

Ecological Modelling Modellieren/Simulieren WS21/22

Richard Fechner, Randy Herbertz, Nataliia Kruchinina

November 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
2	Zielstellung	4
3	Methode	4
3.1	Annahmen	4
3.2	Technische Details	4
3.3	Herausforderungen	5
3.3.1	Modellierung Initialzustand	5
3.3.2	Modellierung der veränderlichen Zustände	6
3.3.3	Modellierung von offspring und Sterberate	10
4	Resultate	11
5	Diskussion	20
5.1	Analyse der Resultate	20
5.2	Validierung und Limitationen	21
5.3	Ungelöste Probleme	22
5.4	Erweiterungsmöglichkeiten	23

1 Einführung

Ein Ökosystem beschreibt den Verbund von Lebensformen und die Wechselwirkung derer aufeinander in einem bestimmten Raum. Ökosysteme gründen auf extrem komplexen Zusammenspielen von mehreren Umwelteinflüssen und den Bewohnern dieses Weltausschnittes. Eines dieser Ökosysteme ist der Wald. Innerhalb eines Waldes spielen sich, verborgen vor unseren Augen, eine Reihe von Prozessen ab, ein ständiges Ringen um Licht, Wasser und Nährstoffe aus dem Boden. Gleichzeitig gehen bestimmte Lebensformen eine Symbiose miteinander ein, um zu überleben.

Die Modellierung und Computersimulation dieser Ökosysteme hat mit der zunehmenden Verfügbarkeit von Rechenressourcen an Aufmerksamkeit gewonnen. Mithilfe dieser Simulationen können verschiedene Szenarien und der Einfluss sich stark verändernder Umwelteinflüsse auf eben diese Ökosysteme prognostiziert werden.

Der menschengemachte Klimawandel gehört unabstreitbar zu den Faktoren, welche den Wald als Ökosystem beeinflussen [5]. Erhöhte Temperaturen sorgen für ein erhöhtes Risiko von Waldbränden, welche wiederum gesamte Ökosysteme zerstören können.

2 Zielstellung

Im Rahmen einer Ausarbeitung für das Modul Modellieren und Simulieren im Wintersemester 20/21 wurde ein Ökosystem, genauer ein deutscher Mischwald, modelliert. Ziel der Ausarbeitung ist es primär den Einfluss von veränderlichen Umwelteinflüssen auf die Anzahl und die Beschaffenheit der verschiedenen Bäume des Waldes zu modellieren.

Sekundär soll ein stabiles und erweiterbares Framework für folgende Simulationen zur Verfügung gestellt werden.

3 Methode

3.1 Annahmen

Um einen Mischwald mathematisch modellieren zu können, müssen erst einmal Annahmen getroffen werden, mit denen diese ökologischen Prozesse in mathematische Formeln umgewandelt werden können. Als erstes muss klargestellt werden, dass nur die Bäume und unter diesen auch nur bestimmte Baumarten betrachtet werden. Tiere, Kleinpflanzen und sonstige Bewohner des Ökosystems werden nicht berücksichtigt. Dann wird außerdem davon ausgegangen, dass sich alle Blätter des Baumes an der Spitze des Stamms in einer Ebene befinden. Außerdem wird angenommen, dass sich weitere Größen eines Baumes, wie die Größe der Baumkrone und die Höhe, durch den Durchmesser und speziesspezifische Konstanten bestimmen lassen [4]. Dies ist nicht für alle Baumarten uneingeschränkt war, jedoch sind die Abweichungen minimal.

3.2 Technische Details

Das Modell wurde in der Programmiersprache *Java* geschrieben, als graphisches Framework wurde *JavaFX* verwendet. Die Autoren haben sich für *Java* und *JavaFX* entschieden, da in diesem speziellen Fall der Performanceverlust von der Visualisierungsmöglichkeit, Dynamik und der Erweiterbarkeit einer objektorientierten Sprache ausgeglichen wird. Zudem wurde das Modell stets mit dem Gedanken entwickelt, dass andere Arbeitsgruppen auf dieses leicht aufbauen können, um in Zukunft den Zeitaufwand für das Schreiben eines

Frameworks für die Simulation zu verringern.

3.3 Herausforderungen

Unser Modell folgt bereits bestehenden Grundlagen zur Modellierung von Ökosystemen, sogenannten "gap-models", bei denen das Wachstum, die Vermehrung und das Absterben von Bäumen in einem Ausschnitt eines Waldes modelliert wird [1, 4, 8].

Die Herausforderung der Modellierung kann in drei Teile aufgespalten werden, die Modellierung eines initialen Zustandes eines Waldstücks, die Modellierung der Differentialgleichungen, welche in Abhängigkeit von einem dt die Veränderung des jeweiligen Baumes beschreiben und schließlich der Modellierung von 'offspring' (Vermehrung) und des Sterbens eines Baumes.

In den folgenden Abschnitten werden die Herausforderungen einzeln erklärt.

3.3.1 Modellierung Initialzustand

Nach dem Prinzip "divide and conquer" lässt sich dieses Problem wieder in Subprobleme aufspalten. Diese Subprobleme sind zuerst einmal die authentische Alters- und Artenverteilung innerhalb eines Waldes, und dann die konkrete räumliche Verteilung der Bäume. Ein naiver Ansatz wäre es alle Baumarten gleichverteilt in Alter und Spezies in einer räumlichen 2-D Gleichverteilung zu modellieren.

Die Autoren dieser Ausarbeitung schlagen eine simple Alternative zu dem vorherigen genannten Ansatz vor. Es wurden drei Baumarten modelliert (Buche, Tanne und Fichte), welche die unglaubliche Artenvielfalt eines Mischwaldes approximieren sollen.

Hierzu wurden Daten einer Baumzählung verarbeitet, welche Auskunft über Alters- und Artenverteilung liefern, nämlich statistische Daten aus den Ergebnissen der Dritten Bundeswaldinventur aus dem Jahr 2012 [3]. Die Daten von der Dritten Bundeswaldinventur, die

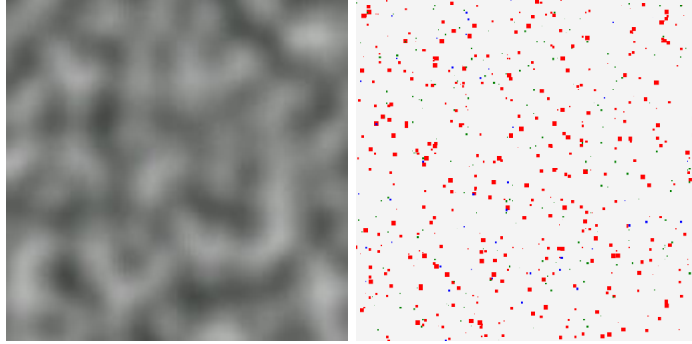


Abbildung 1: Links: Bild von 2-D Perlin Noise [2]. Grayscale-Wert eines pixels bei (x, y) wird benutzt um eine Warscheinlichkeit für das Auftauchen eines Baumes an der Position (x, y) zu berechnen.

Rechts: Initialzustand des Waldes. Hinweis: beide Bilder korrespondieren nicht, und dienen nur zur Verdeutlichung des Konzeptes.

in dieser Arbeit verwendet wurden, bezogen sich auf die Anzahl und prozentuale Verteilung der Bäume nach Arten und Alter in Rheinland-Pfalz.

Unser Modell benutzt Perlin Noise [7], um eine natürlich wirkende, jedoch zufällige räumliche Verteilung der Bäume zu finden.

3.3.2 Modellierung der veränderlichen Zustände

In unserem Modell sind Regenfall $AP[\text{mm}]$ (annual percipitation) und durchschnittliche Jahrestemperatur $T_m[^\circ\text{C}]$ normalverteilt. Bei jeder Iteration wird somit AP und T_m neu berechnet.

Alle Hauptparameter der Bäume im betrachteten Modell hängen vom Durchmesser des Baumes in einem bestimmten Lebensjahr und von seinen artspezifischen Eigenschaften ab. Einer der Hauptparameter von Bäumen, die wir bei der Modellierung eines Mischwald-ökosystems verwendet haben, war die Baumhöhe, die wir mit der folgenden Formel berechnet haben [1, 8]:

$$H(D) = 137 + b_2 \cdot D - b_3 \cdot D^2 \quad (1)$$

mit

$$b_2 = \frac{2 \cdot (H_{max} - 137)}{D_{max}} \quad (2)$$

$$b_3 = \frac{H_{max} - 137}{D_{max}^2} \quad (3)$$

In Formel (1) bezeichnen die Parameter H_{max} [cm] bzw. D_{max} [cm] die maximale Höhe und den maximalen Durchmesser einer bestimmten Baumart. Die entsprechenden Werte dieser Parameter wurden von uns auf Basis von Daten aus wissenschaftlichen Quellen für die Entwicklung eines Modells des Ökosystems eines Waldes vom Typ JABOVA verwendet [4].

Die Hauptgleichung im von uns erstellten Waldökosystemmodell war die Gleichung für die Änderung des Baumdurchmessers D [cm] im Wachstum, die durch die folgende Formel beschrieben wird [1]:

$$D'(t) = \frac{dD}{dt} = G \cdot D \cdot \left(1 - \frac{D * H}{D_{max} * H_{max}}\right) \cdot \frac{1}{b(D)} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \quad (4)$$

In Formel (4) bezeichnen die Parameter G den Wachstumsratenparameter; $b(D)$ ist eine Funktion, die die allometrische Beziehung zwischen Höhe und Durchmesser kapselt. Die Funktion $b(D)$ wird hier dargestellt als [8]:

$$b(D) = 274 + 3 \cdot b_2 \cdot D - 4 \cdot b_3 \cdot D^2 \quad (5)$$

In Formel (4) wird die allometrische Funktion (1) des Baumdurchmessers als Baumhöhe H verwendet. Die Funktionen f_1, f_2, f_3 bestimmen den Einfluss von Umweltfaktoren auf die Wachstumsrate von Bäumen. Jede dieser Funktionen kann von 0 bis 1 reichen.

Es ist anzumerken, dass zur Ermittlung des numerischen Werts des Durchmessers jedes Baumes, das bedeutet zur Lösung der Differentialgleichung (4), beschlossen wurde, keine analytische, sondern eine numerische Methode anzuwenden. Diese Entscheidung wurde aufgrund der komplexen Struktur der resultierenden Differentialgleichung (4) für die Änderung des Durchmessers des Baumes mit der Zeit getroffen. Eine so komplexe Struktur erlaubte nicht den Einsatz analytischer Methoden, um diese Gleichung zu lösen.

Bei der technischen Umsetzung des erstellten Modells wurde hierfür das Verfahren von Heun (oder wie steht auf Englisch in Referenz [9] - the improved Euler method) verwendet. Die Vorteile dieses

Verfahrens liegen in ihrer Einfachheit und relativ hohen Rechengenauigkeit.

Das Verfahren von Heun (the improved Euler method) wird verwendet, um Differentialgleichungen erster Ordnung zu lösen, die in der folgenden allgemeinen Form dargestellt werden können [9]:

$$y' = f(x, y), \quad y(x_0) = y_0. \quad (6)$$

In unserem Fall betrachten wir die Zeit t als unabhängige Variable x .

Der Zahlenwert der Funktion $y(t)$ wird nach diesem Verfahren mit folgender Formel berechnet [9]:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{2} \cdot (f(t_i, y_i) + f(t_{i+1}, y(t_{i+1}))). \quad (7)$$

In Formel (7) bezeichnet der Wert h den Änderungsschritt der Werte der unabhängigen Variablen, der die Punkte bestimmt, an denen der Wert der Funktion $y(t)$ berechnet wird. In unserem Modell beträgt dieser Schritt auf der Zeitachse 1 Jahr.

Bei dieser Formel muss man auch auf die Darstellung des Wertes $y(t_{i+1})$ achten. In der letzten Formel, die im Verfahren von Heun (the improved Euler method) verwendet wird, wird $y(t_{i+1})$ durch $y_i + hf(t_i, y_i)$ ersetzt, weil dies genau die Entsprechung ist, die ihm bei der Verwendung des Euler-Verfahrens zugewiesen wird [9]. Im Ergebnis lautet die endgültige Formel, die bei dem Verfahren von Heun (the improved Euler method) angewendet wird, wie folgt:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{2} \cdot (f(t_i, y_i) + y_i + h \cdot f(t_i, y_i)). \quad (8)$$

Formel (8) wurde bei uns während der technischen Implementierung des Ökosystemmodells der Wald implementiert, um den Durchmesser jedes Baumes für das laufende Jahr seines Lebens zu berechnen.

Als nächstes werden die Formeln beschrieben, die den Einfluss externer natürlicher Faktoren auf die Wachstumsrate von Bäumen beschreiben.

Die erste Formel, die mit dem Einfluss der umgebenden Welt auf die Entwicklung von Bäumen im erstellten Modell des Waldökosystems verbunden ist, ist die Formel für Funktion $f1$. Funktion $f1$ beschreibt die Zugänglichkeit von Licht zu einem Baum mit der Höhe $h[\text{cm}]$ [6]:

$$f1 = Q(h) = Q_{max} \cdot e^{-shadeIntolerance \cdot LA(h)}, \quad (9)$$

sodass $Q_{max} = 1$, $shadeIntolerance$ ein baumspezifischer Wert, welcher die Intoleranz des Baumes gegenüber Schatteneinfall beschreibt und $LA(h)$ - die Gesamtfläche $[\text{m}^2]$ der Blätter benachbarter Bäume, die höher als die aktuelle Baumhöhe h sind.

Je höher $shadeIntolerance$, desto niedriger wird der Faktor $f1$, was einen direkten Einfluss auf das Wachstum des Baumes hat.

Die nächste Funktion $f2$, die mit dem Einfluss natürlicher Faktoren auf das Wachstum von Bäumen verbunden ist, beschreibt die Wasserverfügbarkeit für einen Baum mit einem Durchmesser von $D[\text{m}]$:

$$f2 = \frac{LA \cdot AP}{\frac{W}{6.71} \cdot 52 \cdot D} \quad (10)$$

In Formel (10) bezeichnet $LA[\text{m}^2]$ die Blattfläche der Blätter des betreffenden Baumes und wird nach der Formel berechnet [4]:

$$LA = c \cdot D^2 \quad (11)$$

sodass $D[\text{m}]$ der Durchmesser dieses Baumes ist, und c eine speziesspezifische Konstante ist.

Die anderen Parameter in Formel (10) haben folgende Bedeutung:
 $AP[\text{m}]$ - jährlicher Niederschlag;

$gal/woche * m$ oder $gal/(woche * m)$?

$W[\text{gal}/\text{Woche} * \text{m}]$ - die erforderliche Wassermenge, die ein Baum für jeden Meter Durchmesser jede Woche des Jahres erhalten sollte; 52 Wochen ist der Durchschnitt der Anzahl der Wochen in einem Jahr.

Ein weiterer wichtiger Einfluss der umgebenden Welt auf das Wachstum von Bäumen, nämlich der Einfluss der Lufttemperatur, wird in unserem Waldökosystemmodell mit Funktion $f3$ realisiert. In unserem Modell wird Funktion $f3$ wie folgt verwendet [1]:

$$f3 = -\frac{1}{5062500} \cdot degreeDays^2 + \frac{11}{10125} \cdot degreeDays - \frac{40}{81}. \quad (12)$$

In Formel (12) wird der Wert von $degreeDays$ separat nach folgender Formel berechnet [1]:

$$degreeDays = \sum_{m=Jan}^{Dec} (T_m - 4.4) \cdot d_m \quad (13)$$

sodass $T_m[^\circ\text{C}]$ die monatliche Durchschnittstemperatur ist, d_m ist die Anzahl der Tage im Monat, und $4,4^\circ\text{C}$ ist die Basistemperatur [1].

Alle oben genannten Formeln werden bei der technischen Umsetzung unseres Waldökosystemmodells verwendet, um die Parameter der Bäume jeder Art für jedes Lebensjahr zu berechnen.

3.3.3 Modellierung von offspring und Sterberate

Die grundlegende Idee ist, dass die Umwelteinflüsse die Sterberate und offspring-Chance beeinflussen.

Ein Jahr wird als ein gutes Jahr bezeichnet, wenn $600 \leq AP \wedge 8 \leq T_m \leq 12$, woraus folgt, dass

$$goodYear(AP, T_m) = \begin{cases} 1 & , 600 \leq AP \wedge 8 \leq T_m \leq 12 \\ 0 & , sonst \end{cases} \quad (14)$$

In unserem Modell steigt die Baumanzahl nach Arten proportional zu der Verteilung dieser. Zusätzlich kann es nur eine Vermehrung geben, wenn die Umwelteinflüsse der Iteration entsprechend gut waren, sprich wenn $goodYear(AP, T_m) = 1$.

Wird diese Bedingung in einer Iteration erfüllt, bekommt ein Anteil der Bäume einen 'offspring'. Hierzu werden Bäume zufällig aus-

gewählt, und dem Modell wird ein junger Baum der korrespondierenden Baumart an einer 2-D normalverteilten Position um den jeweiligen zufällig ausgewählten Baum hinzugefügt.

Die Sterbechance P_d ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Baum in der Iteration stirbt. Jeder Baum hat eine grundlegende Chance in einer Iteration zu sterben. Da wir wissen, dass nur etwa 2% einer Baumart ihr maximales Alter erreicht, können wir ϵ aus dem maximalen Alter berechnen:

$$\epsilon(maxAlter) = 1 - \sqrt[{\max Alter}]{0.02} \quad (15)$$

Wenn wir diese Sterbechance mit ϵ beschreiben, so ist die grundlegende Chance für einen Baum zu überleben also $(1 - \epsilon)$. Diesen Ansatz erweitern wir, sodass P_d steigt, wenn der Baum aufeinanderfolgende Jahre hat, in denen der Zuwachs seines Durchmessers D geringer als 0.01 cm ist. Jeder Baum trägt für sich die Information über genau diese aufeinanderfolgenden schlechten Jahre in einer Variable *badYearCounter*.

Insgesamt ermitteln wir somit die Sterbechance in einer Iteration für einen Baum folgendermaßen:

$$P_d = \begin{cases} 1 - e^{-0.0837 * badYearCounter} & , badYearCounter > 0 \\ \epsilon & , sonst \end{cases} \quad (16)$$

4 Resultate

Um die Arbeit des konstruierten Modells des Waldökosystems zu analysieren, wurden 4 Simulationen der Arbeit dieses Modells für verschiedene natürliche Bedingungen durchgeführt. Für jede Version der Simulation des Waldökosystemmodells wurden die entsprechenden Grafiken erstellt, die die Zusammensetzung des Waldes nach Anzahl der Bäume und deren Volumen nach einer bestimmten Zeit zeigen. Zu jeder Simulationsvariante wird es auch Abbildungen geben, die die Zusammensetzung des Waldes zeigen. Auf diesen Abbildungen wird der simulierte Wald dargestellt, dabei entsprechen die Punkte den unterschiedlichen Bäumen. Die Farbe steht für die Baumart und die Größe des Punktes stellt die Größe des Baums

dar. In den Abbildungen steht Rot für Buchen, Blau für Tannen und Grün für Fichten. Alle erhaltenen Simulationsergebnisse, Grafiken und Abbildungen sind unten dargestellt.

Bei der ersten Simulation des konstruierten Mischwaldökosystems haben wir Wetterbedingungen ausgewählt, die den normalen Wetterbedingungen in Koblenz entsprechen, nämlich:

- der jährliche Niederschlag beträgt 700 mm mit einer Standardabweichung dieses Indikators von 50 mm;
- die durchschnittliche jährliche Lufttemperatur beträgt 10 °C mit einer Standardabweichung dieses Indikators von 1 °C;
- die Nachwuchsrate beträgt 2 %.

Die Ergebnisse der Modellierung eines Waldökosystems mit den oben genannten Bedingungen sind in den Abbildungen 2, 3, 4 dargestellt.

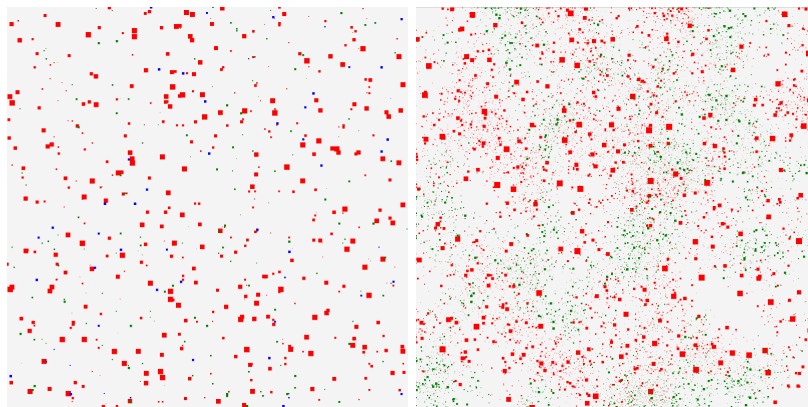


Abbildung 2: Links: Initialzustand des Waldes bei der Modellierung seines Bestehens unter normalen natürlichen Bedingungen für Koblenz. Rechts: Zustand des Waldes für 500 Jahre seines Bestehens unter normalen natürlichen Bedingungen für Koblenz.

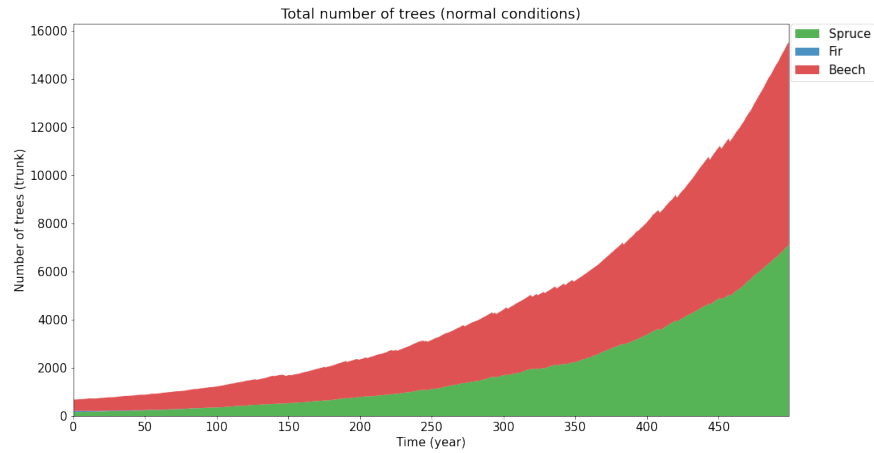


Abbildung 3: Die Gesamtzahl der Bäume im simulierten Waldökosystem nach 500 Jahren seines Bestehens unter normalen natürlichen Bedingungen für Koblenz.

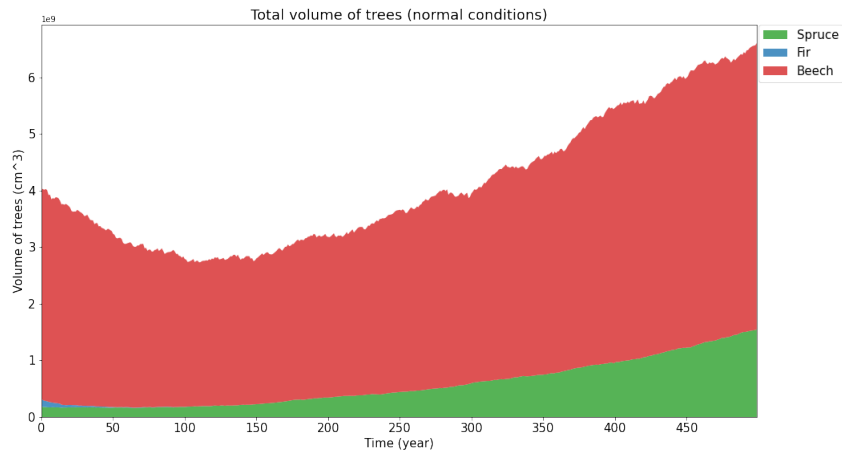


Abbildung 4: Das Gesamtvolumen der Bäume im simulierten Waldökosystem nach 500 Jahren seines Bestehens unter normalen natürlichen Bedingungen für Koblenz.

Bei der Durchführung der zweiten Modellierung der Existenz des Mischwaldökosystems wurden die heute auftretenden Klimaänderungen,

nämlich die Erhöhung der durchschnittlichen Jahreslufttemperatur, berücksichtigt. Somit waren die neuen Modellierungsbedingungen wie folgt:

- der jährliche Niederschlag beträgt 700 mm mit einer Standardabweichung dieses Indikators von 50 mm;
- die durchschnittliche jährliche Lufttemperatur ist eine Funktion der Zeit und wird nach folgender Formel berechnet:

$$f(t) = 10^{\circ}\text{C} + 0,01^{\circ}\text{C} \cdot t; \quad (17)$$

- die Standardabweichung der jährlichen Lufttemperatur beträgt 1°C ;
- die Wachstumsrate beträgt 2 %.

Die Ergebnisse der Modellierung eines Waldökosystems mit den oben genannten Bedingungen sind in den Abbildungen 5, 6, 7 dargestellt.

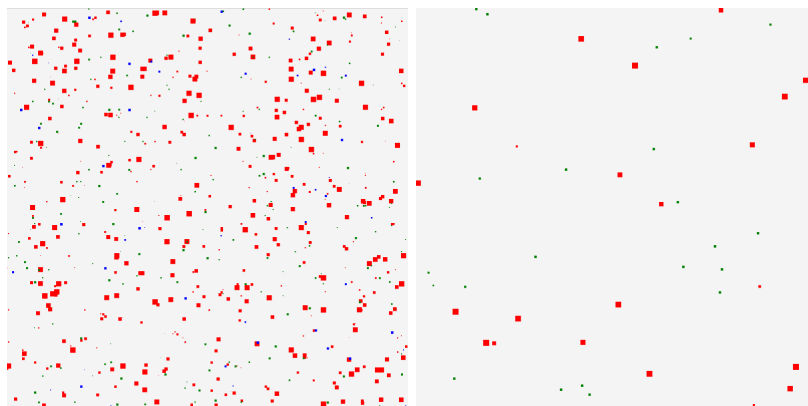


Abbildung 5: Links: Initialzustand des Waldes bei der Modellierung seiner Existenz unter der Bedingungen vom Klimawandel.

Rechts: Zustand des Waldes für 500 Jahre seines Bestehens unter der Bedingungen vom Klimawandel.

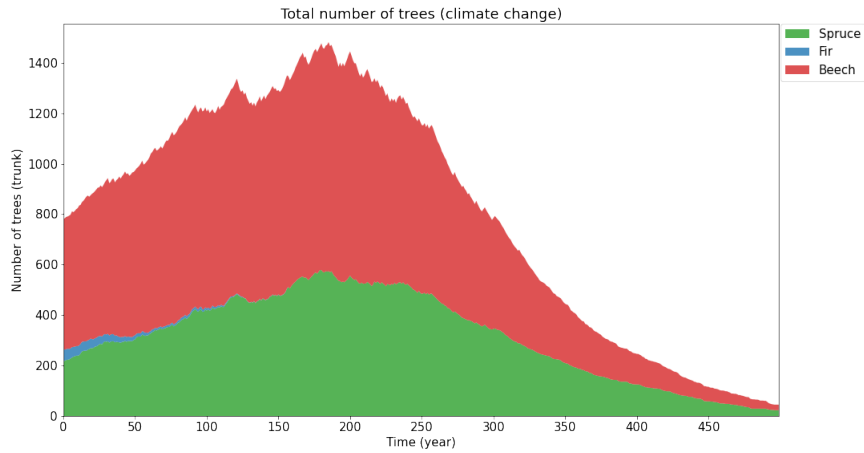


Abbildung 6: Die Gesamtzahl der Bäume im simulierten Waldökosystem nach 500 Jahren seines Bestehens unter der Bedingungen vom Klimawandel.

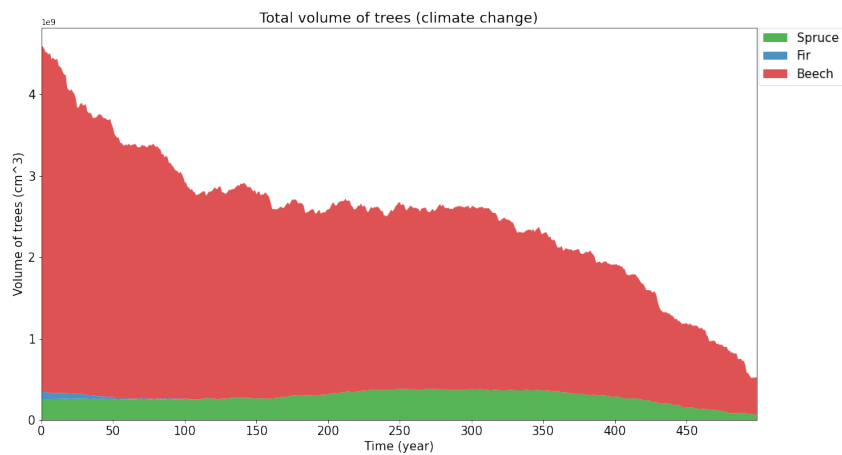


Abbildung 7: Das Gesamtvolumen der Bäume im simulierten Waldökosystem nach 500 Jahren seines Bestehens unter der Bedingungen vom Klimawandel.

Die dritte Simulation der Arbeit des von uns erstellten Waldökosystemmodells zielte darauf ab, den Einfluss ungünstiger Wetterbedingungen auf das Wachstum und die Entwicklung von Bäumen zu untersuchen. In dieser Version der Simulation wurden die folgenden

Umgebungsbedingungen angewendet:

- der jährliche Niederschlag beträgt 700 mm mit einer Standardabweichung dieses Indikators von 150 mm;
- die durchschnittliche jährliche Lufttemperatur ist eine Funktion der Zeit und wird nach Formel (17) berechnet;
- die Standardabweichung der jährlichen Lufttemperatur beträgt $2,5^{\circ}\text{C}$;
- die Nachwuchsrate beträgt 2 %.

Die Ergebnisse der Modellierung eines Waldökosystems mit den oben genannten Bedingungen sind in den Abbildungen 8, 9, 10 dargestellt.

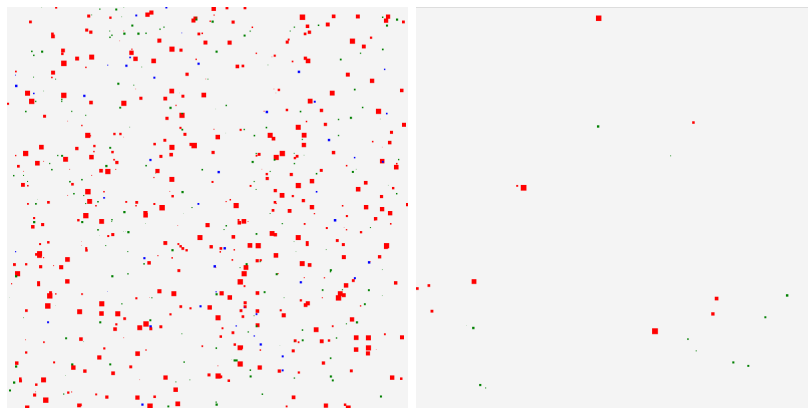


Abbildung 8: Links: Initialzustand des Waldes bei der Modellierung seiner Existenz unter extremen Wetterbedingungen.

Rechts: Zustand des Waldes für 500 Jahre seines Bestehens unter extremen Wetterbedingungen.

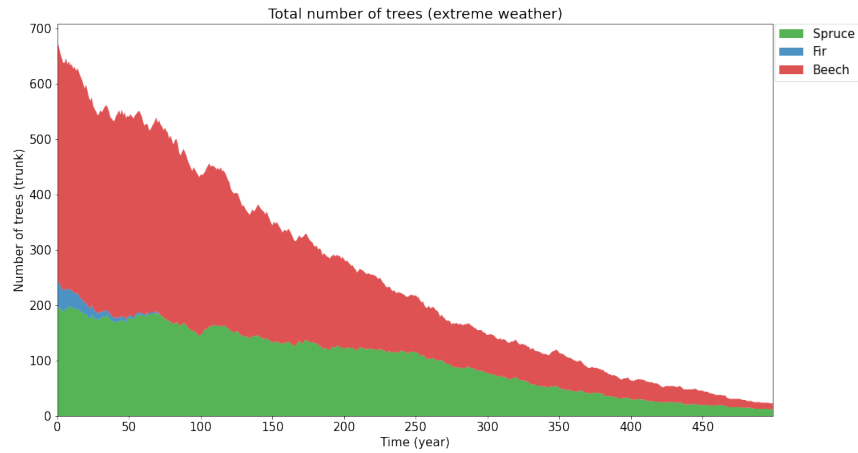


Abbildung 9: Die Gesamtzahl der Bäume im simulierten Waldökosystem nach 500 Jahren seines Bestehens unter extremen Wetterbedingungen.

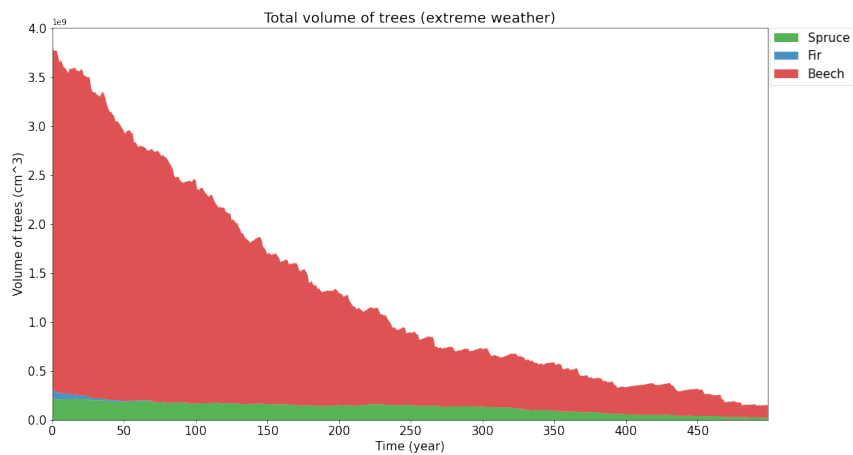


Abbildung 10: Das Gesamtvolumen der Bäume im simulierten Waldökosystem nach 500 Jahren seines Bestehens unter extremen Wetterbedingungen.

Die vierte Version der Simulation des Waldökosystemmodells wurde bei ungünstigen Wetterbedingungen, aber mit erhöhter Nachwuchsrate durchgeführt. Die spezifischen Bedingungen für diese Simulation waren wie folgt:

- der jährliche Niederschlag beträgt 700 mm mit einer Standardabweichung dieses Indikators von 150 mm;
- die durchschnittliche jährliche Lufttemperatur ist eine Funktion der Zeit und wird nach Formel (17) berechnet;
- die Standardabweichung der jährlichen Lufttemperatur beträgt $2,5^{\circ}\text{C}$;
- die Wachstumsrate beträgt 5 %.

Die Ergebnisse der Modellierung eines Waldökosystems mit den oben genannten Bedingungen sind in den Abbildungen 11, 12, 13 dargestellt.

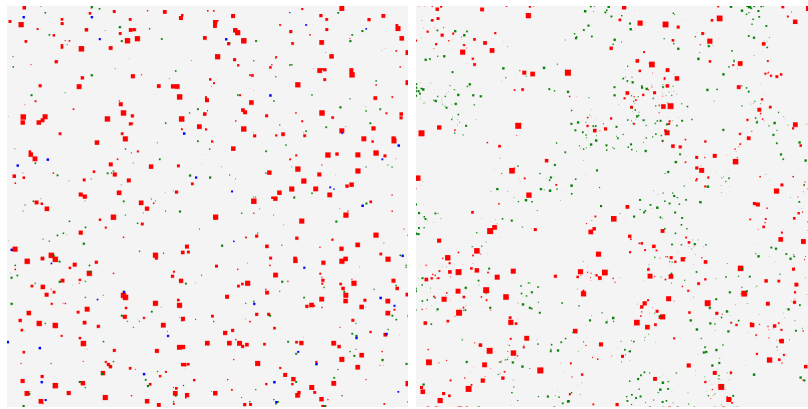


Abbildung 11: Links: Initialzustand des Waldes bei der Modellierung seiner Existenz unter extremen Wetterbedingungen und mit hoher Wachstumsrate. Rechts: Zustand des Waldes für 500 Jahre seines Bestehens unter extremen Wetterbedingungen und mit hoher Wachstumsrate.

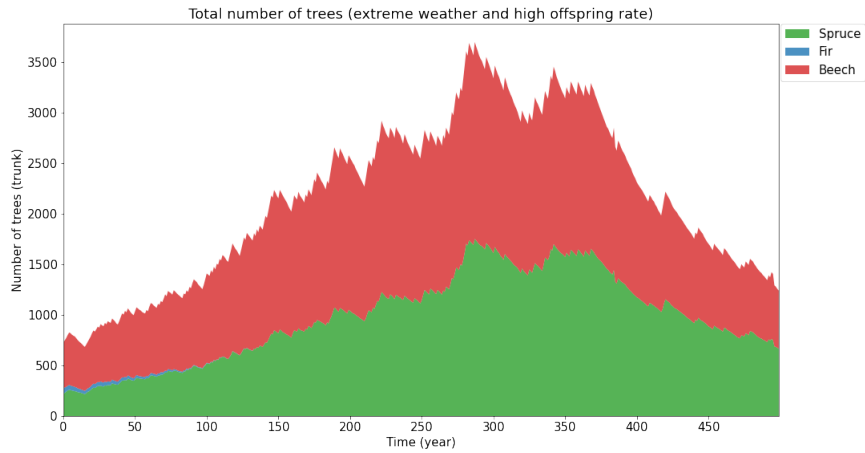


Abbildung 12: Die Gesamtzahl der Bäume im simulierten Waldökosystem nach 500 Jahren seines Bestehens unter extremen Wetterbedingungen und mit hoher Nachwuchsrate.

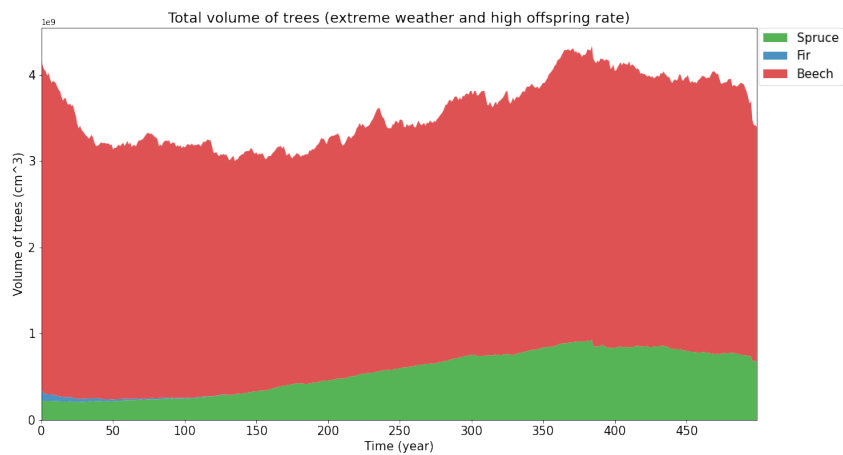


Abbildung 13: Das Gesamtvolumen der Bäume im simulierten Waldökosystem nach 500 Jahren seines Bestehens unter extremen Wetterbedingungen und mit hoher Nachwuchsrate.

5 Diskussion

5.1 Analyse der Resultate

In dieser Sektion werden die Resultate genauer betrachtet. Zu jeder Simulation gibt es Abbildungen, sowohl für die Anzahl, als auch für das Volumen jeder Baumart. Das Volumen ist ein besserer Indikator des Erfolgs einer Spezies, da die unterschiedlichen Baumarten mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften so besser verglichen werden können.

Als erstes wird ein Wald simuliert, dessen Wetterbedingungen denen in Koblenz entsprechen. Dies wird in den Abbildungen 3, 3 und 4 gezeigt. Man erkennt, dass die Buche und die Fichte fast die selbe Anzahl an Bäumen haben, aber die Buche im Volumen dominiert, da sie wesentlich größer sind als Fichten. Das Volumen sinkt zuerst, da wegen guten Wetterbedingungen viele junge neue Bäume entstehen die noch kein großes Volumen haben und die alten großen Bäume wegen ihrem Alter sterben. Die Buche und Fichte können beide uneingeschränkt wachsen, da für sie genügend Platz vorhanden ist und diese Baumarten im Gegensatz zur Tanne gut angepasst an das deutsche Klima sind.

Nun wird das gleiche Waldsystem betrachtet, jedoch steigt die Durchschnittstemperatur stetig, um den Klimawandel zu simulieren. Hier ist in den Abbildungen 5 bis 7 zu erkennen, dass zunächst die Fichte und Tanne keine Probleme haben. Aber nach circa 175 Jahren sieht man, dass alle Baumarten stark unter dem Klimawandel leiden. Dies entspricht einem Anstieg der Durchschnittstemperatur von $1,75^{\circ}\text{C}$. Die Anzahl und das Volumen aller Baumarten sinkt immer weiter je höher die Temperatur wird. Selbst am Ende ist die Temperatur zwar für Deutschland unrealistisch aber in anderen Regionen ist 15°C problemlos erreichbar. Zum Beispiel ist die Durchschnittstemperatur in Regenwäldern mit circa 25°C viel höher. Es wird also nicht nur ersichtlich, dass unsere hiesigen Baumarten durch den Klimawandel bedroht werden, sondern auch warum diese Baumarten in warmen oder gar tropischen Gebieten nicht überleben können.

In den nächsten drei Abbildungen, also von Abbildung 8 bis Abbildung 10 wird die Simulation unter extremen Wetterbedingungen

durchgeführt. Die Temperatur steigt an, wie im Beispiel zuvor, aber die Temperatur und der Niederschlag variiert mehr. Dadurch gibt es durch Zufall mehrere aufeinanderfolgende schlechte Jahre, wodurch immer wieder ein großer Teil der Baumbevölkerung stirbt. Deshalb beginnt in diesem Beispiel der Abstieg der Baumpopulation sofort, da es auch zu Anfang schon viele schlechte Jahre gibt, in denen die Bäume schlecht wachsen können und eher sterben.

Zuletzt wird wieder das extreme, stark variierende, Klima betrachtet, diesmal mit stark erhöhter Nachwuchsrate. Abbildungen 11, 12 und 13. Die Temperaturerhöhung arbeitet in diesem Beispiel gegen die weitaus höhere Nachwuchsrate an und braucht erst einmal Zeit zum aufholen, aber selbst bei dieser hohen Nachwuchsrate haben die Baumarten nach circa 350 Jahren keine Chance, dass Volumen bleibt dennoch zuerst erhalten, da die vielen Jungbäume die in den letzten guten Jahren erzeugt worden sind weiter wachsen. Wenn man genau hinschaut, sieht man aber auch, wie der Graph ganz am Ende abstürzt. Weil Bäume Nachwuchs bekommen wenn sie gute Jahre haben und eine erhöhte Sterberate wenn schlechte Jahre aufeinanderfolgen ist die Varianz von guten und schlechten Jahren stark zu erkennen. Besonders gut ersichtlich ist es in Abbildung 12, zwischen 200 und 400 Jahren. Dort entsteht ein richtiges Gebirge mit Kluften auf Grund von zufällig aufeinanderfolgenden guten und schlechten Jahren.

5.2 Validierung und Limitationen

In allen Resultaten dominiert die Buche besonders, dies ist auch realistisch, da als Basis das deutsche Klima zu Grunde liegt in dem die Buche besonders gut gedeiht. Das liegt daran, dass die Buche perfekt an dieses Klima angepasst ist. Aber nicht nur passen der Buche die Temperatur und Feuchtigkeit, dadurch dass die Buche eine hohe Schattentoleranz und großes Blattwerk hat kann sie im Schatten der anderen Baumarten gedeihen und damit deren Nachfolger verdrängen. Die Tanne hingegen stirbt in fast allen Ergebnissen aus, dies ist auch realistisch. Die Tanne wird in Deutschland als Nutzbaum in gesonderten Wäldern angepflanzt und gepflegt, ohne dass ihr Baumarten wie die Buche den Lebensraum streitig machen können. Die Tanne bevorzugt ein kälteres Klima und kommt

natürlich vor allem in deutschen Gebirgen vor.

Referenzen Überlebenschance nach 10 Jahren = 1% und das die Tanne nicht an das deutsche Wetter angepasst ist.

Das Ziel dieses Modells ist es, natürliches Wachstum des Waldes zu simulieren und so den Einfluss von Klimaänderungen und Naturkatastrophen simulieren zu können. Dieses Ziel wurde zum Teil erreicht. Natürliches Wachstum kann simuliert werden, aber nur mit einer begrenzten Anzahl an Baumarten. Vor allem deshalb ist das Modell in diesem Zustand noch nicht ausgereift genug um wirklich präzise Aussagen über Waldökosysteme zu treffen, jedoch sind eindeutige Trends erkennbar. Besonders ersichtlich, wenn die Temperatur ansteigt wie in Abbildung 9. Das sekundäre Ziel wurde voll und ganz erreicht. Es wurde ein solides Grundgerüst aufgebaut, dass erweiterbar ist und mit dem hervorragend weitergearbeitet werden kann.

erweiterungsmöglichkeiten hier

Dadurch das nur drei Baumarten betrachtet wurden ist das Modell besonders eingeschränkt, da sich die Wechselwirkungen nicht im vollen Maß entfalten können. Mehr Baumarten konnten nicht betrachtet werden, da es schwierig ist an die benötigten Daten zu gelangen. Ökologen haben zwar viele Daten gesammelt, aber nicht im mathematischen Kontext. Das andere große Thema, welches schwer zu beschreiben ist, ist die Reproduktion. Bäume haben tausende potentielle Nachkommen, ob diese dann aber tatsächlich in die Erde gelangen und in welchem Ausmaß ist kompliziert zu bestimmen. Zum Beispiel verschleppen Tiere die Samen oder benutzen sie als Nahrung. Insgesamt werden Tiere und andere Bewohner des Ökosystems Wald nicht berücksichtigt, diese können aber auch einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Bäume und deren Wachstum haben.

ungelöste Probleme hier

5.3 Ungelöste Probleme

- real world Daten räumlicher Verteilung für Bäume;
- real world baum-spezifische Daten;

- realistische Umsetzung der Lichtempfindlichkeit der Bäume;
- Bestimmung eines guten Jahres noch zu naiv;
- Bestimmung des offspring zu naiv;
- Auslagerung des Models in einen separaten Thread ,Trennung von Model-Thread und UI-Thread.

5.4 Erweiterungsmöglichkeiten

- unterschiedliches Terrain, z.B. Berglandschaften mit weniger Sauerstoffgehalt in der Luft;
- weitere Baumarten hinzufügen;
- weitere Pflanzenarten wie z.B. Farne, Moos hinzufügen;
- Tiere innerhalb des Ökosystems simulieren;
- Waldbrände oder Schädlingsbefall simulieren;
- Auswirkungen von hohem CO₂-Gehalt auf Baumwachstum;
- Symbiotische Beziehung zwischen Arten im Mischwald.

Literaturverzeichnis

- [1] Harald Bugmann. „A review of forest gap models“. In: *Climatic Change* 51.3 (2001), S. 259–305.
- [2] Wikimedia Commons. *File:Perlin noise.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository*. [Online; accessed 21-November-2021]. 2020. URL: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Perlin_noise.jpg&oldid=493851402.
- [3] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. *Dritte Bundeswaldinventur (2012)*. [Online; accessed 27-November-2021]. 2012. URL: <https://bwi.info/?lang=de>.
- [4] Virpi Junttila. *Ecological modelling: course script*. 2017.
- [5] Miko UF Kirschbaum. „Forest growth and species distribution in a changing climate“. In: *Tree physiology* 20.5-6 (2000), S. 309–322.
- [6] Ihor Kozak u. a. „Natural forest regeneration in spruce monocultures in the Ukrainian Beskids - Prognosis by FORKOME model“. In: *Journal of Forest Science* 53 (Apr. 2007), S. 162–169. DOI: 10.17221/2355-JFS.
- [7] Ken Perlin. „An image synthesizer“. In: *ACM Siggraph Computer Graphics* 19.3 (1985), S. 287–296.
- [8] Conghe Song, Todd A Schroeder und Warren B Cohen. „Predicting temperate conifer forest successional stage distributions with multitemporal Landsat Thematic Mapper imagery“. In: *Remote Sensing of Environment* 106.2 (2007), S. 228–237.
- [9] William F. Trench und Andrew G. Cowles. *The Improved Euler Method and Related Methods*. [Online; accessed 28-November-2021]. Jan. 2020. URL: <https://math.libretexts.org/@go/page/30706>.