

Current and potential distribution of selected savanna tree species in the South African Lowveld by applying agent-based modeling

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Ulfa Annette Lenfers

Kiel, 2020

Erster Gutachter: Prof. Dr. Rainer Duttmann

Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Wilfried Hoppe

Tag der mündlichen Prüfung: 13.07.2020

Zum Druck genehmigt: 13.07.2020

gez. Prof. Dr. Frank Kempken, Dekan

Abstract

In this dissertation, the impacts on trees by elephants in the Kruger National Park and the use of trees by firewood collectors outside the protected area were compared for a simulation period from 2010 to 2050.

A first research focus aimed at a deeper understanding of the ecological adaptation strategies of different tree species. For this purpose, partial order methods were applied to an existing data set. Three very different strategies were identified and each assigned to a representative tree species.

*Acacia nigrescens*¹ invests in the root system for nitrogen production, while *Combretum apiculatum* stores carbon in different parts of the plant as a defense strategy against browsers. Whereas, *Sclerocarya birrea* with its large average leaf area of easily digestible leaves, on the other hand, leads to a high photosynthesis rate and nutrient input due to the longer residence time of large browsers. At the same time, all these tree species are characterized by their ability to withstand drought, fire, and recurrent tree cutting.

To develop an agent-based model, the agents and the environment had to be conceptualized first. The three agent types, "Tree", "Elephant" and "Firewood collector" were defined. A so-called "Goal-Oriented Action Planning" (GOAP) approach for collecting firewood was adapted from game development to model human adaptive behavior.

Agent-based modeling made it possible to observe individual trees over time and to compare different tree species and age groups. Additionally, the two areas considered have been simulated with two different climate scenarios.

Particularly noteworthy here is the comparison between the pure consideration of aboveground biomass and the detailed information on age class and species level. Even before changes in the biomass values became apparent, effects such as species shift, loss of adult trees and scrub encroachment were visible in the simulation results. This is a clear difference to macroscopic modeling.

Even if trees react very slowly to changes, trends can be derived from the model results that resemble an early warning system. Thus, simulation results can be processed directly into the practice of decision-makers on-site in Africa.

Besides, the combination of computer science and geography has contributed to a reusable methodical workflow and adaptable model elements for the scientific consideration of current and potential distributions of certain tree species in different regions.

¹For the sake of consistency with previously published literature on this research (also included in this dissertation), the *Acacia* tree species is referred to using the older nomenclature *Acacia nigrescens* rather than its current name *Senegalia nigrescens*

Zusammenfassung

Für die vorliegende Dissertation wurden Untersuchungen zur räumlichen Vorhersage der jetzigen und zukünftigen Verbreitung ausgesuchter Baumarten der Savanne im Lowveld Südafrikas mittels Agenten-basierter Modellierung gemacht.

Ein erster Forschungsschwerpunkt zielte auf ein tieferes Verständnis über die ökologischen Anpassungsstrategien verschiedener Baumarten ab. Hierzu wurden Methoden der Partiellen Ordnungen auf einen vorhandenen Datensatz angewendet und damit drei repräsentative Baumarten für die Region ermittelt.

*Acacia nigrescens*² zeichnet sich durch ein Investment in das Wurzelsystem zur Stickstoffgewinnung aus. Die Einlagerung von Kohlenstoff in verschiedene Pflanzenteile dient *Combretum apiculatum* als Abwehr gegen Fraßfeinde. Eine dritte Strategie verfolgt *Sclerocarya birrea*, die durch eine große Blattoberfläche mit leicht verdaulichen Blättern eine hohe Fotosyntheseleistung erlangt. Gleichzeitig führt die längere Verweildauer der großen Pflanzenfresser zu einem erhöhten Nährstoffeintrag unter den Bäumen. Allgemein zeichnet alle diese Baumarten aus, dass sie auch Dürren, Feuer und wiederkehrendem Abholzen widerstehen können.

Um unterschiedliche Nutzungen im Lowveld abzubilden, wurden die Auswirkungen der Elefanten an den Bäumen im Kruger Nationalpark mit denen der Feuerholzsammler im ländlichen Raum verglichen. Hierzu war es notwendig, das geplante, selektive und adaptive Sammeln von Feuerholz abbildbar zu machen. Dafür wurde das aus der Spieleentwicklung bekannte „Goal-oriented Action Planning“ (GOAP) für das Sammeln von Feuerholz angepasst.

Das entwickelte Agenten-basierte Modell verfolgt über die Simulationszeit von 40 Jahren mehr als 500.000 individuelle Bäume mit den jeweiligen Interaktionen durch Elefanten und Feuerholzsammler. Die Ergebnisse können über den Zeitverlauf sowohl auf Einzelbaumniveau als auch auf Art- oder Altersgruppenniveau miteinander verglichen werden. Hierbei zeigte sich in den Simulationsergebnissen, dass Effekte wie Artenverschiebung, Verlust von erwachsenen Bäumen und Verbuschung zu erkennen sind, noch bevor diese in den aggregierten Biomassewerten auftreten.

Ergänzend sind beiden Gebiete jeweils mit zwei unterschiedlichen Klimaszenarien simuliert worden. Auch wenn Bäume sehr langsam auf Veränderungen reagieren, so lassen sich doch Tendenzen aus den Modellergebnissen ableiten, die einem Frühwarnsystem gleichen. Damit war es möglich, die Simulationsergebnisse direkt für die Praxis der Entscheider vor Ort in Südafrika aufzubereiten.

Zusätzlich ist ein wiederverwendbarer methodischer Workflow für die Agenten-basierte Modellierung und einer Wiederverwendbarkeit aller Modellelemente entstanden.

²Aus Gründen der Konsistenz mit früher veröffentlichter Literatur zu dieser Forschung (die auch in dieser Dissertation enthalten ist) wird die Akazienbaumart unter Verwendung der älteren Nomenklatur *Acacia nigrescens* und nicht mit ihrem aktuellen Namen *Senegalia nigrescens* bezeichnet.