

Florian Breitwieser, Bsc

**Simulation raumzeitlicher Effekte des Angebotes
und der Nachfrage von Hackschnitzeln in Kärnten:
Ein Agenten-basierter Ansatz**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium Geospatial Technologies

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ass.Prof. Dipl.-Ing. (FH) Dr.techn. Johannes Scholz

Institut für Geodäsie

Eidesstattliche Erklärung***Affidavit***

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Graz, _____

Datum / Date

Unterschrift / Signature

ABSTRACT

In recent years, the term “sustainability“ gained growing attention in the energy supply market. This study reviews the potential of applying agent-based modeling to forest fuel markets and supply chains. More precisely, the paper aims to model and simulate the forest fuels market, focusing the wood chip production for heating purposes, based on sustainable forest growth and yield. The developed model utilizes three types of agents, being either a supplier, acting on the demand side of the supply chain or being a “trader“ connecting supply and demand. Suppliers are different forest owner types such as small private owners, large forestry companies and governmental forests. Their forest management decisions are based on the available sustainable yield of their forests. These decisions directly affect the available forest fuels in the supply chain. On the demand side local wood-chip consuming power plants are present. Specific agents - “traders“ - are connecting supply and demand, by trying to fulfill the fuel demand of the heating plants. The “traders“, present in the model, compete for the available forest fuel supply which is affected by: a) forest growth modeling and b) the forest management operations. The aim is to minimize the transport distances and purchase costs for forest fuel. The agent-based model utilizes spatial data of forests, forest owners and heating plants. A set of scenarios evaluate the general potential of forest fuels in the region by a province-wide and harmonized central forest fuel management. The second set of scenarios review different market situations, which are mainly influenced by the forest fuel price and individual management decisions of forest owners - i.e. suppliers. The study elaborates on the agent-based modeling and simulation of the forest fuel supply chain and presents results of several simulation scenarios located in the Austrian province of Carinthia.

KURZFASSUNG

Nachhaltigkeit ist ein Begriff, der in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung am Energiemarkt gewonnen hat. Diese Studie überprüft das Potential von Agenten-basierter Modellierung im Umfeld eines Hackschnitzel-Marktes. Im Speziellen beschäftigt sich die Arbeit mit der Modellierung und Simulation einer einfachen Marktsituation der Versorgungskette von Hackschnitzel vom Wald zu den Fernwärmeheizwerken am Beispiel des österreichischen Bundeslandes Kärnten. Das Agentenbasierte-Modell setzt sich aus 3 grundlegenden Agententypen zusammen: dem Waldeigentümern auf der Angebotsseite, den Heizkraftwerken auf der Nachfrageseite und den intermediär agierenden "Händlern". Die Eigentümer setzen sich aus privaten Kleinwaldeigentümern, forstwirtschaftlichen Betrieben und den staatlichen Österreichischen Bundesforsten zusammen, wobei jede dieser Besitzformen unterschiedliche wirtschaftliche Interessen verfolgt und dadurch die Versorgungskette entscheidend beeinflussen. Die Händler reagieren auf die variierende Angebote seitens der Eigentümer und versuchen die Transportkosten zu optimieren. Das umgesetzte Modell geht von einer autarken Holzversorgung im Untersuchungsgebiet aus und ist rundenbasiert. Es wird iterativ in Schritten von einem Jahr fortgesetzt bis nicht mehr genügend Holz für die Bedarfsdeckung zur Verfügung steht. Die Basis der Simulation bilden räumliche Daten zum Wald, zu den Besitzern und den Heizwerken. Aus der laufenden Agenten-basierten Simulation lässt sich die raumzeitliche Entwicklung der Transportdistanz, Erntemuster, Ernteverteilung usw. beobachten. Im Zuge der Ergebnisse werden 6 Szenarien simuliert, welche sich in 2 Ressourcen-orientierte und 4 Markt-orientierte Szenarien einteilen lassen. In den Ersteren wird von einer zentralisierten Forstverwaltung ohne Markteinfluss ausgegangen. Aus diesen lässt sich das forstwirtschaftliche Potential der Region ablesen. Die Markt-orientierten Varianten beziehen den Markt als Einflussfaktor mit ein und beobachten das Modellverhalten im Bezug auf 4 verschiedene repräsentative Marktsituationen.

INHALTSVERZEICHNIS

Abkürzungsverzeichnis	xi
Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xv
1 Einleitung	1
2 Agenten-basierte Modellierung (ABM)	3
2.1 Was ist ABM?	3
2.1.1 Merkmale und Stärken von ABM	4
2.1.2 Grenzen von ABM	6
2.1.3 Einsatzgebiete für ABM	6
2.2 Grundelemente im ABM	7
2.2.1 Der Agent	8
2.2.2 Regeln, Verhalten und Beziehungen	9
2.2.3 Umwelt des Agenten	11
2.3 Entwurf und Design im ABM - Das ODD-Protokoll	12
2.4 Geo-Simulation: ABM und GIS	14
2.5 ABM-Toolkits	17
2.5.1 Repast	17
2.5.2 MASON	18
2.5.3 Swarm	18
2.5.4 NetLogo	19
2.5.5 AnyLogic	19
3 Stand der Forschung	21
3.1 Forstwirtschaft und Agent-Based Modelling (ABM)	21
3.2 Hackschnitzel und geografische Informationssysteme (GIS)	24
4 Modellierung und Umsetzung	27
4.1 Die holzwirtschaftliche Situation in Kärnten	27
4.2 Zweck des Modells	27
4.3 Agentenklassen, Attribute und Maßstab	29
4.3.1 Waldzelle	31
4.3.2 Eigentümer	31
4.3.3 Holzagent	34
4.3.4 Heizwerk - Biomasseheizwerk	34
4.3.5 Markt	35
4.4 Umsetzung mit Repast Symphony	35
4.5 Prozessüberblick und Ablaufplanung	36
4.6 Initialisierung	38
4.7 Forstzellen-Auswahl	38

4.7.1	Ressourcen-orientierte Auswahl	40
4.7.2	Markt-orientierte Auswahl	40
4.7.3	Integration des Waldentwicklungsplans	43
4.8	Ernten	44
4.9	Waldwachstum	47
4.10	Modell-Output	49
4.10.1	Zeitreihendiagramme	50
4.10.2	Ausgabe der Rasterkarten	50
4.11	Preisbildung	51
4.12	Validierung des Modells	51
4.12.1	Problematik der Validierung	51
4.12.2	Validierung des Ressourcen-orientierten Ansatzes	52
4.12.3	Validierung des Markt-orientierten Ansatzes	52
5	Datengrundlage	55
5.1	Rasterdaten	55
5.1.1	Walddaten	55
5.1.2	Digitales Geländemodell	55
5.2	Vektordaten	56
5.2.1	Biomasseheizwerke	56
5.2.2	Waldentwicklungsplan	57
5.2.3	Straßendatensatz	58
5.2.4	Landesgrenze des Bundeslands Kärnten	59
5.3	Datenvorverarbeitung	59
5.3.1	Erstellen des Walddatensatzes	59
5.3.2	Erstellen des Kostenrasters	61
5.3.3	Nachbildung der Eigentumsverteilung auf Bezirksebene	61
5.3.4	Aufbereitung der Preis-Historien	64
6	Ergebnisse und Simulationsszenarien	65
6.1	Überblick und Szenarien-Setup	65
6.1.1	Parameter der Ressourcen-orientierten Szenarien	65
6.1.2	Parameter der Markt-orientierten Szenarien	66
6.1.3	Zuwachs und Nachfrage	68
6.2	Ressourcen-orientiertes Basis-Szenario	68
6.3	WEP-Szenario	75
6.4	Markt-Szenario I: Positive Marktentwicklung	80
6.5	Markt-Szenario II: Negative Marktentwicklung	85
6.6	Markt-Szenario III und IV: Stetige und unsichere Marktentwicklung	88
7	Diskussion und Ausblick	93
7.1	Diskussion	93
7.2	Ausblick	97
	Literaturverzeichnis	99
A	Karten und Diagramme	105

ABKÜRZUGSVERZEICHNIS

ABM	Agent-Based Modelling
ABMS	Agent-Based Modelling and Simulation
ABS	Agent-Based Simulation
ALS	Airborn Laserscanning
API	Application Programming Interface
BFI	Bezirksforstinspektorat
BFW	Bundesforschungszentrum für Wald
CA	Cellular Automata
DGM	Digitales Geländemodell
efm	Erntefestmeter
fm	Festmeter
Ek	Ertragsklasse
EPSG	European Petroleum Survey Group
GIP	Graphenintegrations Plattform
GI	Geografische Information
GIS	geografische Informationssysteme
GK	Gauß Krüger
GUI	Graphical User Interface
LK	Landwirtschaftskammer
MGI	Militärgeographische Institut
ODD	Overview, Design concepts, Details
OOP	Objekt-orientierte Programmierung
ÖBf	Österreichische Bundesforste AG
ÖWI	Österreichische Waldinventur
srm	Schüttraummeter

UML	Unified Modeling Language
vfm	Vorratsfestmeter
WEP	Waldentwicklungsplan
WGS	World Geodetic System

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

2.1	Grundprinzip eines ABM	4
2.2	Umgebungs- und Topologie-Formen für ABM [56]	11
2.3	Gängige Agenten-Problemstellungen im GI-Kontext [76]	15
2.4	ABM-Beispielanwendungen im GI-Kontext [38]	16
3.1	Das Energieholzmodell nach Kostadinov et. al. [49]	22
3.2	Hackschnitzelverfügbarkeitsmodell nach Scholz et. al. [81]	23
3.3	Zeitreihe im Modell von Bone & Dragičević [8]	24
3.4	Holzernte-zonen im Müller-Modell [66]	25
4.1	Aufbau des Modells und Zusammenspiel der Komponenten	28
4.2	Klassendiagramm des Modells	30
4.3	Schematisches Ablaufdiagramm des Modells	37
4.4	Schematischer Ablauf der Initialisierung	38
4.5	Ablaufdiagramm des Holzauswahl-Prozesses	39
4.6	Pseudocode: Ressourcen-orientierte Auswahlkriterien	41
4.7	Pseudocode: Markt-orientierte Auswahlkriterien für Kleinwald	42
4.8	Ablaufdiagramm für den Ernte-Prozess	45
4.9	Betriebsarten des Waldes nach Weinfurter [91]	46
4.10	Zuwachsraten für Buche und Fichte in Tief-, Mittel-, und Hochlagen	49
4.11	Ansatz der Validierung	52
4.12	Validierung: Nuzugsverhalten ÖWI vs. Modell	53
4.13	Validierung: Abweichungen von ÖWI	54
5.1	Datengrundlage für den Wald	56
5.2	Berücksichtigte Biomasseheizwerke	57
5.3	Waldfunktionen im Untersuchungsgebiet	57
5.4	Entstehung des Walddatensatzes	60
5.5	Fehlklassifikation des Waldzellenalters	60
5.6	Vergleich: Distanz- und Zeit-basierende Kostenraster	62
5.7	Modellierte Eigentumsverteilungskarte des kärntner Waldes	63
5.8	Positive, negative, stetige und unsichere Preis-Historien	64
6.1	Jährlicher Gesamtzuwachs des Waldes und Nachfrage der Heizwerke	68
6.2	Basis-Szenario: Konkurrenzsituation dargestellt durch Standardabweichung	69
6.3	Basis-Szenario: mittlere Transportdistanz	70
6.4	Basis-Szenario: maximale Transportdistanz	71
6.5	Basis-Szenario: Vorrats-Kartenreihe	73
6.6	Basis-Szenario: Erntemuster-Kartenreihe	74
6.7	Einfluss des WEP auf Erntemuster	75

6.8	WEP-Szenario: mittlere Transportdistanz	76
6.9	Basis-Szenario + WEP: Erntemuster-Kartenreihe	77
6.10	WEP-Szenario: Vorrats-Kartenreihe	79
6.11	Positives Marktszenario: Konkurrenzsituation dargestellt durch Standardabweichung	80
6.12	Positives Marktszenario: mittlere Transportdistanz	81
6.13	Positives Marktszenario: Erntemuster-Kartenreihe	82
6.14	Positives Marktszenario: Vorrats-Kartenreihe	83
6.15	Positives Marktszenario: Erntevertelung im Bezug auf Eigentumsart	84
6.16	Negatives Marktszenario: Erntevertelung im Bezug auf Eigentumsart	85
6.17	Negatives Marktszenario: mittlere Transportdistanz	86
6.18	Negatives Marktszenario: Erntemuster-Kartenreihe	87
6.19	Stetiges Marktszenario: mittlere Transportdistanz	89
6.20	Unsicheres Marktszenario: mittlere Transportdistanz	90
6.21	Stetiges Marktszenario: Erntevertelung im Bezug auf Eigentumsart	91
6.22	Unsicheres Marktszenario: Erntevertelung im Bezug auf Eigentumsart	91
A.1	Negatives Marktszenario: Vorrats-Kartenreihe	106
A.2	Stetiges Marktszenario: Vorrats-Kartenreihe	107
A.3	Unsichere Marktszenario: Vorrats-Kartenreihe	108
A.4	Stetiges Marktszenario: Erntemuster-Kartenreihe	109
A.5	Unsichers Marktszenario: Erntemuster-Kartenreihe	110

TABELLENVERZEICHNIS

2.1	Einsatzgebiete und Beispiele ABM	7
2.2	7 Elemente des ODD-Protokolls [33]	13
2.3	Fünf ABM-Toolkits im Vergleich	20
4.1	Agentenklassen im Modell	30
4.2	Prozessübersicht des Modells	36
4.3	Waldzellen-Auswahlkriterien für die Ressourcen-orientierten Szenarien.	40
4.4	Zusammenhang zwischen Preisniveau und Entnahmewahrscheinlichkeit.	42
4.5	Waldzellen-Auswahlkriterien für Großwald, Betriebe und ÖBf	43
4.6	Modellierte Brachzeiten für Schutzwald und co. bezogen auf die Wertziffern	44
4.7	Heizwertfaktor bezogen auf Waldtypen	47
4.8	Zuwachswerte bezogen auf die Datenbasis	48
4.9	Höhengürteleinteilung für Österreich	48
5.1	Heizkraftwerke geordnet nach Bedarf	58
5.2	Geschwindigkeitsbezogene Gewichtung der Straßen	61
5.3	Eigentumsverteilung des kärntner Waldes	63
6.1	Datenbasis und Simulationsparameter - Ressourcen-orientierte Szenarien	66
6.2	Datenbasis und Simulationsparameter - Markt-orientierten Szenarien	67

KAPITEL 1

EINLEITUNG

Nachhaltigkeit hat sich in den letzten Jahren zu einem wichtigen Begriff in unserer Gesellschaft entwickelt. Vor allem am europäischen Energiemarkt haben erneuerbare Energiequellen einen hohen Stellenwert in der Politik eingenommen [58]. In Österreich stehen als erneuerbare Energiequellen Wasserkraft, Windenergie und die Energiegewinnung aus Biomasse wie z.B. Hackschnitzeln zur Verfügung. Der Einsatz von Biomasse zur Wärmeerzeugung für Nahwärme-Einspeisung ist eine der effizientesten Arten der energetischen Nutzung von Holz [3]. Als Brennstoff in den Biomasseheizwerken dient fast ausschließlich Holz, meist in Form von Hackschnitzeln. Dieses stammt im besten Fall aus der Region und wird von den Land- und Forstwirten an die Biomasseheizwerke geliefert. Dadurch bleibt die Wertschöpfung in der Region, und es werden Arbeitsplätze gesichert. Zur Hackschnitzel-Produktion dient vorwiegend nicht sägefähiges sowie nicht verkaufsfähiges Restholz. Zusätzlich können Sägespäne, Rinden oder auch Holzabfälle aus der Industrie als Brennstoff in einem Biomasseheizwerk eingesetzt werden [72].

Durch den hohen gesellschaftlichen sowie politisch forcierten Stellenwert dieser erneuerbaren Energiequelle gewinnt eine wirtschaftlich optimierte Nutzung der Ressource immer mehr an Bedeutung. Aus diesem Grund ist das Ziel dieser Masterarbeit die Modellierung, Simulation und darauffolgende Analyse von raumzeitlichen Zusammenhängen in der Versorgungskette vom Wald bis zum energetisch genutzten Hackschnitzel. Räumlich beschränkt sich die Untersuchung auf die Biomasseheizwerke und Waldflächen im österreichischen Bundesland Kärnten, da es mit rund 60 % zu einem der walddreichsten Bundesländer zählt und somit die regionale Verfügbarkeit der Ressource eine überaus günstige Ausgangslage darstellt [3]. Im hier beschriebenen Modell wird Kärnten als autark angesehen, sodass der mögliche Holzimport aus dem Ausland nicht berücksichtigt wird.

Ein moderner Ansatz zur Simulation solcher Märkte bzw. Versorgungsketten ist der Einsatz von Agenten-basierter Modellierung/Agent-Based Modelling (ABM). ABM simuliert Aktivitäten von autonom agierenden Entitäten, die als Agenten bezeichnet werden. Verhalten und Abhängigkeiten dieser Agenten an sich, sowie zwischen mehreren Agenten, z.B. Personen und deren Umfeld, können modelliert und dargestellt werden [37]. Ziel der ABM ist es, ein System unter variierenden Konditionen abzubilden [54]. Während der Agent verantwortlich für die Veränderung im System ist, bleibt das Umfeld in den meisten Fällen passiv und weitgehend unverändert. Außerdem hat sich erwiesen, dass die Kombination aus ABM und geografischen Informationssystemen (GIS) ein großes Potential ergibt um solche reale Sachverhalte darzustellen [61].

Genau in diesem Punkt hakt diese Arbeit ein und beschreibt einen Ansatz zur Agenten-basierten Modellierung einer raumzeitlichen Marktsimulation von Biomasse. Aufbauend auf einer Studie von Scholz et. al. [81] wird ein Marktszenario entwickelt, das sich aus 3 grundsätzlichen Agententypen zusammensetzt: Waldeigentümern (Angebot), Biomasseheizwerken (Nachfrage) und "Händlern", die als Vermittler zwischen Angebot und Nachfrage agieren. Die Waldeigentümer weisen je nach Typ (Kleinwald, Großwald, Betriebe und ÖBf) unterschiedliche Bewirtschaftungsstrategien und -interessen auf und sorgen somit für die Dynamik am Markt. Die Biomasseheizwerke bilden die Nachfrageseite und weisen einen jährlichen Bedarf an Hackgut auf, der gedeckt werden muss. Auf-

grund dessen, dass Biomasse nur begrenzt verfügbar ist, kommt es zu einem Konkurrenzkampf der "Händler", die eine Optimierung der Transportkosten anstreben. Für die Eigentümer werden unterschiedliche Verhaltensmuster bezogen auf Veränderungen des Holzpreises modelliert. Zudem wird ein einfaches Waldwachstumsmodell umgesetzt. Die Simulation wird auf Basis aktueller Daten über Wald und bestehende Biomasseheizwerke durchgeführt und in Form von Testszenarien ausgewertet. In diesem Zusammenhang ergeben sich folgende Forschungsfragen:

1. **Eignet sich ABM, im speziellen die ABM-Plattform *Repast Symphony* [79], zur Modellierung und Simulation räumzeitlicher Zusammenhänge im Bereich der geografischen Informationssysteme GIS?**
2. **Existieren räumzeitliche Zusammenhänge zwischen Angebot und Nachfrage von Hackschnitzeln für Biomasseheizwerke in Kärnten?**

Die Arbeit besteht in der Modellierung und Umsetzung einer auf *Java* und *Repast Symphony* [79] basierenden Prototyp-Applikation, welche die räumzeitlichen Zusammenhänge in Zeitschritten von einem Jahr simulieren soll. Das umgesetzte Modell hegt keinen Anspruch Abläufe auf Mikro-Level abzubilden stattdessen versucht es großräumige Zusammenhänge aufzuzeigen. Da eine realistische Umsetzung des Waldwachstums und der Nutzung des Waldes den Rahmen dieser Arbeit überschreiten würde, konzentriert sich diese Arbeit auf eine modellhafte Annäherung dieser Abläufe. So werden beispielhaft der Einfluss von Schadereignissen wie Sturmschäden, Schneebruch, Borkenkäfer, Wildverbiss usw. nicht berücksichtigt.

Der Aufbau der Arbeit gliedert sich im Grunde folgendermaßen: In Kapitel 2 wird darauf eingegangen was unter dem Begriff ABM zu verstehen ist. Es werden die grundsätzlichen Merkmale, wichtigsten Grundelemente dieses Modellierungsansatzes und eine Methode zur korrekten Beschreibung eines Agenten-basierten Modells beschrieben. Außerdem werden eine Betrachtung von ABM im Kontext mit geografischen Informationssystemen GIS und ein Überblick und Vergleich aktueller ABM-Plattformen abgehandelt. Kapitel 3 beschreibt den "State of the Art" im Themenbereich ABM und GIS zur Modellierung von forstwirtschaftlichen Wertschöpfungsketten.

Den Hauptteil der Arbeit bildet die Modellierung und die Umsetzung des ABM in Kapitel 4. Dieser Teil gibt einen kurzen Einblick in die aktuelle Lage des Holzmarktes und beschreibt die Grundzüge und Zusammenhänge des Modells. Außerdem wird auf die Modellierung der agierenden Komponenten eingegangen. Im Zuge eines Prozessüberblicks und einer Ablaufplanung werden die wichtigsten Schritte im Simulationsablauf bei der Umsetzung mit *Repast Symphony* beschrieben. Zuletzt wird noch ein Einblick in den umgesetzten Validierungsprozess des Modells gegeben. Die Validierung basiert dabei auf einem Vergleich zur Österreichische Waldinventur (ÖWI). Eine Beschreibung der verwendeten Daten und der Arbeitsschritte der Datenvorverarbeitung werden in Kapitel 5 beschrieben. Die Ergebnisse werden in Kapitel 6 abgehandelt. Darauf folgt eine Diskussion und ein Ausblick über mögliche Folgeprojekte in Kapitel 7.

AGENTEN-BASIERTE MODELLIERUNG (ABM)

Dieses Kapitel gibt einen theoretischen Überblick zum Thema ABM. Eine Einführung und Beschreibung der grundsätzlichen Merkmale von ABM findet sich in Abschnitt 2.1. Darauf folgt, im Punkt 2.2, ein Überblick der wichtigsten Grundelemente dieses Modellierungsansatzes und Abschnitt 2.3 zeigt eine Methode zur korrekten Beschreibung eines ABM. Eine Betrachtung von ABM im Kontext mit GIS wird im Teilbereich 2.4 abgehandelt und den Abschluss 2.5 bildet ein Überblick und Vergleich der aktuellen ABM-Plattformen.

2.1 WAS IST ABM?

Agent-Based Modelling (ABM) oder zu deutsch auch agenten-basierte Modellierung ist ein moderner Modellierungsansatz, der in der Literatur auch als *Agent-Based Modelling and Simulation (ABMS)*, *Agent-Based Simulation (ABS)* sowie *Individual-based modelling (IBM)* bekannt ist. Es baut auf Elemente aus den Forschungsbereichen der zellulären Automaten, komplexen (adaptiven) Systeme, der computergestützten Sozialwissenschaften sowie künstlichen Lebens und Intelligenz auf und wurde dazu entwickelt, um auf natürliche Weise die komplexen Phänomene und Problemstellungen der menschlichen Interaktion sowie das Verhalten von Systemen mit dynamischen agierenden Individuen modellieren und simulieren zu können [56, 54].

Das Grundprinzip dieses Modellierungsansatzes beruht darauf, dass ein oder mehrere autonome Agenten in einer modellierten Umgebung dynamisch agieren bzw. miteinander interagieren. Agenten repräsentieren in diesem Zusammenhang z.B. Personen, soziale Gruppierungen, biologische oder geografische Einheiten wie Wälder oder Regionen oder abstrakte Entitäten. Das System als Ganzes baut sich in weiterer Folge in einem *Bottom-Up*-Prozess durch Entscheidungen, Aktionen und Interaktionen und das daraus resultierenden Verhaltensmuster der Agenten auf [26, 37, 54, 70, 75]. Diese Herausbildung der Strukturen auf Systemebene durch das Zusammenspiel auf Elementebene wird als *Emergenz* bezeichnet. Die Emergenz ist ein zentraler Punkt in der ABM [7]. Ein weiterer entscheidender Aspekt ist die Möglichkeit, heterogene Verhaltensweisen sowie das dynamische Zusammenspiel mit anderen Individuen abbilden zu können [17]. Abbildung 2.1 zeigt dieses Prinzip anhand von interagierenden "Menschen". Die Verhaltensregeln sind schematisch als *if-then-else*-Bedingungen¹ dargestellt.

Wie bereits das Wort Simulation impliziert, werden mit ABM Prozesse zeitabhängig beobachtet. Dies kann iterativ, Zeitschritt-abhängig oder in Form von diskreten Ereignissen der Fall sein [12]. In vielen Fällen wird diese dynamische Interaktion so lange beobachtet, bis ein definierter Endzustand erreicht bzw. eine Abbruchbedingung erfüllt wird [56].

Die Verhaltensregeln, Eigenschaften und Ziele der Agenten werden in der Praxis in Form von Computeralgorithmen umgesetzt. Sie können dabei von einfach definierten Aktionen wie z.B. Produzieren, Bewegen, Kaufen usw., bis hin zur Erkennung von komplexen Interaktionsmustern wie z.B.

¹Eine bedingte Anweisung in der Programmierung: ein Programmabschnitt, der nur unter einer bestimmten Bedingung ausgeführt wird.

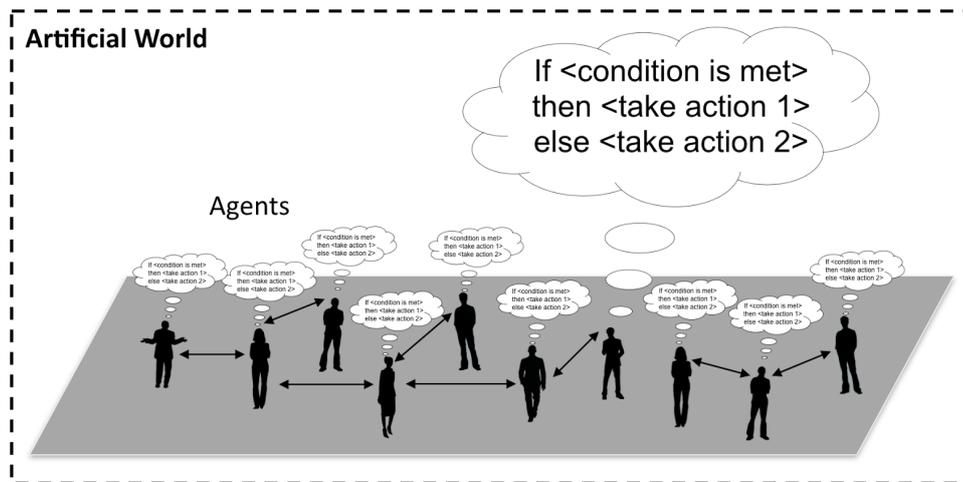


Abbildung 2.1: Beispielhafte, konzeptionelle Darstellung des Grundprinzips eines ABM, in der die Agenten, in diesem Fall Personen, auf Basis von definierten Regelwerken interagieren. (Quelle: Heppenstall & Crooks [38])

dem Zusammenspiel von Landnutzungsklassen in der urbanen Entwicklung reichen [7, 16]. Die ursprüngliche Intention bei ABM baut auf das *Keep it simple stupid*-Prinzip auf, und somit können bereits kleine simpel wirkende Modelle elegant komplexe Sachverhalte abbilden. In den letzten 10-15 Jahren haben sich die verfügbaren Software-Tools, Entwicklungsumgebungen sowie Rechen-Ressourcen allerdings erheblich weiterentwickelt, sodass es heute auch möglich ist, große, spezifische und sehr komplexe Phänomene abzubilden. Solche Modelle sind durch eine oft sehr hohe Anzahl an parallel agierenden Agenten sowie einer sehr hohen Komplexität bei der Implementierung der Verhaltensregelwerke der Agenten, als auch dem Informationsgrad der Umgebung gekennzeichnet [54].

2.1.1 Merkmale und Stärken von ABM

Die grundlegenden Merkmale von ABM lassen sich auf Basis der Fachliteratur durch folgenden drei Feststellungen definieren:

1. **ABM erfasst emergente Phänomene.** Diese spontan wachsenden Phänomene sind charakterisiert durch makroskopische Muster, die erst durch das parallelisierte iterative Anwenden von Verhaltensregeln der heterogenen Komponenten auf einem Micro-Level entstehen. Das Zusammenspiel, induziert durch die Individualität der Einzelkomponenten, kann eine stochastische Komponente mit sich bringen, die zu unvorhersehbaren Szenarien führen kann [7, 57]. Das große Ganze ergibt sich erst durch die Dynamik der Einzelteile in einem sog. *Bottom-Up*-Prozess [17].
2. **ABM liefert eine natürliche Beschreibung für Systeme und Objekte.** ABM bietet die Möglichkeit Objekte der realen Welt als ontologisch entsprechende Agenten in Form von Programmcode zu implementieren. Diese Eigenschaft wird als *ontologische Korrespondenz/Kongruenz* bezeichnet. Im Gegensatz zu Gleichungssystem-basierten Modellen stellt ABM

einen natürlichen Modellierungsansatz dar, da nicht Variablen sondern Objekte beobachtet werden [26].

Zur Beschreibung von dynamischen Systemen werden häufig Differentialgleichungssysteme eingesetzt, die methodisch für viele Benutzer oft schwer verständlich sind [60]. Zudem muss aus Vereinfachungsgründen oft auf Durchschnittswerte und somit auf verallgemeinerte Einzelkomponenten zurückgegriffen werden. Außerdem ist das Verhalten der modellierten Objekte oft nicht linear bzw. sogar zufällig und somit kaum in einer Gleichung fassbar [36, 88]. In der ABM hingegen nimmt das Individuum den zentralen Standpunkt ein und bildet Objekte anhand von heterogenen Agenten mit Eigenschaften, Verhalten, Beziehungen usw. ab [7]. Durch eine fast beliebig gestaltbare Umgebung beschreibt ABM das Verhalten der Agenten in einem räumlichen Kontext [75]. Die Umgebung kann z.B. in Form von physikalischen Barrieren oder Ressourcenvorkommen implementiert sein und kann das Agenten-Verhalten beeinflussen. Durch die Interaktion zwischen Agenten kann es zu Netzwerkeffekten also Beziehungen kommen. Außerdem können die Agenten dabei mit einer eingeschränkten Rationalität sowie Lernfähigkeit ausgestattet sein [26]. In diesem Sinne ist es natürlicher z.B. das Verhalten von Fußgänger in einer virtuellen Fußgängerzone mit sich bewegendem Agenten darzustellen, als mit Gleichungssystemen. Zudem ist diese Variante auch fassbarer für den Betrachter bzw. Nicht-Experten.

Die Verwendung von Objekt-orientierter Programmierung OOP (Java, C++ usw.) ist in diesem Zusammenhang ein entscheidender Faktor, denn Programmiersprachen bieten ein höheres Maß an Ausdrucksfähigkeit als Gleichungssysteme [16]. Außerdem gibt es eine Affinität zwischen der Instanz in der OOP und dem Agenten in der ABM. So setzen sich OOP-Sprachen aus *Klassen* zusammen, die den Bauplan für die Abbildung von realen Objekten in Softwareobjekte bilden. Die Beschreibung erfolgt mittels *Attributen* (Eigenschaften) und *Funktionen/Methoden* (Verhaltensweisen). Die (heterogene) Umsetzung der Klasse wird als *Instanz* bezeichnet [1].

3. **ABM ist flexibel**, und dies auf mehreren Ebenen. Durch den modularen Aufbau, der durch die OOP garantiert wird, kann z.B. durch einfaches Hinzufügen von zusätzlichen Agenten eine komplett neue Rahmenbedingung für Verhaltensweisen geschaffen werden. Auch die Komplexität lässt sich recht einfach verändern, hier muss lediglich auf Agentenebene die Logik erweitert oder angepasst werden. Durch diese Form der Modellierung ist auch die Übertragbarkeit in andere Wissenschaftsbereiche möglich. So ist z.B. der Verkehrsfluss auf Straßen mit der Dynamik von Flüssigkeiten auf analytischer Ebene vergleichbar [36]. Auch die Betrachtung von Teilgruppen oder des einzelnen Agenten ist möglich. So sind auch ganz neue Blickpunkte auf ein Thema realisierbar [7]. Die Parallelisierbarkeit der Prozesse ist ein weiterer Faktor, der die Flexibilität und Leistungsfähigkeit ABM unterstreicht [36].

Es gibt viele verschiedene Arten von ABM, wobei jedes charakteristische Eigenschaften, Vorteile und Nachteile aufweisen kann. In diesem Zusammenhang definieren De Smith, Goodchild & Longley [19] zwei grundlegende Zweckmäßigkeiten, für die ein ABM entwickelt werden kann. Ein ABM kann entweder dazu ausgelegt sein, um eine *erklärende* Funktion einzunehmen oder eine *vorhersagenden / prognostischen* Zweck haben.

Im **erklärenden** Modellierungsansatz geht es darum Theorien zu untersuchen und Hypothesen aufzustellen. Es sollen nicht zukünftige Zustände simuliert werden, sondern es geht darum das Zustandekommen gemachter Beobachtungen durch ein Modell zu verstehen. Dabei kann z.B. der Fokus auf bestimmte Teilbereiche eines Phänomens gelegt werden um einen bessern Einblick in die grundle-

genden Funktionsweise bzw. den Entstehungsprozess unter Laborbedingungen zu bekommen. Solche Systeme streben nicht die Reproduktion vom tatsächlichen System an.

Im Gegensatz dazu steht der **vorhersagende / prognostische** Ansatz, welcher üblicherweise zur Extrapolation von Trends, Evaluierung von Szenarien und zur Vorhersage von zukünftigen Zuständen herangezogen wird. Bei diesem Ansatz werden auf Basis von Veränderungen der initialen Zustände und der Verhaltensregeln die daraus resultierenden Effekte beobachtet und evaluiert.

2.1.2 Grenzen von ABM

ABM ist eine hilfreiche Möglichkeit zur Modellierung und Untersuchung von komplexen Systemen, stößt aber doch in bestimmten Bereichen an seine Grenzen. Ein wichtiger Faktor, der in diesem Zusammenhang betrachtet werden muss, ist die vernünftige Berücksichtigung des Detailgrades im Bezug auf das modellierte System [4]. Da ABM stets die Intention vertritt ein System auf Micro-Level zu beschreiben, gestaltet sich die Berücksichtigung der Maßstabs-bezogenen Attribute, Verhaltensweisen und Interaktionen mit der Umwelt oft als sehr schwierig [19, 4]. Ein ABM kann also durch die Flexibilität in der Anwendung recht schnell sehr komplexe Züge annehmen. Als Konsequenz daraus sind dann auch alle Folgeprozesse wie Validierung und Verifizierung ähnlich komplex [15]. Ein weiterer Faktor ergibt sich durch die Unberechenbarkeit der Emergenz. Vor allem die emergent entstehenden Zusammenhänge, die daraus resultierenden internen Abläufe und das auf stochastischen Effekten aufbauende Systemverhalten ist im Vergleich zu traditionellen analytischen/mathematischen Modellen oft schwer vermittelbar [19]. Zudem können "komplexe" ABM oft sehr empfindlich auf Änderungen des initialen Zustands der Verhaltensregeln reagieren. Somit kann ein robustes und somit fehlerfreies Systemverhalten oft nur durch multiple Simulationsdurchläufe erreicht werden.

2.1.3 Einsatzgebiete für ABM

ABM findet seine Anwendung in verschiedenen Fachbereichen. Die Modelle selbst können sich dabei z.B. in der Modellierung von physischem oder sozialem Raum und im Ausmaß des implementierten Funktionsumfangs unterscheiden. Allgemeingültig für all diese Modelle ist jedoch der Ansatz, dass das Verhalten auf der Ebene der Individuen umgesetzt wird [17]. Tabelle 2.1 zeigt eine Auswahl an ABM Beispielprojekten aus verschiedenen Forschungsbereichen. Diese reichen von Verkehrssimulationen über biomedizinische Simulationen bis hin zu GIS-basierter Kriminalitätsanalyse.

Tabelle 2.1: Ein Querschnitt über Beispielanwendungen und mögliche Einsatzgebiete/ Themenbereiche für ABM.

Themenbereich	Beschreibung
Verkehrssimulationen	Eine Micro-Simulation des Autobahn-Verkehrs zu Stoßzeiten zur Untersuchung von Verbesserungskonzepten. Jedes Fahrzeug stellt einen Agenten in einem virtuellen Straßenverkehr dar [45].
Anthropologie	Modellierung von prähistorischen Siedlungsmustern und der Entwicklung des politischen Einflusses im Titikakasee-Becken in Peru und Bolivien. Siedlungen, Menschen und Häuptlinge sind die Agenten. Sie betreiben Handel, konkurrieren und migrieren [31].
Biomedizin	ABM wird zur Erforschung der Zusammenhänge nativer und erlernter Immunität eingesetzt. Die Agenten stellen die beteiligten Zellen dar [23].
Analytische Chemie	Modellierung der geordneten Aneinanderlagerung von Molekülen und Bildung von Makrostrukturen [87].
Kriminalitäts-Analysen	Zur räumlichen Analyse von potentiellen Raubüberfällen wird eine virtuelle Umgebung auf Basis von GI-Daten mit virtuellen Einbrechern modelliert. Aus den Verbrecherprofilen lassen sich die Regelwerke für die Verhaltensweisen ableiten [59].
Ökologie	Erforschung des Jäger-Beute Zusammenhangs zwischen durchreisenden Schwertwalen und den lokal vorkommenden Meeresäugetieren. Das bekannte Verhalten der Tiere wird mit Agenten dargestellt.
Finanzmarktanalyse	Ein virtueller Markt, der die realistischen Handelsmechanismen und Preisentwicklungen darstellen soll. Durch unterschiedliche Typen von Agenten sind Marktexperimente möglich [78].

2.2 GRUNDELEMENTE IM ABM

Aus den oben beschriebenen Beispielen lässt sich bereits erkennen, dass ein ABM aus 3 grundlegenden Elementen besteht: Agenten, Regeln und Umgebung. In der Literatur, vor allem im Werk von Macal & North [54], werden diese Elemente folgendermaßen beschrieben:

1. Eine Menge von **Agenten** mit ihren Attributen, Regeln und dem daraus resultierenden Verhalten;
2. Die **Beziehungen** zwischen den Agenten und dem dahinterliegenden Regelwerk, der sog. Topologie;
3. Die **Umgebung**, in der die Agenten auftreten, sich bewegen und mit der sie interagieren;

Neben diesen Hauptkomponenten setzt sich ABM aus weiteren im Hintergrund laufenden Elementen zusammen. Zu den wichtigsten zählt in diesem Zusammenhang der sog. “*scheduler*“ welcher die

zeitlichen Abläufe der Simulation beinhaltet und regelt. Rundenbasierte-Agenten werden vom *scheduler* in jedem inkrementell fortlaufenden Zeitschritt angesprochen und führen dann die im internen Regelwerk beschriebenen Aktionen aus. Auch die auf diskreten Events basierenden Reaktionen von Agenten werden durch den *scheduler*, geregelt. Ein weiterer Mechanismus ist das sog. *logging* welches die Aufzeichnung der dynamischen Daten eines ausgeführten Modells verwendet. *Logging* wird in regelmäßigen Zeitabständen durchgeführt und passiert in der Regel automatisch [70].

2.2.1 Der Agent

Grundsätzlich findet sich in der Literatur keine präzise Definition für den Terminus “Agent“. Die wissenschaftliche Community konnte sich bis jetzt noch nicht einigen, ob die Definition auf die Anwendung oder die Umgebung bezogen werden soll [37, 56]. Prinzipiell stellt der Agent einen beliebigen Akteur eines Systems bzw. eine Entität, die Ereignisse hervorrufen kann, die entweder sie selbst oder andere Agenten beeinflussen, dar [70]. Manche Modellierer bezeichnen jede Form einer autonom handelnden Komponente als Agenten [56]. Jeder Agent kann einzigartige Eigenschaften und Verhalten aufweisen. Sie können Informationen aneinander weitergeben und dadurch Aktionen und Entscheidungen davon abhängig machen. Außerdem können sich Agenten reproduzieren und adaptieren oder sogar “Lernprozesse“ daraus entwickeln [26, 7].

Wooldridge & Jennings [94] definieren den Agenten aus einer pragmatisch, praktischen Sichtweise. Der Agent wird hier mit einer Liste aus Eigenschaften, die ein Großteil der Agenten in den verschiedensten ABM aufweist, beschrieben. Bonabeau [7], Macal & North [56], Macal & North [54], Crooks & Heppenstall [17], De Smith, Goodchild & Longley [19] und Heppenstall et. al. [37] haben diese Liste noch erweitert und adaptiert. In der folgenden Auflistung werden diese Eigenschaften im Detail erklärt:

- **autonom:** Agenten sind autonome und selbstgesteuerte Einheiten. Sie kommen also ohne zentralisierte Kontrolleinheit aus. Sie besitzen die Fähigkeit Informationen zu verarbeiten, diese mit anderen Agenten auszutauschen und darauf aufbauend unabhängige Entscheidungen zu fällen. Auch wenn es einem Agenten nur im Rahmen definierter Situationen erlaubt ist mit anderen Agenten zu interagieren, ist hier trotzdem von einer Art der Autonomie zu sprechen.
- **heterogen:** Ein Agent ist eine klar identifizierbare und abgrenzbare Entität, welche aus statischen oder dynamischen Attributen, Verhaltensweisen und Entscheidungsvermögen zusammengesetzt ist. Ein Agent, der einen Menschen darstellt, kann z.B. die Attribute Alter, Geschlecht, Arbeit usw. und Verhaltensweisen wie: gehen, arbeiten usw. aufweisen. Agenten haben in vielen Modellen ein Status-Attribut, welches Auskunft über einen Bestand oder Zustand gibt und so Agenten des gleichen Typs unterscheidbar macht. Dieser Status z.B. Reichtum, Gesundheit, Energie usw. kann sich mit der Zeit, auf Grund von selbst induzierten Aktionen oder durch externe Einflüsse, ändern. Im Kontext mit GIS ist die Position, sei sie statisch oder dynamisch, ein solches Status-Attribut [32].
Zusammenschlüsse oder Gruppen sind niemals als ein kollektives Objekt anzusehen, da sich diese immer aus vielen heterogenen Individuen zusammensetzen. In der Praxis werden Agenten durch Klassen definiert, wobei auch hier die daraus erstellten Instanzen immer heterogen abgrenzbar bleiben [70].
- **aktiv:** Agenten sind aktiv und bringen somit Dynamik in die Simulation. Aktivität ist ein wichtiger Faktor im ABM und ein Agent kann die folgenden aktiven Eigenschaften aufweisen:

- **pro-aktiv/ziel-gerichtet:** Ein Agent kann explizite Ziele haben. In diesem Fall ist das Verhalten so getrimmt, diese auch zu erreichen. Die Ziele können dabei von einfachen Optimierungsprozessen wie dem Lösen von Minimierungs- oder Maximierungsproblemen bis hin zu komplexen Ziel-Szenarien reichen. Auch Lernprozesse sind zielgerichtet, der Agent hat als Ziel seine Entscheidung auf Basis von Feedback aus vorhergehenden Entscheidungen zu optimieren.
- **reaktiv/perzeptiv:** Ein Agent kann so ausgelegt sein, dass er seine Umgebung wahrnimmt. In diesem Zusammenhang ist es auch möglich, dass ein Agent mit Vorwissen über sein Umfeld ausgestattet ist. Dies kann sich in der Form von Grenzen, Hindernissen und Zieldestinationen oder in der Wahrnehmung von anderen Agenten widerspiegeln. In einem GI-Kontext sollte der Agent auch in der Lage sein die räumliche Zusammensetzung zu evaluieren [76]. Es reicht z.B. eine Ressource im aktuellen Standpunkt aus.
- **rational:** Durch die Heterogenität jedes Agenten können diese eine eingeschränkte und somit einfache Form der Rationalität aufweisen. Sie können aufbauend auf ihren Attributen und Zielen, selbst-induzierte und adaptive Entscheidungen treffen. Diese Eigenschaft ist im ABM im Bereich der Sozialwissenschaften vor allem im Zusammenhang “rational choice theory“ zu finden.
- **interaktiv/kommunikativ:** Agenten haben die Fähigkeit Informationen mit anderen, in ihrer Nachbarschaft befindlichen Agenten, auszutauschen.
- **mobil:** Ein Agent kann in den definierten Grenzen seiner Umgebung “herumstreifen“ bzw. sich dort frei bewegen. Es ist somit möglich jegliche Form von bewegten Objekten bzw. dynamischen Verhaltensweisen abzubilden. Mobilität ist aber keine zwingende Eigenschaft, denn vor allem Bäume sind ein weit verbreiteter Agententyp [76].
- **anpassungs- und lernfähig:** Ein Agent kann so ausgelegt sein, dass er seinen aktuellen Zustand auf Basis seines vorhergehenden Zustandes oder eines neuen Sachverhaltes verändert. Das bedeutet, dass er sich adaptiert bzw. anpasst, und dies stellt bereits eine einfache Form eines Lernprozesses auf Basis eines Erinnerungsvermögens dar. Agenten können die Möglichkeit haben, ihre Funktionalitäten weiterzuentwickeln und somit unvorhersehbare Verhalten hervortreten zu lassen [7].
- **reproduzierfähig:** Agenten können sich aus eigenen Stücken selbständig oder fremd-induziert “vermehrten“. Auch sterben bzw. verschwinden kann zum Funktionsumfang gehören [36].

Diese Eigenschaften sind natürlich nicht alle zwingend auf jeden Agenten anwendbar. Deshalb kann es auch vorkommen, dass von Anwendungsbereich zu Anwendungsbereich oder sogar innerhalb eines Modells ein Agent mit nur einigen wenigen dieser gelisteten Eigenschaften auskommt. Außerdem können Agenten auch noch andere Charakteristiken aufweisen. Zudem kann die Bedeutung der Eigenschaften komplett verschieden sein. Ein Agent kann jede Form einer autonomen Entität verkörpern, dies können in einem GI-Kontext z.B. Menschen, Gebäude, Landparzellen, Stromverteiler usw. sein [17].

2.2.2 Regeln, Verhalten und Beziehungen

ABM setzt auf ein dezentralisiertes System [54], in dem jeder dynamische oder statische Agent mindestens eine oder gar mehrere Verhaltensregeln aufweist. Diese **Regeln** steuern Verhalten und

Beziehungen zu anderen Agenten und seiner direkten Umgebung. Die Grundlagen für diese Regeln kommen aus der Literatur, Expertenwissen, Datenanalyse, Erfahrungswerten oder aus empirischen Ermittlungen. Ein Regelwerk kann sowohl für den einzelnen Agenten als auch für bestimmte Gruppen sowie für alle Agenten im System angewendet werden [17]. Die Regeln sind in der Praxis oft so einfach wie möglich gehalten und basieren sehr oft auf bedingten Anweisungen (*if-then-else*) und Grenzwerten [37]. Die Raffinesse des Gesamtregelwerkes eines Agenten hängt in vielen Fällen von der zugrundeliegenden Informationsmenge ab, die einem Agent als Entscheidungsgrundlage vorliegt [56].

Auch “Erinnerungen“ an vorherige Ereignisse können als Entscheidungsgrundlage herangezogen werden. Solche Lernprozesse basieren im einfachsten Fall auf Regeln, die aufgrund vorhergehenden Ergebnissen angepasst werden. Natürlich können auch weit kompliziertere Algorithmen zum Einsatz kommen. Solche Modelle mit anpassungsfähigen oder gar lernfähigen Agenten sind allerdings eine Seltenheit, da diesen adaptiven Verhaltensweisen oft striktere, zielgerichtete Regelwerke vorgezogen werden. Außerdem ist Lernfähigkeit oft nicht Ziel der Modellierung [56].

Das **Verhalten**, welches aus den definierten Regelwerken hervorgeht, kann “Zeitplan“-gesteuert ablaufen. Ein bestimmtes Verhalten kann einerseits synchron, das heißt alle Agent führen ihre Aktionen gleichzeitig zu einem diskreten Zeitpunkt einem sog. “step“ durch, und andererseits fremd-induziert und/oder durch einen zeitabhängigen Stimulus, also asynchron, ausgeführt werden [17].

Die **Beziehungen** in einem ABM werden als Topologie bezeichnet. Sie beschreibt wer mit wem z.B. Informationen austauscht oder bei wem Aktionen auslöst. Die Agenten-Beziehungen können von einem zufälligen über einen reaktiven bis hin zu einem ziel-orientierten Stimulus ausgelöst werden. Die gebräuchlichsten Arten der Topologie in ABM werden von Macal & North [56] abgehandelt und sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Der Typ hängt hier direkt mit der vorhandenen Art der Umgebung zusammen.

Im sog. “*soup*“-Modell (siehe Abbildung 2.2a) gibt es eine definierte Menge von Agenten, die keinen Standort bzw. räumlichen Bezug aufweisen. Üblicherweise werden hier Agentenpaare zufällig ausgewählt, interagieren und tauchen dann wieder in der Menge ab. Die *Cellular Automata*-Topologie, in Abbildung 2.2b stellt die Beziehungen auf Basis eines Rasters dar. Die Agenten wandern von Rasterzelle zu Rasterzelle und prüfen ihre Nachbarschaftsbeziehungen zu anderen Zellen. Die Nachbarschaft wird hier durch adjazente Rasterzellen mittels von *Neumann*²-, *Moore*-Nachbarschaft³- oder deren Ablegern dargestellt. In der Topologie, basierend auf einem *euklidischen Koordinatensystem* (Abbildung 2.2c), bewegen sich die Agenten im 2-, 3- oder mehr-dimensionalen Raum. Der Begriff der Nähe und Nachbarschaft beruht hier rein auf euklidischen Distanzen. Kommt eine *GI*-Topologie zum Einsatz, bewegen sich die Agenten in einer referenzierten geographischen Umgebung, der Vektorelemente (Punkt, Linie und Fläche sowie deren Derivaten) zu Grunde liegen (siehe Abbildung 2.2d). Beziehungen können hier über die *GI*-typischen topologischen Abfragen bzw. Operatoren wie z.B. *touch*, *inside*, *disjoint*⁴ usw. abgebildet werden. Die *Netzwerk*-Topologie, dargestellt in Abbildung 2.2e, ist die höchste Form der Beziehungsdarstellung. Ein Knoten stellt einen Agenten dar und eine Kante die Beziehung zwischen zwei Agenten. Im Gegensatz zu den anderen Topologie-Typen basiert diese Form nicht auf irgendeinem Grundsatz der Nähe sondern auf Grundsätzen einer natürlichen Beziehung. Die Netzwerk-Topologie kann sowohl statische als auch dynamische Beziehungen darstellen, wobei in statischen Netzwerken die Kanten a priori festgelegt werden müssen.

²Lediglich die Flächen, welche eine Kante mit der Basisfläche gemeinsam haben, gelten als Nachbarn.

³Alle Flächen, welche mindestens eine Ecke mit der Basisfläche gemeinsam haben, gelten als Nachbarn.

⁴topologische SQL Abfragen in Oracle-Spatial

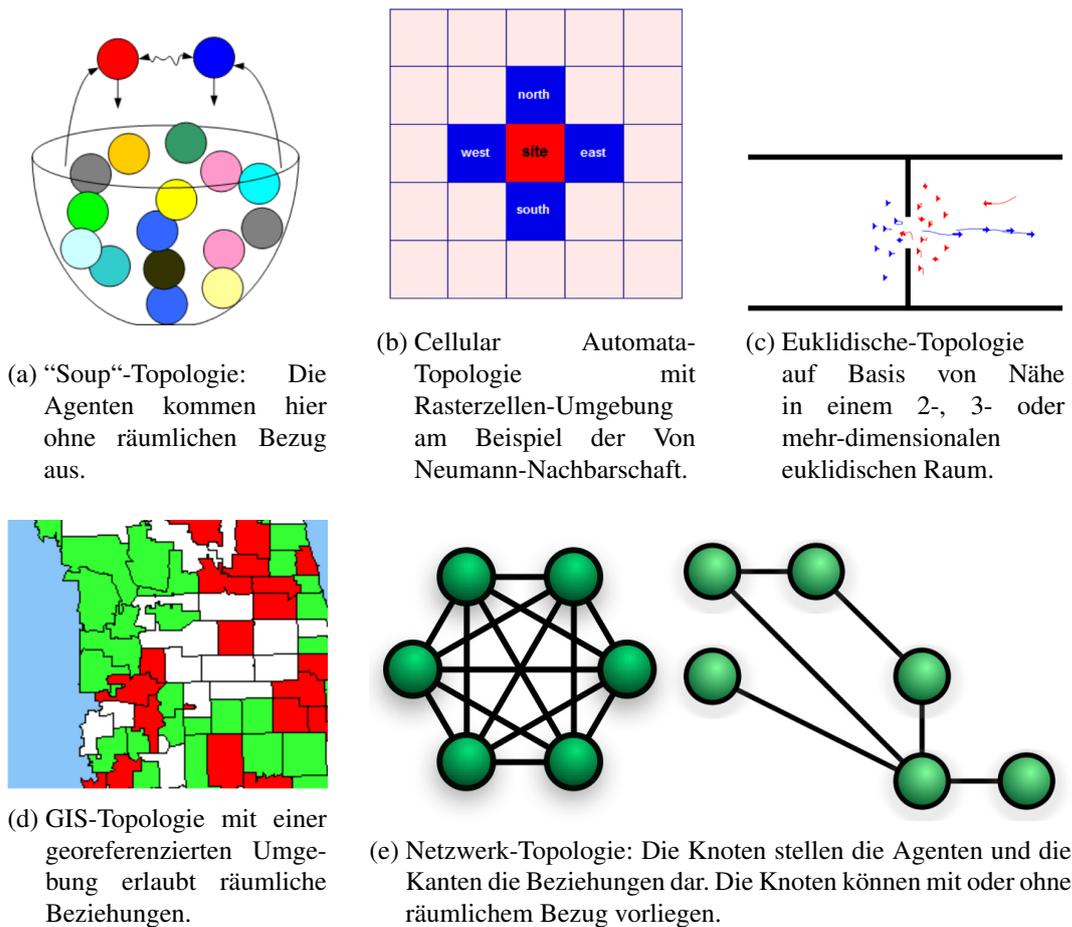


Abbildung 2.2: Grundlegende Formen der Umgebung und der Topologie im ABM (abgeändert aus Macal & North [56]).

2.2.3 Umwelt des Agenten

Crooks & Heppenstall [17] beschreiben die Umwelt oder Umgebung als Raum, der die Grundlage bildet damit ein Agent agieren oder mit anderen Agenten interagieren kann. Für Gilbert [26] ist die Umwelt eines Agenten die virtuelle Welt, in der er handelt. Sie kann dabei Formen von einem komplett neutralen Medium bis hin zu einem sehr detailreichen Modell annehmen. Johnston [43] beschreibt in seiner Arbeit warum der Raum eine wesentliche Rolle in Bezug auf ABM einnimmt:

- Bewegung im Raum ist oft mit einer oder mehreren Verhaltensregeln verbunden. Beispielhaft können Agenten in einem Zeitschritt gehen, laufen oder abwärts fließen;
- Agenten basieren ihre Entscheidungen im/auf Basis des Raumes. In vielen Fällen wird die Umgebung dazu verwendet, um die räumliche Position des Agenten und in weiterer Folge die relative Position im Bezug auf andere Agenten zu bestimmen und somit die Entscheidungsfindung zu beeinflussen. Außerdem kann die Umwelt auf Basis der Agentenposition direkt als

Informationsquelle dienen [54];

- Agenten können die räumliche Zusammenstellung von Objekten in der Umgebung verändern. Ein gutes Beispiel dafür ist der Ressourcenabbau;
- Die Entscheidungsfindung passt sich an die Veränderungen der Umwelt an;

Aus Abbildung 2.2 lassen sich die grundlegenden 5 Umgebungstypen entnehmen: Umwelt ohne räumlichen Bezug 2.2a, Raster-basierte Umwelt 2.2b, euklidischer Raum 2.2c, georeferenzierte Umwelt 2.2d, in Form von Vektor oder Rasterdaten und Netzwerken 2.2e mit oder ohne koordinativ definierten Knoten. Die verschiedenen Arten können natürlich auch beliebig kombiniert werden, jedoch dient nur eine davon zur Beschreibung der Topologie. Liegt der Umwelt eine Form von koordinativer Beschreibung zu Grunde (sei es grid-basiert, euklidisch, georeferenziert usw.), können auch Barrieren, Straßen oder andere physikalische Effekte in der Umwelt modelliert werden [26].

2.3 ENTWURF UND DESIGN IM ABM - DAS ODD-PROTOKOLL

ABM kann aus verschiedensten Typen von Agenten, räumlichen Einheiten, Attributen, Variablen, Verhaltensregeln und deren zeitlicher Ablauffolge und anderen umgebungsspezifischen Prozessen zusammengesetzt sein. Dadurch gestaltet sich die inhaltliche Wiedergabe und Weitergabe des Designs nicht leicht. Konsequenz daraus ist, dass viele auch ausführliche Beschreibungen in irgendeiner Form unvollständig sind.

Genau in dieser Problematik soll das ODD-Protokoll einhaken. Es wurde als standardisiertes Format zur Beschreibung von ABM von Grimm et. al. [32] im Jahr 2006 entwickelt und liegt seit 2010 in der heutigen Form vor. Dem Modellierer wird eine organisierte Methode zur Definition seines Modell geboten, und der Leser erhält eine strukturierte und vollständige Beschreibung. Die Hauptidee liegt in einer hierarchischen Aufschlüsselung der Inhalte, und Tabelle 2.2 zeigt den dreiteiligen Aufbau des ODD-Protokolls mit seinen sieben Unterpunkten. Zur graphischen Beschreibung werden UML-Klassendiagramme, Sequenzdiagramme usw. vorgeschlagen [32].

Der erste Teil gibt einen Überblick (**Overview**) über die grundsätzliche Modellstruktur. Jedes Modell verfolgt ein bestimmtes *Ziel*, welches aus einer klaren Fragestellung, Problemstellung oder durch eine Hypothese hervorgeht. Das ODD-Protokoll startet mit einem zusammenfassenden Überblick über die modellierte Thematik. Durch die Beschreibung von *Entitäten* werden die Akteure im Modell, also die handelnden, interagierenden oder fremd-beeinflussten Objekte, wiedergegeben. Diese Agenten besitzen Eigenschaften bzw. *Variablen*. Diese sollten als Low-Level Status Attribute, also jene die sich nicht aus anderen Attributen zusammensetzen lassen, und deren Einheiten beschrieben werden. Der *Maßstab* definiert die räumliche und zeitliche Granularität des Modells. Der *Prozessüberblick* beschreibt die grundlegenden Prozesse in Form von selbsterklärenden Schlagwörtern wie z.B. "bewegen", "kaufen", "ernten". Diese dienen dann als Überschriften in den Detailbeschreibungen. Die *Ablaufplanung* legt fest, welche Agenten und in welcher Reihenfolge sie einen bestimmten Prozess ausführen. Außerdem wird festgehalten wann Variablen aktualisiert werden.

Der zweite Teil umfasst eine generelle Checkliste zu Design-Entscheidungen im Bezug auf Agenten (**Design concepts**). Diese *Design-Konzepte* dienen nicht zwingend dazu das Modell wiederzugeben, sondern sollen die Intention des Modellierers, also das "Wie?" und "Warum?" bestimmter Design-Entscheidungen, fassbar machen. Sie sind anhand der folgenden zehn Punkte [33] definiert:

- *Emergenz*: Welche Ergebnisse des Modells sind vom adaptiven Verhalten der Agenten abhängig und wie stark? Sind die Ergebnisse regelbasiert und somit weitgehend vorhersehbar?

Tabelle 2.2: 7 Elemente des ODD-Protokolls (angelehnt an Grimm & Railsback [33])

ODD	ODD-Element	Frage
Overview	1. Zweck/Ziel	Was ist das grundsätzliche Ziel des Modells?
	2. Entitäten, Variablen, und Maßstab	Welche Entitäten / Objekte sind im Modell? Was sind die Attribute dieser Objekte? Welche räumliche und zeitliche Auflösung hat das Modell?
	3. Prozessüberblick und Ablaufplanung	Welche Objekte machen was und in welcher Ordnung? Wann werden Variablen aktualisiert? Wie wird Zeit modelliert - als Schritte/Steps, kontinuierlich, diskrete Ereignisse?
Design concepts	4. Design Konzepte	siehe Liste Design Konzepte
Detail	5. Initialisierung	Wie schaut der initiale Zustand aus?
	6. Input-Daten	Welche externen Daten verwendet das Modell und wie kann man den Verlauf des Modells verändern?
	7. Teilmodelle	Wie sehen die Teilmodelle aus, die im Prozessüberblick und Ablaufplanung definiert wurden? Was sind die Parameter der Teilmodelle, und gibt es Referenzwerte?

- *Adaptierung/Anpassung:* Welche Regeln kann ein Agent zur Anpassung des Verhaltens aufweisen? Sind diese durch eigene Aktionen und/oder durch Einflüsse der Umwelt induziert?
- *Ziele:* Ist das adaptive Verhalten zielgerichtet? Wie sehen die Ziele aus? Wie können sie quantifiziert werden?
- *Lernfähigkeit:* Verändert sich das Verhalten durch erlangte Erfahrungen und wie?
- *Prognose/Voraussage:* Muss ein Agent zur Entscheidungsfindung zukünftige Zustände vorhersagen? Welche Regeln sind dazu nötig?
- *Wahrnehmung/Abtastung:* Welche Informationen kann ein Agent aufnehmen, und wie beeinflusst man sein Verhalten?
- *Interaktion:* Welche Art von Interaktionen gibt es zwischen den Agenten? Sind diese direkt oder indirekt? Wie interagieren die Agenten mit ihrer Umwelt?
- *Stochastik/Zufälligkeit:* Welche Prozesse sind (teil)zufällig? Wie soll diese Zufälligkeit auf das System wirken?
- *Kollektive/Gemeinschaften:* Gibt es Aggregation in Form von Gruppenbildungen bei den Agenten? Wie beeinflussen sie die Emergenz?

- *Beobachtung*: Welche Daten und Muster im ABM müssen für das Verständnis und die Analyse beobachtet und/oder aufgezeichnet werden?

Sollten ein oder mehrere Konzepte im zu beschreibenden Modell nicht vorkommen, können diese ohne Weiteres weggelassen werden. Allerdings gibt es Konzepte, die beinahe in jedem ABM vorkommen: *Emergenz*, *Interaktion*, *Zufälligkeit* und *Wahrnehmung* [33].

Das letzte Teil des Overview, Design concepts, Details (ODD)-Protokolls behandelt die Beschreibung des Modells im **Detail**. So wird in der *Initialisierung* der Zustand des Modells zum Zeitpunkt $t = 0$ beschrieben. Die Variablen können zufällig oder immer gleich zugewiesen werden bzw. aus einer Datenbasis heraus definiert sein. Im Punkt *Input-Daten* folgt eine Beschreibung dieser externen Informationen. Die *Teilmodelle* werden durch die verwendeten Algorithmen im Detail erklärt. Eine genaue Beschreibung des ODD-Protokolls ist im Papier von Grimm et. al. [32] zu finden.

2.4 GEO-SIMULATION: ABM UND GIS

Traditionelle GIS stellen Werkzeuge zur Verfügung um raumbezogene Phänomene und Muster zu modellieren, analysieren und darzustellen [28]. Dieser Fokus auf die räumliche Komponente bringt Abstriche im Handling der Zeit mit sich, und somit beschränkt sich der Einsatz von Geografischen Informationen, GI-Ressourcen weitgehend auf die vorhergehende Datenaufbereitung und die abschließende Darstellung und Analyse der Muster und Ergebnisse [61]. Erst in den letzten zwei Jahrzehnten haben sich Grundlagen zur Darstellung und Speicherung raumzeitlicher Prozesse entwickelt [28, 43, 60, 61]. Vor allem die Öffnung der großen Hersteller gegenüber etablierten Industriestandards, den Wandel von proprietären Sprachen (z.B. *Esri ArcMacro*) hin zu Low-Level Programmiersprachen (z.B. Java, C# und C++) und APIs, hat diese Entwicklung vorangetrieben [16]. GI-Daten stehen heute beinahe zu jeder Fragestellung zur Verfügung. Trotzdem bleibt das Problem, dass diese Datenbasis oft nicht kontinuierlich über einen gewünschten Zeitraum vorliegt und somit die Abbildung von dynamischen Prozessen erschwert wird. ABM kann genau hier einhaken und hat die Möglichkeit solche dynamischen Prozesse zu modellieren [16, 43, 19]. Geosimulation ist ein gebräuchlicher Begriff zur Beschreibung von Anwendungen, die raumzeitliche Problemstellungen auf Micro-Level simulieren. Typischerweise haben solche Untersuchungen genau definierte räumliche Ausdehnungen in einem dynamischen Kontext. Die Dynamik bildet sich hier durch die nicht ortsgebundenen Agenten ab [19].

ABM wird zur Modellierung des Systemverhaltens verwendet. GIS bringt die Infrastruktur mit sich zur Speicherung, Manipulation, Anzeige und Analyse von räumlichen Datenstrukturen [16]. In diesem Sinne können sich diese Forschungsgebiete komplementieren, und es finden sich auch die Hauptkomponenten im ABM in einem GI-Kontext wieder. Die Umwelt liegt idealerweise in Form einer räumlichen Datenschicht vor. Die räumlichen Aktionen, wie wo befindet sich ein Agent und wie sind seine Eigenschaften, können als dynamisch veränderbare Datenschicht eingefügt werden. Für Regeln und individuelle Verhaltensweisen der Agenten liegt in der GI kein explizites Werkzeug vor. Trotzdem können diese in dynamisch aktualisierten Datenbanken erfasst werden [60]. Der letzte Punkt ist eine "Simulationsmaschine", die das System antreibt bzw. die den Ablauf der definierten Zeitschritte regelt. Diese wird entweder durch die in Geografische Information (GI)-Systemen gängige (*Meta*)-*Befehlssprache* umgesetzt [61] oder ist direkt ABM-Plattform-seitig verankert [79, 63]. Aus diesem Grund ist ABM heutzutage eine gängige Methode um dynamische Prozesse im Zusammenhang mit GIS darzustellen. O'Sullivan et. al. [76] beschreiben in ihrer Arbeit beispielhaft verschiedene Agententypen, die im Zusammenhang mit GI-Fragestellungen eingesetzt werden. Abbildung 2.3 zeigt eine schematische Darstellung dieser räumlichen Problemstellungen. Die verschie-

denen Agenten sind in den folgenden Absätzen noch genauer beschrieben.

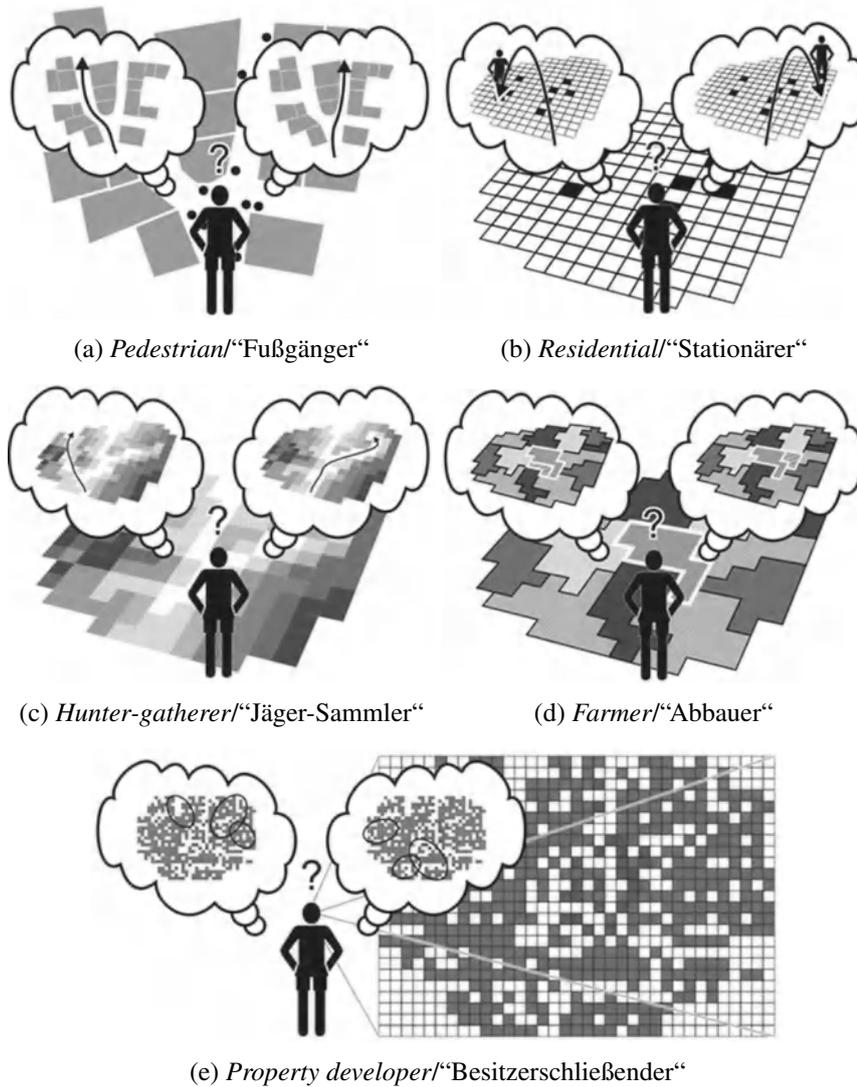


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung gängiger ABM-Problemstellungen in einem GI-Kontext und darin verwickelten Agententypen. (Quelle: O'Sullivan et. al. [76])

Pedestrian/"Fußgänger"-Agent (Abbildung 2.3a): Dieser Fußgänger oder auf anderen mobilen Objekten basierende Agent interagiert in einem Straßennetz oder Gebäudegrundriss. Der Agent muss hier die Entscheidung treffen, wie seine nächsten Schritte aussehen um eine geplante Destination zu erreichen. Die Entscheidungen in solchen Modellen werden von seiner lokalen Umwelt z.B. den Begrenzungen durch Mauern sowie auf Basis der Position der anderen Agenten beeinflusst. Beispiele dafür sind Fußgänger-, Evakuierungs-, Verkehrs- und Stausimulationen.

Residential/"Stationärer"-Agent (Abbildung 2.3b): Auch hier ist der Agent primär damit beschäftigt von einem Ort zum nächsten zu kommen. Die Position wird aber hier nicht kontinuierlich wie

zuvor sondern sprunghaft verändert. Der Agent evaluiert von seiner aktuellen Position aus die günstigste Variante der zur Verfügung stehenden Destinationen und springt dann dort hin. Auch hier kann die Position von anderen Agenten Einfluss auf die Entscheidung nehmen, die Beschaffenheit der Umwelt allerdings nicht.

Hunter-gatherer/“Jäger-Sammler“-Agent (Abbildung 2.3c): Diese Agenten, wie der Name schon sagt, Jäger und Sammler, befassen sich mit der Erschließung von Ressourcen. Diese Variante kombiniert die Entscheidungsmuster der 2 vorhergehenden Beispiele, da hier die möglichen Destinationen evaluiert werden und dann im weiteren Verlauf auf Basis der Umwelt, also den zu Verfügung stehenden Ressourcen, entschieden wird, ob weitergezogen wird oder nicht. Im Gegensatz zu den 2 vorhergehenden Beispielen haben die Aktionen des Agenten direkten Einfluss auf die Umgebung.

Farmer/“Abbauer“-Agent (Abbildung 2.3d): Wie der vorige Typ verändert auch dieser seine Umwelt. Der Agent greift in diesem Fall aber von Außen in einer Form von Management-Prozess auf die räumlichen Objekte zu. Er verändert die Beziehungen (z.B. kaufen und verkaufen oder sähen und ernten) zu diesen Objekten, um daraus einen Vorteil z.B. zur besseren Ressourcengewinnung zu erzielen.

Property developer/“Besitz-erschließender“-Agent (Abbildung 2.3e): Ähnlich wie der *farmer*-Agent greift auch dieser Typ von außen stehend auf räumlichen Objekte zu. Der Funktionsumfang des *property developer*-Agent ist allerdings höher entwickelt und ist auch in der Lage komplexere räumliche Konfigurationen, wie z.B. Zusammenhänge von verschiedenen Landnutzungsklassen, auszuwerten. Diese Form von Agenten werden in ABM zur Simulation des Wachstums und der Entwicklung von Städten eingesetzt.

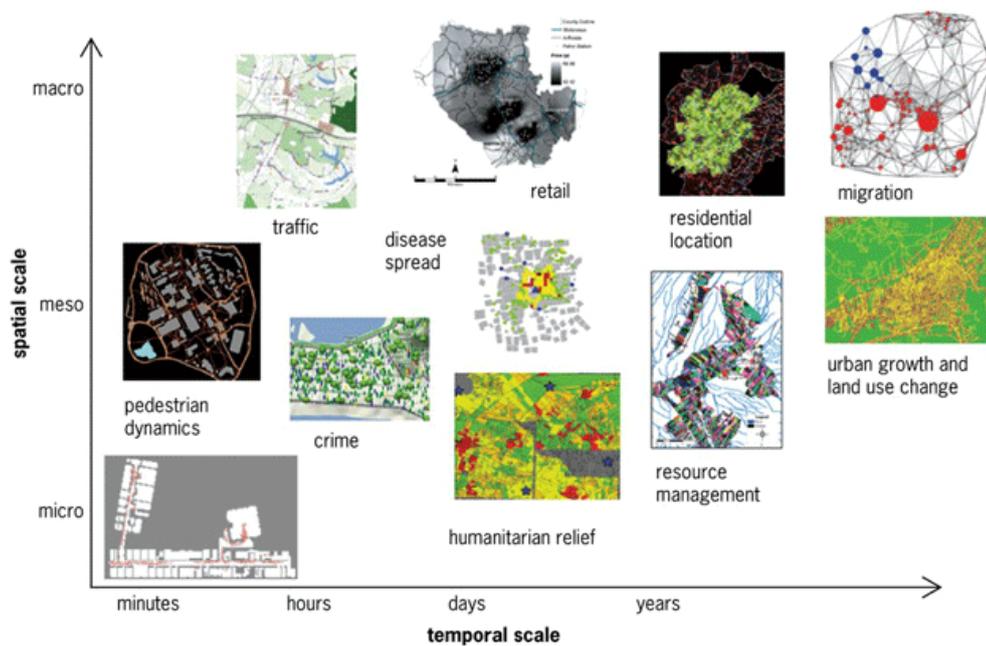


Abbildung 2.4: Beispielanwendungen von ABM im GI-Kontext bezogen auf den räumlichen und zeitlichen Maßstab. Von einer Mikro-Umgebung im Bereich des Fußgänger-Verhaltens bis hin zu Langzeit-Simulationen in Form von Migrationsanalysen. (Quelle: Heppenstall & Crooks [38])

Diese Einteilung ist allerdings nicht als strikt anzusehen, da sie nur eine allgemeine Übersicht von repräsentativen Problemstellungen gibt. Das weite Spektrum an Einsatzgebieten von ABM in einem geografischen Kontext ist anhand von Beispielen in Abbildung 2.4 dargestellt. Es reicht dabei von kleinräumigen Phänomenen wie der Dynamik von Fußgängern (z.B. in Gebäuden → Evakuierungssimulationen) bis hin zu großräumigen Simulationen des Verkehrs oder Städtewachstums. Im Bezug auf den zeitlichen Maßstab können die Modelle und Simulationen von Minuten bis hin zu Stunden (Kriminalität) oder gar Jahren (Ressourcen-Management) ausgelegt sein. Interessant ist auch, dass die oben beschriebenen beispielhaften Agententypen wiedererkennbar sind. Im Bereich der Fußgänger-, Verkehrs- und Krankheits-Verbreitungssimulation findet sich das Prinzip des *pedestrian*-Agent wieder. Kriminalitätssimulationen lassen auf den *hunter-gatherer*-Agenten schließen und das Ressourcen-Management ist mit dem *farmer*-Agenten in Verbindung zu bringen. Die großräumigen Langzeitphänomene wie Migration und urbanes Wachstum bedienen sich des *property developer*-Typs.

2.5 ABM-TOOLKITS

Zu diesem Zeitpunkt existieren über 100 Toolkits im Zusammenhang mit ABM [92]. Nikolai & Madey [69] geben in ihrer Arbeit einen Überblick über die vorhandenen Toolkits und strukturieren sie nach verschiedenen Gesichtspunkten. Multi-Plattform-Unterstützung (Microsoft Windows, Mac OSX und Linux), ist weitverbreitet und ein Großteil verwendet zur Umsetzung der Modelle die Programmiersprachen Java und C++. Der Rest setzt proprietäre Logo-Dialekte sowie visuelle Programmiersprachen, die z.B. Unified Modeling Language (UML)-Diagrammen nachempfunden sind, ein. Kurz gesagt, ein gewisses Maß an Programmiererfahrung wird vorausgesetzt.

Im Zusammenhang mit Programmiersprachen wird stark auf OOP gesetzt. Somit kann auch das benötigte Maß an Modularität zur Implementierung einer solchen Computer-Simulation garantiert werden [16, 69]. Bei der Lizenzierung gibt es freie Tools bis hin zu kommerziell vertriebenen Lösungen. Auch der Einsatzzweck kann von Multifunktionswerkzeugen bis hin zu maßgeschneiderten Applikationen reichen [69]. Die nennenswertesten Vertreter sind: Repast, Swarm, AnyLogic und MASON [16, 69]. Diese werden in den nachfolgenden Abschnitten (2.5.1–2.5.5) noch genauer beschrieben und in Tabelle 2.3 anhand verschiedener Eigenschaften verglichen. Wichtigstes Merkmal im Zusammenhang mit dieser Arbeit ist: alle Plattformen bieten Möglichkeiten zur Integration räumlicher Daten.

2.5.1 Repast

Repast (Recursive Porous Agent Simulation Toolkit) (Tabelle 2.3) wurde ursprünglich von der *University of Chicago* zur Modellierung von sozialwissenschaftlichem Verhalten entwickelt. Heute arbeitet das *Argonne National Laboratory* an der Weiterentwicklung, und die *Repast Organisation for Architecture and Development (ROAD)* hat die organisatorische Leitung inne [71]. Repast hat sich mittlerweile zu einem Multifunktionswerkzeug mit vielen Einsatzbereichen in der ABM gewandelt [43].

Die Repast Suite setzt sich aus Repast Symphony und Repast High Performance Computing (HPC) zusammen und ist eine fortschrittliche, freie und open source ABM-Plattform, die seit über 15 Jahren immer weiterentwickelt wird [79].

Repast Symphony, welches zur Zeit in der Version 2.4.0 zur Verfügung steht, ist eine straff integrierte und interaktive Cross-Plattform Lösung, die hauptsächlich in Java umgesetzt wird. Die Um-

setzung kann hier außerdem noch durch ReLogo,⁵ grafische *Point-and-Click* Zustandsdiagramme und Groovy⁶ erfolgen. Auch ein Verschachtlung bzw. Durchmischung der Sprachen ist möglich. Repast Simphony richtet sich an eher kleinere Modellierungen welche sich im Workstation-Bereich ansiedeln [79].

Reapst HPC, in der aktuellen Version 2.2.0, basiert auf den grundlegenden Prinzipien und Konzepten von Repast Simphony, wobei hier C++ als Programmiersprache zum Einsatz kommt. Außerdem ist es dazu ausgelegt großmaßstäbige Modelle umzusetzen und diese parallelisiert in großen Rechenverbänden wie Clustern oder Supercomputern lauffähig zu machen [79].

Beide Toolkits bieten Bibliotheken für Implementierung, Ablauf, Darstellung und Datenentnahme. Wichtige Features bilden die integrierten Programmierbibliotheken für evolutionäre Algorithmen und künstliche neuronale Netzwerke, die Teilbereiche der künstlichen Intelligenz darstellen und somit die Modellierung von adaptivem Verhalten vereinfachen [71]. Durch ein “point-and-click“ GUI können Anzeigen des Simulationsverlaufes (in 2D oder 3D) und verschiedene Diagramme wie z.B. Histogramme und sequenzielle Graphen erstellt werden. Außerdem können damit Output-Daten, direkte Abfragen bei Agenten und “Snapshots“ der laufenden Simulation generiert werden. Des Weiteren kann der Benutzer während der Laufzeit auf die Agenten zugreifen bzw. in die Simulation eingreifen. Durch Interfaces zu anderen Programmen wie z.B. R⁷ für Statistik können die Daten der Simulation jederzeit über Drittsoftware weiterverarbeitet werden [16, 14].

Die Umsetzung von Repast-Modellen kann auf verschiedene Art und Weise erfolgen: mit Hilfe der Relogo-Programmiersprache [77], über eine grafische Oberfläche in Form von Zustandsübergangsdigrammen oder in Form von Java oder C++-Code [79]. Repast kann durch GeoTools-Bibliotheken auf integrierte GIS-Funktionalitäten zurückgreifen. Es ist somit möglich die gängigen Standard-Vektor- und Rasterdatenformate (z.B. *Esri Shapefile*, *Esri Grid*) einzubinden und Ergebnisse in diesen Formaten zu exportieren [71]. Über externe Bibliotheken wie z.B. *GeoTools* oder *OpenMap* ist die Integration von räumlichen Abfragen, Beziehungen sowie auch die Einbindung von anderen Formaten wie z.B. *GeoTIFF*, *PostGIS*, *WFS* möglich. Auch die frei zur Verfügung stehende *Esri ArcGIS* Extension *AgentAnalyst* verwendet Repast als Unterbau. Der Agent Analyst bringt ABM-Funktionalitäten in den Desktop-GI-Bereich [43].

2.5.2 MASON

MASON (Multi Agent Simulation of Neighbourhood) (Tabelle 2.3) ist eine freie Open Source Simulations- und Virtualisierungs-Bibliothek, die in Java umgesetzt ist. MASON wurde vom Center for Social Complexity an der George Mason University entwickelt mit dem Hintergrund ein einfach zu erlernendes Multifunktionswerkzeug für ABM zu erschaffen [63, 84, 53]. Vom Funktionsumfang ist die aktuell verfügbare Version *MASON 19* ungefähr mit Repast vergleichbar [16]. GI-Daten in Form von *Esri shapefiles* können mit Extension *GeoMASON* integriert werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, wie bei Repast, externe Bibliotheken wie z.B. *GeoTools* zu integrieren [84].

2.5.3 Swarm

Swarm (Tabelle 2.3) ist eine von der *Swarm Development Group* entwickelte Open Source Plattform zur Implementierung von ABM [85]. Es ist eines der ersten ABM-Toolkits und wurde Mitte

⁵ABM-spezifische Programmiersprache und Logo Dialekt.

⁶Objektorientierte Programmiersprache mit ähnlichem Featureumfang wie beispielsweise Python.

⁷R ist eine freie Programmiersprache für statistische Berechnungen und Grafiken.

der 90er veröffentlicht [64]. Ursprünglich wurde Swarm zur Simulation von biologischen Phänomenen entworfen, wobei es sich zu einem Universalwerkzeug [69] im ABM entwickelt hat, dessen Einsatzbereiche sich von anthropologischen, ökologischen, wirtschaftlichen bis hin zu geografischen Fragestellungen ausgeweitet haben [85, 64].

Die aktuell zur Verfügung stehende Version *Swarm 2.2* setzt sich aus einem konzeptionellen Framework zusammen, welches zum Entwerfen, Beschreiben, Ausführen und Darstellen von Experimenten im Bereich der ABM ausgelegt ist. Diese Framework basiert auf OOP-Bibliotheken, die in Objective-C und Java zur Verfügung stehen. Die elementare Einheit, der Agent, wird in diesem Framework als *swarm* bezeichnet [85]. Swarm bietet außerdem eine Softwarepaket an in dem dieses Framework umgesetzt wird und somit viele nützliche Tools direkt bereitstellt [85]. Im Bezug auf geografische Fragestellungen bietet Swarm die von der Utah State University entwickelte Extension *KengeGIS* an. Diese ermöglicht die Integration von Rasterdaten im *Esri grid*-Format [9].

2.5.4 NetLogo

NetLogo (Tabelle 2.3) ist eine eigenständige Multi-Agenten-Programmiersprache mit integrierter Modellierungsumgebung zur Simulation der zeitlichen Veränderung von natürlichen und soziologischen Phänomenen [86]. NetLogo wird am Northwestern University's Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling entwickelt und steht als Freeware frei zur Verfügung. Aktuell liegt NetLogo in der Version *5.3.1* vor, und neben der Desktopversion gibt es auch eine Web-Variante mit teilweise eingeschränkter Funktionalität [67].

NetLogo lehnt sich an Logo an und nutzt eine einfache mit moderaten Programmierkenntnissen erlernbare Modell-Beschreibungssprache. Aus diesem Grund wird NetLogo sowohl in der Lehre als auch zu Forschungszwecken eingesetzt und kann auf eine ausgedehnte Bibliothek an Beispielmotellen zurückgreifen [67]. Die Agenten werden in NetLogo als *turtles* bezeichnet und die Rasterzellen als *patches* [86]. Die verfügbare GIS-Erweiterung erlaubt es die Datenformate *Esri shape* für Vektor- und *Esri grid* für Rasterdaten in NetLogo zu integrieren [67].

2.5.5 AnyLogic

AnyLogic[®] (Tabelle 2.3) ist ein von der russischen Firma *AnyLogic Company* vertriebenes, kommerzielles, plattformübergreifendes Softwarepaket, welches agentenbasierte, ereignisorientierte und System-dynamische Simulationsmethoden bereitstellt [2].

Die aktuelle Version *7.3* wird im ABM-Bereich besonders in der Lieferketten-, Logistik- und Transportsimulation eingesetzt [2]. Die Erstellung von Modellen in AnyLogic[®] erfolgt mittels einer proprietären grafischen Programmiersprache, die auf Zustandsdiagrammen basiert. Diese kann mit Java-Code noch erweitert werden. Die Kompatibilität zu Java ermöglicht es externe Bibliotheken einzubeziehen und die Erstellung von Applets, die in jedem Browser lauffähig sind [2]. AnyLogic[®] erlaubt es GI-Daten im *Esri shape*-Format zu integrieren. Außerdem ist die Software in der Lage auch auf Online-GIS-Ressourcen wie z.B. Open-Street Map zuzugreifen. Neben den Karten und Diagrammdarstellungen besteht auch die Möglichkeit interaktive 2D- und 3D-Animationen durch CAD-Daten z.B. im *DXF*⁸-Format zu erstellen [2].

⁸DXF -Drawing Exchange Format: interoperables Datenformat eingeführt für Autodesk AutoCAD

Tabelle 2.3: Fünf ABM-Toolkits im Vergleich (Angelehnt an: Crooks & Castle [16] und De Smith, Goodchild & Longley [19]).

Open-Source		Free-/Shareware		Proprietär	
Name	reapst	MASON	Swarm	NetLogo	AnyLogic®
Webseite	https://reapst.github.io/	http://cs.gmu.edu/~ec1ab/projects/mason/	http://www.swarm.org/	https://ccl.northwestern.edu/netlogo/	http://www.anylogic.com/
Entwickler	University of Chicago, Department of Social Science Research Computing, USA	Laboratory and Center for Social Complexity, George Mason University, USA	Swarm Group, USA	Centre for Connected Learning and Computer-Based Modelling, Northwestern University, USA	AnyLogic Company (früher XJ Technologies), Russia
Erstveröffentlichung	2000	2003	1996	1999	2000
aktuelle Version	Repast Simphony 2.4.0, Repast HPC 2.2.0	MASON 19	Swarm 2.2	Netlogo 5.3.1	AnyLogic 7.3
Lizenz	New BSD-Licence	AFL 3.0-Licence	GNU GPL	GNU GPL	proprietäre Lizenz
Implementierungssprache	JAVA (Repast Simphony), C++ (Repast HPC), Python	Java	Objective-C, JAVA	proprietäres Scripting	proprietäre graphische Sprache und Scripting, Java
GIS-Funktionen	integrierter GIS-Support (Vektor- & Rasterdaten) & Geotools; Agent/Analyst (ArcGIS-Extension)	GeoMason-Extension & Drittanbieter: GeoTools	Kenge-GIS (Rasterdaten)	NetLogo-Gis Extension (Vektor- & Rasterdaten)	integrierter Support von shapefiles, online Ressourcen z.B. Open Street Map
Diagramme/Graphen/Statistik	Ja (integriert & externe Java-Bibliotheken)	Ja	Ja (R- und S-Plus Statistik Pakete)	Ja	Ja (integriert, externe Java-Bibliotheken)
Manual, Tutorials & Forum/Mailing List	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
API	Ja (API-Dokumentation online und PDF)		Ja (online)	Ja (online)	
Publikationen	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

STAND DER FORSCHUNG

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über aktuelle wissenschaftliche Arbeiten, die im Themenbereich ABM und GIS zur Modellierung von forstwirtschaftliche Wertschöpfungsketten angesiedelt sind. In Abschnitt 3.1 werden agentenbasierte Simulationen aus dem Bereich der Forstwirtschaft vorgestellt. Abschnitt 3.2 beschreibt GIS-basierte wissenschaftliche Arbeiten im Bezug auf den Transport von Hackschnitzeln sowie weitere relevante Publikationen aus dem Bereich der Holzproduktion.

3.1 FORSTWIRTSCHAFT UND ABM

Der Artikel von Frayret [25] gibt einen grundlegenden Überblick über die Einsatzbereiche von ABM in der Forstwirtschaft. Diese reichen von der Modellierung von forstwirtschaftlichen Ökosystemen (Einfluss und Verbreitungsverlauf und -mustern von Schädlingen), territorialen Landnutzungsplanung, Waldbrand-Management und Risiko-Minimierung, Waldarbeit- und Holzbeschaffungsplanung, Holzproduktmarketing, bis hin zur Koordinierung der Holzverarbeitungskette. ABM dient dabei als Simulationsgrundlage und Entscheidungshilfe. Der Inhalt dieser Diplomarbeit kann der Sparte Nachbildung einer Holzverarbeitungskette zugeordnet werden, im Speziellen der von Hackschnitzeln, also dem Weg vom Wald in das Heizwerk im Bezug auf Nachfrage und Angebot.

Dieser Themenbereich ist auch in der Arbeit von Kostadinov et. al. [49] angesiedelt. Hier wird ein beispielhaftes agentenbasiertes Modell des schweizerischen Waldenergieholzmarktes für den Kanton Aargau implementiert. Ziel der Arbeit ist es, die relevanten Faktoren für die Marktverfügbarkeit von Waldenergieholz besser verstehen zu können. Die Änderungen werden in jährlichen Abständen beobachtet. Erwähnenswert ist auch, dass die Beschreibung des Modells dem in Kapitel 2.3 abgehandelten ODD-Format entspricht.

Das Model fokussiert sich auf die Zusammenhänge zwischen der Bereitstellung und Beschaffung von Holz zur Hackschnitzel-Produktion und dem Bedarf der Heizwerke. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf das Entscheidungsverhalten von Förstern und privaten Waldeigentümern gerichtet. Bei der Entscheidungsfindung der Waldeigentümer werden dabei folgenden drei Kriterien berücksichtigt: Profitmaximierung, Freundschaftsbeziehungen und geografische Nähe/Regionalität. Abbildung 3.1 zeigt hier das Zusammenspiel der umgesetzten Agentenklassen, Holzproduzenten, Mittelsmännern (Holzhändler usw.) und Konsumenten für die agentenbasierte Modellierung. Ein interessanter Ansatz ist auch die Berücksichtigung von zwei ineinander verschachtelten Märkten und somit das enge Zusammenspiel im Bezug auf den Rundholz- und Energieholzmarkt.

Eine ähnliche Arbeit, ebenfalls in der Schweiz angesiedelt, ist jene von Binder et. al. [6]. Sie zeigt einen ABM-Ansatz zur Beschreibung des lokalen Materialflusses von Holz im Kanton Appenzell Ausserhorden. Mit Hilfe einer *material flow*-Analyse soll der Weg vom Wald über die Holzverarbeitung bis zum Konsumenten nachgebildet und analysiert werden. Aus dem Modell können Optimierungsvorschläge zu einer besseren wirtschaftlichen Nutzung des Rohstoffes Holz entnommen werden. Die Grundlage der Arbeit besteht in der Beobachtung der Beziehungen zwischen den modellierten Agenten (siehe Abbildung), also den Akteuren (Wald, Sägeindustrie, Holzverarbeitungs-

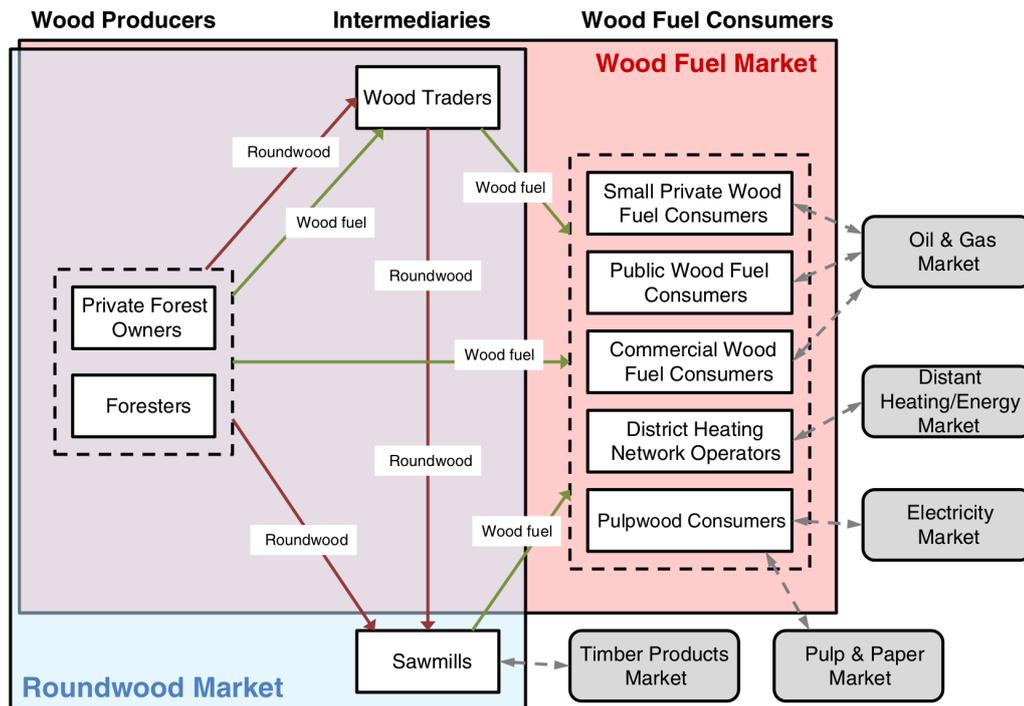


Abbildung 3.1: Überblick über die Teilnehmer im Modell von Kostadinov et. al. [49]). Der Rundholz- (in Blau) und Energieholzmarkt (in Rot) setzt sich aus den in Weiß dargestellten Agentenklassen zusammen. Diese werden von externen Märkten (graue Kästchen) beeinflusst. Die braunen Pfeile weisen auf Ströme von Rundholz und die grünen auf jene von Energieholz hin.

industrie, Energieproduktion und Haushalte), in der Holzwertschöpfungskette.

Auch das Publikation von Scholz et. al. [81] ist in diesem Themenbereich anzusiedeln. Sie befasst sich mit der Modellierung, Simulation und Analyse der raumzeitlichen Zusammenhänge von Angebot und Nachfrage von Hackschnitzeln im österreichischen Bundesland Kärnten. Das System soll die Marktsituation für einige Jahrzehnte darstellen und die Verfügbarkeit von Holz zur Hackschnitzel-Produktion in einer feinen räumlichen (300x300m Waldraster) und zeitlichen (jährlich) Auflösung modellieren. Umgesetzt wird das Modell mit ABM gekoppelt mit GIS-Daten unter Verwendung der für ArcGIS frei verfügbaren Extension AgentAnalyst. Zur Umsetzung kommt die Programmiersprache Python zum Einsatz.

Abbildung 3.2 zeigt den grundlegenden Ablauf des Modells. Schritt 1 ist ein einfaches Wachstumsmodell zur Aktualisierung des Holzvorrates im Walddatensatz. Im Schritt 2 werden basierend auf Forstparametern für jede Waldrasterzelle Entscheidungen über die jährliche Verfügbarkeit von Holz getroffen. Schritt 3 ist der Erntevorgang, dabei stellt jedes Heizwerk einen Agenten dar, der ausgehend vom Werksstandort den Waldraster spiralförmig in einem *first-come first-serve*-Prozess abarbeitet. Ziel ist es eine definierte Menge an Holz, also den Bedarf des Heizwerkes, mit minimalen Transportkosten zu decken. Die Distanz zu einem Heizwerk wird über einen Kostenraster umgesetzt. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt in Schritt 4. Die maximale Erntedistanz, der Verlauf des Holzvorrates im Wald und das Alter des Waldes werden in Form von Diagrammen ausgegeben. Die

räumliche Verteilung des verfügbaren Holzes wird in Form einer Rasterkarte umgesetzt. Für die Simulation werden die 4 Schritte iterativ in jährlichen Abständen wiederholt.

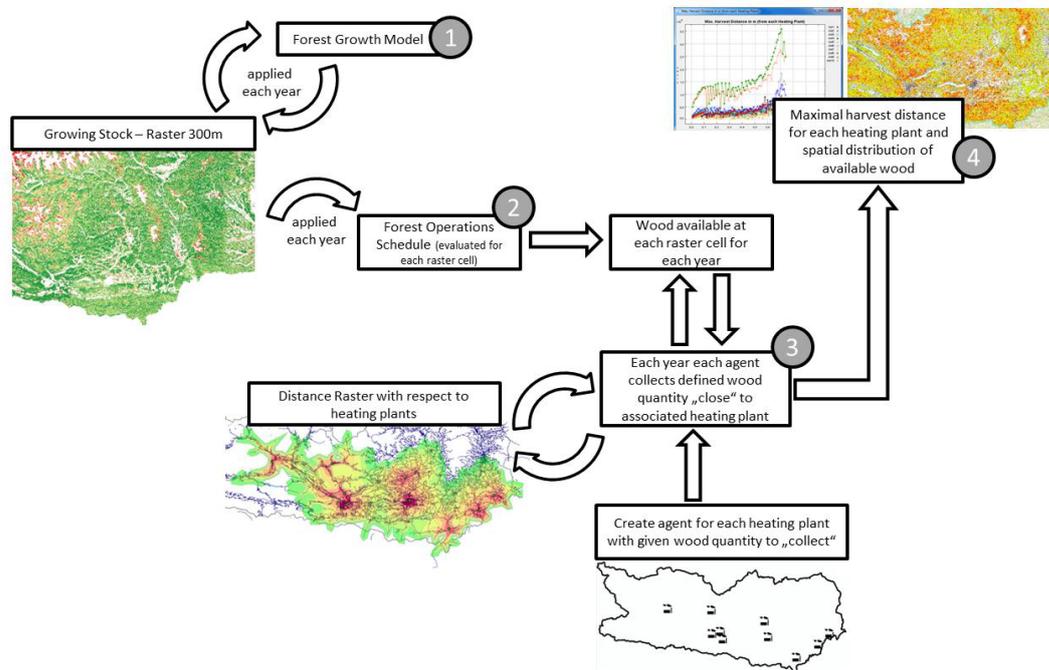


Abbildung 3.2: Jährliche Simulationsschritte zur Analyse raumzeitlicher Zusammenhänge von Angebot und Nachfrage von Hackschnitzeln nach Scholz et. al. [81].

Die Integration von *Advanced Planning and Scheduling* mit Hilfe von ABM ist Inhalt der Arbeit von Lemieux et. al. [50]. Die Simulation soll eine Evaluierung der Kapazitäten der Holzversorgungskette im Bezug auf verschiedene Planungsstrategien bereitstellen. Dazu werden hier verschiedene Marktszenarien im Bezug auf die Versorgungskette von Holz betrachtet. Die Agenten sollen durchschnittliche kanadische Holzunternehmen darstellen, und durch den Einsatz von verschiedenen Kundentypen soll die Simulation als Entscheidungshilfe im Bezug auf Planungsaufgaben herangezogen werden können.

Simon & Etienne [83] zeigen einen Ansatz, der in enger Zusammenarbeit (*companion modelling*) mit den lokalen Landwirten und einer Zivilgesellschaft in der zentral-französischen Region Terres du Larzac durchgeführt wurde. Ziel ist es, das lokale Forstmanagement zur Unterstützung und für Verbesserungsvorschläge in Form von 2 Szenarien herauszuarbeiten. Auch hier ist ein agentenbasierter Ansatz in Form einer Cellular Automata (CA)-Rastersimulation im Einsatz. Inhaltlich geht dieses Projekt aber eher in Richtung Landnutzungsplanung.

Das Modell von Bone & Dragičević [8] befasst sich mit der Frage, in wieweit modernes Forstmanagement zu Veränderungen in der Landbedeckung führt. Im Speziellen geht es darum, wie sich die hier modellierten Agenten im Zusammenhang mit Holzpreisen und Erntekosten verhalten. Beobachtet wird dabei der Prozess der Holzernte in einem Holzlizenz-basierten System wie es z.B. in Kanada und den USA angewendet wird. Die Holzerntebetriebe erhalten von staatlicher Stelle in einem bestimmten Gebiet eine Erntelizenz. Die in dieser Arbeit abgebildete Modellierung basiert auf gewinnorientierten Agenten in Form der Erntebetriebe. Dazu wird das Ernteverhalten

im Untersuchungsgebiet durch ökonomische Gesichtspunkte wie z.B. Holzpreis, legislativ genehmigtes Ernteaussmaß, Erntekosten, sowie die Zugänglichkeit des Holzes untersucht. Das Untersuchungsgebiet wird in Teilgebiete unterteilt, in denen je ein Erntebetrieb agiert und im Zuge eines Kostenminimierungs-Problems Holz erntet. ABM ist hier für das Systemverhalten in Form der Ernteregeln verantwortlich und simuliert die raumzeitlichen Veränderungen, die sich durch das Ernteverhalten der Agenten für die forstlichen Landschaften ergeben. GIS stellt die Grundlage zur Integration der vorhandenen Infrastruktur und Umgebung wie z.B. des Geländes, der Wege usw. Außerdem wird ein einfaches Waldwachstumsmodell angewendet. Das Verhalten der Agenten wird im Zuge von 4 Preisszenarien (hohe, niedrige, zufällige und zynische Preisentwicklung) über einen Zeitraum von 25 Jahren simuliert. Beobachtet wird das Erntevolumen und die raumzeitliche Entwicklung der Erntevorgänge und des Holzvorrats. Output sind dabei Kartenreihen (siehe Abbildung 3.3) im Zusammenhang mit den beobachteten Preis- und Erntekostenszenarien. .

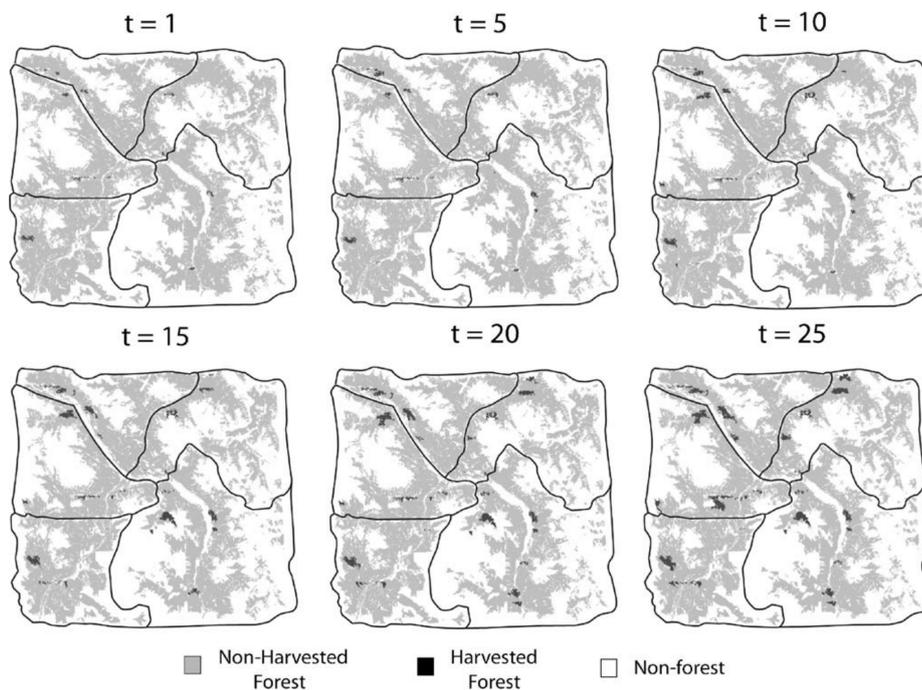


Abbildung 3.3: Zeitreihe, die das Ernteverhalten der Betriebe in den zugewiesenen Gebieten über einen Zeitraum von 25 Jahren darstellt. Anhand der dunklen Bereiche kann der raumzeitliche Verlauf der Erntevorgänge beobachtet werden. (Quelle: Bone & Dragičević [8])

3.2 HACKSCHNITZEL UND GIS

Die Arbeit von Müller [66] analysiert die Einzugsgebiete von 10 Biomassekraftwerken in Kärnten auf Basis von Transportkosten-optimierter Analyse über ein gewichtetes Straßennetz und Geländeinformation. Zum Einsatz kommen hier Kostenraster-Analyse sowie "Zonal Statistics". Abbildung 3.4 zeigt die Ergebnisse dieser Analyse in Form von verschiedenfarbigen Erntezonen für die jeweiligen

Heizwerke. Aus den berechneten Einzugsgebieten lässt sich durch Einbeziehung von Holzvorratsdaten in weiterer Folge ableiten, ob das zur Verfügung stehenden Holz für die Deckung des jährlichen Bedarfs der betrachteten Heizwerke überhaupt ausreicht.

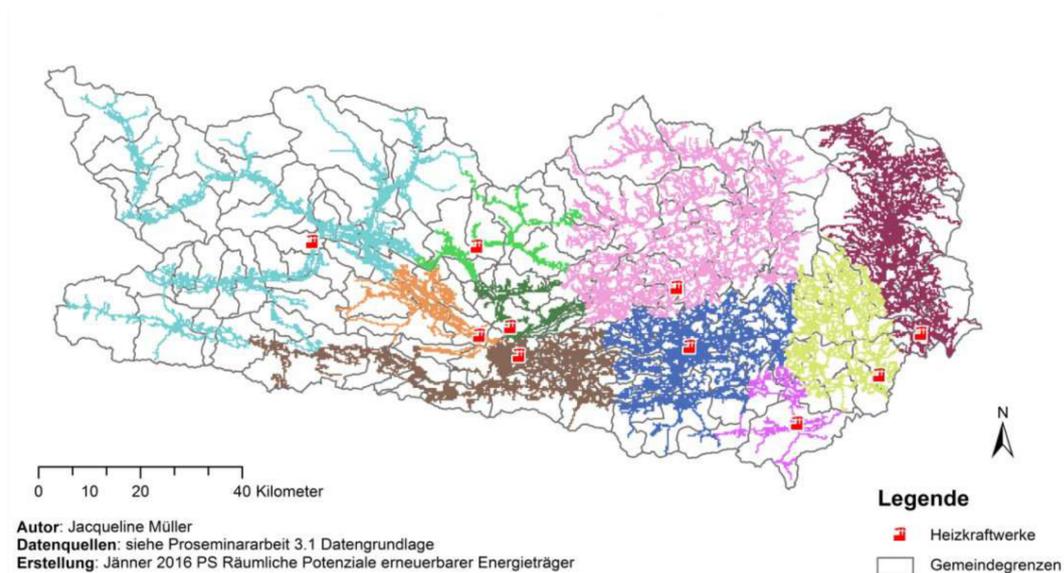


Abbildung 3.4: Holzerntezone basierend auf “Zonal Statistics“ der Heizwerke in Kärnten in Abhängigkeit zu den Transportkosten (Quelle: Müller [66])

Möller & Nielsen [65] befassten sich in ihrer Studie mit den Transportkosten von Hackschnitzeln vom Wald zu den Heizwerken für 4 repräsentative Biomasseheizwerke in Dänemark. Ein ähnlicher Ansatz ist auch im Aufsatz von Graham et. al. [29] für den US-Bundesstaat Tennessee beschrieben. Die Ergebnisse sollen zur Minimierung der Transportkosten beitragen und somit regional verfügbare Rohstoffe optimal zu nutzen.

Möller & Nielsen [65] führen zur Berechnung des kumulativen Transportaufwands vom Wald zu den Heizwerken eine kostenbasierte Distanz Analyse in ArcGIS durch. Basis bilden dabei Land-Cover Rasterdaten und ein Straßennetzwerk. Aus den erstellten Karten lassen sich Zusammenhänge zwischen Bedarf und Transportkosten ableiten.

Die Arbeit von Kanzian et. al. [44] geht einen netzwerkbasierten Weg. Hier werden zusätzlich zu den Heizkraftwerken noch Terminals bzw. Sammelstellen eingeführt. Ziel ist es auch hier durch Berücksichtigung der räumlichen Zusammensetzung des Materialflusses die Transportwege mit Hilfe von Netzwerk-Analyse zu optimieren. Durch die Betrachtung der Transportkosten von 3 Szenarien mit unterschiedlich hohem Anteil der Sammelstellen am Materialflusssystem können die Unterschiede von direktem und indirektem Transport via zwischengelagerter Sammelstelle verglichen werden.

MODELLIERUNG UND UMSETZUNG

Dieses Kapitel befasst sich im Wesentlichen mit der Beschreibung des im Zuge dieser Arbeit umgesetzten Modells. Der erste Teil (Abschnitt 4.1) gibt einen Einblick in die aktuelle Situation im Bezug auf das Angebot und Nachfrage von Holz mit großem Augenmerk auf Hackschnitzel. In Abschnitt 4.2 werden die Grundzüge und Zusammenhänge des Modells behandelt. Darauf aufbauend erläutert Abschnitt 4.3 die agierenden Komponenten. Abschnitt 4.4 gibt dann einen Einblick in einige grundlegende Überlegungen, die im Vorfeld und in den ersten Schritten der Umsetzung mit *Repast Symphony* zu beachten sind. Darauf folgt eine Beschreibung der wichtigsten Abläufe in der Simulation in Form eines Prozessüberblicks und einer Ablaufplanung. In den anschließenden Abschnitten 4.6-4.11 wird ein Einblick in die implementierten Prozesse und Abläufe gegeben. Den Abschluss (Abschnitt 4.10) bildet eine Übersicht über die Ausgabeoptionen der Simulation sowie eine Beschreibung des Validierungsprozesses der Modellierung in Abschnitt 4.12.

4.1 DIE HOLZWIRTSCHAFTLICHE SITUATION IN KÄRNTEN

Mit einer Waldfläche von 584.000 ha und einem Waldflächenanteil von 57,8 % ist Kärnten, nach der Steiermark, das walddreichste Bundesland Österreichs. Im kärntner Ertragswald stockt ein Holzvorrat von rund 178 Mio. Vorratsfestmeter (vfm) [74]. Im Rahmen der ÖWI 2007-09 konnte für Kärnten ein jährlicher Holzeinschlag von ca. 3,6 Mio vfm festgestellt werden. Bezugnehmend auf den aktuellen Einschlagsbericht des Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft [40] ist dieser Wert weitgehend auf einem konstanten Niveau geblieben und kann auch zur Modellierung einer aktuellen Situation herangezogen werden. Dem gegenüber steht ein jährlicher Zuwachs von 5,2 Mio. vfm [74], wobei dann ca. 71 % [89] des jährlichen Zuwachses genutzt werden. Der Bericht der Arbeitsplattform für Holz und Wald [3] gibt einen Bedarf für Kärnten von ca. 6 Mio. Festmeter (fm) an. Dies ergibt eine Unterversorgung von ca. 37 %, welche durch Holzimporte aus dem Ausland kompensiert werden. 6,2 % des Bedarfs also ca. 250.000 fm werden für Hackschnitzel-befeuerte Heizkraftwerke benötigt.

4.2 ZWECK DES MODELLS

Angelehnt an die Arbeiten von Scholz et. al. [81] und Kostadinov et. al. [49] (siehe Abschnitt 3.1) stellt dieses Modell die Grundlage zur Umsetzung einer Prototyp-Applikation zur Abbildung und Simulation einer Holz-Wertschöpfungskette vom Wald bis hin zum energetisch verwendbaren Hackschnitzel dar. Das Modell verfolgt eine vorhersagende/prognostische Intention und versucht die zukünftige Entwicklung der Fragestellung zu simulieren. Wie bereits in der Einleitung 1 erwähnt, beschränkt sich die Modellierung auf die Abbildung großräumiger Zusammenhänge und versucht in kleinster Weise realistische Abläufe auf Mikro-Level nachzubilden. So wird zum Beispiel auf eine Abbildung der Materialflüsse, wie bei Kostadinov et. al. [49] verzichtet. Umgesetzt wird das ABM auf Basis von *Repast Symphony* [79].

Wie in Abbildung 4.1 ersichtlich, gliedert sich das Modell in eine Angebotsseite, eine Nachfrageseite und einen intermediären Bereich. Die Angebotsseite bilden die **Eigentümer**, welche den **Wald** bewirtschaften und somit den Rohstoff Holz zur Verfügung stellen. Die thermischen **Biomasseheizwerke** bilden die Nachfrageseite. Sie haben einen jährlichen Festbrennstoffbedarf für die Wärme-Produktion. Um diesen Bedarf zu decken, beschäftigt jedes Biomasseheizwerk sogenannte **Holzagenten**, die als Holzhändler das Bindeglied zwischen Wald-Eigentümer und Biomasseheizwerke bzw. Angebot und Nachfrage bilden. In Bezugnahme der Arbeit von Scholz et. al. [81], welche eine Ressourcen-orientiertes Ernteverhalten verfolgt, versucht das hier vorgestellte Modell zusätzlich noch ein einfaches Marktszenario, ähnlich wie bei Kostadinov et. al. [49], abzubilden. Aus diesem Grund können die durchgeführten Simulationen in Ressourcen-orientierte und Markt-orientierte Szenarien eingeteilt werden.

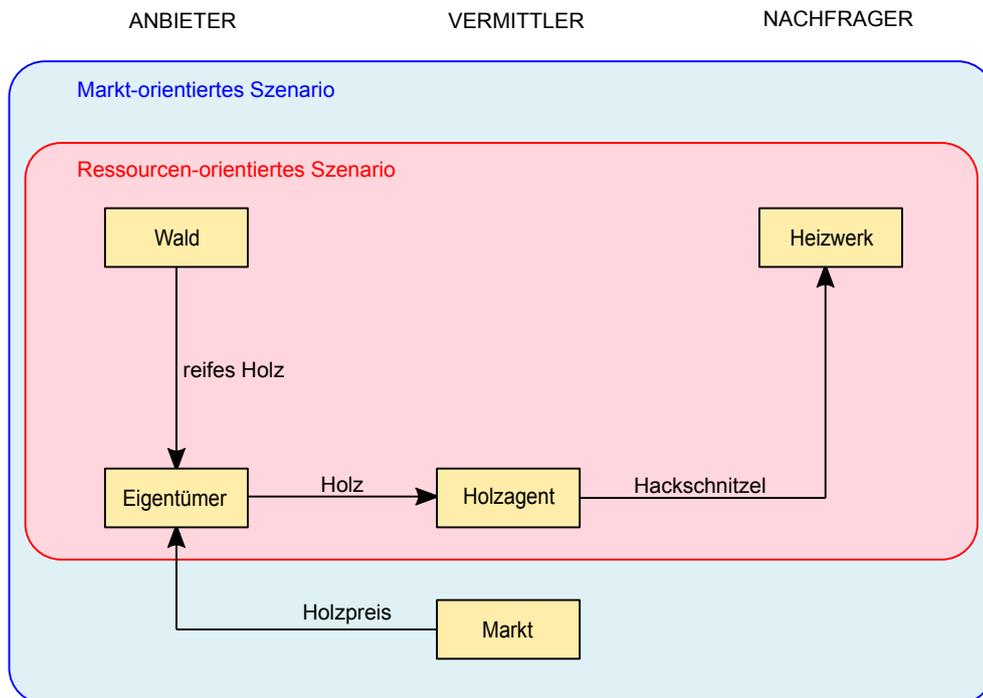


Abbildung 4.1: Grundlegender Aufbau des Modells und Zusammenspiel der Komponenten.

In den **Ressourcen-orientierten** Szenarien wird, das jährlich angebotene Holz im Bezug auf den gesamten Holzbestand betrachtet. Hier wird angenommen dass der Wald von zentraler Stelle bewirtschaftet wird. Alle Eigentümer weisen einheitliche Entscheidungsgrundlagen auf, womit ein konstantes Holzangebot während der gesamten Simulationsdauer erreicht werden soll. Die grundlegenden Funktionsweise des hier verwendeten Modells lehnen sich an die Arbeiten von Scholz et. al. [81] an. In den **Markt-orientierten** Szenarien wird das Holzangebot durch die Einführung des **Marktes** und somit direkt durch den Holzpreis beeinflusst. Da verschiedene Arten von Eigentümern vorliegen und diese unterschiedliche wirtschaftliche Interessen aufweisen, verändert sich auch dementsprechend das jährliche Holzangebot. Ziel ist es in beiden Szenarien die raumzeitlichen Zusammenhänge zwischen Angebot und Nachfrage zu beobachten. Im Speziellen geht es darum, die zeitliche Entwicklung der Holzmenge und die zurückgelegten jährlichen Strecken zur Deckung des

Hackschnitzel-Bedarfs zu untersuchen.

Das Modell geht von einem autarken Versorgungssystem aus, das heißt, dass die Beschaffung des Holzes nur durch den Wald innerhalb der Kärntner Landesgrenzen erfolgt. Ein dynamisch (Marktgetriebenes) Holzangebot aus externen Quellen z.B. Nachbarbundesländern oder dem Ausland wird auf Grund fehlender Daten und somit schwieriger Modellierbarkeit nicht als eigenständige Modell-Komponente berücksichtigt.

4.3 AGENTENKLASSEN, ATTRIBUTE UND MASSSTAB

Aus Abschnitt 4.2 lassen sich die im Modell beteiligten Akteure bzw. Entitäten direkt herauslesen. Wird dies in weiterer Folge mit den grundlegenden Komponenten eines ABM aus Abschnitt 2.2 in Verbindung gesetzt, können für das hier beschriebene Modell folgende Agenten, Beziehungen und Umgebungen zugeordnet werden:

- **Agenten:** Die Hauptakteure im Modell sind die Eigentümer und Holzagenten. Sie sind jene zwei Agentengruppen, die zu einem großen Teil für das emergente Verhalten im Modell verantwortlich sind. Der Eigentümer verfügt, je nach Besitzart, über mindestens eine bis hin zu tausenden Waldzellen. Aus Vereinfachungsgründen wird der Wald als sogenannte Waldzellen in Form von Agenten modelliert. Diese stellen punktförmige Raster-basierte Waldflächen dar (siehe Abschnitt 5.1.1). Jedes Biomasseheizwerk beschäftigt zur Bedarfsdeckung genau einen Holzagenten und steht auch als eine passive Komponente da. Im Markt-orientierten Szenario trägt auch der Markt zu Emergenz bei, indem dieser durch den Preis die Entscheidungen der Eigentümer und somit die Holzmenge beeinflusst;
- **Beziehungen:**
 - Der Eigentümer *bewirtschaftet* den Wald und *verkauft* das Holz;
 - Der Holzagent *kauft* das Holz und ist um eine Kostenoptimierung bemüht;
 - Das Heizwerk *beauftragt* den Holzagenten zur Bedarfsdeckung;
 - Der Markt *beeinflusst* die Eigentümer über den Holzpreis;
- **Umgebung:** Es kommt hier eine GIS-Umgebung zum Einsatz, die das kärntner Landesgebiet darstellt. Die Grundlagen der im Modell implementierten Umgebung wird von der räumlichen Verteilung des Waldes (siehe 5.1.1) und die Biomasseheizwerke (siehe 5.2.1) gebildet. Die Umsetzung der Modellierung mit Hilfe von Kosten-Rastern (siehe 5.3.2) impliziert, dass auch das Straßennetz und das Gelände als Umgebung angesehen werden muss;

Zur besseren Übersicht sind die Agentenklassen und deren wichtigste Attribute, Funktionen sowie Zusammenhänge in Abbildung 4.2 in Form eines UML-Klassen-Diagramms dargestellt. Tabelle 4.1 zeigt diese Agentenklassen nochmals in Listenform. Jede Klasse ist mit ihrer grundsätzlichen Aufgabe und der Unterscheidung zwischen statischen und dynamischen Agenten dargestellt. Des weiteren ist auch die Anzahl der im Modell vorkommenden Agenten aufbauend auf die zur Verfügung stehenden Datenbasis aufgelistet.

Im Bezug auf den räumlichen **Maßstab** erstreckt sich das Untersuchungsgebiet über die kärntner Landesfläche, wobei eine räumliche Auflösung von 100x100 m großen Waldzellen die Grundlage bildet. Die zeitliche Auflösung des Modell weist eine rundenbasierte Implementierung auf. Angelehnt an das Modell von Scholz et. al. [81] simuliert eine Runde ein Jahr. Pro Runde werden einige

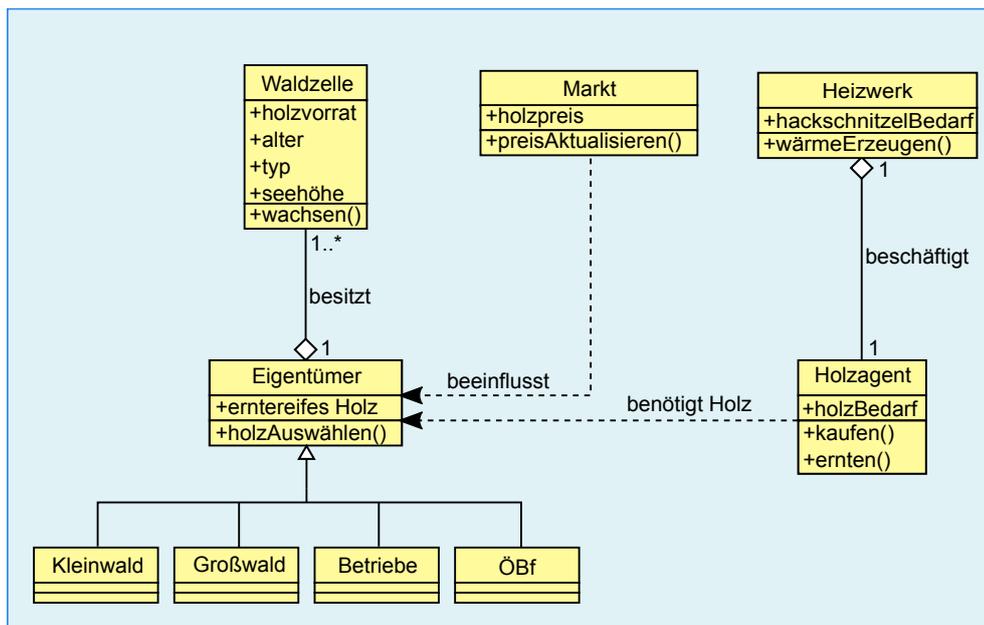


Abbildung 4.2: Klassendiagramm des Modells mit den wichtigsten Funktionen und Attributen jeder Agentenklasse

Tabelle 4.1: Beschreibung der Agentenklassen und deren Aufgabe, Position und Anzahl im Modell. Die Anzahl ist dabei durch die Datengrundlage vorgegeben.

Agentenklasse	Aufgabe	Position	Anzahl
Waldzelle	Quelle	statisch	ca. 580000
Eigentümer	Anbieter	dynamisch	ca. 23000 ^a
<i>Kleinwald</i>	Anbieter	dynamisch	ca. 22700 ^a
<i>Großwald</i>	Anbieter	dynamisch	ca. 270 ^a
<i>Betriebe</i>	Anbieter	dynamisch	13 ^a
<i>ÖBf</i>	Anbieter	dynamisch	1 ^a
Holzagent	Intermediär	dynamisch	18
Heizwerk	Nachfrager	statisch	18
Markt	Extern	statisch	1

^a Angenommen in der Modellierung der Eigentumsverteilung (siehe Kapitel 5.3.3).

Handlungssituationen einmal, andere mehrfach durchlaufen. Eine genaue Beschreibung der ablaufenden Prozesse ist im Abschnitt 4.5 zu finden. In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die modellierten Agentenklassen nochmals im Detail eingegangen.

4.3.1 Waldzelle

Wald, im Sinne des Forstgesetzes von 1975 [24], ist eine mit Holzgewächsen bestockte Grundfläche, die sich dazu eignet um eine der folgenden Wirkungen auszuüben:

- a) Nutzwirkung, insbesondere die wirtschaftlich nachhaltige Hervorbringung des Rohstoffes Holz,
- b) Schutzwirkung, also der Schutz vor Elementargefahren und schädigenden Umwelteinflüssen sowie die Erhaltung der Bodenkraft gegen Bodenabschwemmung und -verwehung, Geröllbildung und Hangrutschung,
- c) Wohlfahrtswirkung, der Einfluss auf die Umwelt, und zwar auf den Ausgleich des Klimas und des Wasserhaushaltes, auf die Reinigung und Erneuerung von Luft und Wasser und auf die Lärminderung, oder
- d) Erholungswirkung, insbesondere die Wirkung des Waldes als Erholungsraum für die Waldbesucher.

Die Wälder in Österreich sind fast ausschließlich Altersklassenwälder. Dieser Typus basiert auf homogenen Flächeneinheiten mit gleichaltrigen Bäumen [91]. Aus diesem Grund kann die Modellierung des Waldes auf Basis von ca. 580.000 sog. "Waldzellen" erfolgen. Jede dieser Waldzelle repräsentiert punktförmig das Zentroid einer 1 ha (100x100 m) großen Rasterzelle des Walddatensatzes. Eine Modellierung auf Basis von Einzelbäumen sowie eine Kataster-basierte Darstellung wurde auf Grund der nicht zur Verfügung stehenden Datenbasis und des unangemessenen Maßstabes nicht berücksichtigt. Jedes dieser punktförmigen Features stellt einen statischen Agenten dar, der aus dem Walddatensatz-Shapefile (siehe Abschnitt 5.1.1) abgeleitet wird und somit fix verortet ist. Jede Waldzelle ist, wie im Klassendiagramm (Abbildung 4.2) abgebildet, durch die Attribute Holzvorrat, Alter, Waldtyp, Seehöhe, Hangneigung usw. definiert und steht in Beziehung zu genau einem Eigentümer, der sie bewirtschaftet. Zudem kann eine Waldzelle von verschiedenen Holzagenten abgeerntet werden.

Da aus der Datenbasis lediglich eine Unterscheidung zwischen Laub-, Laub-dominierten, Nadel- und Nadel-dominierten Waldtypen hervorgeht, werden repräsentativ die dominierenden Baumarten in Kärnten (siehe ÖWI [74]), also respektive Buche für Laub- und Fichte für Nadelwald, eingesetzt. Für die Mischvarianten wird aus Vereinfachungsgründen ein 70–30 Mischverhältnis angenommen. Eine genaue Aufschlüsselung der anderen Attribute ist auch in Abschnitt 5.1.1 zu finden.

Die Hauptfunktion der Waldzelle im Modell ist **Wachsen**. Der Prozess des Wachsens geht mit einer jährlichen Alters-, Typ- und Seehöhe-abhängigen Erhöhung des Holzbestandes einher. Alle anderen Attribute bleiben auf Grund der statischen Position für jede Waldzelle über den gesamten Verlauf der Modellierung konstant. Ein detaillierter Einblick in die Umsetzung des Waldwachstums ist in Abschnitt 4.9 zu finden.

4.3.2 Eigentümer

Die rund 23.000 Eigentümer [89] "bewirtschaften" den Wald. In der Modellierung besitzt jeder Waldeigner eine aus der Besitzverteilung hervorgehende Anzahl an Waldzellen. Diese sind über eine eindeutige Eigentümer-ID verbunden. Die Hauptaufgabe des Eigentümers besteht in der **Auswahl des entnehmbaren Holzes aus seinen Waldzellen** und ist somit zielgerichtet. Die Auswahl erfolgt auf Basis definierter Entscheidungskriterien, die sich je nach betrachtetem Szenario unterscheiden.

Der funktionale Ablauf des Auswahlmechanismus ist mit der Arbeits-Logik des *Stationären-Agenten* aus Abbildung 2.3 in Abschnitt 2.4 vergleichbar. Der Eigentümer springt von Waldzelle zu Waldzelle und entscheidet auf Basis der Attribute der betrachteten Waldzelle über deren Erntezustand.

In den **Ressource-orientierten Szenarien** wird, wie bei Scholz et. al. [81], von einer einheitlichen Entscheidungslogik ausgegangen. Das heißt alle Eigentümer wählen die entnehmbaren Holzmen-gen nach den selben Auswahlkriterien aus. Es wird somit eine optimale Ressourcennutzung für den gesamten Wald angestrebt und eine stetige jährliche Holzentnahme modelliert. Eine detaillierte Beschreibung der Parameter dieser Forstzellenauswahl ist in Abschnitt 4.7.1 zu finden. In den **Markt-orientierten Szenarien** werden unterschiedliche Kategorien von Eigentümern eingeführt, die jeweils eigene Entscheidungskriterien, bezogen auf wirtschaftliche Interessen und implizit auf die Veränderung des Holzpreises, aufweisen. Auf Basis der ÖWI 2007–09 [74] können folgende Eigentümer-Kategorien unterscheiden werden:

- Kleinwald (bis 200 ha);
- Großwald (bis 200 ha - bis 1000 ha);
- Betriebe (ab 1000 ha);
- staatliche österreichische Bundesforste AG (ÖBf);

Mit rund 70 % weist Kärnten den höchsten Kleinwaldanteil in Österreich auf. Betriebe inklusive Großwald besitzen 26 %, die Österreichische Bundesforste AG (ÖBf) 3 % des Kärntner Waldes [89]. Privat-Eigentümer aus dem **Kleinwald**-Bereich weisen eine forstwirtschaftliche Fläche von weniger als 200 ha auf. Für Gesamt-Österreich fallen dabei rund 40 % auf den traditionellen Waldeigentümer aus dem landwirtschaftlichen Sektor, der bäuerliche Eigentümer und Nebenerwerbslandwirte mit einschließt. 28 % werden von Übergangstypen mit landwirtschaftlichem Hintergrund und Berufsaussteigern gebildet. Den Rest bilden die sogenannten "Neuen"-Waldeigentümer wie z.B. Hofaussteiger, urbane Waldeigentümer und landwirtschaftsferne Eigentümer. Letztere Formen weisen oft keinen direkten Bezug zum Wald und zur Waldarbeit mehr auf und bereiten zunehmend Probleme bei der Bewirtschaftung und Pflege des Waldes. Für landwirtschaftsferne Waldeigentümer stellt der eigene Wald kaum eine Einkommensquelle dar, viel mehr hat er die Bedeutung als Freizeitbeschäftigung, Naturerhaltung und Besitzstolz. In diesem Zusammenhang bietet die Organisation in Form von Agrar-Gemeinschaften oder -Genossenschaften eine Form der Abhilfe [39]. Aufgrund von fehlenden Informationen über die Verteilung und die Zusammensetzung von bestehenden Agrar-Gemeinschaften in Kärnten muss auf eine Berücksichtigung dieses Umstandes allerdings im Modell verzichtet werden.

Die Modellierung des Kleinwaldes basiert auf den Interessen eines Eigentümers von sogenanntem "Bauernwald", welche dem landwirtschaftlichen Sektor und dem Übergangs-Bereich zugeordnet werden können. Auch der Anteil der Neuen-Waldeigentümer wird dieser Klasse zugeordnet. Eckmüller [20] beschreibt die wesentlichen Interessen des Kleinwald-Eigentümers ganz allgemein folgendermaßen:

- Sicherung des laufenden Naturalbedarfes (Brenn-, Zaunholz usw.) und Geldbedarfes (gleichmäßiger Holzverkauf);
- Sicherung des außerordentlichen Naturalbedarfes (Bauholz für Gebäudeerneuerung etc.) und Geldbedarfs (z.B. Investition). Dieser Punkt lässt sich unter "Sparkassenfunktion" des Bauernwaldes zusammenfassen;

- Vermögenssicherung;
- Arbeitsausgleich für Mensch und Maschine/Arbeitseinkommen;

Da der größte Teil des laufenden Einkommens bäuerlicher Eigentümer aus den landwirtschaftlichen Produktionszweigen bzw. aus Nebenerwerbstätigkeit kommt, ist es für den Kleinwald, im Gegensatz zum Großbetrieb, meist nicht notwendig bzw. gar nicht möglich, regelmäßige und gleichmäßige Nutzungen durchzuführen. Der Kleinwald nutzt durchschnittlich lediglich 44 %, wohingegen im Großwald und Betrieben 89 % des jährlichen Zuwachses genutzt werden. Aus diesem Grund resultieren die Schwankungen der jährlichen Mengenbereitstellung vor allem aus dem Nutzungsverhalten des Kleinwalds. Der Holzpreis ist für die Mengensteigerung ein zentraler Faktor, und somit führen Schwankungen des Holzpreises auch zu Schwankungen in der Mengenbereitstellung [3].

Grundsätzlich wird also geerntet, wenn die Preislage günstig ist oder wenn Geld- oder Naturalbedarf vorliegt. Somit kann angenommen werden, dass das Verhalten des Kleinwalds weitgehend auf zufälligen Ereignissen basiert. In diesem Zusammenhang ist auch eine einfache Form der Anpassung modellierbar, denn der Kleinwald passt seine Entscheidungen an den Preis an, indem er den gegenwärtigen Preis mit dem Preis des letzten Verkaufes vergleicht. Im Modell wird er beispielsweise nur dann wieder verkaufen, wenn ein ähnliches Preisniveau erreicht wird.

Eine völlig andere Situation ist beim **Großwald**, den **Betrieben** und den **ÖBf** zu beobachten. Diese forstwirtschaftlichen Betriebe weisen eine Waldfläche von mindestens 200 ha auf und sind großteils kommerziell ausgerichtet. Ihre Erträge gehen auf regelmäßigen Holzeinschläge und deren Verkauf zurück. Sie streben somit ein über die Jahre relativ konstantes Nutzungsverhalten an [52]. Dieses Verhalten wird auch durch den Bericht der "Arbeitsplattform für Holz und Wald" [3] der kärntner Landwirtschaftskammer (LK) bestätigt. Im Vergleich zu den kleinen Betrieben verhalten sich die Forstbetriebe hinsichtlich der Holz-Endnutzung weniger preiselastisch [82]. Kurz gesagt, ihr Einschlagverhalten reagiert nur schwach bis gar nicht auf die Veränderung der Preislage. Jöbstl [41, 42] charakterisiert die Entscheidungen im Bezug auf das Einschlagverhalten dieser Eigentumsformen folgendermaßen:

- Notwendigkeit der Auslastung vorhandener Arbeits- und Maschinenkapazitäten;
- Notwendigkeit zur Abdeckung von Fixkosten sowie des gegebenen Privatbedarfes;
- Notwendigkeit der Erfüllung bestehender Zahlungsverpflichtungen;
- Zwangsnutzungen (Schadholz);
- Mangelnde Prognostizierbarkeit der künftigen Holzpreisentwicklung;
- Primäre Ausrichtung des Einschlages und der sonstigen Aktivitäten auf das betriebliche und private Jahresbudget;
- Waldbauliche Überlegungen;

Zusammenfassend ist zu sagen, dass bei den Forstbetrieben ein stetiges Nutzungsverhalten nachzuweisen ist, das unabhängig zum aktuellen Holzpreis auftritt. Je nach Größe des Betriebes (für das Modell gilt die Unterscheidung Großwald vs. Betriebe und ÖBf) kann eine unterschiedlich intensive Nutzung modelliert werden. Die Markt-abhängige Auswahl definiert für jede dieser Eigentumsformen eine unterschiedliche Forstzellenauswahl (siehe Abschnitt 4.7.2).

4.3.3 Holzagent

Der Holzagent übernimmt die intermediäre Aufgabe des “Händlers“ zwischen Eigentümern und Biomasseheizwerken. Aus Vereinfachungsgründen stellt der Holzagent im Modell implizit den Verteiler für die gesamte Holzverarbeitende Industrie (Rundholzverarbeitung, Energieholz-, Papier-, Plattenindustrie usw.) dar, da Hackschnitzel hauptsächlich als Nebenprodukt der Rundholzindustrie entstehen. Im Modell treten die Teilnehmer der anderen Zweige aber nicht auf, sondern werden über die prozentuale Verteilung des geernteten Holzes miteinbezogen. Im Bericht der Arbeitsplattform für Holz und Wald [3] wird der in Form von Fernwärmeproduktion verwertete Anteil mit rund 6,2 % pro Erntefestmeter (efm) angegeben. Der Rest fällt den anderen Holzverarbeitungszweigen zu.

Das Verhalten des Holzagenten ist zielgerichtet und besteht in der **Transportkosten-optimierten Auswahl und Ernte von Holz** zur Deckung des Bedarfs der Biomasseheizwerke. Der Holzagent besucht alle Holzeigentümer und überprüft ob sie erntereifes Holz anbieten. Am Schluss zieht er Résumé und erntet die angebotenen Waldzellen Transportkosten-optimiert. Er springt beim Erntevorgang von Waldzelle zu Waldzelle und erntet das verfügbare Holz. Dieser Prozess wird noch genauer in Abschnitt 4.8 beschrieben. Das Funktionsprinzip baut auf jenes des *Residential/Stationären-Agenten* (siehe Abschnitt 2.3) auf.

4.3.4 Heizwerk - Biomasseheizwerk

Ein Biomasseheizwerk verwendet zur Wärmeerzeugung Biomasse-Brennstoffe in Form von z.B. Hackschnitzeln, Scheitholz und/oder Pellets. Im Gegensatz zum Biomassekraftwerk und zum Biomasseheizkraftwerk wird keine elektrische Energie erzeugt. Es findet eine zentrale Erzeugung von Wärme oder Dampf in einem Heiz- oder Dampfkessel statt, die über ein Nah- oder Fernwärmenetz an die Endverbraucher verteilt werden. Diese zentrale Wärmebereitstellung hat den Vorteil, dass nicht jeder Haushalt einen eigenen Heizkessel benötigt. Zudem ist eine bessere Abgasreinigung möglich. Die hohen Kosten sowie Leitungsverluste im Wärmenetz bilden die Nachteile dieser Form der Energiegewinnung und -verteilung [93].

In der Simulation werden 18 Biomasseheizwerke (siehe Datengrundlage 5.2.1) berücksichtigt. Sie stellen den Nachfrager dar, wobei jedes Biomasseheizwerk einen Holzagenten beschäftigt, der durch seine Tätigkeit den Hackschnitzel-Bedarf decken soll. Der Hackschnitzel-Bedarf wird in den meisten Fällen in sogenannten Schüttraummeter (srm) angegeben. Bezugnehmend auf die Angaben des Bundesforschungszentrum für Wald (BFW) [5] ist 1 fm Rundholz mit 2,5–3 srm Hackgut angegeben. Im Modell wird ein Umrechnungsfaktor von 1 fm = 2,5 srm verwendet. Aus Vereinfachungsgründen wird der Bedarf der Biomasseheizwerke direkt in fm angegeben. Der Gesamtbedarf der im Modell berücksichtigten Biomasseheizwerke ist 239.400 fm.

Im Bericht der kärntner LK [3] wird von einer prognostizierten Steigerung des Energieholzbedarfs für Hackgut und Rinde betriebene Anlagen über 1000 kW von rund 1,1 % jährlich ausgegangen. Diese Entwicklung wird auch im Modell berücksichtigt, wobei diese, aufgrund der über diese 10-jährige Prognose hinausreichenden Simulationszeiträume, als nicht linear angenommen wird. Einerseits sind die Kapazitäten der Biomasseheizwerke begrenzt und andererseits muss von einer Sättigung des Marktes ausgegangen werden. Im Modell nimmt also der jährliche Mehrbedarf an Hackschnitzeln pro Biomasseheizwerk mit fortschreitender Simulationsdauer immer weiter ab.

Die Biomasseheizwerke sind statische Agenten und haben im eigentlichen Sinne, neben der Definition des Bedarfs, wenig aktiven Einfluss auf das Modell. Durch seine Position trägt das Biomasseheizwerk indirekt zur Berechnung der Transportdistanz bei. Dies basiert auf der Erstellung von Kostenrastern, welche in Abschnitt 5.3.2 genauer beschrieben werden.

4.3.5 Markt

Der Einfluss des Markt tritt nur in den Markt-orientierten Szenarien hervor und nimmt eine übergeordnete Funktion ein, welche das Angebot und die Nachfrage von Holz im Zusammenspiel mit dem Preis regelt. Im Modell ist die Nachfrage abgesehen von den jährlichen Steigerungen allerdings konstant, somit wird lediglich angebotsseitig das Verhalten der Eigentümer beeinflusst.

Wie bereits in Abschnitt 4.3.2 genauer beschrieben, reagieren die Einschlagszahlen im Kleinwald kaum auf Veränderungen des Brennholzpreises, da der Großteil des Brennholzes selbst konsumiert wird [82]. Bezugnehmend auf den Bericht der LK Kärnten [3] kann dieser Trend auch bestätigt werden. Außerdem wird hier beschrieben, dass für die Entwicklung des Rundholzpreises ein Zusammenhang zwischen Menge und Preis festgestellt werden kann. Für das Modell bedeutet dies, dass der Rundholzpreis als beeinflussende Größe für das Verhalten der Kleinwaldeigentümer herangezogen werden kann. Anders läuft es bei größeren Privatbetrieben und ÖBf, denn diese reagieren mittlerweile mit expliziten Brennholzeinschlägen positiver auf den Verlauf des Brennholzpreises [82]. Im Modell wird diese Entwicklung allerdings nicht explizit berücksichtigt, da die auftretenden Mengen im Vergleich zum Gesamteinschlag vernachlässigbar sind, und somit wird auch hier auf Basis des Rundholzpreises Einfluss genommen. Kurz gesagt, Hackschnitzel sind ein reines Nebenprodukt der Rundholzproduktion [6], und somit kann deren mengenmäßiges Auftreten an den Rundholzpreis gekoppelt werden.

4.4 UMSETZUNG MIT REPAST SIMPHONY

Die Umsetzung des Modells erfolgt mit Repast Symphony in der Version 2.3.1.⁹ Außerdem benötigt Repast Symphony die Installation der aktuellen Version von Java 8. Hier kommt Java SE 8¹⁰ zum Einsatz. Als Entwicklungsumgebung wird die aktuelle Version von Eclipse¹¹ verwendet, da diese auch in den diversen Einführungs-Tutorials z.B. von Collier & North [13] genutzt wird. Es kann aber jede andere Java-Umgebung wie z.B. NetBeans, Microsoft® Visual Studio usw. eingesetzt werden. Wie bereits in Abschnitt 2.5.1 erwähnt, stellt Repast Symphony in der 2.3.1-Version grundlegende GeoTools-Bibliotheken in der Version 13.1 zur Integration von Geodaten in den Formaten *Esri Shapefile* und *Esri grid* zur Verfügung. Da aber auch Rasterdaten im *TIFF*-Format verarbeitet werden, ist die Integration externer GeoTools-Programmierbibliotheken, in diesem Fall die aktuelle Version 16.1,¹² notwendig.

Bezogen auf die Dokumentation des Application Programming Interface (API) [73] ist das zentrale Merkmal in der Umsetzung die sog. "*Context*"¹³-Klasse. Das initialisierte *Context*-Objekt steht repräsentativ für alle im Modell bzw. in der Simulation enthaltenen Agenten. Es dient sozusagen als Container für die Agenten und bettet diese in die Repast-Umgebung ein. Dies kann auch in mehreren Ebenen durch die Definition von beliebig vielen "*SubContext*"-Objekten erfolgen. Jede dieser "*Context*"-Ebenen kann eine oder mehrere räumliche Definitionen, sogenannte "*Projection*"¹⁴, auf-

⁹Repast Symphony 2.3.1: <https://sourceforge.net/projects/Repast/files/Repast%20Symphony/Repast%20Symphony%202.3.1/>

¹⁰Java SE 8 download: <https://www.java.com/en/>

¹¹Eclipse Neon: <https://eclipse.org/downloads/>

¹²GeoTools The Open Source Java GIS Toolkit 16.1: <https://sourceforge.net/projects/geotools/files/GeoTools%2016%20Releases/16.1/>

¹³Repast Symphony - Context: https://Repast.github.io/docs/api/Repast_simphony/Repast_simphony/context/Context.html

¹⁴Repast Symphony - Projection: https://Repast.github.io/docs/api/Repast_simphony/Repast_simphony/space/projection/Projection.html

weisen. Eine *“Projection“* definiert die grundlegenden Eigenschaften des Raumes, in dem sich die Agenten bewegen und interagieren. Der Raum kann in Form eines Raster-Grid, euklidischem Raumes, physikalischem Raum, Netzwerken oder, wie im Bezug auf GIS-Daten nötig, auf geografischem Raum basieren. Im nächsten Schritt der Umsetzung gilt es alle Agenten-Klassen aus dem oben dargestellten Klassendiagramm (Abbildung 4.2) als Objekt-orientierte Java-Klassen umzusetzen. Die funktionalen Prozesse sowie deren Ablauf werden im nachfolgenden Abschnitt 4.5 noch genauer beschrieben.

4.5 PROZESSÜBERBLICK UND ABLAUFPLANUNG

Die Simulation besteht aus einem zyklischen Ablauf von verschiedenen Prozessen. Ein Zyklus stellt dabei einen Zeitraum von einem Jahr dar. Repast bezeichnet einen solchen Zeitschritt als sogenannten *“Tick“*. Tabelle 4.2 beschreibt die in der Umsetzung des Modells implementierten Prozesse mit den jeweils am Prozess teilhabenden Klassen. Der Initialisierungsprozess erstellt aus den Input-Daten den Modellzustand in Form der Objekt-Instanzen für den Zeitpunkt $t=0$ bzw. *Tick 0*. Wird die Simulation gestartet, werden in den Ressourcen-orientierten Szenarien pro Zeitschritt die Prozesse 1–4 ausgeführt. In den Markt-orientierten Szenarien startet jede Runde mit der Preisbildung (1a), und dann werden die Prozesse 1–4 abgearbeitet.

Tabelle 4.2: Tabellarische Prozessübersicht des Modells.

#	Prozess	Teilnehmer	Beschreibung
A	Initialisierung	Waldzelle, Eigentümer, Holzagent, (Markt)	Erstellen der Agenten aus der Datenbasis.
1	Forstzellen- Auswahl	Waldzelle, Eigentümer, (Markt)	Die Eigentümer legen die entnehmbaren Forstzellen fest. In den Markt-orientierten Szenarien werden diese Entscheidungen auch durch den Holzpreis beeinflusst.
2	Ernten	Waldzelle, Eigentümer, Holzagent	Der Holzagent greift über die Eigentümer auf die Forstzellen zu und erntet. Es werden so viele Waldzellen abgearbeitet, bis der Bedarf erfüllt ist.
3	Waldwachstum	Waldzelle	Aktualisieren der Attribute der Waldzellen.
4	Modell-Output	Waldzelle, Eigentümer, Holzagent, (Markt)	Auslesen der Beobachtungsgrößen aus den Agenten-Instanzen und Ausgabe in Form von Zeitreihendiagrammen. Erstellen einer Rasterkarte des aktuellen Holzvorrats.
1a	Preisbildung	Markt	Updaten der Variable Preis.

Abbildung 4.3 zeigt diese zyklische Verfahrensweise nochmals schematisch in Form eines Ablaufdiagramms. Die Abbruchbedingung der Simulation (in Rot) ist im Ernte-Prozess (siehe Abschnitt 4.8) integriert. Liegt in einer Runde nicht genügend Holzmenge zur Bedarfsdeckung der Biomasseheizwerke vor, wird die Simulation unterbrochen. In den nachfolgenden Abschnitten 4.6–4.11 wird die Umsetzung der hier angeführten Prozesse nochmals im Detail beschrieben.

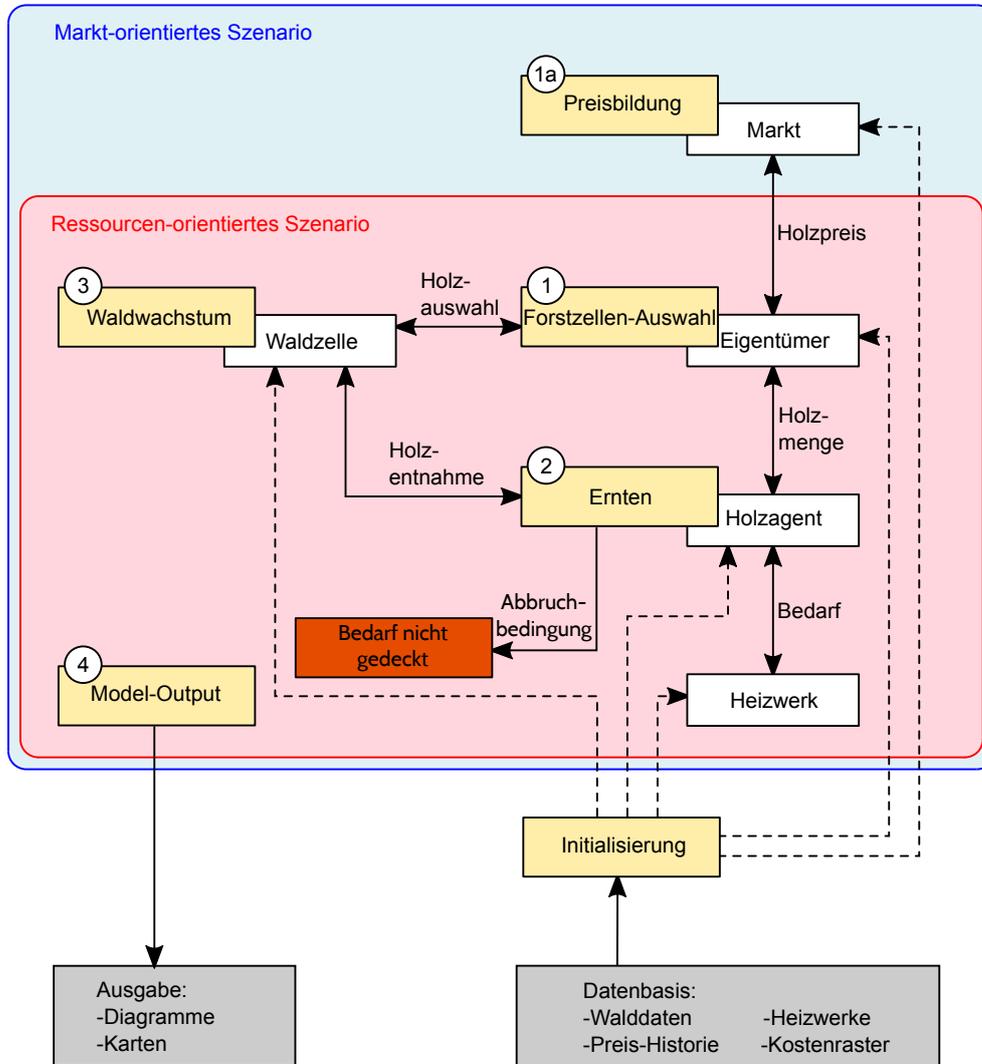


Abbildung 4.3: Schematisches Ablaufdiagramm des Modells in den Ressourcen- (rot) und Markt-orientierten Szenarien. Dargestellt sind die Prozesse (gelb), die Klassen/Agenten (weiß) und die externe Datengrundlage/Output (grau).

4.6 INITIALISIERUNG

Im Zuge der Initialisierung werden alle Input-Dateien nacheinander (siehe Abbildung 4.4) abgearbeitet. In einem iterativen Prozess werden dabei alle Features mit ihren Attributen ausgelesen und als Instanzen zum “Context“ hinzugefügt. Als Erstes wird der Markt erstellt. Die Preishistorie wird als Liste aus der *csv*-Datei ausgelesen und der Markt-Instanz übergeben. Im nächsten Schritt werden die rund 23.000 Eigentümer aus der entsprechenden *shape*-Datei generiert. Da keine entsprechenden Informationen über die Holzpreiserwartung der Eigentümer vorliegt, wird über den Markt ein zufälliger Preis zwischen dem maximalen und minimalen Preis der verwendeten Historie zugewiesen. Für die Instanzen der Holzagenten-Klasse, welche aus den Biomasseheizwerk-Daten erstellt werden müssen, werden die Kostenraster mittels ID über den Namen der *TIFF*-Datei in Verbindung gebracht werden. Als Letztes werden die ca. 570.000 Waldzellen initialisiert, mittels eindeutiger Besitzer-ID wird jede Waldzelle dem jeweiligen Eigentümer zugeordnet.

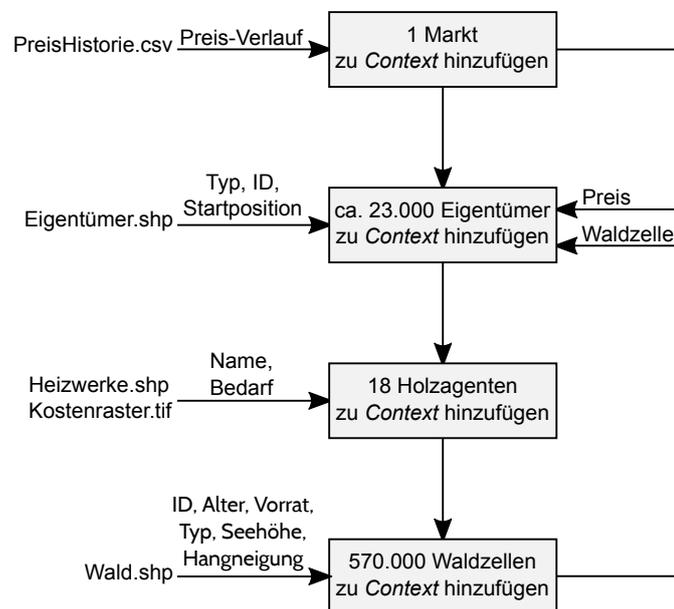


Abbildung 4.4: Schematischer Ablauf der Daten-Initialisierung. Aus der Datenbasis werden iterativ die Features als Objekte zum *Context* hinzugefügt.

4.7 FORSTZELLEN-AUSWAHL

Die Kriterien für eine Bestandsausscheidung, in Form von Durchforstungen und Endnutzung des Waldes, setzen sich im Normalfall aus dem Zusammenspiel mehrerer Faktoren wie z.B. Baumart, Alter, Qualität, Bonität, Bestockungsgrad usw. zusammen [91]. In der Datenbasis für den Wald stehen allerdings lediglich die Attribute Alter und Waldtyp zur Verfügung, somit müssen im Zuge der Modellierung Auswahlkriterien auf Basis dieser Eigenschaften bestimmt werden.

Diese Entscheidungsalgorithmen werden von Seiten der Eigentümer-Instanzen durchgeführt. In den Markt-orientierten Szenarien werden diese Entscheidungen auch durch den Holzpreis beeinflusst.

Abbildung 4.5 zeigt die Umsetzung der Forstzellen-Auswahl in Form eines Ablaufdiagramms.

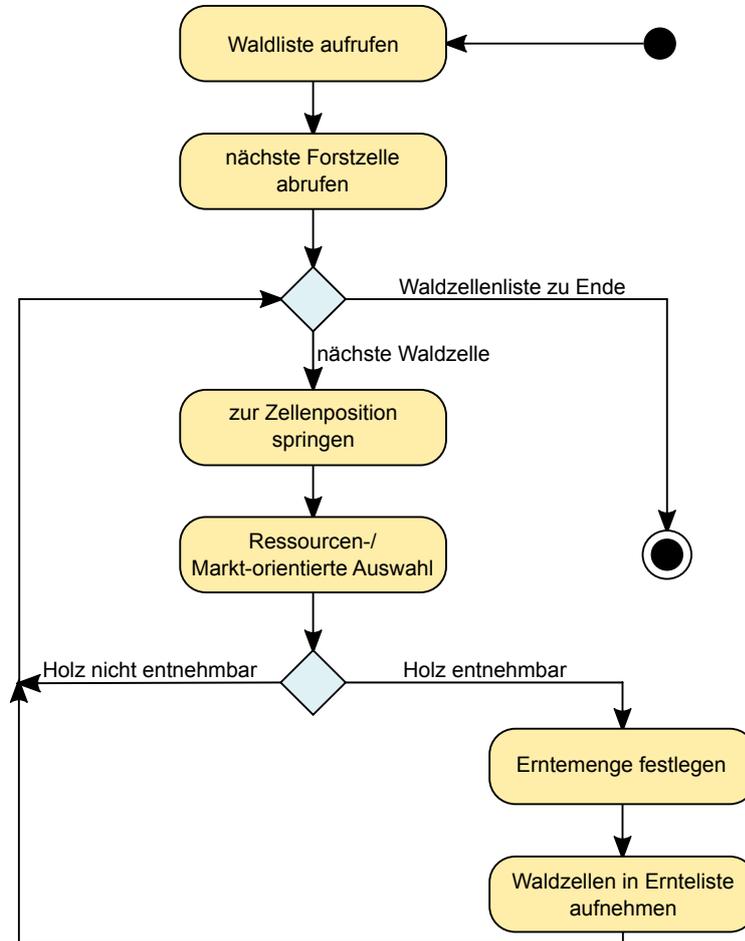


Abbildung 4.5: Ablaufdiagramm des Holzauswahl-Prozesses.

Der Eigentümer ruft die Eigentümer-Liste mit seinen Waldzellen auf. Danach wird diese Liste iterativ durchlaufen. Dabei springt der Eigentümer zuerst an die räumliche Position der betrachteten Waldzelle. Im nächsten Schritt wird auf Basis der Auswahlkriterien entschieden, ob aus der betrachteten Waldzelle Holz entnommen werden kann oder nicht. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Kriterien für die Ressourcen-orientierten bzw. Markt-orientierte Szenarien ist im Abschnitt 4.7.1 bzw. 4.7.2 zu finden. Kann kein Holz entnommen werden, wird die nächste Waldzelle in der Eigentümer-Liste aufgerufen. Darf Holz entnommen werden, wird die entnehmbare Holzmenge festgelegt und die Waldzelle in einen Ernteliste aufgenommen. Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis alle Waldzellen eines Eigentümer abgearbeitet worden sind. Das Ergebnis ist eine Ernteliste mit den entnehmbaren Waldzellen und die entnehmbare Holzmenge pro Eigentümer.

4.7.1 Ressourcen-orientierte Auswahl

Die Ressourcen-orientierte Auswahl von Holz strebt eine optimale Nutzung der vorhandenen Holzmenge an. In der Literatur wird eine Durchforstung alle 5–10 Jahre empfohlen [90]. Eine Vornutzung in Form einer Durchforstung bzw. Zwischennutzung ist erst möglich, wenn der Bestand eine Artenspezifische Oberhöhe erreicht hat. Das Fehlen dieser Einzelbaum-spezifischen Information kann auf Basis der Wuchsreihen von Marschall [62] durch das Alter kompensiert werden. Für Fichte wird das untere Vornutzungsalter mit 20 Jahren und für Buche mit 30 Jahre angegeben. Die Umtriebszeit, also der Zeitraum von Bestandsgründung bis zur Endnutzung, variiert natürlich auch von Art zu Art. So ist eine Endnutzung in Form eines Kahlhiebs für Fichte zwischen 80–120 und für Buche 60–100 Jahren vorgesehen [22, 5].

Um ein statisches Schema bei der Holzauswahl zu vermeiden, werden die Werte für die Entnahmeabstände sowie die Umtriebszeit einer Waldzelle zufällig aus den angegebenen Wertebereichen zugeordnet. Das bedeutet, wird Holz aus einer Waldzelle entnommen, wird der nächste Entnahmezeitpunkt als Zufallswert zwischen 5–10 generiert. Der gleiche Ansatz gilt für den Endnutzungszeitpunkt, wobei hier eine sofortige Wiederaufforstung im nächsten Simulationszyklus erfolgt. Auf Basis dieser Annahmen ergeben sich folgende in Tabelle 4.3 dargestellten Auswahlkriterien.

Tabelle 4.3: Modellerte Waldzellen-Auswahlkriterien der Eigentümer für die Ressourcen-orientierten Szenarien.

Parameter	Wertebereich	zufällig/konstant
Entnahmeabstand (Jahre)	5–10	zufällig
unteres Entnahmealter (Jahre) ^a		konstant
<i>Nadel</i>	20	
<i>Laub</i>	30	
Endnutzungsalter (Jahre) ^a		zufällig
<i>Nadel</i>	80–120	
<i>Laub</i>	60–100	

^a Gilt auch für die dementsprechenden dominierenden Mischvarianten, wobei ein Mischverhältnis von 70–30 angenommen wird.

Die Umsetzung dieser Kriterien erfolgt anhand von *if-then-else*-Anweisungen und ist in Abbildung 4.6 in Form von Pseudocode dargestellt. Um eine zeitnahe Entnahme vor der Endnutzung zu vermeiden, wird die letzte Zwischennutzung mit einem Entnahmeabstand (Zufallswert zwischen 5–10) vor Endnutzungsalter angesetzt. Dieser Zeitraum wird als Nutzalter bezeichnet. Der Entnahmezeitpunkt leitet sich aus dem Entnahmeabstand ab und wird in jeder Simulationsrunde iterativ vermindert. Erreicht dieser den Wert 0, wird entnommen.

4.7.2 Markt-orientierte Auswahl

In der Markt-orientierten Auswahl werden für jede Eigentümer-Art eigene Verhaltensregeln modelliert. Grundlage für die Modellierung bilden die in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Verhaltensweisen der verschiedenen Waldeigentümer-Arten. Da keine detaillierteren Informationen vorliegen, basieren die Modelle auf empirisch erarbeiteten Annahmen, welche sich auf Werte aus der Literatur stüt-

```

Data: Untersuchte Waldzelle
Result: Waldzelle entnehmbar oder nicht
;
if Endnutzungslater → OK then
|   Waldzelle erntbar → Endnutzung;
else
|   if Nutzalter → OK & Entnahmezeitpunkt → OK then
|   |   Waldzelle erntbar → Durchforstung;
|   end
end

```

Abbildung 4.6: Auswahlkriterien der von Seiten der Eigentümer zur Ernte freigegebenen Waldzellen in den Ressourcen-orientierten Szenarien in Form von Pseudocode.

zen.

Das Verhalten der **Kleinwaldeigentümer** (< 200 ha) ist zufällig und wird auf Basis von unregelmäßig auftretendem Geld- und Naturalbedarf modelliert. Für das Modell wird aufbauend auf die Arbeit von Eckmüller [20] angenommen, dass das Holzentnahme-Verhalten der Kleinwaldeigentümer einerseits auf Zufalls-Ereignissen und andererseits durch die Entwicklung des Holzpreises induziert wird. Somit lassen sich folgende Auswahlkriterien modellieren:

- Der Kleinwald weist bei den Einschlägen einen prozentualen Anteil von rund 21 % [3] auf, welcher für den Eigenbedarf verwendet wird. Um diesen Umstand zu modellieren wird in einem ersten Schritt per Zufallsgenerator eine Entnahme zum Eigenbedarf oder andernfalls für den Markt zugewiesen.
- Um das von Hogl, Pregernig & Weiss [39] angesprochene Desinteresse der landwirtschaftsfernen Eigentümer abzubilden, wird ein zufälliger Zeitraum zwischen jeder Entnahmen im Bereich von 5–25 Jahre angenommen;
- Die Modellierung des Preis-bezogenen Einschlagsverhalten basiert auf der Annahme, dass ein “gutes Preisniveau“ eine sofortige Entnahme mit sich bringt. Ein gutes Preisniveau definiert sich dabei dadurch, dass der aktuelle Marktpreis über der Preiserwartung der Eigentümer liegt. Zudem wird berücksichtigt, dass bei höherem Preisverhältnis auch dementsprechend mehr Holz entnommen wird. Dies wird über Wahrscheinlichkeitswerte umgesetzt, welche zufallsgesteuert über die Entnahme jeder Waldzelle entscheiden. Eine Aufschlüsselung dieser Wahrscheinlichkeitswerte ist in Tabelle 4.4 zu finden.
- Um bei anhaltend gutem Preisniveau eine zeitnahe (z.B. im Folgejahr) Entnahme derselben Zelle zu verhindern, wird eine Ruhephase für eine durchforstete Zelle von mindesten 5 Jahren definiert;
- Die Endnutzung erfolgt zufällig ab einem Alter von 90–150 Jahren. Die angenommene Obergrenze stellt dabei die letzte Altersangabe der Wüchseriesen von Marschall [62] dar, somit soll auf die Überalterung der Wälder wie sie von Büchsenmeister [10] in seiner Arbeit angesprochen wird, eingegangen werden. Die Endnutzung wird auch durch das vorherrschende Preisniveau beeinflusst, und dies äußert sich in einem Hinauszögern bis der Preis wieder ein “akzeptables“ Niveau erreicht hat;

Abbildung 4.7 zeigt die Umsetzung dieser Entscheidungskriterien des Kleinwaldeigentümers im Bezug auf die Markt-orientierten Szenarien in Form von Pseudocode.

Tabelle 4.4: Zusammenhang zwischen dem Verhältnis aus Marktpreis und Preiserwartung des Kleinwaldes und der Entnahmewahrscheinlichkeit einer Waldzelle.

Preisverhältnis	Entnahmewahrscheinlichkeit [%]
> 1.2	100
1.1 – 1.2	70
1.05 – 1.1	50
1.025 – 1.05	40
0.975 – 1.025	30
0.95 – 0.975	20

```

Data: Untersuchte Waldzelle
Result: Waldzelle entnehmbar oder nicht
;
if Holz verkaufen → OK oder Entnahmezeitpunkt → OK then
  //Entnahme bei Geldbedarf; if Entnahmezeitpunkt → OK then
    | if Jahre seit letzter Entnahme → OK then
    | | Waldzelle erntbar → Entnahme oder Endnutzung;
    | end
  else
    | if Endnutzungsalter → OK und Verkaufspreis → OK then
    | | Endnutzung;
    | else
    | | if Preisverhältnis → OK und Zeit seit letzter Entnahme → OK then
    | | | Entnahmewahrscheinlichkeit → OK Vor- und Zwischennutzung;
    | | end
    | end
  end
else
  | Entnahme für Eigennutzung;
end

```

Abbildung 4.7: Auswahlkriterien der von Seiten des Kleinwaldes zur Ernte freigegebenen Waldzellen in den Markt-orientierten Szenarien in Form von Pseudocode.

Der Großwald, Betriebe und ÖBf stellt jährlich eine regelmäßige Menge an Holz. Aus diesem Grund sind die hier verwendeten Auswahlkriterien stark an jene der Ressourcen-orientierten Auswahl (siehe 4.7.1, angelehnt).

Der **Großwald, Betriebe und ÖBf** verwenden die in Tabelle 4.5 gelisteten Auswahlkriterien. Einziger Unterschied findet sich in der Annahme bezüglich des Entnahmeabstandes. Da Betriebe und ÖBf größere forsttechnische Ressourcen zu Verfügung stehen wird ihr Entnahmeverhalten aggressi-

ver modelliert.

Tabelle 4.5: Modellierte Waldzellen-Auswahlkriterien der Eigentümer für Großwald, Betrieb und ÖBf.

Parameter	Wertebereich	zufällig/konstant
Entnahmeabstand Großwald / Betriebe u. ÖBf (Jahre)	6–9 / 5–7	zufällig
unteres Entnahmealter (Jahre) ^a		konstant
<i>Nadel</i>	20	
<i>Laub</i>	30	
Endnutzungsalter (Jahre) ^a		zufällig
<i>Nadel</i>	80–120	
<i>Laub</i>	60–100	

^a Gilt auch für die dementsprechenden Mischvarianten.

4.7.3 Integration des Waldentwicklungsplans

Sowohl beim Ressourcen- als auch beim Markt-orientierten Szenario besteht die Möglichkeit den Waldentwicklungsplan (WEP) in den Holzauswahlprozess mit einfließen zu lassen. Der WEP ist Teilbereich der forstlichen Raumplanung und legt die Waldfunktion laut Artikel 1 des Forstgesetzes 1975 [24] fest. Der Wald kann demnach laut forstgesetzlicher Definition folgende Leitfunktionen aufweisen [11]:

- *Nutzfunktion*: wirtschaftliche nachhaltige Produktion des Rohstoffes “Holz“;
- *Schutzfunktion*: Standortschutzwirkung zur Reduktion der Wirkung von abtragenden Kräften wie Wind, Wasser und Schwerkraft. Objektschutzwirkung zum Schutz von Siedlungen vor Naturkatastrophen und schädigenden Umwelteinflüssen wie z.B. Lärm- und Lichtschutz.
- *Wohlfahrtsfunktion*: Ausgleich des Klima- und Wasserhaushaltes, insbesondere Reinigung und Erneuerung von Wasser und Luft.
- *Erholungsfunktion*: Wirkung des Waldes auf Besucher als Erholungsraum.

Im Zusammenhang mit dem WEP können somit für die verschiedenen Waldfunktionen folgende Überlegungen im Bezug auf die laufende Nutzung und Pflege sowie die Wiederbewaldung in Folge von Kahlschlägen angestellt werden. Laut Artikel 12 [24] des Forstgesetzes, muss die Nutzung des Waldes unter Berücksichtigung langfristiger forstwirtschaftlicher Ziele erfolgen. Zur Wiederbewaldung äußert sich das Forstgesetz Artikel 13 [24] so: Eine Wiederbewaldung muss bis zum Ende des dritten Jahres nach Entstehung der Kahlfläche erfolgen. Durch verschiedene Aufschieb-Bedingungen kann sich dieser Zeitraum auf bis zu 8–10 Jahre ausweiten. Für den Schutzwald ist eine Wiederbewaldung binnen 3 Jahren Pflicht. Diese gesetzlichen Vorgaben werden im Modell folgendermaßen berücksichtigt:

- Nutzwald:

- Im Falle eines Kahlschlags in Folge der Endnutzung erfolgt für den Nutzwald die Einführung einer Brachzeit im Ausmaß von 1–8 Jahren. Umgesetzt wird der Zeitraum der Brachzeit bei jedem Kahlschlag per Zufallsgenerator im definierten Wertebereich ermittelt.
- Schutz-, Wohlfahrts- und Erholungswald:
 - Die Nutzung des Schutz-, Wohlfahrts- und Erholungswaldes erfolgt weniger intensiv als des Nutzwaldes. Das heißt, es werden hier längere (9–10 Jahre) Erholungsphasen bis zur nächsten Entnahme eingeführt.
 - Im Wiederbewaldungsfall werden auch für Schutz-, Wohlfahrts- und Erholungswald verschiedene Brachzeiten modelliert. Diese sollen die Zeiträume bis zur natürlichen oder forsttechnischen Wiederbewaldung nachbilden. Aus Vereinfachungsgründen wird auf die Wertziffern des WEP zurückgegriffen. Die Wertigkeit dieser Ziffer bringt das öffentliche Interesse an der jeweiligen Waldwirkung zum Ausdruck und kann als Maßzahl zur Vermeidung oder Reduktion von Gefahren für Leib und Leben, die volkswirtschaftliche Bedeutung der Waldwirkung sowie die Besucherfrequenz herangezogen werden [11]. Tabelle 4.6 zeigt die modellierten Brachzeiten in Zusammenhang mit der jeweiligen Leitfunktion des Waldes und der dazugehörigen Wertziffer nach einem erfolgten Kahlschlag im Detail. Auch hier erfolgt die Anbringung der Brachzeiten in Form eines Zufallswertes im definierten Wertebereich.

Tabelle 4.6: Modelliertes Ausmaß der Brachzeiten nach einem Kahlschlag für Waldzellen mit Schutz-, Wohlfahrts- und Erholungsfunktion bezogen auf die im WEP vorliegenden Wertziffern.

Wertziffer	Brachzeit [Jahre] %	
	Schutzwald	Erholungs- und Wohlfahrtswald
3	0–1	0–3
2	0–2	0–4
1	0–3	0–5

4.8 ERNTEN

Beim Ernten greift jeder Holzagent über die vom Eigentümer erstellten Erntelisten auf die Waldzellen zu und arbeitet diese je nach Szenario in einem bestimmten Schema ab. Grundsätzlich gilt, dass so viele Waldzellen besucht werden, bis der Bedarf des betreuten Biomasseheizwerks erfüllt ist. Abbildung 4.8 erläutert die Umsetzung dieses Erntevorgangs durch ein UML-Ablaufdiagramm. Der Forstagent durchläuft die Eigentümer-Liste und führt die Ernteliste jedes Eigentümers zu einer Gesamtliste zusammen. Auf Basis eines Kostenrasters (jedes Biomasseheizwerk hat seinen eigenen) erfolgt eine Sortierung der Liste im Bezug auf die auftretende Transportdistanz. Der Kostenraster bestimmt dabei die Distanz vom Biomasseheizwerk zur betrachteten Waldzelle auf Basis des Straßennetzes und der Hangneigung (siehe Abschnitt 5.3.2).

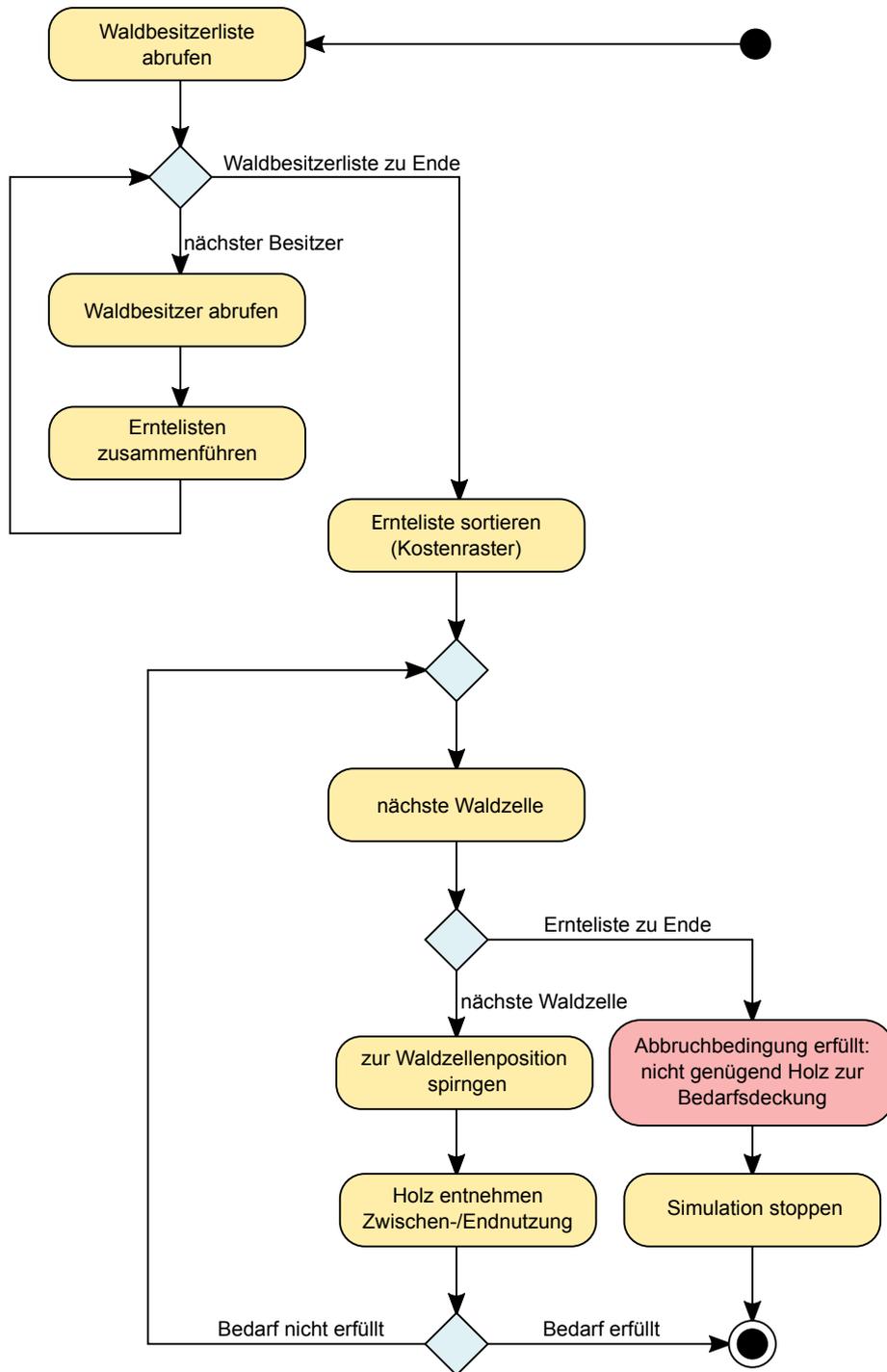


Abbildung 4.8: Schematischer Ablauf des Ernte-Prozesses.

Kogler & Müller [48] beschreiben in ihrer Arbeit, dass “kleine“ Biomasseheizwerke ihr Holz aus der nahen Umgebung beziehen. Dem gegenüber stehen die “großen“ Biomasseheizwerke, die auf Basis einer Kostennutzen-Rechnung auch weitere Transportwege in Kauf nehmen. Um dieses Verhalten nachzubilden, wird die oben beschriebene Sortierfunktion für “große“ Biomasseheizwerke (>15.000 fm Bedarf) unter Berücksichtigung des Verhältnisses aus verfügbarer Holzmenge zu der dafür aufgewendeten Transportdistanz erweitert. Die Unterscheidung zwischen großen und kleinen Kraftwerken wird anhand der zur Verfügung stehenden Daten (siehe Tabelle 5.1 in Abschnitt 5.2.1) abgeleitet, da einerseits 15.000 das arithmetische Mittel der Bedarfswerte darstellt und andererseits ein klarer Sprung (von 12.000 auf 75.000 fm) im Wertebereich feststellbar ist.

Jeder Agent erstellt seine eigene sortierte Ernteliste und arbeitet diese dann iterativ ab, bis der Bedarf des Biomasseheizwerks erfüllt ist. Der Agent springt auf die Position der Waldzelle und entnimmt die benötigte Holzmenge. Da eben mehrere Agenten parallel diese Aktionen ausführen, kommt es zu Konkurrenzsituationen, die auf dem “*First come first serve*“-Prinzip basieren. Das bedeutet: Entnimmt ein Agent nicht die gesamte zur Entnahme ausgewiesene Holzmenge einer Waldzelle, bleibt die Restmenge für den nächsten übrig.

Der Ernteverlust bestimmt den Anteil der im Zuge des Ernteprozesses im Wald zurückgebliebenen Holzreste wie z.B. Baumkronen, Reisig und minderwertige Stammteile. Diese als Schlagabraum bezeichneten Holzresten belaufen sich bei Nadelhölzern zwischen 5–10 % und bei Laubhölzern 10–15 % [34]. Der Anteil für Fernwärme, der nicht für die Rundholz-, Platten-, Papierindustrie usw. vorgesehen, ist wird aus der Literatur abgeleitet und wird für Kärnten mit einem Wert von 6,5 % angegeben [3].

Für Österreich bieten sich grundsätzlich der Kahlschlagbetrieb, der Naturverjüngungsbetrieb und Formen der Einzelstammnutzung an. Der Einfluss auf den laufenden Zuwachs dieser Betriebsformen wird schematisch in Abbildung 4.9 dargestellt. Beim Kahlschlag 4.9a wird der laufende Zuwachs unterbrochen. Bei den Naturverjüngungsformen 4.9b wird dieser als “Zuwachsdelle“ bezeichnete Abfall im Zuwachs abgeschwächt. Der Plenterwald 4.9c kann den maximalen Zuwachs der anderen beiden Betriebsarten nicht aufbringen. Er hält aber dafür ein hohes Zuwachsniveau auf Dauer [91].

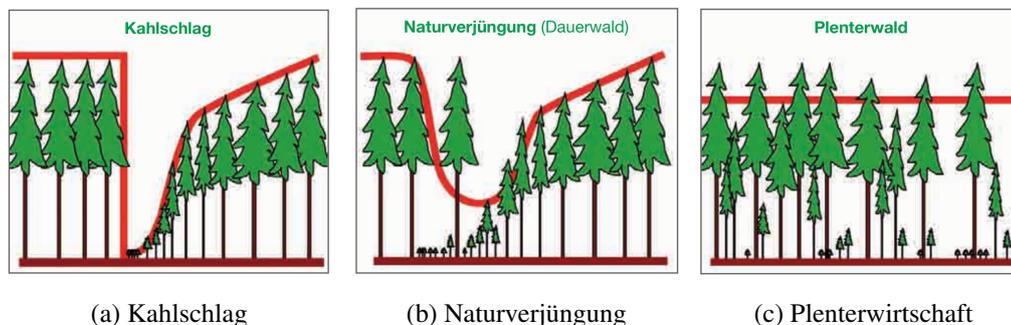


Abbildung 4.9: Betriebsarten des Waldes mit in Rot dargestellter Produktionsverlustlinie (Quelle: Weinfurter [91]).

Bei der Betriebsart wird für das Modell der Kahlschlag verwendet, wobei bei der Entnahme des Holzes folgende zwei Fälle zu unterscheiden sind:

- Durchforstung (Zwischennutzung): nicht der gesamte Vorrat wird zur Bedarfsdeckung herangezogen. Als empirischer Wert wird für bei einer Entnahme 19,7 % des Vorrats angenom-

men. Dieser angenommene Wert kann über durchschnittliche Entnahmemengen, welche in den Hilfstafeln von Marschall [62] genannt sind, bestätigt werden.

- Endnutzung: in Form eines Femelschlags, Saumschlags, Kahlhiebs, o. ä.. Im Zuge der Endnutzung wird mit nachfolgender Neubepflanzung der gesamte Vorrat entnommen.

Die zuletzt resultierende Menge an Hackschnitzeln, die bei einem Erntevorgang einer Waldzelle zustande kommt, ergibt sich nach dem Abzug von Ernteverlusten und dem Holzanteil für nicht-thermische Energiegewinnung. Bei der Bestimmung der Bedarfsdeckung wird des Weiteren ein Brennwertfaktor miteinbezogen. Der Brennwertfaktor (siehe Tabelle 4.7) bestimmt über das Ausmaß der Bedarfsdeckung für die vorliegenden Holzarten. Die BFW [5] gibt für Hackgut aus Buchenholz einen Heizwert von 840–1080 kWh_{sr}m an. Jener für Fichte liegt rund ein Drittel darunter, deshalb wird bei der Bedarfsdeckung der Faktor 1,33 für Buche bzw. 1,0 für Fichte eingesetzt. Für die Mischvarianten werden diese Werte nach dem 70 zu 30-Verhältnis interpoliert. Das heißt die gleiche Menge an Hackschnitzeln aus Buchenholz deckt im Gegensatz zu Fichte den Bedarf um den Faktor 1,33 besser.

Tabelle 4.7: Heizwert-Faktor bezogen auf den Heizwert den Waldtyp/Holzarten

Waldtyp ^a	Heizwert [kWh _{sr} m]	Brennwertfaktor
Nadelwald (Fichte)	550–710	1.0
Nadel-dominiertes Mischwald		1.1
Laub-dominiertes Mischwald		1.23
Laubwald (Buche)	840–1080	1.33

^a Waldtypeneinteilung basierend auf den Ausgangswalddaten (siehe Abschnitt 5.1.1).

4.9 WALDWACHSTUM

Der forstliche Standort und der daraus in weiterer Folge resultierende Zuwachs wird im Wesentlichen von Grundgestein, Boden, Klima, Wasserhaushalt und Geländeform bestimmt. Seehöhe, Hangneigung, Hanglage und Exposition bilden in diesem Zusammenhang die ausschlaggebenden Einflussfaktoren [91].

Moderne Bestands-Wachstumsmodelle basieren in der Regel auf einer Einzelbaum-Modellierungen wie sie z.B. von Hasenauer [35] vorgestellt wird. Auf Grund der fehlenden Einzelbauminformation bzw. des unangebrachten Maßstabs wird das Waldwachstum flächenhaft auf der Basis des Wuchsreihen-Konzeptes durchgeführt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass sich junger Bestand genau gleich entwickeln wird wie ein auf gleicher Bonität stockender Altbestand und weiteres auch die gleichen Entwicklungsphasen im Laufe seines Wachstums durchwandert. Eine Änderung des Standort-bedingten Einflusses auf den Wachstumsgang, verursacht etwa durch Wechselwirkungen zwischen Baumartenmischung und Bodenqualität, bleibt unberücksichtigt [47].

Die ÖWI 2007-09 [74] nennt einen durchschnittlichen jährlichen Zuwachs von 10,1 vfm_{ha}. Außerdem ist dieser zu entnehmen, dass Fichte bzw. Buche die jeweiligen dominierenden Waldtypen für Nadel- bzw. Laubwald sind. Da die vorliegenden Datenbasis nur 4 Waldtypen vorgibt, wird der Zuwachs für Fichte bzw. Rotbuche exemplarisch für Nadel- bzw. Laubwald eingesetzt. Die zwei Mischvarianten werden auf Grund mangelnder Detailinformationen modellhaft mit einem Mischverhältnis von 70 %

zu 30 % für den dominierenden Waldtyp angenommen. Die Zuwachswerte werden dementsprechend interpoliert und sind in Tabelle 4.8 abgebildet. Über die Ähnlichkeit im mittleren Ertragsniveau wird eine Verbindung zur Ertragsklasse in den ‘‘Hilfstafeln für die Forsteinrichtung‘‘ von Marshall [62] hergestellt. Die Variante über Ertragstafeln bietet sich im Kontext dieses Projektes gut an, da die Prognoseergebnisse als Mittel- bzw. Summenwerte pro Flächeneinheit angegeben werden und die einmal bestimmte Bonität als Konstante für die gesamte Lebensdauer betrachtet wird [35, 46]. Somit kann auf einfache Weise von einem durchschnittlichen Zuwachs pro Jahr auf den Gesamtzuwachs über den gesamten Bewirtschaftungs-Zeitraum geschlossen werden.

Tabelle 4.8: Durchschnittliche jährliche Zuwachswerte bezogen auf die in der Datenbasis vorliegenden Waldtypen.

Waldtyp ^a		Zuwachs[vfm/ha]
Laubwald	100 % Buche	9.3
laubdominierter Mischwald	70 % Buche, 30 % Fichte	10.4
nadeldominierter Mischwald	70 % Fichte, 30 % Buche	11.8
Nadelwald	100 % Fichte	12.9

^a Waldtypeneinteilung basierend auf den Ausgangswalddaten (siehe Abschnitt 5.1.1).

Ähnlich wie bei Scholz et. al. [81] wird auch hier die Seehöhe als Einflussfaktor für das Wachstum herangezogen. Die Modellierung baut hierbei auf eine Höhenstufen-basierte Methode. Tabelle 4.9 listet die vorliegende Höhenstufeneinteilung für Österreich auf. Die angeführten Höhenwerte sind allerdings eher als Rahmenwerte anzusehen, da sich diese je nach lokalen Standortbedingungen ändern können. Für praktische Zwecke, wie eben die Bestimmung des Zuwachses, werden diese Höhenstufen in sogenannten Höhengürteln zusammengefasst [46].

Da der Fokus des Projektes nicht auf der Umsetzung eines Wachstumsmodells liegt, wird aus Vereinfachungsgründen auf die Einteilung in die verschiedenen Wuchsgebiete (siehe Kilian, Müller & Starlinger [46]) und somit sich ändernde Höhenstufengrenzen verzichtet. Die Grenzen der 3 Höhengürtel werden, so wie sie in Tabelle 4.9 angeführt sind angenommen. Die Tieflage umfasst die kolline und submontane Stufe bis zu einer Höhe von 700 m. Von 700 m bis 1700 m findet sich die Mittellage mit der tief-, mittel-, und hochmontanen Höhenstufe, und ab 1700 m ist die Hochlage (tief- und hochsubalpine Höhenstufe) definiert.

Tabelle 4.9: Gliederungsübersicht der in Höhengürtel zusammengefassten Höhenstufen für Österreich. (Quelle: Kilian, Müller & Starlinger [46])

Höhengürtel	Höhenstufe	
Tieflage	kollin	< 400 m
	submontan	400 – 700 m
Mittellage	tiefmontan	700 – 1100 m
	mittelmontan	1100 – 1400 m
	hochmontan	1400 – 1700 m
Hochlage	tiefsubalpin	1700 – 1950 m
	hochsubalpin	> 1950 m

Im nächsten Schritt gilt es für die Höhengürtel passende Ertragsreihen im Werk von Marschall [62] zu finden. Abbildung 4.10a zeigt, dass auf Basis der Höhenlagen für Fichte als repräsentative Wuchsreihen jene für “Fichte Bruck Ertragsklasse (Ek) 10“ für Tieflagen und “Fichte Hochgebirge Ek 10“ für Hochlagen ausgewählt wird. Für Mittellagen liegt keine vor, und somit muss diese interpoliert werden. Für Buche wird auf die adaptierten Zuwachsreihen für Tirol [21] zurückgegriffen. Diese Wertereihen werden für den Höhengürtel Tieflagen angenommen. Die Wuchsreihen für Mittel- bzw. Hochlagen werden arbiträr, bezogen auf ein Verbreitungsgebiet bis 1000 m Seehöhe, mit $\frac{2}{3}$ bzw. $\frac{1}{3}$ aus den Werten für Tieflagen abgeleitet. Für die beiden Mischszenarios, Nadel- bzw. Laubmischwald wird, wie oben bereits erwähnt, von einem 70 % zu 30 % je nach dominierendem Waldtyp ausgegangen und die Zuwachswerte dementsprechend interpoliert. Allgemein zeigt sich bei beiden Wuchsreihen, wie in Abbildung 4.10) dargestellt, bis zum ca. 50 Jahr eine Zunahme des mittleren jährlichen Zuwachses. Mit zunehmenden Alter nimmt in weiterer Folge der Zuwachs immer weiter ab.

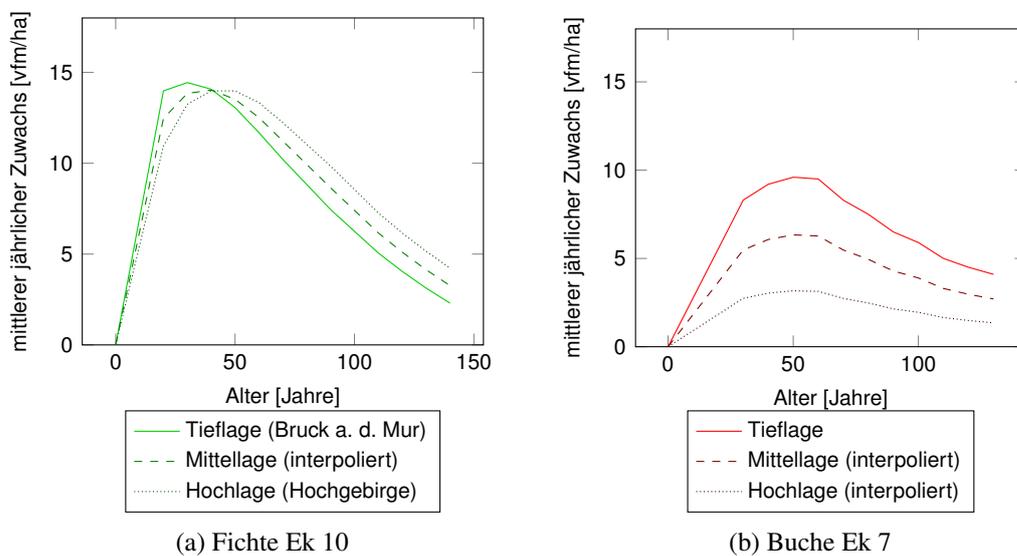


Abbildung 4.10: Durchschnittliche jährliche Zuwachswerte für Buche und Fichte in Tief-, Mittel-, und Hochlagen über den gesamten Bewirtschaftungszeitraum. Entnommen aus den “Hilfstafeln für die Forsteinrichtung“ von Marschall [62].

4.10 MODELL-OUTPUT

Ein wichtiger Teil zur Auswertung des Modells liegt in der Möglichkeit das Modellverhalten in jedem Schritt zu beobachten. Aus diesem Grund erfolgt am Ende jeder iterativen Simulationsrunde eine Ausgabe ausgewählter Beobachtungsgrößen. Wie bei Scholz et. al. [81] lässt sich der Output in folgende zwei Kategorien einteilen:

- **Zeitreihendiagramme**, die in jedem Simulationsschritt aktualisiert werden;
- für jeden *tick* wird eine **Vorratskarte** erstellt und exportiert;

Die Zeitreihendiagramme liefern einen Überblick über die Entwicklung ausgewählter Kenngrößen. Die Vorratskarten-Serien lassen Rückschlüsse über die Ausbildung raumzeitlicher Muster im Bezug auf den Holzvorrat des Untersuchungsgebiet zu.

4.10.1 Zeitreihendiagramme

Die Repast Symphony-Umgebung bringt alle Ressourcen zur Implementierung der Zeitreihendiagramme mit. Die Beobachtungsgrößen können frei mittels *Point and Click*-Environment im Repast-Graphical User Interface (GUI) kombiniert werden und liefern somit in einen visuellen Output des Simulationsverlaufes. Für das Projekt werden folgende Beobachtungsgrößen in Form von solchen Zeitreihendiagrammen aufbereitet:

- Mittlere und maximale jährliche Transportdistanz der einzelnen Biomasseheizwerke;
- Anzahl der jährlichen Erntevorgänge des Agenten;
- Jährlicher Gesamtwuchs des Waldes;
- Durchschnittliches Bestandsalter der Waldzellen und Alter bei der Entnahme/Ernte;
- Verfügbare/Nicht-Verfügbare Holz-Vorratsmenge und Gesamtholzvorrat;
- Angebotene Holzmenge der verschiedenen Betriebsarten und Nachfrage der Biomasseheizwerke;
- Benötigte Holzmenge aus dem Ausland;
- Preisentwicklung: Rundholzpreis, mittlerer Preis, 5-Jahres-Preisniveau, Preiserwartung der Eigentümer;

Zur Weiterverarbeitung der Simulationsergebnisse können die beobachteten Größen auch in Form einer *csv*-Datei exportiert werden.

4.10.2 Ausgabe der Rasterkarten

Neben der Ausgabe in Form von Diagrammen generiert der implementierte Prototyp am Ende jedes Simulationszyklus verschiedene Rasterkarten. Somit können die raumzeitlichen Veränderungen im Bezug auf den Wald besser analysiert und visualisiert werden. Dazu wird der Informationsgehalt der punktförmigen Waldzellen durch eine Vektor/Raster-Transformation in eine Rasterkarte im *GeoTIFF*-Format übertragen. Als Resultat ergibt sich ein Grauwert-Rasterdatensatz mit einer räumlichen Auflösung von 100 m. Wie bereits in Abschnitt 2.5.1 erwähnt, muss hier auf externe GeoTools-Bibliotheken zurückgegriffen werden, da jene, die in *Repast Symphony* integriert sind, keine native Unterstützung für *GeoTIFF* bieten. Folgende Rasterkarten werden in jedem Simulationsschritt generiert und ausgegeben:

- **Vorratskarte:** Darstellung des Holzvorrats jeder Waldzelle in *vm*. Zusätzlich werden alle außer Ertrag stehenden (nicht verfügbaren) Waldzellen mit dem Wert 0 gekennzeichnet.
- **Altersverteilung:** Altersangaben für jede Waldzelle.
- **Verteilung der Erntevorgänge:** In jedem Simulationsschritt wird der Waldzelle beim Erntevorgang die ID des Biomasseheizwerks übergeben. Dadurch ergibt sich eine Verteilung der jährlich besuchten Waldzellen.

4.11 PREISBILDUNG

In den Markt-orientierten Szenarien beginnt jede Simulationsrunde mit der Preisbildung. Diese Holz-Preisentwicklung am Markt wird durch die Weiterführung von Preis-Historien modelliert. Im Zuge der Initialisierung wird die in Listenform vorliegende Preisentwicklungskurve (*csv*-Datei siehe Abschnitt 5.3.4), eingelesen und durch Extrapolation fortgeführt. Das heißt, durch wiederholtes Anhängen des Kurvenverlaufs kann der Preisentwicklungs-Verlauf beliebig lang fortgesetzt werden. Umgesetzt wird dies durch die Bestimmung der Verhältniszahlen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Einträgen der Preis-Historien. Der letzte Eintrag der verwendeten Preis-Historie bildet den Startpreis der Simulation. In weiterer Folge wird die erste Verhältniszahl aus der Liste zur Berechnung des neuen Preisniveaus herangezogen. Darauf folgende Preise ergeben sich durch iteratives Abarbeiten der Preisverhältnisse. Wird das Ende dieser Verhältniszahlen-Liste erreicht, wird wieder von Vorne gestartet und der Kurvenverlauf beginnt auf Basis des aktuellen Preises von neuem. Im Laufe jedes Preisbildungs-Prozesses werden folgenden Größen neu bestimmt:

- Holz-Basispreis: extrapolierter Preis der aus der verwendeten Preis-Historie resultiert;
- 5-jähriges Preisniveau: Mittelwert der Preisentwicklung der vorhergehenden 5 Simulations-schritte/Jahre;
- Mittlerer Preis über den gesamten Simulationszeitraum;

4.12 VALIDIERUNG DES MODELLS

In der Literatur wird die Validierung und Verifizierung des Modells als essentieller Teil von ABM beschrieben Crooks & Heppenstall [17], Macal [55] und Ngo & See [68]. Im Zuge eines Validierungsprozesses werden Informationen und Maßzahlen erarbeitet, die eine Anwendbarkeit des betrachteten Computer-Modells mit einer "zufriedenstellenden" Genauigkeit belegen können [80]. Bezogen auf ABM äußert sich dies in einer Beschreibung, in wie weit das erarbeitete und umgesetzte Modell die reale Welt bzw. die ursprüngliche Zielsetzung approximiert [68]. Zeigler, Praehofer & Kim [95] nennen in diesem Zusammenhang die sog. "*replicative validity*" /angleichende Validität, in dem das Modell mit extern zur Verfügung stehenden Daten verglichen wird.

4.12.1 Problematik der Validierung

Konkret in diesem Fall erweist sich ein Vergleich zu bestehenden Daten als äußerst schwierig, da detaillierte Vergleichsdaten über das Nutzungsverhalten der Eigentümer nicht zur Verfügung stehen. Im Bezug auf die Datengrundlage ist allerdings zu sagen, dass es sich bei Heizwerken auf Biomasse-Basis um ein relativ "neues" Phänomen handelt, welches erst seit den frühen 2000er Jahren an Popularität gewonnen hat [3]. Dies äußert sich anhand in der Ausbau- bzw. Inbetriebnahme-Jahren der im Modell berücksichtigten Heizwerke, beispielsweise Villach 2012 bzw. Völkermarkt 2015. Zusammengefasst gesagt, stehen "Langzeitdaten" aufgrund der Aktualität des Phänomens einfach nicht im benötigten Ausmaß zur Verfügung.

Eine alternative, zur Verfügung stehende Datenbasis bildet die ÖWI [72], welche Detailinformationen zur Holznutzung der verschiedenen Eigentums-Arten bietet. Abstriche müssen hier allerdings in der Stetigkeit der Daten gemacht werden da die ÖWI nur in 10-jährigen Abständen (1994–96, 2000–02 und 2007–09) durchgeführt wird und die aktuellste Studie aus den Jahren 2007–09 da-

tiert. Da die ÖWI aber die einzige brauchbare Datenbasis darstellt, wird diese auch zur Validierung herangezogen.

4.12.2 Validierung des Ressourcen-orientierten Ansatzes

Die Validierung des Ressourcen-orientierten Ansatzes beruht rein auf dem Vergleich der jährlichen Gesamterntemenge. Da die Eigentümer keine individuellen Entscheidungen treffen, ist auch kein Abgleich der Nutzungsstatistiken der verschiedenen Eigentümer-Arten notwendig. Bezogen auf die ÖWI 2007–09 wird eine jährliche Nutzmenge von 2,867 Mio. fm angegeben. Die Modellierung sieht bei einem Ressourcen-orientierten Ansatz bei Simulationsstart eine Nutzmenge von 2,756 Mio. fm vor. Dies entspricht einer Abweichung von 4,1 %.

4.12.3 Validierung des Markt-orientierten Ansatzes

Das Modell verwendet für die Nachbildung einer “realistischen“ Holzpreisentwicklung eine Extrapolation der Holzpreisentwicklung von 1994–2016. Unter der Annahme, dass sich die modellierten Eigentümer bei einer gleichbleibenden Holzpreisentwicklung ähnlich verhalten, ist es möglich die Erntemengen der ÖWI mit den simulierten Werten des Modells zu vergleichen. Wie in Abbildung 4.11 ersichtlich werden die Holz-Nutzungsstatistiken in den zur Verfügung stehenden ÖWI Zeitslots (1994–96, 2000–02 und 2007–09) mit den Ergebnissen der Simulationen in den entsprechenden Simulationszyklen verglichen. Da eine Vergleichbarkeit auf Absolutzahlen aufgrund gesteigerter Erntemenge nicht möglich ist, wird der Vergleich auf Basis von relativen Ernteanteilen der 4 Eigentümer-Arten vollzogen. Des Weiteren wird für die Validierung der Mittelwert aus 10 Simulationsdurchläufen verwendet, um eventuelle Ausreißer eines Einzelsimulationsdurchlaufes zu umgehen.

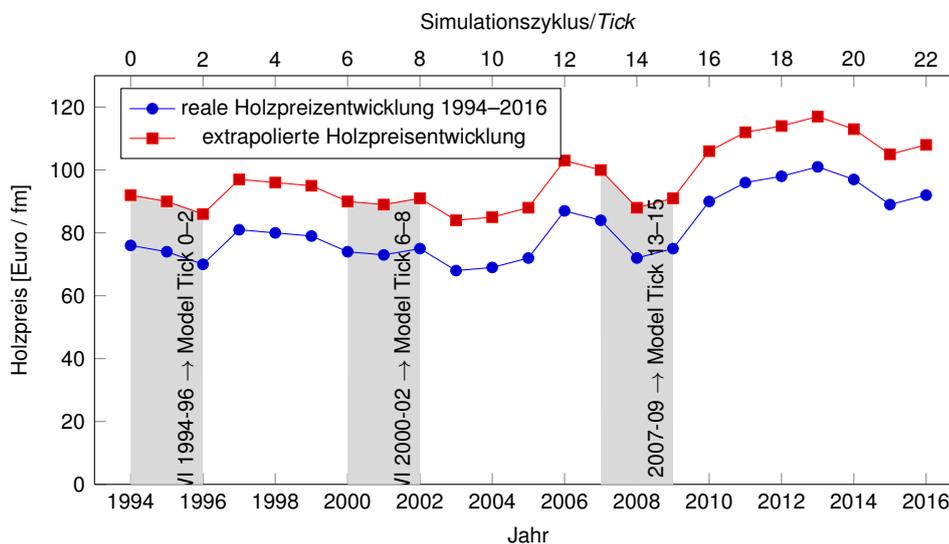


Abbildung 4.11: Schematische Darstellung des Validierungsansatzes. Durch die extrapolierte und somit ähnliche Preisentwicklung im Modell und der verwendeten Preishistorie kann in den ÖWI-Zeitslots verglichen werden.

Abbildung 4.12 zeigt die Ergebnisse des Validierungsprozesses. Es werden hier die relativen Nutzungsanteile der 4 Eigentümer-Arten der ÖWI-Zeitslots mit den entsprechenden Simulation-Zyklen der Simulation verglichen. Wie in Abbildung 4.13 ersichtlich weicht die Zusammensetzung der Simulation durchschnittlich um $\pm 1,8\%$ von den Vergleichsdaten der ÖWI ab. Die größte Abweichungen können im Vergleich zur ÖWI 1994–96 mit $-3,9\%$ beim Kleinwald bzw. zur ÖWI 2000–02 mit $-4,1\%$ beim Großwald festgestellt werden. Bezogen auf den durchschnittlichen Fehler von $\pm 3,9\%$ in den Stichproben-basierten Erhebung der ÖWI halten sich die beobachtete Abweichungen innerhalb dieses Rahmens. Die beobachteten Divergenzen können außerdem nicht systematisch einer Klasse zugeordnet werden, sondern verschieben sich in den drei Beobachtungsslots und treten somit zufällig auf. Da die Modellierung rein makroskopische Phänomene abbilden soll, ist davon auszugehen, dass die erreichte Genauigkeit weitgehend ausreicht.

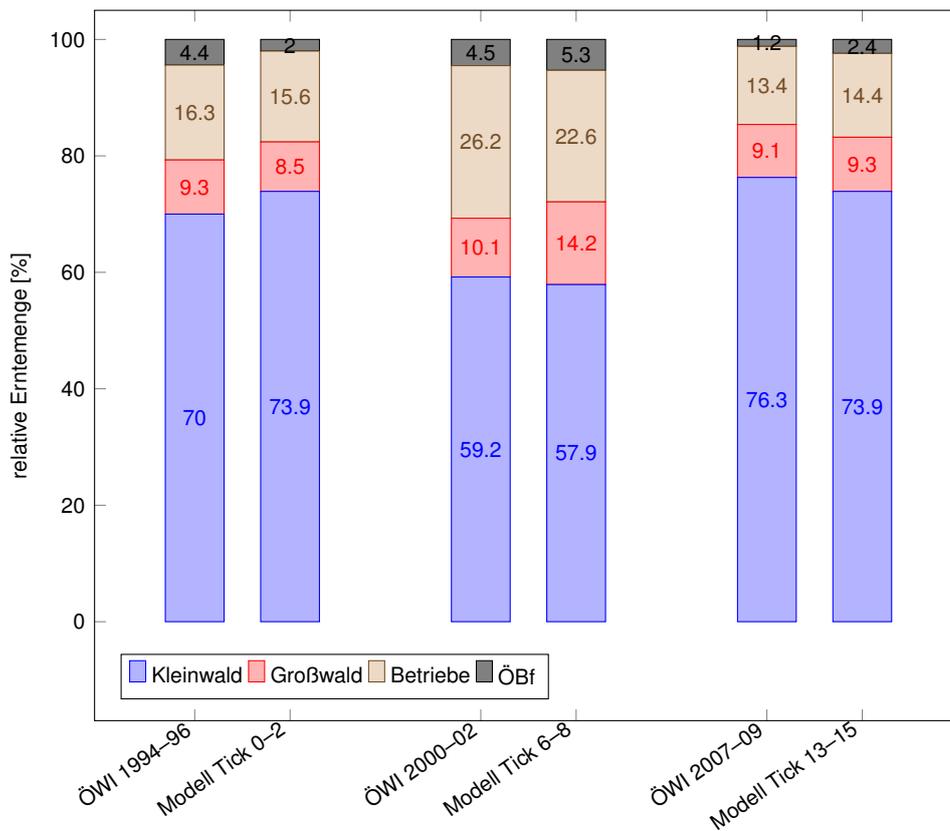


Abbildung 4.12: Vergleich des relativen Nutzungsverhaltens der verschiedenen Eigentümer-Arten zwischen ÖWI und der Simulation.

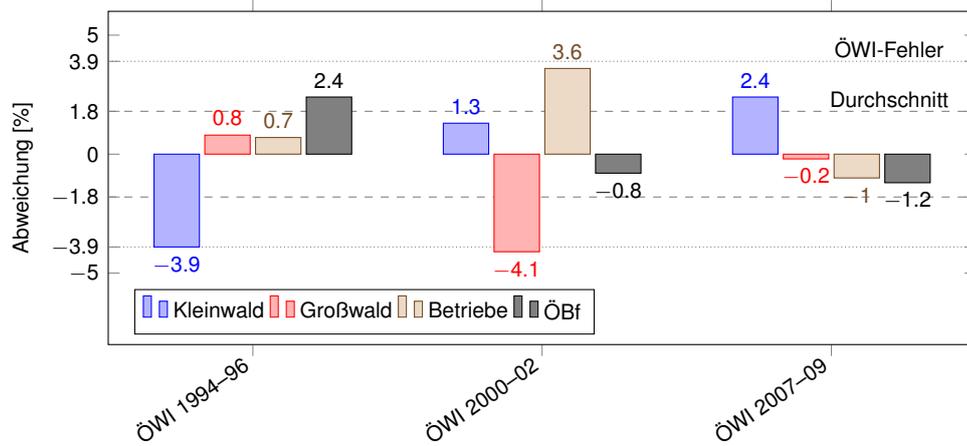


Abbildung 4.13: Abweichung der simulierten Werte im Vergleich zu den dementsprechenden ÖWI-Zeitslots (durchschnittlicher ÖWI-Fehler: $\pm 3,9\%$). Eine durchschnittliche Abweichung von $\pm 1,8\%$ kann festgestellt werden.

DATENGRUNDLAGE

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über das Untersuchungsgebiet und die verwendeten Daten. Die Datengrundlage kann grundsätzlich in Raster- 5.1 und Vektordaten 5.2 eingeteilt werden. Die Datenbasis reicht von Walddaten, Höhenmodell bis hin zu Straßennetzen und Waldentwicklungsplan. Im hinteren Teil (Abschnitt 5.3) werden die durchgeführten Schritte der Datenvorverarbeitung vorgestellt. Hier geht es um die Umsetzung des Walddatensatzes, der Kostenraster sowie der nachgebildeten Eigentumverhältnisse.

5.1 RASTERDATEN

5.1.1 Walddaten

Zur Beschreibung des Waldes kommt eine Waldmaske, eine Vorratskarte und eine Waldtypenkarte in Form von Rasterdaten zum Einsatz. Die Datensätze stehen im *img*-Format zur Verfügung und weisen eine räumliche Auflösung von 30 m auf. Als Referenzsystem kommt das MGI Lambert Conformal Conic (EPSG: 31287) zum Einsatz.

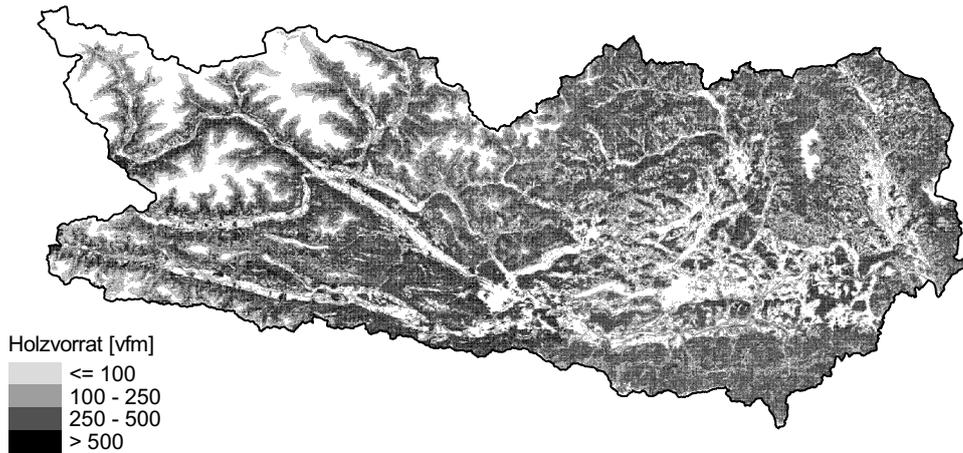
- **Waldmaske:** Grenzt Wald von Nicht-Wald ab. Laut Definition des Forstgesetzes 1975 [24]. Der 1=Wald / 0=Nicht-Wald.
- **Vorratskarte:** Die Werte der Zellen geben die Vorratsfestmeter (vfm) → Schaffholz in m³ an.
- **Waldtypenkarte:** Gibt den Waldtyp der Zellen an. Hier sind folgende Werte definiert: 0=NO-DATA, 1=Laubwald, 2=laubdominierter Mischwald, 3=nadeldominierter Mischwald, 4=Nadelwald, 5=Schläge.

Diese Daten kommen auch in der Arbeit von Scholz et. al. [81] zum Einsatz und wurden im Juli 2013 von Herrn DI Bruno Regner, Mitarbeiter des BFW, zur Verfügung gestellt.

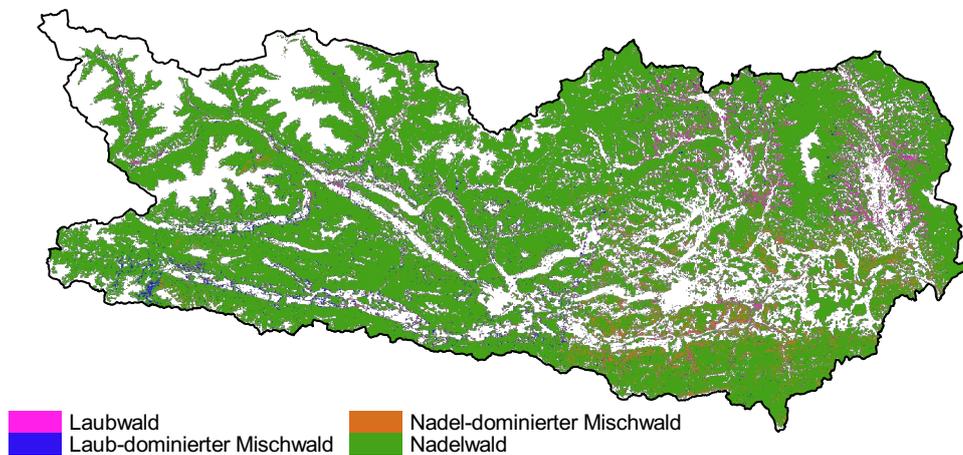
5.1.2 Digitales Geländemodell

Das digitale Geländemodell DGM liefert flächendeckend Höhenangaben für das Bundesland Kärnten und ist über die Open-Data Plattform data.gv.at [18] zugänglich.¹⁵ Die Daten weisen eine räumliche Auflösung von 10 m auf und wurden aus Airborn Laserscanning (ALS) Daten abgeleitet. Das DGM liegt im Format GeoTIFF vor, und die enthaltene Projektionsdatei weist ein Referenzsystem des militärgeografischen Instituts MGI mit einer Lambert Projektion (European Petroleum Survey Group (EPSG): 31287) auf [18].

¹⁵DGM Österreich downloaden unter: <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/d88a1246-9684-480b-a480-ff63286b35b7>



(a) Datenbasis für den Holzvorrat im Untersuchungsgebiet.



(b) Einteilung in die 4 Waldtypen.

Abbildung 5.1: Datengrundlage für den Wald.

5.2 VEKTORDATEN

5.2.1 Biomasseheizwerke

Die Datengrundlage für Biomasseheizwerke besteht aus dem Standort der Biomasseheizwerke und deren jährlichen Biomasse-Bedarf. Die Daten basieren auf der von Scholz et. al. [81] durchgeführten Datenakquisition und konnten im Zuge dieses Projektes noch erweitert werden. Die Erhebung des Datensatzes erfolgt händisch, liegt im Esri-Shape Format vor und nutzt das World Geodetic System (WGS)-1984 Referenzsystem.

Tabelle 5.1 zeigt die 18 berücksichtigten Biomasseheizwerke und deren jährlichen Bedarf an Hackgut. Der Gesamtbedarf beläuft sich dabei auf 239.400 fm. Die Informationen über den Bedarf der anderen kärntner Heizkraftwerke, die im Bericht der Arbeitsplattform für Holz und Wald [3] genannt sind, können aus Datenschutzgründen nicht berücksichtigt werden.



Abbildung 5.2: Räumliche Verteilung der erfassten Biomasseheizwerke für Kärnten.

5.2.2 Waldentwicklungsplan

Der Waldentwicklungsplan (WEP) Kärnten liefert Informationen zur flächenhaften Verteilung der Waldfunktion (Forstgesetz 1975 [24] in der geltenden Fassung). Der Datensatz ist auf der Open-Data Plattform data.gv.at [18] downloadbar.¹⁶ Der Datensatz liegt im Esri shape-Format vor und nutzt das MGI Gauß Krüger (GK) mit Bezugsmeridian M31 (EPSG: 31258) Referenzsystem.

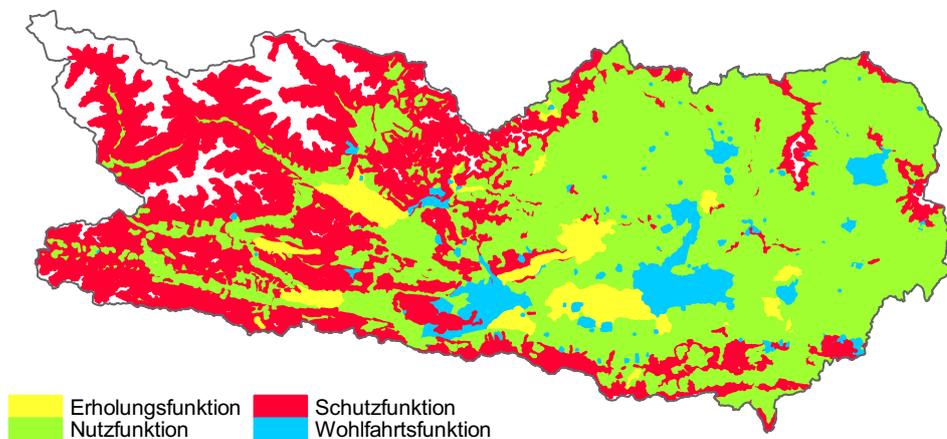


Abbildung 5.3: Räumliche Verteilung der im Forstgesetz 1975 festgelegten Waldfunktionen im Untersuchungsgebiet auf Basis des Waldentwicklungsplans.

¹⁶WEP Kärnten downloaden unter: <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/66b52ac2-de69-44b3-a2f8-344acee36ebc>

Tabelle 5.1: Erfasste Heizkraftwerke geordnet nach deren jährlichem Bedarf.

Biomasseheizwerk	Bedarf [fm]
Biomasse-Biomasseheizwerk St. Agathen/Villach - Kelag Wärme GmbH	91000
Stadtwerke Klagenfurt AG - Fernheizkraftwerk am Südring	75000
Biowärme Bad Kleinkirchheim reg.Gen.mbH	12000
Regionalwärmegruppe - Krumpendorf	12000 ^{ab}
Biomasse-Heizwerk Völkermarkt - Kelag Wärme GmbH	9500 ^a
Fernwärmeversorgung Eisenkappel GmbH Nfg KG	6500
Biowärme Bleiburg GmbH	4000
Biowärme Treffen reg.Gen.mbH	4000
KWH Liebenfels Kraft & Wärme aus Holz GmbH	3800 ^c
MS Fernwärme Moosburg GmbH	3400
Biowärme Liefergemeinschaft St. Margarethen reg.GenmbH	3300 ^a
Hasslacher Fernwärme GmbH & CoKG - Sachsenburg	3000
Biomasse-Heizwerk Millstatt - HSH Nahwärme & Photovoltaik GmbH	2500 ^a
Gurker Bio-Fernwärme GmbH	2200 ^a
Hasslacher Fernwärme GmbH & CoKG - Hermagor	2200 ^a
Fernwärme Winklern - Fürstauer Energie GmbH	1800 ^a
Saubere Wärme GmbH - Biomasseheizwerk St. Kanzian	1700 ^a
Biowärme Weissenstein GesmbH & Co.KEG	1500
Gesamt	239400

^a Neu erfasste Biomasseheizwerke im Vergleich zu Scholz et. al. [81].

^b Stellvertretend für alle Standorte der Regionalwärmegruppe in der Gegend rund um den Wörthersee: Köttmanskendorf, Maria Rain, Feistritz im Rosental, Grafenstein und Keutschach.

^c Stellvertretend für die Standorte Liebenfels, Strassburg und St. Andrä.

5.2.3 Straßendatensatz

Der Straßendatensatz der Graphenintegrations Plattform (GIP) [30] ist das intermodale, amtliche Verkehrsreferenzsystem Österreichs und steht über die Open-Data Plattform data.gv.at [18] zur Verfügung.¹⁷ Er liegt im Esri-Shape Format vor und verwendet das WGS-1984 Referenzsystem (EPSG: 4326). Der Datensatz enthält – wie in der Dokumentation [27] detailliert beschrieben – noch nicht alle Subnetze und wird alle 2 Monate aktualisiert werden, wobei eine sukzessive Vervollständigung vorgesehen ist [18].

¹⁷Intermodales Verkehrsreferenzsystem Österreich (GIP) downloaden unter: <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/3fefc838-791d-4dde-975b-a4131a54e7c5>

5.2.4 Landesgrenze des Bundeslands Kärnten

Die Landesgrenze Kärnten liegt im Esri-Shape Format vor und ist online über die Datenplattform data.gv.at [18] abrufbar¹⁸. Als Bezugssystem ist hier das MGI GK mit Bezugsmeridian M31 (EPSG: 31258) im Einsatz.

5.3 DATENVORVERARBEITUNG

Im Zuge der Datenvorverarbeitung wird die vorhandene Datenbasis für den Einsatz im Zusammenhang mit dem Repast Symphony aufbereitet. Ein wichtiger Punkt ist dabei der Einsatz eines einheitlichen Referenzsystems, da Repast keine native Unterstützung für “on-the-fly“-Transformationen aufweist. Als Referenzsystem wird das MGI GK mit Bezugsmeridian M31 (EPSG: 31258) genommen, da hier auf Koordinaten im metrischen System des Bundesmeldenetzes zurückgegriffen werden kann. Als Datenformate werden *Esri-shapefile* für Vektordaten und *tiff* für Rasterdaten verwendet.

5.3.1 Erstellen des Walddatensatzes

Der Walddatensatz liefert Informationen über Vorrat, Seehöhe, Waldtyp, Funktion usw., wobei zur Modellierung des Alters die Tabellen von Marschall [62] herangezogen werden. Aus den zur Verfügung stehenden Raster- und Vektordaten (siehe Abbildung 5.4) wird ein Punktdatensatz generiert, der den Wald als 100x100m große Waldzellen darstellt. In einem ersten Schritt wird auf Basis der Waldmaske ein Punkt-Feature Datensatz erstellt. Auf diesen werden in weiterer Folge die Informationen der Waldtypenkarte und der Vorratskarte übertragen. In einem weiteren Schritt werden die Höhenwerte des DGM sowie daraus berechnete Werte der Hangneigung integriert. Im nächsten Schritt gilt es, Informationen des Waldentwicklungsplans in den Walddatensatz zu integrieren. Im Speziellen werden die Funktion (Nutz-, Schutz-, Wohlfahrts- und Erholungsfunktion) sowie die Kennziffern (Intensität der Funktion) auf die Features im Walddatensatz übertragen. Abschließend werden alle Punkte außerhalb des kärntner Landesgebietes eliminiert. Wie in Abschnitt 5.3.3 beschrieben, werden aufgrund mangelnder Geodaten die Eigentumverhältnisse modellhaft nachgebildet. Auf Basis dieses Datensatzes bekommt jede Waldzelle eine Eigentum-ID zugewiesen und somit kann jede Waldzelle genau einem Eigentümer zugeordnet werden.

In der nachfolgenden Kontrolle der Daten konnte festgestellt werden, dass der dem Datensatz entnehmbare Gesamtvorrat für Kärnten (1778 Mio. vfm) um eine Zehnerpotenz von jener der ÖWI (178 Mio. vfm laut Erhebung 2007-2009) [5] abweicht. Hier ist zu vermuten, dass die Werte der Vorratskarte (Abschnitt 5.1.1) vfm/ha und nicht in vfm angegeben sind. Da eine Rasterzellengröße von 30x30m vorliegt werden diese Werte entsprechend angepasst. Um die Datenkonsistenz weiter zu verbessern, wird der Waldtyp “Schläge“ gänzlich durch die anderen Typen (Laubwald, laubdominierter, nadel-dominiertes Mischwald und Nadelwald) ersetzt. Als Auswahlkriterium kommt hier die vorherrschende Seehöhe sowie benachbarte Typen zum Einsatz. Im Bezug auf das Alter des Waldes startet die Modellierung mit einem durchschnittlichen Alter von ca. 47 Jahren. Dieser Wert deckt sich ungefähr mit den Angaben des BFW (55 Jahre) [5]. Die Abweichung ist auf die Annahme zurückzuführen, dass von einem gleichmäßig dichtem Bewuchs der Waldzellen ausgegangen wird. Da aber auch weniger dicht bewaldete Zellen vorliegen, wird deren Alter unterbestimmt. In Abbildung 5.5 äußert sich dies in Waldzellen mit einem Alter von ≤ 5 Jahren und tritt vor allem in

¹⁸Landesgrenze Kärnten downloaden unter: <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/82864955-7c29-4f05-962c-cc1cb1cfa4c8>

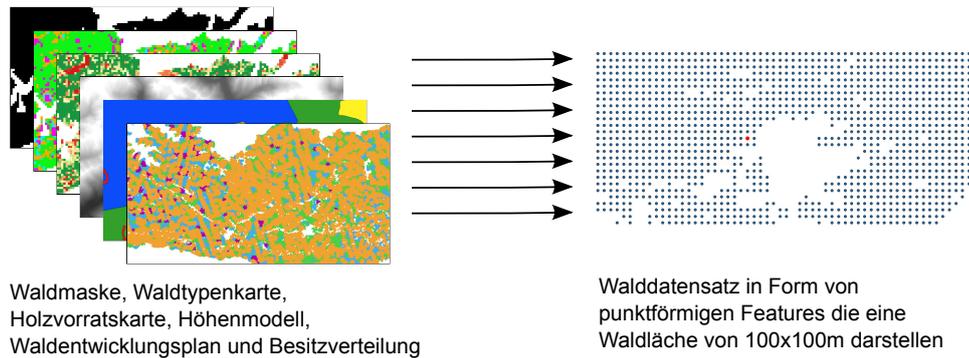


Abbildung 5.4: Entstehung des Walddatensatzes.

höher gelegenen Waldzellen nahe der Waldgrenze auf. Gut sichtbar ist dieser Effekt in den westlichen Bereichen des Untersuchungsgebietes, beispielhaft im Mölltal und Gailtal. Da dieser Zuweisungfehler auch in anderen Waldzellen auftreten kann, ist es nicht möglich eine allgemeingültige Korrektur festzulegen. Außerdem ist davon auszugehen, dass die betroffenen Waldzellen im Bezug auf die Gesamtmenge eine irrelevante Größenordnung einnehmen womit auf eine Fehlerbereinigung verzichtet werden kann.

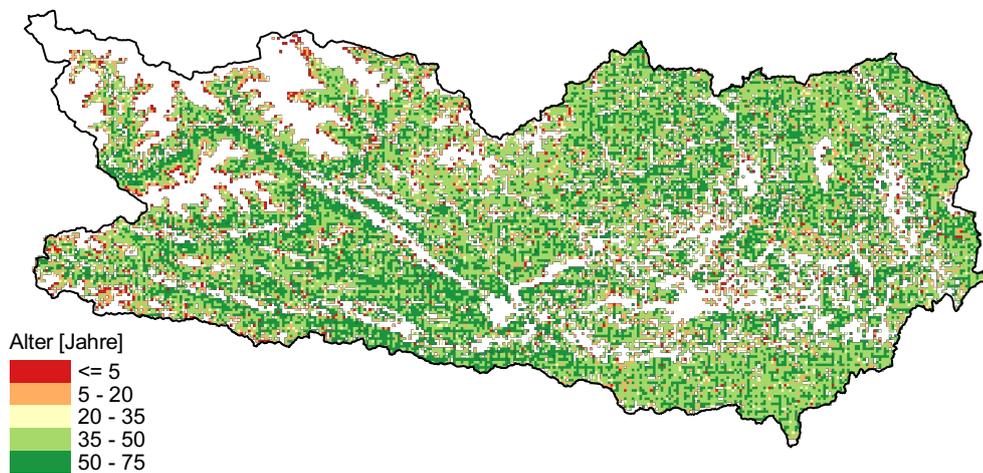


Abbildung 5.5: Aus dem Vorrat abgeleitete und auf 500x500m interpolierte Altersverteilung des Waldes. Vor allem im Bereich der Waldgrenze im Mölltal und westlichen Gailtal treten Fehlklassifikationen beim Alter auf. Auf Grund von geringerer Wuchsdichte wird das Alter unterbestimmt.

5.3.2 Erstellen des Kostenrasters

Jeder Holzagent greift im Zuge des Ernteprozesses auf eine Kostenraster-Datei passend zum Biomasseheizwerk zurück. Diese wird dazu verwendet um die Distanz zwischen Biomasseheizwerk und der zu erntenden Waldzelle zu bestimmen. Bei der Erstellung des Kostenrasters ergeben sich 2 Varianten. Einerseits kann dieser über die Distanz entlang der Straßen errechnet werden sowie andererseits über eine Gewichtung auf Basis der erlaubten Höchstgeschwindigkeit. Zweiteres ergibt einen Zeit-basierten Kostenraster. Umgesetzt sind die 2 Varianten folgendermaßen:

- Variante 1: hier wird der GIP-Straßendatensatz in einen Rasterdatensatz umwandelt, wobei die Straßen einen Gewichtung von 1 erhalten. Außerdem werden jene Rasterzellen, die nicht als Straße belegt sind, mit 2 gewichtet um die Straßen mehr zu priorisieren.
- Variante 2: die Gewichtung richtet sich nach der erlaubten Maximalgeschwindigkeit. Genauer gesagt entspricht die Gewichtung der Zeit, die benötigt wird um 1m Weg in der vorgegeben Geschwindigkeit zurückzulegen. Eine Aufschlüsselung der Gewichtungen ist in Tabelle 5.2 zu sehen.

Tabelle 5.2: Geschwindigkeitsbezogene Gewichtung der Straßen zur Erstellung eines raumzeitlichen Kostenrasters.

zulässige Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Gewichtung
100	0.034
80	0.048
70	0.051
50	0.072
30	0.12
10	0.36

Abschließend werden mit Hilfe der ArcGIS-Funktion *Cost Distance*¹⁹ auf Basis der 2 Gewichtungsverfahren jeweils 2 Kostenraster pro Kraftwerk erstellt. Abbildung 5.6 zeigt am Beispiel des Biomasse-Kraftwerks St. Agathen/Villach 2 Ergebnisse der Kostenrasterberechnung. Links in lila den Distanz-basierten und rechts in blau den Zeit-basierten Ansatz. Hier ist gut zu beobachten, dass der Distanz-basierte ein mehr konzentrisches Muster aufweist, wohingegen der Zeit-basierte mehr den Straßenverläufen der Hauptverkehrsachsen folgt.

5.3.3 Nachbildung der Eigentumsverteilung auf Bezirksebene

Aufgrund mangelnder geografischer Datengrundlagen im Bezug auf die Eigentumsverhältnisse des Kärntner Waldes wird dieser aus den statistischen Informationen (siehe Tabelle 5.3), welche der ÖWI 2007-09 [74] entnehmbar sind, nachgebildet. Kärnten weist mit über 70 % den höchsten "Bauernwald" Anteil auf. Betriebe besitzen rund 25 % und auf die ÖBf fallen ca. 2 % des kärntner Waldes [74]. Tabelle 5.3 zeigt eine prozentuale Aufschlüsselung der Waldflächen auf Bezirksforstinspektorat

¹⁹Die *Cost Distance*-Funktion berechnet den kleinsten kumulativen Kostenwert für jedes Pixel im Bezug zu einem gewählten Ausgangspunkt über eine definierte Kostenoberfläche. <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/cost-distance.htm>

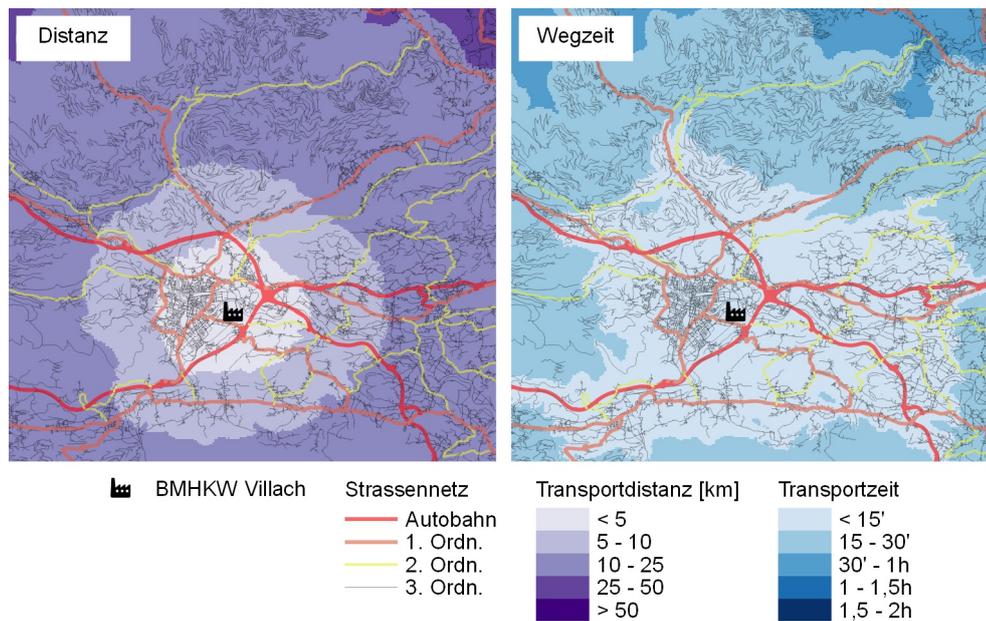


Abbildung 5.6: Vergleich des konzentrischen Distanzbasierenden (links) mit dem Hauptverkehrsachsen-folgenden Zeitbasierenden (rechts) Kostenrasteransatzes am Beispiel des Biomasse-Kraftwerks St. Agathen/Villach.

(BFI)-Ebene, bezogen auf die 4 vorherrschenden Eigentumsarten in Kärnten. Zur Nachstellung dieser Eigentumsverhältnisse in Form von Geodaten sind folgende Arbeitsschritte abgearbeitet worden:

1. Aufteilung der kärntner Waldfläche auf BFI-Ebene in 20 ha große Teile. Der durchschnittliche Kleinwald weist laut Folder der Landesforstdirektion "Wald und Holz in Kärnten" [89] eine Fläche von 18ha auf. Überschlagsmäßig lässt sich somit die Anzahl der Kleinwaldeigentümer über die Fläche berechnen. Außerdem ist dieser Quelle zu entnehmen, dass es circa 23000 Waldeigentümer in Kärnten gibt.
2. Das kärntner Landesgebiet wird auf BFI-Ebene in 18 ha große Polygone gesplittet. Hierbei wird auf wabenförmig angeordnete Sechsecke zurückgegriffen.
3. Um eine homogene Verteilung der Kleinwaldeigentümer zu erreichen, werden diese Polygone über einen Zufallsgenerator ausgewählt und ihnen dann das Attribut "Kleinwaldeigentümer" zugeteilt.
4. Die Restflächen werden prozentual (siehe Tabelle 5.3) auf die anderen Eigentumsverhältnisse aufgeteilt. Da keine genaueren Informationen vorliegen, stützt sich die Anzahl in den Klassen Großwald und Betriebe auf die Eigentumangaben in der Arbeit von Fichtner [22].
5. Durch räumliches Rückrechnen über die Fläche bekommt jede Waldzelle einen Eigentümer zugeordnet.
6. Durch Ableiten des Zentroid der Flächen ergibt sich der Eigentümer-Punktdatensatz, welcher einerseits räumlich und andererseits über eine eindeutige *ID* verknüpft ist.

Tabelle 5.3: Verteilung der Eigentumsverhältnisse des Waldes in den kärntner BFI. (Entnommen aus der ÖWI 2007–2009 [74]).

BFI	Eigentumsverhältnis %			
	Kleinwald <200 ha	Großwald 200-1000 ha	Betriebe >1000 ha	ÖBf
Feldkirchen	86.8	4.1	9.1	0.0
Hermagor	74.7	12.4	9.4	3.5
Klagenfurt	70.3	2.5	27.7	0.0
Spittal	60.2	18.3	11.4	10.1
St. Veit	76.1	8.3	14.5	1.1
Villach	67.0	14.4	14.3	4.3
Völkermarkt	69.6	16.7	13.7	0.0
Wolfsberg	79.6	6.8	13.6	0.0
Gesamt	73.0	10.4	14.3	2.3

Abbildung 5.7 zeigt die, aus den Vorgaben der Tabelle 5.3 abgeleitete, modellhafte räumliche Eigentumsverteilung in Form einer Karte. Klar ersichtlich ist auch hier die vorherrschende Eigentumsform Kleinwald, welche rund 70 % einnimmt.

Diese modellhafte Eigentumsverhältnis-Verteilung ist als Basis für die Simulation bedenkenlos einsetzbar, da keine lokalen Phänomene beobachtet werden sollen, sondern der Gang des Gesamtsystems betrachtet wird. Zudem stimmen die Verhältnisse mit den Vorgaben überein, wodurch nichts gegen die Verwendung spricht, da keine Daten zur Verfügung stehen.

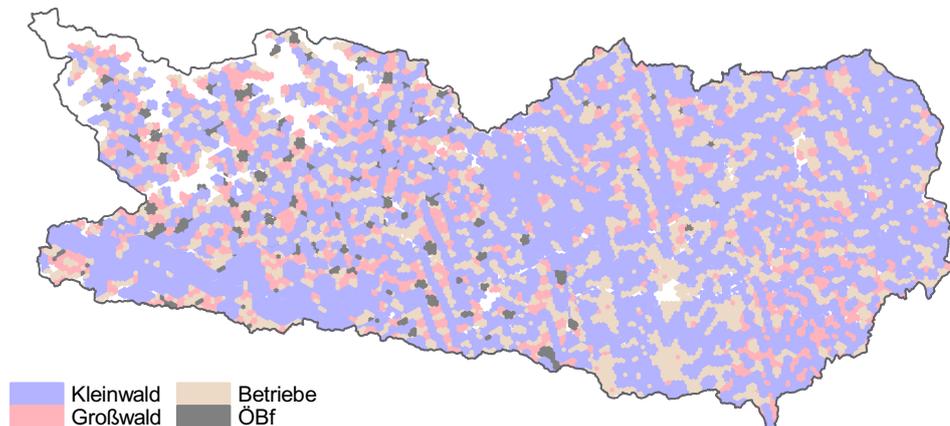


Abbildung 5.7: Modellierte Eigentumsverteilungskarte des kärntner Waldes. Als Datenbasis dienen die Statistiken der ÖWI 2007-09 [74].

5.3.4 Aufbereitung der Preis-Historien

Grundlage für die verwendeten Preis-Historien bildet die Entwicklung des Preises für Sägerundholz (Fichte/Tanne, B, Stärkeklasse 2b) von 1994–2016 [51]. Diese steht in Form von jährlichen Werten (siehe Abbildung 5.8 in Grün) als *csv-Datei* zur Verfügung. Da diese einen positiven Preisverlauf aufweist, wird sie zur Modellierung einer positiven Marktentwicklung herangezogen.

Um eine negative Marktentwicklung nachzubilden, wird die positive Preis-Historie in umgekehrter Reihenfolge verwendet. In Abbildung 5.8 in rot dargestellt. Die stetige Preisentwicklung, in blau, sieht kaum Änderungen der Preislage vor. Auf lange Sicht werden Schwankungen von $\pm 1\%$ modelliert. Die unsichere Preisentwicklung wird anhand einer Reihe von Zufallswerten, die sich im Bereich $\pm 10\%$ des aktuellen Preisniveaus von Rundholz bewegt, abgebildet. In Abbildung 5.8 ist diese Preisentwicklung in orange dargestellt.

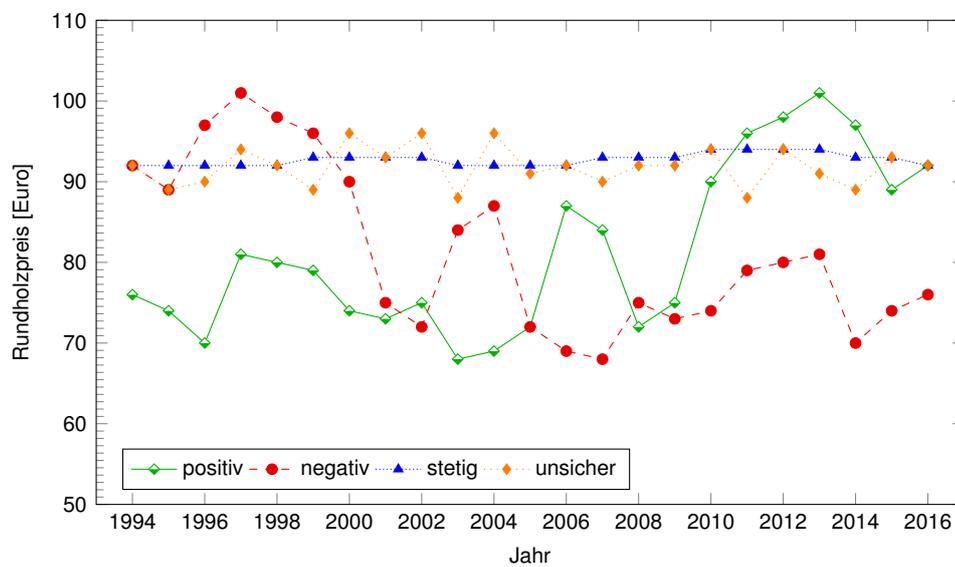


Abbildung 5.8: Positive, negative, stetige und unsichere Preis-Historien.

ERGEBNISSE UND SIMULATIONSSZENARIEN

Diese Kapitel beschäftigt sich mit den Ergebnissen, welche sich aus Simulationen basierend auf dem umgesetzten Modell ableiten lassen. Abschnitt 6.1 gibt einen grundlegenden Überblick über die beobachteten Szenarien und beschreibt die verwendeten Simulationsparameter. Die Ergebnisse der Ressourcen-orientierten Versuchsaufbauten finden sich in den Abschnitten 6.2 und 6.3. Die Ergebnisse der Markt-orientierten Szenarien werden in den Abschnitten 6.4, 6.5 und 6.6 beschrieben.

6.1 ÜBERBLICK UND SZENARIEN-SETUP

Wie bereits in der ersten grundlegenden Beschreibung des Modells, in Abschnitt 4.2, angeführt können zwei Szenarien-Gruppen unterschieden werden. Zum einen gibt es die an Scholz et. al. [81] angelehnten und weiterentwickelten Ressourcen-orientierten, zum anderen die im Zuge dieser Arbeit neu umgesetzten Markt-orientierten Szenarien. Dieses Kapitel beschreibt insgesamt 6 repräsentative Versuchsaufbauten, die sich folgendermaßen gliedern:

- 2 Ressourcen-orientierte Szenarien;
 - Basis-Szenario;
 - WEP-Szenario;
- 4 Markt-orientierte Szenarien;
 - Positive Marktentwicklung;
 - Negative Marktentwicklung;
 - Stetige Marktentwicklung;
 - Unsichere Marktentwicklung;

Für jedes dieser 6 Szenarien werden 10 Simulationsdurchläufe durchgeführt um Ausreißer, welche durch die Verwendung von stochastischen Werten entstehen können, zu kompensieren. Die in diesem Kapitel abgebildeten Ergebnisse bilden immer den gemittelten Wert über die 10 Durchläufe des betrachteten Szenarios ab.

6.1.1 *Parameter der Ressourcen-orientierten Szenarien*

In den beiden Ressourcen-orientierten Szenarien wird von einem einheitlichen Entnahmeverhalten seitens der Besitzer ausgegangen. Das Basis-Szenario stellt die grundlegendste Form der umgesetzten Szenarien dar und bildet eine Transportkosten-optimierte Nutzung des Waldes ohne Einschränkungen, ähnlich wie bei Scholz et. al. [81], ab. Das WEP-Szenario führt diesen Ansatz weiter, berücksichtigt aber bereits einfache Einschränkungen im Bezug auf den WEP. Es werden hier die

in Abschnitt 4.7.3 beschriebenen Regularien im Bezug auf Entnahme und Wiederbewaldung des Forstgesetzes 1975 [24] umgesetzt und berücksichtigt.

Eine detaillierte Beschreibung der modellierten Abläufe und der aus der Literatur entnommenen Parameter ist in Abschnitt 4.7.1 zu finden. Zur besseren Übersicht sind die verwendeten Simulationsparameter in Tabelle 6.1 aufgelistet. Parameter die in Form von Wertebereichen angegeben sind werden stochastisch ermittelt.

Tabelle 6.1: Datenbasis und Simulationsparameter der Ressourcen-orientierten Szenarien: Basis-, und WEP-Szenario.

Holzauswahlverfahren	
Ressourcen-orientiertes Auswahlverfahren (siehe 4.7.1) + WEP-Kriterien (siehe 4.7.3)	
Daten	
Waldvorratsdatensatz (siehe 5.3.1)	
Biomasseheizwerke (siehe 5.2.1) mit Kostenrastern auf Zeitbasis (siehe 5.3.2)	
Eigentümer-Datensatz (siehe 5.3.3)	
Simulations-Parameter	Wert
Holzmenge zur thermischen Nutzung [%] ^a	6.2
jährliche Bedarfszunahme [%] ^a	1.1
Importrate [%] ^a	37
Entnahmemenge bei Zwischennutzung [%] ^b	19.6
Holzauswahlkriterien	
Entnahmeabstand [Jahre]	5–10
Ernteverlust [%] ^d	
<i>Nadel</i>	5–10
<i>Laub</i>	10–15
unteres Entnahmealter [Jahre] ^e	
<i>Nadel</i>	20
<i>Laub</i>	30
oberes Entnahmealter [Jahre]	Endnutzungsalter - Entnahmeabstand
Endnutzungsalter [Jahre] ^e	
<i>Nadel</i>	80–120
<i>Laub</i>	60–100

^a Entnommen aus dem Bericht der Arbeitsplattform für Holz und Wald [3].

^b Abgeleitet und angepasst aus dem Mittelwert der ausscheidenden Holzmenge pro Jahrzehnt der Ertragsreihen Marschall [62] für Fichte EK 10 und Buche EK 7.

^c Entnommen aus *Waldbau-Mekblatt: Durchforstung in Laub- und Nadelwaldbeständen* [90].

^d Siehe Hartmann & Kaltschmitt [34].

^e Entnommen aus Marschall [62] und der BFW-Webseite [5].

6.1.2 Parameter der Markt-orientierten Szenarien

Die vier Markt-Szenarien gehen von verschiedenen Eigentümer-Typen aus. Diese reagieren unterschiedlich auf die Entwicklung des Holzpreises. Das Verhalten der verschiedenen Eigentümer-Arten

basiert auf Annahmen gestützt durch die Literatur. Detailinformationen zur Modellierung der Abläufe und Parameter finden sich in Abschnitt 4.7.2. Zur besseren Übersicht sind die verwendeten Simulationsparameter in Tabelle 6.2 aufgelistet. In Form von Wertebereichen angegebene Parameter werden über den Simulationsverlauf stochastisch ermittelt.

Für das Markt-Szenario werden ähnlich wie bei Bone & Dragičević [8] 4 verschiedene Preis- und in weiterer Folge Marktentwicklungen (siehe Abschnitt 5.3.4) als eigenständige Szenarien definiert. Die positive Marktentwicklung basiert auf einer Extrapolation der Rundholzpreisentwicklung von 1994–2016. Die negative Marktentwicklung leitet sich aus einer “*al reverso*“ Verwendung des positiven Verlaufs ab. Die stetige Preisentwicklung, in blau, sieht kaum Änderungen der aktuellen Preislage (Stand 2016) vor. Auf lange Sicht werden Schwankungen von $\mp 1\%$ modelliert. Die unsichere Preisentwicklung wird anhand einer Reihe von Zufallswerten, die sich im Bereich $\mp 10\%$ des aktuellen Preisniveaus (Stand 2016) von Rundholz bewegt, abgebildet.

Tabelle 6.2: Datenbasis und Simulationsparameter der Ressourcen-orientierten Szenarien: Basis-, und WEP-Szenario.

Holzauswahlverfahren	
Markt-orientiertes Auswahlverfahren (siehe 4.7.2) + WEP-Kriterien (siehe 4.7.3)	
Daten	
Waldvorratsdatensatz (siehe 5.3.1)	
Biomasseheizwerke (siehe 5.2.1) mit Kostenrastern auf Zeitbasis (siehe 5.3.2)	
Eigentümer-Datensatz (siehe 5.3.3)	
Preis-Historie (siehe 5.3.4)	
positiv	
negativ	
stetig	
unsicher	
Simulations-Parameter	Wert
Holzmenge zur thermischen Nutzung [%] ^a	6.2
jährliche Bedarfszunahme [%] ^a	1.1
Importrate [%] ^a	37
Entnahmemenge bei Zwischennutzung [%] ^b	19.6
Ernteverlust [%] ^c	
<i>Nadel</i>	5–10
<i>Laub</i>	10–15
Holzauswahlkriterien	
Kleinwald, Großwald, Betriebe und ÖBf	siehe Abschnitt 4.7.2

^a Entnommen aus dem Bericht der Arbeitsplattform für Holz und Wald [3].

^b Abgeleitet und angepasst aus dem Mittelwert der ausscheidenden Holzmenge pro Jahrzehnt der Ertragsreihen Marschall [62] für Fichte EK 10 und Buche EK 7.

^c Siehe Hartmann & Kaltschmitt [34]. BFW-Webseite [5].

6.1.3 Zuwachs und Nachfrage

Der jährliche Zuwachs und die Nachfrage entwickelt sich für alle Szenarien gleich. Der Zuwachs leitet sich aus dem Wachstumsmodell in Abschnitt 4.9 ab. Dieser wird in jeder Simulationsrunde auf Basis der verwendeten Walddaten (siehe Abschnitt 5.3.1) ermittelt. Der jährliche Zuwachs, in Abbildung 6.1 in grün dargestellt, bewegt sich für einen Simulationszeitraum von 50 Jahren/*Ticks* in einem Wertebereich zwischen 5,2 bis 3,2 Mio. fm. Der jährliche Zuwachs nimmt, wie auch aus den Wuchsreihen von Marshall [62] entnehmbar, mit steigendem Alter der Waldzellen ab.

Der Biomasse-Bedarf (in Abbildung 6.1 in rot) der Biomasseheizwerk nimmt stetig zu. Er bewegt sich dabei in einem Wertebereich von ca. 237.000 bis 310.000fm. Wie in Abschnitt 4.3.4 der Modellierung beschrieben, wird hier von einer jährlichen Zunahme von etwa 1,1 % ausgegangen, die dann ab *Tick* 30 in einen modellierten Sättigungs-ähnlichen Effekt übergeht und in einer Abflachung der Kurve resultiert.

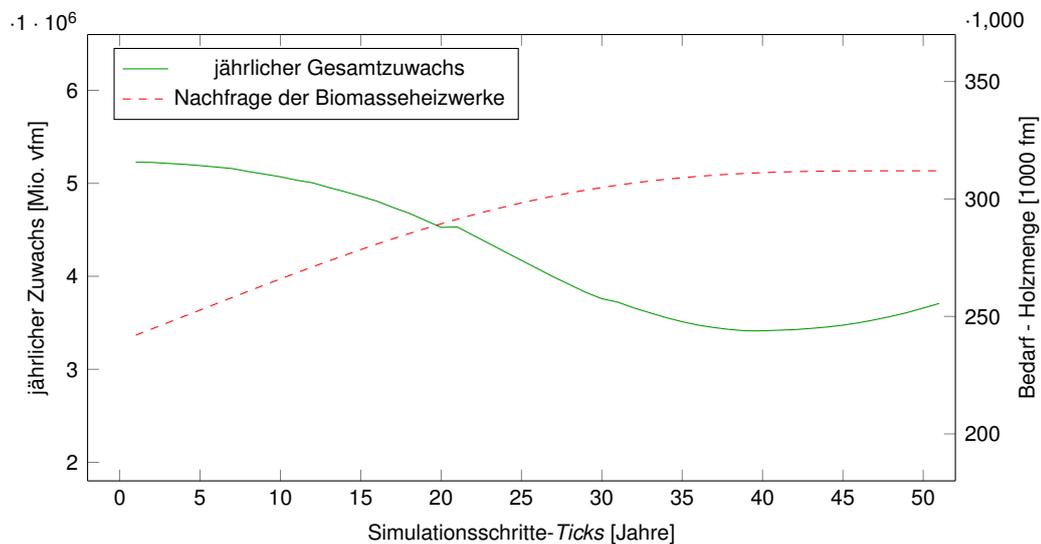


Abbildung 6.1: Entwicklung des jährlichen Gesamtzuwachses und der Nachfrage der Biomasseheizwerke.

6.2 RESSOURCEN-ORIENTIERTES BASIS-SZENARIO

Das Basis-Szenario lehnt sich stark an den Simulationsaufbau von Scholz et. al. [81] an. Alle Eigentumsarten nehmen die Holzauswahl nach dem gleichen Schema vor, und alle Waldzellen werden im Sinne einer Nutzfunktion betrachtet. Dieses Szenario kann als Potentialanalyse für die Deckung des Holzbedarfs für Kärnten angesehen werden. In diesem Simulationsszenario kommt ein Ressourcenorientiertes Auswahlverfahren (siehe Abschnitt 4.7.1) zum Einsatz, welches auf Basis der in Abschnitt 6.1.1 Parameter und Daten durchgeführt wird.

Die Simulation des Ressourcen-orientierten Basis-Szenarios bricht nach 49 Simulationsschritten/*Ticks* ab. In der letzten Simulationsrunde tritt die Abbruchbedingung ein, und die entnehmbare Holzmenge reicht nicht zur Bedarfsdeckung der Heizwerke. Abbildung 6.3 zeigt den Zusammenhang zwischen verfügbarer Holzmenge und der zurückgelegten mittleren Erntedistanz der Holzganten.

Jeder Simulationsschritt stellt ein Jahr dar. Wie bei Scholz et. al. [81] ist auch hier ein Anstieg der Erntedistanzen bei zunehmender Simulationsdauer zu beobachten. Abbildung 6.4 zeigt diesen Verlauf mit maximaler Erntedistanz. Die raumzeitliche Entwicklung des Vorrats ist in Abbildung 6.5 abgebildet. In 5-jährigen Abständen ist hier die Zunahme der außer Ertrag stehenden Waldflächen sowie eine Nutzung im direkten Umfeld (hellere Bereiche) der Heizwerke zu beobachten. Noch besser ist das Nutzungsverhalten in Abbildung 6.6 ersichtlich. Von kompakten Nutzgebieten zu Simulationsbeginn geht dies bei Simulationseende in eine homogene Verteilung über. Des Weiteren ist die Konkurrenz nah situierter Heizwerke zu beobachten. Dieser Effekt ist noch besser in Abbildung 6.2 an den Beispielen Villach und Treffen in Form der Standardabweichung ersichtlich.

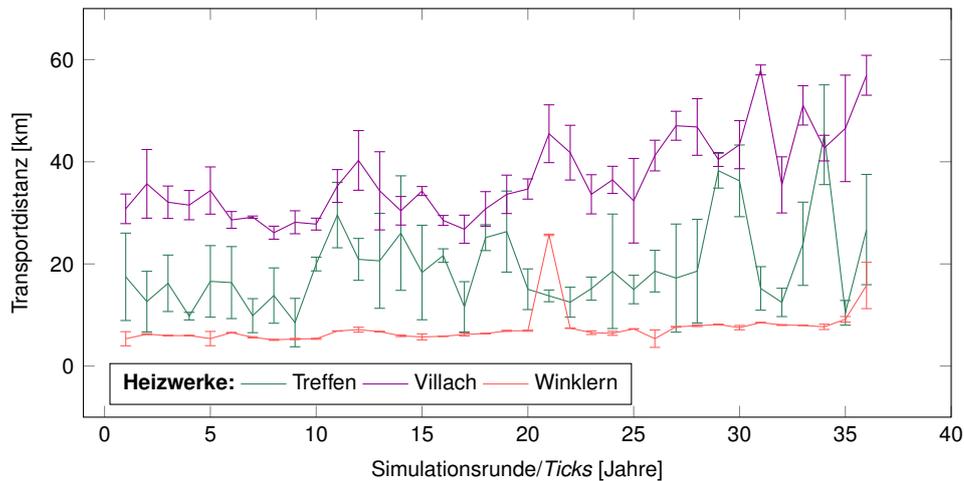


Abbildung 6.2: Am Beispiel der hohen Standardabweichung der durchschnittlichen Erntedistanz über die 10 Simulationsdurchläufe lässt sich die Konkurrenzsituation der räumlich nah beieinander liegenden Heizwerke Villach und Treffen gut abbilden. Dem gegenüber ist der Verlauf des ohne Konkurrenz agierenden Heizwerks Winklern über alle Simulationen konstant.

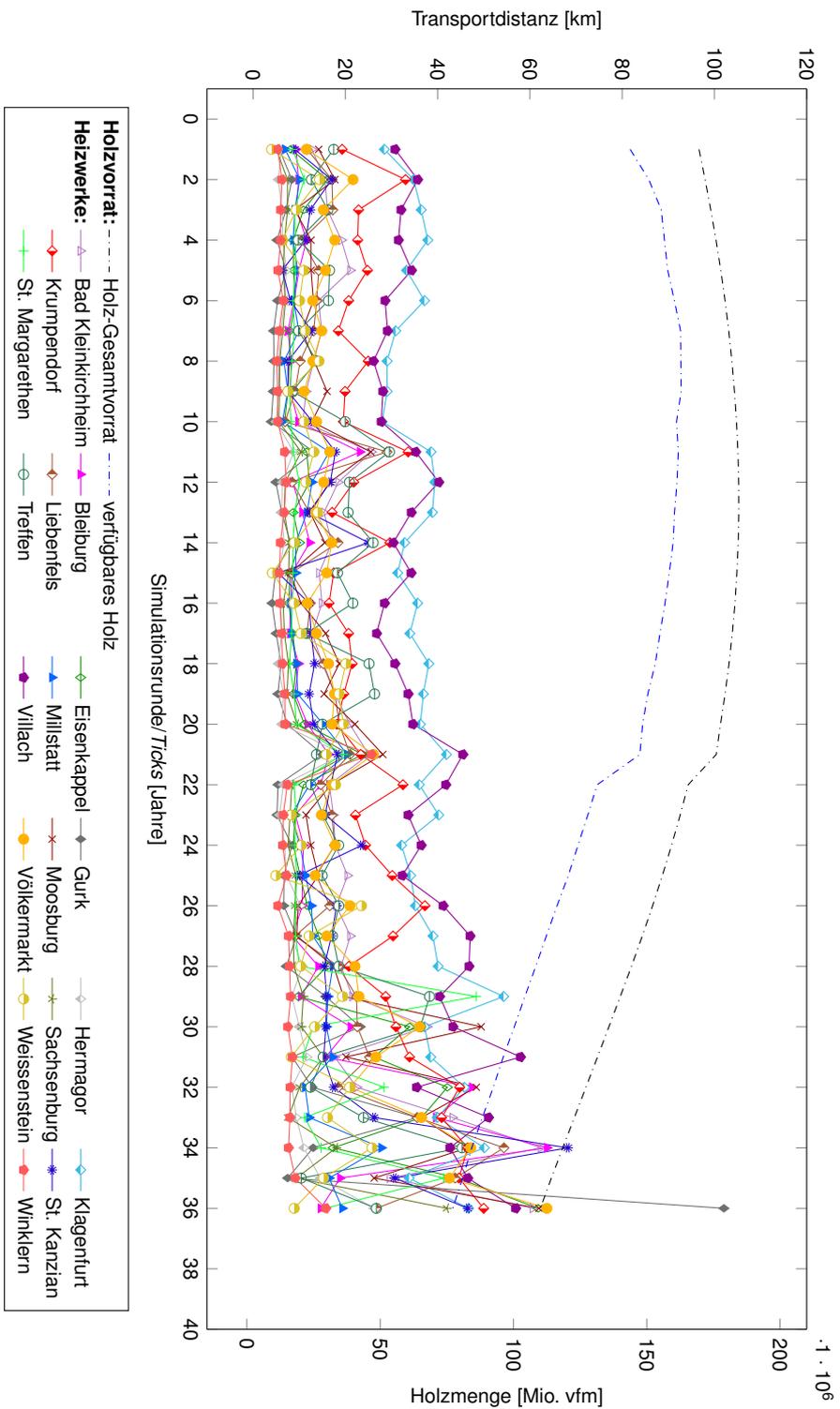


Abbildung 6.3: Zusammenhang zwischen verfügbarem Holz und mittlerer Transportdistanz im Ressourcen-orientierten Basis-Szenario. Mit zunehmendem Simulationsverlauf nimmt der verfügbare Vorrat immer weiter ab und die Transportdistanzen der Biomasseheizwerke zur Holzbeschaffung steigen. Bei *Tick* 36 endet die Simulation und die mittleren Transportdistanzen erreichen ihr Maximum.

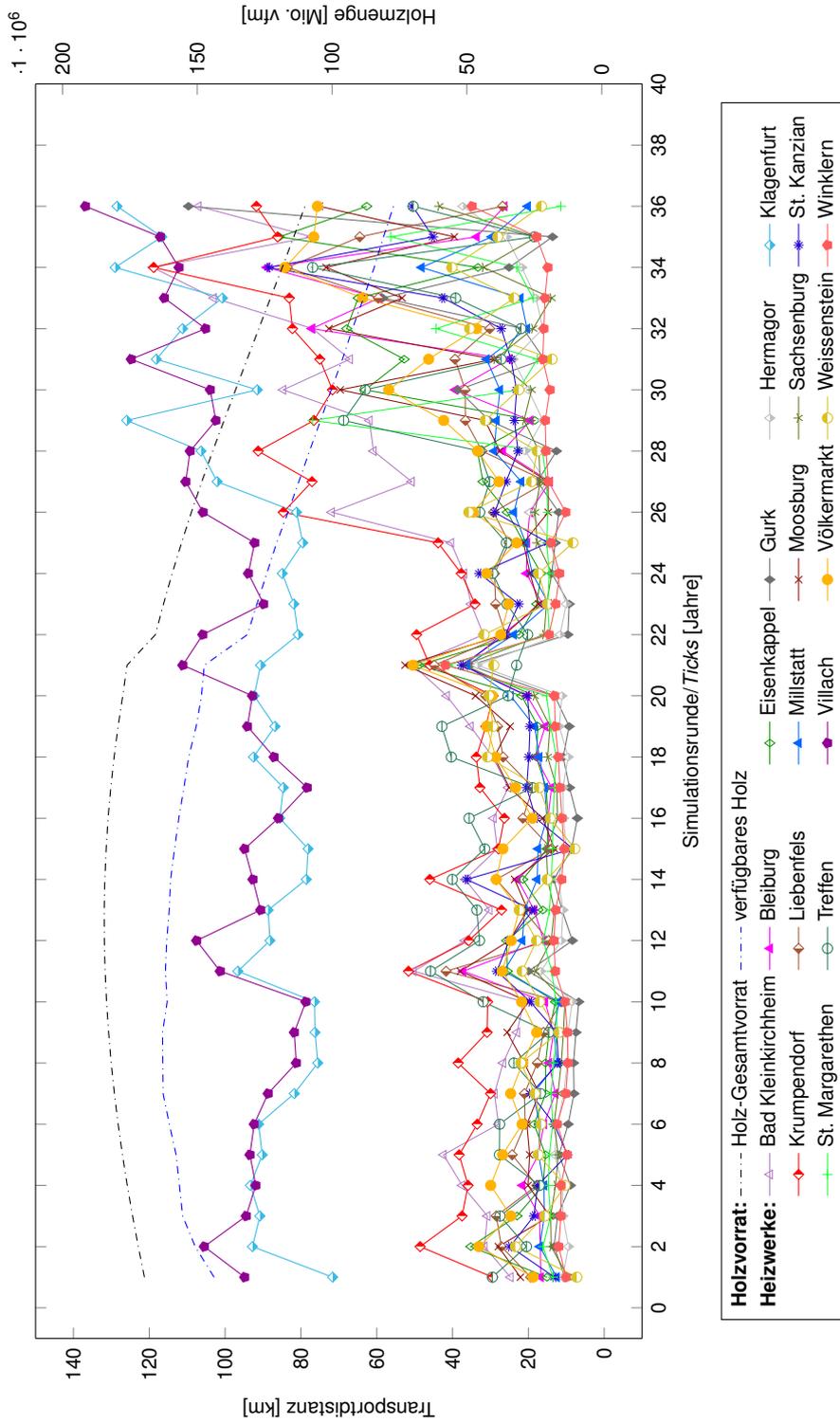
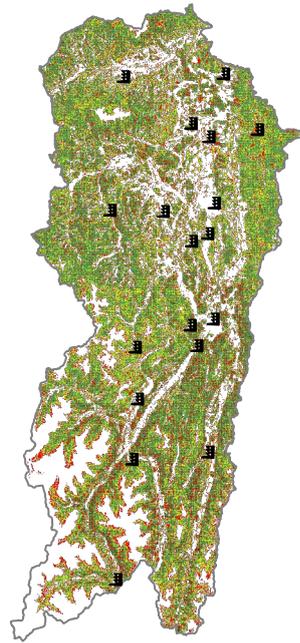
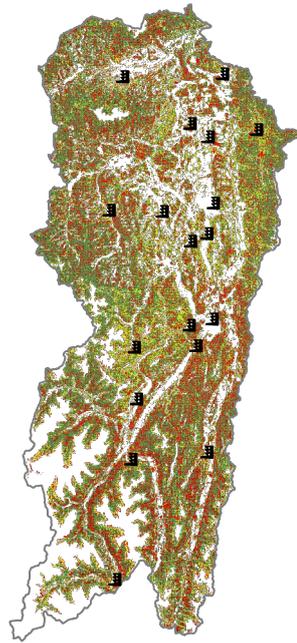


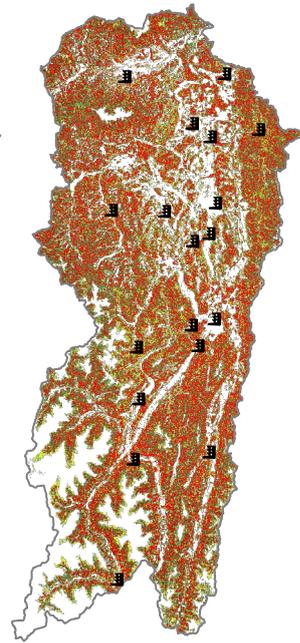
Abbildung 6.4: Zusammenhang zwischen verfügbarem Holz und maximaler Transportdistanz im Ressourcen-orientierten Basis-Szenario. Das Konkurrenzverhalten ist am Beispiel des unsteigigen Verlaufs der maximalen Transportdistanz der Kraftwerke Klagenfurt und Krumpendorf zu sehen. Auch hier ist eine Zunahme der Transportdistanz im späteren Simulationsverlauf (ab Tick 24) zu beobachten.



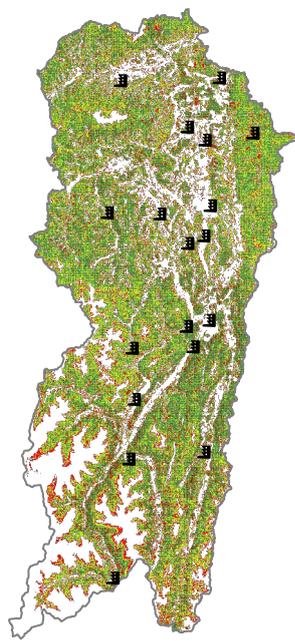
Tick 5



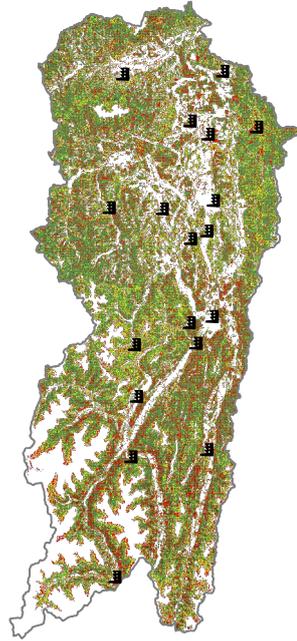
Tick 15



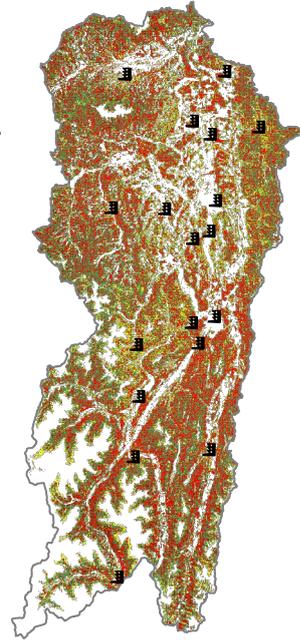
Tick 25



Tick 1



Tick 10



Tick 20

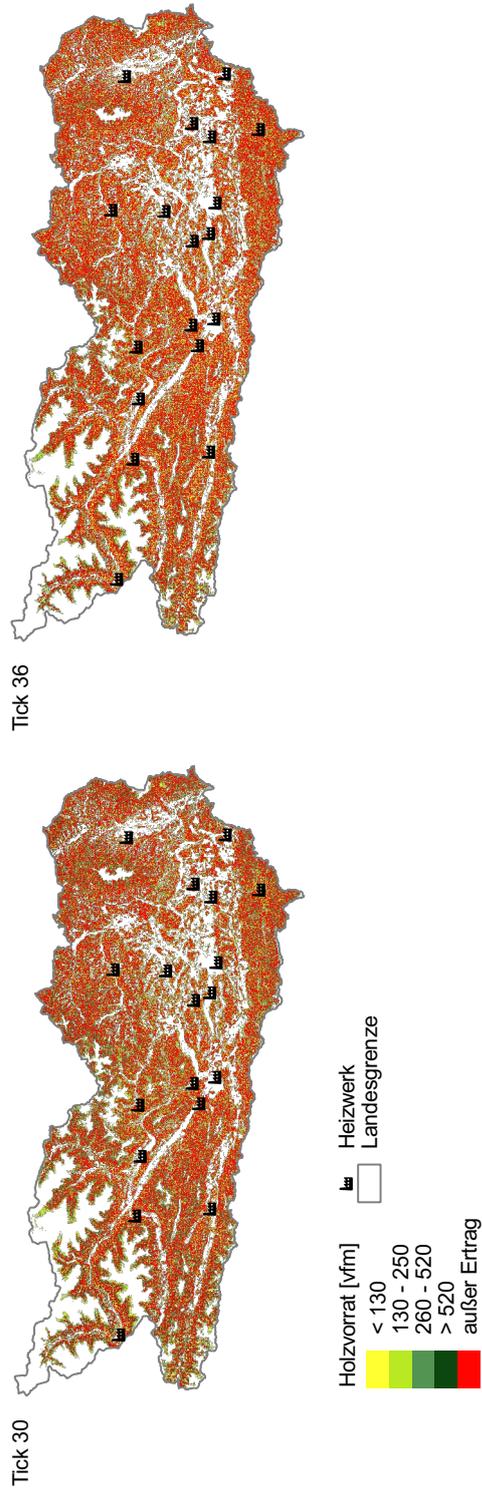


Abbildung 6.5: Entwicklung des Holzvorrates in 5-Jahres-Schritten für das Ressourcen-orientierte Basis-Szenario: Mit zunehmender Simulationsdauer bilden sich zuerst (ab *Tick 5*) die hauptsächlich genutzten Gebiete als helle Bereiche rund um die Heizwerke aus. Ab *Tick 15* nehmen auch die Bereiche des nicht verfügbaren Holzes (außer Ertrag in rot) zu. Bei *Tick 36* reicht das vorhandene Holz nicht mehr zur Bedarfsdeckung.

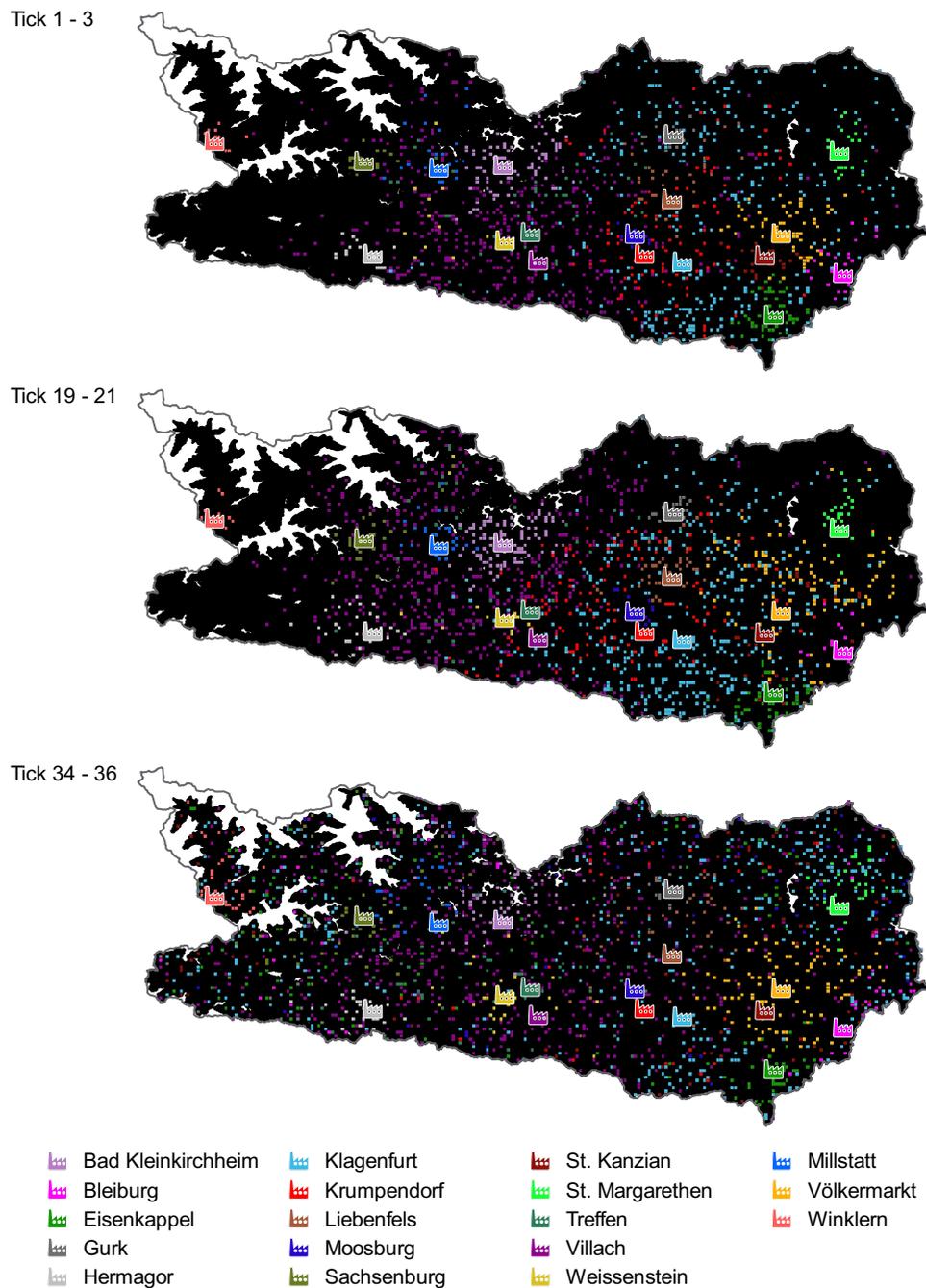


Abbildung 6.6: Auf 800x800m Rasterzellengröße interpolierte Erntemuster-Kartenreihe des Ressourcen-orientierten Basis-Szenarios: Mit fortschreitender Simulation und knapper werdender Holzmenge ist ganz klar die Verschiebung der Erntebereiche vom unmittelbaren Umkreis der Heizwerke (Tick 1–4 und 19–21) in die Peripherie, wo noch Holz vorhanden ist (Tick 34–36), zu erkennen.

6.3 WEP-SZENARIO

Dieses Szenario ist als Erweiterung zum Basis-Szenario in Abschnitt 6.2 anzusehen. Es wird untersucht, in wie weit sich das umgesetzte Regelwerk im Zusammenhang mit dem WEP (siehe Abschnitt 4.7.3) auf die Simulation auswirkt. Wie im vorhergehenden Szenario (Abschnitt 6.2) gibt es keine Unterscheidung bei der Eigentumsart, und alle Eigentümer verwenden die gleiche Holzauswahllogik. Diese basiert auf einer Ressourcen-orientierten Auswahl (siehe 4.7.1), welche zusätzlich durch Kriterien aus dem WEP (siehe 4.7.3) beeinflusst wird. Die in diesem Szenario verwendete Datengrundlage und Simulationsparameter sind in Tabelle 6.1 in Abschnitt 6.1.2 aufgelistet.

Für dieses Szenarios tritt die Abbruchbedingung - in einer Simulationsrunde steht nicht genügend Holz zur Bedarfsdeckung der Heizwerke - bei Schritt/Tick 33 ein. Im Vergleich zum Basis-Szenario in Abschnitt 6.2 verkürzt sich durch die Einführung des WEP-Regelwerks die Simulation um 3 Schritte, also respektive 3 Jahre. Auch die Entwicklung der mittleren Erntedistanz (Abbildung 6.8) verhält sich ähnlich wie beim Basis-Szenario. Im Bezug auf das auftretende Ernte-Muster, in Abbildung 6.9, und die Vorratskarte, in Abbildung 6.10, kann eine weniger intensive Nutzung des Schutz-, Wohlfahrts- und Erholungswaldes beobachtet werden. Abbildung 6.7 zeigt hier eine 10–15 %ige Reduktion der Erntevorgänge im Nicht-Nutzwald. Diese 10–15% schlagen sich in einer Erhöhung der durchschnittlichen Transportdistanz um ungefähr diesen Faktor nieder.

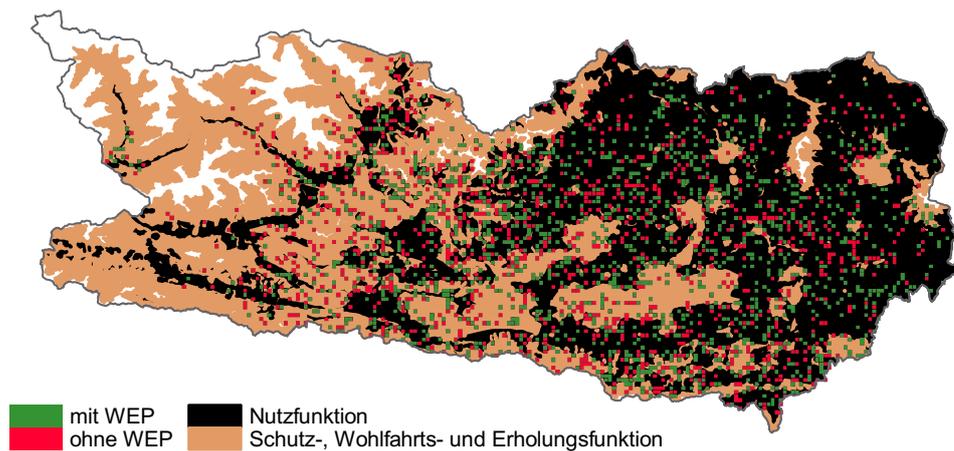


Abbildung 6.7: Im Vergleich zum Basis-Szenario weisen die Erntemuster des WEP-Szenarios ein um 10–15 % geringeres Auftreten in den Waldfunktionen Schutz-, Wohlfahrts- und Erholungswald auf.

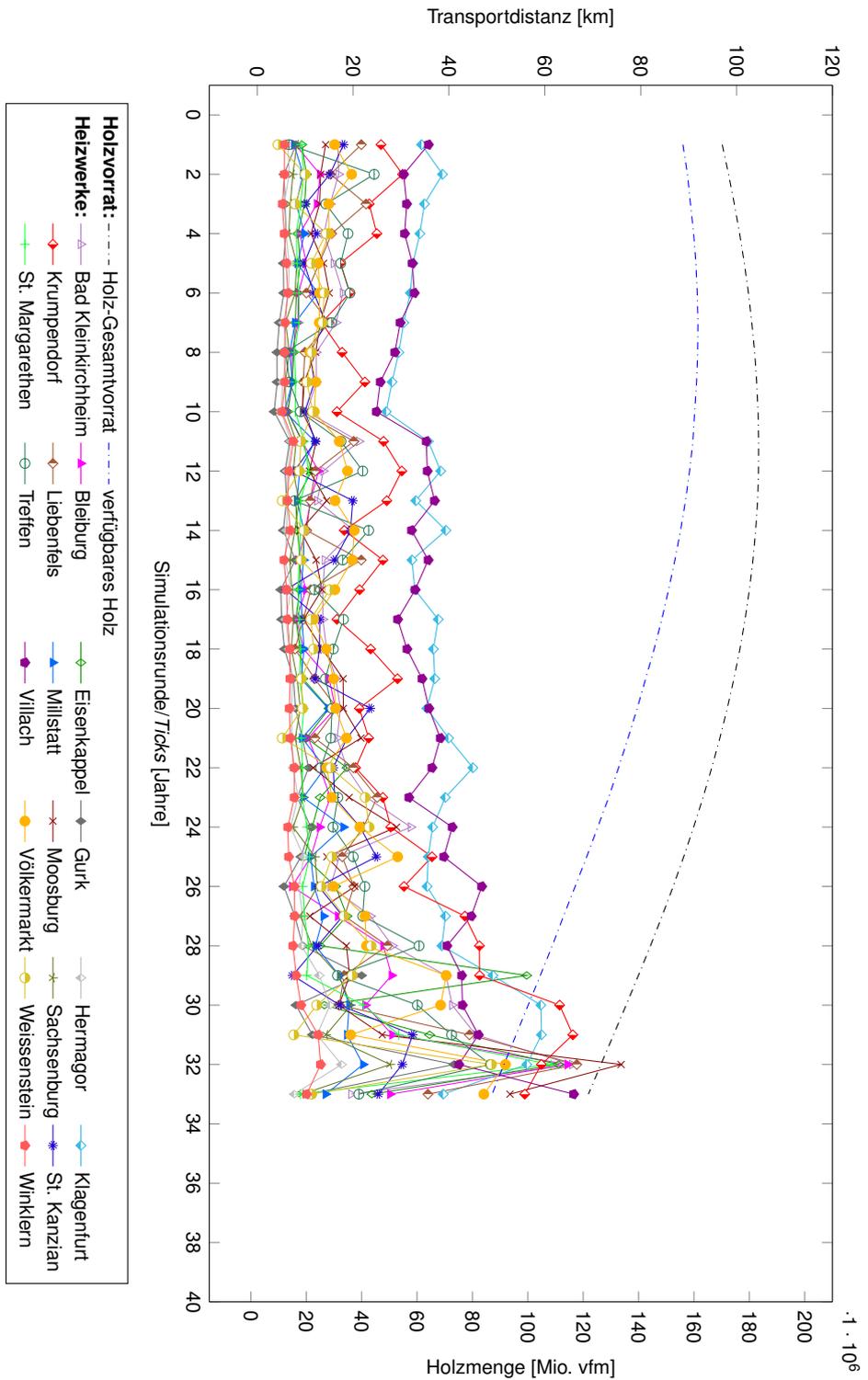


Abbildung 6.8: Zusammenhang zwischen verfügbarem Holz und mittlerer Transportdistanz im Ressourcen-orientierten WEP-Szenario: Durch die ‘sanftere’ Nutzung des Schutz-, Wohlfahrt- und Erholungswaldes erhöht sich die mittlere Transportdistanz.

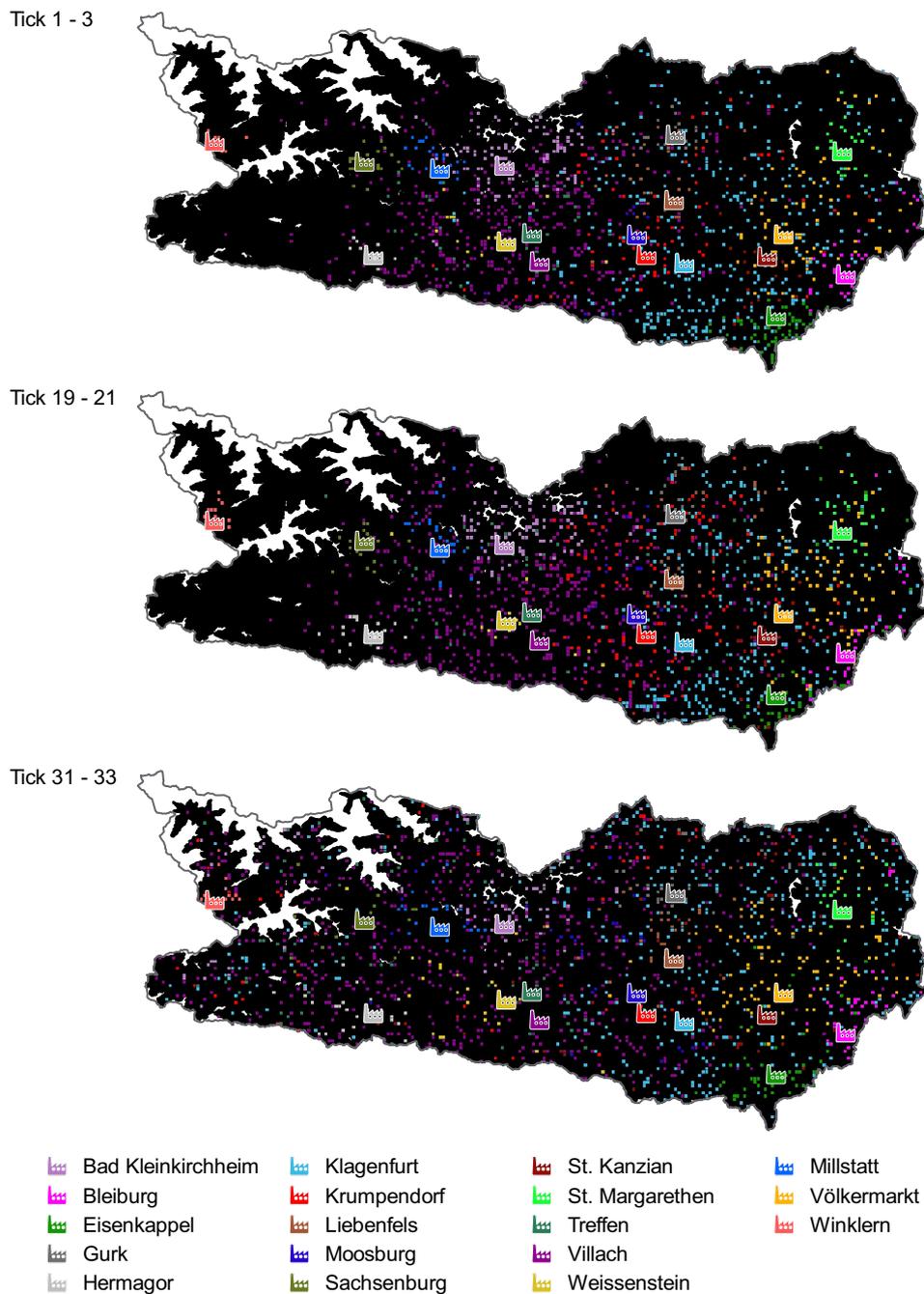
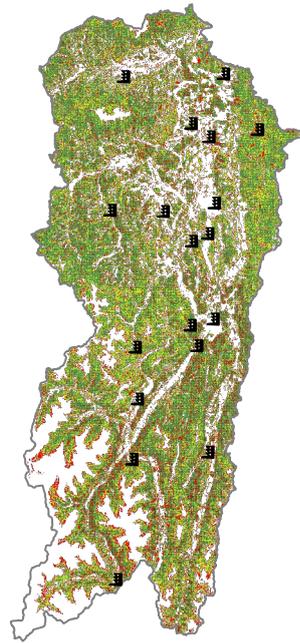
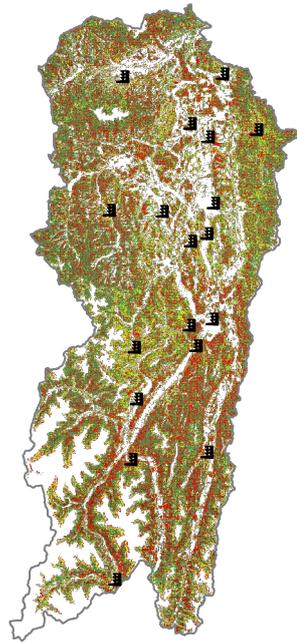


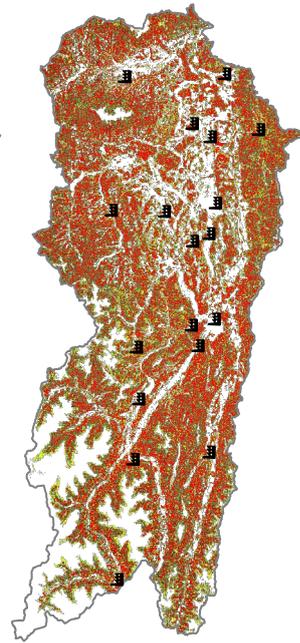
Abbildung 6.9: Auf 800x800m Rasterzellengröße interpolierte Erntemuster-Kartenreihe des Ressourcen-orientierten WEP-Szenarios: Bereits bei Simulationsbeginn sind verstreute Erntebereiche festzustellen. In den Zeitslots 19–21 und 31–33 bilden sich Bereiche um die Heizwerke aus, die nicht mehr abgeerntet werden.



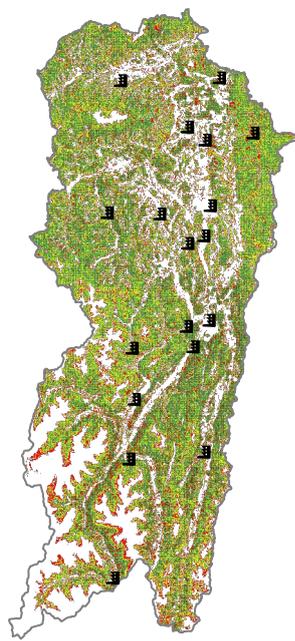
Tick 5



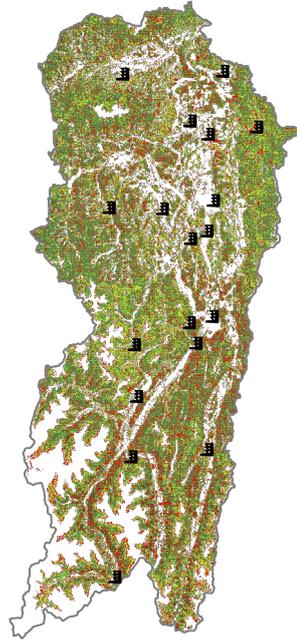
Tick 15



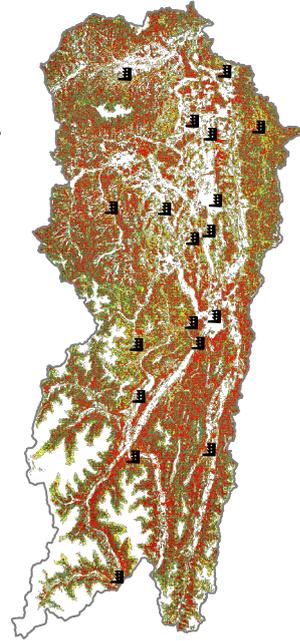
Tick 25



Tick 1



Tick 10



Tick 20

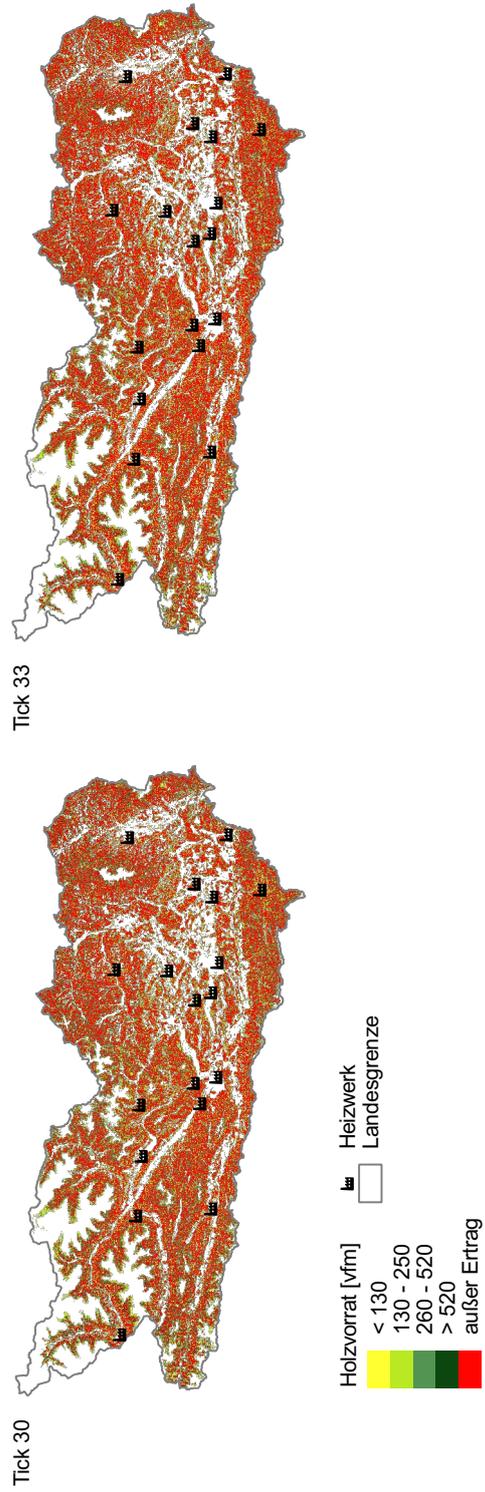


Abbildung 6.10: Entwicklung des Holzvorrates in 5-Jahres-Schritten für das Ressourcen-orientierten WEP-Szenario: Ab *Tick 10* bilden sich die sanfter genutzten Bereiche (dunklere Bereiche mit größerem Vorrat z.B. in Unterkärnten) aus. Mit *Tick 15* beginnt die Zunahme des nicht verfügbaren Waldanteils.

6.4 MARKT-SZENARIO I: POSITIVE MARKTENTWICKLUNG

Die Marktszenarien stellen die höchste Ausbaustufe der in dieser Arbeit behandelten Modelle dar. Jede Eigentumsart hat unterschiedliche Interessen, welche sich nach den in Abschnitt 4.7.2 beschriebenen Verhaltensregeln manifestieren. Auf Basis dieser Regeln verändert sich je nach Preislage die angebotene Holzmenge. In diesem Szenario wird eine positive Marktentwicklung angenommen. Das bedeutet, es wird beobachtet wie sich die aufgebrachte Holzmenge der Eigentümer und die daraus resultierenden Größen bei einer auf lange Sicht steigenden Preislage entwickeln. Zum Einsatz kommen die in Abschnitt 4.7.2 beschriebenen Markt-orientierten Auswahlkriterien. Außerdem fließen auch die auf Basis des WEP definierten Einschränkungen (siehe Abschnitt 4.7.3) in die Simulation ein. Die positive Marktentwicklung ergibt sich aus einer Extrapolation der Preisentwicklung von 1994–2016 (siehe Abschnitt 5.3.4). Das Simulations-Setup, das heißt die verwendeten Ausgangsdaten und Simulationsparameter, sind in Abschnitt 6.1.2 in Tabelle 6.2 aufgelistet.

Die Simulation dieses Szenarios umfasst 21 Simulationsschritte. Das bedeutet, dass eine weitere Verkürzung der Simulationsdauer im Vergleich zu den Ressourcen-orientierten Szenarien (Abschnitte 6.2 und 6.3) vorliegt. Nachdem das Angebot seitens der Eigentümer preis-abhängig variiert, äußert sich dies, wie in Abbildung 6.12 ersichtlich, in einer steigenden mittleren Transportdistanz bei niedrigem Preisniveau. Liegt ein hohes Preisniveau im Bezug auf die Erwartungen der Eigentümer vor, sinkt die Transportdistanz. Abbildung 6.15 zeigt in diesem Zusammenhang, dass der Kleinwald die größte Preisabhängigkeit aufweist. Wie in der Vorratskartenreihe (Abbildung 6.14) ersichtlich ist, steht über den gesamten Simulationsverlauf genügend Holz zur Verfügung, nur sind die Eigentümer nicht gewillt, dieses anzubieten, da ihre Preiserwartung nicht erfüllt werden kann. Abbildung 6.13 zeigt die Entwicklung der Erntemuster in diesem Szenario. Zu beobachten ist, dass sich die Erntengebiete in allen 3 Zeitslots homogen über das gesamte Landesgebiet verteilen. Ähnlich wie in den Ressourcen-orientierten Szenarien äußert sich die Konkurrenz wieder als Standardabweichung (siehe Abbildung 6.11).

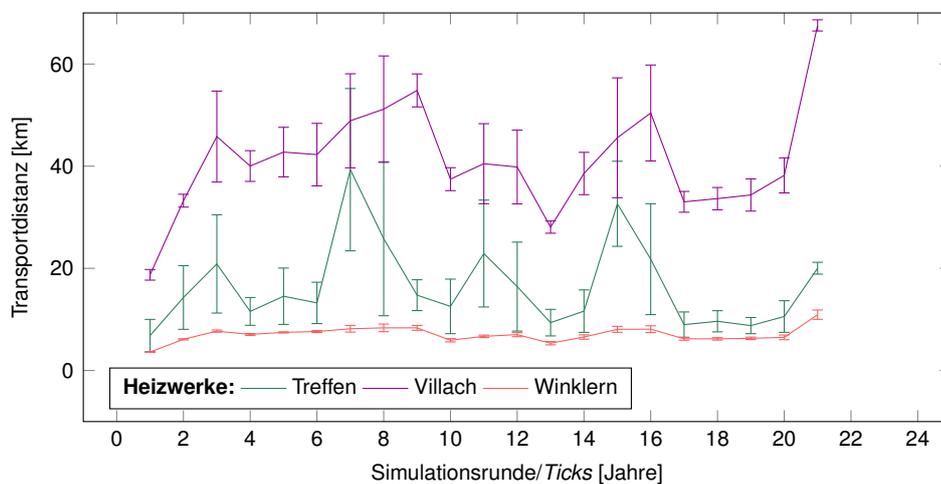


Abbildung 6.11: Am Beispiel der hohen Standardabweichung der durchschnittlichen Erntedistanz lässt sich die Konkurrenzsituation der Heizwerke Villach und Treffen gut abbilden. Dem gegenüber ist der Verlauf des ohne Konkurrenz agierenden Heizwerks Winklarn konstant.

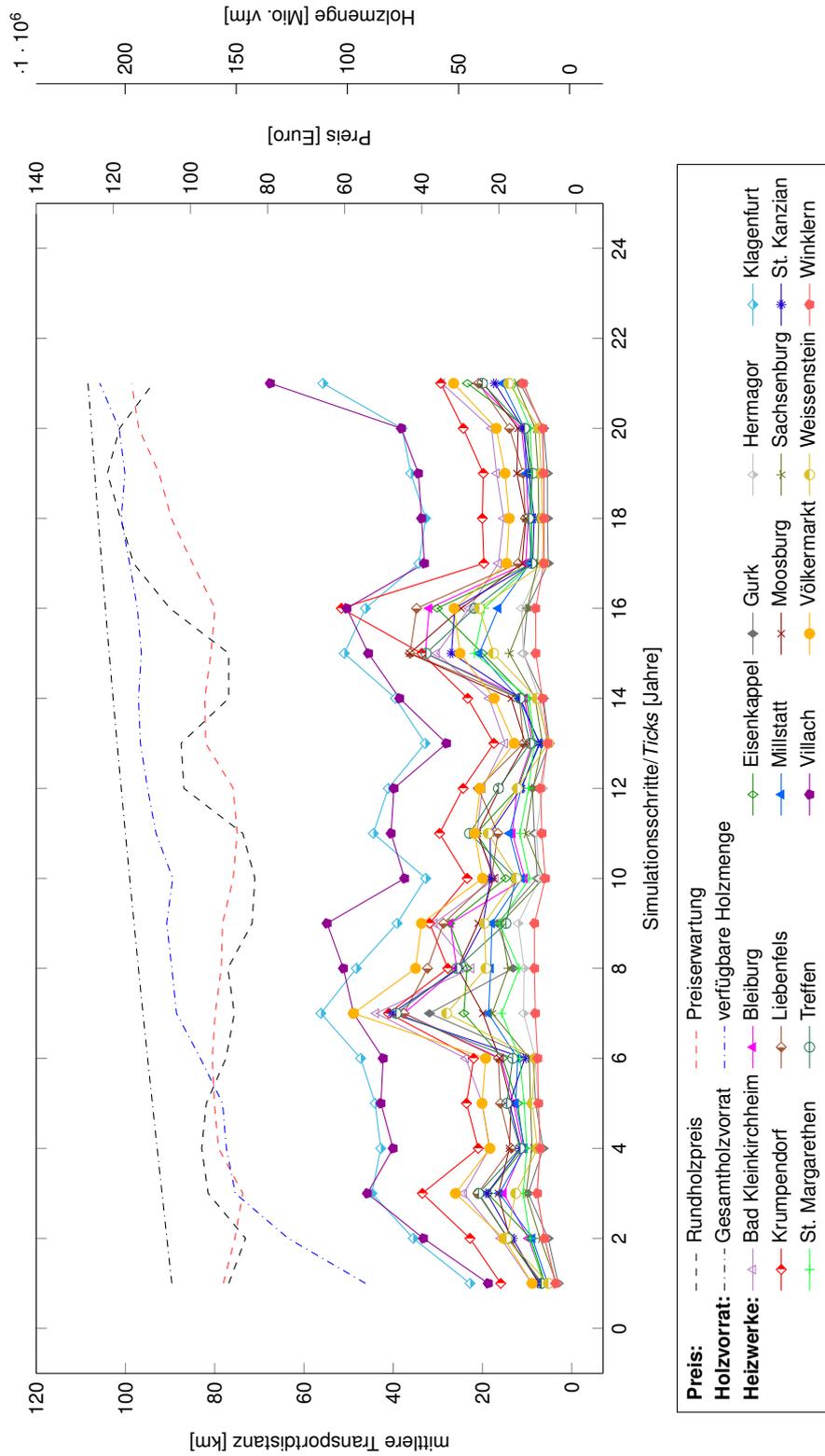


Abbildung 6.12: Zusammenhang zwischen positiver Preisentwicklung und mittlerer Transportdistanz im Markt-orientierten Modell: Die Transportdistanz folgt dem Rundholzpreis. Die Preisermartung der Eigentümer schaukelt sich mit ansteigendem Rundholzpreis so weit auf, dass diese bei abfallendem Rundholzpreis bei *Tick* 21 einfach nicht mehr verkaufen wollen und die Simulation bricht ab.

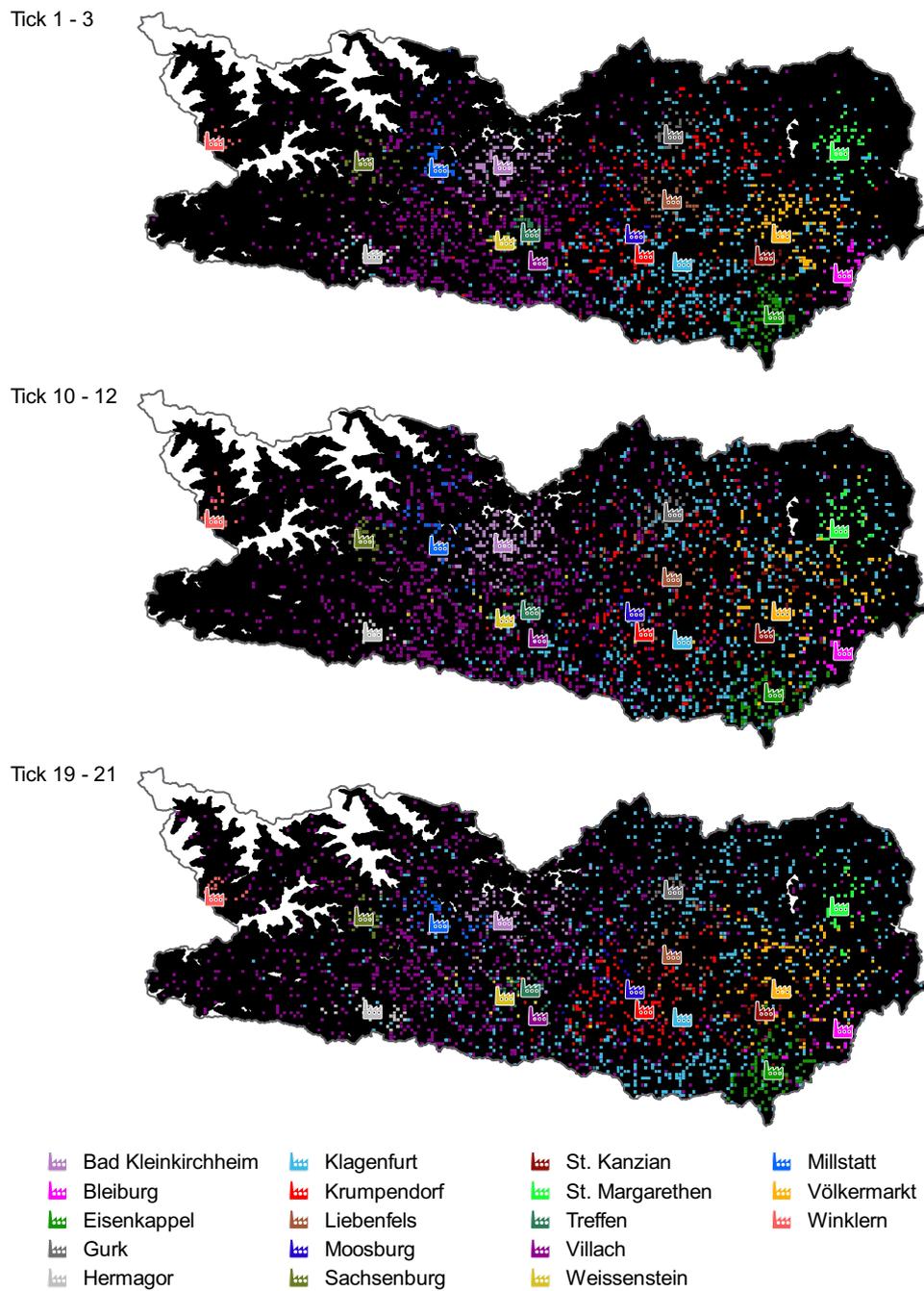


Abbildung 6.13: Auf 800x800m Rasterzellengröße interpolierte Erntemuster-Kartenreihe des Markt-orientierten Szenarios mit positiver Marktentwicklung: Die Erntebereiche bleiben für alle 3 Zeitslots ähnlich verteilt.

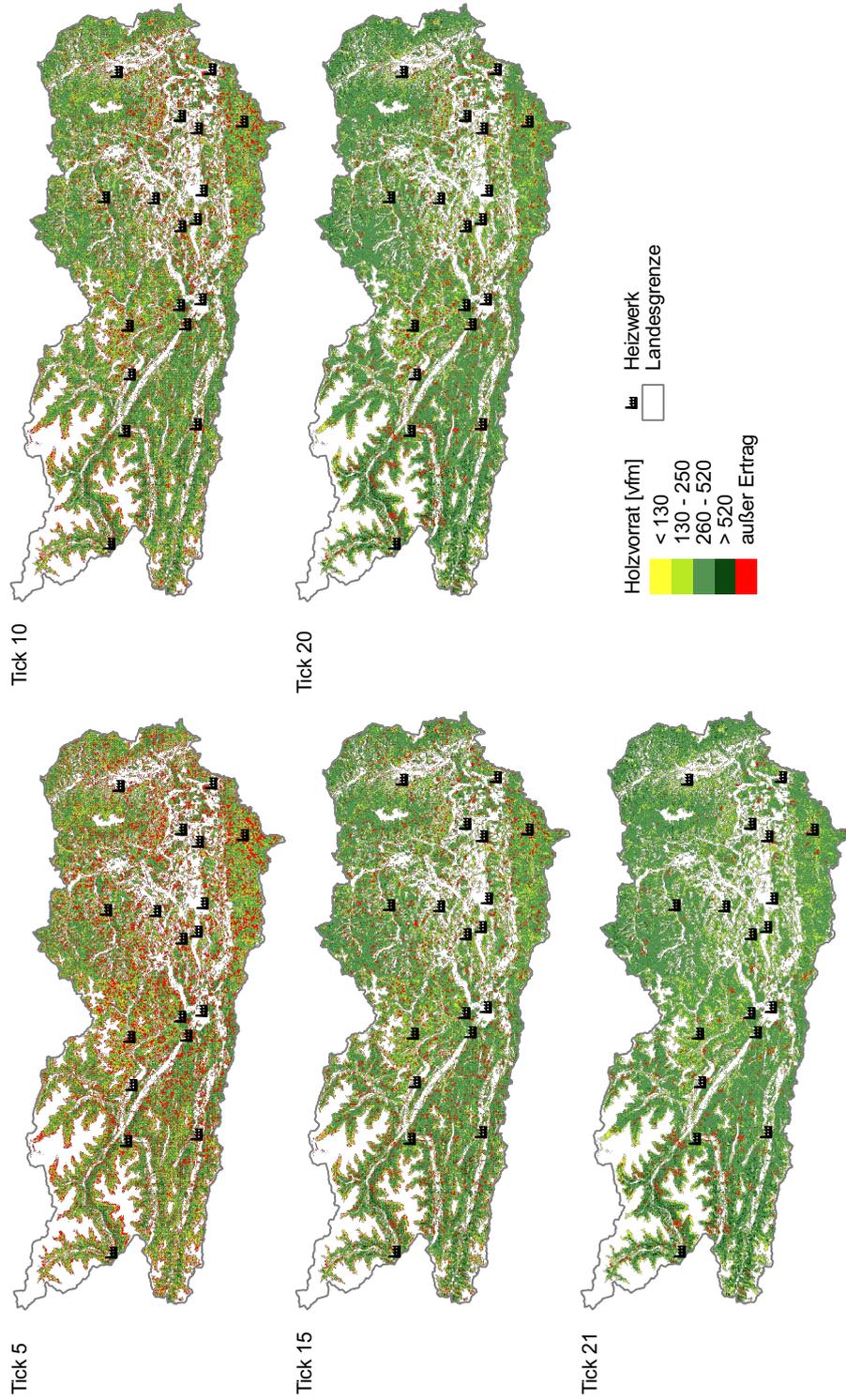


Abbildung 6.14: Entwicklung des Holzvorrates in 5-Jahres-Schritten für das Markt-orientierte Basis-Szenario mit positiver Marktentwicklung: Über den Simulationsverlauf ist eine homogene Nutzung des gesamten Waldgebietes zu beobachten.

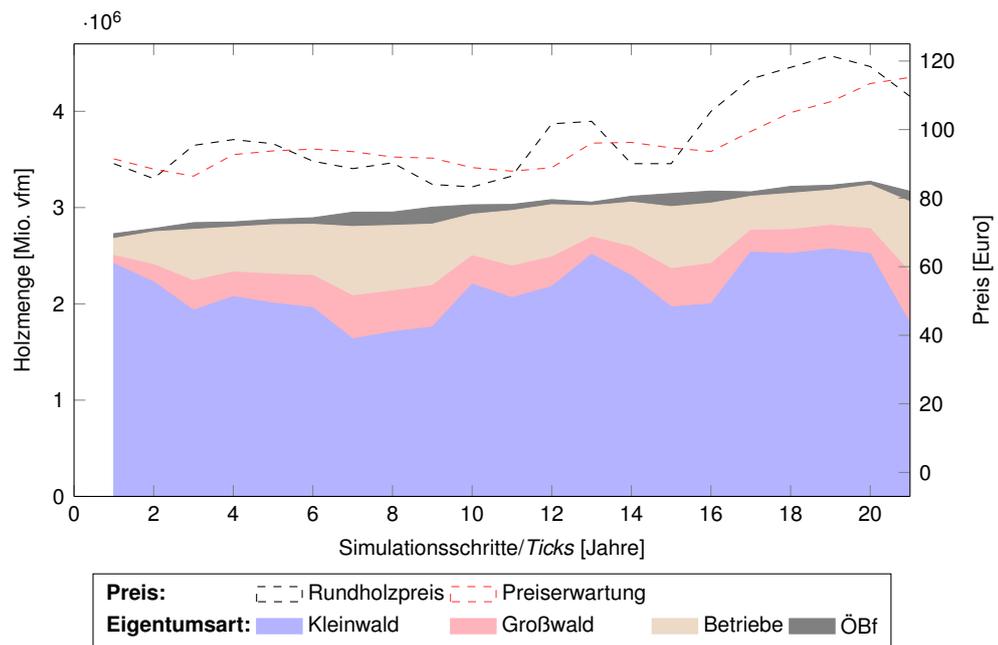


Abbildung 6.15: Positives Marktszenario: Zeitliche Veränderung der Erntemengen im Bezug auf die Eigentumsart. Bei fallendem Holzpreis (siehe beispielsweise *Tick* 4–9 und 13–16) nimmt auch die angebotene Menge seitens der Kleinwaldbesitzer ab.

6.5 MARKT-SZENARIO II: NEGATIVE MARKTENTWICKLUNG

In diesem Szenario werden die raumzeitlichen Auswirkungen einer negativen Marktentwicklung beobachtet. Die in Abschnitt 4.7.2 beschriebenen Markt-orientierten Auswahlkriterien der Eigentümer werden im Zusammenhang mit einer auf lange Sicht negativ-verlaufenden Preissituation beeinflusst. Außerdem fließen auch die Limitierungen im Bezug auf den WEP (siehe Abschnitt 4.7.3) in die Simulation ein. Die negative Marktentwicklung ergibt sich aus einer *“al reverso“* Extrapolation der Preisentwicklung von 1994–2016. Die für dieses Szenario verwendete Datengrundlage und die Simulationsparameter sind in Abschnitt 6.1.2 in Tabelle 6.2 abgebildet.

Die Simulation dieses Szenarios umfasst 8 Simulationsschritte (siehe Abbildung 6.16) bis zum Erreichen der Abbruchbedingung. Durch das abnehmende Preisniveau reduziert sich die Holzmenge aus dem Kleinwald immer weiter. Wie in Abbildung 6.17 ersichtlich, resultiert dies in einer ansteigenden mittleren Transportdistanz, obwohl in jedem Simulationsschritt genügend Holzvorrat (blau strich-punktierte Linie) zur Verfügung steht. Im Bezug auf die Ernteverteilung verschieben sich diese, wie in Abbildung 6.18, von einem rund um die Heizwerke verteilten zu einem *“holen wo noch was zu kriegen ist“*-Muster. Die Vorrats-Kartenreihe ist im Anhang A in Abbildung A.1 dargestellt und zeigt ein ähnliches Bild wie beim positiven Markt-Szenario (Abschnitt 6.4).

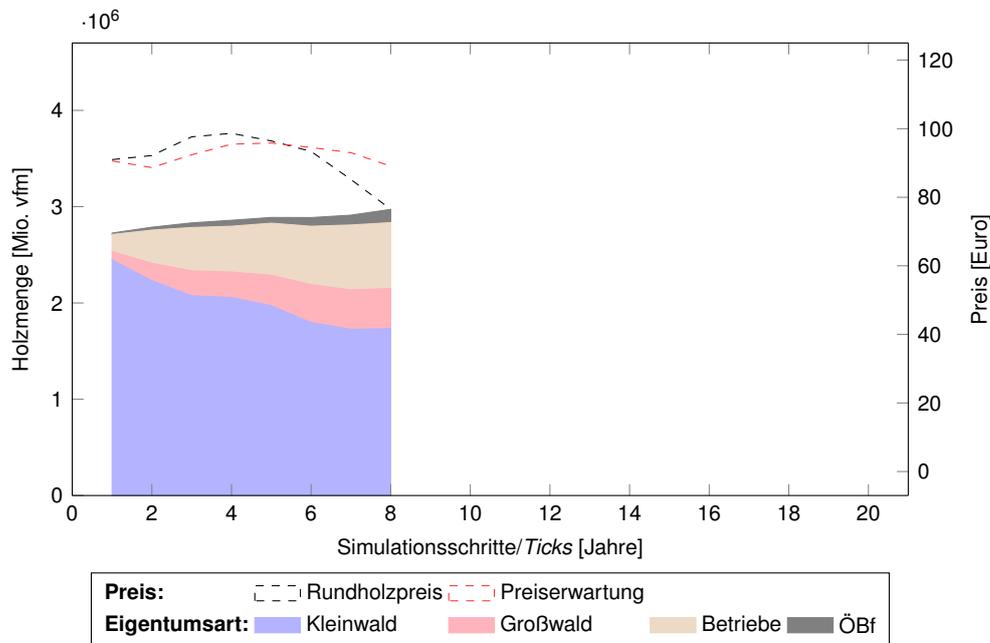


Abbildung 6.16: Negative Marktszenario: Zeitliche Veränderung der Erntemengen im Bezug auf die Eigentumsart. Durch das immer schlechter werdende Preisniveau nimmt die angebotene Holzmenge im Kleinwald und in weitere Folge die Erntemenge seitens der Heizwerke immer weiter ab. Die fehlende Menge wird durch die anderen Eigentumsarten kompensiert bis der Bedarf in *Tick* 8s nicht mehr gedeckt werden kann.

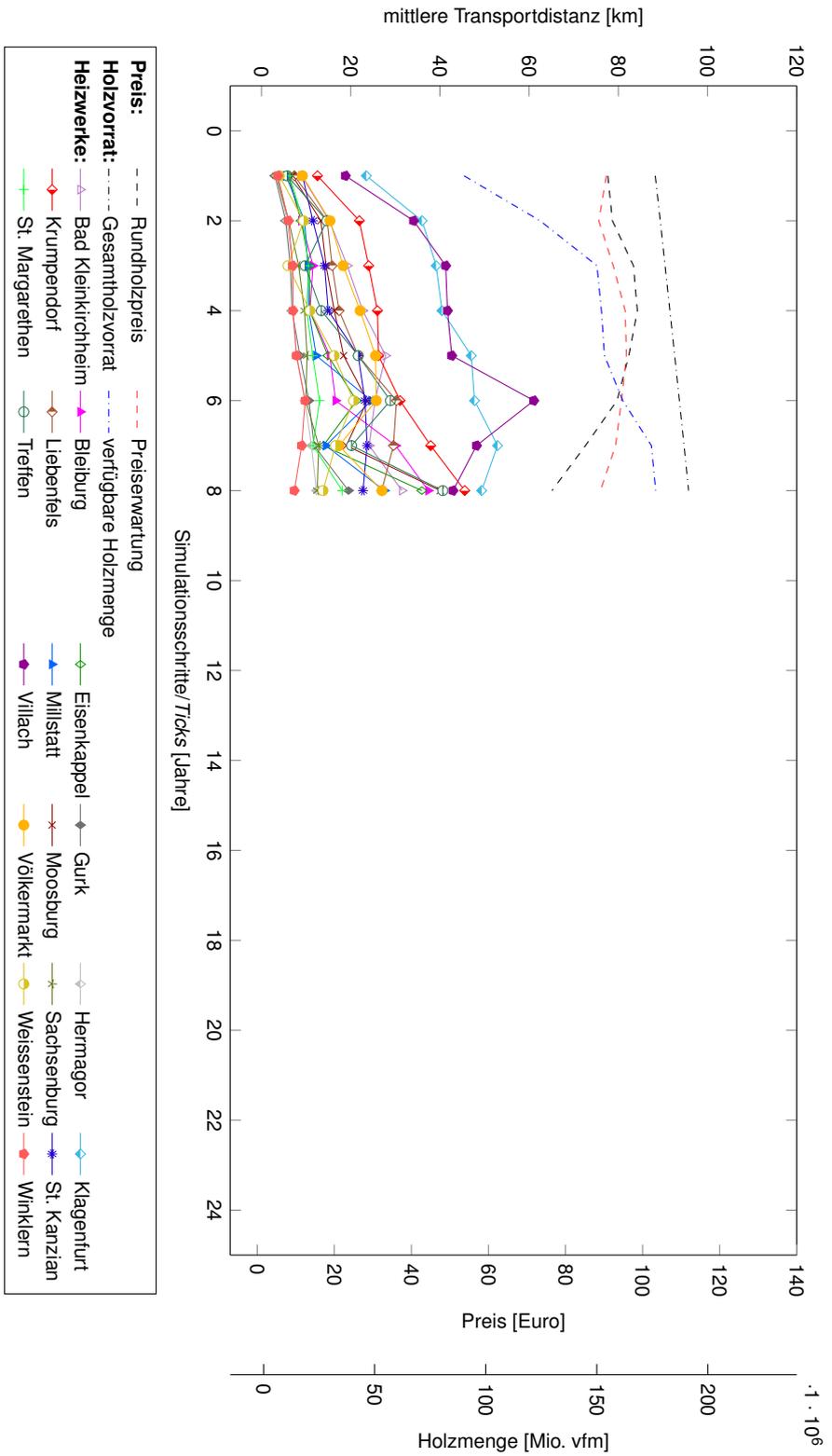


Abbildung 6.17: Zusammenhang zwischen negativer Preisentwicklung und mittlerer Transportdistanz im Markt-orientierten Szenario: Durch die Preisabnahmen sind nur wenige Eigentümer bereit Holz zu verkaufen, und die Simulation bricht bereits bei *Tick* 8 ab. Die mittlere Transportdistanz steigt mit zunehmendem Simulationsverlauf sukzessive an.

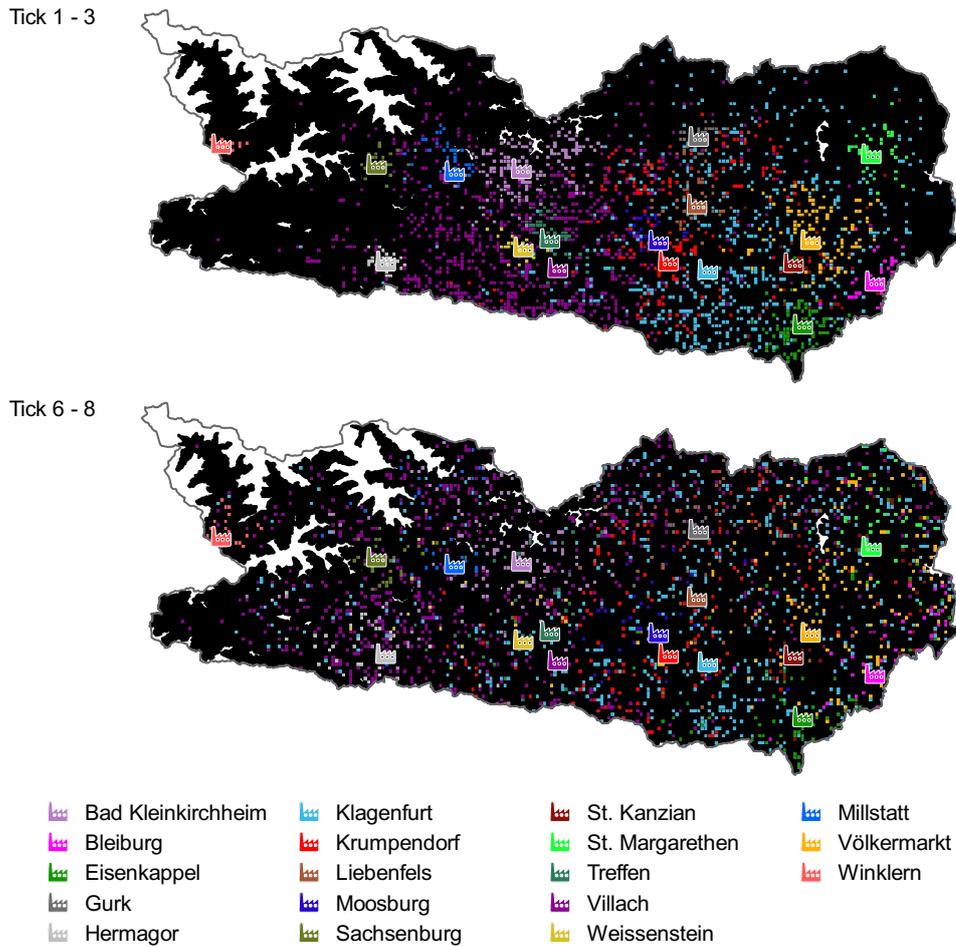


Abbildung 6.18: Auf 800x800m Rasterzellengröße interpolierte Erntemuster-Kartenreihe des Markt-orientierten Szenarios mit negativer Marktentwicklung: Durch die Marktverschlechterung müssen die Agenten zur Bedarfsdeckung auf ausgedehntere Bereiche zurückgreifen.

6.6 MARKT-SZENARIO III UND IV: STETIGE UND UNSICHERE MARKTENTWICKLUNG

In diesen zwei Szenarien wird von einer stetigen bzw. unsicheren Marktentwicklung ausgegangen. Die daraus resultierenden Preislageänderungen beeinflussen die Wald-Eigentümer, welche auf Basis der Markt-orientierten Auswahlkriterien (siehe Abschnitt 4.7.2) Entscheidungen treffen. Außerdem fließt auch der WEP (siehe Abschnitt 4.7.3) in die Simulation ein. Die stetige Preisentwicklung sieht kaum Änderungen der Preislage vor. Auf lange Sicht werden Schwankungen von $\mp 1\%$ modelliert. Die unsichere Preisentwicklung stellt eine sprunghafte Änderung der Preislage von Jahr zu Jahr dar. Der Wertebereich ergibt sich aus Werten $\mp 10\%$ des aktuellen Preisniveaus (siehe Abschnitt 5.3.4). Die verwendete Datenbasis sowie die Simulationsparameter sind in Tabelle 6.2 in Abschnitt 6.1.1 aufgelistet.

Die Simulation beider Szenarien umfasst 20 Simulationsschritte. Im stetigen Marktszenario zeigt sich sowohl bei der mittleren Transportdistanz (Abbildung 6.19) als auch bei der Verteilung der Erntemengen pro Eigentumsart (Abbildung 6.21) ein gleichmäßiger Verlauf über die gesamte Simulationsdauer. Das unsichere Marktszenario zeigt sich in diesem Kontext weit variabler; dies ist vor allem im Verlauf der Erntevertelung, in Abbildung 6.22, gut ersichtlich. Bemerkbar wenn auch nur in verhaltener Weise, äußert sich dieser Effekt im Verlauf der mittleren Transportdistanz in Abbildung 6.20. Wie bei den beiden vorigen (positives in Abschnitt 6.4 und negatives in Abschnitt 6.5) Markt-Szenarien zeigt sich bei den Vorratsreihen (im Anhang A \rightarrow stetig: Abbildung A.2 bzw. unsicher: Abbildung A.3), dass genug Holz in Ertrag steht, aber die Eigentümer dieses nicht anbieten. Die Karten der Erntemuster (stetig: Abbildung A.4 bzw. unsicher: Abbildung A.5) sind auch im Anhang A zu finden.

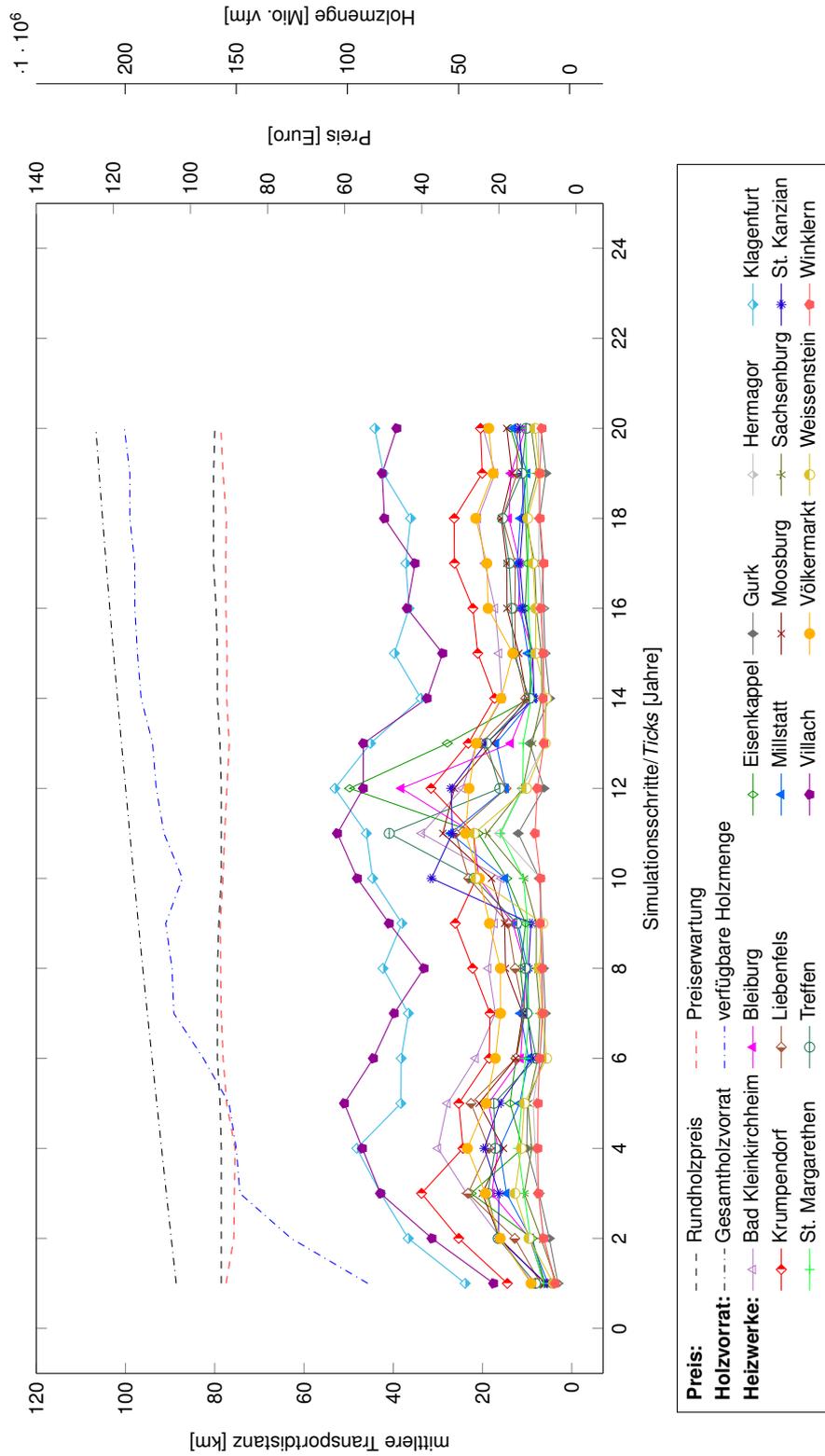


Abbildung 6.19: Zusammenhang zwischen stetiger Preisentwicklung und mittlerer Transportdistanz im Markt-orientierten Szenario. Es zeigt sich hier ein relativ gleichmäßiger Verlauf der mittleren Transportdistanz über den gesamten Simulationsverlauf.

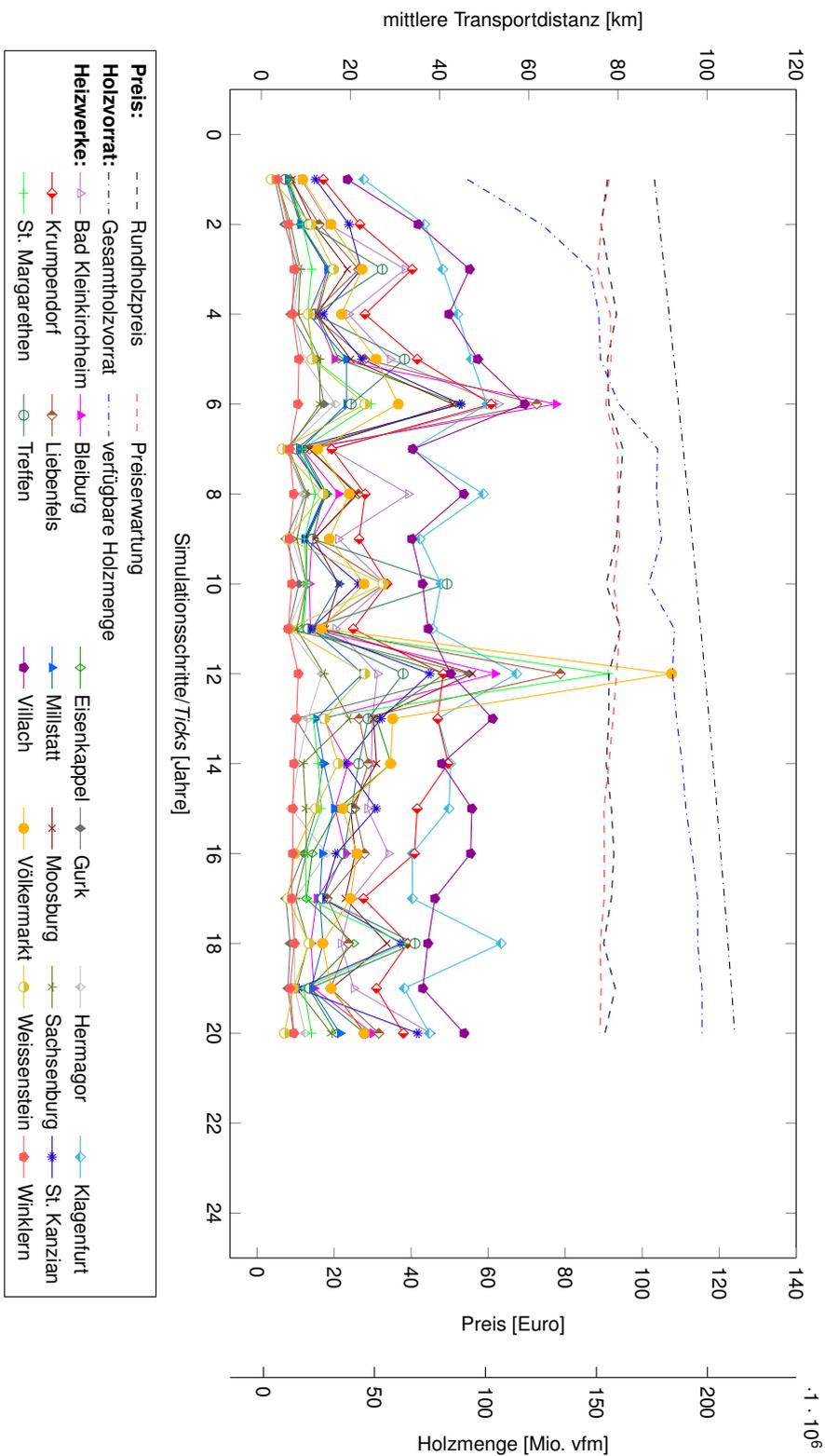


Abbildung 6.20: Zusammenhang zwischen unsicherer Preisentwicklung und mittlerer Transportdistanz im Markt-orientierten Szenario. Die sprunghaften Preisänderungen setzen sich in einer entsprechend variablen mittleren Transportdistanz um.

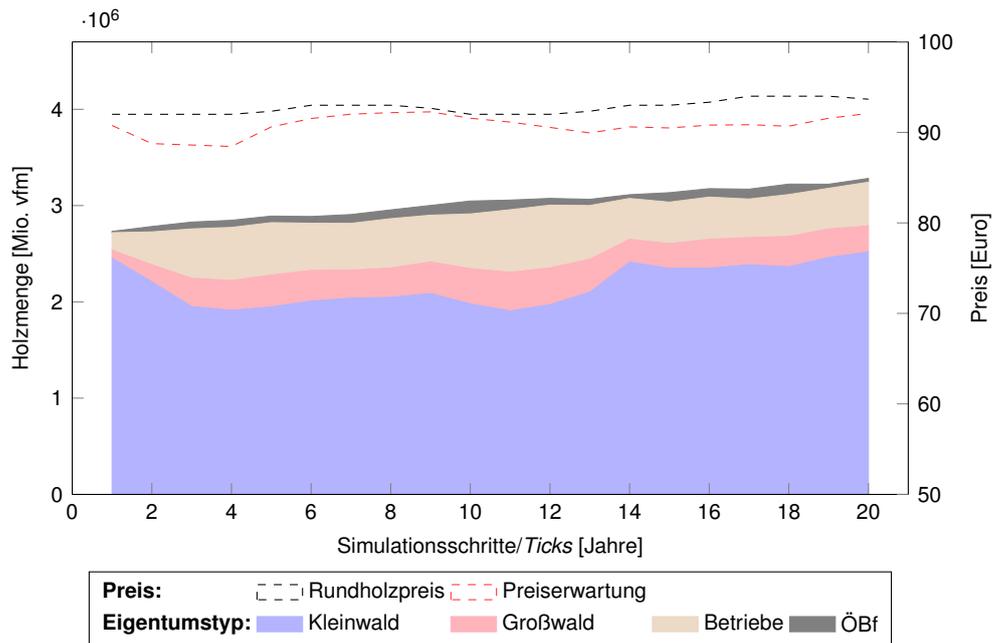


Abbildung 6.21: Stetiges Marktszenario: Zeitliche Veränderung der Erntemengen im Bezug auf die Eigentumsart.

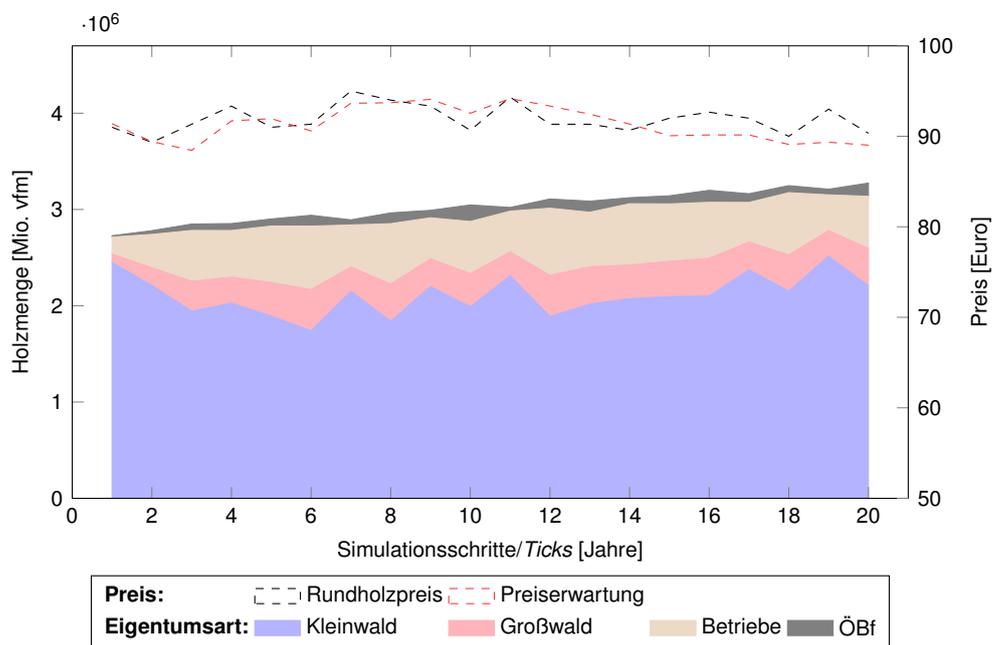


Abbildung 6.22: Unsichere Marktszenario: Zeitliche Veränderung der Erntemengen im Bezug auf die Eigentumsart.

DISKUSSION UND AUSBLICK

Dieses Kapitel bildet den Abschluss der Arbeit und liefert eine Reflexion und Diskussion (Abschnitt 7.1) der erarbeiteten Ergebnisse. Zudem gibt Abschnitt 7.2 einen Ausblick und somit einen Einblick in mögliche Erweiterungsmöglichkeiten

7.1 DISKUSSION

Wie bereits im Abschnitt 2.4 erwähnt, stellen traditionelle geografische Informationssysteme exzellente Werkzeuge zur Verfügung um raumbezogene Phänomene und Muster zu modellieren, analysieren und darzustellen. Da diese Fokussierung auf die räumliche Komponente Abstriche im Handling der Zeit mit sich bringt, ist es möglich mit ABM an dieser Stelle anzuknüpfen. Das im Rahmen dieses Projektes erarbeitete Modell ist das Ergebnis von mehreren Vorläufermodellen der letzten vier Jahre. Die Grundidee war stets die Kreation einer Simulation des Versorgungsprozesses von Biomasse in Form von Hackschnitzeln und das Darstellen der auftretenden raumzeitlichen Effekte. Das Vorläufermodell von Scholz et. al. [81] befasst sich dabei rein mit Ressourcen-basierten Abläufen. Das hier vorgestellte Projekt verwendet dieses Grundprinzip als Anlass um ein darauf aufbauendes Markt-orientiertes Modell umzusetzen. Die Ergebnisse der 6 (2 Ressourcen- und 4 Markt-orientierten) Szenarien werden in diesem Kapitel genauer beleuchtet und diskutiert.

In Anlehnung an die Arbeit von Scholz et. al. [81] gestaltet sich auch das erste in den Ergebnissen behandelte Szenario (siehe Abschnitt 6.2). Wie bereits in der Modellierung (Abschnitt 4.7.1) beschrieben, weisen alle Eigentumsarten dieselbe Holzauswahllogik auf, und der gesamte Wald wird als Nutzwald angesehen. In diesem Sinne kann dieses Szenario als Potentialanalyse für die Deckung des Holzbedarfs für Hackschnitzel-Heizwerke in Kärnten angesehen werden. Ähnlich wie bei Scholz et. al. [81] steigt die Transportdistanz mit zunehmendem Simulationsverlauf sukzessive an (siehe Abbildung 6.8). Dies äußert sich zu Simulationsbeginn in einer mittleren Erntedistanz von 5–20 km bei den “kleinen“ (< 12000 fm Bedarf) und bis hin zu 40 km bei den “großen“ Biomasseheizwerken. Ab Simulationsschritt/Tick 25 nimmt die Transportdistanz merklich zu, da der in Ertrag stehende Holzvorrat dann stärker abnimmt. Noch besser ist dieser Anstieg in der Darstellung der maximalen Erntedistanz erkennbar, wobei hier im weiteren Verlauf Transportdistanzen bis zu 140 km auftreten. Sobald nicht mehr genügend Holzvorrat zur Bedarfsdeckung vorliegt, bricht die Simulation bei Tick 36 ab. Die raumzeitliche Veränderung des in Ertrag stehenden Vorrats zeigt sich gut in der Kartenreihe, in Abbildung 6.5. Bei fortschreitender Simulationsdauer nimmt der flächenhafte Anteil des nicht verfügbaren Holzes (die roten Bereiche) immer weiter zu. Ab Tick 15 ist zu erkennen, dass vermehrt Wälder in den Tallagen, aufgrund der besseren Erreichbarkeit, nicht mehr zur Verfügung stehen. Dies ist einerseits auf das in diesen Bereichen dichtere Straßennetz und andererseits auf die geringere Geländesteilheit zurückzuführen. Einen kleinen Anteil an diesem Effekt macht möglicherweise die beschriebene Fehlklassifikation des Alters (siehe Abschnitt 5.3.1) bei Waldzellen mit geringerer Wuchsdichte nahe der Waldgrenze aus. Außer Ertrag stehende Waldzellen haben dabei noch nicht das untere Entnahmealter (20 Jahren für Nadel und 30 Jahre für Laub) erreicht oder befinden sich

in einer Ruhephase zwischen 2 Entnahmen. Ein weiteres Phänomen in der Vorratskartenreihe des Basis-Szenarios ist das Auftreten von helleren Bereichen in unmittelbarer Umgebung der Biomasseheizwerke, welche eine intensivere Nutzung dieser Bereiche andeutet. Dieses Phänomen ergibt sich, da der eingesetzte Algorithmus primär Distanz-abhängig arbeitet und somit eine intensivere Nutzung der nahen Umgebung der Biomasseheizwerke mit sich bringt. Die Ernteverteilungs-Karten in Abbildung 6.6 zeigen diesen Effekt noch deutlicher. Dieses Phänomen wird auch in der Arbeit Scholz et. al. [81] beschrieben. In der Nähe von "Ballungszentren", wie Klagenfurt oder Villach, finden sich mehrere Biomasseheizwerke. Hier kommt es zu den in der Modellierung angesprochenen Konkurrenzsituationen (siehe Abschnitt 4.8). In der Ernteverteilungs-Karte äußert sich dies in einer Verschiebung der Erntegebiete von der unmittelbaren Umgebung bis in die Peripherie bzw. in eine flächige Verteilung der Erntegebiete. Ein gutes Beispiel bietet hier Krumpendorf. Der Konkurrenzeffekt ist außerdem durch die Standardabweichung der mittleren Transportdistanz von 10 Simulationsläufe (siehe Abbildung 6.2) abbildbar. Am Beispiel Villach und Treffen zeigt sich hier eine weitaus höhere Standardabweichung, als beiden ohne Konkurrenz agierende Heizwerk Winklern. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass der Holzagent des Biomasseheizwerks Villach durch den höheren Bedarf weit mehr Erntevorgänge ausführen muss als jener der kleinen Biomasseheizwerke. Der Mehraufwand, welcher durch das *first come first serve*-Prinzip verursacht wird, wirkt sich im Mittel also nicht so stark aus wie bei den kleinen Nachfragern, da sowieso weitere Wege zur Bedarfsdeckung nötig sind. Die Veränderung der Erntegebiete im Bezug auf die vorhandene Holzmenge ist (Abbildung 6.6) in Form von 3 repräsentativen Zeitslots dargestellt. Sofort ins Auge stechen die Erntebereiche der großen Biomasseheizwerke in Villach und Klagenfurt. In Zeitslot 1-3 weist jedes, bis auf einige der Konkurrenzsituation geschuldete Ausnahmen (z.B. Krumpendorf und Völkermarkt), kleine Biomasseheizwerk einen kompakt um den Standort situierten Erntebereich auf. Mit fortschreitenden Simulationsdauer verschiebt sich dieser langsam weiter weg (Tick 19–21). Bei knapper Versorgungssituation (Tick 34–36) verteilen sich die Erntegebiete aller Biomasseheizwerke auf das gesamte Landesgebiet. Es nimmt also jeder Agent, was er gerade noch kriegen kann.

Der zweite Versuchsaufbau, als WEP-Szenario bezeichnet, ist eine Weiterentwicklung des Basis-Szenarios und berücksichtigt Regularien des Forstgesetzes 1975 [24] im Bezug auf die Wiederbewaldung und Intensität der Nutzung der verschiedenen Forstfunktionen (Nutz-, Schutz-, Wohlfahrts- und Erholungswald). Bezogen auf das Basis-Szenario äußern sich diese Einschränkungen am offensichtlichsten in einer Verkürzung des Simulationsdauer von 36 auf 33 *Ticks*. Die Entwicklung der mittleren Erntedistanz verhält sich ähnlich, allerdings ist eine leichte Erhöhung der Werte um ca. 10–15 % zu beobachten. Diese Größenordnung lässt sich aus den um 10–15 % weniger frequentierten Erntebereichen im Schutz-, Wohlfahrts- und Erholungswald ableiten. Der Vergleich zwischen Erntebereichen im Basis- und WEP-Szenario ist in Abbildung 6.7 gut zu sehen. Raumzeitlich manifestiert sich diese "sanftere" Bewirtschaftung von Schutz-, Wohlfahrts- und Erholungswald als dunklere Flecken mit größerem Vorrat in der Vorratskartenreihe (siehe Abbildung 6.10. Ab *Tick* 10 sind diese im Bereich des Möll- und Gailtals sowie in Unterkärnten erkennbar. Diese Muster zeigen sich auch im Bezug auf die Erntemuster in Abbildung 6.9. Außerdem ergibt sich auch hier für die ersten Simulationsrunden (Zeitslot 1–3) ein homogenes Bild mit Erntebereichen in der Umgebung um die Biomasseheizwerke. Allerdings gehen die Erntemuster deutlich schneller in eine zerstreute Form über als beim Basis-Szenario ohne WEP.

Zusammenfassend zeigt sich für die Ressourcen-orientierten Szenarien, dass der außer Ertrag stehende Holzvorrat mit fortschreitender Simulationsdauer immer weiter zunimmt, bis der Bedarf nicht mehr gedeckt werden kann. Damit einhergehend äußert sich dies in einer sukzessiven Zunahme der Transportdistanzen der Heizwerke. Beide Phänomene treten auch bereits in den Simulationen von Scholz et. al. [81] auf.

Im Gegensatz dazu zeigen sich in den 4 Markt-orientierten Szenarien (positive, negative, stetige und unsichere Marktentwicklung) völlig neue Phänomene und Abhängigkeiten. Der erste ganz offensichtliche Aspekt äußert sich in einer Verkürzung der Simulationsdauer. Für die positive Marktentwicklung (6.4) äußert sich dies in Form von 21 Simulationszyklen. Dies sind im Vergleich zum Basis-Szenario um 15 Schritte weniger bzw. bezogen auf das WEP-Szenario 12 *Ticks*. Bei negativer Preisentwicklung (6.5) sind es 8 *Ticks*, und das stetige bzw. unsichere Marktszenario bricht nach 20 Simulationszyklen ab. Da es sich um ein Preis-abhängiges System handelt, ist diese Verkürzung ganz klar mit der jeweiligen Preisentwicklung in Verbindung zu bringen und ist nicht mehr, wie bei den Ressourcen-orientierten Szenarien rein, von der Entwicklung des im Ertrag stehenden Holzvorrates abhängig.

Im Bezug auf die mittlere Transportdistanz ist diese Preisabhängigkeit vor allem im positiven und negativen Markt-Szenario zu erkennen. Liegt der Marktpreis oberhalb der Preiserwartung der Eigentümer, resultiert dies in einer niedrigen Transportdistanz. Fällt der Preis unter die Preiserwartung, sinkt die angebotene Holzmenge und in weiterer Folge steigt die mittlere Transportdistanz an. Gut ersichtlich ist dieser Effekt in Abbildung 6.12 in den Simulationszyklen 6–10 und 13–16 im positiven Markt-Szenario. Bezogen auf eine negative Preisentwicklung zeigt sich diese Preis-bezogene Steigerung der Transportdistanz langsamer (siehe Abbildung 6.17). In beiden Szenarien führt eine zu hohe Preiserwartung seitens der Eigentümer zu einem nicht erfüllten Bedarf und folglich dann zum Eintreten der Abbruchbedingung. Das Phänomen der Preisabhängigkeit spiegelt sich auch in der Verteilung der Erntemengen pro Eigentumsart wider. Im positiven (Abbildung 6.15) und unsicheren (Abbildung 6.22) Markt-Szenario spiegelt sich der sprunghafte Preisverlauf in der Erntemenge des Kleinwaldes wider. Vor allem bei der positiven Preisentwicklung ist ein ganz klarer Einbruch der Erntemenge aus dem Kleinwald bei Simulationsabbruch zu erkennen. Im negativen Markt-Szenario (Abbildung 6.16) nimmt das Erntevolumen aus dem Kleinwald mit fallenden Preisen immer weiter ab. Der stetige Preisverlauf, in Abbildung 6.22, zeigt einen weitgehend gleichmäßigen Verlauf der Erntemengen im Kleinwald über den gesamten Simulationsverlauf. Wie in der Modellierung angestrebt, bleibt die Erntemenge aus dem Großwald, Betrieben und dem ÖBf großteils auf einem konstanten Niveau. Lediglich bei stark nachlassenden Erntemengen aus dem Kleinwald werden diese aus den anderen Eigentumsarten nach Möglichkeit kompensiert.

Wie durch die Modellierung angestrebt, stellt das jährliche Erntevolumen aus dem Kleinwald den Hauptanteil der benötigten Holzmenge dar. Durch das Preis-abhängige Verhalten führt dies zu einer raumzeitlichen Veränderung der Erntebereiche der Heizwerke. Diese Verschiebung bzw. Verteilung ist gut in den erstellten Erntemuster-Karten zuerkennen. Am Beispiel der positiven Marktentwicklung (Abbildung 6.13) zeigen sich zu Simulationsbeginn noch kompakte (Konkurrenz-bedingte Verschiebungen ausgenommen) um die Heizwerke situierte Erntegebiete. Mit fortschreitender Simulation verschieben sich diese bei schlechterer Preislage weiter in die Peripherie. Eine ähnliche Erntegebiets-Entwicklung ergibt sich bei der negativen Marktentwicklung (siehe Abbildung 6.18). Die beiden anderen Szenarien weisen hier induziert durch die auf lange Zeit gesehen konstante Preisentwicklung ein gleichmäßigeres Bild (siehe Abbildungen A.4 und A.5) auf. Durch die Preis-abhängige Angebotssituation ist eine homogene Verteilung der Erntebereiche der Biomasseheizwerke festzustellen. Ähnlich wie bei den Ressourcen-orientierten Szenarien ist auch hier die Konkurrenz der Holzagenten benachbarter Heizwerke ersichtlich. Dies ist einerseits in den Erntemusterkarten durch Verdrängung der Erntegebiete sowie andererseits durch die auftretende Standardabweichung bezüglich der mittleren Transportdistanz am Beispiel Villach und Treffen in Abbildung 6.11 zu beobachten.

Ebenfalls ist in diesen Szenarien der Effekt auffällig, dass wenn Holz zur Verfügung steht, vor allem die Kleinwaldbesitzer es aus individuellen Gründen nicht ernten, was auf die Sparkassenfunktion

des Waldes hindeutet. Andererseits zeigt sich deutlich, dass forstwirtschaftliche Großbetriebe ihren Wald eher überbewirtschaften. In allen Szenarien wird die Überalterung des Schutzwaldes auffällig, da dieser aufgrund der erschwerten Zugänglichkeit weniger intensiv bewirtschaftet wird [10]. Dieses Phänomen spiegelt sich in allen Vorratskarten-Reihen dieser Szenarien wider. Zu jedem Simulationszeitpunkt steht genügend Holzvorrat zur Verfügung.

Zusammenfassend zeigt sich, dass im Zusammenhang mit den Markt-orientierten Szenarien das von Eckmüllner [20] und Jöbstl [41, 42] beschriebene Modell das umgesetzte Verhalten der verschiedenen Besitzarten gut abbildet. Die grundsätzliche Annahme, dass der Kleinwald bei günstiger Preislage im Zuge von Geld- oder Naturalbedarf Holz entnimmt, zeichnet sich im Großen und Ganzen in den Ergebnissen ab. Auch das konstante Nutzungsverhalten der Großwaldbesitzer und Betriebe wird in seiner Grundform wiedergegeben. Im Vergleich zu den beiden Ressourcen-orientierten Szenarien spielt hier die unberechenbare Variable Waldbesitzer eine tragende Rolle und gibt dem Markt-orientierten Modell realitätsnähere Züge. Das in der Realität vorliegende Verhältnis zwischen Angebot und Nachfrage kann somit besser angenähert werden. Außer Frage steht, dass zu einer realistischen Modellierung noch weitaus detailliertere Datengrundlagen und Modelle nötig sind, denn die realistische Marktsituation ist weitaus komplexer als hier dargestellt. Die hier modellierten Besitzer werden weitgehend pauschaliert abgebildet, obwohl jeder seine Eigenheiten aufweist. Auch die menschlichen Züge wie z.B. langjährig aufrecht erhaltene Geschäftsbeziehungen, wie sie im kleinräumigeren Modell von Kostadinov et. al. [49] ansatz-mäßig modelliert sind, werden nicht berücksichtigt. Dennoch zeigt sich, dass mit den vorliegenden Mitteln der Modellierbarkeit im Bezug auf die Datenbasis und die vorliegenden Informationen über die Verhaltensweisen der Waldeigentümer ein funktionaler Einblick in die raumzeitlichen Abläufe in einem forstwirtschaftlichen Kontext gegeben werden kann. In diesem Zusammenhang ist allein die Tatsache zu nennen, dass die Besitzverteilung aus Zahlenwerten der ÖWI abgeleitet wird und somit rein die prozentuale Verteilung auf BFI-Level widerspiegelt. Zur Simulation und der daraus ableitbaren raumzeitlich auftretenden Phänomene auf makroskopischer Ebene reicht diese Form der Datenbasis aber vollkommen aus. Brauchbare Informationen auf mikro-Level, wie z.B. Eigentümer X verkauft an Händler Y, lassen sich dadurch nicht sinnvoll ableiten. Wichtiger sind hier die daraus ableitbaren Zusammenhänge für das große Ganze. Einen Beweis für die gelungene Modellierung kann in Folge der durchgeführten Validierung erbracht werden. Diese zeigt, dass sich das Modell im Vergleich zu den zur Verfügung stehenden Daten der ÖWI im Schnitt um $\pm 1.8\%$ unterscheidet. Trotzdem stellt die Umsetzung einer realistischen Abbildung von Angebot und Nachfrage niemals das inhaltliche Ziel der Arbeit dar. Trotzdem werden relevante Phänomene wie der Preis-Erntedistanz-Zusammenhang aufgezeigt und großräumige Phänomene wie das Erntemuster gut dargestellt. Grundsätzlich muss aber beachtet werden, dass das hier vorgestellte Modell rein als wissenschaftliche Potentialanalyse anzusehen ist. Neben der kaum möglichen Modellierung des Entnahmeverhaltens stellt auch der Zukauf aus dem Ausland eine nicht wegzudenkende Variable dar, die hier nicht dynamisch berücksichtigt wird. Dieser Teil ist aber schwer modellierbar, da er von vielen oft auch nicht erfassbaren Faktoren abhängig ist. Das gesamte Modell steht eher unter der Prämisse: *“Wie viel kann man aus den zu Verfügung stehenden Möglichkeiten überhaupt heraus holen?”*.

Zur eingangs erwähnten Fragestellung, ob raumzeitliche Zusammenhänge zwischen Angebot und Nachfrage von Hackschnitzeln für Biomasse-Heizwerke in Kärnten existieren, können folgende Beobachtungen resümiert werden. Im Ressourcen-orientierten Szenario zeigt sich, dass alle beschriebenen Phänomene auf eine mit fortschreitender Simulationsdauer in Ertrag stehenden Vorratsmenge zurückzuführen sind. Im Markt-orientierten Modell wird deutlich, dass sich die beobachteten Effekte abhängig vom Preis ändern.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass ABM die Möglichkeit bietet, mit relativ einfachen

Mitteln solche komplexen Sachverhalte, wie das Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage im Kontext eines Holzmarktes, abzubilden. Die Modellierung der Teilnehmer als eigenständige, auf gegebene Sachverhalte reagierende Agenten erlaubt es, an die Problemstellung mit einer völlig neuen und natürlichen Sichtweise heranzugehen. Ebenfalls auf der positiven Seite ist zu erwähnen, dass das Einarbeiten in Repast Symphony aufgrund der zahlreichen Beispielapplikationen und der detaillierten Dokumentation der API wesentlich erleichtert wird. Abstriche in der Verwendung von *Repast Symphony* finden sich im Handling von gebräuchlichen GIS-Datenformaten. Es werden nur *Esri-grid* nativ unterstützt. Somit ist die Verwendung von Datenformaten wie *GeoTIFF* nur durch die Einbindung der GeoTools-Bibliotheken in Form von Workarounds möglich. Daher kann man sagen, dass sich Agenten-basierte Modellierung zur Modellierung und Simulation von raumzeitlichen Effekten im GIS-Bereich eignet.

Alles in Allem kann das hier erarbeitete Modell möglicherweise als Beginn einer zukünftigen Serie von Agenten-basierten Modellen zur Darstellung von Verwendung und Angebot erneuerbarer Energiequellen zur Elektrizitätserzeugung, Wärmegewinnung und Elektromobilität angesehen werden.

7.2 AUSBLICK

Das hier dargestellte Modell könnte man zukünftig noch in mehreren Punkten erweitern. Zum Einen wäre die Verfeinerung des Marktmodells erstrebenswert, sodass man den ausländischen Markt und die Papier- und Sägeholzindustrie miteinbezieht. Weiters könnte man Waldgemeinschaften und Genossenschaften als separate Agenten integrieren. Auch das Einbeziehen von Erntekosten wäre interessant, da in Realität das Gelände die Erntekosten beeinflusst und somit zur Auswahl der Waldparzelle beiträgt. Zum Anderen könnte man den Aufbau insofern optimieren, dass ein professionelles Waldmodell integriert werden kann. Ein ebenfalls erweiterbarer Aspekt ist die Eigenschaft, dass in ländlichen Gebieten der Holzmarkt stark durch subjektive und auch nicht monetäre Faktoren im Bezug auf Vertrauen und Bindung zu einem "Händler des Vertrauens" und somit langfristige Geschäftsverhältnisse beeinflusst wird, ähnlich dem Modell von Kostadinov et. al. [49]. Eine interessante Untersuchungsgrundlage stellt auch die Simulation von Einflüssen bzw. Ressourcenverschiebungen durch neue Energieprojekte wie z.B. das geplante Heizkraftwerk in Klagenfurt dar. Hier kann möglicherweise aufgezeigt werden wie sich durch das neue Projekt Kräfteverhältnisse am Holzmarkt neu ordnen. Ein weitere Punkt im Sinne der Erweiterbarkeit ist die Einflussnahme von Schadensereignissen wie Sturmtief Paula aus dem Jahr 2008. In diesem Zusammenhang sind auch Wildverbiss und Borkenkäfer zu nennen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Abdou, M., Hamill, L. & Gilbert, N. „Designing and Building an Agent-Based Model“. In: *Agent-based models of geographical systems*. Hrsg. von Heppenstall, A. J., Crooks, A. T., See, L. M. & Batty, M. Springer, 2012, S. 141–165. DOI: 10.1007/978-90-481-8927-4_8.
- [2] *AnyLogic® - Multimethod Simulation Software*. URL: <http://www.anylogic.com/> (besucht am 16.11.2016).
- [3] *Arbeitsplattform Wald und Holz in Kärnten - Bilanz und Strategieplan über Aufkommen, Nutzen und Potentiale*. Landwirtschaftskammer Kärnten: ausgearbeitet von Vertretern der Kärntner Forst und Holzwirtschaft. 2009.
- [4] Axelrod, R. „Simulation in the Social Sciences.“ In: *Handbook of research on nature inspired computing for economy and management*. Hrsg. von Rennard, J. P. Idea Group, 2007, S. 90–100.
- [5] *BFW - Bundesforschungszentrum für Wald*. URL: <http://bfw.ac.at/> (besucht am 30.07.2016).
- [6] Binder, C. R., Hofer, C., Wiek, A. & Scholz, R. W. „Transition towards improved regional wood flows by integrating material flux analysis and agent analysis: the case of Appenzell Ausserrhoden, Switzerland“. In: *Ecological Economics* 49.1 (2004), S. 1–17. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2003.10.021.
- [7] Bonabeau, E. „Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems“. In: *PNAS - Proceedings of the National Academy of Sciences* 99.suppl 3 (2002), S. 7280–7287. DOI: 10.1073/pnas.082080899.
- [8] Bone, C. & Dragičević, S. „Evaluating spatio-temporal complexities of forest management: an integrated agent-based modeling and GIS approach“. In: *Environmental Modeling & Assessment* 14.4 (2009), S. 481–496. DOI: 10.1007/s10666-008-9151-9.
- [9] Box, P. „Kenge GIS-CA class template for Swarm“. In: *Natural Resources and Environmental Issues* 8.1 (2001), S. 6.
- [10] Büchsenmeister, R. „Waldinventur 2007/09: Betriebe und Bundesforste nutzen mehr als den Zuwachs“. In: *BFW-Praxisinformation* 24 (2011), S. 6–9.
- [11] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW - Lebensministerium). *Waldentwicklungsplan - Richtlinie über Inhalt und Ausgestaltung - Fassung 2006*. 2006.
- [12] Castle, C. J. E. & Crooks, A. T. „Principles and concepts of agent-based modelling for developing geospatial simulations“. In: *CASA Working Papers* September.Paper 110 (2006), S. 62.
- [13] Collier, N. & North, M. *Repast Java getting started*. Tech. report, Repast Development Team, 2010.
- [14] Collier, N. „Repast: An extensible framework for agent simulation“. In: *The University of Chicago's Social Science Research* 36 (2003), S. 18.

- [15] Cooley, P. & Solano, E. „Agent-based model (ABM) validation considerations“. In: *Proceedings of the Third International Conference on Advances in System Simulation (SIMUL 2011)*. 2011, S. 134–139.
- [16] Crooks, A. T. & Castle, C. J. „The integration of agent-based modelling and geographical information for geospatial simulation“. In: *Agent-based models of geographical systems*. Hrsg. von Heppenstall, A. J., Crooks, A. T., See, L. M. & Batty, M. Springer, 2012, S. 219–251. DOI: 10.1007/978-90-481-8927-4_12.
- [17] Crooks, A. T. & Heppenstall, A. J. „Introduction to agent-based modelling“. In: *Agent-based models of geographical systems*. Hrsg. von Heppenstall, A. J., Crooks, A. T., See, L. M. & Batty, M. Springer, 2012, S. 85–105. DOI: 10.1007/978-90-481-8927-4_5.
- [18] *data.gv.at - offene Daten Österreichs*. URL: <https://www.data.gv.at/> (besucht am 16.07.2016).
- [19] De Smith, M. J., Goodchild, M. F. & Longley, P. *Geospatial analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools - 5th Edition*. Troubador Publishing Ltd, 2015. URL: <http://www.spatialanalysisonline.com/HTML/>.
- [20] Eckmüllner, O. „Probleme des Bauernwaldes; nachgedruckt in: Institut für Forstliche Betriebswirtschaft und Forstwirtschaftspolitik“. In: *Eigenverlag* (1964), S. 91–106.
- [21] *Empfohlene Ertragstabeln für Nord- und Osttirol*. Amt der Tiroler Landesregierung, Abt. Forstplanung. 2004. URL: https://www.tirol.gv.at/fileadmin/themen/umwelt/wald/waldwirtschaft/downloads/ertragstabeln-fuer_tirol.pdf.
- [22] Fichtner, J. „Die Waldverhältnisse Kärntens“. In: *Natur und Land (vormals Blätter für Naturkunde und Naturschutz)* 7–10 (1955), S. 113–119.
- [23] Folcik, V. A., An, G. C. & Orosz, C. G. „The Basic Immune Simulator: an agent-based model to study the interactions between innate and adaptive immunity“. In: *Theoretical Biology and Medical Modelling* 4.1 (2007), S. 1. DOI: 10.1186/1742-4682-4-39.
- [24] *Forstgesetz 1975*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. 1975. URL: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010371> (besucht am 16.10.2016).
- [25] Frayret, J.-M. „Multi-Agent System applications in the forest products industry“. In: *Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes* 1.2 (2011), S. 15–29.
- [26] Gilbert, G. N. *Agent-based models*. Sage Publications Inc., 2008.
- [27] *Dokumentation Intermodales Verkehrsreferenzsystem Österreich (GIP.at)*. URL: http://open.gip.gv.at/ogd/0_dokumentation_gipat_ogd.pdf (besucht am 22.07.2016).
- [28] Goodchild, M. F. „GIS and modeling overview“. In: *GIS, spatial analysis, and modeling*. Hrsg. von Maguire, D. J., Batty, M. & Goodchild, M. F. ESRI Press, Redlands, 2005, S. 1–18.
- [29] Graham, R., Liu, W., Downing, M., Noon, C., Daly, M. & Moore, A. „The effect of location and facility demand on the marginal cost of delivered wood chips from energy crops: a case study of the state of Tennessee“. In: *Biomass and Bioenergy* 13.3 (1997), S. 117–123.
- [30] *Graphenintegrations-Plattform GIP*. URL: <http://www.gip.gv.at/home.html> (besucht am 20.07.2016).

- [31] Griffin, A. F. & Stanish, C. „An agent-based model of prehistoric settlement patterns and political consolidation in the Lake Titicaca Basin of Peru and Bolivia“. In: *Structure and Dynamics* 2.2 (2007).
- [32] Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D. L., Polhill, J. G., Giske, J. & Railsback, S. F. „The ODD protocol: a review and first update“. In: *Ecological modelling* 221.23 (2010), S. 2760–2768.
- [33] Grimm, V. & Railsback, S. F. „Designing, Formulating and Cumunicating Agent-Based Models“. In: *Agent-based models of geographical systems*. Hrsg. von Heppenstall, A. J., Crooks, A. T., See, L. M. & Batty, M. Springer, 2012, S. 361–377.
- [34] Hartmann, H. & Kaltschmitt, M. *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer Verlag, 2001.
- [35] Hasenauer, H. *Ein Einzelbaumwachstumssimulator für ungleichaltrige Fichten-Kiefern-und Buchen-Fichtenmischbestände*. Österr. Ges. für Waldökosystemforschung u. Experimentelle Baumpforschung, 1994.
- [36] Helbing, D. „Agent-based modeling“. In: *Social self-organization*. Springer, 2012, S. 25–70.
- [37] Heppenstall, A. J., Crooks, A. T., See, L. M. & Batty, M. *Agent-based models of geographical systems*. Springer Science & Business Media, 2011. DOI: 10 . 1007 / 978 - 90 - 481 - 8927 - 4.
- [38] Heppenstall, A. & Crooks, A. „Agent-based Modeling in Geographical Systems“. In: *Access-Science* (2016).
- [39] Hogl, K., Pregernig, M. & Weiss, G. „What is new about new forest owners? A typology of private forest ownership in Austria“. In: *Small-scale Forest Economics, Management and Policy* 4.3 (2005), S. 325–342.
- [40] *Holzeinschlag in Österreich*. 2016.
- [41] Jöbstl, H. „Zum Einschlagsverhalten der Forstbetriebe. Holzpreis und Einkommensteuer als Bestimmungsgrößen der Marktanpassung. Eine Daten-und Modellanalyse. Teil 1“. In: *Zentralblatt für das Gesamte Forstwesen* 1 (1986), S. 1–14.
- [42] Jöbstl, H. „Zum Einschlagsverhalten der Forstbetriebe. Holzpreis und Einkommensteuer als Bestimmungsgrößen der Marktanpassung. Eine Daten-und Modellanalyse. Teil 2“. In: *Zentralblatt für das Gesamte Forstwesen* 2 (1986), S. 129–161.
- [43] Johnston, K. M. *Agent analyst: agent-based modeling in ArcGIS*. 2013.
- [44] Kanzian, C., Holzleitner, F., Stampfer, K., Ashton, S. et. al. „Regional energy wood logistics–optimizing local fuel supply“. In: *Silva Fennica* 43.1 (2009), S. 113–128.
- [45] Khalesian, M. & Delavar, M. „A multi-agent based traffic network micro-simulation using spatio-temporal GIS“. In: *Center of Excellence in Geomatics Eng. and Disaster Management* 10 (2008), S. 31–36.
- [46] Kilian, W., Müller, F. & Starlinger, F. „Die forstlichen Wuchsgebiete Österreichs“. In: *Forstliche Bundesversuchsanstalt - Berichte* 82 (1994).
- [47] Klemmt, H., Biber, P. & Pretzsch, H. „Mit SILVA in die Zukunft des Waldes blicken“. In: *LWF aktuell, Bayrische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft* 46 (2004), S. 8.
- [48] Kogler, C. & Müller, M. „Biomasse-Kraftwerke und der kärnter Wald“. Betreut von: Peter Mandl und Johannes Scholz. 2013.

- [49] Kostadinov, F., Holm, S., Steubing, B., Thees, O. & Lemm, R. „Simulation of a Swiss wood fuel and roundwood market: An explorative study in agent-based modeling“. In: *Forest Policy and Economics* 38 (2014), S. 105–118. DOI: 10.1016/j.forpol.2013.08.001.
- [50] Lemieux, S., D’Amours, S., Gaudreault, J. & Frayret, J.-M. *Agent-based simulation to anticipate impacts of tactical supply chain decision-making in the lumber industry*. Bd. 51. CIRRELT, 2009.
- [51] *Holzmarktbericht der LK Österreich*. URL: <https://ktn.lko.at/j%C3%A4hner-2017-holzmarktbericht-der-lk-%C3%B6sterreich+2500+2518864> (besucht am 11. 12. 2016).
- [52] Lorenz von Liburnau, H. & Eckert, K. *Lehrbuch der Forstwirtschaft für Waldbau- und Försterschulen, sowie zum ersten forstlichen unterrichte für Aspiranten des Forstverwaltungsdiens-tes*. W. Frick, 1908.
- [53] Luke, S., Cioffi-Revilla, C., Panait, L., Sullivan, K. & Balan, G. „Mason: A multiagent simulation environment“. In: *Simulation* 81.7 (2005), S. 517–527.
- [54] Macal, C. M. & North, M. J. „Tutorial on agent-based modelling and simulation“. In: *Journal of Simulation* 4.3 (2010), S. 151–162. DOI: 10.1057/jos.2010.3.
- [55] Macal, C. M. „Model verification and validation“. In: *Workshop on Threat Anticipation: Social Science Methods and Models*. The University of Chicago und Argonne National Laboratory. 2005.
- [56] Macal, C. M. & North, M. J. „Agent-based modeling and simulation“. In: *Winter simulation conference*. Winter Simulation Conference. 2009, S. 86–98.
- [57] Macal, C. & North, M. „Introductory tutorial: Agent-based modeling and simulation“. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference 2014*. Institute of Electrical und Electronics Engineers (IEEE), 2014, S. 6–20. DOI: 10.1109/wsc.2014.7019874.
- [58] Madlener, R., Kowalski, K. & Stagl, S. „New ways for the integrated appraisal of national energy scenarios: the case of renewable energy use in Austria“. In: *Energy Policy* 35.12 (2007), S. 6060–6074.
- [59] Malleson, N., See, L., Evans, A. & Heppenstall, A. „Implementing comprehensive offender behaviour in a realistic agent-based model of burglary“. In: Bd. 88. 1. SAGE Publications, 2010, S. 50–71. DOI: 10.1177/0037549710384124.
- [60] Mandl, P. „Geo-Simulation-Experimentieren und Problemlösen mit GIS-Modellen“. In: *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg*. Strobl/Blaschke/Griesebner, Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000, S. 345–356.
- [61] Mandl, P. „Multi-Agenten-Simulation und Raum - Spielwiese oder tragfähiger Modellierungsansatz in der Geographie“. In: *Klagenfurter Geographische Schriften* 23 (2003), S. 5–34.
- [62] Marschall, J. *Hilfstafeln für die Forsteinrichtung*. Österreichischer Agrarverlag, 1975. ISBN: 978-3704011473.
- [63] *MASON*. URL: <http://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/> (besucht am 12. 11. 2016).
- [64] Minar, N., Burkhart, R., Langton, C., Askenazi, M. et. al. „The swarm simulation system: A toolkit for building multi-agent simulations“. In: *Working Paper 96-06-042, Santa Fe Institute, Santa Fe*. (1996).

- [65] Möller, B. & Nielsen, P. S. „Analysing transport costs of Danish forest wood chip resources by means of continuous cost surfaces“. In: *Biomass and Bioenergy* 31.5 (2007), S. 291–298. DOI: 10.1016/j.biombioe.2007.01.018.
- [66] Müller, J. „Holzpotenzial in Kärnten - Eine Allokationsanalyse für Biomassekraftwerke“. Alpen-Adria-Universität Klagenfurt - Institut für Geographie und Regionalforschung. 2015.
- [67] *NetLogo*. URL: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/index.shtml> (besucht am 12. 11. 2016).
- [68] Ngo, A. T. & See, L. „Calibration and Validation of Agent-based Models of Land Cover Change“. In: *Agent-based models of geographical systems*. Hrsg. von Heppenstall, A. J., Crooks, A. T., See, L. M. & Batty, M. Springer, 2012, S. 181–197. DOI: 10.1007/978-90-481-8927-4_5.
- [69] Nikolai, C. & Madey, G. „Tools of the Trade: A Survey of Various Agent Based Modeling Platforms“. In: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 12.2 (2009), S. 2.
- [70] North, M. J. „A theoretical formalism for analyzing agent-based models“. In: *Complex Adaptive Systems Modeling* 2.1 (2014), S. 3. DOI: 10.1186/2194-3206-2-3.
- [71] North, M. J., Collier, N. T. & Vos, J. R. „Experiences creating three implementations of the repast agent modeling toolkit“. In: *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation* 16.1 (2006), S. 1–25. DOI: 10.1145/1122012.1122013.
- [72] *Österreichischer Biomasse-Verband (ÖBV)*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_agent-based_modeling_software (besucht am 16. 01. 2017).
- [73] *Repast Symphony 2.3.1 API*. URL: https://repast.github.io/docs/api/repast_symphony/index.html (besucht am 16. 12. 2016).
- [74] *Österreichische Waldinventur*. URL: <http://bfw.ac.at/rz/wi.auswahl?cros=1> (besucht am 26. 07. 2016).
- [75] Olschewski, R. & Thees, O. „Möglichkeiten und Grenzen der Analyse von Holzmärkten“. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 163.10 (2012), S. 396–400.
- [76] O’Sullivan, D., Millington, J., Perry, G. & Wainwright, J. „Agent-Based Models – Because They’re Worth It?“ In: *Agent-based models of geographical systems*. Hrsg. von Heppenstall, A. J., Crooks, A. T., See, L. M. & Batty, M. Springer, 2012, S. 109–123. DOI: 10.1007/978-90-481-8927-4_6.
- [77] Ozik, J., Collier, N. T., Murphy, J. T. & North, M. J. „The ReLogo agent-based modeling language“. In: *2013 Winter Simulations Conference (WSC)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Dez. 2013, S. 1560–1568. DOI: 10.1109/wsc.2013.6721539.
- [78] Raberto, M., Cincotti, S., Focardi, S. M. & Marchesi, M. „Agent-based simulation of a financial market“. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 299.1-2 (Okt. 2001), S. 319–327. DOI: 10.1016/s0378-4371(01)00312-0.
- [79] *repast - The Repast Suite*. URL: <http://repast.sourceforge.net/> (besucht am 13. 11. 2016).
- [80] Schlesinger, S., Crosbie, R. E., Gagné, R. E., Innis, G. S., Lalwani, C. S., Loch, J., Sylvester, R. J., Wright, R. D., Kheir, N. & Bartos, D. „Terminology for model credibility“. In: *Simulation* 32.3 (1979), S. 103–104.

- [81] Scholz, J., Mandl, P., Kogler, C. & Müller, M. „A Spatial Agent-based Model for Assessment and Prediction of Woodchips Availability for Heating Plants in Austria“. In: *Extended Abstract Proceedings of the GIScience 2014*. Department für Geodäsie und Geoinformation, Technische Universität Wien, 2014.
- [82] Schwarzbauer, P., Huber, W. & Stern, T. „Das Angebotsverhalten der österreichischen Forstwirtschaft. Ökonometrische Schätzungen von Angebotsfunktionen“. In: *Schriftenreihe des Instituts für Marketing und Innovation* 3 (2009). ISSN: 2074-1022. URL: http://www.wiso.boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H73000/H73500/schriftenreihe/band_3_2009.pdf.
- [83] Simon, C. & Etienne, M. „A companion modelling approach applied to forest management planning“. In: *Environmental Modelling & Software* 25.11 (2010), S. 1371–1384.
- [84] Sullivan, K., Coletti, M. & Luke, S. *GeoMason: GeoSpatial support for MASON*. Techn. Ber. Department of Computer Science, George Mason University, 2010.
- [85] *Swarm*. URL: http://www.swarm.org/wiki/Main_Page (besucht am 13. 11. 2016).
- [86] Tisue, S. & Wilensky, U. „Netlogo: A simple environment for modeling complexity“. In: *International conference on complex systems*. Bd. 21. Boston, MA. 2004, S. 16–21.
- [87] Troisi, A., Wong, V. & Ratner, M. A. „An agent-based approach for modeling molecular self-organization“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102.2 (2005), S. 255–260. DOI: 10.1073/pnas.0408308102.
- [88] Troitzsch, K. G. „Agentenbasierte Modellierung von Märkten“. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 163.10 (2012), S. 408–416.
- [89] *Wald und Holz in Kärnten*. Auflage: 2015. URL: https://www.ktn.gv.at/313733_DE-FOLDER-Folder_2015.pdf (besucht am 07.06.2016).
- [90] *Waldbau-Mekblatt: Durchforstung in Laub- und Nadelwaldbeständen*. 2015.
- [91] Weinfurter, P. *Waldbau in Österreich auf ökologischer Grundlage: Eine Orientierungshilfe für die Praxis*. Landwirtschaftskammer Österreich, Ländliches Fortbildungsinstitut Österreich, 2013.
- [92] *Wikipedia - Comparison of agent-based modeling software*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_agent-based_modeling_software (besucht am 16. 11. 2016).
- [93] *Wikipedia - Biomasseheizwerk*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Biomasseheizwerk> (besucht am 16. 12. 2016).
- [94] Wooldridge, M. & Jennings, N. R. „Intelligent agents: theory and practice“. In: *The Knowledge Engineering Review* 10.02 (Juni 1995), S. 115. DOI: 10.1017/s0269888900008122.
- [95] Zeigler, B. P., Praehofer, H. & Kim, T. G. *Theory of modeling and simulation: integrating discrete event and continuous complex dynamic systems*. Academic press, 2000.

ANHANG A

KARTEN UND DIAGRAMME

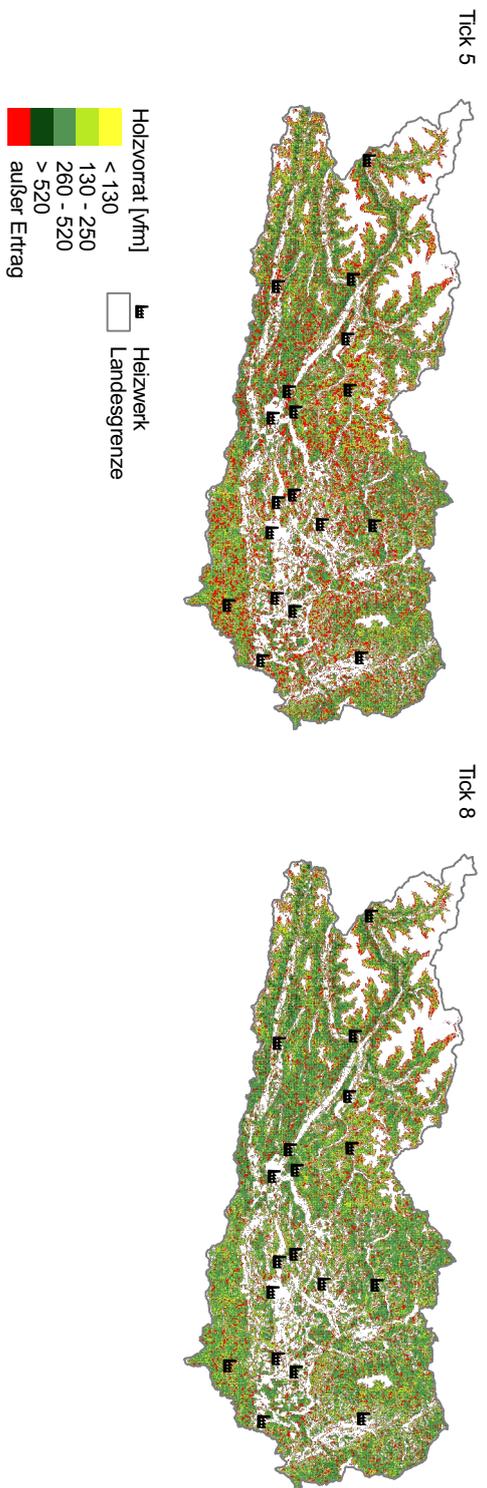


Abbildung A.1: Entwicklung des Holzvorrates in 5-Jahres-Schritten für das Markt-orientierte Basis-Szenario mit negativer Marktentwicklung. Über den Simulationsverlauf ist eine homogene Nutzung des gesamten Waldgebietes zu beobachten.

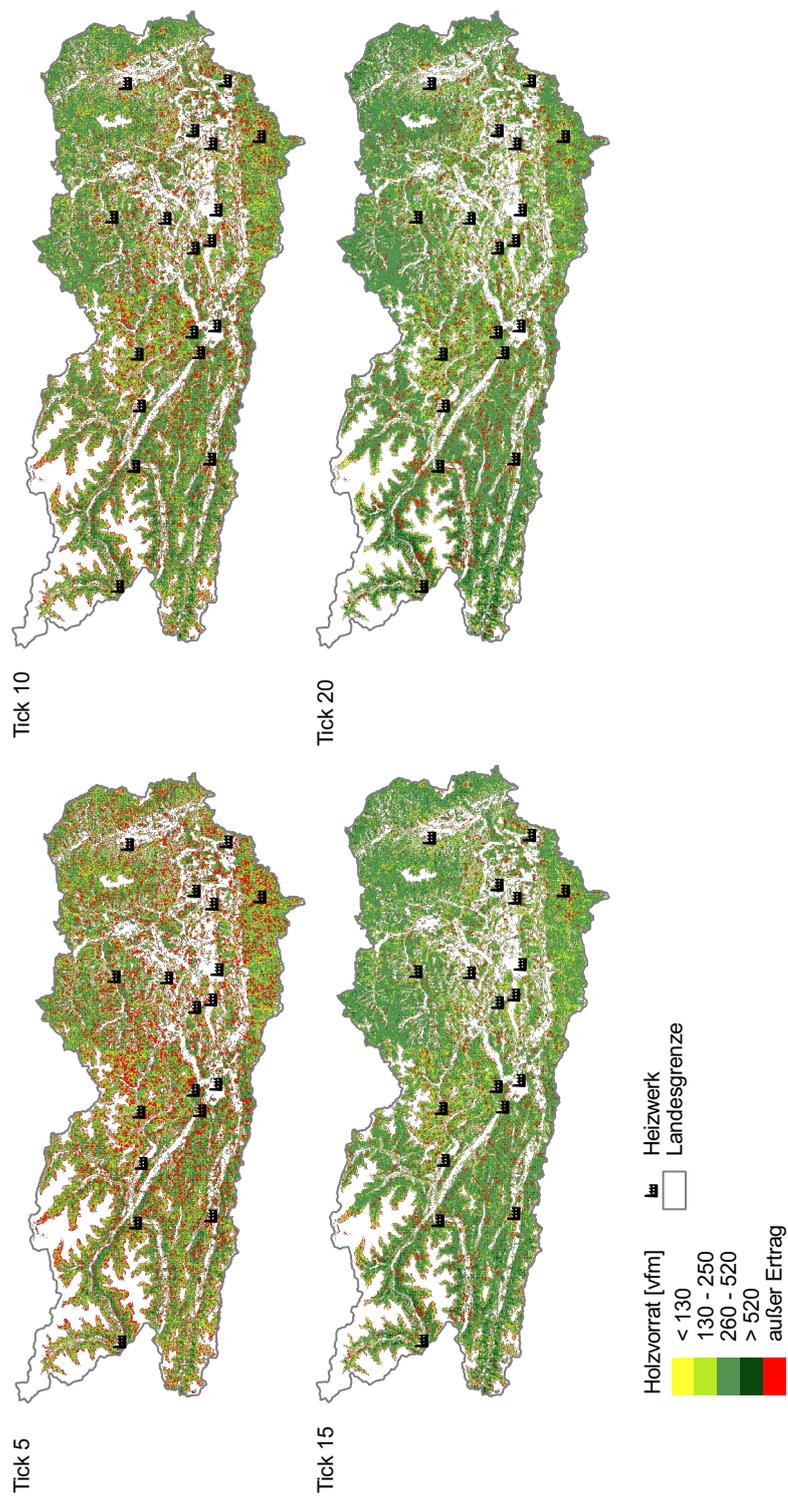


Abbildung A.2: Entwicklung des Holzvorrates in 5-Jahres-Schritten für das Markt-orientierte Basis-Szenario mit stetiger Marktentwicklung: Über den Simulationsverlauf ist eine homogene Nutzung des gesamten Waldgebietes zu beobachten.

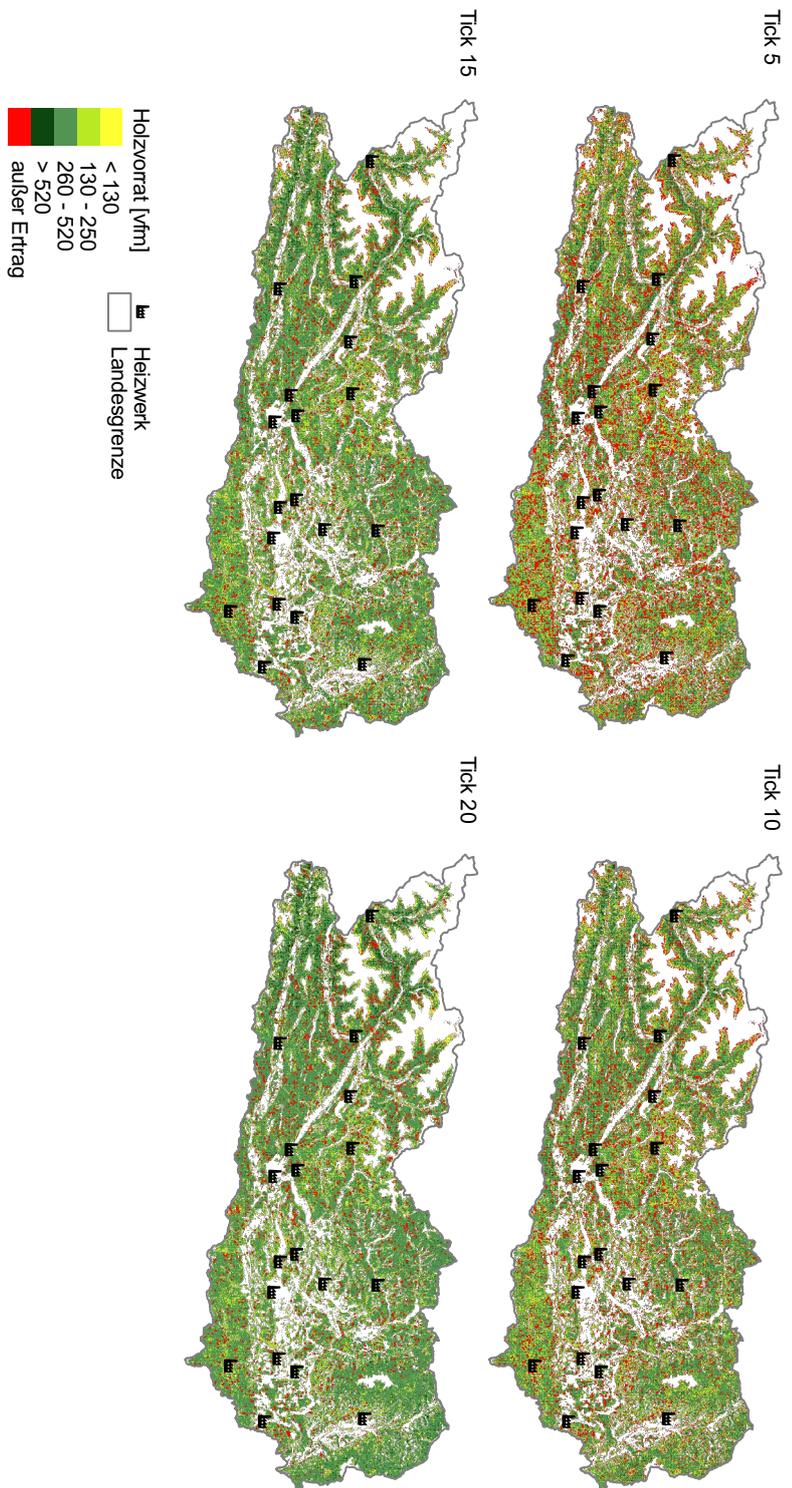
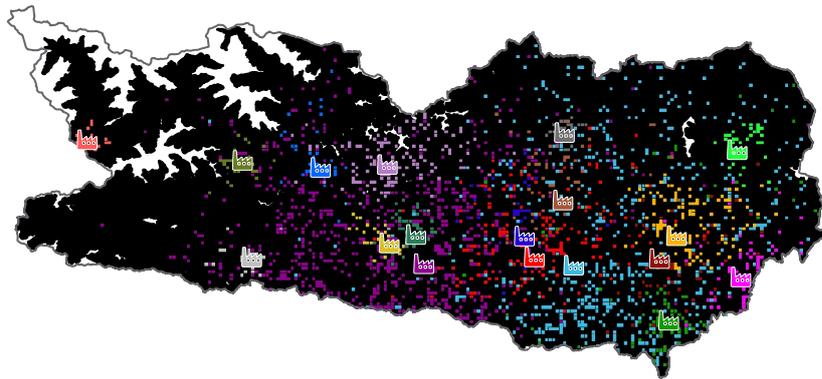
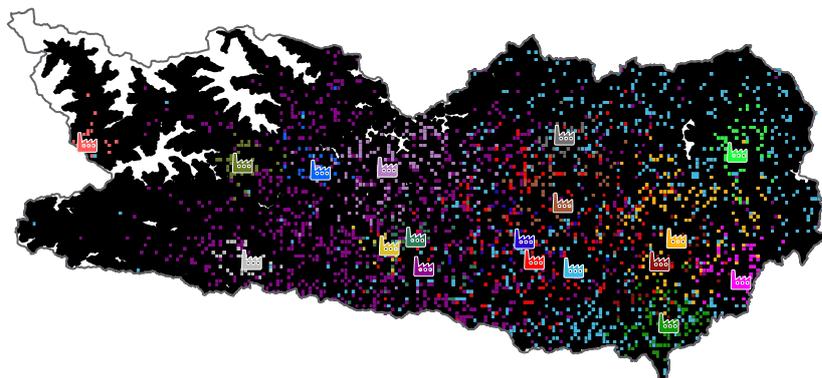


Abbildung A.3: Entwicklung des Holzvorrates in 5-Jahres-Schritten für das Markt-orientierte Szenario mit unsicherer Marktentwicklung: Über den Simulationsverlauf ist eine homogene Nutzung des gesamten Waldgebietes zu beobachten.

Tick 1 - 3



Tick 18 - 20



Bad Kleinkirchheim	Klagenfurt	St. Kanzian	Millstatt
Bleiburg	Krumpendorf	St. Margarethen	Völkermarkt
Eisenkappel	Liebenfels	Treffen	Winklern
Gurk	Moosburg	Villach	
Hermagor	Sachsenburg	Weissenstein	

Abbildung A.4: Auf 800x800m Rasterzellengröße interpolierte Erntemuster-Kartenreihe des Markt-orientierten Szenario mit stetiger Marktentwicklung: Die Erntebereiche bleiben für beide Zeitslots ähnlich verteilt.

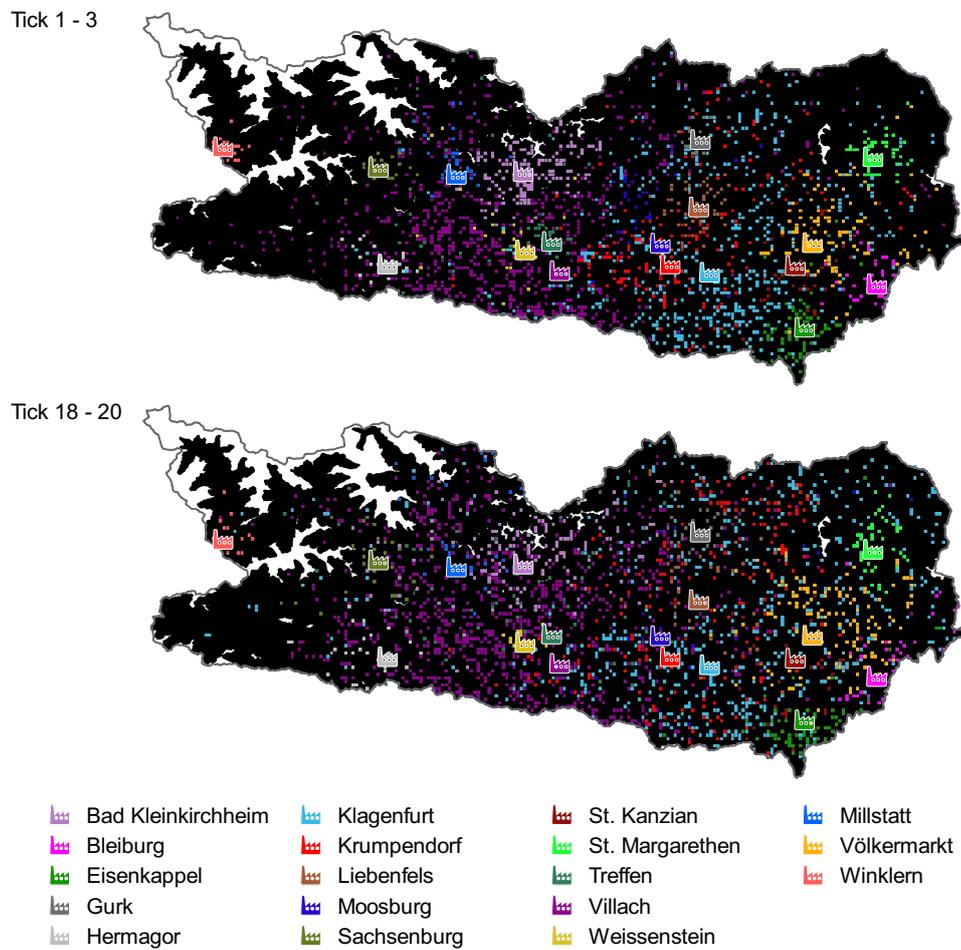


Abbildung A.5: Auf 800x800m Rasterzellengröße interpolierte Erntemuster-Kartenreihe des Markt-orientierten Szenario mit unsicherer Marktentwicklung: Die Erntebereiche bleiben beide Zeitslots ähnlich verteilt.