

CO₂-Wirkung des Aargauer Waldes

Bericht: Modellbeschreibung und fachliche Folgerungen
29.05.2024



Projektteam

Dr. Isabel O'Connor
Luca Bronzini
Livia Ramseier
Carmen Steg
Denise Fussen
Dr. Andy Spöri

EBP Schweiz AG
Mühlebachstrasse 11
8032 Zürich
Schweiz
Telefon +41 44 395 16 16
info@ebp.ch
www.ebp.ch

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Departements Bau, Verkehr und Umwelt des Kantons Aargau, Abteilung Wald verfasst. Für den Inhalt ist die Auftragnehmerin verantwortlich.

Zusammenfassung

Die Klimastrategie des Kantons Aargau zielt darauf ab, die klimapolitischen Ziele des Bundesrates zur Reduktion der Treibhausgasemissionen auf Netto-Null bis 2050 zu unterstützen. Der Wald spielt eine Rolle in dieser Strategie, indem er auf verschiedene Weisen dazu beitragen kann: durch nachhaltige Bewirtschaftung, Holznutzung als Bau- und Werkstoff, sowie Holz als Energieträger, wobei Kaskadennutzung angestrebt wird. Das Projekt «CO₂-Wirkung des Aargauer Waldes» verwendet eine Modellierung in Szenarien, um den Beitrag der Waldbewirtschaftung und Holznutzung zur Ausgleichung der Treibhausgasemissionen des Kantons Aargau zu ermitteln, mit Berechnungen für die Jahre 2025, 2050, 2075 und 2100.

Die Hauptziele des Projekts bestehen darin, ein transparentes Modell für die Kohlenstoffflüsse im Wald und in der Holzertschöpfungskette zu erstellen und eine Wissensgrundlage zur CO₂-Wirkung des Aargauer Waldes zu schaffen. Die Studie schliesst mit fachlichen Schlussfolgerungen für die Waldpolitik des Kantons und zeigt Unsicherheiten im Modell mittels einer Sensitivitätsanalyse transparent auf.

Es wurden drei Grundszenarien entwickelt: das Basisszenario, das Energieholz-Szenario und das CO₂-optimierte Szenario. Diese Szenarien basieren auf realen Daten und geprüften Annahmen. Das Basisszenario beruht auf Inventurdaten des Kantons Aargau sowie Daten zur Holznutzung der letzten fünf Jahre. Das Energieholz-Szenario fokussiert auf die energetische Holznutzung, während das CO₂-optimierte Szenario darauf abzielt, die CO₂-Wirkung zu maximieren, insbesondere durch die Erhöhung des Anteils des Stamm- und Industrieholzes, der Verwendung in möglichst langlebigen Produkten und Förderung der Kaskadennutzung. Diese Szenarien sind jeweils mit einem Unter-Szenario mit reduziertem Zuwachs ergänzt.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine CO₂-optimierte Bewirtschaftung des Waldes die jährliche CO₂-Wirkung des Aargauer Waldes im Vergleich zu den anderen Szenarien erhöhen kann. In absoluten Zahlen ausgedrückt sehen die Werte wie folgt aus:

- Basisszenario: im Mittel +103 kt CO₂/Jahr (entspricht 2.5% der Emissionen des Kantons AG in einem Jahr)
- Energieszenario: im Mittel +87 kt CO₂/Jahr (entspricht 2.2% der Emissionen des Kantons AG in einem Jahr)
- CO₂-optimiertes Szenario: im Mittel +148 kt CO₂/Jahr (entspricht 3.7% der Emissionen des Kantons AG in einem Jahr)

Das Optimierungspotenzial des letztgenannten Szenarios im Vergleich zu den beiden anderen Szenarien liegt also bei 1.2% oder 1.5% der jährlichen Emissionen im Kanton Aargau im Jahr 2021 (4.1 Mio. t CO₂, (Abteilung für Umwelt Aargau, 2022, S. 15)). Vergleicht man die CO₂-Wirkung des CO₂-optimierten Szenarios direkt mit derjenigen der anderen beiden Szenarien ist sie im Vergleich zum Basisszenario um knapp 30% und im Vergleich zum Energieszenario um gut 41% höher. Trotzdem ist der Beitrag des Waldes im Kontext der Gesamtemissionen des Kantons Aargau relativ bescheiden. Die Resultate verdeutlichen, dass der Zuwachs im Wald eine Schlüsselgröße ist und dass die stoffliche Holznutzung und Förderung der Kaskadennutzung wichtige Hebel sind, um die Senkeneffekte zu optimieren. Insgesamt zeigt die Studie, dass der Wald eine Rolle beim Ausgleich von Treibhausgasemissionen spielen kann, vorausgesetzt, er wird nachhaltig bewirtschaftet und die Holznutzung sowie die stoffliche Nutzung des Holzes werden optimiert.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis / Glossar	7
Umrechnungstabelle	9
1. Ausgangslage	10
2. Ziele	10
3. Modellbeschreibung	12
3.1 Modellübersicht	13
3.1.1 Modellstruktur	13
3.1.2 Implementation des Modelles	15
3.1.3 Zielgrößen und Zeitrahmen	15
3.2 Modul Wald	16
3.2.1 Kohlenstofflager	16
3.2.2 Flüsse	19
3.2.3 Eingabemaske	22
3.3 Modul Holz	22
3.3.1 Kohlenstofflager	23
3.3.2 Flüsse	25
3.3.3 Eingabemaske	28
3.4 Modul Substitutionseffekte	30
3.4.1 Konstruktion und Ausbau	30
3.4.2 Holzwaren: Schalungen und Paletten	31
3.4.3 Energie	32
3.4.4 Zukünftige Anrechenbarkeit der Substitutionseffekte	32
3.4.5 Eingabemaske	32
3.5 Parametrisierung der Szenarien	33
3.5.1 Stellschrauben je Szenario	33
3.5.2 Basisszenario	33
3.5.3 Energieszenario	34
3.5.4 CO ₂ -optimiertes Szenario	34
3.6 Zusatzszenario: Reduzierter Zuwachs	39
3.7 Unsicherheiten und Limitierungen	39
3.8 Sensitivitätsanalyse	41
4. Ergebnisse	43

4.1	Grundszenario: Basis	43
4.1.1	Resultate	43
4.1.2	Plausibilisierung	46
4.2	Grundszenario: Energie	48
4.2.1	Resultate	48
4.2.2	Plausibilisierung	51
4.3	Grundszenario: CO ₂ -optimiert	52
4.3.1	Resultate	52
4.3.2	Plausibilisierung	55
4.4	Sensitivitätsanalyse	56
4.4.1	Sensitivitätsanalysen Basisszenario	56
4.4.2	Sensitivitätsanalysen Energieszenario	57
4.4.3	Sensitivitätsanalysen CO ₂ -optimiertes Szenario	57
4.4.4	Erreichen von Netto-Null in verschiedenen Jahren	59
4.5	Zusatzszenario: Reduzierter Zuwachs	61
4.5.1	Basisszenario	61
4.5.2	Energieszenario	63
4.5.3	CO ₂ -optimiertes Szenario	64
4.6	Übersicht und Vergleich der Ergebnisse der Grund- und Zusatzszenarien	65
5.	Diskussion Potenzial des Aargauer Waldes und der nachgelagerten Holzkette im Kanton Aargau	70
5.1	Beitrag zu den Netto-Null Zielen	71
5.2	Beitrag zu den Neubauten	71
5.3	Beitrag zur Energieproduktion im Kontext der stofflichen Optimierung	72
5.4	Eingabeparameter in der Praxis	73
5.5	Diskussion zu den Unterschieden zwischen Laub- und Nadelholz	74
5.6	Zielsetzungen gemäss kantonaler Wald- und Klimapolitik: Potenzielle Konflikte und Synergien mit einer CO ₂ -optimierten Waldbewirtschaftung	75
6.	Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Beantwortung der Leitfragen	76
7.	Literaturverzeichnis	80
8.	Anhang	82

Anhang

A1	Lager	83
	A1.1 Im Grundszenario Basis	83
	A1.2 Im Grundszenario Energie	84
	A1.3 Im Grundszenario CO ₂ -optimiert	87
	A1.4 Im Zusatzszenario "Reduzierter Zuwachs" Basis	89
	A1.5 Im Zusatzszenario "Reduzierter Zuwachs" Energie	90
	A1.6 Im Zusatzszenario "Reduzierter Zuwachs" CO ₂ -optimiert	92
	A1.7 Stellschrauben im Modell und daraus abgeleitete Handlungsoptionen	94

Abkürzungsverzeichnis / Glossar

Abkürzung	Ausgeschrieben	Glossar
AWI2	Zweite Aargauer Waldinventur	
BAG	Baumartengruppe	
BEF	Biomass expansion factor	Faktor mit dem man von der Biomasse von Stammholz in Rinde auf die gesamte Biomasse des Baumes schliessen kann
BFS	Bundesamt für Statistik	
CO _{2eq}	CO ₂ -Äquivalente	Bemerkung: Wird im Lauftext vereinfacht mit CO ₂ bezeichnet (vgl. Ausführung unter Zielgrösse, Abschnitt 3.1.3)
CO ₂ -Wirkung	Senkenleistung und Einsparung	
EfM	Erntefestmeter	Holz, das liegend (nach der Ernte) gemessen wird
EK	Ertragsklasse	
GS	Grundscenario	Es gibt im Modell drei Grundscenarien: das Basis-Szenario, das Energie-Szenario und das CO ₂ -optimierte Szenario
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren	
LFI	Landesforstinventar	
LWF	Langfristige Waldökosystemforschung der WSL	
NV	Nutzungsverzichtsflächen	
PP/PE	Polypropylen/Polyethylen	
Senke		im betrachteten Jahr x neu gebundene Menge CO ₂
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein	
Speicher		im Jahr x in einem «Lager» oder in einem «Vorrat» gebundenes CO ₂
THG-Inventar	Treibhausgasinventar	Das Treibhausgasinventar der Schweiz, jährlich berechnet durch das BAFU.
TfM	Tariffestmeter	Kubikmeter stehenden Holzes gemäss angewandtem Berechnungstarif, im Wald (entspricht hier dem Vorrat)
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation	
WiWa	Wirtschaftswald	
WSL	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft	

ZS	Zusatzszenario	Es wurden im Modell drei Zusatzszenarien mit einem reduzierten Zuwachs gerechnet (für das Basis-Szenario, das Energie-Szenario und das CO ₂ -optimiertes Szenario)
----	----------------	---

Umrechnungstabelle

Gegenstand	Umrechnung	Verweis
Tfm zu Efm	-10% Verluste	
C in CO ₂ (CO _{2eq})	3.67 CO ₂ pro C	Kapitel 3.2.1, Abschnitt lebende Biomasse
m ³ in t CO ₂	Für Laubholz: 1.03 Für Nadelholz: 1.57 Für Totholz: 0.44	Kapitel 3.2.1, Abschnitt lebende Biomasse

Tabelle 1 Wichtige Umrechnungen im Modell

1. Ausgangslage

In der Klimastrategie des Kantons Aargau ist festgehalten, dass der Kanton Aargau die klimapolitischen Ziele des Bundesrates und somit die Reduktion der Treibhausgasemissionen auf Netto-Null bis ins Jahr 2050 unterstützt. Zur Erreichung dieses klimapolitischen Ziels des Kantons Aargau müssen alle Sektoren ihren Beitrag leisten. Der Wald als grossflächige Landnutzungsform kann dabei auf verschiedene Weise beitragen: 1. den Wald nachhaltig erhalten und bzgl. CO₂-Aufnahme optimieren, 2. das Holz als Bau- und Werkstoff nutzen, um den Senkeneffekt von CO₂ zu verlängern und Substitutionseffekte durch den Ersatz CO₂-intensiverer Materialien zu erzielen, sowie 3. Holz als Energieträger nutzen und so fossile Energieträger ersetzen. Bei der Nutzung von Holz ist dabei eine Kaskadennutzung anzustreben, um die CO₂-Speicherwirkung zu maximieren. Die Klimastrategie hat deshalb als eines der Handlungsfelder den Wald als CO₂-Speicher definiert, mit zwei Stossrichtungen: den Wald als CO₂-Speicher zu bewirtschaften und den Holzspeicher zu optimieren.

Im Rahmen des Projektes CO₂-Wirkung des Aargauer Waldes sollte mittels Modellierung aufgezeigt werden, wie gross der Beitrag der Bewirtschaftung des Aargauer Waldes sowie der nachfolgenden Verwendung des Holzes an den Ausgleich¹ der Treibhausgasemissionen des Kantons ist respektive sein könnte.

Mittels einer Szenarioanalyse sollten die entsprechenden Grundlagen zur Beantwortung dieser Fragen erarbeitet werden, wobei die aktuelle Nutzung und die Energieholznutzung als Vergleichsszenarien dienen sollen. Die Auswirkungen von drei verschiedenen Bewirtschaftungsszenarien sollten jeweils für die Jahre 2025, 2050, 2075 und 2100 berechnet werden.

Mit der vorliegenden Studie steht dem Kanton eine neue Grundlage zur Verfügung, um waldpolitische Entscheidungsprozesse zu begleiten, welche aufgrund der Herleitung mit Modellierung laufend angepasst und aktualisiert werden können.

2. Ziele

Die Hauptfrage der Studie ist herauszufinden, welche realistischen Anpassungen an der Waldbewirtschaftung zu einer optimalen CO₂-Speicherung im Wald und in der nachgelagerten Holz-wertschöpfungskette führen. Die Projektziele bestehen darin, ein transparentes und möglichst leicht nachvollziehbares und anpassbares Modell zur Darstellung der Kohlenstoffflüsse aufzubauen und eine Wissensgrundlage zur CO₂-Wirkung des Aargauer Waldes zu schaffen.

Zusammen sollen sie möglichst klare fachliche Schlussfolgerungen für die (Wald-)Politik im Kanton liefern können, wobei Unsicherheiten möglichst transparent und verständlich gemacht werden müssen.

1 Exkurs klimapolitische Regelungen bzgl. anrechenbare Senkenleistungen: In der (internationalen) Klimapolitik und bei der Erstellung von CO₂-Zertifikaten ist nur die massnahmenbasierte Senkenwirkung anrechenbar. Das heisst, es wird eine Referenzentwicklung festgelegt («was wäre gewesen»), dann die tatsächliche Entwicklung verfolgt, und die Differenz dieser beiden Entwicklungen als «Senkenwirkung» berechnet, unter der Annahme, dass die Differenz aufgrund der getroffenen Massnahmen zustande kam und nicht ohnehin eingetreten wären. Nur diese Differenz zwischen den Entwicklungen ist als Senkenwirkung anrechenbar und gilt als Kompensation. Neben diesem Aspekt sind noch weitere Anforderungen zu berücksichtigen (u.a. diverse Abgrenzungsfragen, wie zum Beispiel zu bestehenden Senkenprojekten, Umgang mit den Substitutionseffekten, usw.). Das Ziel dieser Studie ist jedoch aufzuzeigen, wie sich die CO₂-Wirkung in den verschiedenen Szenarien entwickelt und ein Systemverständnis zu erlangen. Sollte zu einem späteren Zeitpunkt die Messung von klimapolitisch anrechenbaren Wirkungen angestrebt werden, müssen diese mitberücksichtigt und einberechnet werden. Um die Abgrenzung klar auszuweisen, wird im vorliegenden Bericht auf den Begriff «Kompensation» gänzlich verzichtet.

Die Beantwortung der wichtigsten Fragen erfolgt durch die Erfüllung der folgenden Zielsetzungen:

- Ermittlung der CO₂-Gesamtwirkung für die drei Szenarien (Basis, Energie, CO₂-optimiert) und deren Vergleich mit den Gesamtemissionen des Kantons Aargau.
- Vergleich der CO₂-Wirkung der Waldbewirtschaftung mit derjenigen der nachgelagerten Holzverwendung.
- Ermittlung des Anteils des Aargauer Holzes an den Holzneubauten im Kanton und Abklärung, ob dieser durch das waldseitige Angebot oder aber durch die Nachfrage/die Holzverarbeiter (Sägereien, Holzbauunternehmen) begrenzt wird.
- Optimierung der stofflichen Nutzung des Holzes: Bestimmung einer entsprechenden Sortimentsverteilung² und Abschätzung der Menge an Energieholz, die dennoch anfällt.

Szenarien

Die im Folgenden beschriebenen Grundszenarien dienen als Basis für die Beantwortung der obigen Fragen. Sie basieren auf realen Daten und plausibilisierten Annahmen.

- *Im Basisszenario* werden grundlegende Annahmen getroffen, die auf der Nutzung der letzten fünf Jahre basieren und den Trend in dieser Periode berücksichtigen. Dabei wird von einem konstanten Zuwachs an Holz ausgegangen und es wird davon ausgegangen, dass das Potenzial von Holz als Baustoff durch den Rückgang des Nadelholz-Lagers (weil weniger Nadelholz nachwächst) nicht direkt reduziert wird.
- *Im Energieholz-Szenario* steht die energetische Verwendung von Holz im Vordergrund. Die Sortimentsverteilung der zukünftigen Nutzung basiert auf dem Durchschnitt der letzten fünf Jahre von drei Forstbetrieben im Aargau, die stark auf Energieholz ausgerichtet sind. Zusätzlich wird das Potenzial der Energieholznutzung aus Altholz einbezogen.
- *Das CO₂-optimierte Szenario* zielt darauf ab, die CO₂-Wirkung zu maximieren, indem zunächst der Anteil von Stammholz innerhalb realistischer Annahmen erhöht wird, gefolgt vom Anteil an Industrieholz. Der verbleibende Teil wird energetisch genutzt. Weiter wird definiert, wie die Verwendung von Stamm- und Industrieholz optimiert wird, mit einer Verschiebung der Nutzung hin zu Produkten mit längerer Lebensdauer (d.h. möglichst viel in die Konstruktion, gefolgt von Ausbau). Dabei erfolgt die Verschiebung innerhalb realistischer Rahmenbedingungen (z.B. wird Holz immer auch für andere Produkte verwendet werden). Auch hier wird das Potenzial der Energieholz- und Industrieholznutzung aus Altholz berücksichtigt.

Für alle drei genannten Grundszenarien gibt es ein entsprechendes Zusatzszenario:

- Reduzierter Zuwachs aufgrund veränderter Klimabedingungen (ohne Störereignisse)

Ausserdem wurde das Modell so konzipiert, dass Schlussfolgerungen auch in diesen Bereichen gezogen werden können:

- Veränderung der Nutzungsverzichtsfläche
- Entwicklung der Totholzvolumina in den Flächen Nutzungsverzichtsflächen und Wirtschaftswald
- Rückgang Nadelholz als Rohstoff für den Bau

² 2 Sortimente: Stamm-, Industrie- und Energieholz.

Grundsätzlichen Bemerkungen zu Szenarioanalysen

Zur Einordnung der vorliegenden Studie werden im Folgenden einige grundsätzliche Bemerkungen zu den Szenarioanalysen angefügt:

Exploration der Zukunft: Die durchgeführte Szenarioanalyse hat einen explorativen Charakter, das bedeutet, dass die erstellten Szenarien den Möglichkeitsraum für vorstellbare, auch extreme Zukunftsbilder des Systems «Wald und Holz» abdecken, ohne Prognosen über wahrscheinliche Entwicklungen zu treffen.

Ganzheitliche Systemperspektive: Aufgrund der umfassenden Betrachtung des Systems und der Tatsache, dass in der Szenarioanalyse nur eine begrenzte Anzahl von Systemvariablen (Parametern) modelliert werden kann, verfolgt das Projekt einen umfassenden Ansatz. Eine detaillierte und räumlich differenzierte Darstellung der systemischen Wirkung von «CO₂ im Aargauer Wald» mit allen spezifischen Zusammenhängen ist nicht das Ziel dieses Projekts. Vielmehr geht es darum, die wesentlichen Rahmenbedingungen und zentralen Entwicklungen aus einer ganzheitlichen Perspektive aufzuzeigen, ihre Wechselwirkungen zu verstehen und mögliche Zukunftsszenarien für das System «Wald und Holz im Kanton Aargau» zu erfassen.

Klimapolitische Regelungen: Der Fokus der vorliegenden Modellierung liegt auf dem Verständnis des Systems «Wald und Holz» und dessen CO₂-Wirkung, inklusive der Frage, wie die CO₂-Wirkung optimiert werden kann. Zusätzlich zu solchen naturwissenschaftlichen Berechnungen gibt es klimapolitische Regelungen, zur Frage, welcher Anteil der CO₂-Wirkung anrechenbar ist (vgl. hierzu Ausführungen in der Fussnote 1). Diese Regelungen sind einerseits nicht ausreichend definiert, um sie auf Stufe Kanton anzuwenden. Andererseits hätte die erforderliche Genauigkeit der Berechnungen den Projektrahmen überstiegen. Zudem sind diese Regelungen Änderungen unterworfen und die Entwicklungen bis 2100 sehr unklar. Aus diesen Gründen wurde die Anrechenbarkeit der Senkenleistungen in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Im Bericht wird generell der Begriff «Senke» für das im betrachteten Jahr x neu gebundene CO₂ verwendet. Der Ausdruck «Speicher» bezeichnet, wie viel CO₂ im Jahr x in einem «Lager» oder in einem «Vorrat» gebunden ist.

3. Modellbeschreibung

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein Excel-Modell entwickelt, um die eingangs erläuterten Fragestellungen zu beantworten. Das Modell gliedert sich in eine Exceldatei (vgl. Tabelle 2 und Tabelle 3) welches für die Szenarien-Konstruktion als Datei kopiert und an festgelegten Stell-schrauben (Parametern auf dem Arbeitsblatt «Eingabe») verändert werden kann. Ein weiteres Excelblatt namens «Szenario_Vergleich_vx» dient dem Szenarien-Vergleich in Hinblick auf die wichtigsten Zielgrössen (tausend Tonnen CO₂-Äquivalente: kt CO_{2eq}).

Die Modellbeschreibung und die Erläuterung der Szenarien sind Bestandteil dieses Kapitels. Die einzelnen Szenarien-Excel sind wie folgt benannt (Tabelle 2 und Tabelle 3):

Dateiname Grundszenarien (.xlsx)	Beschreibung in Worten
Modell_vx_GS_Basis	Basisszenario (vgl. Abschnitt 3.5.2)
Modell_vx_GS_Energie	Energieszenario (vgl. Abschnitt 3.5.3)
Modell_vx_GS_CO ₂ -optimiert	CO ₂ -optimiertes Szenario (vgl. Abschnitt 3.5.4)

Tabelle 2 Die Dateinamen und ihre Beschreibung für die Grundszenarien (x bedeutet die Versionsnummer)

Dateiname Zusatzszenarien (.xlsx)	Beschreibung in Worten
Modell_vx_GS_Basis_reduzierter Zuwachs	Reduzierter Zuwachs im Basisszenario (vgl. Abschnitt 3.6)
Modell_vx_GS_Energie_reduzierter Zuwachs	Reduzierter Zuwachs im Energieszenario (vgl. Abschnitt 3.6)
Modell_vx_GS_CO ₂ -optimiert_reduzierter Zuwachs	Reduzierter Zuwachs im CO ₂ -optimierten Szenario (vgl. Abschnitt 3.6)

Tabelle 3 Die Dateinamen und ihre Beschreibung für die Zusatzszenarien (x bedeutet die Versionsnummer)

3.1 Modellübersicht

3.1.1 Modellstruktur

Das Modell wird in Abbildung 1 schematisch skizziert. Es besteht aus den drei Modulen «Wald», «Holz» und «Substitutionseffekte». Jedes Modul besteht aus Lagern (Box) und Prozessen (Pfeile), welche das Lager (z.B. in lebender Biomasse gespeicherter Kohlenstoff, ausgedrückt als CO_{2eq}) entweder erhöhen (z.B. Zuwachs) oder verringern (z.B. Mortalität).

Das Modul Wald beschreibt die CO₂-Speicherung in der lebenden Biomasse, dem Totholz und dem Waldboden. Das Modul Holz berücksichtigt die CO₂-Speicherung von Holz in den verschiedenen Anwendungsbereichen, d.h. im Bau als Konstruktionsholz, im Ausbau sowie Holzwaren. Das Energieholz wird ebenfalls in diesem Modul abgebildet. Im Modul Substitutionseffekte wird berechnet, welche Effekte durch die Substitution anderer Materialien resp. alternativer Energieträger entstehen.

Alle Module und die geplanten Modellierungsgrundlagen werden in den nachfolgenden Abschnitten genauer beschrieben. Für jedes Lager wird mindestens der Startwert und die Auflösung erläutert. Je nach Lager werden noch zusätzliche Aspekte beschrieben. Für alle Flüsse werden die wichtigsten Eckpunkte dargelegt, um zu verstehen, wie diese parametrisiert wurden.

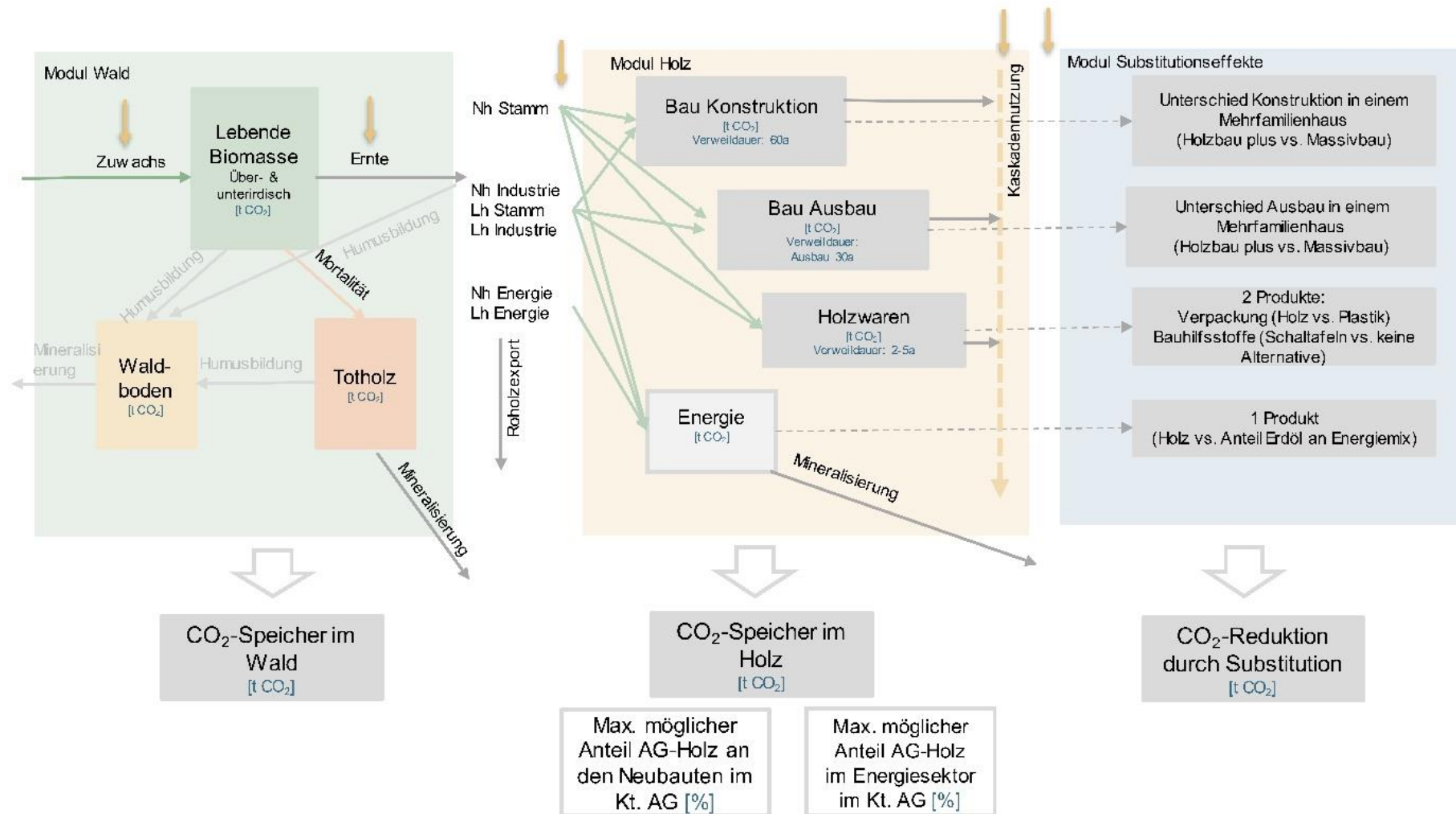


Abbildung 1 Die Abbildung beschreibt das Modell schematisch. Dieses besteht aus drei Modulen (Wald, Holz, Substitutionseffekte). Die Farben der drei Module werden auch im Excel so verwendet. Boxen sind Lager (z.B. in lebender Biomasse oder eingebautem Holz gespeicherter Kohlenstoff, ausgedrückt als CO_{2eq}), Pfeile sind Prozesse (z.B. Zuwachs). Der Output des Modells informiert über den im Wald gespeicherten Kohlenstoff (ausgedrückt als CO_{2eq}), im Holzlager gespeicherten CO₂ und durch Substitutionseffekte reduziertes CO₂. Die vertikalen orangen Pfeile zeigen auf, an welchen Stellen die Szenarien mittels Veränderung der Parameter wirken. (Abkürzungen: Nh Nadelholz, Lh Laubholz, Stamm Stammholz, Industrie Industrieholz, Energie Energieholz).

3.1.2 Implementation des Modelles

Das Modell wurde in Excel implementiert, wobei jeweils ein Excel File ein Szenario abbildet. Dies bedeutet, wenn mehrere Szenarien oder Varianten verglichen werden sollen, werden mehrere Excel Files erstellt. Die Ergebnisse können danach entweder direkt zwischen den Excels oder in einem weiteren Excel miteinander verglichen werden (vgl. Tabelle 2 und Tabelle 3).

Das Modell in Excel ist wie folgt aufgebaut:

- **Einleitung:** Angaben zum Modell
- **Eingabe:** Hier können zentrale Parameter eingegeben und deren Einfluss auf die CO₂-Wirkung des Waldes und der nachgelagerten Holzwirtschaft (=Modul Holz) untersucht werden. Die Auswahl ist so ausgelegt, dass wichtige Stellschrauben oder häufig diskutierte Parameter einfach und schnell angepasst werden können – so z.B. wie sich die Ernte im Startjahr und in Zukunft zusammensetzt oder ob und zu welchem Anteil Substitutionseffekte zukünftig anrechenbar sind. Die Eingabe ist farblich aufgeteilt in Bereiche, welche das Modul Wald (grün), das Modul Holz (gelb) sowie die Substitutionseffekte (blau) betreffen, sowie Parameter, welche den Aargauer Wald als Ganzes charakterisieren.
- **Resultat Senke:** Hier wird der Senkeneffekt pro Jahr und Modul ausgewiesen, als Tabelle wie auch als Abbildungen. Unterhalb der Tabelle wird zusammengefasst, welche Senkenleistung über alle Jahre kumuliert und im Durchschnitt pro Jahr erreicht wird.
- **Resultat Lager:** Hier ist ersichtlich, wie sich die Kohlenstofflager über die Zeit verändern (wie gross sind sie im Startjahr und wie entwickeln sie sich).
- **Weitere Tabellenblätter (ausgeblendet):** Die Berechnungen werden in mehreren Tabellenblättern durchgeführt. Dabei wird pro Modul jeweils unterschieden zwischen Tabellenblättern für die Berechnungen (z.B. Wald_Lager oder Wald_Flüsse) sowie Tabellenblätter mit festgelegten Parametern (z.B. Wald_fixe_Parameter oder Wald_Rohdaten).

3.1.3 Zielgrössen und Zeitrahmen

Einheit: Das Modell drückt alle Lager und Flüsse in der Einheit «CO_{2eq}» aus. Im Wald und im Holz wird eigentlich Kohlenstoff gespeichert, dies wird für die bessere Vergleichbarkeit mit dem Modul Substitutionseffekte in die Einheit CO_{2eq} umgerechnet. Die Substitutionseffekte werden als CO_{2eq} ausgedrückt, die für die Berechnung der Klimawirkung übliche Einheit. CO_{2eq} berücksichtigt neben CO₂ auch andere klimawirksame Treibhausgase (z.B. Methan) und ist darum die üblich verwendete Grösse. Im vorliegenden Bericht wird zur besseren Leserlichkeit auf die Ausschreibung von CO_{2eq} verzichtet und immer im Lauftext von CO₂ gesprochen. Gemeint ist damit dasselbe. In den Grafiken und Abbildungen wird die Einheit CO_{2eq} genutzt, damit die Resultate auch losgelöst vom Bericht korrekt wiedergegeben werden können.

Zielgrösse: Das Modell berechnet die Senkenleistung pro Jahr und kumuliert diese über den ganzen Zeitraum von 75 Jahren. Die Senkenleistung wird für jedes Lager einzeln ausgewiesen.

Zusammenhang Entwicklung Lager und Senkeneffekt

Die Lager im Modul Wald und Modul Holz verändern sich über die Zeit. Wenn das Lager zunimmt, ist ein Senkeneffekt eingetreten: Es wird mehr Kohlenstoff gespeichert als emittiert (positiver Senkeneffekt) und das Lager ist eine Senke. Wenn das Lager abnimmt, wird mehr Kohlenstoff emittiert als gespeichert (negativer Senkeneffekt) und das Lager wird zu einer Kohlenstoffquelle.

Zusätzlich kann die Entwicklung der Lager eingesehen werden sowie diverse Zusatzauswertungen ermöglichen die Interpretation und Plausibilisierung der Ergebnisse.

Zeitraumen: Die Modellierung beginnt im Jahr 2025 und endet im Jahr 2100.

3.2 Modul Wald

Im Wald gibt es drei relevante Kohlenstofflager: die lebende Biomasse, das Totholz und den Waldboden. Die Lager verändern sich aufgrund folgender Prozesse (nachfolgend Flüsse genannt): Zuwachs, Mortalität, Ernte, Humusbildung und Mineralisierung. Die Verbindung vom Modul Wald zum Modul Holz erfolgt über die Ernte.

Im Wald wird eigentlich Kohlenstoff gespeichert. Um jedoch über alle Module konsistent zu sein, werden im Modell alle Lager und Flüsse in der Einheit «CO_{2eq}» ausgedrückt; im vorliegenden Bericht wird im Lauftext von CO₂ gesprochen, gemeint ist damit dasselbe (vgl. Abschnitt 3.1.3). Nachfolgend wird die Modellierung aller Lager und Flüsse genauer erläutert.

3.2.1 Kohlenstofflager

Lebende Biomasse

Auflösung: Die lebende Biomasse im Aargauer Wald wird aufgeteilt in Wirtschaftswald und Nutzungsverzichtsfläche. Der Wirtschaftswald wird weiter aufgeteilt in die vier Ertragsklassen (EK) gemäss der zweiten Aargauer Waldinventur (AWI2) (Departement Bau, Verkehr und Umwelt des Kanton Aargau, 2018). Die Werte je Ertragsklassenflächen basieren auf einer Vor-Ort-Erhebung der Waldstandorte und sind wie folgt: 0=5.3%, 1=4.0%, 2=17.0%, 3=60.1%, 4=13.6%, wobei die Fläche von EK=0 anteilmässig an die restlichen aufgeteilt wird. EK=0 entspricht den Flächen, die nicht kartiert worden sind. In jeder Ertragsklasse wird zwischen zwei Baumartengruppen (BAG; Nadelholz, Laubholz) unterschieden. Auch auf der Nutzungsverzichtsfläche wird zwischen Nadelholz und Laubholz unterschieden.

Startwert: Als Startwerte wurden die Vorräte in [TfM/ha] gemäss AWI2 verwendet. Dabei konnten auf spezifische Werte je Ertragsklasse beim Wirtschaftswald und bei den Nutzungsverzichtsflächen zurückgegriffen werden (WSL-Spezialauswertung). Die Werte werden in Tabelle 4 gezeigt.

Jahr	Lebende Biomasse [TfM/ha]									
	Ertragsklasse 1		Ertragsklasse 2		Ertragsklasse 3		Ertragsklasse 4		Nutzungsverzichtsflächen	
	Nadelholz	Laubholz	Nadelholz	Laubholz	Nadelholz	Laubholz	Nadelholz	Laubholz	Nadelholz	Laubholz
2018	102	255	114	191	180	168	141	166	75	281
Totholz [TfM/ha]										
Wirtschaftswald Nutzungsverzichtsflächen										
14 42										

Tabelle 4 Startwerte für die lebende Biomasse im Modul Wald: Lebende Biomasse (in TfM/ha) für die einzelnen Ertragsklassen des Wirtschaftswalds sowie in den Nutzungsverzichtsflächen.

Bilanzierung: Das Lager in der lebenden Biomasse verändert sich aufgrund des Zuwachses, der Mortalität und der Ernte. Die Veränderung des Lagers im Wirtschaftswald wird wie folgt modelliert:

$$Lager_{t=2026,i,j} = Lager_{t=2025} + Zuwachs - Mortalität - Ernte.$$

Dabei wird das Lager für den Wirtschaftswald für jede Ertragsklasse und innerhalb der Ertragsklasse jeweils für Nadel- und Laubholz separat berechnet.

Die Bilanzierung für die Nutzungsverzichtsfläche erfolgt analog, aber ohne Ernte:

$$\text{Lager}_{t=2026,i,j} = \text{Lager}_{t=2025} + \text{Zuwachs} - \text{Mortalität}.$$

Auch hier wurde das Lager separat für Nadel- und Laubholz berechnet.

Eigentlich müsste auch die Humusbildung mitberücksichtigt werden (z.B. Laubfall Ende Jahr), dieser Prozess wird jedoch vernachlässigt (Begründung vgl. Abschnitt 3.2.2).

Umrechnung von Biomasse zu CO₂: Ein Baum speichert Kohlenstoff im Stamm, in den Ästen, Blättern und den Wurzeln. Für die Berechnung, wieviel Kohlenstoff in einem Baum enthalten ist, werden folgende Umrechnungsschritte verwendet:

- Die Biomasse gemäss AWI2 wird in der Regel in Tariffestmeter ausgewiesen, d.h. als Stammholz in Rinde. Wir gehen von Dichten von 0.386 t/m³ für Nadelholz und 0.556 t/m³ für Laubholz aus (analog Taverna et al. 2007). Des Weiteren nehmen wir an, dass die Biomasse 0.5 tC/t Biomasse speichert (analog Taverna et al. 2007).
- Extrapolation der Biomasse auf den ganzen lebenden Baum via *biomass expansion factor* (BEF) nach Thürig et al. (2007). Die Publikation hat BEF für Nadel- und Laubbäume je Region in der Schweiz und Höhenlage zusammengestellt. Wir haben darauf basierend für das vorliegende Modell einen gewichteten Mittelwert von 1.46 für Nadelbäume resp. 1.53 für Laubbäume berechnet.
- Umrechnung von tC zu tCO₂ anhand des Umrechnungsfaktors von 3.67 tCO₂ pro tC aus Taverna et al. 2007. Für den m³ Nadelholz wird die Menge tCO₂ zum Beispiel wie folgt berechnet:

$$\text{Dichte Nadelholz} \left[\frac{\text{tBiomasse}}{\text{m}^3} \right] * C - \text{Gehalt in Biomasse} \left[\frac{\text{tC}}{\text{tBiomasse}} \right] * \\ \text{Umrechnungsfaktor C zu CO}_2 \left[\frac{\text{tCO}_2}{\text{tC}} \right] * \text{BEF Nadelbaum}.$$

$$\text{Mit Zahlen versehen resultiert folgende Berechnung: } 0.385 \left[\frac{\text{tBiomasse}}{\text{m}^3} \right] * 0.5 \left[\frac{\text{tC}}{\text{tBiomasse}} \right] * \\ 3.67 \left[\frac{\text{tCO}_2}{\text{tC}} \right] * 1.46 = 1.03 \frac{\text{CO}_2}{\text{m}^3}.$$

Darstellung: Die Bilanzierung wird für jedes Unterkompartiment (z.B. Lebende Biomasse im Wirtschaftswald, Ertragsklasse 1, Nadelholz) separat berechnet. Dabei wird jeweils das Lager in den Einheiten Tfm/ha, Tfm (ganzer Wald) sowie kt CO₂ (ganzer Wald) ausgewiesen.

Totholz

Auflösung: Das Totholz wird einmal für den Wirtschaftswald und einmal für die Nutzungsverzichtsflächen modelliert. Ansonsten gibt es keine weitere Verfeinerung (d.h. keine weitere Auflösung bzgl. Nadel- oder Laubholz sowie ob stehend/liegend).

Im Totholzlager wird nur Stamm in Rinde berücksichtigt; der in Wurzeln und Ästen gespeicherte Kohlenstoff wird vernachlässigt. Das Totholzlager wird so unterschätzt. Dies ist jedoch übliche Praxis und ermöglicht eine einfachere Vergleichbarkeit mit anderen Daten. Der Kohlenstoff in

Wurzeln und Ästen ist mit dem in diesem Projekt verwendeten einfachen Mineralisierungsansatz nicht abbildbar. Der Einbezug des Kohlenstoffs in Wurzeln und Ästen wäre sehr aufwändig.

Startwert: Als Startwerte wurden direkt die in AWI2 rapportierten Vorräte in Tfm/ha für den Wirtschaftswald und die Nutzungsverzichtsflächen verwendet.

Bilanzierung: Das Lager im Totholz verändert sich aufgrund der Mortalität (Zunahme im Totholzlager) und der Mineralisierung (Abnahme im Totholzlager, welche mit einer Zerfallskonstante ausgedrückt wird). Die Abbildung der Mortalität und Mineralisierung wird in Abschnitt 3.2.2 erläutert. Vereinfacht lässt sich die Bilanz des Totholzlagers wie folgt beschreiben:

$$Lager_{t=2026} = Lager_{t=2025}^{(-Mineralisierungsrate\ k)*1\ Jahr} + Mortalität$$

Eigentlich müsste auch die Humusbildung mitberücksichtigt werden, dieser Prozess wird jedoch vernachlässigt (Begründung vgl. Abschnitt 3.2.2). Des Weiteren wird wie oben beschrieben angenommen, dass die nicht verwendeten Teile der Ernte und das Abholz ins Bodenkompartment gehen, sie werden somit in der Bilanz vernachlässigt.

Umrechnung von Biomasse zu CO₂: Die Umrechnung erfolgt grundsätzlich gleich wie bei der lebenden Biomasse. Für Totholz wurde eine Dichte von 0.24 t/m³ angenommen (basierend auf Dobbertin und Jüngling (2009)). Da wie oben erwähnt Äste, Wurzeln etc. im Totholzlager vernachlässigt wurden, wurde mit einem BEF von 1 gerechnet.

Darstellung: Die Bilanzierung wird für beide Unterkompartimente (Totholz im Wirtschaftswald und Totholz in der Nutzungsverzichtsfläche) separat berechnet. Dabei wird jeweils das Lager in den Einheiten Tfm/ha, Tfm (ganzer Wald) sowie kt CO₂ (ganzer Wald) ausgewiesen.

Das Kohlenstofflager im Startjahr beträgt 22 Mio. t CO₂ in der lebenden Biomasse und im Totholz (s. Excel Blatt «Wald_Lager», Summe Zellen AN14 und AQ14).

Waldboden

Auflösung: Es gibt ein Waldbodenlager für den ganzen Aargauer Wald. Es gibt keine weitere Unterteilung.

Startwert: Gemäss Waldbericht des BAFU (BAFU, 2015) betrug der Kohlenstoffvorrat im Waldboden inkl. organischer Auflage im Mittel rund 95 tC/ha (Mittelland) und rund 145 tC/ha (Jura). Für den Kanton Aargau wird ein gewichtetes Mittel von 104 tC/ha berechnet. Die Kohlenstoffvorräte nehmen mit zunehmender Höhenlage und den damit verbundenen kühleren und feuchteren Verhältnissen zu. Umgerechnet von Kohlenstoff in CO₂ wird für den Aargau ein gewichtetes Mittel von 380 tCO₂/ha verwendet.

Bilanzierung: Der im Boden gespeicherte Kohlenstoffvorrat ist mengenmässig relevant und muss mitbilanziert werden, wenn Werte über das Lager im Wald kommuniziert werden. Die Veränderung des C-Lagers im Waldboden ist jedoch vernachlässigbar. Dies, da der Wald bereits bestehend ist (keine Aufforstung) und klimabedingte Veränderungen (z.B. erhöhte Mineralisierung aufgrund des Temperaturanstiegs) nicht betrachtet werden. Die mittlere Senkenwirkung des Waldbodens gemäss Jahrbuch Wald und Holz (BAFU, 2021) bestätigt die untergeordnete Rolle der Veränderung (<<1% der Senkenleistung des Waldes). Mathematisch wird somit angenommen, dass die Inputs in den Waldboden gleich hoch sind wie die Verluste aufgrund der Mineralisierung.

Das Kohlenstofflager im Startjahr beträgt 18.6 Mio. t CO₂ im Waldboden (s. Excel Blatt «Wald_Lager», Zelle AR14).

3.2.2 Flüsse

Zuwachs

Aus den Vorrats- und Zuwachsdaten des AWI 2 wurde eine allometrische Beziehung (Exponentialfunktion) zwischen Vorrat (m³/ha) und Zuwachs (m³/(ha*a)) erstellt, aus welcher die Werte a und b abgelesen werden können. Mit dieser vorratsabhängigen Funktion wird in unserem Modell jeweils der Zuwachs berechnet:

$$\text{Zuwachs} = a * \text{Vorrat}^b$$

Die Werte für a und b sind für jede Ertragsklasse unterschiedlich. Es wurden insgesamt fünf Zuwachsfunktionen entlang der Ertragsklassen abgeleitet. Zwei davon sind in Abbildung 2 beispielhaft dargestellt. Es gibt jeweils eine Zuwachsfunktion pro Ertragsklasse sowie eine Zuwachsfunktion über alle Ertragsklassen. Diese wird für die Modellierung des Zuwachses in den Nutzungsverzichtsflächen genutzt. Die Zuwachsfunktion selbst unterscheidet nicht zwischen dem Zuwachs von Nadel- und Laubholz, was bei der Interpretation der Resultate beachtet werden muss, da Nadelholz unter den aktuellen klimatischen Bedingungen einen grösseren Zuwachs als Laubholz aufweist. Als Aufhängepunkt der Zuwachsfunktion wurde der EK-spezifische, gemittelte Zuwachs auf den mittleren Vorrat gemäss AWI2 gewählt. Der Verlauf bei höheren und niedrigeren Vorräten wurde gefittet (Verlauf der Kurve durch den mittleren AWI2-Vorrat, grüner Punkt in Abbildung 2). Des Weiteren wurden alle Zuwachsfunktionen gedeckelt, d.h. der Zuwachs verbleibt über einem gewissen Vorrat (600 TfM/ha in EK1, 700 TfM/ha in den anderen Ertragsklassen) auf gleichem Niveau. Die Werte wurden gutachtlich gemäss der AWI2 Daten festgelegt. Die Maximalwerte der im Modell erreichbaren Vorräte je Ertragsklasse wurden mittels Literaturwerten anhand von ertragskundlichen Experteneinschätzungen plausibilisiert. Da über die ganze Laufdauer des Modells (75 Jahre) in keiner Ertragsklasse Vorratsmengen erreicht werden, die unrealistisch wären, wurde kein Maximalwert auf Seite Vorrat in das Modell integriert.

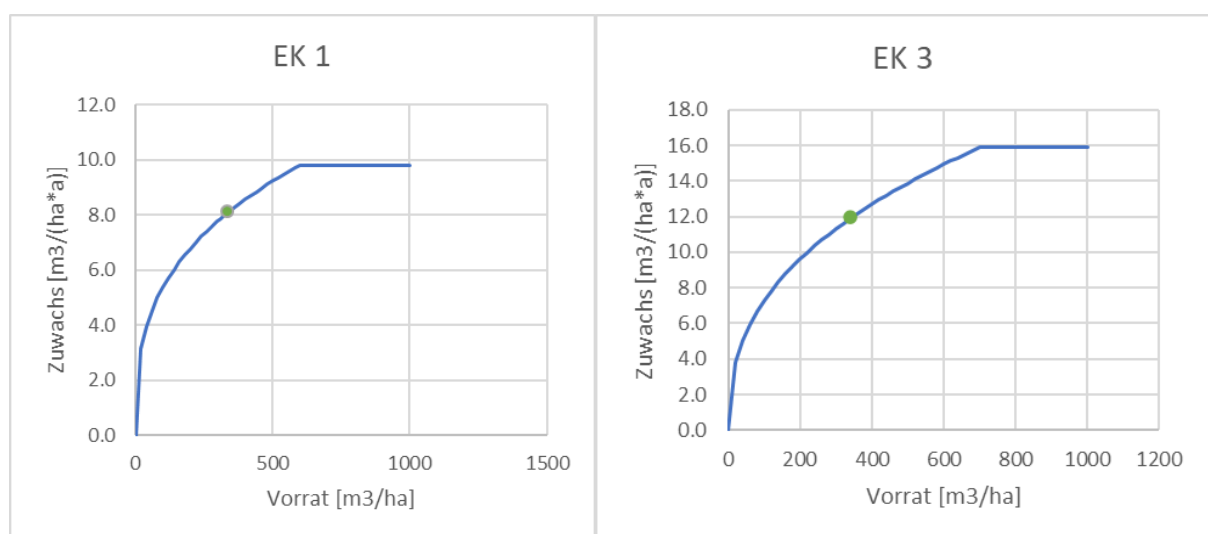


Abbildung 2 Zuwachsfunktionen für die Ertragsklassen 1 und 3 (blaue Linien) sowie EK-spezifischen mittleren Zuwächse bei mittlerem Vorrat gemäss AWI2 (grüne Punkte). Alle Zuwachsfunktionen und die benötigten Parameter sind im Excel im Tabellenblatt «Wald_fixe_Faktoren» ersichtlich.

Anschliessend wird angenommen, dass per Jahr 2100 $\frac{1}{3}$ des Zuwachses je Ertragsklasse auf Nadelholz und $\frac{2}{3}$ auf Laubholz fallen. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde dieser Wert variiert (vgl. Abschnitt 3.8 «Anteil Nadelholz in Zuwachs und Ernte»).

Die Berechnung des Zuwachses in einem spezifischen Lager (z.B. EK1, Nadelholz) erfolgte auf der Modell-Einheit Tfm/ha, konsistent mit den Einheiten der Zuwachsfunktion. Anschliessend wurde der Zuwachs auf die relevante Fläche (z.B. Fläche der EK1) hochgerechnet und in CO₂ umgerechnet. Die Umrechnung zu CO₂ erfolgte analog wie in Abschnitt 3.2.1 «lebende Biomasse» beschrieben.

Ernte

Die Abbildung der Ernte im Wirtschaftswald folgt im Wesentlichen dem Credo «weiter wie bisher», und entspricht den gesetzlichen Vorgaben einer nachhaltigen Bewirtschaftung, die einen Vorratserhalt anstreben. Die Ernte soll entsprechend den Zuwachs abschöpfen. Die totale Erntemenge wird somit basierend auf dem mittleren Netto-Zuwachs (Brutto-Zuwachs – Mortalität) der letzten 10 Jahren berechnet (Veränderbarer Parameter). Grund für die Wahl einer 10-Jahresperiode ist die Trägheit des Systems (Daten ergeben sich aus Betriebsplänen und der kantonalen Waldinventur jeweils ca. alle 10 Jahre). In den ersten zehn Jahren (2025 – 2035), können die Zuwachsmengen noch nicht vollständig aus dem Durchschnitt der zehn Vorjahre berechnet werden, weil diese noch nicht alle vorhanden sind. Entsprechend wird für die Berechnung der Ernte für die ersten zehn Jahre vor allem auf die Erntemenge gemäss Zuwachs-Startwert (Jahr 2025) zurückgegriffen. Anhand der Eingaben im Excel für die Jahre 2025, 2035, 2050 und 2100 wird die totale Erntemenge anschliessend weiter aufgeteilt auf Anteil Nadel- und Laubholz sowie jeweils auf die Anteile Stammholz, Industrieholz, Energieholz und Abholz. Der Anteil Nadelholz an der Ernte geht bis im Jahr 2100 kontinuierlich zurück.

		Nadelholz	Laubholz
Anteil Nadelholz an der Ernte	2025	58%	42%
	2035	56%	44%
	2050	53%	47%
	2100	33%	67%

Abbildung 3 Entwicklung Anteil Nadelholz an der Ernte Jahre 2025 – 2100 bei allen Szenarien

Anschliessend wird die Ernte (z.B. Menge Nadel-Stammholz) automatisch auf die einzelnen Ertragsklassen verteilt. Der Verteilschlüssel basiert auf dem für das betroffene Jahr modellierten Vorrat von Nadel-Stammholz in den einzelnen Ertragsklassen. Dies entspricht der Annahme, dass dort mehr geerntet wird, wo der Vorrat höher ist. In den Nutzungsverzichtsflächen gibt es keine Ernte.

Für die vorliegende Studie wurden im Modell folgende Parameter festgelegt:

- Als Startwert für die totale Erntemenge wird die Angabe gemäss AWI2 (473'000 Tfm/Jahr) gewählt.
- Die Berechnung der totalen Erntemenge erfolgt auf dem berechneten Netto-Zuwachs der letzten 10 Jahre.
- Die Aufteilung der Ernte im Startjahr auf Laub- und Nadelholz sowie weiter auf Stamm-, Industrie-, Energie- und Abholz erfolgt mittels der Daten der kantonalen Nutzungsrapporte (Kt. Aargau, 2021).
- Die Aufteilung der Ernte in den Jahren 2035, 2050 und 2100 erfolgte Szenario-abhängig (vgl. Abschnitt 3.5).

Mortalität

Die Modellierung der Mortalität erfolgt unter der Annahme, dass jedes Jahr ein konstanter Anteil der lebenden Biomasse abstirbt. Dabei wird eine unterschiedliche Mortalität im Wirtschaftswald und in den Nutzungsverzichtsflächen angenommen.

Der Mortalitätsfaktor für den Wirtschaftswald (0.4%) wurde wie folgt hergeleitet: Gemäss AWI2 betrug der mittlere Abgang 12 TfM/ha*a. Des Weiteren wird eine mittlere Ernte im Wirtschaftswald von 10.7 TfM/ha*a rapportiert. Die Differenz wird als Mortalität angenommen (1.3 TfM/ha*a) und entspricht 0.4% des mittleren Vorrats im Wirtschaftswald (330.3 TfM/ha).

Der Mortalitätsfaktor für die Nutzungsverzichtsfläche (1.1%) wurde analog bestimmt: Der mittlere Abgang in den Nutzungsverzichtsflächen betrug 3.9 TfM/ha, was 1.1% des mittleren Vorrats in den Nutzungsverzichtsflächen (356.7 TfM/ha) entspricht. Es wurde angenommen, dass der Abgang vollumfänglich der Mortalität entspricht und im Wald liegengelassen wird.

Das Totholzlager berücksichtigt nur Stamm in Rinde. Somit wird angenommen, dass nur der Stamm in Rinde aus der lebenden Biomasse in das Totholzlager gelangt. Äste, Wurzeln (und Blätter) gehen ins Bodenkompartment und werden so numerisch vernachlässigt (vgl. oben).

Mineralisierung

Die Mineralisierung des Totholzes wird gemäss Bütler R. et al. (2005) mittels eines Zerfalls erster Ordnung modelliert:

$$\text{Totholz}_{t=2026} = \text{Totholz}_{t=2025} e^{-k \cdot 1}$$

Die Mineralisierungsrate k ist dabei entscheidend für die angenommene Mineralisierungsgeschwindigkeit. Bütler et al. 2005 verwenden ein k von 2.5-4% für Mittelland und 2-3% für Jura. Diese Werte stimmen überein mit den Ergebnissen von Harauk et al. (2020). Diese Publikation hat aber auch aufgezeigt, dass die Zerfallskonstante stark abhängig ist von der betrachteten Baumart. Wir wählen für den Kanton Aargau ein k von 6%, als Mittelwert zwischen *Fagus spp.* (8.4%) und Weichholz (3.6%).

Humusbildung

Biomasse gelangt direkt von der Box «lebenden Biomasse» als Laub und feine Äste sowie von der Box «Totholz» im Rahmen des Abbaus in den Boden und trägt zur Humusbildung bei. Beide Flüsse werden nicht quantifiziert, aus den folgenden Gründen:

- **Waldboden:** Wie oben erwähnt, kann auf Stufe Waldboden angenommen werden, dass pro Jahr gleich viel organisches Material am Boden anfällt, wie mineralisiert wird. Somit müssen die Flüsse Humusbildung für die Box Waldboden nicht quantifiziert werden.
- **Lebende Biomasse:** Laub und feine Äste machen nur wenige % der Biomasse des Baumes aus³. Dies kann somit ganz vernachlässigt werden.
- **Totholz:** Gemäss LWF 2012 und WSL wird der Grossteil des Totholzes mineralisiert und nur geringe Mengen werden im Bodenumus eingelagert werden. Somit kann dieser Fluss auch hier vernachlässigt werden.

3 EBP 2020 - Studie basierend auf Pretzsch (2019) schätzte den Anteil Laub und feine Äste bei Buche auf 3%.

3.2.3 Eingabemaske

Im Excel-Modell ist es möglich, verschiedene Eingabeparameter zu verändern. In diesem Dokument wird vielfach beschrieben, was in welchem Excel-Blatt gemacht wurde. Will die Benutzerin / der Benutzer des Excel-Modells eigene Entscheidungen zu Eingabeparametern treffen und deren Auswirkungen auf die Resultate beobachten, empfiehlt es sich, das Excel-Blatt «Eingabe» zu nutzen. Daten in allen anderen Blättern sollten nicht – oder nur bei sich verändernden Rohdaten – angepasst werden, um die korrekte Funktionsweise des Modells zu wahren. Auch ist es wichtig, jeweils auf die Kontrollfelder (Soll: «100%») in grauer Schrift zu achten. Weicht das Soll vom 100% ab, färbt sich das Feld pink.

In der Abbildung 4 ist die Eingabemaske für das Modul «Wald», mit seinen verschiedenen möglichen Stellschrauben ersichtlich.

Modul Wald

Nutzungsverzichtfläche <i>Wie gross ist der Anteil der Nutzungsverzichtfläche?</i>	Jahr	Anteil	entspricht	
	2025	5.6%		2740 ha

Totholz <i>Wieviel Totholz hat es im Wald?</i>	Jahr	Wirtschaftswald	Nutzungsverzichtfläche	
	2025	14	42.1	TfM/ha

Holzernte <i>Wie fällt die Holzernte aus?</i>		Nadelholz	Laubholz	
Holzernte im Startjahr	2025	274'772	198'228	TfM

Zukünftig basiert Ernte auf dem Mittelwert des Nettozuwachses der letzten		10	Jahre	
---	--	----	-------	--

Anteil Nadelholz an der Ernte		Nadelholz	Laubholz	
	2025	58%	42%	
	2035	56%	44%	
	2050	53%	47%	
	2100	33%	67%	

Verteilung des Sortiments		Stammholz	Industrieholz	Energieholz	Abholz
Beim Nadelholz	2025	50%	15%	31%	5%
	2035	50%	15%	31%	5%
	2050	50%	15%	31%	5%
	2100	50%	15%	31%	5%
Beim Laubholz	2025	15%	12%	67%	6%
	2035	15%	12%	67%	6%
	2050	15%	12%	67%	6%
	2100	15%	12%	67%	6%

Abbildung 4 Eingabemaske für das Modul Wald

3.3 Modul Holz

Eine Übersicht über die mengenmässig relevanten Einsatzbereiche von Holz wird in Taverna et al. (2007), in der Studie der BFH (Flühmann, 2020) sowie in der Match-Studie (Matasci et al. 2019) gegeben. Die Studien unterscheiden sich im Scope/Zielrahmen, wie sie die Produkte einteilen und gliedern, aber die Studien sind relativ einheitlich bezüglich der mengenmässig relevantesten Produkte für den Einsatz von Holz in der Schweiz. Aus diesen Studien liess sich

ableiten, dass das Modell folgende Lager benötigt: Produkte im Bereich Konstruktion, Ausbau, Holzwaren und Energie. Ein weiterer, mengenmässig relevanter Holzeinsatz aus Sicht Endnachfrage sind die Holzmöbel. Jedoch werden diese in der Regel importiert, so dass Möbel für die vorliegende Modellierung nicht relevant waren.

Im Modul Holz werden schliesslich die folgenden fünf relevanten Kohlenstofflager verwendet: Bau (Konstruktion), Bau (Ausbau), Holzwaren (Paletten), Holzwaren (Schalungen) und Energie.

Die Lager repräsentieren die Menge an Holz, welches aus dem Aargauer Wald stammt und als Produkt in eines dieser Lager fliesst. Dabei ist irrelevant, wo das Holzprodukt eingesetzt wird, d.h. ob zum Beispiel im Kanton Bern oder in Deutschland. Gleichzeitig werden Holzprodukte, welche importiert werden, im Modul Holz nicht angerechnet. Diese Logik ist konsistent mit den Richtlinien gemäss IPCC und einer vereinfachten Betrachtung gemäss Wunsch des Auftraggebers und insbesondere sinnvoll, wenn man eine kantonale Perspektive einnimmt.

Es wird vom gleichen Kohlenstoffgehalt in allen Produkten ausgegangen, analog wie in der Studie von Taverna et al. (2007) ($1 \text{ m}^3 = 250 \text{ kg C}$). Der gespeicherte Kohlenstoff wird als CO₂ ausgewiesen.

Papier ist eigentlich ein eigenes Lager, welches im Rahmen dieses Modelles aber nicht explizit abgebildet wird. Die Papierindustrie eigens auszuweisen, würde die Modellkomplexität erhöhen, ohne einen echten Zusatznutzen zu liefern, darum wird sie nicht explizit ausgewiesen. Die Mengen Papier werden dem Lager Holzwaren (Schalungen) zugewiesen. Die Zuweisung erfolgte aufgrund folgender Überlegungen: 1) Die Verweildauer von Papier wäre ähnlich derjenigen bei Energie (sehr kurzlebig), aber Holzwaren sind ähnlich kurzlebig, der Fehler ist darum gering, wenn es nicht der Energie, sondern den Holzwaren (Schalungen) zugeordnet wird. 2) Die Substitutionseffekte sind bei Energie viel relevanter, während sie bei Holzwaren Null betragen. Aus Substitutionseffektsicht ist Papier somit besser bei Holzwaren (Schalungen) untergebracht als bei Energie.

Die Lager verändern sich aufgrund folgender Prozesse (nachfolgend Flüsse genannt): Inflow aus der Holzernte, Inflow aus der Kaskadennutzung, sowie Outflow des gespeicherten Kohlenstoffes aus dem Lager durch Erreichen des Endes der Verweildauer. Für alle Lager wird eine spezifische mittlere Verweildauer (vgl. 3.3.1 «Mittlere Verweildauer») angenommen. Unter Annahme einer exponentiellen Abnahme erster Ordnung wird berücksichtigt, dass nicht alle Produkte beispielsweise exakt 60 Jahre später frei werden, sondern dass einige Produkte früher und andere später frei werden, also ihr gespeichertes CO₂ in die Atmosphäre freigeben.

Die Verbindung zum Modul Wald erfolgt über die Ernte und die Verbindung zum Modul Substitutionseffekte über Verbindung der Substitutionseffekte je Referenzprodukt (vgl. Abschnitt 3.4).

Nachfolgend wird die Modellierung der Kohlenstofflager und Flüsse genauer beschrieben.

3.3.1 Kohlenstofflager

Auflösung der Lager

Für die Berechnung des Senkeneffekts wird keine weitere Auflösung innerhalb der Lager Bau Konstruktion, Bau Ausbau, Holzwaren und Energie benötigt. Die genauere Repräsentation der Lager wird erst im Zusammenhang der Substitutionseffekte relevant und wird dort genauer beschrieben.

Startwerte

Die Startwerte der Lager wurden wie folgt abgeleitet: Die Match-Studie (Matasci et al., 2019) beschreibt den Materialfluss des Holzes in der Schweiz für den Bau und den Konsum (Möbel, Papier, Tab 3-1). In der Schweizer Volkswirtschaft besteht im Jahr 2018 ein Lager von 46.7 Mio. Tonnen Holz. Dabei haben sich der Import und Export über alle Produkte hinweg in etwa ausgeglichen, so dass das Lager in der Schweiz in erster Annäherung dem Anteil an Schweizer Holz gleichgesetzt werden kann. Um den Anteil Aargauer Holz im Lager zu bestimmen, wird auf die Statistik Holzernte nach Kanton des BFS⁴ zurückgegriffen. Für die Berechnung des Startjahres gehen wir von einem Anteil von ca. 8% aus (Anteil Kanton Aargau schwankte zwischen 7% und 9% in den Jahren 2004 und 2018), was in einem totalen Lager an Aargauer Holz von 1.8 Mio. m³ Holz, oder 1.688 Mio. t CO₂ entspricht.

Die Verteilung des Holzlagers auf die einzelnen Lager Konstruktion, Ausbau, Holzwaren (inkl. Papier, den Schalungen zugeordnet) und Energieholz wird gemäss den Anteilen aus Taverna et al. (2007, Tab. 9) abgeleitet (vgl. Tabelle 5). Diese Abschätzungen basieren auf groben Vereinfachungen. Da jedoch alle Szenarien die gleichen Startwerte verwenden, kürzen sich allfällige Unsicherheiten beim Vergleich der Szenarien weg. Zudem zeigt eine einfache Hochrechnung, dass das Aargauer Holzlager 'nur' ca. 10% des Kohlenstofflagers in Aargauer Wald (Biomasse + Boden) und Holz ausmacht. Die Veränderung im Kohlenstofflager ist also die relevantere Grösse.

Lager (Startwert)

	Wert	Einheit
Anteil Konstruktion	53%	%
Anteil Ausbau	23%	%
Anteil Holzwaren	15%	%
Anteil Energie	9%	%
Anteil Holzwaren Paletten	6%	%
Anteil Holzwaren Schalungen	9%	%

Tabelle 5 Die Aufteilung auf die fünf Holzlager. Erläuterungen zu den Berechnungsschritten finden sich im Text und dem Tabellenblatt «Holz_fixe_Faktoren».

Mittlere Verweildauer

Für alle Lager wurden mittlere Verweildauern festgelegt. Für die Lager Konstruktion und Ausbau wurden mittlere Verweildauern von 60 und 30 Jahren angenommen. Die 60 Jahre für Konstruktion basiert auf der mittleren Lebensdauer von Gebäuden gemäss SIA-Norm, sie sind kürzer als in Taverna et al. (2007) (80 Jahre) angenommen. Es handelt sich somit um einen konservativen Wert. Die mittlere Verweildauer von 30 Jahren im Bereich Ausbau ist kürzer als die empfohlenen Werte für *harvested wood products* (hwp) gemäss IPCC⁵, womit es sich ebenfalls um einen konservativen Wert handelt.

Die mittlere Verweildauer für die Holzwaren wird als drei Jahre angenommen. Dies entspricht einer pragmatischen und eher konservativen Wahl zwischen 2-5 Jahren. Für Energieholz wird zwei Jahre angenommen (analog Taverna et al. (2007)). Das ist länger als durch das IPCC angenommen wird (Annahme IPCC: instantaneously oxidised⁶, Verweildauer 0 Jahre).

4 Online: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/land-forstwirtschaft/forstwirtschaft.assetdetail.22926974.html>

5 BAFU (April 2020) *Harvested wood products (HWP) in the Swiss Greenhouse Gas Inventory – NIR 2020*, Seite 1: Für 'sawnwood' wird eine Halbwertszeit von 35 Jahren, für 'wood-based panels' von 25 Jahren angegeben. Umgerechnet in eine Zerfallskonstante und schliesslich in eine Verweildauer, ergibt das Verweildauern von 50 respektive 36 Jahren. $Zerfallskonstante = \frac{\ln(2)}{\text{Halbwertszeit}}$; $\frac{1}{Zerfallskonstante} = \text{Verweildauer}$.

6 https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch12_HarvestedWoodProducts.pdf

Bilanzierung

Die Bilanz wird für alle fünf Holzlager separat berechnet. Das Lager verändert sich aufgrund des Inflows aus der Ernte und der Kaskadennutzung (Zunahme im Lager) sowie des Outflows (Abnahme im Lager). Die Inflows und Outflows werden in Abschnitt 3.3.2 erläutert. Vereinfacht lässt sich die Bilanz der Holzlager wie folgt beschreiben:

$$\text{Lager}_{t=2026} = \text{Lager}_{t=2025} \text{ abzgl. Verluste durch den Outflow} + \text{Inflow}_{\text{Holzernte}} + \text{Inflow}_{\text{Kaskadennutzung}}$$

3.3.2 Flüsse

Inflow

Die Summe der Nadelholzernte und Laubholzernte, welche aus dem Modul Wald hinausgeht, geht grundsätzlich ins Modul Holz hinein. Im Blatt Eingabe, Zeilen 32 - 41 ist ersichtlich, welche Anteile des Nadel-, respektive Laubholzes in Stammholz, Industrieholz, Energieholz und Abholz gehen (vgl. Kapitel 3.2.3). Bevor die Zuteilung zu den einzelnen Kohlenstofflagern vorgenommen wird, wird der Anteil Rundholz/Rohholz abgeschätzt, welcher direkt exportiert wird. Dieser exportierte Anteil wird im Modul Holz anschliessend nicht weiter berücksichtigt, weil üblicherweise nur der Kanton/das Land, wo die Mehrheit der Verarbeitungsschritte stattfindet, die CO₂-Wirkung anrechnet. Dieses Vorgehen vermeidet Doppelzählungen und ist somit konservativ, dafür aber vergleichbar.

Export: Der Anteil Export von Nadelrundholz/Nadelrohholz wurde wie folgt abgeschätzt: Gemäss Statistik des Verbands Holzwerkstoffe Schweiz HWS⁷ für das Jahr 2021 wurde 341 Mio. kg Nadelrundholz/Nadelrohholz exportiert. Im Vergleich zur schweizweiten Nadelholzernte (Stamm- und Industrieholz) gemäss BFS entspricht dies rund 26%. Somit wurde angenommen, dass 26% des Nadelholzinflows des Stamm- und Industrieholzes (welche zusammen 65% der Nadelholzernte ausmachen) nicht in der Schweiz verarbeitet wird, sondern direkt exportiert wird. Es werden also 26% von 65%, sprich 17% der Nadelholzernte exportiert. Es wurde angenommen, dass kein Energieholz exportiert wird.

Die Abschätzung für das Laubrundholz/Laubrohholz erfolgte analog und resultiert in einem Exportanteil von 75% bei Stamm- und Industrieholz (welche zusammen 27% der Laubholzernte ausmachen, vgl. Kapitel 3.2.3). Es werden also 75% von 27%, sprich 20% der Laubholzernte exportiert. Es wurde wiederum angenommen, dass Energieholz nicht exportiert wird.

Zuordnung: Die Zuordnung der Ernte je Sortiment zu den einzelnen Lagern in der Holzwirtschaft basiert auf diversen Datenquellen und Experteninputs, welche hier nicht im Detail erläutert werden. Alle Annahmen und Begründungen werden jedoch in den Zuordnungsdiagrammen im Detail erläutert und sind im Exceltool, Tabellenblatt «Holz_Rohdaten» transparent dokumentiert. Im Tabellenblatt «Eingabe» Modul Holz (ab Zeile 47) kann die Verteilung des Sortiments konsultiert werden. Zusammenfassend wurden folgende Überlegungen angewandt:

- *Energieholz (Nadel- und Laubholz):* Zuordnung eindeutig – geht in das Lager Energieholz.
- *Nadel-Stammholz im Startjahr:* Gemäss Statistik des BFS⁸ steht 61% des Stammholzes als Schnittholz zur Verfügung, während 39% als Restholz weiterverarbeitet wird. Bei der Zuordnung des Schnittholzes auf die einzelnen Lager im Startjahr konnte auf langjährige

7 Online: <https://hwsschweiz.ch/holzhandel-schweiz/statistik/>

8 Online: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/land-forstwirtschaft/forstwirtschaft/holzverarbeitung.assetdetail.26325864.html>

Zahlen und Erfahrungen aus dem Kompensationsprojekt Senke Schweizer Holz zurückgegriffen werden.⁹ Das Restholz wird entweder weiterverarbeitet oder energetisch genutzt. Die Flüsse des Restholzes und deren Anteile wurden aus Daten des BFS¹⁰, dem Jahresbuch Wald und Holz des BAFU (2021), und mittels Expertenschätzungen (Urs Luginbühl) sowie Erfahrungswerten aus dem Kompensationsprojekt Senke Schweizer Holz abgeschätzt.

- *Nadel-Industrieholz im Startjahr*: Die Datenlage ist hier unsicherer, es wurde angenommen, dass die Verteilung auf dem gleichen Schlüssel basiert wie das Restholz beim Schnittholz. Es ist zu beachten, dass nur 9% der Aargauer Holzernte im Startjahr in diese Kategorie fiel.
- *Laubholz Stammholz im Startjahr*: Die Zuordnung wurde anhand Expertenschätzungen (Urs Luginbühl) grob abgeschätzt. Die Unsicherheiten sind entsprechend gross. Jedoch ist zu beachten, dass im Startjahr der Anteil in dieser Kategorie nur 7% ausmacht.
- *Laubholz Industrieholz*: Nur ein sehr kleiner Teil wird in der Schweiz verarbeitet, wobei unklar bleibt, was im Ausland mit dem Rest geschieht. Die Herausforderung liegt darin, dass das Laubholz aufgrund der Eigenschaften schwierig zu verarbeiten ist und somit z.B. auch in der Plattenproduktion nur wenig beigemischt werden kann. Auch die Papierindustrie verwendet kein Laubholz. Numerisch wurde dieser Umstand pragmatisch gelöst, indem im Jahr 2025 0% der Ernte in den Ausbau geht und ein grösserer Teil in die Energie (25%).

Die Zuordnung in den Jahren 2026 bis 2100 ist Szenario-abhängig und wird in Abschnitt 3.5 genauer beschrieben. Zum Vergleich gibt die Abbildung 5 die Werte gemäss LFI4 wieder.

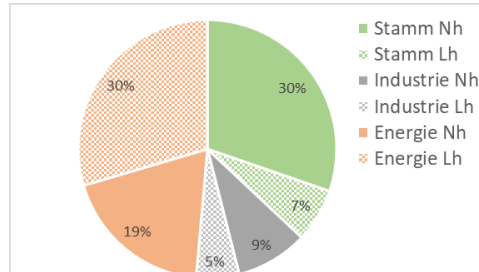


Abbildung 5 Die Holzernte im Kanton AG im Jahr 2021 setzte sich zu 79% aus Nadel-Stammholz und Energieholz (Nadel- und Laubholz) zusammen (Auszug aus LFI4 für den Kt. AG). Die übrigen drei Kategorien Laubholz Stammholz sowie Industrieholz Laubholz und Industrieholz Nadelholz machen zusammen nur 21% aus.

Verluste

Vom gewachsenen Baum bis zu der Verteilung auf die verwendeten Sortimente ergeben sich Verluste an Biomasse, welche im Modell abgebildet werden. Die Baumanteile gemäss Tabelle 6 werden bereits im Modul Wald abgezogen, wobei lediglich Stamm und Rinde als Ernte übrigbleiben.

9 Online: <https://ssh-pbs.ch/projekt-information-senken-projekt/>

10 Online: <https://www.bfs.admin.ch/asset/de/22988121>

Was	Gewählter Wert	Ausgedrückt als Teil	Ausgedrückt
		vom oberirdischen Baum	relativ zur Ernte (Stamm+Rinde)
Unterirdische Biomasse	30%	30%	53%
Oberirdische Biomasse	70%		
Davon im Stamm	73%	51%	90%
Davon in Blätter	4%	3%	5%
Davon Äste & Rinde			
Rinde	8%	6%	10%
Äste	15%	11%	19%

Tabelle 6 Zusammenfassung der Verluste von der lebenden Gesamtbiomasse des Baumes bis zur Ernte, wie sie nachher als Sortimente ins Holzmodul fliesst (gerundet auf 1%), man beachte das «Davon» in der Benennung. Stamm und Rinde ergeben in Spalte 3 zusammen 100%, und sind definiert als Ernte.

Von der Ernte wird nochmals das sogenannte Abholz abgezogen (6% für Laubholz, 5% für Nadelholz (vgl. Abschnitt 3.5.4)). Insgesamt ergibt sich dadurch ein totaler Verlust zwischen der stehenden oberirdischen Baummasse und der im Holzmodul als Ernte verwendeter Sortimente von gut 46%.

Des Weiteren sind im Übergang vom Waldmodul zum Holzmodul und innerhalb des Holzmoduls Verluste zu berücksichtigen. Die wichtigsten Verluste werden explizit ausgewiesen und verrechnet. Dazu gehören die Verluste beim Übergang von Waldmodul (Einheit TfM) zu Holzmodul (EfM), bei der Bildung von Restholz sowie Anteil des Laubstammholzes, welches tatsächlich im Produkt landet. Die übrigen Verluste wurden pragmatisch bei der Festlegung der Verwertungspfade mitgedacht, in Übereinstimmung mit der gewählten Flughöhe des Modells.

Aus diesem Grund darf für Überschlagrechnungen zu den CO₂-Wirkungen nie direkt die Erntemenge verwendet werden.

Outflow

Wie oben erwähnt, wird mit «Outflow» (in t CO₂) ein Abfluss des gespeicherten Kohlenstoffes aus dem Holz-Lager durch Erreichen des Endes der Verweildauer bezeichnet. Der Outflow wird analog zur IPCC-Empfehlung als exponentielle Abnahme erster Ordnung (und nicht als separater Fluss im Excel) gleich in den Lagern berechnet, basierend auf den mittleren Verweildauern je Kohlenstofflager, namentlich Konstruktion, Ausbau, Holzwaren, Energie (Vergleich Abschnitt «Verweildauer» im Kap. 3.3.1). Aus der Verweildauer wird eine jährliche Zerfallskonstante ermittelt.

Falls es keine Zuflüsse ins Holz-Lager gäbe, würde das Lager langsam abnehmen, wie in Abbildung 6 abgebildet. Wie oben im Abschnitt «Inflow» beschrieben, hat das Modell aber Inflows - die Abbildung 6 dient einfach dem Verständnis von Outflows.

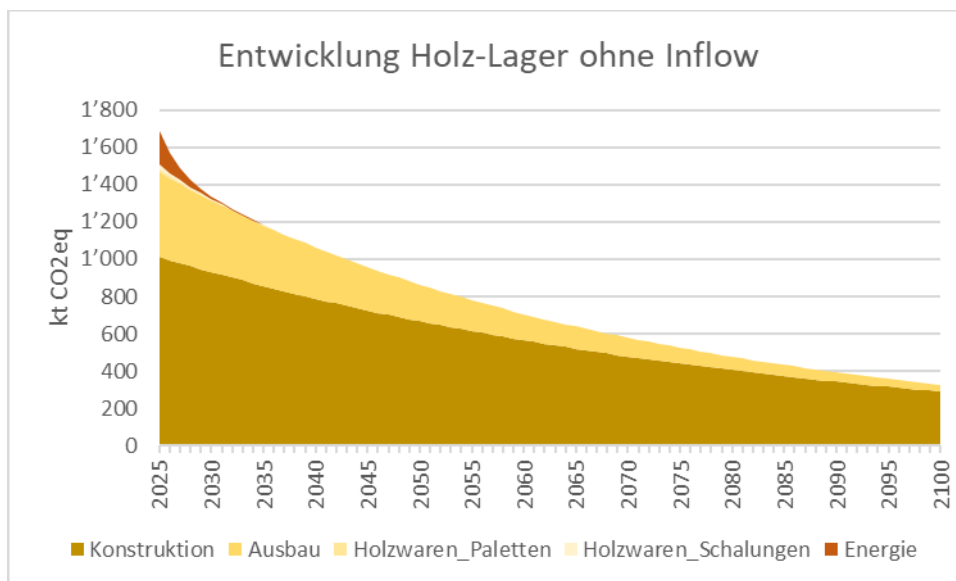


Abbildung 6 Outflows - Entwicklung Holz-Lager ohne Inflow, Jahre 2025 - 2100

Die für die Berechnung des Holz-Lagers nicht als separaten Fluss (nur eingebettet in die Exponentialfunktion des Lagers) berechneten Outflows werden später als eigener Fluss numerisch ausgewiesen, nämlich als Differenz zwischen totalem Inflow und der Senkenleistung des jeweiligen Holzlagers im betrachteten Jahr. Dieser Outflow als separat ausgewiesener Fluss wird für die Berechnung des Zuflusses in die Kaskadennutzung gebraucht.

Kaskadennutzung

Der Outflow aus den einzelnen Lagern wird aufgeteilt und zu den Inflows für die nachfolgende Nutzung. Dabei erlaubt das Modell via Eingabe alle möglichen Ausprägungen einer Kaskadennutzung abzubilden.

Für diese Studie wurde für das Startjahr angenommen, dass die Kaskadennutzung zu 37% in den Ausbau geht und zu 63% in die Energie, basierend auf der Studie Klingler et al. (2021). Die gleiche Annahme wurde für alle nachgeschalteten Nutzungen angenommen.

Die Kaskadennutzung in den Jahren 2026-2100 wurde Szenario-abhängig modelliert und wird in Abschnitt 3.5 beschrieben.

Mineralisierung

Der Outflow aus dem Energielager wird mineralisiert, d.h. der gespeicherte Kohlenstoff wird durch die Verbrennung freigesetzt und verlässt das System.

3.3.3 Eingabemaske

Im Excel-Modell ist es möglich, verschiedene Eingabeparameter zu verändern. In diesem Dokument wird vielfach beschrieben, was in welchem Excel-Blatt gemacht wurde. Will die Benutzerin / der Benutzer des Excel-Modells eigene Entscheidungen zu Eingabeparametern treffen und deren Auswirkungen auf die Resultate beobachten, empfiehlt es sich, das Excel-Blatt «Eingabe» zu nutzen. Daten in allen anderen Blättern sollten nicht – oder nur bei sich verändernde Rohdaten – angepasst werden, um die korrekte Funktionsweise des Modells zu wahren. Auch ist es wichtig, jeweils auf die Kontrollfelder (Soll: «100%») in grauer Schrift zu achten. Weicht das Soll vom 100% ab, färbt sich das Feld pink.

In der Abbildung 7 und der Abbildung 8 ist die Eingabemaske für das Modul «Holz» mit seinen verschiedenen möglichen Stellschrauben ersichtlich.

Modul Holz

Nutzung der Holzernte in der Holzwirtschaft

Nachfolgend wird für die Holzernte zugewiesen, wie das Holz in der Holzwirtschaft verwendet wird.

<u>NADELHOLZ</u>		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Nicht verarbeitet	
Stammholz	2025	19%	15%	13%	14%	13%	26%	
	2035	19%	15%	13%	14%	13%	26%	
	2050	19%	15%	13%	14%	13%	26%	
	2100	19%	15%	13%	14%	13%	26%	
Industrieholz	2025	0%	25%	0%	15%	34%	26%	
	2035	0%	25%	0%	15%	34%	26%	
	2050	0%	25%	0%	15%	34%	26%	
	2100	0%	25%	0%	15%	34%	26%	
Energieholz	2025						100%	
	2035						100%	
	2050						100%	
	2100						100%	

<u>LAUBHOLZ</u>		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Nicht verarbeitet	
Stammholz	2025	1%	2%	1%	0%	22%	75%	
	2035	1%	2%	1%	0%	22%	75%	
	2050	1%	2%	1%	0%	22%	75%	
	2100	1%	2%	1%	0%	22%	75%	
Industrieholz	2025	0%	0%	0%	0%	25%	75%	
	2035	0%	0%	0%	0%	25%	75%	
	2050	0%	0%	0%	0%	25%	75%	
	2100	0%	0%	0%	0%	25%	75%	
Energieholz	2025						100%	
	2035						100%	
	2050						100%	
	2100						100%	

Abbildung 7 Eingabemaske für das Modul Holz mit der prozentualen Aufteilung des Sortiments je Jahr, Teil 1. Da nur gerundete Werte gezeigt werden, ergibt die Summe des Sortiments in einzelnen Jahren scheinbar nicht exakt 100%.

Kaskadennutzung

Nachfolgend wird festgelegt, wie die Kaskadennutzung in der Holzwirtschaft aussieht.

		...den Ausbau	... die Energie	...die Holzwaren (Paletten)	...die Holzwaren (Schalungen)	... die Konstruktion
Von der Konstruktion in...	2025	37%	63%	0%	0%	0%
	2035	37%	63%	0%	0%	0%
	2050	37%	63%	0%	0%	0%
	2100	37%	63%	0%	0%	0%
Vom Ausbau in...	2025	37%	63%	0%	0%	0%
	2035	37%	63%	0%	0%	0%
	2050	37%	63%	0%	0%	0%
	2100	37%	63%	0%	0%	0%
Von den Holzwaren (Paletten) in...	2025	37%	63%	0%	0%	0%
	2035	37%	63%	0%	0%	0%
	2050	37%	63%	0%	0%	0%
	2100	37%	63%	0%	0%	0%
Von den Holzwaren (Schalungen) in...	2025	37%	63%	0%	0%	0%
	2035	37%	63%	0%	0%	0%
	2050	37%	63%	0%	0%	0%
	2100	37%	63%	0%	0%	0%

Abbildung 8 Eingabemaske für das Modul Holz mit der prozentualen Aufteilung des Sortiments je Jahr, Teil 2.

3.4 Modul Substitutionseffekte

Die Substitutionseffekte wurden für alle fünf Lager, d.h. für Konstruktion, Ausbau, Holzwaren (Palette) und Holzwaren (Schalungen) sowie Energie bestimmt.

Für die Berechnung der Senkeneffekte in der Holzwirtschaft (=Modul Holz) ist nur die Verweildauer und die mengenmässige Aufteilung auf die Holzlager relevant (vgl. Abschnitt 3.2.1). Für die Berechnung der Substitutionseffekte müssen diese Holzlager jedoch mit konkreten Produkten (z.B. Dachbalken, Holzpaletten) und deren Vergleichsprodukte hinterlegt werden.

Ursprünglich war geplant, für alle Lager eins bis zwei repräsentative Produkte und Vergleichsprodukte zu definieren und darauf basierend die Substitutionseffekte pro eingesetzte Menge Holz zu definieren. Während mengenmässig relevante Holzprodukte sich noch relativ einfach aus den oben genannten Studien ableiten lassen, zeigte sich schnell in den Interviews mit Experten im Bereich nachhaltiges Bauen und Holzindustrie, dass dieser Ansatz im Baubereich zu Problemen führt: So ist es z.B. aufwändig und kompliziert, eine für die Ökobilanzierung notwendige funktionelle Einheit¹¹ für die wichtigsten Produkte herzuleiten. Ausserdem kann nicht immer ein klares Vergleichsprodukt definiert werden, da es ein Grundsatzentscheid ist, wie gebaut wird (Massivbau oder Holzbau), d.h. die Verwendung der Holzprodukte ist oft voneinander abhängig. Ausserdem stellt sich die Frage, ob die hier relevanten Produkte in der Schweiz hergestellt oder in der Regel importiert werden. Darum wurde entschieden, für den Bereich Bau (Konstruktion und Ausbau) mit einem alternativen Ansatz (Vergleich eines repräsentativen Mehrfamilienhauses, vgl. nächster Abschnitt 3.4.1) zu arbeiten, während die übrigen Lager (Holzwaren und Energie) weiterhin produktbasiert bewertet wurden. Die mengenmässig dominanten Bauteile im Bereich Konstruktion und Ausbau waren konsistent mit den mengenmässig relevantesten Produkten im Baubereich, was den gewählten Ansatz bestätigt.

Für jedes Produkt wird der Substitutionseffekt pro Einheit Holz berechnet, damit der Substitutionseffekt mit der eingesetzten Menge Holz verrechnet werden kann (der Substitutionseffekt skaliert direkt mit der eingesetzten Menge Holz). Die Annahmen für alle fünf Lager werden nachfolgend im Detail erläutert.

3.4.1 Konstruktion und Ausbau

Für die Berechnung der Substitutionseffekte in den Lagern Konstruktion und Ausbau wird ein Mehrfamilienhaus in einer Holz- und Massivbauweise verglichen. Dabei wird auf die Studie von Savi und Klinger (2022) zurückgegriffen, welche die Materialisierung eines realistisch optimistisch repräsentativen Mehrfamilienhauses in Holzbauweise («Holzbau plus») und eines typischen Massivbaus («Massivbau») verglichen. EBP hat den Teil Ausbau insofern angepasst, dass im Holzbau Holzfenster und Parkettböden verwendet wurden, im Massivbau Kunststofffenster und Laminat (in der Originalstudie waren sie gleich materialisiert). Ausgehend von den Materiallisten wurde die Treibhausgasbilanz beider Gebäude berechnet. Die Modellierung der Treibhausgasemissionen der beiden Varianten erfolgte mit den Emissionsfaktoren aus der vom Bund anerkannten öffentlich zugänglichen Datenbank UVEK Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2022, welche als Grundlage für die KBOB-Empfehlung 2009/1 «Ökobilanzdaten im Baubereich» diente¹².

Anschliessend wurden die Bilanzen verglichen und heruntergebrochen auf die Menge Holz, die im Holzbau im Vergleich zum Massivbau zusätzlich verwendet wurde (Konstruktion: im Holz-

11 Ökobilanzen von Produkten werden basierend auf der funktionellen Einheit verglichen: So kann z.B. ein Holz- und Kunststoff-Palett nicht pro kg Palett verglichen werden, sondern der Vergleich muss für zwei Paletten mit der gleichen Tragleistung erstellt werden.

12 https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html

bau Plus wird 730 t verwendet, vs. 3 t im Massivbau, Ausbau: im Holzbau Plus wird 53 t verwendet, vs. 0 t im Massivbau). Der CO₂-Nutzen pro kg Holz wurde so berechnet und anschliessend im Modell verwendet.

Der berechnete CO₂-Nutzen sagt somit aus, wieviel besser die Treibhausgasbilanz der Konstruktion oder des Ausbaus in einem Holzgebäude ist, wobei der Nutzen gänzlich auf die Holzbauweise alloziert wird. Diese Annahme ist unter Berücksichtigung der verwendeten Materialien angemessen.

Wichtig ist dabei hervorzuheben, dass hier nicht nur der direkte Einsatz von Holz mit einer direkten Alternative abgeglichen wird (was bei einem produktbasierten Vergleich der Fall wäre), sondern es wird berücksichtigt, dass die Bauweise durch den Entscheid «Holzbau» oder «Massivbau» beeinflusst wird und auch andere Materialisierungskonsequenzen mit sich zieht. Des Weiteren entfallen in der Modellierung so die Unsicherheiten, wie die Mengen z.B. auf Dachbalken vs. Stützbalken zu verteilen sind, oder die Abhängigkeiten vom Einsatz von Dachbalken und Stützbalken, da der Einsatz von Holz oft ein Grundsatzentscheid ist und die Produkte abhängig voneinander zum Einsatz kommen (vgl. auch Ausführungen in der Einleitung oben in Abschnitt 3.4).

Die Berechnungen ergaben einen Substitutionsnutzen von 0.55 t CO₂/t Holz für Konstruktion und 1.02 t CO₂/t Holz für den Ausbau¹³.

3.4.2 Holzwaren: Schalungen und Paletten

Die Berechnung des Substitutionseffekts für die Lager Holzwaren basiert auf der Auswahl von eins bis zwei Produkten und ihren typischen funktionell äquivalenten Vergleichsprodukten. Die Produkte Holzschalungen sowie Paletten wurden ausgewählt, da sie mengenmässig relevant waren (gemäss Taverna et al. (2007) und Flühmann et al. (2020)), die Vergleichsprodukte relativ klar sind und die für die Modellierung notwendigen Daten zur Verfügung stehen.

Konkret wurden folgende Produkte ausgewählt.

- *Paletten*: Gemäss Flühmann et al. (2020) machen Paletten / Verpackungen 14% Anteil des Holzeinsatzes insgesamt aus. Als Vergleichsprodukt dient eine Kunststoffpalette (PP/PE-Mix, 0% Recyclinganteil) mit der gleichen Tragleistung. Die Berechnungen ergaben einen Substitutionsnutzen von 2.08 t CO₂/t Holz und ist aufgrund des nicht berücksichtigten Recyclinganteils möglicherweise etwas überschätzt (aufgrund der mengenmässigen Relevanz im Modell aber vernachlässigbar).
- *Schalungen (Holzschalung sägerau inkl. Lattung)*: Gemäss Flühmann et al. (2020) machen die Schalungen 7% des Holzeinsatzes insgesamt aus. Eine echte Alternative gibt es nicht¹⁴, so dass kein Substitutionseffekt berechnet wurde (Substitutionseffekt= 0).

¹³ *Berechnung für die Konstruktion*: Differenz in der CO₂-Bilanz zwischen Holzbau und Massivbau entspricht 402 t CO₂. Im Holzbau wurden 727 t Holz mehr verbaut als im Massivbau. Somit berechnet sich der Substitutionsnutzen pro t zusätzlich verbautes Holz auf 0.55 tCO₂eq/t Holz. *Berechnung für den Ausbau*: Differenz in der CO₂-Bilanz zwischen Holzbau und Massivbau entspricht 54 t CO₂. Im Holzbau wurden 53 t Holz mehr verbaut als im Massivbau. Somit berechnet sich der Substitutionsnutzen pro t zusätzlich verbautes Holz auf 1.02 tCO₂eq/t Holz.

¹⁴ Es gibt zwar Aluminiumschalungen, aber die werden sehr selten angewendet. Dies als Vergleichsprodukt anzunehmen wäre nicht repräsentativ. Holzbauten benötigen (abgesehen von einer allfälligen Unterkellerung) keine Holzschalungen (wird nur bei Massivbauten verwendet).

3.4.3 Energie

Der Substitutionseffekt der energetischen Nutzung von Holz wurde mit dem Einsatz von Erdöl verglichen. Dabei wurden sowohl die direkten wie auch die indirekten (vorgelagert, z.B. durch den Bau der Holzschnitzelheizung) Emissionen einbezogen.

Da auf dem Markt aber Erdöl nur einer von mehreren Energieträgern ausmacht, wurde der Substitutionseffekt für den Anteil Erdöl am Energieverbrauch in der Schweiz korrigiert. Somit wird davon ausgegangen, dass Holzschnitzelheizungen ähnlich klimafreundlich sind wie alternative erneuerbare Energieträger. Der Einfachheit vernachlässigt wird der möglicherweise substituierte Einsatz von Erdgas. Da die zukünftigen Annahmen bzgl. Energieträger aber sowieso hoch unsicher und hochsensitiv sind, wurde es als zielführender erachtet, dies mit dem Ersatz von Erdgas verbundenen Emissionen zu vernachlässigen und damit eine einfachere Nachvollziehbarkeit des Modells höher zu gewichten.

Die Berechnungen ergaben einen Substitutionsnutzen von 1.3 t CO₂/t Holz (vgl. Excel Subs_fixe Faktoren).

3.4.4 Zukünftige Anrechenbarkeit der Substitutionseffekte

Aktuell gibt es viele Zielsetzungen bzgl. Netto-Null. Sollte dies umgesetzt werden, wird z.B. Beton im Jahr 2050 auch emissionsfrei sein, und es gibt keinen Mehrnutzen mehr für den Einsatz von Holz gegenüber Beton. Der entsprechende Entwicklungspfad wird in Tabelle 7 gezeigt.

Die Annahme, ob und wann und in welchen Branchen Netto-Null kommen wird, ist somit höchst zentral aber auch höchst unsicher. Für die Modellierung der Szenarien wurde Netto-Null per 2050 angenommen, im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurden jedoch die Substitutionseffekte ebenfalls berechnet, sollte Netto-Null nicht oder erst später erreicht werden (vgl. Abschnitt 4.4.4).

	Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie
2025	100%	100%	100%	100%	38%
2035	50%	50%	50%	50%	23%
2050	0%	0%	0%	0%	0%
2100	0%	0%	0%	0%	0%

Tabelle 7 Annahme, bzgl. zukünftiger Anrechenbarkeit der Substitutionseffekte unter der Annahme, dass Netto-Null per 2050 erreicht wird. Die Prozentzahlen für Energie basieren auf dem Anteil Erdöl gemäss Energieperspektiven des BFE¹⁵

3.4.5 Eingabemaske

Im Excel-Modell ist es möglich, verschiedene Eingabeparameter zu verändern. In diesem Dokument wird vielfach beschrieben, was in welchem Excel-Blatt gemacht wurde. Will die Benutzerin / der Benutzer des Excel-Modells eigene Entscheidungen zu Eingabeparameter treffen und deren Auswirkungen auf die Resultate beobachten, empfiehlt es sich, das Excel-Blatt «Eingabe» zu nutzen. Daten in allen anderen Blättern sollten nicht – oder nur bei sich verändernde Rohdaten – angepasst werden, um die korrekte Funktionsweise des Modells zu wahren. Auch ist es wichtig, jeweils auf die Kontrollfelder (Soll: «100%») in grauer Schrift zu achten. Weicht das Soll vom 100% ab, färbt sich das Feld pink.

15 Online:[Energieperspektiven 2050+ \(admin.ch\)](#)

In der Abbildung 9 ist die Eingabemaske für das Modul «Substitutionseffekte», mit seinen verschiedenen möglichen Stellschrauben ersichtlich.

Modul Substitutionseffekte					
	In welchem Masse sollen die Substitutionseffekte angerechnet werden? <i>(0%: gar nicht, 100%: vollumfänglich)</i>				
	Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie
2025	100%	100%	100%	100%	38%
2035	50%	50%	50%	50%	23%
2050	0%	0%	0%	0%	0%
2100	0%	0%	0%	0%	0%

Abbildung 9 Eingabemaske für das Modul Substitutionseffekte

3.5 Parametrisierung der Szenarien

In diesem Abschnitt wird dargelegt, in welchen Parametern sich die modellierten Szenarien unterscheiden.

3.5.1 Stellschrauben je Szenario

Die drei Grundsznarien werden in Abschnitt 2 beschrieben. Tabelle 8 fasst die Charakteristiken der drei Grundsznarien etwas detaillierter zusammen.

Kurzbeschreibung: was wurde variiert	Basisszenario	Energieholznutzung	CO₂-optimiertes Szenario
Wie setzen sich die Sortimente in der Ernte zusammen	Gleich wie im Startjahr	Verschiebung zu vermehrter Energieholznutzung, Zahlen basierend auf Betriebsdaten von drei Betrieben mit den höchsten Energieholzanteilen	Verschiebung zu vermehrter Stammholznutzung, gefolgt von Industrieholz, Reduktion Energieholz.
Wie wird das Holz in der Holzwirtschaft (= Modul Holz) verwendet (Zuordnung der Ernte auf die einzelnen Lager)	Gleich wie im Startjahr	Gleich wie im Startjahr	Verschiebung hin zu vermehrtem Einsatz in der Konstruktion und Ausbau, weniger in die Energie, gleichbleibend bei den Holzwaren (geringe Anteile).
Kaskadennutzung: Wie wird das Holz weiter genutzt?	Gleich wie im Startjahr	Gleich wie im Startjahr	Verschiebung hin zu erhöhtem Anteil in den Ausbau und weniger in die Energie, sowie Annahme, dass zukünftig Wiederverwendung in der Konstruktion möglich sein wird.

Tabelle 8 Übersicht über die Eigenschaften der Grundsznarien. Dort wo im Laufe der Szenarien neue Werte hergeleitet wurden, wird im Text detaillierter darauf eingegangen.

Im Modell werden im Tabellenblatt «Eingabe» für alle Szenarien Werte für die Jahre 2025, 2035, 2050 und 2100 verlangt. Die Werte für die Jahre dazwischen werden linear interpoliert. Sofern das Szenario davon ausgeht «gleich wie im Startjahr», wurden die Werte aus dem Jahr 2025 für die betroffenen Jahre übernommen. Überall, wo Szenario-bedingte Verschiebungen angenommen wurden, werden die Annahmen und die Werte nachfolgend kurz beschrieben.

3.5.2 Basisszenario

Im Grundsznario Basis wurden überall die gleichen Werte wie im Startjahr angenommen (vgl. Tabellenblatt Eingabe im Modell für das Basisszenario).

3.5.3 Energieszenario

Im Grundszenario Energie wurde nach dem Jahr 2025 eine Verschiebung im Sortiment in der Ernte angenommen (im Excel im Blatt «Eingabe», Modul Wald), basierend auf empirischen aktuellen Daten von drei Betrieben im Kanton Aargau mit dem höchsten Energieholzanteil (im Schnitt 73% Energieholzanteil). Da eine solche Energieholzsteigerung für die Betriebe technisch einfach und ohne grosse Investitionen oder Anschaffungen umsetzbar ist, wurde angenommen, dass die Verschiebung schnell stattfinden kann. Der entsprechende Entwicklungspfad ist in Tabelle 9 gezeigt.

		Stammholz	Industrieholz	Energieholz	Abholz
Beim Nadelholz	2025	50%	15%	31%	5%
	2035	12%	10%	73%	5%
	2050	12%	10%	73%	5%
	2100	12%	10%	73%	5%
Beim Laubholz	2025	15%	12%	67%	6%
	2035	11%	10%	73%	6%
	2050	11%	10%	73%	6%
	2100	11%	10%	73%	6%

Tabelle 9 Verteilung des Sortiments im Startjahr und in den Folgejahren im Energieszenario. Der Anteil Abholz wurde konstant belassen.

Zum Vergleich ist in der folgenden Tabelle 10 die Sortimentsverteilung des Basisszenarios abgebildet:

		Stammholz	Industrieholz	Energieholz	Abholz
Beim Nadelholz	2025	50%	15%	31%	5%
	2035	50%	15%	31%	5%
	2050	50%	15%	31%	5%
	2100	50%	15%	31%	5%
Beim Laubholz	2025	15%	12%	67%	6%
	2035	15%	12%	67%	6%
	2050	15%	12%	67%	6%
	2100	15%	12%	67%	6%

Tabelle 10 Verteilung des Sortiments im Startjahr und in den Folgejahren im Basisszenario.

Vor allem beim Nadelholz zeigt sich im Energieszenario eine deutliche Verschiebung vom Stammholz hin zum Energieholz.

3.5.4 CO₂-optimiertes Szenario

Die Annahmen im Grundszenario CO₂-optimiert werden im Folgenden beschrieben. Zielsetzung war dabei ein «realistisch optimistisches» Szenario; die folgenden optimistischen Annahmen wurden getroffen:

- optimierte Sortimentsverteilung
- optimierte Nutzung in der Holzwirtschaft
- optimistische Annahmen bez. Verarbeitung von Nadel-Stammholz und -Industrieholz
- optimistische Annahmen bez. Verarbeitung von Laubholz
- optimierte Kaskadennutzung

Optimierte Sortimentsverteilung

Es wurde eine Verschiebung der Sortimente in der Ernte angenommen, hin zu einem vermehrten Stammholzanteil, gefolgt von vermehrtem Industrieholzanteil und einem Rückgang im Energieholzanteil. Der Rückgang im Energieholz ist dabei beim Nadelholz ausgeprägter als

beim Laubholz, da beim Laubholz aufgrund der Wuchseigenschaften und der physikalischen Eigenschaften der Spielraum zur Erhöhung des Stamm- und Industrieholzanteils als weniger gross erachtet wird. Die Werte wurden gutachtlich durch die Fachexpertinnen des Auftraggebers festgelegt und sind in Tabelle 11 ersichtlich. Die Unterschiede zum Basisszenario sind beim Vergleich mit Tabelle 10 festzustellen.

Verteilung des Sortiments		Stammholz	Industrieholz	Energieholz	Abholz
Beim Nadelholz	2025	50%	15%	31%	5%
	2035	60%	15%	20%	5%
	2050	60%	20%	15%	5%
	2100	60%	25%	10%	5%
Beim Laubholz	2025	15%	12%	67%	6%
	2035	19%	15%	60%	6%
	2050	24%	20%	50%	6%
	2100	25%	29%	40%	6%

Tabelle 11 Verteilung des Sortiments im Startjahr und in den Folgejahren im CO₂-optimierten Szenario. Der Anteil Abholz wurde konstant bei 5%, respektive 6% belassen.

Optimierte Nutzung in der Holzwirtschaft

Eine optimierte Nutzung des Holzes in der Holzwirtschaft (= Modul Holz) sieht vor, dass der Anteil in der Konstruktion und dem Ausbau zunimmt, während der Anteil Holzwaren und Energie abnimmt. Dies aus der Überlegung, dass Holz in der Konstruktion und im Ausbau eine längere Verweildauer hat als in Holzwaren und in der Energie, nämlich 30 Jahre versus drei, resp. zwei Jahren (vgl. Erklärung in Kap. 3.3.1). Konkret wurden folgende Werte gemäss Tabelle 12 angenommen:

<u>NADELHOLZ</u>		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Nicht verarbeitet (Export)
Stammholz	2025	19%	15%	13%	14%	13%	26%
	2035	24%	19%	10%	9%	11%	26%
	2050	30%	25%	5%	5%	8%	26%
	2100	35%	26%	4%	2%	7%	26%
Industrieholz	2025	0%	25%	0%	15%	34%	26%
	2035	4%	31%	0%	10%	29%	26%
	2050	6%	39%	0%	7%	22%	26%
	2100	9%	41%	0%	4%	19%	26%
Energieholz	2025					100%	
	2035					100%	
	2050					100%	
	2100					100%	
<u>LAUBHOLZ</u>		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Nicht verarbeitet (Export)
Stammholz	2025	1%	2%	2%	0%	22%	75%
	2035	2%	2%	2%	0%	21%	75%
	2050	4%	2%	2%	0%	18%	75%
	2100	6%	3%	1%	0%	15%	75%
Industrieholz	2025	0%	0%	0%	0%	25%	75%
	2035	2%	2%	0%	0%	21%	75%
	2050	4%	4%	0%	0%	16%	75%
	2100	7%	7%	0%	0%	11%	75%
Energieholz	2025					100%	
	2035					100%	
	2050					100%	
	2100					100%	

Tabelle 12 Zuordnung der Holzernte zu den Sortimenten über die Zeit im CO₂-optimierten Szenario.

Die Verschiebungen basieren auf diversen Annahmen und Expertenschätzungen und sind im Excel, Tabellenblatt «Holz_Rohdaten» im Detail dokumentiert. Zusammenfassend wurden folgende Trends angenommen:

Nadel-Stammholz

- Die Aufteilung von Nadel-Stammholz auf Schnittholz (61%) und Restholz (39%) bleibt auch in Zukunft gleich, da diese v.a. auf kaum veränderbaren physikalischen Materialeigenschaften basiert. Zwar könnte es sein, dass mit der Scrimber Technologie¹⁶ zukünftig 80-90% des Holzes als Schnittholz herausgeholt werden könnte, jedoch ist diese Technologie noch nicht marktreif. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde der Einsatz der Scrimber-Technologie getestet.
- Technisch wäre alles Nadel-Schnittholz in der Konstruktion verwendbar, praktisch ist jedoch davon auszugehen, dass das Nadel-Stammholz weiterhin auch in anderen Anwendungszwecken verwendet wird (insb. im Ausbau). Es wurde somit ein Kompromiss diverser Anwendungszwecke angenommen. Es wurde angenommen, dass zukünftig keine Holzwaren (Schalungen) mehr produziert werden, da die Bauweise verändert wird. Zudem wird weniger in der Verpackungsindustrie verwendet (Ersatz durch andere biogene Materialien). Nischenutzungen (Gartenholz, Landwirte) machen einen kleinen Teil aus und werden auch zukünftig einen kleinen Teil ausmachen.

¹⁶ Technologie zur Verarbeitung von «minderwertigen» Holzsortimente, die es erlaubt einen grösseren Anteil des gesamten Holzvolumens als herkömmlich zu hochwertigen Bauprodukten zu verarbeiten. (https://www.scrimber.com/media/docs/downloads/de/BFH-Factsheet_Scrimber_d-f.pdf)

- Annahme, dass das Restholz zukünftig vermehrt verarbeitet wird. In der Verarbeitung ergeben sich neue Anwendungszwecke in der Konstruktion, Nachfrage im Ausbau bleibt vorhanden, Nachfrage in der Papierindustrie geht zurück. Energetische Nutzung geht zurück, bleibt aber auch in Zukunft vorhanden.

Nadel-Industrieholz

- Gleiche Annahmen wie für Nadel-Restholz.

Laubholz

Der zukünftige Einsatz von Laub-Stammholz ist unsicher. Es ist absehbar, dass das Angebot an Nadelholz zurückgehen wird und das Angebot an Laubholz zunehmen wird. Aktuell wird Laubholz im Baubereich und in der Verarbeitung wenig nachgefragt, und es stellt sich die Frage, ob dies zukünftig so bleiben wird oder ob sich die Technologie und Baubranche an das vermehrte Laubholzangebot anpassen wird. Darum wurde die Zuordnung bei Laubholz in der Sensitivitätsanalyse weiter getestet. Im CO₂-optimierten Szenario wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die grossen Verluste bei der Verarbeitung (nur 20% des Schnittholzes gelangen ins Produkt, der Rest wird mehrheitlich energetisch genutzt) werden etwas reduziert, zukünftig gelangt 40% des Schnittholzes ins Produkt.
- Der Anteil des Schnittholzes in der Konstruktion erhöht sich, während der Anteil in den übrigen Anwendungen zurückgeht.
- Der Einsatz von Restholz wird zukünftig in der Konstruktion und im Ausbau nutzbar sein (jeweils 33%), während der energetische Einsatz von 100% auf 34% zurückgeht. Es ist zu beachten, dass dies zu einem gewissen Grad eine disruptive Entwicklung voraussetzt. Ähnliche Annahmen werden für das Industrieholz getroffen.

Optimierte Kaskadennutzung

Bei der Kaskadennutzung wurde angenommen, dass vermehrte Nachfolgenutzung im Ausbau möglich wird und der Anteil energetischer Verwertung je Nutzungszyklus verringert wird. Es wird bei allen Holzlagern die gleiche Zuordnung angenommen. Bei der Konstruktion wird zusätzlich angenommen, dass zukünftig die Wiederverwendung von Bauprodukten möglich sein wird. Dies bedingt aber, dass vorgelagert die Produkte anders im Bau eingebaut werden, sprich z.B. mechanisch befestigen anstatt Kleben oder standardisierte Produktgrössen nutzen. Aus diesen Überlegungen resultierten die Werte gemäss Tabelle 13 unten:

		...den Ausbau	... die Energie	...die Holzwaren (Paletten)	...die Holzwaren (Schalungen)	... die Konstruktion
Von der Konstruktion in...	2025	37%	63%	0%	0%	0%
	2035	38%	40%	0%	0%	22%
	2050	39%	25%	0%	0%	36%
	2100	40%	20%	0%	0%	40%
Vom Ausbau in...	2025	37%	63%	0%	0%	0%
	2035	45%	55%	0%	0%	0%
	2050	65%	35%	0%	0%	0%
	2100	80%	20%	0%	0%	0%
Von den Holzwaren (Paletten) in...	2025	37%	63%	0%	0%	0%
	2035	45%	55%	0%	0%	0%
	2050	65%	35%	0%	0%	0%
	2100	80%	20%	0%	0%	0%
Von den Holzwaren (Schalungen) in...	2025	37%	63%	0%	0%	0%
	2035	45%	55%	0%	0%	0%
	2050	65%	35%	0%	0%	0%
	2100	80%	20%	0%	0%	0%

Tabelle 13 Kaskadennutzung in der Holzwirtschaft (= Modul Holz) im CO₂-optimierten Szenario. Für jedes Holzlager wird festgelegt, wieviel und wohin der Outflow geht.

Zum Vergleich ist in der folgenden Tabelle 14 die Kaskadennutzung des Basisszenarios abgebildet:

		...den Ausbau	... die Energie	...die Holzwaren (Paletten)	...die Holzwaren (Schalungen)	... die Konstruktion
Von der Konstruktion in...	2025	37%	63%	0%	0%	0%
	2035	37%	63%	0%	0%	0%
	2050	37%	63%	0%	0%	0%
	2100	37%	63%	0%	0%	0%
Vom Ausbau in...	2025	37%	63%	0%	0%	0%
	2035	37%	63%	0%	0%	0%
	2050	37%	63%	0%	0%	0%
	2100	37%	63%	0%	0%	0%
Von den Holzwaren (Paletten) in...	2025	37%	63%	0%	0%	0%
	2035	37%	63%	0%	0%	0%
	2050	37%	63%	0%	0%	0%
	2100	37%	63%	0%	0%	0%
Von den Holzwaren (Schalungen) in...	2025	37%	63%	0%	0%	0%
	2035	37%	63%	0%	0%	0%
	2050	37%	63%	0%	0%	0%
	2100	37%	63%	0%	0%	0%

Tabelle 14 Kaskadennutzung in der Holzwirtschaft (= Modul Holz) im Basisszenario

3.6 Zusatzszenario: Reduzierter Zuwachs

Im Rahmen der sich abzeichnenden klimatischen Veränderungen im Kanton Aargau, ausgelöst durch den globalen Klimawandel, wird sich voraussichtlich der Zuwachs verringern. Das Zusatzszenario des reduzierten Zuwachses wird auf alle drei Grundscenarien angewendet (Basis, Energie, CO₂-optimiert). Alle Eingaben in den jeweiligen Szenarien bleiben gleich, mit dem einzigen Unterschied, dass sich bei allen Szenarien der Zuwachs verringert.

Huber et al. (2021) orientieren sich unter anderem an den Schweizer Klimaszenarien CH2011 und präsentieren verschiedene Möglichkeiten der Biomassenentwicklung (A2.1, A2.2, A2.3) zwischen dem Jahr 2000 und 2200. Für den Kanton Aargau wurden die Höhenkategorie «submontan SM» und die Bodenqualität «rich soil» angenommen und die entsprechende Biomasseabnahme (ausgedrückt als Basalfläche (m² / ha)) der Studie von Huber et al. (2021) entnommen. Die darin enthaltenen Szenarien A2.1 und A2.2 zeigen moderate, das Szenario A2.3 starke Auswirkungen des Klimawandels auf die Biomassenentwicklung. Alle Szenarien von Huber et al. (2021) weisen ihre jeweiligen spezifischen Unsicherheitsbereiche auf.

Für die Zusatzszenarien wurde der Unsicherheitsbereich des A2.2 ausgewählt, weil damit sowohl die moderaten wie auch die starken Auswirkungen (A2.3) abgedeckt sind. Entsprechend wurde die folgende Entwicklung auf den Zuwachs im Modell angewandt (Blatt Wald_fixe_Faktoren):

Klimabedingt reduzierter Zuwachs

2025	100%
2050	98%
2075	89%
2100	80%

Im Modell werden diese Werte für die Jahre 2025, 2050, 2075 und 2100 ins Tabellenblatt «Eingabe» übernommen. Die Werte für die Jahre dazwischen werden linear interpoliert. Die prozentualen Werte für den reduzierten Zuwachs werden auf die Berechnung der Zuwachsflüsse (Tfm/ha/Jahr) über alle Ertragsklassen und die Nutzungsverzichtsfläche, sowie über beide Baumartengruppen (Nadelholz, Laubholz) angewendet (Blatt Wald_Flüsse). Diese Zuwachsflüsse werden somit entsprechend reduziert.

Die oben ermittelte und im Modell verwendete prozentuale Abnahme gibt lediglich den direkt klimatisch bedingten Rückgang an Wuchsleistung der Bäume wieder und unterschätzt wohl die tatsächliche Reduktion des Zuwachses aufgrund weiterer Faktoren wie z.B. Störereignisse oder der Verschiebung der Altersverteilung der Bäume. Diesen Effekt verdeutlicht auch ein Vergleich der LFI-Zuwachsentwicklung zwischen dem LFI1 und dem LFI5, welcher ergibt, dass der aargauische Zuwachs bereits innerhalb der vergangenen ca. 30 Jahre um etwa 16% abgenommen hat, wobei hier Waldschäden mit aufgenommen wurden.

3.7 Unsicherheiten und Limitierungen

Das Ziel der vorliegenden Studie war die Entwicklung eines Modelles, welches wo sinnvoll vereinfacht und dafür umso nachvollziehbarer ist. Die Unsicherheiten sollten dabei transparent ausgewiesen werden können.

Nachfolgend werden die relevantesten Unsicherheiten und Limitierungen aufgelistet. Es wird ausserdem erläutert, wie mit den Unsicherheiten umgegangen wird:

Modul Wald

- *Zuwachs von lebender Biomasse*: Die Zuwachsfunktion wurde pro Ertragsklasse festgelegt, der Zuwachs wird anschliessend auf Nadel- und Laubholz verteilt. Die Funktion an sich unterscheidet somit nicht zwischen Zuwachs im Laub- und Nadelholz. Folgender Umgang damit wurde gewählt: Der Verteilschüssel wurde im Rahmen der Sensitivitätsanalyse variiert und zeigte relativ grosse Sensitivität. Diese Unsicherheit muss somit bei der Interpretation der Ergebnisse mitberücksichtigt werden. Die Unsicherheit bezieht sich nur auf die absoluten Werte und kürzt sich bei Vergleichen zwischen Szenarien raus. Bei der Kommunikation von Werten sollte dies dennoch bedacht werden.
- *Nadel- und Laubholz: Gleiche Zuwachsfunktion aber unterschiedliche CO₂-Speicherung*: Wie oben erläutert, unterscheidet der Modellaufbau im Zuwachs keine Baumartengruppen. Gleichzeitig werden aber die unterschiedlichen Holzdichten und BEF zwischen den Baumartengruppen und damit die CO₂-Speicherung pro m³ Holz unterschieden und somit berücksichtigt. Dieser Gegensatz wird in der Diskussion im Abschnitt 5.5 behandelt.
- *Totholz*: Eine Unterscheidung zwischen liegendem und stehendem Totholz wird zur Vereinfachung des Modelles vernachlässigt. Die Unterscheidung wäre aus Sicht einer Diskussion bzgl. der Waldfunktion Biodiversität hilfreich, aus Sicht CO₂ allerdings nur dann relevant, falls unterschiedliche Mineralisierungsgeschwindigkeiten verfügbar wären. Zudem wird das Totholz vereinfacht dargestellt, da Wurzeln, Äste usw. vernachlässigt werden. Dies führt zu einer Unterschätzung des Totholzlagers. Da das Totholzlager jedoch insgesamt aus Kohlenstoffspeichersicht wenig relevant ist, ist diese Unterschätzung tragbar. Bei der Kommunikation von Werten sollte dies dennoch bedacht werden.

Modul Holz

- *Reaktionsfähigkeit der Holzwirtschaft*: 1) Das Modell nimmt in der Holzwirtschaft an, dass diese die Nachfrage jederzeit deckt – sprich laufend genügend Angebot zur Verfügung stellen kann. In Realität ist die Verarbeitungskapazität einerseits auf Mindestmengen angewiesen und andererseits kann es sein, dass ein höheres Holzangebot nicht zu einer erhöhten Verarbeitung führen würde, u.a. wegen Kapazitätsgrenzen (sondern dann wohl exportiert wird). 2) Aktuell wird angenommen, dass die Holzwirtschaft sich an das gesteigerte Laubholzangebot anpassen kann. Die Frage, ob dem innert nützlicher Frist (bis 2050) so ist und welche Mittel dafür nötig sind, bleibt offen.
- *Zuordnung der Ernte auf die Lager in der Holzwirtschaft*: Die Annahmen für die Zuordnung wurden in Abschnitt 3.3 zusammengefasst. Die grössten Unsicherheiten im Startjahr liegen vor für das Nadel-Industrieholz sowie den Einsatz von Laub-Stamm- und Laub-Industrieholz. Im Startjahr macht dieses Sortiment jedoch rund 20% der Ernte aus. Somit ist eine pragmatische Abschätzung gerechtfertigt. Im Rahmen der Szenarios stellt sich die Frage, wie zukünftig mit dem vermehrten Angebot an Laubholz umgegangen wird. Aktuell wird das Laubholz in der Baubranche und Verarbeitung nur wenig eingesetzt. Diese Unsicherheiten wurden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse getestet. Sollte die Holzwirtschaft das Laubholz nicht verwenden können, entspricht dies näherungsweise dem Energieszenario (geringe stoffliche Verwendung von Laubholz in der Holzwirtschaft, geringe stoffliche Verwendung von Nadelholz aufgrund des Rückgangs in der Ernte).
- *Unsicherheiten in den Startwerten*: Die Startwerte der einzelnen Lager in der Holzwirtschaft sind mit relativ hohen Unsicherheiten behaftet, die Grössenordnungen sind jedoch belastbar. Eine genauere Bestimmung wäre sehr aufwändig und weiterhin mit Unsicherheiten behaftet. Die Unsicherheiten kürzen sich beim Vergleich der Szenarien weg, so dass insgesamt belastbare Aussagen machbar sind.
- *Senkeneffekte des Energieholzes*: Dieser Senkeneffekt ist schwierig zu quantifizieren und somit mit hohen Unsicherheiten behaftet. Je nach Szenario ist der Beitrag mengenmässig

gesehen nicht vernachlässigbar. So trägt der Senkeneffekt des Energieholzes beim Basiszenario rund 1/3 zum Senkeneffekt des Moduls Holz bei, während im CO₂-optimierten Szenario der Beitrag des Energieholzes im Modul Holz nur 3% beträgt. Auf der anderen Seite ist der Vergleich zwischen den Szenarien belastbar: Beim Energieszenario ist der Senkeneffekt am grössten, im CO₂-optimierten Szenario am kleinsten (vgl. Kapitel 4). Das IPCC (und somit auch das Schweizer Treibhausgasinventar) anerkennt keine Senkeneffekte beim Energieholz, sondern rechnet mit "*instantaneously oxidised*" – sprich einer Verweildauer von 0 – was aber auch eine vereinfachte Annahme ist. Beim Vergleich der Szenarien kürzt sich diese Unsicherheit wieder weg. In Kapitel 6 wird nochmals darauf eingegangen.

Modul Substitutionseffekte

- *Produkte und Vergleichsprodukte*: Für die Lager wurden z.T. Produkte für die Berechnung des Substitutionseffekts ausgewählt; für die Holzwaren sind das beispielsweise Schalungen und Paletten (vgl. Kapitel 3.4.2). Diese zwei Produkte decken aber nicht alle möglichen Holzwaren ab, sodass Unsicherheiten bestehen. Ähnlich sieht es beim Substitutionseffekt im Bereich Energie aus, wo nur Erdöl als Anteil am Energiemix berücksichtigt wird, obwohl auch andere fossile Energieträger substituiert werden (vgl. Kapitel 3.4.3). Weiterhin bleibt zu beachten, dass sich die Emissionsintensitäten der betrachteten Referenzprodukte in Zukunft wahrscheinlich verändern, wie gross und ob zu- oder abnehmend kann jedoch noch nicht abgeschätzt werden.
- *Zeitpunkt von Netto-Null*: Wie im Kapitel der Ausgangslage beschrieben, wird angenommen, dass im Jahr 2050 in der Schweiz Netto-Null erreicht wird. Wie jedoch bereits im Kapitel 3.4.4 beschrieben, ist die Annahme ob und wann und in welchen Branchen Netto-Null kommen wird, sehr zentral aber auch höchst unsicher. Um diese Unsicherheit etwas abzufedern, wurde der Effekt, wann Netto-Null erreicht wird, im Jahr 2050 oder später im Rahmen der Sensitivitätsanalyse untersucht (vgl. Kapitel 4.4.4).

3.8 Sensitivitätsanalyse

Auf jedes der drei Grundszzenarien wurden verschiedene Sensitivitätsanalysen angewandt. Diese werden in den Abschnitten 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 und 4.4.4 erläutert.

Das Ziel einer Sensitivitätsanalyse ist es, den Einfluss verschiedener Parameter auf das Endresultat des Modells zu testen. Dies ist aus zwei Gründen hilfreich:

Erstens wird ersichtlich, welche Parameter die Resultate stark beeinflussen. Sollten im Modell unsichere Parameterwerte verwendet worden sein, und aus der Sensitivitätsanalyse resultieren, dass diese das Resultat massgeblich beeinflussen, ist in der Interpretation der Ergebnisse diese Unsicherheit mitzubersichtigen.

Zweitens kann aus einer Sensitivitätsanalyse abgeleitet werden, wo aus Modellsicht die Stell-schrauben für eine Erhöhung der CO₂-Wirkung des Aargauer Waldes liegen. Die Ergebnisse aus der Sensitivitätsanalyse werden für die Interpretation der Ergebnisse verwendet und werden in Kapitel 5.4 weiter diskutiert. Es wurden keine Anpassungen am Modell oder an den Parametern basierend auf der Sensitivitätsanalyse vorgenommen.

Im Abschnitt 4.4.4 werden die Auswirkungen eines anderen Netto-Null-Zieljahres auf jedes der drei Grundszzenarien untersucht. Die hauptsächlichen Überlegungen für die Parameterwahl in den Sensitivitätsanalysen waren folgende:

- 1) Vor dem Hintergrund der im Rahmen der sich abzeichnenden klimatischen Veränderungen absehbaren Baumartenverschiebung wird bei allen drei Grundszzenarien das

Verhältnis der zwei Baumartengruppen (Nadelholz – Laubholz) verändert (s. bei allen Szenarien Analysen «Anteil Nadelholz in Zuwachs und Ernte»).

- 2) Laubholz ist in der stofflichen Holzverwendung noch nicht weit verbreitet, im Modell wurden Annahmen getroffen (vgl. Abschnitt 3.3.2), die unsicher sind. Im Basisszenario und dem CO₂-optimierten Szenario wurden deshalb mehrere Variationen bezüglich der Laubholz-Verwendung erstellt.
- 3) Im CO₂-optimierten Szenario wurden im Vergleich zum Basisszenario viele Veränderungen vorgenommen (vgl. Abschnitt 3.5.4). In der Sensitivitätsanalyse wurde überprüft, ob die grundlegenden Annahmen pro Modul wirklich einen Einfluss auf das Resultat haben («Ernte wie im Basisszenario», «Kaskade wie im Basisszenario», «Zuteilung der Holzernte in der Holzwirtschaft wie im Basisszenario»).

Neben diesen drei Hauptvariationen wurden vor allem im CO₂-optimierten Szenario noch weitere Variationen geprüft. Im Modul Substitution wurden keine Sensitivitätsanalysen angewendet, ausser den Variationen «Erreichen von Netto-Null in verschiedenen Jahren».

Die Resultate der Sensitivitätsanalyse sind in Kapitel 4.4 dargestellt.

4. Ergebnisse

Dieses Kapitel beschreibt die Ergebnisse der drei Grundszenarien (4.1 bis 4.3), der Sensitivitätsanalyse (4.4) sowie des Zusatzszenarios (4.5). Als Überblick über die Ergebnisse dient die Vergleichsgrafik der aufsummierten Effekte je Szenario von 2025 bis 2100, in Abbildung 10.

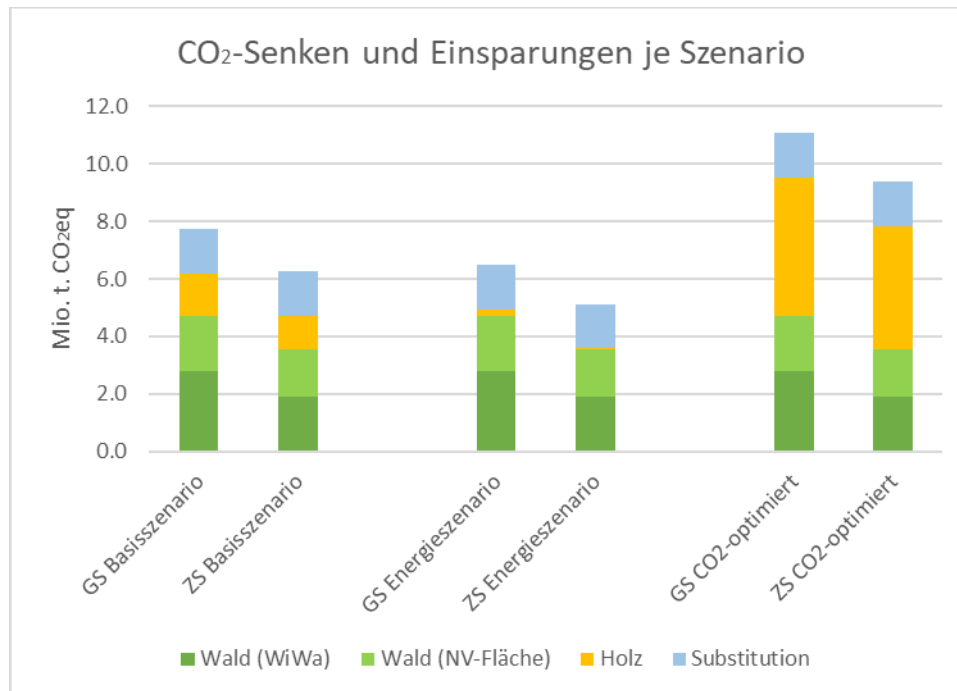


Abbildung 10 CO₂-Senken und CO₂-Einsparungen je Szenario (Basis, Energie, CO₂-optimiert) 2025-2100, Vergleiche jeweils Grundszenario (GS) mit Zusatzszenario (ZS). Das Modul Wald (grün) ist in der Abbildung auf die Senke im Wirtschaftswald (WiWa) und in der Nutzungsverzichtsfläche (NV-Fläche) aufgeteilt.

Eine sehr sensitive und unsichere Annahme für alle drei Grundszenarien ist, inwiefern Substitutionseffekte zukünftig anrechenbar sein werden. Es stellt sich also die Frage: wird Netto-Null per 2050 tatsächlich erreicht? Die Tragweite dieser Annahme wird in den Abschnitten 3.4 (Methode), resp. 4.4.4 (Resultate) weiter erläutert. Für Diskussionen zu Unsicherheiten und Limitierungen vgl. Abschnitt 3.7.

4.1 Grundszenario: Basis

4.1.1 Resultate

Im Basisszenario (weiter-wie-bisher, methodische Annahmen vgl. Abschnitt 3.5.2) kann CO₂ gespeichert und eingespart werden (das System Wald und Holz wirkt als Senke). Die CO₂-Wirkung beträgt durchschnittlich 0.10 Mio. t CO₂/Jahr, kumuliert vom Jahr 2025 bis ins Jahr 2100 ergäbe dies 7.8 Mio. t CO₂. Diese jährliche Speicherung/Einsparung entspricht rund 2.5% der jährlichen Emissionen im Kanton Aargau im Jahr 2021 (4.1 Mio. t CO₂, (Abteilung für Umwelt Aargau, 2022, S. 15)).

Lager

Zur Entwicklung der Lager im Grundszenario Basis können folgende Aussagen gemacht werden: Sowohl das Modul Wald wie auch das Modul Holz haben ein Lager. Im Jahr 2025 beträgt das Lager in diesen zwei Modulen zusammen 42 Mio. t CO₂, wobei 96% davon aus dem Modul Wald stammen. Per 2100 hat sich das Lager auf 49 Mio. t CO₂ vergrößert, wobei nun 94%

aus dem Modul Wald stammen (vgl. Abbildung 19 bis Abbildung 21) im Anhang A1.1. Die Lager haben sich über die 75 Jahre kontinuierlich aufgebaut, mit einer durchschnittlichen jährlichen Rate von etwa 82 kt CO₂ (Wald: +63 kt CO₂, Holz: +19 kt CO₂). Grund dafür ist ein weiter fortschreitender Vorratsaufbau der lebenden Biomasse in den Nutzungsverzichtflächen, sowie durch die Zunahme von Totholz. Methodische Informationen zum Lager und den Startwerten finden sich in den Kapiteln 3.2.1 und 3.3.1.

Für die Zusammensetzung des Lagers bezüglich Nadel-/Laubholz und Ertragsklassen kann Abbildung 22 in Anhang A1.1 konsultiert werden.

Senken

Die CO₂-Senkeneffekte werden durch alle drei Module (Wald, Holz, Substitution) zusammen erreicht. Wie in Tabelle 15 ersichtlich, erfolgt der grösste Effekt durch das Modul Wald mit etwa 60% (4.7 Mio. t CO₂), gefolgt von den Modulen Substitution und Holz mit je etwa 20% (je etwa 1.5 Mio. t CO₂). Beim Wald dominieren die Senkeneffekte durch die lebende Biomasse, beim Holz die Senkeneffekte durch den Ausbau, und die Substitutionseffekte durch Energiesubstitution. Die CO₂-Wirkung durch das Totholz beträgt 7% an der CO₂-Wirkung des Moduls Wald. Die genauen Zahlen sind in der Tabelle 15 und der Abbildung 11 dargestellt, der Vergleich zu den anderen Szenarien findet sich im Kapitel 4.6.

		C Senkenleistung im Wald (Lagerveränderung) [kt CO ₂ eq]			
		lebende Biomasse	Totholz	Waldboden	Total
<i>kumuliert</i>					
	Grundszenario	4'387	327	0	4'714
	Mittelwert über die Jahre	58	4	0	63

		C Senkenleistung im Holz (Lagerveränderung) [kt CO ₂ eq]					
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total
<i>kumuliert</i>							
	Grundszenario	-11	980	9	12	467	1'458
	Mittelwert über die Jahre	0	13	0	0	6	19

		CO ₂ -Einsparung durch Substitutionseffekte [ktCO ₂ eq]						Total [kt CO ₂ eq]
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total	
<i>kumuliert</i>								
	Grundszenario	74	319	185	0	1'001	1'579	7'751
	Mittelwert über die Jahre	1	4	2	0	13	21	103

Tabelle 15 Senkeneffekt im Wald und Holzwirtschaft sowie eingesparte Emissionen aufgrund von Substitutionseffekten im Grundszenario Basis.

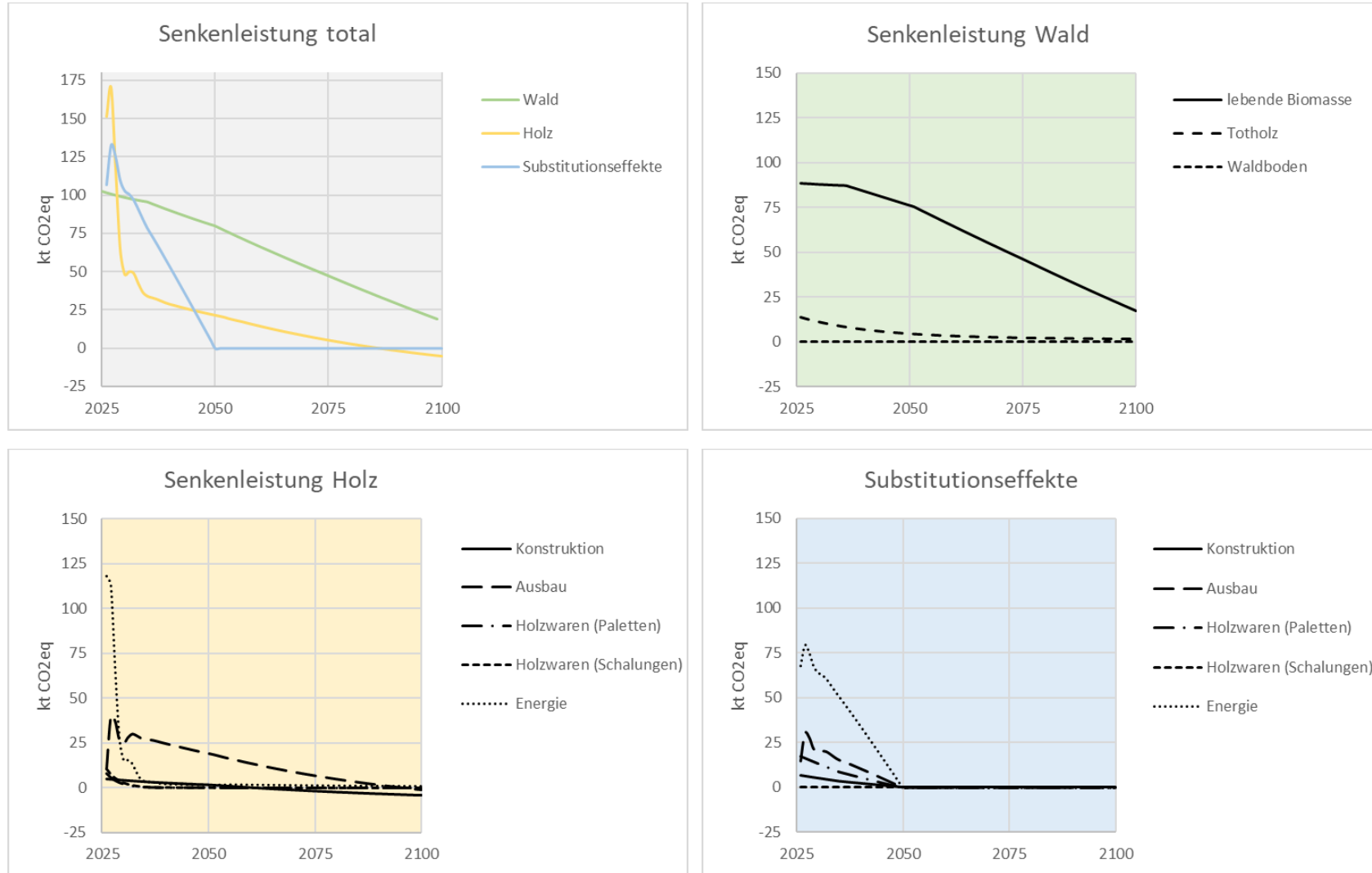


Abbildung 11 Senkenleistung total (oben links), im Wald (oben rechts), in der Holzwirtschaft (unten links) und Substitutionseffekte (unten rechts) im Grundszenario Basis.

Für alle drei Module gilt generell, dass die Zahlen die jährlich neu dazukommende Senke oder Substitution beziffern. Bei allen drei Modulen ist zu beobachten, dass sich die Zunahme im Verlaufe der Zeit gegen Null bewegt. Dies rührt daher, dass irgendwann der Gleichgewichtseffekt des modellierten Systems einsetzt, sich Zufluss und Abfluss also die Waage halten. Auch kann das Lager nicht unendlich vergrössert werden, dies erzeugt einen Begrenzungseffekt.

Im Modul Holz ist bei der Anwendung Konstruktion ein negativer Senkeneffekt zu beobachten, also eine Kohlenstoffquelle. Dies ist darauf zurückzuführen, dass aus der Konstruktion infolge Erreichung der Lebensdauer mehr Holz abfließt, als zufließt. Im Basisszenario wird der Rückgang von Nadelholz in der Ernte nicht durch eine vergrösserte Ernte im Laubholz oder durch einen Inflow aus der Kaskadennutzung aufgefangen.

Der Senkeneffekt für Energieholz in den ersten Jahren ist zu einem grossen Teil vermutlich auf das «phase-in» («Aufstarten») des Modelles zurückzuführen und ist vermutlich mit vergleichsweise hohen Unsicherheiten behaftet. Je nach Ziel der zu kommunizierenden Botschaft sollte darum der Senkeneffekt des Energieholzes mitberücksichtigt oder vernachlässigt werden (vgl. hierzu Ausführungen in den Kapiteln 3.7 sowie 6 «Mögliche Modellanpassungen»). Beim Vergleich der Szenarien kürzt sich diese Unsicherheit grösstenteils wieder weg.

4.1.2 Plausibilisierung

Modul Wald (vgl. Abschnitt 3.1.1 und Abschnitt 3.1.3)

Das Kohlenstofflager im Startjahr beträgt 22 Mio. t CO₂ in der lebenden Biomasse und im Totholz (vgl. Kap. 3.2.1). In der Klimastrategie des Kt. Aargau wurde dies auf 16 Mio. t CO₂ geschätzt. Dies ist etwas niedriger, aber insgesamt in einer ähnlichen Grössenordnung. Der Unterschied ist auf die unterschiedliche Flughöhe der Berechnung (Klimastrategie hat übergeordnete Funktion) sowie Annahmen zurückzuführen (Totholz, Bodenkohlenstoff, Anteile Nadelholz / Laubholz).

Das Kohlenstofflager verteilt sich zu 53% auf die lebende Biomasse, zu 46% auf den Waldboden und 1% auf das Totholz. Das ist vergleichbar mit der Verteilung, welche im Waldbericht des BAFU (2015) gezeigt wird (vgl. Abbildung 12). Wichtig ist dabei zu beachten, dass der Waldbericht die Wurzeln separat ausweist, welche im Modell unter «lebende Biomasse» subsummiert sind.

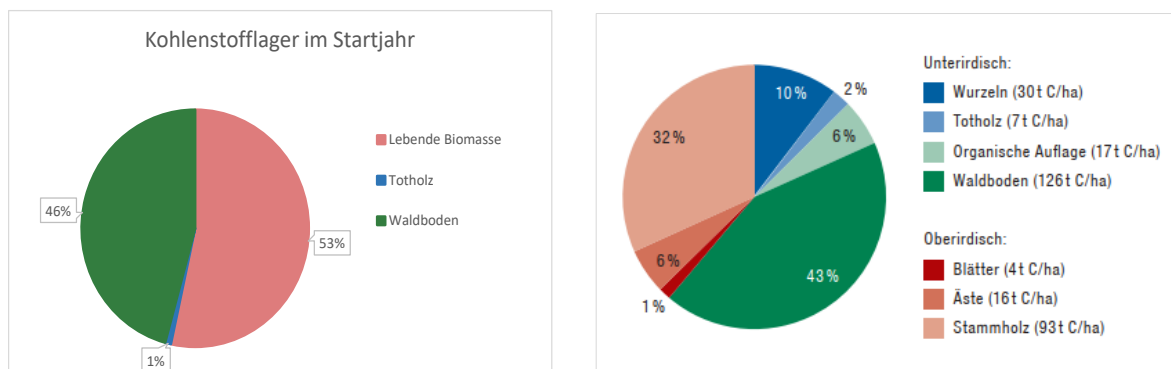


Abbildung 12 Verteilung des Kohlenstofflagers im Wald auf die Kompartimente lebende Biomasse, Totholz und den Waldboden gemäss Berechnungen im Modell (links) und zum Vergleich die rapportierte Verteilung im Waldbericht des BAFU (2015, Abb. 1.4.5)

Über den Zeitraum von 2025 - 2100 nimmt das Kohlenstofflager in der lebenden Biomasse zu, aufgrund folgender Prozesse:

- Zunahme in der Biomasse im Lager um 8.7%. Davon werden 8.3% durch die Nutzungsverzichtsflächen erklärt. Im Wirtschaftswald wird eine kleine Zunahme von 0.4% erreicht, da die Ernte dem Zuwachs hinterherhinkt (Trägheit des Systems). Im Wirtschaftswald sinkt die Biomasse in den ersten Jahren wegen der Trägheit des Systems (Ernte > Zuwachs) und nimmt erst später zu.
- Verschiebung im Lager von Nadelholz zu Laubholz, welche einen Anstieg im CO₂-Speicher darstellt. Dies, da Laubholz gemäss Modellannahme vermehrt zuwächst, eine höhere Dichte und einen höheren 'Biomass expansion factor' als Nadelholz hat.

Für die Plausibilisierung kann das Lager im Startjahr und Senkenleistung im ersten Jahr mit den im Treibhausgasinventar berechneten Werten verglichen werden. Das Modell berechnet für die lebende Biomasse im Jahr 2025 ein Kohlenstofflager von 121 tC/ha, das Treibhausgasinventar rapportiert 128 tC/ha bis 147 tC/ha je nach Region (Mittelland oder Jura) und Höhenlage (<600 m ü.M. bis 600-1200 m ü.M.) (BAFU, 2023, S. 346ff). Dies ist somit konsistent. Das Modell rechnet für das Jahr 2025 eine Senkenleistung von 0.5 tC/ha (+0.4%) in der lebenden Biomasse im ganzen Wald bei einer Abnahme der Biomasse um -0.03% im Wirtschaftswald, während das Treibhausgasinventar eine Senkenleistung von -0.3 tC/ha bis +0.47 tC/ha (entspricht -0.2% bis +0.4%) je nach Region (Mittelland und Jura) und Höhenlage (<600 m ü.M. bis 600-1200 m ü.M.) rapportiert. Die Veränderungen sind insgesamt in einer ähnlichen Grössenordnung und Differenzen erklärbar (ein Biomasserückgang durch Ernte ist auch im Modell ersichtlich, wird aber durch die Senkeneffekte in den Nutzungsverzichtsflächen und durch die Erhöhung des Laubholzanteils überlagert, welche im THG-Inventar nicht in derselben Weise abgebildet sind).

Totholz

Das Kohlenstofflager im Totholz nimmt im Mittel um 1.3% pro Jahr zu, akkumuliert bis 2100 um 97%. Während im Wirtschaftswald das Totholz von 14 TfM/ha auf 24 TfM/ha zunimmt, steigt es in den Nutzungsverzichtsflächen von 42 TfM/ha auf 140 TfM/ha. Die errechneten Werte sind grundsätzlich beide plausibel. Im Wirtschaftswald akkumuliert sich, trotz einer Ernte, die dem Zuwachs angepasst wird, Totholz aufgrund des errechneten Mortalitätsfaktors und da die Mineralisierung der Mortalität hinterherhinkt. Ein Vergleich zu alten Nutzungsverzichtsflächen im In- und Ausland gemäss WSL-Erhebungen ergab für die Nutzungsverzichtsflächen Werte zwischen 52 -163 TfM/ha.¹⁷ Die Startwerte liegen ebenfalls in einer plausiblen Grössenordnung, im Vergleich zu den Werten, welche das LFI für die Schweiz angibt, 13 bis 48 TfM/ha je nach Region. Das Totholzlager berücksichtigt nur den Stamm in Rinde, somit nur den Input via Mortalität (über alle Jahre wird eine jährliche Mortalität zwischen 1.6 und 1.9 TfM/ha errechnet) und den Output via Mineralisierung. Das Totholzlager bleibt gleich, wenn der Input durch Mortalität dem Output durch Mineralisierung entspricht. Die Mortalität ist relativ konstant. Die Mineralisierung wird mit einem Zerfall erster Ordnung modelliert, dabei ist die Wahl der Zerfallskonstante entscheidend, wir wählen für den Kanton Aargau ein k von 0.06 (vgl. Abschnitt 3.2.2). Dies entspricht einer mittleren Verweildauer von Totholz im Wald von 17 Jahren. Die Wahl dieser Zerfallskonstante ist für das resultierende Kohlenstofflager im Totholz hoch sensitiv.

Modul Holz (vgl. Abschnitt 3.1.1 und Abschnitt 3.3)

Wir bilanzieren für Holzprodukte aus dem Aargauer Wald im ersten Jahr einen Senkeneffekt von 0.15 Mio. t CO₂. Anschliessend gibt es im Mittel eine jährliche Zunahme um 0.02 Mio. t CO₂ (Steigerung um 1.2%). Über die 75 Jahre kumuliert beträgt der Senkeneffekt schliesslich im Modul Holz 1.5 Mio. t CO₂. Der Senkeneffekt wird durch die Anwendungsbereiche Ausbau

17 Online: <https://totholz.wsl.ch/de/totholz/totholzmengen/optimale-totholzmengen.html>

und die Energie dominiert, gefolgt von Konstruktion. Die Werte im Anwendungsbereich Energie sind mit relativ hohen Unsicherheiten behaftet.

Gemäss THG-Inventar ist die Senkenleistung durch Schweizer Holz 0.051 Mio. t CO₂. Die Senkenleistung für das Holz aus dem Wald im Kanton Aargau im Modell ist höher (0.15 Mio. t CO₂) und auf verschiedene Gründe zurückzuführen: Im THG-Inventar wird der Energiepool nicht berücksichtigt (Annahme von *instantaneously oxidised*, gemäss Anforderungen der IPCC). Würde der Energiepool im vorliegenden Modell ebenfalls vernachlässigt, resultierte im Modell ein Senkeneffekt von 0.03 Mio. t CO₂ statt 0.15 Mio. t CO₂. Der Vergleich zur Plausibilisierung muss entsprechend zwischen 0.03 und 0.051 Mio. t CO₂ angestellt werden. Der Modellwert liegt folglich etwas höher, als man als Beitrag aus dem Kanton Aargau zum Schweizer Pool erwarten würde. Die verbleibenden Diskrepanzen sind darauf zurückzuführen, dass im THG-Inventar mit leicht abweichenden Verweildauern gerechnet wird und die einzelnen Holzprodukte genauer erhoben und differenziert werden.

Modul Substitutionseffekte (vgl. Abschnitt 3.1.1 und Abschnitt 3.4)

Die Substitutionsnutzen pro Tonne Holz und Anwendungsbereich sind im Abschnitt 3.4 erläutert. Über die Jahre kumuliert, werden die Substitutionseffekte durch den Anwendungsbereich Energie dominiert, vor allem, weil die Holzflüsse in die Energie grösser sind als in die anderen Anwendungsarten. Das Ausmass der Substitutionseffekte ist hoch sensitiv bezüglich der Annahmen, wie Netto-Null in Zukunft gelebt wird und ab welchem Jahr die Schweiz Netto-Null erreicht haben wird (vgl. auch Abschnitt 4.4.4).

4.2 Grundszenario: Energie

4.2.1 Resultate

Alle Parameter des Energieszenarios sind gleich wie im Basisszenario. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Verschiebung im Sortiment in der Ernte entsprechend den Werten der Energiebetriebe angepasst wurde (methodische Annahmen vgl. Abschnitt 3.5.3), also ein grösserer Anteil des Holzes ins Energieholz fliesst. Das Energieszenario ergibt sich in der Realität eigentlich auch, wenn sich herausstellt, dass die Holzwirtschaft das vermehrt zuwachsende Laubholz nicht stofflich verwenden kann und gleichzeitig weniger Nadelholz zur Verfügung hat wegen einem klimatisch bedingten Rückgang von Zuwachs und Ernten.

Lager

Zur Entwicklung der Lager im Grundszenario Energie können folgende Aussagen gemacht werden: Sowohl das Modul Wald wie auch das Modul Holz haben ein Lager. Im Jahr 2025 beträgt das Lager in diesen zwei Modulen zusammen 42 Mio. t CO₂, wobei 96% davon aus dem Modul Wald stammen. Per 2100 hat sich das Lager auf 47 Mio. t CO₂ vergrössert, wobei weiterhin 96% aus dem Modul Wald stammen (vgl. Abbildung 23 bis Abbildung 25 im Anhang A1.2). Die Lager haben sich über die 75 Jahre kontinuierlich aufgebaut, mit einer durchschnittlichen jährlichen Rate von etwa 66 kt CO₂ (Wald: +63 kt CO₂, Holz: +3 kt CO₂). Grund dafür ist ein weiter fortschreitender Vorratsaufbau der lebenden Biomasse in den Nutzungsverzichtflächen, sowie durch die Zunahme von Totholz. Methodische Informationen zum Lager und den Startwerten finden sich in den Kapiteln 3.2.1 und 3.3.1.

Für die Zusammensetzung des Lagers bezüglich Nadel-/Laubholz und Ertragsklassen kann die Abbildung 26 in Anhang A1.2 konsultiert werden.

Senken

Im Energieszenario kann von allen drei Grundscenarien am wenigsten Senkeneffekt erzielt, also CO₂ gespeichert und eingespart werden. Die CO₂-Wirkung beträgt durchschnittlich 0.09 Mio. t CO₂/Jahr, kumuliert vom Jahr 2025 bis ins Jahr 2100 ergäbe dies 6.5 Mio. t CO₂. Diese jährliche Speicherung/Einsparung entspricht rund 2.2% der jährlichen Emissionen im Kanton Aargau im Jahr 2021 (4.1 Mio. t CO₂, (Abteilung für Umwelt Aargau, 2022, S. 15)).

Die CO₂-Effekte werden durch alle drei Module (Wald, Holz, Substitution) erreicht. Wie in Tabelle 16 ersichtlich, erfolgt der grösste Effekt durch das Modul Wald mit etwa 73% (4.7 Mio. t CO₂), gefolgt vom Modul Substitution mit 24% (1.5 Mio. t CO₂) und vom Modul Holz mit 4% (0.2 Mio. t CO₂). Beim Wald dominieren die Senkeneffekte durch die lebende Biomasse, beim Holz die temporären Senkeneffekte durch die Energie (Verweildauer ist zwei Jahre), und die Substitutionseffekte durch Energiesubstitution. Die CO₂-Wirkung durch das Totholz beträgt 7% an der CO₂-Wirkung des Moduls Wald. Die genauen Zahlen sind in der Tabelle 16 und der Abbildung 13 dargestellt, der Vergleich zu den anderen Szenarien findet sich im Kapitel 4.6.

		C Senkenleistung im Wald (Lagerveränderung) [kt CO ₂ eq]			
		lebende Biomasse	Totholz	Waldboden	Total
<i>kumuliert</i>					
	Grundszenario	4'387	327	0	4'714
	Mittelwert über die Jahre	58	4	0	63

		C Senkenleistung im Holz (Lagerveränderung) [kt CO ₂ eq]					
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total
<i>kumuliert</i>							
	Grundszenario	-517	240	-10	-12	539	239
	Mittelwert über die Jahre	-7	3	0	0	7	3

		CO ₂ -Einsparung durch Substitutionseffekte [ktCO ₂ eq]					Total [kt CO ₂ eq]
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total
<i>kumuliert</i>							
	Grundszenario	41	229	104	0	1'174	1'548
	Mittelwert über die Jahre	1	3	1	0	16	21

Tabelle 16 Senkeneffekt im Wald und Holzwirtschaft sowie eingesparte Emissionen aufgrund von Substitutionseffekten im Grundszenario Energie. Da nur gerundete Werte gezeigt werden, ist die Summe der Senkenleistung im Wald scheinbar nicht gleich der Addition der Vorwerte.

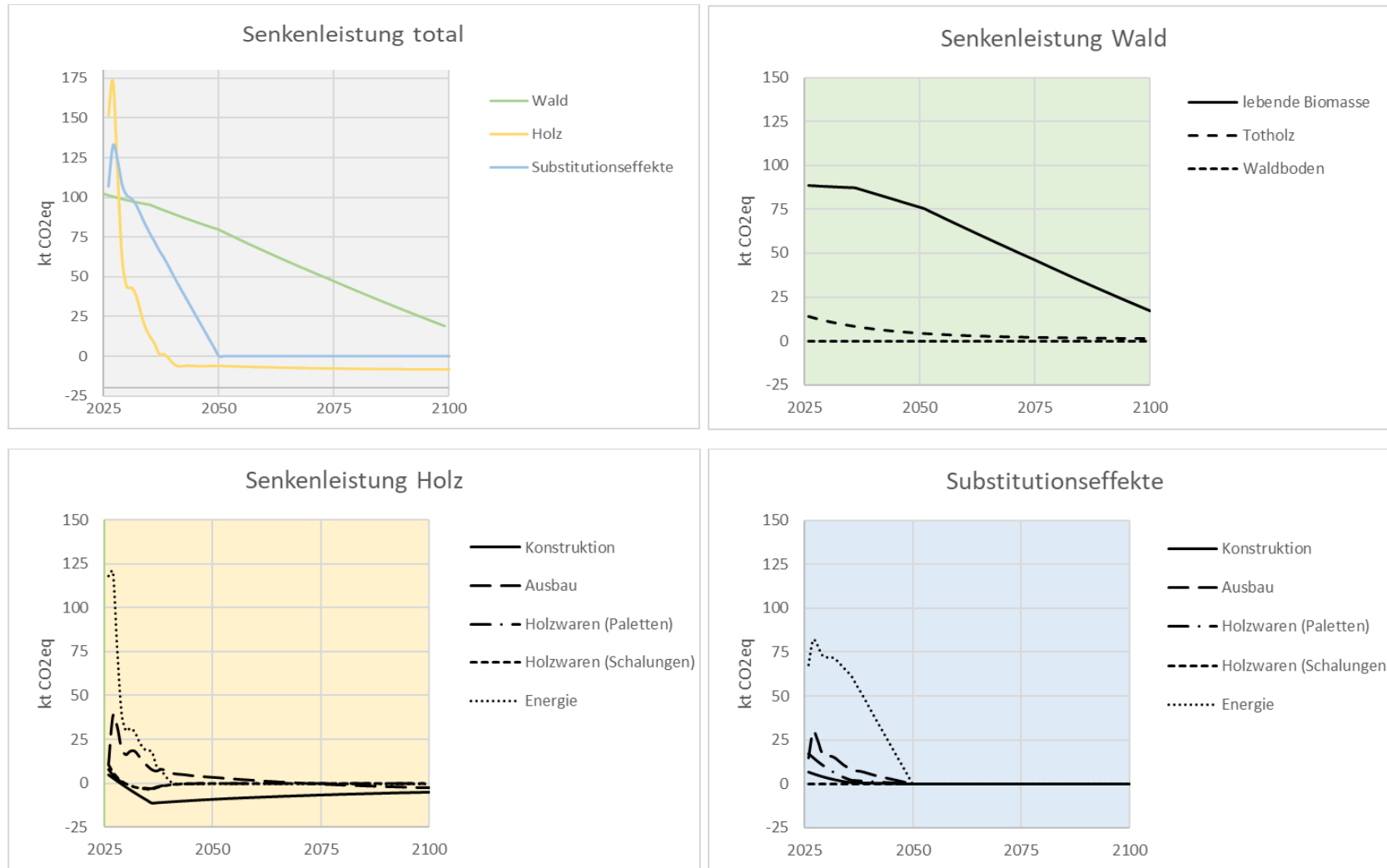


Abbildung 13 Senkenleistung total (oben links), im Wald (oben rechts), in der Holzwirtschaft (unten links) und Substitutionseffekte (unten rechts) im Grundszenario Energie.

Für alle drei Module gilt generell, dass die Zahlen die jährlich neu dazukommende Senke oder Substitution beziffern. Bei allen drei Modulen ist zu beobachten, dass sich die Zunahme im Verlaufe der Zeit gegen Null bewegt. Dies rührt daher, dass irgendwann der Gleichgewichtseffekt des modellierten Systems einsetzt, sich Zufluss und Abfluss also die Waage halten. Auch kann das Lager nicht unendlich vergrössert werden, dies erzeugt einen Begrenzungseffekt.

Im Modul Holz fällt auf, dass sich im Vergleich zum Grundszenario Basis in der Konstruktion der negative Senkeneffekt verstärkt hat, und neu die beiden Holzwaren Paletten und Schalungen ebenfalls einen negativen Senkeneffekt aufweisen (die Holzlager werden so zu CO₂-Quellen). Der Grund ist, dass im Grundszenario Energie mehr Holz (vor allem Nadelholz) direkt in die Energie und weniger in Stammholz fliesst als im Grundszenario Basis. Somit fliesst aus den Holzlagern Konstruktion, Holzwaren, Paletten und Schalungen mehr CO₂ ab (wegen Erreichen der Verweildauer) als neu hinzukommt, weil weniger neu gebaut resp. neu verarbeitet wird.

Eine Ausnahme bei den Sortimenten ist der Ausbau. Es fliesst wie bei der Konstruktion und den Holzwaren weniger Holz in den Ausbau, dessen Lager nimmt aber weiterhin zu wegen dem Kaskadeneffekt aus der Konstruktion und den Holzwaren.

Der Senkeneffekt für Energieholz in den ersten paar Jahren ist zu einem Teil aufgrund der vermehrten Verwendung von Energieholz und zu einem anderen Teil auf das generelle «phase-in» («Aufstarten») des Modelles zurückzuführen. Aufgrund letzterem ist der Senkeneffekt mit Unsicherheiten behaftet. Trotzdem ist die Aussage belastbar, dass der Senkeneffekt im Energieholz im Energieszenario höher ist als in den anderen Szenarien. Je nach Ziel der zu kommunizierenden Botschaft sollte darum der Senkeneffekt des Energieholzes mitberücksichtigt oder vernachlässigt werden (vgl. hierzu mit den Ausführungen in den Kapiteln 3.7 Modul Holz sowie 6 Mögliche Modellanpassungen).

Das Modul Substitutionseffekte sieht bei allen drei Grundszenarien sehr ähnlich aus, per 2050 beläuft sich die CO₂-Wirkung auf null, wegen der Annahme von Netto-Null 2050.

4.2.2 Plausibilisierung

Modul Wald

Das Modul Wald, sowie das Startjahr in allen Modulen im Energieszenario unterliegt den gleichen Annahmen wie das Basisszenario (methodische Annahmen vgl. Abschnitt 3.5.3). Aus diesem Grund sind die Resultate im Modul Wald identisch zu denjenigen im Basisszenario (Abschnitt 4.1.2) und werden hier nicht erneut ausgeführt.

Modul Holz

In den Annahmen des Energieszenarios wird vor allem eine Verschiebung beim Nadelholz von Stammholz hin zu Energieholz angenommen. Die anschliessende Aufteilung der Holznutzung in verschiedenen Anwendungsfeldern (Konstruktion, Ausbau, Holzwaren, Energie) ist im Energieszenario identisch zum Basisszenario.

Das Energieszenario bewirkt eine reduzierte Senkenleistung in der Holzwirtschaft von nur noch 0.24 Mio. t CO₂; im Basisszenario werden über die 75 Jahre kumuliert total 1.46 Mio. t CO₂ gespeichert. Vor allem die Speicherung in den Anwendungsbereichen Konstruktion und Ausbau gehen sehr stark zurück. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass das in diesem Szenario weniger vorhandene Stammholz vor allem in der Konstruktion und im Ausbau genutzt würde. Die Speicherung durch Energieanwendungen erhöht sich leicht, aber kann die erwähnten Rückgänge bei weitem nicht wettmachen. Dieses Resultat ergibt sich aus der Tatsache, dass

der Kohlenstoff gespeichert in der Konstruktion und im Ausbau eine viel längere mittlere Verweildauer hat (60, resp. 30 Jahre) als der Kohlenstoff gespeichert in Holzwaren oder Energieholz (3, resp. 2 Jahre); siehe auch Abschnitt 3.3.1, «Mittlere Verweildauer».

Modul Substitutionseffekte

Die CO₂-Einsparung durch Substitutionseffekte nimmt im Energieszenario gegenüber dem Basisszenario minim ab (über die 75 Jahre kumuliert total 1.55 Mio. t CO₂ anstatt 1.58 Mio. t CO₂). Es gibt eine leichte Verschiebung des Effekts von der Konstruktion, Ausbau und Holzwaren (Paletten) hin zur Energie: Während im Modul Substitutionseffekte die Substitutionseffekte in der Konstruktion, Ausbau und Holzwaren etwas abnehmen, nehmen die Substitutionseffekte durch die energetische Nutzung des Holzes im gleichen Masse zu. Insgesamt resultiert bei nahe ein «Nullsummenspiel». Dies im Kontrast zum Modul Holz, wo die verminderte Senkenleistung in der Konstruktion, Ausbau und Holzwaren nicht durch die vermehrte energetische Nutzung kompensiert wird.

Das Ausmass der Substitutionseffekte ist hoch sensitiv bezüglich der Annahmen, wie Netto-Null in Zukunft gelebt wird und ab welchem Jahr die Schweiz Netto-Null erreicht haben wird (vgl. auch Abschnitt 4.4.4).

4.3 Grundszenario: CO₂-optimiert

4.3.1 Resultate

Die Startjahre aller Module, sowie das gesamte Modul Wald sind gleich wie im Basisszenario. Anschliessend werden mehrere vom Basisszenario abweichende Annahmen bezüglich des Sortiments, der Nutzung in der Holzwirtschaft, des Nadelholzes, der Verluste etc. getroffen (methodische Annahmen vgl. Abschnitt 3.5.4).

Lager

Zur Entwicklung der Lager im Grundszenario CO₂-optimiert können folgende Aussagen gemacht werden: Sowohl das Modul Wald wie auch das Modul Holz haben ein Lager. Im Jahr 2025 beträgt das Lager in diesen zwei Modulen zusammen 42 Mio. t CO₂, wobei 96% davon aus dem Modul Wald stammen. Per 2100 hat sich das Lager auf 52 Mio. t CO₂ vergrössert, wobei nun 93% aus dem Modul Wald stammen (vgl. Abbildung 27 bis Abbildung 29 im Anhang A1.3). Die Lager haben sich über die 75 Jahre kontinuierlich aufgebaut, mit einer durchschnittlichen jährlichen Rate von etwa 127 kt CO₂ (Wald: +63 kt CO₂, Holz: +64 kt CO₂). Grund dafür ist einerseits ein weiter fortschreitender Vorratsaufbau der lebenden Biomasse in den Nutzungsverzichtsflächen, sowie durch die Zunahme von Totholz, als auch die langfristige Verwendung von Holz. Methodische Informationen zum Lager und den Startwerten finden sich in den Kapiteln 3.2.1 und 3.3.1.

Für die Zusammensetzung des Lagers bezüglich Nadel-/Laubholz und Ertragsklassen kann die Abbildung 30 in Anhang A1.3 konsultiert werden.

Senken

Im CO₂-optimierten Szenario kann von allen drei Szenarien am meisten Senkeneffekt erzielt, also CO₂ gespeichert und eingespart werden. Die CO₂-Wirkung beträgt durchschnittlich 0.15 Mio. t CO₂/Jahr, kumuliert vom Jahr 2025 bis ins Jahr 2100 ergäbe dies 11.1 Mio. t CO₂. Diese jährliche Speicherung/Einsparung entspricht rund 3.7% der jährlichen Emissionen im Kanton Aargau im Jahr 2021 (4.1 Mio. t CO₂, (Abteilung für Umwelt Aargau, 2022, S. 15)).

Die CO₂-Effekte werden durch alle drei Module (Wald, Holz, Substitution) erreicht. Wie in Tabelle 17 ersichtlich, erfolgt der grösste Effekt durch die Module Wald und Holz mit je etwa 42% (etwa 4.8 Mio. t CO₂), gefolgt vom Modul Substitution mit etwa 15% (1.6 Mio. t CO₂). Beim Wald dominieren die Senkeneffekte durch die lebende Biomasse, beim Holz die Senkeneffekte

im Ausbau, und bei den Substitutionseffekten die Energie. Im Unterschied zum Basisszenario und zum Energieszenario speichert/spart das Holzmodul am meisten Kohlenstoff von allen drei Modulen. Die CO₂-Wirkung durch das Totholz beträgt 7% an der CO₂-Wirkung des Moduls Wald.

Die Bewirtschaftung des Waldes (Modul Wald) ermöglicht eine Senkenleistung bis ins 2100 von 4.7 Mio. t CO₂. Im Vergleich dazu kann mittels Optimierung der Wertschöpfungskette im CO₂-optimierten Szenario weiter 6.4 Mio. t CO₂ Senkenleistung erzielt werden.

Die genauen Zahlen sind in der Tabelle 17 und der Abbildung 14 dargestellt, der Vergleich zu den anderen Szenarien findet sich im Kapitel 4.6.

		C Senkenleistung im Wald (Lagerveränderung) [kt CO₂eq]			
		lebende Biomasse	Totholz	Waldboden	Total
<i>kumuliert</i>					
	Grundszenario	4'387	327	0	4'714
	Mittelwert über die Jahre	58	4	0	63

		C Senkenleistung im Holz (Lagerveränderung) [kt CO₂eq]					
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total
<i>kumuliert</i>							
	Grundszenario	1'456	3'154	-6	-16	212	4'800
	Mittelwert über die Jahre	19	42	0	0	3	64

		CO₂-Einsparung durch Substitutionseffekte [ktCO₂eq]						Total [kt CO₂eq]
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total	
<i>kumuliert</i>								
	Grundszenario	113	402	178	0	887	1'580	11'094
	Mittelwert über die Jahre	2	5	2	0	12	21	148

Tabelle 17 Senkeneffekt im Wald und Holzwirtschaft sowie eingesparte Emissionen aufgrund von Substitutionseffekten im Grundszenario CO₂-optimiert. Da nur gerundete Werte gezeigt werden, ist die Summe der Senkenleistung im Wald scheinbar nicht gleich der Addition der Vorwerte.

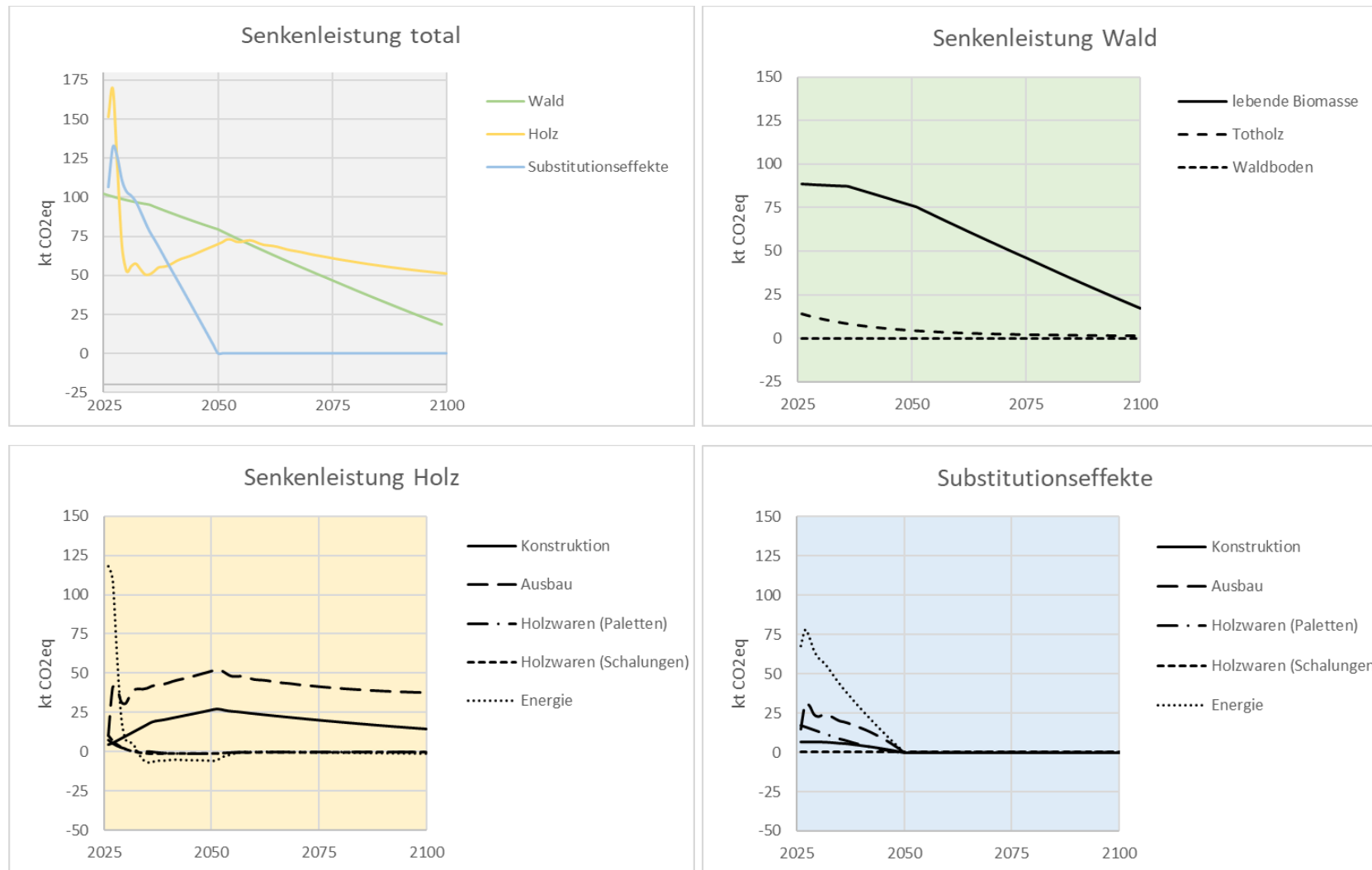


Abbildung 14 Senkenleistung total (oben links), im Wald (oben rechts), in der Holzwirtschaft (unten links) und Substitutionseffekte (unten rechts) im Grundszenario CO₂-optimiert.

Für alle drei Module gilt generell, dass die Zahlen die jährlich neu dazukommende Senke oder Substitution beziffern. Bei allen drei Modulen ist zu beobachten, dass sich die Zunahme im Verlaufe der Zeit gegen Null bewegt. Dies rührt daher, dass irgendwann der Gleichgewichtseffekt des modellierten Systems einsetzt, sich Zufluss und Abfluss also die Waage halten. Auch kann das Lager nicht unendlich vergrössert werden, dies erzeugt einen Begrenzungseffekt.

Im Modul Holz fällt auf, dass die CO₂-Wirkung im Ausbau am grössten ist. Dies ist zwei Effekten zuzuschreiben. Zum einen wird in diesem Szenario ein grösserer Anteil der Ernte in das Stammholz und das Industrielholz geleitet werden, welche beide einen grossen Teil an den Ausbau weiterfliessen lassen. Zum anderen wird in diesem Szenario die Kaskadennutzung optimiert, ein grosser Teil des Ausbau-Holzes fliesst nach der Verweildauer wieder in den Ausbau. Die Konstruktion hat im Modul Holz die zweitgrösste CO₂-Wirkung. Dies hat dieselben Gründe wie beim Ausbau. Neu, im Vergleich zum Grundszenario Basis, wird bei der Konstruktion auch ein Teil der Konstruktion wiederverwendet, allerdings in einer geringeren Masse als für Recycling und Wiederverwendung im Ausbau. Die Unsicherheiten im Senkeneffekt des Energieholzes sind in diesem Szenario irrelevant.

Das Modul Substitutionseffekte sieht bei allen drei Grundszenarien sehr ähnlich aus, per 2050 beläuft sich die CO₂-Wirkung auf null, wegen der Annahme von Netto-Null 2050.

4.3.2 Plausibilisierung

Modul Wald

Das Modul Wald, sowie das Startjahr in allen Modulen im CO₂-optimierten Szenario unterliegt den gleichen Annahmen wie das Basisszenario. Aus diesem Grund sind die Resultate im Modul Wald identisch zu denjenigen im Basisszenario (Abschnitt 4.1.2) und werden hier nicht erneut ausgeführt.

Modul Holz

Die vermehrte Nutzung von Holz in der Konstruktion sowie die optimierte Kaskadennutzung (verlängerter und optimierter materieller Einsatz von Holz) erhöhen die Senkenwirkung im Modul Holz (methodische Annahmen vgl. Abschnitt 3.5.4). Vor allem in den Anwendungsarten Konstruktion und Ausbau kann sehr viel mehr Kohlenstoff gespeichert werden als im Basis- oder im Energieszenario. Die Anwendungsart Energie speichert die Hälfte weniger Kohlenstoff als im Basisszenario, was von den anderen, bereits erwähnten Anwendungsarten jedoch um ein Vielfaches kompensiert wird. Dennoch ergibt sich weiterhin eine Energienutzung, weil Holz nach einer längeren Kaskade weiterhin verbrannt wird.

Modul Substitution

Die CO₂-Einsparung durch Substitutionseffekte bleibt im CO₂-optimierten Szenario gegenüber dem Basisszenario identisch. Es gibt jedoch eine leichte Verschiebung des Effekts von der Energie hin zur Konstruktion und zum Ausbau. Der Substitutionseffekt der Energie geht um ca. 11% zurück, obwohl viel weniger Holz direkt in die Energie fliesst. Dieser geringe Rückgang beruht auf der Tatsache, dass jedes Stück Holz am Schluss energetisch verwendet wird, einfach nach einer tendenziell längeren mittleren Verweildauer in der Holzwirtschaft.

Das Ausmass der Substitutionseffekte ist hoch sensitiv bezüglich der Annahmen, wie Netto-Null in Zukunft gelebt wird und ab welchem Jahr die Schweiz Netto-Null erreicht haben wird (vgl. auch Abschnitt 4.4.4).

4.4 Sensitivitätsanalyse

Im Kapitel 4.4 werden die Resultate aus den Sensitivitätsanalysen, die für die verschiedenen Szenarien durchgeführt wurden (vgl. Kapitel 3.8), kurz und knapp präsentiert. Im Anschluss an die Sensitivitätsanalysen wurden keine Änderungen an den Modellen durchgeführt. Aus der Sensitivitätsanalyse kann abgeleitet werden, welche die interessantesten Hebel für eine Erhöhung der CO₂-Wirkung sind. Diese werden im Kapitel 5.4 präsentiert und diskutiert.

4.4.1 Sensitivitätsanalysen Basisszenario

Die in Tabelle 18 dargestellten Resultate aus den Sensitivitätsanalysen wurden entsprechend der in Abschnitt 3.8 beschriebenen Vorgehensweise produziert.

Kurzbeschreibung	Detailbeschreibung	Resultat - Unterschied t CO ₂ in % (kumuliert über alle Module und Jahre)
Anteil Nadelholz in Zuwachs und Ernte <i>betrifft das Modul Wald</i>	1) Der Nadelholz-Zuwachs, sowie die Nadelholz-Ernte wurden per 2100 auf 20% verringert (Grundszenario Nadelholz-Zuwachs und Nadelholz-Ernte bei je 33% per Jahr 2100). ➤ Im Basisszenario wurden im Blatt «Eingabe» in F26-G29, sowie im Blatt «Wald_Fixe_Faktoren» in B40 Anpassungen vorgenommen.	1) + 13% Wenn sich Nadelholz-Zuwachs verringert, wird dieser durch Laubholz ersetzt, welches eine höhere Dichte aufweist. CO ₂ -Senke wird erhöht.
	2) Der Nadelholz-Zuwachs, sowie die Nadelholz-Ernte wurden per 2100 auf 50% erhöht. ➤ Im Basisszenario wurden im Blatt «Eingabe» in F26-G29, sowie im Blatt «Wald_Fixe_Faktoren» in B40 Anpassungen vorgenommen.	2) - 22% Wenn sich Nadelholz-Zuwachs erhöht, wird der Laubholz-Zuwachs verringert, welches eine höhere Dichte aufweist. CO ₂ -Senke wird verringert.
Zuordnung Laubholz in der Holzwirtschaft, weniger Verluste beim Laubholz <i>betrifft das Modul Holz</i>	1) Vom Laubholz Schnittholz gehen im Startjahr 2025 20% in die Konstruktion (Grundszenario: 30%), 60% in den Ausbau (Grundszenario: 50%). ➤ Im Basisszenario wurden im Blatt «Holz_Rohdaten» in T272 & T277 Anpassungen vorgenommen (wird direkt im Blatt «Eingabe» übernommen).	1) <1% Inhaltlich grosse Unsicherheiten, aber so geringe Mengen, dass nicht relevant
	2) Vom Laubholz Schnittholz gehen 40% in die Konstruktion (Grundszenario: 30%), 40% in den Ausbau (Grundszenario: 50%). ➤ Im Basisszenario wurden im Blatt «Holz_Rohdaten» in T272 & T277 Anpassungen vorgenommen (wird direkt im Blatt «Eingabe» übernommen).	2) <1% Inhaltlich grosse Unsicherheiten, aber so geringe Mengen, dass nicht relevant
	3) Vom Laubholz Schnittholz gehen im Startjahr 2025, sowie im Zieljahr 2100 40% anstatt 20% ins Produkt, entsprechend weniger wird verbrannt (Energie, nur noch 60% anstatt 80%). ➤ Im Basisszenario wurden im Blatt «Holz_Rohdaten» in P281 & P286 Anpassungen vorgenommen.	3) <1% Inhaltlich grosse Unsicherheiten, aber so geringe Mengen, dass nicht relevant
Kaskade gemäss anderer Datengrundlage <i>betrifft das Modul Holz</i>	Veränderte Kaskade: neu gehen 50%, anstatt wie ursprünglich 37% in den Ausbau ➤ Im Basisszenario wurden im Blatt «Eingabe» in F95-G113 Anpassungen vorgenommen.	+7% Mehr Holz im Ausbau anstatt in der Energie erhöht die CO ₂ -Senke.

Tabelle 18 Die Resultate aus der Sensitivitätsanalyse des Basisszenarios.

4.4.2 Sensitivitätsanalysen Energieszenario

Die in Tabelle 19 dargestellten Resultate aus den Sensitivitätsanalysen wurden entsprechend der in Abschnitt 3.8 beschriebenen Vorgehensweise produziert.

Kurzbeschreibung	Detailbeschreibung	Resultat - Unterschied t CO ₂ in % (kumuliert über alle Module und Jahre)
Anteil Nadelholz in Zuwachs und Ernte <i>betrifft das Modul Wald</i>	1) Der Nadelholz-Zuwachs, sowie die Nadelholz-Ernte wurden per Jahr 2100 auf 20% verringert (Grundszenario: Nadelholz-Zuwachs und Nadelholz-Ernte bei je 33% per Jahr 2100). <ul style="list-style-type: none"> ➢ Im Energieszenario wurden im Blatt «Eingabe» in F26-G29, sowie im Blatt «Wald_Fixe_Faktoren» in B40 Anpassungen vorgenommen. 	1) +19% Wenn sich Nadelholz-Zuwachs verringert, wird dieser durch Laubholz ersetzt, welches eine höhere Dichte aufweist. CO ₂ -Senke wird erhöht.
	2) Der Nadelholz-Zuwachs, sowie die Nadelholz-Ernte wurden per 2100 auf 50% erhöht (Grundszenario: Nadelholz-Zuwachs und Nadelholz-Ernte bei je 33% per Jahr 2100). <ul style="list-style-type: none"> ➢ Im Energieszenario wurden im Blatt «Eingabe» in F26-G29, sowie im Blatt «Wald_Fixe_Faktoren» in B40 Anpassungen vorgenommen. 	2) -30% Wenn sich Nadelholz-Zuwachs erhöht, wird der Laubholz-Zuwachs verringert, welches eine höhere Dichte aufweist. CO ₂ -Senke wird verringert.

Tabelle 19 Die Resultate aus der Sensitivitätsanalyse des Energieszenarios.

4.4.3 Sensitivitätsanalysen CO₂-optimiertes Szenario

Aus der folgenden Tabelle 20 wird ersichtlich, dass beinahe alle Haupthebel in der Ernte, in der Kaskade und in der Zuteilung der Holzwirtschaft relevant sind und beträchtlich zu einer grösseren CO₂-Speicherung als das Basisszenario beitragen.

Weniger relevant ist jedoch die in Kapitel 3.7, Modul Holz erwähnte Unsicherheit bzgl. zukünftiger Zuordnung von Stamm- und Industrielaubholz in der Holzwirtschaft. Unter den gegebenen Rahmenbedingungen und realistischen Annahmen ist die Senkenleistung im Modul Holz wenig sensitiv auf den Anteil, wieviel vom verfügbaren Stamm- und Industrielaubholz letztlich in der Konstruktion und im Ausbau landet. Dies liegt daran, dass beim Einsatz von Laubholz mehrere Faktoren zusammenkommen und diese auch zusammenhängen: Im Rahmen der Szenarien bleibt der Anteil Stamm- und Industrieholz an der Ernte überschaubar, ein Grossteil des Laubholzes wird weiterhin exportiert, die Verluste bei der Produktverarbeitung bleiben eher hoch (und werden energetisch genutzt), und die Wirkung der stofflichen Nutzung von Laubholz tritt erst mit der Zeit ein. Diese Faktoren kombiniert zeigen die Herausforderungen beim Einsatz von Laubholz auf. Die Sensitivitätsanalyse zeigt auf, dass die Reduktion des Exports eine relevantere Schlüsselgrösse ist.

Kurzbeschreibung	Detailbeschreibung	Resultat - Unterschied t CO ₂ in % (kumuliert über alle Module und Jahre)
Ernte wie im Basisszenario <i>betrifft das Modul Wald</i>	Die Verteilung des Sortiments (Nadelholz und Laubholz auf Stamm-, Industrie-, Energie- und Abholz) (vgl. Abschnitt 3.5.4) wurde zurückgesetzt auf die Annahmen im Basisszenario <ul style="list-style-type: none"> ➢ Im CO₂-optimierten Szenario wurden im Blatt «Eingabe» in F33-I41 Anpassungen vorgenommen. 	-9% Ohne die CO ₂ -optimierte Sortimentsverteilung wäre der Senkeneffekt 9% geringer.

Kaskade wie im Basisszenario <i>betrifft das Modul Holz</i>	Die Kaskadennutzung in Konstruktion, Ausbau und Holzwaren (vgl. Abschnitt 3.5.4) wurde zurückgesetzt auf die Annahmen im Basisszenario (über alle Jahre 37%, resp. 63%) ➤ Im CO ₂ -optimierten Szenario wurden im Blatt «Eingabe» in F95-G113 Anpassungen vorgenommen.	-16% Ohne die CO ₂ -optimierte Kaskadennutzung wäre der Senkenefekt 16% geringer.
Zuteilung der Holzernte in der Holzwirtschaft wie im Basisszenario <i>betrifft das Modul Holz</i>	Die holzwirtschaftliche Nutzung der Holzernte (vgl. Abschnitt 3.5.4) wurde zurückgesetzt auf die Annahmen im Basisszenario (über alle Jahre Prozentsatz des Startjahrs beibehalten) ➤ Im CO ₂ -optimierten Szenario wurden im Blatt «Eingabe» in F54-J81 Anpassungen vorgenommen.	-11% Ohne sich verändernde Zuteilung der Holzernte wäre der Senkenefekt 11% geringer.
Anteil Nadelholz in Zuwachs und Ernte <i>betrifft das Modul Wald</i>	1) Der Nadelholz-Zuwachs, sowie die Nadelholz-Ernte wurden per 2100 auf 20% verringert (Grundszenario: Nadelholz-Zuwachs und Nadelholz-Ernte bei je 33% per Jahr 2100). ➤ Im CO ₂ -optimierten Szenario wurden im Blatt «Eingabe» in F41-G44, sowie im Blatt «Wald_Fixe_Faktoren» in B40 Anpassungen vorgenommen. 2) Der Nadelholz-Zuwachs, sowie die Nadelholz-Ernte wurden per 2100 auf 50% erhöht ➤ Im CO ₂ -optimierten Szenario wurden im Blatt «Eingabe» in F26-G29, sowie im Blatt «Wald_Fixe_Faktoren» in B40 Anpassungen vorgenommen.	1) +5% Wenn sich Nadelholz-Zuwachs verringert, wird dieser durch Laubholz ersetzt, welches eine höhere Dichte aufweist. CO ₂ -Senke wird erhöht. 2) -12% Wenn sich Nadelholz-Zuwachs erhöht, wird der Laubholz-Zuwachs verringert, welches eine höhere Dichte aufweist. CO ₂ -Senke wird verringert.
Laubholz: Zuordnung in der Holzwirtschaft, weniger Verluste, Steigerung via Verarbeiter statt Schnittholz <i>betrifft das Modul Holz</i>	1) Laubholz optimistisch: Das Schnitt-, Rest- und Industrieholz geht vermehrt in Konstruktion und Ausbau ➤ Im CO ₂ -optimierten Szenario wurden im Blatt «Holz_Rohdaten» in den Zeilen 262-329 Anpassungen vorgenommen (wird direkt im Blatt «Eingabe» übernommen). 2) Laubholz pessimistisch: wenig Steigerung beim Einsatz von Laubholz in Bau und Konstruktion, nur wenig Steigerung bei der Verarbeitung von Restholz ➤ Im CO ₂ -optimierten Szenario wurden im Blatt «Holz_Rohdaten» in den Zeilen 262-329 Anpassungen vorgenommen (wird direkt im Blatt «Eingabe» übernommen). 3) Vom Laubholz Schnittholz erfolgen weniger Verluste, neu gehen per 2100 60% anstatt 40% ins Produkt, entsprechend weniger wird verbrannt (Energie, nur noch 40% anstatt 60%). ➤ Im CO ₂ -optimierten Szenario wurden im Blatt «Holz_Rohdaten» in P281-289 Anpassungen vorgenommen. 4) Das Laubholz Stammholz geht weniger ins Schnittholz, dafür ins Restholz, wo es bis ins Jahr 2100 eher verarbeitet werden kann, als zu Energieholz zu werden. ➤ Im CO ₂ -optimierten Szenario wurden im Blatt «Holz_Rohdaten» in P272-275 und P299-302 Anpassungen vorgenommen.	1) <1% Die Anpassung löst nur minimal veränderte Resultate aus. 2) <1% Die Anpassung löst nur minimal veränderte Resultate aus. 3) <1% Die Anpassung löst nur minimal veränderte Resultate aus. 4) <1% Die Anpassung löst nur minimal veränderte Resultate aus.

Scrimber Technologie bei Nadelholz <i>betrifft das Modul Holz</i>	Nadel-Schnittholz wird mit der Scrimber-Technologie bearbeitet. Neu gehen per 2050 85% anstatt 61% des Nadel-Stammholz ins Schnittholz und nur noch 15% anstatt 39% ins Restholz. <ul style="list-style-type: none"> Im CO₂-optimierten Szenario wurden im Blatt «Holz_Rohdaten» in P185-186 und P212-213 Anpassungen vorgenommen. 	+2% Die Scrimber-Technologie ist unter den vorliegenden Annahmen nicht relevant für eine erhöhte CO ₂ -Senke.
Kaskade weniger optimistisch <i>betrifft das Modul Holz</i>	Die Holzwirtschaft verwendet ein Produkt nach Ablauf seiner Lebensdauer weniger sowohl im gleichen wie auch in den anderen Anwendungsbereichen (Konstruktion, Ausbau, Holzwaren). Es geht mehr Holz in die Energie. <ul style="list-style-type: none"> Im CO₂-optimierten Szenario wurden im Blatt «Eingabe» in J96-J98, sowie in F101-G113 Anpassungen vorgenommen. 	-8% Bei einer weniger optimistischen Kaskadennutzung verringert sich die CO ₂ -Senke.
Weniger Export <i>betrifft das Modul Holz</i>	1) Weniger Export von Laubholz Rohholz (10% anstatt 26% des Stamm- und Industrieholzes) <ul style="list-style-type: none"> Im CO₂-optimierten Szenario wurden im Blatt «Holz_Rohdaten» in I311-314 und P202-203 Anpassungen vorgenommen. 2) Weniger Export von Nadelholz Rohholz (50%, resp. 20% anstatt 75% des Stamm- und Industrieholzes) <ul style="list-style-type: none"> Im CO₂-optimierten Szenario wurden im Blatt «Holz_Rohdaten» in I178-180 und I228-230 Anpassungen vorgenommen. 3) Weniger Export von Laubholz und Nadelholz Rohholz (beide in 1) und 2) erwähnten Anpassungen kombiniert) <ul style="list-style-type: none"> Im CO₂-optimierten Szenario wurden im Blatt «Holz_Rohdaten» in I311-314, I178-180 und I228-230 Anpassungen vorgenommen. 	1) +12% Der tiefere Export von Rohholz führt zu einer erhöhten CO ₂ -Senke. 2) +10% Der tiefere Export von Rohholz führt zu einer erhöhten CO ₂ -Senke. 3) +22% Der tiefere Export von Rohholz führt zu einer erhöhten CO ₂ -Senke.

Tabelle 20 Die Resultate aus der Sensitivitätsanalyse des CO₂-optimierten Szenarios.

4.4.4 Erreichen von Netto-Null in verschiedenen Jahren

Methode

In dieser Variation des Modells soll ergründet werden, welche Auswirkungen verschiedene Zieljahre von Netto-Null auf jedes der drei Grundszenerien haben. Die Grundszenerien enthalten die Annahme, dass die gesamte Gesellschaft all ihre Aktivitäten ab dem Jahr 2050 mit Netto-Null Emissionen verrichtet (vgl. Abschnitt 3.4.4).

Im Excel im Blatt «Eingabe» im «Modul Substitutionseffekte» (Zeilen 118 bis 128) werden für alle drei Grundszenerien die Annahmen zu Netto-Null, wie in den folgenden Abbildungen dargestellt, variiert. Die Werte antworten auf die Frage: «In welchem Masse sollen die Substitutionseffekte angerechnet werden?». Die Werte reichen von 0% («gar nicht») bis 100% («vollumfänglich») und sind in Abbildung 15 gezeigt. Die Werte zwischen den hier abgebildeten Jahren werden jeweils linear interpoliert.

— Die Substitutionseffekte nehmen langsam ab und verschwinden ab 2050:

	Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie
2025	100%	100%	100%	100%	38%
2035	50%	50%	50%	50%	23%
2050	0%	0%	0%	0%	0%
2100	0%	0%	0%	0%	0%

Abbildung 15 Eingabe für «Netto-Null ab 2050»

- Für Netto-Null 2075 wird ein zusätzliches Jahr 2075 eingefügt und die Werte im Jahr 2050 auf einen Wert zwischen denen der Jahre 2035 und 2075 gesetzt (vgl. Abbildung 16). Die Substitutionseffekte nehmen langsam ab und verschwinden ab 2075.

	Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie
2025	100%	100%	100%	100%	38%
2035	50%	50%	50%	50%	23%
2050	35%	35%	35%	35%	23%
2075	0%	0%	0%	0%	0%
2100	0%	0%	0%	0%	0%

Abbildung 16 Eingabe für «Netto-Null ab 2075»

- Für eine Welt, in welcher Netto-Null in der von uns betrachteten Zeitspanne nicht erreicht wird, ist kein Zwischenjahr 2075 konstruiert und die Werte bleiben bei 100%, womit die Substitutionseffekte über die ganze betrachtete Periode vollumfänglich angerechnet werden. Die Eingabemaske sieht dann wie in Abbildung 17 aus.

	Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie
2025	100%	100%	100%	100%	38%
2035	100%	100%	100%	100%	23%
2050	100%	100%	100%	100%	23%
2100	100%	100%	100%	100%	23%

Abbildung 17 Eingabe für «kein Netto-Null bis 2100»

Resultate

Die Verschiebung des Datums der Erreichung von Netto-Null betrifft in allen Szenarien nur das Modul Substitution (vgl. Abschnitt 4.4.4), die Resultate in den anderen Modulen bleiben jeweils gleich wie im jeweiligen Grundscenario. Den Einfluss dieser Verschiebung im Vergleich zur gesamten CO₂-Wirkung verdeutlichen die blauen Punkte in Abbildung 18. In der Interpretation der Resultate ist Folgendes zu beachten: Das Grundscenario «Netto-Null 2050» wird für den globalen Klimaschutz angestrebt. Die ganze Gesellschaft würde ihre Aktivitäten ab 2050 mit Netto-Null Emissionen bestreiten. Dies wird als Referenz für die Effekte der in den Grundscenarien des Modells abgebildeten Aktivitäten verwendet.

Was sich mit den verschiedenen Jahren der Erreichung von Netto-Null ändert, ist dieses Referenzscenario, mit welchem wir die im vorliegenden Modell präsenten Substitutionseffekte vergleichen. Dies ist bei der Interpretation der Netto-Null Punkte in der Abbildung 18 zu beachten. Wenn das Referenzscenario für den Klimaschutz schlechter wird (sprich spätere Erreichung von Netto-Null, also erst 2075 oder gar nicht bis 2100), stehen die Substitutionseffekte des vorliegenden Modells vergleichsweise besser da. Die Menge an effektiv gespeichertem und eingespartem CO₂ ist in der Variante «Ohne Netto-0» aber nicht grösser als in der Variante «Netto-0 2050», nur die Referenz hat sich verändert.

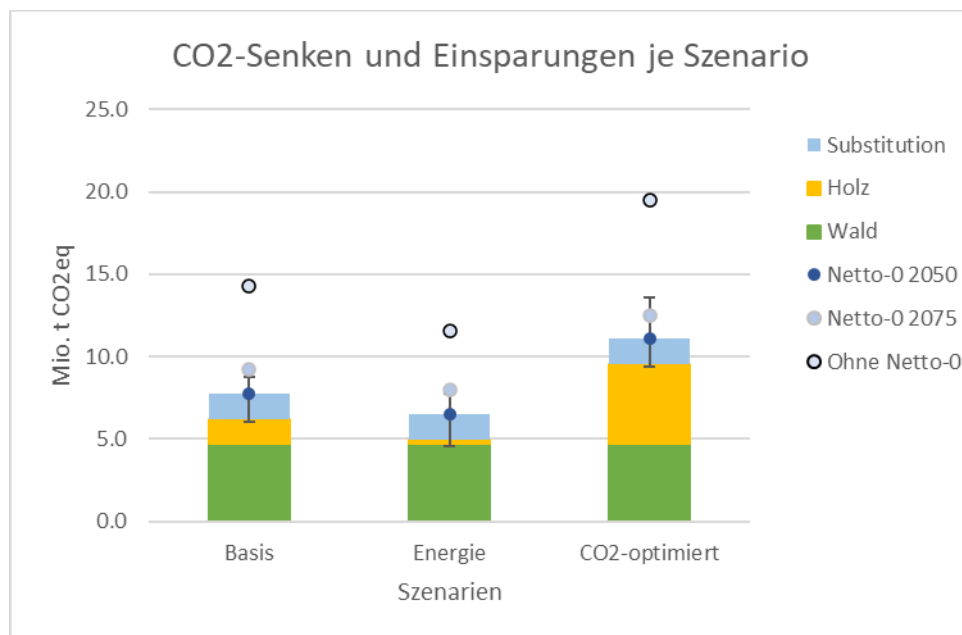


Abbildung 18 CO₂-Senken und Einsparungen pro Grundszenario, inkl. der addierten Unsicherheiten gemäss der Sensitivitätsanalyse (feine Linie) und der Unsicherheit bzgl. Erreichung Netto-Null Zielen für den blauen Substitutionsteil (blaue Punkte)

Im Basisszenario und «falls Netto-Null erst im Jahr 2075 eintritt», ist die CO₂-Wirkung 19% höher, als wenn Netto-Null bereits im Jahr 2050 erreicht wird (der hellblaue Punkt in der Abbildung 18 ist weiter oben als der dunkelblaue). Falls Netto-Null bis ins Jahr 2100 gar nicht eintritt, wird 84% mehr an CO₂ eingespart, als im Basisszenario mit Netto-Null 2050. Dabei werden die Substitutionseffekte über die ganze Zeitdauer (2025-2100) voll angerechnet, anstatt dass sie ab dem Eintreten von Netto-Null nicht mehr angerechnet würden.

Im Energieszenario und «falls Netto-Null erst im Jahr 2075 eintritt», ist die CO₂-Wirkung 22% höher, als wenn Netto-Null bereits im Jahr 2050 erreicht wird. Falls Netto-Null bis ins Jahr 2100 gar nicht eintritt, wird 78% mehr an CO₂ eingespart als im Energieszenario mit Netto-Null 2050. Dabei werden die Substitutionseffekte über die ganze Zeitdauer (2025-2100) voll angerechnet, anstatt dass sie ab dem Eintreten von Netto-Null nicht mehr angerechnet würden.

Im CO₂-optimierten Szenario «falls Netto-Null erst im Jahr 2075 eintritt», ist die CO₂-Wirkung 12% höher, als wenn Netto-Null bereits im Jahr 2050 erreicht wird. Falls Netto-Null Null bis ins Jahr 2100 gar nicht eintritt, wird 75% mehr an CO₂ eingespart als im CO₂-optimierten Szenario mit Netto-Null 2050. Dabei werden die Substitutionseffekte über die ganze Zeitdauer (2025-2100) voll angerechnet, anstatt dass sie ab dem Eintreten von Netto-Null nicht mehr angerechnet würden.

4.5 Zusatzszenario: Reduzierter Zuwachs

4.5.1 Basisszenario

Im Basisszenario bei reduziertem Zuwachs kann im Vergleich zum Grundszenario Basis insgesamt 19% CO₂ weniger gespeichert und eingespart werden. Die CO₂-Wirkung beträgt durchschnittlich 0.084 Mio. t CO₂/Jahr, kumuliert vom Jahr 2025 bis ins Jahr 2100 ergäbe dies 6.2 Mio. t CO₂. Diese jährliche Speicherung/Einsparung entspricht rund 2.1% der jährlichen Emissionen im Kanton Aargau im Jahr 2021 (4.1 Mio. t CO₂, (Abteilung für Umwelt Aargau, 2022, S. 15)).

Lager

Zur Entwicklung der Lager im Grundszenario Basis können folgende Aussagen gemacht werden: Sowohl das Modul Wald wie auch das Modul Holz haben ein Lager. Im Jahr 2025 beträgt das Lager in diesen zwei Modulen zusammen 42 Mio. t CO₂, wobei 96% davon aus dem Modul Wald stammen. Per 2100 hat sich das Lager auf 47 Mio. t CO₂ vergrössert, wobei nun 94% aus dem Modul Wald stammen (vgl. Abbildung 31 bis Abbildung 33 im Anhang A1.4). Die Lager haben sich über die 75 Jahre kontinuierlich aufgebaut, mit einer durchschnittlichen jährlichen Rate von etwa 63 kt CO₂ oder 0.14%. Methodische Informationen zum Lager und den Startwerten finden sich in den Kapiteln 3.2.1 und 3.3.1.

Senken

Die CO₂-Effekte werden durch alle drei Module (Wald, Holz, Substitution) zusammen erreicht. Wie in Tabelle 21 ersichtlich, erfolgt der grösste Effekt durch das Modul Wald mit etwa 56% (3.5 Mio. t CO₂), gefolgt vom Modul Substitution mit etwa 25% (1.5 Mio. t CO₂) und schliesslich Holz mit etwa 18% (1.2 Mio. t CO₂). Beim Wald dominieren die Senkeneffekte durch die lebende Biomasse, beim Holz die Senkeneffekte durch den Ausbau, und bei den Substitutionseffekten die Energiesubstitution. Die CO₂-Wirkung durch das Totholz beträgt 9% an der CO₂-Wirkung des Moduls Wald. Die genauen Zahlen sind in der Tabelle 21 dargestellt, der Vergleich zu den anderen Szenarien findet sich im Kapitel 4.6.

		C Senkenleistung im Wald (Lagerveränderung) [kt CO ₂ eq]				C Senkenleistung im Holz (Lagerveränderung) [kt CO ₂ eq]						CO ₂ -Einsparung durch Substitutionseffekte [ktCO ₂ eq]						Total [kt CO ₂ eq]	
		lebende Biomasse	Totholz	Waldboden	Total	Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total	Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total		
<i>kumuliert</i>	Grundszenario	4'387	327	0	4'714	-11	980	9	12	467	1'458	74	319	185	0	1'001	1'579	7'751	
	Zusatzszenario: Klimawandelbedingter reduzierter Zuwachs	3'232	305	0	3'537	-73	875	4	5	348	1'159	73	318	184	0	998	1'574	6'270	

Tabelle 21 Senkeneffekt im Wald und Holzwirtschaft sowie eingesparte Emissionen aufgrund von Substitutionseffekten im Basisszenario mit reduziertem Zuwachs. Da nur gerundete Werte gezeigt werden, ist die Summe der CO₂-Einsparung durch Substitutionseffekte scheinbar nicht gleich der Addition der Vorwerte.

Im Vergleich zum Grundszenario nimmt in diesem Zusatzszenario die Senkenleistung in Wald und Holz ab, die Substitutionseffekte bleiben fast gleich.

Modul Wald

Aufgrund des reduzierten Zuwachses nimmt die Biomasse im Wald weniger zu als im Grundszenario. Entsprechend wird weniger geerntet und weniger Holz fliesst in das Modul Holz und in die Substitution. Ein weiterer Grund für die tiefere Senkenleistung in der lebenden Biomasse ist die Verzögerung der Anpassung der Ernte (vgl. Abschnitt 3.2.2 «Ernte») an den sich jeweils reduzierenden Zuwachs. Wenn die Ernte auf den letzten 10 Jahren basiert, nimmt die Biomasse im Wirtschaftswald um 3.1% ab. Dies reflektiert das Risiko, dass die Erntemengen zu langsam auf den reduzierten Zuwachs reagieren und somit eine Übernutzung stattfindet. Wenn die Ernte nur auf dem Zuwachs im letzten Jahr basiert, nimmt sie um 0.1% ab – dies ist irrelevant und mit der Trägheit des Systems zu begründen. In den Nutzungsverzichtsflächen nimmt die Biomasse unter reduziertem Zuwachs 'nur' noch 7.1%, anstatt wie im Grundszenario

um 8.3% zu über die betrachteten 75 Jahre. Dieser Effekt ist auch im Energieszenario und im CO₂-optimierten Szenario zu beobachten.

Modul Holz

Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, gibt es im Modul Holz insgesamt weniger Senkeneffekte, da aufgrund tieferer Ernten (jeweils dem Zuwachs angepasst) weniger Holz in dieses Modul einfließt.

Die Abnahme der CO₂-Senke in der Konstruktion ist relativ am höchsten von allen Anwendungsarten im Modul Holz. Die Konstruktion ist direkt von der Ernte abhängig, die ja in diesem Zusatzszenario «reduzierter Zuwachs» unmittelbar betroffen ist. Die Anwendungsart «Ausbau» ist vor allem abhängig von den Kaskaden, entsprechend eher indirekt betroffen und die Abnahme in der CO₂-Senke deshalb proportional kleiner.

Modul Substitution

Wie in der Eingabe definiert (vgl. Abschnitt 3.6) liegt im Jahr 2050 der reduzierte Zuwachs bei 98%, erst danach nimmt er kontinuierlich bis auf 80% ab. Weil im Grundszenario angenommen wird, dass ab 2050 Netto-Null eintritt und alle Aktivitäten keine Emissionen mehr verursachen und entsprechend auch keine Emissionen substituiert werden, bleibt der Substitutionseffekt fast identisch mit dem Grundszenario. Dieser Effekt ist auch im Energieszenario und im CO₂-optimierten Szenario zu beobachten.

4.5.2 Energieszenario

Im Energieszenario bei reduziertem Zuwachs kann im Vergleich zum Grundszenario Energie insgesamt 21% weniger CO₂ gespeichert und eingespart werden. Die CO₂-Wirkung beträgt durchschnittlich 0.068 Mio. t CO₂/Jahr, kumuliert vom Jahr 2025 bis ins Jahr 2100 ergäbe dies 5.1 Mio. t CO₂. Diese jährliche Speicherung/Einsparung entspricht rund 1.7% der jährlichen Emissionen im Kanton Aargau im Jahr 2021 (4.1 Mio. t CO₂, (Abteilung für Umwelt Aargau, 2022, S. 15)).

Lager

Zur Entwicklung der Lager im Grundszenario Energie können folgende Aussagen gemacht werden: Sowohl das Modul Wald wie auch das Modul Holz haben ein Lager. Im Jahr 2025 beträgt das Lager in diesen zwei Modulen zusammen 42 Mio. t CO₂, wobei 96% davon aus dem Modul Wald stammen. Per 2100 hat sich das Lager auf 46 Mio. t CO₂ vergrössert, wobei weiterhin 96% aus dem Modul Wald stammen (vgl. Abbildung 34 bis Abbildung 36 im Anhang A1.5). Die Lager haben sich über die 75 Jahre kontinuierlich aufgebaut, mit einer durchschnittlichen jährlichen Rate von etwa 48 kt CO₂ oder 0.11%. Methodische Informationen zum Lager und den Startwerten finden sich in den Kapiteln 3.2.1 und 3.3.1.

Senken

Die CO₂-Effekte werden durch alle drei Module (Wald, Holz, Substitution) zusammen erreicht. Wie in Tabelle 22 ersichtlich, erfolgt der grösste Effekt durch das Modul Wald mit etwa 69% (3.5 Mio. t CO₂), gefolgt vom Modul Substitution mit etwa 30% (1.5 Mio. t CO₂). Das Modul Holz spielt in diesem Szenario eine sehr untergeordnete Rolle mit etwa 1% (0.04 Mio. t CO₂). Beim Wald dominieren die Senkeneffekte durch die lebende Biomasse, beim Holz die Senkeneffekte durch die Energie, und bei den Substitutionseffekten die Energiesubstitution. Die CO₂-Wirkung durch das Totholz beträgt 9% an der CO₂-Wirkung des Moduls Wald. Die genauen Zahlen sind in der Tabelle 22 dargestellt, der Vergleich zu den anderen Szenarien findet sich im Kapitel 4.6.

		C Senkenleistung im Wald (Lagerveränderung) [kt CO2eq]				
<i>kumuliert</i>		lebende Biomasse	Totholz	Waldboden	Total	
Grundszenario		4'387	327	0	4'714	
Zusatzszenario: Klimawandelbedingter reduzierter Zuwachs		3'231	305	0	3'536	

		C Senkenleistung im Holz (Lagerveränderung) [kt CO2eq]					
<i>kumuliert</i>		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total
Grundszenario		-517	240	-10	-12	539	239
Zusatzszenario: Klimawandelbedingter reduzierter Zuwachs		-533	201	-11	-14	401	43

		CO2-Einsparung durch Substitutionseffekte [ktCO2eq]						Total [kt CO2eq]
<i>kumuliert</i>		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total	
Grundszenario		41	229	104	0	1'174	1'548	6'501
Zusatzszenario: Klimawandelbedingter reduzierter Zuwachs		41	229	104	0	1'169	1'543	5'122

Tabelle 22 Senkeneffekt im Wald und Holzwirtschaft sowie eingesparte Emissionen aufgrund von Substitutionseffekten im Energieszenario mit reduziertem Zuwachs. Da nur gerundete Werte gezeigt werden, ist die Summe der Senkenleistung im Holz scheinbar nicht gleich der Addition der Vorwerte.

4.5.3 CO₂-optimiertes Szenario

Im CO₂-optimierten Szenario mit reduziertem Zuwachs kann im Vergleich zum Grundszenario CO₂-optimiert insgesamt 15% weniger CO₂ gespeichert und eingespart werden. Die CO₂-Wirkung beträgt durchschnittlich 0.125 Mio. t CO₂/Jahr, kumuliert vom Jahr 2025 bis ins Jahr 2100 ergäbe dies 9.4 Mio. t CO₂. Diese jährliche Speicherung/Einsparung entspricht rund 3.1% der jährlichen Emissionen im Kanton Aargau im Jahr 2021 (4.1 Mio. t CO₂, (Abteilung für Umwelt Aargau, 2022, S. 15)). Die genauen Zahlen sind in Tabelle 23 aufgezeigt.

Lager

Zur Entwicklung der Lager im Grundszenario CO₂-optimiert können folgende Aussagen gemacht werden: Sowohl das Modul Wald wie auch das Modul Holz haben ein Lager. Im Jahr 2025 beträgt das Lager in diesen zwei Modulen zusammen 42 Mio. t CO₂, wobei 96% davon aus dem Modul Wald stammen. Per 2100 hat sich das Lager auf 50 Mio. t CO₂ vergrößert, wobei nun 88% aus dem Modul Wald stammen (vgl. Abbildung 37 bis Abbildung 39 im Anhang A 1.6). Die Lager haben sich über die 75 Jahre kontinuierlich aufgebaut, mit einer durchschnittlichen jährlichen Rate von etwa 104 kt CO₂ oder 0.23%. Methodische Informationen zum Lager und den Startwerten finden sich in den Kapiteln 3.2.1 und 3.3.1.

Senken

Die CO₂-Effekte werden durch alle drei Module (Wald, Holz, Substitution) zusammen erreicht. Wie in Tabelle 23 ersichtlich, erfolgt der grösste Effekt durch das Modul Holz mit 46% (4.2 Mio. t CO₂), gefolgt vom Modul Wald mit 38% (3.5 Mio. t CO₂) und vom Modul Substitution mit 17% (1.5 Mio. t CO₂). Beim Wald dominieren die Senkeneffekte durch die lebende Biomasse, beim Holz die Senkeneffekte durch den Ausbau, und bei den Substitutionseffekten die Energiesubstitution. Die CO₂-Wirkung durch Totholz beträgt 9% an der CO₂-Wirkung des Moduls Wald. Die genauen Zahlen sind in der Tabelle 23 dargestellt, der Vergleich zu den anderen Szenarien findet sich im Kapitel 4.6.

		C Senkenleistung im Wald (Lagerveränderung) [kt CO2eq]			
		lebende Biomasse	Totholz	Waldboden	Total
<i>kumuliert</i>	Grundszenario	4'387	327	0	4'714
	Zusatzszenario: Klimawandelbedingter reduzierter Zuwachs	3'231	305	0	3'536

		C Senkenleistung im Holz (Lagerveränderung) [kt CO2eq]					
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total
<i>kumuliert</i>	Grundszenario	1'456	3'154	-6	-16	212	4'800
	Zusatzszenario: Klimawandelbedingter reduzierter Zuwachs	1'267	2'890	-8	-17	141	4'272

		CO2-Einsparung durch Substitutionseffekte [ktCO2eq]					Total [kt CO2eq]
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total
<i>kumuliert</i>	Grundszenario	113	402	178	0	887	1'580
	Zusatzszenario: Klimawandelbedingter reduzierter Zuwachs	112	401	177	0	884	1'575
							11'094
							9'384

Tabelle 23 Senkeneffekt im Wald und Holzwirtschaft sowie eingesparte Emissionen aufgrund von Substitutionseffekten im CO₂-optimierten Szenario mit reduziertem Zuwachs. Da nur gerundete Werte gezeigt werden, ist die Summe der Senkenleistung im Holz und die CO₂-Einsparung durch Substitutionseffekte scheinbar nicht gleich der Addition der Vorwerte.

4.6 Übersicht und Vergleich der Ergebnisse der Grund- und Zusatzszenarien

Grundszenarien

In der folgenden Übersicht (Tabelle 24) finden sich die Resultate des Basis-, Energie- und CO₂-optimierten Szenario in ihrem jeweiligen Grundszenario. Zusammenfassend wird beobachtet, dass die jährliche CO₂-Wirkung des CO₂-optimierten Szenarios am höchsten ist im Vergleich mit den beiden anderen Szenarien; sie entspricht rund 3.7% (oder 148 kt CO₂) der jährlichen Emissionen im Kanton Aargau im Jahr 2021 (4.1 Mio. t CO₂, (Abteilung für Umwelt Aargau, 2022, S. 15)). Die CO₂-Wirkung des Basis-Szenarios entspricht rund 2.5% (oder 103 kt CO₂) der jährlichen Emissionen im Kanton Aargau im Jahr 2021 und die des Energie-Szenarios 2.2% (oder 87 kt CO₂).

Vergleicht man die CO₂-Wirkung des CO₂-optimierten Szenarios direkt mit derjenigen der anderen beiden Szenarien, ist sie im Vergleich zum Basisszenario um knapp 30% und im Vergleich zum Energieszenario um gut 41% höher.

Zum Vergleich: Die beiden Zementproduzenten im Kanton Aargau emittieren etwas mehr als 1 Mio. t CO₂ pro Jahr (Umwelt Aargau, 2022). Die durchschnittliche jährliche CO₂-Wirkung des Aargauer Waldes entspricht (je nach Szenario) gemäss den Modellergebnissen also etwa 9 – 15% der CO₂-Emissionen dieser zwei Zementproduzenten.

Der Kanton Aargau weist aktuell keine detaillierte Treibhausgasbilanz nach Sektoren auf. Nimmt man für die Landwirtschaft des Kantons aber den schweizerischen Anteil der Gesamtemissionen von 14.3% an (BAFU, 2023), ergeben sich dadurch jährliche Emissionen von ca. 0.59 Mio. t CO₂, was gemäss der Modellergebnisse je nach Szenario zu ca. 15 – 25% durch die durchschnittliche jährliche CO₂-Wirkung des Aargauer Waldes ausgeglichen wird.

Die inländischen schweizerischen Gesamtemissionen beliefen sich im Jahr 2022 auf 45.2 Mio. t CO₂¹⁸, was gemäss den Modellergebnissen je nach Szenario zu ca. 0.2 – 0.3% durch die durchschnittliche jährliche CO₂-Wirkung des Aargauer Waldes ausgeglichen werden kann.

18 Online: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/inkuerze.html> (besucht am 1.10.2023)

Nachfolgend in der Tabelle 24 werden die Grundszenario-Resultate des Energie-Szenario und des CO₂-optimierten Szenario jeweils mit dem Basis-Szenario und schliesslich auch untereinander verglichen.

Wie in den Kapiteln 4.2.1 und 3.5.3 beschrieben, sind im Energieszenario die Startjahre aller Module, sowie das gesamte Modul Wald gleich wie im Basisszenario. Der einzige Unterschied in der Einstellung der Parameter besteht darin, dass ein grösserer Anteil des Holzes ins Energieholz fliesst. Im Energieszenario kann von allen drei Grundszenarien die kleinste CO₂-Wirkung erzielt werden. Primär ist der Senkeneffekt im Modul Holz viel kleiner, weil die Verweildauer als Energieholz erheblich kürzer ist als in den anderen Sortimenten. Das Modul Wald unterscheidet sich nicht vom Basisszenario. Im Modul Substitutionseffekt sehen die Grafiken bei allen drei Szenarien ähnlich aus. Netto-Null setzt bereits im Jahr 2050 an und die Szenarien wirken bis dahin noch nicht sehr unterschiedlich.

Wie in den Kapiteln 4.3.1 und 3.5.4 beschrieben, sind im CO₂-optimierten Szenario die Startjahre aller Module, sowie das gesamte Modul Wald gleich wie im Basisszenario. Anschliessend werden mehrere vom Basisszenario abweichende Annahmen bezüglich der Sortimente, der Nutzung in der Holzwirtschaft, des Nadelholzes, der Verluste etc. getroffen. Wie erwartet kann im CO₂-optimierten Szenario von allen drei Grundszenarien die grösste CO₂-Wirkung erzielt werden. Dies ist vor allem den hohen Senkeneffekten im Modul Holz geschuldet, wo sehr viel Holz in die Konstruktion und in den Ausbau fliesst – beides Sortimente mit hohen Verweildauern – und da die Kaskadennutzung optimiert wurde.

Basis-Szenario

		C Senkenleistung im Wald (Lagerveränderung) [kt CO2eq]					
		lebende Biomasse	Totholz	Waldboden	Total		
<i>kumuliert</i>							
Grundszenario		4'387	327	0	4'714		
Mittelwert über die Jahre		58	58	58	58		

		C Senkenleistung im Holz (Lagerveränderung) [kt CO2eq]					
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total
<i>kumuliert</i>							
Grundszenario		-11	980	9	12	467	1'458
Mittelwert über die Jahre		0	13	0	0	6	19

		CO2-Einsparung durch Substitutionseffekte [ktCO2eq]						Total [kt CO2eq]
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total	
<i>kumuliert</i>								
Grundszenario		74	319	185	0	1'001	1'579	7'751
Mittelwert über die Jahre		1	4	2	0	13	21	103

Energie-Szenario

		C Senkenleistung im Wald (Lagerveränderung) [kt CO2eq]					
		lebende Biomasse	Totholz	Waldboden	Total		
<i>kumuliert</i>							
Grundszenario		4'387	327	0	4'714		
Mittelwert über die Jahre		58	4	0	63		

		C Senkenleistung im Holz (Lagerveränderung) [kt CO2eq]					
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total
<i>kumuliert</i>							
Grundszenario		-517	240	-10	-12	539	239
Mittelwert über die Jahre		-7	3	0	0	7	3

		CO2-Einsparung durch Substitutionseffekte [ktCO2eq]						Total [kt CO2eq]
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total	
<i>kumuliert</i>								
Grundszenario		41	229	104	0	1'174	1'548	6'501
Mittelwert über die Jahre		1	3	1	0	16	21	87

CO2-optimiertes Szenario

		C Senkenleistung im Wald (Lagerveränderung) [kt CO2eq]					
		lebende Biomasse	Totholz	Waldboden	Total		
<i>kumuliert</i>							
Grundszenario		4'387	327	0	4'714		
Mittelwert über die Jahre		58	4	0	63		

		C Senkenleistung im Holz (Lagerveränderung) [kt CO2eq]					
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total
<i>kumuliert</i>							
Grundszenario		1'456	3'154	-6	-16	212	4'800
Mittelwert über die Jahre		19	42	0	0	3	64

		CO2-Einsparung durch Substitutionseffekte [ktCO2eq]						Total [kt CO2eq]
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total	
<i>kumuliert</i>								
Grundszenario		113	402	178	0	887	1'580	11'094
Mittelwert über die Jahre		2	5	2	0	12	21	148

Tabelle 24 Resultate aller drei Grundszenarien; Basis-, Energie- und CO₂-optimiertes Szenario. Wo die Summe der Senkenleistung nicht gleich der Addition der Vorwerte ist, ist dies auf die dargestellten gerundeten Werte zurückzuführen.

Zusatzszenarien

In der folgenden Übersicht Tabelle 25 finden sich die Resultate des Basis-, Energie- und CO₂-optimierten Szenario in ihrem jeweiligen Zusatzszenario des klimawandelbedingten reduzierten Zuwachses.

Basis-Szenario

		C Senkenleistung im Wald (Lagerveränderung) [kt CO2eq]					
		lebende Biomasse	Totholz	Waldboden	Total		
<i>kumuliert</i>	Grundszenario	4'387	327	0	4'714		
	Zusatzszenario: Klimawandelbedingter reduzierter Zuwachs	3'232	305	0	3'537		

		C Senkenleistung im Holz (Lagerveränderung) [kt CO2eq]					
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total
<i>kumuliert</i>	Grundszenario	-11	980	9	12	467	1'458
	Zusatzszenario: Klimawandelbedingter reduzierter Zuwachs	-73	875	4	5	348	1'159

		CO2-Einsparung durch Substitutionseffekte [ktCO2eq]						Total [kt CO2eq]
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total	
<i>kumuliert</i>	Grundszenario	74	319	185	0	1'001	1'579	7'751
	Zusatzszenario: Klimawandelbedingter reduzierter Zuwachs	73	318	184	0	998	1'574	6'270

Energie-Szenario

		C Senkenleistung im Wald (Lagerveränderung) [kt CO2eq]			
		lebende Biomasse	Totholz	Waldboden	Total
<i>kumuliert</i>	Grundszenario	4'387	327	0	4'714
	Zusatzszenario: Klimawandelbedingter reduzierter Zuwachs	3'231	305	0	3'536

		C Senkenleistung im Holz (Lagerveränderung) [kt CO2eq]					
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total
<i>kumuliert</i>	Grundszenario	-517	240	-10	-12	539	239
	Zusatzszenario: Klimawandelbedingter reduzierter Zuwachs	-533	201	-11	-14	401	43

		CO2-Einsparung durch Substitutionseffekte [ktCO2eq]						Total [kt CO2eq]
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total	
<i>kumuliert</i>	Grundszenario	41	229	104	0	1'174	1'548	6'501
	Zusatzszenario: Klimawandelbedingter reduzierter Zuwachs	41	229	104	0	1'169	1'543	5'122

CO2-optimiertes Szenario

		C Senkenleistung im Wald (Lagerveränderung) [kt CO2eq]			
		lebende Biomasse	Totholz	Waldboden	Total
<i>kumuliert</i>	Grundszenario	4'387	327	0	4'714
	Zusatzszenario: Klimawandelbedingter reduzierter Zuwachs	3'231	305	0	3'536

		C Senkenleistung im Holz (Lagerveränderung) [kt CO2eq]					
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total
<i>kumuliert</i>	Grundszenario	1'456	3'154	-6	-16	212	4'800
	Zusatzszenario: Klimawandelbedingter reduzierter Zuwachs	1'267	2'890	-8	-17	141	4'272

		CO2-Einsparung durch Substitutionseffekte [ktCO2eq]						Total [kt CO2eq]
		Konstruktion	Ausbau	Holzwaren (Paletten)	Holzwaren (Schalungen)	Energie	Total	
<i>kumuliert</i>	Grundszenario	113	402	178	0	887	1'580	11'094
	Zusatzszenario: Klimawandelbedingter reduzierter Zuwachs	112	401	177	0	884	1'575	9'384

Tabelle 25 Resultate aller drei Zusatzszenarien; Basis-, Energie- und CO₂-optimiertes Szenario

Die Ergebnisse zeigen, der Aargauer Wald kann je nach Zusatzszenario zwischen 1.7% (oder 68 kt CO₂) und 3.1% (125 kt CO₂) der jährlichen Emissionen im Kanton Aargau (Abteilung für Umwelt Aargau, 2022, S. 15) mit dem Senken- und Substitutionseffekt des Systems Wald und Holz ausgleichen.

Wie in den Grundszenarien schneidet auch im Zusatzszenario das Energieszenario bezüglich CO₂-Wirkung am schlechtesten und das CO₂-optimierte Szenario am besten ab. Alle drei Szenarien weisen im Modul Wald die gleichen Rückgänge der Senkenleistungen auf.

Das Energieszenario weist im Zusatzszenario im Vergleich zu den anderen zwei Szenarien überdurchschnittlich hohe Rückgänge im Modul Holz auf. Der starke Rückgang ist darauf zurückzuführen, dass hier mehrere Effekte sich verstärken: Das geerntete Holz wird vermehrt direkt energetisch verwertet anstatt in Produkten genutzt, die Nadelholzernte geht zurück und diese Effekte werden durch den reduzierten Zuwachs noch verstärkt.

Die Rückgänge in der CO₂-Wirkung sind im Zusatzszenario Energieszenario (-21%) grösser als in den anderen Zusatzszenarien (-19% im Basis-Szenario, resp. -15% im CO₂-optimierten Szenario). Das CO₂-optimierte Szenario federt den reduzierten Zuwachs am besten ab.

5. Diskussion Potenzial des Aargauer Waldes und der nachgelagerten Holzkette im Kanton Aargau

Diese Diskussion gliedert sich in sechs Abschnitte, welche die einzelnen Bereiche des Modells und der Ergebnisse diskutieren und interpretieren. Bevor in den folgenden Abschnitten die Themen Netto-Null-Ziele, die Neubauten mit Holz, die Energieproduktion und schliesslich die Eingabeparameter (Stellschrauben) im Modell sowie eine zentrale Limitierung des Modells (Baumartenverschiebung) diskutiert werden, fügen wir hier einige wichtige Bemerkungen zur Interpretation der Ergebnisse an. Das Kapitel schliesst mit einer Beschreibung der möglichen Auswirkungen auf die walddpolitischen Zielsetzungen und den wichtigsten Zielkonflikten und Synergien ab.

- Generell ist für die Interpretation zu beachten, dass rein basierend auf den berechneten Substitutionseffekten pro Produkt (z.B. Holzpalette, Holzbau) keine Schlüsse betreffend deren allfälligen Förderung gezogen werden können. Einige Produkte weisen einen höheren Substitutionseffekt auf als andere. Die Produkte wirken auch im System des Kaskadeneffekts und es gibt zum Teil sehr grosse Unterschiede in den mengenmässigen Potenzialen pro Produkt.
- Der Senkeneffekt im Energieszenario ist im Vergleich zu den anderen Szenarien am geringsten. Dies war zu erwarten, 1. da die Verweildauer des Holzes im Energielager kurz ist und 2. da davon auszugehen ist, dass Substitutionseffekte mit der Zeit abnehmen. Der Ersatz von fossilen Energiequellen ist je länger, je weniger bedeutend. Es bestehen kaum «Stellschrauben», um das Energieszenario weiter zu optimieren.
- Ein wesentlicher Teil der Unsicherheiten durch Annahmen in der Modellierung und der Parametrisierung des Modells bezieht sich nur auf die absoluten Werte, kürzt sich aber bei Vergleichen zwischen Szenarien heraus (z.B. Annahmen Verteilung Holzlager s. Abschnitt 3.3.1; Annahmen Zuwachs lebende Biomasse s. Abschnitt 3.7). Dies ist beim Vergleich mit anderen Quellen zu beachten.

5.1 Beitrag zu den Netto-Null Zielen

Der Regierungsrat des Kantons Aargau steht hinter den Bemühungen des Bundes, die Treibhausgasemissionen bis 2050 auf Netto-Null zu reduzieren. Er beabsichtigt, geeignete Massnahmen innerhalb der Zuständigkeit und Verantwortung des Kantons zur Verringerung der Treibhausgasemissionen zu ergreifen und diese als Möglichkeiten für Innovationen zu nutzen.

Ein Projektziel war es deshalb, folgende Frage zu beantworten: Was ist die CO₂-Gesamtwirkung des Aargauer Waldes für die drei Szenarien und wie relevant ist die CO₂-Gesamtwirkung im Vergleich mit den Gesamtemissionen des Kantons Aargau¹⁹?

Gemäss den Resultaten des Modells kann die Frage wie folgt beantwortet werden: Der Aargauer Wald kann je nach Grundszenario zwischen 2.2% und 3.7% der jährlichen Emissionen im Kanton Aargau mit dem Senken- und Substitutionseffekt des Systems Wald und Holz ausgleichen (vgl. Kapitel 4.6 «Grundszenario»)²⁰. Berücksichtigt man die Zusatzszenarien des reduzierten Zuwachses mit, bewegt sich die Spannweite aller zwischen 1.7% und 3.7%. Zu beachten ist dabei, dass es sich um Durchschnittswerte handelt und der Grossteil der Senkenleistung am Anfang der betrachteten 75 Jahre der Projektion anfällt, danach nimmt die jährliche zusätzliche Senkenleistung ab. Die Gründe dafür sind vielseitig und beinhalten u.a. die folgenden Effekte: Substitutionsrückgang nach Netto-Null, Sättigung von Totholzvolumen im Wald und weitere. Die wichtigsten Stellschrauben werden im Kapitel 5.4 diskutiert.

Der Wald und die nachgelagerten Wertschöpfungsketten können also einen spürbaren Effekt auf das Netto-Null-Ziel haben, beeinflussen aber unter den gegebenen Rahmenbedingungen einen Unterschied von insgesamt maximal 2% aktiv (Spannbreite je nach Szenario zwischen 3.7% und 1.7%).

Bei der Kommunikation der Ergebnisse ist zu entscheiden, ob der Senkeneffekt des Energieholzes mitberücksichtigt oder vernachlässigt werden soll. Zurzeit wird er miteinbezogen. Eine vertretbare Alternative wäre, dass die Senkeneffekte durch den Energiepool ganz ausgeschlossen werden. Diese Interpretation ist denkbar, da der Energiepool i.d.R. nicht als Kohlenstoffspeicher gezählt wird.

5.2 Beitrag zu den Neubauten

Anhand der Daten des Bundesamtes für Statistik (BFS) zu den Aargauischen Gebäudeanteilen an der Gesamtschweiz²¹ (8.67%) und der interpolierten Materialaufschlüsselung der Erstellung von Neubauten gemäss MatCH Studie (Gauch et al. 2016) konnte für das Startjahr 2025 die Holzmenge im Kanton Aargau errechnet werden, die bei Neubauten verwendet wird: Sie liegt bei 88'940 t/a (oder ca. 170'000 Efm/a). Gemäss MatCH Studie (Gauch et al. 2016) macht das Material Holz einen Masseanteil von 1.53% an den im gesamten Neubau verwendeten Materialien aus.

Die jährliche Ernte aus dem Aargauer Wald, die aktuell in die Sortimente Konstruktion und Ausbau geht, beläuft sich gemäss Modell im Startjahr auf etwa 51'700 Efm oder ca. 27'000 t. Im Vergleich zu der in Neubauten verwendeten Holzmenge entspricht dies gut 30%. Es kann also gefolgert werden, dass die Kapazitätsgrenze für Holzneubauten aus Aargauer Holz heute ohne Importe durch das waldseitige Angebot limitiert ist.

19 Online: <https://www.ag.ch/de/verwaltung/bvu/umwelt-natur-landschaft/nachhaltige-entwicklung/bericht-nachhaltige-entwicklung/> (abgerufen am 26.09.2023)

20 Sollte die anrechenbare Senkenwirkung des Aargauer Waldes in voller Übereinstimmung mit klimapolitischen Richtlinien berechnet werden, fällt der Beitrag des Aargauer Waldes an Netto-Null geringer aus (vgl. Ausführungen in der Fussnote 1 (Seite 10); insb. nur massnahmenbasierte Senkenwirkung sind anrechenbar).

21 Online: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bau-wohnungswesen.assetdetail.23524566.html>

Die Verwendung von Aargauer Holz für Neubauten kann durch eine Sortimentsverschiebung Richtung Stamm- und Industrieholz (in der Ernte) sowie mit gesteigerter Kaskadennutzung erhöht werden. Die gesamte Menge zusätzlichen Holzes, welches im CO₂-optimierten Szenario für Ausbau und Konstruktion zur Verfügung stünde, könnte weiterhin im Kanton verbaut werden. Als Beispiel kann folgende Ausführung beigezogen werden: Im CO₂-optimierten Szenario ist 2050 das Jahr mit der grössten Erntemenge, die in die Sortimente Konstruktion und Ausbau fliesst, nämlich 100'100 Efm. Dieser Wert entspricht 59% der für das Jahr 2025 ermittelten 170'000 Efm Holz für Holzneubauten.

Zur Veranschaulichung: Gemäss den Modellparametern entspricht ein Holzneubau (Mehrfamilienhaus) im Schnitt einer verbauten Menge von ca. 780 t Holz. Dadurch lässt sich abschätzen, dass im Jahr 2025 knapp 35 Mehrfamilienhäuser als Holzneubauten im Kanton erstellt werden könnten. Die beinahe Verdopplung von 51'700 Efm auf 100'100 Efm gemäss obigem Beispiel, entspräche einer Erhöhung von 35 auf 68 Holzneubauten. Der eingangs erwähnte Holz-Masseanteil an der gesamten Neubautätigkeit würde sich von 1.53% auf 2.97% erhöhen.

5.3 Beitrag zur Energieproduktion im Kontext der stofflichen Optimierung

In den verschiedenen Grundscenarien fallen unterschiedliche Mengen an Energieholz an. Das Holz (in Form von Pellets) hat einen Heizwert von 4.2 kWh / kg Holz; diese Annahme liegt auch der Berechnung der Substitutionseffekte Energie (vgl. Kap. 3.4.3) zugrunde.

Im Energieszenario resultiert die grösste Menge an Energieholz. Im Jahr 2050, dem Zieljahr der meisten öffentlichen Energiestrategien bezüglich des Erreichens von Netto-Null, fallen 208 kt Energieholz an. Dies entspricht einer Energiebereitstellung von 874 GWh.

Unter der Optimierung der stofflichen Nutzung des Holzes, also im CO₂-optimierten Szenario, resultiert im Jahr 2050 folgende Menge Energieholz: 116 kt, was beim identischen Heizwert pro kg Holz zu einer Energiebereitstellung von 488 GWh führt.

Bezüglich der Sortimentsverteilung (also der Verteilung von Nadelholz und Laubholz auf Stammholz, Industrieholz, Energieholz und Abholz), welche zur stofflichen Optimierung angenommen wurde, kann im Excel das Blatt «Eingabe» konsultiert werden, ab Zeile 47, vgl. Abschnitt 3.5.4.

		Stammholz			Industrieholz			Energieholz			Abholz		
		Basis	Energie	CO ₂ optim.	Basis	Energie	CO ₂ optim.	Basis	Energie	CO ₂ optim.	Basis	Energie	CO ₂ optim.
Beim Nadelholz	2025	50%	50%	50%	15%	15%	15%	31%	31%	31%	5%	5%	5%
	2035	50%	12%	60%	15%	10%	15%	31%	73%	20%	5%	5%	5%
	2050	50%	12%	60%	15%	10%	20%	31%	73%	15%	5%	5%	5%
	2100	50%	12%	60%	15%	10%	25%	31%	73%	10%	5%	5%	5%
Beim Laubholz	2025	15%	15%	15%	12%	12%	12%	67%	67%	67%	6%	6%	6%
	2035	15%	11%	19%	12%	10%	15%	67%	73%	60%	6%	6%	6%
	2050	15%	11%	24%	12%	10%	20%	67%	73%	50%	6%	6%	6%
	2100	15%	11%	25%	12%	10%	29%	67%	73%	40%	6%	6%	6%

Tabelle 26 Sortimentsverteilung in den drei Grundscenarien Basis, Energie und CO₂-optimiert

Zum Vergleich: gemäss dem Aargauer Departement Bau, Verkehr und Umwelt²² liegt der Endenergieverbrauch im Kanton Aargau bei 15 TWh pro Jahr. Im Energieszenario würden mit den 874 GWh 5.8% dieses Verbrauchs gedeckt, im CO₂-optimierten Szenario 3.3%. Mit dem Energieszenario lassen sich damit 21% des Stromproduktionsziels aus erneuerbarer Energie im Kanton Aargau für 2030 gemäss Energiestrategie des Kantons (Departement Bau, Verkehr

22 Online: [https://www.ag.ch/de/verwaltung/bvu/energie/energieversorgung#:~:text=Der%20Endenergieverbrauch%20im%20Kanton%20Aargau,Terawattstunden%20\(TWh\)%20pro%20Jahr](https://www.ag.ch/de/verwaltung/bvu/energie/energieversorgung#:~:text=Der%20Endenergieverbrauch%20im%20Kanton%20Aargau,Terawattstunden%20(TWh)%20pro%20Jahr)

und Umwelt des Kanton Aargau (2015)) beisteuern. Mit dem CO₂-optimierten Szenario hingegen liessen sich knapp 12% davon beisteuern.

5.4 Eingabeparameter in der Praxis

Im Excel-Modell ist es möglich, verschiedene Eingabeparameter (vgl. Kapitel 3.2.3, 3.3.3 und 3.4.5) zu verändern (im Folgenden Hebel genannt). Im vorliegenden Kapitel geht es darum, die veränderbaren Parameter kurz zusammenzufassen und aufzuzeigen, welche nur in der theoretischen Modellwelt und welche auch in der Praxis verändert werden können.

Einige dieser Hebel wurden im Zusatzszenario und in den Sensitivitätsanalysen (vgl. auch Resultate Sensitivitätsanalyse im Abschnitt 4.4) getestet. Anhand der Erkenntnisse daraus wurde abgeleitet, welche Eingabeparameter wichtig sind (ab 10% Veränderung auf das Resultat), um die CO₂-Wirkung zu vergrössern.

Es wurden die folgenden Eingabeparameter analysiert (vgl. dazu auch Anhang A1.7):

- **Modul Wald:** Anteil Nadelholz am Vorrat; Anteil Nadelholz an der Ernte; Aufteilung der Sortimente (Stamm-, Industrie-, Energie- und Abholz); Nutzungsverzichtsflächen; Totholz pro ha; Waldfläche; Zuwachs.
- **Modul Holz:** Aufteilung der Holzernte auf Konstruktion, Ausbau, Holzwaren und Energie; Kaskadennutzung.
- **Modul Substitutionseffekte:** Zeitpunkt Netto-Null; Ökobilanz der Holzprodukte (insbesondere Ausbau und Konstruktion)

Es konnten die folgenden zentralen Hebel identifiziert werden:

Hebel	Beeinflussbar durch...	Erläuterung
Anteil Nadelholz an der Ernte	Waldeigentümer	Durch eine verstärkte Nadelholznutzung und Förderung von Laubholz in der Verjüngung kann die CO ₂ -Wirkung erhöht werden. Laubholz bindet mehr CO ₂ .
Aufteilung der Sortimente	Waldeigentümer	Durch eine vermehrte stoffliche Verwertung des Holzes kann CO ₂ länger gespeichert werden.
Nutzungsverzicht und Totholz	Waldeigentümer	Temporäre Speicherung von CO ₂ , Totholz resp. Nutzungsverzichtsflächen werden irgendwann zu CO ₂ -Quellen.
Aufteilung der Holzernte und Exportanteil	Holzkäufer und -verarbeitende Industrie, Konsumenten	Verstärkte Verwendung in den Bereichen Konstruktion und Ausbau führt zu längerer Speicherung von Kohlenstoff. Starke Abhängigkeit vom Markt (Nachfrage) und von den inländischen Verarbeitungskapazitäten.
Kaskadennutzung	Wirtschaft, Konsumenten, Kanton	Mehrfache stoffliche Nutzung des Holzes vor der energetischen Nutzung führt zu positiven CO ₂ -Effekten.
Zeitpunkt Netto-Null	Politik / Kanton	Je früher Netto-Null erreicht wird, desto geringer fällt die CO ₂ -Wirkung des Aargauer Waldes aus. Konkurrenzprodukte holen auf und verursachen geringere Emissionen. Substitutionsnutzen zwischen den Produkten verringert sich.

Tabelle 27: Übersicht über die wichtigsten Hebel und Beeinflussbarkeit.

Zu den identifizierten Hebeln (Tabelle 27) sind folgende ergänzenden Bemerkungen wichtig:

- Die Effekte der Kaskadennutzung fallen teilweise erst spät an und können ihre Wirkung erst verzögert entfalten, da die Holzprodukte ihre jeweilige Verweildauer im System haben.
- Die Entwicklung innovativer Produkte und Prozesse in der Bioökonomie kann zur Förderung der stofflichen Nutzung von Holz beitragen. Die Verwendbarkeit des zukünftig vermehrt anfallenden Laubholzes ist von grosser Bedeutung für die Stärkung der Kaskadennutzung und somit auch für die CO₂-Senkenleistung.
- Totholz hat trotz Mineralisierung eine nicht zu unterschätzende Verweildauer im System. Mit ca. 17 Jahren ist die Verweildauer deutlich höher als kurzlebige Holzwarenprodukte mit Verweildauern von 3 Jahren, insofern keine Kaskadennutzung erfolgt. Totholz ist aus ökologischer Sicht sehr wichtig, stellt aber aus Sicht CO₂-Optimierung kein permanentes Lager dar. Der im Totholz gespeicherte Kohlenstoff wird durch die Mineralisierung schrittweise wieder freigesetzt.

Der Kanton setzt im Hinblick auf die CO₂-Optimierung der Waldbewirtschaftung folgende Instrumente ein:

- Anreize für die Förderung von Laubholz über die Jungwaldpflegevereinbarungen mit den Waldeigentümerinnen und Waldeigentümern
- Beratung und Information der Waldeigentümerinnen und Waldeigentümer
- Genehmigung der forstlichen Betriebsplanungen zur Sicherstellung einer nachhaltigen Holznutzung und zur Sicherung des CO₂-Lagers im Wald.
- Schaffung von günstigen Rahmenbedingungen für die Kaskadennutzung
- Förderung der Verwendung von nachhaltig produziertem Holz als Bau- und Werkstoff sowie als Energieträger bei der Planung und Errichtung sowie beim Betrieb eigener Bauten und Anlagen (vgl. § 26b AWaG).

5.5 Diskussion zu den Unterschieden zwischen Laub- und Nadelholz

Wie im Abschnitt Unsicherheiten (3.7) erläutert, unterscheidet der Modellaufbau in der Zuwachsfunktion keine Baumartengruppen. Gleichzeitig werden aber die unterschiedlichen Holzdichten und unterschiedlichen BEF zwischen den Baumartengruppen und damit die CO₂-Speicherung pro m³ Holz unterschieden und somit berücksichtigt (im Folgenden «Dichtever-schiebung» des Waldlagers). In den Sensitivitätsanalysen wurde erkannt, dass der Anteil Nadelholz in Zuwachs und Ernte einen bedeutenden Einfluss auf die Resultate des Modells hat (vgl. Kapitel 4.4 und 5.4).

Um abzuschätzen, in welcher Grössenordnung der berücksichtigte Effekt dieser Dichtever-schiebung ist, wurde für das Wald-Lager der drei Grundscenarien der Anteil der Zunahme im Lager ermittelt, der durch diesen Effekt bis im Jahr 2100 zustande kommt. Im Jahr 2100 sind 57% der Lagerzunahme der Verschiebung der Baumarten und ihrer unterschiedlichen Dichten und BEF geschuldet. Anders ausgedrückt: Das Kohlenstofflager der lebenden Biomasse vergrössert sich um 20%. 8.7% davon sind der volumenbasierten Zunahme in der Biomasse geschuldet (TfM). Die restlichen 11.3% (also 57% der 20%) entstehen aufgrund der Verschiebung von Nadelholz zu Laubholz. Die Verschiebung bewirkt eine Senkenleistung, da das Laubholz eine höhere Dichte hat und einen grösseren BEF. Interpretationen müssen unter Berücksichtigung dieser Limitierung in den Modellannahmen erfolgen.

5.6 Zielsetzungen gemäss kantonaler Wald- und Klimapolitik: Potenzielle Konflikte und Synergien mit einer CO₂-optimierten Waldbewirtschaftung

Im Bericht "waldentwicklungAARGAU" (BVU, 2007), im Richtplan des Kantons Aargau und in der Strategie umweltAARGAU (BVU, 2017) sind die Hauptausrichtungen der kantonalen Waldpolitik zusammengefasst:

Die Hauptausrichtung A konzentriert sich auf die Erhaltung und Aufwertung des Ökosystems Wald. Dies beinhaltet die naturnahe, multifunktionale Nutzung des Waldes und besondere Massnahmen zur Erhaltung der Artenvielfalt. Weitere Aspekte sind die Koordination von Schutz und Nutzung mit der Raumplanung, eine breitere finanzielle Unterstützung der Waldleistungen nach dem Nutzniessendenprinzip und verstärkte Bemühungen zur Vernetzung von Wald und offenem Land.

Die Hauptausrichtung B legt den Fokus auf die nachhaltige Nutzung von Holz, unter Berücksichtigung der Prinzipien der Nachhaltigkeit und des naturnahen Waldbaus. Es wird angestrebt, das Potenzial von etwa 400'000 m³ (EfM) nachwachsender Holzressourcen pro Jahr marktwirtschaftlich zu nutzen und eine höhere Wertschöpfung zu erzielen. Vielfältige Bestände, eine nachhaltige Waldverjüngung und die Orientierung an natürlichen Abläufen reduzieren die Risiken von abiotischen und biotischen Schäden. Solche Wälder sind auch weniger anfällig gegenüber Schadstoffeinträgen und Klimaänderungen. Der standortgerechten Baumartenwahl kommt daher eine grosse Bedeutung zu. Die Unterstützung der Waldeigentümerinnen und -eigentümer bei der Entwicklung zukunftsfähiger Betriebs- und Vermarktungsstrukturen ist ein Ziel, ebenso wie die Förderung des Laubholzanteils im Wald aus ökologischen Gründen. Die Jungwaldpflege wird als Investition in gesunde und wertvolle Wälder finanziell unterstützt. Bei Waldpflege- und Holzerntearbeiten wird der Waldboden geschont.

Die Hauptausrichtung C konzentriert sich darauf, Erholungs- und Freizeitaktivitäten im Wald zu lenken. Die gesellschaftlichen Ansprüche an den Wald bezüglich Freizeit- und Erholungsnutzung werden gleichwertig zur Waldökonomie und Waldökologie berücksichtigt. Freizeitnutzungen im Wald müssen grundsätzlich störungsarm sein. Intensivere Nutzungsformen sind auf geeignete Gebiete mit gezielten Lenkungsmassnahmen zu konzentrieren.

Die Ziele und Massnahmen der Klimastrategie des Kantons Aargau sind im Klimakompass sowie einem Massnahmenplan politikbereichsübergreifend aufgezeigt. Wald als Kohlenstoffspeicher bildet ein Handlungsfeld im Bereich der Klimaschutzmassnahmen. Dabei werden zwei Stossrichtungen verfolgt: 1. Wald nachhaltig erhalten und bezüglich CO₂-Aufnahme optimieren. 2. Holz als Bau- und Werkstoff sowie als Energieträger verwenden. Im Handlungsfeld klimaresilientes Waldmanagement (Bereich Massnahmen Klimaanpassung) werden drei Stossrichtungen verfolgt: 1. Waldbewirtschaftung und Baumartenwahl auf zukünftig erwartete Standortbedingungen ausrichten. 2. Synergien zwischen Wald als Lebens- und Erholungsraum identifizieren und Konflikte lösen. 3. Feucht- und Nasswälder fördern. Gemäss dem Massnahmenplan Klimaschutz werden aktuell sechs Projekte verfolgt (Massnahmenpakt zur Bewältigung von Waldschäden; Kühlwirkung des Waldes; Waldbrandpotenzial Aargau; Holznutzung, Nutzungsverzicht und Jungwaldpflege im Staatswald; Potenzialstudie Wiedervernässung von Wäldern; Nutzungsverzichtsflächen im Rahmen des Naturschutzprogramms Wald; Jungwaldpflege für stabile und anpassungsfähige Wälder).

Die Szenarien in der vorliegenden Modellierung wurden unter Berücksichtigung der erläuterten drei Hauptausrichtungen der Waldpolitik sowie den Zielsetzungen der Klimastrategie entwickelt.

Unabhängig vom betrachteten Szenario bestehen potenzielle Zielkonflikte und Synergiepotenziale – bspw. zwischen den Waldfunktionen: Erholung, Schutz vor Naturgefahren, Holzproduktion und Biodiversität. Im Hinblick auf eine CO₂-optimierte Waldbewirtschaftung sind mögliche

Auswirkungen in diesen Bereichen zu beachten. Die folgenden Annahmen in der modellierten CO₂-Optimierung sind dabei zentral.

- das Holznutzungspotenzial ist stark abhängig vom Zuwachs
- der Laubholzanteil im Wald nimmt zu
- die Nutzung von Energieholz direkt aus dem Wald geht zurück
- konsequente Kaskadennutzung kombiniert mit dem Verbau von langlebigen Holzprodukten führen zu einer Verbesserung in der stofflichen Nutzung

Im Folgenden wird auf zwei mögliche Zielkonflikte im Zusammenhang mit einer CO₂-optimierten Waldbewirtschaftung exemplarisch hingewiesen:

Zielkonflikt Energetische Nutzung vs. CO₂-Optimierung: Eine konsequente Umsetzung der Kaskadennutzung führt zu einer Verringerung des Sortiments Energieholz. Damit nimmt der Beitrag des Waldes im Bereich der erneuerbaren Energieträger ab. Dies könnte zu einer Abhängigkeit von anderen Energiequellen führen, die möglicherweise je nach Absenkpfad nicht so klimafreundlich sind wie Biomasse aus dem Wald. Idealerweise wird die Lücke jedoch durch die energetische Nutzung von Altholz gedeckt.

Synergie CO₂-Optimierung und Biodiversität: Die Umwandlung in einen von Laubbäumen dominierten Mischwald kann langfristig zur CO₂-Optimierung beitragen, da Laubbäume mehr CO₂ binden als Nadelbäume. Dies könnte in einem Szenario zu tragen kommen, bei welchem Nadelbäume bedingt durch den Klimawandel an Zuwachs verlieren, während die diverseren Laubbaumarten u.U. insg. weniger Zuwachsrückgang erleben. Gleichzeitig fördert ein vielfältiger Laubmischwald auch die Biodiversität und unterstützt den Erhalt verschiedener Tier- und Pflanzenarten.

6. Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Beantwortung der Leitfragen

Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass eine CO₂-optimierte Bewirtschaftung des Waldes die jährliche CO₂-Wirkung des Aargauer Waldes im Vergleich zu den anderen Szenarien erhöhen kann. In absoluten Zahlen ausgedrückt sehen die Werte für die Grundszenarien wie folgt aus:

- Basisszenario: +103 kt CO₂/Jahr (im Mittel; entspricht 2.5% der Emissionen des Kantons AG in einem Jahr)
- Energieszenario: +87 kt CO₂/Jahr (im Mittel; entspricht 2.2% der Emissionen des Kantons AG in einem Jahr)
- CO₂-optimiertes Szenario: +148 kt CO₂/Jahr (im Mittel; entspricht 3.7% der Emissionen des Kantons AG in einem Jahr)

Das Optimierungspotenzial des letztgenannten im Vergleich zu den beiden anderen Szenarien liegt also bei 1.2% oder 1.5% der jährlichen Emissionen im Kanton Aargau im Jahr 2021 (4.1 Mio. t CO₂, (Abteilung für Umwelt Aargau, 2022, S. 15)). Die Ergebnisse zeigen, dass durch CO₂-Optimierung im System Wald und Holz die jährliche CO₂-Wirkung des Waldes im Kanton Aargau im Vergleich mit den beiden anderen Szenarien erhöht werden kann. Vergleicht man die CO₂-Wirkung des CO₂-optimierten Szenarios direkt mit derjenigen der anderen beiden Szenarien, ist sie im Vergleich zum Basisszenario um knapp 30% und im Vergleich zum Energieszenario um gut 41% höher. Wir beurteilen diesen Effekt der CO₂-Optimierung im Bereich Wald und Holz beispielsweise im Vergleich zu den angestrebten Absenkpfeilen anderer Sektoren in

der Langfristigen Klimastrategie der Schweiz (Bundesrat, 2021) als klein. Dies verdeutlicht ein exemplarischer Vergleich mit den Grossemittenten des Kantons, den beiden Zementproduzenten im Kanton Aargau (emittieren jährlich das 6 bis 9-fache der mittleren positiven CO₂-Wirkung des Aargauer Waldes, je nach Szenario²³), oder dem Landwirtschaftssektor (emittieren jährlich das 4 bis 6-fache der mittleren positiven CO₂-Wirkung des Aargauer Waldes, je nach Szenario).

Dennoch weist das System Wald und Holz nebst der positiven Senkenleistung auch ein bedeutendes Lager auf; dieses beläuft sich im Jahr 2100 auf 47 Mio. t CO₂. Dieses Lager ist zwar auch bei einem zukünftig reduzierten Zuwachs voraussichtlich weiterhin eine Senke, als potenzielle Quelle aber bemerkenswert. So entspricht das CO₂-Lager im Aargauer Wald (Grundszenario Basis, im Jahr 2100) ziemlich genau der heutigen jährlichen inländischen Gesamtemissionen der Schweiz. Es ist bedeutend, dafür zu sorgen, dass er nicht zur Quelle wird, durch Störereignisse, zu stark reduziertem Zuwachs oder Übernutzung. Des Weiteren ist zu beachten, dass heute gering erscheinende Senkeneffekte im einstelligen Prozentbereich vor dem Hintergrund der Absenkpfade an Bedeutung gewinnen können: Folgt die Schweiz einem globalen Emissionspfad, der mit einer Erwärmung um 1,5°C kompatibel ist (Bundesrat, 2021), dürfte sich der prozentuale Wert der Senkenwirkung des Aargauer Waldes bis in zehn Jahren verdoppelt haben (die heutigen 3.7% des CO₂-optimierten Szenarios betragen dann schätzungsweise 7.4%). Ausserdem sind Senkenpotenziale vor folgendem Hintergrund wichtig: Nicht alle Emissionen werden sich zukünftig vermeiden lassen. Die positive CO₂-Wirkung des Aargauer Waldes kann dazu beitragen, die auch zukünftig nicht vermeidbaren Emissionen auszugleichen.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse des Modells verdeutlichen die positive CO₂-Gesamtwirkung der Waldbewirtschaftung und der Holzwertschöpfungskette im Kanton Aargau. Diese können einen Beitrag beim Ausgleich der Gesamtemissionen des Kantons leisten. Eine nachhaltige Bewirtschaftung des Waldes, die Förderung der Holzverwendung und die Optimierung der stofflichen Nutzung des Holzes (Kaskadennutzung) sind entscheidende Schritte, um die Senkeneffekte weiter zu verbessern und einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass das Modell sich als hilfreiches Instrument für die Analyse unterschiedlicher zukünftiger Entwicklungen und zur Beantwortung von Managementfragen erwiesen hat.

Den Autorinnen sind wenige vergleichbaren Studien zur CO₂-Wirkung des schweizerischen Waldes – oder Teilen davon – bekannt, wichtig scheint aber ein Vergleich mit den Schlussfolgerungen und Empfehlungen gemäss Taverna et al. (2007). Deren Folgerungen für die gesamte Schweiz ergänzen wir hier mit den gewonnenen Aargau-spezifischen und neueren Erkenntnissen:

1. Erzeugung eines möglichst grossen, aber nachhaltigen Zuwachses im Wald.

Der Zuwachs ist auch in diesem Modell eine zentrale Grösse, wie insbesondere das Zusatzszenario Reduzierter Zuwachs aufzeigt. Gemäss den berücksichtigten Datengrundlagen ist ein hoher Zuwachs allerdings auch bei relativ hohen Vorräten noch zu erwarten, was einen gewissen Spielraum für Vorratzzunahme andeutet (in den Ergebnissen deutlich erkennbar in den Nutzungsverzichtsflächen).

2. Abschöpfung dieses Zuwachses durch Holzernte.

23 Errechnet mit den absoluten Werten, beispielweise 103 t im Grundszenario Basis

Der grösste Spielraum für die Optimierung der Senkeneffekte ergab sich gemäss Modell im Modul Holz und durch die angepasste Ernte (Sortimentsverteilung; möglichst hoher Anteil Stamm- und Industrieholz). Eine Abschöpfung des Zuwachses ist dafür die Voraussetzung (wurde nicht durch Varianten weiter getestet).

3. Verarbeitung des geernteten Holzes in einer Kaskadennutzung.

Gemäss den Modellergebnissen ist die Kaskadennutzung, zusammen mit Verschiebungen in den Sortimenten hin zu Produkten mit einer langen Verweildauer, der wichtigste Hebel für die Optimierung der Senkeneffekte. Diese Verschiebung ist zu einem grossen Teil abhängig von Annahmen zur Verwertbarkeit der zukünftigen Ernten (mit erhöhtem Laubholzanteil) für hochwertige Anwendungen von langer Lebensdauer.

4. Energetische Endnutzung des nicht mehr weiter verwendbaren Rest- und Altholzes.

Energetische Endnutzung erzeugt einen Substitutionseffekt, dieser spielt allerdings bei konsequenter Anwendung der Kaskadennutzung und der Annahme einer Erreichung von Netto-Null bis 2050 eine untergeordnete Rolle.²⁴

Mögliche Modellanpassungen

Des Weiteren kämen einige interessante Modellanpassungen oder -erweiterungen u.a. in folgenden Bereichen in Frage:

- Den Zuwachs nachträglich noch separat auf Laubholz und Nadelholz aufteilen (technische Machbarkeit noch nicht abgeklärt), wodurch 1) eine baumartenspezifische Parametrisierung für den reduzierten Zuwachs im Klimawandel möglich wird und 2) der Effekt der CO₂-Speicherung durch die Verschiebung von Nadelholz zu Laubholz im Wald klarer abgebildet werden könnte.
- Die Speicherwirkung der Energie könnte rausgerechnet werden, wodurch ein reduzierter Senkeneffekt von ca. 2 - 8% je nach Szenario zu erwarten ist. Ob dies sinnvoll ist, ist abhängig davon, welche weiteren Vergleiche gezogen und welche Schlüsselbotschaften kommuniziert werden sollen (vgl. hierzu Ausführungen in Kapitel 3.7, Modul Holz).

Antworten zu den Leitfragen

CO₂-Wirkung der drei Szenarien im Vergleich zu den Gesamtemissionen des Kantons Aargau:

Die Ergebnisse der drei Szenarien zeigen alle eine positive CO₂-Gesamtwirkung, wie in Tabelle 28 ersichtlich. Die Szenarien weisen also im Vergleich zu den Gesamtemissionen einen Beitrag zum Ausgleich von CO₂-Emissionen auf. Die Senkeneffekte durch die Waldbewirtschaftung und die Holzwertschöpfungskette tragen dazu bei, einen kleinen Teil der jährlichen Gesamtemissionen des Kantons Aargau auszugleichen (2.2 – 3.7%). Das CO₂-optimierte Szenario (3.7%) ist dabei wesentlich besser als die anderen untersuchten Szenarien (Energie 2.2%, Basis 2.5%). Die Gesamtwirkung ist allerdings durch einen klimawandelbedingten Zuwachsrückgang in Frage gestellt (Rückgang der Wirkung von 15 – 21%), der Aargauer Wald wird gemäss der modellierten Zuwachsreduktion aber voraussichtlich auch in diesem Fall weiterhin eine Senke darstellen (vgl. zweite Zeile Tabelle 28). Sollte die anrechenbare Senkenwirkung des Aargauer Waldes in voller Übereinstimmung mit klimapolitischen Richtlinien berechnet

²⁴ Bemerkung: Das Energieszenario ist nur bedingt mit dem Energieszenario von Taverna et al. (2007) vergleichbar. Im Vergleich zur Studie von Taverna et al. (2007) nimmt das vorliegende Modell an, dass die zukünftigen Ernten nicht anhand von Nutzungs-Zielvorgaben abrupt gesteigert werden und eine erhöhte energetische Nutzung deshalb zu einem Grossteil eine reduzierte Nutzungsmöglichkeit in anderen Verwendungen (Bau) zur Folge hat.

werden, fällt der Beitrag des Aargauer Waldes an Netto-0 geringer aus (vgl. Ausführungen in der Fussnote 1).

Szenarien	Basis	Energie	CO ₂ -optimiert
<i>kumuliert</i>	Total [kt CO₂eq]		
Grundscenario	7'751	6'501	11'094
Zusatzszenario: Klimawandelbedingter reduzierter Zuwachs	6'270	5'122	9'384

Tabelle 28 Resultate aller drei Grundscenarien und aller drei Zusatzscenarien; Basis-, Energie- und CO₂-optimiertes Szenario. Ausgewiesen ist die kumulierte Gesamtwirkung bis 2100.

Vergleich der CO₂-Wirkung der Waldbewirtschaftung mit der Holzverwendung:

Der Vergleich der CO₂-Wirkung der Waldbewirtschaftung mit der nachgelagerten Holzverwendung in den Grundscenarien zeigt eindeutig, dass das Modul Wald einen grossen Anteil am gesamten Senkeneffekt im Vergleich zu den anderen Modulen ausmacht (42 – 73% der Gesamtsenke aller drei Module). Wie in den Abschnitten 4.2.1 und 4.3.1 erwähnt, dominieren beim Wald die Senkeneffekte durch die lebende Biomasse, wofür mehrheitlich die Nutzungsverzichtsfläche verantwortlich ist (vgl. auch Abbildung 10). Die Handlungsmöglichkeiten sind im Modul Holz – zumindest bzgl. der Modellvariablen – grösser als im Modul Wald (Senkeneffekt im Holzmodul ist im CO₂-optimierten Szenario ca. 20-fach höher als im Energieszenario). Nichtsdestotrotz: Die nachhaltige Bewirtschaftung des Waldes führt zu einer Kohlenstoffbindung und wirkt sich positiv auf die CO₂-Bilanz aus. Sie stellt ausserdem sicher, dass der Einsatz von Holz in nachgelagerten Prozessen zusätzliche Senkenleistungen erbringen kann.

Maximaler Anteil Aargauer Holz an den Holzneubauten im Kanton (Kapazitätsgrenze):

Die nachhaltige Bewirtschaftung des Waldes spielt eine entscheidende Rolle bei der Sicherstellung einer ausreichenden Holzversorgung für die weiterverarbeitenden Sektoren. Die Kapazitätsgrenze, um für Holzneubauten im Kanton Aargauer Holz zu verwenden, wird in erster Linie durch das waldseitige Angebot bestimmt, welches durch die Verteilung auf andere Verwendungen in der Weiterverarbeitung noch reduziert wird (u.a. Verarbeitungskapazitäten und Exporte). Durch die angenommene CO₂-Optimierung kann der maximale Anteil Aargauer Holz an den Neubauten von heute 30% bis auf ein Maximum von 59% angehoben werden. Unter der Annahme, dass für ein Mehrfamilienhaus ca. 780 t Holz benötigt wird (Holzbau Plus), entspricht dies einer Zunahme von knapp 35 auf 68 Mehrfamilienhäuser in Holzbauweise. Heute wird ein Grossteil des verbauten Holzes von ausserhalb des Kantons eingeführt, wodurch längere Transportwege und weniger Kontrolle zu den Anbaubedingungen in Kauf genommen werden.

Optimierung der stofflichen Nutzung des Holzes (Kaskadennutzung):

Die Optimierung der stofflichen Nutzung des Holzes durch die Kaskadennutzung zeigt vielversprechende Ergebnisse. Durch eine solche Mehrfach-Nutzung des Holzes in verschiedenen Anwendungsgebieten kann der Anteil von Energieholz direkt aus dem Wald reduziert und die Gesamtwirkung positiv beeinflusst werden. Eine entsprechende Sortimentsverteilung ist unter realistischen Annahmen möglich und ermöglicht eine optimale Verwendung des Holzes, indem es zuerst für hochwertige Produkte und Anwendungen eingesetzt wird, bevor es schliesslich als Energieholz verwendet wird. Dies bedingt aber eine entsprechende Nachfrage in der Holzverarbeitung, welche durch eine Förderung der stofflichen Verarbeitung von Holz bei Bauten und Anlagen erreicht werden kann.

7. Literaturverzeichnis

- Abteilung für Umwelt Aargau (2022), *Wie kann das «Netto-Null»-Ziel bis 2050 für Grosse mit-tenten im Industriesektor erreicht werden?* Umwelt Aargau Nr. 88, S. 15-18
- Bundesrat (2021): *Langfristige Klimastrategie der Schweiz*. Bern. 64. S.
- Bundesamt für Umwelt (2015): *Waldbericht 2015*. Umweltzustand. Bern
- Bundesamt für Umwelt (2021): *Jahrbuch Wald und Holz 2021*. Umweltzustand. Bern
- Bundesamt für Umwelt (2023): *Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2021: National Inventory Document and reporting tables (CRF)*. Submission of April 2023 under the United Nations Framework Convention on Climate Change. Federal Office for the Environment, Bern.
- Bundesamt für Umwelt, Thürig, E., & Schmid, S. (2008): *Jährliche CO₂-Flüsse im Wald: Be-rechnungsmethode für das Treibhausgasinventar*. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 159(2), Bern, 31-38.
- Bundesamt für Umwelt (2023): *Kenngrossen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Schweiz 1990–2021*, Bern
- Bütler, R., Lachat, T., & Schlaepfer, R. (2005): *Grundlagen für eine Alt- und Totholzstrategie der Schweiz*. Lausanne, Switzerland: Laboratorium für Ökosystemmanagement (GECOS).
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt des Kanton Aargau (2007): *Bericht zur Entwicklung des Waldes im Aargau, waldentwicklungAARGAU*. Aarau: Departement Bau, Verkehr und Um-welt, Abteilung Wald. 78 p
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt des Kanton Aargau (2015): *Energiestrategie Kanton Aargau – energieAARGAU*. Aarau: Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Wald. 68 p
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt des Kanton Aargau (2018): *Zustand und Entwicklung des Aargauer Waldes. Ergebnisse der 2. Aargauer Waldinventur 2016*. Aarau: Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Wald. 128 p
- Departement Bau, Verkehr und Umwelt des Kanton Aargau (2021): *Klimastrategie Teil I – Kli-makompass*. Aarau: Regierungsrat des Kantons Aargau. 55 p
- Flühmann C., Laggner L., Näher T., Neubauer-Letsch B., (2020): *Holzverbrauch 2018 - Datenbericht*, Berner Fachhochschule, Institut für digitale Bau- und Holzwirtschaft IDBH, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU Abteilung Wald
- Gauch, M., Matasci, C., Hincapié, I., Hörler, R., & Böni, H. (2016): *Material- und Energieres-sourcen sowie Umweltauswirkungen der baulichen Infrastruktur der Schweiz*. (Projekt MatCH, Report No.: 21033). Empa - Materials Science & Technology.
- Harauk, O., Kurz, W.A. & Didion, M. (2020): *Dynamics of dead wood decay in Swiss forests*. For. Ecosyst. 7, 36
- Huber, N. H. (2021): *Stand-scale climate change impacts on forests over large areas: transient responses and projection uncertainties*. Ecological Applications, S. 4 & 8.
- Klingler, M., Savi D. und Doka G. (2021): *Harmonisierte Ökobilanzen der Entsorgung von Bau-stoffen - Für die Liste der Ökobilanzdaten im Baubereich*.

Matasci, C., Gauch, M., & Böni, H. (2019): *Material- und Energieflüsse der schweizerischen Volkswirtschaft. Mit Bewertung der Umweltbelastungen (Projekt MatCH – Synthese)*. St. Gallen: Empa

Pretzsch, H. (2019): *Grundlagen der Waldwachstumsforschung*. Springer-Verlag.

Savi, D. und Klingler M. (2022): *Kohlenstoffspeicherung im Holzbau: Potenzial des Gebäudeparks in der Schweiz*. Hrsg: Stadt Zürich

Taverna R., Hofer P., Werner F., Kaufmann E., Thürig E. (2007): *CO2-Effekte der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft. Szenarien zukünftiger Beiträge zum Klimaschutz*. Umwelt-Wissen Nr. 0739.

8. Anhang

A1 Lager

A1.1 Im Grundszenario Basis

Die folgende Abbildung 19 zeigt, wie viel CO₂ in den Lagern der Module Holz und Wald gespeichert ist.

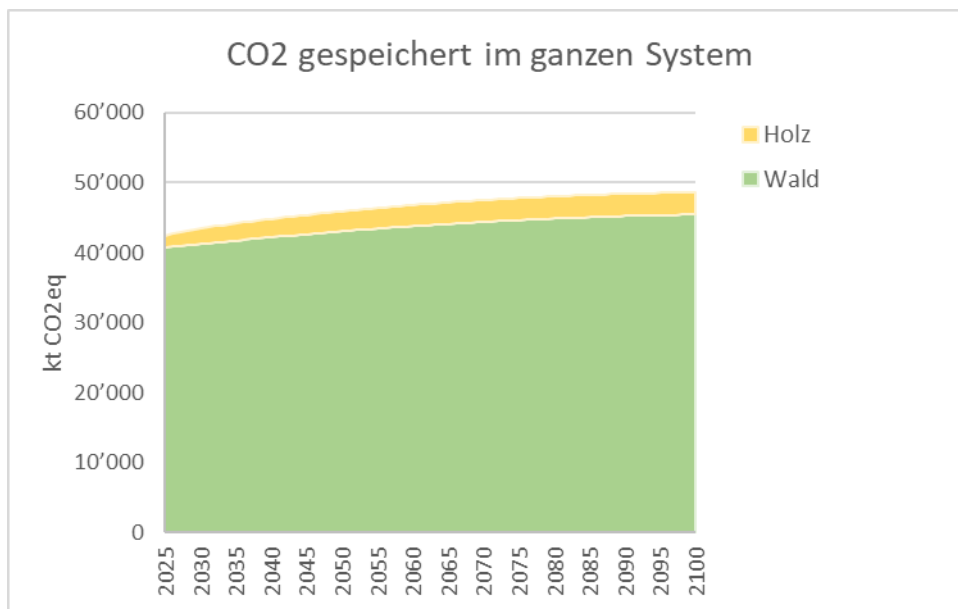


Abbildung 19 Lager im Grundszenario Basis Module Wald und Holz

In der folgenden Abbildung 20 ist das Lager des Moduls Wald abgebildet. Es ist erkennbar, dass sich das Waldboden-Lager nicht ändert, es entsteht da also keine Senke. Die Lager der lebenden Biomasse und des Totholzes nehmen zu.

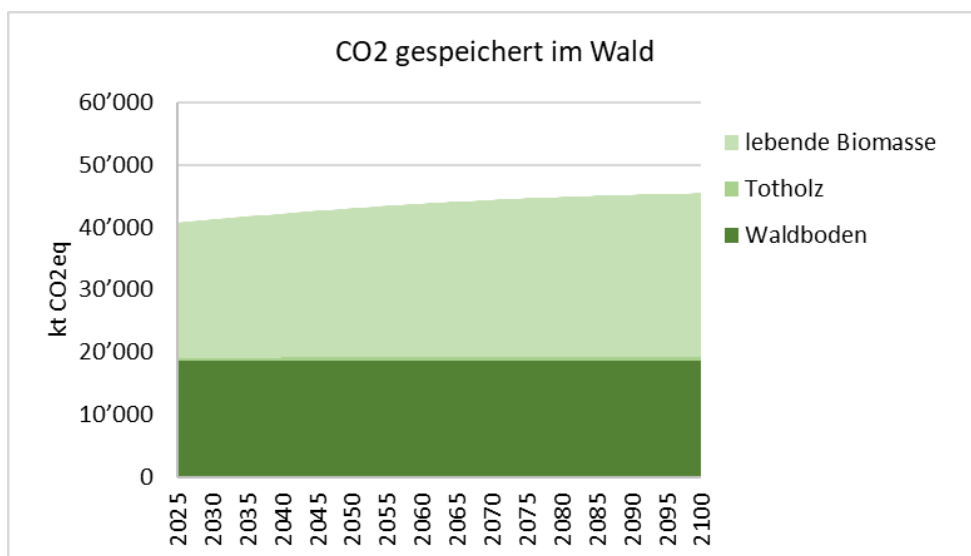


Abbildung 20 Lager im Grundszenario Basis Modul Wald

Das Holz-Lager, in Abbildung 21 dargestellt, nimmt über die 75 Jahre von 1.7 Mio. t CO₂ auf 3.1 Mio. t CO₂ zu. Die Entwicklungen der Lager werden im Kapitel 4.1.1 anhand der Entwicklung der Senken diskutiert.

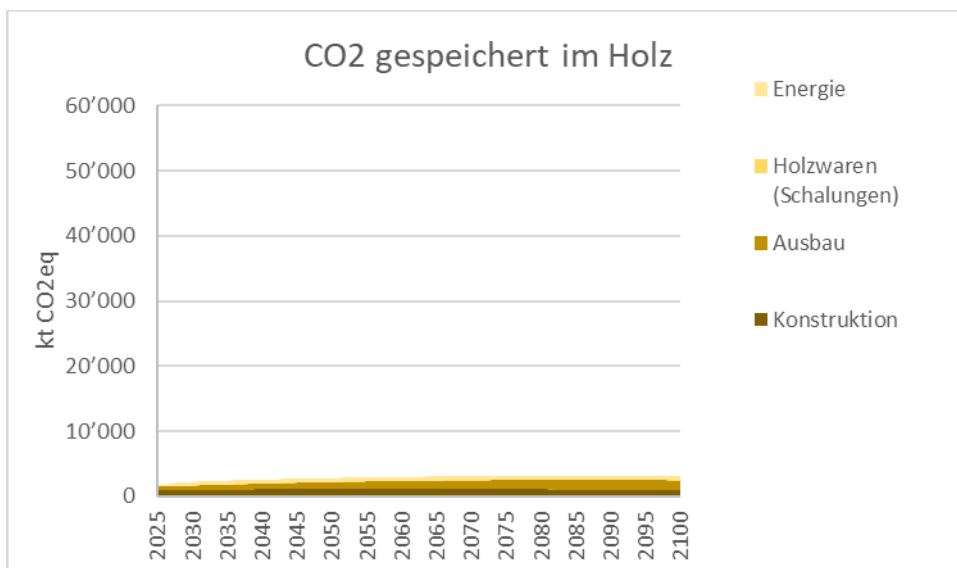


Abbildung 21 Lager im Grundszenario Basis Modul Holz

In Abbildung 22 ist ersichtlich, wie sich im Grundszenario Basis das Lager der lebenden Biomasse bezüglich Ertragsklassen und Nadel-/Laubholz zusammensetzt. Die blauen Linien bezeichnen die Lager des Nadelholzes, die grünen Linien die Lager des Laubholzes.

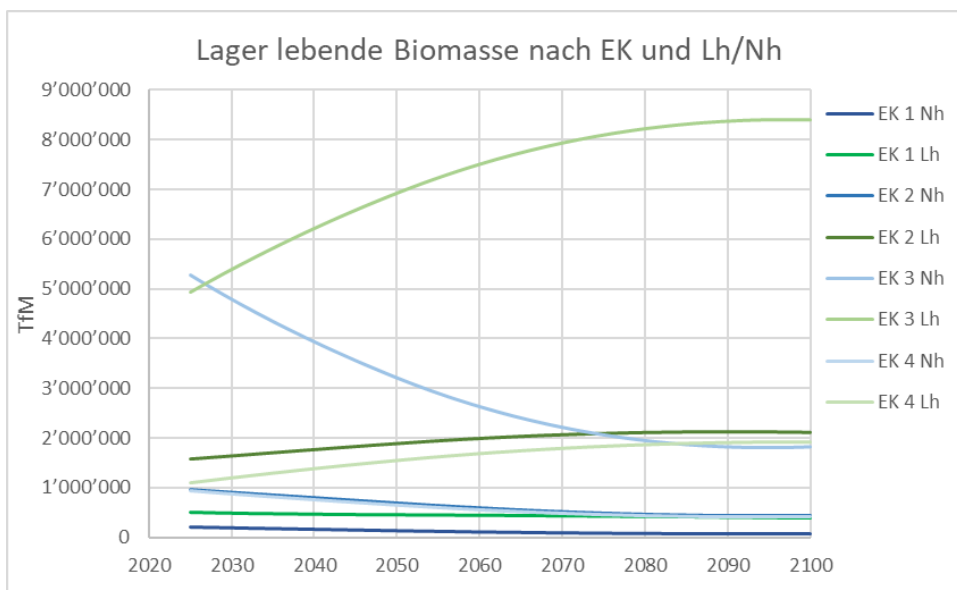


Abbildung 22 Lager lebende Biomasse Grundszenario Basis nach EK und Lh/Nh

A1.2 Im Grundszenario Energie

Die Abbildung 23 zeigt, wie viel CO₂ in den Lagern der Module Holz und Wald gespeichert ist.

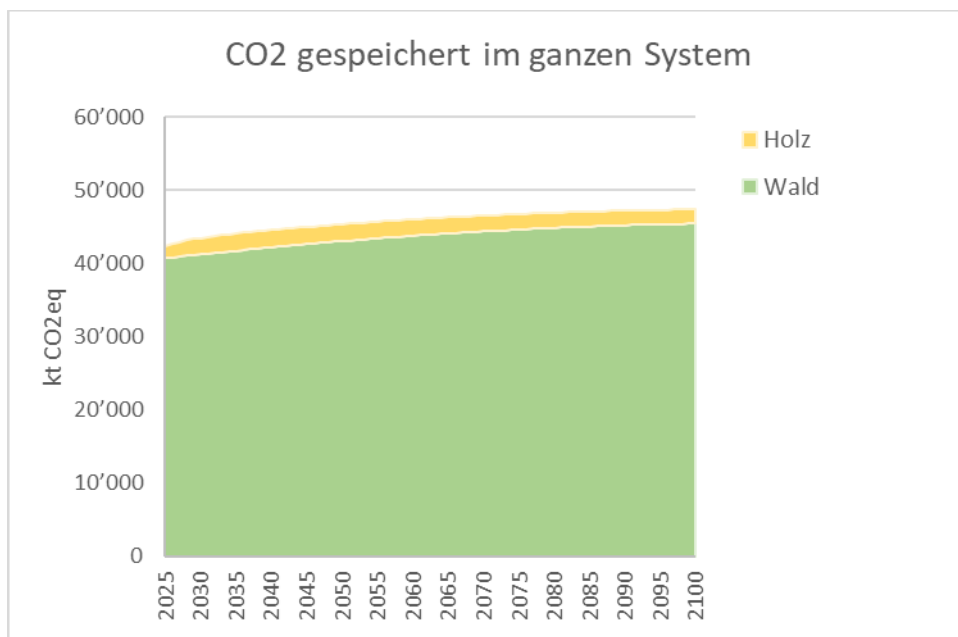


Abbildung 23 Lager im Grundszenario Energie Module Wald und Holz

In Abbildung 24 ist das Lager des Moduls Wald abgebildet. Es ist erkennbar, dass sich das Waldboden-Lager nicht ändert, es entsteht da also keine Senke. Die Lager der lebenden Biomasse und des Totholzes nehmen zu.

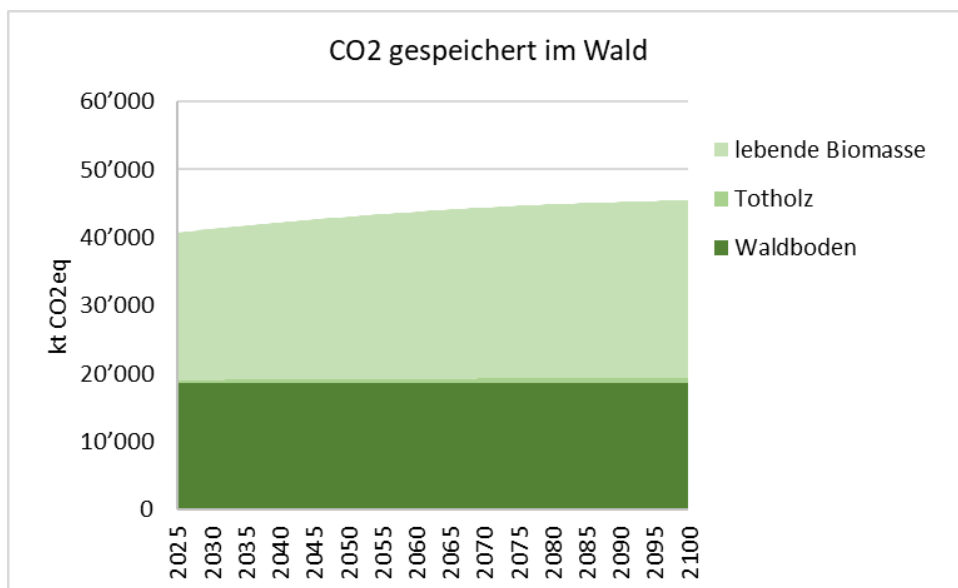


Abbildung 24 Lager im Grundszenario Energie Modul Wald

Das Holz-Lager, in Abbildung 25 dargestellt, nimmt über die 75 Jahre von 1.7 Mio. t CO₂ auf 2.3 Mio. t CO₂ zu und schliesslich per 2100 wieder auf 1.9 Mio. t CO₂ ab. Die Entwicklungen der Lager werden im Kapitel 4.2.1 anhand der Entwicklung der Senken diskutiert.

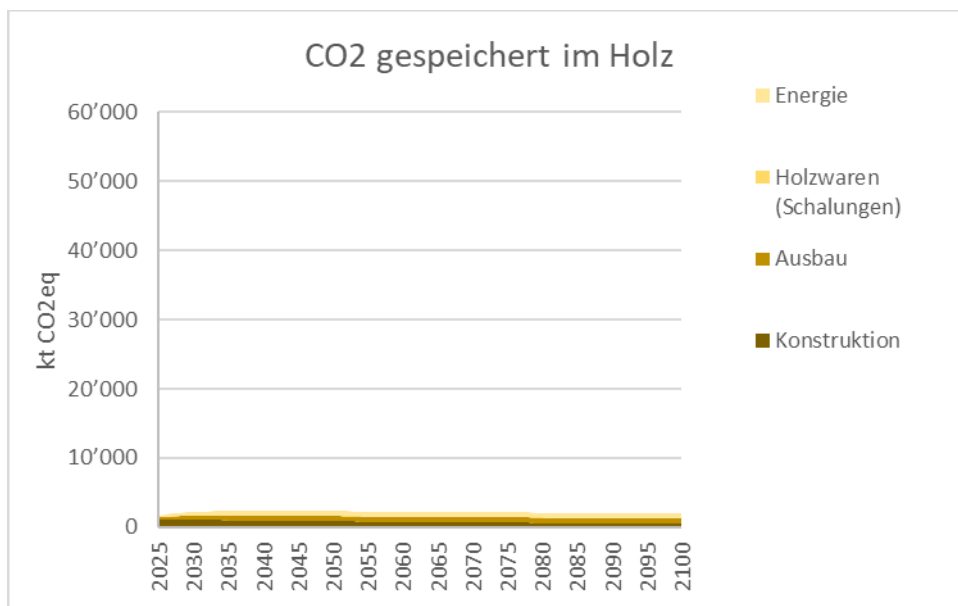


Abbildung 25 Lager im Grundszenario Energie Modul Holz

Abbildung 26 zeigt, wie sich im Grundszenario Energie das Lager der lebenden Biomasse bezüglich Ertragsklassen und Nadel-/Laubholz zusammensetzt. Die blauen Linien bezeichnen die Lager des Nadelholzes, die grünen Linien die Lager des Laubholzes.

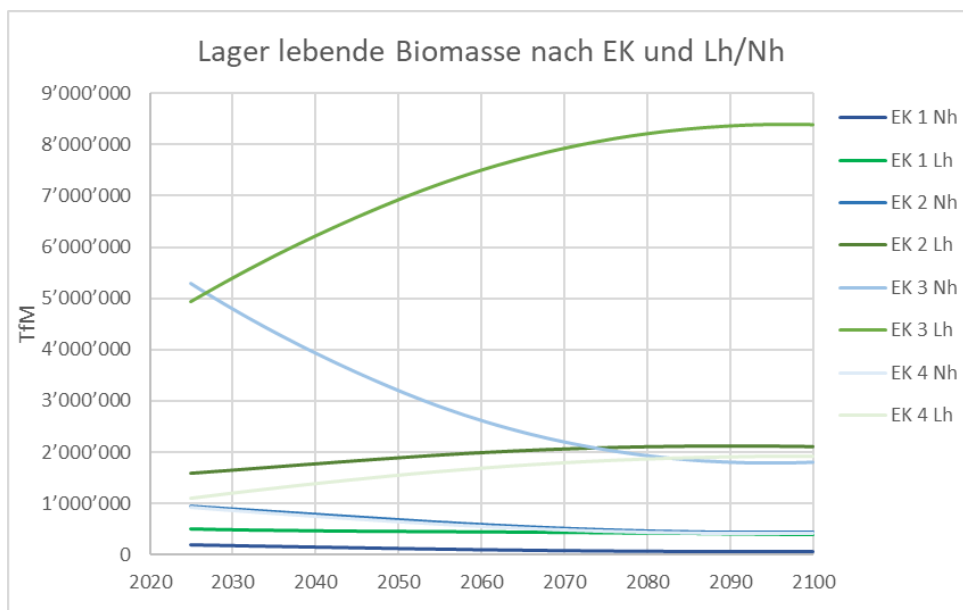


Abbildung 26 Lager lebende Biomasse Grundszenario Energie nach EK und Lh/Nh

A1.3 Im Grundszenario CO₂-optimiert

Abbildung 27 stellt dar, wie viel CO₂ in den Lagern der Module Holz und Wald gespeichert ist.

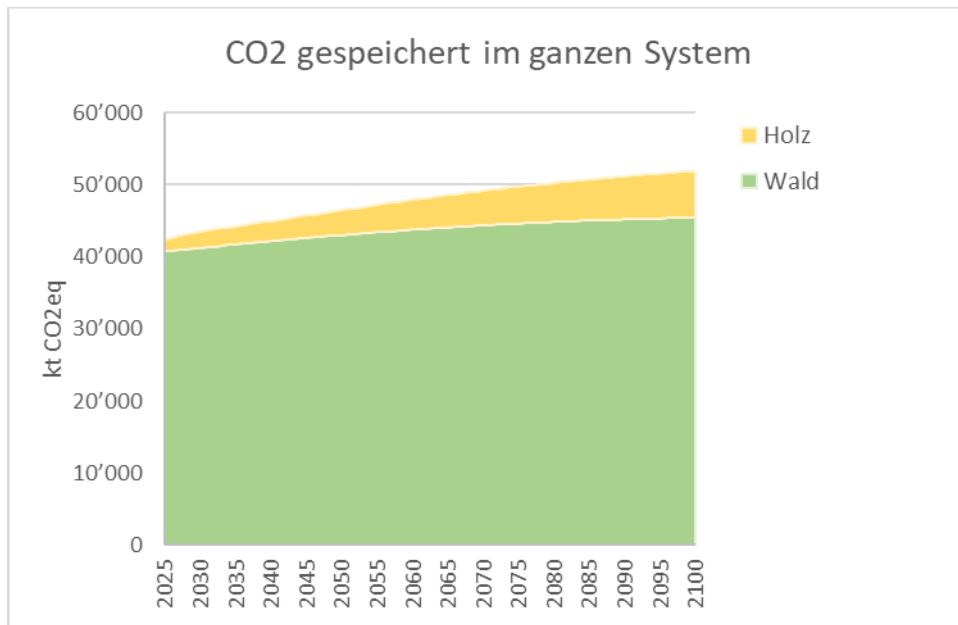


Abbildung 27 Lager im Grundszenario CO₂-optimiert Module Wald und Holz

In der folgenden Abbildung 28 ist das Lager des Moduls Wald abgebildet. Es ist erkennbar, dass sich das Waldboden-Lager nicht ändert, es entsteht da also keine Senke. Die Lager der lebenden Biomasse und des Totholzes nehmen zu.

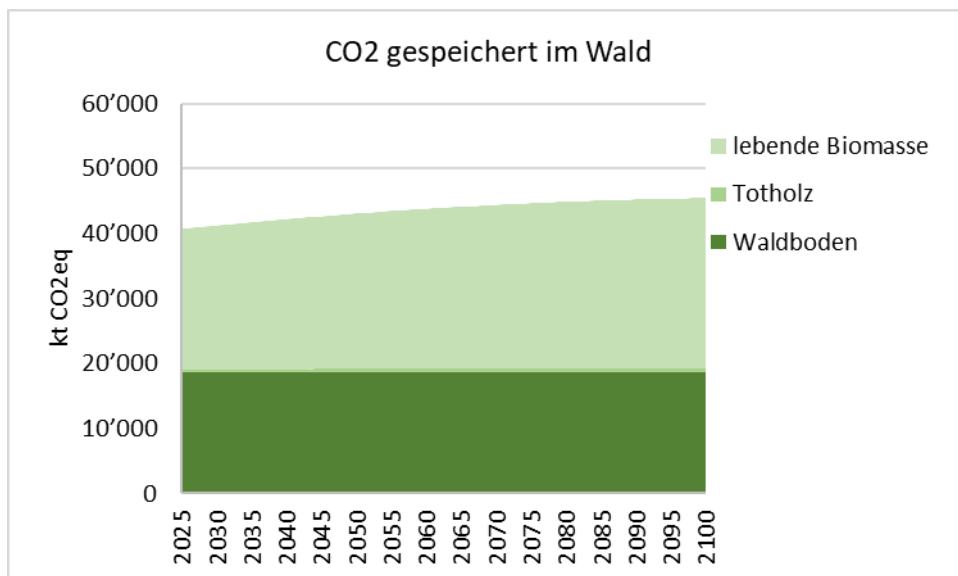


Abbildung 28 Lager im Grundszenario CO₂-optimiert Modul Wald

Das Holz-Lager, in Abbildung 29 dargestellt, nimmt über die 75 Jahre von 1.7 Mio. t CO₂ auf 6.5 Mio. t CO₂ zu. Die Entwicklungen der Lager werden im Kapitel 4.3.1 anhand der Entwicklung der Senken diskutiert.

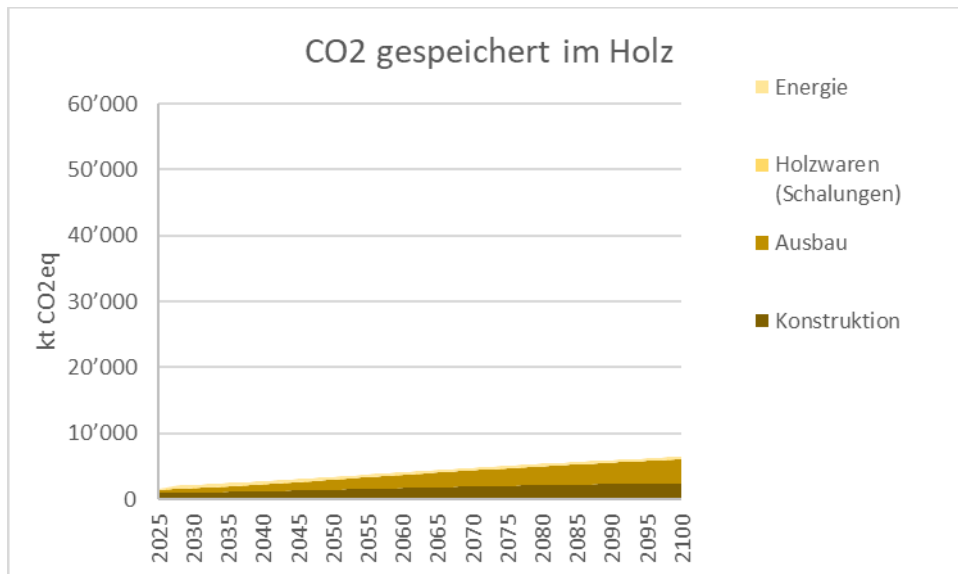


Abbildung 29 Lager im Grundszenario CO₂-optimiert Modul Holz

In Abbildung 30 ist ersichtlich, wie sich im Grundszenario CO₂-optimiert das Lager der lebenden Biomasse bezüglich Ertragsklassen und Nadel-/Laubholz zusammensetzt. Die blauen Linien bezeichnen die Lager des Nadelholzes, die grünen Linien die Lager des Laubholzes.

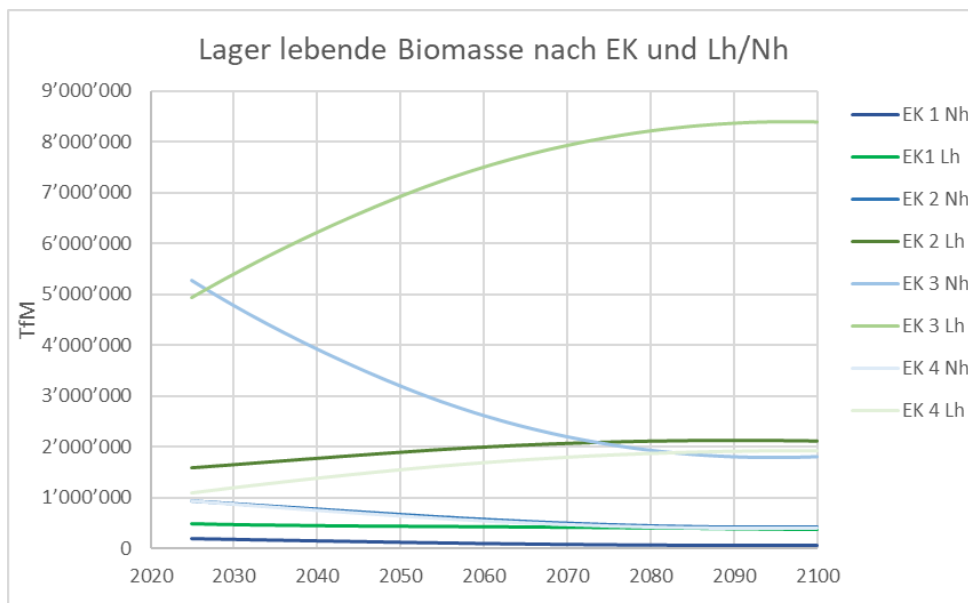


Abbildung 30 Lager lebende Biomasse Grundszenario CO₂-optimiert nach EK und Lh/Nh

A1.4 Im Zusatzscenario "Reduzierter Zuwachs" Basis

Die Abbildung 31 zeigt, wie viel CO₂ in den Lagern der Module Holz und Wald gespeichert ist. Die Lager nehmen am Anfang zu, in den letzten 13 Jahren des Szenarios ab. Das Ausmass unterscheidet sich je nach Lager. Der Grund für das Verhalten ist der Rückgang in der Nadelholzernte und dass v.a. Nadelholz in den Produkten landet.

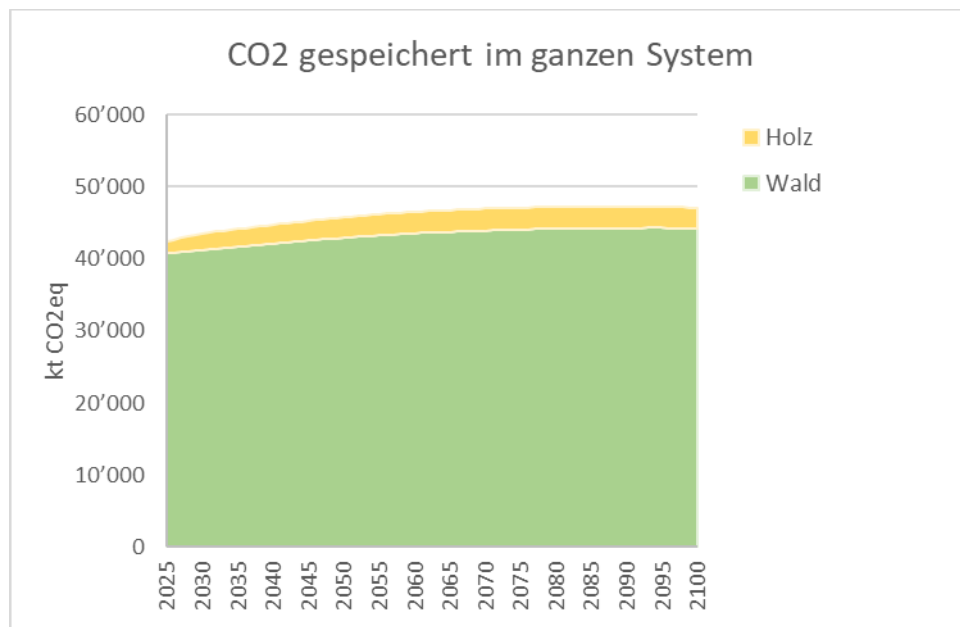


Abbildung 31 Lager im Zusatzscenario Basis Module Wald und Holz

In der Abbildung 32 ist das Lager des Moduls Wald abgebildet. Es ist erkennbar, dass sich das Waldboden-Lager nicht ändert, es entsteht da also keine Senke. Die Lager der lebenden Biomasse und des Totholzes nehmen zu.

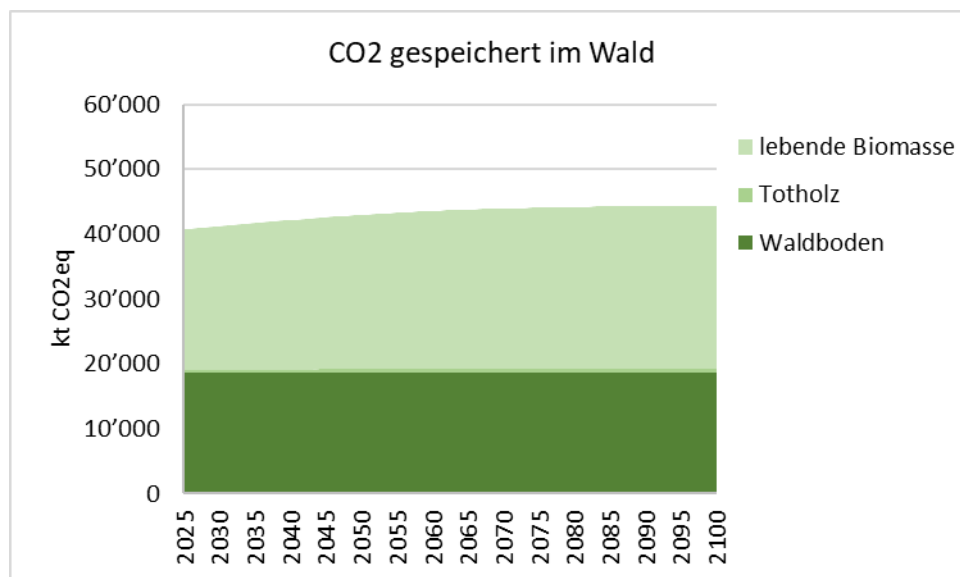


Abbildung 32 Lager im Zusatzscenario Basis Modul Wald

Das Holz-Lager, in Abbildung 33 dargestellt, nimmt über die 75 Jahre von 1.7 Mio. t CO₂ auf 3 Mio. t CO₂ zu und per 2100 wieder auf 2.8 Mio. t CO₂ ab. Die Entwicklungen der Lager werden im Kapitel 4.5.1 anhand der Entwicklung der Senken diskutiert.

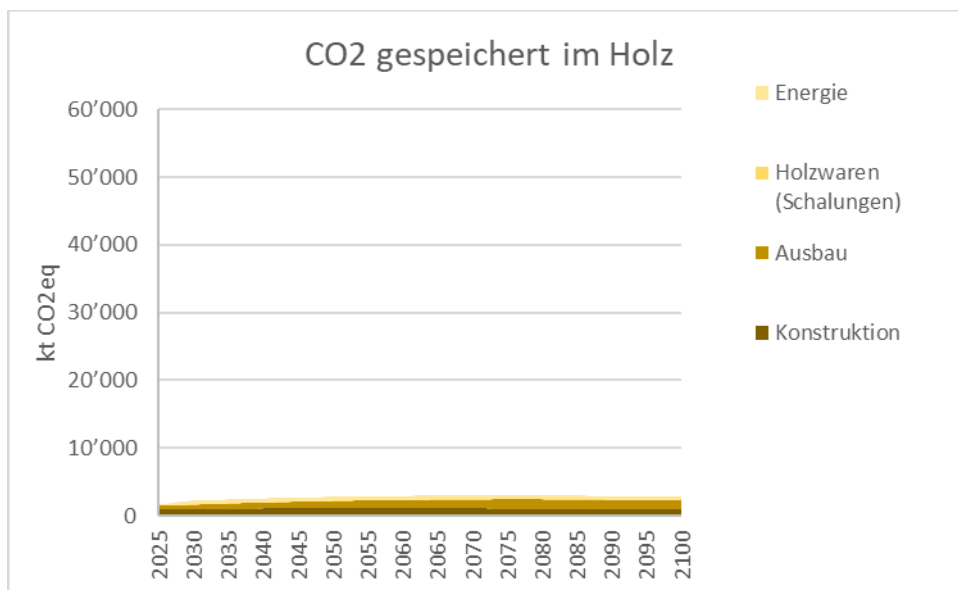


Abbildung 33 Lager im Zusatzscenario Basis Modul Holz

A1.5 Im Zusatzscenario "Reduzierter Zuwachs" Energie

Abbildung 34 zeigt, wie viel CO₂ in den Lagern der Module Holz und Wald gespeichert ist.

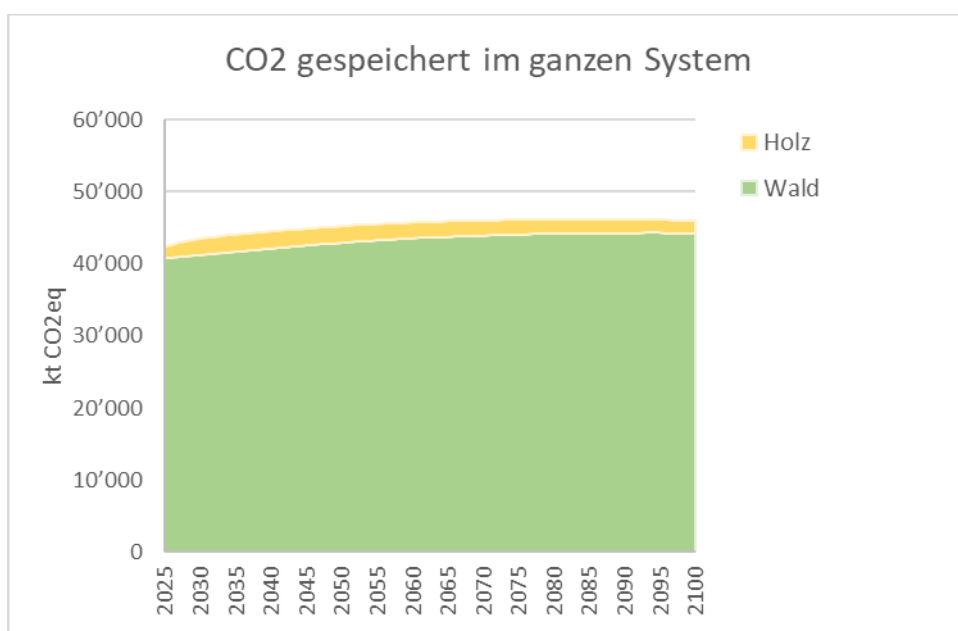


Abbildung 34 Lager im Zusatzscenario Energie Module Wald und Holz

In der Abbildung 35 ist das Lager des Moduls Wald abgebildet. Es ist erkennbar, dass sich das Waldboden-Lager nicht ändert, es entsteht da also keine Senke. Die Lager der lebenden Biomasse und des Totholzes nehmen zu.

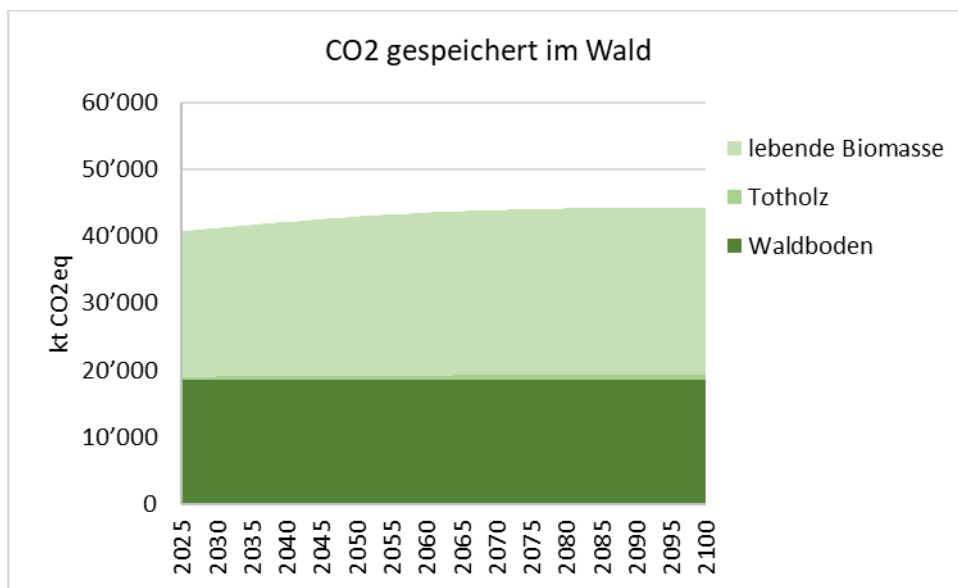


Abbildung 35 Lager im Zusatzszenario Energie Modul Wald

Das Holz-Lager, in Abbildung 36 dargestellt, nimmt über die 75 Jahre von 1.7 Mio. t CO₂ auf 2.3 Mio. t CO₂ zu und per 2100 wieder auf 1.7 Mio. t CO₂ ab. Die Entwicklungen der Lager werden im Kapitel 4.5.2 anhand der Entwicklung der Senken diskutiert.

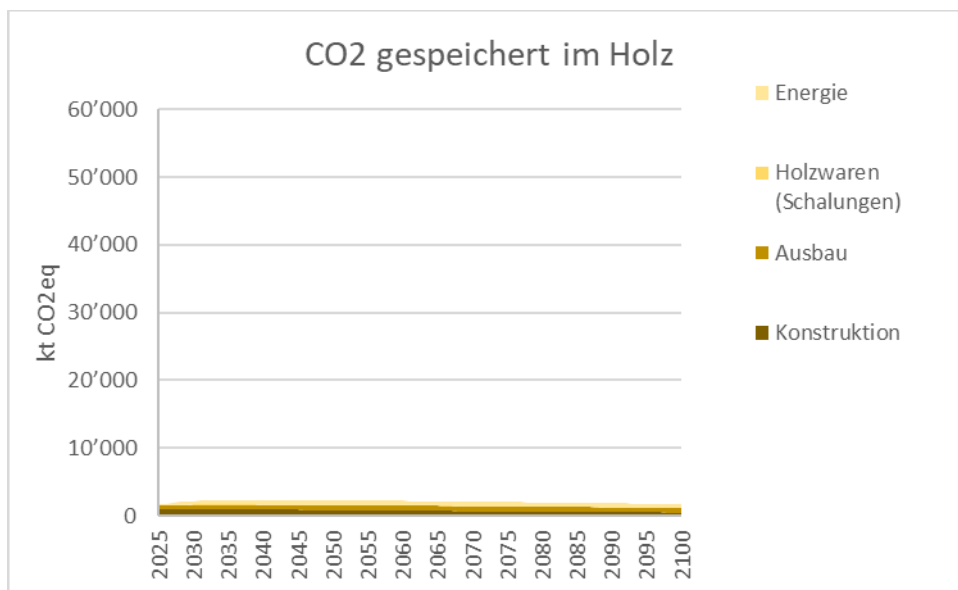


Abbildung 36 Lager im Zusatzszenario Energie Modul Holz

A1.6 Im Zusatzscenario "Reduzierter Zuwachs" CO₂-optimiert

Abbildung 37 zeigt, wie viel CO₂ in den Lagern der Module Holz und Wald gespeichert ist. Im Zusatzscenario CO₂-optimiert werden in der Konstruktion und Ausbau keine Rückgänge erwartet, weil das (verbleibende) Nadelholz vermehrt für die Konstruktion und den Ausbau eingesetzt wird, Laubholz vermehrt zum Einsatz kommt sowie generell vermehrte Kaskadennutzung und Wiederverwertung stattfindet. Dies kompensiert den Rückgang in der Nadelholzernte.

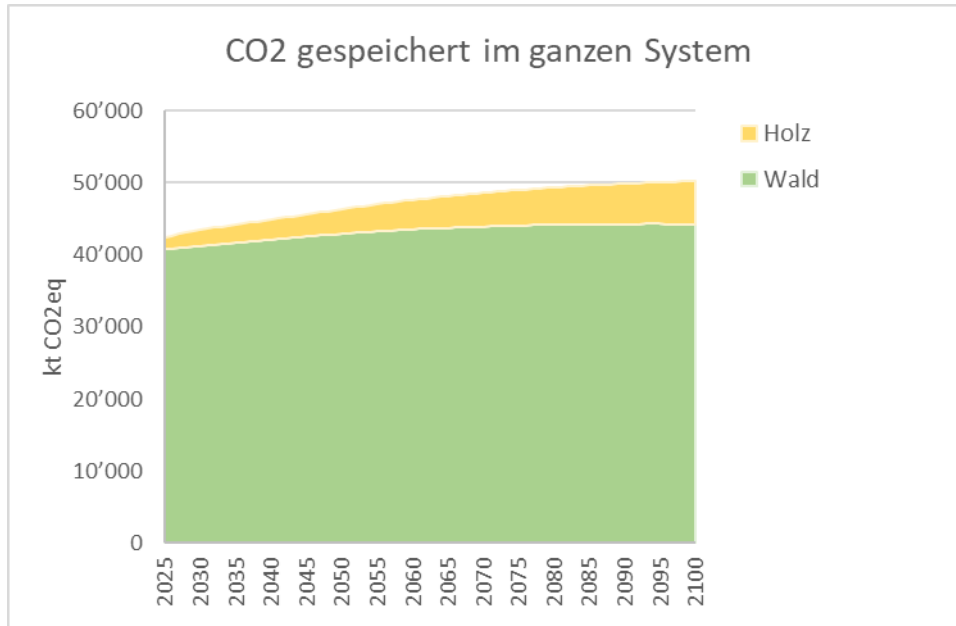


Abbildung 37 Lager im Zusatzscenario CO₂-optimiert Modul Wald und Holz

In der Abbildung 38 ist das Lager des Moduls Wald abgebildet. Es ist erkennbar, dass sich das Waldboden-Lager nicht ändert, da entsteht also keine Senke. Die Lager der lebenden Biomasse und des Totholzes nehmen zu.

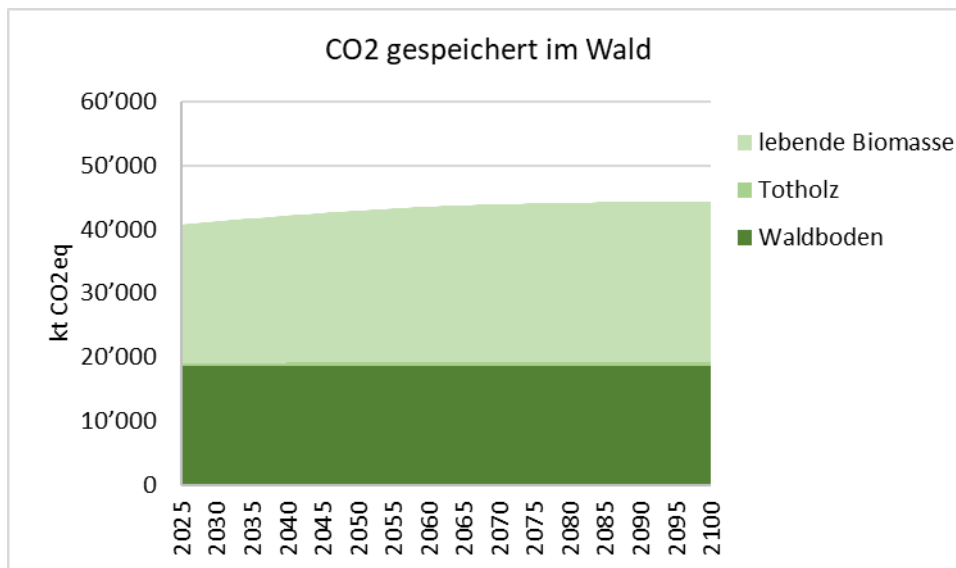
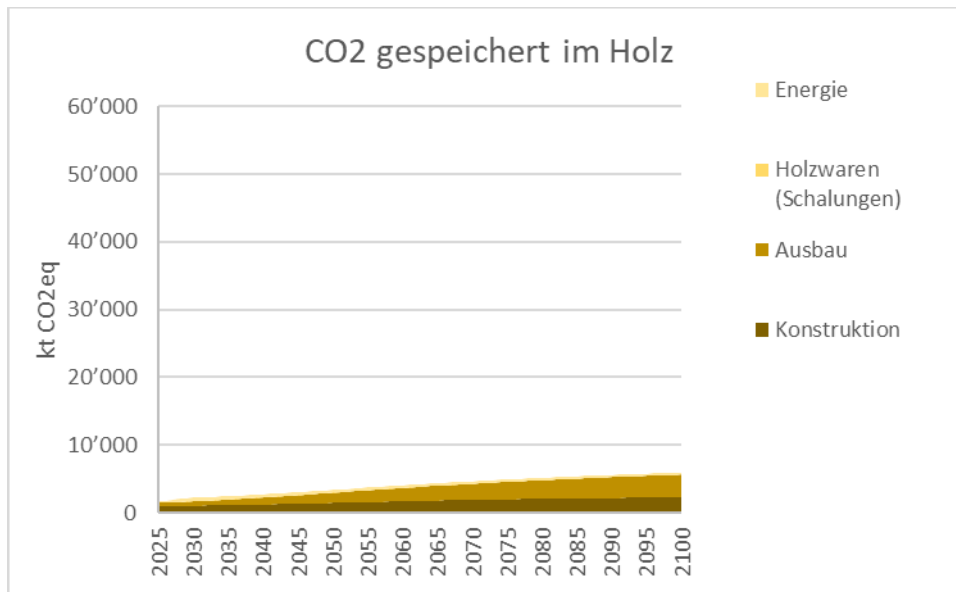


Abbildung 38 Lager im Zusatzscenario CO₂-optimiert Modul Wald

Das Holz-Lager, in Abbildung 39 dargestellt, nimmt über die 75 Jahre von 1.7 Mio. t CO₂ auf 6 Mio. t CO₂ zu. Die Entwicklungen der Lager werden im Kapitel 4.5.3 anhand der Entwicklung der Senken diskutiert.

Abbildung 39 Lager im Zusatzscenario CO₂-optimiert Modul Holz

A1.7 Stellschrauben im Modell und daraus abgeleitete Handlungsoptionen

Stellschraube	Variation und Resultat (aus Sensitivitätsanalyse)	Empfehlung (basierend auf Sensitivitätsanalyse)	Beeinflussbarkeit [++, +, -, --]	Erläuterung
Modul Wald				
Anteil Nadelholz in der Ernte	<p>1) Der Nadelholz-Zuwachs, sowie die Nadelholz-Ernte wurden per 2100 auf 20% runtergesetzt (ursprünglicher Nadelholz-Zuwachs und Nadelholz-Ernte bei je 33% per Jahr 2100).</p> <p>→ Erhöhung der CO₂-Wirkung je nach Szenario um 5% (CO₂-optimiert), 13% (Basis), bis 19% (Energie).</p> <p>2) Der Nadelholz-Zuwachs, sowie die Nadelholz-Ernte wurden per 2100 auf 50% gesetzt.</p> <p>→ Reduktion der CO₂-Wirkung je nach Szenario um 12% (CO₂-optimiert), 22% (Basis), bis 30% (Energie)</p>	Förderung des Laubholz-Zuwachses. Entsprechende Reduktion des Anteils Nadelholz an Zuwachs und Ernte, um die CO ₂ -Wirkung zu erhöhen. Bemerkung: Grosse Unsicherheit, vgl. Abschnitt 5.5)	<p>Waldeigentümer: ++</p> <p>Kanton: -</p>	<p>Die Waldeigentümerinnen und Waldeigentümer können in Abhängigkeit von der aktuellen Zusammensetzung ihrer Waldbestände und der anfallenden Zwangsnutzungen sowie der Vorgabe einer nachhaltigen Holznutzung selbst entscheiden, welche Baumart genutzt wird.</p> <p>Der Kanton hat keinen Einfluss auf den Anteil des Nadelholzes in der Ernte. Mit der Vorgabe von minimalen Laubholzanteilen pro Waldgesellschaft im Rahmen des naturnahen Waldbaus wird langfristig das Angebot bzw. die Nutzungsmöglichkeit von Nadelholz beeinflusst.</p>
Aufteilung auf Sortimente (Stamm-, Industrie-, Energie- und Abholz)	<p>Verschiebung der Sortimente in der Ernte, zu einem vermehrten Stammholzanteil, einem vermehrtem Industrieholzanteil und einem Rückgang im Energieholzanteil (=CO₂-optimiertes Szenario)</p> <p>→ Erhöhung der CO₂-Wirkung um 9%</p>	Die Sortimente sollten von der aktuellen Verteilung verschoben werden hin zu mehr Stammholz, mehr Industrieholz und weniger Energieholz.	<p>Waldeigentümer: ++</p> <p>Holzkäufer / Verarbeiter: +</p> <p>Kanton: --</p>	<p>Die Waldeigentümerinnen und Waldeigentümer bzw. ihre Förster entscheiden über die Sortimentsaufteilung. Diese Verteilung basiert massgeblich auf den im Wald wachsenden Beständen, den lokalen Absatzmöglichkeiten (z.B. lokale Schnitzelheizung) und den Marktpreisen, welche sich aus dem Angebot und der Nachfrage ergeben.</p> <p>Die Nachfrage nach Sortimenten für die entsprechenden Produkte beeinflusst den Preis und somit deren Bereitstellung. Beim Laubholz ist das Angebot an Produkten limitiert (kaum Nachfrage für Konstruktionsholz).</p> <p>Der Kanton hat keinen Einfluss auf die Aufteilung des Holzes auf die verschiedenen Sortimente. Der Kanton empfiehlt die mehrmalige stoffliche Nutzung des Holzes vor der energetischen Nutzung. Mit der Förderung von Energieholzanlagen wird ein indirekter Anreiz gesetzt. Die entsprechenden Förderbeiträge für Holzheizungen werden jedoch gemäss Auskunft der Abteilung Energie kaum nachgefragt.</p>
Nutzungsverzichtsfläche	<i>Zu diesem Parameter wurde keine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.</i>		<p>Waldeigentümer: ++</p> <p>Kanton: +</p>	<p>Der Entscheid, ob eine Nutzungsverzichtsfläche ausgeschieden wird, liegt bei den Waldeigentümern (Vertragsnaturschutz).</p> <p>Der Kanton fördert das Ausscheiden von Nutzungsverzichtsflächen zur Förderung der Biodiversität über das Naturschutzprogramm Wald (Entschädigung des Nutzungsverzichts) und mittels Information / Beratung.</p>
Stellschraube	Variation und Resultat (aus Sensitivitätsanalyse)	Empfehlung (basierend auf Sensitivitätsanalyse)	Beeinflussbarkeit [++, +, -, --]	Erläuterung

Modul Holz				
Stellschraube	Variation und Resultat (aus Sensitivitätsanalyse)	Empfehlung (basierend auf Sensitivitätsanalyse)	Beeinflussbarkeit [++, +, -, --]	Erläuterung
Nutzung der Holzernte für Konstruktion, Ausbau, Holzwaren, Energie	Erhöhung des Anteils des Holzes in der Konstruktion und im Ausbau, Abnahme in den Holzwaren und Energie → Erhöhung der CO ₂ -Wirkung um 11%	Der Anteil des Holzes in der Konstruktion und im Ausbau soll zunehmen, in den Holzwaren und der Energie aber abnehmen.	Holzkäufer / Verarbeiter: ++	Die Nachfrage nach Sortimenten für die entsprechenden Produkte beeinflusst den Preis und somit deren Bereitstellung. Beim Laubholz ist das Angebot limitiert (kaum Nachfrage für Konstruktionsholz).
			Kanton: -	Der Kanton beeinflusst die Nutzung von Energieholz indirekt über die Förderung von Holzenergieanlagen. Die entsprechenden Beiträge werden jedoch gemäss Auskunft der Abteilung Energie kaum nachgefragt.
Kaskadennutzung optimieren	Vermehrte Nachfolgenutzung im Ausbau, Verringerung Anteil energetischer Verwertung je Nutzungszyklus, Wiederverwendung von Bauprodukten (=CO ₂ -optimiertes Szenario) → Erhöhung der CO ₂ -Wirkung um 16%	Die Kaskadennutzung sollte optimiert werden.	Wirtschaft: ++	Eine ökologisch und ökonomisch effiziente Wirtschaft, welche innovative Lösungen für Energieeffizienz und die Nutzung von erneuerbarer Energie und Ressourcen anbietet, ist im globalen Markt wettbewerbsfähiger.
			Kanton: +	Der Kanton strebt im Rahmen des Entwicklungsschwerpunkts Klima eine klimaneutrale Industrie und Gewerbe basierend auf Kreislaufwirtschaft an. Er kann mit geeigneten Rahmenbedingungen und (steuerlichen) Anreizen eine ressourceneffiziente und auf Kreisläufen basierende Wirtschaft fördern. Mit dem Hightech Zentrum Aargau berät er diejenigen Unternehmen, die Innovationen im Bereich Energietechnologie und Ressourceneffizienz oder ressourcenschonende Produkte und Technologien entwickeln möchten. Informationskampagnen sind eine weitere Möglichkeit, Öffentlichkeit und Unternehmen zu sensibilisieren und motivieren.
			Verbraucher: -/+	Mit der Nachfrage nach stofflichen Holzprodukten beeinflusst der Konsument die Kaskadennutzung.
Export	Geringerer Export im Laubholz (10% anstatt 26% des Stamm- und Industrieholzes) und im Nadelholz (50%, resp. 20% anstatt 75% des Stamm- und Industrieholzes) → Erhöhung der CO ₂ -Wirkung um 22%	Der Anteil des exportierten Stamm- und Industrieholzes sollte rückläufig sein.	Holzkäufer: ++	Die Holzkäufer können mit ihrer Preisgestaltung innerhalb der vom Markt vorgegebenen Nachfrage den Preisrahmen sowie die Menge, der in die verschiedenen Kanäle fließenden Holzes steuern. Fehlende Verarbeitungskapazitäten im Inland fördern den Export.
			Kanton: --	Der Kanton hat keine direkten Einflussmöglichkeiten auf den Export von Aargauer Holz.
Anteil Nadelholz am Vorrat	<i>Zu diesem Parameter wurde keine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.</i>		Waldeigentümer: ++	Die Waldeigentümerinnen und Waldeigentümer entscheiden langfristig über den Nadelholzanteil ihrer Wälder. Dies innerhalb eines durch den Standort vorgegebenen Rahmens und den gesetzlichen Rahmenbedingungen (naturnaher Waldbau mit max. möglichem Anteil Nadelholz und an Standort angepasste Baumarten).
			Kanton: -	Mit der Haltung zur naturnahen Waldbewirtschaftung wird der Rahmen des möglichen Nadelholzanteils vorgegeben.

Totholz pro ha	<i>Zu diesem Parameter wurde keine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.</i>	Waldeigentümer: ++ Kanton: -	Über den im Wald belassenen Totholzvorrat entscheiden die Waldeigentümerinnen und -eigentümer. Mit der Haltung zur naturnahen Waldbewirtschaftung wird ein minimaler Rahmen vorgegeben (10 m ³ /ha).
Waldfläche	<i>Zu diesem Parameter wurde keine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.</i>	Kanton: --	Die Waldflächen sind im Kanton Aargau durch statische Waldgrenzen gesetzlich festgelegt. Eine Zunahme / Abnahme der Waldfläche ist nicht mehr möglich.
Zuwachs	<i>Zu diesem Parameter wurde keine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.</i>	Waldeigentümer: -/+ Kanton: -/+	Der Zuwachs ist eine bestandes- und teilweise baumartenspezifische vorratsabhängige Konstante, die im Klimawandel abnehmen dürfte. Der Zuwachs lässt sich indirekt über Vorrat und Baumartenzusammensetzung beeinflussen. Der Kanton kann die natürliche Veränderung des Zuwachses indirekt über die Festlegung von Vorratsuntergrenzen bzw. Vorgaben über die angestrebte Baumartenzusammensetzung in Betriebsplänen beeinflussen.
Modul Substitutionseffekte			
Zeitpunkt Netto-Null	In den drei Grundscenarien wird Netto-Null entweder 2050, 2075 oder aber nie erreicht: → Je nach Szenario und Zeitpunkt für Netto-Null wird die CO ₂ -Wirkung um 12% - 84% erhöht.	Die CO ₂ -Wirkung des Aargauer Waldes sollte zukünftig regelmässig mit den aktualisierten Prognosen für den Erreichungszeitpunkt von Netto-Null abgeglichen werden.	Kanton: - Je früher Netto-Null erreicht wird, desto besser für das Klima und die Umwelt, aber desto geringer fällt die CO ₂ -Wirkung des Aargauer Waldes aus. Der Grund ist, dass die Konkurrenzprodukte ebenfalls geringere Emissionen verursachen und sich der Substitutionsnutzen zwischen den Produkten verringert. Diese Stellschraube ist somit hochsensitiv und wird aus Vollständigkeitsgründen hier erwähnt. Für das betrachtete System ist sie jedoch «kontraproduktiv». Aus Gesamtsicht sollte Netto-Null klar durch alle Akteure so aktiv wie möglich angestrebt werden.
Ökobilanz der Produkte in Ausbau und Konstruktion verbessern	<i>Zu diesem Parameter wurde keine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.</i>	Wirtschaft: ++	Die Ökobilanz der Holzprodukte im Ausbau und Konstruktion könnte weiter verbessert werden, so dass der Substitutionsnutzen höher ausfällt. Für die Produkte im Ausbau reichen Verbesserungen im Herstellungsprozess der Produkte. Bei den Produkten für die Konstruktion muss auch die Holzbauweise selbst optimiert werden, um eine bessere Ökobilanz zu erreichen.

Tabelle 29 Durch die Waldeigentümerinnen und Waldeigentümer, den Kanton und weitere Akteure des Systems Wald und Holz beeinflussbare Parameter