



Ein Programm des Klima- und Energiefonds –
managed by Kommunalkredit Public Consulting



Klimaschutz in der Forstwirtschaft

Zukünftige Bewirtschaftungsszenarien für den österreichischen
Wald und deren Auswirkungen auf die Treibhausgasbilanz

Endbericht

Antragsnummer: B287610

Auftragnehmer:
Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für
Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW)



Projektstart: November 2012

Projektende: Jänner 2015

Inhalt

1.	Einleitung.....	3
2.	Zielsetzung.....	3
3.	Projektstruktur	4
4.	Durchgeführte Arbeiten	5
4.1	Arbeitspaket 1: Entwicklung der Szenarien.....	5
4.1.1	Szenario R – Referenzszenario	5
4.1.2	Szenario 1a – Gesteigerter Einschlag wegen forcierter energetischer Nutzung.....	5
4.1.3	Szenario 1b – Gesteigerter Einschlag wegen forcierter stofflicher Nutzung	5
4.1.4	Szenario 1c – Gesteigerter Einschlag wegen forcierter stofflicher Nutzung unter günstigen Importbedingungen.....	6
4.1.5	Szenario 2 – Reduzierte Nutzung (Nutzungseinschränkungen und Außer-Nutzung-Stellung von Waldflächen durch Naturschutzvorgaben)	6
4.2	Arbeitspaket 2: Adaptierung der Modelle	7
4.2.1	Das Waldwachstumsmodell CALDIS.....	7
4.2.2	Neuentwicklung eines Mortalitätsmodells	10
4.2.3	Entwicklung eines Windmodells.....	10
4.2.4	Formulierung eines Auszeige- und Holzerntemodells	12
4.3	Arbeitspaket 3: Simulation Waldbewirtschaftung	15
4.3.1	Aufbereitung der ÖWI-Daten	15
4.3.2	Klimadaten.....	18
4.3.3	Korrekturfaktoren für das Schaftholzvolumen.....	19
4.3.4	Durchführung der Simulationsläufe	19
4.4	Arbeitspaket 4: Ermittlung der Kohlenstoffgehalte für die verschiedenen Szenarien	21
4.5	Arbeitspaket 5: Simulationsläufe Bodenkohlenstoff.....	23
5.	Ergebnisse	30
5.1	Holzeinschlagsmengen nach Sortimenten	30
5.2	Vorratsentwicklung	32
5.3	Zuwachsentwicklung	34
5.4	Entwicklung des Totholzvorrats	35
5.5	Abschätzung der Schadholzmengen in den Szenarien.....	36
5.6	Altersklassenstruktur.....	37
5.7	Baumartenzusammensetzung.....	40
5.8	Entwicklung der einzelnen Kohlenstoffpools	41
5.8.1	Ober- und unterirdische Biomasse.....	41
5.8.2	Totholz.....	42
5.8.3	Bodenkohlenstoff	43
5.9	Treibhausgasbilanz	50
6.	Fazit	52
7.	Literatur.....	52

1. Einleitung

Die Wald- und Holzwirtschaft trägt auf verschiedene Weise zur Verminderung der Treibhausgasemissionen bei und soll - gemäß den Überlegungen der Europäischen Kommission - auch langfristig eine wichtige Rolle in der europäischen Klimaschutzpolitik spielen¹. In den UN-Klimaschutzverhandlungen erlangt der Waldsektor ebenfalls zunehmende Bedeutung, da auf globaler Ebene 20% der Treibhausgasemissionen aus Entwaldung sowie aus "nicht nachhaltiger Waldbewirtschaftung" resultieren. Der Beitrag einer - wie österreichweit üblichen - "nachhaltigen Waldwirtschaft" soll in dieser Studie je nach Bewirtschaftungsintensität analysiert werden.

Im Rahmen der UN-Klimakonferenz 2011 wurden Regeln zur Ermittlung der Treibhausgasbilanz des Sektors Landnutzung für die zweite Verpflichtungsperiode unter dem Kyoto-Protokoll beschlossen. Es wurde festgelegt, dass die Aktivität Waldbewirtschaftung, inklusive die Veränderung des C-Pools in Holzprodukten, verbindlich in die nationale Treibhausgasbilanz zur Erreichung der vereinbarten Reduktionsziele einzurechnen ist. Bislang war für die erste Verpflichtungsperiode die Einrechnung der Waldbewirtschaftung nur optional und wurde von Österreich nicht genutzt. Die Waldbewirtschaftung umfasst derzeit die Veränderung von fünf Wald-C-Pools (ober- und unterirdische Biomasse, Totholz, Auflagehumus und Mineralboden). In der Anrechnung zur Erreichung der nationalen Reduktionsziele wird die Veränderung des Kohlenstoffbestandes einem Referenzwert gegenübergestellt, dem eine "business-as-usual" Entwicklung des Waldes bis 2020 zugrunde gelegt wurde.

2. Zielsetzung

Aufgrund der Entscheidung der UN-Klimakonferenz, den gesamten Waldsektor (Aufforstung, Bewirtschaftung und Entwaldung) in die Reduktionsverpflichtungen ab 2013 aufzunehmen, ist es wichtig, die Auswirkungen zukünftiger Waldbewirtschaftung auf die Österreichische Treibhausgasbilanz darzustellen. Die Basis dafür sollten verschiedene Szenarien der Holz- und Biomassenutzung im Österreichischen Wald sein. Dabei ist zu beachten, dass es unter Umständen mehrere Jahrzehnte dauern kann, bis die Effekte solcher Maßnahmen in der Treibhausgasbilanz sichtbar werden bzw. dass diese dann über Jahrzehnte anhalten können. Das gegenständliche Vorhaben hatte deshalb zum Ziel, durch ausreichend lange Projektionen die Auswirkungen der zur Umsetzung der unterschiedlichen Szenarien erforderlichen waldbaulichen Behandlungsvarianten quantitativ darzustellen.

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Holz- und Biomassenstudie des BFW und dem darin entwickelten Basisszenario bis 2020 sollten im Rahmen dieses Projekts zusätzliche Behandlungsvarianten formuliert und mit Hilfe eines Waldwachstumssimulators simuliert werden. Der Simulationszeitraum sollte im Vergleich zur HOBI-Studie bis 2100 ausgedehnt und die Auswirkungen auf den Kohlenstoffspeicher Wald auf diese Weise dargestellt werden. Als Ausgangsdatensatz stand die letzte Erhebung der Österreichischen Waldinventur (ÖWI) aus der Periode 2007/09 zur Verfügung.

¹ Mitteilung der Europäischen Kommissionen „Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050" (KOM(2011) 112)

Die Szenarien sollten sowohl eine intensivere Nutzung des Waldes wie auch eine starke Einschränkung der Nutzungen umfassen, um die Effekte extremerer Varianten der Waldbewirtschaftung auf die Treibhausgasbilanz abbilden zu können. Das Wachstum der Bäume sollte mit einem Waldwachstumssimulator für ein spezielles Klimaszenario simuliert werden. Ziel dieses Projekts war die Ermittlung der zukünftigen Holz- und Biomassenbilanzen sowie der Flüsse innerhalb und aus dem Wald inklusive Totholz. Darüber hinaus sollten die Entwicklung des Bodenkohlenstoffes bis 2100 unter den verschiedenen Nutzungsszenarien modellhaft berechnet sowie die jährlich anfallende Schadholzmenge abgeschätzt werden.

3. Projektstruktur

Das Projekt wurde vom Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) durchgeführt und gliedert sich in sechs Arbeitspakete:

1. Entwicklung der Szenarien
2. Adaptierung der Modelle
3. Simulation Waldbewirtschaftung
4. Ermittlung der Kohlenstoffgehalte für die verschiedenen Szenarien
5. Durchführung der Simulationsläufe Bodenkohlenstoffentwicklung
6. Abfassung des Endberichts

4. Durchgeführte Arbeiten

4.1 Arbeitspaket 1: Entwicklung der Szenarien

Ausgehend von der Holz- und Biomassenstudie des BFW (siehe BFW-Praxisinformation 18-2009) wurde ein Referenzszenario entwickelt, das sich an den Annahmen für die Ableitung des Referenzszenarios für die Waldbewirtschaftung innerhalb der zweiten Verpflichtungsperiode bis 2020 orientiert. Darüber hinaus wurden zusammen mit Vertretern der Forst- und Holzbranche sowie Vertretern aus dem Ministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft im April 2013 vier weitere Bewirtschaftungsszenarien im Rahmen eines Workshops erarbeitet. Diese Varianten sollten mögliche Auswirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftungsextreme auf die Situation des Waldes und die fünf Kohlenstoffpools im Wald abbilden und damit Reaktionen auf noch nicht vorhersehbare Änderungen der Rahmenbedingungen unter anderen Szenarien ermöglichen. Dies im Sinne einer stärkeren Sichtbarmachung von unterschiedlichen Effekten auf die Treibhausgasbilanz. Die fünf Bewirtschaftungsszenarien sind in den nächsten Abschnitten beschrieben. Für alle Szenarien gilt die strikte Einhaltung des Forstgesetzes 1975 in seiner aktuellen Fassung (siehe dazu auch Kap. 4.2.4).

4.1.1 Szenario R – Referenzszenario

Die weitere Nachfrage nach Holz (nach Menge und nach Zusammensetzung) und die dementsprechende Waldbewirtschaftung folgen dem Trend der letzten Jahre. Es gilt die ceteris paribus Annahme für die den Markt steuernden Rahmenbedingungen und das Verhalten der Marktteilnehmer mit folgender Ausnahme: Der National Renewable Energy Action Plan 2010 (NREAP) wird bis 2020 umgesetzt. Die forstliche Entwicklung bis 2020 entspricht dem Durchschnitt der Waldbau-Szenarien der HOBI-Aufkommensstudie. Dies bedeutet, dass die Nutzung entsprechend den letzten Jahren bis 2020 weiterhin zunimmt. In Szenario R werden nach 2020 keine steuernden politischen Eingriffe mehr wirksam. Somit folgt die Produktion von Halbfertigprodukten den Marktgegebenheiten.

4.1.2 Szenario 1a – Gesteigerter Einschlag wegen forcierter energetischer Nutzung

Der NREAP wird weiterentwickelt. Die Nachfrage nach Energieholz aus dem Wald nimmt durch eine verstärkte Förderung der Nutzung von Waldbiomasse für die energetische Nutzung entsprechend dem weiteren Ausbau von Biomassekraftwerken bzw. energiewendebedingten Effekten stark zu. Dieser Effekt wird durch Veränderungen in den Preisrelationen Nutzholz/Brennholz und aufgrund des signifikanten Anstiegs der Preise für andere Energieformen verstärkt. Die Nachfrage nach Holz steigt über das Referenzszenario hinaus an. Für dieses Szenario wird angenommen, dass das Aufkommen von Brennholz aus dem Wald bis 2100 auf 120% des Referenzniveaus steigt.

4.1.3 Szenario 1b – Gesteigerter Einschlag wegen forcierter stofflicher Nutzung

Es wird eine erhöhte Holznutzung gegenüber dem Szenario R unter Annahme einer verstärkten stofflichen Nutzung angenommen, wobei die Importverfügbarkeit von Rohholz zu erwartenden Trends folgt. Der Bau mit Holz und der Einsatz von Holzprodukten werden durch direkte Förderungen, Änderung der Bauordnungen und Entwicklungsarbeit in Richtung neuer Technologien

gefördert, die sich durch eine Erweiterung des Einsatzspielraums von Holz in einer verstärkten Verwendung im Bausektor manifestieren (es wird jedoch keine Optimierung der kaskadischen Nutzung im Sinne eines effizienteren Kreislaufs in puncto Wiederverwendung und stofflicher Wiederverwertung modelliert). Gleichzeitig gehen Förderung und Nachfrage der direkten Nutzung von Waldbiomasse für energetische Zwecke zurück. Die Nachfrage nach Holz steigt über das Referenzszenario hinaus an. Die Preisrelation Nutzholz/Brennholz verschiebt sich in Richtung eines stärkeren Anreizes für eine Waldbewirtschaftung in Richtung höherwertiger Sortimente. Dies führt bis 2100 zu einem Ansteigen des Aufkommens an Holz zur stofflichen Nutzung auf 120% des Niveaus im Referenzszenario.

4.1.4 Szenario 1c – Gesteigerter Einschlag wegen forciertes stofflicher Nutzung unter günstigen Importbedingungen

Hier wird eine erhöhte Holznutzung gegenüber dem Referenzszenario in Kombination mit einer höheren Importverfügbarkeit von Rohholz angenommen. Durch ein Ausweiten des Einzugsgebietes für Rohholzimporte stehen auch in Zukunft größere Importmöglichkeiten zur Verfügung. Die Importverfügbarkeit für Rohholz beträgt 150% des Referenzniveaus.

4.1.5 Szenario 2 – Reduzierte Nutzung (Nutzungseinschränkungen und Außer-Nutzung-Stellung von Waldflächen durch Naturschutzvorgaben)

Es werden Anreiz- und Fördersysteme sowie Rahmenbedingungen geschaffen, die einerseits zu einem Rückgang der Waldfläche in forstlicher Nutzung führen, und die andererseits zu einer Reduktion der Nutzungsmengen auf den weiterhin bewirtschafteten Waldflächen führen. Derartige Systeme bzw. Rahmenbedingungen sind naturschutzrechtlichen Ursprungs mit entsprechenden Abgeltungen des Nutzungsentgangs und Förderungen bzw. Entgelten für den Kohlenstoff-Vorratsaufbau in der Landschaft. In diesem Szenario wird angenommen, dass bis 2100 der Anteil der Waldfläche mit Nutzungsverzicht (Kernzonen von National- und Biosphärenparks, Wildnisgebiet Dürrenstein, Naturwaldreservate) von derzeit 1% auf 5%² der Ertragswaldfläche ansteigt. Zusätzlich wird auf der weiterhin bewirtschafteten Waldfläche die im Jahr 2010 im Referenzszenario in den verschiedenen Schutzgebieten errechnete Nutzungsmenge nach den in Tabelle 1 angeführten Prozentsätzen³ reduziert.

Tabelle 1: Nutzungsreduktion für Szenario 2 innerhalb verschiedener Schutzgebiete. Als Basis gilt die reguläre Nutzungsmenge des Referenzszenarios im Jahr 2010.

Schutzkategorie	bis 2020	2020 – 2050	2050 – 2100
Nationalparks, Biosphärenparks (Außenzonen), Natura-2000-Gebiete	20%	30%	40%
Weitere Schutzgebiete (z.B. Landschaftsschutz) und Wanderkorridore	10%	15%	20%
Alle anderen Ertragswaldflächen	5%	10%	15%

² Laut Entwurf zur Österreichischen Biodiversitätsstrategie

³ Laut EU Biodiversitätsstrategie

4.2 Arbeitspaket 2: Adaptierung der Modelle

4.2.1 Das Waldwachstumsmodell CALDIS

Als Grundlage für das Simulationsprogramm diente der Waldwachstumssimulator PROGNAUS (Ledermann, 2006). In diese Software wurde das neue, klimasensitive Waldwachstumsmodell CALDIS (Kindermann, 2010; Gschwantner et al., 2010) implementiert, das im Rahmen des Forschungsprojekts WAMOD (Klima- und Energiefonds, A760631) entwickelt wurde.

CALDIS ist ein einzelbaumorientiertes Waldwachstumsmodell. Der Vorteil von solchen Modellen besteht darin, dass sie die Bestandesentwicklung über das Wachstum der einzelnen Bäume und nicht wie in den Ertragstafeln über die Entwicklung von Hektar- und Mittelwerten (Stammzahl, Grundfläche oder Volumen je Hektar bzw. Mitteldurchmesser, Mittelhöhe oder Oberhöhe) abbilden. Diese Modelle sind deshalb in der Lage, die Auswirkungen einer Vielzahl von waldbaulichen Behandlungsvarianten, Baumarten- und Alterskombinationen zu beschreiben, wodurch sie detailliertere Informationen über die Entwicklung der Bestandesstruktur (BHD-Verteilung, Baumartenzusammensetzung, etc.) liefern.

Eine systematische Gliederung von Waldwachstumsmodellen bzw. ihrer Teilmodelle kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen (Ledermann, 2012). Zwei Gesichtspunkte spielen zumeist eine wesentliche Rolle:

- folgt der Modellansatz einem Potentialkonzept bei dem ein potentieller Zuwachs durch Konkurrenzfaktoren auf den aktuellen Zuwachs reduziert wird,
- wird bei der Beschreibung der Konkurrenzsituation eines Baumes dessen räumliche Position in Bezug auf seine unmittelbaren Nachbarn berücksichtigt.

Demzufolge lassen sich Einzelbaumwaldwachstumsmodelle in Potentialmodelle sowie in Modelle einteilen, die direkte Zuwachsschätzungen liefern. Hinsichtlich der Konkurrenzbeschreibung kann zwischen abstandsabhängigen und abstandsunabhängigen Modellen unterschieden werden.

CALDIS ist ein in all seinen Teilmodellen abstandsunabhängiges Einzelbaumwaldwachstumsmodell. Es benötigt daher keine räumlichen Positionen der Einzelbäume. Darüber hinaus beruht es nicht auf dem Potentialkonzept sondern liefert direkte Zuwachsschätzungen. CALDIS besteht aus einem Set artspezifischer, mathematisch-statistischer Funktionen, mit denen Durchmesser- und Höhenzuwachs (Kindermann, 2010; Gschwantner et al., 2010) eines Baumes geschätzt werden. Außerdem enthält CALDIS Teilmodelle, die das Absterben von Bäumen und den Prozess der Waldverjüngung simulieren (Ledermann, 2002). Als Inputdaten benötigt CALDIS baum- und bestandesspezifische Größen- und Konkurrenzvariable, ein Set aus standortsbeschreibenden Faktoren wie sie bei der Österreichischen Waldinventur (ÖWI) auf jeder Probefläche erhoben werden, sowie Temperatur- und Niederschlagswerte. Alle Teilmodelle sind gültig für Bäume ab einem Grenzdurchmesser von 5 cm. Die Koeffizienten der Modellgleichungen wurden mittels multivariater statistischer Methoden aus dem Datenmaterial der ÖWI 1981-2009 bzw. aus Messdaten der ZAMG hergeleitet. Abbildung 1 zeigt das Verhalten des Durchmesserzuwachsmodells von Kindermann (2010), Abbildung 2 jenes des Höhenzuwachsmodells von Gschwantner et al. (2010).

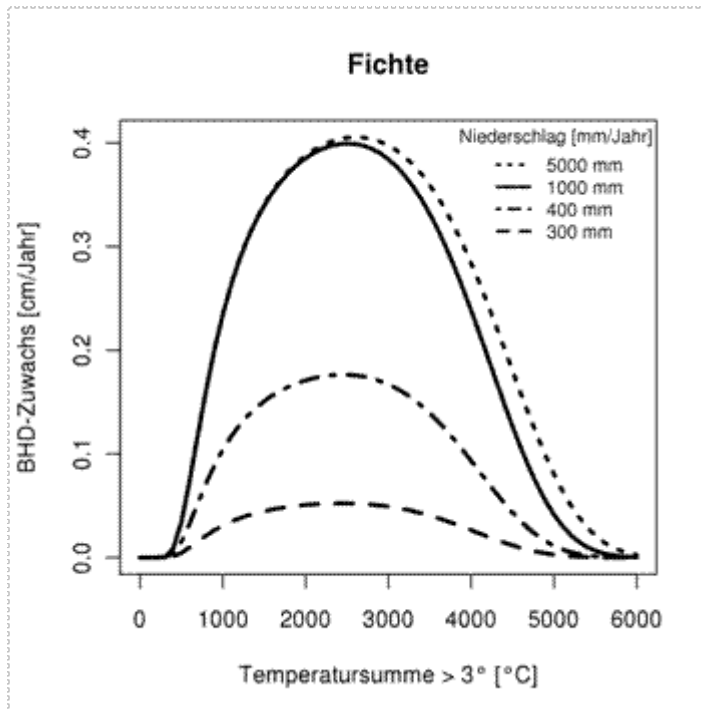


Abbildung 1: Verhalten des neuen Durchmesserzuwachsmodells (Kindermann, 2010).

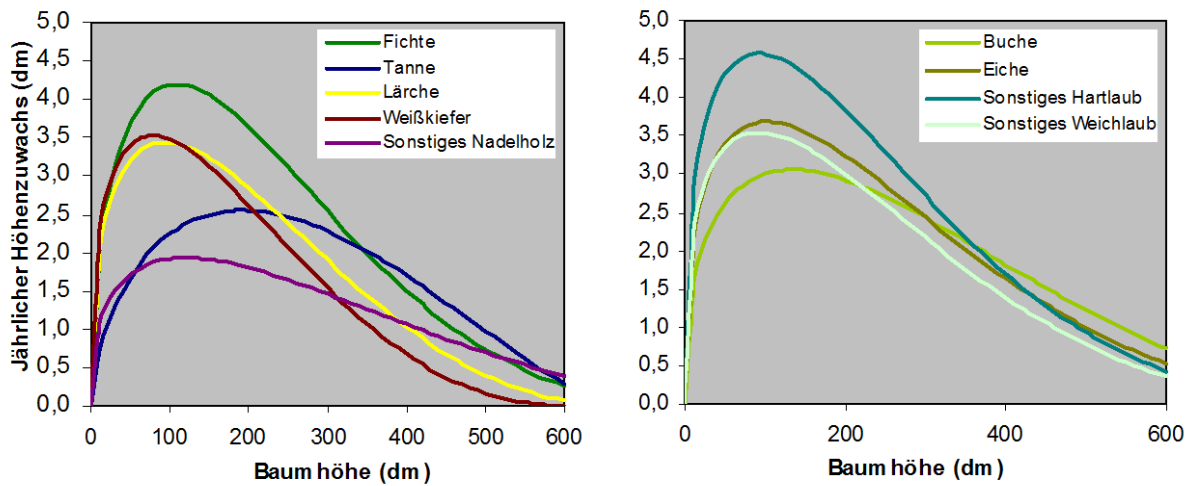


Abbildung 2: Verhalten des neuen Höhenzuwachsmodells (Gschwantner et al., 2010).

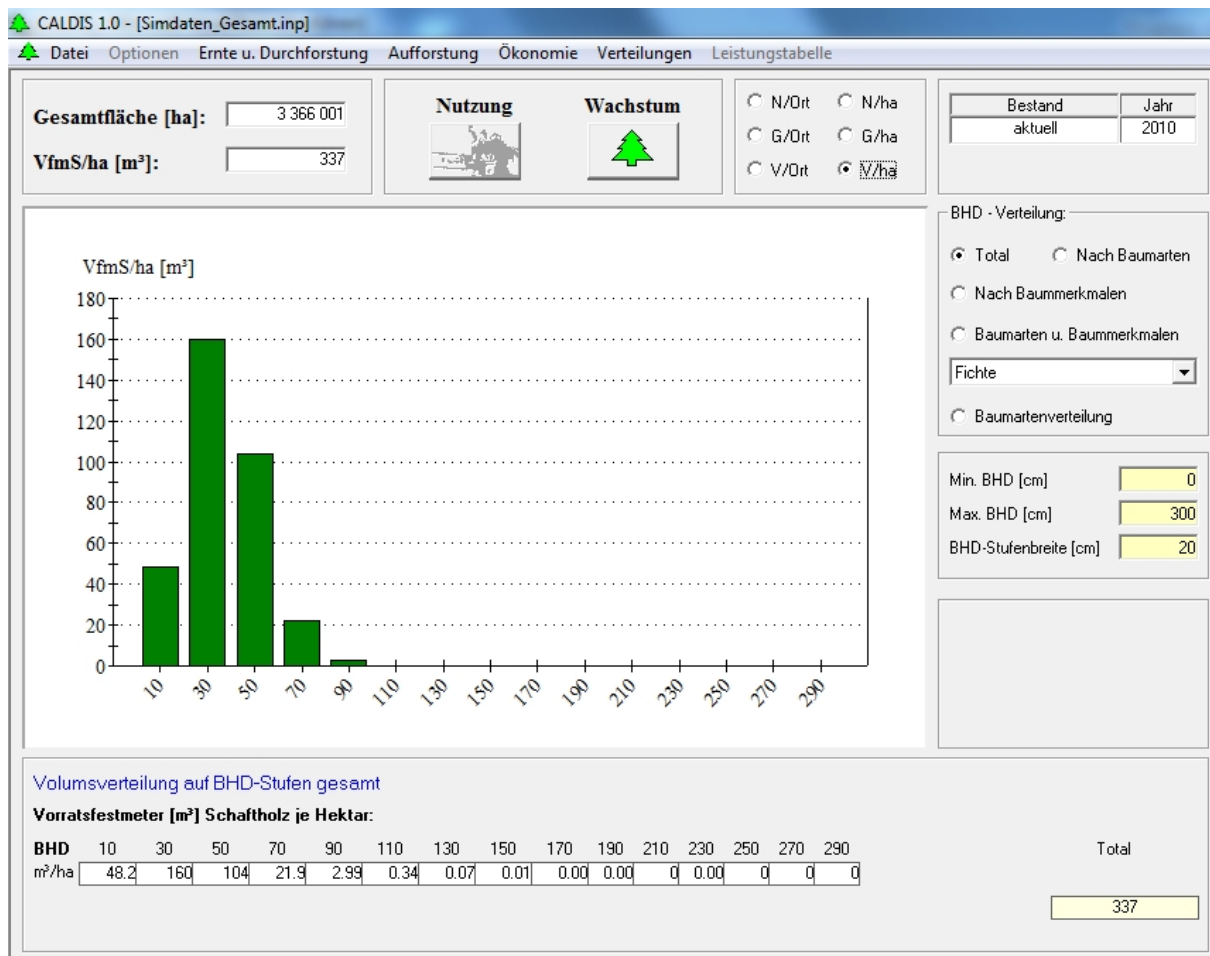


Abbildung 3: Benutzeroberfläche des Waldwachstumssimulators CALDIS.

Die in Abbildung 3 dargestellte Benutzeroberfläche des Simulationsprogramms wurde vom Waldwachstumssimulator PROGNAUS (Ledermann, 2006) übernommen und die neu entwickelten Zuwachsmodelle in diese Software integriert. Da die Zuwachsfunktionen von CALDIS aber jährliche Zuwächse schätzen, mussten alle anderen Teilmodelle derart abgeändert werden, dass das Simulationsprogramm in 1-Jahres-Schritten ablaufen kann. Darüber hinaus wurde eine Routine programmiert, die für jede ÖWI-Probefläche einen Datensatz für Temperatur und Niederschlag bis ins Jahr 2100 verwaltet. Biomassefunktionen (Eckmüllner, 2006; Gschwantner und Schadauer, 2006; Ledermann und Neumann, 2006; Rubatscher et al. 2006) und ein bereits vorhandenes Kalamitätsnutzungsmodell wurden ebenfalls in das Simulationsprogramm integriert. Dieses Kalamitätsnutzungsmodell, das die Zufallsnutzungen in Abhängigkeit von Wind, Trockenheit, Bestandes- und Standortfaktoren abschätzt, wurde ebenfalls im Rahmen des Forschungsprojekts WAMOD entwickelt (Abbildung 4).

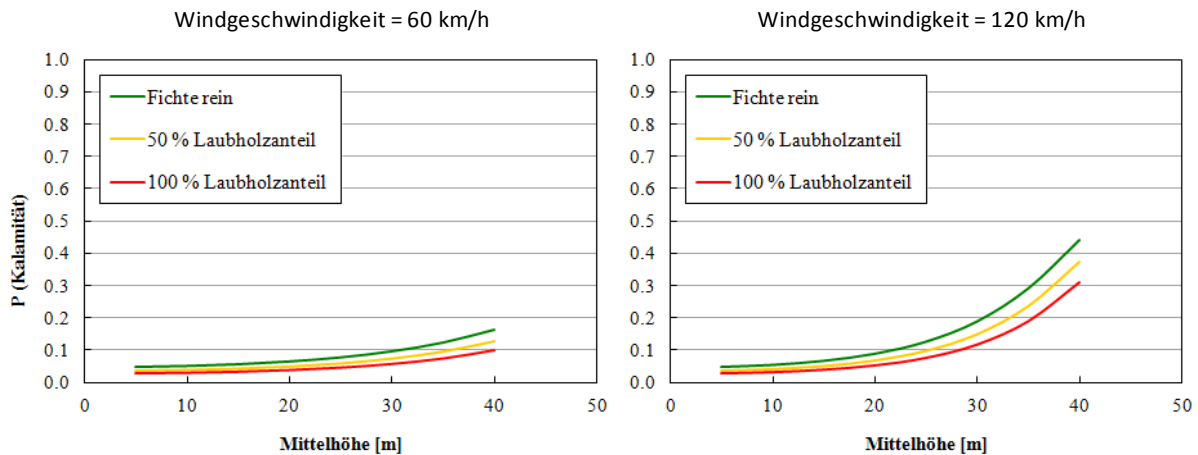


Abbildung 4: Verhalten des Modells zur Abschätzung von Kalamitätsnutzungen.

4.2.2 Neuentwicklung eines Mortalitätsmodells

Das Kalamitätsnutzungsmodell wurde auf der Grundlage der ÖWI-Daten entwickelt und umfasst jene Bäume, die aufgrund von abiotischen (z.B. Schnee, Sturm, Trockenheit) oder biotischen (z.B. Borkenkäfer) Faktoren absterben. Solche Bäume werden meistens aus dem Wald entfernt und einer weiteren Nutzung zugeführt. Darüber hinaus gibt es aber auch Bäume, die aufgrund der Konkurrenz um Ressourcen absterben und zusammenbrechen. Die ÖWI bezeichnet diese Bäume als natürlichen Abgang. Das Holz dieser Bäume verbleibt zumeist im Bestand. Da im gegenständlichen Projekt auch der Kohlenstofffluss abzuschätzen war, musste auf der Datengrundlage der ÖWI ein Wahrscheinlichkeitsmodell entwickelt werden, das jene Holz mengen abschätzt, die der Nutzungsart „Natürlicher Abgang“ zuzuordnen sind.

4.2.3 Entwicklung eines Windmodells

Wie aus Abbildung 2 ersichtlich, benötigt das Kalamitätsnutzungsmodell für jeden Punkt der ÖWI die maximale Windgeschwindigkeit eines Jahres. Daher war es notwendig, ein Modell zu entwickeln, mit dessen Hilfe das Windregime an einem bestimmten Ort charakterisiert werden kann. Die Daten für dieses Modell wurden von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) zur Verfügung gestellt. Bei diesen Daten handelt es sich um Windgeschwindigkeitsmessungen der ZAMG, die von den TAWES-Messstationen im Zweisekundenabstand aufgezeichnet werden. Der größte Messwert einer Stunde wird gespeichert, sodass diese Werte die maximale Zwei-Sekunden-Bö einer Stunde darstellen. Aus diesem Datensatz wurde dann die maximale Windgeschwindigkeit eines Tages herausgefiltert. Die Tageswerte als Summenhäufigkeit dargestellt, charakterisieren das Windregime an einem bestimmten Ort bzw. an der jeweiligen Messstation (Abbildung 5, links).

Summenhäufigkeit

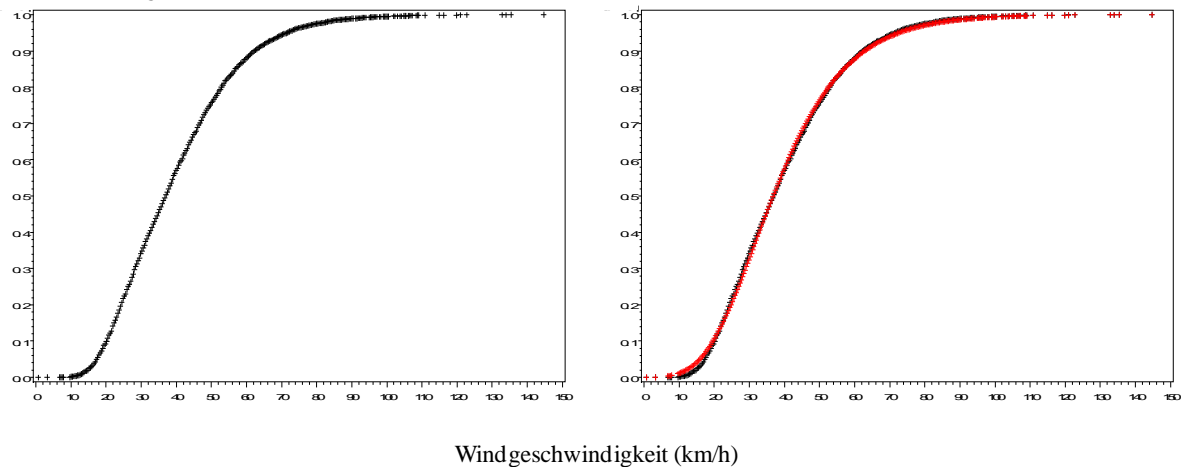


Abbildung 5: Windregime an der Messstation Kremsmünster. Schwarze Kurve: Summenhäufigkeit. Rote Kurve: angepasste Verteilungsfunktion (GUMBEL-Funktion).

Eine solche empirische Verteilung kann mit einer ausgewählten Verteilungsfunktion (z.B. Weibull, Gumbel) ausgeglichen werden (Abbildung 5, rechts). Für das gegenständliche Projekt wurde die GUMBEL-Funktion (Gumbel, 1958) verwendet:

$$F(x) = \exp(-(1 - \tau \cdot \alpha \cdot (x - \beta))^{\frac{1}{\tau}}) \quad (1)$$

mit

x ... Windgeschwindigkeit

α, β, τ ... Funktionsparameter

Sind die Parameter α, β, τ für einen bestimmten Standort geschätzt, kann Gleichung 1 nach x entwickelt werden:

$$x = \beta + \frac{1 - \exp(\tau \cdot \ln(-\ln(F(x))))}{\tau \cdot \alpha} \quad (2)$$

Setzt man für $F(x)$ in Gleichung 2 eine gleichverteilte Zufallszahl zwischen 0 und 1 ein, so hat man eine zufällig ausgewählte, mit den Parametern α, β, τ verteilte Windgeschwindigkeit geschätzt. Wird dieser Vorgang oftmals wiederholt, so ergibt sich für einen bestimmten Ort die modellierte Verteilungsfunktion (rote Kurve in Abbildung 5, rechts). Auf diese Weise kann das an einem bestimmten Ort in der Vergangenheit beobachtete Windregime abgebildet werden.

Die von der ZAMG zur Verfügung gestellten Daten umfassten 150 Messstationen, an denen ein derartiges Windmodell parametrisiert werden konnte. Neben den geschätzten Parametern α , β , τ waren für diese 150 Orte auch die Lagekoordinaten und die Seehöhe bekannt. Um die Windmodelle auf die Trakte der ÖWI übertragen zu können, wurde daher für jeden Parameter ein Hilfsmodell entwickelt, das den jeweiligen Parameter in Abhängigkeit von der geographischen Lage und der Seehöhe schätzt. Auf diese Weise kann für jeden Trakt der ÖWI ein auf historischen Daten beruhendes Windmodell generiert werden. Dieses Modell wurde ebenfalls in das Simulationsprogramm implementiert und für die Schätzung der Kalamitätsnutzungen herangezogen.

4.2.4 Formulierung eines Auszeige- und Holzerntemodells

Zur Umsetzung von Nutzungseingriffen musste ein Regelwerk geschaffen werden, nach dem die geplanten Vor- und Endnutzungen ablaufen sollten. Ausgehend von den Nutzungsansprüchen der ÖWI wurde ein Wahrscheinlichkeitsmodell entwickelt, mit dessen Hilfe für jede Probefläche entschieden wurde, ob eine Vornutzung oder eine Endnutzung stattfindet. Bei einer Endnutzung wurde dann jede Probefläche der Kategorie Kahlschlag oder Einzelstammentnahme zugeordnet. Beim Kahlschlag wurden alle Bäume einer Probefläche entfernt; bei einer Einzelstammentnahme wurden die Bäume beginnend vom oberen Ende der BHD-Verteilung entnommen bis eine Überschirmung von sechs Zehntel der vollen Überschirmung erreicht war. Bei einer Vornutzung wurde - so wie bei der HOBI-Studie (Ledermann und Neumann, 2009) - anhand von standortsspezifischen Stammzahlleitkurven bestimmt, wie viele Bäume je Hektar entnommen werden bzw. wie viele verbleiben sollten (Abbildung 6). Die ermittelte Anzahl an ausscheidenden Bäumen wurde dann zufällig aus der probeflächenspezifischen BHD-Verteilung entnommen. Ausschlagwälder, d. s. Wälder, die sich überwiegend vegetativ über Stockausschläge vermehren, wurden im Kahlschlagverfahren mit 30-jährigem Umtrieb bewirtschaftet.

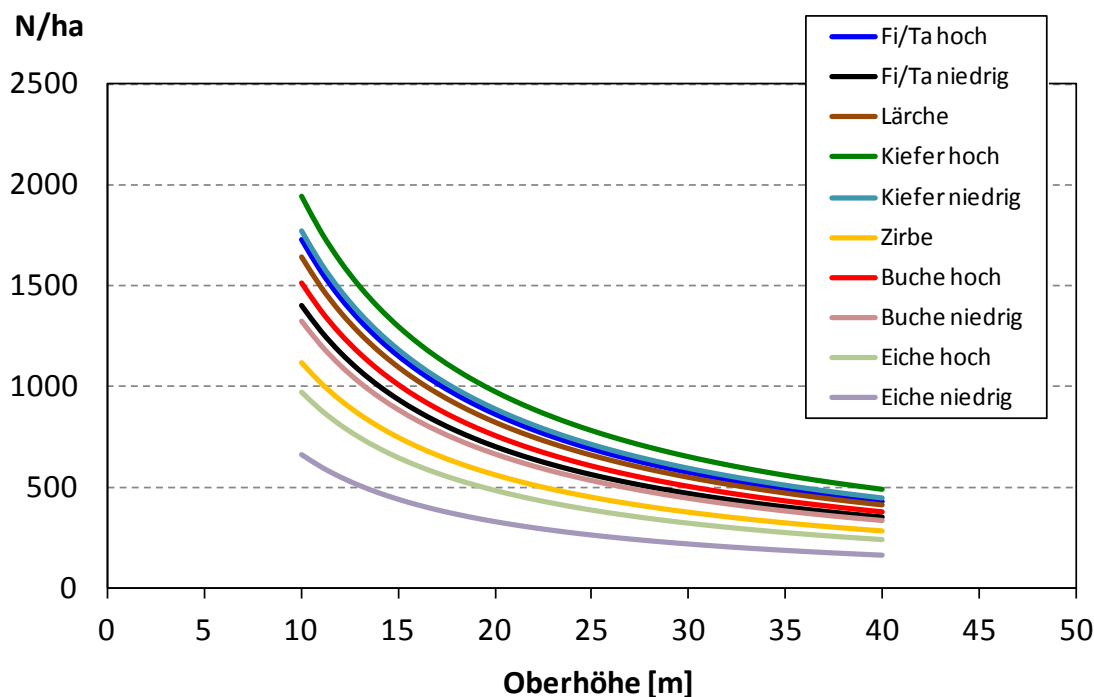


Abbildung 6: Stammzahlleitkurven verschiedener Baumarten zur Steuerung von Vornutzungseingriffen.

Die ausgewählten Bäume wurden aber nicht sofort von den jeweiligen Probeflächen entfernt, sondern sie wurden zunächst einmal als potentielle Aushiebskandidaten im Datensatz markiert (ausgezeigt). Im Zuge dieser Auszeige wurde auch überprüft, ob der geplante Eingriff mit dem Forstgesetz bzw. mit anderen Vorgaben konform ist. Folgende Restriktionen wurden in das Regelwerk implementiert:

- Absolut keine Nutzungen in Kernzonen von National- und Biosphärenparks und in Naturwaldreservaten
- In Außenzonen von National- und Biosphärenparks sowie in Natura-2000-Gebieten keine Kahlhiebe sondern nur Einzelstammentnahmen
- Im Schutzwald grundsätzlich keine Kahlhiebe. Ausnahme: bei einer Überschirmung von weniger als drei Zehntel der vollen Überschirmung
- Keine Kahlhiebe in Beständen unter 60 Jahre (Hiebsunreife)
- Einzelstammentnahmen nur bis zum pfleglichen Ausmaß, d.h. nach dem Eingriff müssen mindestens sechs Zehntel der vollen Überschirmung vorhanden sein
- bei Pflegeeingriffen (Vornutzung) kann der Wert von sechs Zehntel unterschritten werden wenn der Bestand noch nicht älter als 30 Jahre ist

Zusätzlich zu diesen waldbaulichen, ertragskundlichen und legistischen Vorgaben sollten auch ökonomische Aspekte der Holzernte Berücksichtigung finden. Zur Abschätzung der Holzerntekosten wurde die von Gschwantner (2009) getroffene Zuordnung der ÖWI-Probeflächen zu den verschiedenen Bringungskategorien, Rücketechnologien und Arbeitsverfahren übernommen. In einem weiteren Schritt wurden anhand der von Gschwantner (2009) im Rahmen der HOBI-Studie errechneten Erntekosten einfache Modelle entwickelt, die die Erntekosten anhand des mittleren BHD der genutzten Bäume schätzen (Abbildung 7 und Abbildung 8). Bei der Anwendung dieser Modelle wurden auch vorgegebene Minstdimensionen berücksichtigt. Wurden diese nicht erreicht, wurde die Auszeige rückgängig gemacht. Mit den geschätzten Holzerntekosten und den Holzpreisen wurde für jede Probefläche der ÖWI ein erntekostenfreier Erlös errechnet auf dessen Basis eine Reihung der ÖWI-Probeflächen vorgenommen wurde. Nach dieser Reihung wurden dann die Vor- und Endnutzungen durchgeführt. Durch diese Vorgangsweise sollte dem in den vergangenen Jahrzehnten im Rahmen der ÖWI beobachteten Verhalten der Waldbesitzer Rechnung getragen werden, wonach das Holz vorzugsweise in den bringungsgünstigen Lagen genutzt wird.

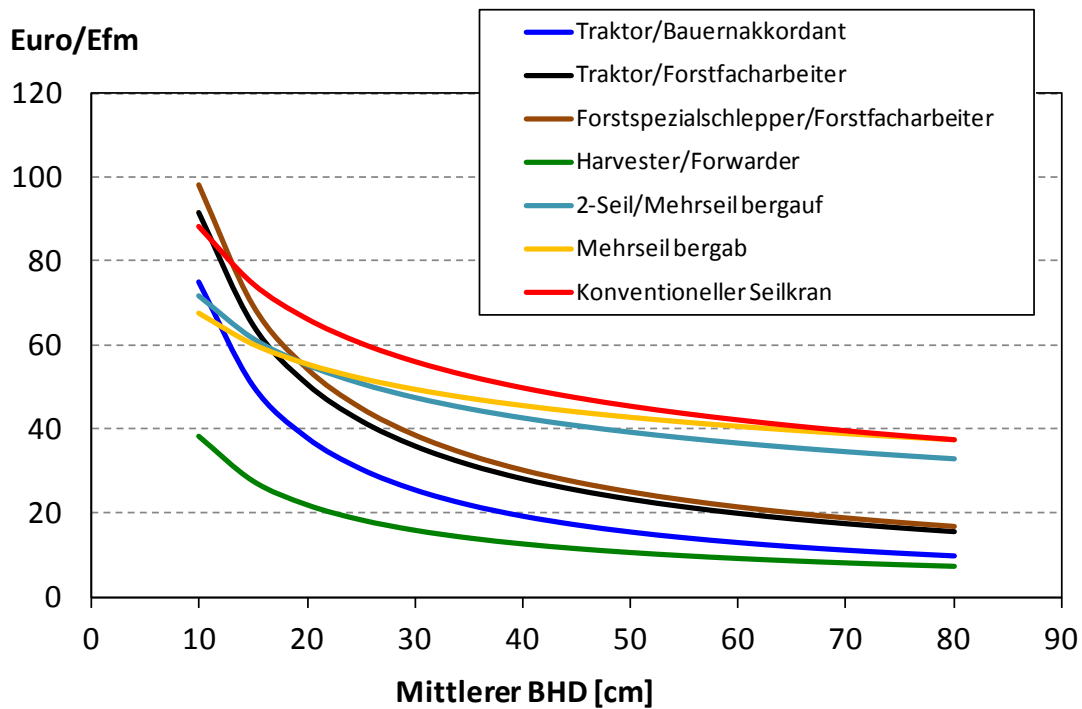


Abbildung 7: Holzertekosten im Sortimentsverfahren in Abhängigkeit des mittleren BHD der genutzten Bäume und des Ernteverfahrens.

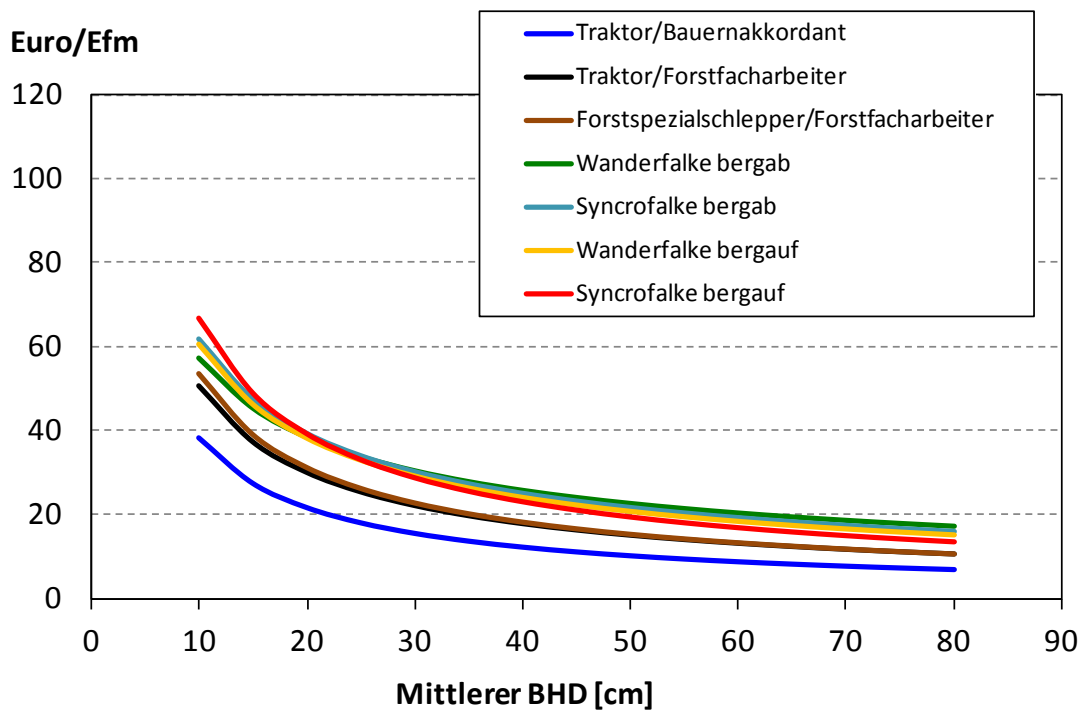


Abbildung 8: Holzertekosten im Baumverfahren in Abhängigkeit des mittleren BHD der genutzten Bäume und des Ernteverfahrens.

4.3 Arbeitspaket 3: Simulation Waldbewirtschaftung

4.3.1 Aufbereitung der ÖWI-Daten

Als Datengrundlage für die Simulationsrechnungen dienen die Daten der ÖWI aus der Erhebungsperiode 2007/09. Die ÖWI erhebt seit 1981 auf einem permanenten und regelmäßigen Stichprobennetz Daten über den österreichischen Wald. Die Erhebungseinheit ist der so genannte Trakt. Die Trakte sind systematisch über das gesamte Bundesgebiet verteilt (Abbildung 9). Der Abstand zwischen den Trakten beträgt 3,89 km x 3,89 km.

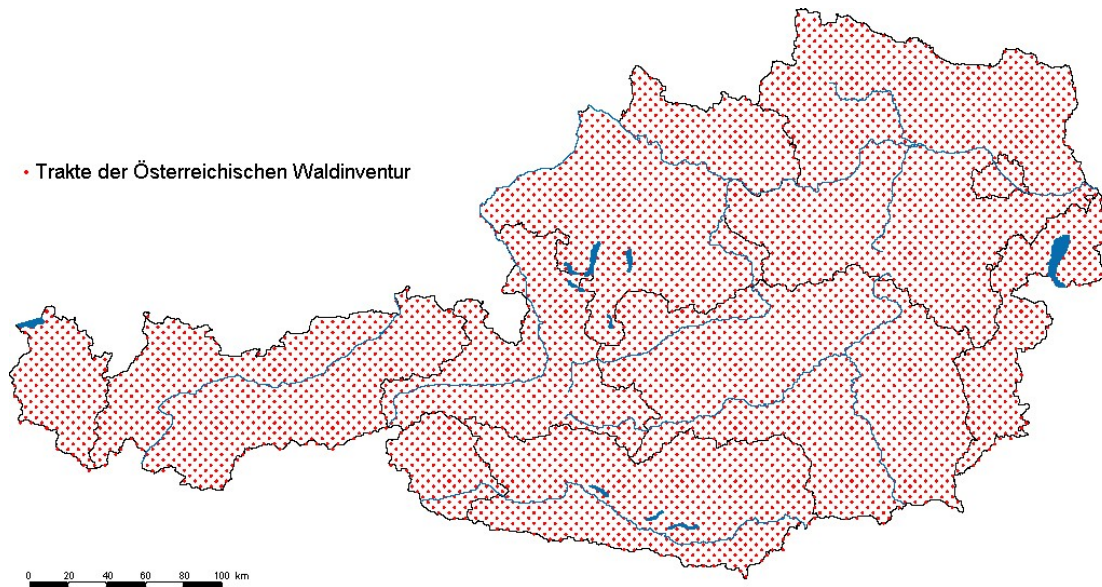


Abbildung 9: Stichprobennetz der ÖWI.

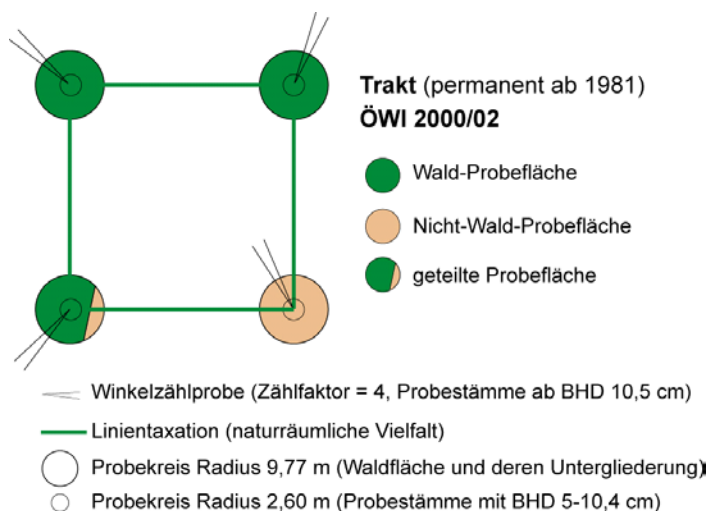


Abbildung 10: Der Trakt als Erhebungseinheit der Österreichischen Waldinventur.

Ein Trakt besteht aus einem Quadrat mit 200 m Seitenlänge, an dessen Eckpunkten die Probeflächen angeordnet sind (Abbildung 10). Probestämme mit einem BHD $\geq 10,5$ cm werden mittels Winkelzählprobe mit einem Zählerfaktor von 4 m²/ha ausgewählt (Bitterlich, 1948). Auf einem kleinen fixen Probekreis mit einem Radius von 2,6 m werden Probestämme mit $5,0 \text{ cm} \leq \text{BHD} < 10,5 \text{ cm}$ erhoben. Ein Probekreis von 9,77 m Radius dient zur Ermittlung der Waldfläche und zur Ansprache von standortkundlichen Merkmalen wie Bodengruppe, Wasserhaushalt, Bodengründigkeit, Vegetationstyp, und Humusmächtigkeit. Weiters wird für jede Probefläche die Seehöhe, Exposition, Hangneigung, Relief und die Zugehörigkeit zum jeweiligen Wuchsraum bestimmt. Eigentums- und Betriebsart (Schutzwald, Ertragswald) werden ebenfalls erhoben. Insgesamt umfasst das Stichprobenetz etwa 5.500 Trakte und somit 22.000 Stichprobenpunkte. Davon ist etwas weniger als die Hälfte bewaldet. Für das gegenständliche Projekt wurden alle ÖWI-Probeflächen im Ertragswald verwendet, deren Waldanteil mindestens $\frac{7}{10}$ beträgt. Teilflächen mit weniger als $\frac{10}{10}$ Waldanteil wurden für die Simulation auf „ganze“ Probeflächen hochgerechnet. Insgesamt standen 7 964 ÖWI-Probeflächen zur Verfügung, die einer Ertragswaldfläche von ca. 3,37 Mio. Hektar entsprechen. Wie sich diese Ertragswaldfläche auf verschiedene Betriebsarten und Schutzgebiete verteilt, zeigen Tabelle 2 und Tabelle 3.

Tabelle 2: Verteilung der Ertragswaldfläche auf verschiedene Betriebsarten.

Betriebsart	Fläche in ha	%
Ausschlagwald	92 000	2,7
Schutzwald	327 000	9,7
Sonstige Ertragswaldfläche	2 947 000	87,6

Tabelle 3: Verteilung der Ertragswaldfläche auf verschiedene Schutzgebiete.

Schutzgebiet	Fläche in ha	%
Nationalparks/Biosphärenparks (Kernzonen), Wildnisgebiet Dürrenstein (inkl. Rothwald), Naturwaldreservate	39 000	1,1
Nationalparks/Biosphärenparks (Außenzonen), Natura 2000	481 000	14,3
Weitere Schutzgebiete (z.B. Landschaftsschutz) und Wanderkorridore	494 000	14,7
Alle anderen Ertragswaldflächen	2 352 000	69,9

Die 7 964 ÖWI-Probeflächen umfassten in Summe 70 147 Probestämme, die für den Waldwachstumsimulator CALDIS in ein spezielles ASCII-Format gebracht werden mussten. Abbildung 11 zeigt die Struktur eines derartigen Datensatzes, in dem jede Zeile einen Stichprobenbaum der ÖWI repräsentiert. Eine Zeile setzt sich wiederum aus Standorts- und Baummerkmalen zusammen. Bestandeswerte werden nach dem Einlesen des Datensatzes aus den Einzelbaumdaten errechnet und in die jeweiligen Datenzeilen eingefügt.

```

|,115530,381810,422.6519337,580090101150203200,1,1,8,450,2.5,0,1,4,6,22,1,2,2,0,0,5,23,10,10,7,3,7,1,-1,470.8726127,10,1000000000
1,115530,381810,422.6519337,580090101150203200,1,1,8,450,2.5,0,1,4,6,22,1,2,2,0,0,2,1,10,10,16,3,13,1,6,5,191.687989,30,1000000000
1,115530,381810,422.6519337,580090101150203200,1,1,8,450,2.5,0,1,4,6,22,1,2,2,0,0,4,10,10,20,1,12,1,6,126.060203,30,1000000000
1,115530,381810,422.6519337,580090101150203200,1,1,8,450,2.5,0,1,4,6,22,1,2,2,0,0,3,4,10,10,25,5,18,9,12,7,78,32307849,50,1000000200
1,115530,381810,422.6519337,580090101150203200,1,1,8,450,2.5,0,1,4,6,22,1,2,2,0,0,7,1,10,10,27,8,21,9,65.89925701,50,1000000200
1,115530,381810,422.6519337,580090101150203200,1,1,8,450,2.5,0,1,4,6,22,1,2,2,0,0,6,4,10,10,31,1,24,6,16,3,52.65617786,50,1000000200
1,115530,381810,422.6519337,580090101150203200,1,1,8,450,2.5,0,1,4,6,22,1,2,2,0,0,1,1,10,10,38,1,24,7,8,9,35.08489318,50,1000000200
2,115330,381820,422.6519337,580015101150203600,1,1,8,450,2.5,324,1,3,6,22,12,0,0,0,4,1,10,10,15,3,16,3,10,4,217.5641069,70,1000001000
2,115330,381820,422.6519337,580015101150203600,1,1,8,450,2.5,324,1,3,6,22,12,0,0,0,1,1,10,10,27,9,24,9,9,9,65.42770749,70,1010000200
2,115330,381820,422.6519337,580015101150203600,1,1,8,450,2.5,324,1,3,6,22,12,0,0,0,2,1,10,10,34,9,25,9,10,6,41.81376326,70,1000000200
2,115330,381820,422.6519337,580015101150203600,1,1,8,450,2.5,324,1,3,6,22,12,0,0,0,3,1,10,10,35,2,26,1,12,5,41.10406588,70,1000000200
2,115330,381820,422.6519337,580015101150203600,1,1,8,450,2.5,324,1,3,6,22,12,0,0,0,6,1,10,10,36,4,27,2,13,2,38.43858063,70,1010000200
2,115330,381820,422.6519337,580015101150203600,1,1,8,450,2.5,324,1,3,6,22,12,0,0,0,5,1,10,10,41,2,27,2,13,9,30.00375966,70,1000000200
3,115340,382020,422.6519337,580060101150203300,1,1,8,450,2.5,67,5,2,3,6,22,2,1,1,0,0,7,1,10,10,5,7,5,8,-1,470.8726127,30,1000000000
3,115340,382020,422.6519337,580060101150203300,1,1,8,450,2.5,67,5,2,3,6,22,2,1,1,0,0,6,1,10,10,9,2,9,4,-1,470.8726127,30,1000000000
3,115340,382020,422.6519337,580060101150203300,1,1,8,450,2.5,67,5,2,3,6,22,2,1,1,0,0,1,1,10,10,12,7,14,1,4,8,315.7640386,30,1000000000
3,115340,382020,422.6519337,580060101150203300,1,1,8,450,2.5,67,5,2,3,6,22,2,1,1,0,0,3,1,10,10,14,7,13,9,5,7,235.686898,30,1000000000
3,115340,382020,422.6519337,580060101150203300,1,1,8,450,2.5,67,5,2,3,6,22,2,1,1,0,0,9,1,10,10,15,7,13,2,4,4,206.6192616,30,1000000000
3,115340,382020,422.6519337,580060101150203300,1,1,8,450,2.5,67,5,2,3,6,22,2,1,1,0,0,2,1,10,10,19,3,15,6,5,8,136.72738,30,1000000000
3,115340,382020,422.6519337,580060101150203300,1,1,8,450,2.5,67,5,2,3,6,22,2,1,1,0,0,1,1,10,10,23,4,16,3,15,6,5,1,93.01187411,30,1000000200
3,115340,382020,422.6519337,580060101150203300,1,1,8,450,2.5,67,5,2,3,6,22,2,1,1,0,0,8,1,10,10,27,3,19,7,7,3,69.33525445,30,1000000200
3,115340,382020,422.6519337,580060101150203300,1,1,8,450,2.5,67,5,2,3,6,22,2,1,1,0,0,5,1,10,10,29,1,19,2,5,15,6,35.91881305,70,1000000200
4,118280,373650,422.6519337,180000103140403500,3,2,8,750,65,324,2,2,2,19,19,0,0,0,14,2,10,10,21,5,12,5,5,1,110.1775701,110,1010000200
4,118280,373650,422.6519337,180000103140403500,3,2,8,750,65,324,2,2,2,19,19,0,0,0,12,2,10,10,47,1,28,1,11,8,22.95769567,150,10000010300
4,118280,373650,422.6519337,180000103140403500,3,2,8,750,65,324,2,2,2,19,19,0,0,0,10,10,50,31,31,20.37183272,150,1100001200
4,118280,373650,422.6519337,180000103140403500,3,2,8,750,65,324,2,2,2,19,19,0,0,0,13,10,10,58,4,26,9,7,14,9329089,150,1000000300
5,118120,379110,422.6519337,680000081150404400,1,1,8,550,7.5,211.5,2,2,3,3,4,2,1,0,0,5,1,10,10,16,6,14,6,7,8,231.0276428,70,1000000000
5,118120,379110,422.6519337,680000081150404400,1,1,8,550,7.5,211.5,2,2,3,3,4,2,1,0,0,3,4,10,10,25,5,20,5,9,97.90384812,50,1100000300
5,118120,379110,422.6519337,680000081150404400,1,1,8,550,7.5,211.5,2,2,3,3,4,2,1,0,0,10,4,10,10,27,4,27,17,3,84.79670898,70,1000000300
5,118120,379110,422.6519337,680000081150404400,1,1,8,550,7.5,211.5,2,2,3,3,4,2,1,0,0,6,4,10,10,32,6,25,2,15,6,59.90249655,70,1000000300
5,118120,379110,422.6519337,680000081150404400,1,1,8,550,7.5,211.5,2,2,3,3,4,2,1,0,0,11,4,10,10,36,6,27,3,17,2,47.52454331,70,1000000300
5,118120,379110,422.6519337,680000081150404400,1,1,8,550,7.5,211.5,2,2,3,3,4,2,1,0,0,1,4,10,10,39,4,26,2,18,4,41.00980265,70,1010000200
5,118120,379110,422.6519337,680000081150404400,1,1,8,550,7.5,211.5,2,2,3,3,4,2,1,0,0,7,4,10,10,42,1,27,5,15,6,35.91881305,70,1000000200
5,118120,379110,422.6519337,680000081150404400,1,1,8,550,7.5,211.5,2,2,3,3,4,2,1,0,0,9,1,10,10,42,6,31,2,9,8,35.08010824,70,1000000200
5,118120,379110,422.6519337,680000081150404400,1,1,8,550,7.5,211.5,2,2,3,3,4,2,1,0,0,4,1,10,10,43,4,30,2,3,8,33.79875196,50,1000000300
5,118120,379110,422.6519337,680000081150404400,1,1,8,550,7.5,211.5,2,2,3,3,4,2,1,0,0,8,1,10,10,48,3,30,1,12,6,27.28888942,70,1000000200
6,118140,379310,422.6519337,680035101150404600,1,1,8,650,2.5,0,2,3,6,3,4,2,1,0,0,4,1,10,10,22,5,23,8,14,8,100.601643,70,1000000200
6,118140,379310,422.6519337,680035101150404600,1,1,8,650,2.5,0,2,3,6,3,4,2,1,0,0,1,1,10,10,26,3,25,3,13,5,73.63064637,70,1010000200
6,118140,379310,422.6519337,680035101150404600,1,1,8,650,2.5,0,2,3,6,3,4,2,1,0,0,8,4,10,10,32,24,1,16,3,49.73591972,70,1000000200
6,118140,379310,422.6519337,680035101150404600,1,1,8,650,2.5,0,2,3,6,3,4,2,1,0,0,12,10,10,33,1,26,9,6,46.48513777,70,1000000200
6,118140,379310,422.6519337,680035101150404600,1,1,8,650,2.5,0,2,3,6,3,4,2,1,0,0,11,2,10,10,33,3,24,7,10,6,45.92843455,70,1010000200
6,118140,379310,422.6519337,680035101150404600,1,1,8,650,2.5,0,2,3,6,3,4,2,1,0,0,5,1,10,10,35,27,5,14,8,41.57516881,70,1000000200
6,118140,379310,422.6519337,680035101150404600,1,1,8,650,2.5,0,2,3,6,3,4,2,1,0,0,14,4,10,10,35,2,25,7,19,1,41.10406588,70,100001300
6,118140,379310,422.6519337,680035101150404600,1,1,8,650,2.5,0,2,3,6,3,4,2,1,0,0,13,4,10,10,35,4,25,9,18,40.64092517,70,1000000300
6,118140,379310,422.6519337,680035101150404600,1,1,8,650,2.5,0,2,3,6,3,4,2,1,0,0,9,1,10,10,36,3,29,6,16,7,38.65065515,70,1010000200
6,118140,379310,422.6519337,680035101150404600,1,1,8,650,2.5,0,2,3,6,3,4,2,1,0,0,3,1,10,10,36,9,28,8,16,5,37.40394224,70,1000000200
6,118140,379310,422.6519337,680035101150404600,1,1,8,650,2.5,0,2,3,6,3,4,2,1,0,0,10,1,10,10,38,28,3,15,1,35.26979348,70,1000000200
6,118140,379310,422.6519337,680035101150404600,1,1,8,650,2.5,0,2,3,6,3,4,2,1,0,0,7,4,10,10,38,7,27,5,18,5,34.00542288,70,1000000300
7,118350,379290,422.6519337,180040101210403700,1,1,8,550,65,108,2,2,2,3,2,2,1,0,0,1,4,10,10,18,9,19,6,19,6,142.5760247,70,1100000000
7,118350,379290,422.6519337,180040101210403700,1,1,8,550,65,108,2,2,2,3,2,2,1,0,0,13,10,10,19,2,14,6,7,1,138.1553326,70,1000010000
7,118350,379290,422.6519337,180040101210403700,1,1,8,550,65,108,2,2,2,3,2,2,1,0,0,11,9,10,10,20,1,14,0,9,126.060201,90,1010000000
7,118350,379290,422.6519337,180040101210403700,1,1,8,550,65,108,2,2,2,3,2,2,1,0,0,8,2,10,10,22,9,16,1,9,2,97.1178692,90,1000010200
7,118350,379290,422.6519337,180040101210403700,1,1,8,550,65,108,2,2,2,3,2,2,1,0,0,10,4,10,10,27,4,21,1,21,1,67.83736719,90,1110000200

```

Abbildung 11: Struktur des Ausgangsdatensatzes (ÖWI-Daten 2007/09).

4.3.2 Klimadaten

In alle Simulationsrechnungen sollten die Effekte einer Klimaänderung einfließen. Dazu wurden Temperatur- und Niederschlagsdaten bis ins Jahr 2100 benötigt. Ursprünglich war geplant, die Daten einer Klimaprojektion (Szenario A1B) durch Downscaling auf 1 km Rasterweite für ÖWI-traktspezifische Schätzwerte anzupassen. Jedoch stellten sich nach eingehender Prüfung die in einem anderen, internationalen Projekt bereits verwendeten Daten für Österreich, speziell für den Alpenraum, als nicht geeignet heraus. Aus diesem Grund hat das BFW im Oktober 2013 mit der ZAMG Kontakt aufgenommen, um hier Fachexpertise einzuholen. Von der ZAMG wurde uns am 25. November 2013 ein Datensatz übermittelt, der für alle ÖWI-Punkte interpolierte Temperatur- und Niederschlagswerte für den Zeitraum von 1981 bis 2009 enthielt. Eine für unsere Zwecke geeignete Klimaprojektion in der geforderten Auflösung war nach Aussage der ZAMG zumindest zum damaligen Zeitpunkt nicht in der erforderlichen Zuverlässigkeit der Schätzwerte verfügbar. Es wurde uns daher von den Experten der ZAMG empfohlen, für eine Klimaprojektion von 2010 bis 2100 einen linearen Anstieg um $3,5^{\circ}\text{C}$ mit einer modellhaft ergänzten jährlichen Variation anzunehmen. Diese Annahmen entsprechen größenordnungsmäßig dem Klimaszenario RCP 8.5 (IPCC, 2013). Die monatlichen Niederschlagswerte wurden ebenfalls aus der Periode von 1981 bis 2009 übernommen und für die weitere Projektion zufällig miteinander kombiniert ohne eine Zu- oder Abnahme zu unterstellen (Abbildung 12).

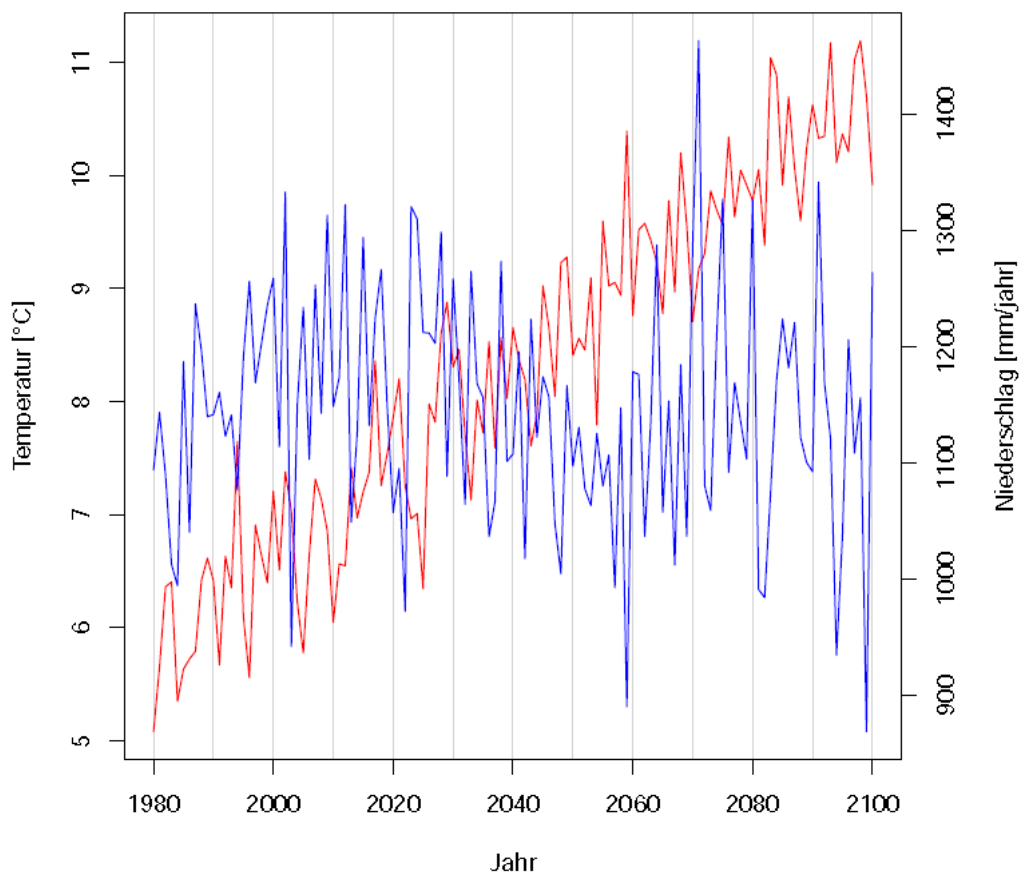


Abbildung 12: Temperatur- und Niederschlagsentwicklung des unterstellten Klimaszenarios.

4.3.3 Korrekturfaktoren für das Schaftholzvolumen

Die Ermittlung von Korrekturfaktoren war deshalb notwendig, weil die ÖWI bei der Berechnung der Baumvolumina den d_{03} (Durchmesser in $\frac{3}{10}$ der Baumhöhe) verwendet. Diese Volumsfunktionen konnten für das gegenständliche Projekt jedoch nicht verwendet werden, weil es kein Modell gibt, das die Veränderung des d_{03} im Zuge einer Simulation prognostiziert. Daher wurden die Schaftholzformzahlfunktionen von Pollanschütz (1974) bzw. Schieler (1988) verwendet, die ohne den d_{03} auskommen. Damit jedoch das Ausgangsvolumen für die nachfolgenden Simulationen mit dem von der ÖWI ausgewiesenen Volumen übereinstimmt, wurde für jeden Baum i ein Quotient qV aus dem d_{03} -Volumen der ÖWI und dem Formzahl-Volumen ($Volumen_{fz}$) berechnet:

$$qV_i = \frac{Volumen_{d_{03}}}{Volumen_{fz}} \quad (3)$$

Aus diesen baumindividuellen Quotienten wurden danach baumartenspezifische Mittelwerte berechnet und in das Simulationsprogramm implementiert.

4.3.4 Durchführung der Simulationsläufe

Für jedes Bewirtschaftungsszenario wurden mehrere Simulationsläufe durchgeführt und die Ergebnisse jeweils auf Plausibilität überprüft. Ein entscheidender Punkt im Simulationsablauf ist die Umsetzung der Nutzungen. Das in Kapitel 4.2.4 beschriebene Auszeigemodell sollte nicht die gesamte Nutzungsmenge bestimmen, sondern es sollte durch die Auswahl von potentiellen Aushiebskandidaten dabei helfen, eine von außen vorgegebene Nutzungsmenge (getrennt nach Vor- und Endnutzung) plausibel, d.h. unter Beachtung ökonomischer Rahmenbedingungen, auf die einzelnen Probeflächen der ÖWI zu verteilen. Wie dies im konkreten Fall umgesetzt wurde zeigt das in Abbildung 13 dargestellte Ablaufschema.

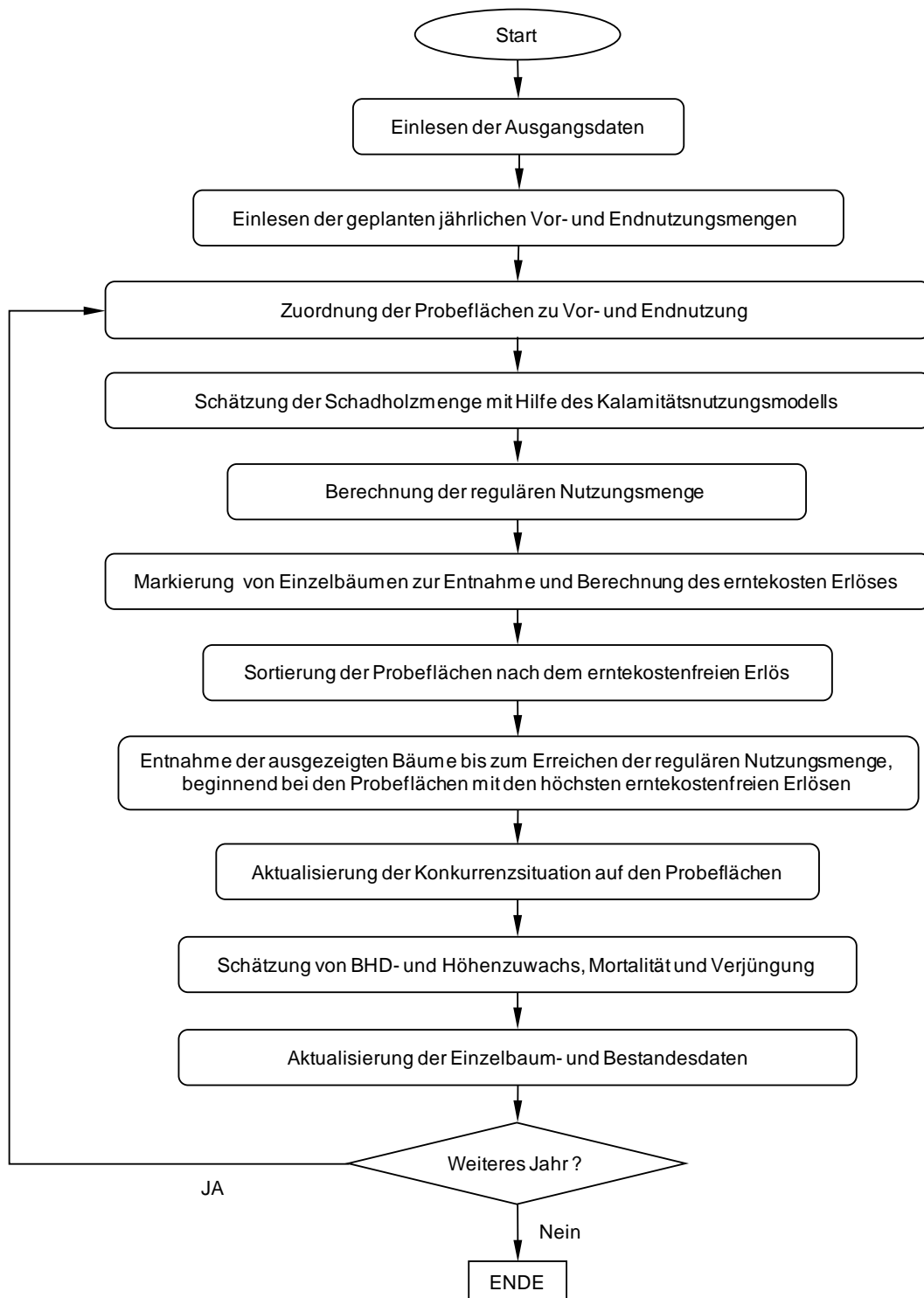


Abbildung 13: Ablaufschema eines Simulationslaufes im Waldwachstumssimulator CALDIS.

4.4 Arbeitspaket 4: Ermittlung der Kohlenstoffgehalte für die verschiedenen Szenarien

Für die Berechnung des gesamten ober- und unterirdischen Kohlenstoffgehalts musste zunächst von jedem Baum die Trockenmasse bestimmt werden. Zur Berechnung der Schaftholztrockenmasse wurde mit Hilfe der Schaftholzformzahlfunktionen von Pollanschütz (1974) bzw. Schieler (1988) das Schaftholzvolumen berechnet und dieses mit den Volumskorrekturfaktoren (siehe Kap. 4.3.3) korrigiert. Dieses Volumen wurde anschließend um das baumartenspezifische Schwundmaß reduziert und mit der Holzdichte multipliziert (Tabelle 4). Im nächsten Schritt wurde mit Hilfe der neu implementierten Biomassefunktionen (siehe Kap. 4.2.1) die Ast- und Nadelnadeln trockenmasse sowie die Wurzel trockenmasse für jeden Baum geschätzt. Für die Berechnung der Wurzel trockenmasse wurde für das Nadelholz eine Funktion von Wirth et al. (2004) und für das Laubholz eine Funktion nach Wutzler et al. (2008) verwendet. Diese Vorgangsweise wurde bei allen lebenden Bäumen angewendet. Bei toten Bäumen wurde angenommen, dass sich die Äste und Nadeln bereits auf dem Waldboden befinden. Die Ast- und Nadeln trockenmasse von stehenden toten Bäumen ist daher in diesen Berechnungen nicht inkludiert, sondern ist im Streufall bei der Modellierung der Bodenkohlenstoffdynamik berücksichtigt (siehe Kap. 4.5). In Gleichung 4 ist das Berechnungsschema für die Baum trockenmasse noch einmal übersichtlich zusammengefasst.

Tabelle 4: Kenngrößen zur Berechnung der Trockenmasse.

Baumart	Schwundmaß [%]	Holzdichte ρ [kg/m ³]
Fichte	11.8	410
Tanne	10.9	410
Lärche	13.2	550
Weißkiefer	11.8	510
Schwarzkiefer	11.8	560
Zirbe	9.0	400
Buche	17.5	680
Eiche	13.6	670
Hainbuche	18.8	750
Esche	13.2	670
Ahorn	11.7	590
Ulme	12.8	640
Edelkastanie	11.5	540
Robinie	11.8	730
Sorbus	18.6	620
Vogelkirsche	13.9	570
Birke	14.0	640
Schwarz- u. Weißerle	13.4	490
Linde	14.7	520
Weißpappel	11.9	450
Schwarz- u. Hybridpappel	12.5	410
Baumweide	9.6	520

$$TM = V_s \cdot \left(1 - \frac{\beta}{100}\right) \cdot \rho + ANTM + WTM \quad (4)$$

mit: TM ... Gesamte Baumtrockenmasse in kg
 V_s ... Schaftholzvolumen in m^3
 β ... Schwundmaß in %
 ρ ... Holzdichte in kg/m^3
 $ANTM$... Ast- und Nadelnadeln trockenmasse in kg
 WTM ... Wurzel trockenmasse in kg

Über die Inventurparameter der ÖWI wurde dann die Trockenmasse der Stichprobenbäume auf Hektarwerte bzw. auf das gesamte Bundesgebiet hochgerechnet. Unter Annahme eines Kohlenstoffgehalts von 50 % wurde anschließend die gesamte Trockenmasse (Biomasse) in Kohlenstoff umgerechnet und mit einem Faktor von 3,67 in CO_2 -Äquivalente konvertiert.

4.5 Arbeitspaket 5: Simulationsläufe Bodenkohlenstoff

Die Simulation des Pools des Bodenkohlenstoffes wurde mit dem Open-Source Programm Yasso07 (<http://code.google.com/p/yasso07ui/>; Liski et al. 2009) durchgeführt. Das Programm basiert auf einer Serie von Streuabbauversuchen, die weltweit durchgeführt worden sind. Die wesentlichsten Datenquellen sind das Long-Term Intersite Decomposition Experiment Team (LIDET; http://andrewsforest.oregonstate.edu/research/intersite/lidet/lidet_fresh.htm), das Canadian intersite decomposition experiment (CIDET; <https://cfs.nrcan.gc.ca/projects/76/7>) sowie europäische Streuabbauversuche (Berg et al., 1993). Insgesamt werden derzeit 20 000 Beobachtungen verwendet. Dabei wird definierte organische Substanz von verschiedenen Pflanzenkompartimenten im Boden oder an der Bodenoberfläche exponiert und deren Masseverlust über einen langen Zeitraum gemessen. Die Versuche decken einen weiten Bereich von klimatischen Standortsbedingungen ab (Abbildung 14).

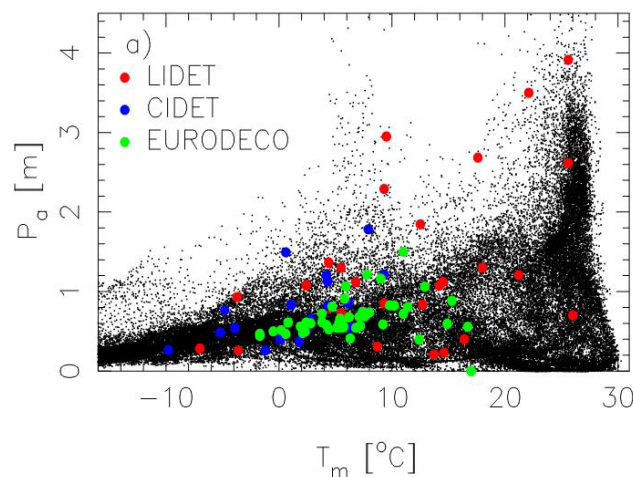


Abbildung 14: Klimatische Bedingungen (T Jahresmitteltemperatur, P Niederschlag) der Streuabbauversuche als Basis von Yasso07. Graphik aus Liski et al. (2009).

Yasso07 wird von Klimadaten und Streu-Eintragsdaten angetrieben (Abbildung 15). Die Herkunft der Klimadaten ist in Kapitel 4.3.2 beschrieben. Für jedes Jahr der Simulation wurden eine Niederschlagssumme, eine mittlere Temperatur und die Differenz zwischen dem kältesten und wärmsten Monat bereit gestellt. Yasso07 wird mit Klimadaten, die an einer Standard-Meteo-Station verfügbar sind, angetrieben, obwohl die Parameter Bodentemperatur und Bodenfeuchte den Abbau von organischer Substanz im Boden besser beschreiben könnten. Diese Entscheidung wurde von den Entwicklern von Yasso07 getroffen, um den Datenbedarf des Modells auf Parameter zu beschränken, die möglichst einfach verfügbar sind.

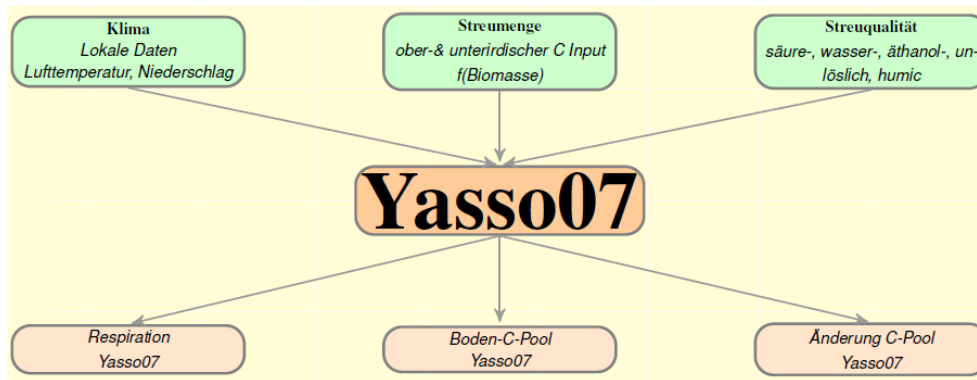


Abbildung 15: Schema des Boden-Kohlenstoffmodells Yasso07.

Yasso07 wird von mehreren Staaten für das Reporting der Treibhausgas-Emissionen nach den Kriterien des UNFCCC verwendet und ist ein Standard-Modul des Earth-System Models MPI-ESM 1.2 des Max-Planck-Instituts.

Der Streu-Input in den Boden wurde außerhalb von Yasso07 geschätzt. Als Ausgangsdaten dienen die Biomassen, die mittels CALDIS simuliert wurden (siehe Kapitel 4.4). Die Herausforderung bestand darin, die vom Modell vorgegebene Biomassendynamik konsistent abzubilden, sodass das Waldwachstum und die Nutzungseingriffe zu sinnvollen Kohlenstoff-Flüssen in den Boden führen. Die Aufgabe gliedert sich in

- (i) die Kohlenstoff-Flüsse, die in einem ungestörten Bestand auftreten,
- (ii) die Flüsse als Folge von Nutzungen (Durchforstungen, Endnutzungen), und
- (iii) die Flüsse infolge von Mortalität.

Der Boden empfängt organische Substanz aus der oberirdischen und unterirdischen Biomasse. Jährlich wird organische Substanz mit dem Nadel-/Laubfall und durch dürre Äste sowie durch absterbende Grob- und Feinwurzeln eingetragen.

Die chemische Qualität der eingetragenen Streu entscheidet über die Abbaugeschwindigkeit. Dazu wird jede Streuart nach ihrer Löslichkeit in Wasser, Äthanol und Säure charakterisiert, wodurch die im Gelände unterscheidbaren Streuarten in chemischen Gruppen zusammengefasst werden. Zwischen den chemischen Gruppen kommt es im Zuge des Abbaus der organischen Substanz zu Kohlenstoff-Flüssen, indem zunehmend langsam abbaubare Stoffgruppen verbleiben und CO₂ und einfache Stoffgruppen wie etwa Zucker freigesetzt wird (Abbildung 16). Die von Yasso07 unterstellten chemischen Fraktionen wurden bekannten Molekül-Typen zugeordnet. Bei der Fraktionierung der organischen Substanz handelt es sich um ein Standard-Protokoll der Holztechnologie. Dem Benutzer von Yasso07 steht eine Datenbank zur Verfügung, aus der die Charakteristika der bearbeiteten Baumart entnommen werden können.

Die Abbaugeschwindigkeit hängt auch von der Größe der organischen Substanz ab. Als Durchmesser für Feinstreu wurde standardmäßig 0 cm angenommen. Der Grobstreu wurde ein Durchmesser von 1 cm zugeordnet. Der bei der Nutzung im Boden verbleibende Stock wurde mit der Größe des BHD angesetzt.

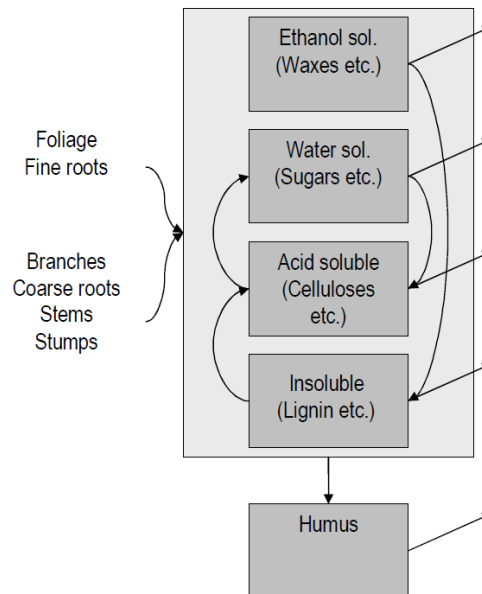


Abbildung 16: Kohlenstoff-Flüsse zwischen chemisch definierten Streu-Fractionen und Bildung von CO₂ im Zuge des Abbaus der organischen Substanz des Bodens.

Eine Herausforderung war die Bewältigung der Datenmenge. Das Programm CALDIS geht von den Eingaben einer Winkelzählprobe aus. Dabei wird jedem erfassten Baum eine Kohorte von Stämmen zugeordnet, die er aufgrund seines Durchmessers und seiner Baumart repräsentiert. Bei der Simulation des Bestandeswachstums wird die Kohorte zunehmend anderen Gruppen zugeordnet, wenn der simulierte Baum weiterwächst, genutzt wird oder abstirbt. Entsprechend legt CALDIS die Baumdimensionen für jedes Jahr der Simulation in folgenden Ordnern ab:

- Natürlicher Abgang ('NatAbgang')
- Endnutzung ('EN')
- Vornutzung ('VN')
- Zufallsnutzung ('Zufallsnutzung')
- Verbleibender Bestand ('Verb')

Die Dateien unterscheiden sich lediglich in der Ausprägung der Variablen der repräsentierenden Stammzahl (Nrepjeha). CALDIS liefert für jede Baumkohorte einen Durchmesser, eine Höhe und ein Stammvolumen waldfischem Zustand. Daraus wurde die Trockenmasse des Stammes und der Wurzeln unter Berücksichtigung von Konversionsfaktoren verwendet (Ledermann & Neumann, 2006, Eckmüllner 2006, Offenthaler & Hochbichler, 2006). Die Kohlenstoffmasse wurde errechnet, indem ein C-Gehalt der organischen Substanz von 50% angenommen wurde.

Um die Biomassen in Streuflüsse umzurechnen wurden baumartenspezifische Zeiten des Rückhaltes von Nadeln und Blättern angenommen. Unabhängig von der Baumart wurde angenommen, dass Feinwurzeln 0.9 Jahre lang leben. Dieser Umsatz ist durch Angaben von Brunner et al. (2013) gestützt. Zudem wurde angenommen, dass Bäume jährlich 3% der Äste und Grobwurzeln verlieren.

Im vorliegenden Projekt wurde der Bodenkohlenstoffpool für jeden Punkt der Waldinventur simuliert. Alternativ könnte der Datensatz stratifiziert werden und es könnte für verschiedene Regionen nur eine Simulation durchgeführt werden.

Yasso07 bietet verschiedene Möglichkeiten, mit der Unsicherheit der Input-Daten umzugehen. Die Standardabweichung des Streufalls bzw. die Standardabweichung der Koeffizienten AWENH (Tabelle 5) kann angegeben werden. Da unsere Bestandeswachstumssimulation ein eindeutiges Ergebnis ohne Streuungsangaben weitergibt und da die chemische Charakterisierung der verschiedenen Streugruppen mittels Datenbankangaben vorgenommen wurde, war die Berücksichtigung von Streuungskomponenten der Input-Parameter nicht sinnvoll.

Eine weitere Quelle der Unsicherheit bilden die Modell-Parameter. Diese Unsicherheit kann berücksichtigt werden, indem Yasso07 für jeden Standort und für jedes Jahr mehrfach aufgerufen wird. Wird das Programm nur einmal exekutiert, wird der beste Schätzer eines Parameters verwendet. Je größer die Anzahl der Simulationsläufe ist, desto öfter werden aus einer Matrix von möglichen Parametern Werte genommen, die weniger wahrscheinlich dem wahren Parameterwert entsprechen. Somit ist die Unsicherheit des Modells bei der Verwendung von Yasso07 leicht zu berücksichtigen (Tuomi, 2009). Im vorliegenden Projekt wurde jede Simulation 10 Mal wiederholt.

Da die Eingangsdaten für Yasso07 aus den Waldinventurdaten stammen, ist der Einfluss von Sträuchern und der krautigen Vegetation auf den Streufall nicht berücksichtigt. Für Bestände mit einer offenen Bestandesstruktur ist daher mit einer Unterschätzung des Streufalles zu rechnen.

Das Beispiel einer Output-Datei ist in Tabelle 6 gegeben. Der gesamte Kohlenstoffpool des Bodens ist angeführt. Einerseits ist er gegliedert in Holz- und Nicht-Holzbestandteile, außerdem ist er gegliedert nach den chemischen Fraktionen aus Abbildung 16. Es wird deutlich, dass im Boden die unlösliche Fraktion und der Humus dominieren, während es in der Streu (Tabelle 5) die verschiedenen löslichen Fraktionen gewesen sind.

Tabelle 6: Beispieldatensatz für ein Output – File von Yasso07. Sample beschreibt die Realisierung der Wiederholung der Simulation. Der Kohlenstoffpool des Bodens ist für verschiedene Fraktionen in t C / ha angegeben.

sample	Jahr der Simulation	Gesamter Kohlenstoffpool des Bodens		Nicht-holz im Boden	Säure-löslich	Wasser-löslich	Äthanol-löslich	Un-löslich	Humus
		Holz im Boden	Holz im Boden						
0	0	33,60	0,013	33,59	2,88	0,38	0,37	14,94	15,04
0	1	33,64	0,013	33,63	2,90	0,38	0,32	15,01	15,04
0	2	33,61	0,013	33,60	2,89	0,38	0,29	15,03	15,04
0	3	33,79	0,013	33,78	2,98	0,39	0,28	15,11	15,04
0	4	33,89	0,014	33,87	3,00	0,39	0,27	15,18	15,04
0	5	34,19	0,014	34,18	3,13	0,41	0,28	15,33	15,04
0	6	34,44	0,014	34,42	3,20	0,42	0,29	15,48	15,05
0	7	35,00	0,014	34,99	3,43	0,45	0,31	15,76	15,05
0	8	35,24	0,014	35,23	3,45	0,45	0,31	15,97	15,06
0	9	35,46	0,014	35,44	3,45	0,45	0,31	16,17	15,07
0	10	35,82	0,014	35,81	3,54	0,46	0,32	16,42	15,08
0	11	36,31	0,014	36,30	3,68	0,48	0,34	16,72	15,09
0	12	36,75	0,014	36,73	3,78	0,49	0,35	17,02	15,10
0	13	37,29	0,020	37,27	3,92	0,51	0,36	17,38	15,12
0	14	37,60	0,020	37,58	3,91	0,51	0,36	17,67	15,14
0	15	38,56	0,020	38,54	4,28	0,56	0,40	18,17	15,15

Der Output von Yasso07 unterscheidet sich in zweifacher Hinsicht von den Erhebungen einer klassischen bodenkundlichen Erhebung:

- Holz/Nicht-Holz: Die Unterscheidung wird in Yasso07 eingeführt um den Output sinnvoll zu stratifizieren. Bei einer bodenkundlichen Untersuchung würden der Kohlenstoffvorrat des Auflagehumus und der des Mineralbodens unterschieden werden.
- Bodenhorizonte: Da von Yasso07 der gesamte Kohlenstoff-Fluss zum Boden als Input verarbeitet wird, umfasst das Ergebnis den gesamten Kohlenstoff des Bodens einschließlich des Totholzes am Boden. Bei einer klassischen bodenkundlichen Untersuchung würde der Kohlenstoff-Pool bis zu einer im Beprobungsprotokoll festgelegten Profiltiefe erhoben werden. Es wird damit unterstellt, dass die organische Substanz im oberen Teil des Bodens leichter abbaubar ist als die im Unterboden.

Das Ergebnis einer Simulation muss kritisch betrachtet werden, da jedes Modell eine mehr oder weniger zulässige Vereinfachung der Realität ist. Diskutierte Vereinfachungen von Yasso07, die einen beträchtlichen Einfluss auf das Simulationsergebnis haben sind:

- Die Rolle der Stickstoffversorgung eines Bestandes wird nicht explizit berücksichtigt.
- Standortmerkmale wie Oberhang/Unterhang, Exposition werden nicht berücksichtigt.
- Die Vorgeschichte eines Bestandes (Vorbestand, Nährstoffmanagement) wird nicht explizit berücksichtigt.
- Bekannte Prozesse der Stabilisierung von Bodenkohlenstoff wie Bindung an Bodenoxide und Tonminerale werden nicht berücksichtigt.
- Der Bodenkohlenstoffpool am Beginn der Simulation wird bei der Verwendung des Modells im Steady-State-Modus nicht berücksichtigt.

Die oben gelisteten Eigenheiten von Yasso07 werden kontrovers diskutiert. An dieser Stelle wird argumentiert, dass die Stickstoffversorgung genauso wie Bestandesmerkmale und Nachwirkungen der früheren Bewirtschaftung in der Flussdichte des ober- und unterirdischen Streufalls manifestiert sind. Dennoch zeigt die Erfahrung, dass durch Yasso07 die zeitliche Veränderung des Bodenkohlenstoffpools besser abgebildet wird als der tatsächliche Bodenkohlenstoffpool.

Da bei der Abschätzung der künftigen Größe des Bodenkohlenstoffpools die Referenzdaten fehlen, muss die Verifizierung der Modellergebnisse gutachterlich erfolgen. Im vorliegenden Projekt wurde die Plausibilität der Ergebnisse auf der Grundlage der Daten der Österreichischen Waldbodenzustandsinventur hinterfragt.

5. Ergebnisse

5.1 Holzeinschlagsmengen nach Sortimenten

Die Holzeinschlagsmengen variieren je nach Szenario zwischen 18,8 und 27,6 Mio. Erntefestmetern (Efm). Die höchsten Mengen ergeben sich beim Szenario 1b, das einen gesteigerten Einschlag wegen forcierter stofflicher Nutzung vorsieht. Zu Beginn des Simulationszeitraumes liegt der Einschlag des Energieszenarios (1a) über allen anderen Szenarien, fällt jedoch ab 2040 hinter die Szenarien 1b und 1c zurück. Nach 2090 fällt die Holzeinschlagsmenge des Energieszenarios abrupt ab und liegt unter der Menge von allen anderen Szenarien. Dieser plötzliche Rückgang ist darauf zurückzuführen, dass die nachgefragte Laubholzmenge nicht mehr bereitgestellt werden kann. Die geringsten Holzeinschlagsmengen ergeben sich beim Szenario 2, das eine reduzierte Nutzung aufgrund von Nutzungseinschränkungen und Außer-Nutzung-Stellung von Waldflächen vorsieht (Abbildung 17).

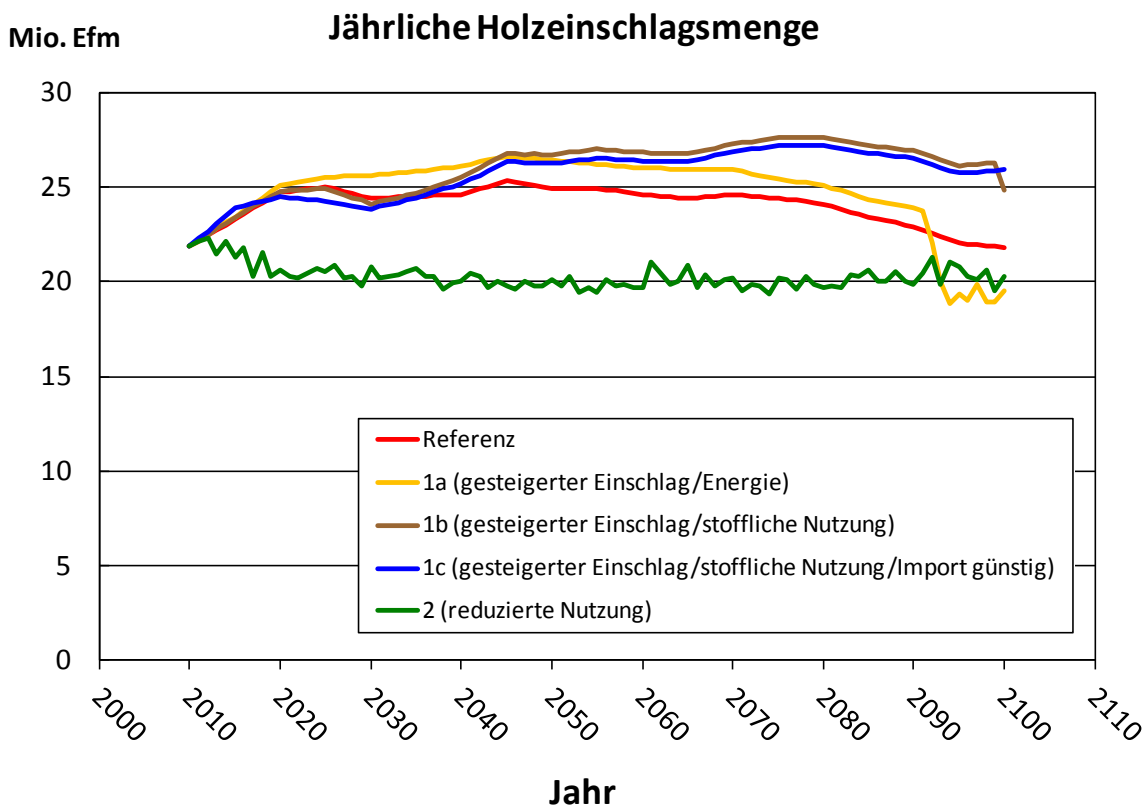


Abbildung 17: Entwicklung der geschätzten jährlichen Holzeinschlagsmengen nach Bewirtschaftungsszenarien getrennt.

Betrachtet man die Entwicklung der Holzeinschlagsmengen getrennt für das Laub- und Nadelholz, so zeigt sich, dass der Nadelholzeinschlag bei allen Szenarien von ca. 17,5 auf 20 Mio. Efm ansteigt und über einen längeren Zeitraum je nach Szenario knapp über oder knapp unter diesem Wert liegt. Erst ab dem Jahr 2060 geht bei den Szenarien R, 1a und 2 der Nadelholzeinschlag langsam zurück und erreicht am Ende des Simulationszeitraumes wieder den Ausgangswert von etwa 17,5 Mio. Efm. Bei den Szenarien 1b und 1c bleibt er dagegen im Bereich von 20 Mio. Efm. Beim Laubholzeinschlag liegen mit Ausnahme von Szenario 2 alle anderen Szenarien zunächst knapp unter und ab dem Jahr 2030 knapp über 5 Mio. Efm. Zu einem deutlich reduzierten Laubholzeinschlag kommt es dagegen beim Szenario 2. Hier sinkt der Wert bis zum Jahr 2020 auf ca. 1 Mio. Efm ab und bleibt bis 2080 etwa auf diesem Niveau. Erst danach steigt Laubholzeinschlag wieder leicht an und erreicht am Ende des Simulationszeitraumes einen Wert von rund 3 Mio. Efm. Somit wirkt sich die in Szenario 2 vorgesehene Nutzungsreduktion und Außer-Nutzung-Stellung von Waldflächen fast ausschließlich auf den Laubholzeinschlag aus (Abbildung 18). Die Entwicklung von Vor- und Endnutzungsmenge ist in Abbildung 19 dargestellt.

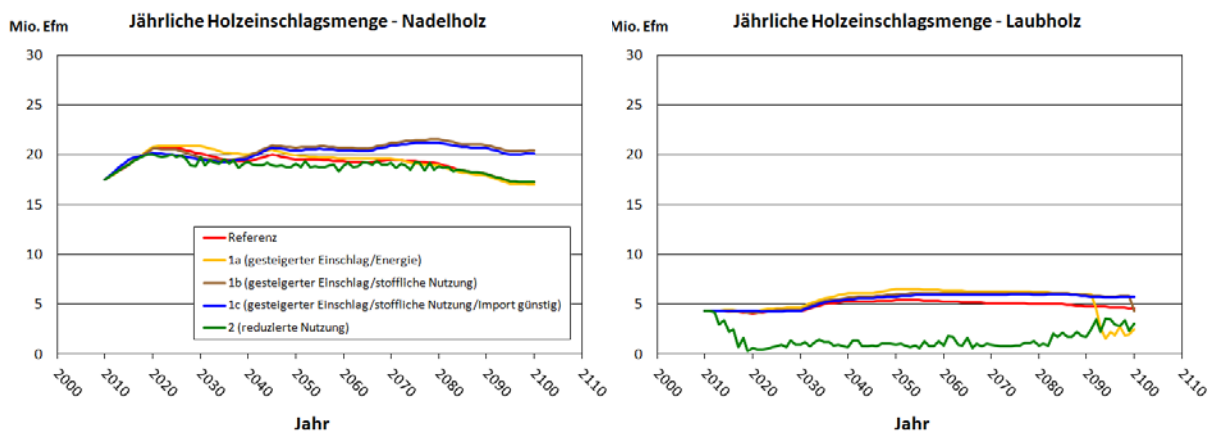


Abbildung 18: Entwicklung der geschätzten jährlichen Holzeinschlagsmengen nach Bewirtschaftungsszenarien für die Sortimente Laub- und Nadelholz.

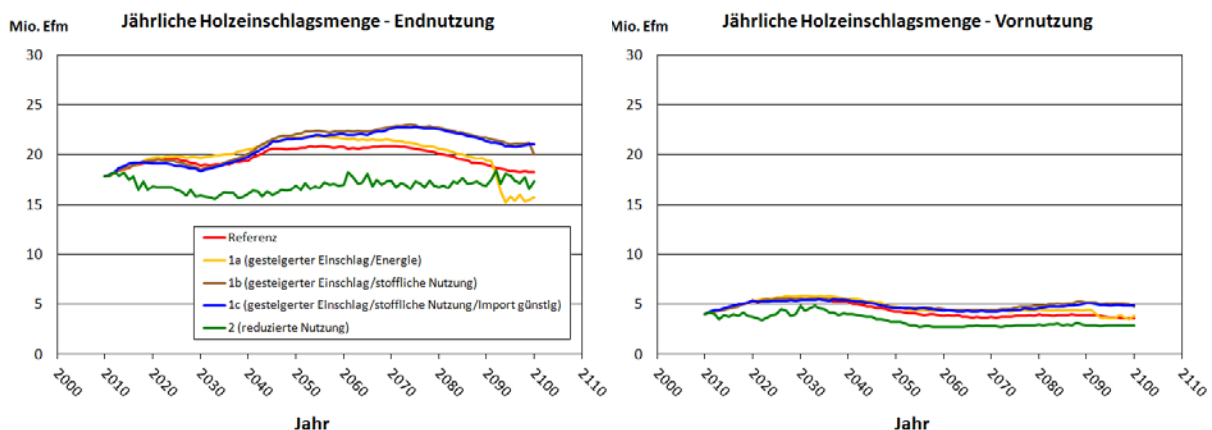


Abbildung 19: Entwicklung der geschätzten jährlichen Holzeinschlagsmengen nach Bewirtschaftungsszenarien für Vor- und Endnutzung getrennt.

5.2 Vorratsentwicklung

Die Simulationsrechnungen zeigen, dass der Vorrat bei vier der fünf Szenarien im Vergleich zum Ausgangsvorrat im Jahr 2010 abnimmt (Abbildung 20). Der niedrigste Vorrat am Ende des Simulationszeitraumes ergibt sich, wenn der Einschlag wegen forcierter stofflicher Holzverwendung deutlich erhöht wird (Szenario 1b). Bei der forcierten Bereitstellung von Energie aus forstlicher Biomasse (Szenario 1a) nimmt der Vorrat anfangs noch stärker ab. Am Ende des Simulationszeitraumes kann aber die benötigte Laubholzmenge nicht mehr geliefert werden, sodass der Vorrat wieder ansteigt. Im Szenario 2 (Nutzungseinschränkungen und Außer-Nutzung-Stellung von Waldflächen) kommt es dagegen zu einem Vorratsaufbau mit einem mittleren jährlichen Anstieg von 1,2 Vorratsfestmeter Schaftholz pro ha (VfmS/ha). Im Vergleich dazu beträgt der zwischen 1981 und 2009 im Rahmen der ÖWI beobachtete mittlere jährliche Vorratsanstieg rund 2,3 VfmS/ha. Allerdings ist der in Szenario 2 simulierte Vorratsanstieg ausschließlich auf eine Zunahme des Laubholzvorrats zurückzuführen, da sich die in diesem Szenario umgesetzte Nutzungsreduktion fast ausschließlich auf den Laubholzeinschlag auswirkt (Abbildung 18). Der Nadelholzvorrat nimmt im Szenario 2 – so wie in den anderen Szenarien – ab (Abbildung 21). Die Ursache für diesen Rückgang im Laubholzeinschlag liegt darin, dass die Probestellen mit den höchsten erntekostenfreien Erlösen bevorzugt genutzt werden (siehe Kap. 4.2.4). Da unter den gegebenen Rahmenbedingungen Laubholzbestände im Durchschnitt niedrigere erntekostenfreie Erlöse aufweisen, werden Nutzungen eher in Nadelholzbeständen als in Laubholzbeständen durchgeführt.

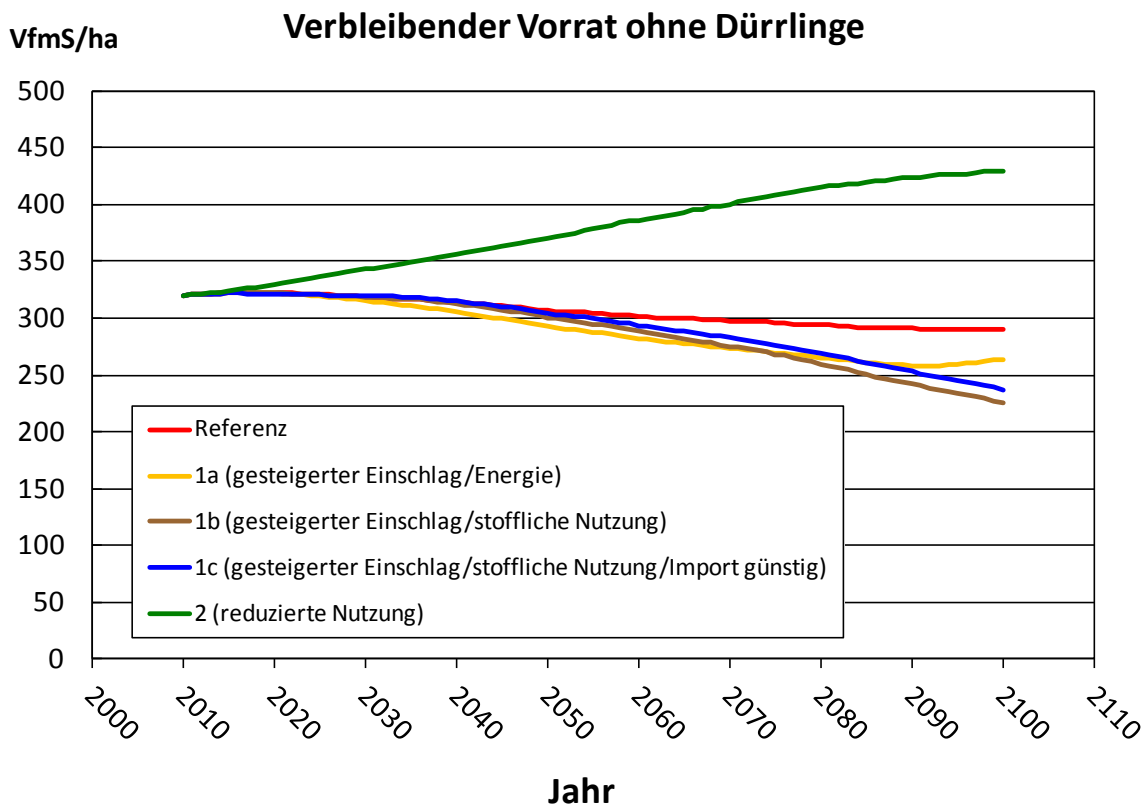


Abbildung 20: Simulierte Vorratsentwicklung nach Bewirtschaftungsszenarien getrennt.

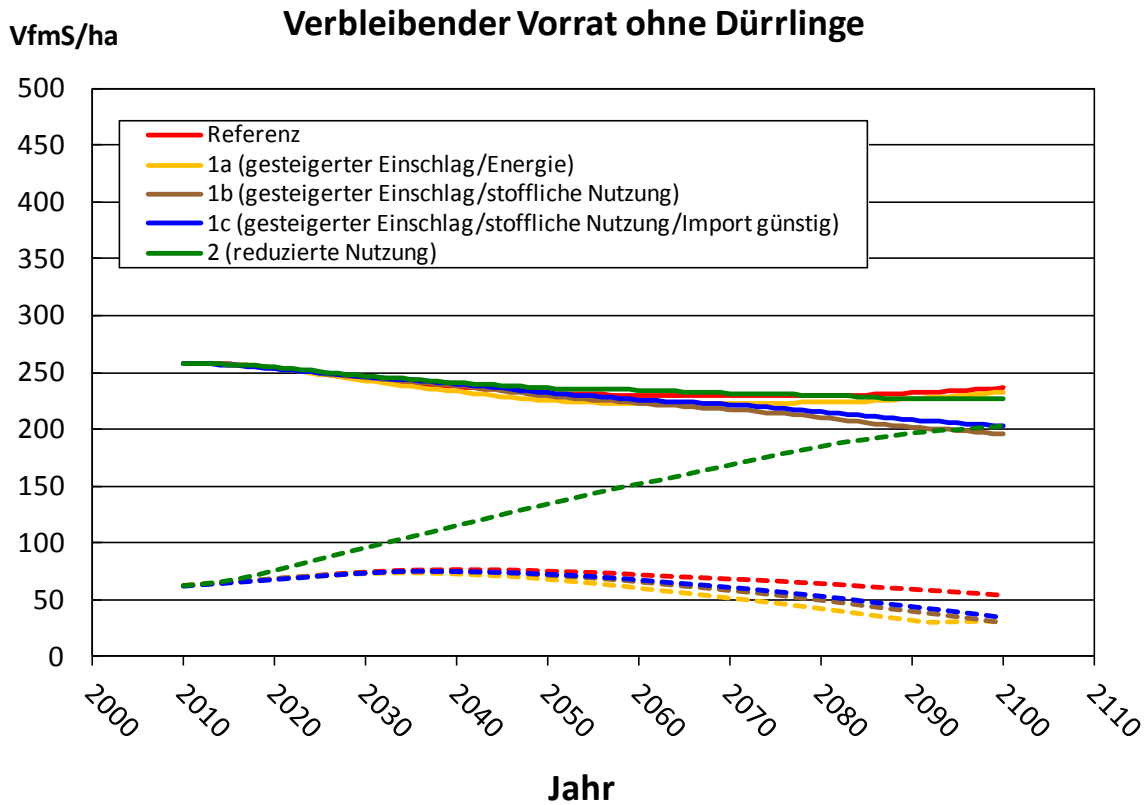


Abbildung 21: Simulierte Vorratsentwicklung für alle Bewirtschaftungsszenarien. Durchgezogene Linien = Nadelholz; strichlierte Linien = Laubholz.

5.3 Zuwachsentwicklung

Der jährlich laufende Zuwachs ist in Abbildung 22 dargestellt. Mit Ausnahme von Szenario 2 zeigt der Zuwachs bei allen Szenarien von Beginn an einen leichten Abwärtstrend. Er verringert sich von 9,4 VfmS/ha/Jahr im Jahr 2010 auf 8,8 VfmS/ha/Jahr im Referenzszenario bzw. auf 8,3 VfmS/ha/Jahr im Szenario 1c. Im Szenario 2 dagegen steigt der Zuwachs bis zu den Jahren 2060 bzw. 2070 auf knapp über 10 VfmS/ha/Jahr an und nimmt dann bis zum Ende des Simulationszeitraumes wieder etwas ab. Mit einem Wert von 9,6 VfmS/ha/Jahr am Ende des Simulationszeitraumes liegt der Zuwachs in Szenario 2 knapp über dem Ausgangsniveau des Jahres 2010.

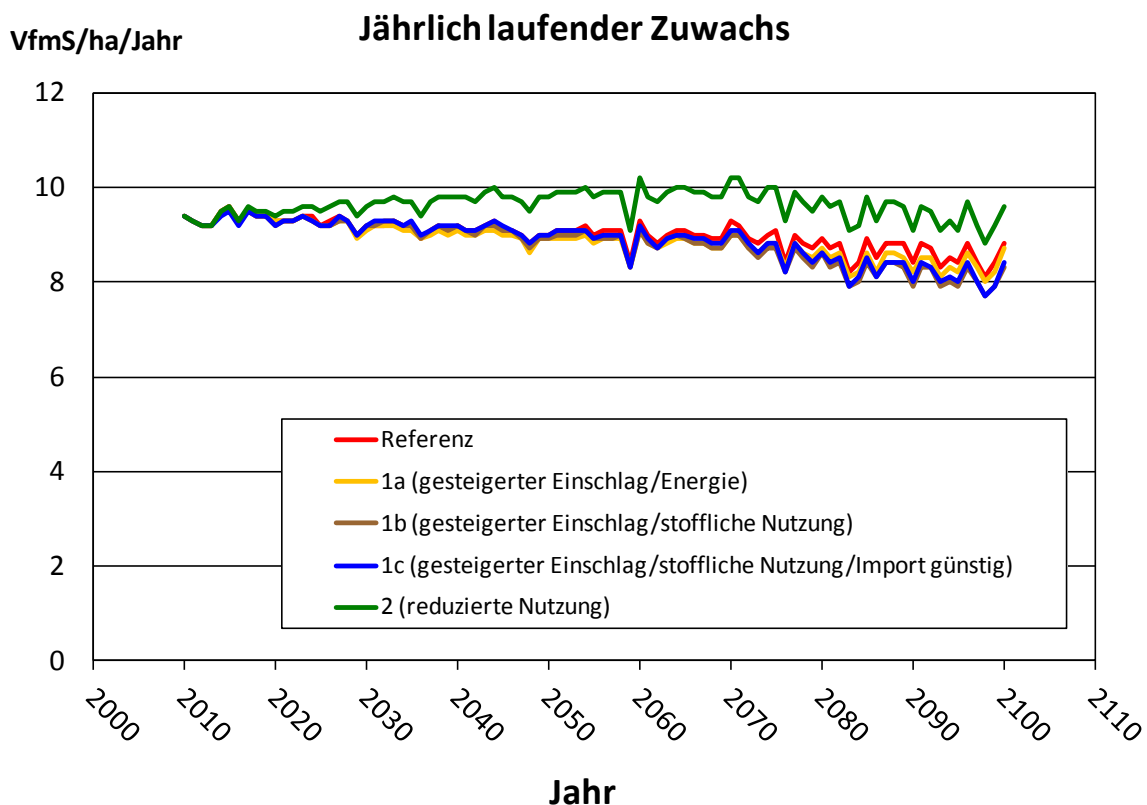


Abbildung 22: Jährlich laufender Zuwachses nach Bewirtschaftungsszenarien getrennt.

5.4 Entwicklung des Totholzvorrats

Der simulierte Vorrat an stehendem Totholz erhöht sich bis zum Jahr 2040 in allen Szenarien um rund 5 VfmS/ha. Danach gibt es unterschiedlich Entwicklungen. Im Szenario 2 steigt der Totholzvorrat weiter an und erreicht am Ende des Simulationszeitraumes seinen Höchststand. Im Szenario R stagniert zunächst der Totholzvorrat bis etwa 2080 bei rund 15 VfmS/ha und steigt danach noch geringfügig an. Im Szenario 1a nimmt der Totholzvorrat zwischen 2050 und 2080 leicht ab und steigt danach wieder an. Alle diese Szenarien (R, 1a, 2) erreichen den höchsten Totholzvorrat am Ende des Simulationszeitraumes. Im Gegensatz dazu haben die Szenarien 1b und 1c ihren höchsten Totholzvorrat um das Jahr 2050. Danach geht in diesen Szenarien der Totholzvorrat wieder zurück (Abbildung 23).

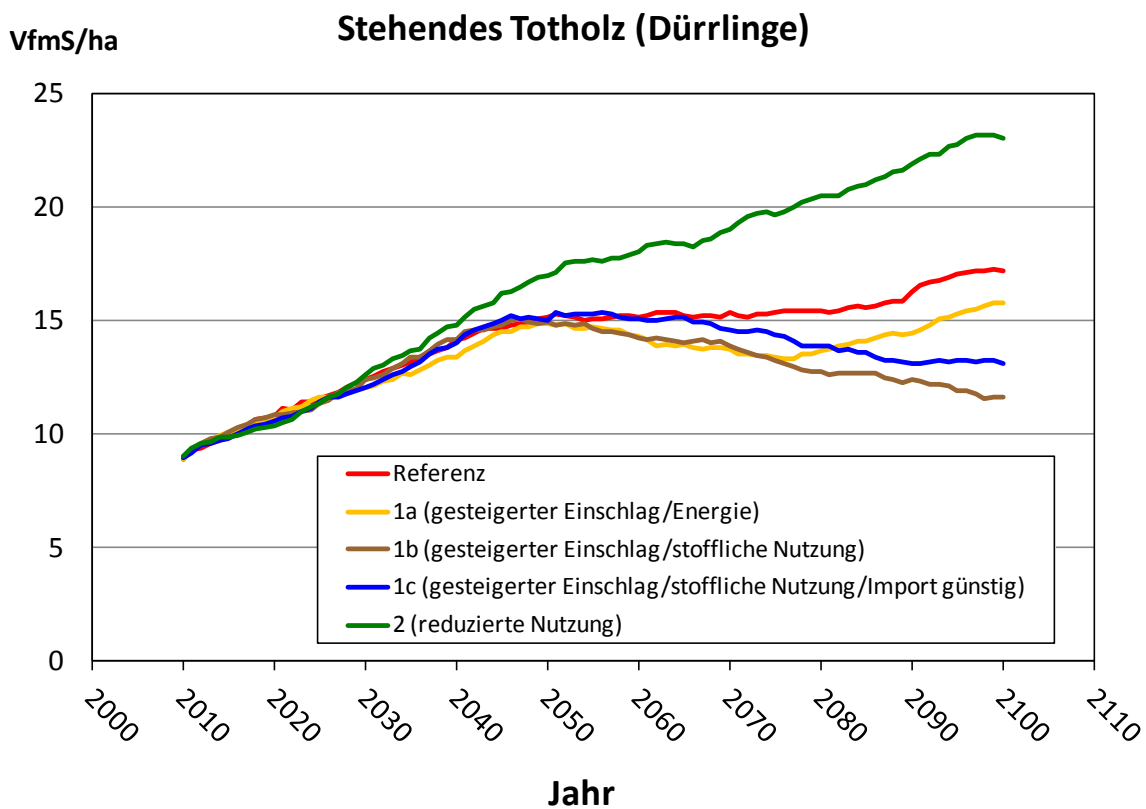


Abbildung 23: Simulierte Entwicklung des Totholzvorrates.

5.5 Abschätzung der Schadhohlmengen in den Szenarien

Die simulierte Schadhohlmenge variiert je nach Szenario und Simulationsjahr zwischen 1.4 und 5.2 Mio. Erntefestmetern. Die Unterschiede zwischen den Szenarien sind bis zum Jahr 2060 eher gering. Danach ergibt sich für das Szenario 2 eine etwas höhere Schadhohlmenge. Auch für das Referenzszenario ergibt sich ab 2080 ein leichter Anstieg (Abbildung 24).

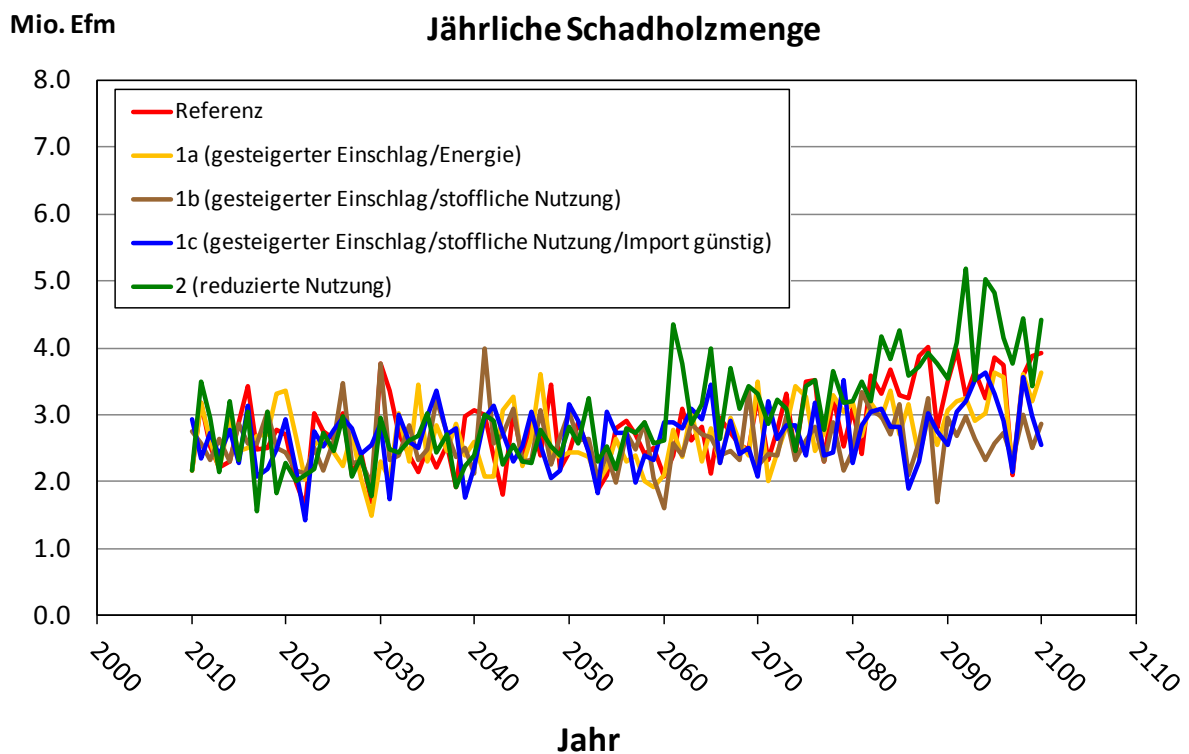


Abbildung 24: Simulierte Entwicklung der jährlichen Schadhohlmenge.

5.6 Altersklassenstruktur

Die Altersklassenverteilungen aller Szenarien sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Mit Ausnahme von Szenario 2 nimmt die Fläche in den ersten drei Altersklassen (bis 60 Jahre) in allen Szenarien zu. Im Bereich zwischen 60 und 140 Jahren nimmt die Fläche dagegen ab. Die stärkste Abnahme ist hier in der Klasse von 80 bis 100 Jahren zu beobachten. In der höchsten Altersklasse (über 140 Jahre) kommt es in allen Szenarien zu einer deutlichen Flächenzunahme. Bei diesen Flächen handelt es sich überwiegend um Althölzer in Bringungslagen, die für eine kostendeckende Holzernte ungünstig sind und/oder die durch einen höheren Laubholzanteil geringere Deckungsbeiträge (erntekostenfreie Erlöse) ergeben. Durch die reduzierte Nutzung im Szenario 2 ist dieser Trend noch deutlicher ausgeprägt (Abbildung 29). Durch die verringerte Endnutzung nimmt im Szenario 2 auch die Fläche in der 2. und 3. Altersklasse nicht zu sondern geringfügig ab.

Fläche [ha]

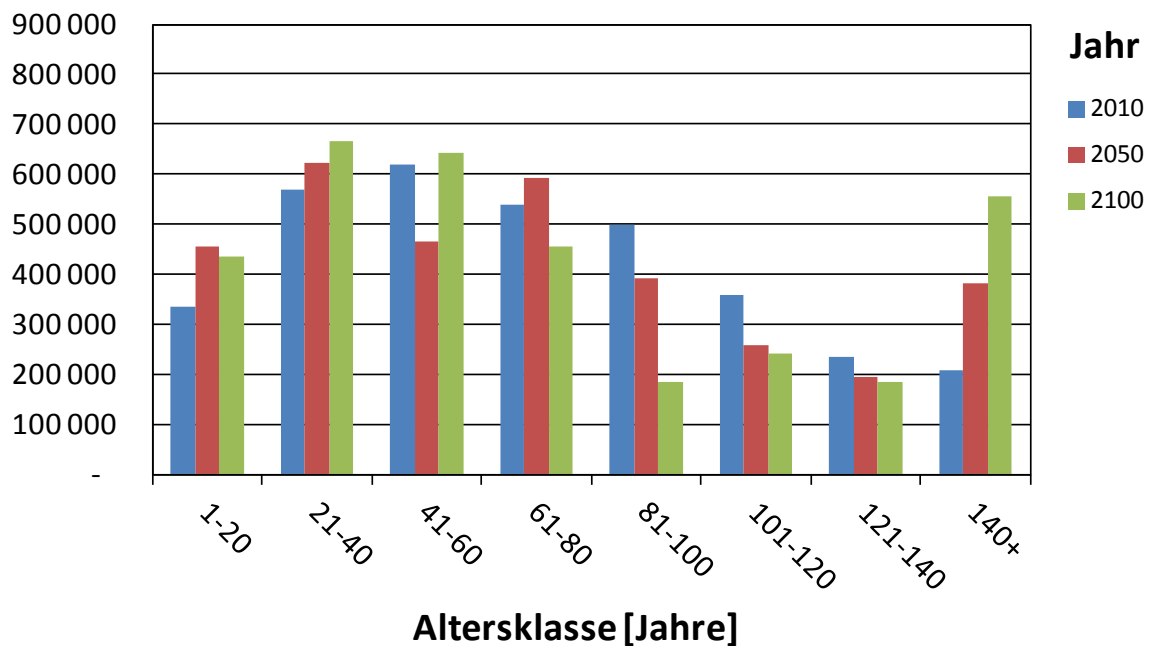


Abbildung 25: Altersklassenverteilung für das Referenzszenario zu Beginn, in der Mitte und am Ende des Simulationszeitraumes.

Fläche [ha]

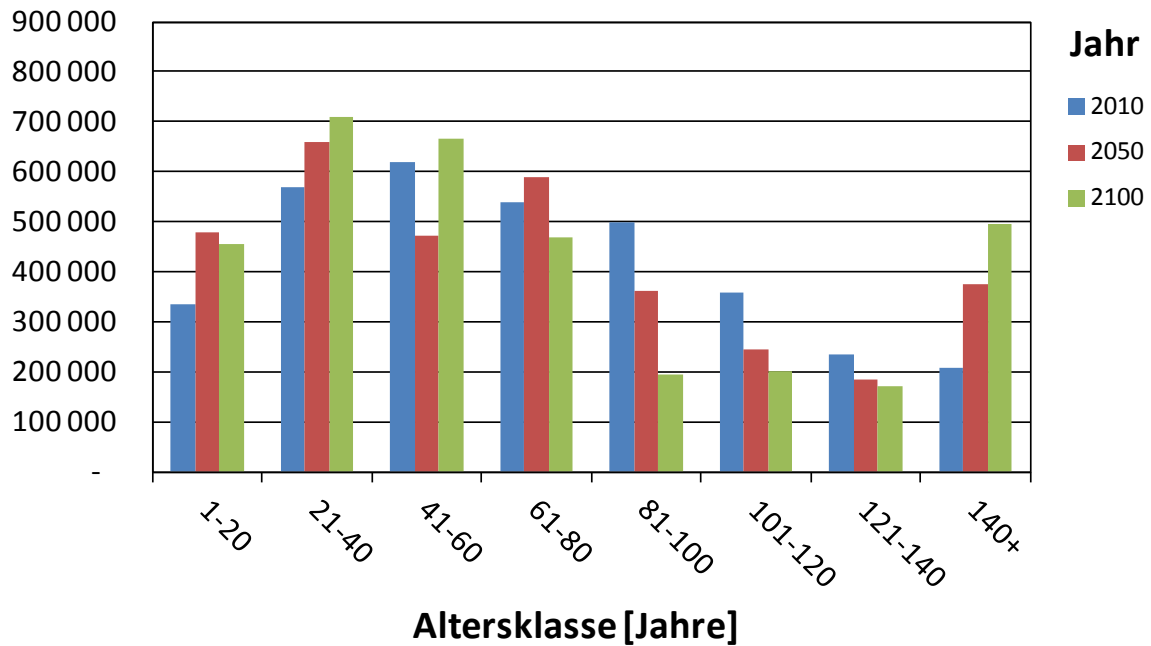


Abbildung 26: Altersklassenverteilung für das Szenario 1a zu Beginn, in der Mitte und am Ende des Simulationszeitraumes.

Fläche [ha]

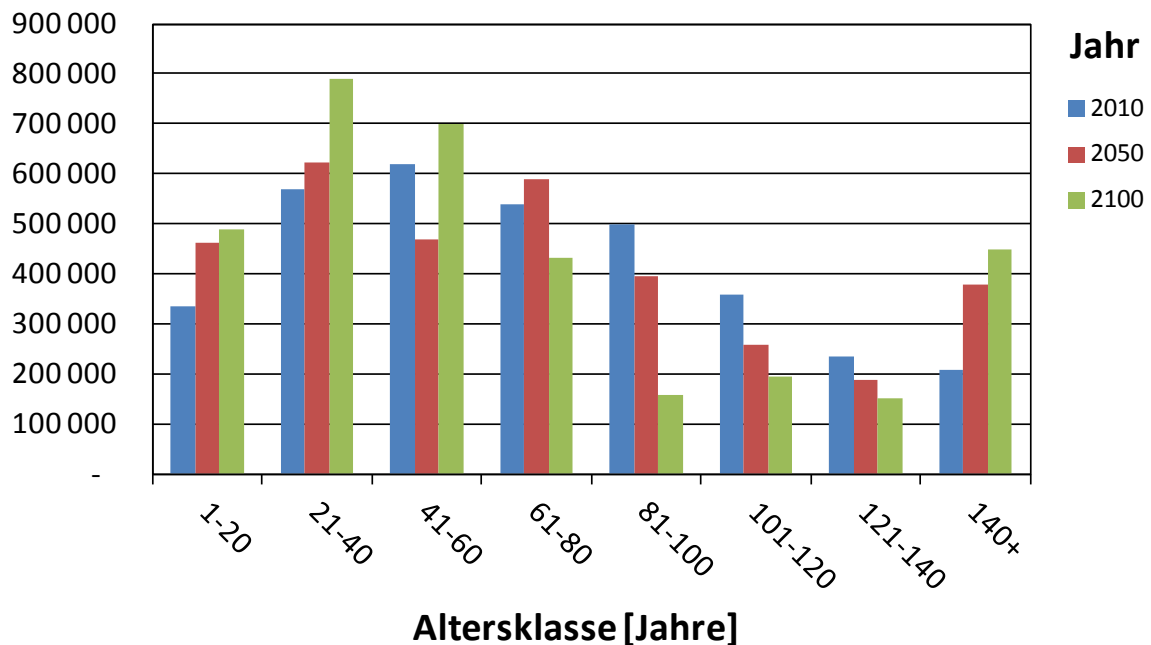


Abbildung 27: Altersklassenverteilung für das Szenario 1b zu Beginn, in der Mitte und am Ende des Simulationszeitraumes.

Fläche [ha]

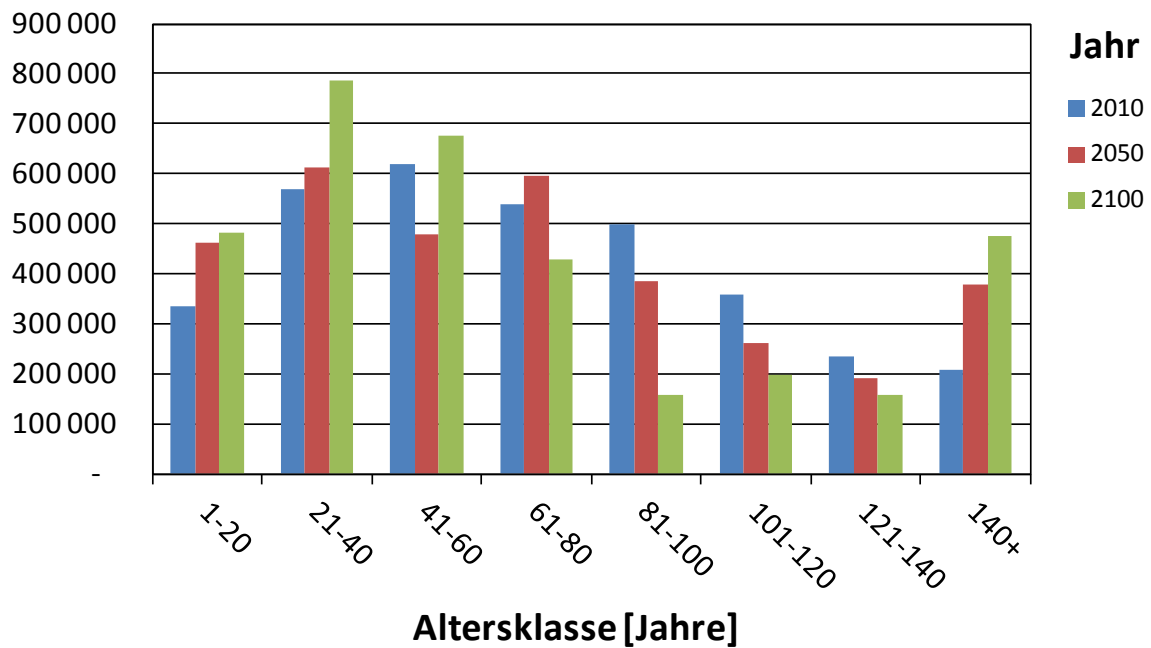


Abbildung 28: Altersklassenverteilung für das Szenario 1c zu Beginn, in der Mitte und am Ende des Simulationszeitraumes.

Fläche [ha]

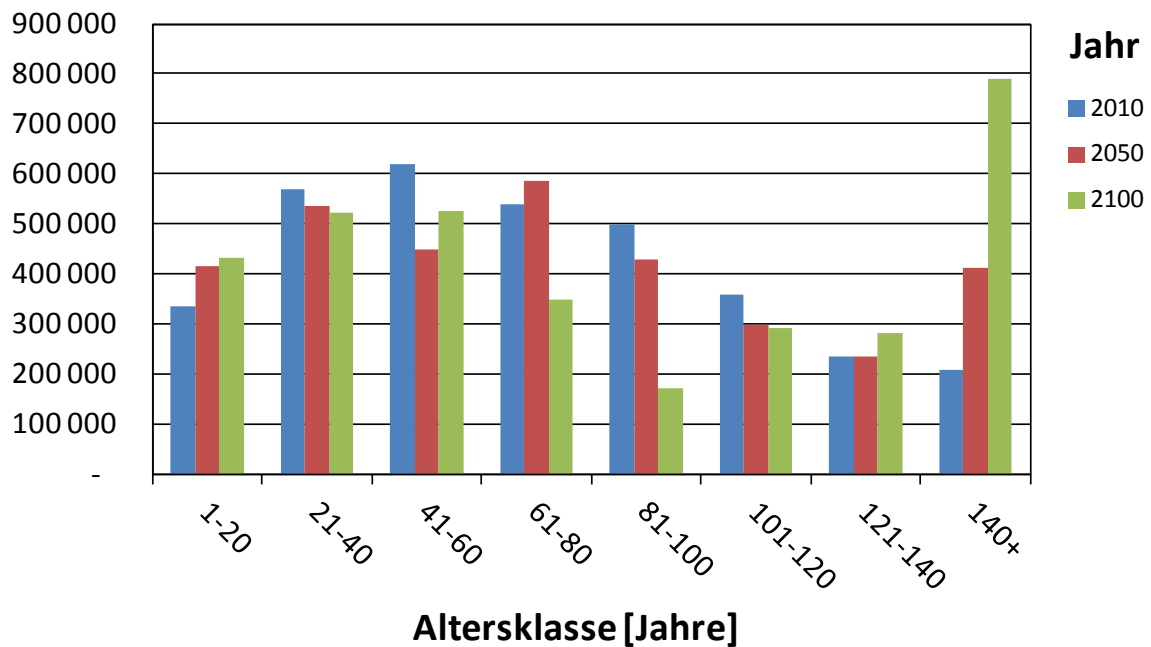


Abbildung 29: Altersklassenverteilung für das Szenario 2 zu Beginn, in der Mitte und am Ende des Simulationszeitraumes.

5.7 Baumartenzusammensetzung

Die Baumartenverteilung ist in Abbildung 30 dargestellt. Die gravierendste Änderung ergibt sich für das Szenario 2, wo das Laubholz im Jahr 2100 fast die Hälfte des gesamten Vorrats ausmacht. Der Grund für die Zunahme des Laubholzes liegt in der reduzierten Nutzung und in der Art und Weise wie die einzelnen Probeflächen für die Nutzung ausgewählt werden (siehe Kap. 4.2.4 bzw. 5.2).

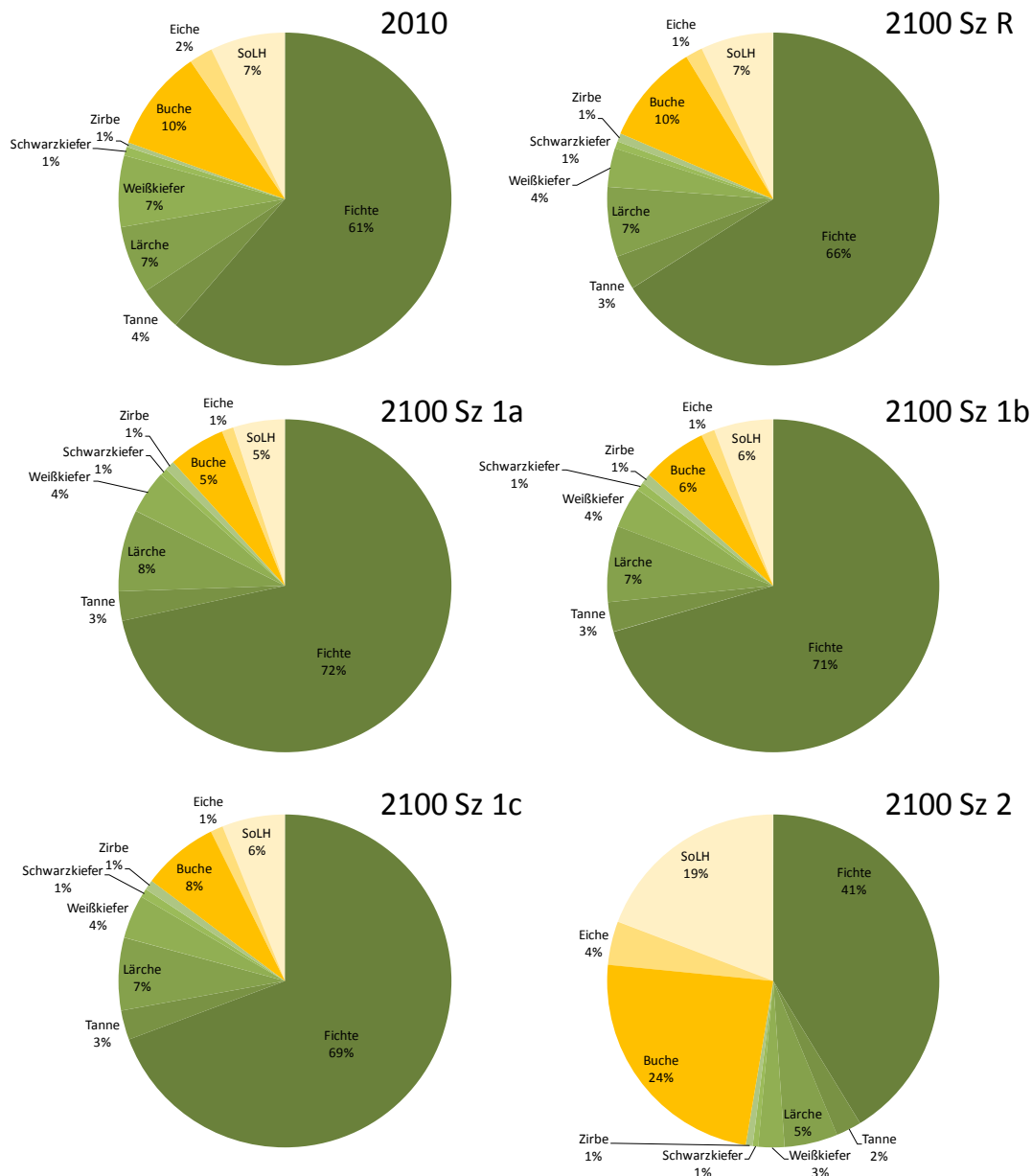


Abbildung 30: Baumartenzusammensetzung nach Vorrat. Oben links die Ausgangssituation im Jahr 2010.

5.8 Entwicklung der einzelnen Kohlenstoffpools

5.8.1 Ober- und unterirdische Biomasse

Abbildung 31 zeigt die simulierte Kohlenstoffentwicklung der ober- und unterirdischen Biomasse. Der Verlauf der einzelnen Szenarien ist im Prinzip ähnlich wie bei der Vorratsentwicklung (Abbildung 20), lediglich der Kulminationszeitpunkt ist bei den Szenarien R, 1a, 1b und 1c um etwa 20 Jahre nach hinten verschoben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei diesen Szenarien der Laubholzvorrat bis dahin ebenfalls zunimmt (siehe Abbildung 21).

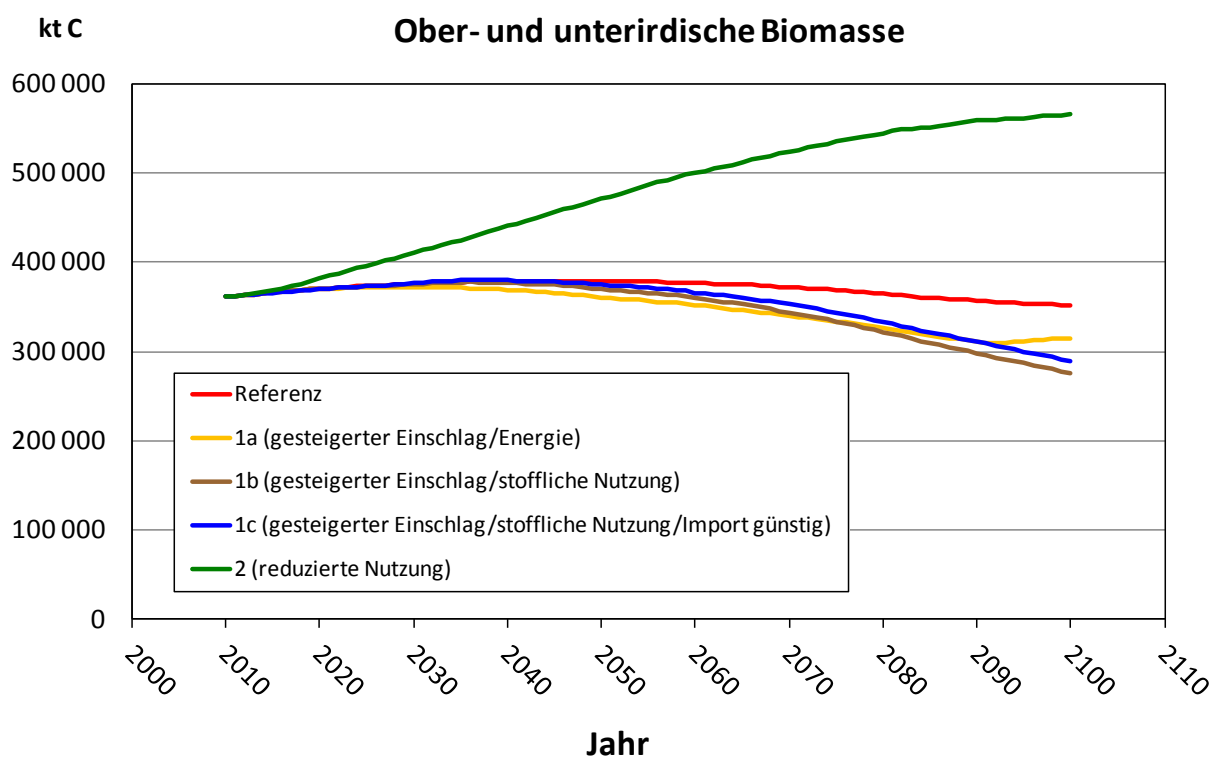


Abbildung 31: Entwicklung des Kohlenstoffvorrates der ober- und unterirdischen Biomasse.

5.8.2 Totholz

Abbildung 32 zeigt die Entwicklung des Kohlenstoffs, der im stehenden Totholz gebunden ist. Der Verlauf für die verschiedenen Szenarien folgt dem Vorratsverlauf in Abbildung 23.

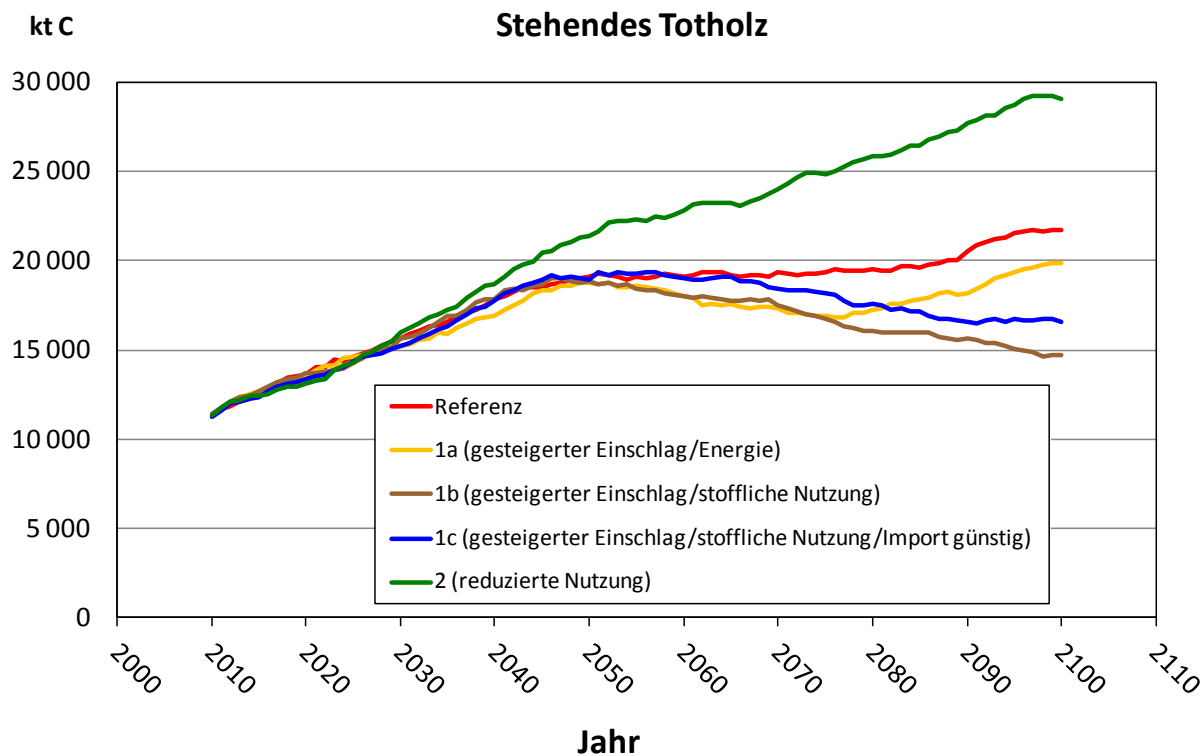


Abbildung 32: Entwicklung des Kohlenstoffvorrates des stehenden Totholzes.

5.8.3 Bodenkohlenstoff

Yasso07 simuliert den gesamten Vorrat an Bodenkohlenstoff. Eine Aufteilung nach Auflagehumus und Mineralboden ist nicht möglich (siehe Kapitel 4.5). Für alle Szenarien wurde das Hektar-Ergebnis von Yasso07 mit der Waldfläche, die in CALDIS verwendet wird, hochgerechnet. Alle Bodenkohlenstoff-Vorräte beziehen sich daher auf die Ertragswaldfläche in Österreich. Die zeitliche Entwicklung in den einzelnen Szenarien ist in (Abbildung 33) dargestellt.

Im *Referenzszenario* bleibt der Bodenkohlenstoffpool über 90 Jahre hinweg praktisch unverändert. Aus der Simulation ergibt sich eine unbedeutende Erhöhung von weniger als 0.1%.

Im Szenario des *gesteigerten Einschlags wegen forcierter energetischer Nutzung (1a)* wird dem Bestand mehr Biomasse entnommen. Dadurch gelangt weniger Streufall von organischer Substanz in den Boden. Bei den gleichen Klimabedingungen wie im Referenzszenario bleiben die Bedingungen für den Abbau der organischen Substanz des Bodens gleich. Im Budget ergibt sich daher ein leichter Abbau des Kohlenstoffvorrates im Boden. Der Kohlenstoffverlust in der 90-jährigen Simulationsperiode ist allerdings mit 1.3% recht gering.

Im Szenario des *gesteigerten Einschlags wegen forcierter stofflicher Nutzung (1b)* kommt es vergleichsweise zu einem stärkeren Abbau des Bodenkohlstoffvorrates, da ja dem Holzmarkt die nachgefragte Holzmenge aus österreichischen Waldbeständen zur Verfügung gestellt wird. Selbst hier ist die Abnahme des Bodenkohlenstoffpools um 1,6% eher gering. Die niedrigen Prozentwerte sollen aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass es dabei um beträchtliche Kohlenstoffmengen handelt. Immerhin speichert ein Hektar Waldboden mehr als 100 Tonnen Kohlenstoff.

Beim Szenario des *gesteigerten Einschlags wegen forcierter stofflicher Nutzung unter günstigen Importbedingungen (1c)* sind die Veränderungen des Bodenkohlenstoffpools gering, er bleibt praktisch unverändert.

Im Szenario *Reduzierte Nutzung im Wald (2)* weicht die Vorratsentwicklung von allen anderen Nutzungsszenarien deutlich ab. Innerhalb von 90 Jahren wird der Kohlenstoffpool um 20% aufgebaut. Dieses Ergebnis entspricht sehr genau der Fläche, für die eine Außer-Nutzung-Stellung angenommen wurde. Auf diesen Flächen ist die stehende Biomasse am höchsten. Da in unserer Parametrisierung von Yasso07 der Streufall (oberirdisch/unterirdisch) direkt von der stehenden Biomasse abhängt, führt das Szenario zwangsläufig zu höheren Bodenkohlenstoffpools. Ein anderes Ergebnis wäre nur zu erwarten, wenn die nicht genutzten Bestände verstärkt von Mortalität betroffen wären.

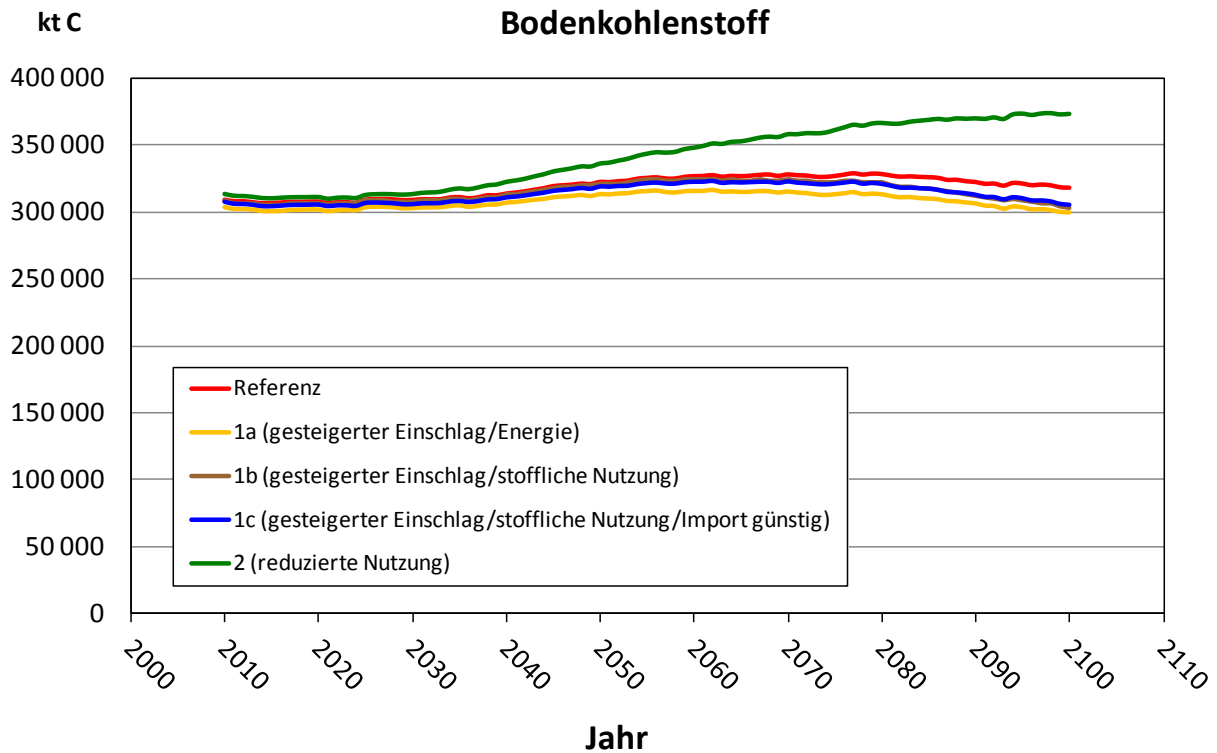


Abbildung 33: Zeitliche Entwicklung des Bodenkohlenstoffpools, nach Szenarien getrennt.

Die in Abbildung 33 dargestellten Entwicklungen beziehen sich immer auf den gesamten Bodenkohlenstoffvorrat im österreichischen Ertragswald und sagen nichts über die Veränderungen an Einzelstandorten aus. Deswegen wurden die simulierten Entwicklungen auch an den Einzelstandorten untersucht. Für diese Analyse wurde an jeder ÖWI-Probefläche die simulierte Entwicklung des Bodenkohlenstoffs mit einer linearen Regression ausgeglichen und der Anstieg k der Regressionsgeraden ermittelt. Aus dem Anstieg k lässt sich dann erkennen, ob der Kohlenstoffpool am Einzelstandort zu- oder abgenommen hat. Eine Häufigkeitsverteilung der Anstiege zeigt dann auf wie vielen Standorten der Bodenkohlenstoffvorrat zu- bzw. an wie vielen er abgenommen hat. Die Ergebnisse einer solchen Analyse sind in den folgenden Abbildungen für alle Szenarien dargestellt.

In Abbildung 34 ist ersichtlich, dass im *Referenzszenario* auf den meisten Standorten keine Veränderung stattgefunden hat. Die Verteilung der Anstiege k ist leicht rechts-schief, sodass sich für ganz Österreich eine leichte Zunahme des Vorrates ergibt.

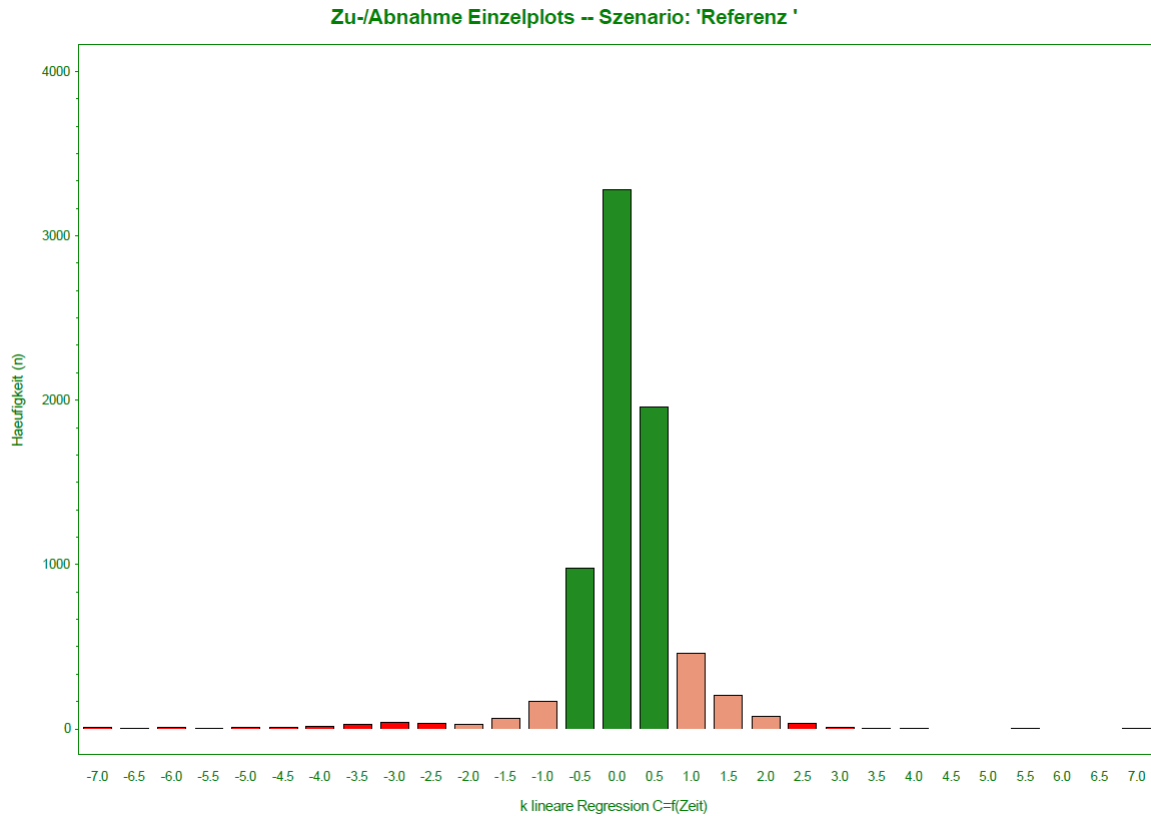


Abbildung 34: Verteilung der Zu- bzw. Abnahmen des Kohlenstoffpools im Boden an Einzelstandorten im Referenzszenario.

Auch im Szenario des *gesteigerten Einschlags wegen forcierter energetischer Nutzung (1a)* ist für die Einzelstandorte keine dramatische Verschiebung der Häufigkeiten der Zu- und Abnahmen ersichtlich (Abbildung 35).

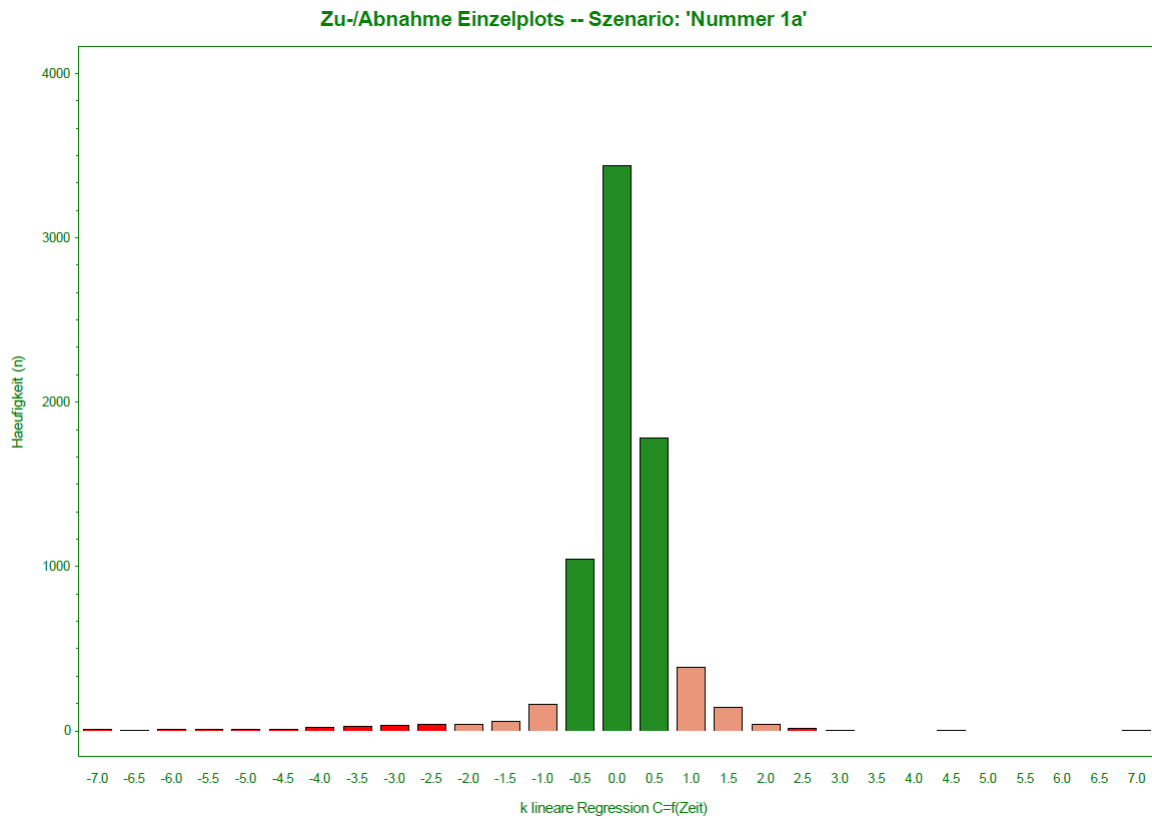


Abbildung 35: Verteilung der Zu- bzw. Abnahmen des Kohlenstoffpools im Boden an Einzelstandorten im Szenario des gesteigerten Einschlags wegen forcierter energetischer Nutzung (1a).

Für die Verteilung der Einzelstandorte zeigt sich im Szenario des *gesteigerten Einschlags wegen forcierter stofflicher Nutzung (1b)* zwar weiterhin, dass bei den meisten Standorten keine Veränderung auftritt. Allerdings gibt es auch viele Standorte mit teils deutlichen Abnahmen des Bodenkohlenstoffpools, die nur möglich sind wenn starke Nutzungen stattfinden (Abbildung 36).

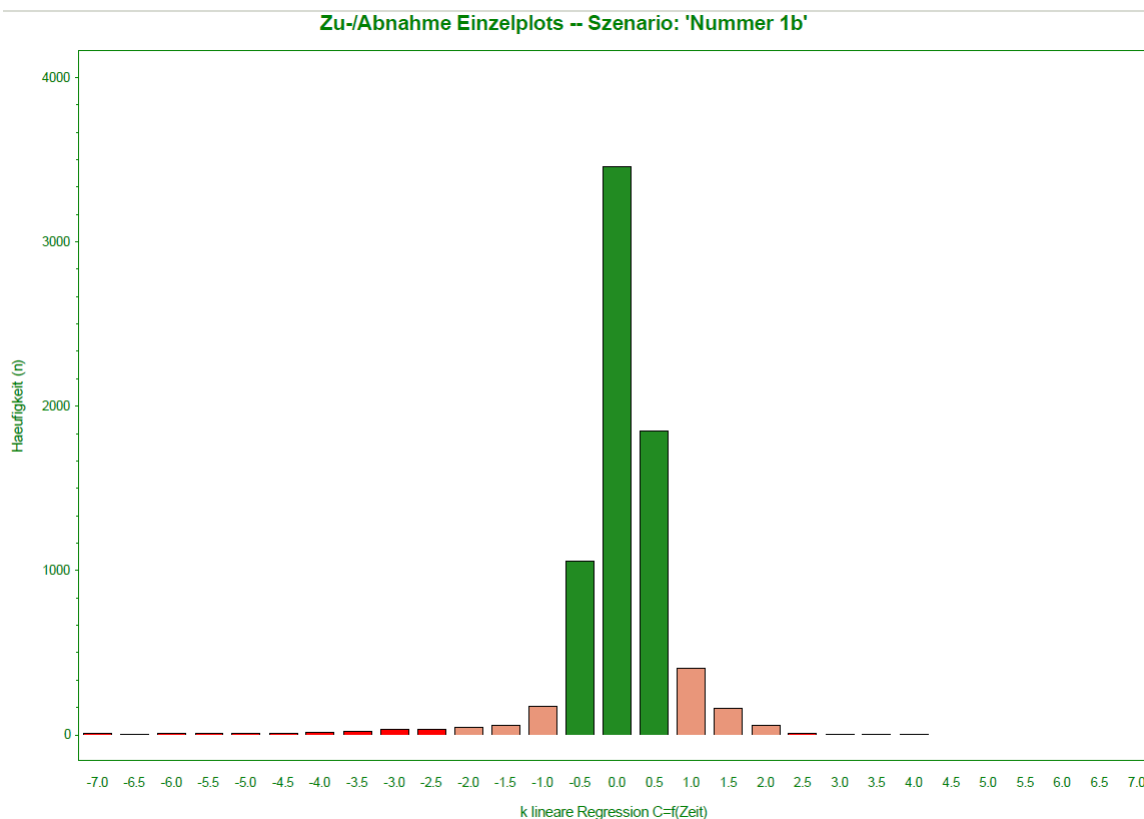


Abbildung 36: Verteilung der Zu- bzw. Abnahmen des Kohlenstoffpools im Boden an Einzelstandorten im Szenario des gesteigerten Einschlags wegen forcierter stofflicher Nutzung (1b).

Die Abbildung 37 zeigt eine leicht links-schiefe Verteilung der Anstiege im Szenario des *gesteigerten Einschlags wegen forciertes stofflicher Nutzung unter günstigen Importbedingungen (1c)*. An wenigen Standorten wurde der Kohlenstoffpool des Bodens deutlich verringert, während an vielen anderen Standorten leichte Zunahmen zu verzeichnen waren.

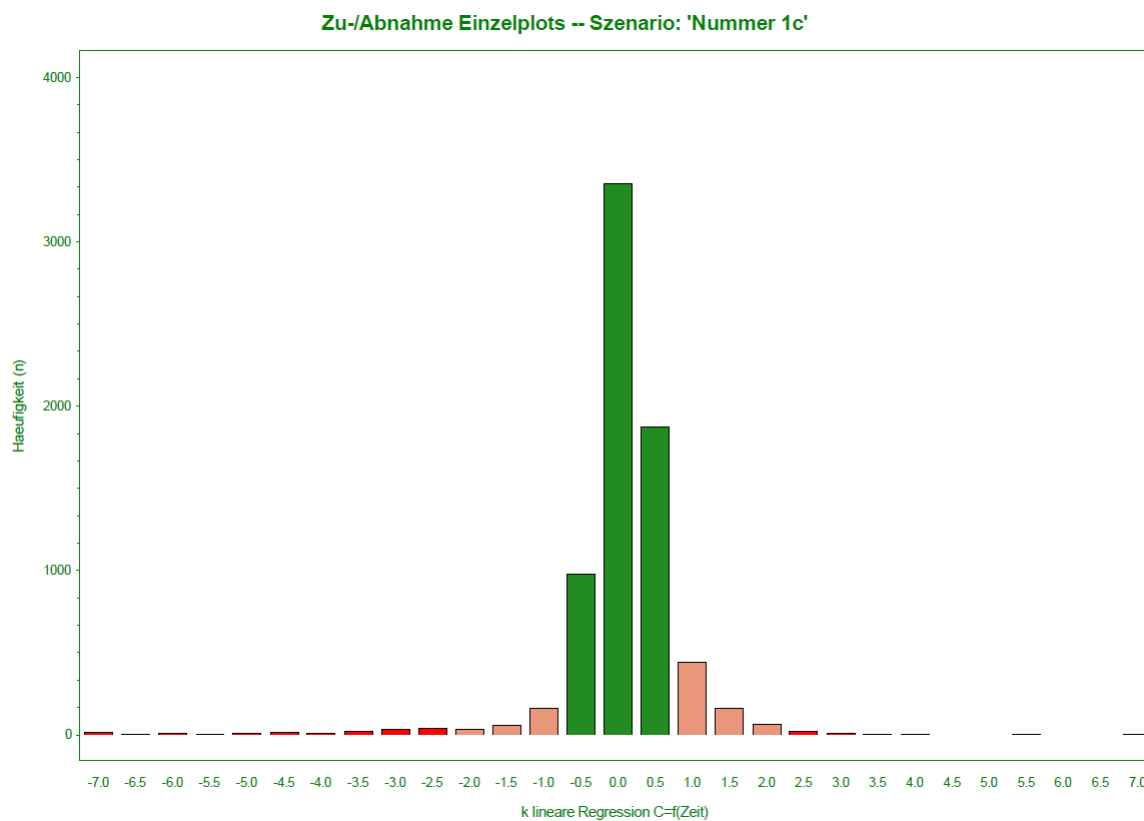


Abbildung 37: Verteilung der Zu- bzw. Abnahmen des Kohlenstoffpools im Boden an Einzelstandorten im Szenario des gesteigerten Einschlags wegen forciertes stofflicher Nutzung unter günstigen Importbedingungen (1c).

Die Abbildung 38 zeigt, dass im Szenario *Reduzierte Nutzung im Wald (2)* die deutliche Zunahme des Kohlenstoffvorrates in den österreichischen Waldböden durch leichte Vorratserhöhungen auf vielen Standorten zustande kommt.

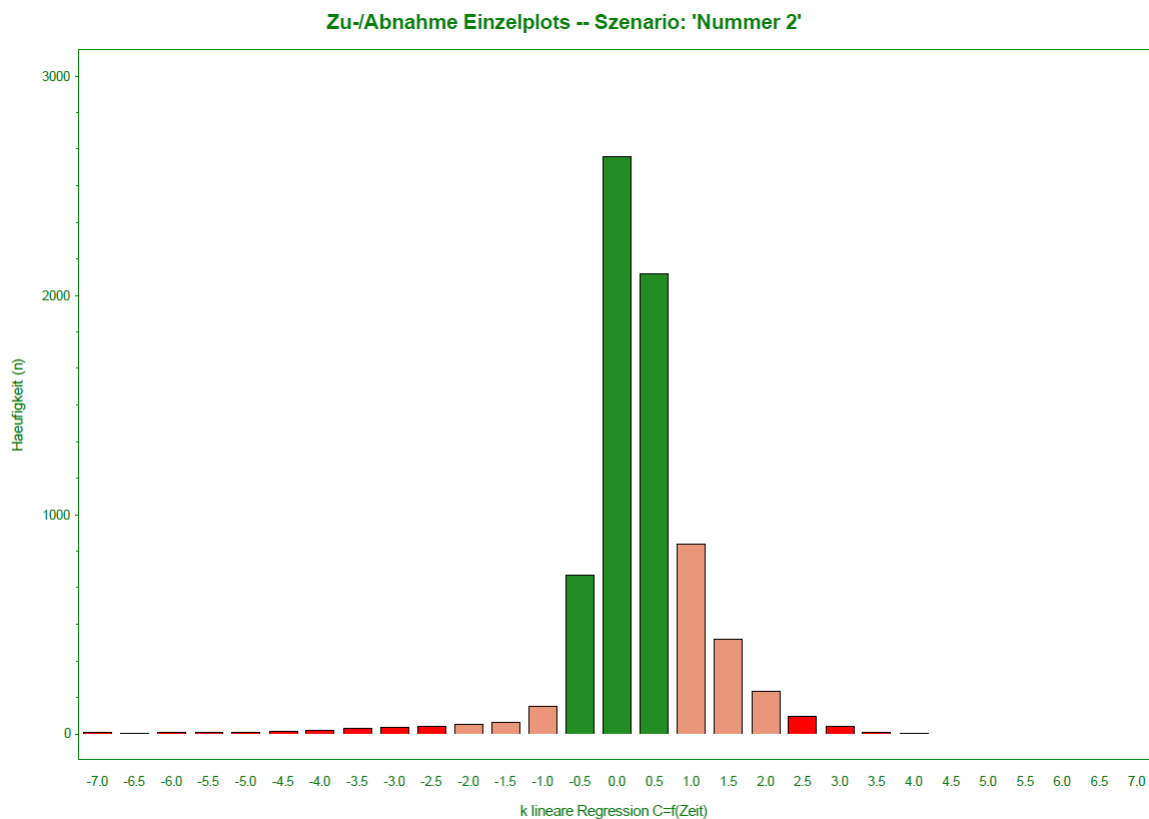


Abbildung 38: Verteilung der Zu- bzw. Abnahmen des Kohlenstoffpools im Boden an Einzelstandorten im Szenario Reduzierte Nutzung im Wald (2).

5.9 Treibhausgasbilanz

Für die Treibhausgasbilanz des gesamten Waldes ist die Entwicklung der Kohlenstoffvorräte in folgenden Kohlenstoffpools entscheidend:

- Ober- und unterirdische Biomasse
- Stehendes Totholz
- Bodenkohlenstoff inkl. liegendes Totholz

Die Entwicklung der einzelnen Pools ist im vorhergehenden Kapitel 5.8 dargestellt. Eine gesamthafte Darstellung aller drei Kohlenstoffpools zeigt die Abbildung 39. Diese und alle weiteren Abbildungen und Ergebnisse beziehen sich immer auf CO₂-Äquivalente, da diese Einheit in der Treibhausgasbilanzierung bzw. im Kyoto-Reporting ebenfalls verwendet wird. Die simulierten Entwicklungen zeigen, dass es bei den Szenarien R, 1a, 1b und 1c bis 2040 bzw. 2060 zu einem leichten Vorratsanstieg kommt. Danach nimmt der Kohlenstoffvorrat bei diesen Szenarien wieder ab. Beim Szenario 2 kommt es dagegen vom Beginn weg zu einem beträchtlichen Anstieg im Kohlenstoffvorrat.

kt CO₂ - Äquivalente

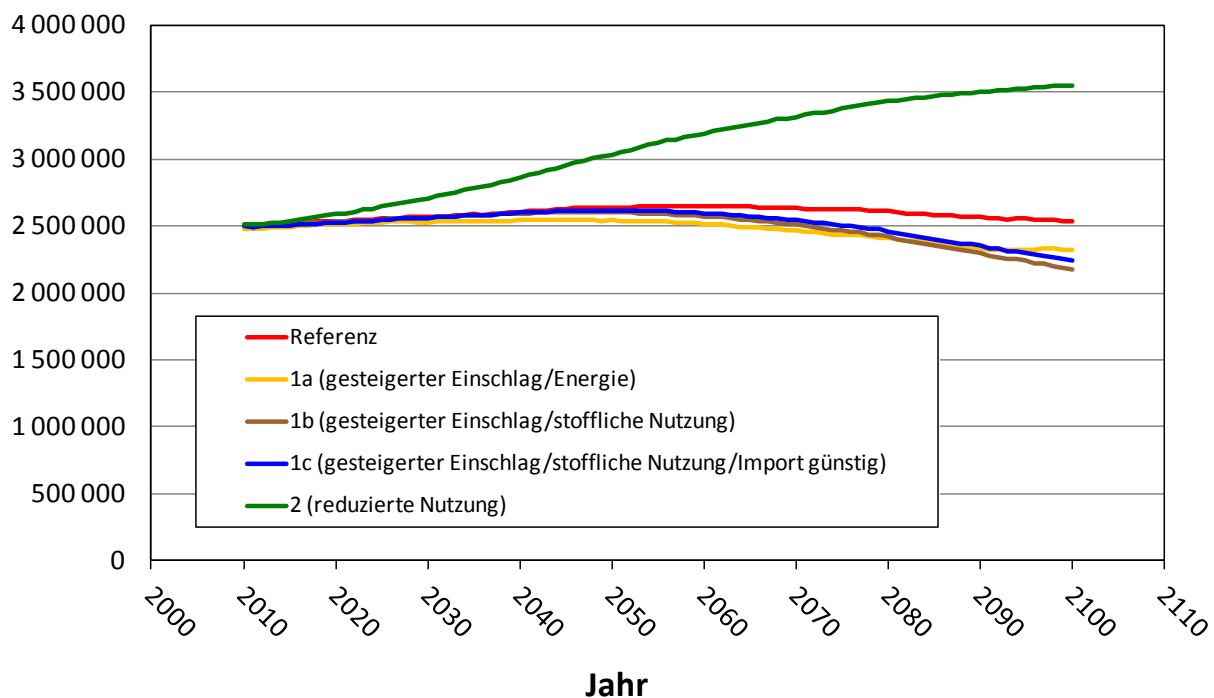


Abbildung 39: Simulierte Entwicklung des gesamten Kohlenstoffpools im Wald (ober- und unterirdische Biomasse, stehendes Totholz, Bodenkohlenstoff inkl. liegenden Totholzes).

Betrachtet man die für die Treibhausgasbilanzierung maßgeblichen jährlichen Änderungen des gesamten Kohlenstoffvorrats im Wald (ober- und unterirdische Biomasse, stehendes Totholz, Bodenkohlenstoff inkl. liegenden Totholzes), so zeigt sich, dass der Wald in allen Szenarien bis etwa zum Jahr 2040 eine Senke ist. Im Szenario 2 bleibt die Senkenfunktion sogar bis zum Ende des Simulationszeitraumes erhalten wenngleich die Senkenleistung gegen Ende des Simulationszeitraumes nur mehr schwach ausgeprägt ist und eine Tendenz zur Quelle aufweist. Bei den anderen Szenarien wird der Wald wesentlich früher, etwa zwischen 2040 und 2060, zu einer bilanztechnischen Quelle von Treibhausgasen, da der Kohlenstoffspeicher im Wald infolge der intensiveren Nutzung abnimmt (Abbildung 40).

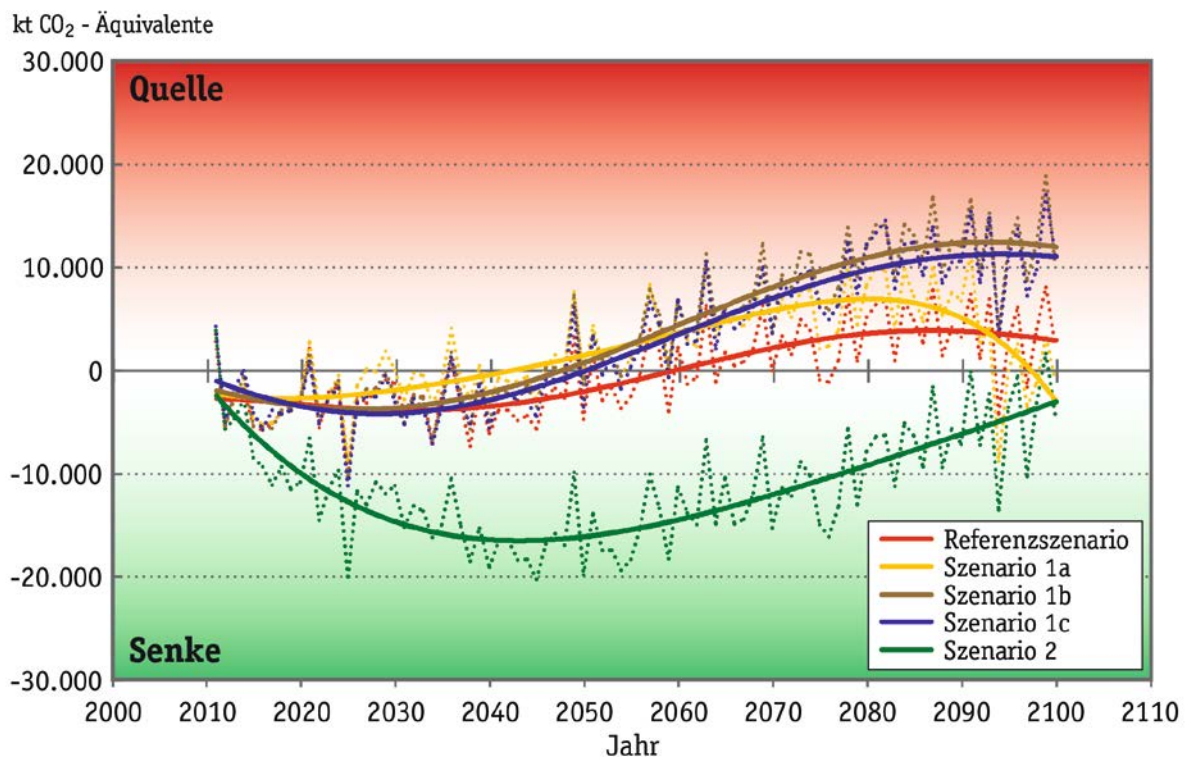


Abbildung 40: Jährliche Änderungen des gesamten Kohlenstoffpools im Wald (ober- und unterirdische Biomasse, stehendes Totholz, Bodenkohlenstoff inkl. liegenden Totholzes). Quelle (+), Senke (-).

6. Fazit

Die Studie hat gezeigt, dass die Art der Waldbewirtschaftung ein entscheidender Faktor für die Treibhausgasbilanz ist. Der Wald für sich betrachtet kann mehr Kohlenstoff speichern, als dies unter derzeitiger Bewirtschaftung der Fall ist. Ohne Nutzungen würde sich langfristig ein Gleichgewicht einstellen, das gegenüber der aktuellen Situation zu einer um etwa 50 Prozent höheren Kohlenstoffspeicherung im Wald führt. Diese rein auf den Wald fokussierte Betrachtung greift jedoch viel zu kurz, weil langfristig die Holznutzung und dauerhafte Holzverwendung einen noch stärkeren positiven Effekt auf die Treibhausgasbilanz hat.

7. Literatur

- Berg, B., Berg, M. P., Bottner, P., Box, E., Breymeyer, A., De Anta, R. C., Couteaux, M., Mälkönen, E., McClaugherty, C., Meentemeyer, V., Munoz, F., Piuksi, P., Remacle, J., De Santo, A. V., 1993. Litter mass loss in pine forests of Europe and Eastern United States: some relationships with climate and litter quality. *Biogeochemistry* 20, 127-159.
- Bitterlich, W., 1948. Die Winkelzählprobe. *Allgem. Forst- und Holzwirtschaftliche Zeitung* 59, 4-5.
- Brunner, I., Bakke, M. R., Björk, R. G., Hirano, Y., Lukac, M., Aranda, X., Børja, I., Eldhuset, T. D., Helmisaari, H. S., Jourdan, C., Konôpka, B., López, B. C., Pérez, C. M., Persson, H., Ostonen, I., 2013. Fine-root turnover rates of European forests revisited: an analysis of data from sequential coring and ingrowth cores. *Plant and Soil* 362, 357-372.
- Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, 2009. BFW-Praxisinformation, ISSN 1815-3895, Nr. 18, 24 S.
- Eckmüllner, O., 2006. Allometric relations to estimate needle and branch mass of Norway spruce and Scots pine in Austria. *Austrian Journal of Forest Science* 123, 7-16.
- Gschwantner, T., 2009. Technische und ökonomische Rahmenbedingungen der modellierten Holzernte. In: BFW-Praxisinformation, ISSN 1815-3895, Nr. 18, 10-12.
- Gschwantner, T., Schadauer, K., 2006. Branch biomass functions for broadleaved tree species in Austria. *Austrian Journal of Forest Science* 123, 17-34.
- Gschwantner, T., Kindermann, G., Ledermann, T., 2010. Weiterentwicklung des Wachstumssimulators PROGNAUS durch Einbindung klimarelevanter Parameter. In: Neumann, M. (Ed.), Auswirkungen des Klimawandels auf Österreichs Wälder - Entwicklung und vergleichende Evaluierung unterschiedlicher Prognosemodelle (WAMOD). Unpublizierter Projektbericht.
- Gumbel, E.J., 1958. *Statistics of Extremes*. Columbia University Press, New York, 375 S.
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kindermann, G., 2010. Eine klimasensitive Weiterentwicklung des Kreisflächenzuwachsmo- dells aus PROGNAUS. *Austrian Journal of Forest Science* 127, 147-178.
- Ledermann, T. 2002. Ein Einwuchsmodell aus den Daten der Österreichischen Waldinventur 1981-1996. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen* 119, 40-77.

- Ledermann, T., 2006. Description of PrognAus for Windows 2.2. In: Hasenauer, H. (Ed.), Sustainable Forest Management - Growth Models for Europe. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 71-78.
- Ledermann, T., 2012. Measuring and modeling the competitive status of individual trees in the context of forest growth models. Habilitationsschrift, Universität für Bodenkultur, Wien, 133 S.
- Ledermann, T., Neumann, M., 2006. Biomass equations from data of old long-term experimental plots. *Austrian Journal of Forest Science* 123, 47-64.
- Ledermann, T., Neumann, M., 2009. Prognose des Waldwachstums und des Nutzungspotenzials. In: BFW-Praxisinformation, ISSN 1815-3895, Nr. 18, 5-7.
- Liski, J., Tuomi, M., Rasinmäki, J., 2009. Yasso07 user-interface manual. Finnish Environment Institute.
- Offenthaler, I., Hochbichler, E., 2006. Estimation of root biomass of Austrian forest tree species. *Austrian Journal of Forest Science* 123, 65-86.
- Pollanschütz, J., 1974. Formzahlfunktionen der Hauptbaumarten Österreichs. *Allgemeine Forstzeitung* 85, 341-343.
- Rubatscher, D., Munk, K., Stöhr, D., Bahn, M., Mader-Oberhammer, M., Cernusca, A., 2006. Biomass expansion functions for *Larix decidua*: a contribution to the estimation of forest carbon stocks. *Austrian Journal of Forest Science* 123, 87-101.
- Schieler, K., 1988. Methodische Fragen in Zusammenhang mit der Österreichischen Forstinventur. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien, 99 S.
- Tuomi, M., Thum, T., Järvinen, H., Fronzek, S., Berg, B., Harmon, M., Trofymow, J., Sevanto, S., Liski, J., 2009. Leaf litter decomposition - Estimates of global variability based on Yasso07 model *Ecological Modelling* 220, 3362-3371.
- Wirth, C., Schumacher, J., Schulze, E.D., 2004. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe - a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiology* 24, 121-139.
- Wutzler, T., Wirth, C., Schumacher, J., 2008. Generic biomass functions for Common beech (*Fagus sylvatica* L.) in Central Europe – predictions and components of uncertainty. *Canadian Journal of Forest Research* 38, 1661-1675.