

**Vergleich der Lichtinterzeption eines
ordnungsbasierten Verzweigungsmodells der Fichte
mit verschiedenen vereinfachten Modellen**

Von Marius Heidenreich

Erstbetreuer: Prof. Dr. Winfried Kurth

Zweitbetreuerin: Dr. Katrin Meyer

Datum: 13.09.2019

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	S. 4
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	S. 4
1.2	Strukturmodelle und ihre Bedeutung in der Pflanzenmodellierung	S. 4
1.3	L-Systeme	S. 5
1.4	Grolmp	S. 6
2	Material und Methoden	S. 6
2.1	Datengrundlage	S. 6
2.2	Modell 1 – Übersetzung des GROGRA Codes nach Grolmp	S. 8
2.2.1	Anpassung der Parameter	S. 8
2.2.2	init	S. 9
2.2.3	grow	S. 9
2.2.4	run	S. 9
2.2.5	Verzweigung Hauptachse	S. 9
2.2.6	Stammwachstum	S. 10
2.2.7	Verzweigung 1. Ordnung	S. 10
2.2.8	Mortalität Achsen 1. Ordnung	S. 10
2.2.9	Verzweigung höhere Ordnungen	S. 11
2.2.10	Austrieb aus Proventivknospen	S. 11
2.2.11	Verzweigung 3. und höherer Ordnungen	S. 11
2.2.12	Mortalität der Achsen höherer Ordnungen	S. 12
2.2.13	absorbieren	S. 12
2.2.14	interpret	S. 12

2.3	Modell 2 – einfaches Kegelmodell	S. 13
2.3.1	erstelle Modell	S. 13
2.3.2	erstelle Fichte	S. 14
2.3.3	Lichtmodell	S. 14
2.4	Modell 3 – Verzweigung der ersten Ordnung	S. 14
2.5	Modell 4 – Scheibenmodell	S. 15
2.5.1	Verzweigung 1. Ordnung	S. 15
2.5.2	Mortalität	S. 16
2.5.3	Zuwachs	S. 16
3	Ergebnisse	S. 16
3.1	Visualisierung der Modelle 1 bis 4	S. 16
3.2	Vergleich der Baumhöhe und des Kronenradius von Modell 1	S.20
3.3	Zusammenfassung und Vergleich der Modelloutputs	S. 20
3.4	Vergleich von Modell 1 und Modell 3 unter Berücksichtigung eines Korrekturfaktors	S. 23
4	Diskussion	S. 24
4.1	Modell 1	S. 24
4.2	Modell 2	S. 24
4.3	Modell 3	S. 25
4.4	Modell 4	S. 25
4.5	Fazit	S. 26
	Literaturverzeichnis	S. 27

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Zuge dieser Arbeit soll ein von Kurth im Jahr 1999 erstelltes komplexes Verzweigungsmodell der Fichte (Kurth, 1999) der Software GROGRA (Kurth, 1994) in die Nachfolgersoftware GroImp übersetzt werden. Nach erfolgreicher Implementierung in GroImp sollen weitere, vereinfachte Modelle der Fichte mit ähnlicher Parametrisierung erstellt und mit dem ursprünglichen Modell in Bezug auf die Interzeption von photosynthetisch aktiver Strahlung verglichen werden. Hierbei soll ein vereinfachtes Modell ermittelt werden, dass die Lichtinterzeption des komplexen Modells möglichst genau reproduziert. Die Vereinfachung des Modells aus GROGRA soll eine effizientere Nutzung in Bezug auf die Rechengeschwindigkeit des Kronenmodells ermöglichen, welche im bei der Simulation mit dem komplexen Modell in GroImp sehr hoch ist. Ist dies erreicht, könnte das ermittelte Modell genutzt werden, um beispielsweise Fichtenbestände zu modellieren.

1.2 Strukturmodelle und ihre Bedeutung in der Pflanzenmodellierung

Die Modellbildung von Pflanzen nimmt innerhalb der Forstwissenschaften eine immer wichtigere Rolle ein. Dabei sollen eine Pflanze oder Pflanzengemeinschaft vereinfacht dargestellt werden, wobei das Modell bestimmte Eigenschaften abhängig von der Fragestellung beinhalten soll. Die in der Natur beobachtete morphologische Struktur von Pflanzen kann über sogenannte Strukturmodelle mehr oder weniger einfach abgebildet werden. Hierbei wird die spezifische Pflanze durch ein räumliches dreidimensionales Modell dargestellt, bei der die Pflanzenorgane als ein Satz von einfachen Einheiten charakterisiert werden. Die Verknüpfungen dieser Einheiten unterliegen verschiedenen verzweigungsbasierten Regeln, die beispielsweise auf Messungen an echten Pflanzen fundieren. Aus den Einheiten und deren Verknüpfungen entsteht so ein Strukturmodell, das statisch sein kann, oder auch dynamisch, wenn es sich durch bestimmte Regeln zeitlich verändert. Bei dieser Art von Modellierung handelt es sich um rein geometrische Modelle, die unabhängig von den physiologischen Prozessen sind, welche sich innerhalb einer Pflanze abspielen und wiederum Auswirkungen auf die Struktur der Pflanzen haben können. Aufgrund dieser Thematik bietet es sich an, rein strukturelle Modelle mit funktionalen Aspekten zu verknüpfen. Beispiele dafür wären die Produktion von Assimilaten in den Photosyntheseorganen und der Transport dieser innerhalb der Pflanze, welche sich dann auf das Wachstum der Organe und somit auf die Struktur der Pflanze auswirken (Vos et al., 2009).

Solche Modelle, seien es rein geometrische, rein funktionelle oder Struktur- und Funktionsmodelle, können dazu dienen, Erkenntnisse in Bezug auf das Baumwachstum und für das Grundverständnis von Waldökosystemen zu liefern. Hierbei steht der Verständnisgewinn im Vordergrund, da solche Modelle nicht genau, beziehungsweise weit genug entwickelt sind, sodass der reale Zustand von Pflanzen nicht exakt abgebildet werden kann. Daher eignen sich

diese Modelle im aktuellen Stand der Wissenschaft noch nicht, um in der komplexen forstlichen Praxis Anwendung zu finden. Es werden durch die Modellierung jedoch bestimmte Wissenslücken gefüllt, nebenbei können so auch falsche Annahmen korrigiert werden. (Kurth, 1997)

Werden solche Modelle zukünftig weiterentwickelt und präzisiert, könnten sie in der Zukunft dazu dienen, komplexe Fragestellungen in der Forstwirtschaft zu lösen. Diese können beispielsweise Wachstumsdynamiken unter Konkurrenz oder Auswirkungen vielseitiger Faktoren, wie Witterungsbedingungen im Zuge des Klimawandels, auf Einzelbäume oder auch Waldbestände sein. Da solche Modelle komplexe mathematische Berechnungen verwenden, wären sie gegenüber den herkömmlichen Verfahren wie Ertragstafeln deutlich genauer und anwendbar auf variablen Klima- und Standortseigenschaften. Auch die Verwendung bei verschiedenen Baumartenzusammensetzungen oder verschiedenen Altersstrukturen wären hier eine denkbare Anwendung, bei der die bisher herkömmlichen Mittel an ihre Grenzen stoßen. (Kurth, 1997)

1.3 L-Systeme

L-Systeme, welche ein Programmiergerüst für die Entwicklungsforschung von Pflanzenorganen darstellen, wurden 1968 von Aristid Lindenmayer entwickelt. Die Struktur und die dynamischen Prozesse innerhalb einer Pflanze können hierbei durch die Visualisierung von geometrischen Formen innerhalb eines Computerprogramms abgebildet werden. Die Darstellung erfolgt durch einfache Filamente, welche als lineare mathematische Anordnung von Zellen charakterisiert werden. Dadurch können physiologische Prozesse, wie der Transport von Hormonen in ein Organ einer Pflanze und die daraus resultierenden morphologischen Reaktionen des Organs bis hin zu Reaktion des gesamten Organismus beschrieben werden. So können jedoch nur Transporte in eine bestimmte Richtung modelliert werden. Um Transportprozesse in verschiedene Richtungen darzustellen, kommen außerdem Ring-Strukturen der Organe zum Einsatz. Daraus wurde von Aristid Lindenmayer eine Theorie entwickelt, in der ein zweiseitiger Input das Wachstum von Filamenten beeinflusst. Die Filamente können sich außerdem wieder in verzweigte Filamente weiterentwickeln. Das Prinzip der L-Systeme unterliegt verschiedenen Regeln, wobei die Verzweigungsregeln hier eine besondere Rolle spielen. Diese Regeln sind in der Arbeit „Mathematical Models for Cellular Interactions in Development“ festgelegt. (Lindenmayer, 1968)

Die Lindenmeyersysteme sind die meist verbreitetste Methode für regelbasierte Systeme innerhalb der Bildung photorealistic virtueller Organismen, wobei die Modellierung von Pflanzen hier die zentrale Rolle spielt. Eine Verknüpfung aus Graphgrammatik und Objekt-orientierter Programmierung eignet sich jedoch besser, um die regelbasierte Entwicklung von dreidimensionalen Pflanzenmodellen zu darzustellen. Der Grund dafür ist, dass die Morphologie und zugrundeliegende Prozesse, die ein Einfluss auf das Wachstum haben, wie beispielsweise metabolische Reaktionen, besser modelliert werden können. Für eine solche Modellierung kann die Plattform GroIMP verwendet werden. (Kurth 2007)

1.4 GroImp

Bei GroImp handelt es sich um eine Open-Source Software, die erstmals 2007 von Kniemeyer et al. beschrieben wurde. Die Plattform bietet die Möglichkeit, Objekte einschließlich einer Visualisierung unter Einbezug von Interaktionen zwischen den Objekten innerhalb eines Interface zu modellieren. Das Programm verwendet die Programmiersprache XL, welche eine Erweiterung von Java ist und auf relationalen Wachstumsgrammatiken basiert. Dabei ist XL eine Integration der Grundidee der L-Systeme in eine Programmieroberfläche. XL verwendet die sogenannte Turtle-Programmierung, bei der ein virtueller, nicht sichtbarer Punkt verwendet wird, der sich anhand von Befehlen bewegt und während der Bewegung graphische Objekte unter Einbezug von Verzweigungen zeichnet. Es können beispielsweise verschiedene Objekte mit bestimmten Längen und Verzweigungswinkeln modelliert werden. Da XL auf Java basiert, kann auch imperativer Code integriert werden. So eignet sich XL, um bestimmte Funktionen, wie Wachstumsfunktionen, zu implementieren. (Kniemeyer et al., 2007)

Einige Besonderheiten machen GroImp äußerst nützlich und einzigartig in Bezug auf die Erstellung von Struktur- und Funktionsmodellen. Der Programmcode ist direkt in einem Texteditor innerhalb des Programms zugänglich und wird automatisch kompiliert. Zusätzlich beinhaltet das Programm einen Satz von dreidimensionalen Klassen, welche zur Modellierung und Visualisierung von Objekten genutzt werden können. Diese bestehen aus einer Kombination aus bildlichen und prozessorientierten Texturen. Die genannten Eigenschaften von GroImp ermöglichen es dem Nutzer, ein Modell zu erstellen, das dynamisch interagieren kann und einfach zu bearbeiten, beziehungsweise zu verändern ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Veränderung direkt im Visualisierungsfenster angewendet wird. (Kniemeyer et al., 2007)

GroImp wird in dieser Hausarbeit verwendet, um die Modellierung eines in der Vorgänger-Software GROGRA (Kurth, 1994) erstellten Fichtenmodells zu realisieren.

2 Material und Methoden

2.1 Datengrundlage

Das Fichtenmodell wurde innerhalb eines Teilprojektes im Rahmen des Forschungsvorhabens „Veränderungsdynamik von Waldökosystemen“ am Forschungszentrum Waldökosysteme der Universität Göttingen erstellt. Ziel der Forschung war es, das Mikroklima, die Struktur des Kronenraums und Prozesse, die an der Primärproduktion beteiligt sind, zu erfassen und zu modellieren. Zum Erreichen dieses Ziels bestand eine Teilaufgabe darin, ein räumlich explizites Kronenraummodell bereitzustellen, das die dreidimensionale Modellierung der Interzeption von photosynthetisch aktiver Strahlung ermöglicht. Beteiligt an diesem Teil des Forschungsvorhabens waren das Institut für Bioklimatologie und das Institut für Forstliche Biometrie und Informatik der Universität Göttingen (Gravenhorst & Ibrom 1996, Sloboda et al. 1994, 1996). Die Implementierung des Modells wurde innerhalb von GROGRA auf Einzelbaumbasis mittels nichtsensitiver Wachstumsgrammatik für drei verschiedene Baumklassen realisiert. Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse der Wachstumsgrammatik in GROGRA.

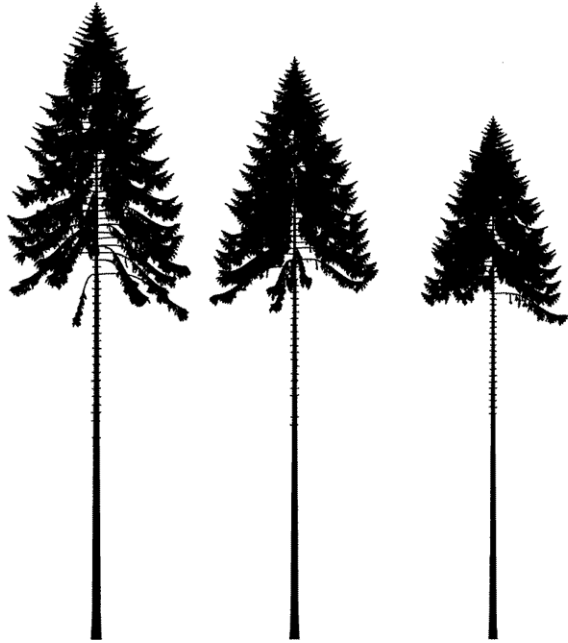


Abbildung 1: Ergebnisse der Wachstumsgrammatik *pic.lsy* für die drei Baumklassen (links: $tc = 1$, Mitte: $tc = 2$, rechts: $tc = 3$) nach 114 Schritten, entsprechend dem Baumalter 112 Jahre bzw. dem Jahr 1994. Simulation mit GROGRA, aus Sloboda et al. (1996)

Die Daten des Modells stammen aus einer Versuchsfläche F1 im Solling. Es handelt sich um einen Fichtenreinbestand, welcher zwischen den Ertragsklassen II und III liegt (Seibt 1981). Die wichtigsten Daten wurden im Jahr 1994 auf einer Teilfläche von F1 erhoben, bei dem der Baumbestand ein Alter von 112 Jahren aufwies. Für das Modell wurden zahlreiche Felddaten innerhalb der Fläche erhoben. (Kurth, 1999)

Zum einen wurden Luftbilder aufgenommen, die aber nicht für die Modellierung benutzt wurden. Ergänzend wurden 42 der Fichten vom Boden aus photographisch aufgenommen, aus diesen wurden Werte für die aktuellen Höhen der Fichten ermittelt. (Kurth, 1999)

Weitere terrestrische Erhebungen der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt auf der gesamten Versuchsfläche F1 lieferten Höhen und Durchmesser der Bäume, in bestimmten Jahren auch die Kronenansatzhöhen. Es wurden durchgängig 36 Bäume erfasst. Aus diesen Daten wurden vor allem die zeitlichen Verläufe der Höhen und der Kronenansatzhöhen verwendet. (Kurth, 1999)

Durch eigene Messungen der Forschungsgruppe wurden morphologische Daten mittlerer Auflösung von einem Messturm aus ermittelt. Diese sind die Höhe des ersten lebenden Astes, die Höhe des ersten Pseudoquirls mit vorwiegend lebenden Ästen, Anzahl der Hauptäste pro Pseudoquirl, Abstände der Pseudoquirle entlang der Haupttriebachse auf mehreren Abschnitten und entlang mehrerer Achsen erster Ordnung, sowie ein Durchmesserprofil eines Hauptastes der Fichte 341. (Kurth, 1999)

Zusätzliche eigene Messungen an einer frisch gefällten Fichte, „Baum D“, lieferten zusätzlich morphometrische Daten feinerer Auflösung aus dem Kronenraum. Diese sind Pseudoquirlabstände am Stamm, Anzahl der Hauptäste 1. Ordnung pro Pseudoquirl, Anzahl der medialen Äste 1. Ordnung, Schaftform, Basisdurchmesser von Hauptästen 1. Ordnung, das Durchmesserprofil eines Hauptastes, WE-Längen an mehreren Hauptästen, vom Stamm aus gemessene Längen der zweiten WE für je einen der Hauptäste erster Ordnung aus den Pseudoquirlen 3 bis 60 und Proventivtrieblängen. (Kurth, 1999)

Zur Modellierung der zeitlichen Dynamik des Wachstums über das gesamte Baumalter wurden außerdem Daten von Jungfichten von einem benachbarten Standort entnommen, welche als genetisch ähnlich angenommen wurden. (Kurth, 1999)

2.2 Modell 1 – Übersetzung des GROGRA Codes nach Grolmp

Für die Implementierung des ursprünglichen Codes in Grolmp wurden die gleichen Baumdaten (Parameter in Zeile 75 – 131) verwendet, die auch in GROGRA benutzt wurden. Eine komplette Auflistung der Parameter befindet sich im Buch „Die Simulation der Baumarchitektur mit Wachstumsgrammatiken“ von Winfried Kurth im Anhang auf Seite 308 f (Kurth, 1999). Die verwendeten Module (Zeile 7 – 48) entsprechen ebenfalls denen, die im GROGRA Code vorhanden sind, eine Auflistung befindet sich auf Seite 183. Zusätzlich mussten zur Übersetzung des Codes in Grolmp weitere Module erstellt werden, die Beschreibung dieser befindet sich in der jeweiligen Methode, in der diese verwendet werden.

Im folgenden Teil sollen die einzelnen verwendeten Methoden und Funktionen beschrieben werden, aus denen sich das Modell zusammensetzt. Dabei werden die Hauptaspekte und Unterschiede zum ursprünglichen Code dargestellt.

Zum Starten des Modells muss der Button *Run_grow* gedrückt werden, als Modelloutput werden die Beträge für die Lichtinterzeption und die Baumhöhe für jedes Jahr geliefert.

2.2.1 Anpassung der Parameter

Da GROGRA mit einer Längeneinheit in Millimetern arbeitet, mussten einige Parameter für die Verwendung in Grolmp angepasst werden, um eine Umrechnung in Meter zu gewährleisten. Die folgende Tabelle stellt die veränderten Parameter einmal in GROGRA und im Vergleich in Grolmp da.

Tabelle 1: Beträge der Parameter in GROGRA (links) und in Grolmp (rechts)

Parameterbezeichnung	Wert in GROGRA	Wert in Grolmp
bh	1300	1.3
dm1	0.5	0.0005
d2	0.4	0.0004
d3	0.3	0.0003
pl	70	0.07

Parameter, die nicht in der Tabelle enthalten sind, wurden für die Benutzung in GroImp unverändert übernommen, insofern sie für das Modell nötig waren.

Der Parameter *c* für die Baumklasse befindet sich in Zeile 3 und kann vor der Simulation auf einen Wert zwischen 1 und 3 gesetzt werden.

2.2.2 init (Zeile 185 – 194)

Das Modell wird im Gegensatz zum GROGRA Modell mit einer *init*-Methode initialisiert. Das Startalter *age* des Baumes wird mittels imperativen Codes auf minus 1 festgelegt und es wird ein Modul *tk* als Samen angelegt. Außerdem wird hier eine Lichtquelle in einer Höhe von 40 Metern gesetzt und zur Fichte hin ausgerichtet. Zusätzlich wird ein Plot zur Abbildung des aufgenommenen Lichts initialisiert.

2.2.3 grow (Zeile 196 – 208)

Das Ausführen dieser Methode startet die Modellierung der Fichte. Die Methode läuft beim Drücken von *Run_grow* bis zu einem Baumalter von 113 Jahren. Zuerst wird die *run*-Methode ausgeführt. Im nächsten Schritt wird das Lichtmodell (übernommen aus *sfspm05.gsz*) berechnet und die *absorbieren*-Methode kalkuliert das Licht, das auf die einzelnen nadeltragenden Oberflächen trifft. Die Summe des aufgenommenen Lichts wird in das Diagramm geplottet. Die nächste Zeile gibt das Alter und die Summe der auftreffenden Strahlung mit jedem Zeitschritt in der Konsole aus, außerdem die Höhe des Baumes. Nach diesen Schritten werden die Interpretationsregeln angewandt und das Alter der Fichte für jeden Zeitschritt um eins erhöht.

2.2.4 run (Zeile 210 – 222)

Innerhalb dieser Methode werden die verschiedenen Wachstumsgrammatiken in bestimmter Reihenfolge bis zu einem Baumalter von 112 Jahren ausgeführt. Zuerst wird die Verzweigung der Hauptachse durchgeführt, gefolgt von dem Stammwachstum, der Verzweigung 1. Ordnung, der Mortalität der Achsen 1. Ordnung, der Verzweigung der 2. Ordnung, dem Austrieb der Proventivknospen, der Verzweigung der 3. bis 4. Ordnung und der Mortalität der Ordnungen 2. bis 4.

2.2.5 Verzweigung Hauptachse (Zeile 224 – 244)

Diese Methode soll das Wachstum der Haupttriebachse, sowie die Bildung von subapikalen und medialen Knospen erster Ordnung generieren. Diesen werden wie im ursprünglichen Code Winkel, Längenfaktoren zum Übergang in die nächste Verzweigungsordnung, spezifische Positionen und ein Gravitationsmodul *g* zugeordnet. Die Segmente der Haupttriebachse bestehen aus *a* (Kronen-) und *b* (Stamm-) Segmenten.

Die Startknospe *tk* wird hier im ersten Zeitschritt durch eine Terminalknospe *t* mit dem Alter null ersetzt. Aus dieser bildet sich die Haupttriebachse der Fichte, der jährliche Höhenzuwachs

wird über die Funktion dh abhängig von der Baumklasse und -alter berechnet. Um Rechenzeit in jungen Jahren zu sparen, wurde auf eine Verzweigung der Haupttriebachse in den ersten 60 Jahren verzichtet. Die Grammatik der Verzweigung der Hauptachse nach diesem Zeitraum entspricht der im GROGRA Code. Es besteht jedoch der Unterschied, dass die Anzahl der subapikalen und medialen Knospen erster Ordnung und die Zuordnung von Attributen durch eine *for*-Schleife realisiert ist, da hier nicht der GROGRA spezifische Wiederholungsoperator „< >“ verwendet werden kann.

2.2.6 Stammwachstum (Zeile 246 – 254)

Diese Methode soll gewährleisten, dass verschiedene Haupttriebachsensegmente aufgrund ihrer Lage und ihres Alters entweder der Krone, dem Stamm oder dem Stamm unterhalb der Brusthöhe zugeordnet werden. Die Einteilung dient dazu, den Zuwachs im Durchmesser realitätsnah abzubilden. Dazu wird das Alter der Segmente in jedem Schritt erhöht, zusätzlich auch das Alter des Moduls w , welches eine Veränderung des Verzweigungswinkels im Alter zur Folge hat.

Die Dickenzuwächse der verschiedenen Segmente werden wie im ursprünglichen Code berechnet. Der Zuwachs von Stamm und Stamm unterhalb des Brusthöhendurchmesser wird hier statt in einer, in zwei Zeilen durchgeführt. In dem GROGRA Code wird die Höhe eines Segments, das von der Krone in den Stamm übergeht, in einem Register gespeichert. Im neuen Modell wird dieser Wert in einer externen Methode, kb , ermittelt. Dafür wird der maximale Höhenwert aller b -Segmente über einen Query ermittelt. Dieser entspricht der Höhe des ersten Stammsegments unterhalb der Krone und wird als Betrag für die Kronenansatzhöhe verwendet.

2.2.7 Verzweigung 1. Ordnung (Zeile 256 – 300)

Hier findet der Austrieb der in der Stammwachstum-Methode erzeugten Knospen statt. Es bilden sich Äste der ersten Ordnung durch die Interpretation der Knospen erster Ordnung als Zylinder $c1$. Entlang dieser entstehenden Äste werden wiederum die Knospen der zweiten Ordnung, sowie Proventivknospen angelegt. Auch hier bekommen die neuen Knospen wie im ursprünglichen Code spezifische Positionen, Längenfaktorwerte, Winkel und das Gravitationsmodul g zugeordnet.

Der einzige Unterschied im GroImp-Code besteht daran, dass die Wahrscheinlichkeiten für ein bestimmtes Austriebsverhalten der medialen Knospen mit einer *if-else*-Funktion mit bestimmten *probability*-Werten festgelegt werden.

2.2.8 Mortalität Achsen 1. Ordnung (Zeile 302 – 319)

Der Abwurf von Ästen, die ein bestimmtes Alter erreicht haben, wird hier simuliert, um einen typischen astfreien Stamm zu erzeugen. Das Absterben der subapikalen Äste erster Ordnung kann zufallsgesteuert geschehen, wird aber grundsätzlich durch die $t0$ -Funktion gesteuert,

welche außerhalb dieser Methode berechnet wird. Das Astabwurfalter der medialen Äste wird durch die Werte Tabelle tm bestimmt, welche altersbedingt ansteigen. Damit die Äste überhaupt altern und somit ein bestimmtes Abwurfalter erreichen, wird innerhalb dieser Methode das Alter t der Segmente $c1$ und $cm1$ mit jedem Zeitschritt erhöht. Zusätzlich wird auch das Alter des Gravitationsmoduls g um eins erhöht, um ein Herabsenken der Äste im Alter zu simulieren.

Im Grolmp-Code wird auf die Umwandlung von älteren subapikalen Ästen in Aststümpfe (Modul $c01$ im GROGRA-Code) verzichtet, in diesem Fall werden die Äste direkt entfernt. Dies ist möglich, da die Aststümpfe keine Bedeutung für das angestrebte Strahlungsmodell haben. Auch wurde auf einen zufallsgesteuerten Abwurf der subapikalen Äste verzichtet. Abgesehen davon entspricht die Methode der im ursprünglichen Code.

2.2.9 Verzweigung höhere Ordnungen (Zeile 321 – 362)

Die Verzweigung der höheren, beziehungsweise zweiten Ordnung geschieht wie bei der ersten Ordnung über das Austreiben der zugehörigen Knospen der zweiten Ordnung. Diese werden jeweils durch ein Modul $c2$ ersetzt, welches als Zylinder interpretiert wird. Auch hier werden weitere Knospen für höhere Ordnungen angelegt, die wie bei den anderen Verzweigungsmethoden die zugehörigen Attribute zugeordnet bekommen. Zusätzlich werden den $c2$ -Segmenten bestimmte Tabellen- und Distributionswerte zugeordnet, die in einer später beschriebenen Mortalitätsmethode eine Rolle spielen.

Auch hier werden die Wahrscheinlichkeiten für ein bestimmtes Austriebsverhalten durch eine *if-else*-Funktion mit verschiedenen *probability*-Werten bestimmt.

2.2.10 Austrieb aus Proventivknospen (Zeile 364 – 387)

Der Austrieb der Proventivknospen findet wie im ursprünglichen Code verzögert abhängig von dem k -Wert der jeweiligen Knospe in einer eigenen Methode statt. Dabei wird eine ins Kroneninnere gerichtete Trieberneuerung gewährleistet (Gruber 1987). Die entstehenden Äste sind wie bei der zweiten Ordnung als Zylinder interpretierte $c2$ Module. Die Lebensdauer der Äste wird durch die Tabelle tp bestimmt, die zu einer bestimmten altersabhängigen Verteilung Werte zwischen vier und dreizehn liefert.

2.2.11 Verzweigung 3. und höherer Ordnungen (Zeile 389 – 422)

Wie schon bei den vorherigen Verzweigungsmethoden werden die zuvor erstellten Knospen der dritten und vierten Ordnung durch ein Modul ersetzt, in diesem Fall $c3$, welches als Zylinder interpretiert wird und sich der geometrischen Attribute der $s3$ - und $s4$ -Knospen bedient. Entlang der Astsegmente, die aus einer Knospe dritter Ordnung hervorgehen, können unter Eintreffen einer bestimmten Wahrscheinlichkeit Knospen der vierten Ordnung gebildet werden. Wie in allen vorherigen Austriebsmethoden, bekommen diese verschiedene Attribute zugeordnet. Ein Astsegment, das aus einer Knospe vierter Ordnung hervorgeht, bildet keine

weiteren Knospen. Somit stellt die vierte Verzweigungsordnung das Maximum da. Auch hier bestehen außer den verschachtelten Wahrscheinlichkeiten keine Unterschiede zum Originalcode.

2.2.12 Mortalität der Achsen höherer Ordnungen (Zeile 424 – 433)

Der Abwurf der Äste der zweiten bis vierten Ordnung wird hier modelliert. Dafür wird das Alter der Astsegmente abgefragt und mit dem aus den Tabellenwerten zum Astabwurf abgeglichen. Die Äste altern solange, bis dieser Wert erreicht ist und sterben danach ab.

2.2.13 absorbiere (Zeile 435 – 441)

Das Ziel dieser Methode ist es, die Adsorption der Strahlung der Lichtquelle zu modellieren. Dafür wird das auftreffende Licht durch die zugehörige *getAbsorbedPower3d*-Funktion ermittelt und dem Attribut *al* zugeordnet, dass alle *needle_shoot* Elemente besitzen (siehe nächster Absatz) und die aufgenommene Strahlung speichert.

2.2.14 interpret (Zeile 443 – 500)

Die Interpretationsregeln werden auf alle Module, außer den Knospen, angewandt. Die Module *a*, *b*, *c1*, *cm1*, *c2* und *c3* werden als F-Zylinder interpretiert, wenn sie außerhalb der nadeltragenden Zone liegen. Die Länge dieser Zylinder ist definiert durch die Länge der vorherigen Ursprungszylinder, sowie einen Längenfaktor, der jeweils für die Knospe festgelegt wurde, aus dem der entsprechende Zylinder hervorgegangen ist. Der Durchmesser wird in diesem Fall durch verschiedene Parameter berechnet.

Um die Nadeloberfläche zu modellieren, wurde in dem ursprünglichen Code das N-Kommando verwendet. Da in GroImp nicht auf die gleiche Weise auf diesen N-Wert zugegriffen werden kann, wurde ein neues Modul *needle_shoot* erstellt, das durch seine Oberfläche der Lage ist, die durch die Lichtquelle imitierte Strahlung aufzunehmen. Innerhalb der Regeln wird für die Module *a*, *c1*, *cm1*, *c2* und *c3* ein Attribut *nval* berechnet. Die Berechnung für diesen Wert orientiert sich an der Berechnung des N-Werts im GROGRA Code und stellt die dem Element zugeordnete Nadeloberfläche dar, die Umrechnung von Millimetern in Meter wird hier berücksichtigt. Hierbei ist das Alter des Elements entscheidend für den Betrag des *nval*. Bei allen betreffenden Modulen wird über eine *if-else*-Schleife abgefragt, ob der Betrag von *nval* größer als Null ist. Ist dies nicht der Fall, wird das Modul einfach wie im ersten Absatz beschrieben als Zylinder interpretiert. Ist der Wert größer als Null, handelt es sich um ein nadeltragendes Segment. Daher wird das jeweilige Modul als *needle_shoot* interpretiert. Für die Länge des *needle_shoot* wird der zugeordnete Betrag des zugrunde liegenden Elements (*a*, *c1*, *cm1*, *c2* oder *c3*) verwendet. Somit ist die Länge, sowie die Oberfläche *nval* des jeweiligen Segments gegeben. Um den Durchmesser zu bestimmen, kann dieser durch die Umstellung der Zylinderformel zur Berechnung der Mantelfläche berechnet werden. Die Formel, die sich für den Durchmesser *d* nach Umstellung der Formel ergibt, lautet wie folgt:

$$d = \left(\frac{nval}{\pi * Länge} \right)$$

Damit besitzen die nadeltragenden Elemente die gleiche Nadeloberfläche, die ihnen im GROGRA-Code zugeordnet wird. Außerdem wird innerhalb der Regeln das Modul *g* als RV-Kommando und das *w* als RU-Kommando interpretiert.

2.3 Modell 2 – einfaches Kegelmodell

Dieses Modell stellt eine starke Vereinfachung des komplexen Modells dar, indem es lediglich aus der Haupttriebachse und der Einteilung dieser in *a* und *b* Segmente einen Stamm und eine Krone modelliert. Es bedient sich der Parameter des ursprünglichen Codes. Außerdem werden wieder die Module *a*, *b*, *t* und *tk* verwendet, die die gleiche Funktion wie in Modell 1 übernehmen. Zusätzlich wird das Modul *Crown* definiert, das als Kegel die Krone der Fichte repräsentiert. Der Radius der Krone wurde für die einzelnen Baumklassen in den Altersklassen 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110 und 112 innerhalb von Modell 1 ermittelt. Die *init*-, die *Höhenwachstum*-Methode sowie die Interpretation der *a* und *b* Segmente entsprechen denen im vorherigen Modell und werden hier daher nicht weiter erläutert. Das Lichtmodell wird exakt wie im komplexen Modell erstellt.

Zum Durchführen der Simulation muss zuerst der Button *Run erstelle_Modell* und nach Beendigung der Berechnungen der Button *kalkuliere_Lichtadsorption* gedrückt werden. Hier kann in Zeile 3 und 4 jeweils die Baumklasse und das angestrebte Simulationsalter festgelegt werden. Über die Funktion *cf* wird der zugehörige Wert der Baumklasse und des Alters als Radius der Krone festgelegt (Zeile 38 – 48).

2.3.1 erstelle Modell (Zeile 148 – 161)

Diese Methode wird benutzt, um die Haupttriebachse der Fichte bis zu einem vorher eingestellten Alter *x* (in der Regel 112 Jahre) zu modellieren. Der Höhenzuwachs wird wie beim vorherigen Modell über die Methode *Höhenwachstum* ermittelt. Anschließend wird das Alter um eins erhöht und die Interpretationsregeln angewandt. Zusätzlich wird ein Zähler *i* um eins erhöht, welcher gewährleistet, dass die Simulation nur bis zu dem Alter *x* ausgeführt wird. Ist dieses Alter erreicht, wird aus der Haupttriebachse durch die Methode *erstelle_Fichte* die Fichte, zusammengesetzt aus einem Stammsegment und der Krone als Modul *Crown*, erstellt.

2.3.2 erstelle Fichte (Zeile 182 – 188)

Aus dem Modul *tk* entsteht ein F-Zylinder, dessen Länge über die Funktion *lb* berechnet wird. Der Betrag von *lb* ergibt sich aus der Höhe des untersten Kronensegments und stellt damit die Länge des Stammes dar. An den Zylinder schließt das Modul *Crown* an. Die Höhe dieser Krone berechnet sich hier über die Funktion *la* aus der Differenz der Baumhöhe (maximaler *h*-Wert der Terminalknospe *t*) und der Stammlänge *lb*. Um den Radius der Krone zu bestimmen, wurde das Modell 1 zehnmal für jede Baumklasse bis zum Alter 112 laufen gelassen und ein Mittelwert aus den jeweiligen Kronenradien pro Baumklasse gebildet. Die Beträge dieser Mittelwerte finden sich in den *cr* Tabellen und legen den Baumklassen abhängigen Kronenradius in den bestimmten Altersklassen fest. Am Ende der Methode werden alle *a* und *b* Segmente aus dem Modell entfernt.

2.3.3 Lichtmodell (Zeile 190 – 196)

Hier wird das Lichtmodell berechnet und die *absorbieren*-Methode angewandt, die die Strahlung, die auf die Krone trifft, wie im vorherigen Modell kalkuliert. Dieser Wert wird in das Diagramm eingetragen und zusätzlich in der Konsole ausgegeben. Die Methode wird über den Button *kalkuliere_Lichtadsorption* ausgeführt.

2.4 Modell 3 – Verzweigung der ersten Ordnung

Der Grundgedanke dieses Modells ist es, die Verzweigung auf eine Ordnung zu beschränken, um die Rechenzeit so deutlich zu verkürzen. Das Modell funktioniert exakt wie Modell 1, mit dem Unterschied, dass auf die Methoden zum Austrieb der Proventivknospen, der Knospen mit einer höheren Ordnung als eins und die Mortalität dieser Segmente verzichtet wurde. Außerdem entstehen keine Knospen, deren Ordnung höher als eins ist. Auch hier wurde auf eine Verzweigung der Haupttriebachse bis zu einem Alter von 60 Jahren verzichtet, um die zeitlichen Verläufe der Kronenentwicklung mit denen aus Modell 1 vergleichbar zu machen. Um nun aber trotzdem die Nadeloberfläche der fehlenden Segmente mit einzubeziehen, wurde das Modell 1 leicht verändert (Kalkulationsmodell). Die Summe der Oberflächen der Äste aller anderen Ordnungen als eins (*needle_shoot_234*) und der ersten Ordnung (*needle_shoot_1*) wurden für jeden Altersschritt ab einem Alter von 60 Jahren ermittelt. Der Quotient *f* (Zeile 84 – 86, Modell 3) aus diesen beiden Größen stellt das relative Verhältnis von der Oberfläche höherer Ordnungen zu der der ersten Ordnung dar. Die Berechnung dieses Faktors für jedes Alter befindet sich in dem Modell „Kalkulationsmodell“.

In den Interpretationsregeln werden nun die geometrischen Attribute der nadeltragenden Segmente wie bei Modell 1 über die Ermittlung des *nval* und der daraus resultierenden Berechnung für den Durchmesser generiert. Die Besonderheit in diesem Modell ist, dass zu dem ermittelten *nval* noch einmal das *f*-fache (*f1[age]*, *f2[age]* oder *f3[age]*; abhängig von der Baumklasse) des *nval* addiert wird. Damit repräsentiert die Oberfläche eines Astes erster Ordnung in diesem Modell eine Oberfläche eines Astes unter Einbezug aller Ordnungen aus Modell 1.

Das Modell wird über *Run_grow* gestartet und liefert alle fünf Jahre den Wert für die Lichtinterzeption durch die Nadeloberfläche der Krone.

2.5 Modell 4 – Scheibenmodell

Das Modell hat den Anspruch, die einzelnen Pseudoquirle als Scheiben zu modellieren, deren Radius der Länge der in Modell 1 entstehenden Äste entspricht. Dabei können die Scheiben (*needle_slice_s* und *needle_slice_m*) das auftreffende Licht messen. Ist ein Alter erreicht, in dem die Nadeln im jeweiligen Segment absterben, wird die Scheibe von einer am gleichen Ursprung entstehenden zweiten Scheibe (*slice_s* bzw. *slice_m*) überlagert, die keine Nadelparameter besitzt. Damit verlieren die Pseudoquirle ihre Nadeloberfläche auf in der gleichen Dimension wie in Modell 1.

Das Wachstum der Haupttriebachse und die Entstehung der Knospen erster Ordnung (*s* und *m*) geschehen wie in Modell 1, außer dass lediglich eine Knospe pro Haupttriebachsensegment gesetzt wird. Ein weiterer Unterschied ist, dass den Knospen ein Attribut *dh_age* zugeordnet wird, dessen Wert das Alter zum Zeitpunkt der Entstehung darstellt und als Input-Variable für das Längenwachstum benutzt wird. Die Methode Stammwachstum entspricht der in Modell 1.

Das Modell kann über den Button *Run_grow* gestartet werden. Es werden die Werte für die Lichtinterzeption und den Kronenradius (größter *needle_slice_s*-Radius) in Fünfjahresschritten ausgegeben.

2.5.1 Verzweigung 1. Ordnung (Zeile 184 – 194)

Der Austrieb der generierten Knospen *s* und *m* findet innerhalb dieser Methode statt. Ist das Alter einer Knospe null, wird eine neue Knospe mit dem Alter $t = \text{eins}$ und dem gleichen *dh_age* Wert gebildet, außerdem entsteht die nadeltragende Scheibe *needle_slice_s* (aus *s*) oder *needle_slice_m* (aus *m*). Der initiale Durchmesser der Scheiben wird durch die Höhenzuwachs-funktion *dh* berechnet, dabei wird der Betrag medial mit 0.35 und subapikal mit 0.63 multipliziert, um den Übergang in die höhere Verzweigungsordnung zu berücksichtigen. Zusätzlich wird er mit 2 multipliziert, da nicht der Durchmesser, sondern der Radius verwendet wird. Wenn die neu generierten Knospen ein Alter von 13 Jahren erreicht haben, treiben diese als *slice_s* oder *slice_m* aus. Da die Knospen mit einem Alter von einem Jahr entstanden sind, geschieht das Austreiben beim Erreichen von 12 Jahresschritten nach der Entstehung. Somit werden die Bereiche in den nadeltragenden Scheiben, die ein Alter von 11 Jahren überschreiten, von den nadellosen überlagert.

2.5.2 Mortalität (Zeile 196 – 209)

Hier wird das Absterben der Scheiben modelliert. Die zugrundeliegenden Regeln entsprechen denen des komplexen Modells. Außerdem werden innerhalb der Methode mit jedem Zeitschritt die Altersattribute der Knospen um eins erhöht, was gewährleistet, dass der Austrieb der nadelfreien Scheiben zum richtigen Zeitpunkt geschieht.

2.5.3 Zuwachs (Zeile 211 – 236)

Die Methode generiert über Aktualisierungsregeln den zeitlichen Zuwachs der einzelnen Scheiben und erhöht das Alter dieser mit jedem Zeitschritt. Dabei wird als Zuwachs jeweils der Betrag der dh Funktion mit dem age Wert zum Entstehungsalter mit den gleichen Faktoren wie beim Austrieb verrechnet und zum bestehenden Radius addiert. Dies geschieht äquivalent zu Modell 1 bei den subapikalen Scheiben nur bis zu einem Alter von 30 Jahren.

3 Ergebnisse

3.1 Visualisierung der Modelle 1 bis 4

Das Modell 1, das sich durch die abgeleitete Wachstumsgrammatik aus dem GROGRA Modell ergibt, ist in Abbildung 2 dargestellt:

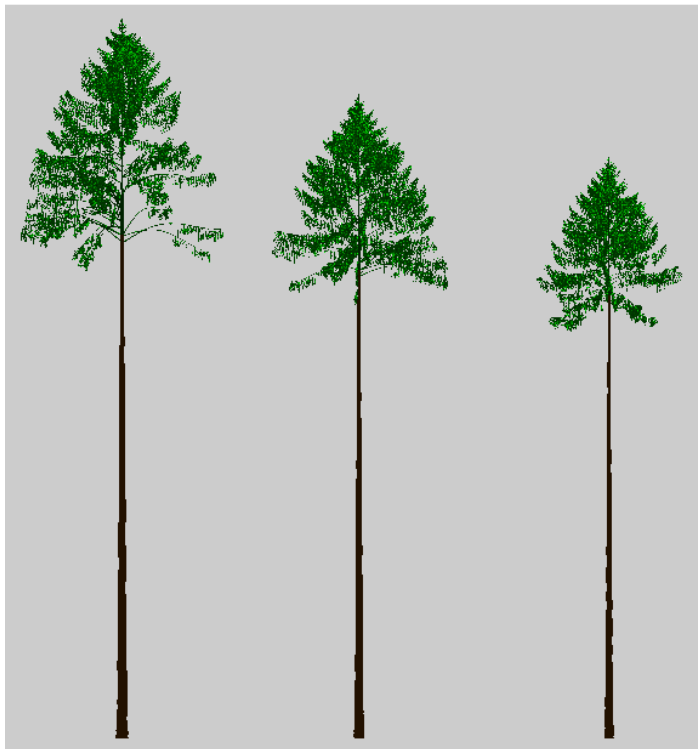


Abbildung 2: Visueller Output des Modells 1 für die Baumklassen 1 (links), Baumklasse 2 (Mitte) und Baumklasse 3 (rechts)

Die nächste Abbildung 3 zeigt die ausgeführte Wachstumsgrammatik des ersten vereinfachten Modells (Modell 2) anhand der drei verschiedenen Baumklassen im Alter von 112 Jahren:

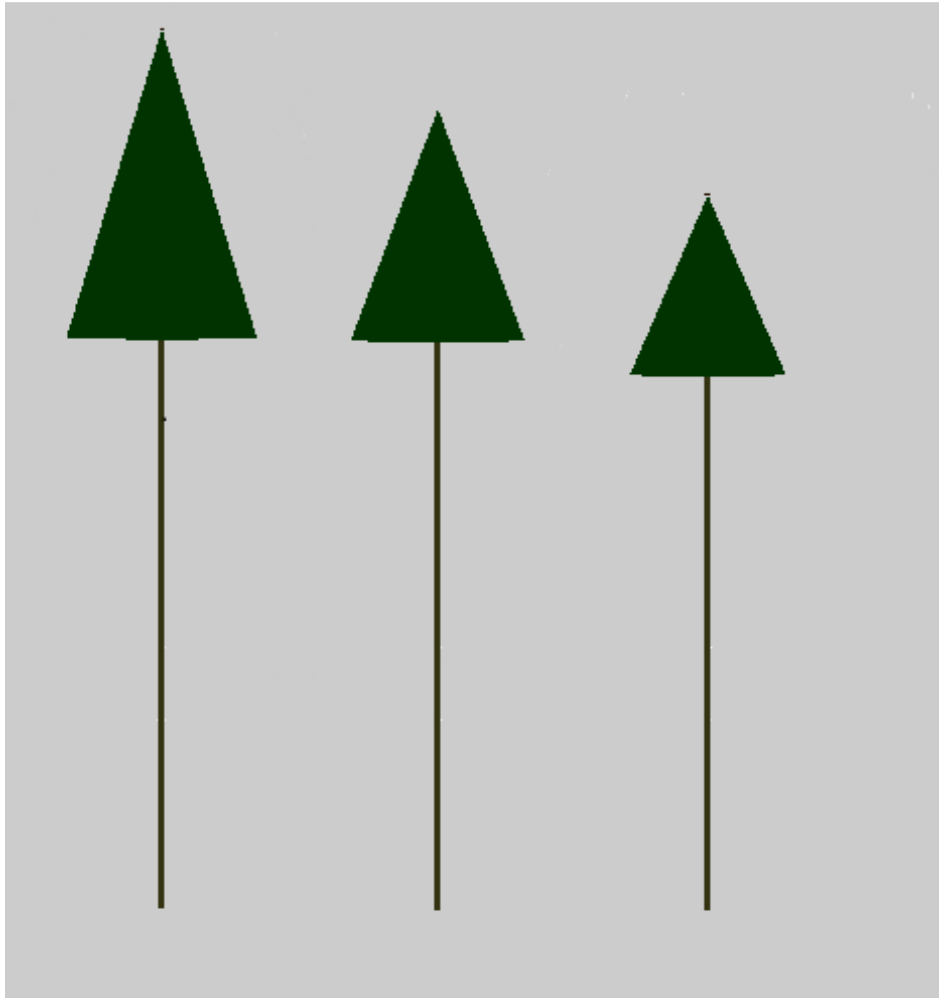


Abbildung 3: Visueller Output des Modells 2 für die Baumklassen 1 (links), Baumklasse 2 (Mitte) und Baumklasse 3 (rechts)

In Abbildung 4 ist die graphische Interpretation der Wachstumsgrammatik im Alter 112 der drei Baumklassen von Modell 3 visualisiert:



Abbildung 4: Visueller Output des Modells 3 für die Baumklassen 1 (links), Baumklasse 2 (Mitte) und Baumklasse 3 (rechts)

Modell 4 wird in der Abbildung 5 wie die vorherigen Modelle im Alter 112 für die verschiedenen Baumklassen abgebildet:

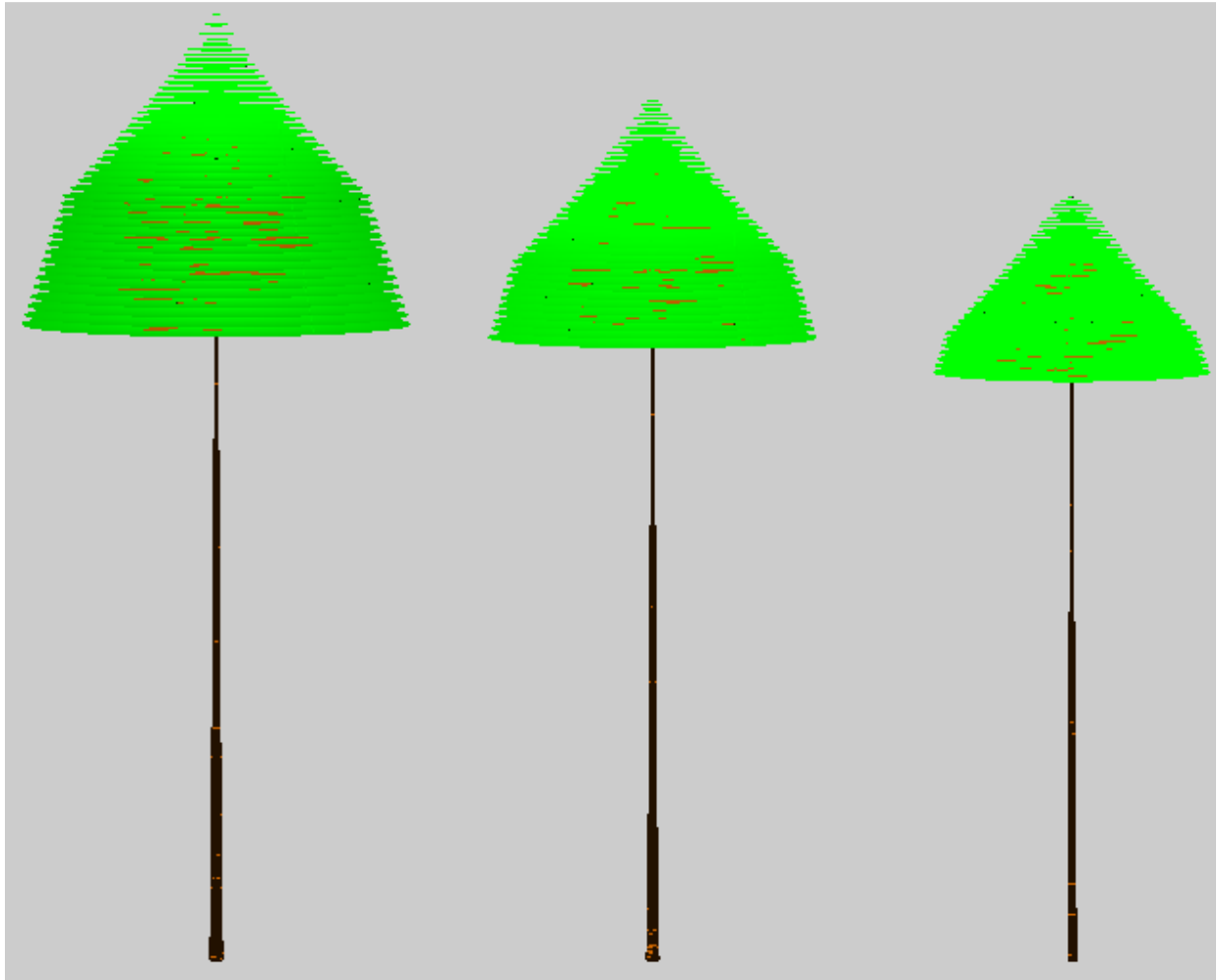


Abbildung 5: Visueller Output des Modells 4 für die Baumklassen 1 (links), Baumklasse 2 (Mitte) und Baumklasse 3 (rechts)

3.2 Vergleich der Baumhöhe und des Kronenradius von Modell 1

Auf der Seite 195 im Buch „Die Simulation der Baumarchitektur mit Wachstumsgrammatiken“ (Kurth, 1999) sind die Beträge einer Analyse der zweiten Baumklasse des GROGRA Modelloutputs im Alter 112 dargestellt. In der folgenden Tabelle sind die Outputs von Modell 1 und dem GROGRA Modell gegenübergestellt. Es sind nicht alle im Buch abgebildeten Outputs vorhanden, der Grund dafür wird in 4.1 erläutert:

Tabelle 2: Vergleich der elementaren Analyse der Modelloutputs der zweiten Baumklasse des GROGRA Modells und von Modell 1

	GROGRA Modell	Modell 1
Baumhöhe im Alter 112	28.256m	28.256m
Kronenradius im Alter 112	3.732m	3.77m

3.3 Zusammenfassung und Vergleich der Modelloutputs

Die Höhenkurve, die durch die Wachstumsgrammatik von Modell 1 erzeugt wird, ist in der folgenden Abbildung 6 dargestellt und gleicht sich mit den Höhenkurven der anderen Modelle, da die gleiche Funktion zur Ermittlung des Wachstums der Haupttriebachse verwendet wurde. Wie erwartet zeigt Baumklasse 1 das größten Höhenzuwachs, gefolgt von Baumklasse 2 und 3.

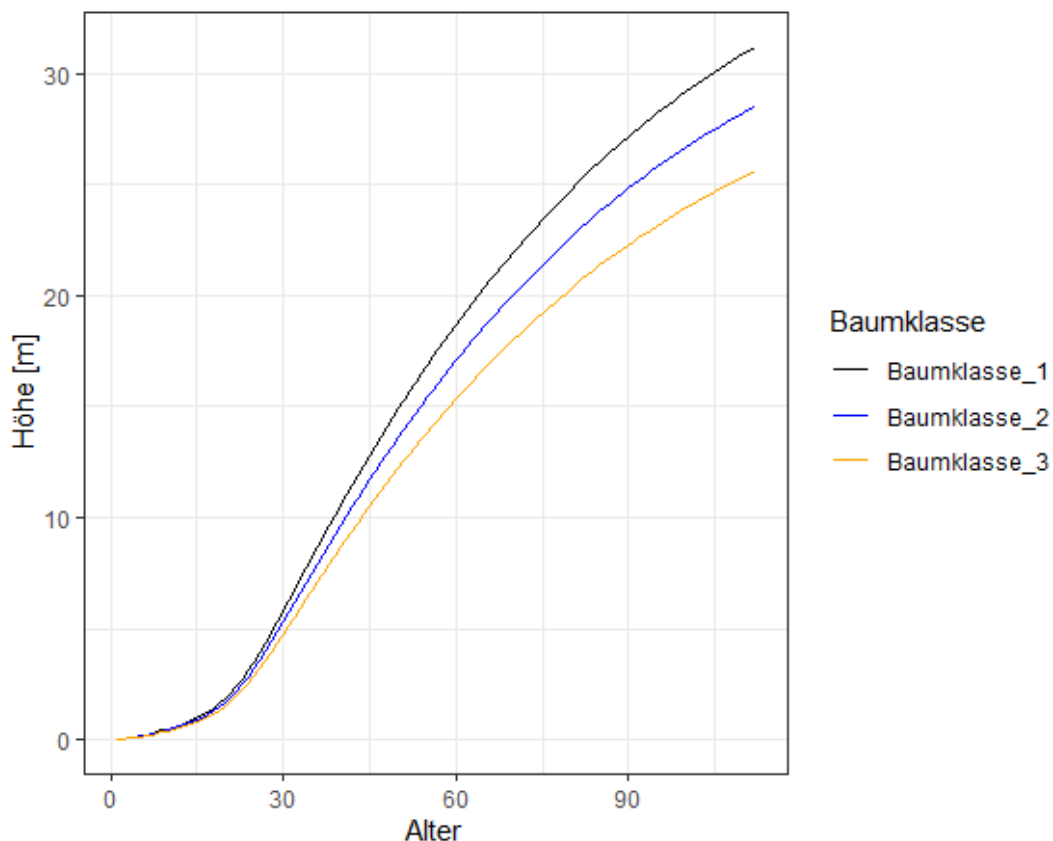


Abbildung 6: Höhenkurven der Baumklassen 1 (schwarz), 2 (blau) und 3 (rot) des Modells 1 bis zu einem Alter von 112 Jahren

Die folgende Tabelle enthält alle a_l , beziehungsweise gemittelten Interzeptionswerte der Nadeloberflächen der verschiedenen Modelle im Alter von 112 Jahren:

Tabelle 3: gemittelte Interzeptionswerte (a_l) der Modelle 1 - 4 im Alter 112

	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4
Baumklasse 1	51.05	80.513	179	38.629
Baumklasse 2	32.363	58.347	114.132	23.228
Baumklasse 3	18.86	37.413	70.879	18.153

Der zeitliche Verlauf dieser Werte ab dem Alter 65 ist in der folgenden Abbildung 7 für alle vier Modelle und mit allen Baumklassen geplottet. Die Kurven bestehen aus Datenpunkten, die für jeden fünften Zeitschritt und im maximalen Alter von 112 Jahren berechnet wurden. In der ersten Baumklasse liefert Modell 3 die höchsten Werte, die Beträge von Modell 2 liegen ebenfalls über denen von Modell 1 und 4. Genauso verhält es sich für die Baumklasse 2, in Baumklasse 3 sind die Werte für jedes Modell ähnlicher. Auffallend ist, dass die Werte für a_l in Modell 4 ab einem Alter von 95 wieder abnehmen. Die anderen Kurven zeigen erwartete Verläufe.

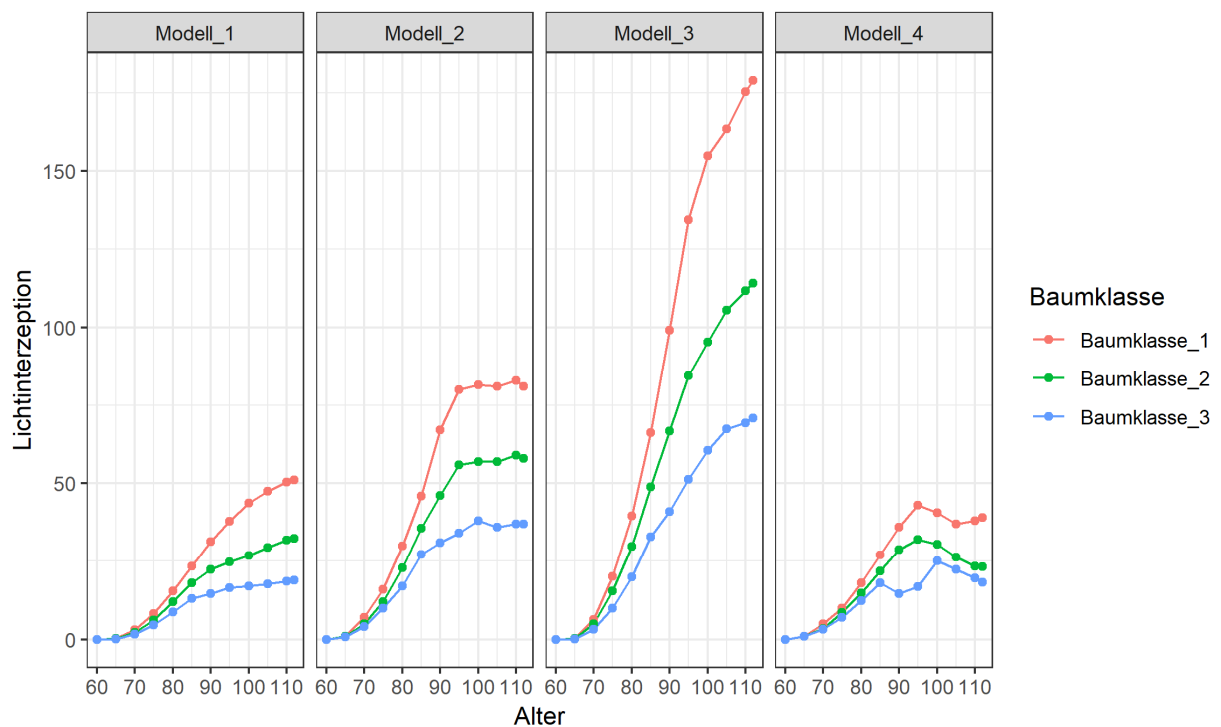


Abbildung 7: zeitliche Verläufe der Lichtinterzeption der verschiedenen Modelle 1 - 4 (von links nach rechts) anhand der verschiedenen Baumklassen 1 (rot), 2 (grün), 3 (blau)

Zusätzlich wurden die Kronenradien aller Modelle, ebenfalls ab dem Alter 65, für jede Baumklasse ermittelt. Tabelle 4 enthält die Beträge der Radien im Alter von 112 Jahren:

Tabelle 4: gemittelte Kronenradien der Modelle 1 - 4 im Alter 112

	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4
Baumklasse 1	4.431 m	4.431 m	6.072 m	6.424 m
Baumklasse 2	3.77 m	3.77 m	5.18 m	5.43 m
Baumklasse 3	3.188 m	3.188 m	4.363 m	4.578 m

Der zeitliche Verlauf der Kronenradien ist hier noch einmal in einer Grafik (Abbildung 8) abgebildet, damit die Modelle besser miteinander verglichen werden können. Bei Modell 1 und 2 sind die Kurven identisch. Modell 3 und 4 liefern höhere Werte für den Kronenradius, dabei ist der Radius im vierten Modell noch ein wenig höher als im dritten.

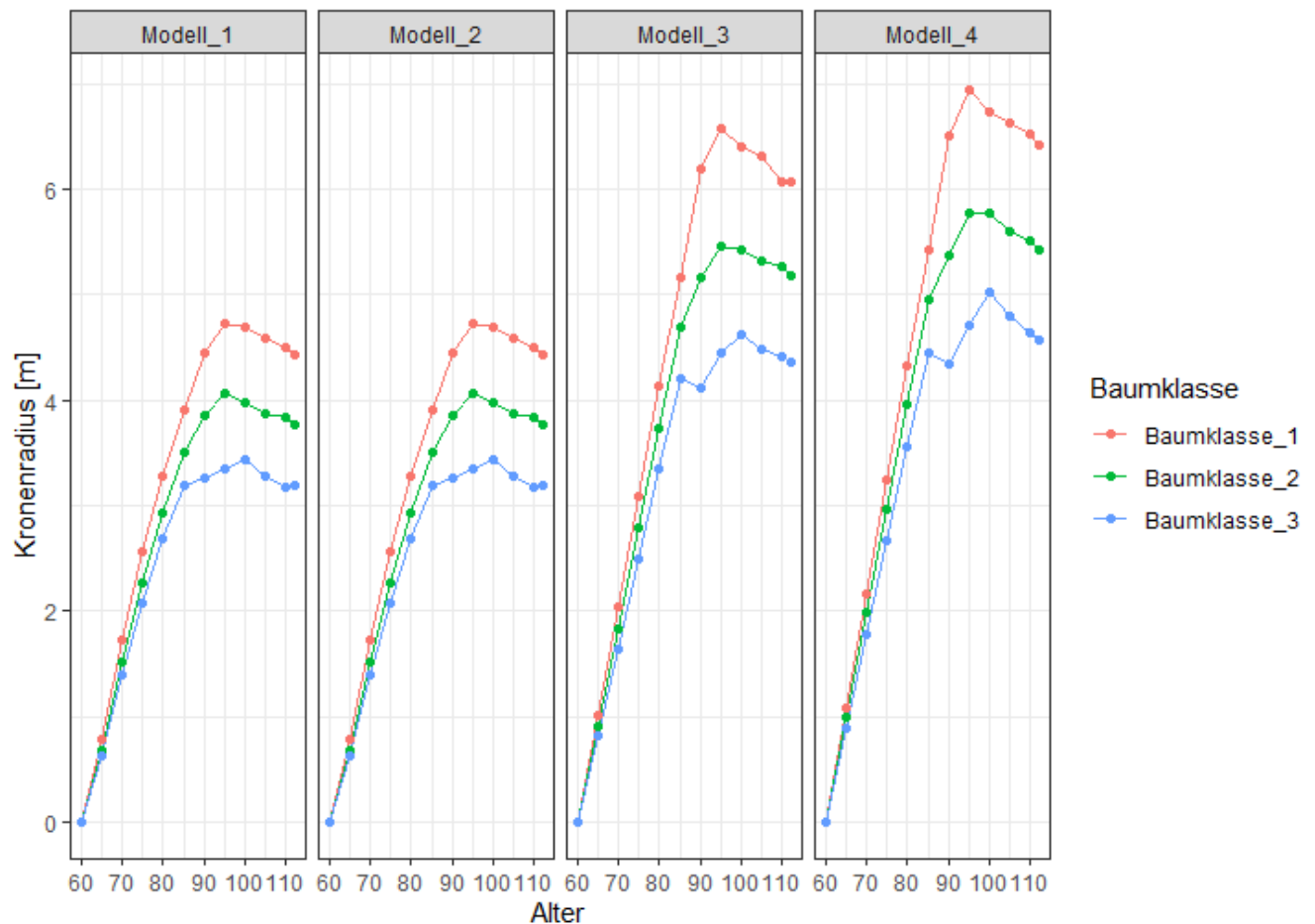


Abbildung 8: zeitliche Verläufe der Kronenradien der verschiedenen Modelle 1 - 4 (von links nach rechts) anhand der verschiedenen Baumklassen 1 (rot), 2 (grün), 3 (blau)

3.4 Vergleich von Modell 1 und Modell 3 unter Berücksichtigung eines Korrekturfaktors

Beim Betrachten der Lichtinterzeptionskurven der verschiedenen Modelle fällt auf, dass die Verläufe der Kurven von Modell 1 und Modell 3 einen ähnlichen Trend zeigen, die Beträge der Daten sind in Modell 3 jedoch deutlich höher. Im Zuge dessen wurde ein Korrekturfaktor *Faktor_1* (0.353) ermittelt, der sich über das relative Verhältnis der einzelnen Punkte von Modell 1 zu Modell 3 über alle Baumklassen als Mittelwert dieser berechnet. Alle Beträge von *al* in Modell 3 wurden mit diesem multipliziert, um eine gleiche Dimension der Punktbeträge zu schaffen.

Zusätzlich wurde der *Faktor_2* (0.278) noch einmal nur im Alter von 112 Jahren über alle Klassen ermittelt und gemittelt. Die Kurven, die sich aus der Multiplikation mit den Beträgen für *al* aus Modell 3 ergeben, sind hier mit dem Verlauf der Werte von *al* in Modell 1 in Abbildung 9 dargestellt. In der ersten Baumklasse nimmt das Modell 3 mit *Faktor_1* ab einem Alter von 85 höhere Wert an, als die beiden anderen Kurven. Dieser Effekt tritt auch bei den anderen Baumklassen auf, bei der dritten Klasse jedoch erst im Alter von 90 Jahren. Das Modell 3 mit *Faktor_2* bewegt sich in allen drei Klassen nah an der Kurve von Modell 1. Lediglich in jüngeren Altersstufen ist eine kleine Abweichung zu erkennen.

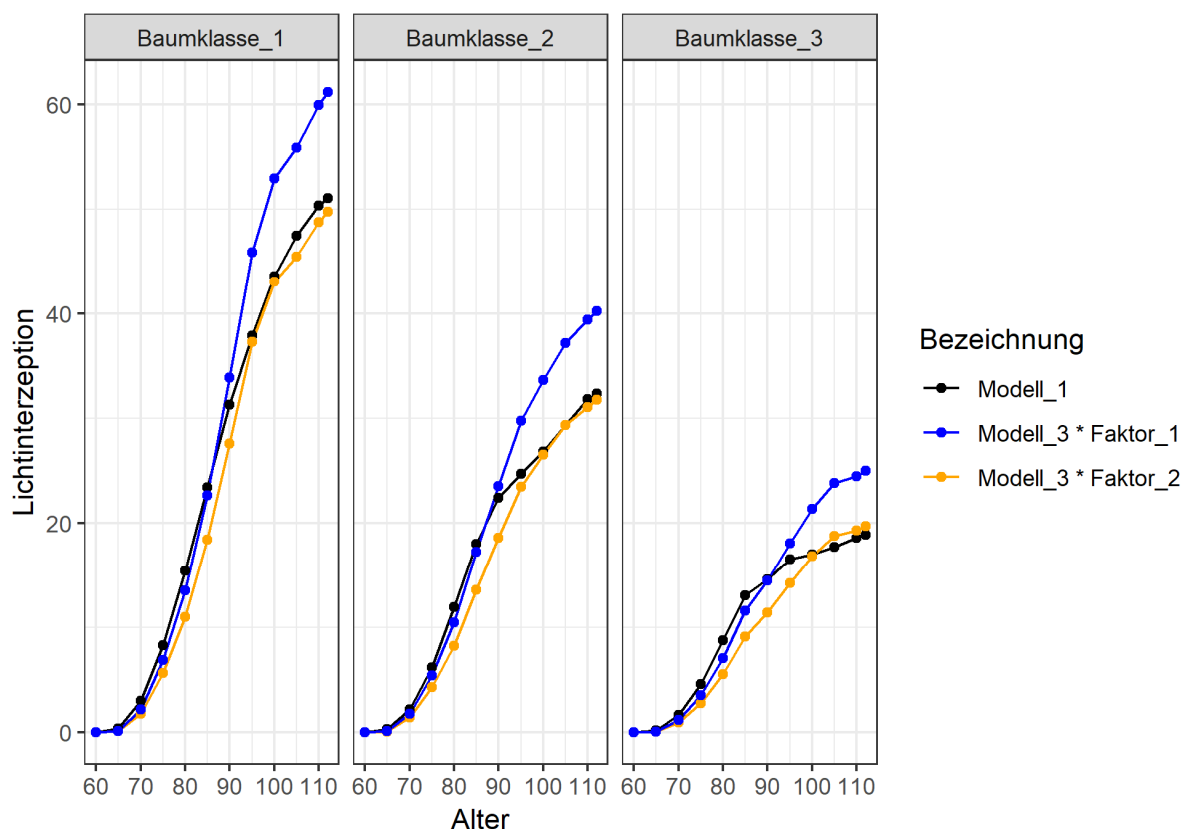


Abbildung 9: zeitliche Verläufe der Lichtinterzeption von Modell 1 (blau) und Modell 3 unter Verwendung des Korrekturfaktors *Faktor_1* (blau) und *Faktor_2* (gelb)

4 Diskussion

4.1 Modell 1

Die verschiedenen Werte, die für a_l ermittelt wurden, zeigen deutliche Unterschiede abhängig von der Baumklasse. Damit bestätigt sich, dass das Modell sensitiv auf die Baumklasse reagiert, wie es auch in GROGRA der Fall.

Es konnte jedoch nur jeweils ein Durchlauf pro Klasse simuliert werden, da die Rechenzeit des Modells extrem hoch war und die meisten Simulationsversuche durch eine Überschreitung des verfügbaren Speichers einen Absturz des Programms Grolmp zur Folge hatten. Somit ist fraglich, ob die Beträge von a_l einen repräsentativen Wert liefern, der sich bei einer größeren Anzahl an Simulationen als Mittelwert ergeben hätte, statistische Methode wie eine Fehleranalyse sind nicht durchführbar. Es bietet sich daher an, das Modell mit einem anderen leistungsstärkeren Computer zu testen und mehrere Simulationen pro Baumklasse durchzuführen, um einen genaueren Wert zu erhalten. Durch die Stochastizität, die an vielen Stellen im Modell wirkt, kann es aber auch sein, dass der Zufall im Modell als Ganzes eine kleine Rolle spielt und somit mit jeder Simulation sehr ähnliche Werte liefert.

Beim Vergleich mit dem in GROGRA generierten Modell fällt auf, dass die Kronenlänge in Modell 1 erkennbar niedriger ist (siehe Abbildung 2). Dies könnte daran liegen, dass die Simulation der Kronenentwicklung erst beim 60. Zeitschritt aktiviert wurde. Wenn ein PC mit mehr Rechenleistung zur Verfügung steht, besteht die Möglichkeit das Modell mit einer Kronenbildung direkt beim ersten Zeitschritt laufen zu lassen, um diese Annahme zu überprüfen. In diesem Fall können auch die in Grolmp eingebauten Funktionen benutzt werden, um die Werte für die Nadeloberfläche, die Anzahl der Äste, die Gesamtlänge dieser, sowie das Volumen mit denen des GROGRA Modells zu vergleichen. Der Vergleich der Baumhöhe von Modell 1 und der mit der Baumklasse 2 generierten in GROGRA (Tabelle 2) zeigt, dass die Höhenfunktion in Grolmp exakt gleich wie in dem GROGRA Modell funktioniert. Ebenso liegt der Kronenradius mit einer kleinen Abweichung von 0,038 m in einem erwarteten Bereich. Die Morphologie des visualisierten Modelloutputs von Modell 1 gleicht dem des GROGRA Modells. Es kann also davon ausgegangen werden, dass das Modell 1 richtig funktioniert, gegebenenfalls könnten noch einige Verbesserungen, wie das Anpassen der Kronenlänge, eingebaut werden.

4.2 Modell 2

Die in dem Kegelmodell berechneten Werte für a_l liegen deutlich über denen, die das komplexe Modell 1 ausgibt (siehe Tabelle 3). Auch der Verlauf der zeitlichen Kurven (Abbildung 7) ab einem ungefähren Alter von 95 Jahren gleicht nicht dem, der in Modell 1 zu beobachten ist. Der Grund für die zu hohen Werte könnte daran liegen, dass die Oberfläche eines Zylinders eine deutlich höhere effektive Nadeloberfläche bereitstellt, als eine zerfurchte und sich selbst beschattende Oberfläche, die im komplexen Modell 1 modelliert wird. Es kann bei einer derart starken Vereinfachung des Modells auch nicht erwartet werden, den Output komplexen Modells genau nachzubilden

Modell 2 eignet sich daher in der jetzigen Form nicht zur Vereinfachung Darstellung des komplexen Modells, da der Output zu stark abweicht.

4.3 Modell 3

Hier liegen die kalkulierten Lichtwerte ebenfalls deutlich über denen, die in Modell 1 ausgegeben (Tabelle 3) werden. In allen Baumklassen sind hier die Werte etwa drei mal so hoch (Abbildung 7). Die beobachtete Ähnlichkeit zwischen dem Verlauf der Kurven dieses Modells und Modell 1 ist hier von allen Modellen aber am größten. Das Modell reagiert in Bezug auf unterschiedliche Baumklassen und verschiedene Altersklassen so wie das komplexe Modell. Der Grund dafür ist, dass dieses Modell die gleichen Funktionen wie Modell 1 verwendet, lediglich die Fläche der Segmente wird hier umgerechnet.

Daher wurde wie in 3.4 erläutert, ein Korrekturfaktor ermittelt, der die Beträge der Lichtinterzeption in eine vergleichbare Dimension umrechnet. Die beiden Kurven (siehe Abbildung 9), die sich aus den beiden unterschiedlich errechneten Faktoren pro Baumklasse ergeben, bilden die Lichtinterzeption im zeitlichen Verlauf gut ab. Welcher der Faktoren verwendet wird, kann von der Fragestellung in Bezug auf das zu simulierende Baumalter abgeleitet werden. In den niedrigeren Rängen liefert der *Faktor_1*, der sich aus den Mittelwerten aus allen Altersstufen ableitet, genauere Ergebnisse. Bei dem Zielalter 112 liefert *Faktor_2* jedoch die genaueren Beträge. Bei einer Auswahl eines Faktors über die gesamte Breite der Altersklassen sollte *Faktor_2* benutzt werden. Dieser zeigt in geringen Altersklassen zwar eine Abweichung, diese ist aber nicht so stark wie die Abweichung der resultierenden Beträge bei Benutzung von *Faktor_1* in höheren Altersklassen, da er auf die geringeren Adsorptionswerte in jungen Jahren keine so große Auswirkung hat.

4.4 Modell 4

Die Ergebnisse (Tabelle 3) zeigen, dass die Lichtmenge, die auf die nadeltragenden Segmente trifft, unter der Lichtmenge im ursprünglichen Modell liegt (abgesehen von Baumklasse 3). Die Analyse der Radian (Tabelle 4) zeigt jedoch, dass die horizontale Ausdehnung der Krone in Modell 4 deutlich über der in Modell 1 liegt. Hier muss noch ein Fehler im Code bestehen. Würde man die Radian an das Modell 1 anpassen, lägen die kalkulierten Lichtwerte jedoch noch deutlicher unter denen im komplexen Modell. Damit wäre das Modell noch ungenauer bei der Abbildung der Lichtinterzeption. Der Grund dafür ist, dass die einzelnen Scheiben einen starken beschattenden Effekt auf die früher entstandenen Scheiben haben. Da die medialen Scheiben einen geringeren Radius als die subapikalen haben, sind diese ausnahmslos komplett beschattet und haben keine Wirkung auf die Aufnahme von Licht. Um dieses Problem zu lösen, könnte ein Teil des Lichtes durch die Scheiben transmittieren. Dabei müsste aber wiederum definiert werden, wie viel Prozent des einstrahlenden Lichtes durch die Scheiben aufgenommen, transmittiert und reflektiert wird, damit der Modelloutput die richtige Dimension annimmt.

Um diese Werte zu ermitteln, könnte weitere Modellierungsarbeit betrieben oder aber im Feld gemessen werden, wie viel Prozent einer ausgestrahlten Lichtmenge auf einen Pseudoquirl tatsächlich durch diesen transmittieren, aufgenommen und reflektiert werden.

Außerdem weist das Modell keinerlei Stochastizität auf, trotzdem ergeben sich bei verschiedenen Simulationen unterschiedliche Werte für a_l . Es muss also einen weiteren Fehler in dem Modell geben. Zusätzlich liefert das Modell in einem Alter von 90 Jahren höhere a_l Werte als in einem Alter von 112. In den Werten der Kronenradien ist zu erkennen, dass die Krone mit dem Alter wieder zusammenschrumpft. Dies ist auch in Modell 1 der Fall, jedoch erhöht sich dort die Verzweigung und die Länge der Äste höherer Ordnungen und der a_l Wert nimmt nicht ab, wie in diesem Modell, wo nur die Ausdehnung der Scheiben abhängig von dem Längenwachstum der Äste erster Ordnung eine Rolle spielt.

Aufgrund der genannten Punkte eignet sich auch das Modell 4 in seiner jetzigen Form nicht dazu, das Modell 1 vereinfacht abzubilden und müsste für die Verwendung weiter verbessert werden.

4.5 Fazit

Im Gegensatz zu den Modellen 2 und 4, liefert Modell 3 unter Einbezug des Korrekturfaktors *Faktor_2* deutlich bessere Ergebnisse (siehe Abbildung 9) bei der vereinfachten Abbildung von Modell 1. Somit ist Modell 3 das Modell, dass zur Vereinfachung benutzt werden sollte.

Um eine noch höhere Übereinstimmung von Modell 3 mit Modell 1 zu erreichen, bietet sich auch die Möglichkeit, einen Faktor zu verwenden, der sich über die verschiedenen Altersklassen verändert. Dabei könnte jedoch der Eindruck entstehen, dass die Ergebnisse so individuell beschönigt werden, um den besten Output zu erreichen. Das Vorgehen wäre wissenschaftlich betrachtet zu bezweifeln. Außerdem kann bei einer Vereinfachung eines Modells nicht davon ausgegangen werden, dass das vereinfachte Modell das Originale genau abbilden kann. Die beobachtete Abweichung von Modell 3 von Modell 1 ist unter Berücksichtigung dieses Aspektes als sehr gering anzusehen.

Gänzlich betrachtet, ist mit dem Modell 3 eine Vereinfachung von Modell 1 in Bezug auf die Aufnahme von photosynthetisch aktiver Strahlung, wie in Abbildung 9 zu erkennen ist, gut gelungen.

Literaturverzeichnis

Gravenhorst, Gode und Ibrom, Andreas (1996), Die biophysikalische Steuerung der CO₂- und Wasserbilanz von Waldökosystemen. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B*, **52**, Verbundprojekt „Veränderungsdynamik von Waldökosystemen“. Zwischenbericht 1994 / 1995, Teil II. Forschungszentrum Waldökosysteme, Göttingen, 155-165.

Gruber, Franz (1987a), Das Verzweigungssystem und der Nadelfall der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) als Grundlage zur Beurteilung von Waldschäden. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme / Waldsterben, A*, **26**, Göttingen.

Kniemeyer, Ole, Gerhard Buck-Sorlin, and Winfried Kurth. "GroIMP as a platform for functional-structural modelling of plants." *Frontis* (2007): 43-52.

Kurth, Winfried. "Growth grammar interpreter grogra 2.4-a software tool for the 3-dimensional interpretation of stochastic, sensitive growth grammars in the context of plant modelling." (1994).

Kurth, Winfried, and Branislav Sloboda. "Growth grammars simulating trees—an extension of L-systems incorporating local variables and sensitivity." (1997).

Kurth, Winfried. "Die Simulation der Baumarchitektur mit Wachstumsgrammatiken." (1999).

Kurth, Winfried. "Specification of morphological models with L-systems and relational growth grammars." *Journal of Interdisciplinary Image Science* 5 (2007): 25.

Lindenmayer, Aristid. "Mathematical models for cellular interactions in development I. Filaments with one-sided inputs." *Journal of theoretical biology* 18.3 (1968): 280-299.

Seibt, G. (1981), Die Buchen- und Fichtenbestände der Probeflächen des Sollingprojektes der Deutschen Forschungsgemeinschaft. *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt*, **72**. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a.M.

Sloboda, Branislav; Kurth, Winfried, und Früh, Thomas (1996), Morphologisches Modell des Baumwachstums. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B*, **52**, Verbundprojekt „Veränderungsdynamik von Waldökosystemen“. Zwischenbericht 1994 / 1995, Teil II. Forschungszentrum Waldökosysteme, Göttingen, 185-193

Vos, J., et al. "Functional–structural plant modelling: a new versatile tool in crop science." *Journal of experimental Botany* 61.8 (2009): 2101-2115.

sfspm05.gsz: <http://www.uni-forst.gwdg.de/~wkurth/sfspm05.gsz>