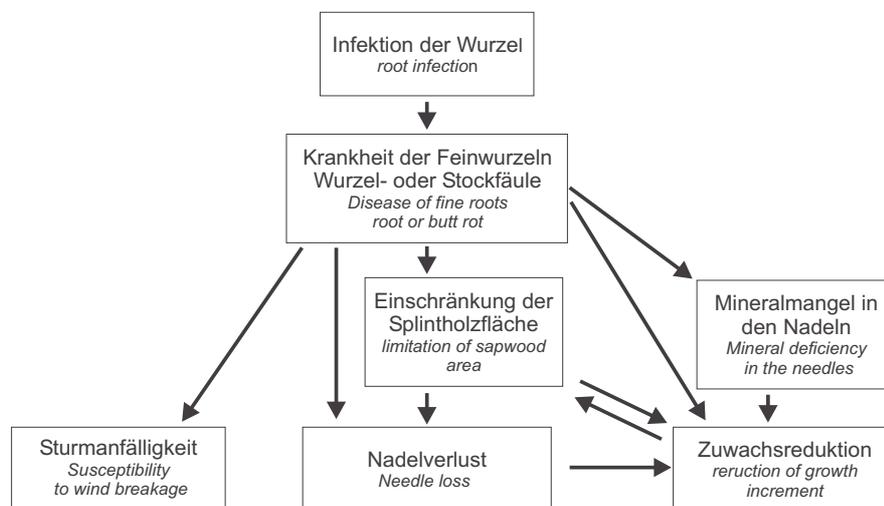


Abbildung 5-6: Beziehungsnetz zwischen Fäule, Baumvitalität und Sturmschadensrisiko nach SCHMID-HAAS und BACHOFEN (1991a) – *Framework of correlations between decay, tree vitality and risk by storm damage.*

Ihre Thesen bieten eine plausible Erklärung für die Ergebnisse von SINNER und REHFUESS (1972), die an stark kernfaulen Fichten, bei denen der Splint vom Pilz teilweise unterbrochen war, neben einem reduzierten Höhen- und Durchmesserzuwachs auch einen signifikanten Kalium-Mangel in den Nadeln nachwies. TOMICZEK (1990, 1993) beobachtet bei rotfaulen

Fichten eine starke Einlagerung von Kalium und Calcium in der Reaktionszone zwischen befallenen Reifholz und Splint, wodurch die zur Abwehr eingesetzten Nährelemente folglich nicht für die Nadeln zur Verfügung stehen.

Zusammenfassend scheint also ein Faktorenkomplex aus der Behinderung der Wasser- und Nährelementleitung durch den Angriff auf die Wurzel und die Splintzone und der aktiven Produktion von Abwehrstoffen mit einhergehender Änderungen der Nährelementallokation verantwortlich für die Zuwachsreduktion von rotfäulebefallenen Bäumen zu sein.

BENDZ-HELLGREN und STENLID (1995) belegen in Beispielrechnungen auf Grundlage ihrer Einzelbaumstudien für Schweden, dass bei einem mittleren Durchmesserzuwachsverlust von 9% in Bruthöhe der bisher nur auf Basis der Holzentwertung kalkulierte Schaden nochmals um 56% nach oben korrigiert werden muss. ARVIDSON (1954) beziffert die Verluste durch das Minderwachstum sogar mit 58–61% des Primärschadens, wobei er noch eine größere Abholzigkeit bei rotfaulen Stämmen in die Rechnung mit einbezieht. Eine Änderung der Stammform wird auch von HENRIKSEN und JØRGENSEN (1952) geschildert.

Diese Ergebnisse illustrieren das beträchtliche Schadpotenzial, das allein auf Grund der Wuchseinbußen durch Rotfäule zustande kommen kann.

Erhöhter Fäll-, Aufarbeitungs- und Sortieraufwand

Weitere sekundäre Schäden ergeben sich durch erhöhten Fäll-, Aufarbeitungs-, Sortier- und Rückeaufwand in befallenen Beständen.

Schon beim Fällen verlangen stark rotfaule Bäume einen überdurchschnittlichen Zeitaufwand, um die Fällrichtung bei der motormanuellen Ernte einzuhalten und die Sicherheit am Arbeitsort zu gewährleisten. Unvorhergesehene Fäll- und Rückeschäden am verbleibenden Bestand und vorhandener Verjüngung sind sonst nicht auszuschließen.

Eine gebräuchliche Verfahrensweise bei der Aufarbeitung stark rotfauler Stämme ist das so genannte „Gesundschneiden“, bei dem nach dem Fällen so lange Stücke vom starken Ende des Stammes abgetrennt werden, bis das Ausmaß der Fäule am verwertbaren Stamm tolerierbar ist. Die dabei anfallenden Arbeits- und Maschinenkosten addieren sich zum Verlust durch die abgetrennten, im Allgemeinen unverkäuflichen X-Holz-Stücke. Zusätzlich muss bei der Sortierung rotfaulen Holzes der Fäuleanteil am Querschnitt sowie der Zersetzungsgrad angesprochen werden. Anschließend wird die Güte- bzw. Qualitätsklasse zugewiesen und erst dann bei Langholz und Abschnittware angeschrieben. Der zusätzliche Zeitaufwand muss in eine ökonomische Betrachtung der Schäden einfließen. Auch ein erhöhter Rücke- und Lageraufwand entsteht durch rotfaule Bäume, die nach Möglichkeit separiert vom gesunden Holz gepoltet bzw. geschichtet werden, um dem Käufer Sortimente einheitlicher Qualität anbieten zu können.

Kosten durch Bekämpfungsmaßnahmen

Hinzu kommen noch Kosten durch aktive Bekämpfungsmaßnahmen, z.B. die Entfernung der faulen NH-Stücke bzw. Wurzelstöcke aus dem Bestand oder eine biologische bzw. chemische Stockbehandlung, wie sie in HOLDENRIEDER und GREIG (1998), PRATT et al. (1998) und KORHONEN et al. (1998) ausführlich besprochen werden. Diese Bekämpfungsmaßnahmen können im Analogieschluss zur von SAGL (1995) dargestellten Wildschadensvermeidung ökonomisch als pagatorische Risikokosten verstanden werden. Dies sind Kosten, die durch die Vermeidung absehbarer Risiken anfallen. Will man eine Entwertung des Bodens für zukünftige Bestände vermeiden, müssen Bekämpfungsmaßnahmen durchgeführt werden (BENDZ-HELLGREN et al. 1998).

Sonstige Kosten

Es fallen noch weitere Kosten an, wie zum Beispiel durch das erhöhte Borkenkäferisiko rotfäulegeschädigter Bäume, wie es von SIERPINNSKI (1969) beschrieben wird. Ein weiterer Kostenfaktor ist das Risiko der Astung oder Förderung rotfauler Bäume anstatt gesunder, mit einer langfristig zu verzinsenden Fehlinvestition in rotfaule Bäume, die nicht die gewünschte Wertentwicklung zeigen. Hier fällt eine Handlungsalternative aus, nämlich die Astung dauerhaft nicht rotfauler Bäume, da am stehenden Baum eine Infektion nur mit großem Aufwand diagnostizierbar ist (MARTIN 1978, STENLID und WÄSTERLUND 1986, NIEMZ et al. 1988, GRABER 1996) und Vorhersagen über die zukünftige Befallswahrscheinlichkeit von Einzelbäumen kaum machbar erscheinen. Die einzige Möglichkeit wäre der völlige Verzicht auf Astung in Rotfäulebeständen, was sich aber in Opportunitätskosten niederschlagen würde, da eine Astung als wertsteigernde Maßnahme nicht eingesetzt werden kann. Opportunitätskosten sind „wegen des ‚Nicht-Nutzen-Könnens‘ von anderen Alternativen in Kauf zu nehmende Gewinneinbußen“ (SCHNECK et al. 1994), die zum Beispiel als kalkulatorische Kosten in eine ökonomische Bewertung von Rotfäuleschäden mit herangezogen werden können.

Opportunitätskosten entstehen auch etwa durch den Zwang zum Baumartenwechsel bzw. zu veränderten waldbaulichen Verfahren, etwa angepasste Pflanzabstände und Behandlungsstrategien oder Verkürzung der Umtriebszeit wie sie in der Literatur als taugliche Gegenmaßnahmen gegen Rotfäule beschrieben werden (KATÓ 1967, WERNER 1971, JOHANN 1988, GRABER 1996, KORHONEN et al. 1998).

Zuletzt sind nach dem Opportunitätskostenprinzip auch noch Aufwendungen heranzuziehen, die im Verwaltungsbereich anfallen und durch eine aufwendigere Planung, Leitung und Kontrolle auf Seiten der Betriebsführung sowie durch Erfassung, Auswertung und Forschung im Zusammenhang mit Rotfäuleschäden Personal binden, das nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten für andere Arbeiten eingesetzt werden könnte.

5.2.3 Schadquantifizierung – Quantification of losses

In der Literatur finden sich Schätzungen zur Schadquantifizierung, die wohl aber unter einer Berücksichtigung aller oben genannten Faktoren das durch Rotfäule und insbesondere *Heterobasidion annosum* verursachte Schadausmaß bei weitem unterschätzen. Die Schwierigkeit bei einer verlässlichen monetären Schadquantifizierung liegt einerseits in der Erfassung der aufgeführten, sehr unterschiedlichen Einflussgrößen sowie andererseits bei der nicht immer trivialen Abgrenzung von Kern- und Wundfäuleschäden bzw. dem verantwortlichen Schaderreger. Beide Effekte zusammen führen zu einer beträchtlichen Unschärfe und erklären die abweichenden Schätzungen der Schäden. Verlustrechnungen für den deutschsprachigen Raum sind in Tabelle 5-4 zusammen gestellt:

Tabelle 5-4: Übersicht über Arbeiten zur ökonomischen Rotfäulebewertung. Kursive Werte sind vom Autor aus veröffentlichten Daten berechnet – *synopsis on publications dealing with economic assessment of red rot. Italicized values were calculated by the author from published data.*

Autor <i>author</i>	Region / Ort <i>region</i>	Schaden <i>damage</i>	Verlusthöhe <i>damage quantification</i>	Pathogene <i>pathogens</i>
KATÓ 1969	Niedersachsen	Stammfäulen insgesamt	2,7 Mio. € (27 €/Jahr/ha, 5 €/fm o.R. Fichtenderbholz) (Holzentwertung, Deklassierung und Erntekosten)	diverse
		nur Wundfäulen	durch Wildschäden 1,3 Mio. € (13 €/Jahr/ha) durch sonstige Verletzungen 0,5 Mio. € (5 €/Jahr/ha)	diverse
		nur Kernfäulen	durch <i>Heterobasidion</i> 0,5 Mio. € (5 €/Jahr/ha) durch andere Kernfäulen 0,4 Mio. € (4 €/Jahr/ha)	<i>H. annosum</i> andere
KATÓ 1967b	Niedersachsen	Kernfäulen	durchschnittlich 6,6% (38000 fm) des Einschlags von 1960 – 1964 sind entwertet	diverse
JOHANN 1988	Traun'sches Forstamt Rapottenstein (Niederösterreich)	Stammfäulen	davon 10 % höhere Aufarbeitungskosten 90 % Holzwertverlust	diverse
GRABER 1996	Schweiz (Jura, Mittelland, Voralpen)	Stammfäulen	14 % Wertverlust (60 Franken /Jahr/ha) davon 57 % Holzentwertung 36 % Mehrkosten 7 % Deklassierung	diverse
DIMITRI und TOMICZEK 1998	Deutschland	Stammfäule	66,5 Mio. € deutschlandweit (Holzentwertung, Deklassierung)	<i>H. annosum</i>
	Österreich	Stammfäule	192 – 350 Mio. € (österreichweit)	<i>H. annosum</i>

Eine umfassende betriebswirtschaftliche Betrachtung der Rotfäule, die alle Effekte mit einbezieht, steht noch aus. Insgesamt wird deutlich, dass durch Kernfäulen und insbesondere *Heterobasidion annosum* der Forstwirtschaft finanzielle Schäden in beachtlichen Größenordnungen entstehen.

5.3 Ausbreitung von Rotfäule im Stamm – *Spread of red rot in the stem*

Die genauen Mechanismen der Ausbreitung des Pilzes im Stamm sind bis jetzt noch weitgehend ungeklärt. Insbesondere zentrale Fragen der Einflussfaktoren auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit und Ausdehnung bedürfen noch einer größeren wissenschaftlichen Aufmerksamkeit.

Im Folgenden sollen die wichtigsten Parameter zur Beschreibung der Rotfäuleausbreitung im Stamm definiert und vorgestellt werden. Die bestimmenden statistischen und biologischen Zusammenhänge werden anhand von Literaturangaben anderer Autoren diskutiert und in einen Zusammenhang gestellt. Dazu werden folgende Hypothesen behandelt:

- Hypothese A: Das Faulflächenprozent ist für alle befallenen Bäume eines Bestandes konstant.
- Hypothese B: Das Faulflächenprozent ist unabhängig von Standort.
- Hypothese C: Über das Faulflächenprozent kann bei gegebenem Alter, Durchmesser und Standort auf die Fäulehöhe im Baum geschlossen werden.
- Hypothese D: Die Fäuleausdehnung folgt der Stammform und wird vor allem durch das Splintholz limitiert, das der Pilz nicht gut besiedeln kann.
- Hypothese E: Die Ausdehnung einer Stammfäule ist, auch wenn die Infektion über die Wurzeln erfolgt, ähnlich einer Wundfäule nach dem CODIT-Schema zu erklären.
- Hypothese F: Die Kernfäule breitet sich vor allem radial vom Mark nach außen aus.
- Hypothese G: Der Fäulegrad ist von der Fäuledimension abhängig.

Die Reaktion des befallenen Baumes wird nicht eigens diskutiert, da die Wachstumsminde- rung aufgrund von Fäulebefall bereits im Abschnitt 5.2.2 besprochen wurde.

Das vorliegende Unterkapitel soll einen Überblick über den Stand des Wissens hinsichtlich der Ausbreitung und Ausdehnung der Rotfäule im Stamm geben. Dies bildet die theoretische Grundlage des anschließend beschriebenen Rotfäuleausbreitungsmodell, das als Synthese die Erkenntnisse vernetzt, aggregiert und in ein Simulationsprogramm überführt.

5.3.1 Beschreibung des Fäuleausmaßes im Stamm

Description of the extent of decay in the stem

Die Ausbreitung des Pilzes im Stamm kann durch die radiale Ausdehnung, die longitudinale Ausdehnung, die Fäuleform sowie den Fäulegrad quantitativ charakterisiert werden. Diese Größen erlauben eine Berechnung des Fäulevolumens und zusammen mit Stammparametern eine dreidimensionale Beschreibung der Fäule im Stamm.

Fäuledurchmesser und -fläche

Der Fäuledurchmesser (FD) beschreibt die radiale Fäuleausdehnung und bestimmt die Faulfläche (FF), die unter der Annahme eines kreisrunden Fäulequerschnitts nach Formel 5-1 berechnet wird. Gelegentlich wird der Fäuledurchmesser als anteiliger Durchmesser relativ zum Stammdurchmesser (D) in der jeweiligen Betrachtungshöhe definiert (ZYCHA und DIMITRI 1968, ZYCHA et al. 1970). Dieses Durchmesserprozent (DP) ist in Formel 5-2 dargestellt. Ein ebenfalls von ZYCHA et al. (1970) eingeführtes relatives Maß ist das Faulflächenprozent (FFP), das den prozentualen Flächenanteil der Fäule an der Stammfläche beschreibt und meist für den Fällschnitt bestimmt wird (Formel 5-3).

In der Literatur finden sich folgende Größen zur Beschreibung:

$$\text{Faulfläche} \quad FF = \left(\frac{FD}{2}\right)^2 \cdot \pi \quad \text{Formel 5-1}$$

$$\text{Fäuledurchmesserprozent} \quad FDP = \frac{FD}{D} \cdot 100 \quad \text{Formel 5-2}$$

$$\text{Faulflächenprozent} \quad FFP = \frac{FD^2}{D^2} \cdot 100 \quad \text{Formel 5-3}$$

Formel 5-2 und Formel 5-3 zur Berechnung von FF und FFP gelten nur unter der Annahme, dass sowohl Fäule (FF, FFP) als auch Stamm (FFP) einen kreisrunden Querschnitt besitzen.

Fäulehöhe

Die longitudinale Ausdehnung der Fäule wird durch die Fäulehöhe definiert, die entscheidenden Einfluss auf die Stammwertung hat (ZYCHA 1967). Auch hier werden in der Literatur häufig absolute Faulhöhen angegeben, doch finden sich auch Angaben der Faulhöhe als relativer Wert zur Baumhöhe H (REHFUESS 1969, 1973), wie in Formel 5-4 dargestellt.

$$\text{Relative Fäulehöhe} \quad FH_{\text{rel}} = \frac{FH}{H} \quad \text{Formel 5-4}$$

Fäuleform

Die Fäuleform ist ebenfalls ein wichtiges Kriterium zur Beschreibung der Fäuleausdehnung im Stamm. Sie beschreibt die Änderung des Fäuledurchmessers über die longitudinale Achse und gibt Hinweise über die biologischen Zusammenhänge zwischen Pilz- und Baumwachstum. In der Literatur finden sich keine expliziten Beschreibungsansätze der Fäuleform auf quantitativer Grundlage. Die Fäuleform kann jedoch vereinfachend wie die Stammform durch Formzahlquotienten angenähert werden oder detaillierter mit Fäuleformkurven analog den Stammformkurven.

Fäulevolumen

Das Fäulevolumen (FV) geht aus der Fäulefläche (FF), der Fäulehöhe (FH) und der Fäuleform hervor. Es lässt sich als Integral des Fäuledurchmessers über die Fäulehöhe berechnen und bestimmt den Volumenanteil des entwerteten Holzes. Eine mögliche Annäherung in Analogie zum Stammvolumen ist in Formel 5-5 aufgeführt.

$$\text{Fäulevolumen} \quad FV = FF \cdot FH \cdot \text{Formzahl} \quad \text{Formel 5-5}$$

Auch hier könnte man ein relatives Maß (FV_{rel}) zum Stammvolumen (V) einführen, um den Anteil des faulen Holzes am gesamten Stamm besser einschätzen zu können (Formel 5-6).

relatives Fäulevolumen

$$FV_{\text{rel}} = \frac{FV}{V}$$

Formel 5-6

Fäulegrad

Der Fäulegrad (FG) beschreibt den Zersetzungsgrad (GRABER 1994, 1996, KALLIO und TAMMINEN 1974) des Holzes. Er reicht von beginnender Verfärbung bis zur vollkommenen Auflösung des Holzgefüges durch die Lignin- und Zellulosezersetzung. Der Fäulegrad stellt ein wichtiges Kriterium bei der Rundholzsortierung dar. Folgende vierstufige Einteilung nach KATÓ (1967a) in Anlehnung an ZYCHA (1962) hat sich über etliche Publikationen verschiedener Autoren hinweg etabliert (KATÓ 1967a, 1967b, GRABER 1994, 1996, KALLIO und TAMMINEN 1974):

- FG I Holz verfärbt, sonstige Eigenschaften nur geringfügig verändert,
- FG II Holz verfärbt, mechanische Eigenschaften beeinträchtigt, Holz noch schnittfest,
- FG III Holz verfärbt, mechanische Eigenschaften stark beeinträchtigt, Gefüge erhalten und
- FG IV Holz weich und faserig aufgelöst, Struktur völlig verloren, meist Höhlung im Stamm.

WERNER (1971, 1973) benutzt für seine Beschreibung des Rotfäulegrades eine differenzierteres Schema und teilt den Zersetzungsgrad in sechs Stufen ein:

- FG I violette Holzverfärbung,
- FG II rotbraune Holzverfärbung, noch schnittfest,
- FG III rotbraune Holzverfärbung, zersetzt,
- FG IV rotbraune Holzverfärbung, mit hohler Randzone,
- FG V hohl, mit breiter, rotbrauner Randzone und
- FG VI hohl bis zum noch gesunden Holzkörper.

Bei beiden Einteilungen wird in den Stufen I und II verfärbtes und leicht zersetztes, aber noch schnittfestes Holz erfasst, das eventuell noch als Holz der Güteklasse C bzw. D (HKS) verkauft werden kann, wenn der Fäuleanteil am Stamm nicht zu groß ist.

5.3.2 Hypothese A: Das Faulflächenprozent ist für alle befalle- nen Bäume eines Bestandes konstant.

Hypothesis A: The relative rot area at stem base is constant for all trees in the same stand.

Etliche Autoren konnten feststellen, dass das Verhältnis von Fäuledurchmesser zum Stammdurchmesser, das so genannte Fäuledurchmesserprozent, zwischen verschiedenen Beständen starken Schwankungen unterworfen ist, aber pro Bestand als konstant betrachtet werden kann. Das Fäuledurchmesserprozent kann, wie im Unterkapitel 5.3 gezeigt, über die Relation von Fäule- zu Stammdurchmesser berechnet werden.

So belegen beispielsweise ZYCHA (1967), ZYCHA und DIMITRI (1968) bzw. ZYCHA et al. (1970), dass ein hochsignifikanter Zusammenhang zwischen dem Durchmesser des Stammes am Abtrieb und dem Fäuledurchmesser besteht. Mittels linearer Regression wird der Zusammenhang von ZYCHA et al. (1970) für zehn Bestände überprüft. Das Ergebnis ist eine Schar von Regressionsgeraden (Abbildung 5-7), die in ihrer Tendenz alle gleich sind, aber leichte Unterschiede in ihrer Steigung und deutliche Unterschiede

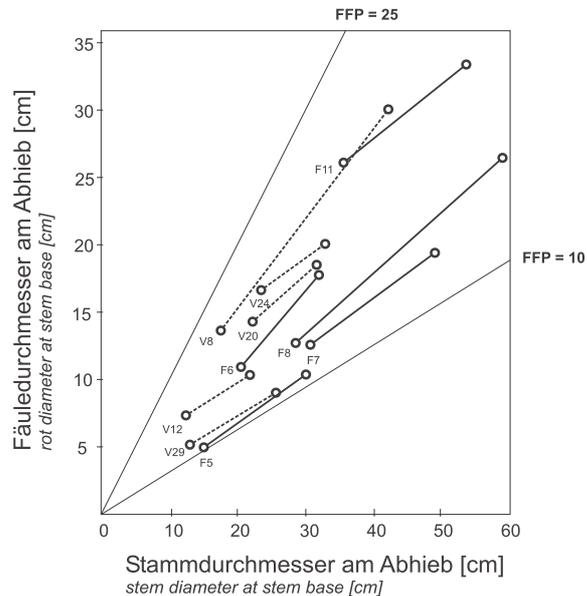


Abbildung 5-7: Zusammenhang zwischen Stamm- und Fäuledurchmesser für verschiedene Bestände (nach ZYCHA 1970) – relation between stem and rot diameter for different stands (from ZYCHA 1970).

in ihrer Lage aufweisen, was die Autoren auf standörtliche Unterschiede in ihrem niedersächsischen, hessischen und nordrhein-westfälischen Untersuchungsgebieten zurückführen. Als Referenz sind zusätzlich zwei Faulflächenprozentgeraden eingetragen, um eine Einordnung der Streubreite zu ermöglichen. Das Faulflächenprozent unterliegt derselben Proportionalität wie das Fäuledurchmesserprozent.

VON PECHMANN et al. (1973) finden für bayerische Bestände ebenfalls hochsignifikante lineare Zusammenhänge zwischen Fäuledurchmesser und Stammdurchmesser am Stock mit Bestimmtheitsmaßen um 0,5. Die Varianz auf den einzelnen Flächen ist jedoch relativ hoch.

REHFUESS stellt in Baden-Württemberg besonders hohe relative Fäuledurchmesser an Beständen fest, die auch einen hohen Anteil fauler Stämme aufweisen (REHFUESS 1969, 1973) und spricht von einer starken Streuung zwischen den Beständen.

In der Tabelle 5-5 sind die Bestandesmittelwerte des Faulflächenprozents und die Streuung zwischen den Beständen aufgeführt. Die Werte wurden aus publizierten Daten berechnet.

Tabelle 5-5: Mittlere Faulflächenprozentangaben berechnet aus Daten verschiedener Autoren – *mean relative rot area values calculated from published data of various authors.*

Autor <i>author</i>	Untersuchungsgebiet <i>investigated region</i>	Flächen- zahl <i>No. of stands</i>	Baum- zahl <i>No. of trees</i>	Faulflächenprozent <i>relative rot area (FFP)</i>			
				Mittel <i>mean</i>	SD <i>sd</i>	Min <i>min</i>	Max <i>max</i>
ZYCHA 1967	Hessen, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen	39	1877	29,82	13,54	7,57	55,29
ZYCHA, DIMITRI u. KLIEFOTH 1970	Niedersachsen, Hessen	10	935	25,02	10,62	14	45
VON PECHMANN et al. 1973	Bayern	9	863	36,06	15,36	14,50	58,10
REHFUESS 1969, 1973	Baden-Württemberg	20	860	38,79	16,42	13,69	75,86

Das Faulflächenprozent als eine dimensionsunabhängige Verhältnisgröße kann im Bestand nur konstant sein, wenn bei gleich alten Bäumen die soziologische Stellung, und damit die Baumdimension, keinen Einfluss auf die absolute radiale Pilzausbreitung hat. Wäre das Faulflächenprozent von der sozialen Klasse abhängig, hieße dies für Altersklassenwälder, dass der Pilz in gewissem Rahmen unabhängig vom Baum wächst. Vorherrschende Bäume mit entsprechend hohem BHD müssten demnach geringere Faulflächenprozente aufweisen als dünnere beherrschte oder mitherrschende. In der Literatur finden sich keine Belege für einen solche Unabhängigkeit von Pilz und Baum.

VON PECHMANN et al. (1973) finden keinen statistisch nachweisbaren Zusammenhang zwischen Kraftscher Baumklasse und Fäuleausdehnung. Mit zunehmendem Brusthöhendurchmesser steigt der Fäuledurchmesser, nicht aber das Faulflächenprozent.

ZYCHA (1967) untersuchte an niedersächsischen, nordrhein-westfälischen und hessischen Beständen den Zusammenhang zwischen Faulfläche und durchschnittlicher Jahrringbreite am faulen Stammquerschnitt. Er kommt zum Schluss, dass die Zunahme der Faulfläche bei steigender Jahrringbreite in etwa das stärkere Kreisflächenwachstum des Baumes kompensiert. Dies bedeutet, dass schneller wachsende Bäume mit breiteren Jahrringen auch einer schnelleren Holzerstörung durch den Pilz ausgesetzt sind. Er belegt die Proportionalität von Fäuledurchmesser zu Stammdurchmesser auch über einen direkten Vergleich von Fäule- und Stammdurchmesser, indem er den Bestand in 5cm-Durchmesser-Klassen aufteilt und diese hinsichtlich des relativen Fäuledurchmessers vergleicht. Lediglich bei sehr alten Beständen mit einem mittleren Durchmesser von über 50 cm am Fallschnitt beschreibt er Unregelmäßigkeiten, die er auf Sekundärinfektionen zurückführt. Auch KATÓ (1967) kann eine deutliche lineare Beziehung zwischen Stamm- und Fäuledurchmesser zeigen. Er weist darauf hin, dass dieser Zusammenhang für *Heterobasidion annosum* Gültigkeit besitzt. Nimmt man andere holzerstörende Pilze mit in die Regression auf, so führt dies zu einer degressiv steigenden Kurve. GRABER (1996) entwickelt zwei gegenläufige Hypothesen beim Zusammenhang zwischen „Baumvitalität“ und Intensität des Kernfäuleschadens, die eine Konstanz des Faulflächenprozentes pro Bestand begründen könnten. Auf der einen Seite seien vitalere Bäume besser in der Lage, Abwehrstoffe zu bilden und sich gegen den Pilz zur Wehr zu setzen. Auf der anderen Seite wiesen vitalere Bäume größere Jahrringbreiten auf, mit weniger Spätholzanteil, der die Pilzentwicklung eher hemme. Daher könne der Pilz wegen der breiteren Jahrringe schneller wachsen.

Alter

Auf eine Abhängigkeit des Faulflächenprozent vom Baum- bzw. Bestandesalter kann aus bisherigen Veröffentlichungen nicht geschlossen werden, wenn man von der durch RIEGER (1991) postulierten Phasendisposition absieht, nach der eine Ausbreitung einer Infektion durch *Heterobasidion annosum* im Stamm bis zu einem Baumalter von 10–20 Jahren eher unwahrscheinlich ist. ZYCHA und ULRICH (1969) beschrieben eine Unabhängigkeit des Faulflächenprozent vom Bestandesalter und bestätigen damit frühere Untersuchungen von ZYCHA (1967), in denen zusätzlich auf die stärkere Streuung des Faulflächenprozent bei Stämmen großen Durchmessers hingewiesen wird.

Nimmt man als Datenbasis die veröffentlichten Daten von REHFUESS (1969, 1971), VON PECHMANN et al. (1973) und ZYCHA (1967) zusammen und stellt das Faulflächenprozent über dem Alter dar, so lässt sich kein definitiver Alterseinfluss erkennen (Abbildung 5-8).

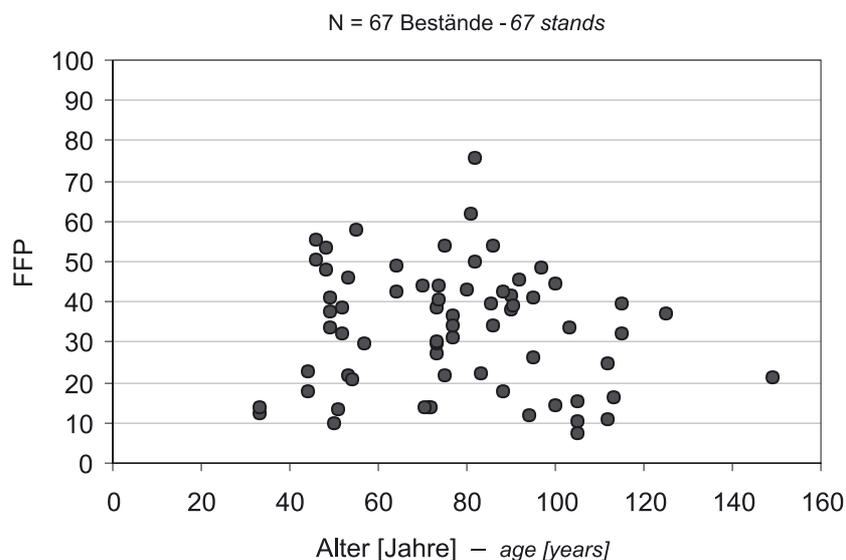


Abbildung 5-8: Zusammenhang zwischen mittlerem Baumalter und Faulflächenprozent (Datenbasis siehe Text) – relative rot area (FFP) in relation to mean tree age.

Fazit

Insgesamt lässt sich aus den dargestellten Ergebnissen ableiten, dass das Faulflächenprozent pro Bestand als konstant angenommen werden kann. Das bedeutet ein gleichsinniges Verhalten von Pilz- und Baumwachstum. Der Pilz wächst im Durchmesser sozusagen mit dem Baum mit. Als relatives Maß ist das Faulflächenprozent unabhängig von der Baumdimension und sozialen Klasse. Nach dem heutigen Stand der Kenntnis reagiert das Faulflächenprozent auch altersunabhängig. Für eine altersabhängige Verschiebung des Verhältnisses von Faulfläche zu Stammfläche existieren keine Anhaltspunkte. Allerdings wurden für die Ableitung dieser Zusammenhänge ausschließlich alte Flächen untersucht, sodass die Zusammenhänge im Initialstadium der Pilzausbreitung im Wesentlichen unbekannt sind. Zudem basieren die Ergebnisse ausschließlich auf einer Altersreihenbetrachtung. Es fehlen Wiederholungsaufnahmen an identischen Beständen, die für einzelne Individuen die Zeitkonstanz über längere Zeiträume belegen. Solche Aufnahmen würden den Einsatz von Computertomographie oder äquivalenter zerstörungsfreier Verfahren an denselben lebenden Bäumen in definierten Zeitintervallen erforderlich machen.

5.3.3 Hypothese B: Das Faulflächenprozent ist unabhängig vom Standort. *Hypothesis B: The relative rot area FFP is not influenced by the site.*

Standort

Wie bereits angesprochen, existieren deutliche Unterschiede zwischen den Faulflächenprozenten verschiedener Bestände. REHFUESS (1969, 1973) führt dies auf Standortunterschiede zurück. Auch ZYCHA (1967) führt Unterschiede beim Quotienten von Fäuledurchmesser zu Stammdurchmesser auf Standortfaktoren zurück, wobei er seine Bestandeswerte einer Stratifikation nach dem Ausgangssubstrat unterzieht. Eine Darstellung der Werte auf der Basis seiner Veröffentlichung lässt eine substratspezifische Differenzierung der Faulflächenprozenten in die Hauptgruppen Grauwacke, Kalk, Sand und Schotter sowie eine Mischgruppe zu, die erwartungsgemäß stark streut (Abbildung 5-9). Die Faulflächen können dabei aus den angegebenen Durchmesserwerten berechnet werden, wenn man die Fäule- sowie die Stammquerschnittsform als kreisförmig annimmt. Dabei liegen Bestände mit kalkhaltigem Substrat im Faulfläche prozentbereich von 25 bis 75, während Bestände mit Kalk, Schotter und Grauwacken als Ausgangsgestein Faulflächenprozentbereiche von 10 bis 25 aufweisen. Der dargestellte Zusammenhang ist allerdings nur als Tendenz zu verstehen, da die getestete Flächenanzahl nicht repräsentativ ist (ZYCHA 1967). Besonders die Grauwacken-Flächen sind stark unterrepräsentiert.

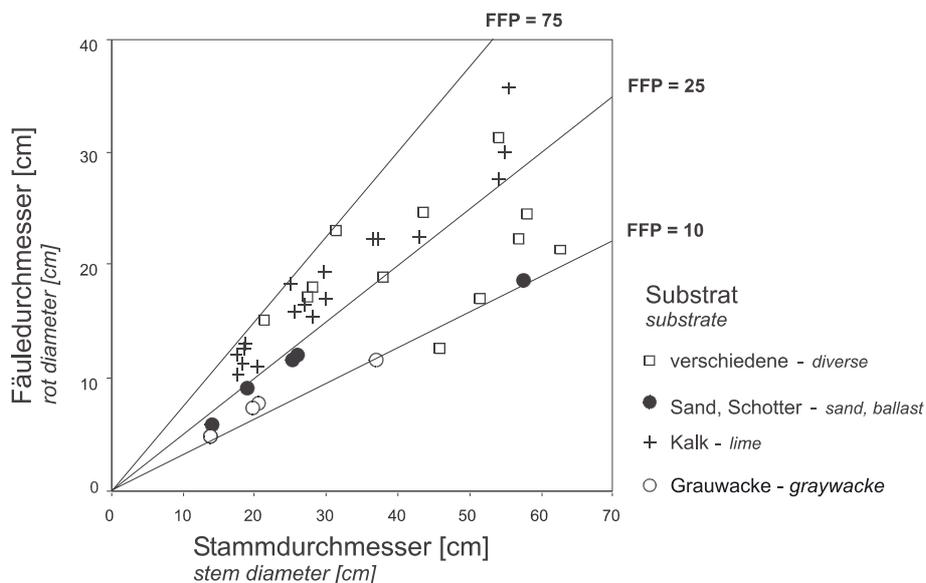


Abbildung 5-9: Standorteinfluss auf den Fäuledurchmesser pro Stammdurchmesser (Datenbasis: ZYCHA 1967) – influence of site on the relation between rot diameter and stem diameter (database: ZYCHA 1967).

Fazit

Eine Tendenz zur standörtlichen Differenzierung des Faulflächenprozentos scheint zu existieren, auch wenn sich kein ausreichend quantitativ belegter Zusammenhang oder Beschreibungsansatz in der Literatur findet. Eine Standortabhängigkeit kann daher nicht ausgeschlossen und die Hypothese kann nicht angenommen werden.

5.3.4 Hypothese C: Über das Faulflächenprozent kann bei gegebenem Alter, Durchmesser und Standort auf die Fäulehöhe im Baum geschlossen werden. Hypothesis C: The relative rot area can be used to predict rot height in the stem under given age, dbh and site conditions.

Einige Autoren beschreiben in ihren Untersuchungen signifikante Zusammenhänge zwischen dem Fäuledurchmesser und der Fäulehöhe (ZYCHA 1967, ZYCHA und DIMITRI 1968, ZYCHA et al. (1970). Betrachtet werden meist Mittelwerte über alle Bäume eines Bestandes. KATÓ (1967a) berechnet Beziehungen zwischen absoluter Faulfläche und Fäulehöhe und kommt zu dem Ergebnis, dass das Faulflächenprozent gegenüber der absoluten Faulfläche zur Schätzung der Fäulehöhe zu bevorzugen ist, da er im Bestand bei gleichen absoluten Faulflächen unterschiedlich große vertikale Fäuleausdehnung beobachten konnte. Er schlägt in einer späteren Studie vor, die Faulfläche quadriert in das Verhältnis zur Stammfläche eingehen zu lassen, die seiner Aussage nach die Fäulehöhe mit derselben Genauigkeit schätzt, aber bei extrem großen Faulflächenanteilen einen Vorteil bringt, da die Funktion degressiv und nicht linear ansteigt (KATÓ 1967b). VON PECHMANN et al. (1973) können den Zusammenhang zwischen Faulflächenprozent und Fäulehöhe an bayerischen Daten bestätigen. Auch GRABER (1996) findet einen höchstsignifikanten positiven Zusammenhang zwischen Faulflächenprozent und Fäulehöhe bei künstlich und natürlich begründeten Beständen in der Schweiz. Für beide Begründungsarten gibt er Korrelationskoeffizienten um 0,7 an.

Alterseinfluss

GRABER (1996) stellt bei künstlich verjüngten Beständen schwache Einflüsse des Schlankheitsgrades, des Baumalters, der Konkurrenz und des Nadelverlustes auf die absolute Fäulehöhe fest. Der Alterseinfluss ist bei den natürlich verjüngten Beständen in seiner Untersuchung jedoch nicht signifikant. Ob die Beziehung von Fäulehöhe und Faulflächenprozent durch das Alter beeinflusst wird, geht aus seinen Studien nicht hervor. KATÓ (1967b) geht nach seinen Ergebnissen von einer linearen Entwicklung der absoluten Fäulehöhe über dem Baumalter aus. Eigene Auswertungen der veröffentlichten Daten von VON PECHMANN et al. (1973), REHFUESS (1969, 1973) und ZYCHA (1967) weisen einen leichten Alterseinfluss auf die Fäulehöhe pro Faulflächenprozent aus (Abbildung 5-10).

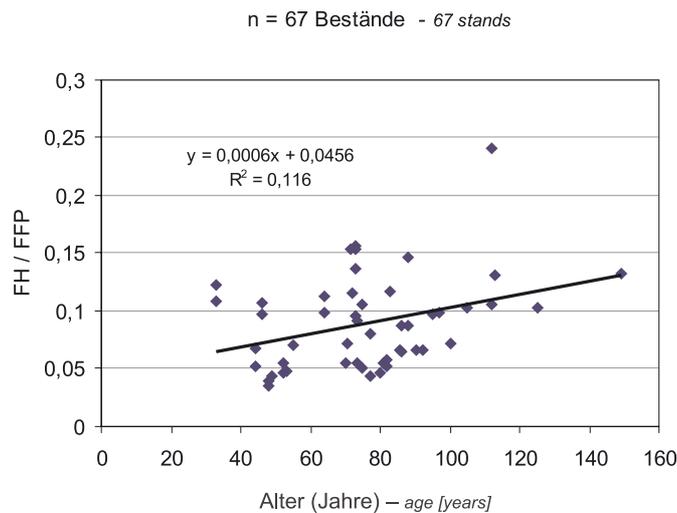


Abbildung 5-10: Alterseinfluss auf die Beziehung zwischen Fäulehöhe pro Faulflächenprozent (Datenbasis siehe Text) – age effect on the relationship between height of the decay column and relative rot area.

Stammdurchmessereinfluss

Weitere Berechnungen auf Basis der publizierten Daten von VON PECHMANN et al. (1973), REHFUESS (1969, 1973) und ZYCHA (1967) lassen einen hoch signifikanten Einfluss des Stammdurchmessers am Fällschnitt auf die Faulhöhen-Faulflächenprozent-Beziehung erkennen (Abbildung 5-11). Mit steigendem Stammdurchmesser am Fällschnitt steigt auch die Fäulehöhe pro Faulflächenprozent. Das Bestimmtheitsmaß beträgt dabei über alle Flächen 0,359. Die Flächenmittelwerte wurden für die Berechnung über die Baumzahl pro Fläche gewichtet.

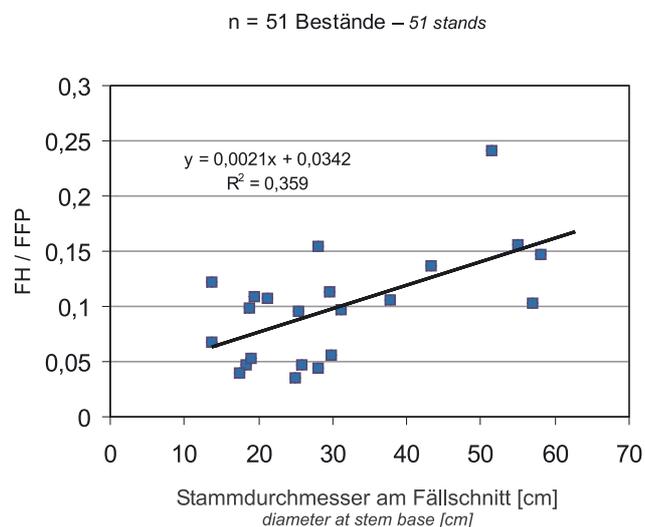


Abbildung 5-11: Durchmesser einfluss auf die Beziehung Fäulehöhe pro Faulflächenprozent (ZYCHA 1967) – Influence of diameter on the relationship between height of the decay column and relative rot area.

Standortseinfluss

WERNER (1971) zeigt standörtliche Unterschiede in der absoluten Faulhöhenentwicklung über dem Alter auf, macht aber keine Angaben zur Relation zum Faulflächenprozent. VON PECHMANN et al. (1973) erklären die bei ihren Untersuchungen auftretenden Unterschiede im Zusammenhang zwischen Faulflächenprozent und Fäulehöhe durch Standortsunterschiede. Weitere Hinweise in der Literatur finden sich nicht.

Fazit

Der in der Literatur beschriebene statistische Zusammenhang zwischen der absoluten Größe Fäulehöhe und der relativen Größe Faulflächenprozent ist eindeutig. Man kann Anzeichen für eine standörtliche Modifikation der Fäulehöhen-Faulflächenprozent-Beziehung annehmen, die jedoch noch zu wenig untersucht ist, um abschließend darüber zu urteilen. Zwei weitere, bisher nicht beschriebene Einflussfaktoren konnten aufgedeckt werden: das Alter und der Stammdurchmesser in Brusthöhe. Die beiden Faktoren korrelieren zwangsläufig untereinander, da die Stammdurchmesserentwicklung zeitabhängig verläuft und als eine Funktion des Alters dargestellt werden kann. Der Alters- bzw. Durchmessererfluss ist vergleichsweise gering. Es liegt insgesamt der Schluss nahe, dass eine gewisse zeitabhängige Entkopplung von radialem und longitudinalem Pilzwachstum vorliegt. Während das absolute radiale Pilzwachstum und folglich auch die Fäuleform stark durch das Durchmesserwachstum des Baumes bestimmt werden (siehe Hypothesen A, B, E), reagiert die Fäulehöhe weit weniger auf die Baumentwicklung. Es scheint denkbar, dass das radiale Fäulewachstum nach Erreichen einer gewissen Schwelle gehemmt wird und nur noch langsam, parallel zum Dickenwachstum des Baumes voranschreitet, während sich das Höhenwachstum des Pilzes unabhängiger vom Baumwachstum als Funktion über die Zeit entwickelt.

5.3.5 Hypothese D: Die Fäuleausdehnung folgt der Stammform und wird vor allem durch das Splintholz limitiert, das der Pilz nicht gut besiedeln kann.

Hypothesis D: The extent of decay follows stem form and is limited by sapwood, which cannot be colonized easily by the fungus.

Physikalische Bedingungen im Splint- und Reifholz

Bei der Fichte kann zwischen einem äußeren, kambiumnahen Splintbereich und einem inneren, marknahen Reifholzbereich unterschieden werden. Die beiden Bereiche sind meist nicht deutlich voneinander getrennt, sondern besitzen eine Übergangszone, die häufig unregelmäßig und nicht immer konzentrisch verläuft (KNIGGE und SCHULZ 1966, SCHAFFNER 1997, TRENDELENBURG und MAYER-WEGELIN 1955). Der Splint unterscheidet sich vom Reifholz darin, dass er der Wasserleitung und -speicherung dient. Zudem kann der Baum im Splintholz durch Parenchymzellen auf Pilzbefall aktiv mit Abwehrstoffen reagieren. Bei der Reifholzbildung sterben die Zellen ab und die Tüpfel verschließen sich, sodass die Wasserleitung stark behindert ist. Dies führt zu unterschiedlichen Wassergehalten im Splint und im Reifholz, wobei der Wasseranteil am Porenvolumen vom Mark zum Kambium hin ansteigt. Man kann davon ausgehen, dass im lebenden Baum auch im Reifholz die Holzfeuchte nie unter den Fasersättigungspunkt fällt (TRENDELENBURG und MAYER-WEGELIN 1955), sodass nur der Wassergehalt in den Zellräumen einer Veränderung unterworfen ist. LOHMANN (1992) beschreibt in der Splintzone von Fichten einen Gradienten beim Wasseranteil am Porenvolumen von 90% im äußeren, bis 70% im inneren Bereich. Im Reifholz finden sich deutlich geringere Wasseranteile

von 30% in Splintnahen, bis zu weniger als 20% im marknahen Reifholz. Diesen Gradienten vom Kambium zum Kern beschreiben auch andere Autoren (ASZMUTAT 1985, TRENDELENBURG und MAYER-WEGELIN 1955).

Ein hoher Wassergehalt am Porenvolumen im Splintbereich führt zu einem geringen Gasanteil. TRENDELENBURG und MAYER-WEGELIN (1955, S. 251) geben nach BURGER (1952, 1952) für lebende Hochwaldfichten die in Tabelle 5-6 aufgeführten Raumanteile an.

Tabelle 5-6: Raumanteile an Holz, Wasser und Luft in Kern- und Splintholz – Percentage of wood, water, and air in the hard and splint wood

	Holz	Wasser	Luft
Splint	24%	60%	16%
Kern	23%	20%	57%

Diese geringen Gasanteile im Splintbereich führen zu einem sehr niedrigen Sauerstoffpartialdruck, da der Sauerstoffgehalt im Baum generell gegenüber der Atmosphäre (21%) deutlich vermindert und der CO₂-Anteil (atmosphärisch 0,03%) deutlich erhöht ist. STENLID und REDFERN (1998) beziffern den Sauerstoffgehalt im lebenden Holz auf 0,1–1,0%, den CO₂-Gehalt auf 10–15%.

Reaktion des Pilzes auf die Holzfeuchte

Heterobasidion annosum braucht allerdings einen gewissen Sauerstoffgehalt im Holz, denn der Pilz gehört von seiner Abbauphysiologie zu der Gruppe der Weißfäulepilze, die von den Hauptkomponenten des Holzes bevorzugt das Lignin zersetzen (CWIELONG et al. 1993). Dies geschieht mittels pilzeigenen Enzymen, den Phenoloxidasen, mit denen der Pilz das Lignin, ein Phenol-Polymer, zerlegt. Dabei werden für den Pilz schädliche Phenole frei, die möglichst schnell von ihm umgesetzt werden müssen. Hinzu kommen auch noch phenolische Abwehrstoffe des Baumes, mit denen er sich im Sinne einer induzierten Abwehrreaktion gegen den Pilz wehrt (ASIEGBU et al. 1998, VON WEISSENBERG 1978) und die der Baum besonders an der so genannten „Reaktionszone“ freisetzt, um den Pilz zu hemmen (HAARS et al. 1981, SHAIN 1971, SHAIN und HILLIS 1971). Diese Reaktionszone liegt zwischen Splint und Reifholz und führt durch den Angriff des Pilzes auf die lebenden Splintzellen zu einem Zellsterben mit einer vorzeitigen Reifholzbildung und über die Ausscheidung von Phenolen zu einer Pilzhemmung (STENLID und REDFERN 1998). Phenole aus dem Ligninabbau sowie phenolische Abwehrstoffe werden dabei vom Pilz immer zunächst radikalisch oxidiert und anschließend polymerisiert, wodurch sie für seinen Metabolismus keine Gefahr mehr darstellen. Dazu benötigt er ein phenoloxidierendes Enzym, die so genannte Laccase, und ausreichend Sauerstoff (CWIELONG et al. 1993). So verwundert es nicht, dass der Wurzelschwamm zwar unter Laborbedingungen ohne weiteres trockenes Splintholz zu zersetzen vermag, aber der feuchte Splintbereich im lebenden Baum ein deutliches Hindernis für ihn darstellt, das nur selten überwunden werden kann (COURTOIS 1970). Vermag er dennoch in den Splintbereich einzudringen und das Kambium zu erreichen, führt dies zu einer Unterbrechung des Kambiums und deutlichen Wuchsdepressionen des Baumes (SINNER und REHFUESS, 1972). Meist bleibt der Pilz jedoch wegen des geringen Sauerstoffgehaltes und der fungiziden Substanzen im Splintholz auf sehr kleine Bereiche beschränkt (STENLID und REDFERN, 1998). In dieses Bild passen auch die Ergebnisse von METZLER et al. (1993), die nach Absenkung des Sauerstoffgehaltes in Holzpoltern auf unter 10% durch CO₂-Einleitung kaum mehr holzzeretzende Pilze feststellen. REDFERN (1993) grenzt bei Sporeninfectionsversuchen an Stöcken von *Picea sitchensis* das Optimum für die Pilzbesiedlung auf eine Wassersättigung von 30–70% ein. Dies korrespondiert sehr gut mit den oben beschriebenen Wassersättigungswerten von LOHMANN (1992) im Kernholz von Fichten.

Einfluss der Feuchte auf Befall und Etablierung

Lindberg und JOHANSSON (1992) finden in Inokulationsexperimenten an jungen Fichten, dass die Infektion in Pflanzen unter Wasserstress wesentlich weiter fortschreitet als in gut wasserversorgten Bäumen. Die Autoren führen diesen Effekt auf Sauerstoffmangel zurück. Ein wichtiger Faktor für die von RIEGER (1991, 1995) beschriebene Phasendisposition bei der Infektion mag auch im Wassergehalt junger Bäume zu finden sein, da sie über den ganzen Bereich Wasser leiten (TRENDELENBURG und MAYER-WEGELIN 1955) und *Heterobasidion annosum* erst in die Wurzeln und von dort in den Stamm eindringen kann, wenn die Reifholzbildung eingesetzt hat und der Wassergehalt unter einen gewissen Schwellwert gefallen ist. Dieser Schwellwert ist zum heutigen Zeitpunkt noch nicht genau definiert. Es finden sich jedoch deutliche Hinweise für den starken Einfluss der Holzfeuchte. BAZZIGHER (1986) beschreibt beispielsweise für 15-jährige Fichten bei Inokulationsexperimenten ebenfalls ein sukzessives Absterben des Pilzes nach zwei Jahren, was bei so jungen Bäumen auch mit dem hohen Splintanteil zusammenhängen mag, der zwar eine Infektion ermöglicht, in dem sich der Pilz jedoch nicht dauerhaft halten kann. Ähnliches berichtet DIMITRI (1980) für zehnjährige Fichten in einem Inokulationsexperiment. Es verwundert nicht, dass bei Untersuchung von Altbeständen (VON PECHMANN et al. 1973) die Zahl der von *Heterobasidion annosum* befallenen Bäume auf trockenen Rendzinen und Sanden besonders hoch ist, wohingegen sie auf nassen Standorten abnimmt. Die Wasserversorgung scheint hier also eine Rolle zu spielen. COURTOIS (1970) stellt als Ergebnis von Laborversuchen die Gleichung fest, dass die lytische Pilzaktivität, ein Maß für die Zersetzungsgeschwindigkeit von Holz, vor allem von der Holzfeuchte und der Rohdichte abhängt. Er weist darauf hin, dass diese beiden Größen kaum in ihrer Wirkung zu trennen sind.

Einfluss auf die Fäuleausbreitung im Stamm

Eine Darstellung der mittleren Beziehungen zwischen Stammform und Fäuleform über die Höhe auf der Basis der Daten von ZYCHA (1967), der bereits eine konstante Durchmesser-Höhen-Beziehung in unterschiedlichen Höhen belegt, bestätigt einen stammformsensitiven Fäuleverlauf im unteren Bereich (Abbildung 5-12). Es wird deutlich, dass in größeren Fäulehöhen ab 4 m die Beziehung zwischen Fäule- und Stammdurchmesser zunehmend schwächer wird. Der Datensatz umfasst Mittelwerte von 416 Bäumen aus 4 Beständen.

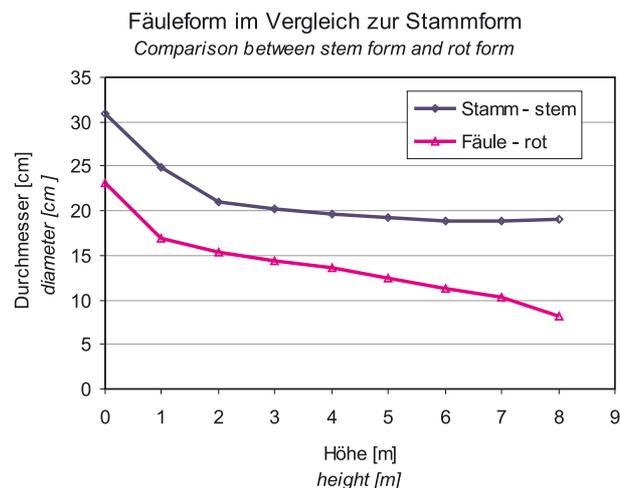


Abbildung 5-12: Fäuleform in Abhängigkeit von der Stammform (Datenbasis: ZYCHA 1967) – *form of the decay column in relation to stem form (database: ZYCHA 1967)*

Berechnet man die Fläche des gesunden Ringes zwischen Fäule und Kambium und setzt sie zur Stammfläche in der jeweiligen Höhe in Beziehung, so liegen die Werte auf den ersten vier Metern mit 42–49% fäulefreiem Flächenanteil im unteren Bereich der Bandbreite, die LOHMANN (1992) für den relativen Splintanteil in Brusthöhe angibt. Dies könnte auf eine vorzeitigen Reifholzbildung an der Reaktionszone durch den Pilzangriff hinweisen, wie er von STENLID und REDFERN (1998) beschrieben wird.

Die Abhängigkeit der radialen Fäuleausdehnung von der Splint-Kernverteilung kann als eine Hauptursache der Konstanz des Faulflächenprozentes in einem Bestand betrachtet werden (s. Hypothese A), da in einem Bestand meist homogene Standortbedingungen vorliegen, die laut TRENDELENBURG und MAYER-WEGELIN (1955) die Splintholzbildung mit bestimmen.

Fazit

Nach dem dargestellten Stand des Wissens kann angenommen werden, dass der Splint mit seinem höheren Wassergehalt, dem niedrigen Sauerstoffanteil und der induzierten Abwehr durch fungitoxische Abwehrstoffen die Ausbreitung des Pilzes deutlich hemmt. So könnten die von ZYCHA et al. (1970) festgestellten Unterschiede beim Faulflächenprozent zwischen den Beständen mit der unterschiedlichen Reifholzentwicklung zusammenhängen. Zudem hat die Hemmung des Pilzes durch den Splint weitreichende Folgen für die Fäuleform, die dadurch in weiten Teilen an das Reifholz gebunden ist. Der Splintanteil an der Stammquerschnittsfläche erhöht sich nach LOHMANN (1992) zwar vom Stammfuß zur Baumspitze hin deutlich, aber im unteren Stammabschnitt, in dem der Pilz sich ausbreitet, ist er als relativ konstant zu betrachten, sodass die radiale Fäuleform in etwa der Stammform folgt, während das Höhenwachstum nicht vom Splintholz limitiert sein dürfte.

5.3.6 Hypothese E: Die Ausdehnung einer Stammfäule ist, auch wenn die Infektion über die Wurzeln erfolgt, ähnlich einer Wundfäule nach dem CODIT-Schema zu erklären.

Hypothesis E: The extent of decay in the stem can be explained by the CODIT-concept, even if infection comes from the roots.

Das von SHIGO und MARX (1977) entwickelte CODIT-Konzept ("Compartmentalization Of Decay In Trees") beschreibt die Wirt-Pilz-Interaktion beim Eindringen von Pathogenen in den Baum. Das Konzept ist ein sehr treffendes Erklärungsmodell für Vorgänge bei Wundinfektionen und bei der Ausbreitung von Wundfäulepilzen im Baum (KUCHENREUTHER 1996). Zur Beschreibung von Kernfäulen wurde es bisher nicht angewendet. Es stellt sich die Frage, ob eine Infektion durch Wurzeln nach einem ähnlichen Schema abläuft wie eine Infektion durch Stammwunden.

Das CODIT-Konzept basiert auf der Annahme, dass sich der Baum gegen den Pilz mit mehreren Wänden wehrt, indem er den Pilz eingrenzt bzw. Kompartimente im Holz bildet, die den Pilz an einer Ausbreitung hindern sollen (Abbildung 5-13). SHIGO betont in diesem Zusammenhang, dass die Wände zur Eingrenzung des Pilzes nicht physikalisch sichtbare „Wände“, sondern Teil der präformierten und induzierten Abwehr des infizierten Gewebes sind, die anatomisch-physikalisch oder chemisch sein kann.

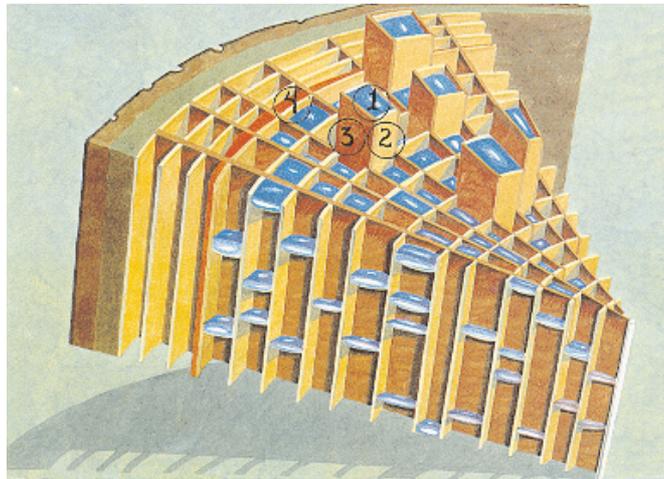


Abbildung 5-13: Kompartimentierung über vier Wände nach dem CODIT-Schema (SHIGO 1979) – *compartmentalization by four walls according to the CODIT concept:*

- Wand 1 longitudinal/vertikal
- Wand 2 radial nach innen
- Wand 3 tangential
- Wand 4 radial nach außen (Barrierezone)

Während die Wände 1 bis 3 die vertikale und tangentielle Fäuleausdehnung sowie die radiale Ausdehnung nach innen behindern, ist die wichtigste Wand die Wand 4. Diese so genannte Barrierezone bildet im noch lebenden Holz durch induzierte Abwehrmechanismen eine sehr starke Sperrschicht, die das Eindringen des Pilzes in das lebende äußere Gewebe und vor allem einen Angriff auf das Kambium verhindern soll (Abbildung 5-14).

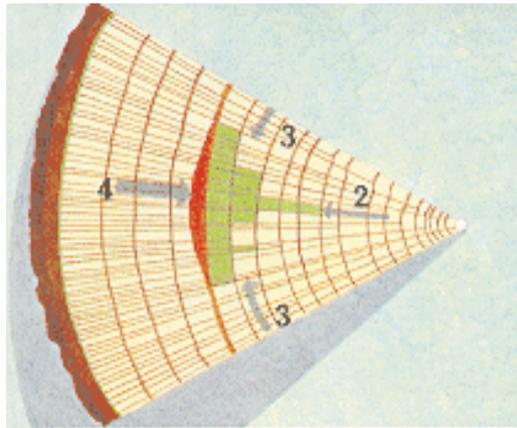


Abbildung 5-14: Die radiale Barrierezone (Wand 4) verhindert die Pilzausbreitung nach aussen und schützt somit die lebenswichtigen Baumteile vor der Fäule (SHIGO 1979) – *the radial barrier zone (wall 4) protects the tree's vital parts by preventing the fungus from spreading outwards.*

Diese Barrierezone wird bei Verwundungen durch das Kambium gebildet und führt im Holz an der Grenze des Schaftkörpers des jeweiligen Jahres zur Einlagerung von pilzhemmenden Substanzen. Bei mehrfacher Verletzung zu unterschiedlichen Jahren bilden sich auch multiple radiale Barrierezonen, um Pathogene einzugrenzen. Der Baum opfert damit einen weniger wichtigen Teil seines Stammquerschnittes, um den lebenswichtigen äußeren Bereich zu schützen.

Die formulierte Hypothese impliziert nun, dass eine derartige Barrierezone im Stamm aufgebaut wird, auch wenn der Pilz nicht durch eine Stammwunde, sondern eine Wurzelinfektion eindringt. Wurzelinfektionen können am einfachsten über Wurzelwunden durch benachbarte, bereits infizierte Wurzeln anderer Bäume erfolgen. Allerdings ist auch eine Infektion über Wurzelfusionen mit Nachbarbäumen, sogenannten Symphyen oder eine direkte Infektion gesunder Wurzeln möglich (BRAUN 1958).

Nach TIPPETT und SHIGO (1981) reagieren Wurzeln auf Pilzbefall ohne eine Verwundung genauso wie bei Verwundung mit einer Barrierezone. Durch eine veränderte Kambiumtätigkeit werden Barrierezonen aufgebaut, die aus traumatischen Harzkanälen in radialer Anordnung, zusätzlichen tangentialen Holzstrahlenreihen und weiteren axialen Parenchymzellen bestehen, die den Pilz durch Phenol- und Polyphenol-Verbindungen an der Ausbreitung hindern. TIPPETT und SHIGO machen allerdings keine Aussagen darüber, auf welchen Bereich diese Abwehrreaktion begrenzt ist.

Würden derartige Abwehrreaktionen nicht auf die Wurzeln begrenzt ablaufen, sondern zu einer Barrierezonenaufbau im Kambium des ganzen Stammes führen, wie es bei Wundfäulen beobachtet werden kann (KUCHENREUTHER 1996), wäre eine maximale Ausbreitung der Rotfäule über die Höhe und Form des bis zum Infektionszeitpunkt gebildeten Schaftkörpers vorgegeben. Auch wenn die Barrierezone in einigen Fällen durchbrochen werden kann, wie es bei großflächigen offenen Stammwunden an *Eukalyptus regnans* und *Eukalyptus obliqua* von WHITE und KILE (1994) für Wundfäulen beschrieben wird, wäre sie doch ein sehr starkes Hindernis für *Heterobasidion annosum* und eine Erklärung für die Abhängigkeit der radialen Fäuleausbreitung von der Stammform. Es wäre dann nicht die aktuelle Stammform, sondern die Stammform zur Infektionszeit maßgebend für die spätere Fäuleausbreitung. In fortgeschrittenem Fäulestadium wäre der von der Barrierezone umgebene Schaftkörper wenigstens in radialer Richtung gänzlich durch die Fäule ausgefüllt.

Es sprechen aber einige Befunde gegen diese Hypothese. Zum Beispiel die beobachteten Wachstumsproportionalitäten zwischen Stammdurchmesser und Fäuledurchmesser bzw. den daraus errechneten Flächen (Hypothese A). Wäre das Wachstum durch eine Barrierezone gehemmt, würde der Baum weiterwachsen, während der Pilz stagniert. Dies widerspricht Hypothese A.

Man könnte nun annehmen, dass das radiale Pilzwachstum sich deshalb noch nicht proportional zu dem des Baumes verhält, weil die Barrierezone noch nicht erreicht ist. Geht man jedoch davon aus, dass sich eine Infektion ab dem Alter von ca. 15 Jahren auch auf den Stamm ausdehnen kann (RIEGER 1991) und die Infektion der Bäume durch *Heterobasidion annosum* ab dem Alter 30 bis 40 in einem Bestand praktisch abgeschlossen ist (KATÓ 1967, ZYCHA 1967), dann würden spätestens die Schaftkurven von 30- bis 40-jährigen Fichten die äußeren Grenzen der Rotfäule bilden. Dies würde die Längenausdehnung der Fäule auf 21,6 m und die mittlere radiale Ausdehnung auf ungefähr 23,4 cm begrenzen, wenn man die BHD- und Höhenwerte der Bonität 40 (mittleres Ertragsniveau) einer 40-jährigen Fichte nach der Ertragstafel von ASSMANN UND FRANZ (1963) zugrundelegt und den Stammdurchmesser am Fallschnitt mit dem 1,3-fachen BHD annimmt. Die veröffentlichten Maximalwerte der Fäulehöhe liegen mit 12 m (STENLID und WÄSTERLUND 1986) innerhalb dieser Grenzen, doch die gemessenen maximalen Bestandesmittelwerte des Fäuledurchmessers mit 35,7 cm (ZYCHA 1967) weit darüber, sodass die Anwendbarkeit des CODIT-Schemas in diesem Fall sehr fraglich erscheint und die Hypothese deshalb abgelehnt werden muss.

Fazit

Das CODIT-Schema ist bei einer Infektion durch Kernfäulen nicht anwendbar, um die Fäuleausbreitung im Stamm zu beschreiben. Aufgrund der tatsächlich messbaren radialen Fäuleausdehnung scheint sich im Stamm keine wirksame Barrierezone auszubilden, die bei der Infektion der Wurzel induziert wird und zu einer effektiven Eingrenzung des Fäulewachstums führen müsste. Da nach TIPPETT und SHIGO (1981) die CODIT-Prozesse auch in Wurzeln ablaufen, legt dies den Schluss nahe, dass die Kompartimentierungsprozesse nur in einer räumlich eng begrenzten Region in der Wurzel stattfinden und keine Barrierezone im Stamm induzieren.

5.3.7 Hypothese F: Die Kernfäule breitet sich vor allem radial vom Mark nach außen aus.

Hypothesis F: A rot originating from root infection shows a concentric spreading pattern in the stem.

In den meisten Studien wird zur Fäulequantifizierung unterstellt, dass sich die Fäule im Stammmittelpunkt befindet und konzentrisch nach außen ausbreitet. Das ist nicht immer so. VON PECHMANN und VON AUFSSESS (1971) zeigen an Fichtebeständen in Bayern ein breites Spektrum von Fäulequerschnittsformen, die zum Teil charakteristisch für die jeweilige Pilzart sind. *Heterobasidion annosum* bildet neben der konzentrischen Fäule auch gelegentlich fleckige oder ringförmige Fäulebilder aus. Fleckige Fäulebilder mit starker Zersetzung bezeichnet die Autoren als typisch für *Armillaria*. KATÓ (1967) errechnet aus fleckigen Fäuleformen eine konzentrische, kreisförmige Faulfläche für seine Untersuchung und umgeht damit eine Differenzierung in Fäuletypen. WERNER (1971) teilt die Fäulebilder verschiedenster Rotfäuleerreger in zentrale, fleckige, ringförmige und periphere Typen, wobei er die peripheren Fäulebilder Wundfäulen zuschreibt. Er ordnet den unterschiedlichen Fäuletypen unterschiedliche Fäulehöhen und Fäulegrade zu. Die fleckige Fäule ist seiner Meinung nach typisch für *Armillaria*. Bei den zentralen Fäulen stellt er deutliche Standortsunterschiede im Zersetzungsgrad fest.

GRABER (1996) quantifiziert für Schweizer Verhältnisse die Häufigkeit verschiedener Fäulequerschnittsformen differenziert nach dem verursachenden Pathogen. Er beschreibt für *Heterobasidion annosum* folgende Anteile an unterschiedlichen Fäulebildern (Tabelle 5-7):

Tabelle 5-7: Position der gesamten Fäule und der Zone mit der höchsten Zersetzung am Stammquerschnitt – *Radial rot position and the position of the most decayed zone.*

Fäulelage <i>position of decay</i>	Lage im Querschnitt <i>radial position</i>	Probenanteil des Fäulebildes am Gesamtkollektiv <i>percentage of trees showing a defined rot pattern</i>	
		gesamte Fäule <i>total rot</i>	Zone der höchsten Zersetzung <i>most decayed zone</i>
Zentral	0–1/3	14%	22%
Mittel	1/3–2/3	16%	33%
Randständig	2/3–3/3	1%	16%
Hälftig	0–1/2	9%	9%
Außen	1/2–2/2	6%	3%
Viel	–2/3	27%	17%
Gesamt	–3/3	27%	0%

Die Ergebnisse von GRABER zeigen, dass exzentrische Fäulen (randständig, mittel und außen) mit insgesamt 23% bei *Heterobasidion annosum* vorkommen, aber die zentralen Fäulen deutlich überwiegen.

Die Zonen mit der höchsten Zersetzung weisen mit insgesamt 52% nicht zentralen Typen eine stärkere Tendenz zur Exzentrizität auf.

Fazit

Als Ergebnis der Literaturstudie kann festgehalten werden, dass das gesamte Fäulebild von *Heterobasidion* zwar überwiegend konzentrisch ist (vor allem bei alten Fäulen mit hohem Fäulegrad), aber auch andere Formen vorkommen. Die formulierte Hypothese kann damit bedingt akzeptiert werden. Häufig treten bei jungen Fäulen mehrere Fäulesäulen nebeneinander auf, die sich erst im fortgeschrittenen Fäulestadium zu einem konzentrischen Gebilde verbinden (PRATT 1979a). Dies mag auch der Grund für die exzentrische Tendenz der Zonen mit der höchsten Fäulezersetzung sein.

5.3.8 Hypothese G: Der Fäulegrad zeigt einen statistischen Zusammenhang zur Fäuledimension.

Hypothesis G: The degree of decay is statistical correlated with the dimension of the decay

Der Fäulegrad, also der Grad der Zersetzung im Stamm, ist sicher zeitabhängig. Genau wie Wachstumsvorgänge sind auch Abbauvorgänge meist durch nichtlineare Funktionen über die Zeit auszudrücken (LIESE und STAMER 1935).

Die Befallsdauer als zeitliche Variable ist jedoch eine sehr schwer zu ermittelnde Größe, da sie praktisch außer bei Inokulationsexperimenten oder in vitro Zersetzungsversuchen immer unbekannt ist. Man behilft sich deshalb oft über das Bestandesalter bzw. Baumalter, unter der Annahme, dass die Befallsdauer der Bäume gleich ist. Des weiteren bereitet die Definition der Befallsdauer Probleme, da es sicherlich erheblichen Einfluss auf das Ergebnis hat, ob sie als erste Infektion der Wurzeln oder als Erstbefall des Stammes definiert wird. Es stellt sich deshalb die Frage, ob ausschließlich die reine Befallszeit eine Rolle bei der Zersetzung spielt oder ob

nicht der Zusammenhang zwischen Fäuledurchmesser und Fäulegrad die Situation besser abbildet. Unter Hypothese B wurde bereits gezeigt, dass auch in einschichtigen Beständen, in denen in etwa von einer ähnlichen Befallszeit ausgegangen werden kann, für unterschiedliche Baumdurchmesser durchaus unterschiedliche absolute Fäuledurchmesser existieren, was für eine engere Bindung des Fäulewachstums an das Baumwachstum statt für eine reine Zeitabhängigkeit spricht.

GRABER (1996) weist ausdrücklich darauf hin, dass eine Schätzung des Schadengrades aus dem Baumalter nicht möglich ist. Der Schadensgrad wird dabei von ihm als Indexwert aus dem vorkommenden flächengewichteten Fäulegradanteilen eines Stammes berechnet. Der Zusammenhang zwischen Fäulehöhe und Schadensgrad ist mit $r=0,7$ jedoch relativ straff.

Auch KALLIO und TAMMINEN (1974), die in ihrer Definition des Fäulegrades ZYCHA folgen (siehe Abschnitt 5.3 ab Seite 192), beschreiben Korrelationen zwischen dem Fäulegrad und einigen anderen Größen zur Beschreibung der Fäuledimension. So besteht nach ihren Ergebnissen ein Zusammenhang zwischen Fäulegrad und Fäulehöhe ($r=0,411$), Fäuledurchmesser ($r=0,464$) und Fäulevolumen ($r=0,384$).

WERNER (1971) berechnet Korrelationen zwischen mittlerem Zersetzungsgrad und dem Bestandesalter für verschiedene Standorte. Für Kalkverwitterungslehme gibt er je nach Standort Korrelationskoeffizienten von $r=0,028$ bis $r=0,989$ an, wobei die hohen Werte von Erstaufforstungsflächen stammen. Seine Zusammenhänge zwischen dem Zersetzungsgrad und der Fäulehöhe sind auf Kalkverwitterungslehmen mit $r=0,017$ bis $r=0,265$ relativ schlechter als die Zusammenhänge zum Alter. Auf pleistozänen Lehmen kehren sich die Verhältnisse um und die Zusammenhänge zwischen Fäulegrad und Fäulehöhe werden straffer ($r=0,398$ bis $r=0,813$) als die zwischen Fäulegrad und Alter ($r=0,008$ bis $r=0,405$). Die große standörtliche Varianz der Zusammenhänge bestätigt WERNER in einer weiteren Studie (WERNER 1973).

KATÓ (1967b) kann einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Fäuledurchmesser und Fäulegrad aufzeigen. Nach seinen Untersuchungen läuft die Zersetzung bis zum Erreichen des Fäulegrades III linear über die Zeit ab; danach steigt sie an. Er stellt eine Funktion zur Beschreibung des Fäulegrades durch den Fäuledurchmesser auf und leitet für die II.0 Ertragsklasse nach Wiedemann (WIEDEMANN 1942) über einige Modellannahmen das korrespondierende Baumalter ab, weist aber auf die Problematik der Übertragbarkeit dieses Altersmodells hin.

Fazit

Als Fazit aus den veröffentlichten Arbeiten kann man durchaus von einem Zusammenhang von Fäuledimension und Fäulegrad ausgehen. Die Fäuledimension, insbesondere der Fäuledurchmesser, erscheint besser als das Baumalter oder das schwierig zu schätzende Befallsalter geeignet, den Fäulegrad zu beschreiben.

5.4 Modellansatz des Rotfäuleausbreitungsmodells RAM

Model approach of the red rot model RAM

Das entwickelte Modell „RAM“ simuliert die Fäuleausbreitung im Stamm des Einzelbaumes für Fichten unter mitteleuropäischen Verhältnissen. Es beruht auf veröffentlichten Daten verschiedener Autoren sowie biologisch plausiblen Annahmen und statistischen Zusammenhängen, die bereits im Hypothesenabschnitt (Unterkapitel 5.3) diskutiert wurden.

RAM ist als integraler Teil des einzelbaumorientierten, distanzabhängigen Waldwachstumssimulators SILVA konzipiert, der im Unterkapitel 3.3 beschrieben wurde. RAM interagiert in mehreren Teilmodellen mit dem Wachstumssimulator und dem Rotfäuleinfektionsmodell „RIM“ (MÜLLER 2001), das ebenfalls ein Teil von SILVA ist. Im Folgenden soll nach einer Beschreibung der Datengrundlage und des angekoppelten Rotfäuleinfektionsmodells RIM im Detail auf die entwickelten Modellkomponenten eingegangen werden, die zur Schätzung der Zielgrößen notwendig sind. Die in Abschnitt 4.4 vorgestellten Hypothesen zur Ausbreitung der Rotfäule im Stamm werden bei der Modellbildung in algorithmische Form gebracht und in ein Simulationsprogramm integriert, dessen Ablauf anschließend geschildert wird.

5.4.1 Modellgrundlagen – *Foundations of the model*

Datengrundlage

Die Datengrundlage für das dargestellte Modell stammt aus Literaturangaben. Eigene Daten konnten nicht erhoben werden. Die Datenbasis wurde größten Teils während des Schwerpunktprogramms „Die Rotfäule der Fichte“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft Ende der 60er bzw. Anfang der 70er Jahre geschaffen. Es wurden zur Modellbildung in erster Linie Daten aus Bayern, Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und Hessen verwendet, wobei in keinem Fall ein Originaldatensatz zur Verfügung stand. Deshalb musste auf veröffentlichte Daten zurückgegriffen werden, die häufig nur in aggregierter Form als Mittelwerte oder grafische Abbildungen vorlagen.

Daten zur Rotfäuleausbreitung im Bestand und im Stamm liegen für Bayern aus Untersuchungen von VON PECHMANN et al. (1973) vor. Für Teile Baden-Württembergs werden die Zusammenhänge von REHFUESS (1969, 1973), WERNER (1971, 1973) und SCHÖNHAR (1969) beschrieben. Die niedersächsischen Daten stammen aus Untersuchungen von ZYCHA (1967) und KATÓ (1967a), die hessischen und nordrhein-westfälischen von DIMITRI und KLIEFOTH (ZYCHA et al. 1970). Ziel dieser Arbeiten war eine Quantifizierung der Rotfäuleschäden in den jeweiligen Gebieten.

Insgesamt ist die Datenstruktur hinsichtlich der erhobenen Größen, der Standorte, der Altersstruktur der untersuchten Bestände und der Untersuchungsmethoden relativ heterogen, sodass für die unterschiedlichen Teilmodelle jeweils auch unterschiedliche Datensätze zur Modellbildung herangezogen werden mussten. Die für die Teilmodelle verwendeten Datengrundlagen sind in Tabelle 5-8 näher beschrieben.

In vielen Fällen waren eine Datenrekonstruktion aus Grafiken, eine weitere Verarbeitung und weitere statistische Analysen notwendig, um die gewünschten Informationen zu exzerpieren und die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Datensätze zu gewährleisten. Konnte diese Vergleichbarkeit nicht gewährleistet werden, so wurde die Quelle für die entsprechende Rechnung nicht herangezogen. In Tabelle 5-9 sind Angaben zur jährlichen Fäuleausbreitung im frühen Fäulestadium aufgeführt.

Tabelle 5-8: Datengrundlage der entwickelten Rotfäulemodelle – *Data base of the developed red rot models*

Teilmodell <i>submodel</i>	Autor <i>author</i>	Region <i>region</i>	Baumzahl <i>No. of trees</i>	Bestände <i>No. of stands</i>
FD (Fäuledurchmesserm- modell)	VON PECHMANN et al. 1973	Bayern	863	9
	REHFUEHSS 1969, 1973	Baden-Württemberg	860	20
	ZYCHA 1967	Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Hessen	1877	39
FH _{max} Fäulehöhenmodell	ZYCHA et al. 1970	Nordrhein-Westfalen, Nieder- sachsen, Hessen	956	17
	VON PECHMANN et al. 1973	Bayern	863	9
iFH (Fäulehöhenzuwachs)		Synthese aus den Werten in Tabelle 5-9		
FG (Fäulegrad)	KATÓ 1967b	Niedersachsen	230	–
ΔiH , $\Delta iBHD$ (Wuchsdepression des Baums)	BENDZ-HELLGREN und STENLID 1997	Schweden	68	Inventur

Tabelle 5-9: Beispielwerte für vertikale Ausbreitungsraten pro Jahr iFH. Etliche Werte wurden vom Autor aus publizierten Daten berechnet. Dabei wurde ein Fäulebefall des Stammes bei 20 Jahren angenommen – *Examples for the annual vertical spread in the stem. Italicized values were calculated by the author from published data under the assumption that the decay reached the stem in the age of 20 years.*

Quelle <i>source</i>	jährliche Ausbreitungsrate <i>yearly spread</i>	Baumalter <i>tree age</i>	ermittelt über <i>determined by</i>
DIMITRI 1980	$\frac{27\text{cm}}{2, 0 - 72\text{cm}}$	17	Inokulation
EKMAN und VON WEISSENBERG 1981	18–30cm	$\frac{53}{36 - 65}$	Inokulation
HUSE und VENN 1994	$\frac{29\text{cm}}{0 - 100\text{cm}}$	82	Inokulation
ROLL-HANSEN und ROLL-HANSEN 1981	20–38cm	–	Inokulation
JOHANN 1988	1,5–4,9cm	60–80	natürliche Infektion, von 60–80 Jahren
	9,5–19cm	46–50	gesamtes Baumalter
PRATT 1979a (<i>Picea sit- chensis</i>)	5–7 cm (Mittel)	23–50	natürliche Infektion
VON PECHMANN et al. 1973	$\frac{5, 2\text{cm}}{2, 2 - 11, 7\text{cm}}$	$\frac{102}{55 - 149}$	natürliche Infektion
REHFUESS 1971, 1973	$\frac{4, 4\text{cm}}{2, 0 - 6, 9\text{cm}}$	$\frac{80}{70 - 100}$	natürliche Infektion

Tabelle 5-9: Beispielwerte für vertikale Ausbreitungsraten pro Jahr iFH. Etliche Werte wurden vom Autor aus publizierten Daten berechnet. Dabei wurde ein Fäulebefall des Stammes bei 20 Jahren angenommen – *Examples for the annual vertical spread in the stem. Italicized values were calculated by the author from published data under the assumption that the decay reached the stem in the age of 20 years.* (Forts.)

Quelle <i>source</i>	jährliche Ausbreitungsrate <i>yearly spread</i>	Baumalter <i>tree age</i>	ermittelt über <i>determined by</i>
STENLID und REDFERN 1998 (<i>Picea sitchensis</i>)	5–15 cm	–	natürliche Infektion
STEYRER 1992 (auch andere Pilze in Wund- fäulen erfasst)	5,8–30,8 cm	–	natürliche Infektion
WERNER 1971	4,8–9,3 cm	20–110	natürliche Infektion
ZYCHA 1967	<u>7,9 cm</u> 1,9 – 20,7 cm	<u>70</u> 33 – 115	natürliche Infektion

Rotfäuleausbreitungsmodell im Bestand RIM

Voraussetzung für die Simulation der Rotfäuleausbreitung im Stamm des Einzelbaumes ist die Kenntnis seines Infektionszeitpunktes und des ersten Fäuleauftretens im Stamm. Solche Größen werden von Rotfäuleausbreitungsmodellen auf Bestandesbasis berechnet. Diese beschreiben die Infektion von Bäumen durch rotfäuleerregende Pilze und deren Ausbreitung im Bestand. Je nach Erreger müssen hier unterschiedliche Infektionswege (Wurzeln, Wunden, Rinde, Wurzelstock) und unterschiedliche Verbreitungsmöglichkeiten des Pilzes (Sporen, Myzel, Rhizomorphen) nachgebildet werden. Die gängigen epidemiologischen Modellansätze arbeiten mit Infektionswahrscheinlichkeiten bei einer Sporeninfection und Übertragungswahrscheinlichkeiten bei einer Wurzelinfektion. Einige Modelle berücksichtigen mit Etablierungswahrscheinlichkeiten auch entsprechende Abwehrleistungen des Baumes oder antagonistischer Pilze und Substanzen, die zur Bekämpfung eingesetzt werden können und variieren damit die Wahrscheinlichkeit einer Erkrankung.

Da die Ausbreitung im Bestand nicht Thema dieser Arbeit ist, aber zusammen mit der Ausbreitung im Einzelbaum Voraussetzung für eine Simulation des Schadens auf Bestandesebene darstellt, soll hier ausschließlich das epidemiologische Modell „RIM“ vorgestellt werden, das als Teil von SILVA Eingangsdaten für das entwickelte Modell zur Rotfäuleausbreitung im Stamm liefert. Eine ausführliche Darstellungen der vor allem in Skandinavien und Nordamerika entwickelten epidemiologischen Modellansätze findet sich in PRATT et al. (1998) und MÜLLER (2001).

Als das einzige mitteleuropäische Simulationsmodell für *Heterobasidion annosum* modelliert das epidemiologische Rotfäuleinfektionsmodell RIM (MÜLLER 2001) die Rotfäuleausbreitung im Bestand, insbesondere für bayerische Verhältnisse. Ziel von RIM ist die Nachbildung der Sporeninfection von Stöcken frisch durchforsteter Fichten und die Infektion gesunder Bäume über die Wurzel. RIM kann als standortsabhängiger Modellansatz angesehen werden, da als Standortparameter der pH-Wert eingeht, der die Infektionswahrscheinlichkeit beeinflusst. Für Bayern steht eine Funktion zur Verfügung, die für sämtliche Wuchsgebiete ein mittleres Rotfäulerisiko vorgibt.

RIM arbeitet distanzabhängig mit räumlichen Bestandesdaten. Über einen stochastischen Prozess wird entschieden, welche Wurzelstöcke und Bäume in einem räumlichen Bestand infiziert werden. Nach einer Primärinfektion verbreitet sich *Heterobasidion annosum* über Wurzelkontakte, wobei die Wahrscheinlichkeit einer Infektion erneut über ein stochastisches Modell nachgebildet wird, in das räumliche und auch baumindividuelle Größen eingehen wie z. B. die Wurzelüberschneidungsfläche und die Stammfußkoordinaten. Ist eine Wurzelinfektion erfolgt,

wächst der Pilz in der Wurzel bis er den Stamm erreicht, breitet sich von dort aus radial über die Wurzeln aus und kann weitere Bäume infizieren. Die Zahl der infizierten Bäume pro Pilzstamm ist dabei begrenzt.

Das Modell RIM basiert auf veröffentlichten Daten und Funktionen unterschiedlicher Autoren, wobei ein Großteil der Daten in Deutschland gewonnen wurde.

5.4.2 Zielgrößen von RAM – *Modeled variables*

Nachdem die Modellvoraussetzungen dargelegt wurden, werden die einzelnen Modellschritte des Rotfäuleausbreitungsmodells im Stamm RAM anhand definierter Zielgrößen beschrieben. Die Zielgrößen des Modells bilden die bereits im Abschnitt 5.3 dargestellten Größen, Fäule-durchmesser, Fäulehöhe, Fäulegrad und Fäuleform. Im Modell wird zudem in einer Rückkopp-lung des Pilzwachstums auf das Baumwachstum berücksichtigt, durch welche die Zuwachsfunktionen für Brusthöhendurchmesser und Baumhöhe in SILVA modifiziert werden.

5.4.3 Modelle zur Prognose des Fäuledurchmessers

Rot diameter models

Maximaler Fäuledurchmesser FD_{max}

Zur Beschreibung einer lange etablierten Fäule im Stamm wird der maximale Fäuledurchmesser FD_{max} benutzt, der in RAM über zwei Größen geschätzt wird. Die eine ist das Faulflächenpro-zent FFP, das als bestandescharakteristische Größe vom Benutzer vorgegeben wird. Es wird bei Beginn der Prognose einmalig für jeden Baum aus einem vom Benutzer definierten Mittelwert und einer ebenfalls benutzerdefinierten Standardabweichung in einem stochastischen Prozess bestimmt, der den Einzelbäumen im vorgegebenen Streubereich um den Mittelwert Faulflä-chenwerte über eine Normalverteilung zuweist. Dadurch ist sichergestellt, dass sich für den Bestand in der Simulation das benutzerdefinierte mittlere Faulflächenprozent ergibt.

Durch die modellierte Varianz zwischen den Bestandesbäumen wird einer individuellen Baum-Pilz-Interaktion Rechnung getragen. Die andere Größe ist der Stammdurchmesser am Fällschnitt D . Dieser wird über das integrierte BDAT-Modul (KUBLIN und SCHARNAGL 1988) von SILVA berechnet. Der maximale Fäuledurchmesser FD_{max} ergibt sich dann nach Formel 5-7.

$$FD_{max} = \sqrt{\frac{FFP}{100} \cdot D^2} \quad \text{Formel 5-7}$$

Der berechnete maximale Fäuledurchmesser limitiert das radiale Fäulewachstum im Modell gemäß dem benutzerbasierten, baumindividuellen FFP und dem baumindividuellen Stamm-durchmesser am Fällschnitt D . Er wird definiert, um die in den Hypothesen D und E diskutierte Hemmung des radialen Pilzwachstums nachzubilden. Der maximale Fäuledurchmesser, der erst bei fortgeschrittenem Fäulestadium erreicht wird, wächst bei konstantem FFP proportional zum Stammfußdurchmesser des Baums (Hypothese A) und limitiert die radiale Pilzausdehnung. Es kann somit ein Hemmeffekt durch das Splintholz modelliert werden, wie er in Hypothese E beschrieben wird. Eine absolute, über die Infektionszeit definierte, radiale Begrenzung wurde nicht vorgesehen, da sich Hypothese F nicht belegen ließ.

Faulflächenprozent FFP

Das Faulflächenprozent FFP definiert einen bestandestypischen Wert, wie unter Hypothese A gezeigt wurde. Seine weitgehende Altersunabhängigkeit (Hypothese B) lässt seine Behandlung als konstante Einzelbaumvariable innerhalb einer definierten Streuung im Bestand zu. Da eine standörtliche Abhängigkeit zwar möglich ist (Hypothese B), aber keine ausreichenden Daten zur Nachbildung zur Verfügung stehen, wird eine Benutzerdefinition des FFP vorgesehen.

Dies ermöglicht eine bestandestypische Modellparametrisierung durch den Benutzer, der die Verhältnisse bezüglich der Rotfäuleausdehnung in seinem Bestand nach eigener Erfahrung festlegt. Richtwerte für einen Bestand lassen sich auch relativ einfach bei Durchforstungen oder ähnlichen Eingriffen gewinnen, weil das FFP weder durch die soziale Klasse noch durch das Alter des Baumes beeinflusst wird (Hypothesen A und B).

Stammform

Für die Ermittlung des Stammdurchmessers am Fällschnitt wird auf die Stammformkurven von BDAT zurückgegriffen, das integraler Bestandteil von SILVA ist. Der Stammdurchmesser am Fällschnitt D wird dort aus dem BHD, der Baumhöhe und der dazugehörigen Schaftformkurve abgeleitet. Da SILVA in Perioden von fünf Jahren arbeitet, stehen auch nur für alle fünf Jahre Schaftformkurven zur Verfügung. Um für das Rotfäulemodell eine jährliche Schaftformbeschreibung bereitzustellen, wird linear zwischen den Schaftformkurven interpoliert. Ein weiteres Problem ist die fehlende Schaftform für die Jugendphase des Baumes, da SILVA auf Einzelbaumbasis erst Bäume ab einem Mindestbrusthöhendurchmesser von sieben Zentimetern berechnet. Die Rekonstruktion der vergangenen Stammdimensionen wird über die bereits in Abschnitt 4.4.3 beschriebenen Modelle durchgeführt. Dies ermöglicht eine plausible Schätzung der Stammform vor Beginn der Prognose. Zu beachten ist jedoch, dass bei einem Startbestand, der bereits aus alten Bäumen besteht, die interpolative Rekonstruktion auf einen sehr langen Zeitbereich ausgedehnt wird. Dadurch kann die individuelle Wuchsdynamik eines Baumes in der Vergangenheit nur sehr ungenau erfasst werden. Starke Konkurrenzänderungen in der Vergangenheit werden bei der Interpolation geglättet und drücken sich damit nicht in der simulierten Stammform aus.

Startwertzeugung und Fortschreibung des Fäuledurchmessers FD_t

Es ist anzunehmen, dass der Pilz in einem initialen Fäulestadium, wenn er von den Wurzeln in den Stamm vordringt, noch keine Proportionalität zwischen Faulfläche zur Stammfläche zeigt und erst für einige Zeit unbeeinflusst im Kernholz wächst (DIMITRI 1980).

Um auch solche frühen Fäulestadien abbilden zu können, wird ein aktueller Fäuledurchmesser zum Zeitpunkt t (FD_t) berechnet, für den bei Prognosebeginn ein Startwert erzeugt wird, der dann über die Zeit fortgeschrieben wird, bis FD_t den maximalen Fäuledurchmesser FD_{max} erreicht. Ab diesem Zeitpunkt verläuft die Fäuledurchmesserentwicklung nach der Funktion für FD_{max} . Die Startwertgenerierung und Fortschreibung des aktuellen Fäuledurchmessers FD_t beruht auf der Annahme, dass sich während eines ungehinderten Pilzwachstums der aktuelle Fäuledurchmesser FD_t proportional zur aktuellen Fäulehöhe FH_t entwickelt, die im nächsten Abschnitt beschrieben wird. Der aktuelle Fäuledurchmesser wird dabei nach Formel 5-8 berechnet.

$$FD_t = \frac{FD_{max}}{FH_{max}} \cdot FH_t \quad \text{Formel 5-8}$$

Das Modell beschreibt also zuerst ein rasches ungehemmtes radiales Fäulewachstum, das mehr oder weniger unabhängig vom Baumdurchmesser erfolgt, bis eine bestimmte Grenze, der FD_{max} , erreicht ist. Es spiegelt damit die unter Hypothese E beschriebenen biologischen Zusammenhänge zwischen dem Splintholz und seiner anzunehmenden Hemmwirkung auf die Pilzausbreitung wieder.

5.4.4 Modelle zur Prognose der Fäulehöhe – Rot height models

Die Fäulehöhe wird wie der Fäuledurchmesser in zwei zeitlichen Phasen simuliert. Initiale Fäulestadien werden über die aktuelle Fäulehöhe FH_t zu einem bestimmten Zeitpunkt t dynamisch über eine lineare Funktion geschätzt, sodass Wachstumsvorgänge des Pilzes simuliert werden können, die anfangs mehr oder weniger unabhängig vom Baumwachstum ablaufen, wie es in Phase A der Abbildung 5-15 illustriert ist. Wird jedoch eine maximale Fäulehöhe FH_{max} bei einem gewissen Faulflächenprozent erreicht, folgt die Entwicklung dieser Funktion (Phase B). Die maximale Fäulehöhe FH_{max} beschreibt demnach die Maximalausdehnung der Fäule in vertikaler Richtung und dient als obere Begrenzung der vertikalen Fäuleausbreitung im fortgeschrittenen Fäulestadium. Durch ihre Abhängigkeit vom Faulflächenprozent und damit vom Durchmesserwachstums des Stammes folgt sie einer nichtlinearen Wachstumskurve

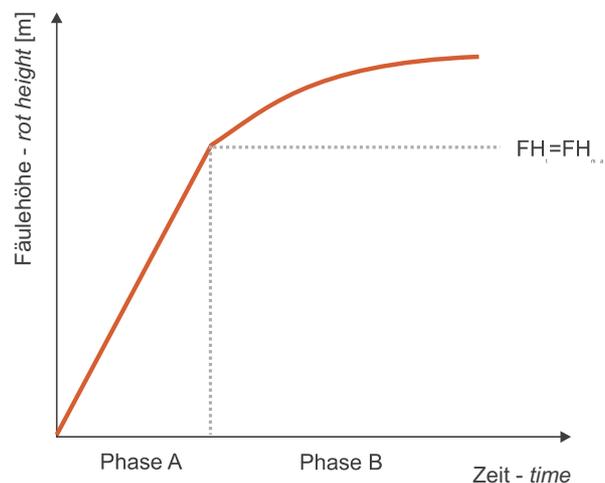


Abbildung 5-15: Modellansatz zur Nachbildung der Rotfäuleausbreitung im Stamm. Nach einer linearen Initialphase (Phase A) mit einem raschen vertikalen Fäulewachstum folgt die Pilzausbreitung der berechneten maximalen Fäulehöhe FH_{max} (Phase B) – *Proposed model for the simulation of the vertical spread of decay in the stem. After an initial linear phase (Phase A) the height of the decay column is determined by the model for the maximum rot height FH_{max} (Phase B).*

Startwertgenerierung und Fortschreibung der Fäulehöhe im Initialstadium

Um das Frühstadium der Fäuleausbreitung während eines Prognoselaufs nachbilden zu können, wird die aktuelle Fäulehöhe zum Zeitpunkt t (FH_t) geschätzt. Sie beschreibt die vertikale Fäuleausbreitung in Abhängigkeit von der Befallszeit TI , seit der sich die Fäule im Stamm ausbreitet.

Der Startwert für die aktuelle Fäulehöhe am Prognosebeginn wird über den vorgegebenen jährlichen Höhenzuwachs iFH und die Befallszeit TI nach Formel 5-9 berechnet. Somit kann auch ein Fäulebeginn vor der ersten Prognoseperiode nachgebildet werden, wenn der Beginn der Fäuleausbreitung im Stamm bekannt ist.

$$FH_t = TI \cdot iFH$$

Formel 5-9

In späteren Prognoseperioden wird dieser Startwert dann über die Zeit fortgeschrieben. Dazu wird immer die Fäulehöhe des letzten Jahres FH_{t-1} um den jährlichen Vertikalzuwachs iFH erhöht, bis FH_{max} erreicht ist (Formel 5-10).

$$FH_t = FH_{t-1} + iFH \quad \text{Formel 5-10}$$

Das initiale Höhenwachstum der Fäule wird im Modell als linear angenommen, obwohl es mit großer Wahrscheinlichkeit einer Wachstumsfunktion folgt. Über das initiale Höhenwachstum ist jedoch nur sehr wenig bekannt. Es stehen nur Mittelwerte zur Verfügung, die je nach Autor unterschiedlichen Baumaltern mit meist unbekanntem Fäulealter zugeordnet werden (Tabelle 5-9). Abhängigkeiten zum Fäuledurchmesser sind in der Literatur für dieses Frühstadium nicht beschrieben. Wichtig erscheint auch der Hinweis, dass Inokulationsexperimente unter künstlicher Infektion zu Beginn häufig zu sehr großen Vertikalausbreitungen im Stamm führen, die deutlich über Werten aus natürlich infizierten Bäumen liegen (Tabelle 5-9). Trotzdem wird die Tendenz eines schnellen Anfangswachstums der Fäule durch Berechnungen auf der Basis der von JOHANN (1988) publizierten Daten gestützt, die eine jährliche Vertikalausbreitung von 9,5–19,0 cm im Alter von 46–50 Jahren ergeben, wenn man für die Bezugszeit das gesamte Baumalter heranzieht. Vergleicht man diese Ergebnisse mit den von JOHANN für ein zwanzigjähriges Altersintervall (60 bis 80 Jahre) berechneten Werten (Tabelle 5-9), kann von einem schnellen Initialwachstum des Pilzes in vertikaler Richtung ausgegangen werden, das später abflacht. Dieser Effekt wird im vorgestellten Modellansatz nachgebildet, indem das Wachstum zuerst linear (FD_t) ansteigt, wie es auch im unteren Bereich einer Wachstumsfunktion annähernd der Fall ist und dann in eine degressiv steigende Funktion (FD_{max}) übergeht.

Schätzung der maximalen Fäulehöhe FH_{max} bei fortgeschrittenen Fäulestadien

Die maximale Fäulehöhe kann in RAM wahlweise nach zwei Modellen geschätzt werden. Beide Modelle benötigen das Faulflächenprozent FFP, das, wie in Abschnitt 5.4.3 beschrieben, als bestandescharakteristische Größe vom Benutzer vorgegeben wird. Dieser hat dann die Wahl, die maximale Fäulehöhe über einen durchmessersensitiven oder einen einfachen linearen Ansatz zu schätzen. Die theoretische Begründung für die Schätzung der Fäulehöhe über das FFP wurde in Hypothese C und D gegeben.

Der einfache lineare Ansatz modelliert die Fäulehöhe ausschließlich über das FFP nach Formel 5-11.

$$FH_{max} = a_1 + a_2 \cdot FFP \quad \text{Formel 5-11}$$

Zur Modellanpassung an verschiedene Standorte können die Regressionsparameter a_1 und a_2 manuell vorgegeben werden. Als Standardwert ist eine Funktion nach VON PECHMANN et al. (1973) eingestellt, die für mittlere bayerische Verhältnisse konstruiert wurde. Die Parameter wurden aus der veröffentlichten Grafik rekonstruiert und lauten $a_1=6,7$ und $a_2=0,83$.

Alternativ steht zur Schätzung der maximalen Fäulehöhe ein Modell zur Verfügung, das die Modifikation der Beziehung zwischen Fäulehöhe und Faulflächenprozent durch den Durchmesser berücksichtigt. Der Alters- und der Durchmesser Einfluss auf die Beziehung zwischen Fäulehöhe und Faulflächenprozent wurden bereits unter Hypothese C diskutiert wie auch die starke wechselseitige Abhängigkeit von Alter und Durchmesser. Die Datenlage machte eine Einbeziehung beider Variablen nicht möglich, da von den verschiedenen Autoren entweder nur die eine

oder die andere Größe zusammen mit dem FFP in den Datensätzen veröffentlicht ist. Weil keine eigenen Daten zur Verfügung standen und auf diese Datensätze zurückgegriffen werden musste, wurde der Durchmesser als Variable gewählt. Da es sich bei SILVA um einen altersunabhängigen Waldwachstumssimulator handelt, wurde dem Durchmesser in der Modellierung der Vorzug gegenüber dem Alter gegeben, weil das tatsächliche Baumalter im Gegensatz zum Durchmesser nicht im Wachstumsmodell mitgeführt wird und auch bei Inventuren wesentlich aufwendiger zu ermitteln ist.

Der durchmessersensitive Ansatz beruht auf einem Modell, das mit veröffentlichten Daten von ZYCHA et al. (1970) erstellt wurde, die aus Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Hessen stammen. Als einzige Autoren geben sie neben dem Fäuledurchmesser auch den zugehörigen Stammdurchmesser am Fallschnitt an. Ihr Datensatz beruht auf 956 Fichten und beschreibt mittlere Verhältnisse in 17 Beständen.

Im Laufe der Modellbildung wurden verschiedene Funktionen zum Ausgleich der Daten getestet. Es zeigten sich für einige nichtlineare Modellansätze zwar bessere Bestimmtheitsmaße als bei einem linearen Ausgleich, aber diese schätzten bei der geringsten Extrapolation extrem hohe Fäulehöhen, da sie zu einem progressiv steigenden Fäulehöhenverlauf bei steigendem FFP führten, was gemäß der publizierten Zusammenhänge anderer Autoren nicht plausibel zu begründen ist und wohl an der geringen Zahl erfasster Bestände mit überdurchschnittlichen Faulflächenprozenten liegt.

Es wurde schließlich ein zweiparametrisches lineares Regressionsmodell gewählt, das eine gute Modellanpassung im Datenbereich liefert und nicht zu unplausibel hohen Werten bei der Extrapolation führt (Abbildung 5-16).

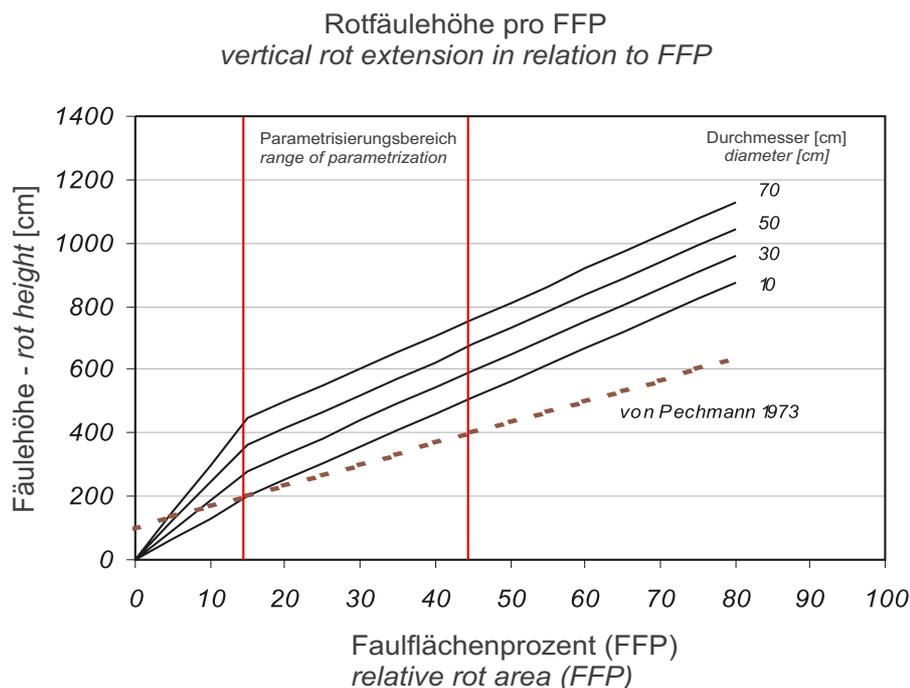


Abbildung 5-16: Darstellung des durchmessersensitiven Modells zur Schätzung der Fäulehöhe aus dem Faulflächenprozent bei verschiedenen Stammdurchmessern am Stammfuß. Zum Vergleich ist die einfache lineare Funktion nach VON PECHMANN et al. (1973) eingezeichnet – *sensitivity analysis of the diameter sensitive model for the prediction of the rot length in the stem from diameter and relative rot area at stem base. Additionally a linear function, developed by VON PECHMANN et al. (1973) is displayed.*

Um eine optimale Modellanpassung im Parametrisierungsbereich zu erhalten, wird die Ausgleichsfunktion (Formel 5-12) nicht durch den Nullpunkt geführt, wodurch sie bei einer Extrapolation unter Faulflächenprozenten von 15 die Y-Achse oberhalb des Nullpunktes schneidet, was bei kleinen Faulflächenprozenten zu unplausiblen Schätzungen führt.

Zur Vermeidung dieser Unplausibilität, wird außerhalb des Parametrisierungsbereiches zum Nullpunkt hin eine weitere lineare Funktion benutzt (Formel 5-13), welche die Regressionsfunktion mit dem Nullpunkt verbindet (Abbildung 5-16). Sie beruht im Gegensatz zu Formel 5-12 nicht auf gemessenen Daten, sondern auf plausiblen Annahmen. Der Steigungsparameter von Formel 5-13 ist dabei abhängig vom Y-Wert der Formel 5-12 bei FFP = 15.

$$FH_{\max_1} = b_1 \cdot D + b_2 \cdot FFP, \quad \text{für } FFP \in [15;45] \quad \text{Formel 5-12}$$

- FH_{\max} = maximale Fäulehöhe [cm]
 D = Stammdurchmesser am Fällschnitt [cm]
 FFP = Faulflächenprozent
 b_1, b_2 = Regressionsparameter

Parameter	asymptotischer Standardfehler <i>asymptotic standard error</i>	asymptotisches 95 %-Konfidenzintervall <i>asymptotic 95 %- confidence interval</i>		Bestimmtheitsmaß <i>degree of determination</i>
		unten – lower	oben – upper	
$b_1=4,16398$	0,86451	2,29631	6,03163	$R^2=0,87$
$b_2=10,42898$	1,11490	8,02036	12,83758	

Bei der Kurvenanpassung der Funktion (Formel 5-12) nach der Methode der kleinsten Quadrate, wurden die einzelnen Bestandesmittelwerte nach ihrer Baumzahl gewichtet. Für die Initialphase der Fäule bei Faulflächenprozenten unter 15 wird die maximale Fäulehöhe in Abhängigkeit von der maximalen Fäulehöhe aus Formel 5-12 modelliert, um einen lückenlosen Übergang der Funktionen zu gewährleisten (Formel 5-13).

$$FH_{\max_2} = \frac{FH_{\max_1}}{15} \cdot FFP, \quad \text{für } FFP \in [0;15[\quad \text{Formel 5-13}$$

Über Einsetzen von Formel 5-12 in Formel 5-13 erhält man Formel 5-14

$$FH_{\max_2} = \frac{b_1 \cdot D}{15} + b_2 \cdot FFP, \quad \text{für } FFP \in [0;15[\quad \text{Formel 5-14}$$

Die mathematische Beschreibung für die gesamte Funktion lautet somit:

$$FH_{\max} = \begin{cases} FH_{\max_2}, & \text{für } FFP \in [0;15[\\ FH_{\max_1}, & \text{für } FFP \in [15;45] \end{cases} \quad \text{Formel 5-15}$$

Die Anpassungsgüte der Funktion im Parametrisierungsbereich (Formel 5-12) beträgt $R^2=0,87$. Allerdings wurde bereits durch die bestandesweise Mittelwertbildung der Daten durch ZYCHA et al. (1970) ein großer Teil der Streuung beseitigt, sodass die Anpassungsgüte schwer zu interpretieren ist. Die Residuen zeigen eine befriedigende Verteilung (Abbildung 5-17) und die Modellanpassung erscheint plausibel (Abbildung 5-18).

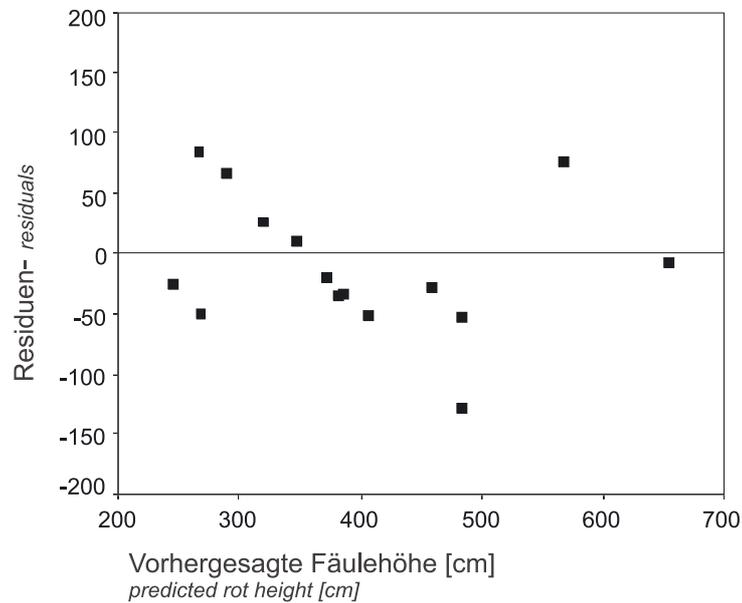


Abbildung 5-17: Residuenplot des Modells zur Berechnung der maximalen Fäulehöhe FH_{max} nach Formel 5-12 – *Residual plot of the model for the maximal vertical spread of the decay FH_{max} (Formel 5-12).*

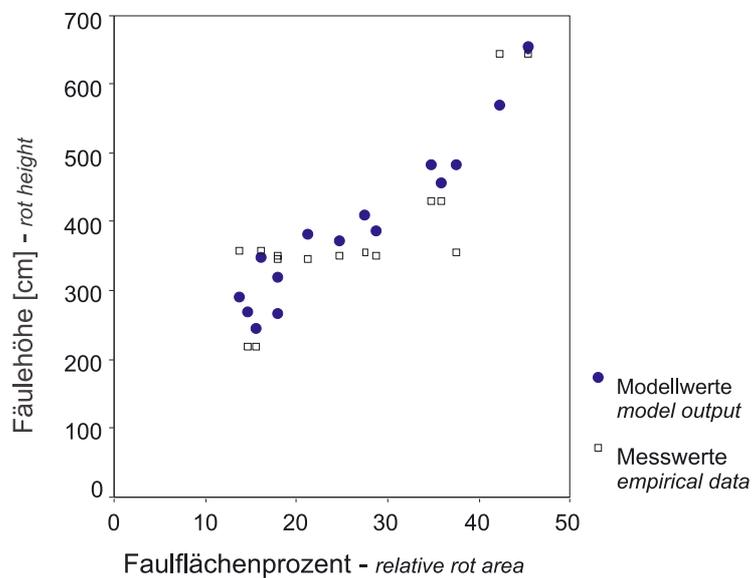


Abbildung 5-18: Modellanpassung des Fäulehöhenmodells FH_{max} (Formel 5-12) – *Model fit to real data for the FH_{max} model (Formel 5-12).*

FH_{max} bezeichnet die maximale vertikale Ausbreitung einer Fäule in fortgeschrittenem Stadium. Das Modell beruht auf Daten von Beständen, in denen die Fäule schon länger manifestiert war (ZYCHA 1970).

Das Modell selbst besitzt keine stochastische Komponente, doch durch die Variablen FFP und den Stammdurchmesser D gehen stochastische Effekte aus RAM und dem Einzelbaumwuchsmodell von SILVA in die Funktion mit ein, sodass das Fäulehöhenmodell über die interne Dynamik der Variablen einen gewissen stochastischen Charakter besitzt.

5.4.5 Modelle zur Prognose des Fäulegrads

Models for the degree of decay

Der Fäulegrad FG wird nach ZYCHA (1962) in vier diskrete Stufen eingeteilt, welche die Zersetzungsintensität charakterisieren (Abschnitt 5.3). Im vorliegenden Modell wird der Fäulegrad über den Fäuledurchmesser geschätzt. Der Fäuledurchmesser ist als unabhängige Variable geeigneter als das Fäulealter, da letzteres meist unbekannt ist und über den Fäuledurchmesser mit erfasst ist (Hypothese G). Zusätzlich geht über den Fäuledurchmesser in das Modell auch eine baumindividuelle Komponente ein, was es besser geeignet erscheinen lässt, die natürliche Varianz in der Baum-Pilz-Interaktion zwischen verschiedenen Bäumen nachzubilden.

Der deterministische Modellansatz basiert auf einer Funktion zur Schätzung des Fäulegrades am Stammfuß, die von KATÓ (1967b) publiziert wurde. Die Funktion, für die keine Einzelwerte vorliegen, wurde grafisch analysiert, um die Durchmessergerenzen der Fäule am Fallschnitt zu ermitteln, ab der ein höherer Fäulegrad zu erwarten ist (Abbildung 5-19). Der Fäulegrad I (Verfärbungen tritt damit sofort ein), der Fäulegrade II, III und IV werden ab etwa 11 cm, 27 cm und 51 cm Fäuledurchmesser erreicht.

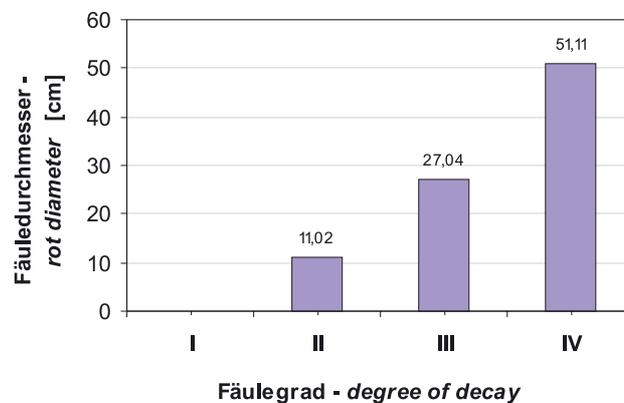


Abbildung 5-19: Untere Grenzdurchmesser zur Berechnung des Fäulegrades (Datenbasis: KATÓ 1967b) – lower diameter limits for a defined degree of decay.

Unter der Annahme, dass die Zersetzungsgeschwindigkeit und damit der Fäulegrad im Verhältnis zum Fäuledurchmesser über die Fäulehöhe konstant ist, kann der Fäulegrad für jede beliebige Höhe der Fäule im Modell berechnet werden.

Besonders hohen Einfluss auf die Holzqualität besitzt die Ausdehnung des Fäulegrades III, da hierbei die Holzstruktur schon deutlich angegriffen ist. Derartiges Holz wird als „nicht mehr nagelfest“ meist in die Güteklasse D oder NH (HKS) sortiert.

5.4.6 Modelle zur Prognose der Fäuleform – *Models for the form of decay*

Die Fäuleform stellt sich als Funktion des Fäuledurchmessers über der Höhe dar. Die Variablen FH_t bzw. FH_{max} und FD werden daher zur Modellbildung benutzt. Der FD beschreibt allerdings nur den Fäuledurchmesser an der Stammbasis, sodass weitere Variablen zur Beschreibung der Fäuleform notwendig sind. Dazu wurde ein von ZYCHA und DIMITRI (1968) beschriebener Zusammenhang genutzt. ZYCHA und DIMITRI bemerken, dass die gesamte Fäule in ihrer Form der Stammform folgt, sobald am Stammfuß Fäule mit dem Fäulegrad III oder IV (FG_{III} bzw. FG_{IV}) auftritt.

Zur Simulation wird deshalb zuerst geprüft, ob am Stammfuß bereits der Fäulegrad III oder IV erreicht ist. Ist dies der Fall, wird die Ausdehnung der Fäule mit dem FG_{III} bzw. FG_{IV} bestimmt, indem in einem ersten Schritt der Durchmesser der Fäule mit dem Fäulegrad III FD_{III} am Stammfuß nach Formel 5-16 berechnet wird. Die Berechnung des FD_{III} erfolgt durch Abzug des in Abschnitt 5.4.5 definierte Grenzdurchmessers für den Fäulegrad III vom Gesamtdurchmesser der Fäule.

$$FD_{III} = FD - 27,04 \tag{Formel 5-16}$$

Im nächsten Schritt wird die Fäulehöhe mit FG_{III} nach Formel 5-17 unter der Annahme geschätzt, dass sich die Höhe der Fäule mit dem Fäulegrad III (FH_{III}) proportional zum Durchmesser verhält.

$$FH_{III} = \frac{FD_{III}}{FD} \cdot FH \tag{Formel 5-17}$$

Somit sind die Parameter zur Beschreibung der Fäule des FG_{III} ermittelt. Die Fäuleform wird so festgelegt, dass sie vom Stammfuß bis zur FH_{III} der Stammform folgt, die der Baum damals hatte (Abbildung 5-20). Es wird dabei auf die bereits beschriebenen Stammformkurven von SILVA zurückgegriffen. Liegt die Fäule zwischen zwei Jahrringen, wird sie auf den nächst größeren gesetzt. Oberhalb von FH_{III} wird die Fäule durch einen Kegel beschrieben. Tritt noch keine Fäule mit einem Fäulegrad von III auf, wird der gesamte Fäuleverlauf durch einen Kegel nachgebildet. Erst bei Erreichen des FG_{III} folgt die Fäule der Stammform.

Das vorgestellte Modell liefert eine biologisch plausible Modellierung der Fäuleform unter der Annahme der konzentrischen Fäuleausbreitung (Hypothese F). Sie beschreibt eine Hemmung der Fäule in radialer Richtung bei fortgeschrittenem Fäulestadium, wie es bereits im Hypothesenteil diskutiert wurde (Hypothesen C, D und E) und reagiert dynamisch über die Nutzung der übrigen Fäulegrößen auf das Baumwachstum.

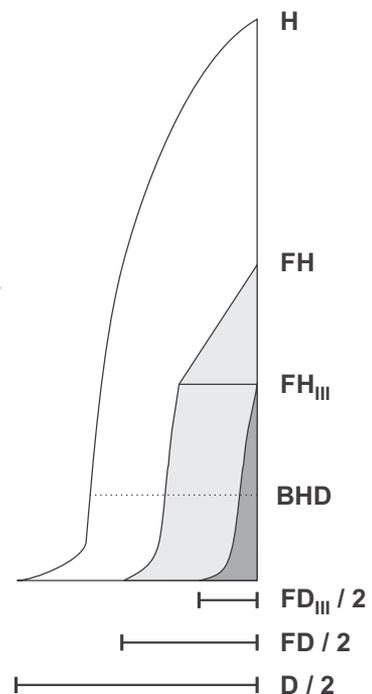


Abbildung 5-20: Modell der Fäuleform – *model for the form of the decay in the stem.*

5.4.7 Modellierung der fäulebedingten Wuchsdepression des Baumes – Models for the rot induced growth depression of infected trees

Wie schon in Abschnitt 5.2.2 beschrieben, hat ein Fäulebefall über die Zeit auch Auswirkungen auf das Höhen- und Durchmesserwachstum des Baumes. Ein deterministisches Modell wird benutzt, um derartige Rückkopplungen des Rotfäulemodells auf das Baumwachstum nachzubilden. Das Modell basiert auf Werten, die von BENDZ-HELLGREN und STENLID (1997) an 68 Fichten für schwedische Verhältnisse gemessen und in grafischer Form veröffentlicht wurden. Da die Autoren in ihrer Publikation keine Modellgleichung angeben, wurden die Stützpunkte grafisch rekonstruiert. Die resultierenden Kurven für das Wachstum gesunder und rotfäuler Bäume wurden voneinander abgezogen und die prozentualen Differenzen mit einer Regressionsgleichung unter Minimierung der quadratischen Abweichungen ausgeglichen (Abbildung 5-21 und Abbildung 5-22). Der quadratische Ausgleich zeigte gegenüber einem linearen eine wesentlich bessere Anpassung an die Daten und wurde deshalb zur Modellbildung benutzt. Die Relativierung der Wachstumseinbußen erlaubt eine vom absoluten Wachstum unabhängige Modellierung der Wuchsdepression.

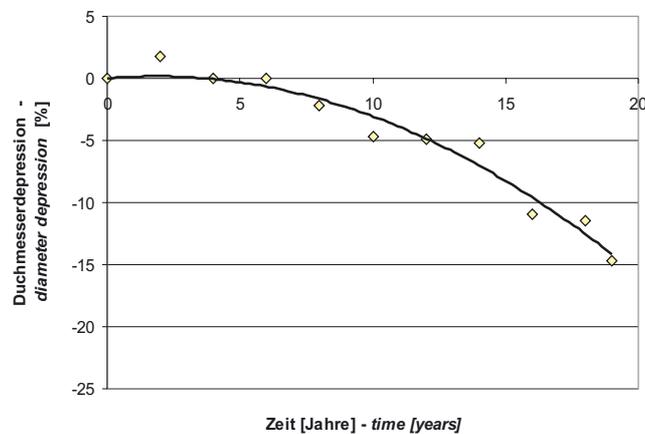


Abbildung 5-21: Relative Depression des Durchmesserwachstums (Datengrundlage BENDZ-HELLGREN und STENLID 1997) – relative growth reduction at DBH (database BENZ-HELLGREN and STENLID 1997)

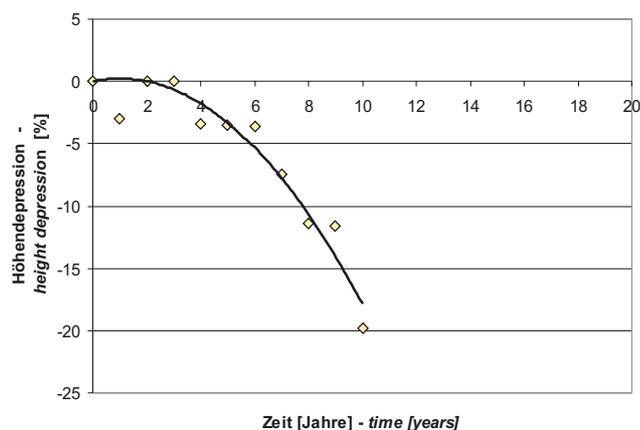


Abbildung 5-22: Relative Wuchsdepression des Höhenwachstums (Datengrundlage: BENZ-HELLGREN und STENLID 1997) – relative growth reduction of tree height (database: BENZ-HELLGREN and STENLID 1997)

Das Ergebnis sind zwei Modellgleichungen zur Beschreibung der relativen Wachstumsdepression eines rotfaulen Baumes über die Zeit, dargestellt in den Formel 5-18 und Formel 5-19.

$$\Delta H = d_2 \cdot TDH^2 + d_1 \cdot TDH \quad \text{Formel 5-18}$$

$$\Delta BHD = e_2 \cdot TDD^2 + e_1 \cdot TDD \quad \text{Formel 5-19}$$

ΔH = relative Höhenwachstumsdepression – relative depression of height growth
 ΔBHD = relative Durchmesserwachstumsdepression – relative depression of radial growth
 TDH = Zeit seit Beginn der Höhendepression – time since height depression started
 TDD = Zeit seit Beginn der Durchmesserdepression – time since radial depression started
 $d_0, d_1, d_2, e_0, e_1, e_2$ = Regressionsparameter – regression parameters

Tabelle 5-10: Regressionsparameter der Funktionen nach Formel 5-18 und Formel 5-19 – Regression parameters of Formel 5-18 and Formel 5-19

Parameter	Bestimmtheitsmaß
$d_1 = 0,4521$	$R^2=0,95$
$d_2 = -0,2231$	
$d_1 = 0,1813$	$R^2=0,93$
$d_2 = -0,0487$	

Durch Ableitung berechnen sich die zugehörigen linearen Zuwachsreduktionsfunktionen ΔiH und $\Delta iBHD$ (Formel 5-20 und Formel 5-21), die in SILVA implementiert wurden und bei der dynamischen Höhen- und Durchmesserfortschreibung im Waldwachstumssimulator berücksichtigt werden können.

$$\Delta iH = f_1 \cdot TDH + f_0 \quad \text{Formel 5-20}$$

$$\Delta iBHD = g_1 \cdot TDD + g_0 \quad \text{Formel 5-21}$$

ΔiH = relative Höhezuwachs-Depression – relative depression of height increment
 $\Delta iBHD$ = relative Durchmesserzuwachs-Depression am BHD – relative depression of DBH increment
 TDH = Zeit seit Beginn der Höhendepression – time since height depression started
 TDD = Zeit seit Beginn der Durchmesserdepression – time since DBH depression started
 f_1, f_0, g_1, g_0 = Regressionsparameter – regression parameters

Tabelle 5-11: Regressionsparameter von Formel 5-20 und Formel 5-21 – regression parameters of Formel 5-20 and Formel 5-21.

Parameter	
$f_1 = -0,4462$	$g_1 = -0,0974$
$f_0 = 0,4521$	$g_0 = 0,1813$

Zur Simulation werden die zwei Zeitgrößen TDH und TDD benötigt, die aus den Benutzereinstellungen und der Infektionszeit TI berechnet werden. Der Benutzer gibt über zwei Parameter vor, wie viele Jahre nach Infektionsbeginn die Depression des Höhen- und des Durchmesserwachstums einsetzen soll.

Zusätzlich kann er noch eine Schwelle angeben, über der das baumindividuelle Faulflächenprozent FFP liegen muss, damit es überhaupt zu einer Wuchsdepression kommt. Mit diesen Einstellungen ist es möglich, Durchmesserdepression und Höhendepression nach unterschiedlichen Zeiten nach dem Befall des Baumes beginnen zu lassen und nur stark befallenen Bäumen mit einem hohen FFP eine Wuchsdepression zuzuweisen.

5.5 Modellimplementation – *Model implementation*

5.5.1 Benutzerdefinierte Eingangsgrößen – *User defined Input*

Einige Größen im Modell RAM müssen vom Benutzer vorgegeben werden. Das mittlere Faulflächenprozent, das für die Bestandesbäume zugrundegelegt werden soll, mit der entsprechenden Standardabweichung sind die wichtigsten Größen. Alle weiteren Parameter sind optional und dienen der Flexibilität und Anpassung des Modells an den Untersuchungszweck. Es können die geschätzte jährliche vertikale Pilzausbreitung und die Modellfunktionen für die Fäulehöhen-schätzung verändert werden, für die auch eine Parameteranpassung möglich ist.

Der Benutzer wird weiterhin gefragt, ob er eine Schätzung der Wuchsdepression in SILVA wünscht und bei welchem minimalen Faulflächenprozent bzw. nach welcher Zeitspanne nach der Ausbreitung des Pilzes im Stamm diese, für Durchmesser- und Höhenwachstum differenziert, beginnen soll. Die Eingabe der Eingangsgrößen erfolgt menügesteuert in SILVA und gibt bereits plausible Werte vor, die vom Benutzer geändert und für den Rechenlauf übernommen werden können (Abbildung 5-23).

Abbildung 5-23: RAM-Menü –
RAM user interface

Das Rotfäuleausbreitungsmodell RAM wurde in Borland Delphi geschrieben und in die Delphi-Version von SILVA 2.2 integriert. Eine komplette Beschreibung des Programmablaufs ist in einem Flussdiagramm (Abbildung 5-24) dargestellt, das auch die Interaktion mit den dem Wuchsmodell und dem Rotfäuleinfektionsmodell RIM von SILVA illustriert. Im anschließenden Text sind die Einzelschritte der Simulation noch einmal erläutert. Die Nummern entsprechen den Nummern in Abbildung 5-24.

RAM

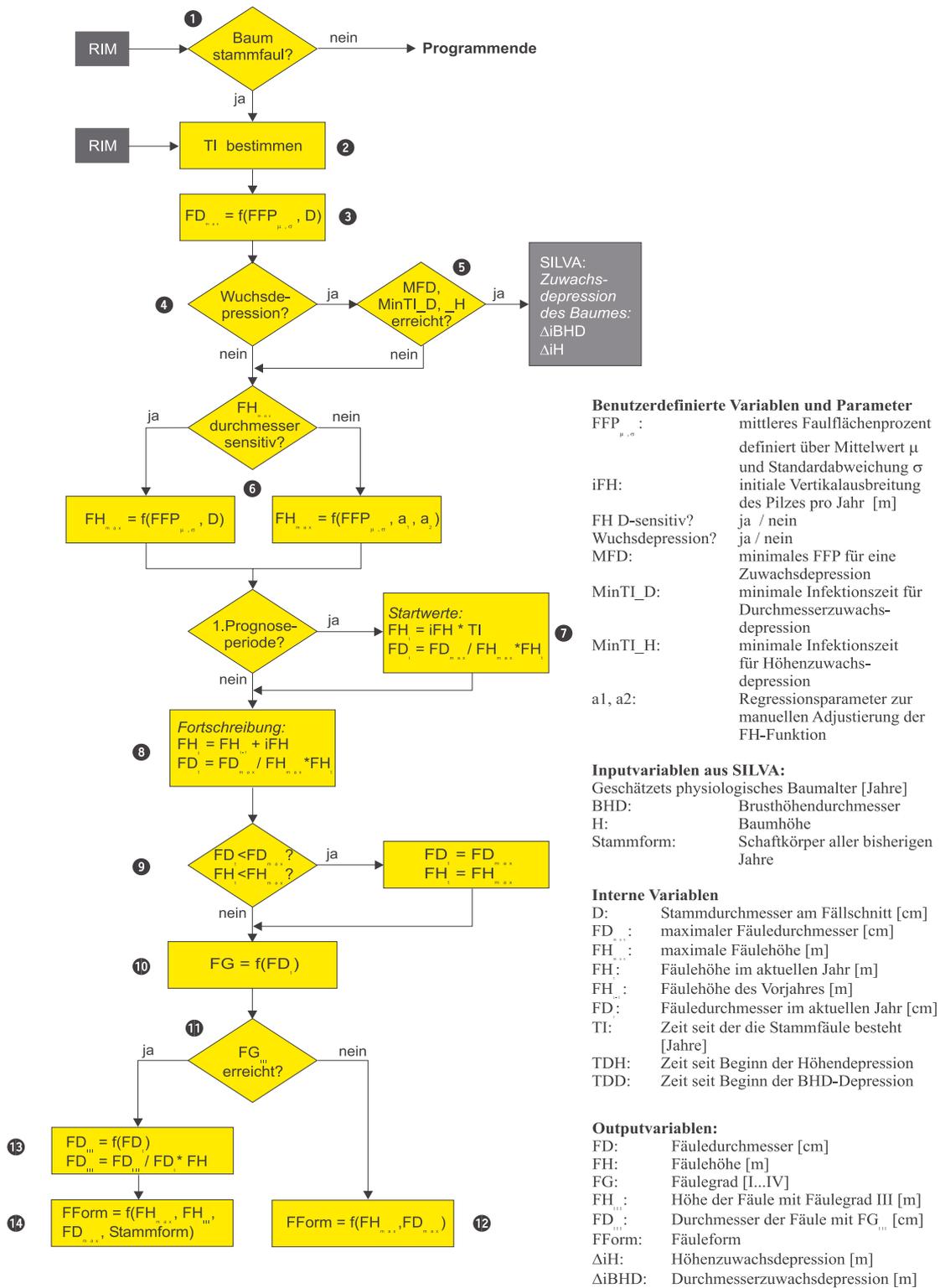


Abbildung 5-24: Flussdiagramm der Rotfäulesimulation – flow chart of the red rot simulation

Programmablauf der Rotfäulesimulation in RAM

1. Zuerst wird vom Rotfäuleinfektionsmodell RIM die Information abgefragt, ob der Baum infiziert ist und ob die Fäule bereits den Stamm erreicht hat.
2. Ist dies der Fall, wird die Befallszeit (TI) berechnet, seit der sich der Pilz im Stamm ausbreitet.
3. Im nächsten Schritt wird geprüft, ob laut Benutzereinstellung eine Wuchsdepression berechnet werden soll.
4. Hat der Benutzer eine Wuchsdepressionsberechnung vorgegeben, wird überprüft, ob der eingestellte Grenzwert für das Faulflächenprozent (MFD) und die, für die Durchmesserdepression (MinTI_D) und Höhendepression (MinTI_H) vorgegebenen Infektionszeiten überschritten sind. Ist dies der Fall, reduziert SILVA den periodischen Durchmesserzuwachs in Brusthöhe ($\Delta iBHD$) und den Höhenzuwachs (ΔiH) des Baums.
5. Der nächste Schritt berechnet den maximalen Fäuledurchmesser FD_{max} aus dem vorgegebenen Faulflächenprozent FFP. Dabei greift das Modell auf die Stammformkurven aus dem SILVA-Modul BDAT zurück, das aus dem BHD und der Baumhöhe den Durchmesser D am Fällschnitt schätzt. Aus D und FFP wird FD_{max} berechnet.
6. Danach wird das gewünschte Verfahren zur Schätzung der maximalen Fäulehöhe abgefragt und angewandt. Es stehen entweder ein lineares Verfahren mit manueller Parametrisierung oder ein durchmesserabhängiges Verfahren zur Verfügung.
7. Befindet man sich am Anfang einer Prognose, werden Startwerte für die Fäulehöhe und den Fäuledurchmesser bestimmt, wobei die Fäulehöhe aus der Infektionszeit TI und der vorgegebenen vertikalen Pilzausbreitung pro Jahr iFH bestimmt wird. Der Fäuledurchmesser wird proportional geschätzt.
8. Bei der anschließenden Fortschreibung wird periodenweise für 5 Jahre die aktuelle Fäulehöhe FH_t aus der Fäulehöhe der letzten Periode FH_{t-1} und dem Produkt aus der Periodenlänge und der jährlichen Höhenausbreitung des Pilzes iFH fortgeschrieben. Der Fäuledurchmesser FD_t der aktuellen Periode wird analog proportional geschätzt.
9. Bei jeder Berechnung wird abgefragt, ob FH_t oder FD_t die vorgegebenen Grenzwerte FH_{max} oder FD_{max} erreicht haben. Wenn ja, werden FH_t und FD_t gleich FH_{max} bzw. FD_{max} gesetzt.
10. Den nächsten Schritt bildet die Schätzung des Fäulegrades FG am Fällschnitt über den Fäuledurchmesser FD. Erreicht der Durchmesser einen definierten Grenzwert, wird der Fäulegrad erhöht.
11. Prüfung, ob der Fäulegrad am Fällschnitt die Stufe III (nicht mehr nagelfest) noch nicht erreicht hat,
12. Wenn der FG_{III} noch nicht erreicht ist wird die Fäuleform FForm durch einen Kegel nachgebildet, der durch FD und FH definiert ist.
13. Ist FG_{III} erreicht, wird der Durchmesser der Fäule mit Fäulegrad III (FD_{III}) bestimmt und die Höhe, die der Fäulegrad III (FH_{III}) einnimmt, proportional über den Durchmesser geschätzt. FH_{III} wird anteilig an FH genauso groß angenommen wie FD_{III} an FD.
14. Die Fäuleform FForm folgt bis zur Höhe des Fäulegrades III (FH_{III}) der Stammform, die wiederum aus SILVA abgefragt wird. Dabei wird die Fäule über den FD_{max} auf den Schaftkörper mit dem nächstgrößeren Durchmesser am Fällschnitt gesetzt. Zwischen den 5-Jahresschritten von SILVA wird hierbei linear interpoliert. Oberhalb von FH_{III} verläuft die Fäuleform wieder kegelförmig bis zur Spitze, die durch FH definiert ist.

6 Modellierung der Rundholzsortierung unter Berücksichtigung der Holzqualität

Modeling grading and bucking by taking into account wood quality

Im Rahmen der praktischen Rundholzsortierung erfolgt die Einteilung der Stämme in Sorten nach der Dimension und Qualität. DAB et al. werden die Stämme über eine Rundholznorm bewertet, wobei von metrisch bestimmbareren Holzmerkmalen auf eine normativ vorgegebene Rundholzqualität geschlossen wird. Durch die Rundholzsortierung wird so der natürliche Rohstoff Holz in ein handelbares Gut transformiert. Dies stellt eine Grundlage für die Wertermittlung dar und erlaubt dem Wirtschaftler eine monetäre Bewertung der Holzproduktion.

In einem managementorientierten Waldwachstumssimulator ist deshalb die Rundholzsortierung ein integraler Bestandteil, weil sie die monetäre Bewertung von simulierten waldbaulichen Alternativen ermöglicht. Eine Einbeziehung der Holzqualität präzisiert die monetäre Einschätzung dabei deutlich. Deshalb wird das ursprüngliche Rundholzsortiermodell des zugrunde liegenden Waldwachstumssimulators SILVA (KUBLIN und SCHARNAGL 1988) durch ein qualitätssensitives Rundholzsortiermodell ersetzt. Dieses neue Modell kombiniert die Simulationsergebnisse der Waldwachstumssimulation, des Astmodells und der Rotfäulesimulation, bestimmt die daraus folgende Holzqualitätsklasse, bewertet sie preislich und teilt schließlich auf dieser Informationsgrundlage jeden einzelnen Stamm mithilfe eines Optimierungsprozesses in definierte Rundholzsorten ein.

Das vorliegende Kapitel gliedert sich dabei in zwei Unterkapitel. Im Unterkapitel 6.1 werden in einem Literaturüberblick bereits existierende Sortiermodelle vorgestellt und nach verschiedenen Kriterien verglichen. Das Unterkapitel 6.2 stellt das hier neu entwickelte Sortiermodell SILVSORT in den Kontext dieses Gliederungsschemas und geht im Detail auf seine Funktionsweise ein.

6.1 Überblick über existierende Sortiermodelle

Overview on existing grading models

Einsatzzweck

Die bereits existierenden Rundholzsortiermodelle wurden für eine große Bandbreite an Einsatzzwecken entwickelt. Tabelle 6-1 bietet einen Überblick über eine Auswahl an Sortiermodellen. Einige Modelle haben zum Ziel, dem Waldarbeiter ein Hilfsmittel für den praktischen Einsatz im Bestand an die Hand zu geben und damit die Stammausformung schon im Wald zu unterstützen (PNEUMATICOS und MANN 1972, SESSIONS et al. 1989). Neuere Sortiermodelle nutzen die integrierten Messinstrumente und Rechner der Harvestersysteme zu genau demselben Zweck (KIVINEN und UUSITALO 2002).

Andere Sortiermodelle wurden vor allem zur Stehendinventur und Abtriebswertermittlung entworfen (ENG et al. 1986, GOULDING et al. 1993, KUBLIN und SCHARNAGL 1988). Die Autoren einer weiteren Modellgruppe sehen den Einsatzzweck vor allem in einer verbesserten Ausformung am Rundholzhof und im Sägewerk (GLÜCK und KOCH 1973, KUBLIN 1982, MENDOZA und BARE 1986, MANESS 1989).

Eine weitere Gruppe der Sortiermodelle befasst sich schließlich mit der Ausformung von Stämmen, die mithilfe von Waldwachstumssimulatoren berechnet wurden, und soll die monetäre Bewertung von verschiedenen Simulationsläufen ermöglichen, wie der Ansatz von NAGEL et al. (2001) oder die Implementation von BDAT in SILVA (siehe Unterkapitel 3.3).

Durch diese hohe Vielfalt an Einsatzzwecken unterscheiden sich diese Modelle auch entsprechend in ihren Verfahrensweisen und Methoden.

Berücksichtigung der Holzqualität

Ein Unterscheidungskriterium auf das in dieser Arbeit besonderen Wert gelegt wird, ist die explizite Berücksichtigung der Holzqualität bei der Stammeinteilung. Dabei kann eine Einteilung in Modelle vorgenommen werden, die ausschließlich die Stammdimension als Einteilungskriterium heranziehen (GLÜCK und KOCH 1973, KIVINEN und UUSITALO 2002, KUBLIN und SCHARNAGL 1988, LAROZE 1985, NAGEL et al. 2001) und in Modelle, die zusätzlich die Holzqualität berücksichtigen oder zumindest einige qualitätsrelevante Holzmerkmale miteinbeziehen (alle übrigen in Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Übersicht über Ansätze zur Modellierung der Stammausformung. *Overview on bucking models.*

Modell <i>model</i>	Sortier- kriterium <i>sorting criterion</i>	Methodik der Ausformung <i>bucking method</i>	Optimie- rungsebene <i>optimization level</i>	Optimie- rungsme- thode <i>optimization method</i>	Einsatzzweck <i>purpose</i>
BDAT, KUBLIN u. SCHARNAGL (1988)	D	det	–	–	Inventur, Simulation (in SILVA)
BWINpro, NAGEL et al. (2001)	D	det	–	–	Simulation
LAROZE (1985)	D	det	–	–	k. A.
PNEUMATICOS u. MANN (1972)	D	opt	E	DP	Ausformung im Wald, Abtriebswertermittlung
GLÜCK u. KOCH (1973)	D	opt	E	DP	Optimale Ausformung am Holzhof
KIVINEN u. UUSITALO (2002)	D	opt	B	FC	Optimale Ausformung durch Harvester
KUBLIN (1982)	D/Q	opt	E	DP	Ausformung im Sägewerk
MicroMARVL, GOULDING et al. (1993)	D/Q	opt	E	DP	Inventur, Abtriebswert- ermittlung
SESSIONS et al. (1989)	D/[Q]	opt	B	BS	Ausformung im Wald
LAROZE (1994)	D/Q	opt	B	LP/SP	Abtriebswertermittlung, Ausformung im Wald
LAROZE (1994)	D/Q	opt	B	MCIP	Abtriebswertermittlung, Ausformung im Wald
LAROZE (1994)	D/Q	opt	B	TS	Abtriebswertermittlung, Ausformung im Wald
ENG et al. (1986)	D/Q	opt	F	DP/LP	Inventur
MENDOZA u. BARE (1986)	D/[Q]	opt	I	LP/KS	Integrierte Holzverwendung
MANESS (1989)	D/[Q]	opt	I	LP/KS	Integrierte Holzverwendung

D = Stammdimension, Q = Rundholzqualität, [Q] = Rundholzqualität möglich, aber nur rudimentär implementiert, det = deterministisch, opt = optimierend, E = Einzelbaum, B = Bestand, F = Forstbetrieb, I = integrierter Betrieb, DP = Dynamische Programmierung, LP = Lineare Programmierung, FC = Fuzzy Controller, SP = Dijkstras Algorithmus, MCIP = Monte-Carlo-Integer-Programmierung, TS = Tabu-Search-Verfahren, BS = Binärsuche, KS = Knapsack-Algorithmus

D = stem dimension, Q = roundwood quality, [Q] = quality consideration possible but only roughly implemented, det = deterministic, opt = optimizing, E = single tree, B = stand, F = forest enterprise, I = integrated enterprise, DP = Dynamic Programming, LP = Linear Programming, FC = Fuzzy Controller, SP = Dijkstra's shortest path algorithm, MCIP = Monte-Carlo Integer Programming, TS = Tabu Search method, BS = binary search method, KS = Knapsack algorithm

Deterministische versus optimierende Modelle

Ein weiteres Gliederungskriterium stellt die Methodik dar, mit der Stammeinteilung ermittelt wird. Dabei lassen sich Modelle mit einer rein deterministischen Vorgabe der Ausformung (KUBLIN und SCHARNAGL 1988, LAROZE 1985, NAGEL et al. 2001) von optimierenden Modellen unterscheiden (Abb. 6-1), die im Folgenden etwas eingehender behandelt werden sollen.

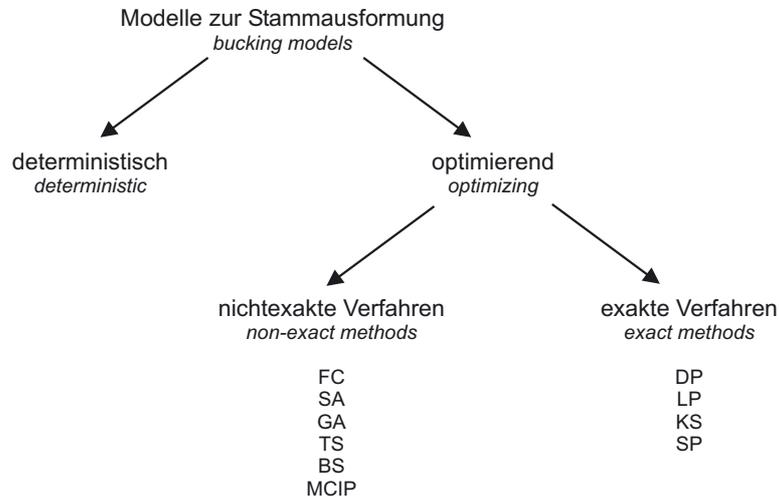


Abbildung 6-1: Gliederungsschema für Sortiermodelle nach methodischen Gesichtspunkten. *Classification scheme for bucking models according to the applied methods.*

KS = Knapsack-Algorithmus, LP = Lineare Programmierung, DP = Dynamische Programmierung, MCIP = Monte-Carlo-Integer-Programmierung, BS = Binärsuche, SP = Dijkstras Algorithmus, TS = Tabusuche, GA = Genetischer Algorithmus, SA = Simuliertes Ausglühen (Simulated Annealing)

KS = Knapsack-Algorithm, LP = Linear Programming, DP = Dynamic Programming, MCIP = Monte-Carlo Integer Programming, BS = Binary Search, SP = Dijkstra's Shortest Path Algorithm, TS = Tabu Search, GA = Genetic Algorithm, SA = Simulated annealing

Optimierungsebene

Wichtig bei einer Differenzierung optimierender Modelle ist die Auflösungsebene, auf der optimiert wird. Die Optimierungsebene kann der Einzelbaum, der Bestand, der Forstbetrieb oder ein Betrieb mit vertikaler Integration von Forstbetrieb und verarbeitender Holzindustrie (z. B. Sägewerk, Furnierwerk, Holzschliff) sein. Die erste Variante ermittelt eine optimale Stammeinteilung für den einzelnen Baum (GLÜCK und KOCH 1973, GOULDING et al. 1993, KUBLIN 1982, PNEUMATICOS und MANN 1972). Bei einer zweiten Variante werden die Stämme so eingeteilt, dass eine optimale Lösung auf Bestandesebene erreicht wird (KIVINEN und UUSITALO 2002, LAROZE 1994, SESSIONS et al. 1989), was mitunter nichtoptimale Einzelbaumsortierungen voraussetzt. Dadurch lassen sich zusätzlich Lieferrestriktionen von bestimmten Sortimenten berücksichtigen.

Bei einer Optimierung auf Forstbetriebsebene wird dieses Konzept vom Bestand auf den Forstbetrieb ausgeweitet (ENG et al. 1986). Die Optimierung integrierter Betriebe befasst sich schließlich mit einer Allokationsoptimierung der Rohstoffe über den gesamten Betrieb und erstreckt sich vom Forstteil des Betriebs bis hin zu den weiterverarbeitenden Betriebsebenen (z. B. Sägewerk, Zellstoffwerk, Furnierwerk). Ziel ist es durch die Stammeinteilung der Einzelbäume und die Verteilung der Sortimente eine Nutzenmaximierung des Gesamtbetriebes zu berechnen (MANESS 1989, MENDOZA und BARE 1986).

Optimierungsmethodik

Die Optimierungsmethodik ergibt sich aus dem Einsatzzweck, der Optimierungsebene und aus der daraus folgenden Problemstellung der Optimierung der Stammeinteilung. Die Optimierung der Sortenbildung stellt ein komplexes kombinatorisches Problem dar, bei dem sehr viele Alternativen untersucht werden können. Damit wird die Lösung durch vollständige Enumeration ineffektiv, da sie zu viel Rechenzeit benötigt. Durch die Stammeinteilung in eine ganzzahlige Anzahl von Abschnitten handelt es sich zudem um ein ganzzahliges bzw. Integer-Optimierungsproblem, das sich in der Lösungsmethodik deutlich von stetigen Optimierungsproblemen unterscheidet.

Typische Lösungsansätze arbeiten nach exakten Verfahren (Abb. 6-1), wobei eine optimale Lösung in jedem Fall errechnet wird (DOMSCHKE und DREXL 1998). Zu den exakten Verfahren zählen beispielsweise die Verfahren der linearen und dynamischen Programmierung. Knapsack-Algorithmen können als Sonderfall der dynamischen Programmierung angesehen werden.

Die Verfahren der dynamischen Programmierung etablierten sich als gängige Methode, da erste Versuche die Stammausformung über lineare Programmierung zu optimieren (SMITH and HARRELL 1961) zu unflexibel waren und zudem die Grundannahme der Linearität des Optimierungsproblems nicht sichergestellt werden kann (PNEUMATICOS und MANN 1972). Die lineare Programmierung wird in modernen Verfahren nur noch in Kombination mit der dynamischen Programmierung eingesetzt, um die möglichen Sorten nach Marktanforderungen zu berechnen, während die dynamische Programmierung die eigentliche Stammeinteilung optimiert (ENG et al. 1986, MANESS 1989, MENDOZA und BARE 1986)

Nichtexakte Verfahren begnügen sich mit einer Annäherung an ein Optimum. Zu dieser Gruppe zählen Modelle mit unscharfen Begriffen (Fuzzy-Modelle), wie das von KIVINEN und UUSITALO (2002) und besonders heuristische Verfahren, die Zufallsprozesse zur Optimierung nutzen, wie etwa simuliertes Ausglühen (Simulated Annealing), Tabusuche (Tabu Search) und genetische Algorithmen. Von diesen heuristischen Ansätzen wird zwar nicht in jedem Fall ein Optimum erreicht, jedoch besitzen sie bei komplexen Optimierungsproblemen deutliche Laufzeitvorteile. Durch den Geschwindigkeitsvorteil und eine flexible Anwendbarkeit werden deshalb nichtexakte Verfahren auch für Optimierung der Stammausformung eingesetzt (LAROZE 1994, SESSIONS et al. 1989)

6.2 Sortiermodell SILVSORT – *The grading and bucking model SILVSORT*

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell zur Rundholzsortierung „SILVSORT“ differenziert nach der Rundholzqualität und versucht für jeden Einzelstamm eine erlösoptimale Sorteneinteilung des Stammes zu erzielen. Die Modellierung gliedert sich dabei in drei Komponenten. Die erste Komponente und zugleich der Rahmen des Sortiermodells ist der genetische Algorithmus, der eine Einteilungsvariante für den Stamm vorschlägt und eine Bewertung für die Variante benötigt. Die zweite Komponente liefert eine Bewertung der Holzqualität der Stammabschnitte nach einer Rundholznorm. Die dritte Komponente weist den Sorten marktübliche Preise zu und berechnet die Erntekosten. Aufbauend auf den daraus hervorgehenden erntekostenfreien Erlösen wird mit dem genetischen Algorithmus die Stammzerlegung in Rundholzsortimente optimiert.

Im Abschnitt 6.2.1 wird zuerst die Modellierung der Bewertung des Stammabschnitts nach einer Rundholznorm vorgestellt. Danach erfolgt die monetäre Bewertung des Stammabschnitts mit Hilfe des erntekostenfreien Erlöses (Abschnitt 6.2.3). Zum Schluss wird die Simulation der optimierten Sortimentseinteilung beschrieben (Abschnitt 6.2.3).

6.2.1 Bewertung der Holzqualität des Stammes nach einer Rundholznorm – *Grading based on a grading rule*

Zur Bewertung der Rundholzqualität werden die sortierrelevanten Holzmerkmale eines Stammes bzw. einzelner Stammabschnitte einer gängigen Rundholznorm gegenübergestellt. Dabei wird in SILVSORT zwischen explizit modellierten Holzmerkmalen und nicht explizit modellierten Holzmerkmalen unterschieden.

Explizit modellierte Holzmerkmale

Das Bewertungsmodell von SILVSORT nutzt die Ergebnisse der Wachstumssimulation des Baumes (Unterkapitel 3.3), der Astsimulation (Kapitel 4) und der Rotfäulesimulation (Kapitel 5), um die simulierten Holzmerkmale in Qualitäts- bzw. Güteklassen nach den Rundholznormen ENV 1927-1 oder HKS umzusetzen. Dabei werden für jeden Stamm Funktionen erstellt, die für vorgegebene Positionen am Stamm den Stammdurchmesser, die Abholzigkeit, die mittlere Jahringbreite, den maximalen Astdurchmesser, den Aststatus, den Fäuledurchmesser und den Fäulegrad bestimmen. Diese Größen ergeben sich direkt aus der Simulation der Holzmerkmale oder durch Berechnung aus den Simulationsergebnissen.

Einbeziehung nicht explizit modellierter Holzmerkmale

Weitere Sortierkriterien, die nur gering zur Bestimmung der Rundholzqualität bei Fichte beitragen, wie SCHUMACHER et al. (1997) bei Probesortierungen nach der ENV 1927-1 belegen (Unterkapitel 3.2), wurden in dieser Arbeit von der expliziten Simulation ausgeklammert. Eine Vernachlässigung dieser Größen bei der Bewertung hätte allerdings zur Folge, dass bei einer Sortierung der Simulationsergebnisse die Holzqualität systematisch zu gut eingeschätzt würde. Um realistische Sortierergebnisse zu gewährleisten, werden derartige Größen, wie beispielsweise Harzgallen, Krümmung, Insektenschäden und Reaktionsholz bei der Qualitätsbewertung des Stammes vorgesehen, indem sie in einem stochastischen Prozess zugewiesen werden. Basierend auf den von SCHUMACHER et al. (1997) angegebenen prozentualen Einflüssen der Kriterien, werden Wahrscheinlichkeiten ermittelt, mit der ein bestimmtes Holzmerkmal eine Absortierung zur Folge hat (Tabelle 6-2). Diese Wahrscheinlichkeiten werden in der Simulation der Sortierung gegen eine gleichverteilte Zufallszahl im Bereich von 0–100 getestet. Ist die Zufallszahl kleiner oder gleich groß der Wahrscheinlichkeit, erfolgt eine Absortierung aufgrund des jeweiligen Kriteriums. Für Ringschäle und Drehwuchs machen SCHUMACHER et al. (1997) keine Angaben, weshalb dafür auch keine Wahrscheinlichkeiten ermittelt werden konnten. Diese Größen sind zwar in den nachfolgenden Sortierschemata vorgesehen, werden jedoch nicht sortierrelevant.

Tabelle 6-2: Die nach SCHUMACHER et al. (1997) abgeleiteten Wahrscheinlichkeiten sortierrelevanter, aber nicht explizit modellierter Holzmerkmale.

Deduced probabilities of wood traits from SCHUMACHER et al. (1997) which are relevant for roundwood grading but not modeled explicitly (A is best NH is not sold any more).

Sortierkriterium – <i>criteria</i>	A → B	B → C	C → D	D → NH
Harzgallen – <i>resin pockets</i>	4%	14%	0%	0%
Exzentrizität – <i>excentricity</i>	0%	3%	0%	0%
Reaktionsholz – <i>reaction wood</i>	0%	11%	1%	0%
Krümmung – <i>stem crook</i>	0%	5%	4%	5%
Risse – <i>cracks</i>	0%	1%	1%	0%
Insekten – <i>insects</i>	0%	0%	1%	0%
Rotstreifigkeit/Bläue – <i>red and blue stain</i>	0%	3%	0%	0%

Alle in Tabelle 6-1 aufgeführten Sortierkriterien werden erst nach dem Durchlaufen des nachfolgend vorgestellten Sortierbaumes geprüft. Die aufgrund der explizit modellierten Sortierkriterien ermittelte Güte- bzw. Qualitätsklasse wird dabei in einem zweiten Schritt, bei Eintritt der in Tabelle 6-2 angegebenen Wahrscheinlichkeiten, modifiziert. Eine Mehrfachreduktion wird dabei ausgeschlossen. Bekommt ein Stamm beispielsweise am Ende der Sortierung nach den explizit modellierten Qualitätsmerkmalen die Qualitätsklasse C zugewiesen, wird überprüft, ob er durch Druckholz ($p = 1\%$), Krümmung ($p = 4\%$), Risse ($p = 1\%$) oder Insektenschäden ($p = 1\%$) nach Qualitätsklasse D absortiert wird. Ist dies der Fall, wird D als Qualitätsklasse festgelegt. Es erfolgt keine weitere Prüfung der Wahrscheinlichkeiten, die eine Absortierung von D nach NH zuließen. Dies würde ansonsten zu systematisch zu schlechten Sortierergebnissen führen.

Sortierschemata

Im Folgenden werden die implementierten Sortierschemata zur Rundholzsortierung dargelegt, die im weiteren Text als „Sortierbäume“ bezeichnet werden, da sie als binäre Entscheidungsbäume aufgebaut sind. Für Stammholz werden Sortierbäume nach der europäischen Rundholznorm ENV 1927-1 und nach der HKS vorgestellt. Die Industrieholzsortierung richtet sich ausschließlich nach den Vorgaben der HKS.

Sortierbaum Stammholz ENV 1927-1

Die europäische Rundholznorm ENV 1927-1 ist quantitativ gefasst und führt im Gegensatz zur HKS explizite Grenzen für die Ausprägung von Holzmerkmalen auf, die bei einer definierten Qualitätsklasse nicht überschritten werden dürfen. Für die Implementation der ENV 1927-1 in Computercode lassen sich diese Grenzen deshalb direkt in einen binären Sortierbaum umsetzen, der mit Ja-Nein-Entscheidungen durchlaufen werden kann. Ein Ausschnitt des Sortierbaums ist in Abbildung 6-2 dargestellt. Die roten Buchstaben kennzeichnen jeweils die erreichte Qualitätsklasse. Werden alle Sortierentscheidungen mit „ja“ beantwortet, ergibt sich Qualitätsklasse A.

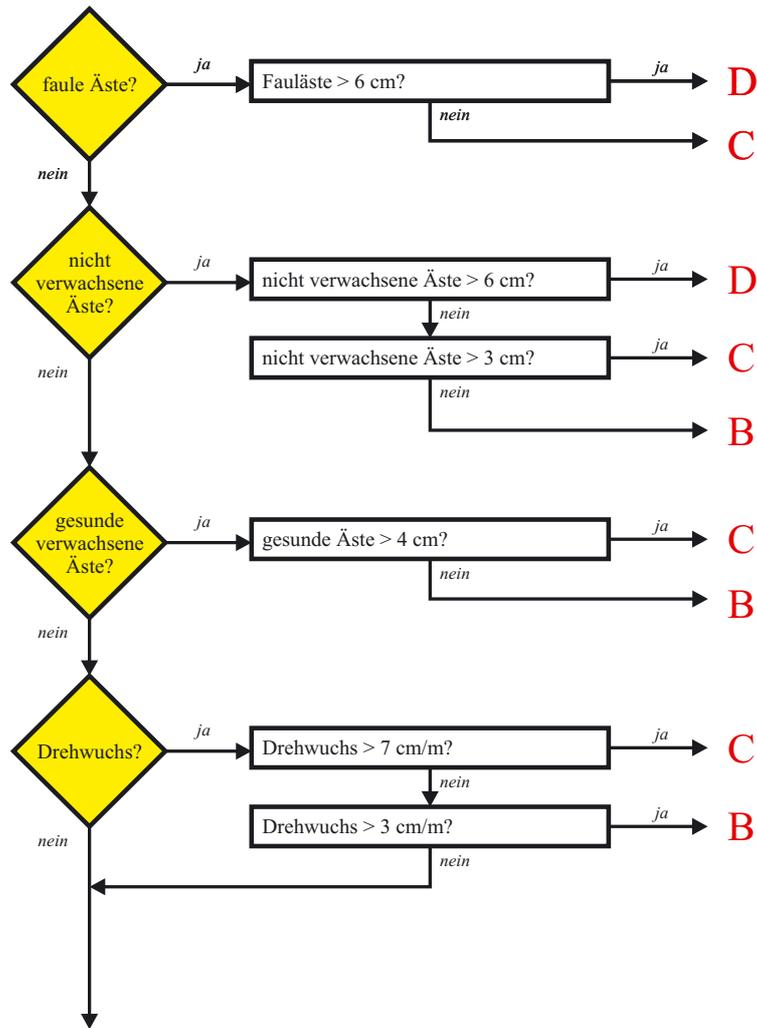


Abbildung 6-2: Ausschnitt des binären Sortierbaums zur Rundholzsortierung nach der ENV 1927-1.
 Section of the binary sorting tree for roundwood grading with ENV 1927-1.

Der komplette Sortierbaum findet sich in Anhang A. Nicht explizit modellierte Größen und nicht simulierte Holzmerkmale sind mit aufgeführt und speziell gekennzeichnet.

Sortierbaum Stammholz HKS

Die Handelsklassensortierung HKS ist vergleichsweise „weich“ formuliert. Es werden keine definitiven Grenzen für die Ausprägung von Holzmerkmalen bereitgestellt, sondern unscharfe Formulierungen wie „grobastig“ oder „stark drehwüchsig“ verwendet. Um nicht mit unscharfen Begriffen arbeiten zu müssen, wird in dieser Arbeit eine Interpretation der HKS vorgenommen, die eindeutige Grenzen für die Merkmalsausprägungen definiert. Diese Interpretation stützt sich auf die quantitative Auslegungen der HKS von Sachsen (SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, ERNÄHRUNG UND FORSTEN 1994) und Baden-Württemberg (SORTIERMERKBLÄTTER FÜR STAMMHOLZ 1988) sowie praktische Sortiergepflogenheiten in Bayern (BAUMGARTNER 1999, SCHUMACHER 1999). Die entsprechenden Grenzwerte für die einzelnen Güteklassen sind in Anhang A. als binärer Sortierbaum dargestellt.

Sortierbaum Industrieholz HKS

Für Industrieholz gelten andere Güteklassen wie für Stammholz. Die Einteilung in die Güteklassen n , f und k erfolgt nach ähnlichem Muster wie beim Sortierbaum der HKS für Stammholz, wobei wiederum die unscharfen Formulierungen der HKS in feste Grenzwerte übertragen werden. Als Eingangsgrößen für die Industrieholzsortierung werden lediglich Astigkeit und Fäule herangezogen.

Die Abgrenzung zwischen Stammholz und Industrieholz wird bei der Simulation ausschließlich aufgrund des Durchmessers getroffen. Ab einem Zopfdurchmesser unter 14 Zentimetern wird Industrieholz ausgewiesen. In der Praxis werden manchmal überdurchschnittlich starke Stämme bei Entnahmen, bei denen ansonsten nur Industrieholzdimensionen anfallen, dem Industrieholz zugeschlagen. Gleiches gilt für besonders schlechtes Stammholz, das qualitativ die Güteklasse D nicht mehr erreicht, aber noch als Industrieholz in der Spanplattenindustrie verwendet werden kann. Auch dieses Stammholz wird gelegentlich als Industrieholz verkauft. Auf eine Einbeziehung von stärkerem Holz ins Industrieholz wird bei der Implementierung in SILVSORT verzichtet, da eine weitere Güte- bzw. Qualitätsklasse unterhalb von D eingeführt würde und dies faktisch einer Änderung der Sortiernormen gleichkäme.

6.2.2 Monetäre Bewertung – *Monetary assessment*

Ermittlung der Bruttoerlöse

Nachdem die Holzqualität für einen definierten Abschnitt über einen Sortierbaum ermittelt ist, wird den einzelnen Sorten je nach Güte- (HKS) bzw. Qualitätsklasse (ENV 1927-1) ein Erlös zugewiesen.

Die benutzten Holzpreise orientieren sich an der Holzpreisstatistik des Jahres 2000 der Bayerischen Staatsforstverwaltung und können so als bayernweite Durchschnittswerte im Staatswald gelten. Die Preise sind den jeweiligen Güteklassen der HKS zugeordnet. Für die ENV 1927-1 liegen noch keine umfangreichen Daten in dieser Form vor, weshalb die Preise der Güteklassen der HKS für die Qualitätsklassen der ENV 1927-1 übernommen werden. Da sich die Qualitätsklassen der ENV 1927-1 jedoch von den Güteklassen der HKS unterscheiden (SCHUMACHER et al. 1997), sind in der Realität Preisverschiebungen zwischen den Klassen zu erwarten. Diese können jedoch erst berücksichtigt werden, wenn reale Preise für die Qualitätsklassen der ENV 1927-1 vorliegen.

Die verwendeten Preise werden in einer Matrixform gespeichert, um bei der Sortiersimulation einen schnellen Zugriff im Programm zu gewährleisten. Die verwendeten Preismatrizen für Stammholz und Industrieholz sind in im Anhang B. aufgeführt.

Bestimmung des erntekostenfreien Erlöses

Die abschließende Bewertung eines Stammes erfolgt in SILVSORT auf der Basis des erntekostenfreien Erlöses. Dieser wird aus dem Verkaufserlös abzüglich der Erntekosten ermittelt. Da sich nach dem Stück-Masse-Gesetz sehr unterschiedliche Erntekosten für verschiedene Sortimente ergeben, wurde als Grundlage für die Erntekosten in SILVSORT der „Erweiterte Sortentarif“ (EST) vom 3. Mai 1979 mit aktuellen Geldfaktoren herangezogen, der die Kosten für eine motor-manuelle Holzernte detailliert aufschlüsselt. Zusätzlich müssen noch Rückekosten angesetzt werden, die der EST nicht abdeckt. Der hier implementierte Ansatz für die Berechnung der Rückekosten in Abhängigkeit von der Stückmasse wurde aus dem Waldwachstumssimulator SILVA übernommen (Formel 6-1).

$$RK = 3,9678 \cdot V^{-0,5246}$$

Formel 6-1

RK = Rückekosten [Euro / fm o. R.] – logging costs

V = Volumen [fm o. R.] – volume

Die Erntekosten sind wie die Preise in Matrixform abgelegt (s. Anhang C). Für den Kostenansatz wird als Sortimentsgruppe neben langem Stammholz, Fixlängen und Industrieholz auch X-Holz berücksichtigt, das zwar Erntekosten verursacht, jedoch nicht vermarktbar ist und deshalb keinen Erlös bringt.

Um in SILVSORT die Erlös- und Kostenmatrizen dem jeweilige Sortiment zuzuweisen, wird nach dem in Abb. 6-3 dargestellten Schema vorgegangen.

Die Abfrage der Grenzlänge von 21 Metern gilt der maximal zulässigen Transportlänge. Für Abschnitte unterhalb der Derbholzgrenze wird ebenfalls kein Erlös angenommen. Durch diese Straffunktion werden Varianten, die solche Sortimente beinhalten, schlecht bewertet und früh ausselektiert.

Die nächste Abfrage prüft auf einen Zopfdurchmesser von 14 Zentimetern. Dies wurde als Grenze zwischen Stammholz und Industrieholz definiert. Liegt der Zopfdurchmesser des Abschnitts unter 14 Zentimetern, wird er als Industrieholz sortiert und bekommt dementsprechende Erlöse und Kosten zugewiesen. Einzige Einschränkung ist eine Mindestlänge von zwei Metern. Erreicht der Abschnitt diese Länge nicht, gilt er als unverkäuflich und über eine Straffunktion wird sein Erlös auf null gesetzt.

Bei Industrieholz fallen als Kostensorten nach dem EST baumfallende (B), kranfallende (K) Stücke oder Wipfel von stärkeren Bäumen (W) an. Letztere werden hier als Bäume mit einem BHD über 40 cm definiert.

Abschnitte mit Zopfdurchmessern von mindestens 14 Zentimetern werden als Stammholz sortiert. Die wichtigste Abfrage gilt hier der Qualität. Ist der Stammabschnitt z.B. durch sehr starke Rotfäule (Qualitätsstufe NH) oder eine Mindestlänge unter 2,5 Metern nicht vermarktbar, wird er als X-Holz sortiert, das zwar Aufarbeitungskosten aber keine Erlöse erbringt. Beim X-Holz werden je nach Länge des Abschnitts die Kostensorten X_L, X_M und X_K unterschieden.

Fällt der Stammabschnitt nicht ins X-Holz, werden ihm nach der Stammholzsortierung die entsprechenden Preis- und Kostenmatrizen für Abschnitte oder langes Stammholz zugewiesen. Außer Stammholz lang (L) werden noch Fixlängen über und unter 3,5 Meter Länge unterschieden (G_FL bzw. G_FK).

Zusätzlich wird bei der Kostenberechnung nach dem EST eine weitere Unterteilung der Stammholz- und Industrieholzsportimente nach der Art des Anschreibens (Zählen, Längenvermessung, vollständige Beschriftung) vorgenommen. Die verwendeten Kostenmatrizen sind in Anhang C dargestellt.

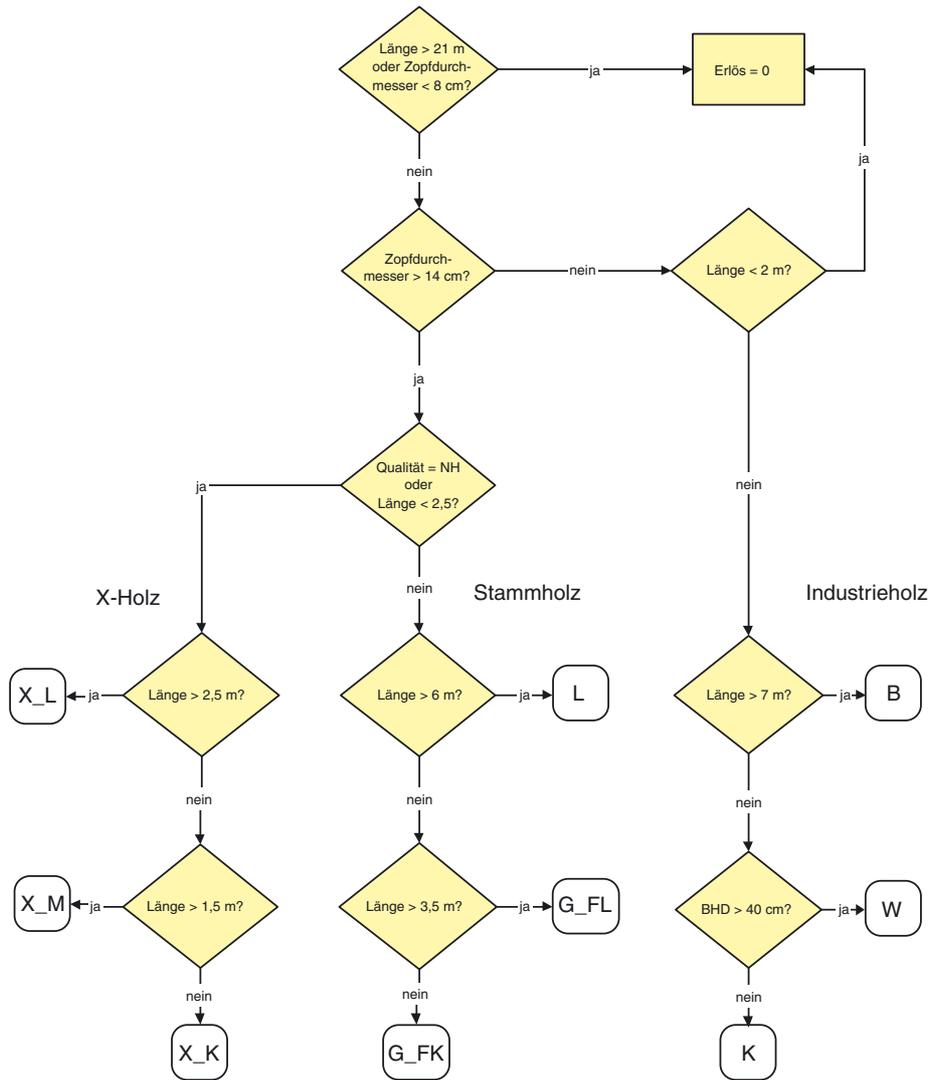


Abbildung 6-3: Einteilschema für die Erlös- und Kostenkalkulation in SILVSORT. *Schedule for cost and revenue calculation in SILVSORT.*

Ist die zugehörige Kosten- bzw. Erlösmatrix bestimmt, wird über den Mittendurchmesser der passende Bruttoerlös und die Erntekosten für den jeweiligen Stammabschnitt ausgelesen und der erntekostenfreie Erlös nach Formel 6-2 errechnet.

$$D1 = BE - VA \cdot KF_VA + VA \cdot LNKF + VA \cdot WG + VMS \cdot KF_MS + RK \quad \text{Formel 6-2}$$

- D1* = Erntekostenfreier Erlös (Nettoerlös) – *netto proceeds*
- BE* = Bruttoerlös – *gross proceeds*
- VA* = Vorgabezeit Arbeiter – *standard time worker*
- KF_VA* = Kostenfaktor Arbeiter – *cost factor worker*
- LNKF* = Lohnnebenkostenfaktor – *non-wage labor costs*
- WG* = Werkzeugenschädigung – *tool costs*
- VMS* = Vorgabezeit Motorsäge – *cost factor chain saw*
- RK* = Rückekosten – *logging costs*

Da das tatsächlich erreichte Arbeitsvolumen in der Regel über den Vorgabezeiten liegt (PAUSCH 2003), werden diese durch 1,3 geteilt. Als Kostenfaktoren werden beispielhaft die aktuell gültigen Tarifvereinbarungen der bayerischen Staatsforstverwaltung von 2003 herangezogen. Mit der Berechnung von erntekostenfreien Erlösen steht ein geeignetes Kriterium für die anschließende Optimierung der Sortimentsaushaltung zur Verfügung.

6.2.3 Optimierung der Sortimentsaushaltung – *Optimization of bucking*

Wahl der Methode

Aus den diversen Möglichkeiten die Sortimentsaushaltung zu optimieren, wurde ein genetischer Algorithmus wegen seiner flexiblen Anwendbarkeit und einfachen Formulierung gewählt. Gegenüber Verfahren wie der dynamischen Programmierung kann ein genetischer Algorithmus sowohl auf Einzelbaum- als auch auf Bestandesebene angewendet werden und bedarf dazu keiner Anbindung an einen zweiten Algorithmus über eine Zerlegungsfunktion, wie in anderen Ansätzen (ENG et al. 1986, MANESS 1989, MENDOZA und BARE 1986). Restriktionen, wie Abschnittsmindestlängen oder Mindestzopfdurchmesser, werden im genetischen Algorithmus einfach als Straffunktion in die Bewertung eingebracht.

Die Geschwindigkeit von Optimierungsalgorithmen ist stark von der effizienten algorithmischen Umsetzung bei der Implementierung abhängig. CHEN und VON GADOW (2003) zeigen, dass Heuristiken, zu denen auch die genetischen Algorithmen zählen, bei bestimmten Optimierungsproblemen durchaus deutliche Geschwindigkeitsvorteile gegenüber exakten Verfahren wie z.B. der linearen Programmierung besitzen, ohne deutlich schlechtere Optimierungsergebnisse aufzuweisen. Um eine hohe Laufgeschwindigkeit sicherzustellen, wird auf die bewährte, frei verfügbare Programmbibliothek „GALIB“ zurückgegriffen, die von MATTHEW WALL (1998) am Massachusetts Institute of Technology entwickelt wurde und in einer C++-Implementierung zur Verfügung steht.

Grundprinzip genetischer Algorithmen

Genetische Algorithmen basieren auf Ideen einer adaptive Verbesserung technischer Systeme mittels evolutionärer Methoden. BÜRGER und BEITELMAIR (1996) führen die Entwicklung der genetischen Algorithmen auf zwei unabhängige Schulen in den 60er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts zurück. Die deutsche Schule um RECHENBERG (1973) und die amerikanische Schule um BAGLEY (1967) und HOLLAND (1975), wobei BAGLEY als erster den Begriff „genetic algorithms“ definierte.

Genetische Algorithmen ahmen evolutionsgenetische Prozesse nach, und basieren auf der Erkenntnis, dass sich in der Natur nur die Individuen mit der höchsten Fitness durchsetzen und ihr Erbgut weitergeben können. Individuen mit geringer Fitness sterben aus.

Diese darwinistische Grunderkenntnis wird auf Optimierungsprobleme übertragen, um aus einer großen Anzahl möglicher Varianten die beste herauszufinden. Dabei wird auch die in der Genetik übliche Nomenklatur übernommen. Nach LUTZ (1998) ergibt sich folgendes allgemeines Ablaufschema eines genetischen Algorithmus:

1. Wähle eine Anfangspopulation (Parentalpopulation) P mit N Individuen und eine unbesetzte Nachfolgepopulation $P' = \{\}$.
2. Berechne für alle Individuen aus P die Fitness.
3. Führe folgende Operationen aus:
 - a) Rekombination mit Wahrscheinlichkeit $p(C)$
 - b) Mutation mit Wahrscheinlichkeit $p(M)$
 - c) Reproduktion und Selektion mit Wahrscheinlichkeit $p(R)$

4. Füge die neuen bzw. ausgewählten Individuen der Population P' hinzu.
5. Ist die Anzahl von P' kleiner als N , so fahre mit 3. fort.
6. Prüfe das Abbruchkriterium.
7. Ist es erfüllt, so beende das Verfahren.

Ermittle das Individuum mit der höchsten Fitness als Lösung.

Im anderen Fall setze P' gleich P und $P' = \{\}$ und fahre mit 2. fort.

Das Durchlaufen mehrerer Generationszyklen führt sukzessive zu einer Steigerung der Fitness der Gesamtpopulation und nach einer ausreichenden Anzahl an Zyklen zu einer nahezu optimalen Lösung.

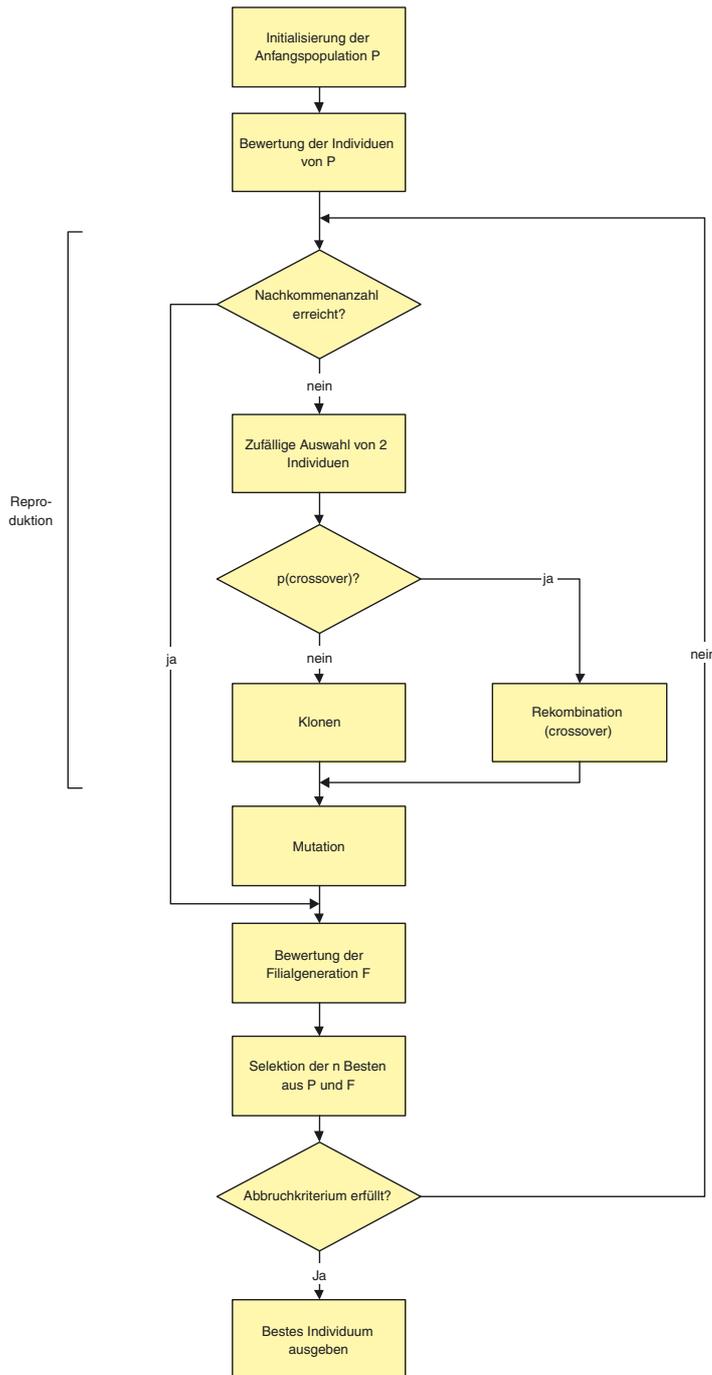


Abbildung 6-4: Flussdiagramm des eingesetzten genetischen Algorithmus.
Flow chart of the applied genetic algorithm

Anwendung eines genetischen Algorithmus zur Optimierung der Sorteneinteilung

Bei der Erläuterung der Anwendung des genetischen Algorithmus zur optimierten Sorteneinteilung des Stammes wird die Semantik der genetischen Algorithmen beibehalten.

Die **Fitness** als Optimierungsvariable, die maximiert werden soll, entspricht in diesem Modell der für einen Stamm erzielbare erntekostenfreie Erlös, der aus der Bewertung des Stammes hervorgeht (Abschnitt 6.2.2). Als **Individuum** wird eine bestimmte Ausformung, d.h. eine bestimmte Sorteneinteilung des Stammes angenommen. Alle gegenübergestellten Stammeinteilungsvarianten werden damit als **Population** mit N Individuen betrachtet. Die Populationsgröße N wird im Laufe der Optimierung konstant gehalten, daher die Bezeichnung „steady state“ für den verwendeten genetischen Algorithmus. Ziel der Optimierung ist die Bestimmung der Ausformung, die den höchsten Erlös erwarten lässt, oder mit anderen Worten das Individuum, das die höchste Fitness aufweist.

Die Umsetzung des benutzten genetischen Algorithmus ist als Flussdiagramm in Abb. 6-4 dargestellt. Zuerst wird eine geradzahlige Anfangs- oder Parentalpopulation P mit N Individuen erzeugt. In den Berechnungen wurde eine Populationsgröße von N=50 vorgegeben.

Die tatsächliche Stammeinteilung kann als **Phänotyp** angesehen werden. Sie wird bei der Initialisierung der Ausgangspopulation zufällig gesetzt, indem aus einer Liste zulässiger Sortimente Stammabschnitte aneinander gereiht werden.

Eine Voraussetzung zur Verwendung des genetischen Algorithmus ist die Umwandlung der Stammeinteilung in ein für den Algorithmus verständliches Muster. Diese als **Genotyp** bzw. **Genom** bezeichnete Kodierung wird erstellt, indem der Stamm binär als Bitstring kodiert wird. Dabei entsprechen 10 cm jeweils einem Bit, das den Wert 0 oder 1 annehmen kann. Ein Wert von 1 definiert jeweils das Ende eines Stammabschnittes (Abb. 6-5). Diese kleinsten Teile des Genoms werden **Gene** genannt.

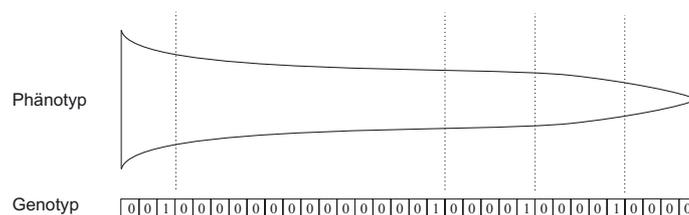


Abbildung 6-5: Phänotyp mit Stammeinteilungsmuster und entsprechender Genotyp als Bitstring mit binär kodierten Genen. *Phenotype with bucking pattern and genotype as a bit string with binary coding of information.*

Falls ab einer bestimmten Stelle bis zum Ende des Genoms keine Eins mehr auftritt, wird der restliche Stamm ebenfalls als Stammabschnitt betrachtet.

Im nächsten Schritt werden alle Individuen der Population P auf ihre Fitness hin getestet. Die Bewertung geschieht phänotypisch anhand des bereits vorgestellten Sortierbaumes nach HKS oder ENV 1927-1 unter Nutzung einer Preismatrix für die einzelnen Sorten bzw. Güte- und Qualitätsklassen. Zusätzlich wird eine Kostenmatrix herangezogen, in welcher die Aufarbeitungskosten jedes Sortiments aufgeschlüsselt sind. Der Grad der Fitness wird dabei als erntekostenfreier Erlös für ein bestimmtes Sortiment in Euro berechnet. Mit Abschluss dieses zweiten Schrittes ist die **Parentalpopulation** P aufgebaut und die einzelnen Individuen (Einteilungsalternativen) sind nach ihrer Fitness (Nettoerlös) bewertet.

In den nächsten Schritten wird mit der Reproduktion von Individuen begonnen. Nur durch eine sukzessive Verbesserung der Fitness der Nachfolgegenerationen wird die gewünschte Optimierung möglich. Dazu wird eine **Filialgeneration F** erzeugt, die eine Individuenzahl von 25% der Parentalgeneration P besitzt. Wie im Flussdiagramm dargestellt, werden so lange die Rekombinationsalgorithmen ausgeführt, bis die 25% der Nachkommen erreicht sind.

Die Rekombinationsalgorithmen stellen das eigentliche Kernstück des genetischen Algorithmus dar, da hier die dynamische evolutionäre Veränderung des Genoms stattfindet, durch die eine Entstehung von Individuen mit höherer Fitness möglich wird. Dafür stehen die Operationen **Rekombination** und **Mutation** zur Verfügung. Dazu werden zuerst zufällig zwei Individuen aus der Population P ausgewählt, die folglich als **Eltern** oder Mutter und Vater bezeichnet werden. In einem weiteren Schritt wird anhand einer Eintrittswahrscheinlichkeit $p(C)$ geprüft, ob eine Rekombination (= **Crossover**) stattfindet. Unter Rekombination wird die zufällige Weitergabe der genetischen Eigenschaften von Eltern verstanden. Dabei werden jeweils Gene des Vaters und der Mutter vererbt. Diese Rekombination der Gene bewährter Individuen führt zu neuen Genotypen, die, wenn sie zufälligerweise die guten maternalen und paternalen Eigenschaften in sich vereinen, eine höhere Fitness als die jeweiligen Eltern besitzen können.

Der Rekombinationsprozess wird als „Uniform Crossover“ implementiert, was bedeutet, dass die Weitergabe von mütterlichen und väterlichen Genen gleich wahrscheinlich ist (Abb. 6-6)

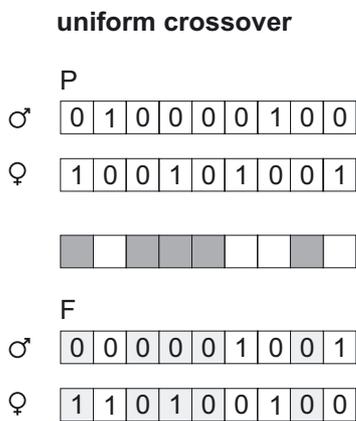


Abbildung 6-6: Uniform Crossover

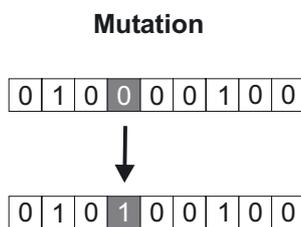


Abbildung 6-7: Mutation

Beim Uniform Crossover werden durch zufällige Auswahl mütterliche und väterliche Gene vererbt (Abb. 6-6a). Dabei wird in einem Zufallsprozess eine Maske in der Länge des Genoms aufgebaut. Diese regelt wie ein zufälliger Filter, welche Gene an welchen Positionen vererbt werden. Entscheidend dabei ist nur die Lage des Gens im Genom. Im darauf folgenden Schritt werden zwei neue Individuen, eine Tochter und ein Sohn erzeugt, wobei der Sohn alle väterlichen Gene vererbt bekommt, die der Maskenfilter (Abb. 6-6b) ausweist. Alle übrigen Genorte werden mit mütterlichen Genen aufgefüllt. Bei der Tochter wird genau invers verfahren. An den Stellen mit durchlässigem Maskenfilter werden die mütterlichen Gene realisiert, alle übrigen mit Vätergenen aufgefüllt (Abb. 6-6c). Schließlich werden Tochter und Sohn der Filialgeneration F hinzugefügt. Wird die Crossover-Wahrscheinlichkeit $p(C)$ nicht erreicht, werden schlicht die Elterngenome geklont und gehen unverändert in die Filialgeneration ein.

Auf alle Individuen der Filialgeneration wirkt anschließend eine Mutation, die als eine spontane, zufällige Veränderung von Einzeleigenschaften (Genen) wirkt. Dabei wird in einem stochastischen Prozess für jedes Gen geprüft, ob die Eintrittswahrscheinlichkeit für eine Mutation $p(M)$ erreicht wird. Wenn dies der Fall ist, werden die Binärwerte der Gene vertauscht (Abb. 6-7). Diese Zufallskomponente hilft, gänzlich neue genetische Varianten hervorzubringen.

Es erfolgt eine Bewertung der Filialgeneration F nach demselben Schema wie bereits bei der Parentalgeneration über eine Fitnessbewertung der phänotypischen Eigenschaften.

Variante A (Abb. 6-7, oben) unterteilt den Stamm in vier Stücke. Dargestellt ist die Einteilung des Phänotyps und die Kodierung im Genotyp. Die Bewertung der Fitness wird ausschließlich am Phänotyp durchgeführt. Dazu werden die vier Abschnitte bewertet, deren Qualitäten nach der ENV 1927-1 in der Abbildung des Stamms aufgeführt sind. Für jeden Abschnitt ist das Volumen nach der in der Praxis gebräuchliche Huberschen Mittenflächenformel (V), der Erlös (E), die Erntekosten (K) sowie der erntekostenfreie Erlös ($D1$) angegeben. Die Kostenberechnung erfolgt nach dem EST, Rückekosten wurden nach Formel 6-1 addiert. Zur Vereinfachung des Beispiels wird angenommen, dass das Wipfelstück kostenneutral verarbeitet wird.

Für Variante A liegt der erntekostenfreie Erlös des gesamten Stammes (grau hinterlegter Kasten rechts) bei 51,00 €.

Die Variante B (Abb. 6-8, unten) geht aus Variante A durch Mutation im Genom hervor. Dabei werden zufällig die unteren beiden Abschnitte der Qualität B zu einem langen Abschnitt zusammengefasst. Dadurch ändern sich Erlöse und Kosten. Der Bruttoerlös bei Variante B liegt 10 € unter Variante A. Dies ist unter anderem auch auf Ungenauigkeit der Volumenberechnung nach Huber zurückzuführen. Dadurch, dass sich der Mittendurchmesser des einzelnen Stückes bei Variante B verringert, unterscheidet sich das berechnete Volumen um 0,15 Festmeter von dem Volumen der Variante A. Allerdings fallen für das lange Erdstammstück in Variante B vierzehn Euro geringere Erntekosten gegenüber den beiden B-Stücken der Variante A an. Im Endergebnis ist der erntekostenfreie Erlös von Variante B vier Euro höher als bei Variante A.

Dementsprechend wird die Fitness des Gesamtstammes bei Variante B in weiteren Zyklen des genetischen Algorithmus besser bewertet, so dass die Sortiervariante B mit höherer Wahrscheinlichkeit im Genom behalten wird, während die Variante A mit höherer Wahrscheinlichkeit selektiert wird. Somit ist eine sukzessive Verbesserung des Genoms und damit des Sortierergebnisses sichergestellt.

Im vorgestellten Sortiermodell SILVSORT wird die Sortimentsaushaltung auf Einzelbaumebene optimiert, da eine bestandesweise Optimierung nur bei einer unterschiedlichen Absatzbarkeit von bestimmten Sortimenten und Mengenbegrenzungen für einzelne Sortimente von einer einzelstammweisen Optimierung abweicht. Für eine Berechnung derartiger Absatzrestriktionen wären Informationen über den lokalen Holzabsatzmarkt nötig, die jedoch in den meisten Waldwachstumssimulatoren, wie auch in SILVA, nicht vorgesehen sind.

SILVSORT wählt die Sortimentsaushaltung jedes Einzelstammes so, dass ein maximaler erntekostenfreier Erlös erzielt wird. Es nutzt damit die im Bewertungsmodell vorgestellte Bewertung nach Dimension und Güte- bzw. Qualitätsklasse, um in Verbindung mit der Kosten- und Preiskalkulation, den erntekostenfreien Erlös eines jeden Stammes zu ermitteln und seine Sortenaushaltung danach zu optimieren.

Damit schließt SILVSORT den in Kapitel 1 dargestellten Modellweg von der waldbaulichen Behandlung zur Rundholzqualität.

7 Simulationsergebnisse – *Simulation results*

7.1 Ergebnisse der Konkurrenzrechnung

Results of the competition calculation

7.1.1 Ergebnisinterpretation – *Interpretation of results*

Die Ergebnisse des Konkurrenzalgorithmus HEMIS sind Konkurrenzmatrizen mit einer horizontalen Komponente, welche die Konkurrenz in 360 Grad beschreibt und einer Vertikalkomponente, auf welcher der Neigungswinkel bis zum Zenit aufgetragen ist. Stellt man das Rechenergebnis grafisch dar, gleicht es einem „Rundum-Panoramafoto“ von einem bestimmten Punkt des Bestandes aus (Abb. 7-1).

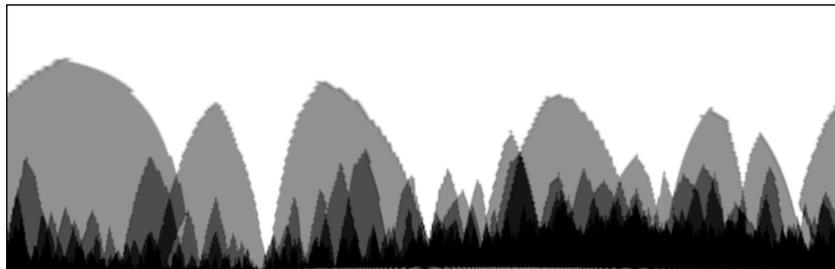


Abbildung 7-1: Darstellung der Konkurrenz nach dem HEMIS-Algorithmus. *Graphical representation of the competition rendered with the HEMIS algorithm.*

Deutlich zeichnen sich in der Abbildung die Silhouetten der Konkurrenten ab. Je nach Himmelsrichtung stellt sich, abhängig von der Bestandessituation, eine unterschiedlich starke Grautönung der Matrix ein. Das in der Abbildung auftretende Grauwertspektrum repräsentiert dabei die Amplitude der Konkurrenzwerte vom Bestimmungspunkt in diesem Bestand. Richtungen mit vielen Konkurrenten weisen dunklere Grauwerte auf als Richtungen mit nur wenigen Konkurrenzbaumen.

Durch die Normierung der Konkurrenz von 0 bis 1 ergeben sich gut interpretier- und vergleichbare Konkurrenzwerte. Ein reines Schwarz (Konkurrenzwert 1) bedeutet totale Abschattung mit maximaler Konkurrenz. Rein weiße Flächen (Konkurrenzwert 0) beschreiben Richtungen ohne Konkurrenz.

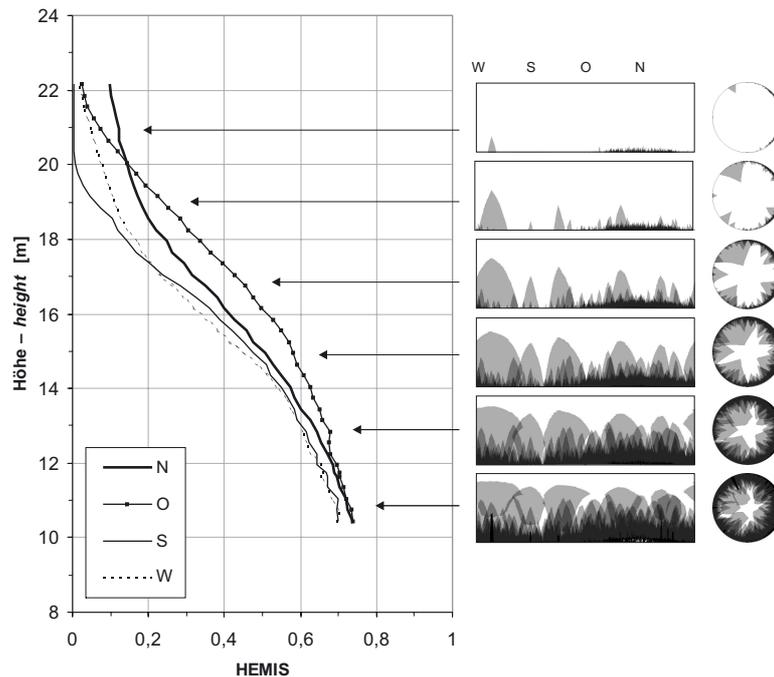


Abbildung 7-2: Analyse der Konkurrenz in verschiedenen Höhen mit dem HEMIS-Algorithmus. *Analysis of competition in different heights with the HEMIS algorithm.*

Zur Überprüfung des Konkurrenzalgorithmus auf Plausibilität wird ein real existierender Baum (Nr. 247) aus der Parzelle 4 des Versuchs Zusmarshausen 604 herangezogen. Dargestellt ist der HEMIS-Wert von den vier Radian der Haupthimmelsrichtung entlang der Stammachse. Es wird deutlich, dass die Konkurrenz zur Baumspitze hin stetig abnimmt (Abb. 7-2 links). Immer weniger Flächenanteile der Matrix (Abb. 7-2 rechts) sind besetzt. Die Tatsache, dass der Bestand an einem leichten Hang mit Südexposition steht, wird vom Konkurrenzalgorithmus abgebildet, indem die Konkurrenz auf der südlichen Kronenseite geringer ist. Der Baum wird von den Konkurrenten am Unterhang weniger konkurrenziert. Anhand der Panorama- und Fisheye-Darstellungen auf der rechten Seite der Abbildung wird deutlich, wie die Konkurrenz verteilt ist. Je mehr „weißer“ Horizont auf der Abbildung zu sehen ist, desto geringer ist die Konkurrenz. Die größten Konkurrenzunterschiede finden sich deshalb erwartungsgemäß im oberen und mittleren Kronenbereich, wo einzelne Konkurrenten einen großen Einfluss haben, während im Bereich des Kronenansatzes eine zunehmende Homogenisierung der Konkurrenz zu beobachten ist. Insgesamt reagiert der Algorithmus plausibel auf die räumliche Konkurrenzsituation.

Der grundsätzliche Verlauf des HEMIS-Konkurrenzgradienten stimmt gut mit hemisphärischen Messwerten überein, wie sie zum Beispiel SPRUGEL (2002) ermittelt, der den reziproken Wert, die relative Lichtmenge für amerikanische Tannenbestände angibt.

7.1.2 Verhalten bei unterschiedlichen Rasterauflösungen

Influence of different rasters on the result

Die Konkurrenzberechnung bei dem vorgestellten Ansatz HEMIS ist abhängig von der gewählten Rasterauflösung der Kreisdarstellung nach der Projektion. Je höher die gewählte Auflösung bei der Diskretisierung der Kreisprojektion, desto exakter wird die Umgebung geometrisch erfasst.

Zum Test der Wirkung verschiedener Rasterweiten werden zwei unterschiedlich strukturierte, mit dem Strukturgenerator von SILVA erzeugte, Bestände benutzt. Beide Bestände besitzen eine Seitenlänge von 50 Metern. Der Testbestand A ist mit 400 Bäumen pro Hektar im regelmäßigen Quadratverband erzeugt, der Testbestand B mit 200 Bäumen pro Hektar mit einer zufälligen Baumverteilung. In beiden Fällen sorgt das Strukturerzeugungsmodul STRUGEN in SILVA für eine plausible Baumverteilung, so dass unnatürlich geringe Baumabstände nicht vorkommen (PRETZSCH 1995).

Für die Berechnungen wird das Verhalten des Konkurrenzalgorithmus in Abständen von fünf Pixeln (Rasterpunkten) bis zu maximal 150 Pixel im Quadrat getestet. Das Ergebnis ist in Abbildung 7-3 dargestellt. Es zeigt die rasterabhängige Änderung der berechneten Konkurrenz.

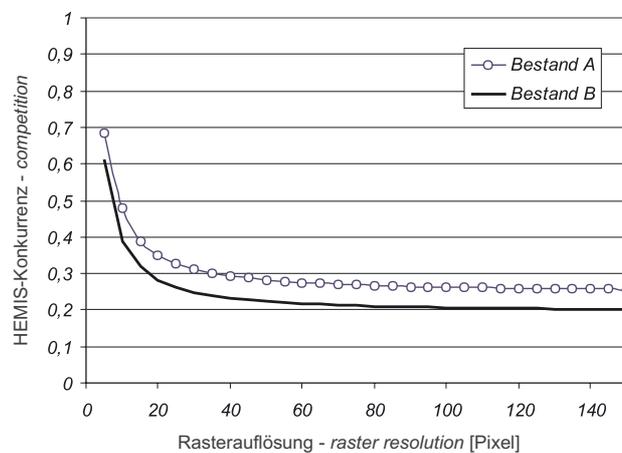


Abbildung 7-3: HEMIS-Kongkurrenz pro Rasterauflösung. *HEMIS competition per raster resolution.*

In dem Diagramm wird deutlich, dass der Konkurrenzalgorithmus bei geringen Auflösungen die Kongkurrenz stark überschätzt. Der berechnete Kongkurrenzwert konvergiert mit steigender Auflösung gegen eine Asymptote, die regressionsanalytisch für die beiden Testbestände über eine Hyperbelfunktion bestimmt werden kann. Die Asymptote für Bestand A liegt bei 0,2395 ($R^2=0,998$), die Asymptote für Bestand B bei 0,1838 ($R^2=0,997$).

Bei der Berechnung der Abweichungen von der geschätzten Asymptote (Abb. 7-4 links und rechts) zeigt sich, dass bei Auflösungswerten von 60 Pixel und mehr eine Abweichung des Kongkurrenzwertes von 3% bei beiden Beständen nicht mehr überschritten wird.

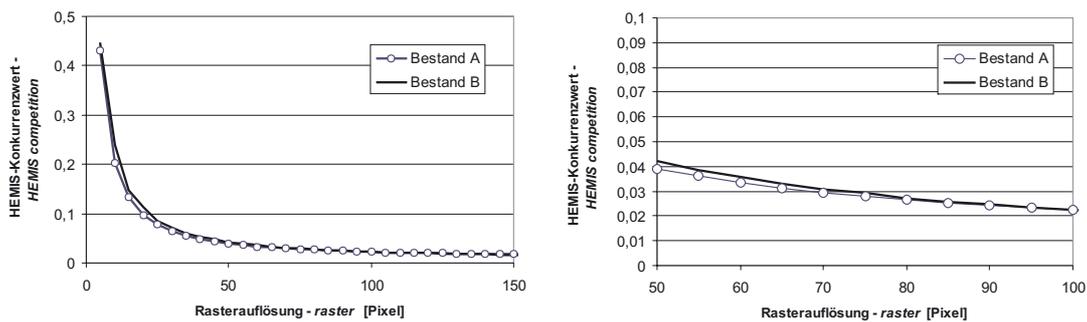


Abbildung 7-4: Einschwingen der Werte zu einer berechneten Asymptote hin mit zunehmender Auflösung. Die x-Achse ist im rechten Teil der Abbildung noch einmal vergrößert dargestellt. *Convergence of the simulation outputs to a asymptote with increasing resolution. The x-axis is shown in a higher resolution in the right part of the graphic.*

Auflösungen mit der Rasterweite von 70 und mehr können daher als hinreichend genau für die verwendete Konkurrenzbeschreibung angesehen werden, wenn man eine dreiprozentige Abweichung von der berechneten Asymptote als Kriterium heranzieht.

7.1.3 Zeitverhalten – Time response

Ein weiteres Kriterium für die Brauchbarkeit eines Konkurrenzalgorithmus' ist die Rechenzeit. Sie bestimmt die Anwendbarkeit des Berechnungsverfahrens für Simulationsläufe mit vielen Bäumen. Eine Analyse des Einflusses der Rasterauflösung auf die Rechenzeit bei den beiden oben genannten Testbeständen zeigt einen quadratischen Anstieg der Rechendauer mit zunehmender Auflösung (Abb. 7-5). Die beiden Bestände liegen, bedingt durch die unterschiedliche Baumzahl und Struktur auf unterschiedlichem Niveau. Die Rechenzeit resultiert aus Rechenläufen auf einem Personal Computer, der sich von der Rechenleistung her am unteren Ende der verfügbaren Personalcomputer bewegt. (AMD Athlon 800 MHz, 256 MB Arbeitsspeicher).

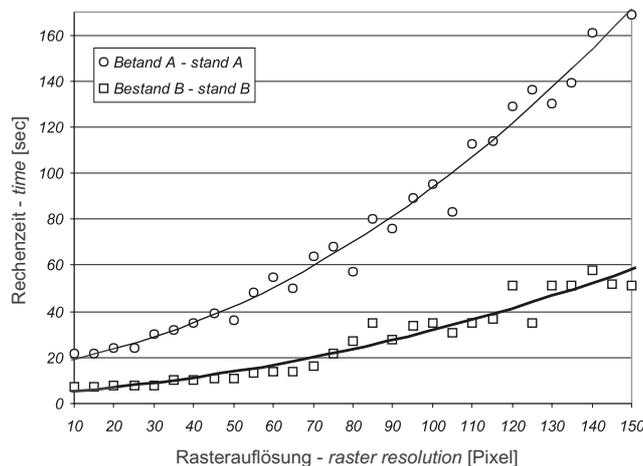


Abbildung 7-5: Zeitverhalten des Algorithmus bei variiert Rasterauflösung – *runtime analysis of the algorithm with changing raster resolution.*

Der quadratische Kurvenverlauf bedingt eine Beschränkung der Auflösung, um vertretbare Rechenzeiten zu gewährleisten. Es gilt, unter Berücksichtigung des im vorigen Abschnitt beschriebenen Auflösungsverhaltens, einen Kompromiss zwischen einer ausreichenden geometrischen Erfassung der Umgebung und einer adäquaten Rechenzeit zu finden. Die optimale Auflösung für die Konkurrenzrechnung im Rahmen dieser Arbeit kann bei einem Raster von 70 Pixeln festgelegt werden. Diese Auflösungsrate ermöglicht akzeptable Rechenzeiten und die Umgebung wird noch in hinreichender Genauigkeit erfasst.

7.2 Ergebnisse der Astsimulation – *Results of the branch simulation*

In diesem Unterkapitel werden Simulationsergebnisse des Astmodells AMOK anhand definierter Testszenarien vorgestellt. Es erfolgt eine erste Evaluierung, bei der das Modellverhalten auf Plausibilität hin geprüft wird und die Simulationsergebnisse mit veröffentlichten oder im Rahmen dieser Untersuchung gewonnenen Referenzwerten verglichen werden. Es werden dabei die Ergebnisse der Teilmodelle zur Simulation der Astposition, der Astdimension und des Aststatus einzeln und im Zusammenspiel betrachtet. Einen besonderen Schwerpunkt bildet die Überprüfung der Reaktion des Astmodells AMOK auf unterschiedliche Konkurrenzsituationen. Dadurch wird die Reaktionsfähigkeit des Simulators auf die waldbauliche Behandlung überprüft.

Das Unterkapitel teilt sich entsprechend der Testszenarien in drei Abschnitte, in denen die Simulationsergebnisse von AMOK vorgestellt werden.

In Abschnitt 7.2.1 wird als Simulationsszenario eine Solitärfichte herangezogen, um die Eignung des entwickelten Modells für die Nachbildung konkurrenzfrei gewachsener Bäume abschätzen zu können. Abschnitt 7.2.2 demonstriert die Simulation von Bestandesbäumen entlang eines Konkurrenzgradienten zum Bestandesrand hin. Dadurch wird die Konkurrenzwirkung in der Astsimulation unter besonders einseitigen Konkurrenzsituationen geprüft. In Abschnitt 7.2.3 wird die Auswirkung unterschiedlicher Ausgangspflanzenzahlen auf die Holzqualität junger Bäume simuliert. Hier steht wiederum die Auswirkung der Konkurrenz auf die simulierte Astentwicklung im Untersuchungszentrum.

In diesem Unterkapitel soll nicht die abschließende Validierung des Modells im Mittelpunkt stehen, sondern eine erste Plausibilitätsprüfung sowie eine Auslotung des möglichen Anwendungsumfangs.

7.2.1 Simulation eines Solitärs – *Simulation of a solitary tree*

Die Ergebnisanalyse der Simulation eines Solitärs zeigt die maximal erreichbaren Ast- und Kronengrößen auf. Daran lässt sich die Eignung des Astmodells für die Simulation konkurrenzfreier und konkurrenzarmer Wuchssituationen überprüfen, wie sie bisweilen auch bei Bestandesbäumen vorkommen. Dieses Testszenario lässt nicht nur die Beurteilung der maximal erreichbaren Dimensionen zu, sondern erlaubt zudem eine Überprüfung der Astgrößen ohne Konkurrenz Einfluss und eignet sich daher besonders zur Modellevaluierung. Deshalb wird der Präsentation der Ergebnisse dieses Testszenarios ein besonders großer Platz in diesem Kapitel eingeräumt. Dabei werden die Simulationsergebnisse, aufgeschlüsselt auf Baum und Astebene, diskutiert.

Definition des Testszenarios

Zur Simulation wird ein mäßig nährstoff- und wasserversorgter Standort in SILVA voreingestellt, auf dem die Fichte ohne Konkurrenz in hundert Jahren eine Höhe von 35 m erreicht. Als Startdimension wird ein Baum mit einem Brusthöhendurchmesser von 6 cm und einer Höhe von 4,25 m definiert. Der Kronenansatz des Solitärs liegt zu Beginn der Simulation bei ca. 0,1 m, seine Kronenbreite beträgt 1,6 m.

Die Höhenentwicklung des Baums ist das Ergebnis der Wachstumsprognose mit SILVA, während die Kronenentwicklung durch das Astmodell AMOK simuliert wird. Zur Durchmesser- und Höhensimulation wird SILVA 2.23 verwendet, eine erweiterte Version, welche die Durchmesserentwicklung freiständig erwachsener Fichten nachbilden kann.

Baum- und Kronenentwicklung

In Abbildung 7-6 ist die simulierte Höhen- und Kronenentwicklung des Solitärs bis zum Alter 100 dargestellt.

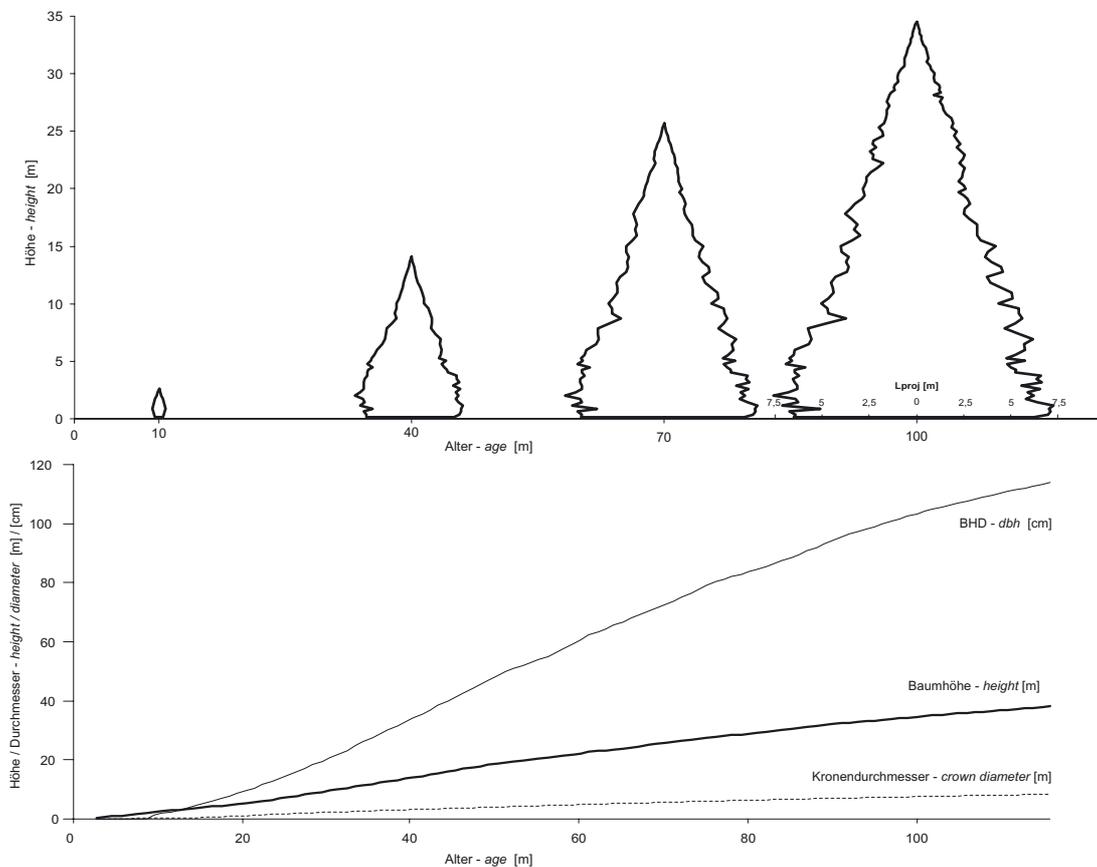


Abbildung 7-6: Simuliertes Höhen- und Kronenwachstum eines Fichtensolitärs – *simulated height and crown development of a solitary spruce*.

Der Solitär erreicht im Alter 100 einen Brusthöhendurchmesser von 104,2 cm bei einer Höhe von 34,85 m. Bis zum Alter von etwa 8 Jahren ist er noch keine 1,3 m hoch, weshalb die BHD-Linie dort die x-Achse schneidet. Alle Angaben vor dem Alter 15 sind das Ergebnis der Rekonstruktion der vergangenen Entwicklung vor dem Startzeitpunkt der Prognose.

Der simulierte Solitär baut in Laufe der Zeit seine maximale Kronenbreite bis ins Alter hundert auf etwa 15,30 m aus. Das originale Kronendurchmessermodell von SILVA schätzt den Kronendurchmesser dagegen nur auf 11,60 m.

maximaler Kronendurchmesser

Da der Kronendurchmesser in enger Beziehung zum Stammdurchmesser steht, stellen diese beiden Größen ein Maß für das Zusammenspiel des Durchmesserwachstumsmodells von SILVA und des neu entwickelten Astmodells AMOK dar. Den Simulationsergebnissen von AMOK werden aus diesem Grunde empirisch ermittelte, mittlere Kronendurchmesser von Solitär-fichten in Abhängigkeit vom Brusthöhendurchmesser gegenübergestellt, die aus Untersuchungen von HASENAUER (1997) und LÄSSIG (1991) stammen (Abb. 7-7). Die Datenbasis setzt sich bei LÄSSIG aus 147, bei Hasenauer aus 198 Individuen zusammen. Für die Funktion von Hasenauer ist zusätzlich zum Mittelwert die Streubreite eingezeichnet, angegeben durch die mittlere zweifache Standardabweichung. In diesem Bereich bewegen sich unter der Annahme der Normalverteilung etwa 95% der Werte.

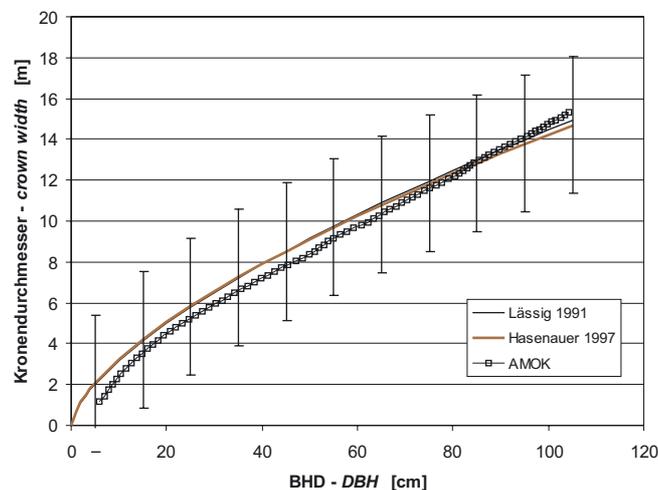


Abbildung 7-7: Vergleich der Simulationsergebnisse mit Mittelwerten aus empirischen Untersuchungen von HASENAUER (1997) und LÄSSIG (1991). Für die Daten von HASENAUER ist die mittlere zweifache Standardabweichung als Streumaß angegeben. *Comparison of the simulation results to empirical mean crown widths published by HASENAUER (1997) and LÄSSIG (1991). The data of HASENAUER is additionally characterised by the mean double standard deviation.*

Zuerst fällt auf, dass die Funktionsverläufe von LÄSSIG und HASENAUER fast gleich verlaufen. Im Vergleich mit den Simulationsergebnissen aus AMOK zeigt sich, dass die simulierten Kronendurchmesserwerte etwas unterhalb des Mittelwertes der beiden empirischen Funktionen liegen. Ab dem Alter von 90 Jahren werden jedoch größere Kronendurchmesser pro BHD geschätzt als die Mittelwerte der Vergleichsfunktion erwarten lassen. Allerdings liegen die prognostizierten Werte in der angegebenen Streubreite. Damit liegt der von AMOK erreichte Kronendurchmesser und auch die Entwicklung der maximalen projizierten Astlänge im plausiblen Bereich.

Kronenform

Bei der Kronenform werden der Kronendurchmesser bzw. die Horizontalprojektion der Astlängen entlang der Stammachse betrachtet. Eine erwartete paraboloidale Entwicklung der Kronenform aufgrund sinkender Akrotonie ist beim simulierten Solitär nicht zu beobachten, wie Abbildung 7-6 zeigt. Die Kronenform weist zudem keine geringeren Astlängen im unteren Kronenbereich auf, wie es andere Kronenmodelle für Bestandesbäume (z. B. PRETZSCH 1992) vorhersagen. Um einen Vergleich der Simulation in AMOK mit den gemessenen Solitärwerten von HASENAUER (1997) und LÄSSIG (1991) zu ermöglichen, werden Kronenradien bei definierter Baumhöhe auf der Grundlage der bereits in Abbildung 7-7 benutzten allometrischen Kronendurchmesserfunktionen und den ebenfalls veröffentlichten Höhen-Durchmesser-Beziehungen der Bäume hergeleitet. Unter der Annahme, dass dieser Zusammenhang auch an einem Baum in verschiedenen Höhen gilt, ergeben sich die in Abbildung 7-8 dargestellten Kronenformen.

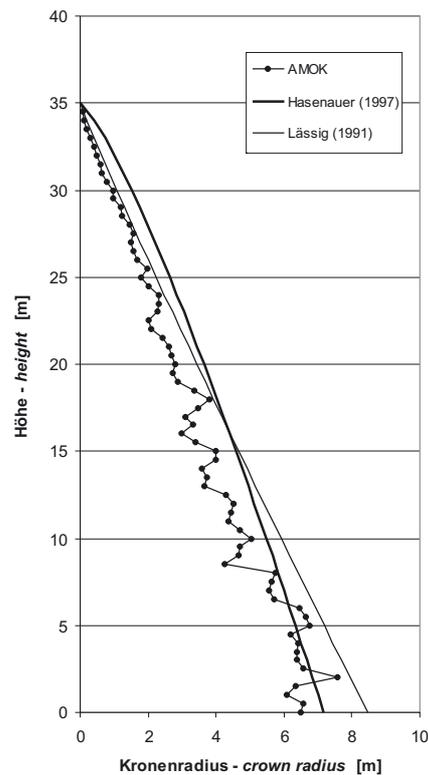


Abbildung 7-8: Die mit AMOK simulierte Kronenform ist der Kronenform von Fichtensolitären gegenübergestellt, die aus den veröffentlichten allometrischen Funktionen von HASENAUER (1997) und LÄSSIG (1991) abgeleitet wurden. *Simulated crown shape with AMOK compared to the crown shape of solitary spruce trees, calculated on the base of published allometric relationships of HASENAUER (1997) and LÄSSIG (1991).*

Kronenansatz

Die Kronenansatzhöhe bleibt in der Simulation konstant bei 0,1 m. In der Realität ist bei Solitären häufig das Fehlen der untersten Äste zu beobachten, das durch die Konkurrenz der Bodenvegetation, starke Eigenbeschattung und Fraßwirkung durch Wild und Weiderinder zustande kommt, bzw. durch gezielte Astung. Bis auf die Astung, die in diesem Szenario nicht getestet

wird, bildet AMOK die genannten Effekte nicht ab. Der Kronenansatz verlagert sich nicht. Doch auch bei realen Solitären lassen sich Individuen mit sehr niedrigen Kronenansatzhöhen finden, so dass das Ergebnis durchaus plausibel ist.

Astlängen

Sie simulierten Astlängen des Solitärs sind in Abbildung 7-9 dargestellt. Es ist zwischen den linearen Astlängen (L_{lin}) und der Horizontalprojektion (L_{proj}) zu unterscheiden. Für die Darstellung aller Astgrößen wird ein Zeitraum von 100 Jahren betrachtet.

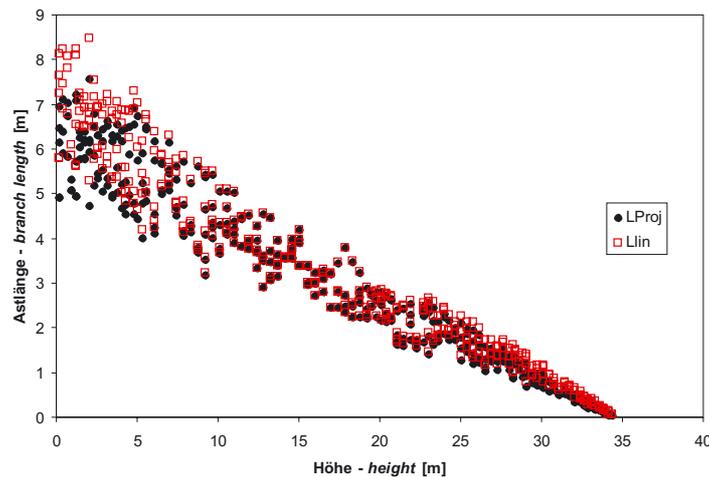


Abbildung 7-9: Simulierte lineare Astlängen (L_{lin}) und Astprojektionslängen (L_{proj}) entlang der Stammachse im Alter 116. *Simulated linear (L_{lin}) and projected (L_{proj}) branch lengths along the stem axis for a solitary spruce in the age of 116.*

Die erreichten Maximallängen (L_{lin}) liegen bei 8–9 m und damit im Mittel der von LÄSSIG gemessenen Maxima bei Solitären. Allerdings erreichen die Äste LÄSSIGS diese Dimension bereits deutlich früher.

Während im Mittelteil der Krone die lineare und die projizierte Astlänge nahezu identisch sind, liegt die lineare Astlänge aufgrund des Astwinkels an der Kronenspitze und der Kronenbasis deutlich über der Projektionslänge.

Insgesamt scheint die Simulation die Astlängen im Vergleich zu wirklichen Werten bei Solitär-bäumen etwas zu unterschätzen.

Astwinkel

Die Betrachtung der simulierten Astwinkel in Abbildung 7-10 zeigt ein erwartungsgemäßes Bild. Wie bei den Fichten des Datenkollektivs B, das zur Parametrisierung herangezogen wurde, verändert sich der Astansatzwinkel stark in der Baumspitze, um dann relativ konstante Werte anzunehmen, die bei der Simulation etwas über 90° liegen. Dies ist auf die hohen Durchmesser zurückzuführen, welche ein plagiotropes Wachstum des Astes unterstützen und im Modell ein Absinken des Astdurchmessers verhindern.

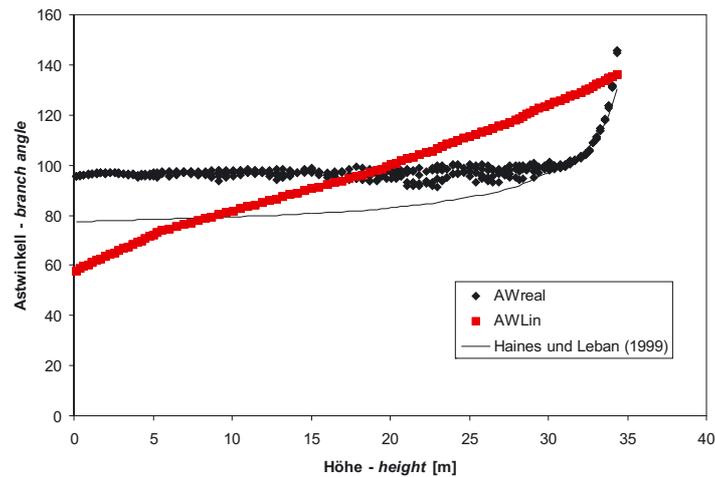


Abbildung 7-10: Simulierte Astwinkelstellung entlang des Stammes im Alter 100. Dargestellt ist der simulierte lineare Astwinkel AW_{lin} und der reale Astansatzwinkel AW_{real} sowie ein Vergleichsmodell zur Schätzung des Astansatzwinkels von HAINES und LEBAN (1999). *Simulated branch angles along the stem at an age of 100. The picture shows the linear branch angle (AW_{lin}), the branch insertion angle (AW_{real}), and for comparison an additional model for the prediction of the insertion angle presented by HAINES and LEBAN (1999).*

Das bei Solitären beobachtete Absinken des Astwinkels wird durch die Simulation der linearen Astlänge bestätigt. Diese beginnt bei 140 mit steil nach oben gerichteten jungen Ästen an der Kronenspitze und sinkt bis zur Kronenbasis auf unter 60 ab, so dass die untersten Äste zum Boden gerichtet sind, wie die grafische Darstellung über das Visualisierungssystem TreeView (SEIFERT, S. 1998) illustriert (Abb. 7-11). Diese stark nach unten hängenden Äste leben trotzdem weiter, da keine Astmortalität bei Bodenberührung in AMOK implementiert ist. Eine Änderung des Astwinkels bei Bodenberührung ist ebenso nicht vorgesehen.

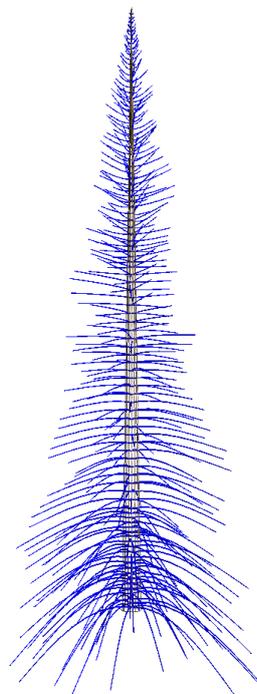


Abbildung 7-11: Darstellung der simulierten Astwinkel entlang der Stammachse mithilfe des Visualisierungssystems TreeView (SEIFERT, S. 1998). *Simulated branch angles visualized with the tree and stand visualization system TreeView (SEIFERT, S. 1998)*

Bis auf den Bereich in direkter Bodennähe verhalten sich beide Astwinkelgrößen jedoch plausibel. Der Vergleich mit einem Modell zur Schätzung des realen Astwinkels von HAINES und LEBAN (1999) belegt, dass AMOK ein ausgeprägteres waagerechtes Wachstum alter Äste unterstellt als das Vergleichsmodell. Diese Differenz liegt jedoch durchaus im Rahmen des natürlich vorkommenden Astwinkelspektrums, das sehr stark genetisch geprägt ist (s. Abschnitt 4.4.6).

Astdurchmesser und Längen-Durchmesser-Beziehung

Die simulierten maximalen Astdurchmesser erreichen bei einem Baumalter von 100 Jahren Dimensionen von 8 bis 9 cm (Abb. 7-12). Sie korrespondieren gut mit den an den Datenkollektiven B und C gemessenen Astdurchmessern (s. Abschnitt 4.3.5).

Es ist ein fast linearer Verlauf der Astdurchmesser von der Spitze zum Kronenansatz zu verzeichnen. Die Streuung ist aufgrund der homogenen Wuchsbedingungen relativ gering.

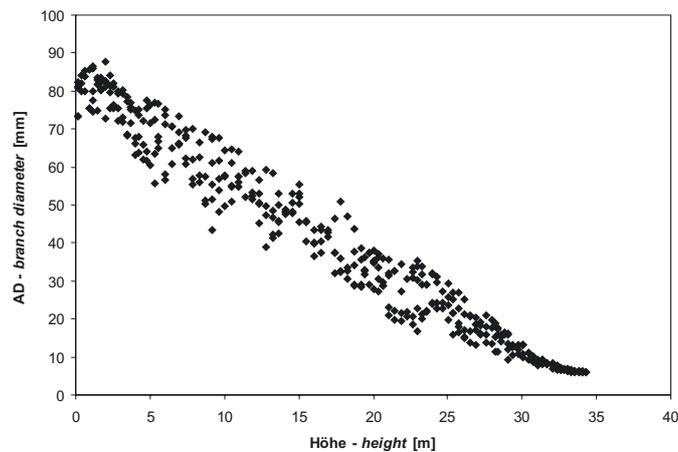


Abbildung 7-12: Simulierter Astdurchmesser des Fichtensolitärs entlang der Stammachse im Alter 100. *Simulated branch diameter of a solitary spruce along the stem axis at age 100.*

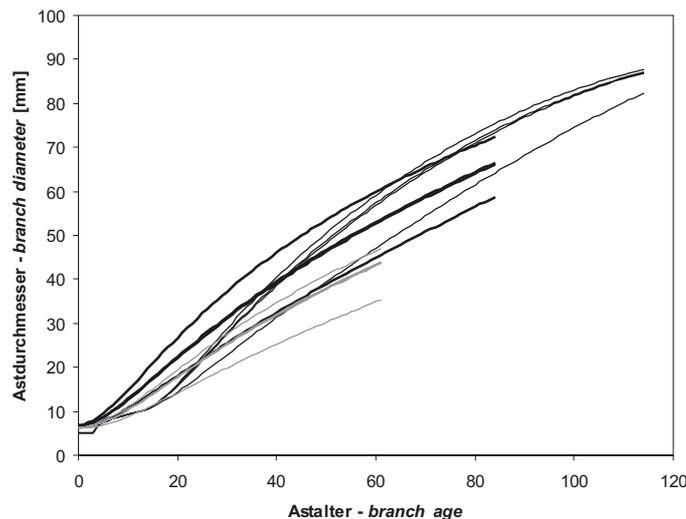


Abbildung 7-13: Zeitverlauf der Astdurchmesserentwicklung, demonstriert an einigen Beispielästen. *Branch diameter growth over time of some sample branches.*

In Abbildung 7-13 ist die Durchmesserentwicklung einiger Äste über dem Alter zu sehen. Der Verlauf gibt ein sanftes Abfallen des Durchmesserwachstums mit dem Alter wieder, wie er für Äste unter geringer Konkurrenz typisch ist.

Die Betrachtung der Längen-Durchmesser-Beziehung aller Äste bis zum Alter 100 zeigt ein plausibles Absinken des L/D-Wertes mit zunehmender Astlänge (Abb. 7-14).

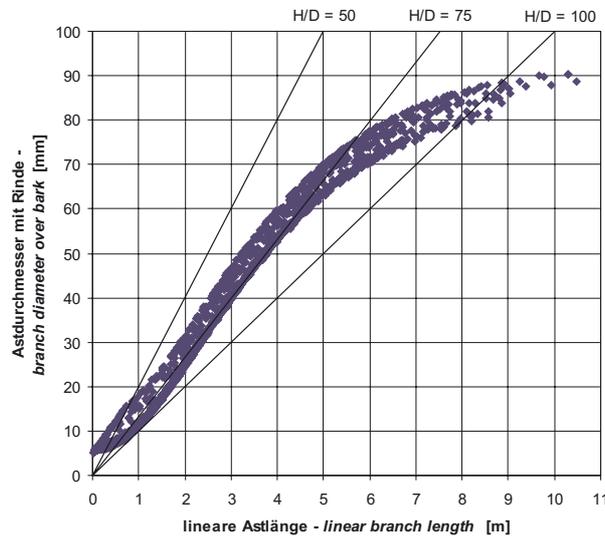


Abbildung 7-14: Simulation des Astdurchmessers in Abhängigkeit von der linearen Astlänge. *Simulation of branch diameter depending on linear branch length.*

Analog zu gemessenen Solitärästen (LÄSSIG 1991, S. 69) kann im Bereich von 3–6 m Astlänge ein mittlerer L/D-Wert von 75 beobachtet werden, der ab 6 m Astlänge ansteigt und bei langen Ästen um 9 m einen Wert von 100 übersteigt.

Der simulierte Verlauf zeigt durch das verwendete Chapman-Richards-Modell (siehe Abschnitt 4.4.8) einen Wendepunkt in der Durchmesser-Längenbeziehung an, der aus den LÄSSIG-Daten nicht hervorgeht. Trotzdem kann die Längen-Durchmesser-Beziehung in ihrer Entwicklung als plausibel angesehen werden.

Fazit

Die Nachbildung des Solitärs mit dem neu erstellten Astmodell ist möglich. Die Simulation liefert realistische Kronen- und Astwerte mit einer plausiblen Entwicklung über die Zeit. Die simulierten Maximalwerte liegen im Bereich der beschriebenen Messwerte anderer Autoren. Einzig der Astwinkel der untersten Äste reagiert unplausibel, da keine Begrenzung durch den Boden vorgegeben wurde. Davon abgesehen kann von einem plausiblen Verhalten des Astmodells hinsichtlich der Simulation konkurrenzfreier Wachstumsbedingungen ausgegangen werden.

7.2.2 Simulation von Bestandesbäumen anhand eines Konkurrenzgradienten zum Bestandesrand

Simulation of stand grown trees with a gradient of competition towards the stand's edge

In diesem Testszenario wird vor allem die Reaktion des Astmodells AMOK auf Konkurrenz getestet. Da die Reaktionsfähigkeit auf Behandlung als ein Hauptziel bei der Entwicklung des Astmodells definiert wurde, kommt der Simulation unter Konkurrenzeinfluss eine besondere Bedeutung zu. Deshalb werden besonders Simulationsergebnisse behandelt die durch Konkurrenzwirkung zustande kommen

Definition des Testszenarios

Das Testszenario geht von einem regelmäßigen, gepflanzten Quadratverband mit 1,5 m Reihenabstand auf einer 62 m mal 62 m großen Parzelle aus. Die Pflanzengröße zu Beginn der Simulation wird mit 3 cm im Durchmesser und 2,5 m Höhe vorgegeben. Der Kronenansatz liegt bei 0,1 m, der Kronendurchmesser bei 1,5 m. Die Simulation wurde mit sehr jungen Bäumen begonnen, die für das Wachstumsmodell von SILVA einen Grenzfall darstellen. Eventuelle Unplausibilitäten im Wachstum der ersten Jahre werden allerdings in Kauf genommen, um eine möglichst kurze Rekonstruktionsperiode sicherzustellen und so eine umfassende Wirkung des konkurrenzgesteuerten Fortschreibungsmodells von AMOK untersuchen zu können. Die Prognose wird bis ins Baumalter 60 durchgeführt.

Im Simulationsszenario wird nicht durchforstet, so dass ausschließlich die natürliche Mortalität wirkt. So wird vor allem im Bestandesinneren eine maximale Konkurrenz erzeugt, indem die Bäume besonders dicht wachsen. Um einen Konkurrenzgradienten von der Bestandesmitte zum Bestandesrand zu erzeugen, wird auf die Generierung eines Randbestandes zur „Umfütterung“ des eigentlichen Rechenbestandes verzichtet. Zur Darstellung der Ergebnisse werden Bäume aus dem Bestandesinneren mit den westlichen Randbäumen verglichen. Die im Folgenden vorgestellten Bäume sind von 106 bis 113 nummeriert, wobei der Baum 106 am westlichen Bestandesrand steht und die Bäume mit steigender Baumnummer immer weiter vom Bestandesrand entfernt stehen. Der Baum 113 steht damit in der achten Reihe vom Bestandesrand aus gesehen.

Kronendurchmesserentwicklung

Bis zu einem Alter von 25 Jahren verläuft die Entwicklung des mittleren Kronendurchmessers aller Bäume sehr ähnlich (Abb. 7-15). Danach wird die Konkurrenz für die Bestandesbäume so groß, dass sich der Randbaum 106 deutlich von den übrigen Bäumen absetzt. Die Tatsache, dass der Differenzierungseffekt so spät eintritt, ist vor allem auf den geringen Höhenzuwachs zurückzuführen, den der Waldwachstumsmodell in der Jugendphase berechnet, da die Bäume zum Prognosestart eigentlich unter der Dimension lagen, für die das Einzelbaummodell parametrisiert ist. Diese Unplausibilität führt auch zu einer etwas zeitverzögerten Entwicklung der Krone, hat jedoch kaum Auswirkungen auf den grundsätzlichen Verlauf der Kronenentwicklung. Ein weiterer Faktor mag hier in einer Überschätzung des Baumalters liegen, die in der Rekonstruktion von AMOK implementiert ist.

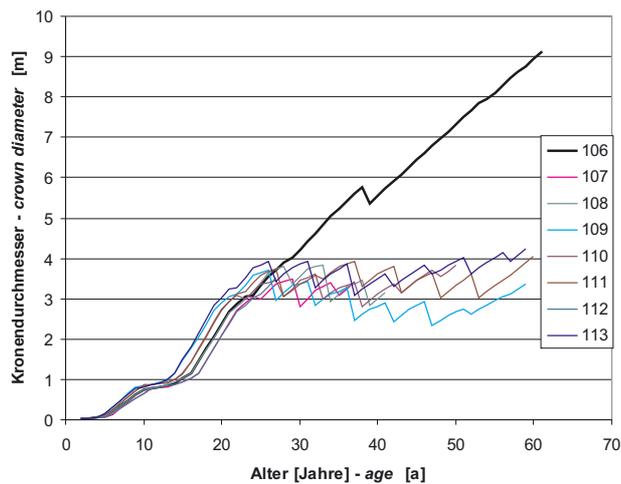


Abbildung 7-15: Mittlere Kronendurchmesserentwicklung – *development of the mean crown diameter.*

Die Simulationsergebnisse zeigen ab dem Alter 25 eine deutlich gegenläufige Entwicklung zwischen dem Randbaum und den übrigen Bäumen im Bestandesinneren hinsichtlich der Kronendurchmesserentwicklung. Während der Randbaum seinen Kronendurchmesser ausbaut, bleibt der Kronendurchmesser im Bestandesinneren im Laufe der Zeit mehr oder weniger konstant. Dies ist das Ergebnis der Astmortalität: Die Äste an den Bestandesbäumen sterben, bevor sie größere Längen erreichen können, was sich im gezackten Verlauf der Entwicklungslinien zeigt. Somit folgt die Entwicklung des Kronendurchmessers keinem Gradienten zum Bestandesrand, sondern weist eine deutliche Differenzierung zwischen dem Randbaum und allen übrigen Individuen auf.

Kronenansatz und Kronenform

Die Kronenansatzentwicklung ist primär eine Folge der Konkurrenzsituation des Baumes. Es zeichnet sich bei den Simulationsergebnisse dieselbe Differenzierung ab, die schon beim Kronendurchmesser zu beobachten war (Abb. 7-16). Es entwickelt sich kein Gradient in der Kronenansatzhöhe vom Bestandesrand nach innen, sondern vielmehr tritt ein abrupter Wechsel zwischen dem Randbaum und den übrigen Bäumen auf, wie er auch in der Realität zu beobachten ist. Typisch für die Fichte ist zudem eine Kronenverlagerung in diskreten Schritten, die durch die Anordnung der Äste in Quirlen bedingt ist. Dieser Effekt wird in der Simulation ebenso nachgebildet und wird durch den stufenartigen Verlauf deutlich.

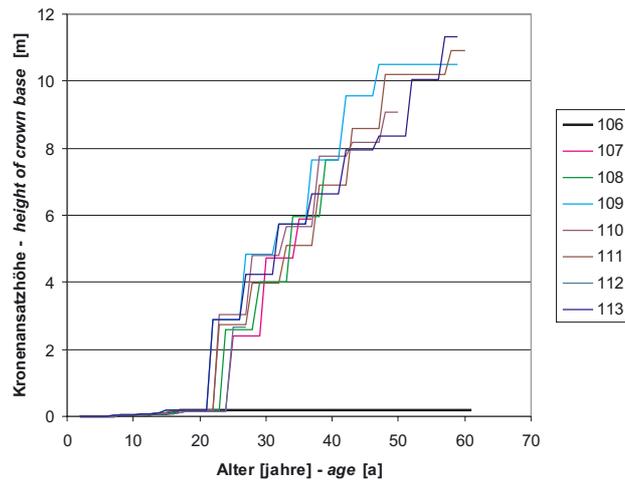


Abbildung 7-16: Simulation der Kronensatzhöhenentwicklung der Testbäume.
Simulated development of crown recession.

Da sich die übrigen Bestandesbäume kaum unterscheiden, wird der Baum 113 repräsentativ für die Bestandesbäume mit dem Randbaum 106 im Alter 50 verglichen (Abb. 7-17).

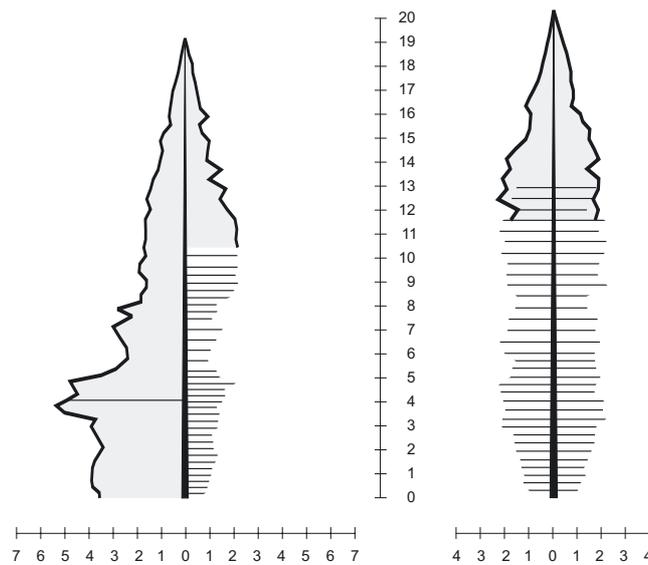


Abbildung 7-17: Kronenform, Kronensatzdifferenzierung und Totastverteilung des Randbaums 106 (links) und des Bestandesbaums 113 (rechts) im Alter 50. *Crown form, crown base and structure of dead branches shown for the edge tree 106 (left) and tree 113 from the centre of the stand (right).*

In der Grafik sind die kronenprägenden, lebenden Äste in ihrer Projektionslänge dargestellt sowie die einzelnen Totäste, die als Einzellinien eingezeichnet sind. Ein Abbrechen der Äste im Zuge der Astreinigung wurde bewusst nicht berechnet, so dass die Länge der Totäste zum Absterbezeitpunkt beurteilt werden können. Die Ergebnisse lassen eine Überprüfung der Simulation der Astmortalität zu, die an den beiden Bäumen sehr unterschiedlich wirkt. Der Bestandesbaum (rechts) zeigt eine relativ homogene Kronenausbildung sowie eine spindelförmige,

fast rotationssymmetrische Totastverteilung. Zudem weist der Bestandesbaum eine Übergangszone in der Höhe von 10 bis 12 Metern auf, in der tote und lebende Äste gleichermaßen vorkommen.

Der Randbaum hingegen entwickelt eine typisch asymmetrische Kronenstruktur. Während die Randseite solitärähnlich bis zum Boden bekront ist und nur ein einziger alter Ast abgestorben ist, weist die Bestandesseite eine Kronenansatzhöhe von mehr als 10 m auf. Die Totastlänge lässt auf eine starke Konkurrenz aus der Richtung des Bestandes schließen.

In Abbildung 7-18 wird die Höhenentwicklung der Kronenbasis beim Randbaum 106 noch einmal für die Haupthimmelsrichtungen dargestellt.

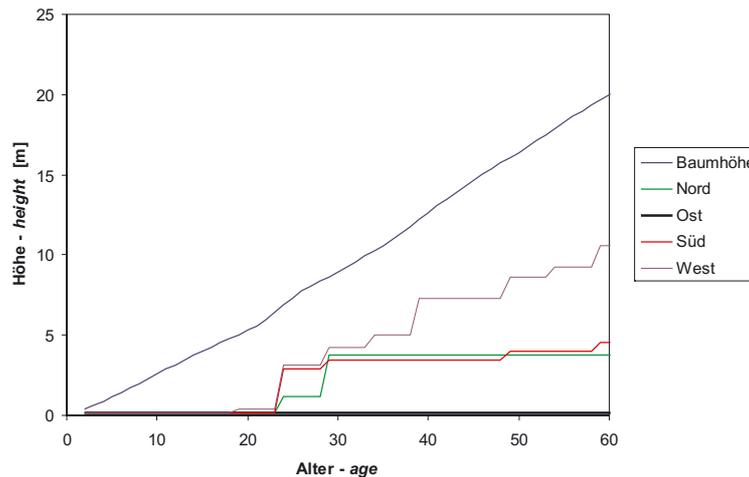


Abbildung 7-18: Höhenentwicklung und Kronenansatzentwicklung in den vier Haupthimmelsrichtungen (Randbaum 106). *Height development and crown recession in the four compass directions (edge tree 106)*

Das Simulationsergebnis zeigt deutlich die Differenzierung der Kronenansatzhöhe in Abhängigkeit von der Himmelsrichtung ab dem Alter 20. Auf der Randseite im Westen findet keine Astmortalität statt, weil dort keine Konkurrenz bäume stehen. In Bestandesrichtung (Osten) ist die Astmortalität am weitesten fortgeschritten, während die Nord- und Südrichtung noch deutlich vom Randeinfluss profitieren, sodass weniger Äste absterben.

Insgesamt zeigt die Simulation der Kronenform sowie der Astmortalität realitätsnahe Ergebnisse. Insbesondere die Reaktion auf einseitige Konkurrenz spiegelt die Randsituation in wirklichen Beständen gut wider.

Astlängen und Astdurchmesser

Die simulierten Astlängen und Astdurchmesser sind für den Bestandesbaum 113 aufgetragen, um die simulierte Astentwicklung unter Konkurrenz im Vergleich mit der unkonkurrenzierten Astentwicklung des Solitärs beurteilen zu können. Abbildung 7-19 zeigt den Astdurchmesser mit Rinde (rechts) und die lineare Astlänge (links) über der Höhe differenziert nach lebenden und toten Ästen.

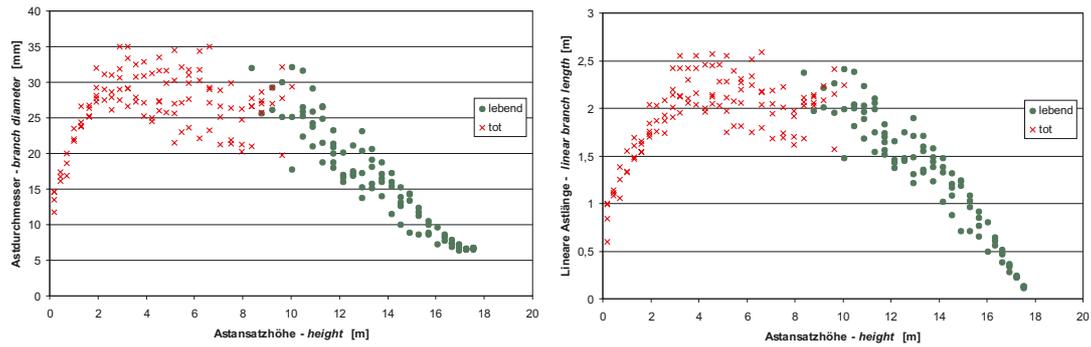


Abbildung 7-19: Simulierte Astdurchmesser (links) und Asthöhe (rechts), aufgetragen entlang der Stammachse für den Bestandesbaum 113. Lebende Äste sind durch Punkte, tote durch Kreuze gekennzeichnet. *Simulated branch diameter (left) and linear branch length (right) plotted along the stem for the stand tree 113. Living branches are marked with dots, dead branches with crosses.*

Astlängen sowie Astdurchmesser liegen deutlich unter den erreichten Maximalwerten des Solitärs, was auf die Konkurrenz und die kürzere Lebensdauer der Äste zurückzuführen ist. Die Simulationsergebnisse zeigen die typische parabolische Astdurchmesserverteilung bei Bestandesbäumen, die von etlichen Autoren beschrieben ist (COLIN und HOULLIER 1992, MAGUIRE et al. 1999, SCHMIDT 2001, SEIFERT et al. 2003) und sehr eng mit der Astlängenentwicklung zusammenhängt. Altersbedingte Veränderungen des Längen-Durchmesser-Verhältnisses kommen bei den simulierten Ästen kaum zum Tragen, da die konkurrenzbedingte Mortalität die Äste vorher sterben lässt. Dieses Simulationsergebnis kann durch die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen an Bestandesbäumen der Kollektive A und D bestätigt werden. Weiterhin wird durch die Durchmesser und Längen der toten Äste deutlich, wie sich die Äste in der Vergangenheit entwickelt haben.

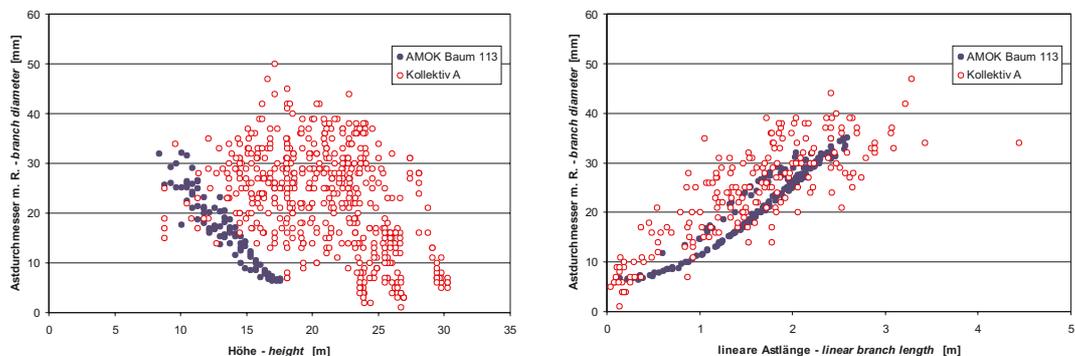


Abbildung 7-20: Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse von AMOK mit Messwerten der etwas älteren Bestandesbäume aus dem Probekollektiv A. *Comparison of the simulation results of AMOK with measured branch diameters and lengths of the data collective A which is some years older than the simulated stand.*

Die simulierten Äste des Bestandesbaumes weisen plausible Astdurchmesser und Astlängen auf, wie die Gegenüberstellungen der Durchmesser (links) und Längen-Durchmesser-Verhältnisse (rechts) mit den lebenden Ästen des Datenkollektivs A belegen, die von etwas älteren Bäumen größerer Dimension stammen (Abb. 7-20). Die Fichten des Datenkollektivs A wurden bis auf einen Baum ebenfalls nur sehr schwach frei gestellt und erwachsen im Dichtstand, so dass ein Vergleich möglich ist.

Die Ergebnisse der Astsimulation werden in Abbildung 7-21 für alle Bäume entlang des definierten Gradienten in TreeView (SEIFERT, S. 1998) dargestellt, die im Alter 50 noch leben.

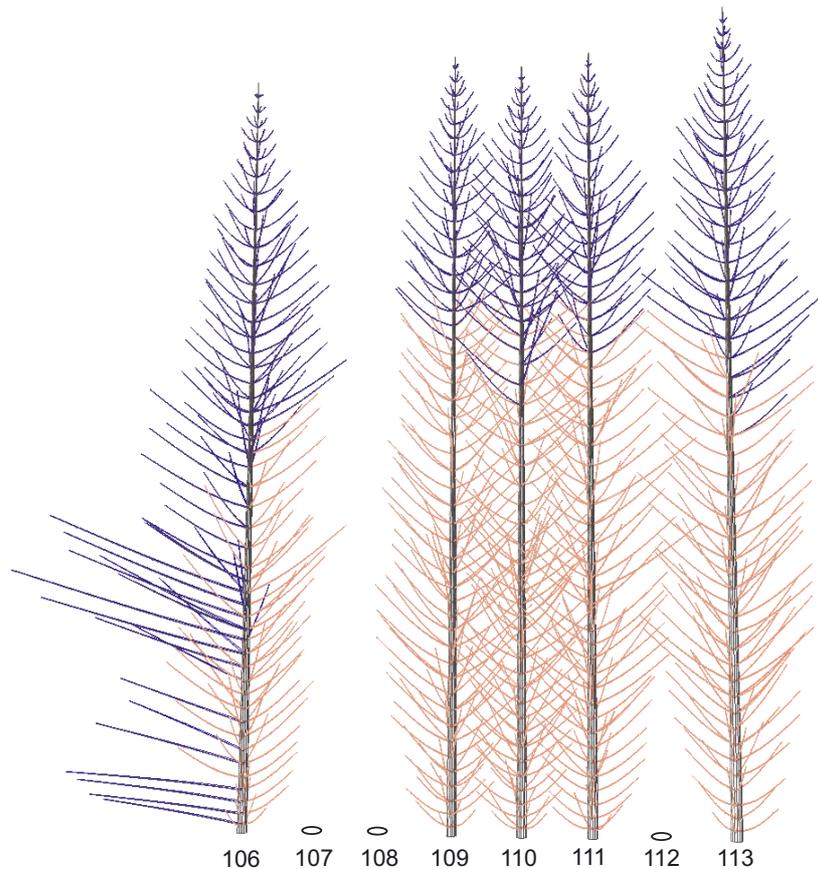


Abbildung 7-21: Darstellung der Astverhältnisse aller Bäume entlang des definierten Gradienten im Alter 50. Lebende Äste sind blau dargestellt, tote hellrot. *Illustration of the branch structure along the defined gradient for all trees in the age of 50 (living branches in blue colour; dead branches in bright red).*

Die Grafik zeigt auch nochmals die Unterschiede in den Längenverhältnissen der Äste vom Bestandesrand zum Bestandesinnern hin. Sie deckt auch auf, dass der Baum 113 zwar im Inneren des Bestandes aufgewachsen ist, aber durch das Absterben eines direkten Konkurrenten gegenüber den Bäumen 109, 110 und 111 im Laufe der Zeit besser gestellt war und folglich eine größere Krone entwickelt hat. Auch der Randbaum hat auf Bestandesseite durch den Ausfall von Konkurrenten profitieren können.

Astwinkel

Deutlich ist in Abbildung 7-21 bei den lebenden Ästen auch das allmähliche Absinken der Astwinkel mit zunehmendem Alter zu erkennen. Die toten Äste behalten den Astwinkel, den sie beim Absterben aufweisen. Dies führt besonders beim Randbaum 106 zu einer deutlichen Differenzierung der Astwinkel zwischen den toten und den lebenden Ästen auf gleicher Höhe.

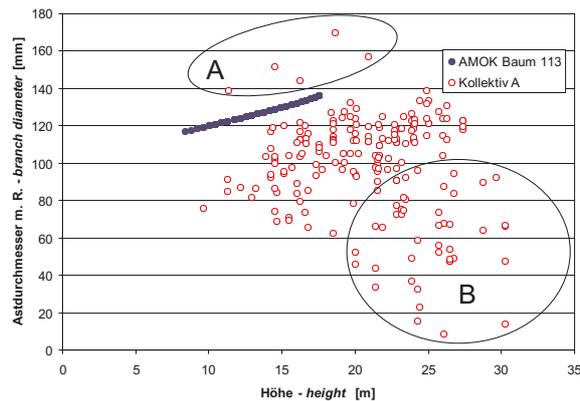


Abbildung 7-22: Simulierte lineare Astwinkel im Vergleich mit Messwerten des Probekollektivs A. Steiläste bzw. Äste ohne plagiotropen Wuchs, die nicht Gegenstand der Astwinkelmodellierung sind, sind durch A bzw. B markiert. *Simulated branch angles compared to measured data of collective A. Ramicorn branches and small branches which lost their plagiotropic growth are not an model-objective and are marked with A and B respectively.*

Im Vergleich mit den linearen Astwinkeln des Versuchskollektivs A zeigt sich, dass die Astwinkel in der Simulation etwas höher liegen (Abb. 7-22). Eine Streuung der simulierten linearen Astwinkelwerte um den Erwartungswert liegt nicht vor, da kein Residuenmodell implementiert wurde. Im Datensatz des Kollektivs A wurden alle Werte, auch Steiläste (Markierung A) und kleine Äste ohne plagiotropen Wuchs (Markierung B), miteinbezogen, was zu einer wesentlichen Streuung der Werte führt. Sieht man von diesen Werten ab, ist die Simulation der zentralen Tendenz der Messwerte jedoch sehr ähnlich und kann als plausibel gelten.

Fazit

Zusammenfassend lässt sich für die Simulationsergebnisse von AMOK eine realistische Reaktion der Baumkrone und Astigkeit attestieren, sowohl im Bestand als auch bei Randsituationen. Die Astdimensionen bewegen sich in einem realistischen Rahmen. Die Altersschätzung der Bäume überschätzt das Alter allerdings etwas. Die Mortalitätsprozesse laufen plausibel ab, so dass eine Simulation von einseitiger Konkurrenz nachgebildet werden kann. Das Aststerben erfolgt unterschiedlich in verschiedenen Himmelsrichtungen und gibt realistisch die Konkurrenzwirkung wieder. Insgesamt scheint vor dem Absterben der Äste nur eine moderate Reduktion des Wachstums einzusetzen. Die Ursache kann in der bereits geschilderten Unterrepräsentation längerer Schattenäste im Parametrisierungsdatensatz des Astdurchmessermodells liegen (s. Abschnitt 4.4.8), sodass das Wachstum junger Äste unter Konkurrenz überschätzt wird.

7.2.3 Simulation unterschiedlicher Pflanzverbände

Simulation of different initial spacings

Das nächste Szenario soll der Evaluierung des Astwachstums in jungen Beständen in Abhängigkeit vom Ausgangsverband nachbilden. Ziel ist die Prüfung der Reaktionsfähigkeit des Astmodells AMOK auf verschiedene Konkurrenzstärken.

Definition des Szenarios

Simuliert werden drei Bestände mit Pflanzverbänden von $1,25\text{ m} \times 1,25\text{ m}$, $2,5\text{ m} \times 2,5\text{ m}$ sowie ein Weitverband mit $5,0\text{ m} \times 5,0\text{ m}$ auf dem Standort 09.12.08 „Oberbayerisches Tertiärhügelland“. Die Bestandesfläche beträgt 60 m^2 im Quadrat, wobei sich die Aussagen ausschließlich auf ein inneres Quadrat von 30 m Seitenlänge beziehen. Die umgebende Fläche wurde mitberechnet, um Randeffekte zu vermeiden.

Zum Startzeitpunkt besitzen die Bäume alle dieselbe Dimension. Analog zum zweiten Szenario in Abschnitt 7.2.2. wird die Pflanzengröße zu Beginn der Simulation mit 3 cm im Durchmesser und $2,5\text{ m}$ Höhe vorgegeben. Der Kronenansatz liegt bei $0,1\text{ m}$, der Kronendurchmesser bei $1,5\text{ m}$.

Astdurchmesser und Astlänge

Zum Vergleich der Simulationsergebnisse von AMOK werden Literaturwerte und eigene Messungen zur Validierung herangezogen, bei denen der maximale Astdurchmesser in 5 m Höhe am Baum bestimmt wurde. Analog werden auch die Astdurchmesserwerte der Simulation als Maximum in 5 m Höhe am Stamm berechnet und als Mittelwert pro Fläche präsentiert (Abb. 7-23 links).

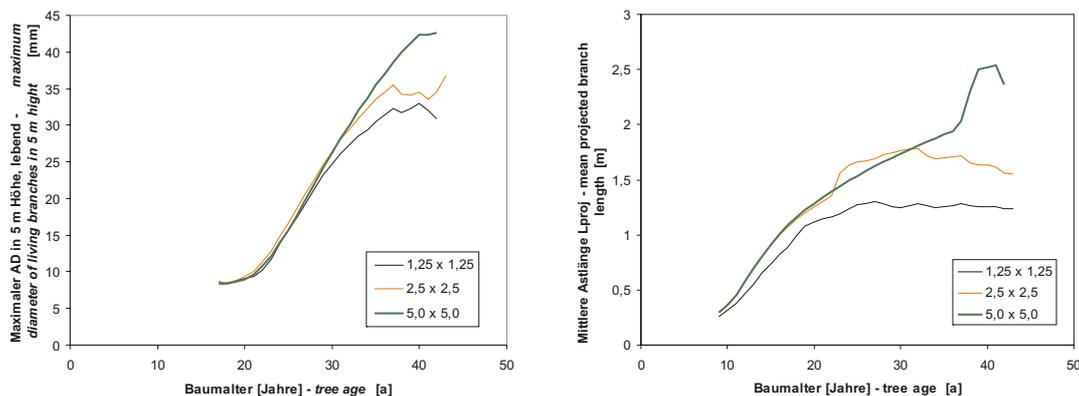


Abbildung 7-23: Vergleich der drei Pflanzverbände anhand der Simulationsergebnisse der maximalen Astdurchmesser in 5 m Höhe und der mittleren projizierten Astlängen. *Comparison of the three different initial spacings regarding maximum branch diameter in 5 m and mean projection length of the branches.*

Die Astentwicklung im 5 m Höhe differiert zu Beginn zwischen den Varianten kaum, da alle Bäume in diesem Kronenbereich unter nahezu konkurrenzfreien Bedingungen wachsen. Erst bei zunehmendem Baumwachstum schließen sich die Bestände und die Astentwicklung der Varianten zeigt ein differenzierteres Bild. Während der Weitverband maximale Astdurchmesser bis 42 mm aufweist, bewegen sich die $2,5\text{ m} \times 2,5\text{ m}$ -Variante bei etwa 35 mm und der dichte Verband bei unter 33 mm . BUES (1990) gibt für dieselben Verbände mittlere Maximaldurchmesser pro Quirl von 37 mm ($5,0\text{ m} \times 5,0\text{ m}$), 26 mm ($2,5\text{ m} \times 2,5\text{ m}$) und 21 mm ($1,25\text{ m} \times 1,25\text{ m}$) an. Die Bestände von Bues streuen allerdings in einem Bereich, der die Simulationsergebnisse mit AMOK einschließt.

Eigene Astmessungen in Vohenstrauß (s. Datenkollektiv E) bei einem Verband von $5,0\text{ m} \times 5,0\text{ m}$ ergeben im Mittel maximale Astdurchmesser von 36 mm , eine Pflanzvariante von $2,5\text{ m} \times 2,5\text{ m}$ weist 23 mm auf. Allerdings sind die Bäume in Vohenstrauß erst 28 Jahre alt und $13,5$ bis 15 m hoch.

Die mittleren projizierten Astlängen (Abb. 7-23 rechts) der Simulation unterscheiden sich schon frühzeitig zwischen den Pflanzabstandsvarianten. Die Simulation der dichten Variante liegt durchweg deutlich unter den beiden weitständigeren. Ab einem Alter von 30 Jahren finden sich auch deutliche Unterschiede zwischen dem 2,5 m-Quadratverband und dem Weitverband. Bei einer Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit den von BUES (1990) veröffentlichten Astlängen verschiedener Pflanzverbände (s. Abschnitt 4.3.4) zeigt, dass die mittleren Vorhersagewerte sehr nah an den Messwerten von BUES liegen (Tabelle 7-1)

Tabelle 7-1: Mittlere projizierte Astlänge bei bestimmten Pflanzverbänden. Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse und eine auf empirischen Messwerten basierenden Funktion von BUES (1990). *Mean projected branch length for different initial spacings. Simulation results compared to a function based on empirical data (BUES 1990).*

Pflanzverband		1,25×1,25	2,5×2,5	5,0×5,0
Simulationsergebnis der mittleren Astlänge in AMOK		1,24	1,52	2,51
BUES	mittlere Astlänge pro Quirl	1,15	1,47	2,12
BUES	Länge der 3 stärksten Äste pro Quirl	1,24	1,58	2,25
BUES	Länge des stärksten Astes pro Quirl	1,30	2,25	2,85

Indizes zur Beschreibung der Astigkeit

Als Größen zur Beurteilung der Astigkeit bieten sich auch Indexwerte an, welche die Astdurchmesser zum Brusthöhendurchmesser des Stammes in Relation setzen. In Abbildung 7-24 (links) ist der ASIX-Index dargestellt, der den Ast mit dem höchsten Durchmesser in Relation zum BHD setzt. Ein weiterer Index berechnet die Summe aller Durchmesser eines Baumes in Verhältnis zum BHD (Abb. 7-24 rechts).

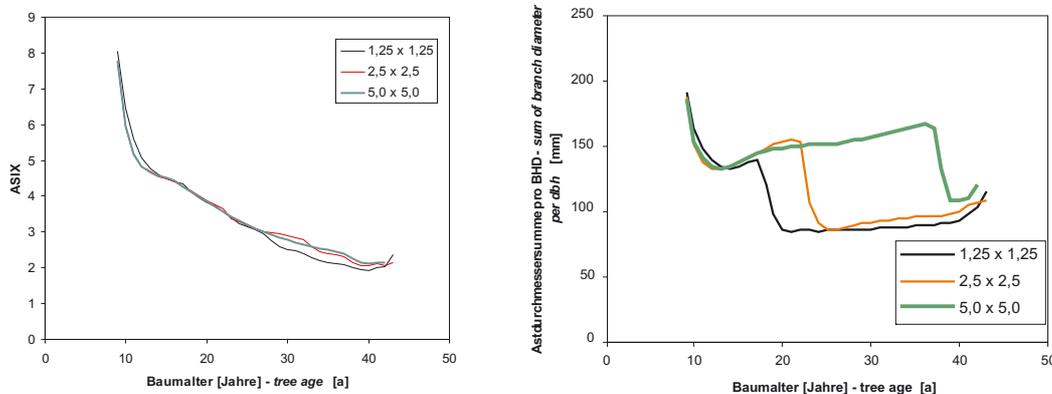


Abbildung 7-24: Entwicklung des ASIX (Durchmesser des stärksten Astes pro BHD) und der Relation der Astdurchmessersumme pro BHD. *Development of ASIX (maximal branch diameter per tree to dbh and the relation of branch diameter sum per dbh [both in mm/cm].*

Der ASIX-Wert erweist sich als sehr konstant über alle Pflanzverbände hinweg. Damit bestätigt die Simulation die mehrfach beobachtete gleichförmige Förderung von Astwachstum und Durchmesserwachstum des Stammes (s. Abschnitt 4.3.5). Dies ist eine Bestätigung darauf, dass

das Zuwachsmo­dell für das Stammwachstum in SILVA und das Astmodell AMOK plausibel zusammenwirken. Das ist nicht selbstverständlich, da beide Modelle nicht direkt voneinander abhängen und zudem unterschiedliche Konkurrenzalgorithmen verwenden.

Die Astdurchmessersumme pro Brusthö­hendurchmesser verringert sich deutlich bei Bestandes­schluss, der in den unterschiedlichen Pflanzverbandsvarianten zu unterschiedlichen Zeiten stattfindet. Bemerkenswert ist der Verlauf auf einem konstanten Niveau über längere Zeit, bis zu einer abrupten Absenkung. Danach verläuft die Entwicklung ebenso konstant auf einem tieferen Niveau.

Fazit

Die Simulationsergebnisse zeigen eine Reaktion in den Astgrößen auf verschiedene Pflanzverbände. Die Wirkrichtung ist eindeutig: weite Pflanzverbände führen zu Ästen von größerem Durchmesser und höherer Länge. Allerdings überschätzt das Modell in diesem Szenario die Astdurchmesser in dichten Beständen im Vergleich zu empirischen Werten. Eine Ursache kann im Parametrisierungsdatensatz liegen, der zu wenige lange Äste von dünnem Durchmesser enthält und das Astdurchmessermodell deshalb etwas verzerrt (s. Abschnitt 4.4.8).

7.3 Ergebnisse der Simulation der Rotfäuleausbreitung

Results of the simulation of the extent of red rot in the stem

In diesem Unterkapitel werden Simulationsergebnisse des Rotfäuleausbreitungsmodells RAM vorgestellt. Es erfolgt eine erste Evaluierung, bei der das Modellverhalten auf Plausibilität hin geprüft wird. Im Abschnitt 7.3.1 werden Simulationsergebnisse zur Ausbreitung der Fäule im Stamm präsentiert. Die Ergebnisse der simulierten Auswirkungen des Fäulebefalls auf das Baumwachstum werden im Abschnitt 7.3.2 besprochen.

Definition des Testszenarios

Als Testszenario wird die Rotfäuleentwicklung eines anfänglich 30-jähriger Fichtenbestandes mit einer Ausgangsdichte von 1950 Bäumen pro Hektar über 125 Jahre simuliert. Als Standort ist das Oberbayerische Tertiärhügelland (Standortcode 09.12.08) bei guter Wasser- und Nährstoffversorgung vorgegeben. Der Bestand wird nur leicht niederdurchforstet.

Zur Schätzung des Befallszeitpunktes wird das in SILVA integrierte Rotfäuleinfektionsmodells „RIM“ (MÜLLER 2002) eingesetzt, das die Ausbreitung des Pathogens von Baum zu Baum im Bestand simuliert. Die verwendeten Einstellungen sind in Abbildung 7-25 dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung des Modells und der Eingangsgrößen findet sich MÜLLER (2002).

Einstellungen zur Rotfäule

RJM | RAM

pH-Wert: 6.5 [3.0 <= x <= 8.0]

Rotfäule Bestandesrisiko: 1.00 [0.0 <= x <= 1.0]

Risiko des Sporenbefalls (Bäume): 0.010 [0.0 <= x <= 1.0]

Risiko des Sporenbefalls (Stöcke): 0.300 [0.0 <= x <= 1.0]

Infektionsrisiko: 0.40 [0.0 <= x <= 1.0]

Vertragungsfaktor Infektionspotential: 0.60 [0.0 <= x <= 1.0]

Verhältnis WD/KD: 1.40 [0.5 <= x <= 3.0]

Sporenübertragung nur in der 1. Periode

Abbrechen Std. Werte OK

Abbildung 7-25: Modelleingaben für das Rotfäuleinfektionsmodell RIM (MÜLLER 2002), das den Infektionszeitpunkt des Baumes bestimmt. *Model input for the red rot infection model RIM (MÜLLER 2002), which calculates the time of infection*

Das wichtigste Ergebnis von RIM für die weitere Simulation der Fäuleausbreitung im Stamm mit dem Modell RAM ist der Infektionszeitpunkt der Einzelbäume. Als Überblick über den Verlauf der Infektion im Szenariobestand ist der Anteil der faulen Bäume an der Gesamtbaumzahl im Bestand dargestellt (Abb. 7-26).

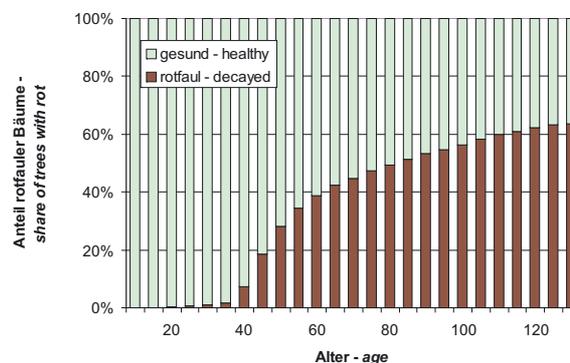


Abbildung 7-26: Entwicklung des Anteils der faulen Bäume im Bestand, vorgegeben durch RIM. *Development of the percentage of decayed trees in the stand as a result of RIM.*

Die Eingaben des hier präsentierten Modells RAM sind in Abbildung 7-27 zu sehen. Das Faulflächenprozent wird für das Szenario auf einen relativ hohen Wert von 60 eingestellt und die Standardabweichung mit 15 vorgegeben, so dass durchaus sehr hohe Faulflächenprozent auftreten können. Als Voraussetzung für eine Wuchsdepression wird ein minimales Faulflächenprozent von 40 definiert und der Beginn der Fäuledepression für Durchmesser- und Höhenzuwachs wird jeweils auf 20 Jahre nach der Infektion gesetzt. Bis zu diesem Zeitpunkt beeinflusst der Pilz das Baumwachstum nicht. Für die letzten drei Werte gibt es bislang kaum empirische Anhaltspunkte, so dass sie hier vorgegeben werden.

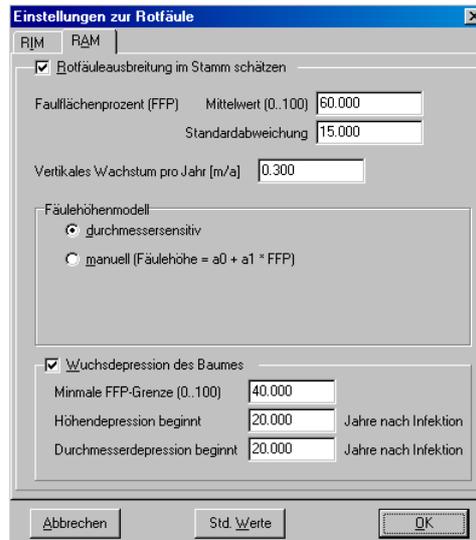


Abbildung 7-27: Modelleingaben für das entwickelte Rotfäuleausbreitungsmodell RAM, das die Fäuleausdehnung im Stamm simuliert. *Model input for the red rot model RAM, which is presented in this work for the prediction of the red rot extent in the stem.*

7.3.1 Simulation der Fäuleausbreitung im Stamm

Simulation of the spread of decay in the stem

Die Ergebnisse der Rotfäulesimulation werden in diesem Abschnitt beispielhaft auf der Ebene des Einzelbaumes und aggregiert auf der Bestandesebene vorgestellt.

Betrachtung eines Einzelstammes

In Abbildung 7-28 ist der Verlauf der Fäuleausbreitung im Stamm eines Beispielbaumes in drei Baumaltern aufgetragen. Zur besseren Übersicht sind nur zwei Fäulestufen dargestellt.

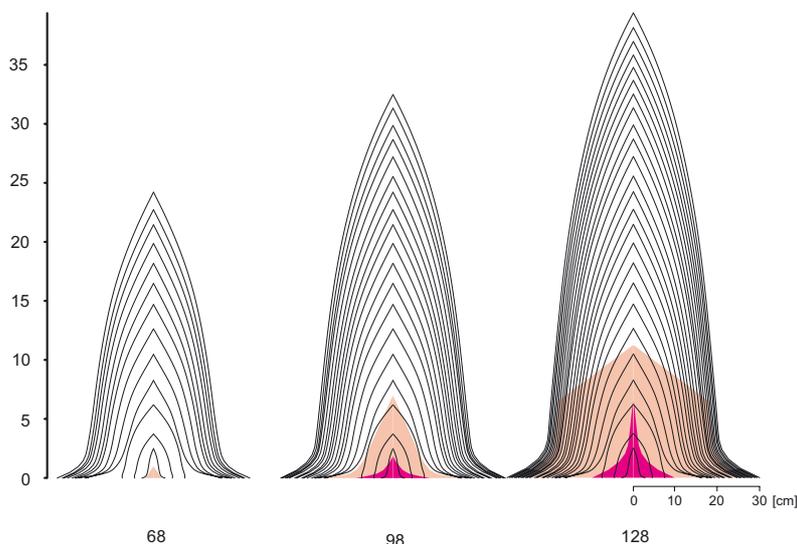


Abbildung 7-28: Simulierte Fäuleausdehnung im Einzelstamm. Dargestellt ist die Ausdehnung der Fäule des Fäulegrades I (hell) und III (dunkel). *Simulation of the rot extent in the stem illustrated for the decay of degree I (bright) and III (dark).*

Die Fäule dringt in der Simulation mit dem Alter von 68 Jahren relativ spät in das Stammholz vor. Dies ist ein Zeichen für eine späte Infektion über die Wurzeln. Sie breitet sich in dieser Phase radial und longitudinal ungehindert aus. Zu diesem dargestellten Zeitpunkt liegt keine Fäule mit dem Fäulegrad III (FG III) vor, die eine Strukturauflösung des Holzes anzeigen würde. Der Befall ist lediglich als Holzverfärbung ausgebildet, die dem Fäulegrad I (FG I) entspricht.

Im Alter von 98 Jahren hat sich die Zone mit FG I bereits deutlich ausgedehnt und eine weitere mit dem FG III ist hinzugekommen. Dort ist die Holzstruktur bereits deutlich zerstört – das Holz ist nicht mehr „nagelfest“. Die dazwischenliegende Zone FG II ist nicht extra dargestellt. Sie zeigt deutliche Fäule, weist aber noch nagelfestes Holz auf. Die Zone der einfachen Verfärbung, angezeigt durch die helle Tönung, folgt bis etwa 2 m Höhe der Stammform. In größerer Höhe entwickelt sie sich als Kegel. Die Absolutausdehnung beträgt etwa 7 m. Im Alter 128 umfasst die Verfärbungszone (FG I) schließlich, bis auf ein schmales Stück des Splintholzes, nahezu den ganzen unteren Stammbereich. Sie reicht bis 11,5 m im Stamm nach oben. Die Zone mit FG III hat sich radial weiter ausgedehnt und beinahe eine Höhe von 7 m erreicht.

Das simulierte Verhalten der Fäule im Stamm zeigt ein plausibles Verhalten. Nach einer initialen ungehinderten Ausdehnung wird die Fäule im Durchmesserwachstum gehemmt, was sich im stammformfolgenden Radialwachstum der Fäule ausdrückt. Sie dehnt sich nach längerer Befallszeit bis zum Splintholz aus, ohne dieses jedoch besiedeln zu können. Obwohl in RAM kein explizites Splintholzmodell integriert ist, bildet es mit den statistischen Modellen die Zusammenhänge plausibel nach. Es beschreibt die Fäuleform im Stamm und bietet eine Einteilung der Fäule in Zonen verschiedener Holzersetzung. Die Ausdehnung der Fäule im Stamm liegt in Dimensionen, die in der Praxis als Maximalwerte durchaus beobachtet werden und in der Literatur beschrieben sind (KATÓ 1976a/b). Es wurde bewusst im Szenario ein sehr großes Faulflächenprozent vorgegeben, um vorkommende Maximalausdehnungen und die Abhängigkeit der Fäuleform von der Stammform zu testen. Bei der Vorgabe niedrigerer Faulflächenprozentage ergeben sich wesentlich geringere Fäulehöhen, die als Mittelwert eher den Beobachtungen in der Praxis entsprechen.

Betrachtung von Bestandeswerten

Die Bestandeswerte stellen Mittelwerte aus einer zehnfachen Wiederholung der Simulation mit denselben Eingangswerten dar, um stochastische Effekte korrekt in der mittleren Tendenz zu erfassen. In Abbildung 7-29 ist die simulierte Entwicklung der Fäulehöhe und des Fäuledurchmessers gleichzeitig mit der Baumentwicklung dargestellt.

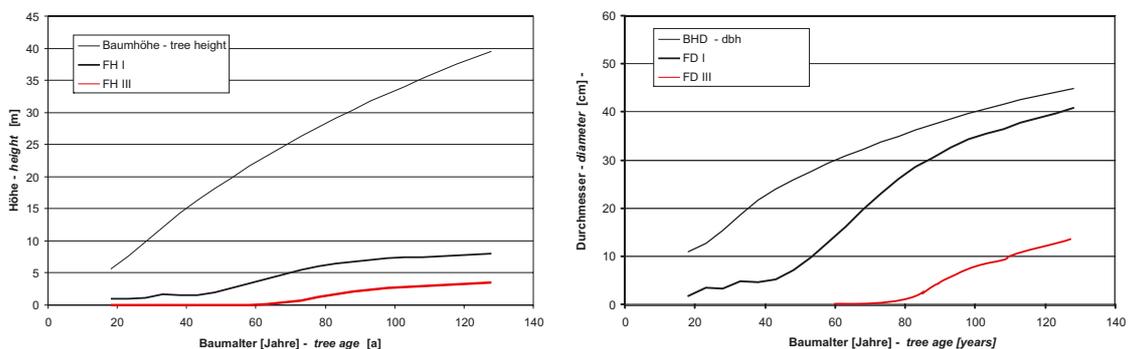


Abbildung 7-29: Simulierte Entwicklung eines sehr starken Fäulebefalls als Bestandesmittelwerte: Fäulehöhe (links) und Fäuledurchmesser (rechts). Der dargestellte Fäuledurchmesser bezieht sich auf den Stammfuß, für den Stamm selbst ist der BHD angegeben. *Simulated development of a heavy decay shown as mean values of a stand: height of the rot (left) and rot diameter (right). The rot diameter is shown for the stem base while the stem diameter refers to breast height.*

Die Fäuleentwicklung zeigt erwartungsgemäß ein Ausmaß, das sich im oberen Bereich der Beobachtungswerte von WERNER (1971) und KATÓ (1967 a/b) befindet. Die von RAM simulierte Fäulehöhen werden laut WERNER (1971) auf Kalkverwitterungsböden nach Erstaufforstung jedoch durchaus erreicht.

Um einen Eindruck von der Entwicklung des entwerteten Stammvolumens zu vermitteln, werden die entsprechenden Volumina der befallenen Stammstücke mit dem Fäulegrad I und III dargestellt (Abb. 7-30). In der Rundholzsortierung entspricht der FG I einer Verfärbung und der FG III bereits eine deutlichen Einschränkung der Sägefähigkeit und ergibt damit, je nach Ausmaß im Stamm, Holz der Güte- bzw. Qualitätsklasse D oder NH nach HKS bzw. ENV 1927-1.

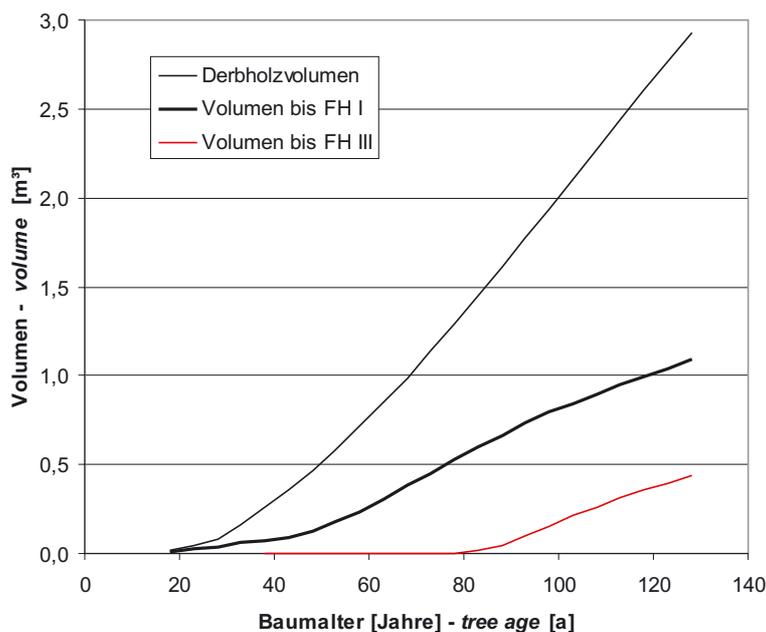


Abbildung 7-30: Simulierte mittlere Volumenentwertung durch die Rotfäule im Vergleich zur Volumenentwicklung der Einzelbäume. *Simulation of the mean decayed volume per tree (separated in degrees of decay I and III resp.) compared to total stem volume.*

Deutlich ist zu erkennen, wie das gesamte Stammvolumen stärker steigt als die Ausbreitung der Rotfäule voranschreitet. Zu einer Bestimmung des Wertverlustes des Stammes mit zunehmender Rotfäuleausbreitung bedarf es jedoch einer eingehenden Qualitäts-Sortierung nach der Rundholznorm, wie sie in Kapitel 6 mit dem Programm SILVSORT vorgestellt wurde.

7.3.2 Simulation der fäulebedingten Wuchsdepression des Baumes – *Simulation of the red rot induced growth depression of infected trees*

Die Ergebnisse der fäulebedingten Wuchsdepression entstammen ebenfalls dem oben definierten Testszenario, das schon in Abschnitt 7.3.1 herangezogen wurde. In Abbildung 7-31 ist die mittlere Anzahl rotfauler Bäume mit Wuchsdepression im Altersverlauf aufgetragen.

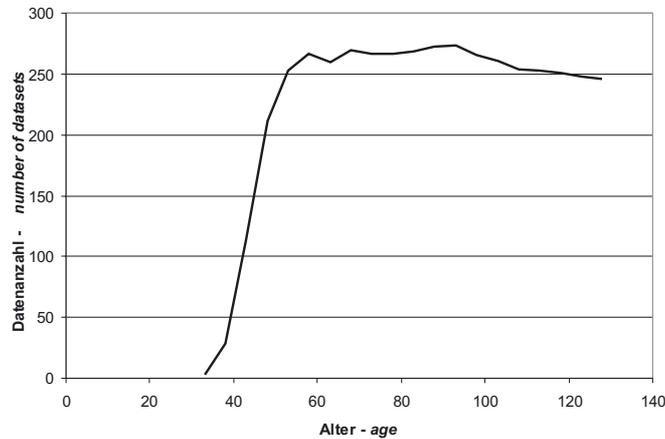


Abbildung 7-31: Anzahl rotfauler Bäume mit Wuchsdepression. *Number of decayed trees showing a growth depression.*

Die Grafik zeigt deutlich, dass in der Simulation Wuchsdepressionen erst ab einem Alter von etwa 35 Jahren auftreten. Die Zahl der betroffenen Individuen steigt ab dem Baumalter 40 an und bleibt ab 60 Jahren in etwa konstant. Die folgenden Ausführungen beziehen sich deshalb auf Baumalter ab 60, für die eine ausreichende Anzahl an Werten zur Ergebnisinterpretation zur Verfügung steht.

Abbildung 7-32 zeigt die Durchmesser- und Höhenentwicklung von Bäumen mit Wuchsdepression relativ zu gesunden Individuen. Ein Wachstum von 1 bedeutet, dass sich eine Änderung im Wachstum abzeichnet, negative Abweichungen zeigen eine Depression an.

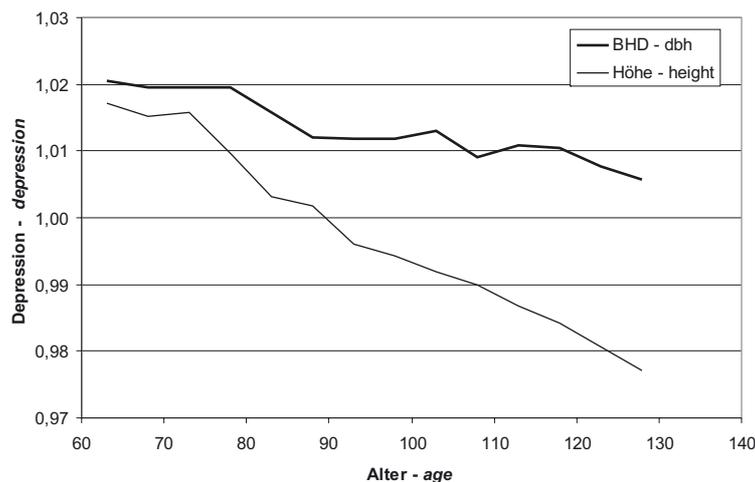


Abbildung 7-32: Durchmesser und Höhenwachstum von befallenen in Relation zu gesunden Bäumen. *Relative diameter and height growth of decayed tree compared to healthy individuals.*

Deutlich ist ab dem Alter 60 das Einsetzen eines Abwärtstrends zu beobachten. Allerdings liegt das Wachstum der befallenen Bäume im Alter 60 über dem der gesunden Bäume. Zudem verläuft die Depression nur im Bereich von 2 % des Durchmessers ab, was praktisch keine Auswirkung auf das Baumwachstum hat, wie auch bei Vergleich auf Bestandesebene in Abbildung 7-33 zu erkennen ist

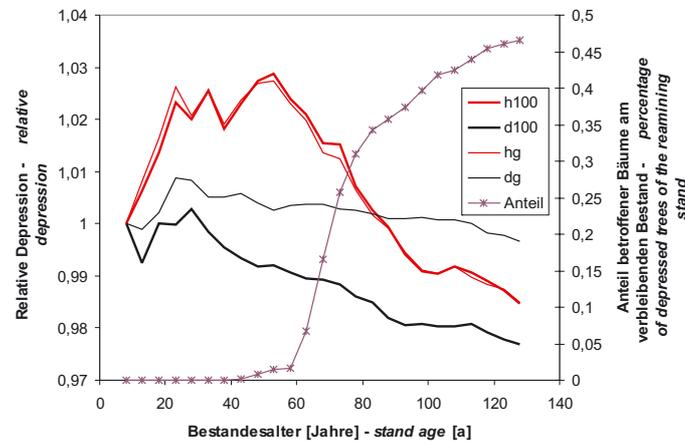


Abbildung 7-33: Wuchsdepression des Durchmessers und der Höhe. Die Höhe und der Durchmesser sind charakterisiert durch den Mittelwert der 100 stärksten Bäume pro Hektar sowie den Wert des Grundflächenmittelstamms. *Growth depression of diameter and height. Both are characterized by the 100 biggest trees and the tree of the mean basal area tree.*

Es ist zwar auch hier ein Absinken der befallenen Bestände im Vergleich zu den gesunden (Referenzwert 1) ab dem Alter 25 erkennbar, aber die Absolutdimension der Depression und die positiven Abweichungen machen eine Interpretation der Ergebnisse nicht möglich. Das Modell hat sich damit als ungeeignet erwiesen. Die Gründe dafür könnten in einer unerwarteten Wechselwirkung mit anderen Modellteilen des Wachstumsmodells liegen, welche die Ergebnisse verzerrt.

7.4 Kombiniertes Simulationslauf mit Ast-, Rotfäule- und Sortiermodell

Integrated Simulation of branch model, red rot model and grading/bucking model.

Im Folgenden wird ein Testszenario für die kombinierte Wachstumssimulation mit SILVA, der Astsimulation mit AMOK und der Rotfäulesimulation mit RAM vorgestellt. Die Ergebnisse werden schließlich mit dem Sortiermodell SILVSORT bewertet.

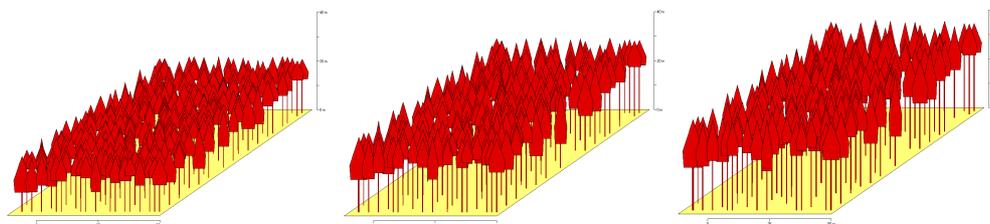


Abbildung 7-34: Darstellung der Entwicklung des Szenariobestandes mit SILVA im Alter von 63, 88 und 113 Jahren. *Development of the scenario stand in SILVA in the age 63, 88 and 113 years*

Szenario-Definition

Als Startbestand wird ein 63-jähriger Fichtenreinbestand mit den in Tabelle 7-2 dargestellten Kennwerten vorgegeben (Abb. 7-34). Es erfolgt eine Prognose bis zum Alter 113. Die Einstellungen für das Rotfäulemodell werden mit einem Faulflächenprozent von 35 bei einer Standardabweichung von 10 vorgegeben. Zum Vergleich der Rotfäulewirkung werden ein Rechenlauf mit Rotfäule und ein Rechenlauf ohne Rotfäule verglichen. Als waldbaulicher Eingriff wird eine mäßige Niederdurchforstung im 5-jährigen Intervall vorgegeben, die zu einer Stammzahlreduktion von 669 auf 466 im Simulationszeitraum führt. Die Grundfläche wächst in dieser Zeit von 53,43 auf 73,6 an.

Tabelle 7-2: Ausgabe der Bestandeswerte des Simulationsbestandes in SILVA. *Output of the characteristics of the simulated stand from SILVA*

Periode <i>simulation period</i>	Baumart <i>species</i>	Alter age	N (v)	h100 (v)	d100 (v)	hg (v)	dg (v)	G (v)	V (v)
12	Fichte (<i>P. abies</i>)	63	669	23,18	39,32	22,88	31,9	53,42	586,75
13	Fichte (<i>P. abies</i>)	68	635	24,8	41,47	24,49	33,54	56,07	656,18
14	Fichte (<i>P. abies</i>)	73	609	26,32	43,39	26,06	35,02	58,64	726,56
15	Fichte (<i>P. abies</i>)	78	585	27,85	45,17	27,59	36,44	61,05	796,68
16	Fichte (<i>P. abies</i>)	83	562	29,3	47,02	28,98	37,87	63,31	863,1
17	Fichte (<i>P. abies</i>)	88	544	30,78	48,67	30,47	39,14	65,42	932,9
18	Fichte (<i>P. abies</i>)	93	525	32,09	50,27	31,76	40,38	67,31	995,1
19	Fichte (<i>P. abies</i>)	98	507	33,37	51,78	33,01	41,61	68,97	1054,22
20	Fichte (<i>P. abies</i>)	103	494	34,59	53,17	34,24	42,68	70,73	1115,52
21	Fichte (<i>P. abies</i>)	108	479	35,78	54,53	35,43	43,8	72,11	1170,85
22	Fichte (<i>P. abies</i>)	113	466	36,91	55,84	36,55	44,86	73,6	1226,7

Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der Sortierung der beiden Bestände am Ende der Simulationszeit nach ENV 1927-1 mit und ohne Rotfäule sind in Abb. 7-35 illustriert.

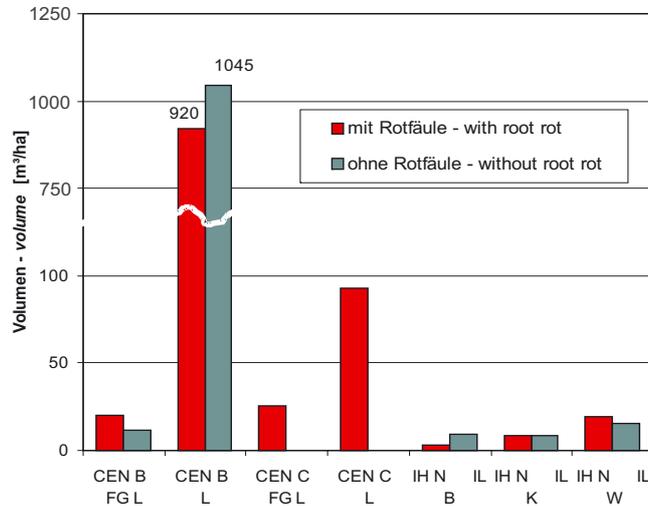


Abbildung 7-35: Simulierte Ergebnisse der qualitätsorientierten Rundholzsortierung mit SILVSORT. *Results of simulated grading by SILVSORT.*

Im rotfaulen Bestand erreicht der Großteil der Bäume Stammholzqualität B. Ein Anteil von mehr als 100 fm der Fixlängen (FG) des Holzes fällt jedoch wegen der Rotfäule in die Qualitätsklasse C. Der gesunde Bestand weist nur Stammholz und Fixlängen der Qualitätsklasse B auf. Die Industrieholzanteile beider Bestände sind vergleichbar. Ausgeschieden sind baumfallende, kranfallende Längen und Wipfelstücke.

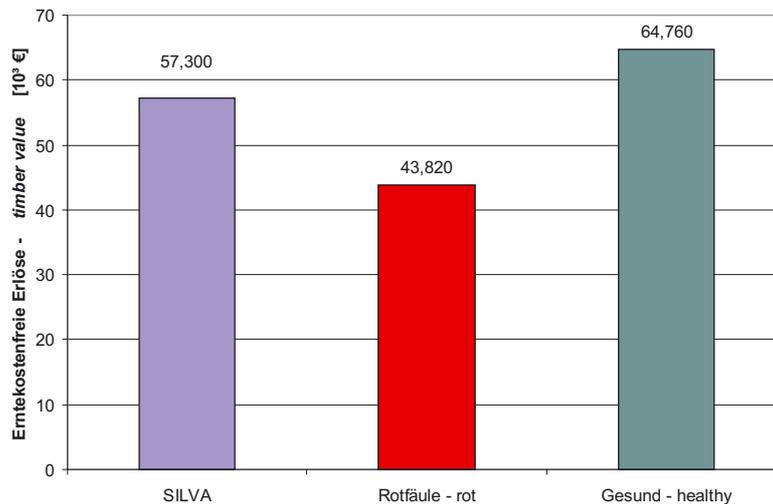


Abbildung 7-36: Erntekostenfreie Erlöse der Szenario-Rechnung. Verglichen ist das Ergebnis von SILVA mit der rotfaulen und der gesunden Variante der Qualitätsbetrachtung (Werte pro Hektar in Tausend Euro). *Timber value of the scenario calculation. The results of SILVA is compared to the quality sensitive variant with and without red rot (Values per hectare in thousand Euro).*

Die Bewertung beider Bestände nach dem erntekostenfreien Erlös ist auf Abb. 7-36 zu sehen. Zusätzlich ist der von SILVA berechnete Wert als Referenz angegeben, der ohne die Berücksichtigung der Qualität berechnet wird. Das Ergebnis zeigt, dass die SILVA-Berechnung erwartungsgemäß einen mittleren Wert liefert, während der rotfaule Bestand deutlich darunter liegt. Im gesunden Szenariobestand wird ein höherer Wert ermittelt, als durch die SILVA-Referenz zu erwarten wäre, obwohl kein Holz der Qualitätsklasse A anfällt, das diesen Unterschied erklären könnte. Dies mag an der abweichenden Art der Kostenermittlung der Sortieralgorithmen in BDAT und SILVSORT liegen. Eine andere Möglichkeit wäre ein Erlös-Vorteil des optimierenden Algorithmus in SILVSORT gegenüber dem eher deterministischen System in BDAT. In der Gesamtbetrachtung zeigt das Ergebnis der Szenariosimulation deutlich den Einfluss einer differenzierten Qualitätsbetrachtung auf die berechneten Erlöse.

Die Konvergenz des genetischen Algorithmus in SILVSORT ist in Abb. 7-37 zu sehen. Die Diversität, charakterisiert als Anzahl der unterschiedlichen Bits in 50 Individuen des Genoms, kennzeichnet die Konvergenz der Optimierung. Mittelwert bzw. Minimum und Maximum geben die zentrale Tendenz bzw. den Streubereich der Lösungen an. Je mehr Generationen durchlaufen werden, desto stärker nähern sich diese Werte an, was das allmähliche Konvergieren der Optimierung anzeigt, das in diesem Beispielszenario nach 37 Zyklen erreicht ist. Im Durchschnitt sind 40 bis 50 Generationszyklen typisch.

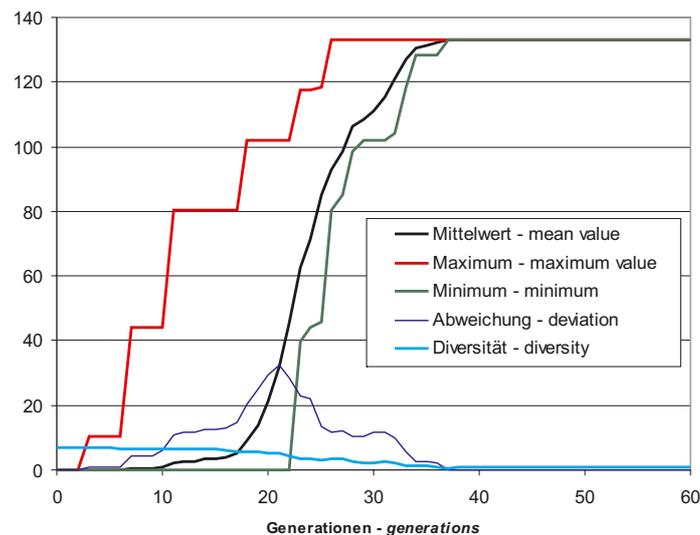


Abbildung 7-37: Verhalten des genetischen Algorithmus des Sortiermodells SILVSORT anhand verschiedener Kennwerte. *Behaviour of the genetic algorithm in the sorting model SILVSORT shown by various indices.*

8 Diskussion – Discussion

8.1 Darstellung des Simulationssystems und Bewertung der Simulationsergebnisse – Discussion of the simulation results

Das in dieser Arbeit vorgestellte Simulationssystem integriert am Beispiel der Baumart Fichte ein dynamisches Astmodell, ein Modell zur Rotfäuleausbreitung im Stamm und ein Sortiermodell zur optimalen Sortimentsausformung in einen einzelbaumorientierten, distanzabhängigen Waldwachstumssimulator. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der dreidimensionalen Nachbildung wichtiger Holzeigenschaften in Abhängigkeit von der waldbaulichen Bestandesbehandlung. Als Modellrahmen wird dabei auf den managementorientierten Waldwachstumssimulator SILVA zurückgegriffen, in den eine breite Palette an möglichen waldbaulichen Steuerungsmaßnahmen implementiert ist (Unterkapitel 3.3).

Astmodell AMOK

Die Astsimulation im Modell AMOK beschreibt die Äste räumlich über deren Position am Stamm, den Astwinkel, die Astlänge und den Astdurchmesser (Kapitel 4). Zusätzlich wird ein Mortalitätsmodell verwendet, das zusammen mit einem Astreinigungs- und Astungsmodell den Aststatus nachbildet.

Die Datenbasis zur Parametrisierung stammt aus der Messung insgesamt vieler tausend Äste an über 250 Fichten aus Rein- und Mischbeständen mit unterschiedlicher Behandlung in Süddeutschland (s. Unterkapitel 4.1) und wurde durch weitere Daten aus dem Ertragskundlichen Versuchsflächennetz der Bayerischen Staatsforstverwaltung und Literaturwerte ergänzt.

Die Konkurrenz wird als wichtige Steuergröße in der Kronen- und Astsimulation eingesetzt, um eine Reaktion der Astentwicklung auf die waldbauliche Behandlung zu gewährleisten. Über das Konkurrenzmodell HEMIS lässt sich die Beschattung eines beliebigen Kronenteils in Abhängigkeit von der räumlichen Umgebungsstruktur in hoher Auflösung berechnen. Das entworfene flexible Kronenmodell reagiert plastisch auf die Konkurrenz und bildet damit die Grundlage für eine behandlungssensitive, räumliche Nachbildung der Astentwicklung. Dabei wird das Astwachstum in Jahresschritten über ein dynamisches Modell beschrieben. Weitere Einflussfaktoren, wie beispielsweise das Astalter, die topologische Aststellung oder das Baumalter beeinflussen die Astentwicklung ebenso wie der Standort. Zur Standortbindung wurde das Astmodell an das Standort-Leistungs-Modell von SILVA gekoppelt. So wird die Anwendbarkeit des Astmodells auf eine breite Standortpalette erweitert und ist nicht auf die Parametrisierungsbestände beschränkt. Bei der Modellbildung wurde stets auf eine biologische Interpretierbarkeit der Variablen geachtet. In einigen Fällen wurde diesen der Vorzug gegenüber nicht interpretierbaren Variablen gegeben, die ein geringfügig höheres Bestimmtheitsmaß versprochen. Ebenso wurde ein besonderes Augenmerk auf die Interpolationsfähigkeit der Modelle im möglichen Simulationsspektrum gelegt.

Das Simulationssystem AMOK reagiert auf unterschiedliche Konkurrenzsituationen und erlaubt die plausible Nachbildung der Astentwicklung von sehr dichten Beständen bis zum solitären Einzelbaum (s. Abschnitte 7.2.1 und 7.2.3). Die flexible Modellstruktur ermöglicht, im Zusammenspiel mit dem hochauflösenden Konkurrenzmodell HEMIS, die Nachbildung der Kronen- und Astreaktion auf einseitige Konkurrenz (s. Abschnitt 7.2.2), wie sie typischerweise an Bestandesrändern oder bei der Überführung von Beständen auftritt. Somit steht mit AMOK ein Werkzeug zur Szenarioanalyse zur Verfügung, mit dem auch waldbauliche Behandlungskonzepte verglichen werden können, bei denen die räumliche Geometrie des Eingriffs eine Rolle

spielt. Die Simulationsergebnisse zeigen insgesamt plausible Werte. Auffällig ist eine Überschätzung des Astdurchmesserwachstums in sehr dichten Jungbeständen. Dieses Modellverhalten könnte an einer Unterrepräsentation von langen Schattenästen im Parametrisierungsdatensatz liegen, so dass es zu einer Verzerrung der Ergebnisse bei der Simulation von sehr stark konkurrenzierten jungen Ästen kommt. Dies kann durch ein „Überschwingen“ der verwendeten Chapman-Richards-Funktion bedingt sein. Eine Erweiterung der Datenbasis und eine anschließende Neuparametrisierung des Astdurchmessermodells mit einer Funktion ohne Wendepunkt, können hier Abhilfe schaffen. Noch vorteilhafter wäre der gezielte Aufbau eines Datensatzes mit wirklichen Astdurchmesserzuwachswerten in Abhängigkeit von der Konkurrenz, sodass eine Substitution dieser Werte über die Differenzierung von Wachstumsdaten entfällt. Ein solcher Datensatz konnte jedoch in der Arbeit nicht angelegt werden.

Weiterhin konnten unrealistische Astwinkel bei der Simulation von Solitären im untersten Stammbereich festgestellt werden, da diese Äste in der Realität auf dem Boden aufliegen, was das Modell nicht nachbildet. Allerdings tritt dieser Effekt nur bei der Simulation sehr alter Solitär-bäume mit langen stark hängenden Ästen auf. Hier muss eine Anpassung der untersten Äste erfolgen, die den Astwinkel bzw. die Krümmung bei Berührung mit dem Erdboden modifizieren.

Rotfäulemodell RAM

Das Rotfäulesimulationsmodell RAM simuliert die Ausbreitung von wurzelbürtiger Fäule durch *Heterobasidion annosum* [FR.] BREF. und erlaubt plausible Prognosen für die Fäulehöhe, die Fäuleform sowie den Zersetzungsgrad im Stamm für mitteleuropäische Verhältnisse (Unterkapitel 5). Das Rotfäulemodell berücksichtigt sowohl den Effekt des Baumwachstums auf die Fäuleentwicklung als auch die Auswirkungen der Fäule auf das Baumwachstum und interagiert entsprechend mit dem Waldwachstumssimulator SILVA. So wird auch bei der Simulation der Rotfäule ein Einfluss der waldbaulichen Behandlung nachgebildet.

Das Modell RAM basiert auf einer Parametrisierung, die sich auf Literaturwerten von insgesamt mehreren tausend Fichten aus ganz Deutschland stützt und bietet dadurch plausible mittlere Entwicklungsgänge nach. Durch einfach messbare Eingangsparameter (Anzahl fauler Stämme im Bestand, mittlere anteilige Fäulefläche am Stock) lässt es sich zusätzlich vom Benutzer auf spezifische Bestandessituationen anpassen. Zusätzlich besitzt es eine Schnittstelle zu dem Rotfäuleinfektionsmodell RIM (MÜLLER 2002), das die Ausbreitung von *Heterobasidion annosum* [FR.] BREF. im Bestand simuliert und für die Schätzung von Infektionszeitpunkt und räumlicher Verteilung der faulen Bäume im Bestand angekoppelt werden kann.

Die Modellergebnisse zeigen einen plausiblen Verlauf der Fäuleentwicklung im Stamm und realistische Prognosen für den Fäuledurchmesser, die Fäulehöhe, die Fäuleform und den Fäulegrad (Abschnitt 7.3.1). Die Ergebnisse der fäulebedingten Wuchsdepression auf den Baum sind als vorläufig zu betrachten, da sie auf einer geringer Datenmenge beruhen, die aus Skandinavien stammt und sich als nicht direkt übertragbar erwiesen hat. Die Ergebnisse zeigen einen weiteren Forschungsbedarf auf diesem Gebiet auf, der eine bessere Datengrundlage zur Modellierung des Einflusses der Fäule auf das Baumwachstum bieten kann. Die Programmstruktur und Anbindung an das Wuchsmodell sind bereits geschaffen. Mit geeigneten Daten zur Parametrisierung stünde einer Simulation der Wuchsdepression nichts im Wege.

Insgesamt kann mit dem Modell RAM der Wurzelschwamm, eines der ökonomisch wichtigsten forstlichen Pathogene, bei Simulationsrechnungen berücksichtigt und bei der Entscheidungsfindung zur jeweils standortangepassten Bestandesbehandlung mit einbezogen werden. Damit steht für mitteleuropäische Verhältnisse zum ersten Mal ein Simulationsmodell zu Verfügung dass die Rotfäuleentwicklung durch *Heterobasidion* prognostiziert.

Sortiermodell SILVSORT

Das Sortiermodell SILVSORT benutzt die Ergebnisse der Ast- und Fäulesimulation und verschneidet sie mit den waldwachstumskundlichen Simulationsergebnissen von SILVA, um eine Bewertung und Sortierung aller Stämme eines Bestandes zu ermöglichen. Für die Sorteneinteilung werden die gängigen Rundholznormen HKS und ENV 1927-1 zugrundegelegt, nach denen für beliebige Abschnitte eines Stamms die Güte- bzw. Qualitätsklassen berechnet werden können. Die Bewertung beruht vor allem auf der Gesundheit (Fäuledurchmesser, Fäulelänge, Fäulegrad), der Astigkeit (Astzahl, Astposition, Astdurchmesser, Aststatus), der Abholzigkeit, dem Jahrringbau und des Zopf- und Mittendurchmessers des Abschnitts.

Der Einfluss, den nicht explizit räumlich simulierte Holzmerkmale wie z. B. die Harzgallenzahl oder der Drehwuchs auf die Rundholzqualität ausüben, wird über Wahrscheinlichkeitsfunktionen nachgebildet. Eine Vernachlässigung würde das Sortierergebnis andernfalls verfälschen.

Nach der Bestimmung der Rundholzqualität wird ein Abschnitt monetär bewertet, indem aus einem zu erwartenden Verkaufserlös und Erntekosten nach dem EST ein erntekostenfreier Erlös kalkuliert wird.

Auf der Grundlage der Maximierung des erntekostenfreien Erlöses wird in SILVSORT die Sorteneinteilung für jeden Stamm mit einem genetischen Algorithmus optimiert, der durch die Nachahmung von evolutionsgenetischen Mechanismen auf algorithmischer Basis die Sorteneinteilung berechnet, die den höchsten erntekostenfreien Erlös verspricht.

Gesamtsystem

Die Konzeption des Simulators setzt auf eine starke vertikale und horizontale Integration der Modelle, um die Interaktion der Einzelkomponenten so effizient wie möglich zu gestalten und Wechselwirkungen nachbilden zu können. Mit der integrierten Simulation von Baumwachstum, Kronen- und Astentwicklung sowie der Rotfäuleausbreitung im Stamm stehen die wichtigsten Holzmerkmale für eine ebenfalls integrierte qualitätsabhängige Rundholzsortierung in einem Simulationssystem zur Verfügung. Durch die Simulation qualitätsrelevanter Holzmerkmale mit einer abschließenden Rundholzsortierung ist eine Vergleichbarkeit verschiedener Handlungsalternativen auf einer monetären Basis möglich.

Wie im Unterkapitel 7.4 demonstriert, greifen die entwickelten Modelle nahtlos ineinander und interagieren mit dem Wachstumsmodell in etlichen Punkten (s. Kapitel 4 und 5). Die Simulationsergebnisse aller entwickelten Teilmodelle demonstrieren das Potenzial, dass die Integration von Holzqualität und Holzsortierung in behandlungssensitive Waldwachstumssimulatoren eröffnet. Die vorliegende Implementation stellt damit einen ersten wichtigen Schritt zur Simulation der Holzqualität in Abhängigkeit von der waldbaulichen Behandlung dar, wie sie einleitend in dieser Arbeit als Ziel definiert wurde. Der hier vorgestellte Simulationsansatz baut auf dem Wirkgefüge aus Bestandes- bzw. Einzelbaumstruktur und Zuwachs auf, das durch waldbauliche Maßnahmen beeinflusst werden kann (Abbildung 8-1).

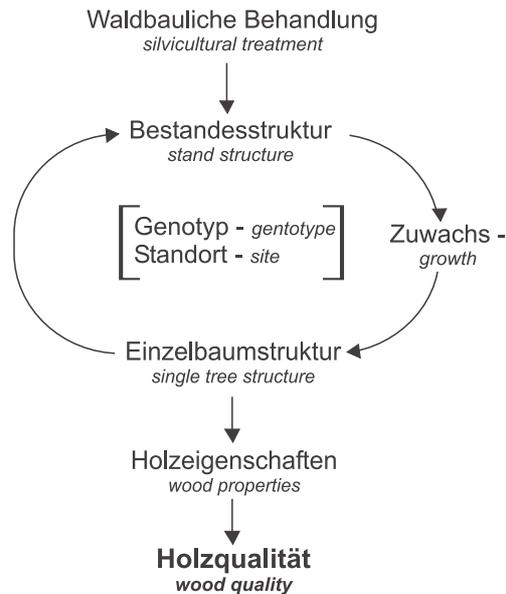


Abbildung 8-1: Wirkgefüge – Relationship between silvicultural treatment, growth and wood quality.

Das Ergebnis ist die Simulation einiger qualitätsrelevanter Holzeigenschaften, die im Rahmen einer Sortierung bewertet und in eine Rundholzqualität überführt werden. Somit stellt der gewählte Modellansatz eine Verbindung zwischen waldbaumwachstumskundlichen und waldbaulichen sowie holzkundlichen Modellansätzen dar.

8.2 Abgrenzung von bisherigen Modellansätzen

Comparison to existing model approaches

Integration von Wachstum und Holzqualität in ein Simulationssystem

Bisherige Ansätze zur Nachbildung der Holzqualität können in reine Holzqualitätsmodelle und in Ansätze zur kombinierten Modellierung von Baumwachstum und Holzqualität eingeteilt werden. Die meisten reinen Holzqualitätsmodelle sind nicht als Simulationssysteme ausgelegt und nur zum Zweck der Untersuchung spezieller Fragestellungen konstruiert und auch parametrisiert (COLIN und HOULLIER 1992, KALLIO und TAMMINEN 1974, SAMSON 1993, SCOTTI 1999, VESTØL 1998, YAMAMOTO 1999). Damit ist ihre Anwendbarkeit meist auf wissenschaftliche Einzeluntersuchungen beschränkt. Szenariosimulationen sind nur mit großem Aufwand Schritt für Schritt rechenbar, so dass solche Modelle in der Regel nur kurze Zeit verwendet werden und keinen Eingang in die Planung der praktischen Forstwirtschaft finden. Erst die Implementation eines Modells in ein Computerprogramm macht einen effizienten Modelleinsatz möglich (LINDSTRÖM 1999) und kann komplexe Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Modellen darstellen (PRETZSCH 2001). Die kombinierten Ansätze von Baumwachstum und Holzqualität sind deshalb alle Simulationsmodelle und in der Regel dafür konzipiert, praxisrelevante Größen auszugeben.

Reine Holzqualitätsmodelle arbeiten retrospektiv und rekonstruieren die Holzmerkmale ausgehend von äußeren Baumdimensionen und Informationen über das Alter und das standorttypische Höhenwachstum (z.B. LEBAN et al. 1999, VESTØL 1998, WILHELMSSON et al. 1999). Es handelt sich dabei um eine reine Rekonstruktion ohne Prognosemöglichkeit.

Diese Prognosemöglichkeit eröffnen jedoch Waldwachstumssimulatoren, die das Baum- und Bestandeswachstum immer prospektiv, also in die Zukunft gerichtet nachbilden und damit die geeigneten Eingangsinformationen für Holzqualitätsmodelle bieten. Deshalb werden seit einiger Zeit Ansätze zur kombinierten Modellierung von Wachstum und Holzmerkmalen entwickelt.

Den meisten bisherigen Ansätzen haben gemeinsam, dass vorhandene Holzqualitätsmodelle nur an Waldwachstumsmodelle angebunden, aber nicht eingebunden werden. Die Modelle werden meist sequentiell über Dateien gekoppelt, sodass ein Modell lediglich die Ausgaben des anderen Modells weiterverarbeitet, was nur eine Abstimmung der Ausgabe, aber keine grundlegende Anpassung der Programmstruktur erfordert (z.B. LEBAN und JAEGER 1999, MEREDIEU et al. 1999). In den zitierten Beispielen liefert das Wachstumsmodell in der Regel die Eingangsinformation für das Holzmodell. Eine Rückkopplung oder weitere Interaktion zwischen den Modellen findet nicht statt.

In dem hier präsentierten Modell wird dagegen eine weiter reichende Integration der Holzqualitätskomponenten in den Waldwachstumssimulator betrieben. Dafür wird ein Integrationskonzept entworfen, welches das ursprüngliche Wuchsmodell nicht grundlegend verändert, sondern um weitere Ebenen erweitert. Analog zum Kern des Wachstumsmodells werden Modellkomponenten zur Astsimulation und Rotfäuleausbreitung hinzugefügt, die nach demselben Konzept ablaufen und auf denselben Paradigmen der räumlichen Modellierung beruhen. Durch die weitgehend unveränderte Erhaltung des ursprünglichen Modellkerns bleibt die Simulation ohne die neuen Komponenten möglich. Diese können bei Bedarf zugeschaltet werden.

Durch die direkte Integration können die Holzqualitätsmodelle in vielen Bereichen während der Simulation auf die Ergebnisse des Waldwachstumssimulators zugreifen, was ein großer Vorteil gegenüber der sequentiellen Modellkopplung darstellt. So stehen beispielsweise zu jedem Simulationszeitpunkt die räumliche Bestandesstruktur mit den zugehörigen Bauminformationen zur Verfügung. Die Rückkopplung der neuen Holzqualitätsmodelle auf den Wachstumsteil des Simulators beschränkt sich bislang auf das Rotfäuledepressionsmodell. Sie kann aber bei Bedarf weiter ausgebaut werden. Es liegt zum Beispiel nahe, das neue Konkurrenz- und Kronenmodell für die Stammdurchmesser- und Höhenzuwachsprognose einzusetzen und die Kronenansatzschätzung und Kronenformschätzung zu übernehmen. Ebenso ist eine Steuerung der Durchforstungsalgorithmen in Interaktion mit dem Astmodell AMOK sinnvoll, sodass stark astige Bäume bei der Durchforstung bevorzugt entnommen werden.

Räumliche Simulation

Ein Hauptmerkmal von AMOK ist die räumliche Nachbildung aller modellierten Astmerkmale im Stamm.

Eine dreidimensionale Simulation des Astwachstums in Abhängigkeit von der räumlichen Konkurrenz bieten derzeit einige wenige andere Ansätze (LE DIZÉS et al. 1997, KELLOMÄKI 1991, KURTH 2000), die jedoch nicht für die Prognose der Holzqualität entwickelt wurden, sondern in der Regel als wissenschaftliche Instrumente zur Untersuchung der Baumarchitektur. Deshalb sind die Modelle meist sehr komplex und zur Simulation auf Bestandesebene in vertretbarer Zeit nicht in der Lage. Typische Astmodelle zur Prognose der Holzqualität sind dagegen meist als Verteilungsmodelle entwickelt und berücksichtigen keine räumliche Konkurrenz. In einigen Modellen wird über den H/D-Wert als konkurrenzabhängige Größe eine indirekte Sensitivität auf Konkurrenz eingebracht (SCHMIDT 2001) oder es wird eine zusätzliche Variable zur Dichtebestimmung eingeführt (DELEUZE 1996). Nur in ganz wenigen Modellen wird die räumliche Kronensituation der Nachbarbäume als direkte Einflussgröße benutzt und ebenfalls eine räumliche Astverteilung nachgebildet (GOUDIE 1999).

Die Astsimulation in AMOK wird wie bei einem Baumarchitekturmodell für jeden Ast einzeln durchgeführt. Die Kronenentwicklung wird direkt durch die Konkurrenz aus einer bestimmten Richtung gesteuert und findet ihren Ausdruck im Wachstum jedes Einzelastes, für den Position und Dimension dynamisch fortgeschrieben werden. Das hat den Vorteil, dass die räumliche Astverteilung an der Stammoberfläche und im Stamminneren in jedem Simulationsschritt bekannt ist. Der Ansatz von AMOK im Vergleich zu den meisten anderen Astmodellen ist in etwa vergleichbar mit dem Unterschied zwischen distanzabhängigen Einzelbaummodellen und Bestandesmodellen zur Ermittlung der Stammzahlfrequenz.

Ein weiterer Aspekt des hier vorgestellten Ansatzes ist die konsistente dreidimensionale Simulation, sowohl in der Prognose als auch in der Rekonstruktion der vergangenen Entwicklung. Damit geht die Simulation über die typischen Simulationsziele der Waldwachstumsmodelle hinaus und liefert auch eine retrospektive Abschätzung der Dimension und Holzqualität von Bäumen.

Auch die Rotfäulesimulation in RAM bietet eine räumliche Beschreibung und geht in der Beschreibung der Fäuleform im Stamm und des Fäulegrades weit über bisher existierende Ansätze (KALLIO und TAMMINEN 1974, MÄKELÄ et al. 1994, MÖYKKYNEN et al. 1998, 2000) hinaus, die bei der Fäulemodellierung lediglich einfache geometrische Körper oder ausschließlich die Fäulehöhe zur Beschreibung heranziehen.

8.3 Anwendungsmöglichkeiten des Modells

Application range of the models

Wie dargestellt unterscheidet sich das entwickelte Modellsystem in Konzept und Implementation deutlich von bisherigen Modellansätzen. Es präzisiert nicht nur die Prognosequalität im Vergleich zu Waldwachstumssimulatoren ohne Holzqualitätsmodul (s. Unterkapitel 7.4), sondern erweitert durch sein Konzept auch deren Anwendungsspektrum entsprechend.

Anwendung in Fragen der Bestandessteuerung

Die Anwendungsmöglichkeiten durch die Integration des Ast-, Rotfäule und Sortiermodells in SILVA sind vielfältig. Im Folgenden sollen einige Anwendungsgebiete genannt werden. Vor dem Einsatz zur Prognose muss jedoch ein ausführlicher Validierungsprozess des Modellsystems stehen (PRETZSCH 2001)

Mit dem entwickelten Simulationssystem eröffnet sich die Möglichkeit, unterschiedliche waldbauliche Szenarien in ihren Auswirkungen auf die Holzqualität und den möglichen Erlös zu testen. So können verschiedene Pflanzverbände hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Holzqualität verglichen werden, wie bereits beispielhaft im Ergebnisteil (Kapitel 7) demonstriert wurde. Es lassen sich durch die räumliche Sensitivität auf Konkurrenz die Auswirkungen besonders starker Freistellung (Abschnitt 7.2.1) auf die Holzqualität ebenso testen, wie der Einfluss verschiedener Gassenbreiten und -abstände. Die Rentabilität von Astungsmaßnahmen ist ebenso eine Untersuchungsoption.

Das Modell kann bei der Entwicklung von Durchforstungsprogrammen eingesetzt werden oder auch zur Schätzung des Abtriebswertes in Inventuren. Voraussetzung ist jedoch eine ausführliche vorangehende Modell-Evaluierung, wie oben bemerkt.

Das Rotfäulemodell lässt z.B. zusammen mit dem Sortiermodell die Berechnung eines optimalen Erntezeitpunktes in rotfäulegeschädigten Beständen zu und eine Abschätzung der Sortenstruktur und unverkäuflichen X-Holzanteils. Damit können wichtige Informationsbedürfnisse der Forstwirtschaft erfüllt werden, die in Kapitel 1 definiert wurden.

Anwendung bei wissenschaftlichen Fragestellungen

Eine weitere Anwendung bietet sich in der getrennten Berechnung von Stamm-, Ast- und Rindenbiomassen an, wie sie für Untersuchungen der Kohlenstoff- oder Nährstoffbindung benötigt werden.

Durch die realistische Abbildung der Kronenstruktur kann es zur Biomassenskalierung als Ausgangspunkt für die Berechnung des Lichtklimas im Bestand oder andere physiologische Modelle herangezogen werden

Ein Einsatz des Modellsystems zur gezielten Versuchssteuerung im ertragskundlichen Versuchswesen ist ebenfalls denkbar. So könnte z.B. die Eingriffsplanung in Durchforstungsversuchen von einer kritischen Qualitätsschwelle (beispielsweise dem maximalen Astdurchmesser) abhängig gemacht werden. Dieser Einsatz würde gleichzeitig eine iterative Evaluierungsmöglichkeit des Astmodells bedeuten, da Abweichungen zwischen den Messwerten und den Modellvorhersagen sofort ins Modell eingehen können. Sie könnten zu einer sukzessiven Modellverbesserung führen.

Auch der Einsatz des Konkurrenzmodells HEMIS für die Untersuchung der Konkurrenzverhältnisse bietet sich als interessante Option bei wissenschaftlichen Fragestellungen an.

Schließlich kann das Astmodell AMOK auch zur Datengenerierung für die realistischere Einzelbaumdarstellung in Visualisierungssystemen benutzt werden, wie die Bilder im Unterkapitel 7.2 belegen.

Einsatz zum Aufbau einer Modellkette vom Baum zum Produkt

Die dreidimensionale Beschreibung von Astigkeit, Fäule, und Jahrringstruktur im Stamm führt zu der konsistenten Wirkungskette von der waldbaulichen Behandlung bis zur Holzqualität in der Simulation, wie sie oben beschrieben ist (Abb. 8-1). Erst dadurch wird eine zwanglose Erweiterung der Modellkette „Holz“ vom Rundholz über das Schnittholz oder Furnier in mehreren Schritten möglich, bei der eine durchgehende Kausalität von der waldbaulichen Behandlung bis zum fertigen Produkt simuliert werden kann.

Das hier vorgestellte Simulationssystem bildet mit der Nachbildung des initialen Rohstoffes „Rundholz“ ein wichtiges Glied in der Modellkette „Holz“ und legt den Grundstein für eine Ankopplung weiterer Modelle, die dem Informationsbedarf der Holzindustrie nach einer Prozessoptimierung der Holzverarbeitung nachkommen.

8.4 Verbesserungsmöglichkeiten – Possible future enhancements

Bereits angesprochen ist die Notwendigkeit einer ausführlichen Modellevaluierung auf allen Ebenen. Dies schließt die Ausgaben und Abläufe der Einzelmodelle ebenso mit ein, wie das Zusammenspiel der Einzelkomponenten. In weiten Teilen kann bei der Evaluierung nach den Empfehlungen zur Einführung und Weiterentwicklung von Waldwachstumssimulatoren des DEUTSCHEN VERBANDES FORSTLICHER VERSUCHSANSTALTEN (2000) vorgegangen werden.

Konkurrenzberechnung

Bei der Konkurrenzberechnung bietet sich eine Erweiterung des Modells hinsichtlich mechanischer Effekte an, die nur mittelbar erfasst sind, aber die Kronenstruktur deutlich beeinflussen. Eine Gewichtung der Konkurrenz nach der Himmelsrichtung zur Nachbildung der unterschiedlichen Lichteinstrahlung wie sie HENDRICH (2000) vorschlägt, wäre sinnvoll.

Eine Berechnung der Eigenbeschattung könnte ebenso zu einer Präzisierung der Modellergebnisse beitragen.

Astmodell

Die in Kapitel 7 aufgezeigten Schwächen in der Modellierung junger Äste unter starker Konkurrenz und die fehlende Reaktion der Äste tief bekronter Solitäre auf eine Kollision mit dem Boden gilt es zu beseitigen.

Eine konkurrenzabhängige Modellierung der Vertikalverteilung der Äste am Quirl selbst würde die biologische Plausibilität des Modells weiter erhöhen. Mit solch einem Modell könnten auch Internodialäste plausibel nachgebildet werden.

Bei der Astlängenberechnung gilt es, die Parametrisierungsgrundlage der Akrotoniefunktion weiter zu vervollständigen.

Eine stärkere Berücksichtigung der Astkrümmung – zum Beispiel über ein mechanisches Modell (CANELL und MORGAN 1989) – scheint eine weitere Verbesserung der Astlängen- und Astwinkelsimulation möglich zu machen.

Besonders bei der Astmortalität und Astreinigung sind die Zusammenhänge zu wenig bekannt. Hier besteht dringender Forschungsbedarf zur Klärung der Prozesse, Einflussgrößen und quantitativen Auswirkungen. Die implementierten Modelle gründen auf einer eher schwachen Datenbasis, die zwar eine plausible Schätzung der Astreinigung erlaubt, aber einer weiteren Parametrisierung mit einem größeren Datensatz bedarf. Dieser könnte effizient durch den Einsatz von Computertomographen gewonnen werden.

Mittelfristig ist eine Parametrisierung des Astdurchmesserzuwachsmodells mit wirklichen Zuwachswerten anzustreben. Das jetzige Modell schätzt die Zuwachswerte aus der Ableitung einer Durchmesser-Längen-Beziehung. Dadurch müssen zwei unterschiedliche Datensätze für die Schätzung des Mittelwertes und für die Herleitung der konkurrenzabhängigen Durchmesserzuwachsreduktion benutzt werden (Kapitel 4.4.8). Diese Substitution von Zuwachswerten durch eine differenzierte Wachstumsfunktion wird notwendig, weil wirkliche Zuwachswerte von nur wenigen Bäumen auf einem Standort vorliegen, die eine plausible Erstellung eines über den Bestand hinaus übertragbaren Modells nicht gewährleisten. Die daraus entstehenden Probleme wurden bereits in Kapitel 7.2 beleuchtet.

Rotfäule

Die Verbesserungsmöglichkeiten im Rotfäulemodell betreffen vor allem die Modellierung des Fäuleeinflusses auf den Baum, die mit dem vorgestellten Modell nicht befriedigend gelöst werden kann. Es fehlen Erkenntnisse zu der Frage, wie viele Jahre nach einem Befall sich eine Wuchsdepression einstellt, wie sie mit der Fäuleausdehnung im Stamm korreliert und wie der genaue quantitative Einfluss auf das Stammdurchmesser- und Höhenwachstum sowie die Stammformentwicklung ist.

Weiterhin würde eine Erweiterung des Modells zur Simulation von Wundfäule durch Rucke- und Fällschäden, Schältschäden oder Stammbrüche die Anwendungsoptionen des Modells deutlich ausbauen. Dazu ist jedoch die Schaffung eines Parametrisierungsdatensatzes und eine Erweiterung des Modellansatzes nötig, da die Wundfäuleausbreitung sich deutlich vom Verhalten einer wurzelbürtigen Kernfäule unterscheidet (VON PECHMANN und VON AUFSESS 1971).

Sortierung

Eine Erweiterung des Sortiermodells könnte die Ausweitung der Optimierungsebene von Einzelstamm zum Bestand sein. Dies würde die Interaktion des Waldwachstumssimulators mit einer Sortendatenbank oder einem Modell zur Nachbildung des lokalen Holzmarktes erleichtern. Eine weitere Verfeinerung der Sortiereinstellung mit einer Menüsteuerung, welche die

Vorgabe von verwendungstypischen Sortierkriterien und -grenzen, unabhängig von den jetzt implementierten Rundholznormen, erlaubt, stellt eine andere Erweiterungsoption dar. Eine ausführliche Evaluierung muss wie bei allen Modellen auch hier Prognoserechnungen vorangehen.

8.5 Gesamtbetrachtung – Overall view

Insgesamt konnte in dieser Arbeit die Integration der Holzqualität in einen behandlingssensitiven Waldwachstumssimulator erfolgreich demonstriert werden. Dabei wurden mit der Astigkeit und der Gesundheit die Hauptvariablen zur Beschreibung der Rundholzqualität identifiziert und in zwei Modellen in den Waldwachstumssimulator integriert. Die ebenfalls integrierte qualitätsorientierte Rundholzsortierung ergänzt das Modellsystem. Sie aggregiert und bewertet die simulierten Wachstums- und Holzmerkmale. Die Modellentwicklung ist jedoch noch nicht abgeschlossen. Eine fundierte Modellevaluierung steht noch aus und muss in der kommenden Entwicklungsperiode durchgeführt werden. Die bisherigen Simulationsergebnisse zeigen jedoch bereits eine plausible Nachbildung der Holzqualität in Abhängigkeit von der waldbaulichen Behandlung. Das Hauptziel dieser Arbeit ist damit erreicht. Das Konzept baut auf einer räumlichen Beschreibung der Holzmerkmale im Stamm auf und sollte nach einer ersten Evaluierungsphase mit zusätzlichen Modellen erweitert werden, um eine möglichst umfassende Beschreibung der Holzqualität zu erreichen.

Erste Modellansätze zur Nachbildung der Harzgallen und der Rohdichte bei Fichten konnten dabei schon die Machbarkeit einer Modellierung dieser Größen belegen (SEIFERT et al. 2003). Mit einem Ausbau des Modells zur Simulation der Stammkrümmung, der Querschnittsform, des Faserwinkels und der Reaktionsholzbildung kann die Prognose der Holzqualität bei Fichten nachhaltig verbessert werden.

Eine Übertragung des Modellansatzes auf andere Nadelbäume wie die Douglasie oder die Tanne scheint mit wenig Aufwand machbar. Die Simulation der Holzqualität von Laubbäumen nach dem präsentierten Ansatz stellt eine weitere Herausforderung für die Zukunft dar.

9 Literatur – Literature

- ABETZ, P., 1976: Reaktionen auf Standraumerweiterung und Folgerungen für die Auslesedurchforstung bei Fichte. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 147 (4), 72–75.
- ABETZ, P. und KLÄDTKE, J., 2002: The Target Tree Management System. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 121, 73–82.
- ABETZ, P. und MERKEL, O., 1968: Aststärken und Schaftovalität in Fichtenreinbeständen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 139 (6), 138–145.
- ABETZ, P. und UNFRIED, P., 1983: Aststärken an Z-Bäumen in einem Fichtenstandraumversuch im Forstbezirk Riedlingen/Donau. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 154 (11), 189–197.
- ALEXANDER, S. A., HOKANS, R. H., FANEILI, E. S., and KURDYLA, T. M., 1985: Methods for estimating Annosus root rot in loblolly pine stands. In: Integrated Pest Management Research: Proceedings of a Symposium, 15–18 April, 1985. General Technical Report, S0-56, USDA, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, New Orleans, Louisiana, 56–58.
- ARNEY, J. D., 1972: Computer Simulation of Douglas-fir Tree and Stand Growth. Dissertation, Oregon State University, 79 pp.
- ARVIDSON, B., 1954: En studie av grantrötans (*Polyporus annosus* FR.) ekonomiska kensekvenser – A Study of the Economic Effects of Root Rot (*Polyporus annosus* FR.) in the Norway Spruce. Svenska Skogs-vårdsföreningens Tidskrift, 52, 381–412.
- ASIEGBU, F. O., JOHANSSON, M., WOODWARD, S., and HÜTTERMANN, A.: Biochemistry of the Host-Parasite Interaction. in: WOODWARD, S., STENLID, J., KARJALAINEN, R., and HÜTTERMANN, A. (Eds.) 1998: *Heterobasidion annosum* – Biology, Ecology, Impact and Control. Wallingford: CABI, 167–193.
- ASSMANN, E., 1955: Zur Bonitierung süddeutscher Fichtenbestände. Allgemeine Forstzeitschrift, 10, 61–64.
- ASSMANN, E., 1961: Waldertragskunde. BLV-Verlag, München, 1961, 490 S.
- ASSMANN, E. und FRANZ, F., 1963: Vorläufige Fichten-Ertragstafel für Bayern. In: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 1990: Hilfstafeln für die Forsteinrichtung, 334 S.
- ASZMUTAT, H., 1985: Auswirkungen der Immissionsbelastungen auf einige anatomische und physikalische Eigenschaften des Holzes der Fichte (*Picea abies* (L.) KARST.). Dissertation am Forstwissenschaftlichen Fachbereich der Georg-August-Universität Göttingen. 182 S.
- BACHMANN, M., 1998: Indizes zur Erfassung der Konkurrenz von Einzelbäumen. Methodische Untersuchungen in Bergmischwäldern. Forstliche Forschungsberichte München, 172, 261 S.
- BACHMANN, M., 2000: Der Bayerische Kiefern-Herkunftsversuch 1950/51 – ein Beitrag zur Bedeutung von Provenienzversuchen. In: KENK, G. (Hrsg.): Tagungsbericht der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Kaiserslautern, 63–75.
- BAGLEY, J. D., 1967: The behavior of adaptive systems which employ genetic and correlation algorithms. Dissertation, University of Michigan, Dissertation Abstracts International, 28 (12), 5106B, University Microfilms No. 68–7556.
- BARTELHEIMER, P., 2002: A Simulation Model for the German Forest Products Markets. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 121, Supplement, 1, 172–190.
- BAUMGARTNER, F., 1999: mündliche Information.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN, 1998: Holzpreisstatistik der Bayerischen Staatsforstverwaltung für das Kalenderjahr 1997. München, 1–2.
- BAZZIGHER, G. und SCHMID, P., 1969: Sturmschaden und Fäule. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 120, 521–535.
- BAZZIGHER, G., 1986: Infection studies with *Heterobasidion annosum* on young trees of *Picea abies*. European Journal of Forest Pathology, 16, 125–128.
- BENDZ, M. and STENLID, J., 1994: Decrease in diameter growth of decay affected Norway spruce. In: JOHANSSON, M. and STENLID, J. (Eds.) 1994: Proceedings of the Eighth International Conference on Root and Butt Rots. IUFRO Working Party S2.06.01, Uppsala, Sweden, 1993. 176–180.
- BENDZ-HELLGREN, M. and STENLID, J., 1995: Long-term reduction in the diameter growth of butt rot affected Norway spruce, *Picea abies*. Forest Ecology and Management, 74, 239–243.

- BENDZ-HELLGREN, M. and STENLID, J., 1997: Decreased volume growth of *Picea abies* in response to *Heterobasidion annosum* infection. Canadian Journal of Forest Science, 27, 1519–1524.
- BENDZ-HELLGREN, M., LIPPONEN, K., SOLHEIM, H., and THOMSEN, I. M., 1998: The Nordic Countries. In: WOODWARD, S., STENLID, J., KARJALAINEN, R., and HÜTTERMANN, A. (Eds.), 1998: *Heterobasidion annosum* – Biology, Ecology, Impact and Control. Wallingford: CABI, 333–345.
- BERGÈS, L., HERVÉ, J.-C., FRANC, A., GILBERT, J.-M., and NEPVEU, G., 1999: Influence of ecological factors and individual effects on radial growth and wood density components for Sessile oak (*Quercus petraea* LIEBL.) in Paris Basin and North-Eastern France by use of mixed linear models. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”, La Londe-Les-Maures, France, September 5-12, 205–222.
- BERNHART, A., 1960: Untersuchungen über die Astigkeit von Fichten aus dem Bayerischen Wald. Mitteilungen aus der Staatsforstverwaltung Bayern, 31, 40–51.
- BHANDARKAR, S. M., FRAUST, T. D., and TANG, M., 1999: CATALOG – a system for detection and rendering of internal log defects using computer tomography. Machine Vision and Applications, 11, 171–190.
- BIBER, P., 1996: Konstruktion eines einzelbaumorientierten Wachstumssimulators für Fichten-Buchen-Mischbestände im Solling. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, 142, 252 S.
- BIBER, P., 1997: Analyse verschiedener Strukturaspekte von Waldbeständen mit dem Wachstumssimulator SILVA 2. In: Beiträge zur Jahrestagung 1997 der Sektion Ertragskunde des DVFFA in Grünberg, S. 100–120.
- BIGING, G. S. and DOBBERTIN, M., 1992: A Comparison of Distance-Dependent Measures for Height and Basal Area Growth of individual Conifer Trees. Forest Science, 38 (3), 695–720.
- BINDSEIL, W. 1933: Das bauökonomische Problem der Fichtenkrone. Mitteilungen aus Forstwirtschaft und Forstwissenschaft, 4, 560–577.
- BJÖRKLUND, L., 1997: The Interior Knot Structure of *Pinus sylvestris* Stems. Scandinavian Journal of Forest Research, 12, 403–412.
- BOESEL, M. und VOGEL, J., 2001: Statistische Formeln und Tabellen für Studierende der Wirtschaftswissenschaften. Vorlesungsskript des Instituts für Wirtschaftsinformatik der Technischen Universität Ilmenau, 50 S.
- BÖHLMANN, D., 1970: Anatomisch-histologische Untersuchungen im Bereich der Astabzweigungen bei Nadel- und Laubbäumen – I. Die Verhältnisse im Abzweigungsbereich der Langtriebe von Nadelbäumen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 141 (7), 134–140.
- BOS, F., CHIORESCU, S., CONSTANT, T., JAEGER, M., MOTHE, F., and THIBAUT, B., 1999: Simulating the rotary-cutting of a softwood: modelling the variations of the veneer properties and the consequences on the plywood quality. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”, La Londe-Les-Maures, France, September 5-12, 290–293.
- BOSSSEL, H., 1992: Modellbildung und Simulation. Vieweg Verlag, Braunschweig, 400 S.
- BOSSSEL, H. 1994: Treedyn Forest Simulation Model – Mathematical model, program documentation, and simulation results. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, 35, 118 pp.
- BRAUN, H. J., 1958: Untersuchungen über der Wurzelschwamm *Fomes annosus* (FR.) COOKE. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 77, 65–88.
- BROCKHAUS-ENZYKLOPÄDIE, 1991, 19. Auflage, Band 12, Mannheim, S. 274
- BROCKHAUS-ENZYKLOPÄDIE, 1993, 19. Auflage, Band 20, Mannheim, 301–302.
- BRÜCHERT, F. und BECKER, G., 2000: Biegemechanische Eigenschaften von Fichten (*Picea abies* (L.) KARST.) bei unterschiedlichen Wuchsbedingungen – Grundlagen zur Abschätzung der Stabilität von Bäumen gegenüber mechanischen Belastungen durch Sturm und Schnee. Forstarchiv 71, 102–111.
- BRÜNDL, M., BARTELT, P., SCHNEEBELI, M., and FLÜHLER, H., 1999: Measuring branch deflection of spruce branches caused by intercepted snow load. Hydrological Processes, 13 (14/15), 2357–2369.
- BRUNN, G., 1931: Untersuchungen über die Astreinigung von Fichtenbeständen. Mitteilungen aus Forstwirtschaft und Forstwissenschaft, 2, 35–507.
- BRUNNER, A., 1998: A light model for spatially explicit forest stand models. Forest Ecology and Management, 107 (1-3), 19–46.

- BUES, C. T., 1990: Untersuchung der Holzqualität von Fichten aus unterschiedlich weit begründeten Beständen. Habilitationsschrift an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München, 159 S.
- BUES, C. T., 1994: Untersuchung der Holzqualität von Kiefern aus waldbaulich unterschiedlich behandelten Beständen Bayerns, LWF aktuell, 1, 5–8.
- BUGMANN, H. K. M., YAN, X., SYKES, M. T., MARTIN, P., LINDNER, M., DESANKER, P. V., and CUMMING, S. G., 1996: A comparison of forest gap models – Model structure and behaviour. *Climatic Change*, 34, 289–313.
- BÜHL, A. und ZÖFEL, P., 2002: SPSS 11 – Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows. München, Imprint der Pearson Education Deutschland GmbH, Addison-Wesley, 757 S.
- BURGER, H., 1939: Baumkrone und Zuwachs in zwei hiebsreifen Fichtenbeständen. *Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen*, 147–176.
- BÜRGER, M. und BEITELMAIR, R., 1996: Genetische Algorithmen. Ein Seminar zum Thema Rekursion und Selbstorganisation. Institut für Informationsverarbeitung und Mikroprozessortechnik. Johannes-Kepler-Universität, Linz. Online-Version: http://www.fim.uni-linz.ac.at/lva/rus/GenetischeAlgorithmen/ga_root.htm
- BURTON, P. J., 1993: Some limitations inherent to static indices of plant competition. *Canadian Journal of Forest Research*, 23, 2141–2152.
- CANELL, M. G. R. and MORGAN, J., 1989: Branch breakage under snow and ice loads. *Tree Physiology*, 5, 307–317.
- CASTÉRA, P., 1999: Multiple scale methods of wood variability for the design of wood based materials for structural purposes: Elastic and strength properties. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”, La Londe-Les-Maures, France, September, 5-12, 283–289.
- CESCATTI, A. and PIUTTI, E., 1997: Silvicultural alternatives, competition regime and sensitivity to climate in a European beech forest. *Forest Ecology and Management*, 102, 213–223.
- CHANTRE, G. and BOUVET, A., 1999: Modelling fibre morphology of Kraft pulps within and between Maritime pine trees (*Pinus pinaster*) through a microdensitometric profile. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”, La Londe-Les-Maures, France, September, 5-12, 228–236.
- CHELLE, M. and ANDRIEU, B., 1998: The nested radiosity model for the distribution of light within plant canopies. *Ecological Modelling*, 111, 75–91.
- CHEN, B. and VON GADOW, K., 2003: A Case Study of Simulated Annealing, Genetic Algorithm, Tabu Search and Linear Programming for Solving Forest Planning Problems. *Forstarchiv*, 74, 26–31.
- CIESLAR, A. und JANKA, G., 1902: Untersuchungen über die Qualität rasch erwachsenen Fichtenholzes. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*; S. 337ff [zitiert nach BRUNN 1931]
- CLEVELAND, W. S., 1979: Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, 74, 829–836.
- CLEVELAND, W. S. and DEVLIN, S. J., 1988: Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting. *Journal of the American Statistical Association*, 83, 596–610.
- COLIN, F. and HOULLIER, F., 1992: Branchiness of Norway spruce in northeastern France: predicting the main crown characteristics from usual tree measurements. *Annales des Sciences Forestiers*, 49, 511–538.
- CONSTANT, T., ANCELIN, P., FOURCAUD, T., FOURNIER, M., and JAEGER, M., 1999: The French project SICRODEF – a chain of simulators from the tree growth to the distortion of boards due to the release of growth stresses during sawing: First results. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”, La Londe-Les-Maures, France, September, 5-12, 377–386.
- COURTOIS, H., 1970: Einfluß von Rohdichte, Holzfeuchtigkeit und Jahrringbreite auf den Abbau des Nadelholzes durch *Fomes annosus* (FR.) CKE. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 28 (2), 67–75.
- COWN, D., HÉRBERT, J. and BALL, R., 1999: Modelling Radiata pine lumber characteristics. Part 1: Mechanical properties of small clears. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”, La Londe-Les-Maures, France, September, 5-12, 294–302.

- CWIELONG, P., LETTOJUÄRVI, T. und HÜTTERMANN, A., 1993: Die Bedeutung des Sauerstoffs für die Physiologie von *Heterobasidion annosum*, dem Erreger der Rotfäule. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 164 (11), 199–203.
- DAHLBLOM, O., PERSSON, K., ORMARSSON, S., and PETERSSON, H., 1999: Stiffness and shape stability analysis of sawn timber based on experimentally found variations of wood properties. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”, La Londe-Les-Maures, France, September, 5-12, 363–375.
- DAQUITAINE, R., SAINT-ANDRÉ, L., and LEBAN, J.-M., 1999: Modelling the boards properties distribution for a forest stand. Analysis of the propagation of errors in the simulation process. Application in Norway spruce (*Picea abies* KARST.). In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”, La Londe-Les-Maures, France, September, 5-12, 426–435.
- DAUZAT, J., SILLION, F., NOUGUIER, C., and DAMEZ, C., 1998: Specific methods for radiative transfer simulations on multi-scale plant mock-ups. Presentation held at the “Second International Workshop on Functional-Structural Tree Models”, Clermont-Ferrand, France.
- DEBELL, J. D., TAPPEINER II, J. C., and KRAHMER, R. L., 1994: Wood density of western hemlock: effect of ring width. Canadian Journal of Forest Research, 24, 638–641.
- DELEUZE, C., HERVÉ, J.-C., COLIN, F., and RIBYROLLES, L., 1996: Modelling crown shape of *Picea abies*: spacing effects. Canadian Journal of Forest Research, 26, 1957–1966.
- DEUTSCHER VERBAND FORSTLICHER VERSUCHSANSTALTEN, 2000: Empfehlungen zur Einführung und Weiterentwicklung von Waldwachstumssimulatoren. Allg. Forst- und Jagdzeitung, 171. Jg., Heft 3, S. 52–57
- DHÔTE, J. F., 1999: Modélisation de la dynamique des peuplements de feuillus sociaux. Application à la sylviculture du Hêtre et du Chêne. Mémoire d’Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Nancy I, Mars 1999, 166 pp.
- DIETRICH, G., 1973: Untersuchungen über die Astbildung und natürliche Astreinigung der Weißtanne, Forstwissenschaftliches Centralblatt, 92, 1–95.
- DIMITRI, L., 1966: Ausbreitung des Wurzelschwammes (*Fomes annosus* [FR.] COOKE) und seine Beteiligung an der Rotfäule der Fichte. Forst- und Holzwirt, 8, 191–194.
- DIMITRI, L., 1980: Untersuchungen über die Widerstandsfähigkeit der Fichte (*Picea abies* KARST.) gegenüber dem Wurzelschwamm *Fomes annosus* (FR.) COOKE. Schriften aus der Forstlichen Versuchsanstalt Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, 66, 1–126.
- DIMITRI, L. and TOMICZEK, C., 1998: Impact, Control and Management of *Heterobasidion annosum* Root and Butt Rot in Europe and North America. 19. Germany and Austria. In: WOODWARD, S., STENLID, J., KARJALAINEN, R. and HÜTTERMANN, A. (Eds.) 1998: *Heterobasidion annosum* – Biology, Ecology, Impact and Control. Wallingford: CABI, 355–368.
- DIN 21329, 1987: Grubenschnittholz – Technische Güte- und Lieferbedingungen. Normen über Holz. Hrsg.: DIN, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 1991, 67–70.
- DIN 4074, 1989: Sortierung von Nadelschnittholz nach der Tragfähigkeit. Hrsg.: DIN, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 1991, 14–28.
- DIN 68360, 1981: Holz für Tischlerarbeiten – Teil 2: Gütebedingungen bei Innenanwendung. Normen über Holz. Hrsg.: DIN, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 1991, 197–199.
- DIN 68362, 1979: Holz für Leitern – Gütebedingungen. Normen über Holz. Hrsg.: DIN, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 1991, 200–203.
- DOMSCHKE, W. und DREXL, A., 1998: Einführung in Operations Research. Berlin, Springer Verlag, 247 S.
- DUMM, G., 1971: Der Einfluß des Pflanz-Verbandes auf Astbildung und Schneebruchgefährdung bei Fichte. Allgemeine Forstzeitschrift, 26 (5), 150–152.
- DURSKÝ, J., 1997: Modellierung der Absterbeprozesse in Rein- und Mischbeständen aus Fichte und Buche. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 168 (6/7), 130–134.
- DURSKÝ, J., 2000: Einsatz von Waldwachstumssimulatoren für Bestand, Betrieb und Großregion. Habilitationsschrift, Technische Universität München, 223 S.
- DÖRFELT, H. (Hrsg.), 1989: Lexikon der Mykologie. Stuttgart, New York, Gustav Fischer Verlag, 432 S.

- EBERT, H.-P. und DEUSCHLE, R., 2000: Die Baumkrone als Maßstab für den Zuwachs von Fichte. *Forst und Holz*, 55, 452–454.
- EK, A. R. and MONSERUD, R. A., 1974: Trials with program FOREST: Growth and reproduction simulation for mixed species even- or uneven-aged forest stands. In: FRIES, J. (Ed.): *Growth models for tree and stand simulation*. Royal College of Forestry, research Notes, 30, 56–73.
- EKMAN, R. und VON WEISSENBERG, K., 1981: Association between some silvicultural, physical and chemical properties of *Picea abies* and spread of *Fomes annosus*. *Acta Academiae Aboensis, Serie B*, 41 (2), 1–22.
- ENG, G., DAELLENBACH, H. G., and WHYTE, A. G. D., 1986: Bucking tree-length stems optimally. *Canadian Journal of Forest Research*, 16, 1030–1035.
- ENV 1927-1, 1998: Schlussentwurf der Europäischen Vornorm zur Qualitäts-Sortierung von Nadelrundholz – Teil 1: Fichten und Tannen. Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, 6 S.
- ERWEITERTER SORTENTARIF (EST), 1979: Tarifvertrag über die Entlohnung von Waldarbeitern in der Fassung des Änderungs-TV 17 vom 19. September 2000.
- FARRAR, J. L., 1961: Longitudinal variation in the thickness of the annual ring. *Forestry Chronicle*, 37, 323–331. [zitiert aus KOZLOWSKY and PALLARDY 1997]
- FINNISH PULP AND PAPER RESEARCH INSTITUTE, 1981: Effect of *Fomes annosus* on the wood and pulping properties of spruce. *Finland, Pulp-and Paper-World*, 1981, 1: (11–12), 118–123.
- FOLEY, J. D., VAN DAM, A., FEINER, S. K., and HUGHES, J. F., 1996: *Computer Graphics – Principles and Practice*. Addison-Wesley-Publishing, Reading, 1174 pp.
- FORSBERG, D., 1999: Twist of sawn wood (*Picea abies*) – Relationship with grain angle variation and pith fluctuation. In: NEPVEU, G. (Ed.): *Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”*, La Londe-Les-Maures, France, September, 5-12, 303–308.
- FRANKEL, S. J., EAV, B. B., KLEIJUNAS, J. T., and SHAW III, C. G., 1994: Modelling the dynamics and impact of *Annosus* root rot disease in western North America. In: JOHANSSON, M. and STENLID, J. (Eds.) 1994: *Proceedings of the Eighth International Conference on Root and Butt Rots*. IUFRO Working Party S2.06.01, Uppsala, Sweden, 1993, 762–770.
- FUGLSANG NIELSEN, L., 2000: Lifetime and residual strength of wood subjected to static and variable load. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 58 (1/2), 81–90.
- GJEDRUM, P., 1999: Prediction of heartwood in *Pinus sylvestris*. In: NEPVEU, G. (Ed.): *Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”*, La Londe-Les-Maures, France, September, 5-12, 145–148.
- GLOS, P. und TRATZMILLER, M., 1997: Qualität von Schnittholz bayerischer Fichten aus Lichtwuchsbetrieb im Vergleich zu Schnittholz aus Beständen mit niederdurchforstungsartiger Behandlung, Abschlussbericht 96511 der Bayerischen Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft zum Kuratoriumsprojekt „X31“, 1–74.
- GLÜCK, P. und KOCH, W., 1973: Die optimale Rundholzausformung. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen* 90 (4), 193–228.
- GOUDIE, J. W., 1999: Modelling the impact of silvicultural activities on the wood characteristics of coastal Western hemlock in British Columbia. In: NEPVEU, G. (Ed.): *Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”*, La Londe-Les-Maures, France, September, 5-12, 436–447.
- GOULDING, C. J., DEADMAN, M. W., and LAWRENCE, M. E., 1993: Assessing stem qualities and using dynamic programming to predict log-product volumes in inventory. *Proceedings of Ilvessalo Symposium on National Forest Inventories*, IUFRO S 4.02. Published in: *The Finnish Forest Research Institute, Research Papers* 444, 171–178.
- GRABER, D., 1994: Die Fichtenkernfäule in der Nordschweiz: Schadenausmass, ökologische Zusammenhänge und waldbauliche Massnahmen. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 145 (11), 905–925.
- GRABER, D., 1996: Die Kernfäule an Fichte (*Picea abies* KARST.) in der Schweiz nördlich der Alpen: Untersuchungen über das Schadenausmass, die ökologischen und mykologischen Einflussfaktoren sowie die ökonomischen Auswirkungen. Beiheft zur Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen, 79, 283 S.

- GRACE, J., VAN GARDINGEN, P. R., and LUAN, J., 1997: Tackling large-scale problems by scaling up. In: VAN GARDINGEN, P. R., FOODY, G. M., and CURRAN, P. J. (eds.), 1997: Scaling-up: From Cell to Landscape. Cambridge University Press, Cambridge, 7–16.
- GREGER, O., 1995: Biogruppen – Bausteine vielfältiger Waldstrukturen. *Dauerwald*, 13, 24–35.
- GRIL, J., SASSUS, F., YAMAMOTO, H., and GUITARD, D., 1999: Maturation and drying strain of wood in longitudinal direction: a single-fibre mechanical model. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”, La Londe-Les-Maures, France, September, 5-12, 309–313.
- GROTE, R., 1998: Integrating dynamic morphological properties into forest growth modelling – II. Allocation and mortality. *Forest Ecology and Management*, 111, 193–210.
- GRUBER, F., 1992: Dynamik und Regeneration der Gehölze. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A*, 86-I, 420 S.
- GUILLEY, E. and NEPVEU, G., 1999: Using mixed models to estimate the pith-to-bark density profiles in individual logs from reduced density measurements: application to Sessile oak. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”, La Londe-Les-Maures, France, September, 5-12, 245–252.
- GUILLEY, E., HERVÉ, J.-C., HUBER, F., and NEPVEU, G., 1999: Modelling variability of within-ring density components in *Quercus petraea* LIEBL. with mixed-effect models and simulating the influence of contrasting silvicultures on wood density. *Annales de Sciences Forestiers*, 56, 449–458.
- HAARS, A., CHET, I. und HÜTTERMANN, A., 1981: Effect of phenolic compounds and tannin on Growth and laccase activity of *Fomes annosus*. *European Journal of Forest Pathology*, 11, 67–76.
- HAINES, D. and LEBAN, J.-M., 1999: A model for Norway spruce branch stiffness variation – implications on branch modeling. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”, La Londe-Les-Maures, France, September 5-12, 29–34.
- HAPLA, F. und SABOROWSKI, J., 1994: Quantifizierung der Kernvolumina von Nadelbäumen mit obligatorischer Farbkernholzbildung. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 52, 205–209.
- HARI, P., 1985: Theoretical aspects of eco-physiological research. In: TIGERSTEDT, P. M. A., PUTTONEN, P., and KOSKI, V. (Eds.): *Crop physiology of forest trees. Proceedings of an International Conference on Management of Forest Trees as Cultivated Plants*, University of Helsinki, 21–30. [zitiert nach PRETZSCH 1992]
- HASENAUER, H., 1994: Ein Einzelbaumsimulator für ungleichaltrige Fichten-Kiefern- und Buchen-Fichtenmischbestände. *Forstliche Schriftenreihe der Universität für Bodenkultur, Wien*, 8, 152 S.
- HASENAUER, H., 1997: Dimensional relationships of open-grown trees in Austria. *Forest Ecology and Management*, 96, 197–206.
- HASSEBRAUK, K., NIEMANN, E., SCHUMANN, G. und ZYCHA, H., 1962: Basidiomycetes. In: SORAUER, P., APPEL, O., BLUNCK, H., RADEMACHER, B. und RICHTER, H. (Hrsg.), 1962: *Handbuch der Pflanzenkrankheiten*. Parey-Verlag, Berlin, S. 619–655.
- HECKER, M., RESSMANN, J., BECKER, G. und MERFORTH, C., 2000: Prognose der Schnittholz-Qualität auf der Grundlage der Rundholzsortierung. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 58, 168–176.
- HENDRICH, CH., 2000: Ein kybernetisches Licht-Biomasse-Modell für Fichten-Buchen-Mischbestände. Dissertation an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Technischen Universität München, Buchverlag, Gräffelfing, 188 S.
- HENRIKSEN, H. A. und JØRGENSEN, E., 1952: Rodfordaerverangreb i relation til udhugningsgrad. [*Fomes annosus* attack in relation to grade of thinning.], (dänisch mit englischer Zusammenfassung). *Det Forstlige Forsøgsvæsen i Danmark*, 21, 215–252.
- HENRIKSSON, J., 2001: Differential shading of branches or whole trees: survival, growth, and reproduction. *Oecologia*, 126, 482–486.
- HERVÉ, J.-C., 1999: Mixed-effects modelling of between-tree and within-tree variations application to wood basic density in the stem. In: *Product properties prediction- improved utilization in the forestry-wood chain applied on spruce sawnwood. Task A2: Tree and stand properties modelling, Final report sub-task A2.1 Modelling stem properties distribution, Part two: FAIR CT 96-1915*, 24–42.

- HKS, 1969: Handelsklassensortierung von Rohholz – definiert im Gesetz über gesetzliche Handelsklassen für Rohholz vom 25.2.1969 und in der Verordnung über gesetzliche Handelsklassen von Rohholz vom 31.7.1969 geändert am 6.12.1973. In: BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (Hrsg.), 1977: Rohholzsortierungsbestimmungen für den Gebrauch im bayerischen Staatswald, München, 32 S.
- HOLDENRIEDER, O. and GREIG, B. J. W., 1998: Biological Methods of Control. In: WOODWARD, S., STENLID, J., KARJALAINEN, R. and HÜTTERMANN, A. (Eds.), 1998: *Heterobasidion annosum* – Biology, Ecology, Impact and Control. Wallingford: CABI, 235–258.
- HOLLAND, J. H., 1962: Outline for a logical theory of adaptive systems. JACM 9: 297–317.
- HOLLAND, J. H., 1975: Adaption in Natural and Artificial Sytems. The University of Michigan Press, Ann Arbor.
- HORN, H. S., 1971: The adaptive geometry of trees. Monographs in Population Biology (3), 1–144.
- HOULLIER, F., LEBAN, J.-M., and COLIN F., 1995: Linking growth modelling to timber quality assessment for Norway spruce. Forest Ecology and Management, 74, 91–102.
<http://www.fbva.bmlf.gv.at/inst4/integrierter-fs/windwurf/wurzelfaeule.html>
- HÄRDLE, W., 1990: Applied Nonparametric Regression. Econometric Society Monographs, 19, 333 pp.
- HUBER, B., 1928: Weitere quantitative Untersuchungen über das Wasserleitsystem der Pflanzen. Jahrbuch der wissenschaftlichen Botanik 67, 877–959.
- HUSE, K. J. and VENN, K., 1994: Vertical spread of *Heterobasidion annosum* in stems of Norway spruce. In: JOHANSSON, M. and STENLID, J. (Eds.) 1994: Proceedings of the Eighth International Conference on Root and Butt Rots. IUFRO Working Party S2.06.01, Uppsala, Sweden, 1993, 208–212.
- ILSTEDT, B. and ERIKSSON, G., 1986: Quality of Intra- and Interprovenance Families of *Picea abies* (L.) KARST. Scandinavian Journal of Forest Research, 1, 153–166.
- JACKE, H., 1995: Planzeiten zur Wertästung der Fichte. Allgemeine Forst Zeitschrift, 1, 49–51.
- JANSEN, M., MARTIN, P.-G., SONNTAG, M., DITZER, T. und BOSSEL, H., 1995: Modellierung von Bestandeswachstum, Stoff- und Energieumsätzen mit TREEDYN am Beispiel Solling F1. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, 45, S. 33.
- JOHANN, K., 1988: Ergebnisse einer Rotfäuleuntersuchung in sehr wüchsigen Fichtenbeständen. FBVA-Berichte – Schriftenreihe der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, 25, 80 S.
- JOHANSSON, K., 1992: Effects of Initial Spacing on the Stem and Branch Properties and Graded Quality of *Picea abies* (L.) KARST. Scandinavian Journal of Forest Research, 7, 503–514.
- JORGENSEN, E., 1961: On the spread of *Fomes annosus* (FR.) CKE. Canadian Journal of Botany, 39, 1437–1445.
- KAHN, M., 1994: Modellierung der Höhenentwicklung ausgewählter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort. Forstliche Forschungsberichte München, 141, 204 S.
- KAHN, M., 1995a: Die Fuzzy-Logic basierte Modellierung von Durchforstungseingriffen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 166 (9/10), 169–176.
- KAHN, M., 1995b: Quasikausale Modellierung des Standort-Leistungs-Bezuges als Voraussetzung zum Aufbau flexibler Mischbestandsmodelle. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 114, 175–187.
- KAHN, M. und PRETZSCH, H., 1997: Das Wachstumsmodell SILVA-Parametrisierung der Version 2.1 für Rein- und Mischbestände aus Fichte und Buche. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 168 (6/7), 115–123.
- KAHN, M., SCHÜTZE, G. und PRETZSCH, H., 1997: Exkursionsführer zur Wuchsreihe Freising FRE 813. Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Technischen Universität München, MWW-EF 104, LMU.06 – München, 25 S.
- KALLIO, T. und NOROKORPI, Y., 1972: [Butt rot in a spruce stand]. Finnisch mit englischer Zusammenfassung. Silva Fennica, 6, 39–51.
- KALLIO, T. and TAMMINEN, P., 1974: Decay of spruce (*Picea abies* (L.) KARST.) in the Åland islands. Acta Forestalia Fennica, 138, 1–42.
- KARKI, L., 1980: Genetically narrow crowned and fine-branched treed are valuable in forestry. Found for tree breed Finland Infosheet, Helsinki, 3, 3 pp. [zitiert nach ZOBEL und JETT 1995]
- KATÓ, F., 1967a: Auftreten und Bedeutung des Wurzelschwammes (*Fomes annosus* [FR.] COOKE) in Fichtenbeständen Niedersachsens. In: ZYCHA, H. und KATÓ, F., 1967: Untersuchungen über die Rotfäule der Fichte. Schriftenreihe der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen, 39, 33–120.

- KATÓ, F., 1967b: Beitrag zur Beurteilung einzelner schwerwiegender Probleme der Fichtenrotfäule. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 6, 348–369.
- KATÓ, F., 1969: Stammfäuleschäden der Fichte – Ein Beitrag zur Schadensberechnung in den staatlichen Fichtenwäldern Niedersachsens mit besonderer Berücksichtigung der Schältschäden des Rotwildes. Forstarchiv, 40, 81–92.
- KELLOMÄKI, S. und KURTIO, O., 1991: A model for the structural development of a Scots pine crown based on modular growth. Forest Ecology and Management, 43, 103–123.
- KENK, G., 1990: Fichtenbestände aus Weitverbänden – Entwicklung und Folgerungen. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 109, 86–100.
- KIVINEN, V.-P. and UUSITALO, J., 2002: Applying fuzzy logic to tree bucking control. Forest Science 48 (4), 673–684.
- KLÄDTKE, J. und YUE, C., 1997: Wachstumsreaktion bei Fichte nach Grünästung. AFZ/Der Wald, 3, 145–151.
- KLEINSCHMITT, J. und SVOLBA, J., 1998: Variation zwischen Fichtenklonen (*Picea abies* KARST.) und Möglichkeiten der Auslese. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 169 (12), 225–229.
- KNOKE, T. und SCHULZ-WENDEROTH, S., 2001: Ein Ansatz zur Beschreibung von Wahrscheinlichkeit und Ausmaß der Farbkernbildung bei Buche (*Fagus sylvatica*). Forstwissenschaftliches Centralblatt, 120, 154–172.
- KNUCHEL, H., 1934: Holzfehler – die Abweichung von der normalen Beschaffenheit des Holzes. Hannover, Schäfer Verlag, 119 S.
- KOLOSOVA, T. and BERESTIZHEVSKY, S., 1998: Programming Techniques for Object-Based Statistical Analysis with SAS Software. p.11
- KORHONEN, K., DELATOUR, C., GREIG, B. J. W. and SCHÖNHAR, S., 1998. Silvicultural Control. In: WOODWARD, S., STENLID, J., KARJALAINEN, R. and HÜTTERMANN, A. (Eds.) 1998: *Heterobasidion annosum* – Biology, Ecology, Impact and Control. Wallingford: CABI, 283–313.
- KÖSTER, E., 1934: Die Astreinigung der Fichte. Mitteilungen aus Forstwirtschaft und Forstwissenschaft, 393–416.
- KOZLOWSKY, T. T. and PALLARDY, S. G., 1997: Growth Control in Woody Plants. Academic Press, San Diego, 641 pp.
- KRAMER, H., 1962: Kronenaufbau und Kronenentwicklung gleichaltriger Fichtenpflanzbestände. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 133(11), 249–256.
- KRAMER, H. 1963: Der Einfluss von Großklima und Standort auf die Entwicklung von Waldbeständen am Beispiel langfristig beobachteter Versuchsflächen von Douglasie, Fichte, Buche und Eiche. Schriftenreihe der Forstlichen Universität Göttingen und Mitteilungen der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Frankfurt am Main, 31/32.
- KRAMER, H., 1976: Grünästung und Düngung bei Fichte, Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 147 (2/3), 25–33.
- KRAMER, H., 1988: Waldwachstumskunde – Ökologische und anthropogene Einflüsse auf das Wachstum des Waldes, seine Massen- und Wertleistung und die Bestandessicherheit. Parey-Verlag, Hamburg, 374 S.
- KRAMER, H., SAETRE, O.-J., LEONHARDT, J., 1970: Untersuchungen über die Baummerkmale und über den genetischen Einfluß auf das Wachstum bei frei erwachsenen Jungfichten. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 141(2), 30–41.
- KRANIGK, J., 1996: Ein Modell für den Strahlungstransport in Fichtenbeständen. Dissertation an der Georg-August-Universität Göttingen, Cuvillier Verlag, Göttingen, 124 S.
- KREHAN, H., CECH, T. und TOMICZEK, C., 1990: Sturmschäden 1990 – Jeder zweite Baum war faul. Forstschutz aktuell, Wien, 4, 7–8.
- KREHAN, H., CECH, T. und TOMICZEK, C., 1991: Sturmschäden 1990 – Jeder zweite Baum war von Fäulnis befallen. Der Förderungsdienst, Wien, 39 (2), 3.
- KUBLIN, E., 1982: Das Schwarzwälder Einteilprogramm – optimale Ausformung von Nadelstammholz beim Sägewerk. In: Schöpfer, W. (Hrsg.): Neue Wege der Rundholzvermessung im Wald und im Werk. Parey-Verlag, Hamburg, 189–197.
- KUBLIN, E. und SCHARNAGL, G., 1988: Verfahrens- und Programmbeschreibung zum BWI-Unterprogramm BDAT. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg, 87 S.
- KUCHENREUTHER, J., 1996: Rotfäuleentwicklung infolge von Schältschäden am Forstamt Wunsiedel. Diplomarbeit am Fachbereich Forstwissenschaft der Fachhochschule Weihenstephan, 85 S.

- KURTH, W., 2000: Towards universality of growth grammars: Models of Bell, Pagès, and Takenaka revisited. *Annals of Forest Science*, 57, 543–554.
- KÜSTERS, E., 2001: Wachstumstrends der Kiefer in Bayern. Dissertation am Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München, 187 S.
- LAGHDIR, A., JULLIEN, D., GRIL, J., and THIBAUT, B., 1999: Modelling growth stresses related radial cracks in logs. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”, La Londe-Les-Maures, France, September, 5-12, 324–333.
- LAROCQUE, G. R. and MARSHALL, P. L., 1995: Wood Relative Density Development in Red Pine (*Pinus resinosa* AIT.) Stands as Affected by Different Initial Spacings. *Forest Science*, 41, 709–728.
- LAROZE, A., 1985: Simulador de trozado. Informe Interno. Forestal Chile S.A., Concepción, Chile, 36 pp., [zitiert aus LAROZE 1994]
- LAROZE, A., 1994: Development and Comparison of Stand-Level Bucking Optimization Methods. Dissertation at the Oregon State University, 95 pp.
- LÄSSIG, R., 1991: Zum Wachstum von Fichtensolitären [*Picea abies* (L.) KARST.] in Südwestdeutschland. Dissertation an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg im Breisgau, 136 S.
- LE DIZÈS, S., CRUIZIAT, P., LACOINTE, A., SINOQUET, H., LE ROUX, X., BALANDIER, P., and JACQUET, P., 1997: A model for simulating structure-function relationships in walnut tree growth processes. *Silva Fennica*, 31 (3), 313–328.
- LEBAN, J.-M. et DUCHANOIS, G., 1989: SIMQUA – un logiciel de simulation de la qualité du bois. *Annales des Sciences Forestiers*, 47, 483–493.
- LEBAN, J.-M. and JAEGER, M., 1999: Assessment of timber quality in the forest resources by the mean of tree growth and conversion models. A challenge for today. COST E10 Workshop on “Wood Properties for Industrial Use”, Tapada Nacional de Mafra, Portugal, June 13-15, 1–10.
- LEBAN, J.-M., DHOTE, J.-F., and HERVÉ, J. C., 1999: Modelling past growth and timber quality in forest stands. State-of art in France for Norway spruce. Perspective application for some other softwood species and for Oak stem morphology. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”, La Londe-Les-Maures, France, September 5-12, 478–487.
- LEHTONEN, I., 1978: Knots in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) KARST.) and their effect on the basic density of stemwood. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*, 95 (1), 1–34. [zitiert nach LEWARK 1981]
- LEMIEUX, H., 1995: Morphological Characterization of Knots in Norway Spruce Logs. Master Thesis, Laval University, Quebec, Kanada, 110 pp.
- LEMIEUX, H. and BEAUDOIN, M., 1999: Modelling the sawing and grading of boards while considering knots. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”, La Londe-Les-Maures, France, September 5-12, 410–416.
- LEMIEUX, H., SAMSON, M., and USENIUS, A., 1997: Shape and Distribution of Knots in a Sample of *Picea abies* Logs. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 12, 50–56.
- LEMM, R. und ERNI, V., 1998: Modelle als Hilfsmittel zur Optimierung der Produktionskette „Holz“. In: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (Hrsg.): Forum für Wissen, 51–60.
- LEWANDOWSKI, A. and VON GADOW, K., 1997: A method for reproducing uneven-aged forest stands. Ein heuristischer Ansatz zur Reproduktion von Waldbeständen. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 168(9), 170–174.
- LEWARK, S., 1981: Untersuchungen von Holzmerkmalen junger Fichten (*Picea abies* (L.) KARST.) – Jahrringbreite, Rohdichte und Ästigkeit von Stecklingsklonen. Dissertation Forstliche Fakultät Georg-August-Universität Göttingen, 193 S.
- LIESEBACH, M., 1994: Untersuchung an ausgewählten Herkünften des internationalen Fichtenprovenienzversuchs 1964/68 über den Zusammenhang zwischen Isoenzym-Merkmalen und morphologischen, phänologischen sowie Wachstums-Merkmalen. Dissertation am Fachbereich Biologie der Universität Hamburg, 210 S.

- LINDSTRÖM, H., 1999: Intra-tree models of basic density in Norway spruce (*Picea abies* (L.) KARST.) as an input to simulation software. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the "Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software", La Londe-Les-Maures, France, September 5-12, 168–180.
- LIU, S., BAO, F., and JIANG, Z., 1999: Modelling the relationships between wood properties and quality of veneer and plywood in plantation poplar. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the "Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software", La Londe-Les-Maures, France, September 5-12, 334–340.
- LOHER, F., 2002: Einfluss der Konkurrenz auf Krone, Stamm und Wurzel der Fichte (*Picea abies* [L.] KARST.). Diplomarbeit an der Studienfakultät für Ressourcenmanagement und Forstwissenschaft der Technischen Universität München, 90 S.
- LOHMANN, J., 1992: Die Xylemleitquerschnitte von Fichten (*Picea abies* [L.] Karst.) unterschiedlicher Vitalitätsgrade und Altersklassen. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Band 88, 123 S.
- LUNDQUIST, J. E., SHAW C. G. III, CHEN, C., 1994: Dynamics of root diseases on artificial landscapes. In: JOHANSSON, M. and STENLID, J. (Eds.) 1994: Proceedings of the Eighth International Conference on Root and Butt Rots. IUFRO Working Party S2.06.01, Uppsala, Sweden, 1993. 751–759.
- LUTZ, M., 1998: Operations Research Verfahren verstehen und anwenden. Köln, Fortis Verlag FH, 232 S.
- LYR, H., Schachler, G. und Matschke, J., 1992: Alterung und Lebensdauer. In: Lyr, H., Fiedler, H.-J. und Tranquillini, W. (Hrsg.): Physiologie und Ökologie der Gehölze. Gustav-Fischer-Verlag Jena, 471–496.
- MACHATSCHKE, M., 2000: Wettervorhersage mithilfe des „Fichtenbarometers“. Allgemeine Forst Zeitschrift, 21, 1122–1223.
- MADGWICK, H. A. I., TAMM, C. O., and FU MAO-YI, 1986: Crown development in Young *Picea abies* Stands. Scandinavian Journal of Forest Research, 1, 195–204.
- MAGUIRE, D. A. and HANN, D. W., 1987: A Stem Dissection Technique for Dating Branch Mortality and Reconstructing Past Crown Recession. Forest Science, 33,4, 858–871.
- MAGUIRE, D. A., JOHNSTON, S. R., and CAHILL, J., 1999: Predicting branch diameters on second-growth Douglas-fir from tree-level descriptors. Canadian Journal of Forest Research, 29, 1829–1840
- MÄKELÄ, M., ARI, T., KORHONEN K. und LIPPONEN, K., 1994: Kantokäsittely koneellisessa hakkuussa. [Stump treatment in mechanized timber harvesting.] Metsäteho Katsaus 3, 8 pp. [zitiert nach PRATT et al. 1998]
- MÄKINEN, H., 1999: Effect of stand density on radial growth of branches of Scots pine in southern and central Finland. Canadian Journal of Forest Research, 29, 1216–1224.
- MÄKINEN, H., SARANPÄÄ, P., and LINDER, S., 2001: Effect of Nutrient Optimization on Branch characteristics in *Picea abies* (L.) KARST. Scandinavian Journal of Forest Research, 16, 354–362.
- MANESS, T. C., 1989: A Technique for the Combined Optimization of Log Sawing and Bucking Strategies. Dissertation, University of Washington, 198 pp.
- MAR-MOLLER, C., 1960: The influence of pruning on the growth of conifers. Forestry, 33, 37–53. [zitiert nach OLIVER und LARSON 1990]
- MARSCH, M., 1989. Biomechanische Modelle zur Quantifizierung der Tragfähigkeit von Einzelbäumen und Beständen gegenüber Schnee- und Windbelastung sowie darauf aufbauende Bestandesbehandlungsmaßnahmen mit Hilfe eines Simulationsmodells, dargestellt am Beispiel der Fichte. Dissertation Fakultät für Bau-, Wasser- u. Forstwesen der Technischen Universität Dresden, 384 S.
- MARTIN, B., 1978: Verfahren zur Diagnose von Stammfäulen an Fichte unter besonderer Berücksichtigung des Verfahrens nach SHIGO. Proceedings of the Fifth International Conference on Problems of Root and Butt Rot in Conifers, IUFRO Working Party S2.06.01, Hessische Forstliche Versuchsanstalt, Hannoversch Münden, 348–355.
- MASURA, V., 1998: A mathematical model for neutral sulfite pulping of various broadleaved wood species. Wood Science and Technology, 32 (1), 1–13.
- MASURA, V., 1999: A mathematical model of kraft pulping related to the alkali concentration in the cooking liquor. Wood Science and Technology, 33 (5), 381–389.
- MATTHECK, C., 1992: Design in der Natur – Der Baum als Lehrmeister. Rombach-Verlag, Freiburg, 242 S.

- MENDOZA, G. A. and BARE, B. B., 1986: A two-stage decision model for log bucking and allocation. *Forest Products Journal* 36 (10), 70–74.
- MEREDIEU, C., COLIN, F., and HERVÉ, J.-C., 1998: Modelling branchiness of Corsican pine with mixed-effect models (*Pinus nigra* Arnold ssp. *laricio* (poiret) Maire). *Annales des Sciences Forestiers*, 55, 359–374.
- MEREDIEU, C., DREYFUS, P., SAINT-ANDRÉ, L., and LEBAN, J.-M., 1999: A chain of models from tree growth to properties of boards for *Pinus nigra* ssp. *laricio* Arn.: simulation using CAPSIS and WINEpifn. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”, La Londe-Les-Maures, France, September 5-12, 505–513.
- MERKEL, O., 1967: Der Einfluß des Baumabstandes auf die Aststärke der Fichte. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 138 (6), 113–125.
- MESCHEDERU, M., 1997: Erfassung und Modellierung des Strahlungsangebotes in Fichten-Buchen-Mischbeständen. Sonderheft der Allgemeinen Forst- und Jagdzeitung, 168 (6/7), 115–123.
- METZGER, K., 1893: Der Wind als maßgebender Faktor für das Wachstum der Bäume. *Mündener Forstliche Hefte*, 3, 35–86.
- METZLER, B., 1995: Phytopathologische Untersuchungen an grünteasteten Fichten. *Agrarforschung in Baden-Württemberg. Waldwirtschaft und Waldökologie*, Ulmer, 26, 302–306.
- METZLER, B., 1997: Infektionsrisiko und Überwallungszeit bei grünteasteten Fichten. *Allgemeine Forst Zeitschrift/ Der Wald*, 3, 149–151.
- METZLER, B., Gross, M. und Mahler, G., 1993: Pilzentwicklung in Fichtenholz unter Schutzgasatmosphäre. *European Journal of Forest Pathology*, 23, 281–289.
- MITCHELL, K. J., 1969: Simulation of the growth of even-aged stands of white spruce. *Yale University, School of Forestry, Bulletin* 75, 48 pp.
- MITCHELL, K. J., 1975: Dynamics and Simulated Yield of Douglas-fir. *Forest Science – Monograph*, 17, 1–39.
- MITSCHERLICH, G., 1970: *Wald, Wachstum und Umwelt*. 1. Band: Form und Wachstum von Baum und Bestand. J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, 142 S.
- MITSCHERLICH, G., und VON GADOW, K., 1968: Über den Zuwachsverlust bei der Ästung von Nadelbäumen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 139, 175–184.
- MOOSMAYER, H. U., 1974: Die Bedeutung einiger Zusammenhänge zwischen Standort und Waldwachstum für die Forsteinrichtung. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 145, 11–15.
- MORGAN, J. and CANELL, M. G. R., 1988: Support cost of different branch designs: effect of position, number angle and deflection of laterals. *Tree Physiology*, 4, 303–313.
- MOU, P., MITCHELL, R. J., and JONES, R. H., 1993: Ecological field theory model: a mechanistic approach to simulate plant-plant interactions in southeastern forest ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 23, 2180–2193.
- MÖYKKYNEN, T., MIINA J., PUKKALA, T., VON WEISSENBERG, K., 1998: Modelling the spread of butt rot in a *Picea abies* stand in Finland to evaluate the profitability of stump protection against *Heterobasidion annosum*. *Forest Ecology*, 106, 247–257.
- MÖYKKYNEN, T., MIINA J., PUKKALA, T., 2000: Optimizing the management of a *Picea abies* stand under risk of butt rot. *European Journal of Forest Pathology*, 30, 65–76.
- MÜLLER, F., 2001: Modellierung von Sturm-, Schnee- und Rotfäulerisiko auf Einzelbaumbene. Dissertation am Wissenschaftszentrum für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München. 175 S.
- MÜLLER, G., 1957: Untersuchungen über die Querschnittsform der Baumschäfte. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 76, 34–54.
- MUNDY, J. S., BONFIELD, P. W., DINWOODIE, J. M., and PAXTON, B. H., 1998: Modelling the creep behaviour of chipboard: The rheological approach. *Wood Science and Technology*, 32 (4), 261–272.
- NAGEL, J., ALBERT, M. und SCHMIDT, M., 2001: BWINpro – Programm zur Bestandesanalyse und Prognose. Vorläufiges Handbuch zur Version 6.02. Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, 87 S.
- NAGEL, J., 1994: Ein Einzelbaumwachstumsmodell für Roteichenbestände. *Forst und Holz*, 49 (3), 69–75.

- NAGEL, J., 1999: Konzeptionelle Überlegungen zum schrittweisen Aufbau eines waldwachstumskundlichen Simulationssystems für Nordwestdeutschland. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 128, J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a.M., 122 S.
- NÄGELI, W., 1952: Aufastungsversuche in gleichaltrigen Nadelholzbeständen des schweizerischen Mittellandes. Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen, 28, 271–354.
- NEPVEU, G., 1994: Evaluating the quality of the resource to deliver to wood industry from usual tree measurements: some results gained in that perspective on Norway spruce, Sitka spruce and Douglas fir during an EEC forest project (1991–1994) involving 12 research teams from 8 countries (Belgium, Denmark, France, Germany, Ireland Italy, Sweden, United Kingdom). In: Proceedings of the First IUFRO Workshop “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Softwares”, Hook Sweden, June 13-17, 80–88.
- NEPVEU, G., CONSTANT, T., COLIN, F., Dhôte, J.-F., GUILLEY, E., and LE MOGUÉDEC, G., 1999: Along the chain from the plant to the plank: The experience recently gained in Sessile oak (*Quercus petraea* LIEBL.) by the French connection. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”, La Londe-Les-Maures, France, September 5-12, 514–525.
- NIEMZ, P., BODMER, H.-C., KUCERA, L. J., RIDDER, H.-W., HABERMEHL, A., WYSS, P., ZÜRCHER, E. und HOLDENRIEDER, O., 1988: Eignung verschiedener Diagnosemethoden zur Erkennung von Stammfäulen bei Fichte. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 149, 8, 615–630.
- NILSSON, B., 1968: Studies of the genetical variation of some quality characters in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Research Notes of the Royal College of Forestry, Department of Forest Genetics, 3, 117 pp. [in schwedisch mit englischer Zusammenfassung] {zitiert aus PETERSSON, 1998}
- ÖHMAN, M., 1998: Grade Prediction of *pinus sylvestris* Logs with the Aid of a Radiograph Image of the Log. Scandinavian Journal of Forest Research, 13, 83–89.
- OJA, J., 1997: A comparison between three different methods of measuring knot parameters in *Picea abies*. Scandinavian Journal of Forest Research, 12, 311–315.
- OJA, J., 2000: Evaluation of knot parameters measured automatically in CT-images of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst). Holz als Roh- und Werkstoff, 58 (5), 375–379.
- OLESEN, P. O., 1976: The interrelation between basic density and ringwidth of Norway spruce. Sammenhængen mellem rumtæthed og årringsbredde hos gran. Det forstige Forsogsvæsen i Danmark, 34, 340–359.
- OLISCHLÄGER, K. 1970a: Fichtenfurniere nach Wertästung. Allgemeine Forstzeitschrift, 25, 251–254.
- OLISCHLÄGER, K., 1970b: Zur Wertästung der Fichte. Forstarchiv, 41 (12), 241–245.
- OLIVER, C. D. and LARSON, B. C., 1990: Forest Stand Dynamics. McGraw-Hill Publishing, New York, 467 pp.
- PÄÄTALO, M.-L., PELTOLA, H., and KELLOMÄKI, S., 1998: Modelling the risk of snow damage to forests under short-term snow loading. Forest Ecology and Management, 116, 51–70.
- PAUSCH, R., 2003: Mündliche Information.
- PERSSON, P., 1975: Stormskador på skog – Uppkomstbetingelser och inverkan av skogliga åtgärder. (schwedisch mit englischer Zusammenfassung) Rapport och Uppsala Institut för skogproduktion 36, 294 pp.
- PETERSEN, R. und SPELLMANN, H., 1993: Fichtenverbandsversuch Braunlage 51. Forst und Holz 48 (4), 83–86.
- PETERSSON, H., 1998: Prediction of Branch Variables Related to Timber Quality in *Pinus sylvestris*. Scandinavian Journal of Forest Research, 13, 21–30.
- PETRUNCIO, M., BRIGGS, D., and BARBOUR, J., 1997: Predicting pruned branch stub occlusion in young, coastal Douglas-fir. Canadian Journal of Forest Research, 27, 1074–1082.
- PFREUND, J., 1988: Modellierung der räumlichen Verteilung von Strahlung, Photosynthesekapazität und Produktion in einem Fichtenbestand und ihrer Beziehung zur Bestandesstruktur. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme / Waldsterben, A 39, Göttingen, 163 S.
- PNEUMATICOS, S. M. and MANN, S. H., 1972: Dynamic Programming In Tree Bucking. Forest Products Journal 22 (2), 26–30.
- POMMERENING, A., 2000: Neue Methoden zur räumlichen Reproduktion von Waldbeständen und ihre Bedeutung für forstliche Inventuren und deren Fortschreibung. Allgemeine Forst und Jagdzeitung, 171 (9/10), 164–170.

- PRATT, J. E., 1979a: *Fomes annosus* Butt-Rot of Sitka Spruce – I. Observations on the Development of Butt-Rot in Individual Trees and in Stands. *Forestry*, 52 (1), 11–29.
- PRATT, J. E., 1979b: *Fomes annosus* Butt-Rot of Sitka Spruce – II. Loss of Strength of Wood in Various Categories of Rot. *Forestry*, 52 (1), 31–45.
- PRATT, J. E., JOHANSSON, M. and HÜTTERMANN, A., 1998: Chemical Control of *Heterobasidion annosum*. In: WOODWARD, S., STENLID, J., KARJALAINEN, R. and HÜTTERMANN, A. (Eds.) 1998: *Heterobasidion annosum* – Biology, Ecology, Impact and Control. Wallingford: CABI, 259–282.
- PRESSLER, M., 1865: Das Gesetz der Stammbildung, Leipzig. [zitiert nach ASSMANN, E. 1961]
- PRETZSCH, H., 1985: Wachstumsmerkmale süddeutscher Kiefernbestände in den letzten 25 Jahren. *Forstliche Forschungsberichte München*, 65, 173 S.
- PRETZSCH, H., 1992: Konzeption und Konstruktion von Wuchsmodellen für Rein- und Mischbestände. *Forstliche Forschungsberichte München*, 115, 332 S.
- PRETZSCH, H., 1993: Analyse und Reproduktion räumlicher Bestandesstrukturen. Versuche mit dem Strukturgenerator STRUGEN. *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt*, 114, 87 S.
- PRETZSCH, H., 1995a: Zum Einfluß des Baumverteilungsmusters auf den Bestandeszuwachs. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 166 (9/10), 190–201.
- PRETZSCH, H., 1995b: Analyse und Reproduktion räumlicher Bestandesstrukturen – Methodische Überlegungen am Beispiel niedersächsischer Buchen-Lärchen-Mischbestände. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, 112 (2), 91–117.
- PRETZSCH, H., 1997: Analysis and modeling of spatial stand structures – Methodological considerations based on mixed beech-larch stands in Lower Saxony. *Forest Ecology and Management*, 97, 237–253.
- PRETZSCH, H. 2001: Modellierung des Waldwachstums. Berlin, Parey-Verlag, 341 S.
- PRETZSCH, H. u. KAHN, M., 1996: Wuchsmodelle für die Unterstützung der Wirtschaftsplanung im Forstbetrieb. *Allgemeine Forstzeitschrift*, 25, 1–6.
- PRETZSCH, H. und KAHN, M., 1998: Konzeption und Konstruktion von Wuchs- und Prognosemodellen für Mischbestände in Bayern. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben W28, Teil 2: Konzeption und Konstruktion des Wuchsmodells SILVA 2.2 – Methodische Grundlagen. 279 S.
- PRETZSCH, H. und SEIFERT, S., 1999: Wissenschaftliche Visualisierung des Waldwachstums. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 54 (18), 960–962.
- PRETZSCH, H., KAHN, M. und GROTE, R., 1998: Die Fichten-Buchen-Mischbestände des Sonderforschungsbereiches „Wachstum oder Parasitenabwehr?“ im Kranzberger Forst. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 117, 241–257.
- PRIEHÄUSSER, G., 1958: „Die Fichten-Variationen und -Kombinationen des Bayr. Waldes nach phänotypischen Merkmalen mit Bestimmungsschlüssel.“ *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 77, 151–171.
- PROTZ, C. G., SILINS, U., and LIEFFERS, V. J., 2000: Reduction in branch sapwood hydraulic permeability as a factor limiting survival of lower branches of lodgepole pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 30, 1088–1095.
- PUKKALA, T., 1989: Methods to Describe the Competition Process in a Tree Stand. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 4, 187–202.
- PUKKALA, T. and Kolström, T., 1987: Competition indices and the prediction of radial growth in Scots pine. *Silva Fennica*, 21, 55–67.
- PUKKALA, T. and Miina, J., 1998: Tree-selection algorithms for optimizing thinning using a distance-dependent growth model. *Canadian Journal of Forest Research*, 28, 693–702.
- RECHENBERG, I., 1973: Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. Frommann-Holzboog, Stuttgart, 170 S.
- RECK, P., 2002: Das Baumwachstum von kronenspannungsfrei gewachsenen Fichten (*Picea abies* (L.) KARST.) unter besonderer Berücksichtigung der holztechnologischen Eigenschaften. Dissertation an der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, 288 S.
<http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/639>

- REDFERN, D. B., 1993: The effect of wood moisture on infection of Sitka spruce stumps by basidiospores of *Heterobasidion annosum*. European Journal of Forest Pathology, 23, 218–235.
- REHFUESS, K. E., 1969: Ernährungszustand und Kernfäulebefall älterer Fichtenbestände auf der Schwäbischen Alb. Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung, 19, 6–18.
- REHFUESS, K. E., 1973: Kernfäulebefall und Ernährungszustand älterer Fichtenbestände (*Picea abies* KARST.) im Wuchsgebiet „Baar-Wutach“. Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung, 22, 9–26.
- REMRÖD, J., 1976: Choosing Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) provenances in Northern Sweden – analysis of survival, growth and quality in provenance experiments planted 1951. Research Notes of the Royal College of Forestry, Department of Forest Genetics, Stockholm, 19, 132 pp. [schwedisch mit englischer Zusammenfassung] {zitiert aus PETERSSON, 1998}
- RIEGER, S., 1991: Untersuchungen zur Phasendisposition der Fichte (*Picea abies* (L.) KARST.) gegenüber *Heterobasidion annosum* (FR.) BREF. Dissertation an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München. 151 S.
- RIEGER, S., 1995: Befall der Fichte (*Picea abies*) durch *Heterobasidion annosum* in Abhängigkeit vom Baumalter. European Journal of Forest Pathology, 25, 357–365.
- RJASANOWA, K. und RÖSCH, R., 1995: Baumstammmodelle zur Simulation von Holzmaserungen. Holz als Roh- und Werkstoff, 53, 221–224.
- ROBINSON, A. P. and EK, A. R., 2000: The consequences of hierarchy for modeling in forest ecosystems. Canadian Journal of Forest Research, 30, 1837–1846.
- RÖHLE, H., 1995: Zum Wachstum der Fichte auf Hochleistungsstandorten in Südbayern. Mitteilungen der Staatsforstverwaltung Bayerns, 48, 272 S.
- ROLL-HANSEN, F. und ROLL-HANSEN, H., 1981: Root wound infection of *Picea abies* at three localities in southern Norway. Meddelelser fra Norsk Institutt for Skogforskning, 36 (4), 1–18.
- RUBNER, K., 1910: Das Hungern des Cambiums und das Aussetzen der Jahrringe. Naturwissenschaftliche Zeitschrift für Forst- und Landwirtschaft, 8, 212–262.
- RUBNER, K., 1943: Die praktische Bedeutung unserer Fichtentypen: Ein Vorschlag zur Leistungssteigerung unserer Fichtenbestände. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 65, 232–247.
- RUBNER, M., 1902: Die Gesetze des Energieverbrauchs bei der Ernährung. Deuticke-Verlag, Leipzig-Wien, 426 S.
- RUST, S. und ROLOFF, A., 2001: Warum sterben alte Bäume und Zweige geringer Vitalität? AFZ-Der Wald, 13, 672–673.
- SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, ERNÄHRUNG UND FORSTEN (Hrsg.), 1994: Messung und Sortierung von Rohholz. Dresden, 96 S.
- SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, ERNÄHRUNG UND FORSTEN (Hrsg.), 1997: Messung und Sortierung von Rohholz, Dresden, 96 S. und Anlage.
- SAGL, W., 1995: Bewertung in Forstbetrieben. Berlin, Blackwell-Verlag, 306 S.
- SAINT-ANDRÉ, L. and LEBAN, J.-M., 2000: An elliptical model for tree ring shape in transverse section. Methodology and case study on Norway Spruce. Holz als Roh – und Werkstoff, 58 (5), 368–374.
- SAMSON, M., 1993: Modelling of knots in logs. Wood Science and Technology, 27, 429–437.
- SAUTER, U. H., FAHRBACH, M., 1993: Ästigkeitsverhältnisse und Schnittholzqualität in einem weitständig begründeten Fichtenbestand. Allgemeine Forstzeitschrift, 48 (17), 875–878.
- SCHILL, H., 1993: Triebbildung, Verzweigungsverhalten und Kronenentwicklung junger Fichten und Lärchen, Eco-med-Verlag, Landsberg am Lech, 157 S.
- SCHMID-HAAS, P., 1993a: Assessing the stability of Norway spruce by forest inventories. Proceedings of the IUFRO-Conference on Wind and Wind-Related Damage to Trees. Edinburgh, 14 pp.
- SCHMID-HAAS, P., 1993b: Kronenverlichtung und Sterberaten bei Fichten, Tannen und Buchen. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 112, 32–333.
- SCHMID-HAAS, P., 1994: Kronenverlichtung der Fichte als Indiz für mangelhafte Gesundheit und Stabilität – Fäule in Stützwurzeln als eine der Ursachen. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 145, 371–387.
- SCHMID-HAAS, P. und BACHOFEN, H., 1991 a: Die Sturmgefährdung von Einzelbäumen und Beständen. 142, 477–504.

- SCHMID-HAAS, P. und BACHOFEN, H., 1991b: Ursächliche Zusammenhänge zwischen Nadelverlust, Zuwachs, Sturmgefährdung und Fäule. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 142, 505–512.
- SCHMID-HAAS, P., BAUMANN, E., HOLDENRIEDER, O., KELLER, W., RAMP, B. und STEPIEN, E., 1997: Infektion der Stützwurzeln, Kronenverlichtung und Zuwachs bei Fichten und Tannen. Mitteilungen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald-, Schnee und Landschaft, 72 (2), 129–244.
- SCHMIDT, M., 2001: Prognosemodelle für ausgewählte Holzqualitätsmerkmale wichtiger Baumarten. Dissertation an der Georg-August-Universität Göttingen, 302 S.
- SCHMIDT-VOGT, H., 1972: Studien zur morphologischen Variabilität der Fichte (*Picea abies* [L.] KARST.), Allg. Forst- und Jagdztg. 143, 133–144, 177–186, 221–240.
- SCHMIDT-VOGT, H., 1977: Nachkommenschaftsprüfung deutscher Fichten-Erntereviere, Allg. Forstz. 32, Sonderbeilage H. 28, 26–30.
- SCHMIDT-VOGT, H., 1986: Die Fichte – Band II/1, 2. Auflage, Parey-Verlag, Hamburg, 663 S.
- SCHMIDT-VOGT, H., 1987: Die Fichte – Band I., 2. Auflage, Parey-Verlag, Hamburg, 647 S.
- SCHMIDT-VOGT, H., 1989: Die Fichte – ein Handbuch in zwei Bänden. Hamburg, Berlin, Parey, Bd. II, S. 151–153.
- SCHNECK, O., KOCH, M., OTT, J. und STELZER M., 1994: Lexikon der Betriebswirtschaft. Beck-Verlag, München, 755 S.
- SCHÖBER, R., 1988: Einfluss der Provenienz auf die Ertragsleistung. In: KRAMER, H.: Waldwachstumskunde – Ökologische und anthropogene Einflüsse auf das Wachstum des Waldes, seine Massen- und Wertleistung und die Bestandessicherheit. Parey Verlag, Hamburg, 134–138.
- SCHÖNHAR, S. 1969: Untersuchungen über das Vorkommen von Rotfäulepilzen in Fichtenbeständen der schwäbischen Alb. Mitteilungen des Vereins für forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung, 19, 20–28.
- SCHÖPF, J., 1954: Untersuchungen über Astreinigung der Selber Kiefer. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 73, 275–290.
- SCHULZ, H., 1961: Die Beurteilung der Qualitätsentwicklung junger Bäume. Forstarchiv, 32 (5), 89–99.
- SCHUMACHER, P., 1993: Qualitätsvergleich zwischen nordischem und bayerischem Fichtenschnittholz. Dissertation an der Ludwig-Maximilians-Universität München. 169 S.
- SCHUMACHER, P., 1999: Mündliche Information.
- SCHUMACHER, P., RITTER, U., SCHULZ, H. und WEGENER, G., 1997: Qualitätssortierung von Fichtenstammholz nach dem Europäischen Normentwurf prEN 1927-1 (1). Holz-Zentralblatt, 74, 1137–1138.
- SCHÜTT, P., SCHUCK, H. J. und STIMM, B. (Hrsg.), 1992: Lexikon der Forstbotanik. Ecomed-Verlag, Landsberg am Lech, 581 S.
- SCOTTI, R., 1999: Modelling the influence of silviculture on branching and taper functions in Italian Douglas fir plantations. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”, La Londe-Les-Maures, France, September 5-12, 72–82.
- SEELING, U., 2001: Merkmale und verwendungsbezogene Eigenschaften des Holzes der Fichte (*Picea abies* (L.) KARST.) bei Überführung von einschichtigen Reinbeständen in strukturierte Mischbestände. Habilitationsschrift an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 520 S.
- SEIFERT, S., 1998: Dreidimensionale Visualisierung des Waldwachstums. Diplomarbeit im Fachbereich Informatik der Fachhochschule München in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Ludwig-Maximilians-Universität München, 133 S.
- SEIFERT, T., SCHERMER, R. und PRETZSCH, H. 2002: Das Baumwachstum von kronenspannungsfrei gewachsenen Fichten, unter besonderer Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Stammholzeigenschaften und die forstökonomischen Konsequenzen. Abschlussbericht zu einem Forschungsvorhaben am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der TU München. 86 S. plus Anhang.
- SEKTION ERTRAGSKUNDE IM DVFFA, 2000: Empfehlungen zur Einführung und Weiterentwicklung von Waldwachstumssimulatoren. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 171 (3), 52–57.
- SESSIONS, J., OLSEN, E., and GARLAND, J., 1989: Tree Bucking for Optimal Stand Value with Log Allocation Constraints. Forest Science 35 (1), 271–276.

- SHAIN, L., 1971: The response of sapwood of Norway spruce to infection by *Fomes annosus*. *Phytopathology*, 61, 301–307.
- SHAIN, L. and HILLIS, W. E., 1971: Phenolic extractives in Norway spruce and their effects on *Fomes annosus*. *Phytopathology*, 61, 841–845.
- SHAW, C. G. und EAV, B. B., 1993: Modeling Interactions. In: Schowalter, T. D. und Filip, G. M.: *Beetle-Pathogen interactions in conifer forests*. Academic Press, London, 199–208.
- SHIGO, A. L. und MARX, H. G., 1977: Compartmentalization of decay in trees. *USDA Forest Service Agricultural Information Bulletin*, 405, 73 pp.
- SHINOZAKI, K., K. YODA, HOZUMI, K., and KIRA, T., 1964a: A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory: I. Basic analyses. *Japanese Journal of Ecology* 14 (3): 97–105.
- SHINOZAKI, K., K. YODA, HOZUMI, K., and KIRA, T., 1964b: A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory: II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. *Japanese Journal of Ecology* 14 (4): 133–139.
- SHUGART, H. H., 1984: *A Theory of Forest Dynamics. The Ecological Implications of Forrest Succession Models*. Springer Verlag New York, Berlin, Heidelberg, Tokio. 278 pp.
- SIERPINNSKI, Z., 1969: [The economic importance of secondary pests in Scots pine on former agricultural land]. *Prace Instytutu Badawczego Lesnictwa* 373/375, 109–480
- SINNER, K. F. und REHFUESS, K.-E., 1972: Wirkungen einer *Fomes annosus* Kernfäule auf den Ernährungszustand älterer Fichten. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 143 (3/4), 74–80.
- SIOSTRZONEK, E., 1958: Radialzuwachs und Flächenzuwachs: Genauere Bestimmung des Grundflächenzuwachses mit Bohrspänen und Stammscheiben. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 77, 237–254.
- SLOBODA, B., GAFFREY, D. und MATSUMURA, N., 1997: Erfassung individueller Baumschaftformen und ihrer Dynamik durch Spline-Funktionen und Verallgemeinerung durch lineare Schaftformmodelle. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 169 (2), 29–39.
- SMALTSCHINSKI, T., 1983: Individuelle Baumschaftform und Cubische Spline Interpolation. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 155 (7/8), 193–197.
- SMITH, W. G. and HARRELL, C., 1961: Linear programming in log production. *Forest Products Journal* 11 (1), 8–11.
- Sortiermerkblätter für Stammholz: Stand Okt. 1988, vereinbart zwischen der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg und den Baden-Württembergischen Sägewerksverbänden.
- SPATHELF, P., 1998: Orientierungshilfe zur Prognose und Steuerung des Wachstums von Fichten (*Picea abies* (L.) KARST.) und Tannen (*Abies alba* MILL.) in Überführungswäldern mit Hilfe der relativen Kronenlänge. *Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung*, 4, 192 S.
- SPRUGEL, D. G., 2002: When branch autonomy fails: Milton's Law of resource availability and allocation. *Tree Physiology*, 22, 1119–1124.
- SPRUGEL, D. G., HINCKLEY, T. M., and SCHAAP, W., 1991: The theory and practice of branch autonomy. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 22, 309–334.
- STEFFEN, A., JANSSEN, A. und KRUSE, K., 2001: Analyse der Herstellung von MDF mit Hilfe von statistischer Prozeßmodellierung. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 58 (6), 419–431.
- STENLID, J. and WÄSTERLUND, I., 1986: Estimating the frequency of stem rot in *Picea abies* using an increment borer. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1, 303–308.
- STENLID, J. und REDFERN, D. B., 1998: Spread within the Tree and Stand. In: WOODWARD, S., STENLID, J., KARJALAINEN, R. and HÜTTERMANN, A. (Eds.) 1998: *Heterobasidion annosum – Biology, Ecology, Impact and Control*. Wallingford: CABI, 125–141.
- STERBA, H., SCHWEIGER, J., GOLSER, M. und HASENAUER, H. 1997. Modelle für das Aufkommen und Wachstum der Naturverjüngung. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, 114, 11–33.
- STEYRER, G., 1992: Ausmaß und Bewertung von Stammfäulen in einem Fichtenforstbetrieb. Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur, Wien. [zitiert nach DIMITRI und TOMICZEK 1998]
- STEYRER, G., 1999: Bruch- und Wurfgefahr bei Wurzelfäule. Ergebnisse eines Umziehversuches an Fichten. *Forstliche Bundesversuchsanstalt, Wien, Internet*, 4 S.;
- STEYRER, G. und TOMICZEK, C., 1998: Höhere Sturmschadensgefahr durch Wurzelfäule. *Österreichische Forstzeitung*, 109 (4), 19.

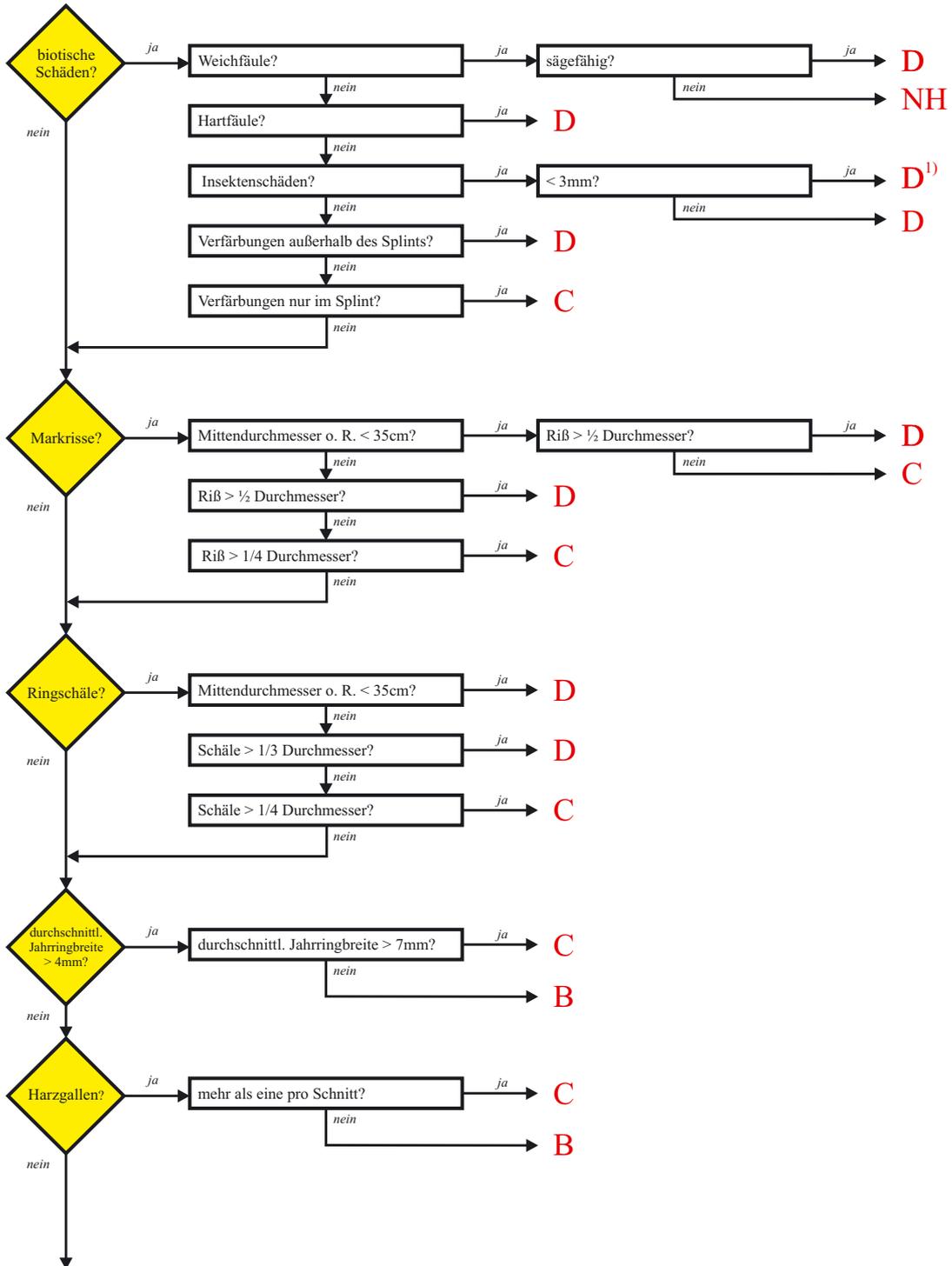
- STROBEL, G., 1997: Rottenstruktur und Konkurrenz im subalpinen Fichtenwald – eine modellhafte Betrachtung. Beiheft zur Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen, 81, 203 S.
- STÖCKER, H. (Hrsg.), 1999: Taschenbuch mathematischer Formeln und moderner Verfahren. Harri Deutsch-Verlag, Frankfurt am Main, S. 308.
- STOLL, P. and SCHMID, B., 1998: Plant foraging and dynamic competition between branches of *Pinus sylvestris* in contrasting light environments. *Journal of Ecology*, 86, 934–945.
- STRUCK, G. and DOHRENBUSCH, A., 2000: Development of a new branchiness index ASIX – A simple tool to describe branchiness in young deciduous forest stands. *Annals of Forest Science*, 57, 811–818.
- SVENSSON, S. und MARTENSSON, A., 1999: Simulation of drying stresses in wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 57, 129–136.
- TAINTER, F. H. und BAKER, F. A., 1996: Root Systems Decay. In: TAINTER, F. H. und BAKER, F. H.: *Principles of Forest Pathology*. John Wiley & Sons, New York, 392–410.
- TAMMINEN, P., 1985: Butt rot in Norway spruce in southern Finland. *Commun. Inst. Fenn.*, 127, 1–52.
- TECK, R., MOEUR, M. und EAV, B., 1996: Forecasting Ecosystems with the Forest Vegetation Simulator. *Journal of Forestry*, 94, 7–10.
- TIPPETT, J. T. und SHIGO, A. L., 1981: Barriers to decay in conifer roots. *European Journal of Forest Pathology*, 11, 51–59.
- TODOROKI, C. L., 1990: AUTOSAW system for sawing simulation. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 20 (3), 332–348.
- TOMICZEK, C., 1990: Forstpathologische Erhebungen im Gebiet der Glein (III), Wurzel- und Stammfäulen – eine mögliche Ursache von Nährelementmangel in Fichtennadeln. *Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien*, 163 (3), 71–97.
- TOMICZEK, C. 1994: Nutrient deficiency of spruce needles caused by root- and butt rots – a factor in forest decline. In: JOHANSSON, M. and STENLID, J. (Eds.) 1994: *Proceedings of the Eighth International Conference on Root and Butt Rots*. IUFRO Working Party S2.06.01, Uppsala, Sweden, 1993, 181–193.
- TOMICZEK, C. und STEYRER, G., 1998: Erhöhte Sturmgefahr durch Wurzelfäule. *Ergebnisse eines Umziehversuches an Fichten*. *Baum-Zeitung, Minden*, 32 (2), 56–58.
- TREDWELL, T., 1973: Visual Stress Grading of Timber. Explanation and practical interpretation of the visual grading elements of BS 4978: Timber grades for structural uses. *Timber Research and Development Association*, 31pp. [zitiert nach LEBAN et al. 1999]
- TRENDELENBURG, R. und MAYER-WEGELIN, H., 1955: *Das Holz als Rohstoff*. München, Carl Hanser-Verlag, 541 S.
- ULRICH, B., 1999: Entwicklungsprognosen für Waldökosysteme aus der Sicht der Hierarchitätstheorie. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 118, 118–126.
- USENIUS, A., 1999: Wood conversion chain optimization. In: NEPVEU, G. (Ed.): *Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”*, La Londe-Les-Maures, France, September 5-12, 541–548.
- UTSCHIG, H., 2000: Wachstumstrends der Fichte in Bayern. *Mitteilungen der Bayerischen Staatsforstverwaltung*, 49, 170 S.
- UTSCHIG, H. und STIMM, B., 1994: Der Kiefern-Provenienzversuch Hagenbach acht Jahrzehnte nach seiner Begründung. *Forst und Holz*, 49 (5), 115–122.
- VÄISÄNEN, H., KELLOMÄKI, S., OKER-BLOM, P., and VALTONEN, E., 1989: Structural Development of *Pinus sylvestris* Stands with Varying Initial Density: A Preliminary Model for Quality of Sawn Timber as Affected by Silvicultural Measures. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 4, 223–238.
- VAN LAAR, A., 1976: Single-Tree Parameters of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) KARST.) in Relation to Site and Environment. *Forschungsberichte der Forstlichen Forschungsanstalt München*, 30, 88 pp.
- VESTØL, G. I., 1998: Single-tree Models of Knot Properties in Norway Spruce (*Picea abies* (L.) KARST.). Enkelt-tre modeller for kvistegenskaper i gran (*Picea abies* (L.) KARST.). Doctor Scientiarum Theses 1998: 34 Norges Landbrukshøgskole, Institutt for skogfag, ÅS, 1998, 34, 1–17.
- VESTØL, G. I., COLIN, F., and LOUBÈRE, M., 1999: Influence of progeny and initial stand density on the relationship between diameter at breast height and knot diameter of *Picea abies* (L.) KARST. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14, 470–480.

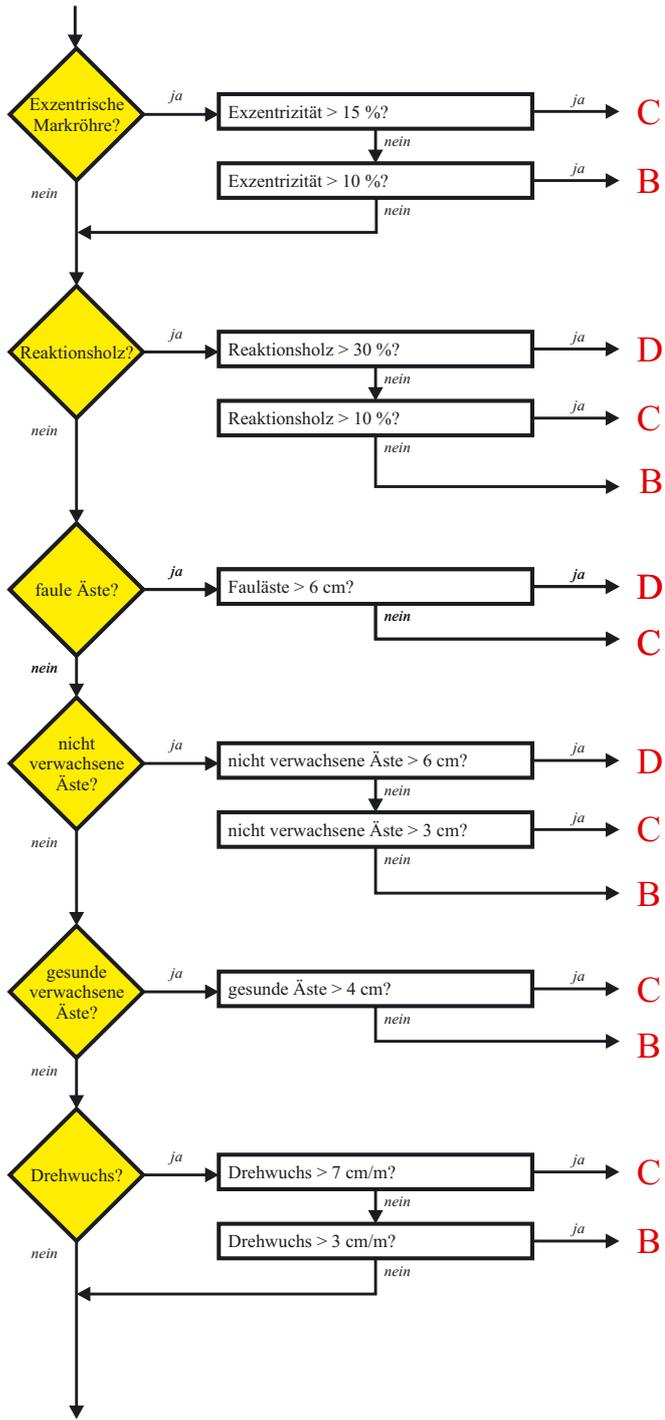
- VON DROSTE ZU HÜLSHOFF, B., 1969: Struktur und Biomasse eines Fichtenbestandes auf Grund einer Dimensionsanalyse an oberirdischen Baumorganen. Dissertation an der Hohen Staatswirtschaftlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München, 178 S.
- VON GUTTENBERG, A., 1915: Wachstum der Fichte im Hochgebirge. Franz Deuticke Verlag, Wien, 153 S.
- VON PECHMANN, H. und VON AUFESESS, H., 1971: Untersuchungen über die Erreger von Stammfäulen in Fichtenbeständen. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 90, 259–284.
- VON PECHMANN, H., SCHAILE, O., 1955: Die Auswirkungen der waldbaulichen Behandlung auf die Holzeigenschaften der Fichte – untersucht am Beispiel einiger oberschwäbischer Fichtenbestände. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 74, 305–318.
- VON PECHMANN, H., VON AUFESESS, H. und REHFUESS, K.-E., 1973: Ursachen und Ausmaß von Stammfäulen in Fichtenbeständen auf verschiedenen Standorten. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 92, 68–89.
- VON WEISSENBERG, K., 1978: Resistance of *Picea abies* to *Heterobasidion annosum*. Proceedings of the Fifth International Conference on Problems of Root and Butt Rot in Conifers of the IUFRO Working Party S2.06.01, August 7-12, Kassel, Germany, 67–74.
- WAGNER, S., 1994: Strahlungsschätzung in Wäldern durch hemisphärische Fotos. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, 123, 166 S.
- WALENTOWSKI, H., GULDER, H.-J., KÖLLING, C., EWALD, J. und TÜRL, W., 2001: Regionale natürliche Waldzusammensetzung Bayerns. Karte als Beilage in LWF aktuell, 31.
- WANGLER, F., 1974: Die Sturmgefährdung der Wälder in Südwestdeutschland. Eine Waldbauliche Auswertung der Sturmkatastrophe 1967. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, 126 S.
- WENK, G. und GEROLD, D., 1984: Die neue DDR-Fichtenertragstafel und Hinweise für die Einführung in die Praxis. Sozialistische Forstwirtschaft, 34, 338–340.
- WENK, G., RÖMISCH, K. und GEROLD, D., 1985: DDR-Fichtenertragstafel 1984. Technische Universität Dresden, Sektion Forstwirtschaft, Tharandt.
- WERNER, H., 1971: Untersuchungen über die Einflüsse des Standorts und der Bestandesverhältnisse auf die Rotfäule (Kernfäule) in Fichtenbeständen der Mittleren Alb. Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung, 20, 9–49.
- WERNER, H., 1973: Untersuchungen über die Einflüsse des Standorts und der Bestandesverhältnisse auf die Rotfäule (Kernfäule) in Fichtenbeständen der Ostalb. Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung, 22, 27–64.
- WERNSDÖRFER, H., 2001: Untersuchung über die Bildung von Reaktionsholz und Harzgallen in besonders weitständig erwachsenen, geasteten Fichten (*Picea abies* (L.) KARST.) – unter Anwendung eines digitalen Bildverarbeitungsverfahrens. Diplomarbeit am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. 115 S.
- WHITE, D. A., 1994: Breakdown of barrier zones and prediction of the spread of discolouration and decay resulting from stem wounds in *Eucalyptus regnans* and *E. obliqua*. European Journal of Forest Pathology, 24, 71–78.
- WIEDEMANN, E., 1936/42: Fichten-Ertragstafel. In: SCHÖBER, R. 1975: Ertragstafeln wichtiger Baumarten, Frankfurt am Main.
- WILHELMSSON, L., ARLINGER, J., and SPÄNBERG, K., 1999: Modelling *Pinus sylvestris* and *Picea abies* within- and between-tree variation in some wood properties. Functions based on annual rings and diameters for application at the planning stage and in tree harvesters. In: NEPVEU, G. (Ed.): Proceedings of the third IUFRO workshop on the “Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Software”, La Londe-Les-Maures, France, September 5-12, 186–194.
- WINKLER, 1930: Natürliche Astreinigung. Der praktische Forstwirt für die Schweiz. [zitiert nach KÖSTER 1934]
- WOODWARD, S., STENLID, J., KARJALAINEN, R. and HÜTTERMANN, A. (Eds.) 1998: *Heterobasidion annosum* – Biology, Ecology, Impact and Control. Wallingford: CABI, 589 pp.
- WU, H., SHARPE, P., WALKER, J., and PENRIDGE, L. K., 1985: Ecological Field Theory: A Spatial Analysis of Resource Interference Among Plants. Ecological Modelling, 29, 215–243.
- WYKOFF, W. R., CROOKSTON, N. L. und STAGE, A. R., 1982: Users Guide to the Stand Prognosis Model. USDA Forest Service, GTR-INT-133, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah, 112 pp.

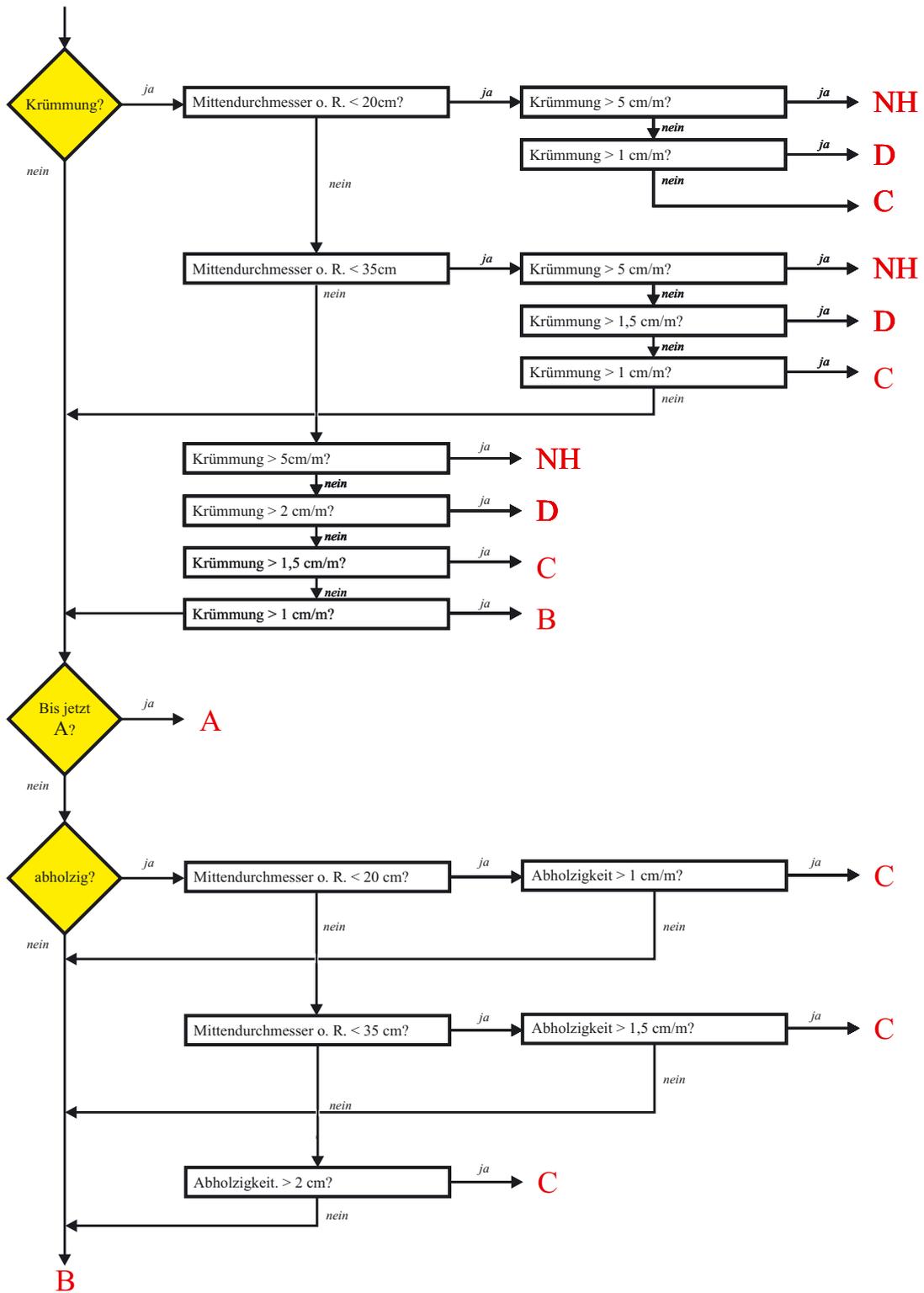
- YAMAMOTO, H., 1999: A model of the anisotropic swelling and shrinking process of wood. Part 1. Generalization of Barber's wood fiber model. *Wood Science and Technology*, 33 (4), 311–325.
- ZAR, J. H., 1984: *Biostatistical Analysis*. New Jersey, Prentice Hall, S. 441 f.
- ZOBEL, B. J. and JETT, J. B., 1995: *Genetics of Wood Production*, Springer-Verlag, Berlin, 337 pp.
- ZOBEL, B. J. and VAN BUIJTENEN, J. P., 1989: *Wood Variation – Its causes and control*. Springer-Verlag, Berlin, 363 pp.
- ŽUMER, M., 1966: Astungsversuche an Föhre, Fichte, Birke, Aspe, Esche und Eiche. Kvistingsforsøk med fur, gran, bjørk, osp, ask, og eik. *Meddelelser fra det Norske Skogforsøgsvesen*, 20 (77), 399–581.
- ZYCHA, H., 1962: Hymenomyces. In: SORAUER, P., APPEL, O., BLUNCK, H., RADEMACHER, B. und RICHTER, H. (Hrsg.), 1962: *Handbuch der Pflanzenkrankheiten – Parey-Verlag, Berlin*, 550–575.
- ZYCHA, H., 1967: Die Beurteilung des Rotfäulebefalls in Fichtenbeständen. In: ZYCHA, H. und KATÓ, F., 1967: *Untersuchungen über die Rotfäule der Fichte. Schriftenreihe der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen*, 39, 1–31.
- ZYCHA, H., 1967: Die Rotfäule der Fichte. In: ZYCHA, H., AHRBERG, H., COURTOIS, H., DIMITRI, L., LIESE, W., PEEK, R.-D., REHFUESS, K. E., SCHLENKER, G., VON SCHNURBEIN, U. und SCHWANTES, H. O., 1976: *Der Wurzelschwamm (*Fomes annosus*) und die Rotfäule der Fichte (*Picea abies*)*. Beiheft zum Forstwissenschaftlichen Centralblatt 36, 6–13 S.
- ZYCHA, H. und DIMITRI, L., 1968: Ausmaß und Ursache der Kernfäule in einer Fichtenprobefläche in Reinhausen (Niedersachsen). *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 87, 331–341.
- ZYCHA, H. und ULRICH, B., 1969: Die Rotfäule der Fichte. *Forstarchiv*, 40 (11), 209–212.
- ZYCHA, H., DIMITRI, L. und KLIEFOTH, R., 1970: Ergebnis objektiver Messungen der durch *Fomes annosus* verursachten Rotfäule in Fichtenbeständen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 141 (4), 66–73.

Anhang A

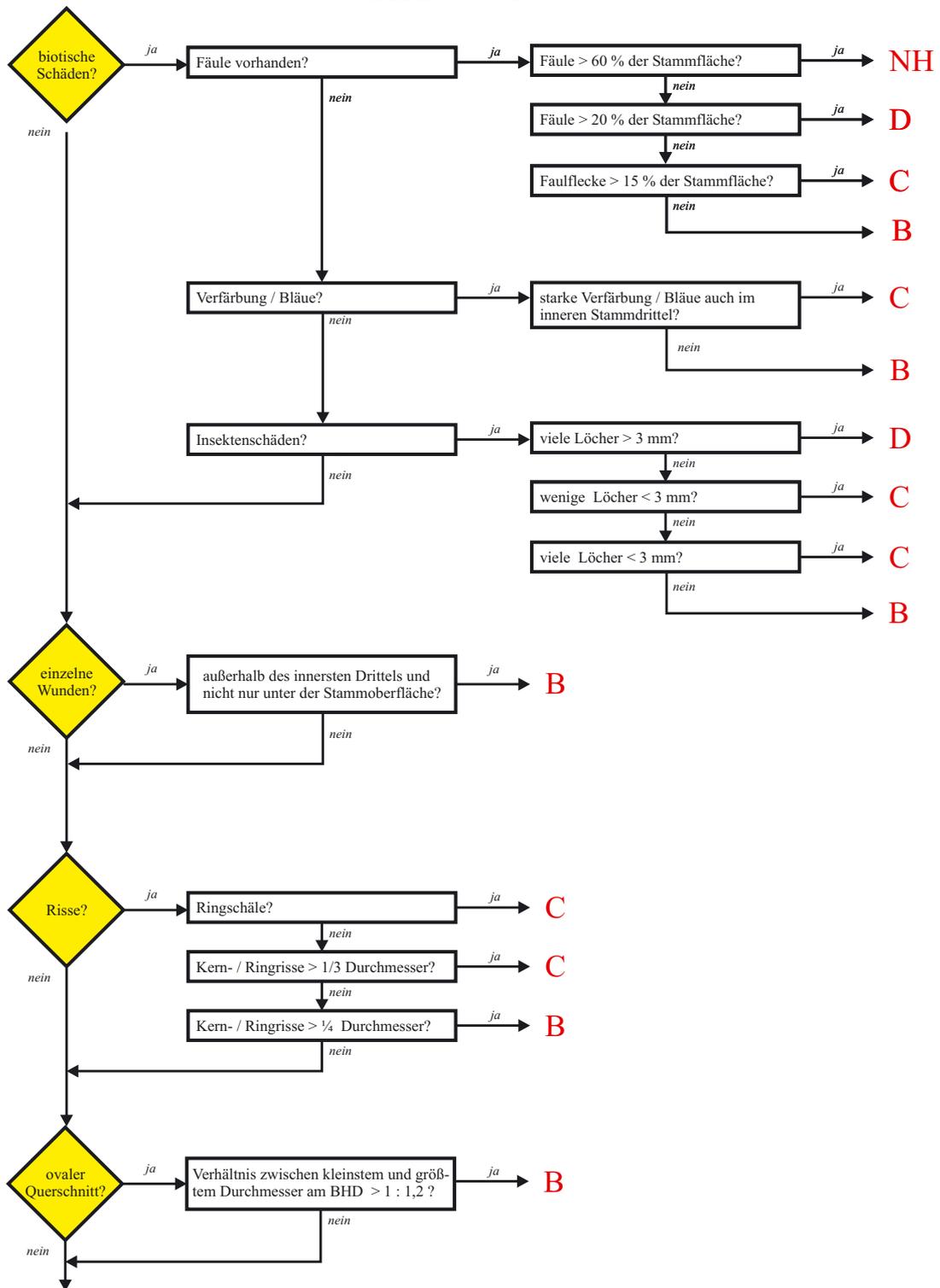
CEN-Sort

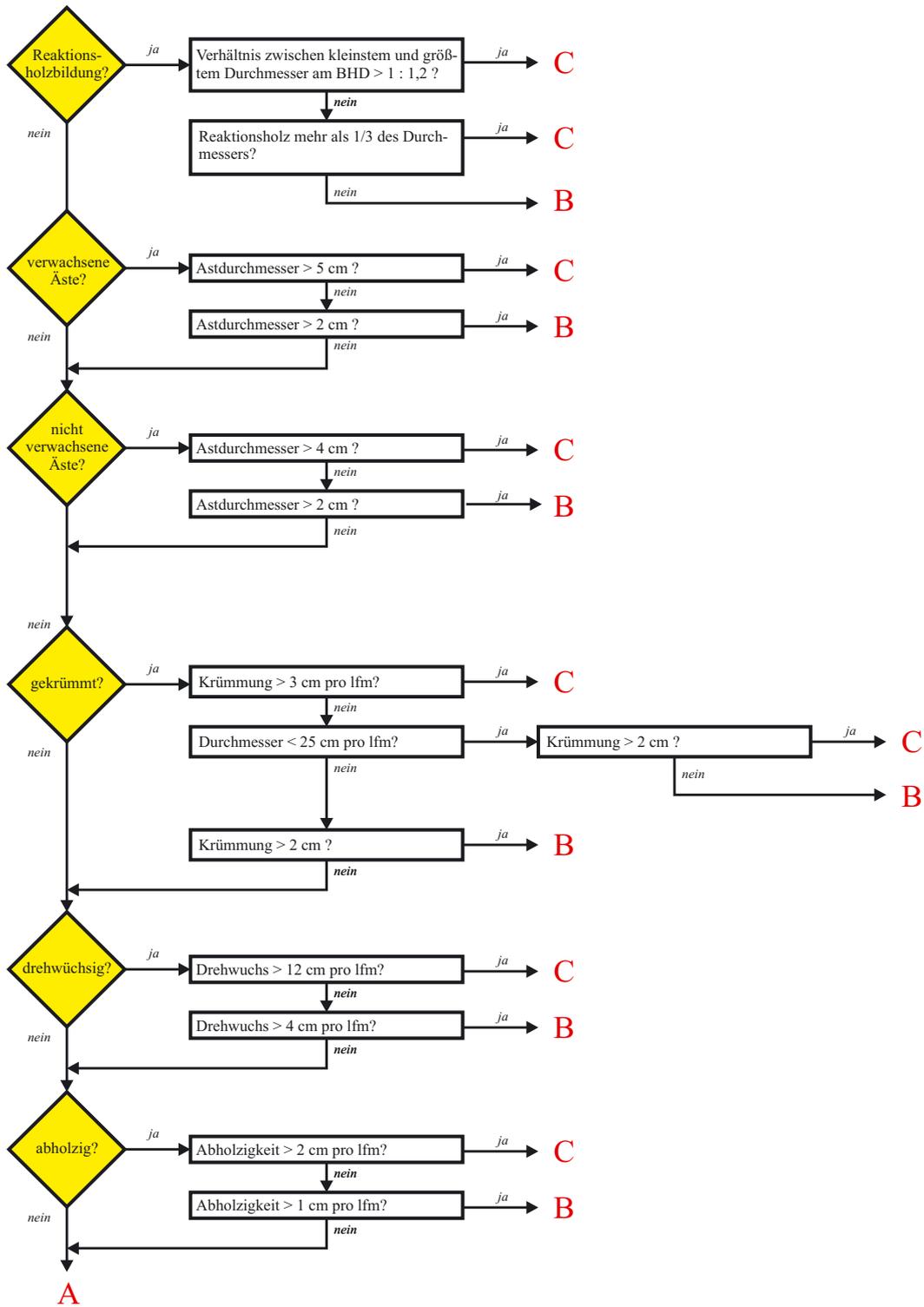






HKS-Sort





Anhang B

Tabelle B-1: Preise für Stammholz Güteklasse A (HKS)

Güte	Stärke	Preis DM	Preis €
A	0b		
A	1a		
A	1b		
A	2a		
A	2b	180	92,03
A	3a	204,49	104,55
A	3b	219,23	112,09
A	4	223,7	114,38
A	5	255,06	130,41
A	6	289,83	148,19

Tabelle B-2: Preise für weitere Güteklassen (HKS)

Baumart	Sorte	Güte	Stärke	Preis DM	Preis €
Fichte	L	B	0b	53	27,09
Fichte	L	B	1a	74,36	38,02
Fichte	L	B	1b	96,6	49,09
Fichte	L	B	2a	107,15	54,78
Fichte	L	B	2b	113,66	58,11
Fichte	L	B	3a	117,46	60,05
Fichte	L	B	3b	118,92	60,8
Fichte	L	B	4	122,56	62,66
Fichte	L	B	5	144,94	74,11
Fichte	L	B	6	163,42	83,55
Fichte	L	C	0b	84,54	43,22
Fichte	L	C	1a	57,57	29,44
Fichte	L	C	1b	78,76	40,27
Fichte	L	C	2a	90,13	46,08
Fichte	L	C	2b	99,24	50,74
Fichte	L	C	3a	103,69	53,02
Fichte	L	C	3b	104,11	53,23
Fichte	L	C	4	107,36	54,89
Fichte	L	C	5	116,29	59,46
Fichte	L	C	6	114,01	58,3
Fichte	L	D	0b	5	2,56
Fichte	L	D	1a	48,04	24,56
Fichte	L	D	1b	57	29,14

Tabelle B-2: Preise für weitere Güteklassen (HKS) (Forts.)

Baumart	Sorte	Güte	Stärke	Preis DM	Preis €
Fichte	L	D	2a	17	8,7
Fichte	L	D	2b	61,35	31,37
Fichte	L	D	3a	61,35	31,37
Fichte	L	D	3b	62,82	32,12
Fichte	L	D	4	64,92	33,19
Fichte	L	D	5	67,9	34,72
Fichte	L	D	6	68,77	35,16
Fichte	SL	B	0b	90	46,01
Fichte	SL	B	1a	76,59	39,16
Fichte	SL	B	1b	98,57	50,4
Fichte	SL	B	2a	107,03	54,72
Fichte	SL	B	2b	114,92	58,78
Fichte	SL	B	3a	114,35	58,46
Fichte	SL	B	3b	108,4	55,42
Fichte	SL	B	4	106,37	54,42
Fichte	SL	B	5	118,92	60,8
Fichte	SL	B	6	154,86	79,18
Fichte	SL	C	0b	56,25	28,73
Fichte	SL	C	1a	62,18	31,8
Fichte	SL	C	1b	75,27	38,48
Fichte	SL	C	2a	84,5	43,66
Fichte	SL	C	2b	91,63	46,85
Fichte	SL	C	3a	89,68	45,94
Fichte	SL	C	3b	90,11	46,07
Fichte	SL	C	4	90,1	46,06
Fichte	SL	C	5	93,83	47,97
Fichte	SL	C	6	84,22	43,06
Fichte	SL	D	0b	47,4	24,23
Fichte	SL	D	1a	44,21	22,6
Fichte	SL	D	1b	56,88	29,08
Fichte	SL	D	2a	64,07	32,79
Fichte	SL	D	2b	66,2	33,85
Fichte	SL	D	3a	66,46	33,98
Fichte	SL	D	3b	66,07	33,78
Fichte	SL	D	4	65,94	33,71
Fichte	SL	D	5	67,03	34,27
Fichte	SL	D	6	69,79	35,68
Fichte	IS	N	2	33,1	16,92
Fichte	IS	N	2,2	47,3	24,18
Fichte	IS	N	3,1	51	26,07
Fichte	IS	N	OK	47,62	24,35

Tabelle B-2: Preise für weitere Güteklassen (HKS) (Forts.)

Baumart	Sorte	Güte	Stärke	Preis DM	Preis €
Fichte	IS	F	2,2	45,51	23,26
Fichte	IS	F	OK	37,72	19,29
Fichte	IL	N	0b	53,47	27,34
Fichte	IL	N	1a	55,06	28,15
Fichte	IL	N	1b	51,13	26,14
Fichte	IL	N	2a	34,61	17,69
Fichte	IL	N	2b	21,28	10,88
Fichte	IL	N	3a	17,59	8,99
Fichte	IL	N	3b	17,51	8,95
Fichte	IL	N	4	25,06	12,81
Fichte	IL	N	5	10	5,11
Fichte	IL	N	6	22,08	11,29
Fichte	IL	F	0b	47,53	24,3
Fichte	IL	F	1a	48,66	24,88
Fichte	IL	F	1b	44,86	22,94
Fichte	IL	F	2a	39,37	20,13
Fichte	IL	F	2b	39,84	20,37
Fichte	IL	F	3a	40,42	20,67
Fichte	IL	F	3b	40,83	20,88
Fichte	IL	F	4	39,48	20,19
Fichte	IL	F	5	38,1	19,48
Fichte	IL	F	6	42,63	21,66
Fichte	IL	K	0b	36,44	18,63
Fichte	IL	K	1a	36,05	18,43
Fichte	IL	K	1b	35,43	18,12
Fichte	IL	K	2a	38,71	19,52
Fichte	IL	K	2b	39,67	20,28
Fichte	IL	K	3a	39,39	20,14
Fichte	IL	K	3b	41,14	21,03
Fichte	IL	K	4	38,71	19,79
Fichte	IL	K	5	8,71	4,45

Anhang C

Tabelle C-1: EST-Erntekosten Stammholz

	MD o.R.		Stammholz unentrindet		Fixlängen vollvermessen				Fixlängen abgelängt			
			L/HL		GK		GL		AK		AL	
	min	max	AZ	MSZ	AZ	MSZ	AZ	MSZ	AZ	MSZ	AZ	MSZ
L 0	8	8	258	92	306	111	278	103	252	108	242	101
	9	9	190	65	226	79	205	73	186	77	178	71
	10	10	141	50	167	60	152	56	138	59	132	55
L 1a	11	12	102	38	121	48	110	42	100	44	96	41
	13	14	67	29	79	34	72	32	66	33	63	31
	15	16	54	23	64	27	58	25	53	28	51	25
L 1b	17	19	46	18	55	21	49	20	45	21	43	20
L 2a	20	24	36	14	43	17	39	15	35	15	34	15
L 2b	25	29	30	11	36	13	32	12	29	13	29	12
L 3a	30	24	26	9	31	11	28	10	25	11	24	10
L 3b	35	39	22	8	26	10	24	9	21	9	21	9
L 4	40	49	17	6	20	7	18	7	17	7	16	7
L 5	50	59	15	5	18	6	16	6	15	6	14	6
L 6	60		13	4	15	5	14	5	13	5	12	4

Tabelle C-2: EST-Erntekosten Industrieholz

baumfallende Längen			Kranlängen Baum						Kranlängen Krone									
MD	BU	BA	BG	KU	KA	KG	WU	WA	WG									
o.R.	AZ	MS	AZ	MS	AZ	MS	AZ	MS	AZ	MS	AZ	MS	AZ	MS	AZ	MS	AZ	MS
mit- tel	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
8	221	88	242	92	258	92	235	93	257	99	292	99						
9	161	62	178	65	190	65	172	67	190	71	216	71						
10	119	47	134	50	141	50	128	53	143	56	160	56	135	50	147	50	160	50
11	97	38	110	41	115	41	106	44	119	46	130	46	115	48	107	48	140	48
12	81	32	91	35	96	35	88	38	99	40	109	40	96	46	127	46	117	46
13	67	28	77	31	80	31	74	33	84	35	90	35	83	44	93	44	100	44
14	57	25	65	28	68	28	62	29	71	31	77	31	75	42	84	42	89	42
15	50	23	56	25	59	25	54	26	60	27	66	27	70	40	79	40	84	40
16	45	21	51	23	54	23	48	23	54	24	59	24	67	38	75	38	79	38
17	42	19	48	20	51	20	44	21	51	22	56	22	64	36	71	36	75	36
18	39	18	45	18	48	18	41	20	49	20	53	20	61	34	68	34	71	34
19	36	17	43	17	45	17	38	19	46	19	50	19	58	32	65	32	68	32
20	34	16	40	16	42	16	36	18	44	18	48	18	55	30	61	30	64	30

Tabelle C-2: EST-Erntekosten Industrieholz (Forts.)

baumfallende Längen			Kranlängen Baum						Kranlängen Krone									
MD	BU	BA	BG	KU	KA	KG	WU	WA	WG									
o.R.																		
mit-	AZ	MS	AZ	MS	AZ	MS	AZ	MS	AZ	MS	AZ	MS	AZ	MS	AZ	MS	AZ	MS
tel	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
21	32	15	38	15	39	15	35	16	41	16	45	16	53	28	58	28	61	28
22	30	14	36	14	37	14	33	15	39	15	42	15	50	27	55	27	58	27
23	29	13	34	13	35	13	32	14	37	14	40	14	47	25	51	25	55	25
24	28	12	32	12	33	12	31	13	35	13	38	13	45	23	48	23	52	23
25	27	12	31	12	32	12	30	13	34	13	37	13	42	22	46	22	48	22
26													39	20	43	20	46	20
27													37	18	40	18	44	18
28													34	17	37	17	41	17
29													32	15	35	15	38	15
30													30	14	33	14	36	14