Optimierung der räumlichen Baumartenverteilung
Ergebnisse aus dem WKF-Projekt „DSS-RiskMan“

Ronald Bialozyt und Matthias Schmidt
Abt. Waldwachstum, NW-FVA Göttingen

Zusammenfassung

In dem durch den Waldklimafond geförderten Projekt „DSS-Risikomanagement – Entscheidungsunterstützung zur Verteilung und Begrenzung von Risiken für die Forstwirtschaft vor dem Hintergrund des Klimawandels“ („DSS-RiskMan“, FKZ: 28WB40150) wurde ein Prototyp für ein Modellsystem entwickelt, mit dem die strategische forstliche Planung und insbesondere die Baumartenwahl unter den Bedingungen des Klimawandels unterstützt werden kann. Die wesentlichen Grundlagen des Systems stellen modellgestützte Projektionen der Leistungsfähigkeit, bedeutender biotischer und abiotischer Ausfallrisiken wichtiger Baumarten sowie deren simultane Bewertung dar.

In dem Beitrag wird eine beispielhafte Optimierung der Baumartenwahl für die Modellregion „Westharz“ dargestellt. In der Optimierung wurden drei unterschiedliche Konzeptionen getestet, um bessere Erkenntnisse bzgl. der Sensitivität des Gesamtsystem zu erhalten. In der einfachsten Variante I wurden als Eingangsdaten klima- und standortsensitive Wachstumsprojektionen der Baumarten verwendet. In Variante II wurden zusätzlich Projektionen der verschiedenen Risikomodelle (u.a. Sturm- und Borkenkäferschaden) mit Hilfe eines Überlebenszeitmodells gewichtet normiert und über eine Leistungsdämpfung berücksichtigt. In Variante III wurden Annuitäten der Baumarten unter Berücksichtigung von Projektionen der Variante II berechnet und als Zielgröße in der Optimierung verwendet.

In der Optimierung wurden zusätzliche waldbauliche und forstpolitische Restriktionen berücksichtigt. Eine waldbauliche Restriktion ist beispielsweise dass auf Kalkstandorten Waldentwicklungstypen mit höheren Anteilen an Edellaubhölzern geplant werden. Eine Beispiel für forstpolitische Restriktion ist die Begrenzung der Douglasie auf maximal 10% der Anbaufläche. Gerade durch die verschiedenen Restriktionen ergeben sich vielfältige Möglichkeiten die Baumarten in der Modellregion zu verteilen. Die eigentliche Optimierung erfolgte technisch durch einen Genetischen Algorithmus. Als Startset für die Optimierung wurde eine räumliche Waldentwicklungstypenverteilung auf der Grundlage der bisherigen regionalen Waldbauplanung ohne die besondere Berücksichtigung von Klimawandeleffekten verwendet.

Anschließend wurden die Ergebnisse der unterschiedlichen Optimierungsansätze auf standörtliche Verteilungsmuster hin untersucht und mit der Ausgangssituation und untereinander verglichen. Zu diesem Zweck wurden die Baumarten- bzw. WET-Anteile räumlich, höhenzonal und nach standörtlichen Parametern stratifiziert und deren Optimierungsverlauf dargestellt. So kann man aus den Optimierungen u.a. ablesen, dass die Eiche zukünftig im Harz auch in den höheren Lagen (bis ca. 650m) angebaut werden sollte. Weiterhin kommt es zukünftig zu einer Verschiebung der Fichte hin zu kälteren und bei der Buche zu wärmeren Standorten als heute.

Das vorgestellte dreistufige Modellsystem erlaubt eine schrittweise differenzierte Optimierung der zukünftigen forstlichen Planung. Je nach verwendeter Optimierungsvariante bzw. Zielgröße ergeben sich dabei unterschiedliche Ergebnisse der räumlich expliziten Baumartenwahl.

Einleitung

Natürliche Störungen, die durch Stürme, Trockenheit oder Insektenkalamitäten verursacht werden, sind ein integraler Bestandteil von Waldökosystemen (OTTO 1994). Diese Störungen bedeuten für den Forstbetrieb Risiken, da sie im Eintrittsfall die Erfüllung der Waldfunktionen beeinträchtigen oder sogar vollständig gefährden können (WAGNER 2008). Möglichkeiten zur Risikominderung, beispielsweise durch den Anbau standortsgemäßer Baumarten, werden bereits heute in den Waldbaurichtlinien der Länder berücksichtigt. Hierbei wird allerdings von konstanten standörtlichen Verhältnissen ausgegangen. Angesichts des Klimawandels ist jedoch davon auszugehen, dass sich die Standortbedingungen bereits innerhalb eines Produktionszeitraumes verändern und natürliche Störungen in Waldökosystemen zunehmen werden (WERNER et al. 2000; WERMELINGER 2004; LECKEBUSCH und ULBRICH 2004; ROUAULT et al.

2006; PINTO et al. 2007), so dass die üblichen Planungsgrundlagen um modellbasierte dynamische Leistungs- und Risikoprojektionen und Anpassungsstrategien ergänzten werden müssen.

Das Leitbild des “Waldbaus auf standörtlicher Grundlage“, das bisher an regional modifizierten Zuordnungsmatrizen in Abhängigkeit kategorischer Wasserhaushalts- und Nährstoffschätzungen orientiert war, muss dafür auf ein gänzlich neuartiges dynamisches Konzept umgestellt werden. Ein solches Konzept wurde im Projekt „DSS-RiskMan“ entwickelt. Die Struktur des Verbundprojektes zwischen der NW-FVA, dem Landeskompetenzzentrums Eberswalde und der Abteilung Forstökonomie der Georg-August Universität Göttingen ist in Abbildung 1 dargestellt. Das Projekt zeichnet sich dadurch aus, dass es alle Teilaspekte für eine erfolgreiche Waldbauplanung bearbeitet. In insgesamt neun Teilprojekten wurden Grundlagen für eine standortgemäße Baumartenwahl unter den Bedingungen des Klimawandels erarbeitet. Die Eingangsdaten lagen bereits in unterschiedlicher Form und Güte bei den Projektteilnehmern vor. Diese mussten aber in vielen Fällen noch aufgearbeitet, bereinigt und regionalisiert werden. Dies betraf insbesondere das Teilprojekt 2 (TP 2), in welchen die retrospektiven Klimadaten und eine Variante der Klimaprojektion STARS2 mit dem Szenario RCP8.5 für ganz Deutschland regionalisiert wurde. Die Daten wurden zusammen mit den regionalen Standortsdaten für eine standortsensitive Modellierung der Leistung der jeweiligen Baumarten verwendet. Darüber hinaus wurden in anderen TP‘s verschiedene Risikoarten und der Standort-Leistungs-Bezug für die jeweiligen Baumarten untersucht und entsprechende Modelle entwickelt. Die komplexen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen baumartenspezifischen Risiken wurden im Rahmen des TP 7 durch eine quantitative Überlebenszeitmodellierung abgebildet und zu einem Gesamtrisiko zusammengeführt. Außerdem wurden im TP 8 an der Georg-August Universität Göttingen räumlich explizite Annuitäten in Abhängigkeit der zuvor ermittelten Wuchsleistung und dem assoziierten Gesamtrisiko berechnet.

Die Ergebnisse der verschiedenen Einzelmodelle wurde im TP 1 zu einem Simulationssystem kombiniert. Dieses Simulationssystem ist in seiner gegenwärtigen Form nicht direkt als Entscheidungsunterstützungssystem (DSS, „Decission Support System“) für die forstliche Praxis gedacht. Es stellt vielmehr die Voraussetzung für Szenariosimulationen für konkrete Reviere, Forstbetriebe, Regionen dar. Das zu entwickelnde System soll dabei eine optimale regionale Verteilung der Baumarten auf der Grundlage der Leistungsprognose, des Gesamtrisikos bzw. der Annuitäten ermitteln. Dabei sind neben waldbaulichen Restriktionen (wie z.B. dem Ausschluss von Fichte auf Kalk- bzw. Stauwasserstandorten) auch forstpolitische Restriktionen zu berücksichtigen.

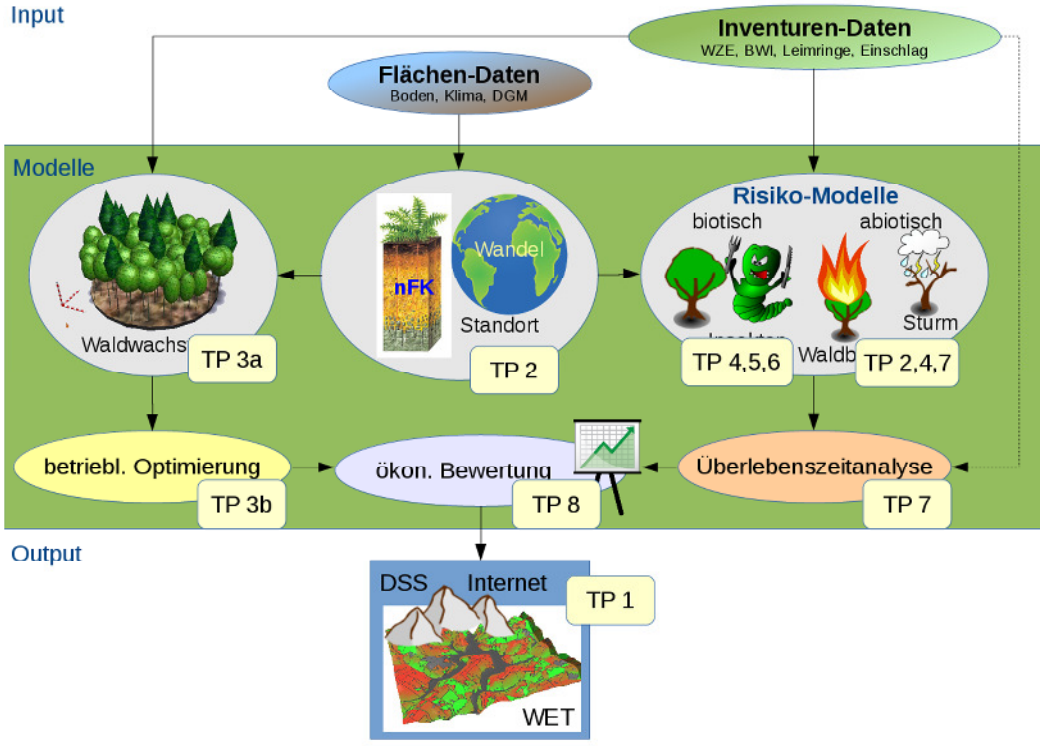

Abbildung 1: Die Struktur des Projektes "DSS-RiskMan" mit den Bezeichnungen der Teilprojekte. Die Ergebnisse aller Teilprojekte laufen im Teilprojekt 1 "DSS Internet" zusammen, welches die standortgerechte Baumartenverteilung optimiert.

Unter der Prämisse einer gewünschten Maximierung der Ertrages zeigen die Daten der Leistungsmodellierung, dass unter den gegeben Bedingungen auf fast allen Standorten die Douglasie die leistungsstärkste Baumart ist. Dem entgegen stehen aber verschiedene politische und waldbauliche Restriktionen. Auf der politischen Seite sind vor allem Mischwälder mit einem hohen Anteil an Laubbäumen gefordert. Außerdem ist die Douglasie in Deutschland keine einheimische Baumart und ihr Flächenanteil sollte aus naturschutzfachlicher Sicht bestimmte Werte nicht überschreiten. In Niedersachsen ist die maximal mit Douglasie zu bestockende Fläche auf 10% festgelegt. Auch aus Forstschutzgründen sollte möglichst keine extreme Konzentration auf einzelne Baumarten erfolgen.

Durch die oben genannten Restriktionen ergeben sich vielfältige Möglichkeiten die Baumarten auf der Waldfläche zu verteilen. Ist es beispielsweise vorteilhafter die leistungsstärksten oder die leistungsschwächeren Baumarten auf den besseren Standorten zu planen? Möglicherweise ist der Leistungsverlust auf einem schwachen Standort für eine leistungsstarke Baumart (z.B. Douglasie) geringer als für eine weniger leistungsstarke Baumart. Diese Entscheidung muss für jeden Standort erneut getroffen werden, da sich die klimatischen Parameter und weitere Einflussgrößen wie z.B. die Exposition trotz gleicher Bodenparameter erheblich unterscheiden können, was wiederum den Zuwachs und die Vulnerabilität beeinflusst.

Ziel der standortsensitiven Baumartenwahl ist die Maximierung der Gesamtwuchsleistung des Systems. Hieraus und aus den vielfältigen Restriktionen bei der Baumartenwahl ergibt sich ein Optimierungsproblem. Da die Auswahl einer Baumart auf einem Standort die mögliche Auswahl dieser Baumart auf einem weiteren Standort beeinflusst. Insbesondere über die in den Nebenbedingungen definierten prozentualen Anteile der Arten(gruppen), können die vielfältigen Möglichkeiten die Arten räumlich zu verteilen nur durch einen entsprechenden Algorithmus optimiert werden. Auf Grund der hohen Komplexität des Problems und den möglichen Rückkopplungen wird für die Optimierung ein genetischer Algorithmus (GA) verwendet. Dieser kann ohne Vorkenntnis spezifischer Abhängigkeiten numerische Probleme heuristisch lösen. Das bedeutet aber auch, dass die dabei erzeugten Ergebnisse nicht immer das globale Optimum treffen. Außerdem kann ein GA in verschiedenen Läufen auch unterschiedliche Ergebnisse liefern, wenn das Problem sehr komplex ist. Solche heuristischen Algorithmen liefern jedoch stets recht schnell eine Lösung, die nahe an einem Optimum liegt. Dieses muss aber nicht immer das globale Optimum darstellen.

Alle im System verwendeten Modelle sowie die zu berücksichtigenden Restriktionen beziehen sich auf einzelne Baumarten. Die forstliche Planung bezieht sich allerdings auf Baumarten-Mischungs-Typen (z.B. Waldentwicklungstypen in Niedersachsen). Da das zu entwickelnde System als Entscheidungsunterstützungssystem für die forstliche Praxis gedacht ist, sollten in dem System ebenfalls die Mischbestandstypen verwendet werden, die in den jeweiligen Waldbauprogrammen der Länder definiert sind. Eine zusätzliche Optimierung der definierten Baumartenanteile in den Baumarten-Mischungs-Typen wurde nicht durchgeführt. Daher wurden die jeweiligen baumartenspezifischen Wuchsleistungen und Risikoarten je WET anteilflächenmäßig gewichtet und zusammengefasst und somit ein Wert für die Kombination aus Standort und WET ermittelt. Diese Vorgehensweise ermöglicht es auch Mischungseffekte von Baumarten mit in die Planung einzubeziehen. So weisen z.B. sowohl das verwendete Sturm- als auch Borkenkäferrisikomodell Mischungseffekte auf.

Dieser Beitrag stellt zunächst die Optimierung der standortgemäßen Baumartenwahl unter Verwendung der Leistungsprognose der WET‘s dar. Hierbei werden erste Ergebnisse der räumlichen Optimierungen bezüglich ihrer Plausibilität bewertet. Im weiteren beschreibt diese Arbeit eine dreistufigen Strategie zur schrittweisen Adaptierung des Systems an die Erfordernisse der forstlichen Praxis. Eine detaillierte Auswertung diesbezüglich wird in einer weiteren Arbeit folgen.

Material

Im Projekt „DSS-RiskMan“ wurden insgesamt sechs Modellregionen ausgewiesen. Für die Darstellung der Optimierung werden in dieser Arbeit jedoch nur die Ergebnisse für die Modellregion „Westharz“ vorgestellt. Dieses Gebiet wurde ausgewählt, da hier umfangreiche Vorarbeiten und Erfahrungen an der NW-FVA vorliegen, die eine besonders umfassende Interpretation der Ergebnisse der Optimierung erlauben.

Auf Grund der relative langen Simulationszeit selbst auf einem Parallelrechner sowie zum Test der Algorithmen wurde am südöstlichen Rand der Modellregion „Westharz“ eine wesentlich kleinere Region „Süd-Westharz“ ausgewählt (siehe Abbildung 2). Diese Region beinhaltet nur 5343 Standortspolygone gegenüber 59119 Polygonen in der gesamten Modellregion „Westharz“. Ein Optimierungslauf für die Testregion benötigt auf einem normalen PC mit vier Kernen ca. 3,5 Tage wohingegen die Optimierung der gesamten Modellregion „Westharz“ auf einem Parallelrechner mit 28 Kernen schon insgesamt 7 Tage benötigt.

Die wesentlichen Eingangsdaten für die Optimierung wurden im Projekt „DSS-RiskMan“ selbst erarbeitet, wobei auf umfangreiche Datengrundlagen zurückgegriffen wurde. Diese beinhalten die Klima- und Bodendaten, sowie Projektionen der Wuchsleistung der Baumarten je Standort und der assoziierten Risikoarten. Aus den Eingangsdaten je Baumart wurden die Kennwerte für die Waldentwicklungstypen (WET‘s) der niedersächsischen Landesforsten durch Gewichtung mit den definierten Baumartenanteilen ermittelt. Da jedoch nicht für alle Baumartenmodellgestützte Leistungsprojektionen möglich waren, wurden diese Baumarten gutachtlich zugeordnet. So wurden für die Leistungseinschätzung der Tanne die Projektionen der Fichte und für die der Roteiche die Projektionen der Buche verwendet. Für die Kategorie „Edellaubholz“ (ALh) wurden die Leistungsprojektionen des Bergahorns verwendet. Die jeweiligen Ergebnisse der Modelle wurden in einer Datenbank gespeichert und lagen somit als Basis für die Optimierung vor.

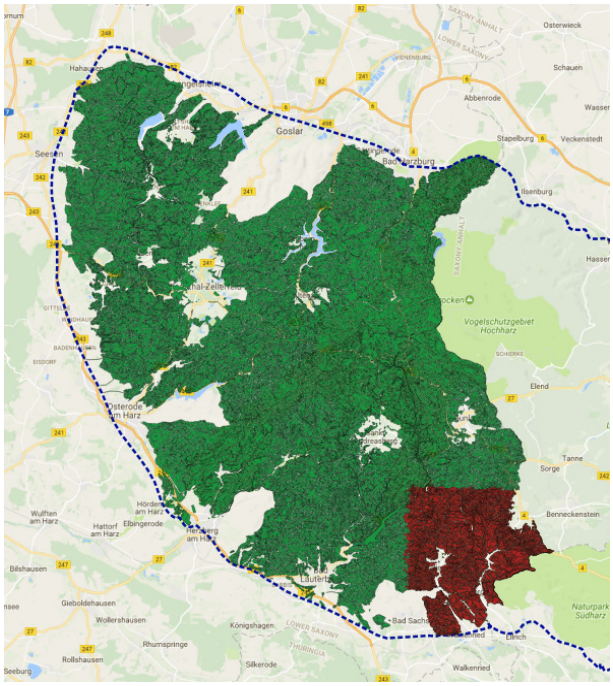

Abbildung 2: Die in der Optimierung verwendete Modellregion "Westharz" mit ihren Standortspolygonen (dunkelgrün) sowie Polygone der Testregion "Süd-Westharz" (dunkelrot).

Die Optimierungsvariante I beinhaltet als Zielvariablen nur die standortsensitiven baumartenspezifischen Leistungsprojektionen. Während der Optimierung wurden nicht direkt die projizierten Höhenbonitäten der Baumarten verwendet, sondern die Summe der anteilflächenmäßig gewichteten durchschnittlichen Gesamtzuwächse eines WET‘s. Damit erhalten wir jeweils einen Wert für die Optimierung pro Standortspolygon. Die Gesamtzuwächse wurden über einfache Übergangsfunktionen der Ertragstafeln aus den Mittelhöhenbonitäten berechnet. Weiterhin ermöglicht diese Methode konzeptionell die Berücksichtigung von Interaktionen zwischen den Baumarten in Bezug auf die Leistung bzw. die Risikoarten.

Neben der reinen Leistungsmodellierung in Variante I wurde innerhalb des Projektes „DSS-RiskMan“ auf der Basis von Modellprojektionen abiotischer und biotischer Risiken und den in der WZE erfassten Absterbe- und Ausfallraten ein Überlebenszeitmodell entwickelt. Auf dieser Grundlage sowie der vorhanden Leistungsmodellierung konnten anschließend Annuitäten je Baumart und Standort ermittelt werden. Anhand von Leistungsprojektionen, die mit Hilfe der Überlebenszeit gedämpft wurden, bzw. Projektionen der Annuität wurden anschließend die Varianten II bzw. III der Optimierung durchgeführt. Auch hier wurde in beiden Fällen nicht die Werte je Baumart als Eingangsgröße für die Optimierung genutzt, sondern die Werte entsprechend des Anteils der Baumart im WET aufsummiert. Somit ergeben sich drei Optimierungsvarianten, die über vergleichende Analysen ein tieferes Verständnis der Wirkungsweise des Optimierungssystems ermöglichen. Die Modellergebnisse werden zunächst getrennt nach den Varianten interpretiert und anschließend miteinander verglichen. Das System besteht also aus drei Varianten mit unterschiedlichen Zielvariablen: 1) Leistungsprojektionen ohne die Berücksichtigung von Risiken, 2) Leistungsprojektionen mit Berücksichtigung von Risiken und 3) Projektionen der Annuität unter der Berücksichtigung von Risiken.

In allen drei Stufen der Optimierung wurden folgende waldbauliche Restriktionen umgesetzt: Erstens, die Moore werden nicht in die Optimierung mit einbezogen. Zweitens, die Fichte soll nicht auf Stau-, Kalk- und Tonstandorten geplant werden. Drittens, auf sehr gut mit Nährstoffen versorgten Kalkstandorte werden WET mit höheren Anteilen an Edellaubholz (ALh) geplant. In der niedersächsischen regionalen Waldbauplanung (Band 54, NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR DEN LÄNDLICHEN RAUM, ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ 2004) wurden außerdem noch Restriktionen der Anbaueignung bestimmter Baumarten bezüglich der Höhenlage angegeben. Diese Restriktionen sind bewusst nicht in der Optimierung berücksichtigt worden, da unter den Bedingungen des Klimawandels eine Verschiebung der höhenzonalen Gliederung zu erwarten ist. Ob das System diese hauptsächlich temperaturabhängige Zonierung realistisch abbilden kann, ist ein erster Test der Leistungsfähigkeit des Systems.

Außerdem wurden in allen drei Stufen politische Restriktionen berücksichtigt. Stellvertretend für die vielen Möglichkeiten, die sich dabei auch regional stark unterscheiden können, wurde der maximale Anteil der Douglasie an der Gesamtfläche der niedersächsischen Landesforsten auf 10% begrenzt und der Anteil an Laubbaumarten wurde mit mindestens 40% festgelegt. Diese Restriktionen lassen sich in späteren Optimierungen noch weiter anpassen. Hier dienen sie erst einmal der Überprüfung inwieweit das Modell- und Optimierungssystemsystem konsistente Ergebnisse liefert.

Im Projekt „DSS-RiskMan“ wurden für die Zentroide der Standortspolygone Klimadaten regionalisiert. Diese Daten bilden den Zeitraum von 1970 – 2070 ab. Das retrospektive Klima wurde von den gemessenen DWD Daten abgeleitet und für die zukünftigen Daten wurden die Projektionen der Klimaentwicklung an den DWD Klimastationen bis 2070 verwendet. Diese basieren auf dem „STatistical Analogue Resampling Scheme“ Regionalmodell (STARS, ORLOWSKY et al. 2008) wobei das RCP8.5 Szenario unterstellt und eine Projektion mit dem ECHAM6 Globalmodell zur Initialisierung verwendet wurden. Somit können aus dem Datensatz beliebige Zeiträume zwischen 1970 – 2070 extrahiert werden. In den Optimierungen wurden zwei Zeiträume verwendet. Als aktuelles Klima wurde der Zeitraum 1981–2010 genutzt und als zukünftiges Klima die Werte für das Jahr 2070 genutzt. Die Wirkmodelle (Leistung, Risiko, Überlebenszeit und Annuität) wurden dabei in einer jährlicher Auflösung gerechnet. Allerdings stehen für die Risikoarten nicht die Daten für den gesamten retrospektiven Zeitraum zur Verfügung, so dass diese Modelle nur im Rahmen ihrer Daten parametrisiert werden konnten.

Methoden

Die Optimierung im Gesamtmodellsystem wird mit Hilfe eines genetischen Algorithmus (GA) durchgeführt. Genetische Algorithmen lehnen sich in ihrer Konzeption an die Evolution genetischer Systeme an. Insbesondere die Konzepte von Selektion und Mutation der DNA werden hier im Computer nachempfunden. Zu den Mutationen zählt neben den Punktmutationen auch der Austausch kompletter Sequenzen durch „Crossover“. Das zu optimierende Problem wird auf einem „Chromosom“, hier einer linearen Zeichenkette kodiert und vervielfältigt („Replikation“). Dabei werden mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit Mutationen zugelassen. Somit erhält man eine „Population“ an Chromosomen die i.d.R. ein wenig unterschiedlich sind. Durch ein „Genotyp-Phänotyp-Mapping“, die Übersetzung der linearen Zeichenkette in einen spezifischen Wert, kann jeder Zeichenkette eine „Fitness“ zugeordnet werden. Für die nächste Iteration werden nur die besten, d.h. die fittesten Zeichenketten ausgewählt und die anderen verworfen. Anschließend werden die verbleibenden Zeichenketten vervielfältigt, bis die Population wieder vollständig aufgefüllt wurde. Dabei werden wiederum Mutationen zugelassen. Anschließend wird jede neue Zeichenkette mit der Fitnessfunktion bewertet. Diese Schritte werden so häufig wiederholt, bis man eine gewünschte Fitness erreicht hat oder eine bestimmte Anzahl an Iterationen durchlaufen wurde. Dieses Vorgehen nennt man einen meta-heuristischen Algorithmus.

In unserem Fall besteht die Zeichenkette aus der Hintereinanderreihung der pro Standortspolygon gewählten WET‘s der Modellregion. Die Fittnessfunktion ermittelt die Leistung (bzw. die Annuität) für jedes Polygon mit dem dafür selektierten WET und testet auf die Abweichung zu den forstpolitischen Restriktionen. Die waldbaulichen Restriktionen sind bereits in die Mutationsfunktion eingeflossen, so dass auf den entsprechenden Standorten nur WET‘s ausgewählt werden können, welche dort auch waldbaulich zulässig sind. Da die Entwicklung eines geeigneten Abbruchkriteriums bei diesem

komplexen Optimierungsproblem schwierig ist, wurde eine bestimmte Anzahl an Iterationen als Abbruchkriterium gewählt (i.d.R. 5000).

Neben der Kodierung des Problems in einer Zeichenkette und der Definition der Fitnessfunktion stellt die Auswahl einer geeigneten Startkonfiguration ein wesentliches Kriterium für die Geschwindigkeit der Optimierung dar. Je näher die Startkonfiguration an der optimalen Konfiguration ist, desto schneller wird der Algorithmus das Optimum auch finden. Die Auswahl der Startkonfiguration kann auf zwei Weisen erfolgen: 1)man verteilt viele verschiedene Startkonfiguration zufällig über den gesamten Optimierungsraum und gibt ein eher hartes Selektionskriterium an. 2) man beginnt mit einer Konfiguration relativ nahe am Optimum. Diese Version ist eigentlich die beste Variante, erfordert jedoch, dass man die Lage des Optimums gut abschätzen kann. In unserem Fall gehen wir davon aus, dass die aktuelle standortgemäße Baumartenplanung bereits relativ nahe am Optimum liegt und nun durch die Anpassung an den Klimawandel verändert werden müsste. Daher nutzen wir als Startkonfiguration die waldbaulichen Regeln entsprechend der niedersächsischen regionalen Waldbauplanung (Band 54, NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR DEN LÄNDLICHEN RAUM, ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ 2004).

Der schematische Ablauf der Arbeitsschritte zur Bestimmung der optimierten standortbezogenen Baumartenwahl ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Eingangswerte werden immer je Baumarten ermittelt. Aus diesen wird unter Berücksichtigung der waldbaulichen Restriktionen die entsprechende Zielgröße je WET erstellt. Diese sind entweder der maximale durchschnittliche Gesamtzuwachs (dGZmax) bzw. Annuität. Daraus ergibt sich eine Reihenfolge (Ranking) der WET‘s je Standortspolygon. Diese bilden den Optimierungsraum. Durch die weitere Berücksichtigung politischer Restriktionen kann dann die räumliche Optimierung erfolgen.

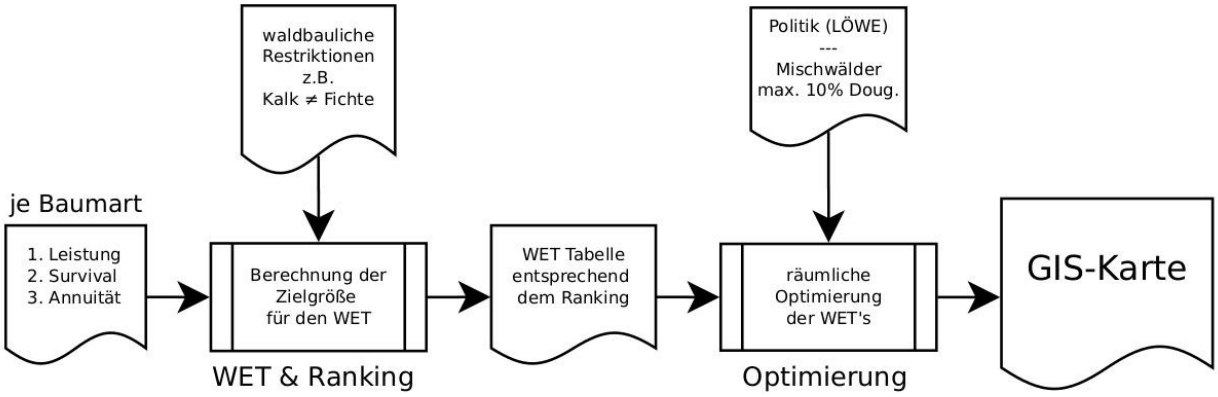

Abbildung 3: Schematischer Ablauf der Arbeitsschritte hin zur Optimierung der räumlichen Verteilung der WET’s (Waldentwicklungstyp) und damit der Baumarten.

Wie bereits in Abbildung 3 zu sehen ist, verwenden wir drei verschiedene Typen an Zielvariablen. Daraus ergeben sich drei Varianten der Optimierung. Variante I („Leistung“) geht davon aus, dass die Maximierung der Gesamtwuchsleistung unser Ziel ist und wir die Risiken durch abiotische und biotische Ereignisse vernachlässigen können. In der Variante II („Survival“) werden genau diese Risiken mit berücksichtigt, indem eine Leistungsdämpfung erfolgt. Das Ziel auf der Fläche ist aber weiterhin die Maximierung der Gesamtwuchsleistung. In der Variante III („Annuität“) werden alle Risiken wie in Variante II berücksichtigt, jedoch steht bei dieser Optimierung nicht mehr die Maximierung der Wuchsleistung als Zielgröße sondern die fiskale Leistung der Modellregion.

Ergebnisse

Die Präsentation der Ergebnisse wird in zwei Teilen erfolgen. Im ersten Teil wird die Leistungsfähigkeit des Optimierungssystems in Bezug auf den Klimawandel anhand von Variante I („Leistung“) untersucht. Hier wird vor allem der Vergleich der Optimierung unter aktuellen Klimabedingungen mit den Ergebnissen der Optimierung unter zukünftigen Klimabedingungen (2070) durchgeführt. Im zweiten Teil werden die Ergebnisse der Optimierung für das zukünftige Klima unter den drei verschiedenen Optimierungsvarianten betrachtet.

Optimierung der räumlichen Baumartenwahl im Klimawandel

In diesem Abschnitt werden die Unterschiede in der Optimierung zwischen dem aktuellen und dem zukünftigen Klima für die Region „Westharz“ dargestellt. In Abbildung 4 ist die Änderung der Anteile der wichtigsten Baumarten während der Optimierung für beide Klimavarianten (aktuell und 2070) dargestellt. Zunächst lässt sich aus den Abbildungen erkennen, dass die beiden forstpolitischen Restriktionen (max. 10% Douglasie und mind. 40% Laubbaumarten) ungefähr beim Iterationsschritt 1000 erreicht werden. Trotzdem verändert sich die Baumartenzusammensetzung auch noch nach diesem Zeitraum. Insbesondere nimmt der Anteil der Fichte in beiden Szenarien weiter zu. Außerdem ist im Vergleich beider Szenarien zu sehen, dass im zukünftigen Szenario mehr Eiche und etwas weniger Buche geplant würde.

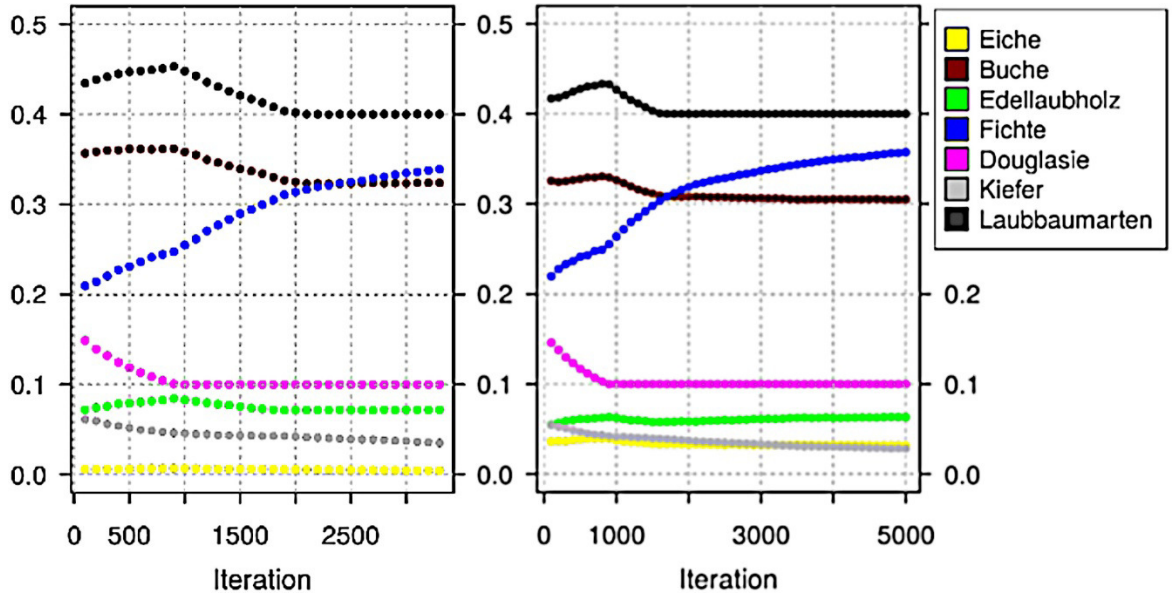

Abbildung 4: Die Veränderung der Anteile der Baumarten während der Optimierung für die zwei unterschiedlichen Zeiträume. Links das aktuelle Klima (1981-2010) und rechts das Klima für das Jahr 2070.

Durch die Optimierung wird nicht nur der Anteil der Baumarten in der Modellregion verändert sondern auch die durchschnittliche Leistung der Baumarten in der Modellregion, da die projizierte Leistung je Standortspolygon deutliche Unterschiede aufweist. Somit ändert sich die durchschnittliche Leistung durch die Verschiebung der Baumarten auf bessere bzw. schlechtere Standorte. Allerdings erfolgt die Baumartenplanung und die räumliche Optimierung für WET‘s, so dass die projizierten dGZmax anteilflächenmäßig gewichtet bzw. berücksichtigt werden (siehe Abbildung 5).

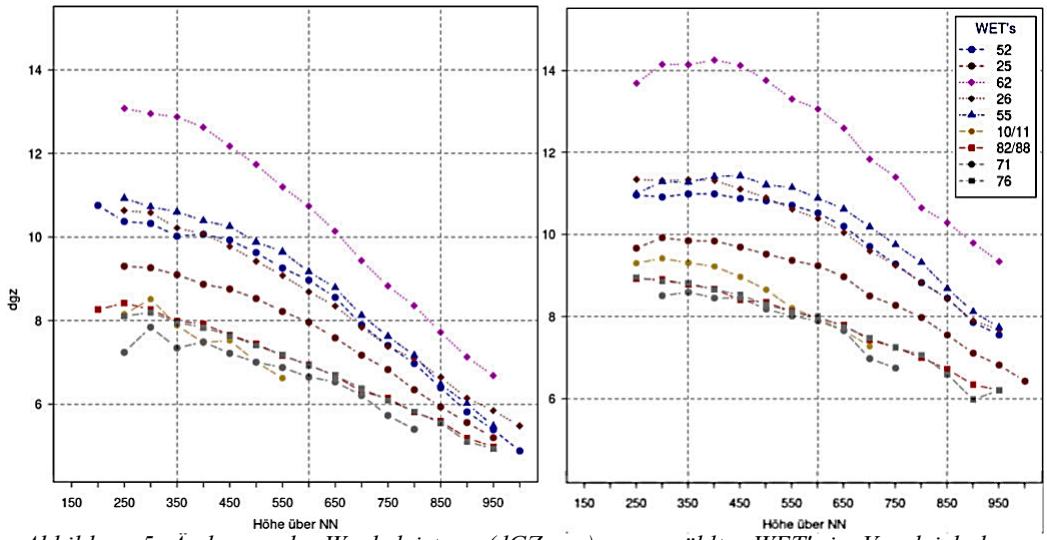

Abbildung 5: Änderung der Wuchsleistung (dGZmax) ausgewählter WET's im Vergleich der zwei Szenarien am Ende der Optimierung (Iterationsschritt 5000). Links die Werte für das aktuelle Klima (1981-2010) und rechts für das Klima im Jahr 2070.

Die Veränderung des dGZmax während der Optimierung ist für ausgewählte WET‘s in Abbildung 6 dargestellt. In der rechten Abbildung wird durch die Pfeile angezeigt, dass es bei einigen WET‘s zu einer Verbesserung der Leistung kommt, bei anderen sehen wir eine gleichbleibende Leistung und wiederum Andere zeigen eine Verschlechterung ihrer Leistung.

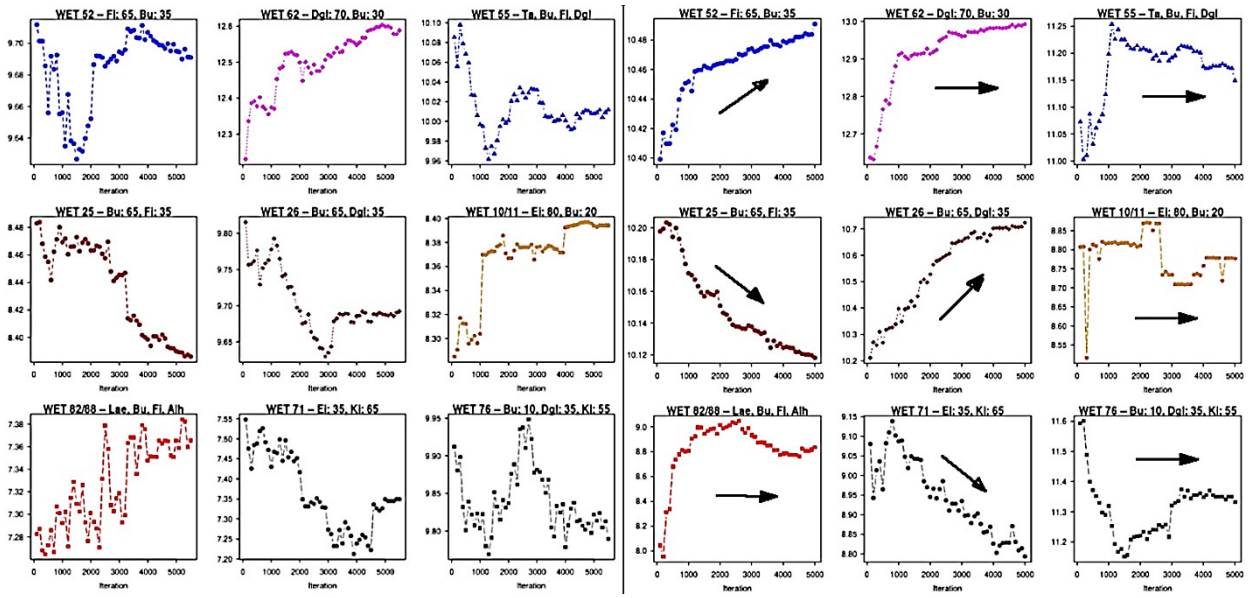

Abbildung 6: Entwicklung der Wuchsleistung ausgewählter WET's über die Iterationsschritte. Links das Klima 1981--2010 und rechts das Klima von 2070. Die Pfeile zeigen die Tendenz der WET-Leistung an.

Die Auswertung der Optimierung bezüglich der Höhenzonierung der Baumarten ist in Abbildung 7 zu sehen. Diese Abbildung zeigt die Konfiguration am Ende der Optimierungsroutine zum Iterationsschritt 5000 an. Es ist deutlich zu sehen, welche Baumarten in welcher Höhenstufe am häufigsten geplant und welche nur selten verwendet werden. Es ist deutlich zu sehen, dass die Fichte und die Buche weiterhin die häufigsten Baumarten sein werden und dagegen die Eiche und die Lärche flächenmäßig nur selten geplant werden. Ebenso kann man an den Abbildungen ablesen, dass die Eiche bisher nur bis in eine Höhenlage von max. 500 m über NN geplant wurde und unter zukünftigem Klima dagegen bis in eine Höhe von 650 m geplant wird. Darüber hinaus ist beim Vergleich der beiden Klimaszenarien bzgl. der prozentualen Verteilung der Baumarten (jeweils die rechte Abbildung) zu sehen, dass bisher eher die Buche in den Höhenlagen angebaut werden sollte, jedoch unter den zukünftigen Bedingungen eher die Fichte in den Höhenlagen geplant wird.

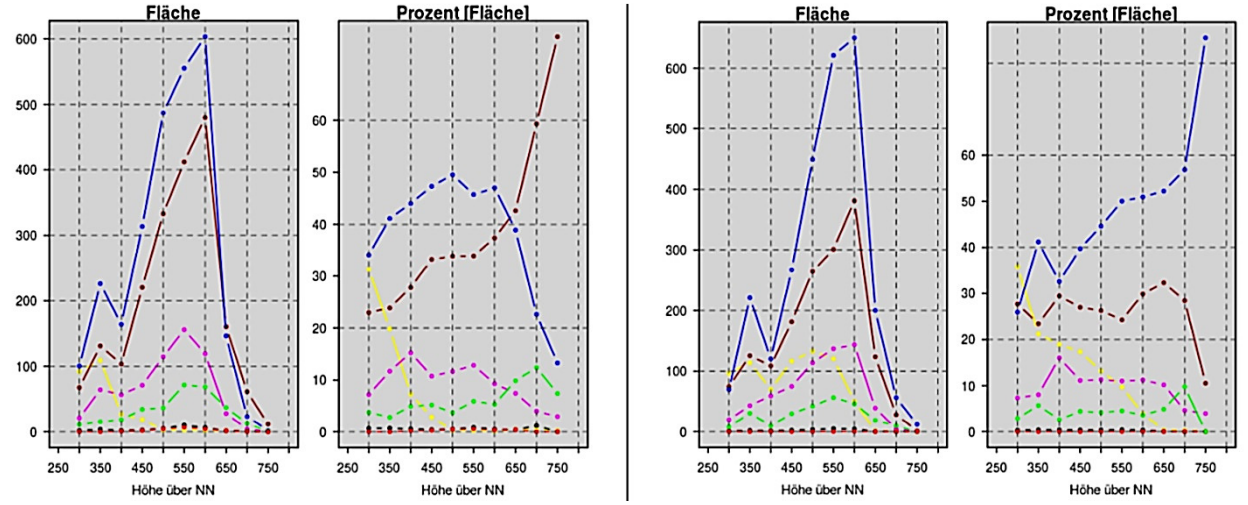

Abbildung 7: Darstellung der Verteilung der Baumarten über die verschiedenen Höhenstufen im Harz. Die erste Abbildung zeigt den Anteil der Gesamtfläche in dieser Höhenstufe je Baumart an und in der zweiten Abbildung wird der prozentual Anteil dieser Baumart an der Höhenstufe dargestellt. Wiederum sind die beiden linken Abbildungen das aktuelle Klima (1981-2010) und rechts die Abbildungen für das Klima für das Jahr 2070.

Vergleich der drei Varianten

Die drei Varianten der Optimierung (Leistung, Survival, Annuität) wurden stets mit dem gleichen Startset für den Bereich „Süd-Westharz“ initialisiert. Der Verlauf der Entwicklung der prozentualen Anteile der Baumarten ist in Abbildung 8 dargestellt.

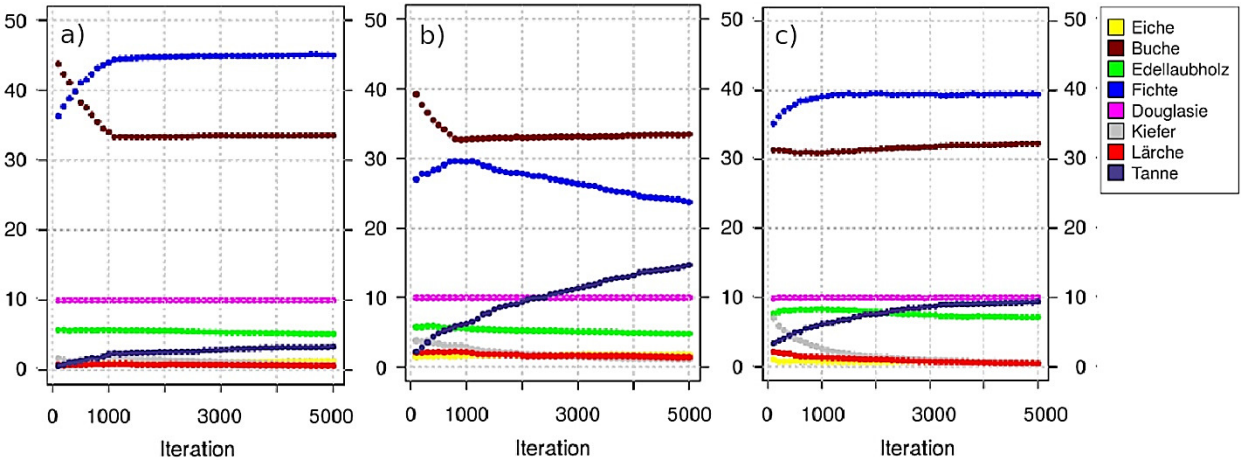

Abbildung 8: Die Entwicklung des prozentualen Anteils der Baumarten während der Optimierung. a) Optimierung nur nach der Leistung, b) Optimierung unter Verwendung des Überlebenszeitmodells, c) Optimierung auf der Grundlage der Annuitäten.

Die Grundtendenz bei der Entwicklung der Baumartenanteile ist in allen drei Varianten prinzipiell gleich. Anfänglich werden zunächst recht schnell die politischen Restriktionen durch die Optimierung erfüllt und anschließend erfolgt die eigentliche Optimierung. Der Verlauf der Kurven zeigt an, dass auch bis zum Iterationsschritt 5000 in allen Varianten noch Anpassungen durchgeführt werden. Diese sehen aber recht unterschiedlich für die drei Varianten aus.

Bei der Variante I „Leistung“ (Abbildung 8a) ändert sich im Wesentlichen nur noch der Anteil der Tanne im Gesamtsystem, nachdem die politischen Restriktionen erreicht wurden. Der Anteil der Tanne steigt dabei kontinuierlich an während die anderen Baumarten im Wesentlichen auf ihrem Niveau verbleiben. Bei der Optimierung mit der Variante II „Survival“ (Abbildung 8b) haben sich nicht nur die Anteile der Baumarten verschoben, sondern mit der Zunahme des Tannenanteilssinkt der Anteil der Fichte bis zum Iterationsschritt 5000 kontinuierlich. Daher liegt hier die Fichte auch generell auf einem niedrigeren Niveau als in Variante I. Bei der dritten Variante („Annuität“, Abbildung 8c) wird wieder die Fichte zur am häufigsten geplanten Baumart. Die Tanne steigt zwar wie in den anderen beiden Varianten kontinuierlich an, jedoch nicht so stark wie in der Variante II („Survival“). Außerdem liegt hier der Anteil an Edellaubhölzern deutlich höher als in den zwei vorherigen Varianten.

Vergleichen wir die Leistung ausgewählter WET‘s zwischen den drei Varianten (Abbildung 9), dann kann man auf den ersten Blick keine großen Unterschiede erkennen. Die Leistung verläuft in allen drei Varianten und für alle gewählte WET‘s nahezu gleich. Insbesondere das Ranking der Leistung der selektierten WET‘s ändert sich zwischen den Varianten nicht. D.h., obwohl zu einigen Baumarten bessere Modelle für die Risikoarten existieren (z.B. für die Fichte das Borkenkäfermodell), wirkt sich dies nicht auf die realisierten Leistung der Baumarten aus. Des Weiteren wird in allen drei Varianten die Eiche nur bis in eine Höhe von 600m über NN geplant. Vereinzelt gibt es auch schlechte Leistungswerte in einer Höhenstufe, z.B. die Eiche bei der Leistungsmodellierung in der Höhenlage von 550 m über NN hat nur einen dGZmax von 6 (Abbildung 9a). Dies spricht für eine Fehlplatzierung und würde bei längeren Optimierungsläufen eliminiert werden.

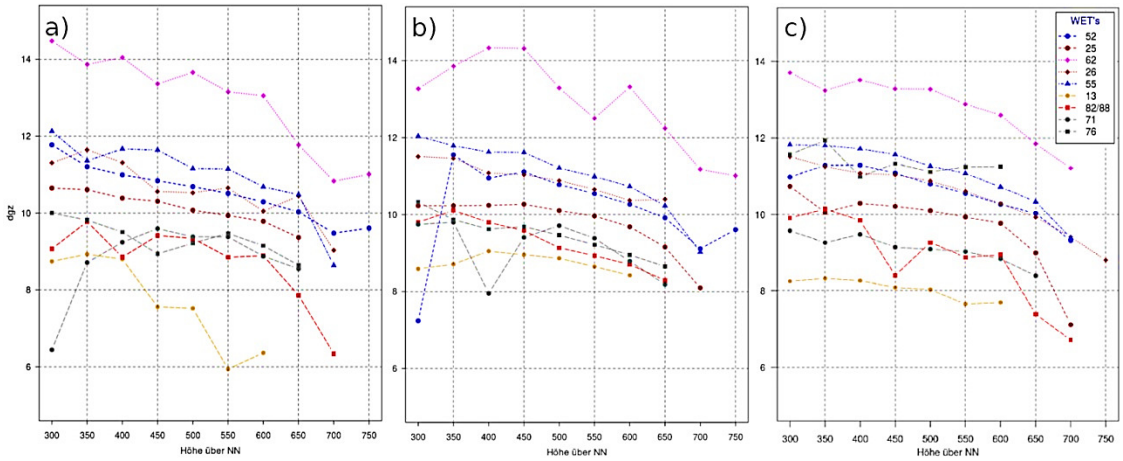

Abbildung 9: Die Leistung ausgewählter WET's über den Höhengradienten als Vergleich zwischen den drei Varianten zur Optimierung. Die Abbildungen sind die Momentaufnahme zum Iterationsschritt 5000. a) Optimierung nur nach der Leistung, b) Optimierung unter Kombination von Leistung und Überlebenszeit, c) Optimierung auf der Grundlage der Annuitäten.

Diskussion

Es existieren bereits eine Reihe von Ansätzen, welche aktuell für eine standortgemäße Baumartenwahl genutzt werden. Dabei wird die Gefährdung der Baumarten über Trockenstressweiser, wie zum Beispiel das pflanzenverfügbare Wasser in Abhängigkeit von Standortparametern eingeschätzt und für die Anpassung vorhandener Planungsgrundlagen unter Klimawandel genutzt. Die vorhandenen Planungsgrundlagen basieren dabei auf Expertenwissen zum standortsensitiven Wachstum und Risiken der Baumarten.

Durch die rasche Entwicklung der Computertechnik und die Etablierung von computergestützten Entscheidungsunterstützungssystemen (DSS – „Decission Support System“) war es das Ziel im Projekt „DSS-RiskMan“ ein stärker modellbasiertes System zu entwickeln. Das hier vorgestellte Verfahren zur räumlichen Optimierung einer standortgemäßen Baumartenwahl nutzt dafür verschiedene Modelle zur Auswahl standortgemäßer WET‘s. Damit ist eine räumlich höher aufgelöste Baumartenplanung möglich. Die Modellprojektionen werden weiterhin wenn notwendig mit vorhandenem Expertenwissen ergänzt (z.B. waldbauliche Restriktionen) und mit politischen und naturschutzfachliche Restriktionen in einem Gesamtsystem kombiniert. Dadurch kommt es zu zahlreichen Wechselwirkungen bei der Planung der Baumarten in der Fläche. Da diese Wechselwirkungen i.d.R nicht linear sind, ergeben sich zahlreiche Optionen und vor allem Konfigurationen, wie die Baumarten in der Fläche verteilt werden können.

Derartige Probleme, bei denen der Lösungsraum extrem groß und vor allem komplex ist, können am besten mit heuristischen Verfahren gelöst werden. Solche Verfahren können in einem hochdimensionalen Raum mit komplexen Abhängigkeiten recht schnell gute Lösungen liefern. Allerdings benötigen diese Verfahren relativ lange, um die optimale Lösung zu finden. In manchen Fällen ist dies sogar nahezu unmöglich. Dies gilt vor allem dann, wenn es mehrere deutlich separierte lokale Optima gibt. Für solche Fälle lohnt es sich mit vielen verschiedenen Ausgangskonfigurationen zu starten und die Ergebnisse bezüglich der Gesamtfitness zu vergleichen.

Für die Optimierung in dem dargestellten DSS haben wir uns für einen Genetischen Algorithmus (GA) entschieden. Ein GA gehört ebenfalls zu den heuristischen Verfahren. Der Lösungsraum unseres Optimierungsproblems besteht aus der Kombination der Anzahl der betrachteten Standortpolygone und der auf ihnen planbaren WET‘s. Eine systematische Suche nach dem Optimum ist in einem solchen hochdimensionalen Raum unmöglich. Die Qualität der Lösung lässt sich aber durch Expertenwissen und Wiederholungen der Optimierung abschätzen. Die WET‘s, die einem Standortpolygon in mehreren Optimierungsläufen häufig zugeordnet werden, sind als sichere Lösung anzusehen. Für Standortpolygone, denen sich kein eindeutiger WET zuordnen lässt, muss entweder eine Zufallsauswahl oder eine gutachtliche Expertenauswahl erfolgen.

Die in allen drei Varianten generierten Muster der räumlichen Zuordnung der WET‘s zu den Standortpolygonen sind aus waldbaulicher Sicht als prinzipiell plausibel anzusehen. So wird z.B. unter dem aktuellen Klima die Eiche nur bis in eine Höhe von 500 m über NN geplant. Allerdings wird die

Eiche unter zukünftigem Klima und in allen drei Varianten bis auf eine Höhe von 650 m geplant (Abbildung 7). Außerdem wird insgesamt mehr Eiche in der Modellregion unter den zukünftigen Klimabedingungen und der Optimierung nach Variante I („Leistung“) geplant (Abbildung 4). Dasselbe gilt für den Anteil an Buche und Fichte in Variante I. Die Entwicklung der Leistung während der Optimierung (Abbildung 6) zeigt, dass das System die Douglasie (WET 62 und 26) und die Lärche (WET 82/88) auf die besseren Standorte plant, da die durchschnittliche Wuchsleistung dieser Baumarten während der Optimierung zunimmt. Für die Fichte ist das Bild nicht so einheitlich. Der WET 52 (65% Fichte und 35% Buche) verbessert seine Wuchsleistung während der Optimierung wohingegen die Leistung des WET 25 (35% Fichte und 65% Buche) tendenziell abnimmt.

Aus dem Vergleich der Wuchsleistung zwischen beiden Klimaperioden in Variante I (Abbildung 5) kann geschlossen werden, dass die Wuchsleistung aller Baumarten im der Modellregion „Westharz“ vor allem durch die erhöhte Temperatur zunimmt. Die Verbesserung der Wuchsleistung nimmt dabei in den höheren Lagen stärker zu als in den niedrigeren Höhenstufen.

Darüber hinaus ist beim Vergleich der prozentualen Verteilung der Baumarten zwischen den beiden Klimaszenarien in Variante I zu sehen, dass bisher eher die Buche in den Höhenlagen angebaut werden sollte, jedoch unter den zukünftigen Bedingungen eher die Fichte in die Höhenlage geplant wird (Abbildung 7). Dieses Ergebnis scheint eher kontraintuitiv zu sein, da die Buche stärker von einer Erhöhung der Temperatur in den Hochlagen profitiert. Allerdings sind die hier dargestellten Muster immer nur das Ergebnis eines einzigen Optimierungslaufes. Für verlässlichere Aussagen sollten mehrere Optimierungen mit den gleichen Parametern durchgeführt und anschließend über alle Simulationen gemittelt werden. Dies war hier jedoch aus Zeitgründen noch nicht möglich.

Das von uns konzipierte System ist dreistufig aufgebaut. Neben der reinen Optimierung nach der Wuchsleistung können im System auch die Daten einer Überlebenszeitanalyse bzw. die Daten zur Annuität als Zielgröße verwendet werden. Jede neue Variante nutzt dabei auch die Eingangsdaten der vorherig Variante. Wie bereits oben erwähnt, gibt es gewisse Unterschiede zwischen den drei Optimierungsvarianten. Dies betrifft vor allem die Häufigkeiten der geplanten Baumarten (Abbildung 8). Die konkreten Ursachen für die jeweiligen Unterschiede müssen noch detaillierter durch stratifizierte Auswertungen und Sensitivitätsanalysen untersucht werden. Der resultierende dGZmax je WET ist allerdings zwischen allen drei Variablen nahezu gleich (Abbildung 9). Da aktuell nur für die erste Variante („Leistung“) wiederholte Optimierungsläufe vorliegen, ist eine detaillierte Auswertung bzw. ein detaillierter Vergleich derzeit noch nicht möglich.

Wir konnten in diesem Beitrag zeigen, dass eine räumliche Optimierung einer standortgemäßen Baumartenwahl mit Hilfe eines Genetischen Algorithmus möglich ist. Dabei können neben der standortbezogen Wuchsleistung und spezifischer biotischer und abiotischer Risiken der Baumarten auch unterschiedliche Restriktionen im System berücksichtigt werden. Im aktuellen System wurden verschiedene waldbauliche und politische Restriktionen verwendet. Das System optimiert in allen drei Varianten zunächst auf diese Restriktionen hin und im zweiten Schritt wird dann nur noch die Gesamtwuchsleistung der modellierten Region gesteigert. Somit eignet sich das System vor allem dazu eine „schnelle“ großräumige Planung durchzuführen, welche politische Restriktionen bereits berücksichtigt.

Die konkrete Planung einzelner Standortpolygone ist jedoch langwierig und mit mehr Unsicherheiten behaftet. Um eine derartige Planung möglichst valide durchzuführen, müsste der GA über mehr als 5000 Iterationsschritte laufen und auch entsprechend häufig wiederholt werden. Bei einer Laufzeit von sieben Tagen auf einem Parallelrechner mit 28 Kernen ist allerdings die Zeit der limitierende Faktor. Diese Angaben gelten für eine Modellregion mit ca. 60.000 Standortspolygonen. Die Optimierung für größere Bereiche (z.B. Niedersächsische Landesforsten) wäre mit diesem System nahezu unmöglich.

Eine mögliche Lösung für dieses Problem wäre die Teilung des Planungsraumes in kleinere Einheiten, die dann jede für sich schnell und effizient optimiert werden könnten. Dazu ist es aber notwendig die politischen Restriktionen für jede dieser Einheit separat anzupassen, so dass auf der Gesamtfläche die politischen Restriktionen noch erfüllt werden. Damit fallen aber die Wechselwirkungen zwischen den Flächen der unterschiedlichen Einheiten weg. Das bedeutet, dass die Aufteilung der Modellregion sowie die Anpassung der Restriktionen kein triviales Problem ist. Hier können im ersten Ansatz nur

Expertensysteme helfen. Eine andere Möglichkeit wäre es, die Standortpolygone so zusammenzufassen, dass sinnvolle Einheiten entstehen, die sich bei der Optimierung relativ ähnlich verhalten würden. Mit diesen „großen“ Polygonen kann z.B. eine Aufteilung der gewünschten Anteile an Baumarten für jede Teilregion ermittelt werden. Diese Anteile würden dann in einem zweiten Schritt als Restriktionen für die Optimierung auf den eigentlichen Standortpolygonen verwendet.

Das hier vorgestellte System zur Optimierung der Baumartenwahl auf der Grundlage der Waldentwicklungstypen ermöglicht es, eine strategische Waldbauplanung durch den Computer erstellen zu lassen. Schnittstellen zu Expertenwissen (waldbauliche Restriktionen) und gesellschaftlichen Bedürfnissen (politische Restriktionen) erlauben es, diese Planung an die konkreten Bedürfnisse vor Ort anzupassen. Die hier präsentierten Ergebnisse bedürfen jedoch noch einer weiteren kritischen Evaluierung und Bewertung durch Waldbau- und Forstplanungsexperten. Sie sind nur als eine erste Potentialabschätzung zu sehen. Diese kann und sollte durch den Forsteinrichter vor Ort unter Berücksichtigung weiterer Informationen, wie einer existierenden Vorverjüngung, überprüft und gegebenenfalls modifiziert werden.

Der Vorteil des hier entwickelten Systems liegt vielmehr darin, dass mit dessen Hilfe bei der Waldbauplanung auf der Grundlage von Leistungs- und Risikoprojektionen Standortunterschiede kleinräumiger abgebildet werden können. Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit die Gesamtplanung nicht durch schrittweise Anpassung gutachterlich sondern modellgestützt reproduzierbar durchzuführen.

Literatur

LECKEBUSCH GC, ULBRICH U (2004). On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change. Global and Planetary Change 44: 181–193.

NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR DEN LÄNDLICHEN RAUM, ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ Band 54 (2004). Langfristige ökologische Waldentwicklung: Richtlinie zur Baumartenwahl. Hannover.

ORLOWSKY B, GERSTENGARBE F-W, WERNER PC (2008). A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. Theoretical and Applied Climatology 92: 209–223.

OTTO H-J (1994). Waldökologie. Ulmer.

PINTO JG, ULBRICH U, LECKEBUSCH GC, SPANGEHL T, REYERS M, ZACHARIAS S (2007). Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. Climate Dynamics 29: 195–210.

ROUAULT G, CANDAU J-N, LIEUTIER F, NAGELEISEN L-M, MARTIN J-C, WARZÉE N (2006). Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. Annals of Forest Science 63: 613–624.

WAGNER S (2008). Klimawandel-Überlegungen zu waldbaulichen Strategien. AFZ-DerWald 63: 1104–1107.

WERMELINGER B (2004). Ecology and management of the spruce bark beetle Ips typographus—a review of recent research. Forest ecology and management 202: 67–82.

WERNER PC, GERSTENGARBE F-W, FRAEDRICH K, OESTERLE H (2000). Recent climate change in the North Atlantic/European sector. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society 20: 463–471.