

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA GOZDARSTVO IN
OBNOVLJIVE GOZDNE VIRE

Jurij HUDERNIK

**VALIDACIJA RASTNEGA MODELA MOSES V
JELOVO-BUKOVIH GOZDOVIH V SLOVENIJI**

MAGISTRSKO DELO

Magistrski študij – 2. stopnja

Ljubljana, 2016

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA GOZDARSTVO IN OBNOVLJIVE GOZDNE VIRE

Jurij HUDERNIK

**VALIDACIJA RASTNEGA MODELA MOSES V JELOVO-BUKOVIH
GOZDOVIH V SLOVENIJI**

MAGISTRSKO DELO
Magistrski študij – 2. stopnja

**VALIDIERUNG DES WALDWACHSTUMSMODELLS MOSES FÜR
TANNEN-BUCHENWÄLDER IN SLOWENIEN**

MASTERARBEIT
Masterstudium

**VALIDATION OF THE FOREST GROWTH MODEL MOSES FOR
FIR-BEECH FORESTS IN SLOVENIA**

M. Sc. THESIS
Master Study Programme

Ljubljana, 2016

Magistrsko delo je zaključek magistrskega študijskega programa druge stopnje Gozdarstvo in upravljanje gozdnih ekosistemov. Izdelano je bilo na Univerzi v Ljubljani, Biotehniški fakulteti, Oddelku za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, v Skupini za urejanje gozdov in biometrijo ter v sodelovanju z »Institut für Waldbau, Universität für Bodenkultur Wien (BOKU)«, ki je omogočil uporabo ravnega modela MOSES. Podatke s stalnih vzorčnih ploskev GGE Ribnica na Pohorju in GGE Leskova dolina je posredoval Zavod za gozdove Slovenije.

Študijska komisija Oddelka za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire Biotehniške fakultete je dne 5. 2. 2015 odobrila naslov magistrske naloge in za mentorja imenovala prof. dr. Andreja Bončino, za somentorja prof. dr. Huberta Hasenauerja (BOKU) in za recenzenta prof. dr. Jurija Diacija.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Podpisani izjavljam, da je magistrsko delo rezultat lastnega raziskovalnega dela. Izjavljam, da je elektronski izvod identičen tiskanemu. Na univerzo neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki in reproduciranja ter pravico omogočanja javnega dostopa do avtorskega dela na svetovnem spletu preko Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete.

Jurij HUDERNIK

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Du2
DK	GDK 566:815(043.2)=112.2
KG	modeliranje/drevesni rastni model/odvisnost od razdalje/jelovo-bukovi gozdovi/jelovi gozdovi
KK	
AV	HUDERNIK, Jurij
SA	BONČINA, Andrej (mentor)/HASENAUER, Hubert (somentor)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Večna pot 83
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire
LI	2016
IN	VALIDACIJA RASTNEGA MODELA MOSES V JELOVO-BUKOVIH GOZDOVIH V SLOVENIJI
TD	Magistrsko delo (Magistrski študij – 2. stopnja)
OP	X, 49 str., 9 pregl., 10 sl., 1 prilog., 50 vir.
IJ	de
JI	sl/de/en
AI	

Trajnostno gospodarjenje z gozdovi je mogoče le s skrbnim načrtovanjem. Za napovedovanje razvoja gozdov uporabljamo rastne modele. Prof. Hasenauer s sodelavci (BOKU, Dunaj) so razvili rastni model MOSES; zasnovan je bil predvsem za malopovršinsko raznomerne gozdove, ki so v Sloveniji pogosti. Model pri nas še nikoli ni bil uporabljen, zato smo raziskali možnosti njegove uporabe na primeru jelovo-bukovih in jelovih gozdov. Podatke slovenske gozdne inventure iz dveh gozdnogospodarskih enot (Leskova dolina in Ribnica na Pohorju) smo prilagodili zahtevam rastnega modela MOSES. Model smo validirali na podlagi primerjave izmerjenih in simuliranih debelinskih prirastkov dreves, in sicer za jelko, smreko in bukev. Nato smo simulirali razvoj gozdov v naslednjih petdesetih letih glede na tri scenarije gospodarjenja: 1) brez ukrepanja, 2) slučajno redčenje in 3) visoko redčenje. Rezultati raziskave kažejo, da je mogoče podatke gozdne inventure Zavoda za gozdove Slovenije prilagoditi za modeliranje z MOSES. Parametrizirana verzija modela, ki smo jo razvili v naši raziskavi, omogoča simuliranje razvoja jelovo-bukovih in jelovih gozdov v Sloveniji. Model je mogoče še dopolniti in ga uporabiti pri načrtovanju in upravljanju gozdov v Sloveniji.

SCHLÜSSELWÖRTER DOKUMENTATION

DI	Du2
DK	FDK 566:815(043.2)=112.2
KB	Modellierung/Baumwachstumsmodell/Abstandsabhängiges Model/Tannen und Tannen-Buchenwälder
KC	
AU	HUDERNIK, Jurij
SA	BONČINA, Andrej (Betreuer)/HASENAUER, Hubert (Ko-Betreuer)
VO	SI-1000 Ljubljana, Večna pot 83
HG	Universität Ljubljana, Biotechnische Fakultät, Abteilung für Forstwirtschaft und erneuerbare Waldressourcen
VJ	2016
TI	VALIDIERUNG DES WALDWACHSTUMSMODELLS MOSES FÜR TANNEN-BUCHENWÄLDER IN SLOWENIEN
DT	Masterarbeit (Masterstudium)
NO	X, 49 S., 9 Tab., 10 Abb., 1 Anh., 50 Qu.
SP	de
AS	sl/de/en
AB	

Eine nachhaltige Waldbewirtschaftung ist nur mit Hilfe einer sorgfältigen Planung möglich. Um eine Prognose der Waldentwicklung zu erleichtern, wurden Waldwachstumsmodelle entwickelt. Prof. Hasenauer und seine Mitarbeiter (BOKU, Wien) haben den Waldwachstumssimulator MOSES entwickelt. Das Modell wurde speziell für den Umgang mit ungleichaltrig gemischten Wäldern mit kleinflächiger Nutzung, wie sie auch in Slowenien aufzufinden sind, konzipiert. Weil das Modell noch nie in Slowenien benutzt worden ist, wurden die Verwendungsmöglichkeiten am Beispiel Tannen und Tannen-Buchenwälder untersucht. Daten der slowenischen Forstinventur aus zwei Wirtschaftseinheiten (Leskova dolina in Ribnica na Pohorju) wurden an die Simulation mit MOSES angepasst. Das Modell wurde an Hand des Vergleichs der beobachteten und simulierten Zuwächse des Brusthöhendurchmessers für Tanne, Fichte und Buche validiert. Anschließend wurden für die nächsten 50 Jahre drei mögliche Bewirtschaftungsszenarien simuliert: 1) kein Eingriff, 2) Zufallsdurchforstung und 3) Hochdurchforstung. Es konnte gezeigt werden, dass die Eingangsdaten der Forstinventur erfolgreich an die Bedürfnisse von MOSES angepasst worden sind. Die Ergebnisse der Validierung haben gezeigt, dass MOSES in der parametrisierten Form zur Simulation und Prognose der BHD-Entwicklung Slowenischer Tannen und Tannen-Buchenwälder verwendet werden kann. Das Potenzial und die Aussagekraft des Modells können in der Zukunft noch verbessert werden.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Du2
DC FDC 566:815(043.2)=112.2
CX Modelling/Tree Growth Model/Distance Dependent Model/Fir and Fir-Beech Forests
CC
AU HUDERNIK, Jurij
AA BONČINA, Andrej (supervisor)/HASENAUER, Hubert (co-advisor)
PP SI-1000 Ljubljana, Večna pot 83
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Forestry and Renewable Forest Resources
PY 2016
TI VALIDATION OF THE FOREST GROWTH MODEL MOSES FOR FIR-BEECH FORESTS IN SLOVENIA
DT M. Sc. Thesis (Master Study Programmes)
NO X, 49 p., 9 tab., 10 fig., 1 ann., 50 ref.
LA de
AL sl/de/en
AB

Sustainable forest management is only possible by careful planning. In order to facilitate a forecast of the forest development, forest growth models were developed. The forest growth model MOSES has been developed by professor Hasenauer and his coworkers (BOKU, Wien). The forest growth simulator MOSES has been specially designed for handling differently aged mixed forests with small-scale usage, as they can also be found in Slovenia. Because the model had never been used in Slovenia, the use possibilities here have been studied on the example of fir and fir-beech forests. Data from two different business units of the Slovenian forest inventory (Leskova dolina and Ribnica na Pohorju) have been adapted for the simulation with MOSES. The model was validated by comparing the observed and simulated growth of the breast diameter of spruce, fir and beech. Subsequently three possible forest management scenarios for a period of next 50 years were simulated: 1) without interference, 2) random thinning and 3) crown thinning. It was shown that the input data of the forest inventory could be successfully adapted to the requirements of MOSES. The results of the validation showed that MOSES can be used in the parameterized form to simulate and forecast the DBH development of Slovenian fir and fir-beech forests. In the future the potential and the validity of the model can be improved.

INHALTSVERZEICHNIS

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
SCHLÜSSELWÖRTER DOKUMENTATION	IV
KEY WORDS DOCUMENTATION	V
INHALTSVERZEICHNIS	VI
TABELLENVERZEICHNIS	VIII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	IX
ANHANGSVERZEICHNIS	X
1 EINLEITUNG	1
2 BISCHERIGE FORSCHUNGSARBEITEN.....	6
3 UNTERSUCHUNGSGEBIET	9
3.1 <i>POHORJE</i>	10
3.2 <i>SNEŽNIK</i>	11
4 METHODEN	13
4.1 <i>DATEN</i>	13
4.1.1 Datenaufbereitung für die Kalibrierung	14
4.1.1.1 Umrechnung der Koordinaten	15
4.1.1.2 Berechnung der Baumhohen.....	15
4.1.1.3 Berechnung des Kronenansatzes	16
4.1.1.4 Parametrisierung der Oberhöhenverläufe	17
4.1.1.5 Bestimmung des Site Index	18
4.2 <i>METHODIK VON MOSES</i>	19
4.2.1 Competition Index.....	19
4.2.2 Potenzieller Höhenzuwachs	20
4.2.3 Potenzieller BHD-Zuwachs.....	22
4.2.4 Angleichung der Zuwächse an die Konkurrenzsituation	22
4.2.5 Änderungen im Kronenprozent.....	22
4.2.6 Verjüngung.....	22
4.2.7 Mortalität.....	23
4.3 <i>DARSTELLUNG DER WALDBAULICHEN BEHANDLUNG</i>	23
4.3.1 Simulation der Untersuchungsgebiete.....	24
4.4 <i>GENAUIGKEIT DER MODELVORHERSAGE</i>	24
4.5 <i>VERWENDETE VERSION UND MODELLE</i>	26
5 ERGEBNISSE	27

5.1	<i>KALIBRIERUNG DER OBERHÖHENVERLÄUFE</i>	27
5.2	<i>VALIDIERUNG VON MOSES</i>	27
5.3	<i>SIMULATIONSERGEBNISSE</i>	32
5.3.1	Pohorje	32
5.3.2	Snežnik	34
6	DISKUSSION	36
6.1	<i>ANPASSUNG DER SLOWENISCHEN FORSTINVENTURDATEN</i>	36
6.2	<i>VALIDIERUNG</i>	37
6.3	<i>ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN IN DER FORSTPRAXIS</i>	38
6.4	<i>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK</i>	40
7	POVZETEK	41
8	LITERATUR	46
	ZAHVALA	50
	ANHANG	51

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Wichtigsten Merkmale der Waldbewirtschaftungseinheiten.....	12
Tabelle 2: Zahlen der verwendeten Daten der slowenischen Forstinventur in den Untersuchungsgebieten.....	14
Tabelle 3: Koeffizienten zur Berechnung der fehlenden Höhen nach Petterson im UG Pohorje.....	16
Tabelle 4: Koeffizienten nach Klopčič (2013) zur Berechnung der fehlenden Höhen nach Prodan.....	16
Tabelle 5: Koeffizienten nach Klopč (2013) zur Berechnung des fehlenden Kronenansatzes	17
Tabelle 6: Durchschnittliche SI Werte nach Pflanzengesellschaft und Baumart (nach Kadunc, 2010, 2012, 2013a und 2013b).....	18
Tabelle 7: Verwendete Modelle und Koeffizienten für die Validierung.....	26
Tabelle 8: Koeffizienten zur Berechnung der OH nach Mitscherlich/Richards.....	27
Tabelle 9: Mittelwerte des simulierten BHD-Zuwachses und statistische Analyse der simulierten BHD-Zuwächse pro Baumart und Jahr	31

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Slowenien mit eingezeichneten Untersuchungsgebieten und Aufnahmepunkten	9
Abbildung 2: Zuwachspotentialkonzept von MOSES (Klopf, 2014)	19
Abbildung 3: Darstellung der Konkurrenzsituation (Klopf et al., 2011)	20
Abbildung 4: Ermittlung des potenziellen Höhenzuwachses in MOSES (Klopf et al., 2011)	21
Abbildung 5: Streuung der Differenzen zwischen simulierten und gemessenen BHD- Zuwachs (UG Pohorje).....	29
Abbildung 6: Streuung der Differenzen zwischen simulierten und gemessenen BHD- Zuwachs (UG Snežnik)	30
Abbildung 7: Entwicklung des Holzvorrats in der 50-Jährigen Simulationsdauer UG Pohorje.....	33
Abbildung 8: BHD-Verteilung vor und nach den simulierten Eingriffen in UG Pohorje .	33
Abbildung 9: Entwicklung des Holzvorrats in der 50-Jährigen Simulationsdauer in Snežnik UG	34
Abbildung 10: BHD-Verteilung vor und nach den simulierten Eingriffen in UG Snežnik	35

ANHANGSVERZEICHNIS

Anhang A: Site Index: durchschnittliche Werte je Pflanzengesellschaft und Baumart (nach Kadunc, 2010, 2012, 2013a und 2013b).....	51
--	----

1 EINLEITUNG

Modelle sind vereinfachte Abbildungen eines wirklichen Systems, die zur deren Erforschung und Verständnis verwendet werden. Wird ein graphisch und mathematisch dargestelltes Modell in ein Computerprogramm überführt, kann mit diesem das Systemverhalten simuliert und analysiert werden (vgl. Berg und Kuhlmann, 1993; Bossel, 1992; Pretzsch, 2001).

Waldökosystemmodelle sind diagnostische Werkzeuge, die Waldökosystemprozesse beschreiben, abbilden und quantifizieren. Laut Hasenauer (2011) unterscheidet man drei Grundkonzepte innerhalb der Waldökosystemmodellierung:

- Wachstums- und Ertragsmodelle werden zur Prognose zukünftiger Bestandesentwicklung verwendet und dienen als Instrument für die forstliche Planung.
- Sukzessions- oder Gap-Modelle dienen zur Untersuchung der natürlichen Sukzession in langen Zeiträumen.
- Prozess- oder BGC-Modelle eignen sich für die Abbildung der "Prozesse" - wie zum Beispiel die komplexe Interaktion zwischen Energie, Wasser und Nährstoffkreisläufen.

In der forstlichen Praxis haben sich bis heute Waldwachstumsmodelle bewährt, welche auf Daten langfristig beobachteter Versuchsflächen aufbauen. Hinsichtlich der Auflösung unterscheidet man Bestandes- Verteilungs- und Einzelbaummodelle (Pretzsch, 2002).

Einzelbaummodelle haben an Bedeutung gewonnen, da sich mit ihnen die Entwicklung verschiedener Kombinationen von Baumarten und Altersgruppen nachbilden lässt. Sie bestehen in der Regel aus Gleichungssystemen, wie einem Durchmesser- und Höhenzuwachsmo- dell, einem Mortalitätsmodell und einem Verjüngungsmodell. Diese Modelle werden oft von Teilmodellen gesteuert, welche die Konkurrenzsituation der ein Baum im Bestand ausgesetzt ist beschreiben (Hasenauer, 1994, 2005). Im Gegensatz zur Ertragstafel wird nicht die mittlere Bestandesentwicklung verfolgt, sondern das Wachstum jedes einzelnen Baumes mit seiner ganz spezifischen Stellung im Bestand. Die Summe der Veränderung jedes Baumes ergibt dann die üblichen mittleren Bestandesdaten (Hasenauer, 2005).

Die Wachstumsfunktionen sind unabhängig vom Alter formuliert, da wie in den Ertragstafelmodellen übliche Wachstumsentwicklung in Abhängigkeit vom Bestandesalter nicht möglich ist. Die periodische Durchmesser- bzw. Höhenzuwachsschätzung für jeden einzelnen Baum im Bestand kann entweder über einen potential abhängigen oder potential unabhängigen Ansatz geschätzt werden. Die potential abhängige Zuwachsschätzung basiert auf dem Potentialkonzept, welches voraussetzt, dass Höhen- und Durchmesserwachstum standorts- und baumartspezifisch sind. Das Wachstumspotenzial hängt von einem vorher definiertem maximalen Durchmesser- bzw. Höhenzuwachs ab. Der tatsächliche Zuwachs ergibt sich dann mit Hilfe von Reduktionsfaktoren entsprechend der Konkurrenzsituation (Hasenauer und Kindermann, 2007). Auf Grund der Abstandsabhängigkeit kann die Struktur des Bestandes in Abhängigkeit von der Behandlung fortgeschrieben werden (Basch et al., 2006). Beim potential unabhängigen Ansatz werden die Durchmesser- und Höhenzuwächse direkt aus den verfügbaren Daten geschätzt und hängen somit nur von den unabhängigen Variablen ab. Auf die Art gibt es keinen vorher definierten maximalen Zuwachs und der Standort ist im Gegensatz zum potential abhängigen Konzept, Teil der unabhängigen Variablen (Hasenauer und Kindermann, 2007).

Unabhängig vom methodischen Ansatz der Zuwachsschätzung wird das Wachstum jedes einzelnen Baumes im Bestand, durch die Konkurrenzsituation definiert. Die ergibt sich aus der Konkurrenz, der ein Baum in der Vergangenheit ausgesetzt war und der aktuellen Konkurrenzsituation. Die Konkurrenz der Vergangenheit wird durch das Kronenprozent eines Baumes beschrieben. Die aktuelle Konkurrenz bzw. auch eine mögliche aktuelle Konkurrenzveränderung (wegen der Mortalität und Durchforstung) wird mit Hilfe von Konkurrenzindizes dargestellt. Dabei unterscheidet man im Wesentlichen einen abstandsabhängigen und abstandsunabhängigen Ansatz. Abstandsabhängige Modelle haben den Vorteil, dass sich mit ihnen unterschiedliche Bestandesstrukturen detailliert erfassen lassen. Der Nachteil ist jedoch, dass mit ihnen nicht direkt auf viele vorhandene Datenquellen zurückgegriffen werden kann, da Stammfußkoordinaten in der Vergangenheit nur für sehr wenige Versuchsflächen ermittelt wurden (Hasenauer und Kindermann, 2007). Dazu eignen sich abstandsunabhängige Modelle besser, oder man

greift als Zwischenschritt auf ein Verteilungsmodell zurück (z. B. den Bestandesgenerator STANDGEN).

MOSES (**MO**delling **Stand rES**ponse) ist ein abstandabhängiges auf dem Potentialkonzept aufbauendes Einzelbaumwachstumsmodell, das speziell für ungleichaltrige Mischbestände in Mitteleuropa konzipiert wurde und ist als Instrument für die forstliche Planung zu sehen (Hasenauer, 1994a). Mit ihm können Höhen- und Durchmesserzuwachs, Mortalität, Verjüngung und Schneebruch modelliert werden (Basch et al., 2006). MOSES wurde an der Universität für Bodenkultur in Wien (BOKU) entwickelt (Hasenauer, 1994a). Das Konzept wurde immer weiter verbessert und ergänzt, so entstand am Institut für Waldbau (BOKU) das MosesFramework, das auf der Arbeit von Hasenauer (z.B. 1994), Kindermann (z.B. 2004), Kittenberger (2003, 2006), Steinmetz (2004), Hasenauer und Kindermann (2007) Thurnher et al. (2011) und Klopff (2014) aufgebaut ist.

MosesFramework ermöglicht die Verwendung mehrerer Programme (MOSES 3.0, MOSESbatch und STANDGEN). Zur interaktiven Simulation einzelner Bestände wird MOSES 3.0 von Steinmetz (2004) verwendet (Klopff et al., 2011). Allerdings ist das Programm nicht dazu geeignet, mehrere (vielleicht hunderte) Bestände auf einmal zu verarbeiten. Aus dem Grund entstand im Jahr 2006 eine Batchversion von MOSES 3.0, die von Kindermann und Basch in Form eines in Perl verfassten Skripts entwickelt wurde. Da diese Version über Textdateien gesteuert wird, verlangt die gewisse Vorkenntnisse und ist daher nicht sehr benutzerfreundlich (Basch et al., 2006). Die Version MOSESbatch Kreis (Kindermann, 2007) wurde an Hand vieler kreisförmigen Probestellen für die Validierung des Modells im Rahmen dieser Arbeit verwendet.

Sowohl MOSES 3.0 wie auch MOSESbatch arbeiten mit Einzelbäumen. Da es sich bei dem Modell um einen abstandsabhängigen Ansatz handelt, müssen folgenden Daten für jeden Baum vorhanden sein: Baumart, BHD, Höhe, Höhe des Kronenansatzes, X- und Y-Koordinaten (Basch et al., 2006). Da solche Daten nicht immer für alle Bäume eines Bestandes zu Verfügung stehen, wurde der Bestandesgenerator STANDGEN von Kittenberger (2003) erstellt. Das Programm ermöglicht auch aus Stichproben die benötigten Baumdaten, wie Position, Baumart und Brusthöhendurchmesser zu generieren. Mit Baumhöhe und Kronenansatz ergänzte Daten können in MOSES 3.0 oder MOSESbatch weiterverarbeitet werden (Kittenberger, 2003, 2006).

Slowenien ist durch eine sehr große natürliche Vielfalt gekennzeichnet. Das liegt an den verschiedenen geologischen Verhältnissen, dem bewegten Relief und der Tatsache, dass sich hier Kontinental-, Alpen- und Mittelmeerklima mischen. Obwohl Slowenien relativ klein ist, gibt es wegen der abwechslungsreichen klimatischen Verhältnisse in deren Wäldern eine wirklich vielfältige Vegetation (Perko, 2004). Der Großteil (ungefähr 70%) der slowenischen Wälder befindet sich im Bereich der Buchen-, Tannen-Buchen- und Buchen-Eichenstandorte (Daksobler, 2012). Alle Wälder werden gemäß dem Forstgesetz aus dem Jahr 1993 bewirtschaftet, welches eine naturnahe und multifunktionale Bewirtschaftung der Wälder vorsieht (Zakon o gozdovih, 1993). Auf die Art steht ein ungleichaltrig gemischter Wald mit kleinflächiger Nutzung im Vordergrund.

Um eine nachhaltige Waldbewirtschaftung solcher Wälder gewährleisten zu können, stehen verschiedene Hilfsinstrumente zu Verfügung. Eines dieser Instrumente ist das Einzelwachstumsmodell MOSES, welches speziell für solche Verhältnisse in Mitteleuropa konzipiert wurde. Das Modell operiert auf Einzelbaumebene. Am Ende der Simulation ergibt die Summe der Veränderung jedes Baumes die mittleren Bestandeswerte. So können alle erdenklichen Kombinationen von Baumarten, Altersgruppen und Bewirtschaftungskonzepten simuliert und deren zukünftige Entwicklung auch visuell dargestellt werden. Das Einzelwachstumsmodell MOSES wurde noch nie in Slowenien benutzt. Da es großes Potenzial als Instrument für die forstliche Planung auch in Slowenien zeigt, ist es sinnvoll die Möglichkeiten der Verwendung des Modells vor Ort zu untersuchen. Um das Modell möglichst zweckgemäß zu testen, wurden zwei Untersuchungsgebiete (UG) mit ungleichaltrigen Mischbeständen ausgewählt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es die Anpassungsmöglichkeiten der slowenischen Forstinventurdaten für die Simulation mit MOSES zu überprüfen, das Waldwachstumsmodell am Beispiel Tannen und Tannen-Buchenwälder aus Slowenien zu validieren und die Anwendungsmöglichkeiten in der slowenischen Forstwirtschaft zu beurteilen.

Um die Endgültigen Ergebnisse und Schlussfolgerungen zu etablieren, wurden für diese Arbeit folgende Arbeitshypothesen geformt:

- Die Daten der slowenischen Forstinventur können für die Wachstumssimulation mit MOSES angepasst werden,
- MOSES kann für Standortverhältnisse in Slowenien validiert werden.

2 BISCHERIGE FORSCHUNGSARBEITEN

Die ersten Baummodelle wurden Mitte der 1960er Jahre in Nordamerika entwickelt (z.B. Newnham, 1964; Stage, 1973; Monserud, 1975). Für Skandinavien und Zentraleuropa wurden dann die ersten Baummodelle in den frühen 1990er Jahren erstellt (z.B. Sterba, 1983; Pukkala, 1988, 1989; Pretzsch, 1992, 2001; Hasenauer, 1994, 2000). Diese Modelle haben im Grunde die vorigen Modellansätze auf alle Hauptbaumarten in Europa ausgeweitet (Hasenauer, 2005).

Im Jahr 1994 hat Hasenauer mit seiner Doktorarbeit den Grundstein für die Entwicklung von MOSES gelegt. Basierend auf Daten permanenter Probeflächen in gemischten Beständen wurde ein Einzelbaumwachstumssimulator, bestehend aus einem Höhen- und Durchmesserwachstumsmodell, einem Kronenmodell und einem Mortalitätsmodell, entwickelt. Die einzelnen Teilmodule wurden mit Hilfe des visualisierten interaktiven Computerprogramms MOSES (Hasenauer et al. 1994b), das zur Simulation von Wachstumsreaktionen entwickelt wurde, validiert. MOSES Version 1.2. enthält die Option der irregulären Mortalität in Form eines Schneebruchsimulators und es bietet dem Benutzer eine zwei- bzw. dreidimensionale Darstellungsmöglichkeit der Bestände an (Hasenauer, 1994a).

Nach Hasenauer (1997) ist es möglich die Kronenbreite einer Baumart aus dem Brusthöhendurchmesser zu berechnen. Mit Hilfe der theoretischen Kronenbreite, die ein Baum erreichen kann, wenn er als Solitärbaum erwachsen wäre, kann die Konkurrenz zwischen einzelnen Bäumen beurteilt werden. In der Studie wurden zu dem Zweck 435 Solitärbäume innerhalb 11 Baumarten analysiert und Koeffizienten zur Berechnung der Kronenbreite erarbeitet.

In der Doktorarbeit von Kindermann (2004) wird das MOSES-Modul Verjüngung beschrieben. Neben der Verjüngung wurde die Berücksichtigung von Aufnahmeflächen behandelt. Als Ergebnis dieses Teiles wurde ein Algorithmus entwickelt, der es erlaubt, den Randeffect von beliebigen Polygonen und auch von Kreisflächen zu kompensieren. Im letzten Teil der Arbeit wurde versucht, die Bestandesstrukturen zu beschreiben, deren Gesetzmäßigkeiten aufzuzeigen und auch künstlich nachzubilden.

Oberhöhenverläufe werden unter anderem auch für die Abschätzung der Höhenwachstumspotenziale in Einzelbaummodellen verwendet. In der Arbeit von Kindermann und Hasenauer (2005) wurden einheitliche Oberhöhenbeziehungen für die in Österreich und die angrenzenden Gebiete entwickelten Ertragstafeln erarbeitet. Dazu wurden 52 unterschiedliche Oberhöhenfächer mit 9 unterschiedlichen Ausgleichskurven insgesamt 20 Baumarten neu parametrisiert, analysiert und in MOSES integriert.

Für eine Simulation in MOSES werden Daten auf Bestandes- wie auch auf Einzelbaumebene benötigt. Da solche Daten nicht immer im Ganzen Umfang zu Verfügung sind, ist ein Bestandesgenerator notwendig der die fehlenden Daten generiert. Speziell für die Bedürfnisse von MOSES wurde von Kittenberger (2003) der Bestandesgenerator STANDGEN erstellt. Das Programm generiert aus Durchmesser- und Strukturinformationen Einzelbaumkoordinaten. Die Form der Bestandesfläche kann beliebig festgelegt werden (Polygon) und auch der Bestandaufbau kann von gleichaltrig rein (reiner Altersklassenwald) bis ungleichaltrig gemischt (Plenterwald) nachgebildet werden. Je nach Art der vorhandenen Bestandesdaten kann aus drei Modulen (Random-, Layout- und Struktur-) gewählt werden. Das Programm hat ein einfach zu bedienendes Graphical User Interface (GUI), welches ein interaktives Arbeiten ermöglicht (Kittenberger, 2003, 2006).

Für eine interaktive Simulation einzelner Bestände wurde MOSES 3.0 von Steinmetz (2004) in der Programmsprache C erstellt. Bäume können direkt in der graphischen Benutzeroberfläche (GUI) zur Entnahme markiert (einzelne, Gruppen), Pflanzungen durchgeführt und direkt nach jeder Periode das Ergebnis betrachtet werden (Klopf et al., 2011). MOSES 3.0 ist eine Weiterentwicklung der Version 2.0, welches noch für MS DOS entwickelt wurde (Basch et al., 2006).

MOSESbatch ist mit der Programmiersprache Perl entwickelt worden (Kindermann, 2006; Basch et al., 2006). Die Version dient für die Bearbeitung vieler Bestände auf einmal. Im Jahr 2007 wurde von Hasenauer und Kindermann für diese Version ein Entnahmekonzept entwickelt, mit dem man den Großteil des waldbaulichen Behandlungsvokabulars umsetzen kann. Als Ergebnis dieser Studie ergaben sich dann vier Entnahmealgorithmen.

Um die einzelnen Komponenten des MosesFramework effizient bedienen zu können, wurde vom Institut für Waldbau, Department für Wald- und Bodenwissenschaften der Universität für Bodenkultur ein Benutzerhandbuch erstellt. Dieses erläutert die Benutzung der Software und die methodischen Ansätze (Klopf et al., 2011).

Im Jahr 2005 wurde das Waldwachstumsmodell MOSES für Schweizer Wälder validiert. Das Wachstum wurde nach den Gesichtspunkten Baumart, Bestandestyp und Höhenlage über mehrere Wachstumsperioden simuliert und mit den beobachteten Daten verglichen. Systematischen Abweichungen in den Durchmesser- und Höhenzuwachsschätzungen waren für den Zeitraum von 50 Jahren keine feststellbar (Hallenbarter et al., 2005).

In der Arbeit Mikac et al. (2013) wurde MOSES zur Beurteilung der dynamischen Entwicklung gemischter Tannen-Buchenuhrwälder im Dinarischen Gebirge in Kroatien verwendet. Der Vergleich simulierter und beobachteter BHD Verteilung der 50 Jährigen Simulationsperiode zeigte sehr gute Vorhersagefähigkeiten für alle Baumarten auf der Probefläche. In Bezug auf die Ergebnisse wurde festgestellt, dass MOSES ein hilfreiches Instrument zur Analyse komplexer Urwald-Strukturpolitik ist.

3 UNTERSUCHUNGSGEBIET

Für diese Arbeit wurden Inventurdaten aus zwei verschiedenen Regionen ausgewählt. Der erste Teil der Daten stammt aus der Wirtschaftseinheit Ribnica na Pohorju im Gebirge Pohorje und der zweite Teil aus der Wirtschaftseinheit Leskova dolina auf dem Plateau Snežnik.

Pohorje, zu Deutsch Bachern, ist ein dicht bewaldetes Mittelgebirge in Nord-Osten Sloweniens. Es ist ein breiter Gebirgsrücken, der sich südlich über der Drau erstreckt und durch das Städtedreieck Maribor, Dravograd und Slovenske Konjice begrenzt ist. Der höchste Punkt liegt 1543 m über dem Meeresspiegel (Hiltl, 1893). Das Gebirge umfasst rund 1000 km² (Bachergebirge, 2015).

Snežnik, zu Deutsch Krainer Schneeberg, ist ein ausgedehntes Kalksteinplateau im slowenischen Karst im nördlichen Teil des Dinarischen Gebirges. Das für seine Karstphänomene bekannte Kalksteinplateau dehnt sich über die Fläche von 85 km² aus und liegt östlich von Ilirska Bistrica nahe der Grenze zum kroatischen Gorski Kotar. Der Gipfel erreicht eine Höhe von 1796 m über dem Meeresspiegel (Krainer Schneeberg, 2015).

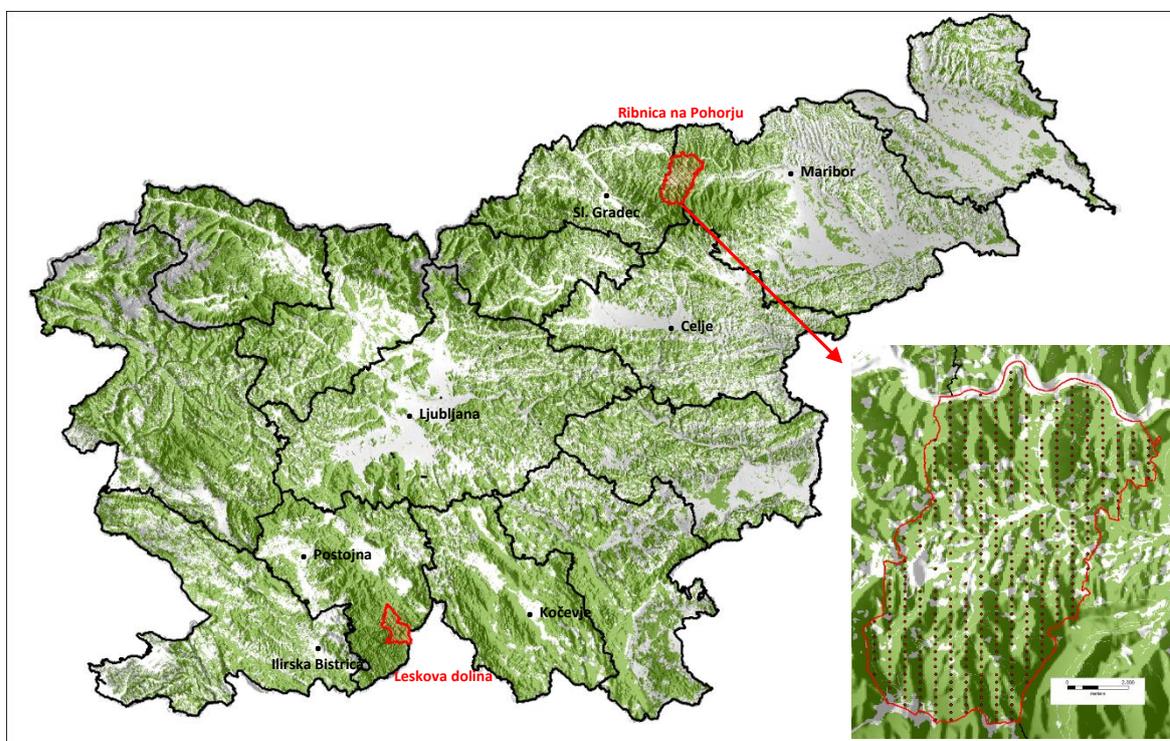


Abbildung 1: Slowenien mit eingezeichneten Untersuchungsgebieten und Aufnahmepunkten

3.1 POHORJE

Die Waldbewirtschaftungseinheit Ribnica na Pohorju erstreckt sich über die Wälder auf den Nördlichen Hang von Pohorje, von der Drau mit tiefstem Punkt auf 340 m ü.N.N. bis zum Gebirgrücken mit höchstem Punkt auf 1537 m ü.N.N. Das Relief ist in der ganzen Einheit sehr ungleichförmig, aus dem Drautal erheben sich steile und zergliederte Hänge, das Gelände verläuft im höheren Teil bis zum Hauptkamm relativ glatt. In der Einheit überwiegt mäßig feuchtes voralpines Klima das stark von subpannonischem Klima beeinflusst wird. Die Niederschläge betragen durchschnittlich ungefähr von 1100 bis 1500 mm/Jahr, das Jahresmaximum ist im Sommer und das Minimum im Winter. Die hydrologischen Bedingungen sind günstig, dies spiegelt sich im Wasserstand der Flüsse wider. Das Grundgestein besteht überwiegend aus Magmatit (Granodiorit) und Metamorphit, teilweise sind auch Kontinentalsedimente aufzufinden (Gozdnogospodarski načrt Ribnica na Pohorju, 2011).

Der Beginn der Forstwirtschaft und die ersten Eingriffe in die Wälder waren hier relativ früh. Das Gebiet war schon im 13. Jahrhundert besiedelt. Endstanden sind große abgelegene Bauernhöfe (Einzelhöfe) mit abgerundeten Grundstücken. Die Nutzung der Wälder war nur auf Gewinnung von Brenn- und Bauholz beschränkt. Ende des 17. Jahrhunderts kam es zur allmählichen Auflassung der höchstgelegenen Bauernhöfe. Deren Wälder kamen in den Besitz verschiedener Feudaleinrichtungen. Zugleich begannen die Eisenverhüttung und die Entstehung von Glashütten in der Region, dies führte zur einen intensiveren Nutzung der Wälder. Ab der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts und im 19. Jahrhundert, als die Eisenverarbeitung und Glasproduktion am Höhepunkt waren, kam es auch zu den größten Eingriffen in die Wälder. Für die Bedürfnisse der Holzkohlgewinnung (Köhlerei) wurden hauptsächlich Laubbäume (Buchenholz) verwendet. Die kahlgeschlagenen Bestände wurden oft der natürlichen Walderneuerung überlassen, die neu entstandenen Wälder waren überwiegend Fichtenwälder mit Tannenanteil. Die Bewirtschaftung der Bauernwälder war nie schablonisiert, obwohl es auf die Anzucht von Nadelwäldern ausgerichtet war. Daraus entwickelte sich die Bauernplenterung, die für das Wuchsgebiet eine gut geeignete Plenterungsform war. Messungen und Analysen nach dem II. Weltkrieg haben gezeigt, dass die privaten Wälder in einem besseren Zustand waren als die früheren Feudalwälder. Im Jahr 1949 wurde der Kahlschlag in ganz Slowenien

verboten. Die durch Kahlschlag und Aufforstung entstandenen Fichtenmonokulturen wurden in den darauf folgenden Jahrzehnten zu Mischwäldern gefördert (Cenčič, 2000). Noch heute gibt es in dem Gebiet überwiegend Privateigentümer welche 82% der Wälder besitzen, die restlichen 18% sind Staatseigentum. Das durchschnittliche Waldgrundstück ist 10,9 ha groß und der größte Teil der Wälder ist im Besitz von Eigentümern die 10 Hektar und mehr an Wald besitzen (Gozdnogospodarski načrt Ribnica na Pohorju, 2011).

3.2 SNEŽNIK

Die Waldbewirtschaftungseinheit Leskova dolina liegt auf der Nord-Östlichen Hang von Snežnik von 750 m ü.N.N. bis zum Gipfel auf 1796 m ü.N.N. Die Einheit liegt auf einer stark ungleichförmigen tektonisch gebrochenen Karsthochebene mit vielen Gipfeln, Tälern, steilen Felskanten und Schluchten die größtenteils aus Kalk und teilweise Dolomit aufgebaut sind. In den klimatischen Eigenschaften spiegelt sich der Einfluss von Mediterranem-, Atlantik- und Kontinentalklima. Die Niederschläge betragen durchschnittlich ungefähr 3000 mm/Jahr und sind durchs ganze Jahr verteilt, mit gut ausgeprägtem Herbst- und weniger ausgeprägtem Frühjahrsmaximum. Die Einheit liegt auf einer typischen Karstwelt, ohne oberflächlich fließendem Wasser, nur hier und da sind kleine Karstquellen aufzufinden (Gozdnogospodarski načrt Leskova dolina, 2007).

Schloss Schneeberg und dessen Besitztum mit deren Wäldern, die heute die Leskova dolina Einheit bilden, wurden das erste Mal urkundlich im Jahr 1269 erwähnt. In den darauffolgenden Jahrhunderten waren die Wälder im Besitz verschiedenen Adelsfamilien (Gozdnogospodarski načrt Leskova dolina, 2007). Bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts unterlagen die Wälder einer sehr schlechten Bewirtschaftung. Im Jahr 1890 entstand der erste Bewirtschaftungsplan für die Wälder. Dieser Plan sah einen Übergang auf gleichförmige Bestände mit größerem Anteil an Nadelholz vor. Die Struktur der Wälder war bis zu dem Zeitpunkt zweischichtig, mit einem großen Buchenanteil. In der Oberschicht war Buche gemischt mit Tanne und in der Unterschicht reichlich Tannenverjüngung. Zur Wende kam es im Jahr 1912, in dem neuen Bewirtschaftungsplan hat man nach dem Vorbild von Dr. Leopold Hufnagl als Ziel Plenterung vorgegeben, ausserdem sollte der Anteil der Tanne zu vergrößert werden. Die Folgen waren eine radikale Beseitigung der Buche, auch in der Verjüngung. Die vertikale Struktur und das

Mischungsverhältnis zwischen Nadel- und Laubbäumen waren somit zerstört, die Tanne hat sich nicht mehr verjüngt und dies wiederum führte zu einschichtigen Beständen. Im Jahr 1964 hat man im neuen Bewirtschaftungsplan erläutert, dass man nur noch dort plentert, wo die Bestandesbedingungen das zulassen (Gašperšič, 1967). In den 70-Jahren hat man angefangen den naturnahen Waldbau einzuführen und somit das Berücksichtigen von spezifischen Standortverhältnissen in den Vordergrund zu stellen (Gozdnogospodarski načrt Leskova dolina, 2007).

Tabelle 1: Wichtigsten Merkmale der Waldbewirtschaftungseinheiten

		Ribnica na Pohorju - Pohorje	Leskova dolina - Snežnik
Fläche			
Untersuchungsgebiet	[ha]	6831	3062
Waldfläche	[ha]	5618	3011
Waldanteil	[%]	82	98
Holzvorrat und Zuwachs			
Holzvorrat	[m ³ /ha]	408,3	405,0
Nadelholz	[%]	77,5	68,2
Laubholz	[%]	22,5	31,8
Fichte	[%]	48,0	18,2
Tanne	[%]	26,0	50,0
Buche	[%]	17,2	28,6
Sonstiges Nadelholz	[%]	3,4	3,2
Sonstiges Laubholz	[%]	5,4	0,0
Zuwachs pro Jahr	[m ³ /ha]	10,5	8,5

4 METHODEN

4.1 DATEN

Die Daten, die in dieser Arbeit verwendet werden, wurden im Rahmen der slowenischen Forstinventur aufgenommen und sind von der slowenischen Forstverwaltung »Zavod za gozdove Slovenije« (ZGS) zur Verfügung gestellt worden.

Für rationales und effektives aufnehmen von Bestandesinformationen wird auf Stichprobenverfahren zurückgegriffen. In Europa hat sich für den Zweck der Überwachung der Waldökosysteme das Kontrollstichprobenverfahren etabliert (Hočevár, 2003).

In Slowenien werden seit den 60-Jahren verschiedene Teilmessungen von Beständen vorgenommen. Am Ende desselben Jahrzehnts hat man angefangen, Daten auf Dauerbeobachtungsflächen aufzunehmen (Navodila..., 2010). Das Kontrollstichprobenverfahren wurde in der Praxis in Slowenien das erste Mal im Jahr 1971 in dem Waldbewirtschaftungsgebiet Bled angewendet, erst 10 Jahre nach der Entstehung in der Schweiz (Grilc, 1972). In den folgenden zwei Jahrzehnten hat sich diese Methode auch in andere Teile von Slowenien ausgeweitet und mit der Einführung der slowenischen Forstverwaltung (ZGS) im Jahr 1994 auch als einheitliche Inventurmethode in ganz Slowenien übernommen (Navodila..., 2010).

Der Quadratraster der Probeflächenzentren ist von Gebiet zu Gebiet anders. Die am häufigsten verwendeten Raster sind 250×500 m, 200×500 m und 250×250 m. Das genaue Probeflächenzentrum ist gut mit einem versenkten für die Waldinventur vorgesehenen Metallstab markiert. Die Probefläche besteht aus zwei konzentrischen Probekreisen mit festem Radius und mit unterschiedlichen Kluppschwellen. Bäume mit BHD ≥ 30 cm werden auf dem gesamten Probekreis mit Radius 12,61 m aufgenommen, Bäume mit BHD < 30 cm nur auf dem inneren Probekreis mit Radius 7,98 m und die Kluppschwelle liegt bei BHD > 10 cm. Auf der Probefläche werden Daten aufgenommen die zur Beschreibung der Probefläche, der Bäume und des Totholzes dienen, außerdem werden auch Daten aufgenommen, die für andere Zwecke verwendet werden (z. B.: Natura 2000, Schutzgebiete, Waldfunktionen,...). Für das Ermitteln der einzelnen Baumparameter werden auf der Fläche für jeden Baum die Nummer, Baumart, Azimut, Distanz (parallel zum Gelände), BHD, Baumstatusveränderung (z.B. geerntet, gestorben, eingewachsen,...),

Höhe (für wenigstens 2 zum Probekreiszentrum nächsten Bäume der Hauptbaumart, herrschend im Bestand und ohne größere Schäden und Wipfelbruch), Soziale Stellung, Schaftgüte und Schäden aufgenommen (Navodila..., 2010). Die Probeflächen werden alle 10 Jahre aufgesucht und vermessen, so steht aus einigen Teilen Sloweniens schon die dritte Aufnahme zu Verfügung mit selben Aufnahme-konzept, dass somit eine gute Datenbank ergibt.

Tabelle 2 gibt einen Überblick der verfügbaren BHD Daten. Für die Simulation wurden Daten von insgesamt 1.332 Probeflächen verwendet, 438 aus dem UG Pohorje und 894 aus dem UG Snežnik. Zur Verfügung stand die erste Aufnahme mit deren Wiederholung nach 10 Jahren. Die Baumhöhe und der Kronenansatz standen nicht zu Verfügung.

Tabelle 2: Zahlen der verwendeten Daten der slowenischen Forstinventur in den Untersuchungsgebieten

UG	Baumart	n	Anteil [%]	Mittel BHD [cm]	Standard-abweichung [cm]	Min. BHD [cm]	Maks. BHD [cm]
Pohorje	Fichte	1931	44,7	25,7	13,6	10	82
	Tanne	975	22,6	24,7	13,3	10	88
	Buche	786	18,2	22,9	12,6	10	83
	Sonstiges Laubholz	486	11,3	20,7	9,8	10	60
	Sonstiges Nadelholz	141	3,3	26,3	12,8	10	75
	Gesamt	4319	100	24,4	13,1	10	88
Snežnik	Fichte	1273	17,3	26,5	15,9	10	97
	Tanne	2563	34,9	36,2	17,8	10	97
	Buche	3220	43,8	22,8	12,2	10	80
	Sonstiges Laubholz	288	3,9	28,2	12,2	10	66
	Sonstiges Nadelholz	8	0,1	29,6	16,5	11	51
	Gesamt	7352	100	28,3	16,2	10	97

4.1.1 Datenaufbereitung für die Kalibrierung

MOSES braucht für eine Simulation Daten auf Bestandesebene (z. B. Site Index) wie auch auf Einzelbaumebene (Baumart, BHD, Höhe, Höhe des Kronenansatzes, X- und Y-Koordinaten). Die slowenische Forstinventur deckt die meiste Bedürfnisse von MOSES ab. Baumart, BHD, X- und Y-Koordinaten sind vorhanden, Höhe nur teilweise oder gar nicht und auch Höhe des Kronenansatzes war nicht vorhanden. Der Site Index wurde mit Hilfe durchschnittliche SI-Werte nach Baumart aus Pflanzengesellschaften definiert. Die Rohdaten der Forstinventur mussten vorerst in die passende Form gebracht werden. Weil nur im inneren Probekreis mit Radius 7,98 m alle Bäume mit BHD > 10 cm aufgenommen werden, wurde auch nur der Teil des Datensatzes verwendet.

4.1.1.1 Umrechnung der Koordinaten

Für die Simulation in MOSES werden kartesische Koordinaten (X, Y) benötigt. Die auf dem fixen Probekreis aufgenommenen Polarkoordinaten (die Schrägdistanz vom Probekreiszentrum bis zur Mitte des Baumes und der Azimut in Grad) wurden deshalb mit Hilfe der Gleichung 1 und 2 (Polarkoordinaten, 2015) in kartesische Koordinaten umgerechnet.

$$x = r \cdot \cos \varphi \quad \dots (1)$$

$$y = r \cdot \sin \varphi \quad \dots (2)$$

r ...	Horizontaldistanz [m]
φ ...	Azimut [Radiant]
X ...	X Koordinate
Y ...	Y Koordinate

4.1.1.2 Berechnung der Baumhöhen

An den Aufnahmepunkten wurden nur ein Teil aller Baumhöhen bei der zweiten Aufnahme (UG Pohorje) oder sogar keine Baumhöhen (UG Snežnik) gemessen, darum war es notwendig die fehlenden Baumhöhen über Höhenkurven zu berechnen.

Bei der Aufnahme im UG Pohorje waren 1.592 gemessene Baumhöhen zu Verfügung, das war ein guter Ausgangspunkt um die fehlenden Höhen mit Hilfe von Höhenkurven zu ermitteln. So wurde für alle Bäume die im Probekreis vorkommen je nach Baumart die Höhe berechnet. Als sehr gut geeignete Funktion hat sich die Höhenkurve nach Petterson (Gleichung 3) herausgestellt, die ein hohes Bestimmtheitsmaß vorgibt. Die Funktion wurde auch in der Studie von Kušar (2007) als sehr gut geeignet für Daten der slowenischen Forstinventur befunden.

$$h = \left(\frac{BHD}{a_0 + a_1 \cdot BHD} \right)^3 + 1,3 \quad \dots (3)$$

h ...	Baumhöhe [m]
BHD ...	Brusthöhendurchmesser [cm]
a_0, a_1 ...	Funktionskoeffizienten

Bevor für das UG Pohorje die fehlenden Baumhöhen berechnet werden konnten, mussten für jede BHD-Klasse die Mittelwerte der gemessenen Höhen ermittelt werden. Dann wurden die entsprechenden Transformationen für die abhängige y und unabhängige x Variable berechnet. Aus den Wertpaaren x und y mittels Regressionsanalyse wurden die Koeffizienten a_0 und a_1 der Höhenkurve berechnet.

Tabelle 3: Koeffizienten zur Berechnung der fehlenden Höhen nach Petterson im UG Pohorje

Baumart	Koeffizienten		Bestimmtheitsmaß
	a_0	a_1	
Fichte	2,3335	0,2821	0,969
Tanne	2,3001	0,2816	0,994
Buche	2,0012	0,2886	0,973

Vom UG Snežnik standen keine Baumhöhen zu Verfügung, darum wurde auf eine Studie zurückgegriffen in der auf Grund von Daten aus einer Untersuchungsfläche in Leskova dolina Funktionskoeffizienten zur Berechnung der Baumhöhen ermittelt worden sind (Klopčič, 2013). Mit Hilfe dieser Koeffizienten wurden die fehlenden Höhen mit der Höhenkurve nach Prodan (Gleichung 4) berechnet.

$$h = \frac{BHD^2}{a_0 + a_1 \cdot BHD + a_2 \cdot BHD^2} + 1,3 \quad \dots (4)$$

h	...	Baumhöhe [m]
BHD	...	Brusthöhendurchmesser [cm]
a_0 bis a_2	...	Funktionskoeffizienten

Tabelle 4: Koeffizienten nach Klopčič (2013) zur Berechnung der fehlenden Höhen nach Prodan

Baumart	Koeffizienten		
	a_0	a_1	a_2
Fichte und Tanne	22,4816	0,0430	0,0253
Buche und sonstiges Laubholz	9,6300	0,0812	0,0313

4.1.1.3 Berechnung des Kronenansatzes

Für die Berechnung fehlender Kronenansätze wurde die der Gleichung 5 nach Kahn und Pretzsch (1997) verwendet.

$$ka = h \cdot e^{a_0 + a_1 \cdot \frac{h}{BHD} + a_2 \cdot BHD} \quad \dots (5)$$

ka	...	Kronenansatz [m]
h	...	Baumhöhe [m]
BHD	...	Brusthöhendurchmesser [cm]
a ₀ bis a ₂	...	Koeffizienten

Weil keine gemessenen Kronenansätze zu Verfügung waren, wurden die Koeffizienten zu deren Berechnung aus Baumdaten je nach Baumart ermittelt, die in Österreich und in der Schweiz aufgenommen worden sind. Die Daten dazu wurden vom Institut für Waldbau, Universität für Bodenkultur Wien zu Verfügung gestellt (Klopf, 2013).

Tabelle 5: Koeffizienten nach Klopf (2013) zur Berechnung des fehlenden Kronenansatzes

Baumart	Koeffizienten		
	a ₀	a ₁	a ₂
Fichte	-1,5168417	0,6656053	0,0076387
Tanne	-1,6147180	0,9224665	0,0056466
Buche	-0,8443730	0,1171238	0,0020899
Weißkiefer	-0,5565572	0,1220822	0,0030937
Lärche	-1,3731881	0,7237903	0,0061296

4.1.1.4 Parametrisierung der Oberhöhenverläufe

Oberhöhenfunktionen werden auch in Einzelbaumwachstumsmodellen für die Abschätzung des potenziellen Höhenwachstums je Baumart und Standort verwendet. Für den Zweck sind in MOSES Oberhöhenverläufe integriert. Als Datengrundlage dafür wurden keine Originaldaten verwendet, sondern die aus den Ertragstafeln bereits bekannten und ausgeglichenen Werte für Österreich und Angrenzenden Gebieten (Kindermann und Hasenauer, 2005).

Da für Slowenien noch keine geeigneten Koeffizienten zur Berechnung der Oberhöhenverläufe zu Verfügung standen, wurden im Rahmen dieser Arbeit die Koeffizienten für den Oberhöhenfunktionstyp nach Mitscherlich/Richards (1919) (Gleichung 13) aus Ertragstafeln ermittelt und anschließend in MOSES integriert. Die Oberhöhenentwicklung wurde in Abhängigkeit vom Alter und Bonität regressionstechnisch neu ausgeglichen. Die Datengrundlage waren für Slowenien angepasste Slowakische Ertragstafeln nach Halaj et al. aus dem Jahr 1987 (Kotar, 2007).

4.1.1.5 Bestimmung des Site Index

Der Site Index (SI; Oberhöhe im Alter 100 Jahre) wird für die Berechnung des potenziellen Höhenzuwachses verwendet. Die Oberhöhenbonität einzelner Standorte konnte auf Grund fehlender Baumhöhen und Alters nicht direkt aus den verfügbaren Inventurdaten bestimmt werden. Der SI wurde mit Hilfe von Pflanzengesellschaften ermittelt, die für jeden Aufnahmepunkt bekannt sind. Für die meisten Pflanzengesellschaften stehen durchschnittliche SI-Werte nach Baumart zu Verfügung. Die verwendeten Werte wurden aus den Arbeiten von Kadunc (2010, 2012, 2013a und 2013b) entnommen und sind in der Tabelle 6 zusammengefasst:

Tabelle 6: Durchschnittliche SI Werte nach Pflanzengesellschaft und Baumart (nach Kadunc, 2010, 2012, 2013a und 2013b)

UG	Pflanzengesellschaft	Baumart	SI	
Pohorje	<i>Luzulo-Fagetum</i>	Fichte	31,5	
		Buche	31,2	
		Sonstiges Laubholz	31,0	
	<i>Enneaphyllo-Fagetum und Savensi-Fagetum pohoricum</i>	Fichte	29,2	
		Buche	24,4	
		Sonstiges Laubholz	26,0	
	<i>Dryopterido-Abietetum</i>	Tanne	39,6	
		Fichte	38,1	
		<i>Bazzanio-Abietetum</i>	Tanne	41,2
			Fichte	34,0
		<i>Bazzanio-Piceetum</i>	Fichte	28,0
	<i>Sphagno-Piceetum</i>	Fichte	10,7	
	<i>Aceri-Fraxinetum</i>	Sonstiges Laubholz	33,0	
	Snežnik	<i>Hacquetio-Fagetum</i>	Fichte	34,0
Buche			26,5	
Sonstiges Laubholz			27,4	
<i>Omphalodo-Fagetum</i>		Tanne	27,6	
		Fichte	33,4	
		Buche	26,0	
		Sonstiges Laubholz	23,1	
<i>Necero-Abietetum</i>		Tanne	23,6	
<i>Omphalodo-Fagetum Iycopodietosum</i>		Fichte	34,0	
<i>Ranunculo platanifolii-Fagetum</i>		Buche	16,7	
<i>Piceetum subalpinum dinaricum</i>	Fichte	25,2		

Für die Standorte wo keine mittleren SI nach Baumart zu Verfügung waren, wurde für die jeweilige Baumart sorgfältig ein Wert je nach der Wuchsleistung von einer anderen Pflanzengesellschaft oder Baumart bestimmt (siehe Anhang).

4.2 METHODIK VON MOSES

MOSES ist ein abstandabhängiges Einzelbaumwachstumsmodell, das auf dem Potenzialkonzept aufbaut. Es wird für jeden einzelnen Baum ein Wachstumspotenzial errechnet, das dann auf tatsächliche Zuwächse (bedingt durch Konkurrenzweiser) reduziert wird (vgl. Hasenauer, 1994; Klopff et al., 2011).

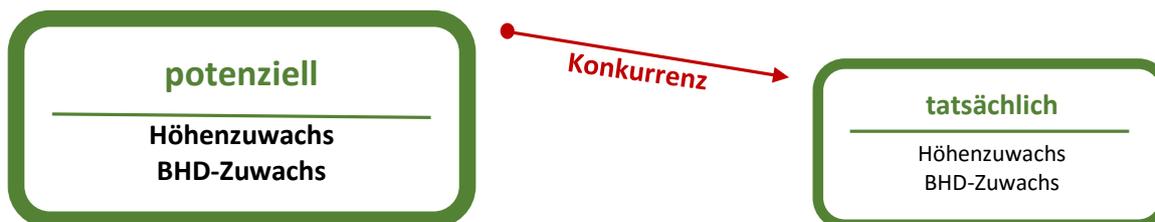


Abbildung 2: Zuwachspotenzialkonzept von MOSES (Klopff, 2014)

4.2.1 Competition Index

Als Konkurrenzweiser dienen das Kronenprozent (»crown ratio«) und der Competition Index (CI). Das Kronenprozent gibt Auskunft über vergangene Konkurrenzverhältnisse. Der Competition Index (Gleichung 6, 7 und 8) wird nach Monserud (1975) berechnet und bildet die aktuelle Konkurrenz ab. Für den CI sind potenzielle Kronenradien notwendig, die die Solitärfunktionen von Hasenauer (1997) liefern (Gleichung 9) (Klopff et al., 2011).

$$CI_i = \sum_{j=1}^n \left(\frac{o_{ij}}{a_i} \cdot \frac{h_j \cdot cr_j}{h_i \cdot cr_i} \right) \quad \dots (6)$$

$$cr = \frac{cw}{2} \quad \dots (7)$$

$$a = cr^2 \cdot \pi \quad \dots (8)$$

$$cw = e^{a_0} + a_1 \cdot \ln(h) \quad \dots (9)$$

CI_i	...	Competition Index für Baum i
n	...	Anzahl der Konkurrenten
o_{ij}	...	Überlappungszone der potentiellen Schirmfläche von Baum i und j
a_i	...	Einflusszone des Baumes i
h	...	Baumhöhe
cr (cw)	...	Kronenradius (-Durchmesser) eines Solitärbaumes mit gleicher Höhe
$a_0; a_1$	...	Koeffizienten von Hasenauer (1997)

Die Abbildung 3 zeigt die Schematische Darstellung der Konkurrenzsituation der Bäume 2 und 3 auf den Baum 1 durch den Competition Index nach Monserud (1975) mit potenziellen Kronenradien (r) und Überlappungsflächen der potentiellen Kronenprojektionen (o) (Klopf et al., 2011).

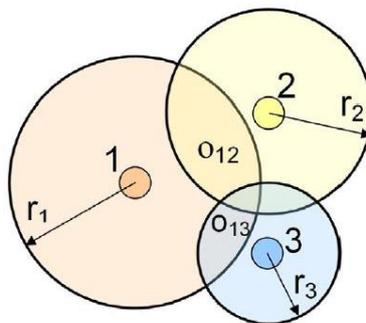


Abbildung 3: Darstellung der Konkurrenzsituation (Klopf et al., 2011)

4.2.2 Potenzieller Höhenzuwachs

Der potenzielle Höhenzuwachs (ih_{pot}) wird mit Hilfe von Oberhöhenkurven ermittelt. Die Funktionen dafür müssen sowohl nach der Oberhöhe als auch nach dem Alter (t) aufgelöst werden können (Gleichung 10) nach Kindermann und Hasenauer (2005). Zuerst wird mit Gleichung 10 ein rechnerisches Alter ermittelt, dazu werden die aktuelle Baumhöhe (h) und der Site Index (SI) verwendet. Das wird folgendermaßen interpretiert: wäre der Baum mit der Höhe h (bei einem Site Index von SI) in der Oberschicht erwachsen, hätte er ein Alter von t Jahren. Dieses Alter wird im nächsten Schritt um fünf Jahre erhöht und nun in die umgeformte Gleichung 11 eingesetzt. Das Ergebnis ist die potenzielle neue Höhe, die Differenz zur Ausgangshöhe der potenzielle Höhenzuwachs (Gleichung 12) (Klopf et al., 2011).

$$t = f(OH, SI) \rightarrow \dots (10)$$

$$\rightarrow OH = f(t, SI) \dots (11)$$

$$ih_{pot_i} = f_h(SI_i, t_i + LGP) - f_h(SI_i, t_i) \dots (12)$$

t	...	rechnerisches Alter eines Oberhöhenbaumes
OH	...	Oberhöhe [m]
SI	...	Site Index (Oberhöhe im Alter 100 Jahre)

ih_{pot} ... potenzieller Höhenzuwachs
 LGP ... Länge einer Simulationsperiode

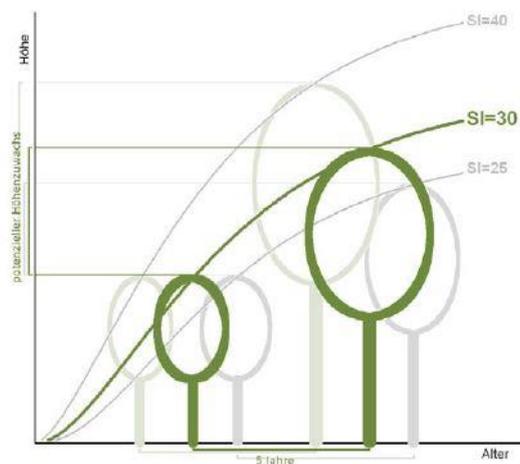


Abbildung 4: Ermittlung des potenziellen Höhenzuwachses in MOSES (Klopf et al., 2011)

Zur Abschätzung des potenziellen Höhenwachstums wurde der Richards Oberhöhenfunktionstyp (Mitscherlich, 1919) verwendet (Gleichung 13).

$$OH = a \cdot (1 - e^{-b \cdot t})^c \quad \rightarrow \quad t = \frac{\ln\left(\frac{1}{1 - \left(\frac{OH}{a}\right)^{\frac{1}{c}}}\right)}{b} \quad \dots (13)$$

$$a = a_0 + a_1 \cdot SI + a_2 \cdot SI^2$$

$$b = b_0 + b_1 \cdot SI + b_2 \cdot SI^2$$

$$c = c_0 + c_1 \cdot SI + c_2 \cdot SI^2$$

OH ... Oberhöhe [m]
 t ... Alter
 SI ... Site Index
 $a_i; b_i; c_i$... Koeffizienten

4.2.3 Potenzieller BHD-Zuwachs

Die Berechnung des potenziellen BHD-Zuwachses ($iBHD_{pot}$) basiert auf den BHD-Höhen-Beziehungen von Solitäräumen (Hasenauer, 1997). Berechnet wird er durch Anwendung der Gleichung 14 und 15.

$$BHD_{sol} = e^{a_0 + a_1 \cdot \ln(h)} \quad \dots (14)$$

$$iBHD_{pot_i} = e^{a_0 + a_1 \cdot (\ln(h_i + ih_{pot,i}))} - e^{a_0 + a_1 \cdot \ln(h_i)} \quad \dots (15)$$

BHD_{sol}	...	BHD eines Solitärbaumes
$iBHD_{pot}$	...	potenzieller BHD-Zuwachs
a_0 und a_1	...	Koeffizienten

4.2.4 Angleichung der Zuwächse an die Konkurrenzsituation

Die zuvor berechneten potentiellen BHD- und Höhenzuwächse werden an die Konkurrenzsituation angepasst. Mit dem Kronenprozent werden die Konkurrenzbedingungen der Vergangenheit berücksichtigt. Dann wird die aktuelle Konkurrenzsituation nach forstlichen Maßnahmen und Mortalität eingebunden. Darüber hinaus wird durch Berücksichtigung der Veränderung der Konkurrenz durch Eingriff und Mortalität der notwendigen Anpassung des Baumes an die geänderten Konkurrenzbedingungen Rechnung getragen (Klopf et al., 2011).

4.2.5 Änderungen im Kronenprozent

Die Höhe des Kronenansatzes wird wie der Zuwachs von Baumdurchmesser und -höhe in jeder Periode angepasst. Dazu werden BHD, Höhe und Kronenansatz in Form vom Kronenprozent und Konkurrenz nach erfolgter Freistellung als Eingangsgrößen berücksichtigt. Durch Verwendung eines dynamischen Ansatzes und der Beachtung der Tatsache, dass ein Baum seinen Kronenansatz nicht nach unten verlagern kann, wird die Änderung des Kronenansatzes simuliert (Klopf et al., 2011).

4.2.6 Verjüngung

Die Verjüngung wird in mehreren Schritten abgearbeitet. Zuerst wird die Bestandesfläche in 4x4 m große Verjüngungskästchen unterteilt, auf denen wird ermittelt, ob und welche Baumarten sich verjüngen und falls Verjüngung auftritt, wie viele Pflänzchen generiert

werden sollen. Wenn Pflänzchen zu generieren sind, erfolgt dies mit einer Höhe von 0.1 m plus einer zwischen 0 und 0.2 gleichverteilten Zufallszahl. Der Kronenansatz ergibt sich aus Multiplikation dieser Höhe mit einer zwischen 0 und 1 gleichverteilten Zufallszahl. Der BHD ist per Definition 0. Die Verteilung der Pflänzchen im Verjüngungskästchen erfolgt zufällig (Gleichverteilung) (Klopf et al., 2011).

4.2.7 Mortalität

Die Mortalität wird mit einer Logit-Funktion bestimmt. Für jeden Baum wird die Wahrscheinlichkeit für sein Absterben berechnet. Ob ein Baum schlussendlich stirbt oder nicht, wird mit einer gleichverteilten Zufallszahl bestimmt. Ist die Wahrscheinlichkeit für seinen Tod höher als die Zufallszahl, wird der Baum als abgestorben markiert und ausgeschieden, wenn nicht wird er für eine weitere Simulation vorgemerkt (Klopf et al., 2011).

4.3 DARSTELLUNG DER WALDBAULICHEN BEHANDLUNG

Der Großteil waldbaulicher Behandlungskonzepte kann mit den in MosesBatch integrierten Entnahmealgorithmen dargestellt werden. Für den Zweck stehen vier Algorithmen zu Verfügung:

- Kahlschlag: Alle Bäume mit $BHD > 5$ cm werden entfernt
- Hochdurchforstung: Die Bäume werden nach BHD sortiert und Bäume vom stärkeren Ende der BHD-Verteilung beginnend entnommen. Die Entnahme stoppt beim Erreichen des vorgegebenen Abbruchkriteriums.
- Niederdurchforstung: Die Bäume werden nach BHD sortiert und Bäume vom schwächeren Ende der BHD-Verteilung beginnend entnommen. Die Entnahme stoppt beim Erreichen des vorgegebenen Abbruchkriteriums.
- Zufallsdurchforstung: Es werden solange zufällig Bäume entnommen (über gesamte BHD-Verteilung) bis das vorgegebene Schaftholzvolumen erreicht ist.

Die Entnahmen erfolgt getrennt nach Laub- und Nadelholz. Die Stärke der Entnahme wird über Anteile folgend definiert:

- Anteil (%) an der Stammzahl
- Anteil (%) an der Anzahl aller Bäume mit $BHD \geq 5$ cm

- Anteil (%) am Schaftholzvolumen
- Anteil (%) an der Grundfläche

Mehr Details können in Basch et al. (2006) und Klopčič et al. (2011) entnommen werden.

4.3.1 Simulation der Untersuchungsgebiete

Um die Verwendungsmöglichkeit von MOSES zu demonstrieren, wurden für jedes der zwei Untersuchungsgebiete drei Bewirtschaftungsszenarien simuliert. Die Simulation wurde mit einer Dauer von 50 Jahren (10 Perioden) festgelegt.

In beiden Untersuchungsgebieten würden folgende drei Szenarien angewendet:

- kein Eingriff (als Referenz)
- Zufallsdurchforstung (Anteil (%) des Nadelholz bzw. Laubholz Schaftholzvolumens)
- Hochdurchforstung (Anteil (%) des Nadelholz bzw. Laubholz Schaftholzvolumens)

Die Stärke des Eingriffs würde für beide Untersuchungsgebiete den aktuellen 10-Jährigen Forstwirtschaftsplänen für deren Wirtschaftseinheit entnommen. So ergab sich die Stärke der Entnahme (Zufallsdurchforstung bzw. Hochdurchforstung) für UG Pohorje 19,3% des Nadelholzvolumens und 15,3% des Laubholzvolumens (Gozdnogospodarski načrt Ribnica na Pohorju, 2011) und für UG Snežnik 21,6% des Nadelholzvolumens und 18,2% des Laubholzvolumens (Gozdnogospodarski načrt Leskova dolina, 2007) und wurde alle 10 Jahre bzw. jede zweite Periode durchgeführt. Die Länge einer Periode umfasst 5 Jahre.

4.4 GENAUIGKEIT DER MODELVORHERSAGE

Um die Genauigkeitsangaben der Modellvorhersage eines Modells zu testen, werden die Ergebnisse auf systematische Fehler bzw. Trends untersucht. Zu diesem Zweck wurden Konfidenz- (CI), Vorhersage- (PI) und Toleranzintervall (TI) nach Reynolds (1984) ermittelt.

Das **Konfidenzintervall** wird nach Gleichung 16) berechnet und gibt die mittlere Variationsbreite der erwartenden Fehler von Simulationen mit dem verwendeten Model an. Diese ist abhängig von der gewünschten Sicherheit der Schätzung, dem Stichprobenumfang und der Standardabweichung.

$$CI = \bar{D} \pm \frac{S_D}{\sqrt{n}} \cdot t_{n-1;\alpha;2} \quad \dots (16)$$

CI	...	Konfidenzintervall
\bar{D}	...	Mittelwert der Differenzen aus simuliertem und beobachtetem Wert
S_D	...	Standardabweichung
n	...	Anzahl der BHD-Klassen
$t_{n-1;\alpha;2}$	...	t-Wert mit n-1 Freiheitsgraden, einer Irrtumswahrscheinlichkeit von α und zweiseitiger Verteilung

Das **Vorhersageintervall** wird nach Gleichung 17 berechnet und gibt mit bestimmter Irrtumswahrscheinlichkeit den Rahmen für Fehler zukünftiger Schätzungen an. Es wird die Variationsbreite der Differenzen aus simulierten und beobachteten Werten dargestellt.

$$PI = \bar{D} \pm S_D \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \cdot t_{n-1;\alpha;2} \quad \dots (17)$$

PI	...	Vorhersageintervall
\bar{D}	...	Mittelwert der Differenzen aus simuliertem und beobachtetem Wert
S_D	...	Standardabweichung
n	...	Anzahl der BHD-Klassen
$t_{n-1;\alpha;2}$	...	t-Wert mit n-1 Freiheitsgraden, einer Irrtumswahrscheinlichkeit von α und zweiseitiger Verteilung

Das **Toleranzintervall** wird nach Gleichung 18 berechnet und beschreibt für wiederholte Modellsimulationen den Fehlerrahmen, innerhalb dessen bei einer bestimmten Irrtumswahrscheinlichkeit ein bestimmter Prozentsatz aller Fehler zu erwarten ist.

$$TI = \bar{D} \pm S_D \cdot g_{1-\gamma;n;\alpha} \quad \dots (18)$$

TI	...	Toleranzintervall
\bar{D}	...	Mittelwert der Differenzen aus simuliertem und beobachtetem Wert
S_D	...	Standardabweichung
$g_{1-\gamma;n;\alpha}$	...	Toleranzfaktor mit dem Prozentsatz der Fehler innerhalb des festgelegten Rahmens $(1 - \gamma)$, n Freiheitsgraden und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von α

Der t-Wert und auch der Toleranzfaktor g können aus statistischen Tabellen entnommen werden (Kokoska und Nevisin, 1989).

4.5 VERWENDETE VERSION UND MODELLE

Für die Validierung des Modells im Rahmen dieser Arbeit wurde an Hand vieler Probeflächen mit MOSESbatch gearbeitet. MOSES ist grundsätzlich für rechteckige Bestände konzipiert. Das Aufnahmedesign der slowenischen Forstinventur ist allerdings auf die Arbeit mit kreisförmigen Probeflächen ausgerichtet, aus dem Grund wurde auf eine Version von MOSESbatch Kreis aus dem Jahr 2007 zurückgegriffen. Die Version wurde von Georg Kindermann speziell für die Bedürfnisse der Diplomarbeit von Mario Klopff (2007) angepasst und ermöglicht die Arbeit mit kreisförmigen Probeflächen. Die einzelnen Teilmodelle und deren Koeffizienten die für die Validierung verwendet worden sind, können der Tabelle 7 entnommen werden.

Tabelle 7: Verwendete Modelle und Koeffizienten für die Validierung

Modell	Koeffizienten
Competition Index	Monserud, 1975
Kronendurchmessermodell	Höhe nach Hasenauer, 1997
Durchmesser eines Solitärs	Durchmesser eines Solitärs nach Hasenauer, 1997
Durchmesserzuwachsmmodell	Moses 2.0 Koeffizienten nach Kindermann, 2006
Höhenzuwachsmmodell	Moses 2.0 Kindermann, 2006
Kronenmodell	Dynamisch, nach Kindermann, 2006
Volumenberechnung	Derbholzvolumen nach Kennel (Franz et al., 1973)
Mortalitätsmodell	Nicht verwenden
Verjüngungsmodell	Nicht verwenden

Für die Simulation von Entwicklungsszenarien wurde zusätzlich zu den oben aufgelisteten Modellen das Mortalitätsmodell nach Boheim (2003) verwendet. Auf ein Verjüngungsmodell wurde für den Zweck der Demonstration jedoch verzichtet.

5 ERGEBNISSE

5.1 KALIBRIERUNG DER OBERHÖHENVERLÄUFE

Für ein genaueres Ermitteln des potenziellen Höhenzuwachses slowenischer Wälder wurden die Koeffizienten zur Berechnung der Oberhöhenverläufe aus für Slowenien angepassten Slowakischen Ertragstafeln nach Halaj et al. aus dem Jahr 1987 (Kotar, 2007) geschätzt. Die Oberhöhenentwicklung wurde in Abhängigkeit von Alter und Bonität regressionstechnisch neu ausgeglichen. In der Tabelle 8 sind die neu ermittelten und in MOSES integrierten Koeffizienten zur Berechnung der Oberhöhenverläufe nach Mitscherlich/Richards (1919). Schon die ersten Tests haben gezeigt, dass eine Integrierung neuer Koeffizienten für Slowenien sinnvoll war, da die Differenzen zwischen beobachteten und simulierten Werten kleiner waren im Vergleich zu bereits vorhandenen Koeffizienten.

Tabelle 8: Koeffizienten zur Berechnung der OH nach Mitscherlich/Richards

Koeffizienten	Baumart		
	Buche	Fichte	Tanne
a0	18,4300000	18,3200000	20,3400000
a1	0,1653000	0,3514000	0,2191000
a2	0,0165800	0,0102200	0,0133400
b0	0,0034010	0,0045850	0,0040690
b1	1,0400000	0,0009661	0,0010480
b2	-0,0000186	-0,0000145	-0,0000173
c0	2,9700000	3,3920000	3,7180000
c1	-0,0818300	-0,0736900	-0,0851100
c2	0,0008304	0,0005291	0,0005973
Standardabweichung	0.361	0.373	0.370
95 % Fehlerrahmen	0.543	0.478	0.512
Maximale Abweichung	1.111	1.523	1.486

5.2 VALIDIERUNG VON MOSES

Bevor man mit MOSES die Entwicklung der Wälder prognostizieren kann, muss das Model auf seine Genauigkeitsangaben der Modellvorhersage getestet werden. Um einen guten Überblick der Ergebnisse zu bekommen, wurden die Daten in Gruppen nach Baumart aufgeteilt. In der Gruppe gesamt, sind neben Fichte, Tanne und Buche auch Daten von sonstigem Laub- und Nadelhölzern vertreten.

Die beobachteten und simulierten BHD-Zuwächse wurden miteinander verglichen. Die verglichenen Werte wurden zuerst graphisch und dann rechnerisch dargestellt. Abbildung 5 zeigt die Differenzen (Δ) aus dem simulierten und gemessenen BHD-Zuwachs (iBHD), aufgetragen über den gemessenen Brusthöhendurchmesser für das UG Pohorje und Abbildung 6 für das UG Snežnik.

Um die Ergebnisse auf systematische Fehler bzw. Trends zu untersuchen, wurden Konfidenz- (CI), Vorhersage- (PI) und Toleranzintervall (TI) nach Reynolds (1984) ermittelt. Die ermittelten Werte werden am Beispiel der Baumart Fichte aus dem UG Pohorje näher erläutert und können wie folgt interpretiert werden: der mittlere BHD-Zuwachs bei Fichte beträgt 0,330 cm pro Jahr. Dieser Wert ist nur um 0,009 größer als der beobachtete Wert. Mit 95% Wahrscheinlichkeit besteht keine systematische Abweichung in den Durchmesserzuwachsschätzungen, weil das Konfidenzintervall Null einschließt und zwischen -0,134 und 0,153 liegt. Ebenfalls mit 95% Wahrscheinlichkeit liegen die Fehler zukünftiger Durchmesserzuwachsschätzungen (PI) zwischen -0,509 und 0,528, und bei wiederholter Anwendung der Gleichung liegen 95% der Fehler der Durchmesserzuwachsschätzungen zwischen -0,706 und 0,725 (siehe TI). Nur bei der Baumart Buche aus beiden Untersuchungsgebieten konnte bei 95 % der Wahrscheinlichkeit der Nachweis nicht erbracht werden, dass es keine systematischen Abweichungen gibt. Die ermittelten Werte aller Baumgruppen aus beiden UG, können detailliert der Tabelle 9 auf Seite 31 entnommen werden.

Über die gesamten Ergebnisse gesehen, unterscheiden sich die mit MOSES simulierten BHD-Zuwächse graphisch und rechnerisch nicht von den gemessenen. Das heißt, MOSES kann in der parametrisierten Form zur Simulation und Prognose der BHD-Entwicklung slowenischer Tannen und Tannen-Buchenwälder verwendet werden.

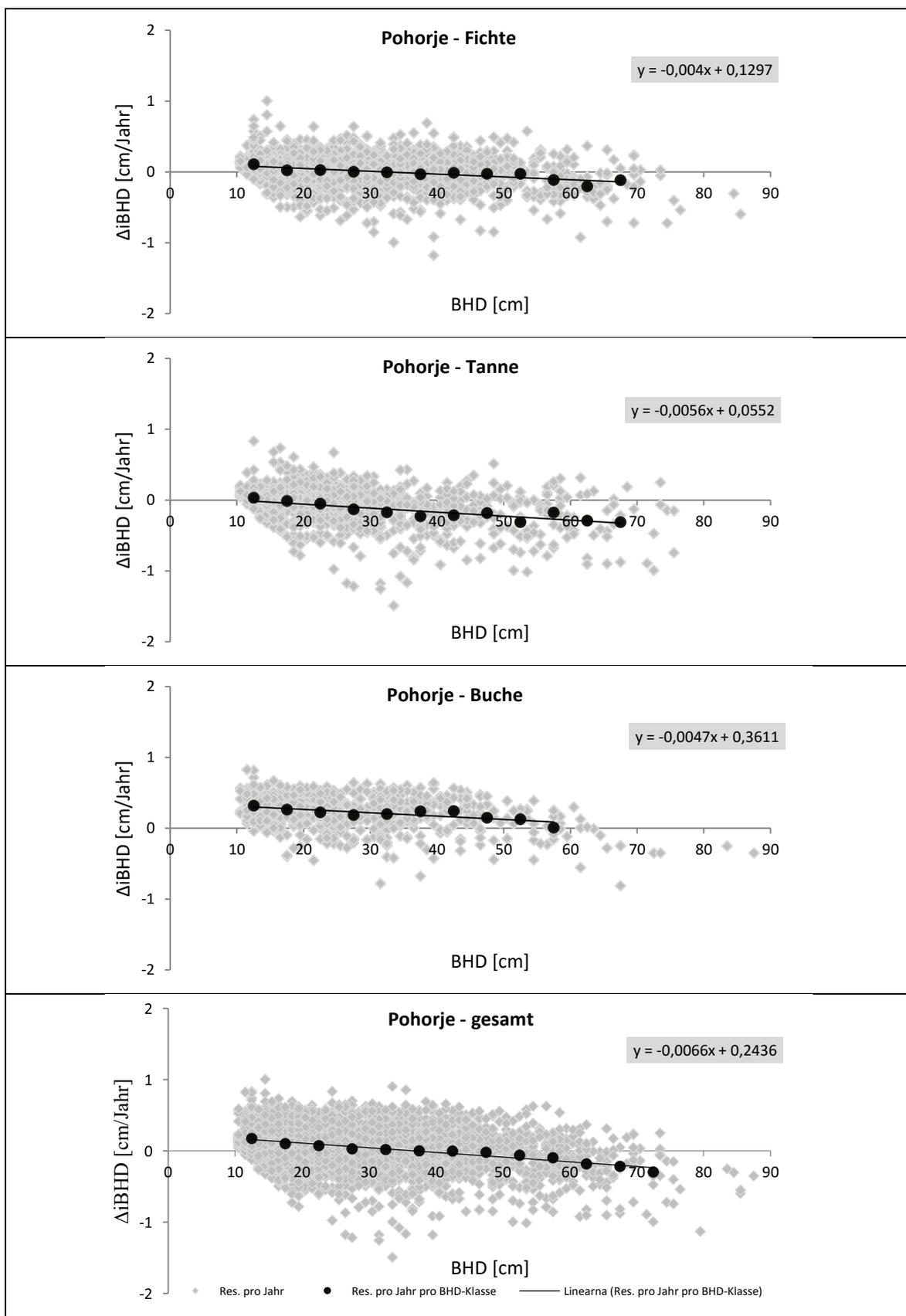


Abbildung 5: Streuung der Differenzen zwischen simulierten und gemessenen BHD-Zuwachs (UG Pohorje)

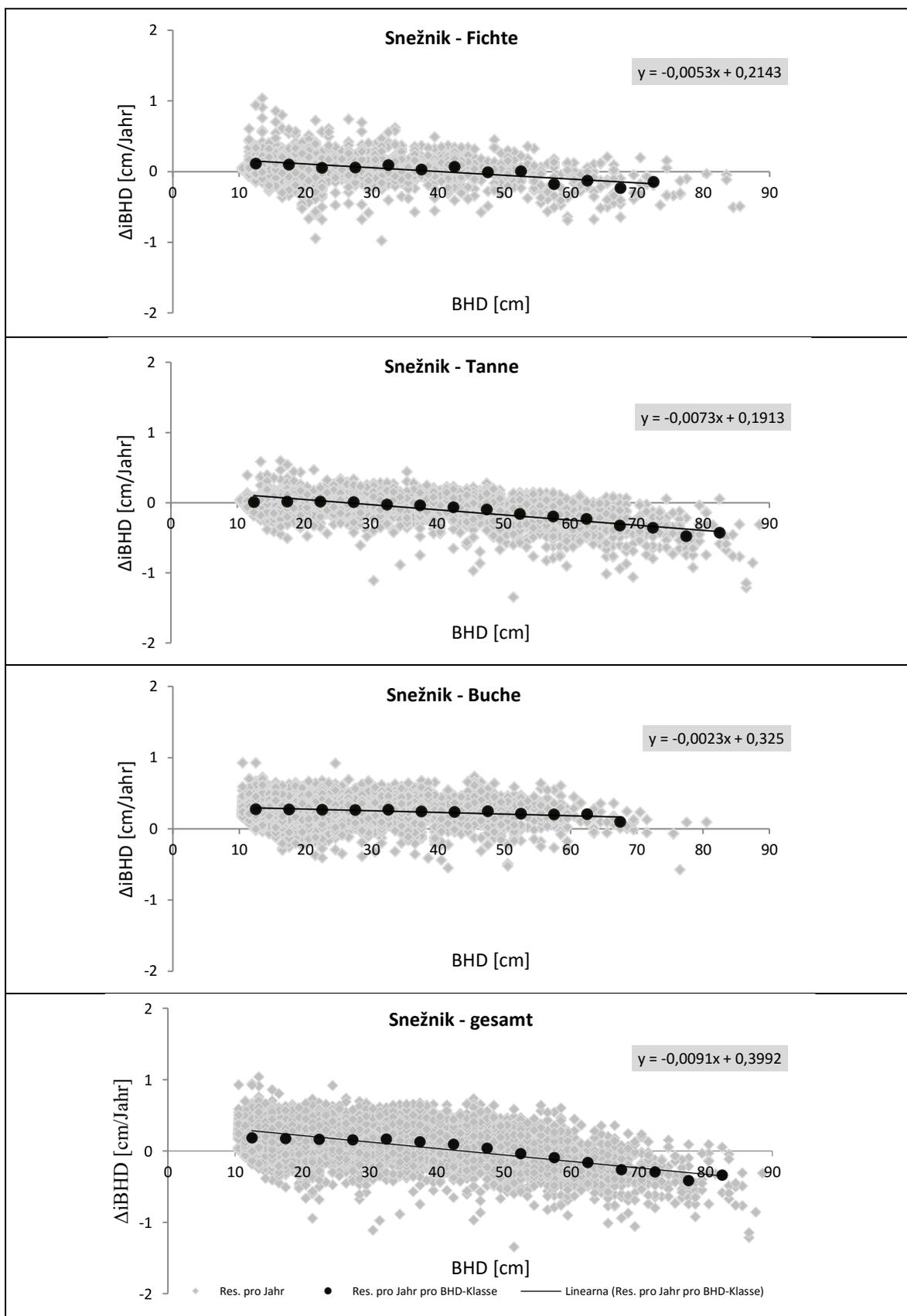


Abbildung 6: Streuung der Differenzen zwischen simulierten und gemessenen BHD-Zuwachs (UG Snežnik)

Tabelle 9: Mittelwerte des simulierten BHD-Zuwachses und statistische Analyse der simulierten BHD-Zuwächse pro Baumart und Jahr

		N	\overline{iBHD}_{sim} [cm]	$\overline{\Delta}$ [cm]	SD_{Δ} [cm]	t-Wert	CI [cm]		PI [cm]		TI [cm]	
Pohorje	Fichte	12	0,330	0,009	0,226	2,20	-0,134	0,153	-0,509	0,528	-0,706	0,725
	Tanne	12	0,341	-0,102	0,284	2,20	-0,282	0,078	-0,752	0,548	-0,999	0,794
	Buche	10	0,544	0,239	0,216	2,26	0,084	0,394	-0,274	0,752	-0,492	0,970
	gesamt	13	0,395	0,053	0,279	2,18	-0,116	0,222	-0,578	0,684	-0,806	0,912
Snežnik	Fichte	13	0,385	0,051	0,228	2,18	-0,086	0,189	-0,463	0,566	-0,650	0,752
	Tanne	15	0,164	-0,084	0,211	2,14	-0,201	0,033	-0,550	0,382	-0,705	0,537
	Buche	12	0,526	0,259	0,178	2,20	0,146	0,373	-0,149	0,668	-0,304	0,823
	gesamt	15	0,375	0,105	0,257	2,14	-0,037	0,247	-0,464	0,674	-0,653	0,863

N	...	Anzahl der BHD-Klassen (5-cm-Stufen)
\overline{iBHD}_{sim}	...	mittlerer geschätzter jährlicher BHD-Zuwachs
$\overline{\Delta}$	...	mittlere jährliche Differenz zwischen beobachteten und simulierten BHD
SD_{Δ}	...	Standardabweichung
t-Wert	...	mit Freiheitsgraden = 9; $\alpha = 0,05$; zweiseitig
CI	...	Konfidenzintervall mit $\alpha = 0,05$
PI	...	Vorhersageintervall mit $\alpha = 0,05$
TI	...	Toleranzintervall mit $\gamma = 0,05$ und $\alpha = 0,05$

5.3 SIMULATIONSERGEBNISSE

Um die Verwendungsmöglichkeit von MOSES zu demonstrieren, wurden für jedes der zwei Untersuchungsgebiete drei Bewirtschaftungsszenarien simuliert. Die modellierten Szenarien beziehen sich in der Stärke der Entnahme zwar auf die aktuellen Forstwirtschaftspläne, dienen aber nur als Beispiel und bilden in keinerlei Hinsicht die aktuelle waldbauliche Bewirtschaftung ab. Um eine solche Bewirtschaftung nachbilden zu können, müsste ein Erntemodell auf Grund von Entnahmedaten erstellt werden. Die simulierten Szenarien dienen also nur dem Zweck, eine mögliche Waldentwicklung nachbilden und analysieren zu können.

5.3.1 Pohorje

Die Holzvorratsentwicklung (Abbildung 7) der drei simulierten Bewirtschaftungsszenarien zeigt in allen Fällen eine Erhöhung des durchschnittlichen Holzvorrates pro Hektar. Die Ausgangssituation aus dem Jahr 2010 waren $422 \text{ m}^3/\text{ha}$. Da bei der Simulation ohne Eingriffe nur die natürliche Mortalität (0 bis $0,7 \text{ m}^3/\text{ha}$ je Simulationsperiode) auf die Bestände einwirkte, war hier auch die höchste Erhöhung des Holzvorrates zu erwarten, der beträgt nach 50 Jahren $990 \text{ m}^3/\text{ha}$. Die simulierten Zufalls- und Hochdurchforstung zeigen eine ähnliche Entwicklung des Holzvorrates auf, was der gleichen Eingriffsstärke zugeschrieben werden kann. Bis zum Schluss der Simulation hat sich in den beiden Szenarien der Holzvorrat um ca. $200 \text{ m}^3/\text{ha}$ erhöht. Die simulierte Entnahme lag bei der Zufallsdurchforstung im Schnitt bei $62 \text{ m}^3/\text{ha}$ und bei der Hochdurchforstung bei $65 \text{ m}^3/\text{ha}$. Der durchschnittliche entnommene Baum hatte bei der Zufallsdurchforstung einen BHD von $32,9 \text{ cm}$ und $35,8 \text{ cm}$ bei der Hochdurchforstung. Mortalität war fast keine aufzufinden.

Die Abbildung 8 zeigt die BHD-Verteilung vor und nach den simulierten Eingriffen. Was sofort ins Auge sticht, ist der geringe Anteil der unteren BHD-Klassen Ende der Simulation in allen Szenarien, was dem ausgeschalteten Verjüngungsmodell zugeschrieben werden kann. Interessant ist auch das Laubholz schneller die unteren BHD-Klassen überwächst. Das kann mehrere Gründe haben, eventuell könnte das an der Überschätzung der Buchenzuwächse liegen (siehe Abbildung 5). Trotz einem unterschiedlichen Ansatz der

Entnahmealgorithmen können keine markanten Unterschiede der BHD-Verteilung zwischen der Zufalls- und Hochdurchforstung festgestellt werden.

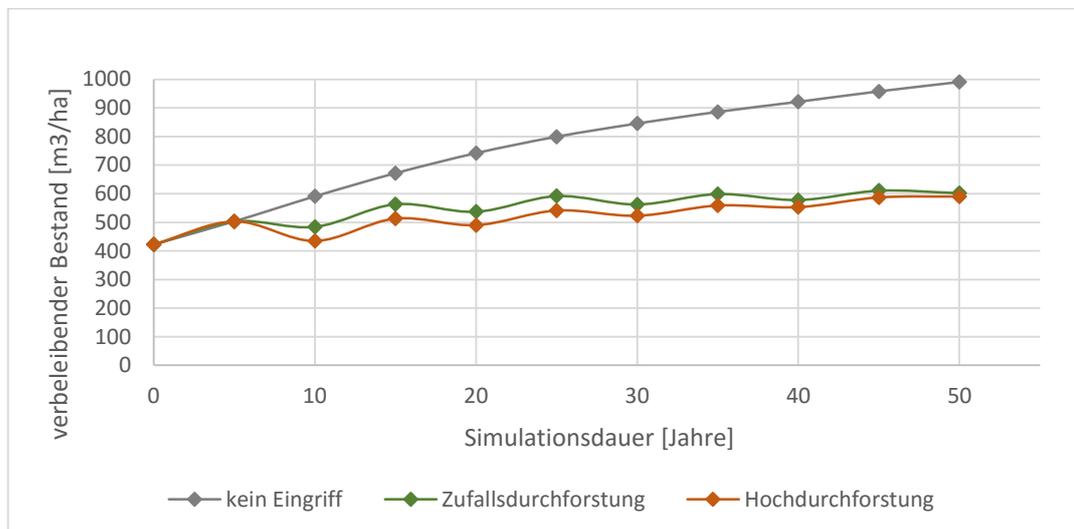


Abbildung 7: Entwicklung des Holzvorrats in der 50-jährigen Simulationsdauer UG Pohorje

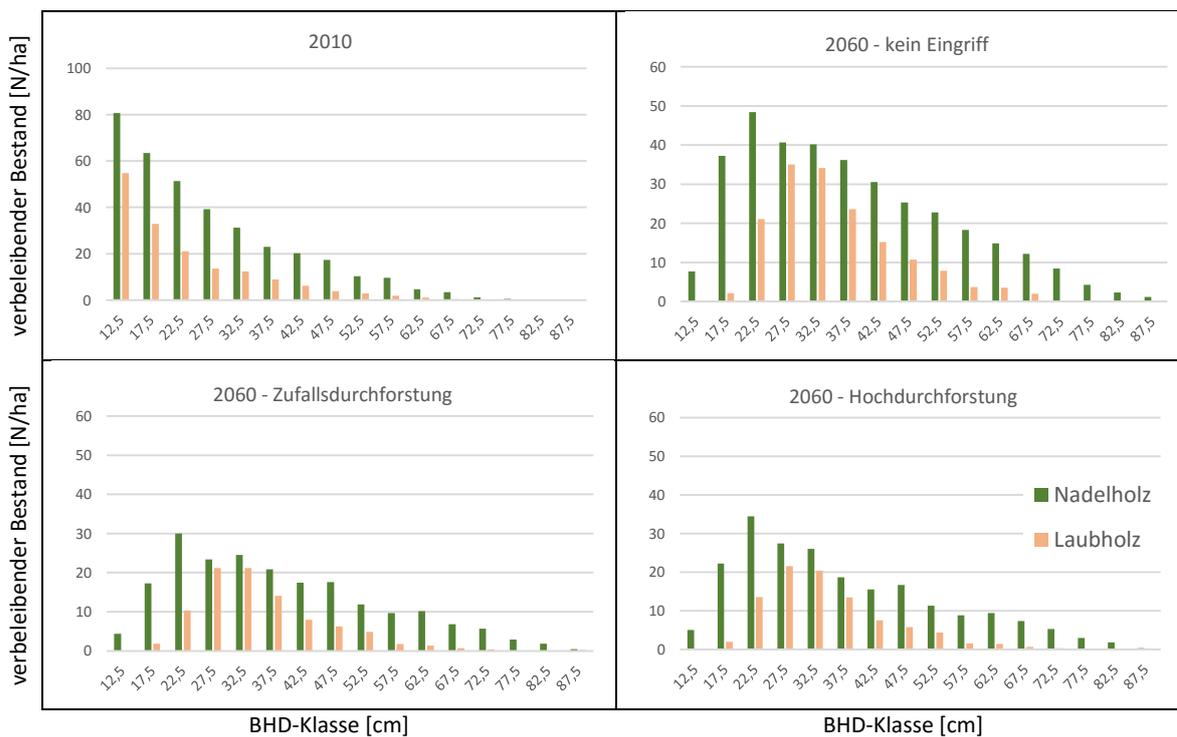


Abbildung 8: BHD-Verteilung vor und nach den simulierten Eingriffen in UG Pohorje

5.3.2 Snežnik

Im Vergleich zu Pohorje (Abbildung 9), zeigt Snežnik nur bei der Simulationsvariante kein Eingriff nach 50 Jahren eine Erhöhung des durchschnittlichen Holzvorrates pro Hektar auf. Der beträgt nach Ende der Simulation 901 m³/ha. Die natürliche Mortalität lag je Simulationsperiode zwischen 0 und 0,5 m³/ha. Die Ausgangssituation aus dem Jahr 2002 waren 479 m³/ha. Die simulierten Zufalls- und Hochdurchforstung zeigen eine ähnliche Entwicklung des Holzvorrates auf, was auch hier der gleichen Eingriffsstärke zugeschrieben werden kann. Der bewegt sich in der ganzen Simulationsdauer im Bereich rund um 500 m³/ha. Die simulierte Entnahme lag bei der Zufallsdurchforstung im Schnitt bei 68 m³/ha und bei der Hochdurchforstung bei 70 m³/ha. Der durchschnittliche entnommene Baum hatte bei der Zufallsdurchforstung einen BHD von 34,8 cm und bei der Hochdurchforstung 37,1 cm. Mortalität war fast keine aufzufinden.

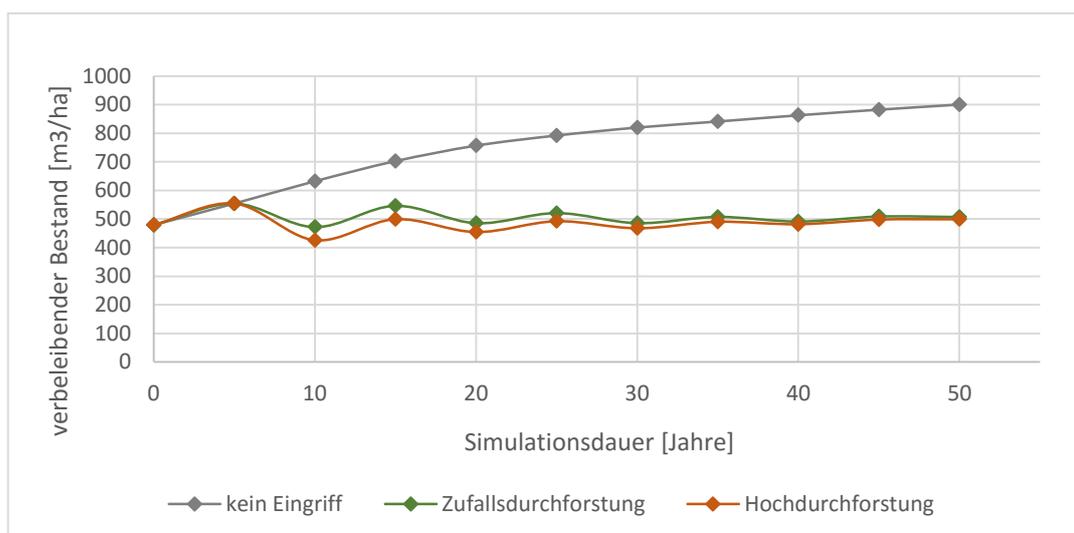


Abbildung 9: Entwicklung des Holzvorrats in der 50-jährigen Simulationsdauer in Snežnik UG

In der BHD-Verteilung der Abbildung 9 kann man einen schnelleren BHD-Zuwachs von Laubholz in den unteren BHD-Klassen erkennen. Das kann mehrere Gründe haben, aber auch hier könnte das auf Überschätzung der Buchenzuwächse zurückgeführt werden (siehe Abbildung 6). Trotz einem unterschiedlichen Ansatz der Entnahmealgorithmen können auch hier keine größeren Unterschiede der BHD-Verteilung zwischen der Zufalls- und Hochdurchforstung festgestellt werden.

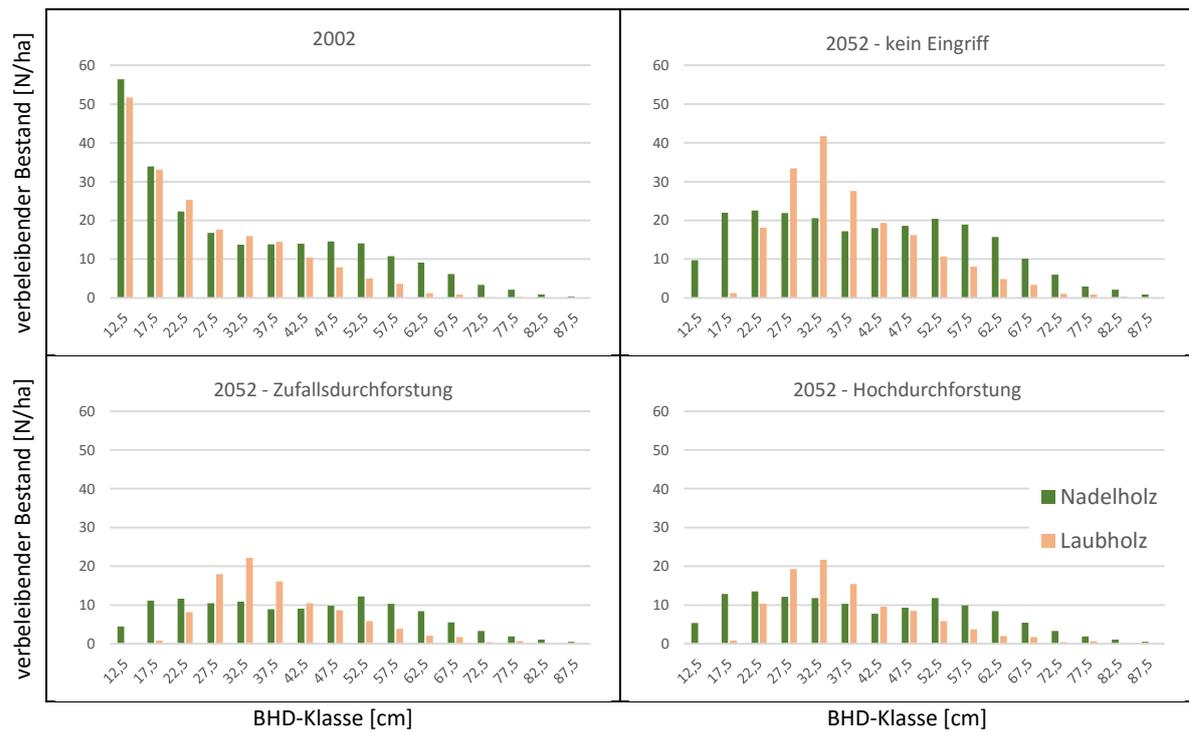


Abbildung 10: BHD-Verteilung vor und nach den simulierten Eingriffen in UG Snežnik

6 DISKUSSION

6.1 ANPASSUNG DER SLOWENISCHEN FORSTINVENTURDATEN

Um eine Simulation mit MOSES machen zu können werden sowohl Daten auf Bestandes- als auch auf Einzelbaumebene gebraucht. Da die slowenische Forstinventur nicht alle Bedürfnisse von MOSES abdeckt, mussten fehlende Daten auch aus anderen Informationsquellen hergeleitet werden.

MOSES als abstandabhängiges Einzelbaumwachstumsmodell braucht kartesische Koordinaten (X, Y) um die Konkurrenzsituation auf der Probestfläche abschätzen zu können. X und Y können aus Polarkoordinaten (die Horizontaldistanz vom Probekreiszentrum bis zur Mitte des Baumes und dem Azimut) berechnet werden. Da bei der Inventur nicht die Horizontaldistanz sondern die Schrägdistanz ohne bekannte Neigungsgrad zum einzelnen Baum aufgenommen wurde, war das ermitteln der Horizontaldistanz im Nachhinein nicht möglich. Das ergibt einen systematischen Fehler, der mit der Neigung der Probestflächen größer wird und eine ungetreue Nachbildung der Konkurrenzsituation verursacht.

Gemessene Baumhöhen standen im UG Pohorje nur teilweise zu Verfügung, darum wurden aus den gemessenen Höhen Koeffizienten geschätzt und die fehlenden mit der Höhenkurve nach Petterson berechnet. Im UG Snežnik waren keine Baumhöhen zu Verfügung, deswegen wurden die mit der Höhenkurve nach Prodan und Koeffizienten nach Klopčič (2013) ermittelt.

Die Kronenansätze werden bei der Inventur nicht gemessen, darum ist eine gute Lösung die nach Kahn und Pretzsch (1997) zu berechnen. Die Koeffizienten von Baumdaten aus Österreich und der Schweiz können dieser Studie entnommen werden.

Um den potenziellen Höhenwachstum der Baume auch für slowenische Standorte abschätzen zu können, würden Koeffizienten für den Oberhöhenfunktionstyp nach Mitscherlich/Richards (1919) aus für Slowenien angepassten slowakischen Ertragstafeln nach Halaj et al. aus dem Jahr 1987 ermittelt und anschließend in MOSES integriert. Die neu integrierten Koeffizienten erweisen sich als sinnvoll, da schon die ersten Tests gezeigt

haben, dass die Differenzen zwischen beobachteten und simulierten Werten kleiner waren im Vergleich zu bereits im MOSES vorhandenen Koeffizienten.

Als Eingangsparameter zur Berechnung des potenziellen Höhenwachstums dient der Site Index (Oberhöhenbonität). Auf Grund fehlender Baumhöhen und -alter wurde der Site Index einzelner Baumarten auf Standorten aus durchschnittlichen SI-Werten je Baumart und Pflanzengesellschaft definiert. Weil es im diesem Fall um durchschnittliche Werte geht, die im großem und ganzem zwar gute Simulationsergebnisse liefern, aber die Bonität einzelner Standorte nicht getreu abbilden, sollte nach passenderen Lösungen gesucht werden.

Simulationsläufe mit MOSES zeigten dass Eingangsdaten sinnvoll angepasst oder hergeleitet wurden und dass eine Simulation auch plausible Ergebnisse liefern.

6.2 VALIDIERUNG

Die Ergebnisse der Validierung wurden in Gruppen nach Baumart aufgeteilt um einen guten Überblick zu bekommen. Die beobachteten und simulierten BHD-Zuwächse wurden miteinander verglichen.

Bis auf die Baumart Buche weisen die graphisch und rechnerisch verglichenen Werte auf keinen systematische Abweichungen bzw. Trends hin. Die Differenzen aus dem simulierten und gemessenen BHD-Zuwachs, aufgetragen über den gemessenen BHD zeigen eine gleichmäßige Streuung um 0. Auch die Mittleren Differenzen aus den simulierten und gemessenen Werten nach BHD-Klassen weist auf dasselbe hin. Es kann zwar ein geringes Gefälle und eine leichte Unterschätzung mit zunehmenden BHD erkannt werden, hellt sich aber im Rahmen. Mit den Ergebnissen kann nachgewiesen werden, dass sich beobachtete und simulierte Zuwächse nicht voneinander unterscheiden. Auch die berechneten Konfidenz-, Vorhersage- und Toleranzinterwal können das bestätigen, da sie den Wert null einschließen.

Die Buche neigt zur einen leichten Überschätzung der BHD-Zuwächse, dies kann den graphischen und auch den rechnerischen Ergebnissen entnommen werden. Das Konfidenzintervall liegt in beiden Untersuchungsgebieten über der 0. Somit kann mit 95 % Wahrscheinlichkeit nicht bestätigt werden, dass keine systematische Abweichung in den

Durchmesserzuwachsschätzungen vorliegen. Der Grund kann an einer Überschätzung der Bonitäten liegen, da der Site Index einzelner Standorte mit Hilfe durchschnittlicher Werte für Pflanzengesellschaft definiert wurden. Oder auch wie Hasenauer (pers. Kommentar 30. 3. 2016) meint, weil die Buche auf diesen Standorten wahrscheinlich nicht die dominierende Baumart ist und für die Kalibrierung sehr viele Buchenreinbestände auf Flysch verwendet wurden.

Betrachtet man die gesamten Ergebnisse, so unterscheiden sich die mit MOSES simulierten BHD-Zuwächse graphisch und rechnerisch nicht von den gemessenen. Das heißt, MOSES kann in der parametrisierten Form zur Simulation und Prognose der BHD-Entwicklung slowenischer Tannen und Tannen-Buchenwälder verwendet werden.

6.3 ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN IN DER FORSTPRAxis

Das Modell ist abstandsabhängig, so kann es die Struktur des Bestandes detailliert erfassen, was Simulationen beliebiger Bewirtschaftungskonzepten ermöglicht. Somit kann mit Hilfe von Simulationen rechtzeitig auch auf unerwünschte Veränderungen oder Konsequenzen bestimmter waldbaulicher Eingriffe hingewiesen werden.

Im letzten Teil der Ergebnisse wurden im Kapitel Simulation für beide Wirtschaftseinheiten drei verschieden Bewirtschaftungsszenarien für 50 Jahre dargestellt. Auf diese Art konnte ein eventueller Einsatz von MOSES demonstriert werden. Da die Buchenzuwächse in den Simulationsergebnissen auf eine mögliche Überschätzung hinweisen, wird an dem Punkt auf das Formen von Richtlinien für die weitere Bewirtschaftung der Wirtschaftseinheiten verzichtet.

Die dargestellten Szenarien dienen als Beispiel einer möglichen Waldentwicklung und bilden nicht die aktuelle waldbauliche Bewirtschaftung ab. Um eine solche Bewirtschaftung nachbilden zu können, müsste ein Erntemodell erstellt werden. So könnte die Entwicklung des Waldes besser beurteilt werden, was eine Planung für die Forstliche Praxis erleichtert. Als Anhaltspunkt kann das in die aktuelle MOSES Version integrierte Plenter Erntemodell nach Thurnher (2011) dienen.

Für diese Arbeit verwendete Version MOSESbatch Kreis ist aus dem Jahr 2007 und wird über Textdateien gesteuert, dass verlangt gewisse Vorkenntnisse und ist daher nicht sehr

benutzerfreundlich. Darum wäre eine Anpassung der aktuellen MOSES Version an das kreisförmige Aufnahmedesign der slowenischen Forstinventur sinnvoll. Vor allem weil sie von einer graphischen Benutzeroberfläche unterstützt wird und so dem Benutzer die Arbeit mit dem Modell vereinfacht.

Mit dem oben vorgeschlagenen Verbesserungsmöglichkeiten wäre MOSES noch breiter einsetzbar. Wie schon in der Simulation gezeigt, können sehr gut verschiedene waldbauliche Bewirtschaftungsszenarien für Wirtschaftseinheiten oder auch Wirtschaftsgebiete nachgebildet und die Waldentwicklung beurteilt werden. Dazu kommen auch noch andere Einsatzmöglichkeiten wie z. B. Beurteilung der Entwicklung verschiedener Waldtypen unter bestimmten waldbaulichen Behandlungskonzepten, Entwicklung der Wälder nach größeren Waldschäden oder auch Abschätzung des Einflusses bestimmter waldbaulichen Bewirtschaftungskonzepte auf einzelne Baumarten. Auch eine Erstellung von Waldwirtschaftsplänen für Waldbesitzer wäre mit den richtigen Eingangsdaten möglich.

Das Model ist ein Werkzeug, das die Entscheidungen innerhalb des Planungsprozesses erleichtert. Je nach Interesse können verschiedene Ergebnisse dargestellt werden:

- Die Entwicklung des Holzvorrates, Holzzuwachses, Grundfläche, Grundflächenzuwachs oder der Stammzahl.
- BHD-Verteilung oder Baumartenmischung je nach Holzvorrat, Grundfläche oder Stammzahl.
- Die Entnahme kann nach Sortimenten dargestellt und mit dem Einfließen der Holzqualitäten und der Holzpreise können die Erlöse berechnet werden.
- Biomasse, das Biomasse-Waldhackgut und dessen Erlöse.
- Holzerntekosten (dazu stehen drei Systeme zu Verfügung: Kombination Motorsäge – Schlepper, Harvester – Forwarder und Motorsäge – Seilgerät.

Das sind nur einige der Darstellungsmöglichkeiten, mehr Details können in Klopff et al. (2011) entnommen werden.

MOSES hat also eine große Verwendungsbreite von Forschungszwecken über Lehrzwecke bis hin zur Forstpraxis.

6.4 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

MOSES hat ein großes Potenzial als Planungsinstrument in der slowenischen Forstwirtschaft Verwendung zu finden. Die Wachstumssimulationen zeigten, dass die Eingangsdaten der Forstinventur erfolgreich an die Bedürfnisse von MOSES angepasst worden sind. Über die gesamten Ergebnisse der Validierung gesehen, unterscheiden sich simulierte BHD-Zuwächse graphisch und rechnerisch nicht von den gemessenen. Damit können beide Arbeitshypothesen bestätigt werden.

Um das Potenzial und die Aussagekraft des Modells in der Zukunft noch ausbauen zu können, werden folgende Überlegungen bzw. Forschungsarbeiten vorgeschlagen:

- Anpassung der aktuellen MOSES Version an das kreisförmige Aufnahmedesign der slowenischen Forstinventur.
- Herleitung passenderer Oberhöhenbonität (Site Index) der Bestände.
- Kalibrierung und anschließend Validierung des Höhenzuwachses und eine Anpassung der Buche auf Standortverhältnisse um eine Überschätzung der simulierten BHD-Zuwächse zu vermeiden.
- Erstellung von Erntemodellen die aktuelle und potentielle waldbauliche Bewirtschaftungskonzepte in Slowenien abbilden.

7 POVZETEK

Modeli so poenostavljene abstrakcije realnega sistema in služijo za njihovo raziskovanje ter razumevanje (Pretzsch, 2001). Modeli gozdnih ekosistemov so diagnostična orodja, ki opisujejo, ponazarjajo in količinsko opredeljujejo njihove procese. Delimo jih v rastne, sukcesijske in procesne modele (Hasenauer, 2011). Za potrebe gozdarske prakse so se uveljavili predvsem rastni modeli, ki jih glede na to, kako podrobno razčlenijo gozd, delimo na sestojne, razporeditvene in drevesne modele (Pretzsch, 2002). Drevesni rastni modeli v primerjavi z donosnimi tablicami ne ponazorijo samo povprečne rasti sestoja, temveč rast vsakega drevesa posebej z njegovim specifičnim položajem v sestoju. Vsota rasti vsakega drevesa v sestoju nam poda srednje sestojne vrednosti (Hasenauer, 2005). Na ta način je mogoče spremljati razvoj rasti za vse mogoče kombinacije mešanosti in starostne strukture gozdov (Hasenauer, 1994, 2005).

Prvi drevesni rastni modeli so bili razviti v 60-ih letih v severni Ameriki. Njihov koncept je bil v 90-ih letih prenesen v Evropo. Leta 1994 je Hasenauer s sodelavci razvil drevesni rastni model MOSES. Koncept je bil v naslednjih letih vedno znova izboljššan in dodelan, tako je nastal MosesFramework, ki omogoča uporabo programov MOSES 3.0, MOSESbatch in STANDGEN. MosesFramework temelji na mnogih raziskavah, npr.: Hasenauer (1994), Kindermann (2004), Kittenberger (2003, 2006), Steinmetz (2004), Hasenauer in Kindermann (2005, 2007), Thurnher et al. (2011) in Klopff (2014).

MOSES je drevesni rastni model, ki je bil razvit posebej za malopovršinsko raznomerne mešane gozdove v srednji Evropi. Temelji na dveh med seboj neodvisnih pristopih. Prvi pristop je odvisen od potenciala, kar pomeni, da sta višinska in debelinska rast vsakega posameznega drevesa v sestoju odvisni od specifičnega potenciala (maksimalnega prirastka) drevesne vrste in rastišča. Drugi pristop ocenjuje aktualno konkurenco za vsako drevo posebej v odvisnosti od razdalje med posameznimi drevesi (Hasenauer, 1994a).

MOSES v Sloveniji ni bil še nikoli uporabljen in ker je potencialno lahko uporaben za razmere v Sloveniji, smo model preizkusili na primeru dveh gozdnogospodarskih enot, za kateri so značilni raznomerni mešanimi gozdovi. Cilj raziskave je preučiti možnosti prilagoditve podatkov slovenske gozdne inventure za simulacijo z MOSES, validirati

model na primeru jelovo-bukovih in jelovih gozdov in preučiti možnosti uporabe modela v slovenskem gozdarstvu. Oblikovali smo dve hipotezi:

- Podatke slovenske gozdne inventure je mogoče prilagoditi za simulacijo z MOSES,
- MOSES je mogoče validirati za rastiščne razmere v Sloveniji.

Uporabili smo podatke s stalnih vzorčnih ploskev iz gozdnogospodarskih enot Ribnica na Pohorju (raziskovalno območje Pohorje) in Leskova dolina (raziskovalno območje Snežnik). Na razpolago smo imeli podatke o drevesni vrsti, prsnem premeru in polarne koordinate za 11.671 dreves iz 1.332 stalnih vzorčnih ploskev iz dveh zaporednih meritev. Za Pohorje so bile na razpolago tudi višine drevja, ki so bile izmerjene pri drugi meritvi. MOSES potrebuje za simulacijo podatke na ravni sestoja (rastiščni indeks) in drevesa (drevesna vrsta, prsni premer, višina, višina dna krošnje, X in Y koordinate). Zato smo morali manjkajoče podatke prilagoditi ali pridobiti iz drugih virov. Iz polarnih koordinat smo izračunali kartezični koordinati vsakega drevesa. Iz 1.592 razpoložljivih drevesnih višin na Pohorju smo ocenili koeficiente in izračunali manjkajoče višine z višinsko krivuljo po Pettersonovi funkciji. Za Snežnik drevesnih višin nismo imeli na razpolago, zato smo manjkajoče višine izračunali z višinsko krivuljo po Prodanovi funkciji in koeficientih po Klopčiču (2013). Višina dna krošnje se na stalnih vzorčnih ploskvah ne meri, zato smo uporabili funkcijo po Kahnu in Pretzschu (1997). Koeficienti za izračun so bili ocenjeni na osnovi izmerjenih dreves v Avstriji in Švici (Klopf, 2013). Za določitev potenciala višinske rasti dreves v slovenskih rastiščnih razmerah smo ocenili koeficiente za funkcijo razvoja zgornje višine po Mitscherlich/Richardsu (1919) iz za Slovenijo prilagojenih slovaških donosnih tablicah po Halaj et al. (1987) in jih integrirali v MOSES. Že prve simulacije z novimi koeficienti so pokazale smiselnost njihove integracije v model. Rastiščni indeks je vhodni parameter za izračun potencialne višine. Ker podatki o višini in starosti dreves niso na voljo, smo kot vhodno vrednost uporabili povprečne rastiščne koeficiente po drevesnih vrstah in rastiščih.

MOSES je drevesni rastni model, ki temelji na ravnem potencialu drevesne vrste in rastišča ter ocenjuje aktualno konkurenco med drevesi v odvisnosti od razdalje med njimi. Za vsako posamezno drevo izračuna potencialni debelinski in višinski prirastek, ki ga nato na podlagi kazalcev konkurence zmanjša na dejanski prirastek (Hasenauer, 1994; Klopf et

al., 2011). Kazalca konkurence sta dolžinski delež krošnje (»crown ratio«) in indeks konkurence (»competition index«). Dolžinski delež krošnje opisuje konkurenčne razmere, ki jim je bilo drevo izpostavljeno v preteklosti. Indeks konkurence pa daje informacijo o aktualni konkurenci, ki vpliva na rast drevesa v odvisnosti od razdalje med drevesi in se izračuna po Monserud (1975). Za izračun indeksa konkurence so potrebni potencialni polmeri krošenj, te izračuna po Hasenauerju (1997), ki je koeficiente ocenil na podlagi izmerjenih prostorastočih dreves. Potencialni višinski prirastek temelji na zgornjih višinah sestoja. Model najprej drevesom določi računsko starost na podlagi aktualne višine in rastiščnega indeksa. To starost se interpretira na sledeči način: če bi drevo z višino h pri določenem rastiščnem indeksu odraslo v zgornjem sloju, bi imelo starost t . Tej starosti v naslednjem koraku doda 5 let in določi zgornjo višino pri novi starosti, razlika med višinama je potencialni prirastek. Potencialni prirastek prsnega premera temelji na povezavi med prsnim premerom in višino prostorastočih dreves po Hasenauerju (1997). Izračunane potencialne prirastke nato prilagodi konkurenčnim razmeram. Na podlagi dolžinskega deleža krošnje model upošteva konkurenčne razmere iz preteklosti. Nato vključi še aktualno konkurenco po izvedenih posegih ali mortaliteti. Poleg tega glede na spremembe konkurence na podlagi posegov ali mortalitete prilagodi rast drevesa spremenjenim konkurenčnim razmeram. Prav tako vsako petletno simulacijsko periodo prilagodi višino dna krošnje. Pri tem se upošteva dejstvo, da se dno krošnje lahko dviguje, ne more se pomakniti navzdol. Pomlajevanje MOSES generira v več korakih. Najprej sestoj razdeli na več manjših kvadratov, kjer določi, katere drevesne vrste se pomlajujejo, če se pomladek pojavi in koliko sadik se generira. To naredi enakomerno z naključnim številom. Odmrtje dreves določi z logistično funkcijo. Za vsako drevo izračuna verjetnost, ali drevo odmre. Če drevo na koncu res odmre, pa določi na podlagi enakomerno porazdeljenega naključnega števila. Če je verjetnost, da drevo odmre, večja od naključnega števila, se drevo označi kot odmrlo (Klopf et al., 2011).

V naši raziskavi smo za validacijo modela na podlagi velikega števila vzorčnih ploskev uporabili verzijo modela MOSESbatch. Ker je model koncipiran za delo s pravokotnimi ploskvami, smo uporabili verzijo modela iz leta 2007 MOSESbatch Kreis, prirejeno za krožne ploskve. Za preverjanje natančnosti modela smo izračunali intervale po Reynoldsu (1984):

- interval zaupanja, ki daje povprečno variacijo pričakovane napake simulacije,
- interval napovedi, ki z določeno verjetnostjo poda okvir napake bodoče napovedi,
- in interval tolerance, ki izračuna in opisuje okvir napake pri ponovni simulaciji.

Rezultate validacije smo razporedili v skupine po drevesnih vrstah. V skupini skupno so poleg smreke, jelke in bukve zajeti še ostali iglavci in listavci. Merjene in simulirane prirastke iz obeh območij smo primerjali. Razlike med simuliranimi in merjenimi prirastki prsnega premera, razporejenih po prsnem premeru, kažejo enakomerno porazdelitev okoli ničle. Mogoče je zaznati manjše padanje in podcenjevanje z večanjem premera, ki pa je v mejah normalnega. Vsi izračunani intervali zaupanja, napovedi in tolerance vključujejo ničlo. Rezultati kažejo, da se simulirani prirastki prsnega premera grafično in računsko ne razlikujejo od merjenih, izjema je le bukev. Pri bukvi smo ugotovili rahlo precenjen prirastek. Tudi interval zaupanja pri bukvi v obeh območjih ne vključuje ničle. Tako s 95 % verjetnostjo ne moremo trditi, da ni statistično pomembnih razlik med ocenjenimi in merjenimi prirastki prsnega premera. Razlog je lahko v tem, ker so bili rastiščni indeksi drevesnih vrst na posameznih vzorčnih ploskvah določeni na podlagi srednjih vrednosti rastiščnega indeksa gozdnih združb. Ali pa kot meni Hasenauer (osebni komentar, 30. 3. 2016), je možen razlog v tem, da v analiziranih sestojih bukev ni dominantna vrsta, medtem ko so za kalibracijo modela bili uporabljeni podatki iz čistih bukovih gozdov na flišu. Če celovito presojava rezultate za vse drevesne vrste skupaj, ki kažejo, da se simulirani in merjeni prirastki grafično in računsko ne razlikujejo bistveno med seboj, lahko zaključimo, da lahko MOSES v tej parametrizirani obliki uporabljamo za simulacijo in napovedovanje razvoja prsnega premera dreves v jelovo-bukovih in jelovih gozdovih Slovenije.

Odvzem simuliramo s pomočjo štirih algoritmov: golosek, visoko redčenje (od debelejših dreves k tanjšim), nizko redčenje (od tanjših dreves k debelejšim) in slučajno redčenje (čez celotno debelinsko strukturo). Jakost odvzema neto lesne mase se za izbran algoritem deli na iglavce in listavce (Basch et al., 2006; Klopff et al., 2011). V tem delu smo simulirali in prikazali razvoj gozdov v obeh območjih v naslednjih petdesetih letih (10 period) glede na tri scenarije gospodarjenja, in sicer 1) brez ukrepanja, 2) slučajno redčenje in 3) visoko redčenje. Pri jakosti odvzema smo se ravnali po aktualnih gozdnogospodarskih načrtih. Za Pohorje je bil odvzem iglavcev 19,3 %, listavcev pa 15,3 % lesne mase, za Leskovo dolino

pa 21,6 % za iglavce in 18,2 % za listavce. Simulirali smo razvoj lesne zaloge in debelinske strukture v naslednjih petdesetih letih v obeh območjih za vse tri scenarije. Lesna zaloga se je v obeh območjih pri scenariju brez ukrepanja povečala, pri slučajnem in visokem redčenju se je lesna zaloga na Pohorju povečala za okoli 200 m³/ha, na Snežniku pa je ostala na približno enaki ravni. Povprečna višina odvzema se je v obeh območjih gibala med 60 in 70 m³/ha. Debelinska struktura po koncu simulacije se v obeh območjih med slučajnim in visokim redčenjem ni bistveno razlikovala.

S simulacijo razvoja gozdov smo prikazali samo del možnosti uporabe modela v Sloveniji. Model se lahko uporablja za simulacijo različnih scenarijev gospodarjenja v različnih tipih gozdov, uporaben je tudi za preučevanje razvoja gozdov po večjih ujmah, preučevanje vpliva gospodarjenja na različne drevesne vrste in tudi za izdelavo načrtov za zasebno gozdno posest. Z modelom je mogoče prikazati lesno zalogo, temeljnico, prirastek, število dreves, debelinsko strukturo, drevesno sestavo itd. Odvzem je mogoče prikazati po sortimentih, če tem pripišemo še ceno, lahko analiziramo ekonomske učinke različnih načinov gospodarjenja. Prav tako je mogoč prikaz rabe lesne biomase, količine sekancev in prihodka od biomase. Za izračun stroškov sečnje in spravila so na razpolago trije sistemi: motorna žaga in traktor, stroj za sečnjo in zgibni polprikoličar ter motorna žaga v kombinaciji z žičnico.

MOSES je lahko zelo uporaben pripomoček za načrtovanje. Rastne simulacije so pokazale, da so vhodni podatki gozdne inventure bili uspešno prilagojeni zahtevam modela. Za izboljšanje potenciala in smiselnosti napovedi modela predlagamo naslednje nadaljevalne raziskave: prilagoditev aktualne verzije modela na krožne ploskve, izpeljavo ustrežnejših rastiščnih indeksov za posamezne sestoje, kalibracijo in validacijo višinske rasti, prilagoditev rasti bukve rastiščnim razmeram v Sloveniji in izdelavo modelov gospodarjenja, ki dobro opisujejo načine gospodarjenja v Sloveniji.

8 LITERATUR

Bachergebirge. <https://de.wikipedia.org/wiki/Bachergebirge> (2.12.2015).

Basch C., Hasenauer H., Kindermann G. 2006. Benutzerhandbuch MOSESbatch. Universität für Bodenkultur, Institut für Waldwachstumskunde. Wien: 23 S.

Cenčič L. 2000. Gospodarjenje z gozdovi in razvoj sestojev v Lehnu na Pohorju: magistrsko delo. (Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire). Ljubljana: 170 S.

Dakskobler I. 2012 Pregled bukovih rastišč v Sloveniji. V: Bončina A. (ur.). Bukovi gozdovi v Sloveniji : ekologija in gospodarjenje. Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Biotehniška fakulteta, Ljubljana: S. 58-74.

Franz F., Bachler J., Deckelmann B., Kennel E., Kennel R., Schmidt A., Wotschikowsky U. 1973. Bayerische Waldinventur 1970/79, Inventurabschnitt I: Großrauminventur Aufnahme- und Auswertungsverfahren. München, Forstliche Forschungsberichte: 173 S.

Gašperšič F. 1967. Razvojna dinamika mešanih gozdov jelke-bukve na Snežniku v zadnjih 100 letih. Gozdarski vestnik, 7–8:202–237.

Gozdnogospodarski načrt gozdnogospodarske enote Leskova dolina 2004-20013. 2007. Postojna, Zavod za gozdove Slovenije, OE Postojna: 113 S.

Gozdnogospodarski načrt gozdnogospodarske enote Radlje – desni breg 2014-2023. 2014. Slovenj Gradec, Zavod za gozdove Slovenije, OE Slovenj Gradec: 169 S.

Gozdnogospodarski načrt Ribnica na Pohorju 2011-2020. 2011. Maribor, Zavod za gozdove Slovenije, OE Maribor: 190 S.

Grilc J. 1972. Gozdno gospodarstvo Bled urejuje gozdove po metodi stalnih vzorčnih ploskev. Gozdarski vestnik, 30:63-65.

Hallenbarter D., Hasenauer H., Zingg A. 2005. Validierung des Waldwachstumsmodells MOSES für Schweizer Wälder. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 156:149-156.

Hasenauer H. 1994a. Ein Einzelbaumwachstumssimulator für ungleichaltrige Fichten-Kiefer und Buchen-Fichtenmischbestände. Österreichische Ges. für Waldökosystemforschung und experimentale Baumforschung. Universität für Bodenkultur, Wien: 152 S.

Hasenauer H. 1997. Dimensional relationship of open-grown trees in Austria. Forest Ecology and Management 96:197-206.

- Hasenauer H. 2011. Concepts within Ecosystem Modelling. Modelling Forest Ecosystems – Concepts, Data and Application. Institute of Silviculture. University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna: 179 S.
- Hasenauer H., Moser M. und Eckmüllner O. 1994b. MOSES - A computer simulation program for modelling stand response. In: Pinto da Costa, M.E, and T. Preuhler (eds.). Mixed stands, research plots, measurement and results, models. Inst. Superior de Agronomia. Univ. Tecnica de Lisboa. Lisboa Codex, Portugal. Appendix 1 : 1.
- Hasenauer H. und Kindermann G. 2007. Anwendung des Baummodells MOSES in zwei Forstrevieren der ÖBfAG – MoGoPra. Bericht. Universität für Bodenkultur, Institut für Waldwachstum. Wien: 62 S.
- Hiltl C. 1893. Das Bachergebirge: Eine monographische Studie mit besonderer Berücksichtigung der Forst- und Jagdwirtschaft und Touristik. Klagenfurt: 195, LXXIX S.
- Hočvar M. 2003. Zgodovina, značilnosti in razvoj KVM v svetu in Sloveniji. Monitoring gozdnih ekosistemov. Gozdarski inštitut Slovenije in Zavod za gozdove Slovenije, Ljubljana: S 7-8.
- Kadunc A. 2010. Growth and Yield Characteristics of European Silver Fir (*Abies alba* Mill.) in Slovenia. Gozdarski vestnik, 68/2010, vol. 9:403-421.
- Kadunc A. 2012. Ocena produkcijske sposobnosti bukovih rastišč v Sloveniji V: Bončina A. (ur.). Bukovi gozdovi v Sloveniji: Ekologija in gospodarjenje. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Ljubljana. S. 91-98.
- Kadunc A. 2013a. Produkcijske sposobnosti gozdnih rastišč v Sloveniji: pregled izsledkov. V: Zbornik prispevkov. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire in Zavod za gozdove Slovenije. Ljubljana: S. 7-9
- Kadunc A. 2013b. Produkcijske sposobnosti gozdnih rastišč v Sloveniji: pregled izsledkov. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Ljubljana.
- Kahn, M., Pretzsch, H. 1997. Das Wuchsmodell SILVA - Parametrisierung der Version 2.1 für Rein- und Mischbestände aus Fichte Und Buche. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 168:115-123.
- Kindermann G. 2004. Waldwachstumssimulation in Mischbeständen: Dissertation. (Universität für Bodenkultur, Institut für Waldwachstum). Wien: 146 S.
- Kindermann G. 2006. Neukalibrierung von MOSES. Unveröffentlichter Bericht, Universität für Bodenkultur, Institut für Waldwachstum, Wien.

- Kindermann G. 2007. MOSESbatch Kreis. Unveröffentlichte Arbeit, Institut für Waldwachstum, Universität für Bodenkultur. Wien.
- Kindermann G. und Hasenauer H. 2005. Zusammenstellung der Oberhöhenfunktionen für die wichtigsten Baumarten in Österreich. *Austrian Journal of Forest Science* 122, 4:163-185.
- Kittenberger A. 2003. Generierung von Baumverteilungsmustern: Diplomarbeit. (Technische Universität und Universität für Bodenkultur). Wien: 79 S.
- Kittenberger A. 2006. STANDGEN 2.2 – Benutzerhandbuch. Universität für Bodenkultur, Institut für Waldbau. Wien: 84 S.
- Klopčič M. 2013. Koeficienti za izračun višin dreves v GGE Leskova dolina. Neobjavljeno delo, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Ljubljana.
- Klopf M. 2007. Abschätzung der Totholzentwicklung im Nationalpark Kalkalpen: Diplomarbeit. (Universität für Bodenkultur, Institut für Waldwachstum). Wien: 77 S.
- Klopf M. 2013. Koeffizienten zur Berechnung des Kronenansatzes. Unveröffentlichte Arbeit, Universität für Bodenkultur, Institut für Waldbau. Wien.
- Klopf M. 2014. MOSES: A single tree growth simulator for forest management planning: dissertation. (Universität für Bodenkultur). Wien: 155 S.
- Klopf M., Thurnher C., Hasenauer H. 2011. MosesFramework – Benutzerhandbuch. Universität für Bodenkultur, Institut für Waldbau. Wien: 124 S.
- Kokoska S. und Nevison C. 1989: Statistical tables. Springer Verlag, New York. 88 S.
- Kotar M. Gozdarski priročnik. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Ljubljana: 414 S.
- Krainer Schneeberg. https://de.wikipedia.org/wiki/Krainer_Schneeberg (2.12.2015)
- Kušar G. 2007. Zanesljivost ugotavljanja volumna dreves in lesne zaloge sestojev z enoparametrijskimi funkcijami in stratifikacijo: doktorska disertacija. Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Ljubljana: 277 S.
- Kušar G. und Hočevar M. 2009. Izbor ustreznega tarifnega niza prilagojenih enotnih francoskih tarif za izračun lesne zaloge sestojev v sklopu kontrolne vzorčne metode. Kontrolna vzorčna metoda v Sloveniji – zgodovina, značilnosti in uporaba. (Strokovna in znanstvena dela, 134). Gozdarski inštitut Slovenije. Založba Silva Slovenica, Ljubljana: 104 S.

- Mikac S., Klopf M., Anic I., Hasenauer H. 2013. Using the tree growth model MOSES to assess the dynamics of Dinaric old-growth mixed beech-fir forest ecosystems. *Plant Biosystems* 147:664-671.
- Monserud R.A. 1975. Methodology for simulating Wisconsin Northern hardwood stand dynamics: PHD thesis. Madison, University of Wisconsin: 156 S.
- Navodila za snemanje na stalnih vzorčnih ploskvah. 2010. Ljubljana, Zavod za gozdove Slovenije, Centralna enota, Oddelek za gozdnogospodarsko načrtovanje: 27 S.
- Perko, F. 2004. Gozd in gozdarstvo Slovenije. Ljubljana, Zveza gozdarskih društev Slovenije, Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano RS, Zavod za gozdove Slovenije: 39 S.
- Pretzsch H. 2001. Modellierung des Waldwachstums. Parey, Berlin: 341 S.
- Pretzsch H. 2002. Grundlagen der Waldwachstumsforschung. Parey, Berlin: 414 S.
- Polarkoordinaten. <https://de.wikipedia.org/wiki/Polarkoordinaten> (21.12.2015)
- Reynolds M.R. 1984. Estimating the error in model predictions. *Forest Science* 30:454-469.
- Steinmetz P. 2004. Implementierung des Waldwachstumsmodells MOSES 3.0: Diplomarbeit. (Technische Universität und Universität für Bodenkultur). Wien: 76 S.
- Thurnher C., Klopf M., Hasenauer H. 2011. Forests in transition: a harvesting model for uneven-aged mixed species forests in Austria. *Forestry* 84:517–526.
- Zakon o gozdovih. 1993. Ur. l. RS, št. 30/93.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem staršema, ki sta mi omogočila študij in me pri študiju podpirala ter mi privzgojila odgovoren odnos do narave. Hvala tudi ostalim članom družine.

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Andreju Bončini za strokovno pomoč, čas in nasvete. Hvala mojemu somentorju prof. dr. Hubertu Hasenauerju, ki me je navdušil nad modeliranjem in me pri tem usmerjal. Prof. dr. Juriju Diaciju pa se zahvaljujem za hitro in strokovno opravljeno recenzijo.

Zahvaljujem se tudi dr. Matiji Klopčiču, dr. Mariu Klopfu in dr. Christopherju Thurnherju, ki so mi pri izdelavi magistrske naloge svetovali, me strokovno podpirali in mi vedno hitro priskočili na pomoč.

Zahvalil bi se tudi Komisiji za študij 1. in 2. stopnje, ki mi je omogočila izdelavo magistrske naloge v nemškem jeziku.

Zahvaljujem se Evi Lanz za lektoriranje nemškega dela naloge in Štefki Sgerm za lektoriranje slovenskega dela naloge.

Seveda pa študij gozdarstva še zdaleč ne bi bil tako lep in zanimiv brez tako preprostih in prijetnih sošolcev. Hvala vam, ker ste mi polepšali čas med in ob študiju.

Na koncu pa se zahvaljujem še vsem, ki so mi na kakršen koli način pomagali in me pri študiju spodbujali.

ANHANG

Anhang A: Site Index: durchschnittliche Werte je Pflanzengesellschaft und Baumart (nach Kadunc, 2010, 2012, 2013a und 2013b)

UG	Pflanzengesellschaft	Tanne	Fichte	Buche	Sonstiges Laubholz	Sonstiges Nadelholz
Pohorje	<i>Luzulo-Fagetum</i>	31,5	31,5	31,2	31	31,5
	<i>Enneaphyllo-Fagetum und Savensi-Fagetum pohoricum</i>	29,2	29,2	24,4	26	29,2
	<i>Dryopterido-Abietetum</i>	39,6	38,1	24,4	26	38,1
	<i>Bazzanio-Abietetum</i>	41,2	34	24,4	26	34
	<i>Bazzanio-Piceetum</i>	/	28	28	28	28
	<i>Sphagno-Piceetum</i>	/	10,7	/	10,7	/
	<i>Aceri-Fraxinetum</i>	33	33	/	33	/
Snežnik	<i>Hacquetio-Fagetum</i>	34	34	26,5	27,4	34
	<i>Ranunculo platanifolii-Fagetum</i>	16,7	16,7	16,7	16,7	16,7
	<i>Omphalodo-Fagetum</i>	27,6	33,4	26	23,1	33,4
	<i>Necero-Abietetum</i>	23,6	25,2	23,6	23,6	23,6
	<i>Omphalodo-Fag, Iycopodietosum</i>	27,6	34	26	23,1	34
	<i>Piceetum subalpinum dinaricum</i>	23,6	25,2	23,6	23,6	25,2

Schwarze werte sind verfügbaren Werte aus den Arbeiten von Kadunc (2010, 2012, 2013a und 2013b) und die grauen wurden je nach der Wuchsleistung von einer anderen Pflanzengesellschaft oder Baumart bestimmt.