

## Klimaschutz durch Forst- und Holzwirtschaft Rheinland-Pfalz

Szenarienanalyse zur potenziellen Klimaschutzleistung des Clusters Forst/Holz Rheinland-Pfalz durch die Simulation alternativer Waldbewirtschaftungsmaßnahmen und Holzverwendungsoptionen

Schlussbericht, 13.11.2017

### Durchgeführt durch

Universität Hamburg, Weltforstwirtschaft  
Leuschnerstraße 91, 21031 Hamburg  
Prof. Dr. Michael Köhl, Dr. Volker Mues  
weltforst@uni-hamburg.de



Universität Hamburg

### in Zusammenarbeit mit

Knauf Consulting GbR  
Dorotheenstraße 7, 33615 Bielefeld  
Dr. Marcus Knauf  
mknauf@knauf-consulting.de

**.knauf**consulting  
Beraten und Forschen für mehr Kompetenz

### gefördert durch

Ministerium für Umwelt, Energie,  
Ernährung und Forsten (MUEEF)  
Rheinland-Pfalz



Rheinland-Pfalz

MINISTERIUM FÜR UMWELT,  
ENERGIE, ERNÄHRUNG  
UND FORSTEN

Forschungsanstalt für Waldökologie  
und Forstwirtschaft  
Rheinland-Pfalz  
Forstliche Forschungsförderung Nr. 57-01-2016



Landesforsten  
Rheinland-Pfalz

### **Zitervorschlag**

Mues, V., Knauf, M., Köhl, M. (2017): Szenarienanalyse zur potenziellen Klimaschutzleistung des Clusters Forst/Holz Rheinland-Pfalz durch die Simulation alternativer Waldbewirtschaftungsmaßnahmen und Holzverwendungsoptionen. Projekt der Universität Hamburg in Zusammenarbeit mit Knauf Consulting gefördert durch das Land Rheinland-Pfalz. Universität Hamburg, Hamburg.

## Inhalt

<b>Kurzfassung.....</b>	<b>1</b>
<b>1 Hintergrund des Projekts: Ganzheitliche Bewertung von Wald und Holz im Klimaschutz.....</b>	<b>7</b>
<b>2 Ziele der Studie.....</b>	<b>8</b>
<b>3 Methodischer Ansatz und Datengrundlage.....</b>	<b>10</b>
<b>3.1 Waldbauliche Simulation .....</b>	<b>11</b>
3.1.1 Methodischer Ansatz und Parametrisierung .....	12
3.1.1.1 Ermittlung von Vorrat, Zuwachs und Holzerntemengen .....	16
3.1.1.2 Baumartwechsel nach Endnutzungen .....	19
3.1.1.3 Berechnung der Kohlenstoffspeicher .....	21
3.1.2 Datengrundlage.....	23
3.1.2.1 Bundeswaldinventur Datenvorbereitung der Inventurdateien zu BWI 2 und BWI 3 ..	23
3.1.2.2 Holzerntemengen im Anpassungszeitraum 2002 bis 2015.....	28
<b>3.2 Simulation der Holzverwendung.....</b>	<b>29</b>
3.2.1 Bewertung der Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung .....	29
3.2.1.1 Holzproduktespeicher .....	32
3.2.1.2 Verwertung der Rinde.....	33
3.2.2 Annahmen zur Rheinland-pfälzischen Holzverwendung in der 1. Absatzstufe und Ableitung eines Basisszenarios für die Holzverwendung .....	34
3.2.3 Szenarien, die das Basisszenario variieren.....	36
<b>4 Ergebnisse .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1 Aktuelle Klimaschutzleistung des Waldes in Rheinland-Pfalz (2013-2015) ....</b>	<b>39</b>
<b>4.2 Waldbauliche Szenarien .....</b>	<b>42</b>
4.2.1 Bestandesentwicklung .....	42
4.2.2 Entwicklung des Kohlenstoffspeichers Wald .....	55
4.2.3 Holzerntemengen der Grund- und Kombinationsszenarien .....	64
<b>4.3 Simulation der Holzverwendung.....</b>	<b>73</b>
4.3.1 Holzerntemengen als Grundlage für die Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung – exemplarische Darstellung des Grundszenarios Massenoptimierung .....	73
4.3.2 Abhängigkeit der Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung von der Verwendung in der 1. Absatzstufe.....	80
4.3.3 Abhängigkeit der Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung von den verwendeten Holzarten .....	83
<b>4.4 Klimaschutzleistung von Wald und Holzverwendung bis 2100 – Ergebnisse der   ganzheitlichen Betrachtung.....</b>	<b>85</b>
4.4.1 Ganzheitliche Betrachtung.....	85
4.4.2 Status quo: Basisszenario der Holzverwendung .....	88
4.4.2.1 Grundszenarien.....	88
4.4.2.2 Kombinationsszenarien .....	90
4.4.3 Veränderung des Anteils der stofflichen Holznutzung in der 1. Absatzstufe .....	92
4.4.3.1 Erhöhte stoffliche Holznutzung in der 1. Absatzstufe .....	92
4.4.3.2 Stark erhöhte stoffliche Holznutzung in der 1. Absatzstufe .....	94
4.4.3.3 Variation zu ausschließlich energetischer Nutzung des Rohholzes .....	96
4.4.4 Erhöhung der (stofflichen) Ausbeute bei der holzwirtschaftlichen Fertigung....	97
<b>5 Diskussion und Schlussfolgerungen.....</b>	<b>99</b>
<b>6 Literatur .....</b>	<b>103</b>

<b>7</b>	<b>Abbildungen und Tabellen .....</b>	<b>108</b>
<b>8</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>114</b>

## Kurzfassung

Die internationalen Bemühungen zum Klimaschutz streben eine dauerhafte Verminderung des Ausstoßes von Treibhausgasen (THG) und deren Konzentrationen in der Atmosphäre an. Wälder tragen wesentlich zur Minderung der atmosphärischen THG-Konzentrationen bei, indem sie Kohlenstoff durch Photosynthese und Wachstum der Bäume aufnehmen und speichern. Durch die Holzernte findet ein Übertrag des Kohlenstoffes vom Waldspeicher in den Holzproduktespeicher statt. Die internationale Treibhausgasberichterstattung sieht seit der 15. Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention, COP 15, 2009 in Kopenhagen die optionale Berücksichtigung der Speicherung von Kohlenstoff in Holzwirtschaftsprodukten (HWP) in der Treibhausgasberichterstattung vor. Zusätzlich kann Holz durch energetische und materielle Substitution von fossilen Energieträgern zur Emissionsminderung beitragen. Diese Emissionsreduktionen werden in der nationalen Treibhausgasberichterstattung dem Energiesektor zugerechnet, sind aber letztendlich eine Leistung aus der Waldbewirtschaftung.

Rheinland-Pfalz, das deutsche Bundesland mit dem höchsten Waldanteil, strebt einen effektiven und effizienten Beitrag zum Klimaschutz durch Waldwachstum und –bewirtschaftung an. Der 2009 eingerichtete Holzbau-Cluster RLP oder die Auswertungen zur BZE (Block und Gauer, 2012) sind nur zwei Beispiele, die das Bemühen um die Gewinnung entscheidungsrelevanter Erkenntnisse und die umweltpolitische Relevanz des Forst- und Holzsektors veranschaulichen.

Sollen die potenziellen Klimaschutzleistungen des Waldes beurteilt werden, so müssen sowohl Wald- und Holzproduktespeicher als auch die Möglichkeiten zu materieller und energetischer Substitution unter verschiedenen Handlungsoptionen in einem ganzheitlichen Ansatz ermittelt werden. In der vorliegenden Studie wird dies durch die Methode der Szenarienanalyse umgesetzt.

### Methodischer Ansatz

Die Speicherung von Kohlenstoff im Waldspeicher wird über Zuwächse und den Speicherabbau durch Holznutzung unter verschiedenen Szenarien zur Waldbewirtschaftung quantifiziert. Die Verarbeitung des geernteten Holzes zu Produkten führt zum Aufbau eines Holzproduktespeichers, der einen Abbau der Produkte nach durchschnittlichen

Verweildauern nach sich zieht. Zusätzlich zur Speicherung von Kohlenstoff werden die Emissionseinsparungen durch energetische und stoffliche Substitution ermittelt. Dies geschieht durch Multiplikation des Kohlenstoffgehalts des eingesetzten Holzes mit spezifischen Substitutionskoeffizienten für Verwendungsarten und Produktgruppen. Neben einem Basisszenario der Holzverwendung in Rheinland-Pfalz werden Alternativszenarien zur stofflichen und energetischen Verwendung sowie Ausbeute in Produktionsprozessen berechnet. Die Auswertung in Kombination mit den Szenarien zur Waldbewirtschaftung nach dem ganzheitlichen Ansatz der Studie ermöglicht die Beurteilung der Klimaschutzleistung in Forst- und Holzwirtschaft.

Die Simulation des Waldwachstums und der daraus abgeleiteten jährlichen Holzerntemengen stützt sich auf die in Rheinland-Pfalz aufgenommenen Inventurdaten der zweiten Bundeswaldinventur (2002) und der dritten Bundeswaldinventur (2012) und die Holzerntemengen, die zwischen den Inventuren und in den Jahren bis 2015 entnommenen wurden.

Die Daten der zweiten Bundeswaldinventur aus dem Jahr 2002 werden als zeitlich erste Inventur für die Studie herangezogen und für jeden Stichprobenpunkt in ideale Reinbestände gleicher Baumartengruppe und gleichen Alters überführt. Für diese ideellen Reinbestände werden Volumina und laufende jährliche Zuwächse mit Hilfe der Ertragstafeln und der entsprechenden Reduktionstafeln, die in Rheinland-Pfalz im Rahmen der Forsteinrichtung verwendet werden, ermittelt. Die Einbeziehung der tatsächlich realisierten jährlichen Holzerntemengen von 2002 bis 2015 ermöglicht sowohl die Anpassung des Ertragstafel-Zuwachses an die örtlichen Gegebenheiten als auch die Ermittlung eines realitätsnahen Ausgangszustands zum Jahr 2015, dem letzten Jahr vor dem Betrachtungszeitraum der Szenarienanalyse von 2016 bis 2100.

Im Betrachtungszeitraum kann die Waldbewirtschaftung unter verschiedenen Wirtschaftszielen und Prämissen stattfinden. Jedes Szenario bildet ein solches Wirtschaftsziel ab und ist durch entsprechende Parameter zur Bewirtschaftung wie Zielbestockung, Baumartwechsel oder Zeitpunkt und Intensität der Holzernte definiert:

**Massenoptimierung**     Es wird eine möglichst hohe Zuwachs- und damit Erzeugungsleistung von Massensortimenten angestrebt. Die Grundfläche orientiert sich stets an derjenigen der Ertragstafel (Zielbestockungsgrad ist 1); die Endnutzung wird mit dem Erreichen des maximalen durchschnittlichen Ge-

samtzuwachses eingeleitet; nur 5 % des eingeschlagenen Derbholzes verbleibt als Totholzanteil im Wald.

**Wertoptimierung** In Anlehnung an das in Rheinland-Pfalz angestrebte QD-Konzept strebt dieses Szenario die naturnahe und qualitätsgeleitete Produktion von Wertholz starker Dimensionen in kurzen Rotationszeiträumen an. Dies erfolgt bei einem Zielbestockungsgrad von 0,9 bis zum Erreichen des baumartspezifischen Zielalters; der Totholzanteil am eingeschlagenen Derbholz ist 15 %.

**Speicheroptimierung** Das waldbauliche Konzept der Speicheroptimierung maximiert die Speicherung von Kohlenstoff im Waldspeicher durch die Verlängerung von Umtriebszeiten im Vergleich zur Massenoptimierung; der Zielbestockungsgrad wird auf 1,2 erhöht; der Totholzanteil am eingeschlagenen Derbholz beträgt 15 %.

**Nichtnutzung** Es werden keine Entnahmen von Holz aus dem Bestand modelliert; Zuwachsmengen über die Kappungsgrenze hinaus werden als Mortalität ebenso in den Totholzspeicher überführt wie Holz aus Sturmkalamitäten; die Modellierung sieht keine Endnutzungen und daher auch keine Baumartwechsel vor.

Die Simulation der vier Grundszenarien erfolgt jeweils als einheitliche Bewirtschaftung des gesamten Landes. Die Grundszenarien sind dabei als Extreme der Waldbewirtschaftung zu interpretieren und beschreiben den möglichen Rahmen für die Entwicklung der Wälder in Rheinland-Pfalz. Neben den Grundszenarien wurden drei Kombinationsszenarien definiert, bei denen die jeweiligen Grundszenarien kombiniert werden und in verschiedenen Anteilen einfließen. Die Kombinationsszenarien ermöglichen es, ein Nebeneinander von unterschiedlichen Bewirtschaftungsschwerpunkten in einem segregativen Ansatz darzustellen. Auch diese können mit dem ganzheitlichen Ansatz der Studie hinsichtlich ihrer Klimaschutzleistung beurteilt werden.

Die Waldwachstumssimulation berechnet jährliche Holzerntemengen und weist diese getrennt nach den definierten sechs Baumartengruppen aus. Die Erntemengen werden in der Holzwirtschaft zu Produkten mit unterschiedlicher Lebensdauer verarbeitet (=stoffliche Verwendung) oder direkt energetisch verwertet (=energetische Verwendung). Bei einer stofflichen Verwendung verbleibt der Kohlenstoff zunächst im Holzpro-

duktespeicher. Für die Holzprodukte wird eine spezifische durchschnittliche Lebensdauer angenommen, nach deren Erreichen sie aus dem Holzproduktespeicher ausscheiden. Für die Bewertung der Klimaschutzleistung der Holzverwendung sind die Endprodukte bzw. der in ihnen gespeicherte Kohlenstoff die Kalkulationsbasis. Für die Einlagerung in den Holzproduktespeicher ergibt sich der Kohlenstoffeffekt unmittelbar aus der Masse des Kohlenstoffs, der in den Endprodukten enthalten ist. Für die CO<sub>2</sub>-Minderungen der stofflichen und energetischen Substitution wird der Kohlenstoffeffekt gemäß der Multiplikation dieser Masse mit produktspezifischen Substitutionsfaktoren ermittelt (Anhang 1).

Zur Holzverwendung der modellierten Baumartengruppen wurde ein Basismodell der Holzverwendung entwickelt, das auf Informationen der Landesforsten Rheinland-Pfalz und öffentlich zugänglicher Statistiken basiert. Die Berechnungen mit diesem für Rheinland-Pfalz angepassten Basismodell werden in der Studie ergänzt um Szenarien der Holzverwendung, die sich auf den Rohstoffeinsatz in der 1. Absatzstufe beziehen oder auf den holzwirtschaftlichen Fertigungsprozess selbst. Dadurch kann gezeigt werden, dass neben den Maßnahmen der Waldbewirtschaftung auch die Art der Holzverwendung eine hohe Relevanz für die gesamte Klimaschutzleistung von Forst- und Holzwirtschaft hat.

#### Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Für die Jahre von 2013 bis 2015 konnte die aktuelle Klimaschutzleistung des Waldes in Rheinland-Pfalz sowie des Staatswaldes in Rheinland-Pfalz berechnet werden. Der Wald in Rheinland-Pfalz trägt aktuell demnach ca. 2,375 Mio t C jährlich zum Klimaschutz bei, wobei auf den staatseigenen Wald auf ca. 25,6% der Fläche mit 0,603 Mio t C pro Jahr ebenfalls etwa 25,4 % der Klimaschutzleistung entfallen. Höhere Holzerntemengen im Staatswald führen dabei zu verstärkter Klimaschutzleistung durch Substitution und die Kohlenstoffspeicherung im Holzproduktespeicher, zugleich aber auch zu niedrigeren Klimaschutzleistungen im Waldspeicher.

Die vier Grundszenarien zur Waldbewirtschaftung wirken sich sehr unterschiedlich auf die Entwicklung des Gesamtvorrats im Betrachtungszeitraum 2016 bis 2100 aus. Massenoptimierung und Wertoptimierung führen vor allem in der ersten Hälfte des Betrachtungszeitraums durch intensive Holzerntemaßnahmen zu einem Vorratsabbau. Speicheroptimierung und Nichtnutzung bauen im gesamten Betrachtungszeitraum hohe Vorräte im Wald auf. Der durchschnittliche jährliche Effekt in Form von Änderungen des



Waldspeichers ist dementsprechend negativ im Fall von Massenoptimierung (-5.900 t C/a) und Wertoptimierung (-340.200 t C/a) und positiv für Speicheroptimierung (+702.100 t C/a) und Nichtnutzung (+1.358.800 t C/a).

Alle Szenarien mit Holznutzung zeigen zu Beginn des Betrachtungszeitraums starke Eingriffe in die Vorräte vornehmlich älterer Bestände. Dies ist auf die entsprechenden Vorräte im aktuellen Waldbestand in Rheinland-Pfalz zurück zu führen, die als Endnutzungsbestände eingestuft werden. Im Sinne einer Optimierung der Klimaschutzleistung zeigt die Studie, dass diese Auflösung von Altbeständen sowohl die Realisierung positiver Effekte der Holzverwendung für die Treibhausgasreduzierung ermöglicht, als auch die Bestände zu verjüngen. Gleichzeitig kann u.a. durch Baumartwechsel zur Anpassung an den Klimawandel beigetragen werden.

Die Raten des Baumartwechsels wurden zusammen mit Experten der Landesforsten Rheinland-Pfalz, der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz und aus dem rheinland-pfälzischen Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten definiert und führten zur Verschiebung von Fichte, Kiefer und ALN hin zu Buche und Douglasie. Die relativ hohe Zuwachsleistung von Fichte und Kiefer bedingt, dass ihr Anteil am Gesamtvorrat durch Baumartwechsel im Betrachtungszeitraum von 2016 bis 2100 deutlich weniger abnimmt als ihr Anteil an der Fläche.

Durch Verzicht auf Holznutzung konzentriert sich die Waldbewirtschaftung auf die Speicherleistung. Dadurch werden zwar die höchsten Ergebnisse in Bezug auf die Kohlenstoffspeicherleistung im Wald erzielt, aber gleichzeitig die Möglichkeit zur Kontrolle und Förderung einer nachhaltigen Produktion des nachwachsenden Rohstoffs Holz vergebend. Die höchsten Holzerntemengen im Betrachtungszeitraum werden durch die Massenoptimierung erreicht. Die Wertoptimierung als Szenario mit den zweithöchsten Holzerntemengen im gesamten Betrachtungszeitraum bis 2100, erreicht noch bis zum Jahr 2045 höhere Holzerntemengen als die Massenoptimierung.

Die Übertragung der erzielten Holzerntemengen in das Modell der Holzverwendung ermöglicht die Ausweitung der Betrachtungen auf die Klimaschutzleistung der Holzwirtschaft. Die höchste durchschnittliche jährliche Klimaschutzleistung im Zeitraum 2016 bis 2100 wird für die Massenoptimierung mit +2,20 Mio. t C/a berechnet, gefolgt von Speicheroptimierung (+2,04 Mio. t C/a), Wertoptimierung (+1,71 Mio. t C/a) und Nichtnutzung

(+1,36 Mio. t C/a). Die Kombinationsszenarien Nutzung und Standard erreichen Werte um 2 Mio. t C/a, das Kombinationsszenario Schutz liegt mit 1,85 Mio. t C/a darunter.

In der ersten Hälfte des Betrachtungszeitraums sind keine Unterschiede zwischen den Szenarien in Bezug auf die Gesamtwerte der Klimaschutzleistung zu finden. Im Vergleich zur Nichtnutzung zeigen sich das Szenario Massenoptimierung ab dem Jahr 2050, das Szenario Speicheroptimierung ab ca. dem Jahr 2060 und das Szenario Wertoptimierung ab ca. dem Jahr 2075 hinsichtlich der Klimaschutzleistung überlegen.

Die langfristig wirksamen Klimaschutzeffekte durch energetische und stoffliche Substitution überwiegen die teils hohe Reduzierung der Speicherleistung des Waldes durch die Holzernte in den Nutzungsszenarien, wenn auch der Klimaschutzeffekt der Holznutzung in Rheinland-Pfalz aufgrund der hohen Laubholzanteile geringer ausfällt als in Bundesländern mit höherem Nadelholzanteil.

Der höhere Kohlenstoffeffekt von Nadelhölzern im Vergleich zu Laubhölzern erklärt sich zum einen aus den Kohlenstoffeffekten der Holzverwendung. Zum anderen ist zu berücksichtigen, dass Nadelbäume im Vergleich zu Laubhölzern einen deutlich höheren Volumenzuwachs haben. Die höheren Dichten des Laubholzes gleichen diesen Vorteil des Nadelholzes im Volumenzuwachs nicht aus. Da sich die Kohlenstoffeffekte aus dem Wachstum und der Holzverwendung addieren, liegt der gesamte Kohlenstoffeffekt der Forst- und Holzwirtschaft beim Anbau und der Verwendung von Nadelholz etwa doppelt so hoch wie bei Laubholz. Die Ergebnisse der Studie weisen unter den derzeitigen technischen Gegebenheiten der Holzverwendung auf die deutlich höheren Klimaschutzeffekte von Anbau und Verwendung von Nadelholz im Vergleich zu Laubholz hin. Szenarien zur verstärkten stofflichen Nutzung von Laubholz sowie zur vollständigen energetischen Verwendung der gesamten Holzerntemengen komplettieren die Darstellung der potenziellen Klimaschutzleistung des Clusters Forst/Holz Rheinland-Pfalz unter der Annahme alternativer Waldbewirtschaftungsmaßnahmen und Holzverwendungsoptionen.

## 1 Hintergrund des Projekts: Ganzheitliche Bewertung von Wald und Holz im Klimaschutz

Die internationalen Bemühungen zum Klimaschutz streben eine dauerhafte Verminderung des Ausstoßes von Treibhausgasen (THG) und deren Konzentrationen in der Atmosphäre an. Wälder tragen wesentlich zur Minderung der THG-Konzentrationen in der Atmosphäre bei, da Bäume durch Photosynthese atmosphärisches Kohlendioxid binden und in Form von Kohlenstoff in (verholzter) Biomasse speichern. Eine Erhöhung dieses „Waldspeichers“ stellt somit eine CO<sub>2</sub>-Senke dar und wirkt sich positiv auf die nationale Treibhausgasbilanz und die Erreichung der Reduktionziele aus. In älteren Dokumenten des Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC; im Deutschen als Weltklimarat bezeichnet) wurde Holzernte und damit einhergehende Verringerung des stehenden Holzvorrates als direkte Freisetzung von Kohlenstoff in die Atmosphäre behandelt. Obwohl diese ursprüngliche Auffassung in aktuellen Dokumenten des IPCC mittlerweile revidiert wurde, herrscht vielfach noch die Meinung vor, dass Holzernte per se negativ für den Klimaschutz sei (Köhl, 2017).

Durch die Holzernte findet ein Übertrag des Kohlenstoffes vom Waldspeicher in den Holzproduktespeicher statt. Die Nutzung von Holz in Form langlebiger Produkte führt zu einer Verlängerung der durchschnittlichen Verweilzeit von Kohlenstoff im Holzspeicher. Gemäß den Beschlüssen der 15. Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention, COP 15, 2009 in Kopenhagen sind auch Klimaschutzleistungen des Holzproduktespeichers in der Treibhausgasbilanz eines Landes grundsätzlich anrechenbar. Zusätzlich kann Holz durch energetische und materielle Substitution von fossilen Energieträgern zur Emissionsminderung beitragen. Diese Emissionsreduktionen werden in der nationalen Treibhausgasberichterstattung dem Energiesektor zugerechnet, sind aber letztendlich eine Leistung aus der Waldbewirtschaftung.

Sollen die möglichen Klimaschutzleistungen des Waldes beurteilt werden, so müssen Wald- und Holzproduktespeicher sowie die Möglichkeiten zu materieller und energetischer Substitution in einem ganzheitlichen Ansatz ermittelt werden. Hierbei werden Zuwächse als Senken bewertet, der Holzeinschlag als Emissionen, aus der Differenz ergibt sich die Nettosenke. Zusätzlich sind aber die Emissionseinsparungen durch die Holzverwendung in einer Gesamtschau zu berücksichtigen.

## 2 Ziele der Studie

Rheinland-Pfalz, das deutsche Bundesland mit dem höchsten Waldanteil, strebt einen effektiven und effizienten Beitrag zum Klimaschutz durch Waldwachstum und -bewirtschaftung an. Der 2009 eingerichtete Holzbau-Cluster RLP oder die Auswertungen zur BZE (Block und Gauer, 2012) sind hier nur einige Beispiele für die umweltpolitische Relevanz und das Bemühen der Forstseite um die Gewinnung entscheidungsrelevanter Erkenntnisse.

Im Fokus der hier vorgelegten Studie, stehen die Auswirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die gesamte Klimaschutzleistung des Wald- und Holzsektors in Rheinland-Pfalz. Hierfür wurde ein Modellansatz gewählt, der die Klimaschutzleistungen der Waldbewirtschaftung und der Holzverwendung kombiniert (s. Abbildung 1). Unabhängig vom Verwendungsort des Holzes werden unterschiedliche Maßnahmen in einem forstlichen Wachstumsmodell modelliert. Das Modell berücksichtigt den Wald in Rheinland-Pfalz und die potenziellen Kohlenstoffeffekte (Holzproduktespeicher und Substitutionseffekte) des aus ihm entnommenen Holzes. Die resultierenden mittel- und langfristigen Folgen können eingeschätzt werden, was zu einer Verbesserung der entscheidungsrelevanten Wissensbasis führt.

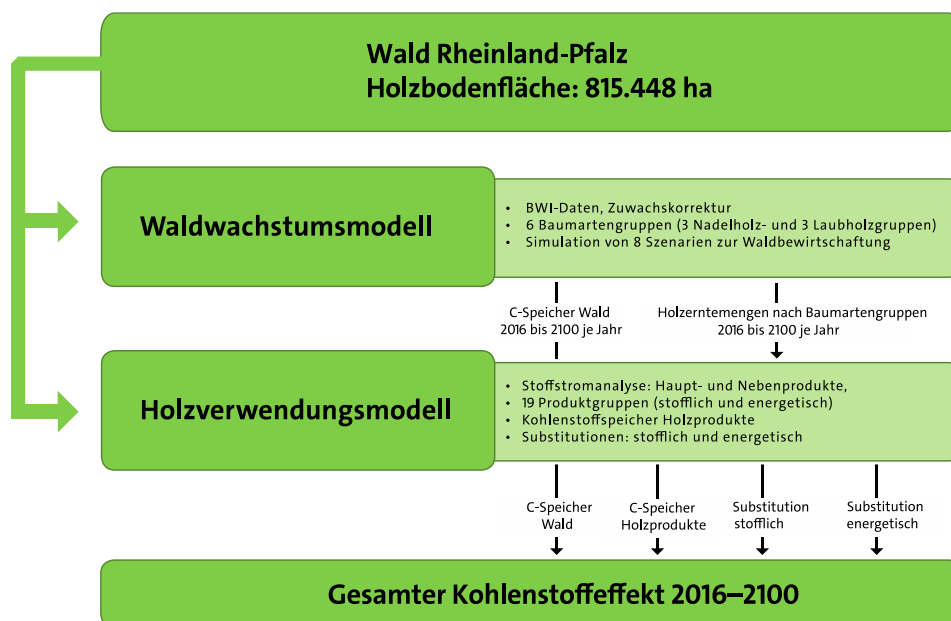


Abbildung 1 Vorgehensweise bei der Simulation von Bestandeswachstum und Holzerntemengen

Die Abteilung Weltforstwirtschaft des Zentrums Holzwirtschaft an der Universität Hamburg setzte hierzu ein Modell ein, mit dessen Hilfe es möglich ist, das Waldwachstum für verschiedene Bewirtschaftungsstrategien in RLP zu simulieren. Über Szenarien konnten die Auswirkungen unterschiedlicher Waldbewirtschaftungsmaßnahmen auf die Entwicklung der Holzvorräte und damit der Kohlenstoffspeicher des Waldes und die jeweils zur Verfügung gestellten Holzerntemengen analysiert und verglichen werden.

Für eine ganzheitliche Betrachtung ist es erforderlich, die spezifische Holzverwendung (mit ihren C-Wirkungen der Veränderung des Holzproduktespeichers und der Substitution fossiler Energieträger) ebenfalls zu berücksichtigen und in einem ganzheitlichen Modell zu analysieren und zu bewerten. Ein solches spezifisches Holzverwendungsmodell wurde durch Knauf-Consulting in Zusammenarbeit mit Vertretern des Auftraggebers, die über einschlägige Erfahrungen im Bereich des Forst/Holz Clusters RLP verfügen, erstellt. Durch die Zusammenführung des Modells der Waldmodellierung mit dem Modell der Holznutzung ist es möglich, ein gesamthafte Bild der möglichen Klimaschutzleistung der rheinland-pfälzischen Wälder in Forst- und Holzwirtschaft zu erstellen und in dieser Studie vorstellen zu können.

### 3 Methodischer Ansatz und Datengrundlage

Das Waldwachstum und die aus der Bewirtschaftung resultierende Erntemengen werden mit einem Modell simuliert, das auf Ertragstafeln basiert. Mit Daten der zweiten und dritten Bundeswaldinventur für Rheinland-Pfalz und der Holzeinschlagsstatistiken für den Zeitraum zwischen beiden Inventurzeitpunkten sowie für die Jahre bis 2015 kann die tatsächliche Wachstumsrate der erhobenen Bäume, ermittelt werden. Das in den Ertragstafeln beschriebene Bestandeswachstum (a-priori Annahme der Simulation) wird dem tatsächlichen Wachstum der Bäume, das an den Stichprobenpunkten der Bundeswaldinventur ermittelt wird, angepasst. Damit können die Punktinformationen der Bundeswaldinventur auf die Bestandesebene übertragen werden. Der Ansatz nimmt dabei eine Einteilung aller vorkommenden Baumarten in sechs funktionale Baumartengruppen vor (vgl. Abbildung 1, oben).

Die Studie legt besonderes Augenmerk auf die Entwicklung und Verwendung von Grundszenarien, die einen weiten Bereich potenzieller waldbaulicher Maßnahmen umfassen und in Zusammenarbeit mit der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft, Trippstadt, und dem rheinland-pfälzischen Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten, Mainz, entwickelt wurden. Während z. B. ein Szenario die Massenproduktion von Energieholz mit schwachen Dimensionen abbildet, beschreibt ein weiteres die Produktion von hochwertigem Konstruktionsholz stärkerer Dimensionen und entsprechend angepasstem Durchforstungsregime nach Vorgaben des Waldbaus zur Qualifizierung und Dimensionierung. Ein drittes Grundszenario zielt unter Beibehaltung von Erntemaßnahmen auf die Maximierung der Klimaschutzleistung durch Erhöhung des Waldspeichers von Kohlenstoff ab. Schließlich dient ein viertes Grundszenario zur Beschreibung der Entwicklung ohne die Modellierung von Holzerntemaßnahmen.

Die vier Grundszenarien werden zunächst auf die gesamte Waldfläche angewandt. So genannte „Kombinationsszenarien“ erlauben eine flächenmäßig gewichtete Kombination der Grundszenarien und stellen eine realistischere Kombination von Bewirtschaftungszielen dar. Durch den Vergleich der Grund- und Kombinationsszenarien können Bewirtschaftungsmaßnahmen im Hinblick auf ihren Beitrag zum Klimaschutz beurteilt werden. Der Einfluss von Zeitpunkt und Intensität von Holzerntemaßnahmen wird eben-

so verdeutlicht wie derjenige von Baumartwechseln, die im von Endnutzungen simuliert werden können (vgl. 3.1.1.2).

Die Waldmodellierung liefert jährliche Werte zur Höhe des Holzvorrats (und entsprechend Kohlenstoffmengen für die oberirdische und unterirdische Biomasse; s. Kapitel 3.1.1.3) und jährliche Erntemengen. Der im Wald verbleibende Anteil des Waldrestholzes wird zwischen den Szenarien variiert. Die jährlichen Erntemengen werden zusammen mit entsprechenden Dimensionsangaben an die Holznutzungsmodellierung übergeben. Die Holznutzungsmodellierung parametrisiert unter Einbeziehung landesspezifischer Erfahrungen aus dem Bereich der Clusteranalysen die Aufteilung der Holzerntemengen in Sortimente und Verwendungsbereiche. Eine jährliche Bewertung des Holzspeichers und der durch die Holznutzung erzielten Substitutionsleistungen wird so ermöglicht, was letztlich eine umfassende Beurteilung der potentiellen Klimaschutzleistungen der Szenarien erlaubt.

### **3.1 Waldbauliche Simulation**

Methodik und verwendete Daten zur Umsetzung des waldbaulichen Teils der Szenarienanalyse von 2016 bis 2100 werden in diesem Kapitel beschrieben. Die Simulation des Waldwachstums und der aus diesem hervorgehenden jährlichen Holzerntemengen stützt sich auf zwei aufeinander folgende Inventuren der Holzbodenfläche in Rheinland-Pfalz und der dort zwischen den Inventuren und in den Jahren bis 2015 entnommenen Holzerntemengen. Zunächst wird die Ermittlung von Vorräten, Zuwachs, Totholz- und Holzerntemengen in Kapitel 3.1.1 erläutert, bevor in Kapitel 3.1.2 die Datengrundlage in Form von Inventurdaten und Holzerntemengen beschrieben wird.

Die Daten der zweiten Bundeswaldinventur aus dem Jahr 2002 werden als zeitlich erste Inventur für die Studie herangezogen und für jeden Stichprobenpunkt in ideale Reinbestände gleicher Baumartengruppe und gleichen Alters überführt. Mit Hilfe der in Rheinland-Pfalz im Rahmen der Forsteinrichtung verwendeten Ertragstafeln werden für diese Bestände Volumina und unter Verwendung der entsprechenden Reduktionstafeln laufende jährliche Zuwächse ermittelt (s. Kapitel 3.1.1). Die Einbeziehung der tatsächlich

realisierten jährlichen Holzerntemengen von 2002 bis 2015, ermöglicht sowohl die Anpassung des Ertragstafel-Zuwachses an die örtlichen Gegebenheiten (s. Kapitel 3.1.1.1) als auch die Ermittlung eines realitätsnahen Ausgangszustands zum Jahr 2015, dem letzten Jahr vor dem Betrachtungszeitraum der Szenarienanalyse von 2016 bis 2100.

Das Modell zur waldbaulichen Simulation umfasst Möglichkeiten zur Festlegung verschiedener Endnutzungsmengen und der Definition von einhergehendem Baumartwechsel (s. 3.1.1.2). Zudem ermöglicht es letztlich über die Berechnung des Kohlenstoffgehalts der Kompartimente des Waldspeichers und der Holzerntemengen (s. 3.1.1.3) die ganzheitliche Betrachtung von Wald- und Holzsektor.

### 3.1.1 Methodischer Ansatz und Parametrisierung

Die in Rheinland-Pfalz vorkommenden Baumarten wurden in funktionale Baumartengruppen eingeteilt, um sowohl die Modellparametrisierung als auch die Darstellung der Ergebnisse übersichtlich gestalten zu können. Die Zuordnung der Baumarten zu den Baumartengruppen wird in Tabelle 1 beschrieben. Hier werden auch die für die Ermittlung von Vorrat und Zuwachs verwendeten Ertragstafeln aufgeführt.

Tabelle 1 Definition der Baumartengruppen und verwendete Ertragstafeln

Baumart-gruppe	Baumarten	Ertragstafel	Zuwachs Reduk-tionstafel
Kiefer	Kiefer, Lärche	Kiefer (Rheinland-Pfalz)	Kiefer (Rheinland-Pfalz)
Fichte	Fichte + übriges Nadelholz	Fichte (Rheinland-Pfalz)	Fichte (Rheinland-Pfalz)
Douglasie	Douglasie + Tanne	Douglasie (Rheinland-Pfalz)	Douglasie (Rheinland-Pfalz)
Eiche	Eichenarten	Eiche (Rheinland-Pfalz)	Eiche (Rheinland-Pfalz)
Buche	Buche + ALH	Buche (Rheinland-Pfalz)	Buche (Rheinland-Pfalz)
ALN	ALN (Baumarten niedriger Umtriebszeiten)	Birke (Schwappach, 1929, aus Schober, 1975 )	Eiche (Rheinland-Pfalz)

Die Baumarten werden aufgeteilt in Baumartengruppen nach (1) Laub- und Nadelbäumen, (2) Licht- und Schattbaumarten sowie (3) schnellwachsende Baumarten bzw. Baumarten mit niedriger Lebensdauer. Dies ermöglicht letztlich die Modellierung des



kompletten Waldbestandes mit sechs funktionalen Baumartengruppen, die nach Möglichkeit mit dem Namen einer Leitbaumart benannt wurden. In Abweichung von dieser generellen Gruppierung wurde die Lärche mit der Lärchen-Ertragstafel nach Schober, 1946 (aus: Schober, 1975) simuliert, die Darstellung der Ergebnisse und die Holzmodellierung erfolgten aber zusammen mit der ähnlich zu verwertenden Kiefer.

Der Zuwachs der modellierten Reinbestände konnte mit der Ertragstafel der entsprechenden Leitbaumart zuverlässig bestimmt werden. Für die Baumartengruppe ALN wurde die Ertragstafel für Birke nach Schwappach, 1929, (Schober, 1975) verwendet (vgl. Tabelle 1).

Die vorliegende Studie untersucht die mögliche zukünftige Entwicklung des Waldes in Rheinland-Pfalz mit Hilfe einer Szenarienanalyse. Die Waldentwicklung kann unter verschiedenen Wirtschaftszielen und Prämissen stattfinden. Jedes Szenario bildet ein solches Wirtschaftsziel ab und ist durch entsprechende Parameter zur Bewirtschaftung wie Zielbestockung oder Zeitpunkt und Intensität der Holzernte definiert.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden in Zusammenarbeit mit Experten der Landesforsten Rheinland-Pfalz, der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz und aus dem rheinland-pfälzischen Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Grundszenarien der Waldbewirtschaftung definiert (s. Seite 13). Diese unterscheiden sich vor allem in Bezug auf die Definition des Zielbestockungsgrads und von Zeitpunkt und Intensität der Endnutzungen (vgl. Tabelle 3 auf Seite 17).

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden die folgenden drei Grundszenarien der Waldbewirtschaftung mit Holznutzung definiert als so genannte „Nutzungsszenarien“:

#### Definition der Grundszenarien

**Massenoptimierung** Es wird eine möglichst hohe Zuwachs- und damit Erzeugungsleistung von Massensortimenten angestrebt. Die Grundfläche orientiert sich stets an derjenigen der Ertragstafel (Zielbestockungsgrad ist 1); die Endnutzung wird mit dem Erreichen des maximalen durchschnittlichen Ge-

samtzuwachsen eingeleitet; nur 5 % des eingeschlagenen Derbholzes verbleibt im Wald als Totholzanteil<sup>1</sup>.

**Wertoptimierung** Diese Waldbaustrategie soll die Durchführung des QD-Konzeptes (Wilhelm et al. 1999a, Wilhelm und Rieger 2013) nachbilden. Dieses strebt die naturnahe und qualitätsgeleitete Produktion von Wertholz in starken Dimensionen bei einem Zielbestockungsgrad von 0,9 an; die Initialisierung der Endnutzung erfolgt mit dem Erreichen des Baumart spezifischen Zielalters (s. Tabelle 3 auf Seite 17); der Totholzanteil am eingeschlagenen Derbholz ist 15 %, was der generellen Vorgehensweise in den Landesforsten entspricht.

**Speicheroptimierung** Das waldbauliche Konzept der Speicheroptimierung ist darauf ausgerichtet, die Speicherung von Kohlenstoff im Waldspeicher durch die Verlängerung von Umtriebszeiten im Vergleich zu Massenoptimierung und speziell zu Wertoptimierung zu maximieren (vgl. Tabelle 3 auf Seite 17); der Zielbestockungsgrad wird auf 1,2 erhöht; der Totholzanteil am eingeschlagenen Derbholz ist auf 15 % festgesetzt.

Als viertes Grundszenario wurde das Szenario Nichtnutzung, das gänzlich auf Holznutzung verzichtet, definiert:

**Nichtnutzung** In diesem Grundszenario werden keine Entnahmen von Holz aus dem Bestand modelliert; Zuwachsmengen über die Kappungsgrenze hinaus werden als Mortalität in den Totholzspeicher überführt; nur Zufall gesteuerte Kalamitäten führen zur (unmittelbaren) Verjüngung der Bestände (vgl. 3.1.1.2); das durch Wind-Kalamitäten oder Überschreitung des maximalen Vorrats anfallende Holz (vgl. Kapitel 3.1.1.2 zur „Kappungsgrenze“) wird nicht genutzt sondern komplett in den Totholzspeicher überführt: Totholzanteil 100 %.

---

<sup>1</sup> Da in den Definitionen u.a. der Totholzanteil am eingeschlagenen Derbholz festgelegt wurde, soll hier noch einmal explizit darauf hingewiesen werden, dass die Bestandteile des Stammes sowie der Äste und Zweige unter einem Durchmesser von 7 cm im Rahmen der Simulationen generell als Totholz im Wald verbleiben.

Die Simulation der vier Grundszenarien erfolgt jeweils komplett für alle Simulationsbestände in Rheinland-Pfalz und so als einheitliche Bewirtschaftung des gesamten Landes. Die Grundszenarien sind dabei als Extreme der Waldbewirtschaftung zu interpretieren und die resultierenden Waldentwicklungen beschreiben den Rahmen für die Zukunft der Wälder in Rheinland-Pfalz.

Da eine Bewirtschaftung des gesamten Waldes nach einem einzigen Grundszenario eher unrealistisch ist, wurden drei Kombinationsszenarien definiert, bei denen die jeweiligen Grundszenarien in verschiedenen Anteilen einfließen. Die Berechnung von Kombinationsszenarien auf Basis der für die Grundszenarien berechneten Ergebnisse folgt damit einem segregativen Ansatz zur Waldnutzung: Die Kombinationsszenarien ermöglichen es, ein Nebeneinander von unterschiedlichen Bewirtschaftungsschwerpunkten darzustellen.

In Tabelle 2 werden die Kombinationsszenarien Nutzung, Standard und Schutz in der ersten Spalte aufgeführt. Die Gewichtungen der Grundszenarien in den folgenden Spalten entsprechen dem prozentualen Anteil an der gesamten Waldfläche in Rheinland-Pfalz, der in dem jeweiligen Kombinationsszenario mit der Bewirtschaftungsstrategie des jeweiligen Grundszenarios bewirtschaftet wird. Das Kombinationsszenario Standard definiert hier z.B. eine Bewirtschaftung von 30 % der Fläche mit dem Ansatz der Massenoptimierung, 50 % mit dem der Wertoptimierung und 15 % bzw. 5 % mit denen von Speicheroptimierung bzw. Nichtnutzung.

Tabelle 2 Kombinationsszenarien und deren Definition durch Gewichtung der Grundszenarien (Summe aller Gewichte eines Kombinationsszenarios beträgt stets 100 %)

Kombinationsszenarien	Anteil der Grundszenarien [%]			
	Massenoptimierung	Wertoptimierung	Speicheroptimierung	Nichtnutzung
Nutzung	60	30	5	5
Standard	30	50	15	5
Schutz	5	30	50	15

Die in Tabelle 2 dargestellten Kombinationsszenarien ermöglichen eine realitätsnähere Abschätzung der möglichen zukünftigen Waldentwicklung als die der reinen Grundsze-

narien durch deren Kombination mit unterschiedlichen Gewichtungen und damit anderer Gesamtausrichtung der Waldbewirtschaftung in Rheinland-Pfalz können.

Die Waldentwicklung wird beschrieben über die Entwicklung von Alter und Vorrat, der sich wiederum über das Saldo aus Zuwachs und Holzerntemenge berechnet. Die Ermittlung von Vorrat, Zuwachs und Holzerntemengen wird in Kapitel 3.1.1.1 beschrieben. Die Endnutzung eines Bestandes wird mit der Räumung abgeschlossen. Mit jeder Endnutzung kann es zu einem Baumartwechsel kommen (Kapitel 3.1.1.2). Die Berechnung der lebenden oberirdischen und unterirdischen Biomasse sowie der oberirdischen und unterirdischen toten Biomasse über Expansionsfaktoren sowie die Berechnung der Kohlenstoffgehalte wird in Kapitel 3.1.1.3 beschrieben.

#### 3.1.1.1 Ermittlung von Vorrat, Zuwachs und Holzerntemengen

Zur Beschreibung der Waldentwicklung werden zunächst auf Basis der für die Baumartengruppe definierten Ertragstafel über Alter und Höhe der Simulationsbestände die entsprechende Ertragsklasse und in Abhängigkeit von der Grundfläche pro Hektar der Bestockungsgrad berechnet. Für jeden Bestand kann analog zum Vorrat der jährliche laufende Zuwachs der Ertragstafel und unter Verwendung der in Rheinland-Pfalz verwendeten Reduktionstabellen nach Ertragsklasse und Bestockungsgrad bestimmt werden. Dieser wird über Baumartengruppen spezifische Zuwachskorrekturfaktoren an das beobachtete Wachstum in Rheinland-Pfalz angepasst. Die Ermittlung dieser Zuwachskorrekturfaktoren wird weiter unten beschrieben.

Der Holzeinschlag setzt sich aus Vornutzung und Endnutzung zusammen. Die Endnutzung wird initiiert über das Erreichen eines absoluten Alters oder des Alters, in dem der maximale durchschnittliche Gesamtzuwachs erreicht wird. Ab diesem Zeitpunkt wird der Vorrat über einen Endnutzungszeitraum von 10 bzw. 20 Jahren beerntet und mit der abschließenden Räumung in den Folgebestand überführt. Die Vornutzungen werden so bestimmt, dass der Bestockungsgrad der Zielbestockung angenähert wird, der für das jeweilige Grundscenario definiert wurde (vgl. „Definition der Grundscenarios“ auf Seite 13 und weitere Erläuterungen in diesem Kapitel).

Endnutzungen werden eingeleitet, wenn das Alter den für das Grundscenario und die Baumartengruppe definierten Wert übersteigt. Im Fall der Massenoptimierung ist das

genau das Alter, in dem der maximale durchschnittliche Gesamtwuchs durch den Bestand erreicht wird und die Endnutzung wird über 20 Jahre hinweg durchgeführt. Im Fall von Wertoptimierung und Speicheroptimierung sind das Alter des Beginns der Endnutzung und die Endnutzungsdauer in Tabelle 3 für die Baumartengruppen dargestellt. Ebenso enthält Tabelle 3 die Kappungsgrenzen. Alle über diese Kappungsgrenze hinausgehenden Zuwachsmengen werden unmittelbar als ausscheidende Volumina in der Simulation weiter verarbeitet.

Tabelle 3 Beginn der Endnutzung in den Grundszenarien Wertoptimierung und Speicheroptimierung nach dem Bestandesalter sowie die Dauer der Endnutzungsperiode.

Baumartengruppe	Zielalter		Dauer der Endnutzungsperiode [Jahre]	Kappungsgrenze [Vfm]
	Wertoptimierung	Speicheroptimierung		
Kiefer	120	200	40	700
Lärche	65	200	40	1400
Fichte	70	140	20	1200
Douglasie	65	200	40	1400
Eiche	130	300	40	800
Buche	110	200	40	1000
ALN	50	80	20	700

Der ausscheidende Bestand wird während der Endnutzungsphase nach Gleichung (1) bestimmt, wodurch ein gleichmäßiger Abbau des Vorrats in der Endnutzungsphase modelliert wird.

$$(1) \quad V_a = \text{Vorrat} / (\text{Endnutzungsdauer} - \text{Jahr} + \text{Startjahr\_der\_Endnutzung}) ;$$

wobei  $V_a$  das Volumen des ausscheidenden Bestandes bezeichnet

Jede Endnutzungsphase wird mit der Räumung des Altbestandes abgeschlossen und der Folgebestand beginnt mit einem Bestockungsgrad von 1 und einem kalkulierten Alter, das der Hälfte der Endnutzungsdauer des Altbestandes entspricht.

Außerordentliche Endnutzungen können als Ausdruck von Kalamitäten spontan und für den gesamten Bestand erfolgen. Grundsätzlich wird zwischen zwei Typen von Kalamitäten unterschieden. Der erste Typ „Feuer“ führt zur unverzüglichen Freisetzung des ge-

samten oberirdischen Kohlenstoffs. Im BEKLIFUH-Softwaretool wird hierzu der Vorrat auf null gesetzt und ein Folgebestand wird begründet. Die unterirdische Biomasse geht in die unterirdische tote Biomasse über. Die Risiken sind aus bundesdeutschen Statistiken abgeleitet und in Tabelle 4 zusammen gestellt.

Tabelle 4 Risiken für die Kalamitäten Windwurf und Feuer nach bundesdeutschen Statistiken als Prozentangabe des Ereignisses in 100 Jahren

Baumartengruppe	Feuer	Wind
Kiefer	0.169	4.904
Lärche	0.169	14.136
Fichte	0.169	4.904
Douglasie	0.063	2.853
Eiche	0.063	2.853
Buche	0.063	2.853

Der Typ „Wind“ führt zu einer sofortigen Räumung des gesamten Bestandes. Alle Derbholzmengen, die gemäß der Definition des simulierten Grundscenarios (s. Seite 13) nicht als Totholzanteil gelten, werden in diesem Jahr als Holzerntemenge genutzt. Der Totholzanteil des Derbholzes und die gesamte Baumbiomasse unter Derbholzgrenze (vgl. Kapitel 3.1.1.3) gehen in den oberirdischen Totholzspeicher über. Entsprechendes gilt für die gesamte unterirdische lebende Biomasse. Für die Nichtnutzung mit einem Totholzanteil von 100 % geht so die komplette oberirdische Biomasse im Fall von Windwurf über in den Totholzspeicher.

Ist ein Bestand nicht in der Endnutzungsphase, so werden Holzerntemengen aus der Vornutzung berechnet. Liegt der Bestockungsgrad eines Bestandes über dem Zielbestockungsgrad, erfolgt ein reduzierender und damit verstärkter Vornutzungseingriff. Liegt der Bestockungsgrad unter dem Zielbestockungsgrad, so wird die Eingriffsstärke der Vornutzung reduziert, um den Bestockungsgrad anzuheben. Die Veränderung des Bestockungsgrades wird dabei auf 0.2 je Jahrzehnt beschränkt.

Die Anpassung des Zuwachses der ausgewählten Ertragstafeln erfolgt über die Simulation der Bestandesentwicklung in der Periode zwischen den zwei aufeinander folgenden Inventuren von 2002 (BWI 2) und 2012 (BWI 3). Aus den Daten der BWI 2 werden ideelle Reinbestände abgeleitet (vgl. Kapitel 3.1.2.1). Ausgehend von den Bestandesvorräten zum Zeitpunkt der BWI 2 und den Zuwächsen gemäß Ertragstafel und Reduktionstabelle wird

die Bestandesentwicklung bis zum Jahr 2012 (BWI 3) simuliert. Die Holzerntemengen der Bestände werden dabei derart modifiziert, dass deren Summe für jede Baumartengruppe der jährlich beobachteten Holzerntemenge entspricht. Diese Simulation mit Ertragstafelzuwachs und korrigierter Einschlagsmenge führt zu einem Gesamtvorrat je Baumartengruppe zum Zeitpunkt der zweiten Inventur. Durch den Abgleich mit den Vorratssummen, die aus den Daten der zweiten Inventur abgeleitet werden, kann für jede Baumartengruppe und die jeweils spezifizierte Ertragstafel ein Zuwachskorrekturfaktor ermittelt werden. Durch Multiplikation dieser Zuwachskorrekturfaktoren mit dem laufenden jährlichen Zuwachs nach Ertragstafel und Reduktionstabelle wird die Bestandesentwicklung im Zeitraum zwischen BWI 2 und BWI 3 derart simuliert, dass im Jahr 2012 die Summe des Bestandesvorrats je Baumartengruppe dem auf Basis der BWI 3 für Rheinland-Pfalz ermittelten Derbholzvorrat genau entspricht. Unter Verwendung der weiteren bekannten Holzerntemengen konnte für das Jahr 2015 der Ausgangszustand der Wälder in Rheinland-Pfalz für die Szenarienanalyse ermittelt werden.

#### 3.1.1.2 Baumartwechsel nach Endnutzungen

Die Endnutzung wird mit der Räumung des Vorbestandes abgeschlossen. Nach jeder Endnutzung wird die Begründung eines nachfolgenden Bestandes simuliert. Das mittlere Alter des Nachfolgebestandes im Jahr der Räumung des Vorbestandes wird auf die halbe Endnutzungsdauer festgelegt und ggf. gerundet (vgl. Tabelle 3). Im Fall der Bestandesbegründung nach Kalamität wird auf ein Jahr aufgerundet. Jeder neu begründete Bestand hat den Bestockungsgrad eins.

In Zusammenarbeit mit Experten der Landesforsten Rheinland-Pfalz, der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Trippstadt, und dem rheinland-pfälzischen Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten, Mainz, wurden für die Szenarienanalyse Wahrscheinlichkeiten festgelegt, mit denen ein Baumartwechsel mit zur Begründung des Folgebestandes stattfindet. In Tabelle 5 sind für alle Baumartengruppen (s. erste Spalte) die Wahrscheinlichkeiten aufgeführt, mit denen die bisherige Baumart beibehalten wird (Diagonale) oder ein Baumartwechsel zu den in Spalten aufgeführten Baumartengruppen jeweils zu simulieren ist.

Im Fall des Grundszenarios Nichtnutzung werden keine Baumartwechsel simuliert, da keine Waldbewirtschaftung stattfindet und somit auch kein Baumartwechsel forciert

werden kann. Wie sich natürliche Sukzession und interspezifische Konkurrenz zukünftig in einem solchen Szenario auswirken kann im Rahmen der vorliegenden Studie nicht abgeschätzt werden. Es bleibt hier festzuhalten, dass mit der Möglichkeit eines forcierten Baumartwechsels z.B. durch gezielte Voranbauten die Möglichkeit besteht, Anpassungsmaßnahmen an den zu erwartenden Klimawandel durchzuführen.

Tabelle 5      Wahrscheinlichkeiten für die weitere Simulation mit unveränderter Baumartengruppe in der Diagonale und Fettdruck und für den Baumartwechsel nach Endnutzung des Vorbestandes mit der in der ersten Spalte ausgewiesenen Baumartengruppe.

<b>Wahrscheinlichkeit eines Baumartwechsels nach Endnutzung in Abhängigkeit von der vorausgehenden Baumart (Zeilenkopf) in [%]</b>							
<b>von...</b>	<b>zu...</b>						
	Kiefer	Fichte	Douglasie	Eiche	Buche	ALN	Summe
Kiefer	<b>79</b>	0	10	0	11	0	100
Fichte	0	<b>50</b>	25	0	25	0	100
Douglasie	0	0	<b>100</b>	0	0	0	100
Lärche	0	0	<b>100</b>	0	0	0	100
Eiche	0	0	1	<b>97</b>	2	0	100
Buche	0	0	0	0	<b>100</b>	0	100
ALN	0	0	6	0	5	<b>89</b>	100
Zielbestockung 2100	10	10	15	20	37	8	100
Bestockung 2015	15,7	23,0	6,9	21,2	26,4	6,8	100

Die Modellierung von Baumartwechseln führt zur Veränderung der Baumartzusammensetzung. Vor allem für die Baumartengruppen Fichte und Kiefer sind Baumartwechsel relativ wahrscheinlich, die weitere Bewirtschaftung mit derselben Baumartengruppe relativ gering (50 % bzw. 79 %). Die Veränderung tritt umso stärker auf, je häufiger es zu Endnutzungen während des Simulationszeitraums von 2015 bis 2100 kommt. Dies ist wiederum abhängig von der Altersstruktur der Baumartengruppen und damit der Bestände und von der Waldbewirtschaftung im jeweiligen Grundscenario. Die in Tabelle 5 enthaltenen Angaben zur Zielbestockung wurden nicht in der Modellierung berücksichtigt, können aber zur Diskussion der Szenarien-Ergebnisse herangezogen werden.



### 3.1.1.3 Berechnung der Kohlenstoffspeicher

Die berechneten Volumina zu Vorrat, laufendem Zuwachs, Einschlag und Holzernte der simulierten Waldbestände dienen der Beschreibung der Bestandesentwicklung (vgl. Kapitel 3.1.1.1). Die Holzerntemengen incl. der Rinde sind zudem Grundlage für die Simulation der Holzverwendung (Kapitel 3.2). Um die Klimarelevanz der Speicherleistung des Waldes beschreiben und mit den klimarelevanten Leistungen der Holzverwendung vergleichen zu können, müssen die Kohlenstoffgehalte der ober- und unterirdischen, lebenden und toten Biomasse berechnet werden. Zur Transformation von Volumina zu Kohlenstoffgehalt werden Expansionsfaktoren und Dichten von Holz und Rinde zur Bestimmung der Biomassen der auf den Wald bezogenen Kompartimente sowie der Kohlenstoffgehalt der Biomasse herangezogen, wie in diesem Kapitel erläutert wird.

Im Gegensatz zum Volumen des Derbholzvorrats, der in Vorratsfestmeter mit Rinde berechnet und dargestellt wird, werden die Holzerntemengen in Erntefestmeter ohne Rinde (Efm o. R.) berechnet und dargestellt. Um die Erntefestmeter ohne Rinde herzuleiten, wird für jede Baumartengruppe ein spezifischer Rindenanteil an der Derbholzmasse nach den in Tabelle 6 dargestellten Werten berechnet. Die ebenfalls in Tabelle 6 dargestellten Raumdichten für Derbholz und Astholz dienen zur Herleitung der Derbholz Biomasse.

Tabelle 6 Rindenanteil pro Baumartengruppe nach Knigge und Schulz (1966) und Raumdichten nach Kollmann 1951/1982 (zitiert in Umweltbundesamt, 2013)

Baumarten- gruppe	Rindenanteil [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Derbholz]	Raumdichte Derbholz [t/m <sup>3</sup> ]	Raumdichte Astholz [t/m <sup>3</sup> ]
Kiefer/Lärche	0,122	0,44	0,58
Fichte	0,100	0,38	0,51
DGA	0,122	0,41	0,56
Eiche	0,122	0,57	0,61
Buche	0,060	0,56	0,61
ALN	0,100	0,40	0,43

Die Berechnung der Biomasse aus dem Derbholzvolumen folgt der Beschreibung von Mues et al., 2017b, die sich auf die entsprechende Methodik nach Burschel et al. (1993) bezieht. Sie verwendet Expansionsfaktoren, um auf Basis des Derbholzvolumens die ober- und unterirdische Biomasse zu schätzen. Die Differenz aus oberirdischer Biomasse

und Derbholz-Biomasse ist der Anteil unterhalb der Derbholzgrenze von 7 cm, der zur Berechnung der Totholzbiomassen herangezogen wird, wie weiter unten in diesem Kapitel erläutert.

Der Kohlenstoffgehalt wird für die Baumartengruppen generell mit einem Faktor von 0,5 t C pro t Biomasse berechnet (IPCC, 2003, Gleichung 3.2.3 ebenda):

$$(2) \quad \text{Kohlenstoffgehalt [t C]} = 0,5 \text{ [t C/t]} * \text{Biomasse [t]}$$

Vor den Berechnungen zu Derbholzvorräten und Holzerntemengen ist der Abzug der Totholzanteile bereits erfolgt (vgl. Kapitel 3.1.1.1 und Definition der Grundszenarien auf Seite 13). Zusätzlich verbleiben der Anteil an oberirdischer Biomasse unter Derbholzgrenze als auch die gesamte unterirdische Biomasse, die den geernteten Derbholzmengen zuzurechnen sind, als ober- bzw. unterirdische Totholzmengen im Wald. Es findet keine Ernte von Holzbiomasse unter Derbholzgrenze oder von unterirdischer Biomasse statt. Die Biomasse von Boden, Streu, Gräsern, Moosen, Farnen oder Sträuchern sowie die Biomasse tierischen Ursprungs bleiben von der Studie unberücksichtigt.

Die Zersetzung der Totholzbiomasse aus dem Vorjahr ( $C_{tot,t-1}$ ) erfolgt jährlich zu einem Anteil, der mit „Zerfallsrate“ bezeichnet wird. Diese Zerfallsrate wurde spezifisch für die Baumartengruppen und für den ober- bzw. unterirdischen Totholzspeicher in Tabelle 7 definiert:  $Zerfallsrate_{BA,OU}$ .

Tabelle 7 Nach Literaturlauswertungen und generellen Abwägungen zur Zusammensetzung der Totholzmasse gewählte Zerfallsraten für oberirdische und unterirdische tote Biomasse mit entsprechende Halbwertszeiten.

Baumartengruppe	Zerfallsrate oberirdisch [kg/kg Totholz]	Halbwertszeit oberirdisch [Jahre]	Zerfallsrate unterirdisch [kg/kg Totholz]	Halbwertszeit unterirdisch [Jahre]
Kiefer/Lärche	0,08	8,3	0,05	13,5
Fichte	0,08	8,3	0,05	13,5
DGA	0,08	8,3	0,05	13,5
Eiche	0,08	8,3	0,04	17,0
Buche	0,12	5,4	0,06	11,2
ALN	0,12	5,4	0,06	11,2

Der Verbleibende Totholzvorrat wird mit dem Zugang an toter Biomasse ( $C_{tot\_neu}$ ) zur Berechnung des aktuellen Totholzspeichers ( $C_{tot\_t}$ ) addiert:

$$(3) \quad C_{tot\_t} = C_{tot\_t-1} * (1 - \text{Zerfallsrate}_{BA\_OU}) + C_{tot\_neu}$$

Die Halbwertszeit entspricht der Zeitspanne, in der die Hälfte der ursprünglichen Totholzbiomasse bei vorgegebener Zersetzungsrate zersetzt wird. Halbwertszeiten sind für die gewählten Zersetzungsraten für oberirdische und unterirdische tote Biomasse in Tabelle 7 dargestellt.

Die Klimaschutzleistung des Waldes während des Simulationszeitraums lässt sich letztlich über die Vorratsänderungen im lebenden Waldbestand und der während des Simulationszeitraums entstehenden Totholzbiomasse berechnen. Die bereits 2015 vor dem Simulationszeitraum bestehende kann hier vernachlässigt werden, da sie unbeeinflusst von der Waldbewirtschaftung ihrem natürlichen Zerfall überlassen bliebe. Um die Veränderung der Totholzbiomasse unter Einbeziehung auch des zerfallenden anfänglichen Totholzvorrats darstellen zu können (vgl. Kapitel 4.2.2), wurden diese anfänglichen Totholz mengen nach Angaben der BWI 3 geschätzt (s. Kapitel 3.1.2.1)

### 3.1.2 Datengrundlage

Datengrundlage der für Rheinland-Pfalz durchgeführten Szenarienanalyse waren Daten der Bundeswaldinventuren 2002 (BWI 2) und 2012 (BWI 3) sowie zu den in Rheinland-Pfalz realisierten jährlichen Holzerntemenge für den Zeitraum von 2002 bis 2015. Datenquellen und vorbereitende Datentransformationen werden in den folgenden Unterkapiteln 3.1.2.1 und 3.1.2.2 erläutert.

#### 3.1.2.1 Bundeswaldinventur Datenvorbereitung der Inventurdateien zu BWI 2 und BWI 3

In diesem Kapitel werden die für die Studie verwendeten Daten der Bundeswaldinventuren 2002 (BWI 2) und 2012 (BWI 3) beschrieben. Die Daten der 2. und 3. Bundeswaldinventur sind frei zugänglich sind und können als „BWI-Basisdaten“ konnten unter der folgenden URL heruntergeladen werden (Download: 24.10.2016):

<https://bwi.info/Download/de/BWI-Basisdaten/>

Die Daten der BWI 2 und der BWI 3 wurden in Rheinland-Pfalz auf einem verdichteten Raster von 2x2 km<sup>2</sup> erhoben. An jedem Erhebungspunkt („Trakt“) der BWI sind an den jeweils 4 Eckpunkten eines Quadrats mit 150 m Kantenlänge 4 Stichproben erhoben worden. Jeder dieser Eckpunkte ist somit Ausgangspunkt für eine Stichprobennahme mit konzentrischen Probekreisen und repräsentiert eine Fläche, die einem Viertel der 2x2 km<sup>2</sup> und damit 1 km<sup>2</sup> = 100 ha entspricht.

Das Auslesen der für die vorliegende Studie relevanten Daten aus dem Datensatz der Bundeswaldinventur verlangte verschiedene Selektionsschritte, die im Folgenden beschrieben werden. Grundsätzlich werden Daten der BWI 2 und BWI 3 zu den Transekt-Ecken (Tabellen „b2\_ecke\_w“ bzw. „b3\_ecke\_w“), zu den generellen und über die Zeit unveränderlichen Attributen der Transekt-Ecken (Tabelle „b0\_ecke“) und Daten zu den an den Ecken durch Winkelzählproben mit Zählbreite 4 gewählten Bäumen (Tabellen „b2\_baeume\_korr“ bzw. „b3\_baeume“) herangezogen.

#### Selektion 1      Auswahl des Bundeslandes

Im Bundesland Rheinland-Pfalz wurden 8.436 (BWI 2) bzw. 8.467 (BWI 3) Stichprobepunkte erfasst. Die BWI 2 Kategorien produktiver Wald (7.804), unproduktiver Wald (278) und nachträglich Wald (77) entsprechen mit ihren insgesamt 8.159 Ecken der BWI 3 Kategorie bestockter Holzboden mit 8.126 Ecken. Die Zahl der durch die BWI 2 abgedeckten Ecken liegt damit um +0,4 % höher gegenüber derjenigen der BWI 3. Die im Internet unter der URL „<https://bwi.info/start.aspx>“ verfügbare Auswertung zur BWI 3 weist für 2012 in Rheinland-Pfalz im Abschnitt 1.04, Waldfläche nach Baumartengruppen, eine Waldfläche von 807.542 ha auf 8.112 Stichprobenecken aus. Der Anteil temporärer Blößen wurde für die BWI 2 mit 2600 ha und für die BWI 3 mit 2300 ha ermittelt. Über Standortqualitäten und Ertragsklassen oder Baumartenverteilungen können für Stichprobenecken mit Blößen keine Aussagen getroffen werden. Sie sind zudem zum Zeitpunkt der Inventuraufnahme unproduktiv. Da Blößen zudem nur einen geringen Flächenanteil von 0.3% einnehmen, werden sie für die vorliegende Studie nicht berücksichtigt.

Tabelle 8 Anzahl der beprobten Ecken im Bundesland Rheinland-Pfalz nach Waldentscheid der BWI 2 (2002) und der BWI 3 (2012)

<b>Wa = Waldentscheid</b>		<b>Ecken BWI 2, 2002</b>	<b>Ecken BWI 3, 2012</b>
	o. Angabe	52	83
1	produktiver Wald	<b>7.804</b>	
2	unproduktiver Wald	<b>278</b>	
3	Blöße	26	23
4	Nichtholzboden	198	235
5	bestockter Holzboden		<b>8.126</b>
6	nachträglich Nichtwald	1	
7	nachträglich Wald	<b>77</b>	
	bestockter Holzboden	<b>8.159</b>	<b>8.126</b>
	Summe	8.436	8.467

Die für die BWI 2 fett gedruckten Werte entsprechen in ihrer Summe von 8.159 Punkten einer Fläche von 815.900 ha bestockter Holzbodenfläche. Die auswertbare Fläche für Rheinland-Pfalz der BWI 2 ist somit grundsätzlich 815.900 ha (repräsentiert durch 8.159 Traktecken) und die der BWI 3 ist 812.600 ha. Die geringe Abweichung von 0,4 % zwischen beiden Flächen bleibt als Inventurungenauigkeit unberücksichtigt.

#### Selektion 2 Inventur übergreifende Auswertbarkeit

Die inventurübergreifende Auswertbarkeit zwischen BWI 2 und BWI 3 wird in der Logik der BWI-Basisdaten verschlüsselt in der Information „use23“. Ecken, die z.B. während einer der beiden Inventuren nicht begehbar waren, scheiden somit als Datenbasis für die Studie aus. Durch die Verwendung nur solcher Ecken, die mit “100“, gemäß der Schlüsselstabelle x\_use23 dem Code für „Daten verwendet so wie aufgenommen“, verschlüsselt sind und die auch in der jeweils anderen Inventur (b2\_ecke\_w bzw. b3\_ecke\_w) aufgenommen sind, reduziert sich die Zahl der zu berücksichtigenden Traktecken weiter.

### Selektion 3      Verfügbarkeit von Bauminformationen zum Hauptbestand

Für die nach Selektion 2 ausgewählten Traktecken werden in diesem Schritt die verfügbaren Informationen der Einzelbaumdaten zum Hauptbestand zusammen gestellt. Hierbei werden aus den Tabellen b2\_Baeume und b3\_Baeume zu BWI 2 bzw. BWI 3 jeweils Daten zur Bestandesschicht als weiteres Selektionskriterium herangezogen. Nur solche Bäume werden berücksichtigt, die zum Hauptbestand zählen. Plenterwaldstrukturen wurden in Rheinland-Pfalz nicht beobachtet. Bäume in Unterstand, Überhalt und Verjüngung werden nicht berücksichtigt, da der Fortbestand dieser Bestandesschichten nicht als sicher gelten kann und durch diese Entscheidung eine Doppelbelegung der entsprechenden Fläche im Simulationsverlauf vermieden wird.

Tabelle 9      Selektion auf die im Bundesland Rheinland-Pfalz im Rahmen der BWI 2 (2002) und der BWI 3 (2012) aufgenommenen Traktecken mit gemeinsamer Auswertbarkeit und Verfügbarkeit von Baumdaten

<b>Wa = Waldentscheid</b>		<b>Ecken BWI 2, 2002</b>	<b>Ecken BWI 3, 2012</b>
1	produktiver Wald	7.650	
2	unproduktiver Wald	251	
5	bestockter Holzboden	Summe von 1 + 2: 7.901	7.886
<b>Ecken mit Bauminformation</b>		<b>7.813</b>	<b>7.743</b>

Zum Einhängen der Bestände in die Ertragstabellen sind für jeden einzelnen ideellen Reinbestand Angaben zu Alter und Höhe notwendig. Durch das Fehlen dieser Angaben reduzierte sich die Zahl der repräsentierten Ecken auf 7353 mit 55081 Bäumen. Diese repräsentieren letztlich mit einer Flächengewichtung von 110,9 ha eine Holzbodenfläche von 815.447 ha.

Da für die ideellen Bestände über Alter und Höhe Ertragsklassen ermittelt werden mussten, wurde das Baumalter einen Bereich von 2 Ertragsklassen um die von den jeweiligen Ertragstabellen abgedeckten Ertragsklassen beschränkt. Im Fall der BWI 2 (bzw. BWI 3) wurden hierzu insgesamt 4961 (4929) Korrekturen vorgenommen, wobei allerdings nur 853 (1002) Korrekturen um mehr als 10 Jahre betrafen. Immerhin 185 (323) Altersangaben mussten um mehr als 20 Jahre und davon 62 (146) um mehr als 30 Jahre angepasst werden. Über 98 % der Anpassungen (bzw. 97 % im Fall der BWI 3) waren dabei Heraufset-

zungen des Alters und damit Beschränkungen der Ertragsklassen-Einstufung im konservativen Sinne.

Zur Quantifizierung der aktuellen Klimaschutzleistung der Wälder in Rheinland-Pfalz ist eine Abschätzung der Kohlenstoffspeicherung im Totholz (ober- und unterirdisch) zum Beginn der Simulation notwendig. Diese erfolgte auf Basis des oberirdischen Totholzvorrats der BWI 3 für von  $23,1 \text{ m}^3/\text{ha}$  (Totholz ab einem Durchmesser am dickeren Ende von 10 cm; MULEWF, 2015). Aus der Veränderung von  $+2 \text{ m}^3/\text{ha}$  seit der BWI 2 im Jahr 2002 lässt sich eine durchschnittliche jährliche Zunahme von  $0,2 \text{ m}^3/\text{ha}$  Totholz je ha ableiten, was für den Ausgangszustand im Jahr 2015 einen oberirdischen Totholzvorrat von  $23,7 \text{ m}^3/\text{ha}$  ergibt. Das Verhältnis von unterirdischem zu oberirdischem Totholzvorrat im Jahr 2100 über alle Grundscenarien entspricht 1:1, weshalb eine Verdopplung des aktuellen oberirdischen Totholzvorrats zur Schätzung des gesamten aktuellen Totholzvorrats angemessen erscheint. In Anlehnung an die für unterschiedliche Zerfallsstadien und Baumartengruppen dargestellten Biomasseexpansionsfaktoren im nationalen Treibhausgasbericht 2017 (Umweltbundesamt 2017; Tabelle 346) wurde ein mittlerer Faktor von 0,35 gewählt, um die Biomasse für das gemessene Totholzvolumen zu berechnen. Die Multiplikation mit einem Kohlenstoffgehalt von  $0,5 \text{ t C/t}$  ergab einen aktuellen Kohlenstoffvorrat von  $8,3 \text{ t C/ha}$ . Eine mittlere Zerfallsrate von 7 % wurde gewählt, da sich der Ausgangswert von  $23,7 \text{ m}^3/\text{ha}$  auf Totholz stärkerer Dimension beschränkte (vgl. Tabelle 7) und es ergibt sich im Sinne einer gutachterlichen Schätzung für den aktuellen Totholzvorrat der in Kapitel 4.2.2, Abbildung 15 dargestellte Verlauf.

Die BWI gibt auch Auskunft über die Eigentumsart des Waldes an jeder Traktecke. Diese Information ermöglicht auch spezifische Auswertungen für die Waldflächen im Eigentum des Landes. Für den Landeswald kann, anders als im Fall von Kommunal- und Privatwald, unterstellt werden, dass er in seiner Gesamtheit einer Bewirtschaftung nach einheitlichen Richtlinien unterlag. Die aktuelle Klimaschutzleistung wurde als eine solche spezifische Auswertung für den landeseigenen Wald berechnet und in Kapitel 4.1 neben den Ergebnissen des gesamten Landeswaldes dargestellt.

### 3.1.2.2 Holzerntemengen im Anpassungszeitraum 2002 bis 2015

Zur Ableitung der Holzverwendungsdaten wurden die Daten der Jahre 2002 bis 2015 zum Holzeinschlag in Rheinland-Pfalz durch die Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft, Rheinland-Pfalz für die sechs Baumartengruppen der Holzverwendung zusammengestellt (vgl. Kapitel 3.1 und 3.2.2). Die Daten umfassen den Holzeinschlag des Staatswaldes, des Kommunalwaldes und Teile des Privatwaldes und differenzieren in Nutzung als Stamm- und Industrieholz. Der Anteil des Großprivatwaldes an der Holzern-temenge, der durch die vorhandenen Statistiken nicht mit erfasst wird, konnte dem An-teil von Fläche und Vorrat entsprechend mit 3 % der gesamten Holzern-temenge veran-schlagt werden.

Die Holzern-temengen für die Jahre bis 2012 konnten zu den Angaben zum Holzeinschlag der Auswertungen zur BWI 3 in Verhältnis gesetzt werden. Die Verhältniszahlen sind in Tabelle 10 dargestellt und konnten als Korrekturwerte der aus dem Vollzug abgeleiteten Zahlen verwendet werden.

Tabelle 10 Verhältnis von berichteten Produktionsmengen mit Korrektur für den Großpri-  
vatwald zu den Angaben in der Ergebnisdatenbank der BWI, Auswertung 6.03

<b>Baumart</b>	<b>Holzerntemenge</b>	<b>Nutzungsmenge BWI</b>	<b>Abgeleiteter Korrekturfaktor</b>
Kiefer/Lärche	479.337	563.000	1,17
Fichte	1.814.414	2.221.000	1,22
Douglasie	338.121	424.000	1,25
Eiche	270.844	408.000	1,51
Buche	833.565	1.238.000	1,49
ALN	43.061	110.000	2,55



## 3.2 Simulation der Holzverwendung

### 3.2.1 Bewertung der Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung

Die Waldwachstumssimulation berechnet jährliche Holzerntemengen und weist sie getrennt nach den definierten sechs Baumartengruppen aus, wobei die waldbaulich gesondert modellierte Lärche in der Baumartengruppe Kiefer berücksichtigt ist (vgl. Kapitel 3.1.1). Die Holzerntemengen werden im Holzverwendungsmodell hinsichtlich ihrer Klimaschutz- bzw. Kohlenstoffeffekte bewertet. Dazu werden sie entsprechend ihrer holz- oder energiewirtschaftlichen Verwendung zu Produktgruppen (stoffliche oder energetische Nutzung) zugeordnet. Die Erntemengen werden direkt energetisch verwertet (z. B. als Scheitholz oder auch in Heizkraftwerken) oder in der Holzwirtschaft zu Produkten verarbeitet. Bei dem holzwirtschaftlichen Be- und Verarbeitungsprozess fallen Sägenebenprodukte und Resthölzer an. Sie werden in der Holzwerkstoff- oder Papierherstellung zur Herstellung von Produkten eingesetzt oder (direkt oder indirekt) energetisch verwertet. In Bezug auf das Endprodukt der holzwirtschaftlichen Fertigung ist eine eindeutige Zuordnung möglich: Entweder werden Produkte aus Holz mit einer unterschiedlich langen Lebensdauer hergestellt (=stoffliche Verwendung) oder das Holz wurde bzw. wird direkt oder indirekt als Energieträger genutzt (=energetische Verwendung).

Für die Bewertung der Kohlenstoffeffekte bzw. der Klimaschutzleistung der Holzverwendung sind diese Endprodukte am Ort der Verwendung (also in der Form, wie sie z. B. im Dachstuhl als Träger eingebaut sind) bzw. der in ihnen gespeicherte Kohlenstoff die Kalkulationsbasis. Für die Einlagerung in den Holzproduktespeicher ergibt sich der Kohlenstoffeffekt unmittelbar aus der Masse des Kohlenstoffs der Endprodukte, für die CO<sub>2</sub>-Minderungen der stofflichen und energetischen Substitution gemäß der folgenden Formeln (vgl. Knauf et al., 2016):

$$(4) \quad \text{CO}_2\text{-Minderung durch stoffliche Holznutzung} = \text{Kohlenstoff im Fertigprodukt} \times SF_{MA}$$

$$(5) \quad \text{CO}_2\text{-Minderung durch energetische Holznutzung} = \text{Kohlenstoff im Produkt zur energetischen Verwertung} \times SF_{En}$$

Bei den Bezeichnungen  $SF_{Ma}$  und  $SF_{En}$  in den angegebenen Formeln handelt es sich um spezifische Substitutionsfaktoren, die mittels ökobilanziellen Analysen als Vergleich von

Holz mit Nichtholzprodukten für verschiedene Produkte bzw. Produktgruppen ermittelt werden können (vgl. z. B. Frühwald und Knauf, 2014). Für die Bewertung der Kohlenstoffeffekte der Forst- und Holzwirtschaft in Rheinland-Pfalz werden produktspezifische Substitutionsfaktoren in Anlehnung an Knauf et al. (2015) bzw. Knauf und Frühwald (2013) und Frühwald und Knauf (2014) verwendet; diese bei Mues et al. (2017b) begründeten Substitutionsfaktoren sind in Anhang 1 dokumentiert.

Die produktspezifischen Substitutionsfaktoren werden gleichbleibend für den gesamten Simulationszeitraum von 2016 bis 2100 angenommen. Dieser Status-quo-Ansatz bei der Bewertung der Kohlenstoffeffekte wird von Knauf (2016), nach Abwägung mit anderen Bewertungsansätzen für die Bewertung der Substitution fossiler Energieträger durch Holz favorisiert und ist die Grundlage der für Rheinland-Pfalz verwendeten Simulation<sup>2</sup>.

Da die endgültige Verwendung des Holzes die Grundlage zur Berechnung der Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung darstellt, ist es notwendig, das im Waldwachstumsmodell anfallende Rohholz entsprechend den Endprodukten zuzuordnen. Abbildung 2 illustriert das Prinzip der Zuordnung der Holzermengungen zu den zur Bewertung der Kohlenstoffeffekte relevanten Verwendungen (Endprodukte bzw. Fertigprodukte).

---

<sup>2</sup> Die beiden anderen Bewertungsansätze, die Knauf (ebd.) dagegen abwägt, sind der Ansatz, der einen zukünftig CO<sub>2</sub>-reduzierten Energiemix annimmt und alternativ ein Ansatz, der den Grenznutzen der Substitution des fossilen Energieträgers mit den höchsten CO<sub>2</sub>-Emissionen bewertet (Braunkohle). Der Ansatz mit der Betrachtung des Grenznutzens zur Berechnung der Substitutionseffekte würde der Tatsache gerecht werden, dass Erneuerbare Energien fossile Energien ersetzen. Aus inhaltlichen Gründen empfiehlt Knauf (ebd.) diesen Ansatz. Auf Basis dieses Ansatzes errechnen sich höhere positive Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung. Der gewählte Status-quo-Ansatz stellt demgegenüber einen konservativeren Ansatz dar, für den Knauf (ebd.) eine größere Akzeptanz erwartet.

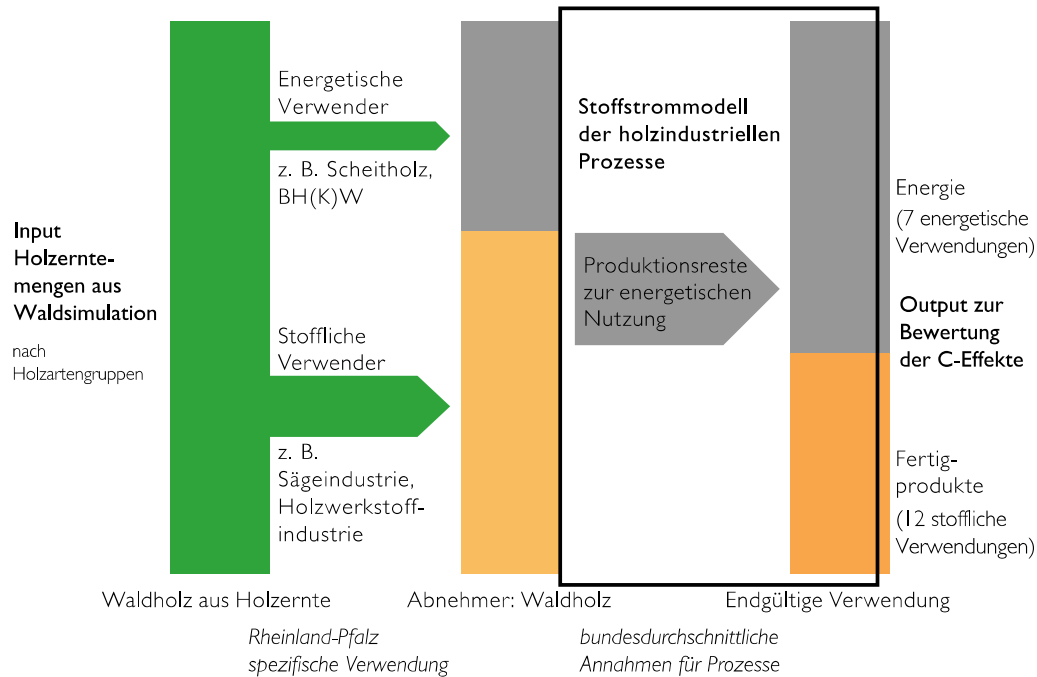


Abbildung 2 Das Prinzip der Zuordnung der Holzermengungen als Ergebnis der waldbaulichen Simulation zu den für die Bewertung der Kohlenstoffeffekte relevanten Verwendungen (Darstellung in Anlehnung an das Holzverwendungsmodell für Bayern in Friedrich und Knauf, 2016)

Die Holzermengungen, die sich als Ergebnis der Waldwachstumsmodellierung ergeben, werden gemäß eines Rheinland-Pfalz spezifischen Verwendungsschlüssels in der 1. Absatzstufe simuliert. Die Annahmen bezüglich dieses Verwendungsschlüssels werden in Kapitel 4.3.2 dargestellt. Für den weiteren holzwirtschaftlichen Prozess wird ein Stoffstrommodell verwendet, das den Holzmarkt und die Stoffströme des Holzes in Deutschland möglichst genau abzubilden versucht (vgl. auch Mues et al, 2017b). Dieses Modell wurde auf Basis verschiedener Veröffentlichungen zum Holzmarkt entwickelt. Die Zuordnung der Holzermengungen zu verschiedenen Verwendungszwecken (stoffliche und energetische Verwendungen) erfolgte u. a. auf Basis der Analyse von Jochem et al. (2015) für den Durchschnitt der Jahre 2009–2013 und für die (prozentuale) Zuordnung zu den Endprodukten u. a. auf Basis von Mantau und Bilitewski (2010). Diese zu Grunde liegenden Literaturangaben differenzieren jedoch lediglich in die Verwendung von Laub- und Nadelholz. Die für das Standardmodell notwendige Zuordnung zu je drei Baum- bzw. Holzartengruppen der Laub- und Nadelholzbaumarten erfolgte auf Basis der Holzmarktberichterstattung (z. B. BMEL, 2015), die in vier Hauptbaumartengruppen unterscheidet. Da die Holzmarktberichterstattung keine Aussagen über die Holzverwendung der Hölzer macht, die der Baumartengruppe Douglasie bzw. der Baumartengruppe ALN zugeordnet

sind, werden die für die Baumartengruppe Fichte bzw. Baumartengruppe Buche abgeleiteten Verwendungen auf diese Baumartengruppen übertragen.

### 3.2.1.1 Holzproduktespeicher

Bei einer stofflichen Verwendung verbleibt der Kohlenstoff bis zu seinem Ausscheiden im Holzproduktespeicher. Es wird angenommen, dass die Holzprodukte nach Erreichen der durchschnittlichen Lebensdauer aus dem Holzproduktespeicher ausscheiden. Im Modell sind Werte für die produktspezifische durchschnittliche Lebensdauer hinterlegt; diese ergeben sich auf Basis von Literaturangaben (z. B. IEMB, 2006 oder BBSR, 2011) oder wurden durch Expertenschätzungen abgeleitet. Die durchschnittliche Lebensdauer beschreibt also, wie lange sich die Holzprodukte im Holzproduktespeicher befinden. Produkte werden, gemäß dem zugrundeliegenden Stoffstrommodell, bei Ausscheiden aus der Verwendung zu 16 % einem stofflichen Recycling und zu 64 % der energetischen Verwendung zugeführt. Der Rest (20 %) wird als direkte CO<sub>2</sub>-Emission (biologischer Abbau) betrachtet und modelliert. Mit diesen Annahmen werden heutige Marktverhältnisse unterstellt (vgl. Knauf und Frühwald, 2013).

Für den Vergleich der Szenarien zur zukünftigen Waldbewirtschaftung ist die Information der Anfangsbestände des Holzproduktespeichers entbehrlich. Der Vergleich geht davon aus, dass die schon vorhandenen Holzprodukte bei allen Szenarien die gleiche Verweildauer im Holzproduktespeicher haben. Dieser Wert würde in allen Szenarien hinzuzugaddiert, so dass es für den Vergleich der verschiedenen Szenarien untereinander irrelevant ist. Für die Darstellung der aktuellen Klimaschutzleistung in Kapitel 4.1 ist jedoch eine Abschätzung des aktuellen Holzprodukt pools sowie zu dessen Verwendung nötig.

Die aktuelle Klimaschutzleistung des Waldes in Rheinland-Pfalz wird in Kapitel 4.1 dargestellt und bezieht sich auf die Jahre 2013 bis 2015. Die Veränderung des Holzproduktespeichers in diesem Zeitraum wird abgeschätzt, indem ein Anteil von 30 % des Inputs von mittel- und langlebigen Holzprodukten in den Holzproduktespeicher als Nettoinput betrachtet wird. Diese Zahl basiert auf einer Abschätzung, die sich auf Basis der Auswertung der Analysen von Bösch et al. (2015) und Jochem et al. (2015) für das Jahr 2010 ergibt. Um die Auswirkung eines davon abweichenden Prozentsatzes beurteilen zu können, wird in einer Sensitivitätsbetrachtung mit einem Nettoinput von 20 % und 40 % für die Holzprodukte mit einer mittleren oder langen Lebensdauer gerechnet.

Für 20 % der aus dem Holzproduktespeicher ausscheidenden Produkte wird ein Recycling (Herstellung von Spanplatten) angenommen, weitere 20 % gehen verloren und 60 % werden energetisch verwertet. Die damit jeweils verbundenen Substitutionseffekte (stofflich, energetisch) werden in der Berechnung der jährlichen Klimaschutzleistung berücksichtigt.

### 3.2.1.2 Verwertung der Rinde

Neben dem Derbholz ohne Rinde liegt auch die Rinde vor, deren Verwendung auch mit einem entsprechenden Kohlenstoffeffekt verbunden ist, der im Holzverwendungsmodell berücksichtigt wird. Entsprechend der heute üblichen Verwendung wird davon ausgegangen, dass bei einer Belieferung von energetischen Verwendern die Rinde vollständig zu Energiezwecken genutzt wird. Bei der Belieferung von stofflichen Verwendern (z. B. Sägewerke) wird davon ausgegangen, dass 80 % der Rinde energetisch genutzt werden; für 20 % wird eine sonstige Verwendung angenommen (z. B. Mulch für den Einsatz im Garten- und Landschaftsbau oder der Tierhaltung), wobei von einer sofortigen Emission ohne die Substitution fossiler Energieträger ausgegangen wird. Anhang 1 zeigt die definierten Produktgruppen mit den angenommenen spezifischen Produktlebensdauern und Substitutionsfaktoren. Die Tabelle enthält in der Kommentarspalte Informationen zu den getroffenen Annahmen.

### **3.2.2 Annahmen zur Rheinland-pfälzischen Holzverwendung in der 1. Absatzstufe und Ableitung eines Basisszenarios für die Holzverwendung**

Die waldbauliche Simulation liefert Szenarien spezifisch neben den Daten zur Vorratsentwicklung und der Veränderung des Kohlenstoffspeichers im Wald (Waldspeicher) auch Erntemengen, die holzwirtschaftlich genutzt werden (inklusive energetische Nutzung). Diese Erntemengen bilden den Ausgangspunkt der Analyse der Klimaschutzleistung der Holzverwendung (vgl. die Darstellung in Abbildung 2). Zur Simulation der Holzverwendung wurden die in Rheinland-Pfalz verfügbaren Daten zum Holzeinsatz ausgewertet und darauf aufbauend ein Rheinland-Pfalz spezifisches individuelles Stoffstrom- und Verwendungsmodell entwickelt. Datengrundlage sind in erster Linie die durch die Landesforsten Rheinland-Pfalz bereitgestellten Informationen zur Holzverwendung (stofflich wie energetisch) bzw. zum Holzverkauf nach Sortimenten. Neben der Simulation eines Standardmodells (= Basisszenario der Holzverwendung) wird das Holzverwendungsmodell durch verschiedene Szenarien für die Holzverwendung angepasst (Kapitel 3.2.3), u. a. wird a) eine verstärkte stoffliche Holznutzung des anfallenden Laubholzes wie auch b) eine ausschließlich energetische Nutzung abgebildet. Durch diese veränderten bzw. extremen Annahmen für die Holznutzung kann gezeigt werden, dass neben den Maßnahmen der Waldbewirtschaftung auch die Art der Holzverwendung eine hohe Relevanz hat.

Zur Ableitung der Holzverwendungsdaten wurden die Daten zum Holzeinschlag in Rheinland-Pfalz ausgewertet. Sie wurden durch die Landesforsten Rheinland-Pfalz nach den für die Szenarienanalyse definierten Baumartengruppen (vgl. Kapitel 3.1) für den Zeitraum 2002–2015 (Stand 28.11.2016) zur Verfügung gestellt. Die Daten umfassen den Holzeinschlag des Staatswaldes, des Kommunalwaldes und Teile des Privatwaldes und differenzieren in Nutzung als Stamm- und Industrieholz; daneben wird auch das nicht genutzte Holz (NH) ausgewiesen. Zur Plausibilitätsprüfung und Ergänzung wurden auch die Daten der amtlichen Holzeinschlagstatistik mit Einschlagsdaten für 2016 (zuletzt Destatis, 2017) berücksichtigt. Die amtliche Statistik (ebd.) unterscheidet auf Ebene der Bundesländer – so auch für Rheinland-Pfalz – die vier Baumartengruppen 1) Eiche, 2) Buche und sonstiges Laubholz, 3) Kiefer und Lärche und 4) Fichte, Tanne, Douglasie und sonstiges Nadelholz. Als zusätzliche Information wird das Holz, das als Energieholz genutzt wird, differenziert. Über eine weitere Sonderauswertung der Landesforsten Rheinland-Pfalz zu

den Verkaufsmengen zwischen 2011–2015 lässt sich die Verwendung des Industrieholzes analysieren: 30 % des Industrieholzes in diesem Zeitraum wurden in der Zellstoff- und Papierindustrie eingesetzt und 70 % in der Holzwerkstoffindustrie. Diese Verteilung wird für die Erntemengen aller Baumartengruppen im Basisszenario der Holzverwendung angenommen. Das in der amtlichen Statistik und den Informationen der Landesforsten Rheinland-Pfalz als Stammholz ausgewiesene Sortiment wird in Sägewerken und weiteren Stammholz bearbeitenden Betrieben, z. B. Furnierwerke, eingesetzt (im Weiteren als Sägeindustrie bezeichnet).

Auf Basis dieser unterschiedlichen Datenquellen wird – basierend für den Zeitraum 2011–2016 – ein Holzverwendungsmodell für die primäre Holzverwendung abgeleitet und als Grundlage für die Simulation verwendet. Dabei werden die primären Einsatzorte 1) Sägeindustrie, 2) Holzwerkstoffindustrie, 3) Zellstoff- und Papierindustrie und 4) Energie unterschieden. Für die Baumartengruppe Douglasie wird die Holzverwendung der Fichte und für die Baumartengruppe ALN die Holzverwendung der Buche zugrunde gelegt. Diese Annahme für die Baumartengruppen mit (heute noch) geringen Holzerntemengen orientiert sich damit an der Erwartung der zukünftigen Nutzungen aus holztechnologischer Sicht. Es wird auf Basis der Studie von Stelter et al. (2011) davon ausgegangen, dass 90 % der zur energetischen Verwertung vorgesehenen Erntemengen als Scheitholz eingesetzt werden und 10 % in Biomasseheiz(kraft)werken.

Das Holzverwendungsmodell für die erste Absatzstufe ist in Tabelle 11 dargestellt; es bildet die Grundlage für das Basisszenario der Holzverwendung. Für dieses Basisszenario werden die Ergebnisse in Kapitel 4.1 dargestellt und analysiert.

Tabelle 11 Holzverwendung in der 1. Absatzstufe in Rheinland-Pfalz als Grundlage des Basisszenarios der Holzverwendung

	<b>Sägewerke</b>	<b>HWI</b>	<b>Papier</b>	<b>Energie</b>	<b>Summe</b>
Kiefer/Lärche	65 %	22 %	9 %	4 %	100 %
Fichte	75 %	16 %	7 %	2 %	100 %
Douglasie	75 %	16 %	7 %	2 %	100 %
Eiche	27 %	8 %	3 %	62 %	100 %
Buche	20 %	16 %	6 %	58 %	100 %
ALN	20 %	16 %	6 %	58 %	100 %

### 3.2.3 Szenarien, die das Basisszenario variieren

Neben dem Basisszenario der Holzverwendung werden weitere Szenarien der Holzverwendung betrachtet, die Varianten bzw. Extreme der Holzverwendung abbilden; diese Variationen können sich auf den Rohstoffeinsatz in der 1. Absatzstufe beziehen oder auf den holzwirtschaftlichen Fertigungsprozess, wie er in Abbildung 2 dargestellt ist.

Um die Auswirkungen eines unterschiedlichen Rohstoffeinsatzes in der 1. Absatzstufe zu analysieren, werden folgende drei Szenarien der Holzverwendung betrachtet:

- 1) Verstärkte Nutzung des Laubholzes in stofflichen Verwendungen auf dem Niveau des Anteils von vor 15 Jahren (vgl. Jochem et al., 2015). Der Anteil des für Energiezwecke genutzten Holzes wird dabei mit 40 % angenommen; dabei wird unterstellt, dass das bislang energetisch genutzte Holz stattdessen zu ca. 1/3 als Stammholz genutzt wird und zu 2/3 als Industrieholz in der Holzwerkstoffindustrie. Die Verteilung ist in Tabelle 12 dargestellt. Ergebnisse, die sich auf Basis dieses Szenarios ergeben, finden sich in Kapitel 4.4.3.1.
- 2) Möglichst vollständige Nutzung des Laubholzes in stofflichen Verwendungen in der 1. Absatzstufe; im Sinne der Kaskadennutzung eine erst stoffliche und dann energetische Holzverwendung (Fraanje, 1997; BMELV, 2008; Frühwald et al., 2010; Arnold et al., 2009; Höglmeier et al., 2013). Ein Anteil einer direkten energetischen Nutzung von 10 % wird aus technischen Gründen angenommen. Es wird die Annahme getroffen, dass das bislang energetisch genutzte Holz im selben Maße als Stammholz genutzt wird wie unter 1) und ansonsten als Industrieholz in der Holzwerkstoffindustrie. Die Verteilung ist in Tabelle 13 dargestellt, die Ergebnisse dieses Szenarios der Holzverwendung in Kapitel 4.4.3.2.
- 3) Vollständige Nutzung des anfallenden Holzes zu energetischen Zwecken (Tabelle 14). Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 4.4.3.3.



Tabelle 12 Holzverwendung in der 1. Absatzstufe in Rheinland-Pfalz als Grundlage eines Szenarios der verstärkten stofflichen Holznutzung des Laubholzes

	<b>Sägewerke</b>	<b>HWI</b>	<b>Papier</b>	<b>Energie</b>	<b>Summe</b>
Kiefer/Lärche	65 %	22 %	9 %	4 %	100 %
Fichte	75 %	16 %	7 %	2 %	100 %
Douglasie	75 %	16 %	7 %	2 %	100 %
Eiche	34 %	23 %	3 %	40 %	100 %
Buche	26 %	28 %	6 %	40 %	100 %
ALN	26 %	28 %	6 %	40 %	100 %

Tabelle 13 Holzverwendung in der 1. Absatzstufe in Rheinland-Pfalz als Grundlage eines Szenarios der möglichst vollständigen stofflichen Holznutzung des Laubholzes in der 1. Absatzstufe

	<b>Sägewerke</b>	<b>HWI</b>	<b>Papier</b>	<b>Energie</b>	<b>Summe</b>
Kiefer/Lärche	65 %	22 %	9 %	4 %	100 %
Fichte	75 %	16 %	7 %	2 %	100 %
Douglasie	75 %	16 %	7 %	2 %	100 %
Eiche	34 %	53 %	3 %	10 %	100 %
Buche	26 %	58 %	6 %	10 %	100 %
ALN	26 %	58 %	6 %	10 %	100 %

Tabelle 14 Holzverwendung in der 1. Absatzstufe in Rheinland-Pfalz als Grundlage des Szenarios der Holzverwendung mit einer ausschließlich energetischen Verwertung des Holzes

	<b>Sägewerke</b>	<b>HWI</b>	<b>Papier</b>	<b>Energie</b>	<b>Summe</b>
Kiefer/Lärche	0 %	0 %	0 %	100 %	100 %
Fichte	0 %	0 %	0 %	100 %	100 %
Douglasie	0 %	0 %	0 %	100 %	100 %
Eiche	0 %	0 %	0 %	100 %	100 %
Buche	0 %	0 %	0 %	100 %	100 %
ALN	0 %	0 %	0 %	100 %	100 %

Eine weitere Variation des Basisszenarios der Holzverwendung bezieht sich nicht auf den Rohstoffeinsatz in der 1. Absatzstufe, sondern auf die Erhöhung der (stofflichen) Ausbeuten im holzwirtschaftlichen Fertigungsprozess. In diesem weiteren Szenario wird simuliert, wie es sich auf die Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung auswirkt, wenn in den Verwertungswegen Säge- und Holzwerkstoffindustrie der Anteil des stofflichen genutzten Holzes (bezogen auf den Verwendungsort) zu Lasten der energetischen Nutzung erhöht wird. Dies kann fertigungstechnisch durch eine Erhöhung der Ausbeuten erfolgen oder durch eine Umleitung der Stoffströme der Nebenprodukte bzw. der Resthölzer in stoffliche statt energetischer Verwendungen. Die Ergebnisse werden in Kapitel 4.4.4 dargestellt.

## 4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Szenarienanalyse dargestellt. Dies geschieht zunächst für die waldbauliche Simulation in Kapitel 4.1. Veränderungen der Kohlenstoffspeicher in lebender und toter Biomasse des Waldes resultieren aus Kohlenstoffspeicherung und Zuwachs auf der einen und die Reduzierung durch Zersetzung toter Biomasse und Kohlenstoffexport in Form von Holzerntemengen auf der anderen Seite. Die Veränderungen von Volumen (s. Kapitel 4.2.1) und Kohlenstoffeffekten (Kapitel 4.2.2) auf Grund der waldbaulichen Szenarien werden hier vorgestellt ebenso, wie die Ergebnisse zu den Holzerntemengen (Kapitel 4.2.3).

In Kapitel 4.3 werden die Ergebnisse der Holzverwendungsszenarien in Bezug auf die Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten und auf die stoffliche und energetische Substitution dargestellt und erläutert. Die gesamthafte Darstellung der Ergebnisse aus Waldbau- und Holzverwendungssimulation findet sich in Kapitel 4.4.

### 4.1 Aktuelle Klimaschutzleistung des Waldes in Rheinland-Pfalz (2013-2015)

Die Höhe der durch zukünftige Waldbewirtschaftung zu erzielenden Klimaschutzleistungen ist auch in Relation zur aktuellen Klimaschutzleistung zu beurteilen. Daher wurden die Simulationsergebnisse zur Waldbewirtschaftung für die Jahre 2013 und 2015 zur Berechnung der aktuellen Klimaschutzleistung des Waldes in Rheinland-Pfalz herangezogen. Verzerrungen durch die Sonderereignisse eines einzelnen Jahres werden dadurch vermieden. Die vorherige dritte Bundeswaldinventur erlaubt eine relativ zuverlässige Einschätzung des Totholzspeichers zum Jahr 2012. Die Holzerntemengen in den Jahren 2013 bis 2015 sind zudem nicht mehr geprägt von den Kalamitätsmengen im Nachgang des Orkantiefs Xynthia im Februar 2010.

Die Klimaschutzleistung des Waldes wird erzielt durch die Speicherung von zusätzlichem Kohlenstoff im Wald oder in Holzprodukten zum Ende des Zeitraums im Verhältnis zur Ausgangssituation sowie durch die Substitution anderer Materialien zur stofflichen Verwendung oder zur energetischen Verwendung. Die Berechnung dieser vier Komponenten

folgt den in Kapitel 3 dargestellten Annahmen und Methoden. Die zum Holzproduktespeicher getroffenen spezifischen Annahmen sind in Kapitel 3.2.1.1 beschrieben.

Tabelle 15 Aktuelle durchschnittliche jährliche Klimaschutzleistung der Forst- und Holzwirtschaft in Rheinland-Pfalz für den Zeitraum 2013 bis 2015

Klimaschutz	Klimaschutzleistung	
	[t C/a]	[t CO <sub>2</sub> /a]
Waldspeicher	1 025 400	3 763 218
Holzproduktespeicher	127 200	466 824
Energiesubstitution	515 300	1 891 151
Materialsubstitution	706 800	2 593 956
<b>Summe</b>	<b>2 374 700</b>	<b>8 715 149</b>

Die aktuellen Werte der Klimaschutzleistung von jährlich 2,37 Mio. t C bewegen sich in ähnlicher Höhe wie die jährliche Klimaschutzleistungen im Zeitraum 2016-2030 des Grundszenarios Wertoptimierung von 2,47 Mio. t C oder des Kombinationsszenarios Standard von 2,45 Mio. t C (s. Tabelle 25 und Tabelle 26).

Die wissenschaftlichen Beiräte für Waldpolitik sowie Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz (2016) quantifizieren den Beitrag der deutschen Forst- und Holzwirtschaft zum Klimaschutz mit 127 Mio. t CO<sub>2</sub>/Jahr (2014). Gemessen am Anteil der Waldfläche Rheinland-Pfalz an der bundesdeutschen Waldfläche sollte die jährliche Klimaschutzleistung höher liegen und der Beitrag von 8,715 Mio. t CO<sub>2</sub> entspricht nur 93 % dieser Menge. Die ermittelten Werte erscheinen plausibel angesichts der schon aktuell durch trockene und relativ warme Standorte geprägten Bewaldung und der im letzten Jahrzehnt aufgetretenen Orkane Kyrill (2007) und Xynthia (2010). Zudem trägt der überdurchschnittlich hohe Laubholzanteil dazu bei, dass unter den derzeitigen Gegebenheiten die Klimaschutzleistung in Rheinland-Pfalz geringfügig unter dem Bundesdurchschnitt liegt.

Alternativ zur Annahme von 30 % Nettoinput zum Holzproduktespeicher (vgl. Kapitel 3.2.1.1) wurden die Holzproduktespeicher auch mit Werten von 40 % bzw. 20 % Nettoinput berechnet. Dies führte zu Erhöhung bzw. Verringerung der jährlichen Klimaschutzleistung um 0,6 %. Der eventuelle Fehler durch die getroffene Annahme ist somit eher gering.

Auf Speichereffekte gehen 1,15 Mio. t C der aktuellen Klimaschutzleistung zurück, die Effekten der Energiesubstitution und der Materialsubstitution erzielten jährliche Klimaschutzleistungen in Höhe von 1,22 Mio. t C. Während die Speicherung von Kohlenstoff im Wald oder im Holzproduktespeicher umkehrbar ist, sind Einsparungen durch energetische oder Materialsubstitution unumkehrbar.

Die in Tabelle 16 dargestellten Klimaschutzleistungen des landeseigenen Waldes liegen in Summe bei etwa 25,4 % der Klimawirkung des gesamten Waldes in Rheinland-Pfalz, was dem Flächenanteil des Staatswaldes von 25,6 % entspricht. Der Anteil des Staatswaldes an der Erhöhung des Waldspeichers beträgt nur 14,6 % der Klimaschutzleistung des gesamten Waldes. Durch überdurchschnittliche Holzerntemengen trägt der Staatswald zu ca. 33 % zur Erhöhung des Holzproduktespeichers und zu den Substitutionseffekten bei.

Tabelle 16 Aktuelle durchschnittliche jährliche Klimaschutzleistung der Forst- und Holzwirtschaft bezogen für den landeseigenen Wald und den Zeitraum 2013 bis 2015

Klimaschutz	Klimaschutzleistung		Anteil an landesweiter Klimaschutzleistung
	[t C/a]	[t CO <sub>2</sub> /a]	
Waldspeicher	150 100	550 867	14.6%
Holzproduktespeicher	41 100	150 837	32.3%
Energiesubstitution	169 200	620 964	32.8%
Materialsubstitution	243 400	893 278	34.4%
<b>Summe</b>	<b>603 800</b>	<b>2 215 946</b>	<b>25.4%</b>

## 4.2 Waldbauliche Szenarien

Die Ergebnisse zu den waldbaulichen Grund- und Kombinationsszenarien zur zukünftigen Entwicklung der Klimaschutzleistung des Waldes in Rheinland-Pfalz (vgl. Kapitel 3.1.1) werden in diesem Kapitel dargestellt. Die Grundszenarien Massenoptimierung, Wertoptimierung, Speicheroptimierung und Nichtnutzung zeigen z. T. deutlich divergierende Entwicklungen der Waldbestände in Rheinland-Pfalz (z.B. Abbildung 6, Seite 48). Im Unterkapitel 4.2.1 wird für die Grund- und Kombinationsszenarien allgemein und teils beispielhaft am Beispiel des Grundszenarios Massenoptimierung erläutert, welche Effekte die waldbaulichen Szenarien auf die Waldbestände und deren Zuwachs und die Holzerntemengen haben und wie sich diese teils gegenseitig bedingen.

In Kapitel 4.2.2 wird die Kohlenstoffspeicherung in lebender und toter Biomasse (ober- und unterirdisch) als Resultat vom Ausgangszustand der Waldbestände, der Holzernte und der Zuwachsentwicklung für alle Grund- und Kombinationsszenarien dargestellt. Die Berechnung von Kohlenstoffgehalten ermöglicht den direkten Vergleich der Ergebnisse verschiedener Bestandteile des Waldspeichers sowie die vergleichende Darstellung für verschiedene Szenarien oder Baumartengruppen.

In Kapitel 4.2.3 sind die Holzerntemengen zusammengestellt, welche ein wichtiges Ergebnis der waldbaulichen Simulation und die Grundlage für die anschließende Berechnung der Holzverwendung darstellen.

### 4.2.1 Bestandesentwicklung

Die Berechnungen zur vorliegenden Studie wurden mit ideellen Reinbeständen durchgeführt (Kapitel 3.1.2.1), wobei jeder Reinbestand einer Baumartengruppe angehört. Zur Bestandesentwicklung wird zunächst die Verteilung von Fläche und Vorrat auf diese Baumartengruppen dargestellt. Es folgen Ergebnisse zu Zuwachs, zu Holzernte und zu Auf- und Abbau des Totholzspeichers.

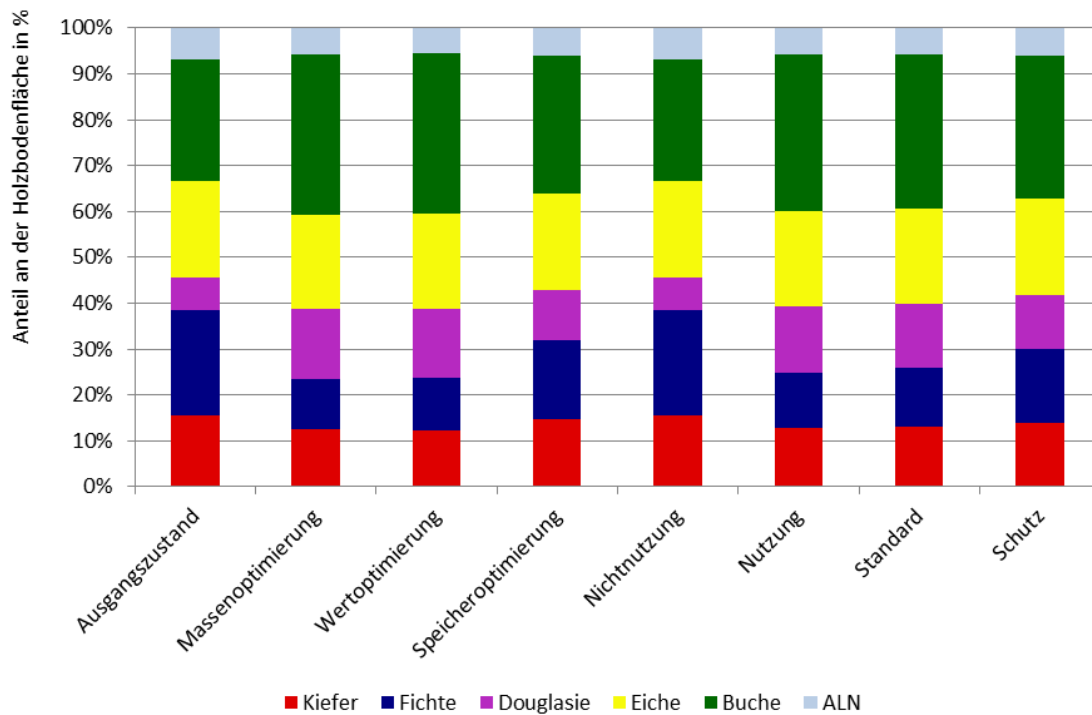


Abbildung 3 Flächenanteil der sechs Baumartengruppen an 815 447 ha Holzbodenfläche zum Start der Szenarienanalyse im Jahr 2015 („Ausgangszustand“) und zum Ende des Simulationszeitraums im Jahr 2100 für die Grund- und Kombinationsszenarien

Abbildung 3 zeigt links den Ausgangszustand der Flächenverteilung auf die sechs Baumartengruppen im Jahr 2015 vor der Szenarienanalyse, die sich auf den Zeitraum 2016 bis 2100 erstreckt. Im Jahr 2015 verteilen sich die 815 447 ha Holzbodenfläche auf ideale Reinbestände der Baumartengruppen, wie in Tabelle 17 als „Ausgangszustand“ dargestellt. Dazu sind die Anteile der Baumartengruppen für die Grund- und Kombinationsszenarien zum Ende des Betrachtungszeitraums im Jahr 2100 aufgeführt. Auffallend sind die bundesweit höchsten Anteile von Eiche mit 21 % und Douglasie mit 7 % der Fläche im Ausgangszustand. Der für die Szenarien beschriebene Zustand zum Ende des Betrachtungszeitraums von 2016 bis 2100 macht deutlich, dass die Anteile von ALN, Kiefer und vor allem Fichte teilweise sehr stark zu Gunsten von Buche und Douglasie verschoben werden.

Tabelle 17 Flächenanteil der Baumartengruppen vor (Ausgangszustand 2015, absolute Flächen in [ha] und Anteile in [%]) und zum Ende der Szenarienanalyse von 2016 bis 2100; Angaben als Anteil an der Gesamtfläche in [%]

	Kiefer	Fichte	Douglasie	Eiche	Buche	ALN
2015:						
Ausgangszustand 2015	127.856 ha 16 %	187.154 ha 23 %	56.542 ha 7 %	172.743 ha 21 %	216.038 ha 26 %	55.114 ha 7 %
2100:						
Massenoptimierung	13 %	11 %	15 %	21 %	35 %	6 %
Wertoptimierung	12 %	11 %	15 %	21 %	35 %	6 %
Speicheroptimierung	15 %	17 %	11 %	21 %	30 %	6 %
Nichtnutzung	16 %	23 %	7 %	21 %	26 %	7 %
Nutzung	13 %	12 %	15 %	21 %	34 %	6 %
Standard	13 %	13 %	14 %	21 %	33 %	6 %
Schutz	14 %	16 %	12 %	21 %	31 %	6 %

Die Flächenanteile in Tabelle 17 zeigen, dass vor allem für die Grundszenarien Massenoptimierung und Wertoptimierung ein deutlich höherer Anteil von Buche und Douglasie bei Abnahme der Anteile von ALN, Kiefer und vor allem Fichte erreicht wird. Die Parameter des Baumartwechsels (Tabelle 5) sehen für alle Szenarien vor, dass nach Endnutzungen von Fichte 50 % und nach Endnutzung von Kiefer 5 % der Bestände zu Buche oder Douglasie umgewandelt werden. Die beiden Grundszenarien Massenoptimierung und Wertoptimierung sehen im Vergleich zu den anderen Szenarien relativ frühe Endnutzungen vor (Tabelle 3), was in einem entsprechend häufigen Baumartwechsel von 2016 bis 2100 resultiert. Der Anteil der Kiefer sinkt von ursprünglich 16 % auf 12 %, der Fichtenanteil sinkt von 23 % auf knapp über 11 %. Der Anteil der Buche steigt durch den Baumartwechsel von ursprünglich 26 % auf 35 %. Der Anteil der Douglasie an der Fläche steigt um rund 8 % von 7 % auf 15 %.

Im Grundszenario Speicheroptimierung setzen Endnutzungen sehr viel später ein (vgl. Tabelle 3). Dadurch treten im Simulationszeitraum Endnutzungen seltener auf. Dies führt zu vergleichsweise geringen Verschiebungen der Flächenanteile von Fichte und Kiefer hin zu Buche oder Douglasie. Der Anteil von Fichte sinkt von 23 % auf 17 %, der von Kiefer von 16 % nur um einen Prozentpunkt auf 15 %. Für Eiche und ALN sind nur geringe Anteile von 3 % bzw. 11 % der Bestände für einen Baumartwechsel zu Buche oder Douglasie definiert (s. Tabelle 5). Douglasien und Buchenbestände werden zu 100 % mit derselben Baumartengruppe verjüngt, weshalb im Fall der Endnutzung kein Baumartwechsel erfolgt.



Im Fall der Nichtnutzung sind keine Endnutzungen vorgesehen und auch im Fall von Kalamitäten (z.B. Sturm oder Feuer, vgl. Tabelle 3) werden keine Baumartwechsel simuliert. Daher bleiben bis zum Jahr 2100 die Flächenanteile der Baumartengruppen gegenüber 2015 unverändert.

In Abbildung 4 werden für alle Grund- und Kombinationsszenarien die Derbholzanteile der Baumartengruppen vor (Ausgangszustand im Jahr 2015) und zum Ende der Szenarienanalyse im Jahr 2100 dargestellt.

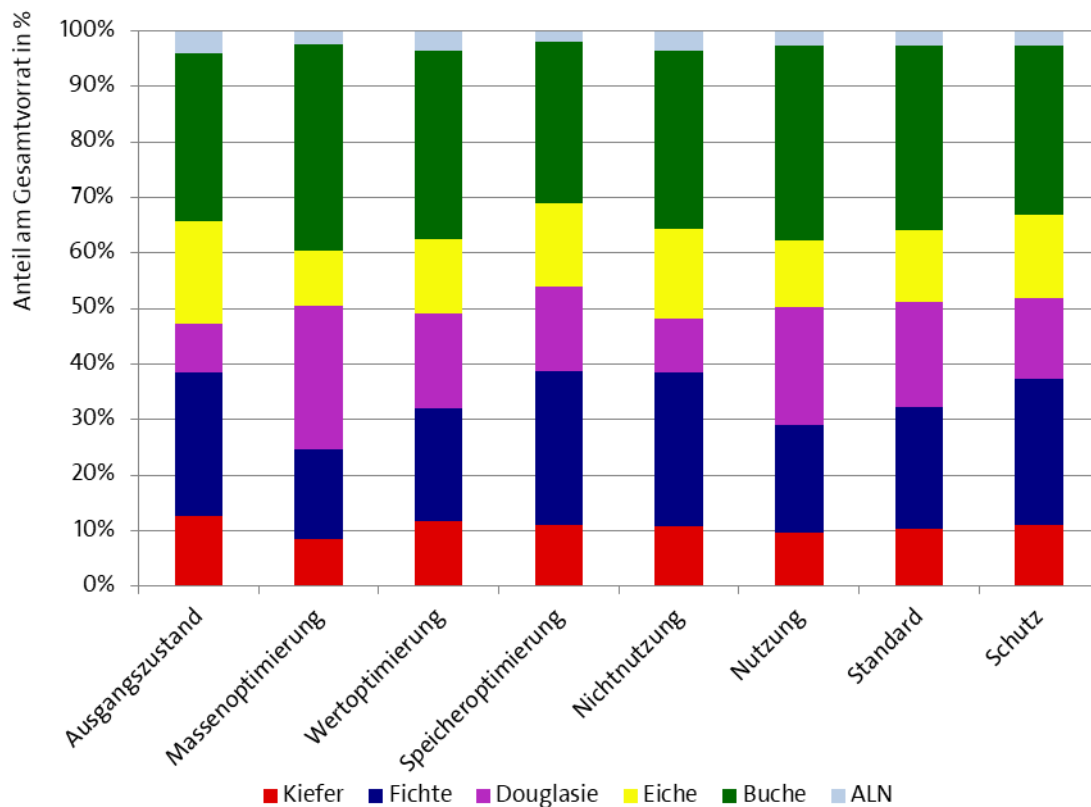


Abbildung 4 Derbholzvorrat der sechs Baumartengruppen zum Start der Szenarienanalyse im Jahr 2015 („Ausgangszustand“) und zum Ende des Simulationszeitraums im Jahr 2100 für die Grund- und Kombinationsszenarien

Für die Grundszenarien Massenoptimierung und Wertoptimierung sowie weniger stark für die Kombinationsszenarien Nutzung und Standard wird im Jahr 2100 nach häufigen Endnutzungen im Betrachtungszeitraum in Verbindung mit Baumartwechseln eine starke Verschiebung des Anteils von Kiefer und vor allem Fichte hin zu Buche und Douglasie beobachtet. Ebenso ist ein geringerer Vorrat ausgewiesen als zu Beginn der Szenarienanalyse (s. Abbildung 6). Dies ist auf relativ kurze Rotationen und damit häufige Endnutzungen, den Abbau von Altholzvorräten zu Beginn des Betrachtungszeitraums und im

Fall der Wertoptimierung auf die Absenkung des Bestockungsgrades zurück zu führen. Die Verlängerung der Rotationsperioden im Szenario Speicheroptimierung oder gar der komplette Verzicht auf Nutzung im Fall der Nichtnutzung führen zum Aufbau eines Derbholzvorrats von 424 bzw. 574 Mio. Vfm, was im Vergleich zum Ausgangsvorrat von 277 Mio. Vfm im Jahr 2015 einer Steigerung auf 153 % bzw. 207 % entspricht.

Beachtenswert ist die Steigerung des Derbholzanteils von Fichte und Kiefer im Grundszenario Speicheroptimierung trotz des oben bereits erläuterten Baumartwechsels hin zu Buche und Douglasie. Das Derbholzvolumen der Fichte steigt bis 2100 auf 164 % des Wertes von 2015, das der Kiefer auf 134 %, obwohl der Flächenanteil der Fichte um 5,7 % und derjenige der Kiefer um 1 % sinkt. Für die Baumartengruppe ALN wird ein Vorratsabbau auf 71 % des Wertes von 2015 beobachtet, während sich der Flächenanteil nur auf knapp 90 % der Fläche von 2015 verringert. Nach dem Abbau älteren Beständen ist der durchschnittliche Bestand jünger und vitaler, habe aber eben auch einen geringeren Vorrat.

Im Fall der Nichtnutzung erreichen Buche, Douglasie und Fichte jeweils Vorräte von über 220 % des Ausgangszustands. Vergleichsweise geringer steigen die Vorräte von ALN, Eiche und Kiefer auf 179 %, 184 % und 175 % des Ausgangszustands. Ein Baumartwechsel wird im Szenario Nichtnutzung nicht modelliert und beeinflusst daher nicht die absolute Speicherentwicklung der Baumartengruppen.

Neben Unterschieden in der Wuchsdynamik der Baumartengruppen spielt die Altersstruktur der Bestände im Jahr 2015 eine wichtige Rolle für die Entwicklung der Bestände (Anhang 2). Für ALN, Douglasie und Fichte sind zu Beginn der Szenarienanalyse vorwiegend Bestände in den Altersklassen 1 bis 3 zu finden (jeweils 58 %, 78 % und 43 %). Buche, Eiche und Kiefer zeigen mit 49 %, 50 % und 42 % in den Altersklassen 6 bis 8 deutlich ältere Bestände. In Verbindung mit der unterschiedlichen Zuwachsdynamik der Baumartengruppen erklärt dies zum größten Teil die beobachteten Steigerungen des Derbholzvorrats im Szenario Nichtnutzung.

Insgesamt stellen die Veränderungen der Derbholzvorräte bis zum Jahr 2100 eine wichtige Größe bei der Beurteilung des Waldspeichers dar. Dem Betrachter muss jedoch bewusst sein, dass es sich hierbei nur um eine Momentaufnahme handelt. Die Wahl des Endjahres der Szenarienanalyse beeinflusst die Ergebnisse in diesem dynamischen System. Die Entwicklung der Derbholzvorräte je Baumartengruppen und deren Fläche über

den gesamten Betrachtungszeitraum verdeutlicht dies (Abbildung 5). Nur für Fichte und Douglasien liegt im dargestellten Grundszenario Massenoptimierung der Vorrat pro Fläche im Jahr 2100 über dem im Jahr 2015. Im Fall der Fichte drückt sich dieser flächenmäßig höhere Vorrat nicht in absoluten Werten aus, da er durch den oben beschriebenen Baumartwechsel hin zu Buche und Douglasie überkompensiert wird. Douglasie zeigt durch ihre Wuchsdynamik und den steigenden Flächenanteil (vgl. Tabelle 5) im Fall der Massenoptimierung wie auch in allen anderen waldbaulichen Szenarien den höchsten Anstieg des Derbholzvolumens bis zum Jahr 2100. Der durchschnittliche Derbholzvorrat pro Hektar ist jedoch zeitweise unter dem des Ausgangszustands.

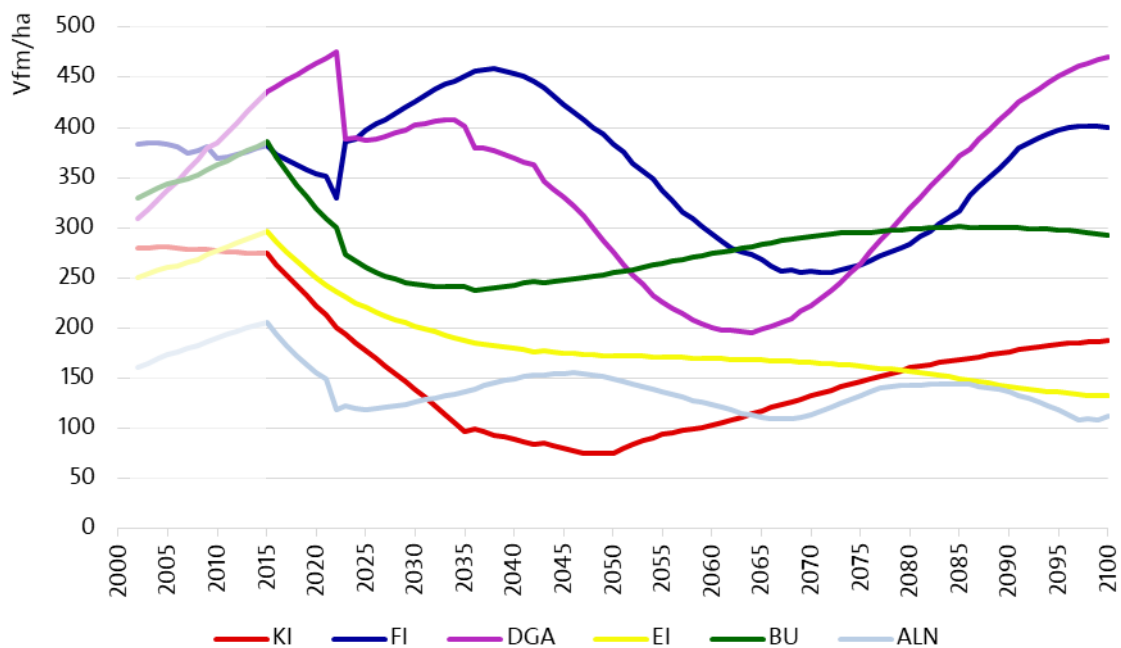


Abbildung 5 Entwicklung des Derbholzvorrats pro Fläche der sechs Baumartengruppen im Grundszenario Massenoptimierung

Der starke Abbau im mittleren Vorrat je Fläche, der für das Grundszenario Massenoptimierung zur Mitte des dargestellten Zeitraums in Abbildung 5 zu beobachten ist, kann auf vermehrte Endnutzungen vor allem bei Fichte, Douglasie und ALN und entsprechende Holzerntemengen in diesem Zeitraum zurückgeführt werden (s. Kapitel 4.2.3).

Die Entwicklung des Derbholzvorrats über den gesamten Zeitraum der Szenarienanalyse wird in Abbildung 6 für die Grundszenarien und in Abbildung 7 für die Kombinationsszenarien dargestellt.

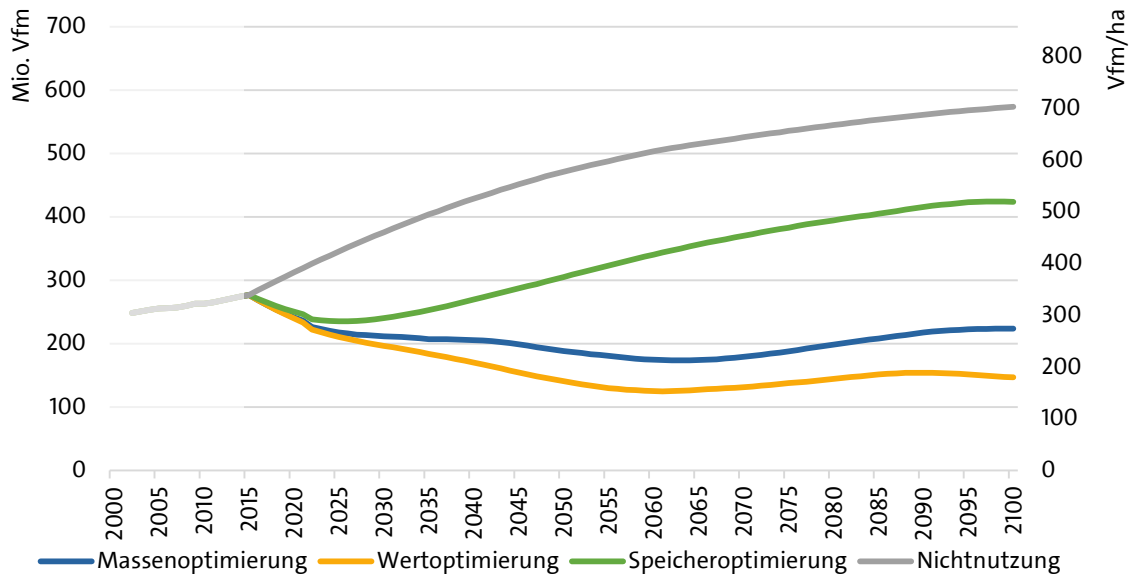


Abbildung 6 Vorratsentwicklung der Grundszenarien in Vorratsfestmeter; die Nutzungsszenarien Massenoptimierung, Wertoptimierung und Speicheroptimierung zeigen nach der Anpassungsperiode von 2002 bis 2015 zunächst einen Vorratsabbau während sich im Szenario Nichtnutzung im gesamten Simulationszeitraum von 2016 bis 2100 den Vorrat an Derbholz vergrößert

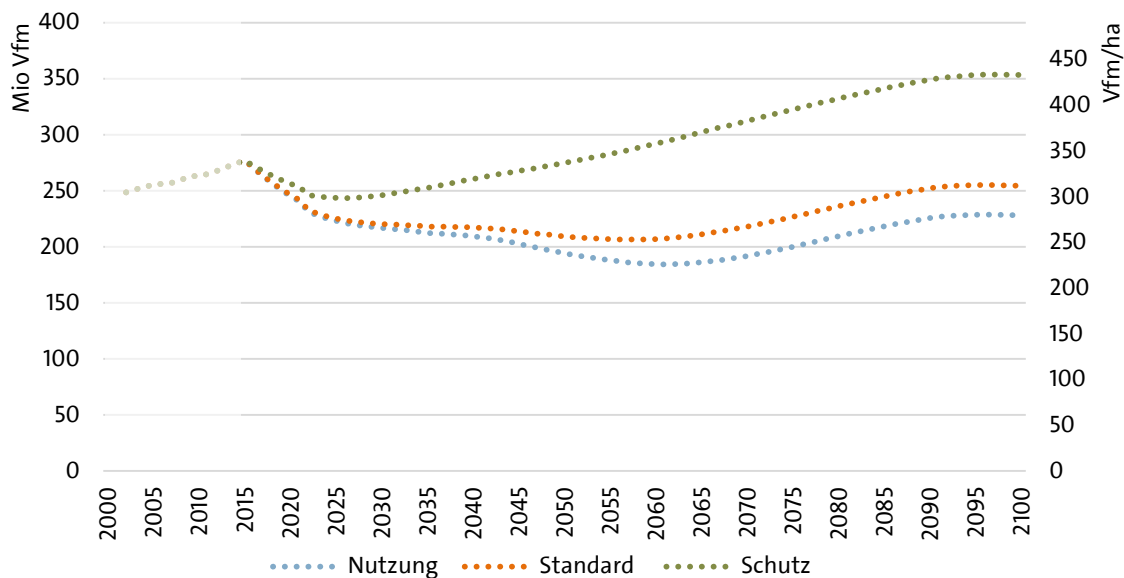


Abbildung 7 Die Vorratsentwicklung der Kombinationsszenarien in Vorratsfestmeter

Für das Szenario der Nichtnutzung ist eine kontinuierliche Erhöhung der Vorräte zu beobachten. Alle anderen Szenarien zeigen einen Abbau des Vorrats zumindest zu Beginn der Szenarienanalyse im Jahr 2016. Dieser wird durch vermehrte Endnutzungen älterer Bestände eingeleitet, die das Endnutzungsalter der Szenariendefinitionen übersteigen (vgl. Tabelle 3). In der Folge (ab. ca. 2030) steigen die Vorräte im Fall der Speicheroptimierung und des Kombinationsszenarios Schutz deutlich an. Die Vorräte von Massenopti-

mierung, Wertoptimierung und den Kombinationsszenarien Nutzung und Standard sind auf gleichbleibend niedrigem Niveau, was auf die konsequente Modellierung intensiver Bewirtschaftung mit den definierten Parametern zurückzuführen ist. Zum Ende des Betrachtungszeitraums im Jahr 2100 erreichen diese Szenarien intensiver Nutzung Vorräte unter dem Vorrat zu Beginn der Szenarienanalyse, die Grundszenarien Speicheroptimierung und Nichtnutzung sowie das Kombinationsszenario Schutz weisen deutlich höhere Speicher aus. Die beiden intensivsten Nutzungsszenarien Massenoptimierung und Wertoptimierung zeigen im gesamten Zeitraum der Szenarienanalyse einen Derbholzvorrat, der unter dem des Ausgangsjahres 2015 liegt. Dies ist auf entsprechend intensive Bewirtschaftung und hohe Entnahmemengen zurück zu führen. Die Klimaschutzleistung durch Waldspeicherung muss hier entsprechend negativ ausfallen. Der Anfall von Totholz im Zuge der Nutzungen kann nur zum Teil die niedrigeren Vorräte im Derbholz und damit auch in der lebenden oberirdischen Biomasse der Bestände ausgleichen (s.u.).

Durch die bereits in diesem Kapitel erläuterten Phasen vermehrter Endnutzungen werden die Waldbestände intensiv verjüngt. In der Folge dieser Verjüngung erhöht sich zunächst der Anteil junger Bestände noch ohne Holz im Derbholz (über 7 cm Durchmesser). Dadurch werden nicht nur die durchschnittlichen Vorräte sondern auch die durchschnittlichen Zuwächse der Baumartengruppen reduziert. In den ersten Jahren nach Begründung ist kein nennenswerter Zuwachs von Derbholz zu verzeichnen. Der durchschnittliche jährliche Zuwachs ist in Abbildung 8 für die Grundszenarien, in Abbildung 9 für die Kombinationsszenarien dargestellt.

Mit fortschreitender Zeitdauer der Szenarienanalyse vergrößern sich die Unterschiede in Bezug auf den für die Szenarien berechneten durchschnittlichen Zuwachs pro Hektar. Grundsätzlich wird der höchste Zuwachs um 9,7 Vfm/ha für das Grundszenario Massenoptimierung ermittelt. Die Szenarien Speicheroptimierung und Wertoptimierung folgen mit geringeren Zuwächsen zwischen 9,4 bzw. und 8,5 Vfm/ha. Für das Szenario Nichtnutzung werden jährliche Zuwächse mit einem Durchschnitt von 7,9 Vfm/ha ermittelt. Im zeitlichen Verlauf liegen sie zu Beginn der Szenarienanalyse über denen der Nutzungsszenarien, gehen dann aber wegen ausbleibender Verjüngung und zunehmender „Vergreisung“ der Bestände bis zum Jahr 2100 auf 5,5 Mio Vfm (entsprechend ca. 6,75 Vfm/ha) zurück. Die Kombinationsszenarien weisen Werte auf, die der jeweiligen Gewichtung der Grundszenarien entsprechen und zwischen 8,9 und 9,3 Vfm/ha liegen.

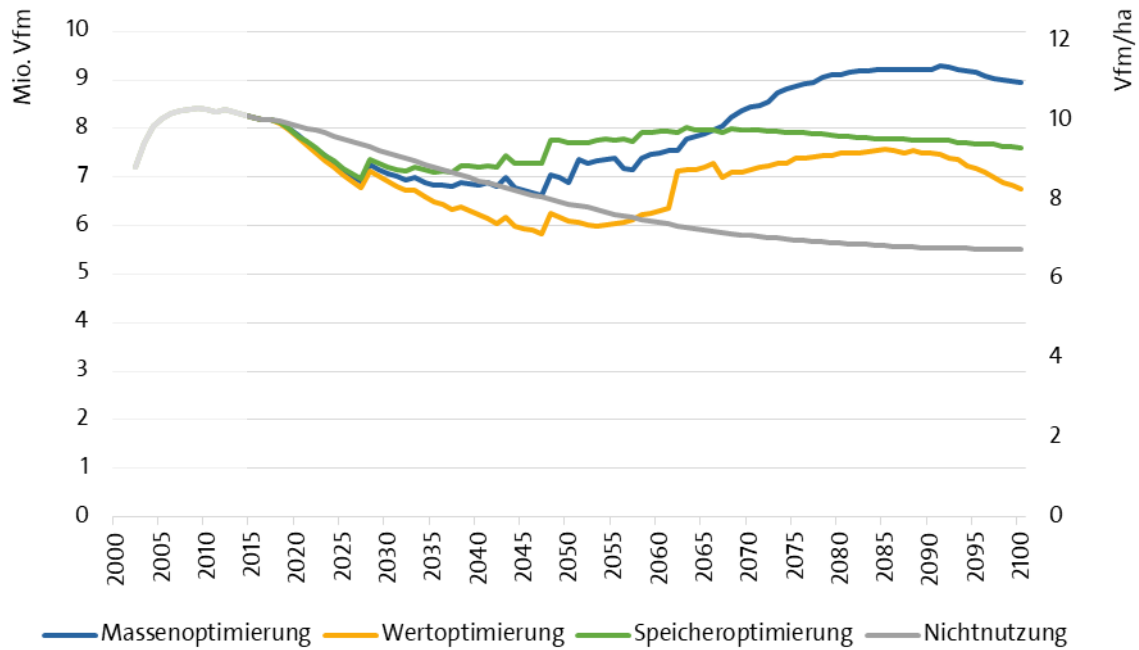


Abbildung 8 Durchschnittlicher jährlicher Volumenzuwachs der Grundszenarien; die linke Werteachse weist die absoluten Beträge aus, die rechte Werteachse die relativen Werte je Holzbodenfläche

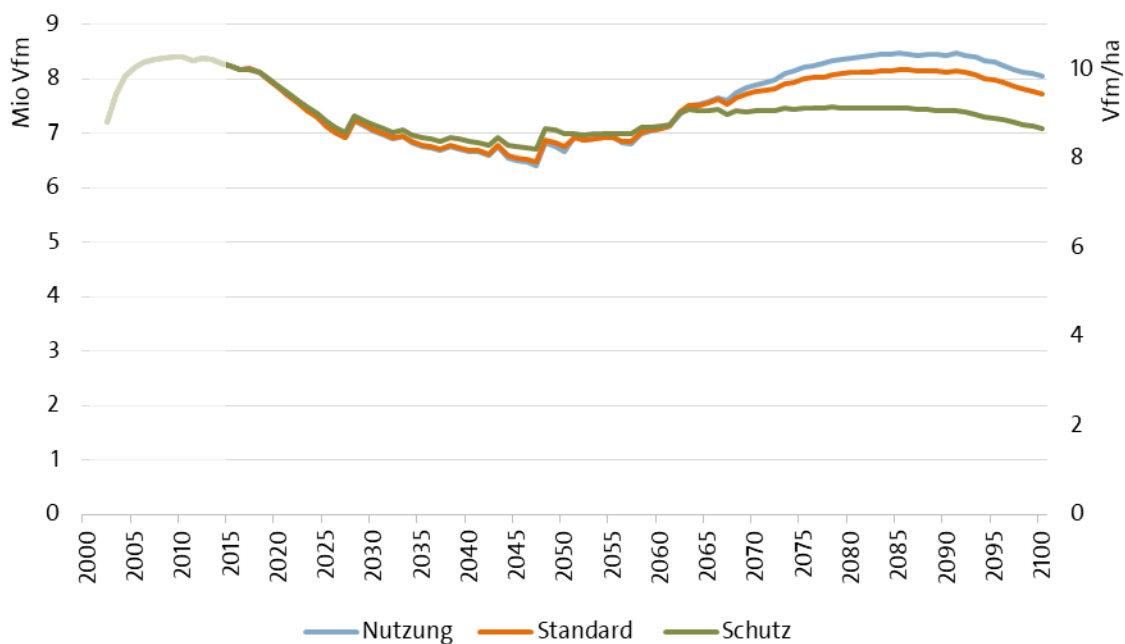


Abbildung 9 Durchschnittlicher jährlicher Volumenzuwachs der Kombinationsszenarien; die linke Werteachse weist die absoluten Beträge aus, die rechte Werteachse die relativen Werte je Holzbodenfläche

Exemplarisch werden in Abbildung 10 die Volumenzuwächse der Baumartengruppen für das Grundszenario Massenoptimierung dargestellt. Die Zuwächse der Baumartengruppen für das Grundszenario Massenoptimierung zeigen die höchsten durchschnittlichen

jährlichen Volumenzuwächse je Hektar für Douglasie, Fichte und Buche. ALN und Eiche erreichen Zuwächse um 7 bzw. 6 Vfm je ha. Den niedrigsten durchschnittlichen jährlichen Zuwachs erreicht die Kiefer, die grundsätzlich auf standörtlich schwächeren Standorten stockt.

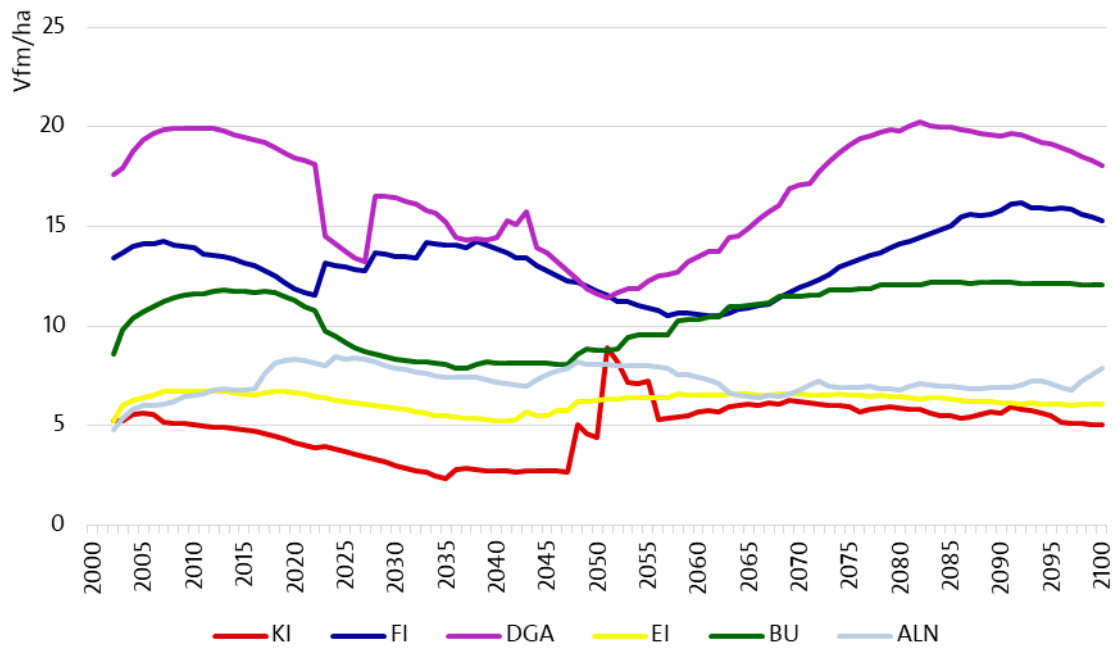


Abbildung 10 Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen Volumenzuwächse der Baumartengruppen für das Grundszenario Massenoptimierung

Die spezifische Darstellung für die Baumartengruppen unterstreicht vor allem in Zusammenschau mit den in Abbildung 11 dargestellten Holzerntemengen die konsequente Umsetzung der Bewirtschaftungsregeln. Im gezeigten Beispiel der Massenoptimierung weisen die Zuwachsverläufe vor allem für Douglasie, Fichte und Kiefer deutliche Sprünge der Werte in einzelnen Jahren auf. Dies ist auf die in 2002 einsetzende Simulation und die ab 2015 wirksam werdenden Szenariendefinitionen zur Endnutzung zurückzuführen. So werden einige stark wüchsige und ältere Douglasienbestände bereits ab dem Jahr 2002 als Endnutzungsbestände bewirtschaftet und im Jahr 2022 geerntet. Die Verjüngung dieser Bestände führt zu einem unmittelbaren aber vorübergehenden Einbruch der durchschnittlichen Zuwächse. Für die Fichte führt die Endnutzung unterdurchschnittlich wüchsiger Bestände zum Anstieg der durchschnittlichen Zuwachsleistung im selben Jahr. Ähnliche Beobachtungen könne auch für Kiefer und Buche gemacht werden, sind jedoch ungleich schwächer. Ab dem Jahr 2015 werden im Fall der Massenoptimierung Parameter

frühere Endnutzungsalter vorgesehen als zuvor, wodurch es 20 Jahre später im Jahr 2035 zu einer erneuten Räumungs- und Verjüngungswelle der Baumarten kommt.

Die Zuwachswerte für die Baumartengruppen zeigen, in welchen Zeiträumen eine starke und wann eine weniger starke Bindung von Kohlenstoff durch das Waldwachstum erreicht wird. Die unterschiedliche Raumdichte der Baumarten muss jedoch berücksichtigt werden, wenn der Kohlenstoffgehalt des stockenden Holzes oder des Totholzes bestimmt wird oder wenn diesbezüglich Vergleiche zwischen den Baumartengruppen angestellt werden (s. Kapitel 4.2.2).

Die absolute Höhe der Zuwächse basiert auf der Anwendung der Ertragstafeln, die in Rheinland-Pfalz verwendet werden und resultiert letztendlich aus Alter und Ertragsklasse der in der BWI 2 vorgefundenen Bestände in Rheinland-Pfalz, den in der Anpassungsphase im Land entnommenen Holzerntemengen und den in der BWI 3 für Rheinland-Pfalz ermittelten Bestände (vgl. Kapitel 3.1.1). Für die Simulation des Zuwachses werden die laufenden Zuwächse der für die Baumartengruppen gewählten Ertragstafeln durch Multiplikation mit einem Zuwachskorrekturfaktor derart angepasst, dass ausgehend von der BWI 2 und unter Realisierung der beobachteten Holzerntemengen der Vorrat der BWI 3 im Jahr 2012 erreicht wird. Die Zuwachskorrekturfaktoren der vorliegenden Simulation liegen für Douglasie, Fichte und Kiefer mit Werten von 1,08, 1,05 und 0,95 um einen Wert von 1, was die gute Anpassung der vorliegenden angepassten Ertragstafeln bestätigt. Für die Baumartengruppen des Laubholzes sind die Werte deutlich höher. Sowohl für Buche (1,90) als auch für Eiche (1,91) werden um 90 % erhöhte laufende Zuwächse berechnet. Für die Baumartengruppe ALN wird gar ein Wert von 2,11 ermittelt. Während Buche und Eiche relativ homogene Baumartengruppen mit deutlich führenden Baumarten darstellen, ist die Baumartengruppe ALN sehr viel inhomogener und schwieriger zu beurteilen.



Tabelle 18 Zuwachskorrekturfaktoren der Baumartengruppen entsprechend der auf Inventuren und Holzerntemengen aufbauenden Anpassung des Modells

<b>Zuwachskorrekturfaktor</b>	
Buche	1,90
Fichte	1,05
Kiefer	0,95
Eiche	1,91
DGA	1,08
ALN	2,11
LAE	1,26

In Vorgriff auf Kapitel 4.2.3 werden hier die Holzerntemenge des Grund szenarios Mas senoptimierung präsentiert, um sie mit der Entwicklung des Zuwachses vergleichen zu können. Während der Anpassungsphase von 2002 bis 2015 (vgl. 3.1.1) wurden vor allem auf den Fichtenflächen bereits starke Nutzungen getätigt und auch durch das Modell vor allem im Zuge von Endnutzungen realisiert. Die jährlichen Erntemengen werden in den Jahren des Anpassungszeitraums auf die tatsächlich beobachteten Holzerntemengen beschränkt oder bis zum Erreichen dieser erhöht. Die größten Nutzungsmengen sind in diesem Zeitraum auf Sturmereignisse zurück zu führen. Die älteren Bestände werden als Endnutzungsbestände eingestuft. Die Endnutzungsmengen werden in der 20- bzw. 40-jährigen Endnutzungsphase jährlich so reduziert oder erhöht, dass die tatsächlich entnommenen Mengen in Rheinland-Pfalz (vgl. 3.1.2.2) erreicht werden.

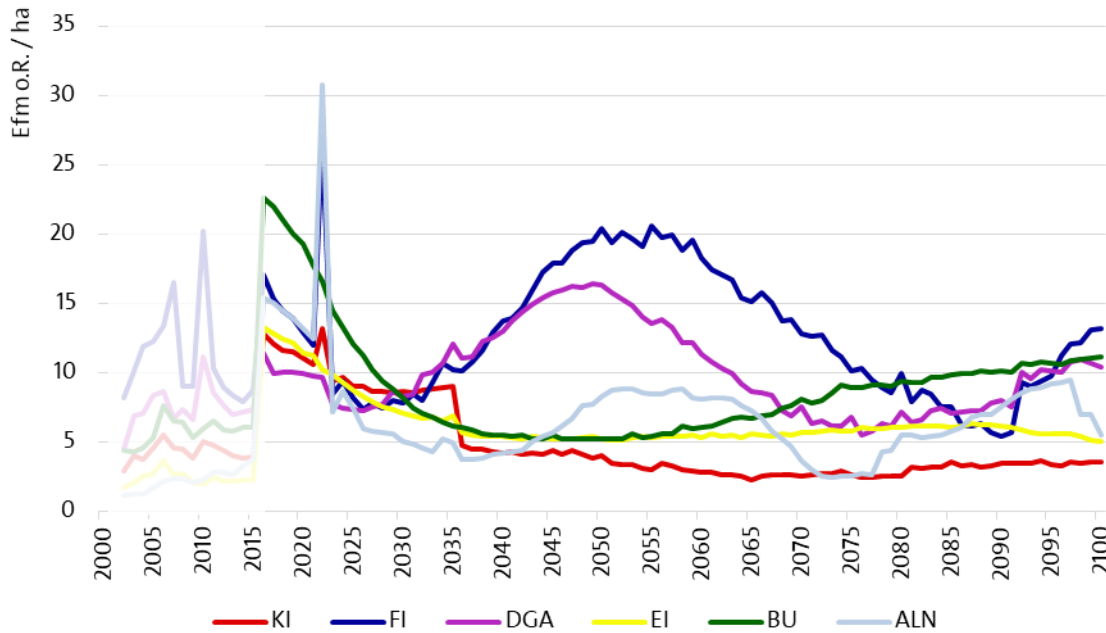


Abbildung 11 Grundszenario Massenoptimierung: Holzerntemengen der sechs Baumarten-gruppen

Mit dem Einsetzen der Szenarienanalyse im Jahr 2016 werden für alle Baumarten verstärkt Endnutzungsmengen realisiert, die nach der Anpassungsphase einen „Ernterückstand“ haben. Abbildung 11 verdeutlicht, dass zu Beginn der Szenarienanalyse für nahezu alle Baumartengruppen, insbesondere Buche, Fichte und ALN, relative große Holzmengen pro Fläche zur Endnutzung anstanden. Zur Räumung der Endnutzungsbestände im Jahr 2022 kulminiert noch einmal die anfallende Holzerntemenge.

Auf Grund der in den Inventurdaten vorgefundenen Altersstruktur der Bestände werden für Douglasie, Fichte und ALN zur Mitte und zum Ende des simulierten Zeitraums weitere Phasen verstärkter Endnutzungen erreicht. Buche und vor allem Eiche und Kiefer hingegen zeigen einen gleichmäßigeren Verlauf der Holzernte. Auf Grund der für sie ohnehin höheren Alter der Endnutzung (s. 3.1.1) und entsprechender Altersstrukturen der Bestände sind diese nach den Endnutzungen zu Beginn der Szenarienanalyse vornehmlich auf Vornutzungen zurück zu führen und reduzieren daher weniger stark Zuwachs und Vorratsaufbau der Bestände.

#### 4.2.2 Entwicklung des Kohlenstoffspeichers Wald

Zur Ermittlung der Klimaschutz relevanten Effekte der Waldbewirtschaftung werden die Kohlenstoffgehalte der ober- und unterirdischen Biomasse berechnet und als für den Klimaschutz relevante Ergebnisse der Waldmodellierung zusammen mit den Holzerntemengen dargestellt. (vgl. 3.1.1 und insbesondere 3.1.1.3). Neben der Kohlenstoffspeicherung in der lebenden Biomasse und im geernteten Holz wird auch die Speicherung von Kohlenstoff im Totholz (ober- und unterirdisch) beschrieben.

Die in Kapitel 4.2.3 dargestellten Holzerntemengen stellen nur einen Teil der durch die Holznutzung bedingten Reduzierung des vorhandenen Derbholzes dar. Der andere Teil des Derbholzes verbleibt als Totholzanteil im Wald (vgl. Definition der Grundszenarien in Kapitel 3.1.1). Er geht zusammen mit der Biomasse der Äste und Zweige unter der Derbholzgrenze von 7 cm in den Speicher Totholz (oberirdisch) über. Der Anteil der unterirdischen Biomasse, der dem Anteil der geernteten oberirdischen Derbholzmenge am Derbholzvorrat entspricht, wird gleichfalls mit dem Jahr der Ernte aus dem Speicher der unterirdischen lebenden Biomasse in den Speicher Totholz (unterirdisch) überführt (vgl. 3.1.1.3). Die durch Holzernte entstehenden Werte des gesamten Totholzspeichers der Grundszenarien werden in Abbildung 12 dargestellt. Abbildung 13 Abbildung 14 zeigt den Kohlenstoffgehalt der durch Holzernte im Simulationszeitraum entstehenden Totholzspeicher der Kombinationsszenarien. Abbildung 15 schließt die Entwicklung zu Beginn des Simulationszeitraums vorhandenen Totholz mengen in die Betrachtung mit ein.

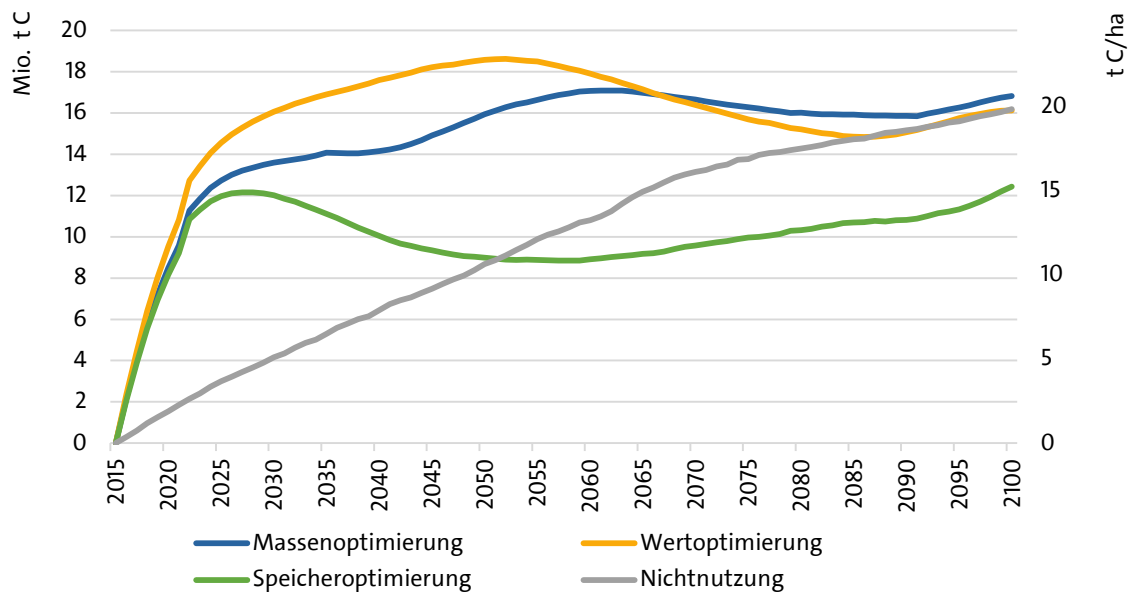


Abbildung 12 Kohlenstoffspeicherung im gesamten Totholzspeicher (ober- und unterirdisch) der vier Grundszenerien Massenoptimierung, Wertoptimierung, Speicheroptimierung und Nichtnutzung während der Szenarienanalyse von 2016 bis 2100

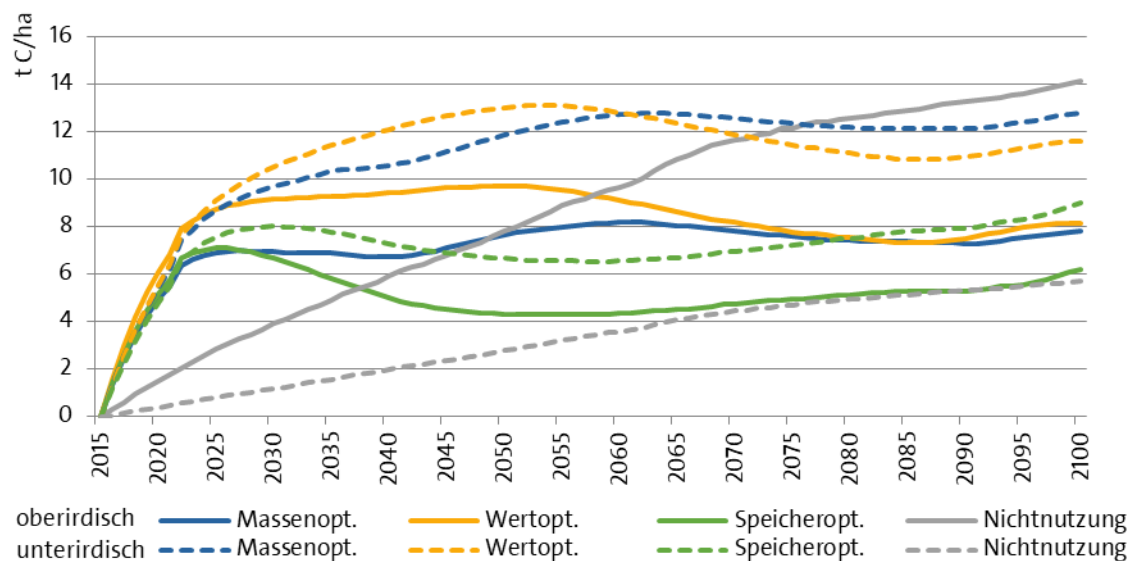


Abbildung 13 Kohlenstoffspeicherung im Totholzspeicher (ober- und unterirdisch; letztere als gestrichelte Linien) der vier Grundszenerien Massenoptimierung, Wertoptimierung, Speicheroptimierung und Nichtnutzung während der Szenarienanalyse von 2016 bis 2100

Abbildung 13 zeigt die Kohlenstoffspeicherung im gesamten Totholzspeicher der Grundszenerien, die Ergebnisse der Kombinationsszenarien sind in Abbildung 13 dargestellt. Der Beitrag der Szenarien zur Treibhausgasvermeidung bezieht sich hier ausschließlich auf die Totholz mengen, die im Zuge der Szenarienanalyse von 2016 bis 2100 entstehen (vgl. 3.1.1.3). Die Entwicklung des Totholzspeichers (ober- und unterirdisch) ist

dabei für alle Nutzungsszenarien ähnlich und letztlich durch die hohen Holzerntemengen zu Beginn des Simulationszeitraums geprägt: der Totholzanteil des eingeschlagenen Derbholzes (15 %, im Fall der Massenoptimierung 5 %) sowie der gesamte nicht zum Derbholz zählende Teil der Ast und Zweigbiomasse geernteter Bäume verbleibt als Totholz im Wald, ebenso wie die komplette unterirdische Biomasse der geernteten Bäume. Die beträgt ca. 20 % der kompletten oberirdischen Biomasse, was erklärt, weshalb im Totholzspeicher die unterirdischen Kohlenstoffgehalte diejenigen der oberirdischen übersteigen. Im Fall der Nichtnutzung wird kein Derbholz geerntet und die gesamte oberirdische Biomasse verbleibt im Wald. Das Ausbleiben intensiver Holzernte führt jedoch gerade zu Beginn des Simulationszeitraums zu einem langsameren Aufbau von Totholzbiomasse als im Fall der Nutzungsszenarien.

Die Kohlenstoffspeicherung im Totholzspeicher beträgt im Jahr 2030 durch die intensive Holzernte in den ersten Jahren der Szenarienanalyse und die Ansammlung entsprechender Mengen an ober- und unterirdischem Totholz bereits Werte zwischen 14,7 und 19,7 t C/ha für die Nutzungsszenarien und immerhin 5,1 t C/ha für das Grundscenario Nichtnutzung. Die Werte der Kombinationsszenarien im Jahr 2030 liegen zwischen 14,9 und 16,9 t C/ha (Abbildung 14). Der weitere Verlauf des Totholzspeichers der Nutzungsszenarien zeigt nur geringe Veränderungen in gegenläufiger Richtung zum Vorrat der lebenden Biomasse (vgl. Abbildung 17).

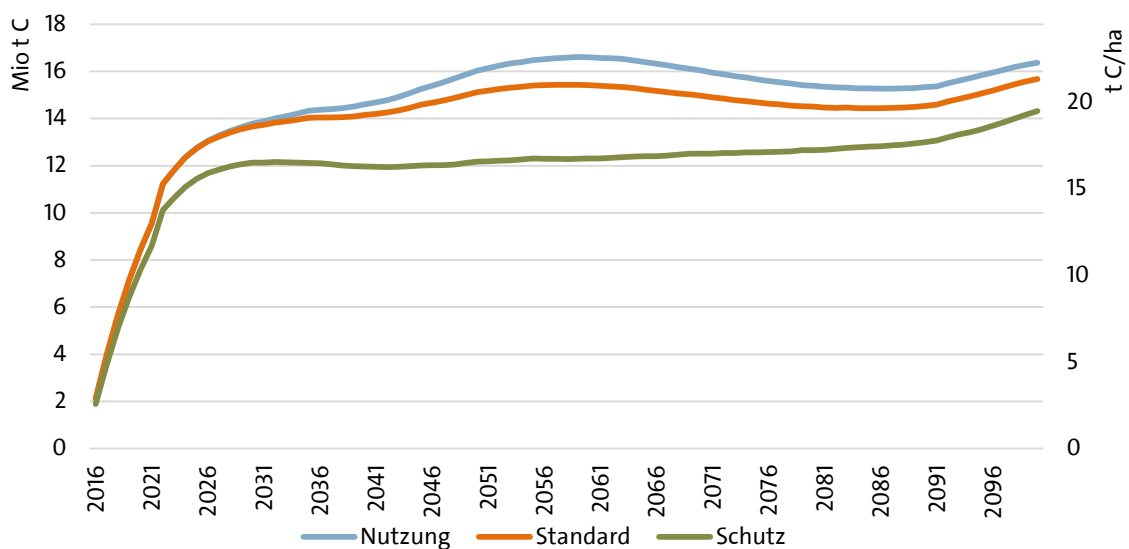


Abbildung 14 Kohlenstoffspeicherung im Totholzspeicher der drei Kombinationsszenarien Nutzung, Standard und Schutz während der Szenarienanalyse von 2016 bis 2100

In der nachfolgenden Abbildung 15 werden die Totholzspeicher unter Berücksichtigung des aktuellen Totholzspeichers (s. Kapitel 3.1.2.1, Seite 27) dargestellt. Die Speicherung und Zersetzung der im Ausgangszustand 2015 bereits vorhandenen toten Biomasse ist grundsätzlich nicht Gegenstand der Untersuchung im engeren Sinne, da sie nicht durch die weitere Waldbewirtschaftung beeinflusst werden können. Die Integration des aktuellen Totholzbestandes zeigt, dass trotz der Zersetzung der Ausgangsbestände an Totholz die starken Einschläge der Nutzungsszenarien zu Beginn der Szenarienanalyse zur Erhöhung des Totholzspeichers führen. Zum Ende des Simulationszeitraums werden nach Perioden niedrigerer Einschlagsintensität Werte auf dem doppelten Niveau des Ausgangszustands des Totholzspeichers erreicht. Im Gegensatz zur Entwicklung der Nutzungsszenarien führt die Nichtnutzung der Bestände zu einer langsameren Erhöhung der Kohlenstoffspeicherung im Totholzspeicher, erzielt aber zum Ende des Betrachtungszeitraums ähnlich hohe Werte wie Massenoptimierung und Wertoptimierung.

Auffallend ist auch, dass die Massenoptimierung ebenso hohe Werte für den Totholzspeicher erzielt wie die Wertoptimierung, obwohl im Fall der Massenoptimierung nur 5 % des eingeschlagenen Derbholzes als Totholzanteil im Wald verbleiben und im Fall der Wertoptimierung 15 %. Dies ist durch die höheren Einschlags- und Holzerntemengen des Szenarios Massenoptimierung in der zweiten Hälfte des Betrachtungszeitraums zu erklären (vgl. Abbildung 19).

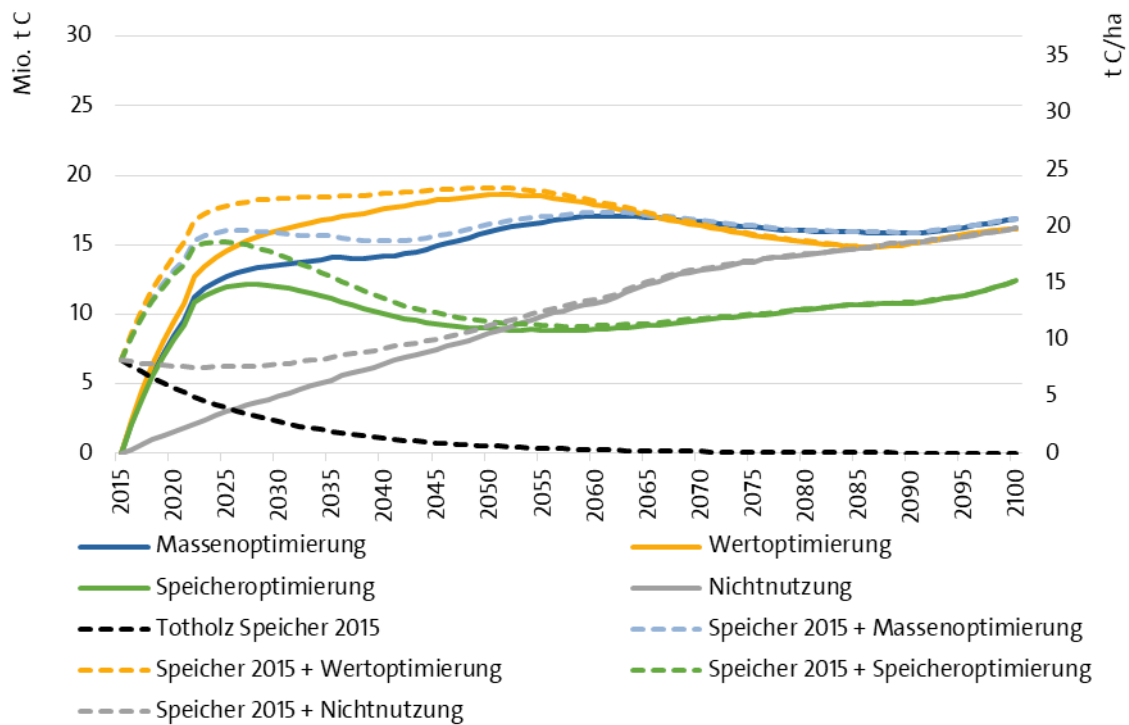
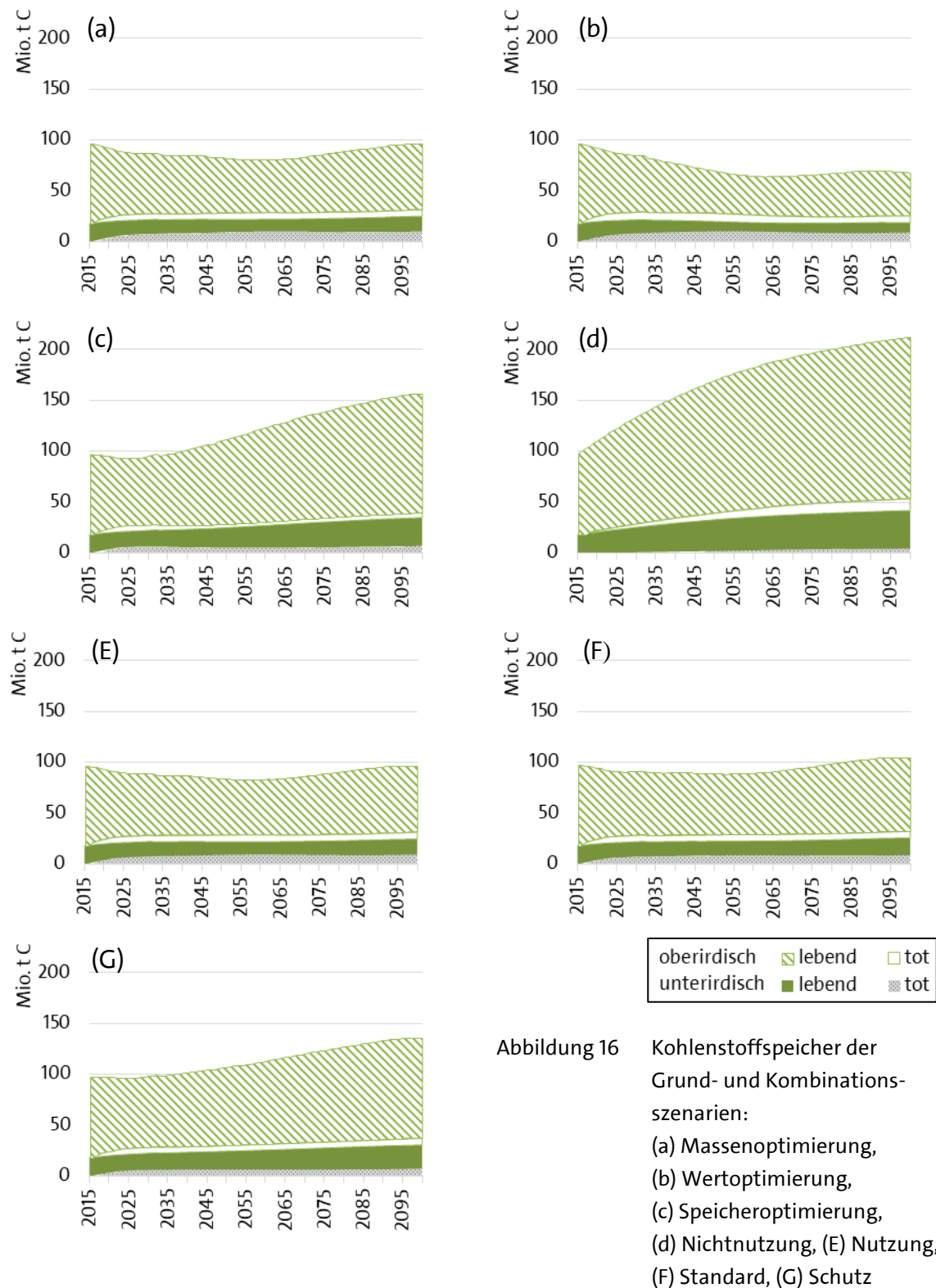


Abbildung 15 Kohlenstoffgehalt des Totholzspeichers der vier Grundscenarien Massenoptimierung, Wertoptimierung, Speicheroptimierung und Nichtnutzung; die gestrichelten Linien präsentieren den Totholzspeicher unter Einbeziehung des aktuellen Speichers im Jahr 2015 und dessen Zersetzung (schwarze gestrichelte Linie)

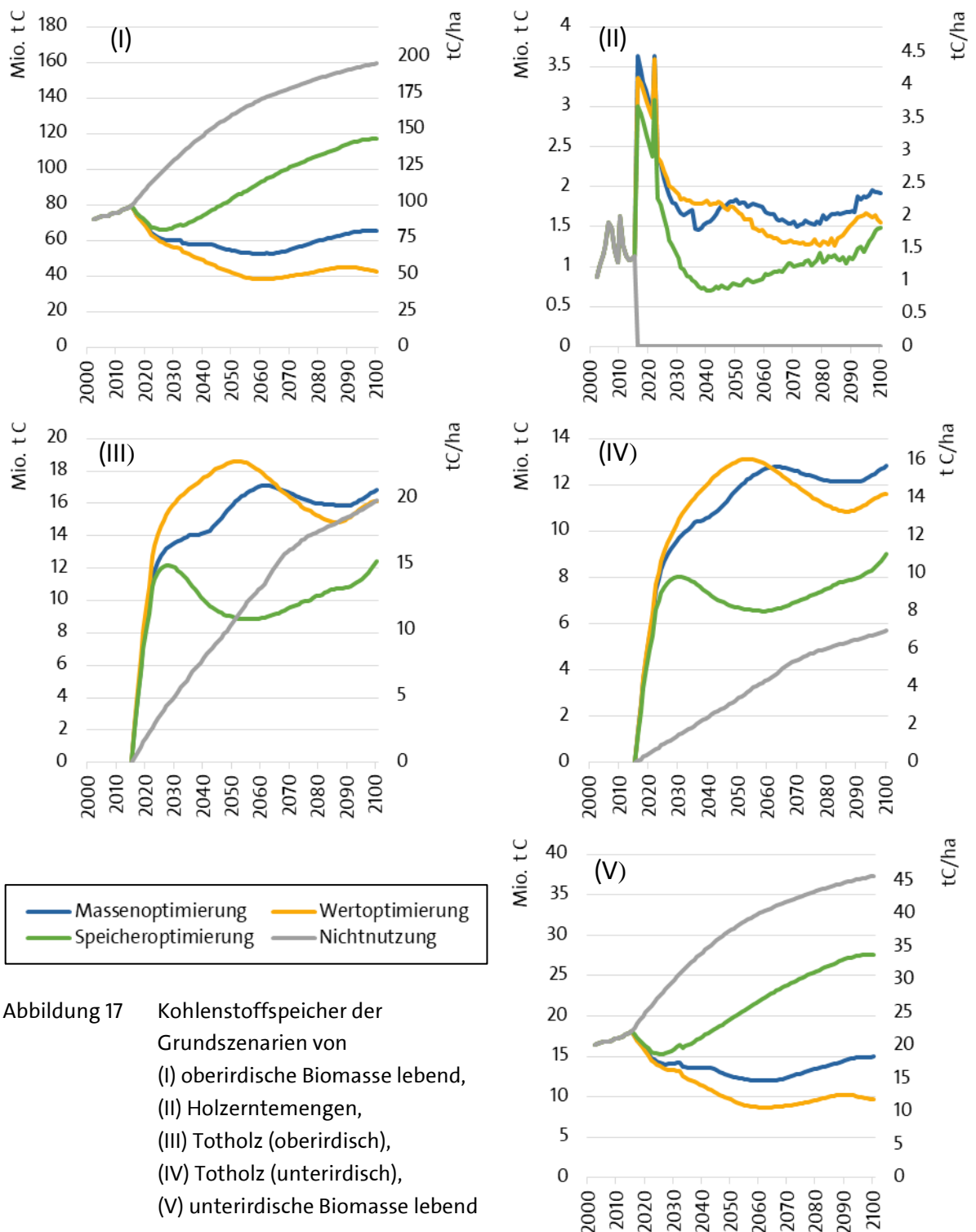
Die Entwicklung der Kohlenstoffspeicher der Grund- und Kombinationsszenarien im Betrachtungszeitraum 2016 bis 2100 ist in Abbildung 16 dargestellt. Die klimarelevante Gesamtspeicherleistung des Waldes ist dabei als Differenz zum Ausgangszustand der summarisch dargestellten Speicher stets an der oberen Kurve abzulesen. So entspricht der Gesamtspeicher des Grundscenarios Massenoptimierung mit knapp 100 Millionen t C zum Ende des Simulationszeitraums der Gesamtspeicherung im Ausgangszustand im Jahr 2015.



Der Gesamtspeicher nimmt bis zum Jahr 2100 ab im Szenario Wertoptimierung und zu im Fall von Speicheroptimierung und Nichtnutzung. Die Kombinationsszenarien Nut-



zung, Standard und Schutz erreichen der Gewichtung der Grundszenarien entsprechende Entwicklungen der Kohlenstoffspeicher.



Eine hohe Einschlagsintensität verringert den Bestand lebender Biomasse und trägt zur Erhöhung des Totholzspeichers bei, niedrige Einschläge führen zu Vorratsaufbau und

relativ geringen Beiträgen zum Totholzspeicher. In Abbildung 17 und Abbildung 18 wird dies durch die Darstellung der Holzerntemengen jeweils in Grafik (II) deutlich.

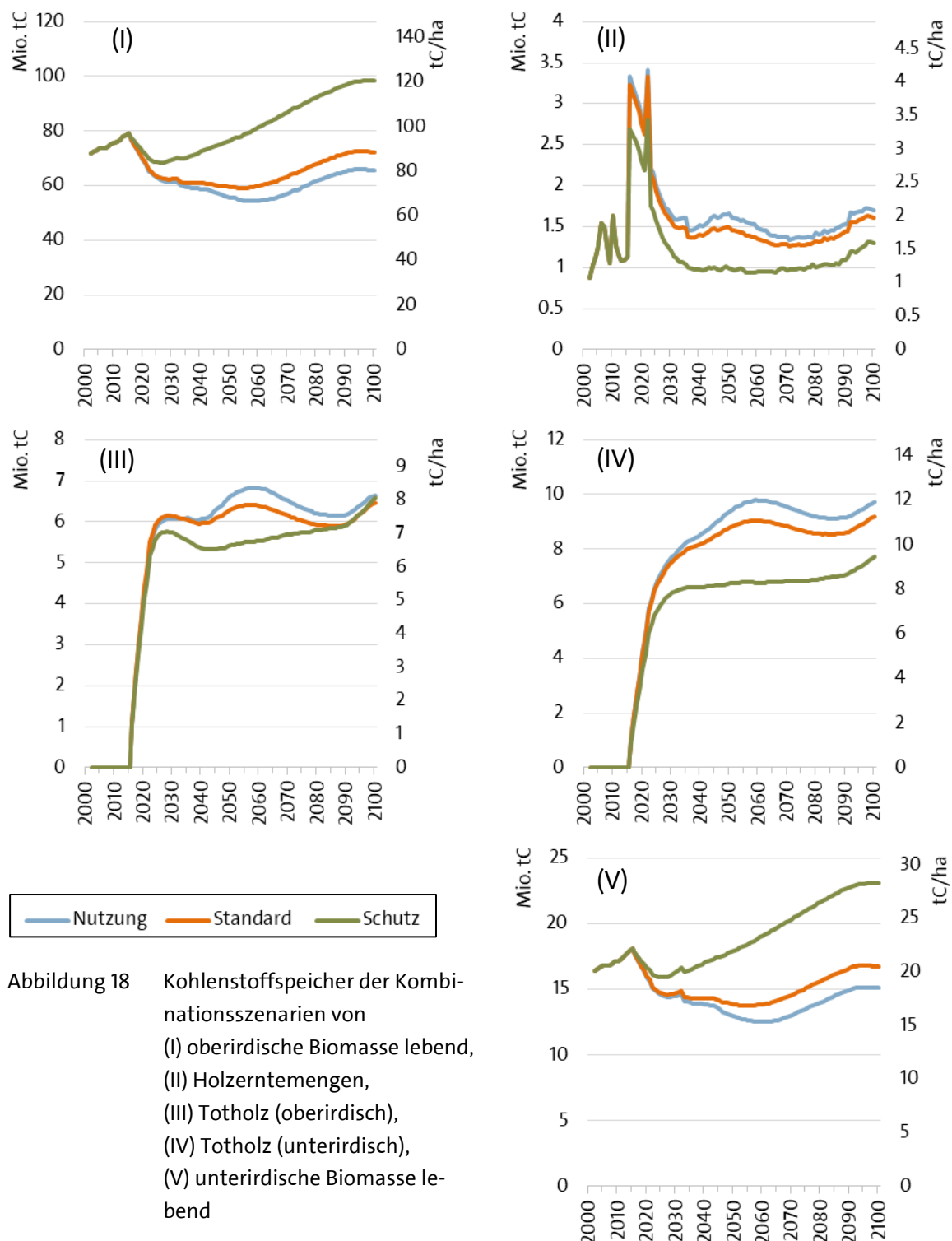


Abbildung 18 Kohlenstoffspeicher der Kombinationsszenarien von (I) oberirdische Biomasse lebend, (II) Holzerntemengen, (III) Totholz (oberirdisch), (IV) Totholz (unterirdisch), (V) unterirdische Biomasse lebend

Die Speicheränderungen sind als Differenzen zum Ausgangszustand im Jahr 2015 zu berechnen sind. Eine z.B. durch Holzerntemaßnahmen reduzierte Speicherung von Kohlen-

stoff wird im Sinne der Treibhausgasberichterstattung als Emission gewertet. Die Holzermengungen hingegen sind Ausgangspunkt für die Modellierung der Holzverwendung (s. Kapitel 4.3) und können im Sinne der gesamthaften Modellierung als fortlaufende Leistungen des Waldes interpretiert werden (s. Kapitel 4.2.3).

Tabelle 19 Durchschnittliche jährliche Klimaschutzleistung der Waldbewirtschaftung in Rheinland-Pfalz abhängig von der Bewirtschaftungsform (Grund- und Kombinationsszenarien) sowie durchschnittlich jährlich durch Holzernte entnommener Kohlenstoff in den Betrachtungszeiträumen von 2016 bis 2030, bis 2050 und bis 2100.

Durchschnittliche jährliche Klimaschutzleistung	lebende Biomasse		Totholz		Gesamt [t C/a]	Holzernte [t C/a]
	oberirdisch [t C/a]	unterirdisch [t C/a]	oberirdisch [t C/a]	unterirdisch [t C/a]		
<b>2016–2030</b>						
Massenoptimierung	-1 296 622	-262 723	377 994	527 911	<b>-653 440</b>	2 601 979
Wertoptimierung	-1 534 944	-321 530	498 743	572 446	<b>-785 285</b>	2 613 425
Speicheroptimierung	-787 972	-144 372	363 995	436 834	<b>-131 514</b>	2 065 092
Nichtnutzung	1 731 272	425 299	212 600	64 887	<b>2 434 058</b>	0
Nutzung	-1 191 291	-240 047	405 249	513 566	<b>-512 523</b>	2 448 470
Standard	-1 126 910	-225 234	409 187	502 132	<b>-440 826</b>	2 368 509
Schutz	-659 610	-117 986	382 410	426 279	<b>31 094</b>	1 946 672
<b>2016–2050</b>						
Massenoptimierung	-718 088	-159 575	178 637	276 923	<b>-422 103</b>	2 062 869
Wertoptimierung	-1 069 230	-241 459	226 945	303 906	<b>-779 838</b>	2 140 737
Speicheroptimierung	122 141	44 100	101 098	155 769	<b>423 107</b>	1 333 584
Nichtnutzung	1 462 130	358 395	182 691	65 008	<b>2 068 223</b>	0
Nutzung	-672 408	-148 058	189 455	268 364	<b>-362 647</b>	1 946 622
Standard	-563 931	-121 601	180 240	251 540	<b>-253 752</b>	1 841 122
Schutz	-76 283	-4 607	154 968	192 653	<b>266 730</b>	1 412 157
<b>2016–2100</b>						
Massenoptimierung	-166 735	-37 088	74 975	122 993	<b>-5 855</b>	1 842 442
Wertoptimierung	-430 843	-99 062	78 356	111 391	<b>-340 158</b>	1 723 821
Speicheroptimierung	444 218	111 651	59 749	86 505	<b>702 122</b>	1 167 567
Nichtnutzung	942 067	226 332	135 618	54 815	<b>1 358 833</b>	0
Nutzung	-159 980	-35 072	78 260	114 279	<b>-2 513</b>	1 680 990
Standard	-81 542	-15 860	76 145	108 226	<b>86 969</b>	1 573 827
Schutz	225 829	58 202	77 473	91 042	<b>452 546</b>	1 193 052

Die Klimaschutzleistung durch Speicherung von Kohlenstoff in der Biomasse ist nur im Fall der Nichtnutzung stets positiv. Alle anderen Grund- und Kombinationsszenarien zeigen auf Grund der intensiven Holzernte zumindest zu Beginn des Betrachtungszeitraums eine starke Abnahme der oberirdischen lebenden Biomasse, die nur zum Teil durch entsprechende Zugänge zur toten Biomasse ausgeglichen werden. Ein verstärkter Zuwachs der Folgebestände setzt erst im Jugendstadium und daher mit zeitlicher Verzögerung ein.

### **4.2.3 Holzerntemengen der Grund- und Kombinationsszenarien**

Die Holzerntemengen der Grund- und Kombinationsszenarien sind sowohl Ausdruck der Eingriffsintensität im Waldbau als auch letztlich Ergebnis der waldbaulichen Simulation und die Grundlage für die Simulation der Holzverwendung (s. Kapitel 4.3). Die Abnahme der Kohlenstoffspeicher im Wald durch Holzernte und Zersetzung des Totholzes werden im Sinne der Treibhausgasberichterstattung als Freisetzung von Treibhausgasen gewertet. Die ganzheitliche Betrachtung der Klimaschutzleistung des Wald- und Holzsektors erlaubt es, die an die Holzernte anschließende Holzverwendung (s. Kapitel 4.3) als dauerhaft erbrachte Leistung des Waldes zu interpretieren.

In Tabelle 20 und Tabelle 21 werden für die Grund- und Kombinationsszenarien die durchschnittlichen jährlichen Holzerntemengen dargestellt, die jeweils im Zeitraum 2016 bis 2100 erzielt werden. Diese Angabe eines durchschnittlichen Wertes ermöglicht einen ersten Vergleich der Leistungen zwischen den Szenarien. Die Darstellung der entsprechenden Werte für die Baumartengruppen quantifiziert deren Beitrag.

Die Holzerntemengen sind für das Grundszenario Massenoptimierung am höchsten unter allen Grund- und Kombinationsszenarien (Tabelle 20 und Tabelle 21). Da dieses Grundszenario auf die Produktion mit der maximalen Massenleistung abzielt (vgl. Szenariendefinition, Seite 13 ff.), entspricht dies den Erwartungen. Annähernd ebenso hoch fallen die Holzerntemengen für das Grundszenario Wertoptimierung aus. Hier ist jedoch bereits im vorherigen Kapitel darauf verwiesen worden, dass die Speicherleistung der Wertoptimierung die geringste unter den definierten Szenarien zur Waldbewirtschaftung ist. Auch dies entspricht der Szenariendefinition, die für die Wertoptimierung u.a. eine Absenkung des Bestockungsgrades und damit der Dichte der Bestände vorsieht, um das Wachstum auf die werttragenden Bestandeglieder zu konzentrieren. Durch diese

Konzentration des Zuwachses ist es zudem möglich, relativ kurze Umtriebszeiten zu erreichen. Die grafischen Darstellungen zu den Holzerntemaßnahmen belegen dies weiter unten in diesem Kapitel. Die geringsten Holzerntemengen unter den Nutzungsszenarien weist die Speicheroptimierung auf. Das Grundscenario Nichtnutzung verzichtet gänzlich auf Holznutzung.

Tabelle 20 Durchschnittliche jährliche Holzerntemengen in Erntefestmetern ohne Rinde für die Grundscenarien von 2016 bis 2100

<b>Baumarten- gruppe</b>	<b>Massenoptimierung [Efm o. R.]</b>	<b>Wertoptimierung [Efm o. R.]</b>	<b>Speicheroptimierung [Efm o. R.]</b>	<b>Nichtnutzung [Efm o. R.]</b>
Kiefer	572 005	518 927	253 780	0
Fichte	1 672 370	1 560 461	917 199	0
Douglasie	965 716	843 719	461 326	0
Eiche	1 103 490	1 016 040	711 269	0
Buche	2 286 742	2 216 132	1 680 267	0
ALN	365 523	348 454	320 623	0
<b>Summe</b>	<b>6 965 846</b>	<b>6 503 733</b>	<b>4 344 465</b>	<b>0</b>

Tabelle 21 Durchschnittliche jährliche Holzerntemengen in Efm o. R. für die Kombinations-szenarien von 2016 bis 2100

<b>Baumarten- gruppe</b>	<b>Nutzung [Efm o. R.]</b>	<b>Standard [Efm o. R.]</b>	<b>Schutz [Efm o. R.]</b>
Kiefer	511 570	461 182	311 168
Fichte	1 517 420	1 398 549	1 010 356
Douglasie	855 612	773 853	532 065
Eiche	1 002 469	939 264	715 621
Buche	2 120 899	2 026 397	1 619 311
ALN	339 881	332 293	283 124
<b>Summe</b>	<b>6 347 851</b>	<b>5 931 538</b>	<b>4 471 645</b>

Der Beitrag der Baumartengruppen zur gesamten Holzerntemenge weist die Buche in allen Nutzungsszenarien als die Baumart mit den höchsten absoluten Holzerntemengen aus. Die Holzerntemengen aus Tabelle 20 werden in Anhang 4 in Relation zu den in Abbildung 3 und Tabelle 17 (Kapitel 4.2.1) dargestellten Flächenanteilen im Jahr 2015 („Ausgangszustand“) und im Jahr 2100 dargestellt. Auch wenn die Entwicklung der Altersstruk-

turen (s. Anhang 2), die Unterschiede der Holzdichte hier keine Berücksichtigung finden und der Zeitpunkt der zwischen 2015 und 2100 modellierten Baumartwechsel unberücksichtigt bleibt, lassen sich zusammenfassend für absolute und flächenbezogene Holzernstemengen der Baumartengruppen folgende Aussagen treffen:

- Die Buche ist auch bei Flächen bezogener Darstellung stets unter den Baumartengruppen mit den höchsten Holzernstemengen.
- Die Holzernstemengen der Fichte werden durch den fortlaufenden Baumartwechsel hin zu Buche und Douglasie reduziert, bleiben aber in Relation zum Anteil an der Fläche und dem Beitrag anderer Baumartengruppen überproportional hoch.
- Die Douglasie erreicht enorme absolute und Flächen bezogene Holzernstemengen mit steigender Tendenz.
- Für ALN und Buche fallen die Holzernstemengen der Speicheroptimierung gegenüber Massenoptimierung und Wertoptimierung weniger stark ab als für die anderen Baumartengruppen.

Die folgenden Grafiken zeigen die jährlichen Holzernstemengen für die Grund- und Kombinationsszenarien im Betrachtungszeitraum. Alle Darstellungen zeigen dabei sehr starke und auf das Jahr 2022 konzentrierte Holzernstemengen. Diese entsprechen den Räumungen derjenigen Bestände, die bereits zu Beginn der Anpassungsperiode von 2002 bis 2015 gemäß als Endnutzungsbestände eingestuft werden. Die Holzernstemengen wurden während der Anpassungsperiode auf das tatsächlich realisierte Niveau reduziert, um zum Ende im Jahr 2015 einen möglichst realitätsnahen Ausgangszustand zu simulieren (s. Abbildung 11). Im Jahr 2022 werden die Räumungen der im Anpassungszeitraum reduzierten Endnutzungen nachgeholt und stellen somit eine zuvor aufgeschobene Nutzung von Altholzbeständen dar. Solche überproportionalen Holzernstemengen im Jahr 2022 werden vor allem für Fichte und in schwächerer Ausprägung für ALN, Douglasie und Kiefer beobachtet, aber auch für Eiche und Buche sind überdurchschnittlich hohe Nutzungen zu Beginn des Betrachtungszeitraums zu verzeichnen, die auf entsprechend hohe Altholzvorräte im Ausgangszustand zurück zu führen sind.

Für das Grundscenario Massenoptimierung ist in Abbildung 19 nach niedrigeren Holzernstemengen von 2040 bis 2060 eine zweite Welle höherer Holzernstemengen zu beobachten. Eine dritte Periode höherer Holzernstemengen beginnt zum Ende des Betrachtungs-

zeitraums. Die Baumart bezogene Abbildung 21 zeigt für die Massenoptimierung deutlich, dass diese verstärkten Nutzungen vor allem bei Fichte, Douglasie und ALN durchgeführt werden. Auch im Grundszenario Wertoptimierung sind eine zweite und dritte Kulmination der Einschlagsintensitäten zu erkennen. Die zweite Periode schließt hier wegen früherer Endnutzungen direkt an die erste Periode verstärkter Endnutzung an, was ebenfalls durch eine Baumartengruppen spezifische Darstellung in Abbildung 22 noch deutlicher wird. Die Speicheroptimierung zeigt mit verstärktem Einschlag ab 2060 auf insgesamt niedrigerem Niveau einen verzögerten Beginn der zweiten Periode erhöhter Holzertemengen (Abbildung 23). Letztlich folgen die Perioden höherer oder niedriger Holzertemengen in der Szenarienanalyse den Annahmen der Szenarien und dem Altersaufbau der Bestände zu Beginn der Simulation.

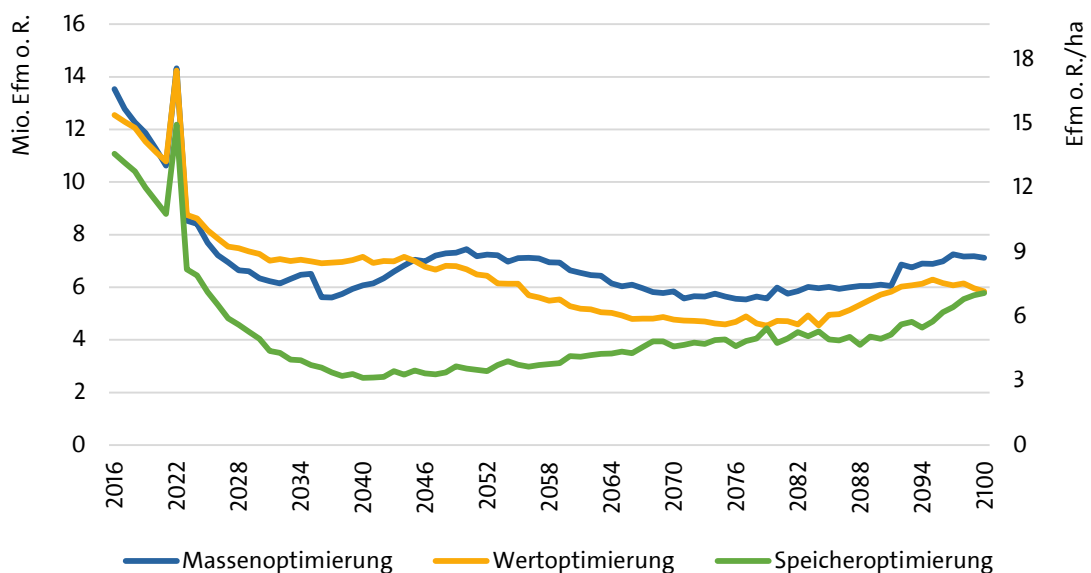


Abbildung 19 Jährliche Holzertemenge in Efm o.R. von 2016 bis 2100 für die Grundszenarien; für das Grundszenario Nichtnutzung sind keine Holzertemengen ausgewiesen

Abbildung 20 zeigt die Holzertemengen für die Kombinationsszenarien mit insgesamt gleichmäßigerem Verlauf. Dieser ist insbesondere im Fall des Kombinationsszenarios Standard auf vergleichbarem Niveau zum derzeitigen Holzeinschlag, was ebenfalls den zu Grunde liegenden Definitionen entspricht.

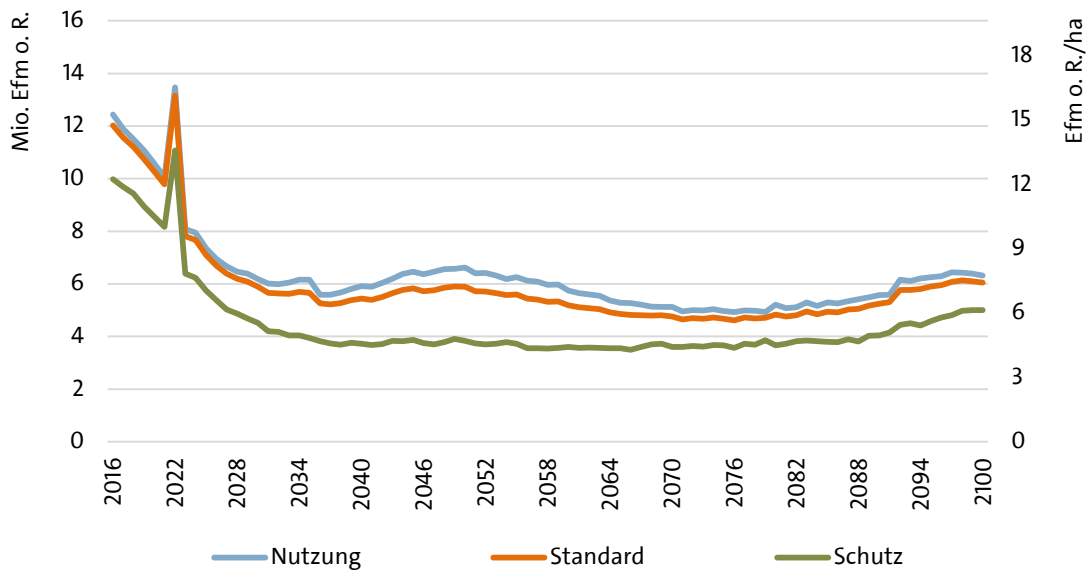


Abbildung 20 Jährliche Holzerntemenge in Efm o.R. von 2016 bis 2100 für die Kombinationsszenarien

In Abbildung 21 bis Abbildung 26 werden die Holzerntemengen der drei Grundscenarien mit Holznutzung und der Kombinationsszenarien Baumartengruppen spezifisch dargestellt. Die Ausweisung von Werten je Fläche bezieht sich hier stets auf die gesamte Holzbodenfläche und nicht auf die Baumartengruppen spezifischen Flächen.

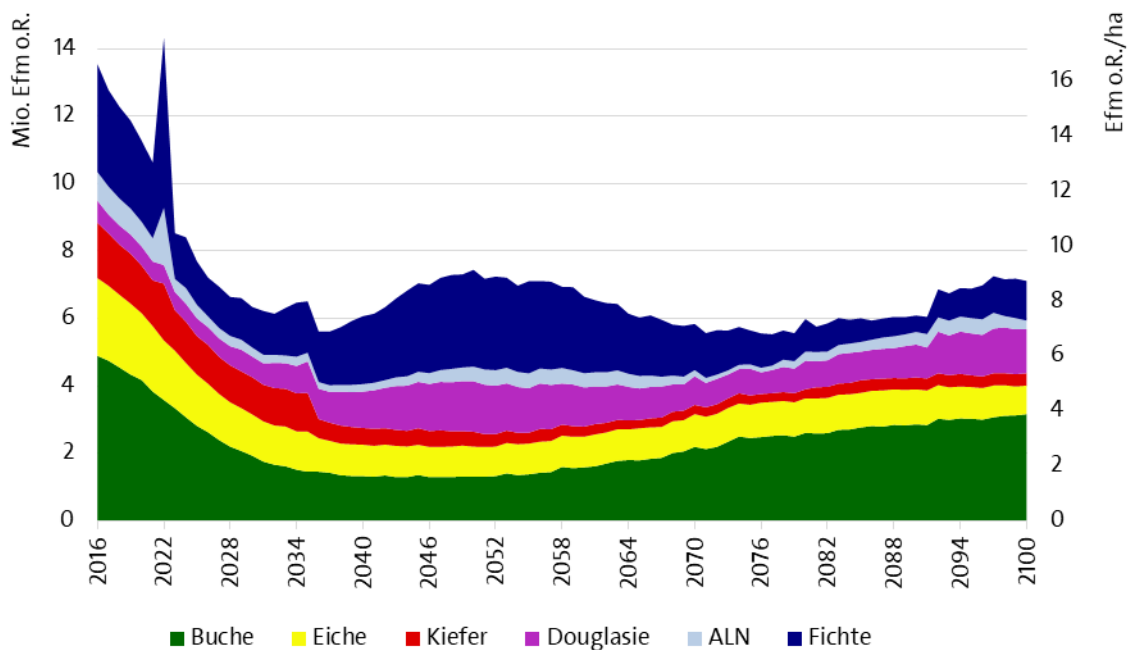


Abbildung 21 Jährliche Holzerntemengen nach Baumartengruppen und gesamt in Efm o.R. für das Grundscenario Massenoptimierung;



Die Baumartengruppen zeigen im Grundszenario Massenoptimierung deutlich unterschiedliche Verläufe der Holzermenge (Abbildung 21). Während die kurzumtriebigen Baumartengruppen Fichte, Douglasie und ALN eine zweite und dritte Periode höherer Holzermengen durchlaufen, zeigt die Buche erst ab ca. 2060 einen erneuten Anstieg der Nutzungsintensität. Die Eiche liefert ab 2022 gleiche Holzermengen. Die Holzermengen der Fichte sind in der Zuwachsperiode am Ende des Betrachtungszeitraums deutlich geringer, was auf den Baumartwechsel hin zu Buche und Douglasie nach den Endnutzungen zu Beginn des Betrachtungszeitraums zurück zu führen ist. Dementsprechend ist der Beitrag der Douglasie zum Ende des Betrachtungszeitraums auf deutlich höherem Niveau als zu Beginn.

Gerade im Vergleich zum Grundszenario Massenoptimierung zeigen die Holzermengen des Grundszenarios Wertoptimierung deutlich ein früheres Einsetzen der zweiten und dritten Endnutzungsphasen von Fichte, ALN und Douglasie (Abbildung 22). Die dritte Endnutzungsphase von ALN beginnt bereits um das Jahr 2065. Dass die Holzermengen unter denen der Massenoptimierung liegen, ist bedingt durch die geringere Nutzungsintensität in der zweiten Hälfte des Betrachtungszeitraums.

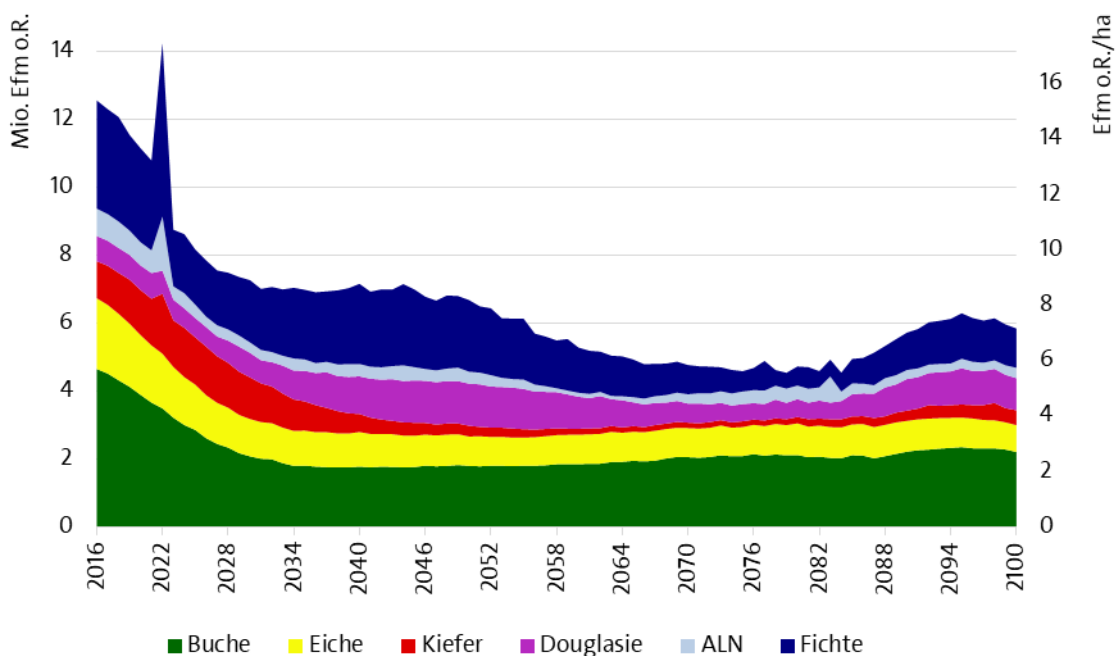


Abbildung 22 Jährliche Holzermengen nach Baumartengruppen und gesamt in Efm o.R. für das Grundszenario Wertoptimierung; Angaben in Efm o.R.

Die in Abbildung 23 dargestellten Holzerntemengen des Grundszenarios Speicheroptimierung sind auf deutlich niedrigerem Niveau als für die beiden anderen Nutzungsszenarien ermittelt. im Zeitraum von 2036 bis 2052 sinkt die Gesamtmenge sogar unter 3 Mio. Efm o.R. Die für Massenoptimierung und Wertoptimierung zur Mitte des Betrachtungszeitraums beobachtete zweite Periode höherer Holzerntemengen beginnt hier deutlich verzögert.

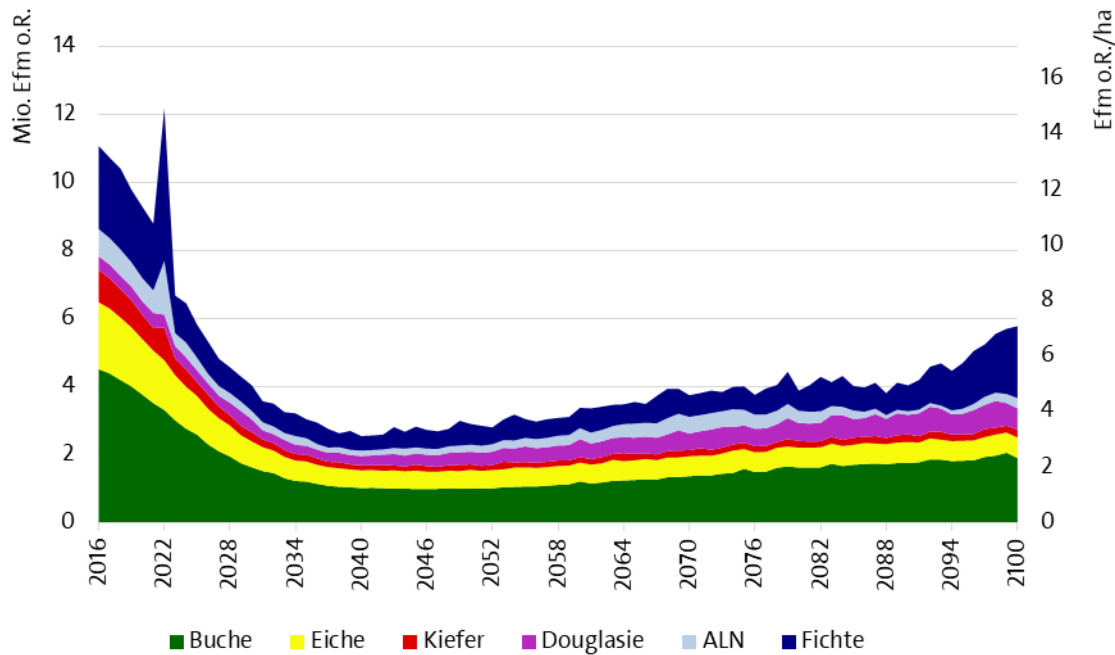


Abbildung 23 Holzerntemengen (pro Jahr) nach Baumartengruppen und gesamt in Efm o.R. für das Grundszenario Speicheroptimierung

Für das Grundszenario Nichtnutzung ist keine Abbildung der Holzerntemengen vorhanden, da alles anfallende Holz dem Totholzspeicher zugerechnet wird, es findet keine Holzernte statt (vgl. Kapitel 3.1.1).

Die Kombinationsszenarien zeigen das Resultat der in Tabelle 2 für sie definierten Gewichtung der Grundszenarien. Das Kombinationsszenario Nutzung (Abbildung 24) mit höheren Anteilen von Massenoptimierung (60 %) und Wertoptimierung (30 %) zeigt durchweg Holzerntemengen auf hohem Niveau. Hier sind nur geringe Anteile der Holzbodenfläche in Rheinland-Pfalz für Speicheroptimierung und Nichtnutzung von jeweils 5 % vorgesehen.

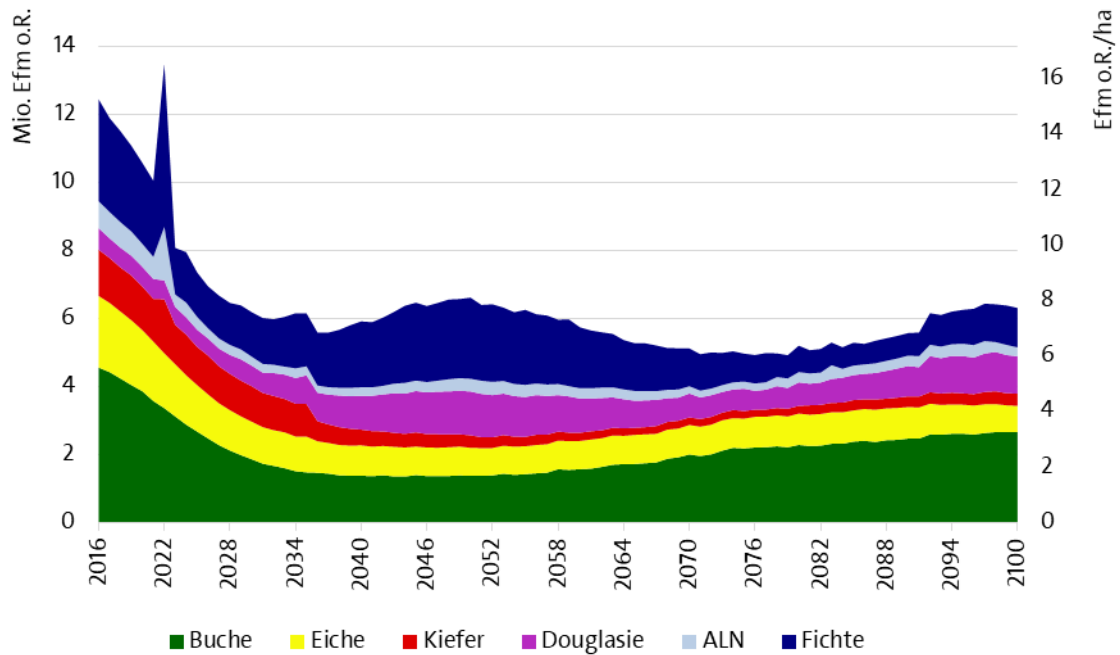


Abbildung 24 Holzerntemengen (pro Jahr) nach Baumartengruppen und gesamt in Efm o.R. für das Kombinationsszenario Nutzung

Die Holzerntemengen des Kombinationsszenarios Standard sind im gesamten Zeitraum von 2030 bis 2092 unter 6 Mio. Efm o.R. liegt damit aber nur im Zeitraum 2065 bis 2084 auf unter 4,9 Mio, der durchschnittlichen jährlichen Nutzungsmenge im Zeitraum zwischen BWI 2 und BWI 3 (Thünen Institut, 2015).

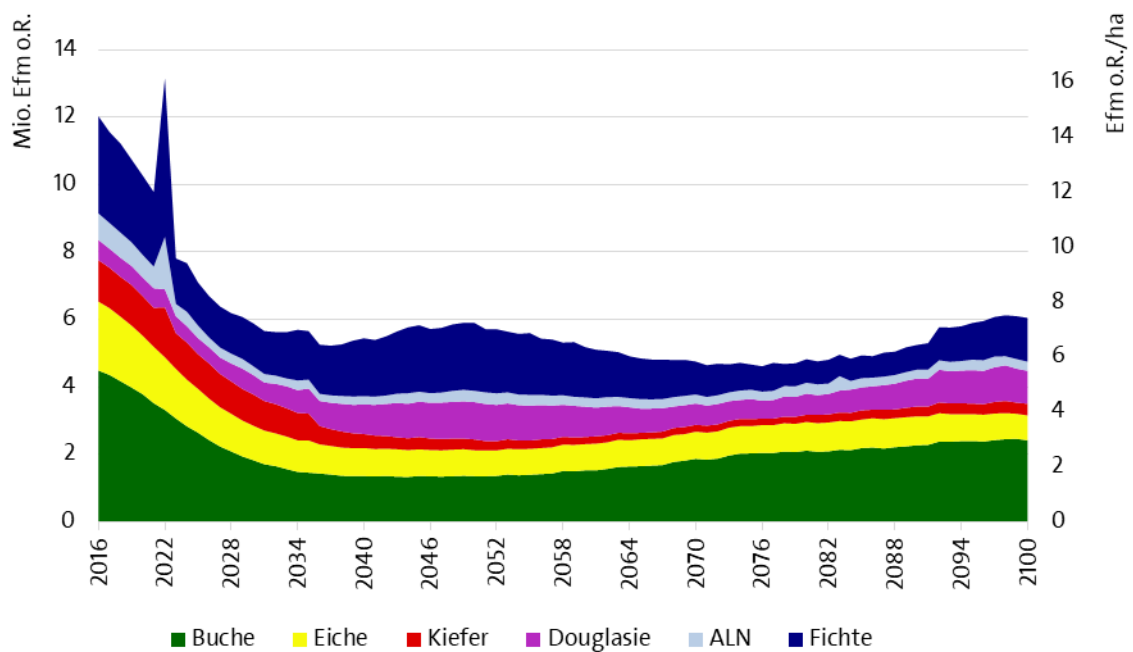


Abbildung 25 Holzerntemengen (pro Jahr) nach Baumartengruppen und gesamt in Efm o.R. für das Kombinationsszenario Standard

Die durchschnittliche jährliche Holzerntemenge des Szenarios von 7,3 Efm o.R./ha Holzbodenfläche (vgl. Tabelle 21 bei einer Holzbodenfläche von 815.448 ha in Rheinland-Pfalz) ist damit gegenüber den Ergebnissen der letzten beiden Bundeswaldinventuren erhöht. Diese gegenüber dem Zeitraum 2002 bis 2012 intensivierte Holzernte erscheint angesichts der Auflösung der hohen Altholzvorräte zu Beginn des Betrachtungszeitraums und der damit verbundenen mittelfristigen Reaktivierung des Zuwachspotentials auf den entsprechenden Flächen insgesamt plausibel.

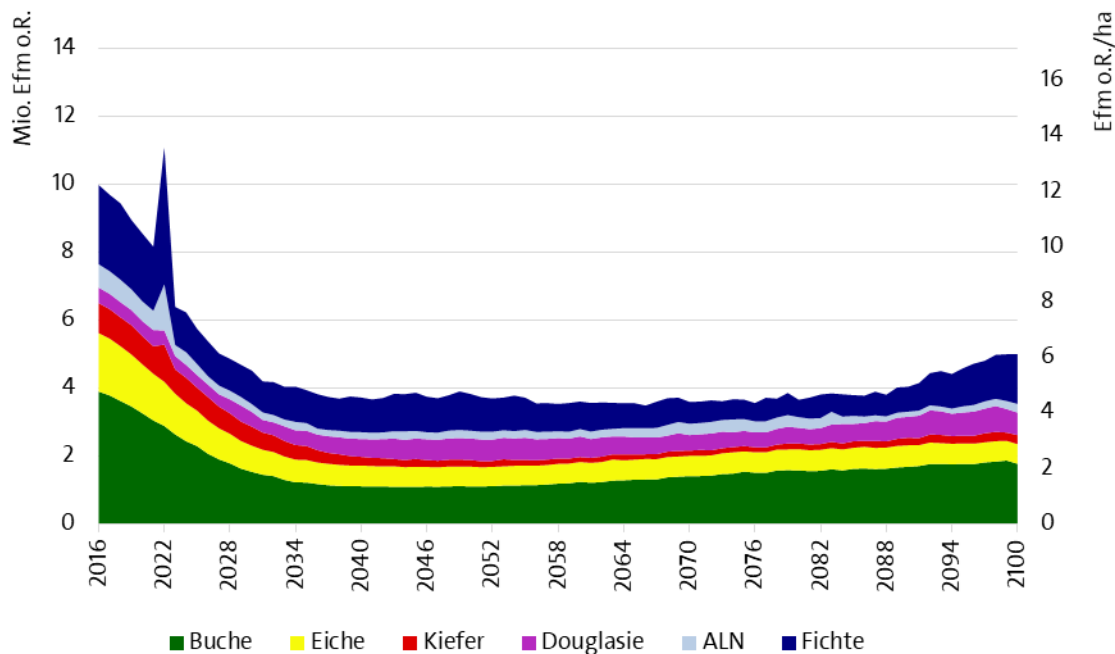


Abbildung 26 Holzerntemengen (pro Jahr) nach Baumartengruppen und gesamt in Efm o.R. (Kombinationsszenario Schutz)

Das Kombinationsszenario Schutz (Abbildung 26) zeigt stabile Holzerntemengen, die von 2026 bis 2065 über denen der Speicheroptimierung liegen, was durch die wenn auch niedrigen Anteile von Masseno Optimierung und Wertoptimierung am Kombinationsszenario begründet ist. Durch die hohe Speicherleistung dieses Kombinationsszenarios bietet die Holzverwendung die Möglichkeit zur Optimierung der Treibhausgasvermeidung.

### **4.3 Simulation der Holzverwendung**

Als Ergebnisse der waldbaulichen Modellierung wurden in Kapitel 4.1 für die verschiedenen Szenarien die Entwicklung des Vorrats und der Kohlenstoffspeicher im Wald und die jährlich entnommenen Rohholzmengen dargestellt. Diese Rohholzmengen (vgl. Kapitel 4.2.3) bilden den Übergang zu dem System der Holzverwendung und können dort bezüglich ihrer Kohlenstoffeffekte bewertet werden. Für die Bewertung der Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung sind die drei Effekte a) Veränderung des Holzproduktespeichers (Kohlenstoffspeicher der Holzprodukte), b) die stoffliche Substitution bzw. Materialsubstitution und c) die energetische Substitution zu berücksichtigen. Die Summe aus diesen drei Kohlenstoffeffekten bildet den Kohlenstoffeffekt der Holzverwendung. Zusammen mit den Kohlenstoffeffekten des Waldes (Entwicklung des Waldspeichers) ergibt sich der Gesamtkohlenstoffeffekt von Forst- und Holzwirtschaft (Darstellung in Kapitel 4.4).

#### **4.3.1 Holzerntemengen als Grundlage für die Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung – exemplarische Darstellung des Grundszenarios Massenoptimierung**

Dieses Kapitel soll dem Verständnis dienen, wie die Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung von den Holzerntemengen und ihrer Zusammensetzung bestimmt werden. Dabei wird auf die Unterschiede bei der Entwicklung des Holzproduktespeichers und der Kohlenstoffeffekte der stofflichen und energetischen Substitution eingegangen. Die Darstellung erfolgt am Beispiel des Grundszenarios Massenoptimierung. Im Basisszenario der Holzverwendung (vgl. methodische Annahmen in Kapitel 3.2) wird als Modellannahme von einem konstanten Verwendungsschlüssel der Holzverwendung und konstanten Stoffströmen während des gesamten Betrachtungszeitraums ausgegangen.

Der Verwendungsschlüssel bestimmt Baumartengruppen spezifisch die Verwendung. Damit ist die Höhe der jährlichen Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung unmittelbar davon abhängig, welche (Ernte-) Mengen an Rohholz im Betrachtungszeitraum jährlich stofflich oder energetisch verwendet wird und wie sich diese jährlichen Erntemengen auf die verschiedenen Baumartengruppen verteilen. Die Verteilung nach Baumartengruppen

determiniert, wie hoch der Anteil des Holzes ist, das einer stofflichen oder energetischen Verwendung zugeführt wird und bestimmt damit in hohem Maße die daraus resultierenden Kohlenstoffeffekte, die in der Regel bei einem stofflichen Einsatz deutlich höher sind als bei einem Einsatz zur Energieerzeugung oder einem Einsatz in der Papier- und Zellstoffindustrie (vgl. detaillierter in Kapitel 4.3.2).

Die Darstellung der Abbildungen in diesem Kapitel (Abbildung 27 bis Abbildung 30) erfolgt zunächst fortlaufend und nicht unterbrochen von dem Textteil, um den Vergleich der Abbildungen untereinander zu verbessern.

In Abbildung 21 in Kapitel 4.2.3 wurden die jährlichen Holzerntemengen für das Grundszenario Massenoptimierung als gestapelte Flächen dargestellt. Diese Darstellung wird in Abbildung 27 in ein Liniendiagramm überführt, das es erleichtern soll, die jährlichen Holzerntemengen der einzelnen Baumartengruppen abzulesen. Neben dieser Darstellung der Holzerntemengen in der Einheit Efm o. R. werden in Abbildung 28 die jährlichen Erntemengen auch in der Einheit t C dargestellt. Die Unterschiede im Verlauf der Kurven in Abbildung 27 und Abbildung 28 sind dadurch begründet, dass das Holz der Baumarten Buche und Eiche mit 0,56 bzw. 0,57 t/m<sup>3</sup> eine um fast 50 % höhere Raumdichte hat als das Holz von Fichte oder Douglasie (0,38 bzw. 0,41 t/m<sup>3</sup>); damit speichert Buche bei gleichem Volumen auch ca. 50 % mehr Kohlenstoff als Fichte. Dieser höhere Kohlenstoffgehalt zeigt sich insbesondere dann als Vorteil, wenn das Holz energetisch verwertet wird (höhere Kohlenstoffeffekte bei der energetischen Substitution); bei einer stofflichen Verwendung hingegen können Nadelholz-Baumartengruppen durch einen wesentlich höheren Anteil an Holz, das stofflich genutzt wird und höhere Ausbeuten im Fertigungsprozess den Effekt der niedrigeren Raumdichte im Vergleich zu Laubholz nicht nur kompensieren, sondern auch übertreffen, so dass der Einsatz eines m<sup>3</sup> Nadelholz in der Regel eine höhere Klimaschutzleistung hat als der Einsatz eines m<sup>3</sup> Laubholz. Bei dieser Aussage ist zu beachten, dass dabei von dem heutigen Einsatz und den heutigen Möglichkeiten, Laubholz einzusetzen, ausgegangen wird. Wie sich die Situation für die Klimaschutzleistung der Forst und Holzwirtschaft darstellt, wenn man in Zukunft eine Erhöhung der stofflichen Nutzung des Laubholzes erreicht (z. B. durch neue Produkte oder verbesserte Fertigungstechnologien), wird in Kapitel 4.4.3 gezeigt.

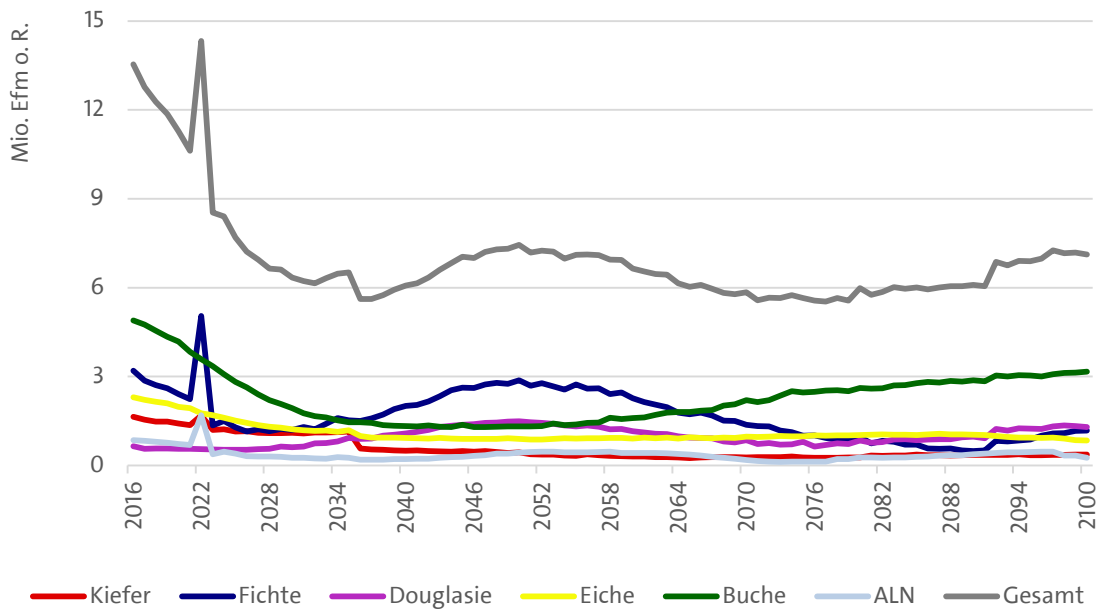


Abbildung 27 Holzerntemengen (pro Jahr) nach Baumartengruppen und gesamt in Efm o.R. für das Grundszenario Massenoptimierung

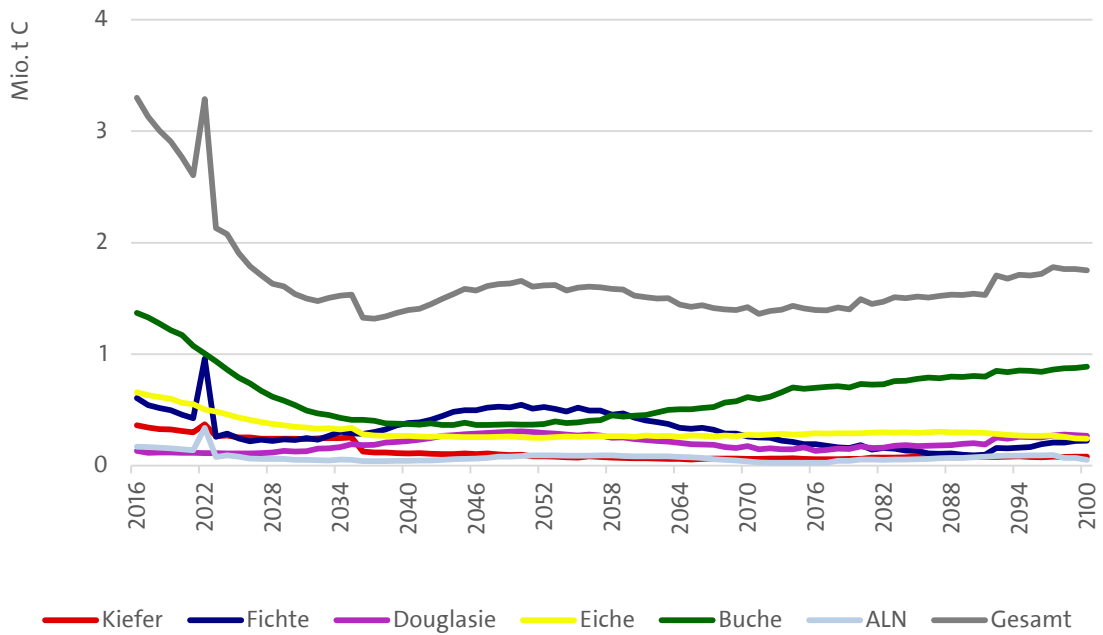


Abbildung 28 Holzerntemengen (pro Jahr) nach Baumartengruppen und gesamt in t C für das Grundszenario Massenoptimierung

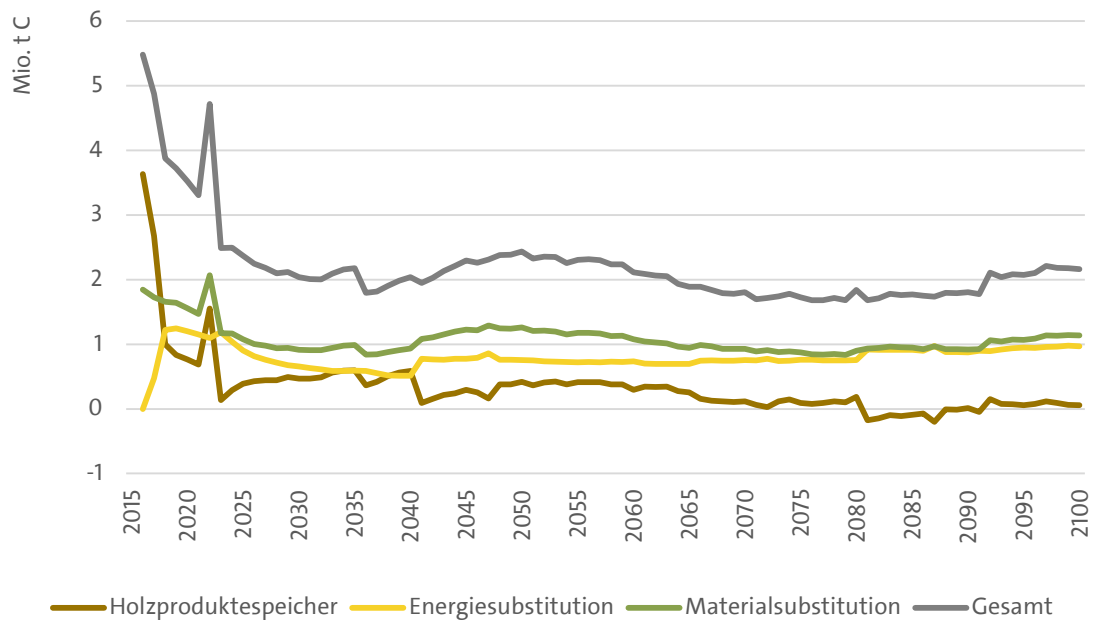


Abbildung 29 Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung pro Jahr für das Grundszenario Massenoptimierung

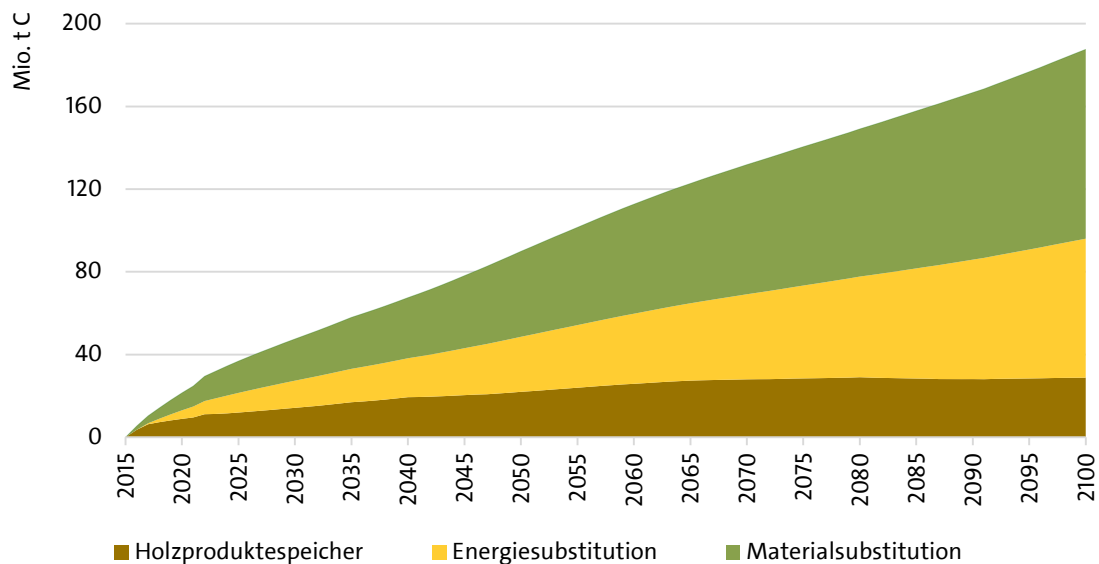


Abbildung 30 Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung im Zeitraum 2015–2100; kumuliert (Grundszenario Massenoptimierung)

In Abbildung 29 sind die Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung jährlich einzeln als Linien der Veränderung des Holzproduktespeichers, der Höhe der stofflichen und energetischen Substitution und als Gesamteffekt dargestellt. Neben den Holzermengungen wird



auch die (anteilige) energetische Verwertung der Rinde bei der energetischen Substitution berücksichtigt. Man sieht in dieser Abbildung, dass der Gesamteffekt (graue Linie) eine hohe Übereinstimmung mit der Darstellung der Gesamterntemengen in Abbildung 27 und Abbildung 28 hat: Große Erntemengen zu Beginn bis zum Jahr 2024 zeigen sich auch in einer starken Erhöhung des Holzspeichers und hohen Werten für die energetische und stoffliche Substitution. Zu berücksichtigen ist hier, dass zwischen Ernte bzw. Rohholzbereitstellung zur Energieverwendung und der Verbrennung des Holzes ein bis zwei Jahre liegen, so dass es zwischen Abbildung 27 bzw. Abbildung 28 und Abbildung 29 zu einer zeitlichen Differenz der dargestellten Effekten kommt. Entsprechend dem Rückgang der jährlichen Erntemengen von 8,4 Mio. Efm (2024) auf 5,6 Mio. Efm (2036) nimmt auch der jährliche Effekt der Kohlenstoffeffekte der Holznutzung im gleichen Zeitraum ab (von 2,5 Mio. t C/Jahr auf 1,8 Mio. t C/Jahr). Der Grund dafür, dass in diesem Zeitraum der Rückgang nicht stärker ausfällt, hängt damit zusammen, dass die Erntemengen der Nadelhölzer eher leicht ansteigen, denn mit deren Verwendung ist ein etwas höherer Klimaschutzeffekt verbunden als mit der Verwendung von Laubhölzern (hier insbesondere die Buche). Auf die Bedeutung der Holz- bzw. Baumart wird in Kapitel 4.3.3 eingegangen. Der Gesamtkohlenstoffeffekt von 1,8 Mio. t C/Jahr (2036) steigt auf 2,4 Mio. t C/Jahr (2051) und geht anschließend auf 1,7 Mio. t C/Jahr (2072) zurück. Der nochmalige Anstieg ab 2091 auf fast 2,2 Mio. t C/Jahr hängt insbesondere damit zusammen, dass ab 2090 die Erntemengen der Fichten noch einmal deutlich ansteigen. Sie erreichen jedoch nicht wieder das Niveau zu Beginn des Simulationszeitraums (2022) oder zum Zeitpunkt 2051. Dies hat seinen Grund darin, dass in der Waldwachstumsmodellierung ein Baumartenwechsel vorgesehen ist, so dass jeweils die Hälfte der Fichtenbestände nach einer Endnutzung in andere Baumarten überführt wird, was zur Folge hat, dass sich nach einer weiteren Rotationsperiode die Erntemengen in etwa auf die Hälfte reduzieren.

Insgesamt lässt sich die Entwicklung des jährlichen Gesamtkohlenstoffeffekts der Holzverwendung durch die Höhe der Erntemengen und den Anteil der Nadelhölzer an den Holzerntemengen erklären. Diese Erklärung gilt ebenfalls – sogar noch stärker ausgeprägt – für den Einzeleffekt der Materialsubstitution, denn im Jahr der Holzernte und der anschließenden holzwirtschaftlichen Verarbeitung zum Endprodukt wird der Kohlenstoffeffekt wirksam; dabei hat der Anteil des Nadelholzes an den Erntemengen eine besonders große Bedeutung.

Der Kohlenstoffeffekt der Energiesubstitution ist nur zum Teil unmittelbar abhängig von den eingesetzten Erntemengen, denn er speist sich aus drei unterschiedlichen Rohstoffquellen für die energetische Verwertung: 1) das Rohholz, das unmittelbar als Energieholz eingesetzt wird; 2) die Nebenprodukte und das Industrierestholz, die bei der stofflichen Verwertung des Holzes anfallen und entweder in BH(K)W verbrannt werden oder zu Energieprodukten wie Pellets verarbeitet werden und 3) das Holz, das nach Ausscheiden aus dem Holzproduktespeicher als Gebrauchtholz thermisch verwertet wird. Die Energiesortimente 1) und 2) stehen also in einem unmittelbaren Zusammenhang zu den Erntemengen und bestimmen damit auch im Jahr der Ernte bzw. im Jahr danach die Höhe der energetischen Substitution. Das Rohstoffsortiment 3) hingegen fällt zeitversetzt, entsprechend den Nutzungsdauern der verschiedenen Holzprodukte an und hängt damit auch vom Output aus dem Holzproduktespeicher ab. Im Gegensatz zu der stofflichen Substitution, die stark vom Anteil des Nadelholzes bestimmt ist, hat das Laubholz durch seine höhere Raumdichte eine überproportional große Bedeutung bei der Höhe der energetischen Substitution.

Der Nettoinput in den Holzproduktespeicher hängt direkt mit der Erntemenge zusammen. Da jedoch auch Holzprodukte aus dem Holzproduktespeicher ausscheiden, ist für die Veränderung des Holzproduktespeichers auch dieser Output zu berücksichtigen. Dieses Ausscheiden macht sich in Abbildung 29 auch schon ab 2017 deutlich durch einen Rückgang bemerkbar (Ausscheiden der Energieprodukte, die nur ein bis zwei Jahre im Holzproduktespeicher verbleiben und Ausscheiden des Holzes, das zu Verpackungen verarbeitet wurde mit einer durchschnittlichen Verweildauer im Holzproduktespeicher von drei Jahren). Ist der Kohlenstoffgehalt der aus dem Holzproduktespeicher ausscheidenden Produkte größer als der der neu eingelagerten, wird der jährliche Wert des Holzproduktespeichers auch negativ, wie man in Abbildung 29 ab dem Jahr 2082 für mehrere Jahre sieht. Bei einer konstanten Erntemenge (und gleichbleibenden Annahmen für die Holzverwendung) wäre langfristig der Kohlenstoffeffekt aus der Veränderung des Holzproduktespeichers Null; der Holzproduktespeicher würde auf einem konstanten Niveau verbleiben, nachdem er über eine bestimmte Zeit aufgefüllt wurde. Dies lässt sich in Abbildung 29 ab 2070 beobachten, wenn die Kurve der Veränderung des Holzproduktespeichers jeweils etwas unter- oder oberhalb der X-Achse liegt. Diese Entwicklung korrespondiert mit einer vergleichsweise kontinuierlichen Erntemenge ab 2030, die zwischen 2030

und 2100 zwischen 5,4 und 7,4 Mio. Efm pro Jahr schwankt und durchschnittlich bei ca. 6,4 Mio. Efm pro Jahr liegt.

Damit ist der Kohlenstoffeffekt aus der Veränderung des Holzproduktespeichers *temporär* und unterscheidet sich elementar von den Kohlenstoffeffekten der Substitution, die immer größer Null sind und *dauerhaft*. Die Kohlenstoffeffekte der Substitution addieren sich damit im Zeitverlauf, während der Holzproduktespeicher bei konstantem In- und Output langfristig einen Gleichgewichtszustand erreicht. Der Holzproduktespeicher ist damit mit einem nicht genutzten Wald bzw. einem Totholzspeicher, der einen konstanten jährlichen Input hat, vergleichbar. Abbildung 30 stellt die jährlichen Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung kumuliert dar. Tabelle 22 weist für die Zeiträume 2016–2030, 2016–2050 und 2016–2100 den durchschnittlichen Wert der Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung aus und differenziert sie nach dem jeweiligen Beitrag des Holzproduktespeichers und der energetischen und stofflichen Substitution.

Tabelle 22 Durchschnittliche jährliche Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung des Grundszenarios Massenoptimierung differenziert nach dem Anteil der Beiträge aus der Änderung des Holzproduktespeichers und der Material- und Energiesubstitution

Klimaschutzleistung	2016–2030 [t C/Jahr]	2016–2050 [t C/Jahr]	2016–2100 [t C/Jahr]
Summe	3 169 211	2 568 473	2 206 869
davon			
Holzproduktespeicher	30 %	24 %	15 %
Materialsubstitution	42 %	46 %	49 %
Energiesubstitution	28 %	30 %	36 %
<i>davon der Anteil Energiesubstitution aus zunächst stofflicher Nutzung</i>	45 %	53 %	57 %

Dadurch, dass ab dem Jahr 2040 der Beitrag des Holzproduktespeichers geringer ist und dann ab dem Jahr 2070 keine Erhöhung des Holzproduktespeichers stattfindet, sinkt der Anteil des Beitrags des Holzproduktespeichers von 30 % im ersten Betrachtungszeitraum bis 2030 auf 15 % im gesamten Zeitraum 2016–2100. Dieser geringere Beitrag aus dem Holzproduktespeicher ist der wichtigste Grund für den Rückgang des Kohlenstoffeffekts (3,2 Mio. t C pro Jahr im Zeitraum 2016–2030 auf 2,2 Mio. t C pro Jahr im Zeitraum 2016–2100).

Im Zeitraum 2016–2100 ist der Kohlenstoffeffekt aus der stofflichen Substitution 1,36 Mal so hoch wie der der energetischen Substitution, wobei die Kohlenstoffeffekte von stofflicher und energetischer Substitution zum Ende des Zeitraums in etwa gleich sind (vgl. auch Abbildung 29). Die relativ größere Bedeutung der energetischen Substitution zum Ende des Betrachtungszeitraums hängt vor allem damit zusammen, dass weniger Nadelholz zur (stofflichen!) Nutzung zur Verfügung steht und gleichzeitig deutlich mehr Buche; sie wird zum großen Teil energetisch verwendet. Tabelle 22 enthält als zusätzliche Information, dass 45 % bis 57 % des Kohlenstoffeffekts der Energiesubstitution durch Holz erbracht wird, das im ersten Verwendungsschritt stofflich genutzt wird (durch energetische Verwertung der Nebenprodukte und des Industrierestholzes bzw. des Gebrauchtholzes nach dem Gebrauch). Die Zunahme dieses Wertes im Betrachtungszeitraum ist auf das zunehmende Ausscheiden von Produkten aus dem Holzproduktespeicher und ihrer anschließenden thermischen Verwendung zurückzuführen.

#### **4.3.2 Abhängigkeit der Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung von der Verwendung in der 1. Absatzstufe**

Tabelle 23 differenziert für den Zeitraum 2016–2100 die Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung nach der Verwendung in der 1. Absatzstufe; also danach ob das Rohholz stofflich in der Säge- und Holzwerkstoffindustrie oder Papierindustrie eingesetzt wird oder energetisch verwertet wird. Gezeigt werden hier wie im vorangegangenen Kapitel 4.3.1 exemplarisch die Ergebnisse für das Grundszenario Massenoptimierung. Tabelle 23 illustriert, dass durch den überwiegenden Einsatz des Holzes in der Sägeindustrie hier auch absolut die größten Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung erzielt werden, gefolgt von den Kohlenstoffeffekten aus einem Einsatz in der Holzwerkstoffindustrie. Tabelle 23 bestätigt dabei die Aussage von Tabelle 22, dass durch die energetische Verwertung der Nebenprodukte und des Industrierestholzes sowie die energetische Verwertung nach Gebrauch der Produkte im Zeitraum 2016–2100 ein insgesamt größerer Substitutionseffekt durch energetische Substitution erzielt wird als durch das Holz, das erstmalig energetisch eingesetzt wird. Für Papierprodukte wird keine stoffliche Substitution angenommen, weswegen der dazu in Tabelle 23 ausgewiesene Wert Null ist. Der Wert bei der energetischen Substitution im Verwertungsweg Papier begründet sich in einer anteiligen

energetischen Verwertung der Papierprodukte, die aus dem Produktkreislauf ausscheiden.

Besonders aussagekräftig ist die letzte Spalte der Tabelle 23; sie weist für jeden Verwertungsweg einen spezifischen Kohlenstoffeffekt (t C/Efm) aus. Hier erkennt man, dass die stofflichen Verwertungswege Sägewerke und Holzwerkstoffindustrie mit 0,41 t C/Efm bzw. 0,47 t C/Efm einen deutlich höheren Kohlenstoffeffekt haben als der Einsatz zu Energiezwecken in der ersten Absatzstufe mit einem spezifischen Wert von 0,15 t C/Efm. Fasst man die stoffliche Verwendung in Säge- und Holzwerkstoffindustrie in einem durchschnittlichen Wert zusammen, ergibt sich ein durchschnittlicher Kohlenstoffeffekt von 0,42 t C/Efm für den Einsatz in der Säge- und Holzwerkstoffindustrie. Dieser Wert liegt 2,8-fach höher als der Wert bei der ausschließlich energetischen Verwendung. Hierbei ist zu beachten, dass diese Betrachtung sich auf die eingesetzten Erntemengen in Efm bezieht und nicht auf den Kohlenstoff des eingesetzten Holzes. Einen noch geringeren spezifischen Kohlenstoffeffekt als die energetische Verwendung hat die Verwendung in der Zellstoff- bzw. Papierwirtschaft mit 0,13 t C/Efm, da hier nur eine anteilige energetische Verwendung berücksichtigt wird. Die Differenz der Kohlenstoffeffekte von stofflicher Verwendung in Säge- und Holzwerkstoffindustrie liegt daran, dass im Holzverwendungsmodell eine höhere (stoffliche) Ausbeute in der Holzwerkstoffindustrie zugrundeliegt.

Tabelle 23 Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung nach der Verwendung in der 1. Absatzstufe im Zeitraum 2016–2100 für das Grundszenario Massenoptimierung

Holzverwendung in der 1. Absatzstufe	Kohlenstoffeffekt der Holzverwendung [t C]				
	Holzproduktespeicher	Energie-substitution	Material-substitution	Gesamt	pro Efm
Sägeindustrie	20 381 133	25 014 942	64 904 132	110 300 207	<b>0,41</b>
Holzwerkstoffindustrie	6 771 968	9 057 498	26 665 261	42 494 727	<b>0,47</b>
Papier/Zellstoff	189 667	4 499 076	0	4 688 743	<b>0,13</b>
Energie	1 499 805	28 600 414	0	30 100 218	<b>0,15</b>
<b>Gesamt</b>	<b>28 842 572</b>	<b>67 171 930</b>	<b>91 569 393</b>	<b>187 583 895</b>	<b>0,317</b>

Das Ergebnis aus Tabelle 23 lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:

Kohlenstoffeffekt der stofflichen Verwendung in Säge- und Holzwerkstoffindustrie

>>

Kohlenstoffeffekt der ausschließlich energetischen Verwendung

>

Kohlenstoffeffekt der Verwendung in der Papier- und Zellstoffindustrie

Damit ist die Erhöhung der stofflichen Nutzung in der 1. Absatzstufe eine wichtige Strategie zur Erhöhung der Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung. Diese Strategie wird in einer Variation des Basisszenarios der Holzverwendung mit einer zukünftig erhöhten stofflichen Holznutzung berücksichtigt und in Kapitel 4.4.3.1 und 4.4.3.2 in der ganzheitlichen Analyse von Kohlenstoffeffekten des Waldes und der Holzverwendung berücksichtigt; Kapitel 4.4.3.3 zeigt die Auswirkung einer vollständig energetischen Nutzung des eingesetzten Rohholzes.

### 4.3.3 Abhängigkeit der Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung von den verwendeten Holzarten

Aus technischen Gründen kann heute ein deutlich höherer Anteil des anfallenden Nadelholzes im Vergleich zu dem anfallenden Laubholz stofflich genutzt werden. Berücksichtigt man die Ergebnisse, die im letzten Kapitel 4.3.2 dargestellt wurden, ist jedoch eine stoffliche Verwendung (in der Regel mit einer anschließenden thermischen Verwertung des Gebrauchtholzes) mit einem deutlich höheren Kohlenstoffeffekt verbunden als eine ausschließlich energetische Nutzung. Diese Überlegung erklärt den höheren Klimaschutzeffekt beim Einsatz von Nadelholz im Vergleich zum Einsatz von Laubholz. Durch die höhere Raumdichte der in Rheinland-Pfalz dominierenden Laubhölzer der Baumartengruppen Buche und Eiche im Vergleich zu den Nadelhölzern (vgl. dazu auch Kapitel 4.3.1) sind jedoch mit der thermischen Verwertung von Laubholz höhere Kohlenstoffeffekte durch die energetische Substitution verbunden als bei der thermischen Verwertung von Nadelholz, so dass die Unterschiede zwischen den Klimaschutzeffekten von Laub- und Nadelholz bezogen auf den eingesetzten  $\text{m}^3$  Rohholz geringer sind als die Überlegungen zu den stark unterschiedlichen Kohlenstoffeffekten in stofflicher und energetischer Verwendung (vgl. Tabelle 23) vermuten lassen.

Tabelle 24 vergleicht exemplarisch für das Szenario Massenoptimierung den Kohlenstoffeffekt, den die holz- bzw. energiewirtschaftliche Verwendung von jeweils einem  $\text{m}^3$  Rohholzeinsatz im Zeitraum 2016–2100 erbringt; dabei findet eine Differenzierung nach den sechs in der Waldwachstumssimulation betrachteten Baumartengruppen statt. Ergänzend werden die Nadel- und Laubholzbaumartengruppen jeweils als „Nadelhölzer gesamt“ und „Laubhölzer gesamt“ zusammengefasst.

Tabelle 24 Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung differenziert nach Baumartengruppen im Zeitraum 2016–2100 für das Grundszenario Massenoptimierung

Baumartengruppe	Kohlenstoffeffekt der Holzverwendung [t C]				
	Holzproduk- tespeicher	Energie- substitution	Material- substitution	Gesamt	pro Efm
Kiefer	2 366 634	5 169 109	10 763 013	18 298 757	<b>0,38</b>
Fichte	8 454 227	11 539 598	28 323 674	48 317 499	<b>0,34</b>
Douglasie	6 512 094	6 798 238	17 594 200	30 904 532	<b>0,38</b>
<i>Nadelhölzer gesamt</i>	<i>17 332 955</i>	<i>23 506 945</i>	<i>56 680 887</i>	<i>97 520 788</i>	<b><i>0,36</i></b>
Eiche	2 816 872	14 534 192	9 489 003	26 840 067	<b>0,29</b>
Buche	8.084 390	25 866 512	22 856 637	56 807 539	<b>0,29</b>
ALN	608 355	3 264 280	2 542 866	6 415 501	<b>0,21</b>
<i>Laubhölzer gesamt</i>	<i>11 509 617</i>	<i>43 664 984</i>	<i>34 888 506</i>	<i>90 063 107</i>	<b><i>0,28</i></b>
<b>Gesamt</b>	<b>28 842 572</b>	<b>67 171 930</b>	<b>91 569 393</b>	<b>187 583 895</b>	<b>0,317</b>

Tabelle 24 zeigt, dass der absolute Beitrag der Nadelhölzer in Rheinland-Pfalz zum Klimaschutzeffekt im Zeitraum 2016–2100 etwas höher (8 %) ist, obwohl gleichzeitig 17 % mehr Laub- als Nadelholz (Bezug Volumen; Efm) im Zeitraum 2016–2100 eingesetzt wurden. D. h., im Betrachtungszeitraum 2016–2100 ist in Rheinland-Pfalz der potenzielle Kohlenstoffeffekt bei der Nutzung eines m<sup>3</sup> Nadelholz etwa ein Viertel höher als bei der Nutzung eines m<sup>3</sup> Laubholz (0,36 t C/Efm bzw. 0,28 t C/Efm); bei dieser Betrachtung wird von der für Rheinland-Pfalz simulierten Baumartenzusammensetzung ausgegangen. Unterschiede innerhalb der Baumartengruppe, die als Nadelholz bzw. Laubholz zusammengefasst sind, erklären sich meist durch eine unterschiedliche Raumdichte der Hölzer.

Der höhere Kohlenstoffeffekt von Nadelhölzern im Vergleich zu Laubhölzern erklärt sich zum einen aus den Kohlenstoffeffekten der Holzverwendung. In einer ganzheitlichen Betrachtung ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass Nadelbäume im Durchschnitt eine deutlich höhere Wuchsleistung bezogen auf das Volumen haben als Laubhölzer, so lag nach den Daten der Bundeswaldinventur für Rheinland-Pfalz (Thünen Institut, 2015) der durchschnittliche jährliche Zuwachs der Nadelholzbaumartengruppe im Zeitraum 2002–2012 bei 13,87 m<sup>3</sup>/ha und der der Laubholzbaumartengruppe bei 8,33 m<sup>3</sup>/ha; damit hatten die Nadelhölzer im Schnitt einen ca. 1,66-fach Zuwachs. Der Kohlenstoffeffekt aus dem höheren Wachstum von Nadelhölzern und dem höheren Kohlenstoffeffekt der



Holzverwendung addieren sich, so dass der Kohlenstoffeffekt der Forst- und Holzwirtschaft beim Anbau und der Verwendung von Nadelholz bei etwa dem Doppelten liegt wie bei Laubholz. Auch wenn die retrospektiven Werte zum Zuwachs u. a. wegen des Baumartenwechsels nur eingeschränkt auf den Simulationszeitraum übertragen werden können, geben sie doch den derzeitigen technischen Voraussetzungen einen klaren Hinweis zur deutlichen Vorteilhaftigkeit von Nadelholz im Vergleich zu Laubholz in Bezug auf die Klimaschutzeffekte von Forst- und Holzwirtschaft.

#### **4.4 Klimaschutzleistung von Wald und Holzverwendung bis 2100 – Ergebnisse der ganzheitlichen Betrachtung**

##### **4.4.1 Ganzheitliche Betrachtung**

Die Klimaschutzleistung der Waldbehandlung kann nur dann vollständig beschrieben werden, wenn sowohl die Speicherwirkung in Wald und Holzprodukten als auch die energetische und materielle Substitution von Holz bewertet werden, wie in Kapitel 3 beschrieben ist. Diese Studie vergleicht Szenarien der waldbaulichen Bewirtschaftung, die sich darin unterscheiden, ob sie eher darauf ausgerichtet sind, den Kohlenstoffspeicher im Wald zu erhöhen und damit mit geringeren Holzerntemengen verbunden sind (die Grundszenarien Speicheroptimierung oder Nichtnutzung oder das Kombinationsszenario Schutz) oder ob sie eher holznutzungsorientiert sind (z. B. das Grundszenario Massenoptimierung oder das Kombinationsszenario Nutzung). Diese holznutzungsorientierten Szenarien sind mit höheren Holzerntemengen verbunden, haben aber dafür einen geringeren Vorrat und damit Waldspeicher zur Folge. D. h., höhere Klimaschutzeffekte im Wald (durch die Erhöhung des Waldspeichers) sind mit geringeren Holzerntemengen verbunden und damit auch mit geringeren Kohlenstoffeffekten der Holzverwendung (vgl. die Ausführungen zum direkten Zusammenhang von Holzerntemengen und Kohlenstoffeffekten der Holzverwendung in Kapitel 4.3.1).

Höhere Klimaschutzeffekte der Holzverwendung, die aus höheren Holzerntemengen resultieren, sind mit einem geringeren Kohlenstoffeffekt im Wald verbunden. Abbil-

Abbildung 31 und Abbildung 32 illustrieren diesen Zusammenhang: Abbildung 31 zeigt die Summe aller Kohlenstoffspeicher der Grundscenarien im Wald (unter- und oberirdische Biomasse und Totholz; vgl. Kapitel 4.2.2) und Abbildung 32 zeigt die Summe der Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung (vgl. Kapitel 4.3.1). Betrachtet man lediglich die in Abbildung 31 dargestellten Kohlenstoffeffekte der Veränderung des Waldspeichers, so würde dies für eine klare Vorteilhaftigkeit der Szenarien sprechen, denen eine geringere oder keine Holznutzung zugrunde liegt. Die alleinige Betrachtung von Abbildung 32 spricht mit deutlich geringeren Kohlenstoffeffekten durch Holzverwendung bei den Szenarien, die einen höheren Waldspeicher anstreben (beim Nichtnutzer definitionsgemäß Null), für eine klare Vorteilhaftigkeit der holznutzungsorientierten Szenarien.

Die Systeme der Waldbewirtschaftung (wie als Ergebnis in Abbildung 31 dargestellt) und Holzverwendung (wie als Ergebnis in Abbildung 32 dargestellt) bilden jedoch ein Gesamtsystem, das es auch ganzheitlich zu analysieren gilt. Daher ist es notwendig, über die Einzelanalyse der Kohlenstoffeffekte im Wald oder der Holzverwendung hinauszugehen und beide Bereiche miteinander in einer Gesamtanalyse zu verknüpfen. Der Gesamtkohlenstoffeffekt ergibt sich dann als Summe der Kohlenstoffeffekte des Waldes und der Holzverwendung. Diese ganzheitliche Betrachtung mit der Zusammenführung der Ergebnisse aus Kapitel 4.1 (Ergebnisse der Waldsimulation; hier aggregiert für die Grundscenarien in Abbildung 31 dargestellt) und Kapitel 4.3 (Ergebnisse der Simulation der Holzverwendung; hier aggregiert für die Grundscenarien in Abbildung 32 dargestellt) erfolgt in diesem Kapitel 4.4.

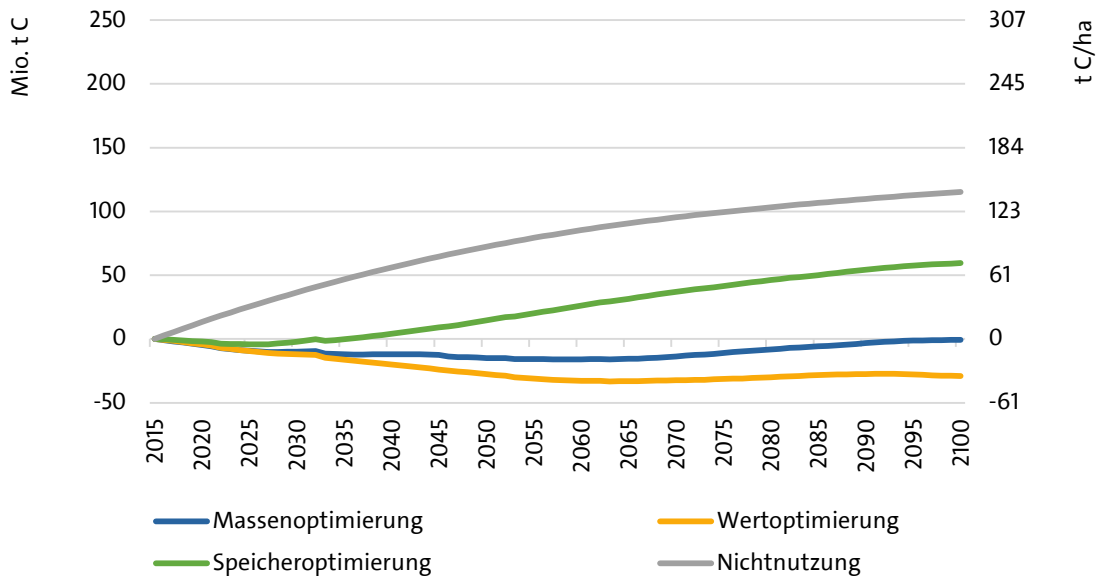


Abbildung 31 Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicher im Wald von 2016 bis 2100 für die Grundszenarien in t Kohlenstoff (t C) für das Basisszenario der Holzverwendung

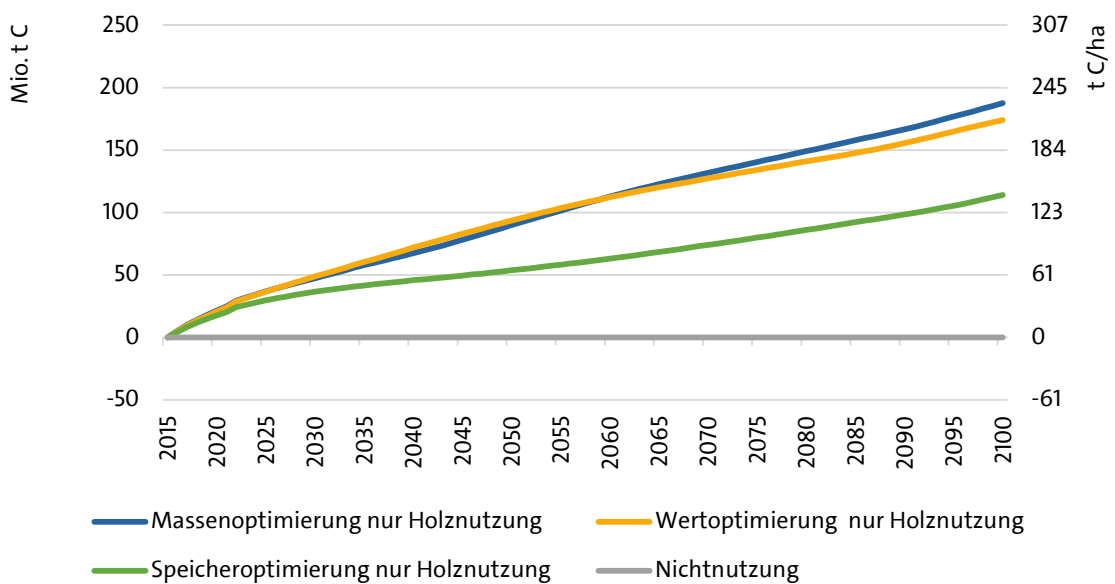


Abbildung 32 Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung (Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) von 2016 bis 2100 für die Grundszenarien in t Kohlenstoff (t C) für das Basisszenario der Holzverwendung

Nach der Beschreibung der aktuellen Klimaschutzleistung als Durchschnittswerte des Zeitraums 2013 bis 2015 in Kapitel 4.1 wird die Entwicklung der Klimaschutzleistung der waldbaulichen Szenarien in Abhängigkeit von Szenarien der Waldbewirtschaftung mit

Ansatz der aktuellen Holzverwendung in Kapitel 4.4.2 dargestellt. Kapitel 4.4.3 beschreibt die Folgen einer vermehrt stofflichen oder gänzlich energetischen Holzverwendung und unter die Folgen höherer Ausbeuten in der Holzverwendung auf die Klimaschutzleistung wird in Kapitel 4.4.4 dargestellt. Zustand und mögliche Entwicklungen der Klimaschutzleistungen des Waldes in Rheinland-Pfalz werden quantifiziert.

## **4.4.2 Status quo: Basisszenario der Holzverwendung**

### 4.4.2.1 Grundszenarien

Abbildung 33 zeigt die Entwicklung der Klimaschutzleistungen für die Grundszenarien der Waldbewirtschaftung kumuliert von 2015 bis 2100. Die durchgezogenen Linien stellen alle Klimaschutzleistungen des Gesamtsystems Wald–Holzverwendung (Wald- und Holzspeicher und Emissionsreduktion durch energetische und stoffliche Substitution) für die vier Grundszenarien dar. Die gepunkteten Linien zeigen im Vergleich die Entwicklung des Waldspeichers bis 2100, wie er sich als Summe aus der Speicherleistung in ober- und unterirdischer Biomasse und Totholz (vgl. Kapitel 4.2.2) ergibt.

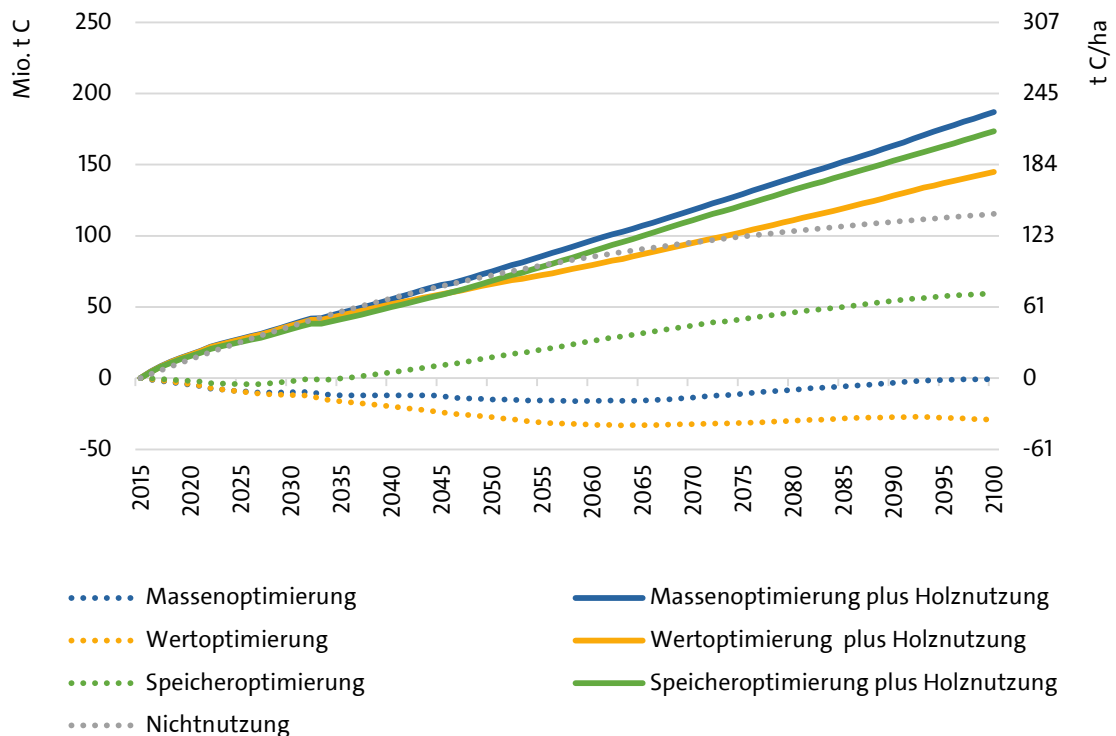


Abbildung 33 Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicherleistung im Wald von 2016 bis 2100 (gepunktete Linien) und für die Summe aller Klimaschutzleistungen des gesamten Systems Wald–Holzverwendung (durchgezogene Linien; Wald- und Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) für die Grundszenarien in t Kohlenstoff (t C) für das Basisszenario der Holzverwendung

Im Zeitraum bis zum Jahr 2050 zeigen alle vier Szenarien ähnlich hohe Kohlenstoffeffekte. Die Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung gleichen damit die gegenläufigen Kohlenstoffeffekte im Wald aus (vgl. Kapitel 4.4.1). Ab dem Jahr 2050 ergibt sich eine Vorteilhaftigkeit des Szenarios Massenoptimierung gegenüber der Nichtnutzung; das Szenario Speicheroptimierung ist ab ca. dem Jahr 2060 und das Szenario Wertoptimierung ab ca. dem Jahr 2075 der Nichtnutzung hinsichtlich der Klimaschutzleistung überlegen. Das Szenario Massenoptimierung erzielt höhere Klimaschutzleistungen als das Szenario Speicheroptimierung; von den auf Holznutzung ausgerichteten Szenarien hat die Wertoptimierung die geringste Klimaschutzleistung.

Tabelle 24 fasst das Ergebnis zusammen und weist für die drei Betrachtungszeiträume 2016–2030, 2016–2050 und 2016–2100 jeweils einen durchschnittlichen jährlichen Wert der Klimaschutzleistung aus. Dabei wird der Kohlenstoffeffekt der Holzverwendung dif-

ferenziert nach dem Effekt aus der Veränderung des Holzproduktespeichers und den Beiträgen aus der energetischen und stofflichen Substitution.

Tabelle 25 Durchschnittliche jährliche Klimaschutzleistung der Forst- und Holzwirtschaft in Rheinland-Pfalz abhängig von der Bewirtschaftungsform (Grundscenarien) für das Basisszenario der Holzverwendung in drei Betrachtungszeiträumen

Durchschnittliche jährliche Klimaschutzleistung	Waldspeicher [t C/a]	Holzproduktespeicher [t C/a]	Energie-substitution [t C/a]	Material-substitution [t C/a]	Gesamt [t C/a]
<b>2016–2030</b>					
Massenoptimierung	-653.440	949.528	875.783	1.343.900	<b>2.515.771</b>
Wertoptimierung	-785.285	991.626	860.831	1.403.452	<b>2.470.624</b>
Speicheroptimierung	-131.514	708.278	717.250	1.011.275	<b>2.305.289</b>
Nichtnutzung	2.434.058	0	0	0	<b>2.434.058</b>
<b>2016–2050</b>					
Massenoptimierung	-422.103	627.822	760310	1.180.341	<b>2.146.370</b>
Wertoptimierung	-779.838	653.722	787569	1.234.020	<b>1.895.473</b>
Speicheroptimierung	423.107	324.344	531550	678.726	<b>1.957.727</b>
Nichtnutzung	2.068.223	0	0	0	<b>2.068.223</b>
<b>2016–2100</b>					
Massenoptimierung	-5.855	339.324	790.258	1.077.287	<b>2.201.014</b>
Wertoptimierung	-340.158	285.760	754.860	1.006.970	<b>1.707.432</b>
Speicheroptimierung	702.122	200.149	507.554	634.327	<b>2.044.152</b>
Nichtnutzung	1.358.832	0	0	0	<b>1.358.833</b>

#### 4.4.2.2 Kombinationsszenarien

Abbildung 34 zeigt – entsprechend der Darstellungsweise in Abbildung 33 – die Entwicklung der Klimaschutzleistungen für die Kombinationsszenarien kumuliert von 2015 bis 2100. In Abbildung 34 sieht man, dass sich die Klimaschutzleistung der drei Kombinationsszenarien bis zum Jahr 2050 nicht unterscheidet und sich danach eine geringe Vorteilhaftigkeit der auf eine stärkere Holznutzung ausgerichteten Szenarien zeigt; deutlicher tritt dieser Effekt im letzten Drittel des Betrachtungszeitraums zu Tage. Tabelle 25 fasst das Ergebnis für die drei Betrachtungszeiträume 2016–2030, 2016–2050 und 2016–2100 zusammen und weist jeweils einen durchschnittlichen jährlichen Wert aus.

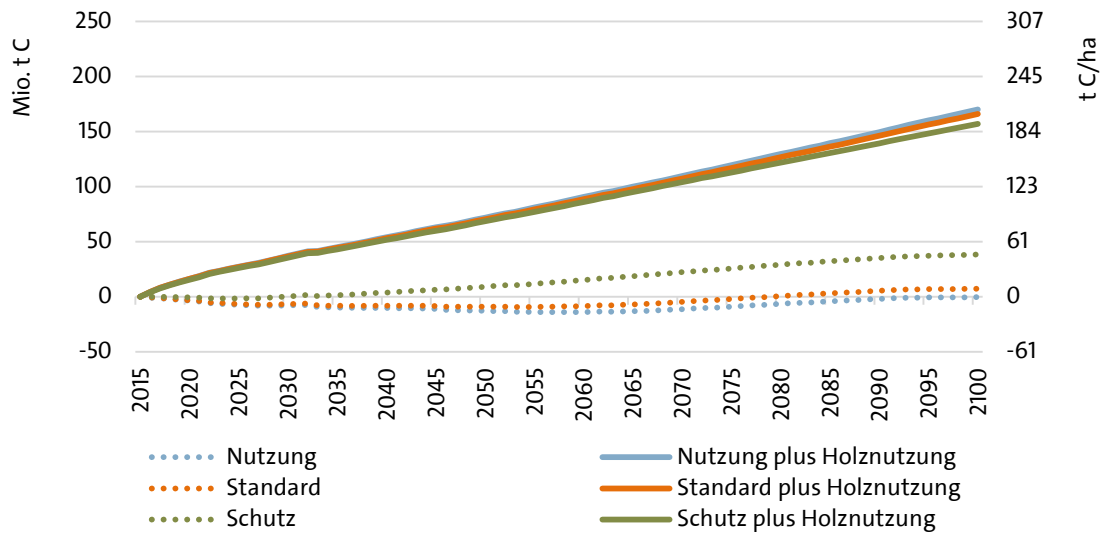


Abbildung 34 Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicherleistung im Wald von 2016 bis 2100 (gepunktete Linien) und für die Summe aller Klimaschutzleistungen des gesamten Systems Wald–Holzverwendung (durchgezogene Linien; Wald- und Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) für die Kombinationsszenarien in t Kohlenstoff (t C) für das Basisszenario der Holzverwendung

Tabelle 26 Durchschnittliche jährliche Klimaschutzleistung der Forst- und Holzwirtschaft in Rheinland-Pfalz abhängig von der Bewirtschaftungsform (Kombinationsszenarien) für das Basisszenario der Holzverwendung in drei Betrachtungszeiträumen

Durchschnittliche jährliche Klimaschutzleistung	Waldspeicher [t C/a]	Holzprodukt-speicher [t C/a]	Energie-substitution [t C/a]	Material-substitution [t C/a]	Gesamt [t C/a]
<b>2016–2030</b>					
Nutzung	-512.523	902.619	819.581	1.277.939	<b>2.487.616</b>
Standard	-440.826	868.536	795.054	1.231.023	<b>2.453.787</b>
Schutz	31.094	699.104	660.663	993.868	<b>2.384.729</b>
<b>2016–2050</b>					
Nutzung	-362.647	589.027	719034	1.112.347	<b>2.057.761</b>
Standard	-253.752	544.800	686083	1.039.789	<b>2.016.920</b>
Schutz	266.730	389.680	540062	768.586	<b>1.965.058</b>
<b>2016–2100</b>					
Nutzung	-2.513	299.330	725.990	980.180	<b>2.002.987</b>
Standard	86.969	275.775	681.815	910.220	<b>1.954.779</b>
Schutz	452.546	202.768	519.748	673.119	<b>1.848.181</b>

### 4.4.3 Veränderung des Anteils der stofflichen Holznutzung in der 1. Absatzstufe

Im Folgenden wird dargestellt, wie sich eine Erhöhung des stofflichen Einsatzes des Laubholzes in der 1. Absatzstufe (zu Lasten der energetischen Verwendung) bemerkbar macht. In Kapitel 4.4.3.1 wird von einer Erhöhung des stofflichen Einsatzes im Vergleich zum Basisszenario (s. Tabelle 11) ausgegangen, so dass der Anteil des stofflich genutzten Laubholzes in etwa auf dem Niveau des Anteils von vor 15 Jahren liegt (vgl. Kapitel 3.2 und Annahmen in Tabelle 12). In Kapitel 4.4.3.2 wird von der möglichst vollständigen Nutzung des Laubholzes in stofflichen Verwendungen ausgegangen, wobei von einem Anteil einer energetischen Nutzung von 10 % aus technischen Gründen ausgegangen wird (vgl. Kapitel 3.2 und Annahmen in Tabelle 13). Es wird jeweils davon ausgegangen, dass die erhöhte stoffliche Nutzung ab dem Jahr 2025 einsetzt und bis dahin die Holzverwendung dem Basisszenario der Holzverwendung entspricht. Kapitel 4.4.3.3 stellt die Klimaschutzleistung bei vollständig energetischer Nutzung dar.

#### 4.4.3.1 Erhöhte stoffliche Holznutzung in der 1. Absatzstufe

Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigen (nach einem Zeitraum von knapp 10 Jahren, in dem definitionsgemäß noch keine Variation der Annahmen im Vergleich zum Basisszenario der Holzverwendung stattfindet) für alle Szenarien außer der Nichtnutzung höhere Klimaschutzeffekte (zwischen 7 und 12 % über den gesamten Betrachtungszeitraum). Dabei profitieren die Szenarien, die auf eine höhere Holznutzung ausgelegt sind, etwas stärker von der Variation als die auf Erhöhung des Waldspeichers orientierten Szenarien. So erreichen bis zum Jahr 2100 die Grundszenarien Massenoptimierung oder Wertoptimierung einen zusätzlichen Klimaschutzeffekt von 10 bis 12 % und das Grundszenario Speicheroptimierung einen zusätzlichen Effekt von 7 %. Ähnlich ist es bei den Kombinationszenarien (Nutzung und Standard plus 10 % und Schutz plus 8 %).



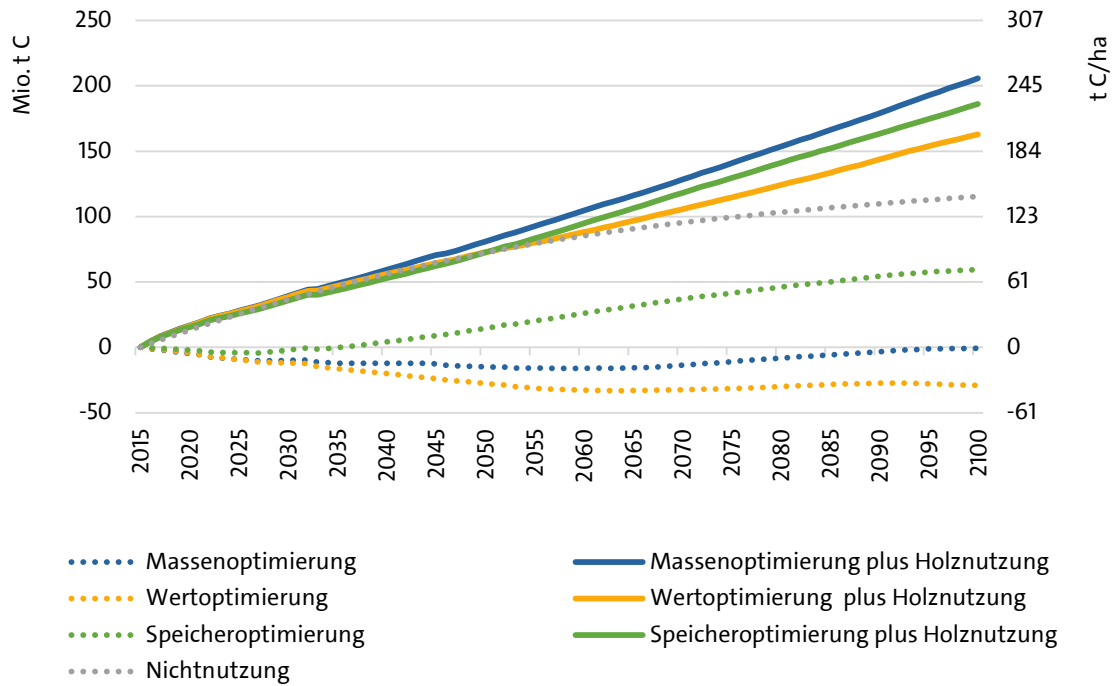


Abbildung 35 Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicherleistung im Wald von 2016 bis 2100 (gepunktete Linien) und für die Summe aller Klimaschutzleistungen des gesamten Systems Wald–Holzverwendung (durchgezogene Linien; Wald- und Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) für die Kombinationsszenarien in t Kohlenstoff (t C); Szenario einer erhöhten stofflichen Holzverwendung in der 1. Absatzstufe

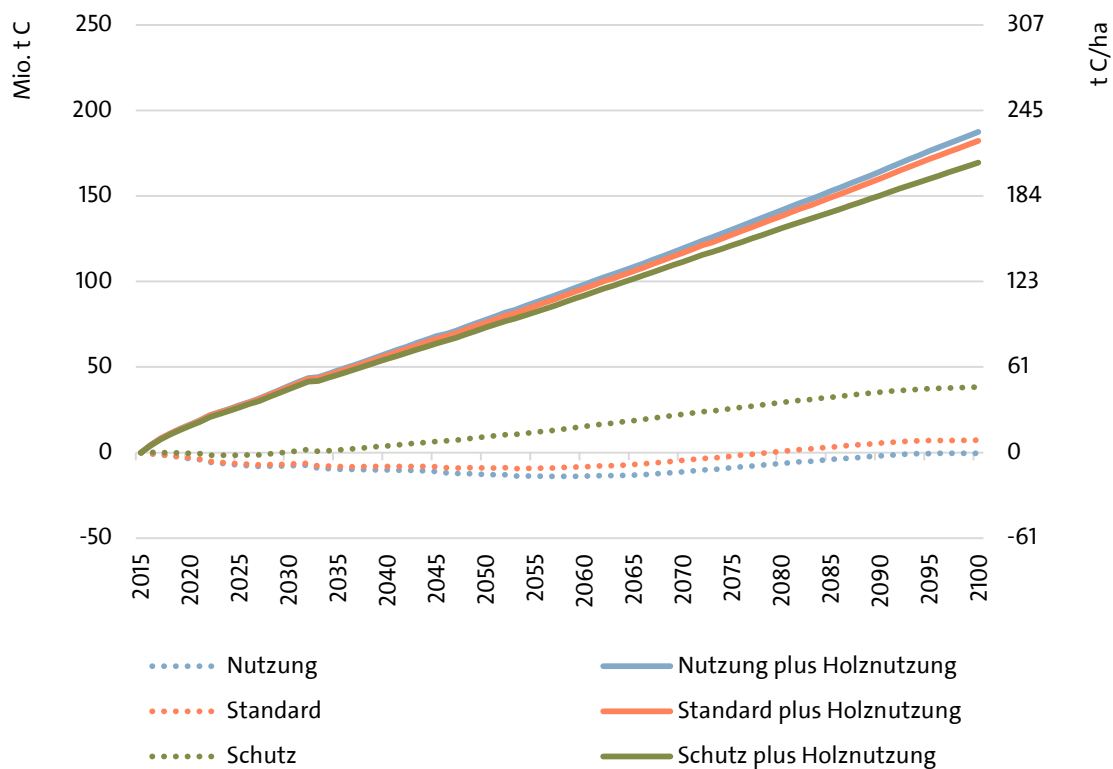


Abbildung 36 Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicherleistung im Wald von 2016 bis 2100 (gepunktete Linien) und für die Summe aller Klimaschutzleistungen des gesamten Systems Wald–Holzverwendung (durchgezogene Linien; Wald- und Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) für die Kombinationsszenarien in t Kohlenstoff (t C); Szenario einer erhöhten stofflichen Holzverwendung in der 1. Absatzstufe

#### 4.4.3.2 Stark erhöhte stoffliche Holznutzung in der 1. Absatzstufe

Abbildung 37 und Abbildung 38 stellen die Variation einer stark erhöhten Holznutzung in der 1. Absatzstufe dar. Die Abbildungen zeigen für alle Szenarien außer der Nichtnutzung deutlich höhere Klimaschutzeffekte (zwischen 19 und 33 % über den gesamten Betrachtungszeitraum). Dabei profitieren die Szenarien, die auf eine höhere Holznutzung ausgelegt sind, stärker von der Variation als die auf eine Erhöhung des Waldspeichers orientierten Szenarien. So erreichen die Grundszenarien Massenoptimierung oder Wertoptimierung einen zusätzlichen Klimaschutzeffekt von 27 und 33 % und das Grundszenario Speicheroptimierung einen zusätzlichen Effekt von 19 %. Ähnlich ist es bei den Kombinationsszenarien (Nutzung und Standard plus 26 und 27 % und Schutz plus 21 %). Die Vorteilhaftigkeit der Szenarien, die eine Holznutzung betreiben, gegenüber der Nichtnutzung zeigt sich besonders deutlich über den gesamten Betrachtungszeitraum.

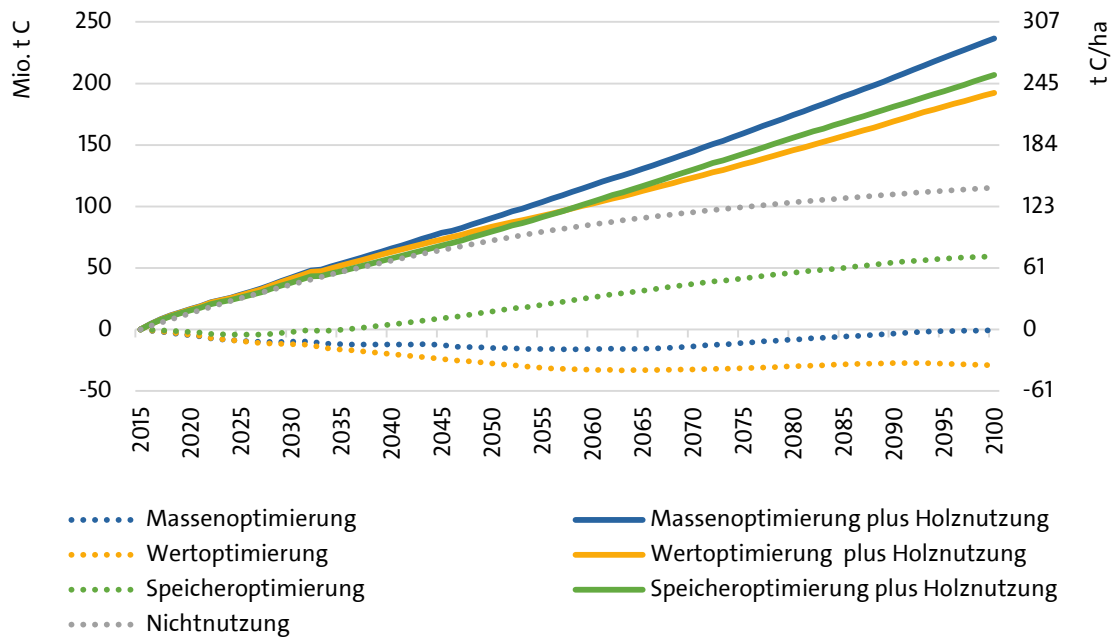


Abbildung 37 Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicherleistung im Wald von 2016 bis 2100 (gepunktete Linien) und für die Summe aller Klimaschutzleistungen des gesamten Systems Wald–Holzverwendung (durchgezogene Linien; Wald- und Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) für die Kombinationsszenarien in t Kohlenstoff (t C); Szenario einer stark erhöhten stofflichen Holzverwendung in der 1. Absatzstufe

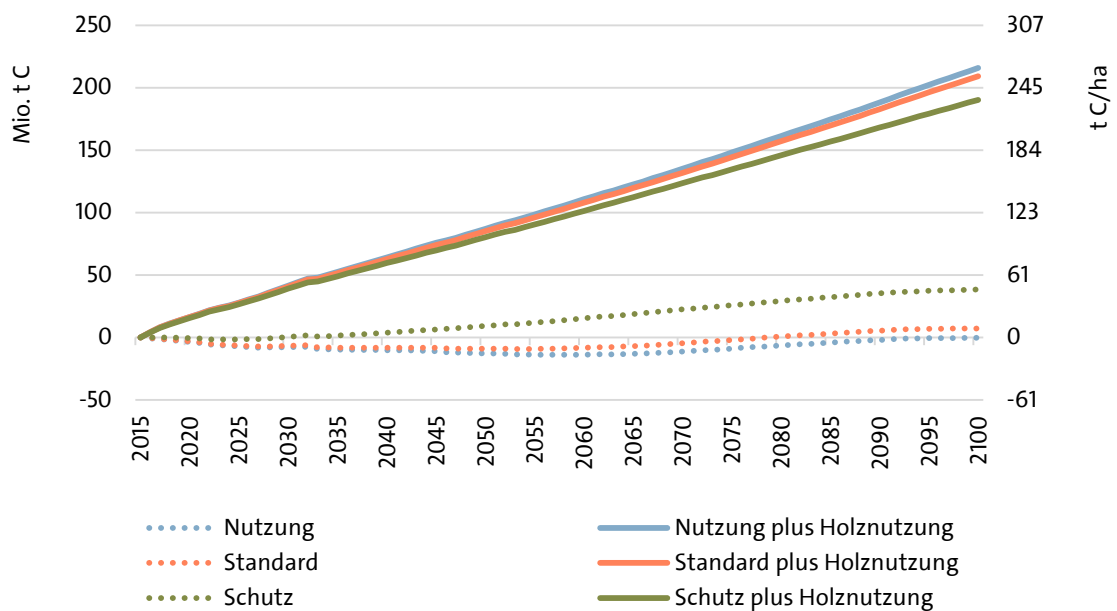


Abbildung 38 Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicher im Wald von 2016 bis 2100 (gepunktete Linien) und für die Summe aller Klimaschutzleistungen des gesamten Systems Wald–Holzverwendung (durchgezogene Linien; Wald- und Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) für die Kombinationsszenarien in t Kohlenstoff (t C); Szenario einer stark erhöhten stofflichen Holzverwendung in der 1. Absatzstufe

#### 4.4.3.3 Variation zu ausschließlich energetischer Nutzung des Rohholzes

In Abbildung 39 wird für die Grundszenarien dargestellt, wie sich eine Erhöhung der energetischen Nutzung des Rohholzes auswirkt. In diesem Extremszenario wird dabei von einer vollständigen energetischen Verwertung der gesamten Erntemengen ausgegangen (vgl. Kapitel 3.2 und Annahmen in Tabelle 14).

Abbildung 39 zeigt, dass eine ausschließliche energetische Nutzung des Rohholzes deutlich geringere Klimaschutzeffekte aufweist als eine stoffliche bzw. eine kombiniert stofflich-energetische Nutzung. In allen Szenarien sind jedoch positive Kohlenstoffeffekte zu jedem Zeitpunkt des Betrachtungszeitraums vorhanden. D. h., auch eine Waldbewirtschaftung, die ausschließlich auf energetische Verwertung ausgelegt ist, hat einen positiven Klimaschutzeffekt; dieser Effekt ist jedoch im betrachteten Zeitraum geringer als der Klimaschutzeffekt, der durch die Erhöhung des Waldspeichers bei Nichtnutzung erzielt wird.

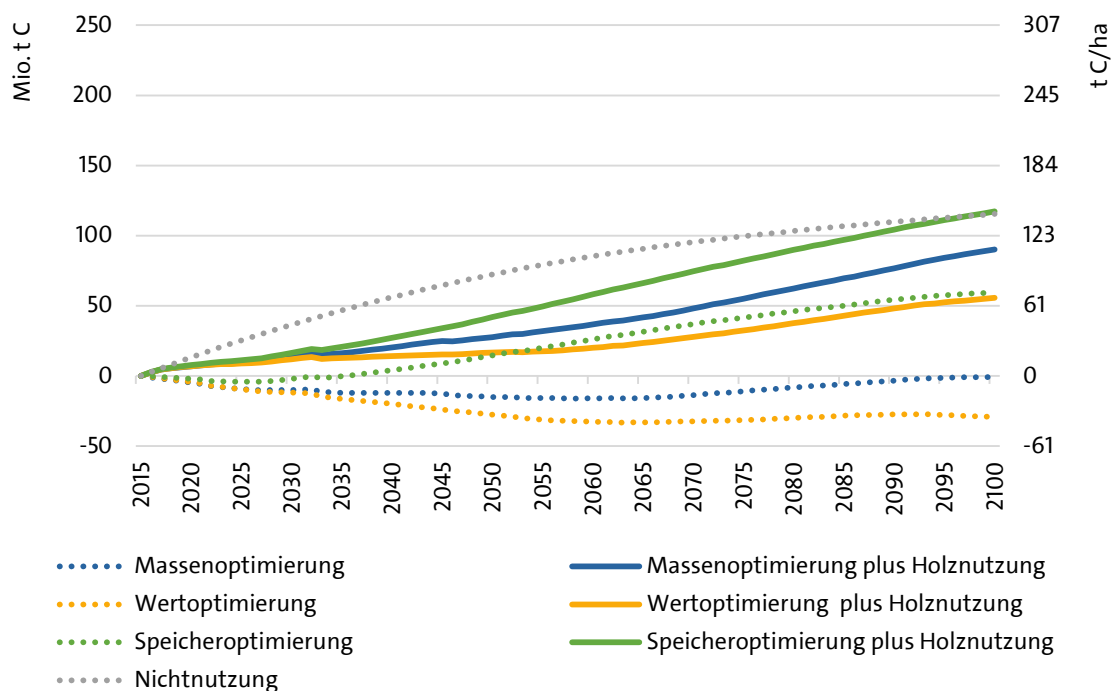


Abbildung 39 Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicher im Wald von 2016 bis 2100 (gepunktete Linien) und für die Summe aller Klimaschutzleistungen des gesamten Systems Wald–Holzverwendung (durchgezogene Linien; Wald- und Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) für die Grundszenarien in t Kohlenstoff (t C); Szenario einer ausschließlich energetischen Holzverwendung in der 1. Absatzstufe

#### 4.4.4 Erhöhung der (stofflichen) Ausbeute bei der holzwirtschaftlichen Fertigung

In Kapitel 4.4.3 wurden die Ergebnisse für Szenarien der Holzverwendung dargestellt, die die stoffliche Holzverwendung in der 1. Absatzstufe verändern. Eine Erhöhung der stofflichen Holzverwendung kann auch dadurch erreicht werden, dass die holzwirtschaftlichen Prozesse (vgl. Abbildung 2, Seite 31) so gestaltet werden, dass die Ausbeute erhöht wird, also bezogen auf den Rohstoffeinsatz mehr Endprodukte hergestellt werden und weniger Energie. Abbildung 40 (Grundszenarien) und Abbildung 41 (Kombinationsszenarien) stellen die Kohlenstoffeffekte für den Fall dar, dass ab dem Jahr 2025 eine Erhöhung der Ausbeute in der holzwirtschaftlichen Produktion um 10 %-Punkte zu Lasten der Ausbeute für Energiezwecke erreicht wird. Für die Grundszenarien wird im Zeitraum 2016–2100 eine Erhöhung der Kohlenstoffeffekte um 7 bis 8 % erreicht; für die Kombinationsszenarien um 5 %.

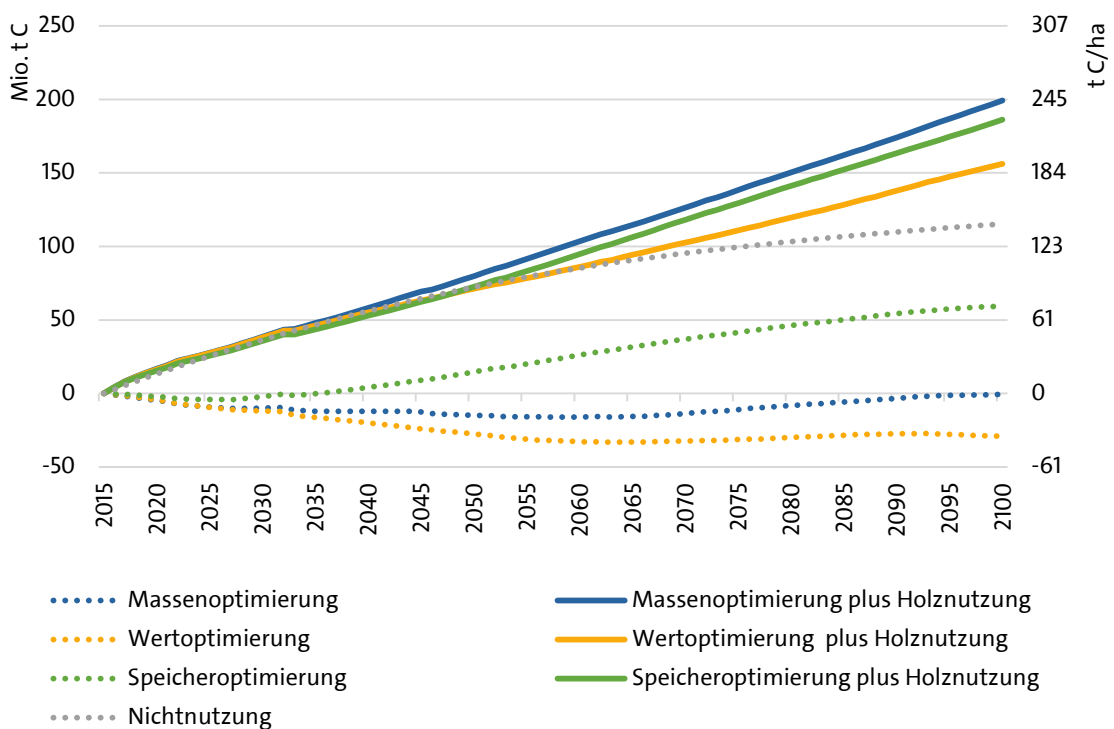


Abbildung 40 Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicher im Wald von 2016 bis 2100 (gepunktete Linien) und für die Summe aller Klimaschutzleistungen des gesamten Systems Wald–Holzverwendung (durchgezogene Linien; Wald- und Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) für die Grundszenarien in t Kohlenstoff (t C); Szenario einer Erhöhung der Ausbeute im holzwirtschaftlichen Fertigungsprozess

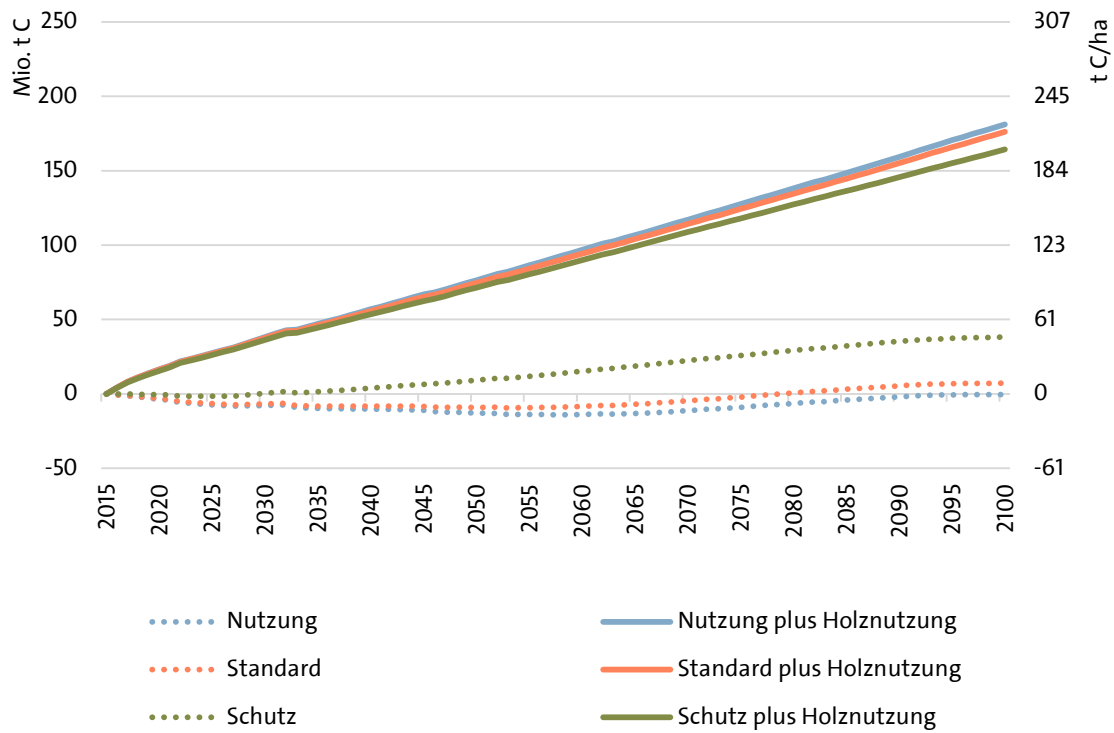


Abbildung 41 Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicher im Wald von 2016 bis 2100 (gepunktete Linien) und für die Summe aller Klimaschutzleistungen des gesamten Systems Wald–Holzverwendung (durchgezogene Linien; Wald- und Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) für die Kombinationsszenarien in t Kohlenstoff (t C); Szenario einer Erhöhung der Ausbeute im holzwirtschaftlichen Fertigungsprozess

## 5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass die Kohlenstoffeffekte bzw. die Klimaschutzleistung der Forst- und Holzwirtschaft nur ganzheitlich als Gesamtsystem beurteilt und sachgerecht dargestellt werden. Die alleinige Betrachtung des Waldspeichers führt zu nicht sachgerechten Bewertungen und falschen Schlussfolgerungen.

Eine Bewirtschaftung, die auf zukünftig höhere Holznutzung ausgelegt ist, erbringt für die Forst- und Holzwirtschaft in Rheinland-Pfalz in einer ganzheitlichen Analyse mit der Berücksichtigung der Kohlenstoffeffekte der Waldbewirtschaftung und Holznutzung langfristig deutlich höhere Klimaschutzleistungen als eine Nichtnutzung. Kurz- und mittelfristig zeigt auch die Nichtnutzung gleiche oder ähnlich hohe Klimaschutzleistungen. Damit bestätigt die hier vorgelegte Studie für Rheinland-Pfalz die Ergebnisse von anderen Studien, die in diesem Punkt zu grundsätzlich gleichen Ergebnissen kommen (z. B. Taverna et al., 2007, Köhl et al., 2010, Wördehoff et al., 2011, Klein und Schulz, 2012, Lundmark et al., 2014, Knauf et al., 2015, Mund et al., 2015, Mues et al., 2017a; vgl. dazu Kapitel 1).

Das Ergebnis ist deshalb besonders bemerkenswert, weil Rheinland-Pfalz einen im Vergleich zum bundesdeutschen Durchschnitt deutlich höheren Laubholzanteil, d. h. geringeren Nadelholzanteil, hat. So weist die dritte Bundeswaldinventur (BWI 2012) für Rheinland-Pfalz einen Laubholzanteil von ca. 58 % (rechnerischer Reinbestand) und im bundesdeutschen Durchschnitt von ca. 43 % aus (Thünen Institut, 2015) aus. Durch eine heute deutlich höhere stoffliche Holznutzung von Nadelholz und zugleich höhere Ausbeuten in der holzwirtschaftlichen Fertigung sind die Klimaschutzleistungen, die sich durch Nadelholz ergeben, deutlich höher; die hier vorgelegte Studie schätzt ab, dass die durch Nadelholz erzielten Kohlenstoffeffekte in etwa doppelt so hoch sind im Vergleich zu denen aus Laubholz. Aus Sicht des Klimaschutzes ist es daher notwendig, auch in Zukunft klimaanangepasste Nadelholzarten zu kultivieren. Die Studie verdeutlicht hier die Möglichkeiten, die mit dem Anbau von Douglasie als Ersatzbaumart für die Fichte verbunden sein können. Schon heute ist bundesweit in Rheinland-Pfalz der höchste Anteil an Eiche und Douglasie zu finden (Thünen Institut, 2015). Standort- und Witterungsverhältnisse haben hier die bisherige Bewirtschaftung und Ausgestaltung der Wälder schon früh für potenzielle Gefahren durch den Klimawandel sensibilisiert.

Die aktuelle Klimaschutzleistung des Waldes in Rheinland-Pfalz bewegt sich mit ca. 2,375 Mio. t C im Bereich der auch für die Szenarien im Zeitraum 2016 bis 2030 ermittelten durchschnittlichen jährlichen Klimaschutzleistung. Der Anteil der staatseigenen Waldflächen beträgt bei relativ höheren Holzerntemengen mit 0,604 Mio. t C einen Anteil von 25,4 % an der Klimaschutzleistung des gesamten Waldes in Rheinland-Pfalz.

Die Ergebnisse der waldbaulichen Szenarienanalyse unterstreichen, dass die Umsetzung von Konzepten zur Förderung einer wachstums- oder wertorientierten Bewirtschaftung zu einer schnelleren Abfolge von Endnutzungen führen. Der Derbholzvorrat in älteren Beständen kann durch entsprechende Holzverwendungen klimawirksam eingesetzt werden und die Bestände werden verjüngt. Dadurch bieten sich fortlaufend Möglichkeiten, Anpassungsmaßnahmen zum Schutz vor negativen Auswirkungen des Klimawandels im laufenden Betrieb durchzuführen. Der in den Szenarien umgesetzte Ansatz zur Umwandlung von Teilen der Fichten- und Kiefernflächen in Buche und Douglasie trägt diesem Gedanken Rechnung und kann als Beispiel für eine aktive Waldumgestaltung interpretiert werden. Vor allem die Szenarien mit kürzeren Umtrieben – Massenoptimierung, Wertoptimierung und Nutzung – zeigen hier ein hohes Anpassungspotential.

Die Konzentration der Waldbewirtschaftung auf die Speicherleistung durch Verzicht auf Holznutzung erzielt zwar in Bezug auf die Kohlenstoffspeicherleistung im Wald die höchsten Ergebnisse, aber sie vergibt damit alle Möglichkeiten zur Kontrolle und Förderung einer nachhaltigen Produktion des Rohstoffs Holz. Die höchsten Holzerntemengen im Betrachtungszeitraum werden durch die Massenoptimierung erreicht. Die Wertoptimierung, das Szenario mit den zweithöchsten Holzerntemengen im Betrachtungszeitraum bis 2100, erreicht noch bis zum Jahr 2045 höhere Holzerntemengen. Die Übertragung der erzielten Holzerntemengen in das Modell der Holzverwendung ermöglicht die ganzheitliche Betrachtung der Klimaschutzleistung in Forst- und Holzwirtschaft. Die höchste durchschnittliche, jährliche Klimaschutzleistung im Zeitraum 2016 bis 2100 wird berechnet für die Massenoptimierung mit +2.20 Mio. t C/a gefolgt von Speicheroptimierung (+2.04 Mio. t C/a), Wertoptimierung (+1.71 Mio. t C/a) und Nichtnutzung (+1.36 Mio. t C/a). Die Kombinationsszenarien Nutzung und Standard erreichen um 2 Mio. t C/a, das Kombinationsszenario Schutz 1,85 Mio. t C/a.

Die Studie zeigt auch, dass es Möglichkeiten gibt, die Klimaschutzleistung der Forst- und Holzwirtschaft in Rheinland-Pfalz zu erhöhen. Ein wichtiger Faktor ist hierbei ein höherer



stofflicher Einsatz des Rohholzes. Die Kaskadennutzung mit der zunächst stofflichen Nutzung des Holzes erbringt eine deutlich größere Klimaschutzleistung als eine sofortige energetische Nutzung des Rohholzes. Die vorrangig stoffliche Nutzung des Holzes hat den größten Einfluss überhaupt auf die Klimaschutzleistung der Holzverwendung. Dies ist insbesondere für das Laubholz wichtig, das in der Zukunft verstärkt zur Verfügung stehen wird. Die Produktivität der Buche ist in allen Szenarien hoch und der durch sie eingenommene Anteil an der Fläche wird durch Baumartwechsel zu Lasten des Anteils von Fichte, Kiefer und ALN noch zunehmen. Eine Möglichkeit, die Klimaschutzleistung der Holzverwendung zu erhöhen, muss also insbesondere darin bestehen, für Laubholz stoffliche Nutzungen zu entwickeln und zu realisieren. Die Erhöhung der stofflichen Ausbeute in Produktionsprozessen kann die Klimaschutzeffekte der Holzverwendung zusätzlich verstärken.

Ein aus Klimaschutzgründen nutzungsorientiertes Waldmanagement ist vor allem sinnvoll, wenn damit ein Nutzungskonzept zur stofflichen Nutzung verbunden ist. Ein einseitig auf Holzenergienutzung ausgelegtes Nutzungskonzept wirkt sich hingegen im Zeitraum bis 2100 nachteilig auf die Klimaschutzeffekte von Wald- und Holzwirtschaft aus.

In dieser Studie wird der Beitrag der Forst- und Holzwirtschaft zum Klimaschutz betrachtet. Daneben erbringen Wälder in einer multifunktionalen Waldbewirtschaftung auch weitere Leistungen, die auf einer Bewirtschaftung der Wälder beruhen. Pohlmeier und Seegmüller (2016) beziffern die sozioökonomischen Effekte für Rheinland-Pfalz: So erwirtschaften die 7.300 Unternehmen des Clusters Forst und Holz in Rheinland-Pfalz mit 51.000 Beschäftigten einen Umsatz von ca. 10 Mrd. Euro und eine Wertschöpfung von 2,75 Mrd. Euro. Knauf und Frühwald (2013) haben darauf hingewiesen, dass die mit der Holznutzung verbundenen ökonomischen Effekte (volkswirtschaftliche und fiskalische Effekte) ebenso für Klimaschutzmaßnahmen genutzt werden können und den Begriff der „sekundären Klimaschutzleistungen“ geprägt. Diese sekundären Klimaschutzeffekte liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie die in dieser Studie berechneten (physischen, primären) Klimaschutzeffekte. Bei Berücksichtigung sekundärer Klimaschutzeffekte erhöht sich die Vorteilhaftigkeit von auf Holznutzung ausgelegten Bewirtschaftungsszenarien deutlich gegenüber denen mit einer geringeren oder keiner Holznutzung.

Die Berechnung von Kombinationsszenarien verdeutlicht durch diesen segregativen Ansatz, welche Möglichkeiten Kombinationen unterschiedlicher Schwerpunkte der Wald-

bewirtschaftung bieten und erlaubt eine Abschätzung des erzielten Nutzens im Sinne des Klimaschutzes. Durch die Ausweisung von Gebieten extremer Nutzungseinschränkung einerseits und die Massen- oder Wert orientierte Produktion von Holz in anderen Gebieten, können unterschiedliche sozio-ökonomische Leistungen zukünftig auch in distinkten Gebieten erbracht werden.

## 6 Literatur

- Arnold, K., Geibler, von, J., Bienge, K., Stachura, C., Borbonus, S., Kristof, K., 2009. Kaskadennutzung von nachwachsenden Rohstoffen: ein Konzept zur Verbesserung der Rohstoffeffizienz und Optimierung der Landnutzung. Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal Papers 180, Wuppertal.
- BBSR [Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung], 2011. Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Stand 03.11.2011, Bonn.
- Block, J., Gauer, J. 2012. BLOCK, J. & GAUER, J., 2012. Waldbodenzustand in Rheinland-Pfalz: Ergebnisse der zweiten landesweiten Bodenzustandserhebung BZE II. Mitteilungen der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Nr. 70/2012, 228 S.
- BMEL [Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft], 2015. Holzmarktbericht 2014. Abschlussergebnisse für die Forst- und Holzwirtschaft des Wirtschaftsjahres 2014 (01.01.2014–31.12.2014), Bonn.
- BMELV [Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz], 2008. Bekanntmachung über die Förderung der angewandten Forschung auf dem Gebiet der nachwachsenden Rohstoffe im Rahmen des Förderprogramms "Nachwachsende Rohstoffe" der Bundesregierung zum Schwerpunkt "Innovative Mehrfachnutzung von nachwachsenden Rohstoffen, Bioraffinerien" vom 24. April 2008. Bonn.
- Bösch, M., Jochem, D., Weimar, H., Dieter, M., 2015. Physical input-output accounting of the wood and paper flow in Germany. *Resources, Conservation and Recycling* 94, 99–109.
- Burschel, P., Kuersten, E., Larson, B. C., 1993. Die Rolle von Wald und Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt. Eine Betrachtung fuer die Bundesrepublik Deutschland. Hg. v. FAO of the UN (Forstliche Forschungsberichte München, no. 126).
- Destatis [Statistisches Bundesamt], 2017. Forstwirtschaftliche Bodennutzung - Holzeinschlagsstatistik 2016 - Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Fachserie 3, Reihe 3.3.1. Wiesbaden.
- EDER, W. und DONG, P.H.: Vorläufige Referenztafeln für die Forsteinrichtung. Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Trippstadt 2003, 56 Seiten
- Fraanje, P.J., 1997. Cascading of pine wood. *Resour. Conserv. Recycl.* 19, 21–28. [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-3449\(96\)01159-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-3449(96)01159-7).

- Friedrich, S., Knauf, M., 2016. Holzbilanzen als Informationsquelle zur Holzverwendung auf Bundeslandebene am Beispiel der bayerischen Holzmarktbalanz. *Forstarchiv* 87, 79–85. doi:10.4432/0300-4112-87-79
- Frühwald, A., Knauf, M., 2014. Carbon aspects promote building with wood. Proceedings of the World Conference on Timber Engineering WCTE, Quebec, Kanada, 10–14. August 2014.
- Frühwald, A., Solberg, B., 1995. LCA – a challenge for forestry and forest products industry. EFI Proceedings No. 8. Frühwald, A., Solberg, B. (Hrsg.), Joensuu.
- Frühwald, A., Diederichs, S., Morgan, R.M., 2010. Verwendungspotenziale heben durch Kaskadennutzung am Beispiel Holz. In: Thomé-Kozmiensky, K.J., Beckmann, M. (Hrsg.), Erneuerbare Energien, Biomasse und Biogas, Ersatzbrennstoffe, Solar und Windenergie Band 4. TK Verlag Karl-Thomé-Kozmiensky, Neuruppin.
- Gustavsson, L., Holmberg, J., Dornburg, V., Sathre, R., Eggers, T., Mahapatra, K., Marland, G., 2007. Using biomass for climate change mitigation and oil use reduction. *Energy Policy* 35, 5671–5691. doi:10.1016/j.enpol.2007.05.023
- Höglmeier, K., Weber-Blaschke, G., Richter, K., 2013. Potentials for cascading of recovered wood from building deconstruction — a case study for south-east Germany. *Resour. Conserv. Recycl.* 78, 81–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.07.004>.
- IEMB [Kompetenzzentrum "Kostengünstig qualitätsbewusst Bauen" im Institut für Erhaltung und Modernisierung], 2006. Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten. Berlin.
- IPCC, 2014. 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol, Hayama.
- Jochem, D., Weimar, H., Bösch, M., Mantau, U., Dieter, M., 2015. Estimation of wood removals and fellings in Germany: a calculation approach based on the amount of used roundwood. *Eur J Forest Res* 1–20. doi:10.1007/s10342-015-0896-9
- Karjalainen, T., Zimmer, B., Berg, S., Welling, J., Schwaiger, H., Finér, L., Cortijo, P., 2001. Energy, Carbon and Other Material Flows in the Life Cycle Assessment of Forestry and Forest Products. European Forest Institute Discussion Paper 10, Joensuu.
- Klein, D., Schulz, C., 2012. Die Kohlenstoffbilanz der Bayerischen Forst- und Holzwirtschaft. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising.
- Knauf, M., Frühwald, A., 2013. Beitrag des NRW Clusters ForstHolz zum Klimaschutz. Langfassung der Studie. Landesbetrieb Wald und Holz Nordrhein-Westfalen, Münster.
- Knauf, M., Joosten, R., Frühwald, A., 2016. Assessing fossil fuel substitution through wood use based on long-term simulations. *Carbon Management* 7, 67–77. doi:10.1080/17583004.2016.1166427

- Knauf, M., Köhl, M., Mues, V., Olschofsky, K., Frühwald, A., 2015. Modeling the CO<sub>2</sub>-effects of forest management and wood usage on a regional basis. *Carbon Balance and Management* 10, 13. doi:10.1186/s13021-015-0024-7
- Köhl, M., Hildebrandt, R., Olschofsky, K., Kohler, R., Rötzer, T., Mette, T., Pretzsch, H., Koethke, M., Dieter, M., Abiy, M., Makeschin, F., Kenter, B., 2010. Combating the effects of climatic change on forests by mitigation strategies. *Carbon Balance and Management* 5, 8. doi:10.1186/1750-0680-5-8
- Köhl, M. 2017. Nutzungsverzicht oder Holznutzung: ein Missverständnis? *AFZ der Wald* 14, 30-32
- Lindgren, M., Bandhold, H., 2002. Scenario planning – the link between future and strategy. Palgrave Macmillan, Basingstoke. doi:10.1057/9780230511620
- Lippke, B., Wilson, J., Perez-Garcia, J., Bowyer, J., Meil, J., 2004. CORRIM: Life-cycle environmental performance of renewable building materials. *Forest Products Journal* 54, 8–19.
- Lundmark, T., Bergh, J., Hofer, P., Lundström, A., Nordin, A., Poudel, B., Sathre, R., Taverna, R., Werner, F., 2014. Potential Roles of Swedish Forestry in the Context of Climate Change Mitigation. *Forests* 5, 557–578. doi:10.3390/f5040557
- Mantau, U., Bilitewski, B., 2010. Stoffstrom-Modell-Holz. Bestimmung des Aufkommens, der Verwendung und des Verbleibs von Holzprodukten. Forschungsbericht für den Verband Deutscher Papierfabriken e. V. (VDP), Celle.
- Mues, V., Knauf, M., Frühwald, A., Köhl, M., Happe, J., Schockemöhle, R., 2017a. BEKLIFUH-Simulation für den Stadtwald Höxter. *AFZ der Wald* 14, 23–26.
- Mues, V., Knauf, M., Köhl, M., Frühwald, A., 2017b. Bewertung der Klimaschutzleistungen der Forst- und Holzwirtschaft auf lokaler Ebene (BEKLIFUH). Ein Projekt im Rahmen des Waldklimafonds. Dokumentation, 15.01.2017. Hamburg/Bielefeld.
- MULEWF, 2011. BAT-Konzept: Konzept zum Umgang mit Biotopbäumen, Altenbäumen und Totholz bei Landesforsten Rheinland-Pfalz. Landesforsten Rheinland-Pfalz, AZ: 105-64011/2008-1  
<http://www.wald-rlp.de/de/forstamt-trier/angebote/infothek/publikationen/bat-konzept/>, zuletzt überprüft: 14.08.2017
- MULEWF, 2015. Der Wald in Rheinland-Pfalz: Ergebnisse der Bundeswaldinventur. Rheinland-Pfalz Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten, Rheinland-Pfalz Landesforstverwaltung  
[https://mulewf.rlp.de/uploads/media/Der\\_Wald\\_in\\_Rheinland-Pfalz\\_-\\_Ergebnisse\\_der\\_Bundeswaldinventur\\_3\\_10.10.2014.pdf](https://mulewf.rlp.de/uploads/media/Der_Wald_in_Rheinland-Pfalz_-_Ergebnisse_der_Bundeswaldinventur_3_10.10.2014.pdf); zuletzt überprüft: 26.07.2017

- Mund, M., Frischbier, N., Profft, I., Raacke, J., Richter, F., 2015. Klimaschutzleistung des Wald-und Holzsektors: Schutz-und Nutzungsszenarien für drei Modellregionen in Thü-ringen. BfN-Skripten 396. Bundesamt für den Naturschutz (Hrsg.), Bonn.
- Pohlmeyer, H., Seegmüller, S., 2016. Holzbaucuster – in Rheinland-Pfalz gegen den Trend erfolgreich. GStB 250–251.
- Puettmann, M. E., Wilson, J. B., 2005. Life-cycle analysis of wood products: Cradle-to-gate LCI of residential wood building materials. *Wood and Fiber Science* 37, 18–29.
- Reijnders, L., 2006. Conditions for the sustainability of biomass based fuel use. *Energy Policy* 34, 863–876. doi:10.1016/j.enpol.2004.09.001
- Sathre, R., Gustavsson, L., 2009. A state-of-the-art review of energy and climate effects of wood product substitution. *School of Technology and Design Reports 57*, University Vaxjö, Vaxjö.
- Sathre, R., O'Connor, J., 2010. A Synthesis of Research on Wood Products and Greenhouse Gas Impacts, 2nd Edition. FPInnovations, Vancouver.
- Schober, R., 1975. Ertragstabeln wichtiger Baumarten. Sauerländer, Frankfurt a.M.
- Selter, A., Sotirov, M., Volz, K.-R., Hauber, J., Weimar, H., 2011. Holzenergienutzung in Rheinland-Pfalz - Sozioökonomische Bedeutung und politische Implikationen. Arbeitsbericht 03/2011 Institut für Forst- und Umweltpolitik, Universität Freiburg.
- Taverna, R., Hofer, P., Werner, F., Kaufmann, E., Thürig, E., 2007. The CO2 Effects of the Swiss Forestry and Timber Industry. Scenarios of future potential for climate-change mitigation, Bern.
- Thünen Institut, 2015. Dritte Bundeswaldinventur - Ergebnisdatenbank. [www.bwi.info](http://www.bwi.info)
- Umweltbundesamt, 2016. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990–2014, Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt, 2017. Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990–2015, Dessau-Roßlau.
- UNFCCC, 2010. Ad Hoc Working Group on further Commitments for Annex I Parties under the Kyoto Protocol, Consideration of further commitments for Annex I Parties under the Kyoto Protocol. Revised Proposal by the Chair. FCCC/KP/AWG/2010/CRP.4/Rev.4., Cancun.
- UNFCCC, 2011. Synthesis report of the technical assessments of the forest management reference level submissions. Note by the secretariat, Durban.

- Vasconcelos, A.C., Matthes, U. & Konold, W., 2013. Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald in Rheinland-Pfalz. – RHEINLAND-PFALZ KOMPETENZZENTRUM FÜR KLIMAWAN-DELFOLGEN [Hrsg.]: Schlussberichte des Landesprojekts Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz (KlimLandRP), Teil 4, Modul Wald: 333 S.
- Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik Ernährung und gesundheitlicher Verbraucherschutz und Wissenschaftlicher Beirat Waldpolitik beim BMEL, 2016. Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung, Gutachten Juli 2016, Berlin
- Wilhelm, G.J., Letter, H. A. u. Eder, W., 1999a. Zielsetzungen und waldbauliche Prinzipien. Konzeption einer naturnahen Erzeugung von starkem Wertholz. AFZ/Der Wald 54, 232-233
- Wilhelm, G.J., Letter, H. A. u. Eder, W., 1999b. Die Phase der Qualifizierung. AFZ/Der Wald 54, 234-236
- Wilhelm, G.J., Letter, H. A. u. Eder, W., 1999c. Die Phase der Dimensionierung. AFZ/Der Wald 54, 236-238
- Wilhelm, G.J., Letter, H. A. u. Eder, W., 1999d. Die Phase der Reife. AFZ/Der Wald 54, 239-240
- Wilhelm, G.J., Rieger H., 2013. Naturnahe Waldwirtschaft mit der QD-Strategie. Ulmer Verlag, Stuttgart, 2013, ISBN 978-3-8001-7858-2.
- Wilson, J. B., Sakimoto, E. T., 2005. Gate-to-gate life-cycle inventory of softwood plywood production. Wood and Fiber Science 37, 58–73.
- Winistorfer, P., Chen, Z., Lippke, B., Stevens, N., 2005. Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions Related to the Use, Maintenance, and Disposal of a Residential Structure. Wood and Fiber Science 37, 128–139.
- Wördehoff, R., Spellmann, H., Evers, J., Nagel, J., 2011. Kohlenstoffstudie Forst und Holz Niedersachsen. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt Band 6, Göttingen.

## 7 Abbildungen und Tabellen

### Abbildungen

Abbildung 1	Vorgehensweise bei der Simulation von Bestandeswachstum und Holzerntemengen.....	8
Abbildung 2	Das Prinzip der Zuordnung der Holzerntemengen als Ergebnis der waldbaulichen Simulation zu den für die Bewertung der Kohlenstoffeffekte relevanten Verwendungen (Darstellung in Anlehnung an das Holzverwendungsmodell für Bayern in Friedrich und Knauf, 2016) .....	31
Abbildung 3	Flächenanteil der sechs Baumartengruppen an 815 447 ha Holzbodenfläche zum Start der Szenarienanalyse im Jahr 2015 („Ausgangszustand“) und zum Ende des Simulationszeitraums im Jahr 2100 für die Grund- und Kombinationsszenarien .....	43
Abbildung 4	Derbholzvorrat der sechs Baumartengruppen zum Start der Szenarienanalyse im Jahr 2015 („Ausgangszustand“) und zum Ende des Simulationszeitraums im Jahr 2100 für die Grund- und Kombinationsszenarien .....	45
Abbildung 5	Entwicklung des Derbholzvorrats pro Fläche der sechs Baumartengruppen im Grundszenario Massenoptimierung.....	47
Abbildung 6	Vorratsentwicklung der Grundszenarien in Vorratsfestmeter; die Nutzungsszenarien Massenoptimierung, Wertoptimierung und Speicheroptimierung zeigen nach der Anpassungsperiode von 2002 bis 2015 zunächst einen Vorratsabbau während sich im Szenario Nichtnutzung im gesamten Simulationszeitraum von 2016 bis 2100 den Vorrat an Derbholz vergrößert.....	48
Abbildung 7	Die Vorratsentwicklung der Kombinationsszenarien in Vorratsfestmeter .....	48
Abbildung 8	Durchschnittlicher jährlicher Volumenzuwachs der Grundszenarien; die linke Werteachse weist die absoluten Beträge aus, die rechte Werteachse die relativen Werte je Holzbodenfläche.....	50
Abbildung 9	Durchschnittlicher jährlicher Volumenzuwachs der Kombinationsszenarien; die linke Werteachse weist die absoluten Beträge aus, die rechte Werteachse die relativen Werte je Holzbodenfläche.....	50
Abbildung 10	Entwicklung der durchschnittlichen jährlichen Volumenzuwächse der Baumartengruppen für das Grundszenario Massenoptimierung .....	51
Abbildung 11	Grundszenario Massenoptimierung: Holzerntemengen der sechs Baumartengruppen.....	54
Abbildung 12	Kohlenstoffspeicherung im gesamten Totholzspeicher (ober- und unterirdisch) der vier Grundszenarien Massenoptimierung, Wertoptimierung, Speicheroptimierung und Nichtnutzung während der Szenarienanalyse von 2016 bis 2100 .....	56



Abbildung 13	Kohlenstoffspeicherung im Totholzspeicher (ober- und unterirdisch; letztere als gestrichelte Linien) der vier Grundscenarien Massenoptimierung, Wertoptimierung, Speicheroptimierung und Nichtnutzung während der Szenarienanalyse von 2016 bis 2100 .....	56
Abbildung 14	Kohlenstoffspeicherung im Totholzspeicher der drei Kombinationsszenarien Nutzung, Standard und Schutz während der Szenarienanalyse von 2016 bis 2100 .....	57
Abbildung 15	Kohlenstoffgehalt des Totholzspeichers der vier Grundscenarien Massenoptimierung, Wertoptimierung, Speicheroptimierung und Nichtnutzung; die gestrichelten Linien präsentieren den Totholzspeicher unter Einbeziehung des aktuellen Speichers im Jahr 2015 und dessen Zersetzung (schwarze gestrichelte Linie) .....	59
Abbildung 16	Kohlenstoffspeicher der Grund- und Kombinationsszenarien: (a) Massenoptimierung, (b) Wertoptimierung, (c) Speicheroptimierung, (d) Nichtnutzung, (E) Nutzung, (F) Standard, (G) Schutz .....	60
Abbildung 17	Kohlenstoffspeicher der Grundscenarien von (I) oberirdische Biomasse lebend, (II) Holzerntemengen, (III) Totholz (oberirdisch), (IV) Totholz (unterirdisch), (V) unterirdische Biomasse lebend .....	61
Abbildung 18	Kohlenstoffspeicher der Kombinationsszenarien von (I) oberirdische Biomasse lebend, (II) Holzerntemengen, (III) Totholz (oberirdisch), (IV) totholz (unterirdisch), (V) unterirdische Biomasse lebend .....	62
Abbildung 19	Jährliche Holzerntemenge in Efm o.R. von 2016 bis 2100 für die Grundscenarien; für das GrundscENARIO Nichtnutzung sind keine Holzerntemengen ausgewiesen .....	67
Abbildung 20	Jährliche Holzerntemenge in Efm o.R. von 2016 bis 2100 für die Kombinationsszenarien .....	68
Abbildung 21	Jährliche Holzerntemengen nach Baumartengruppen und gesamt in Efm o.R. für das GrundscENARIO Massenoptimierung; .....	68
Abbildung 22	Jährliche Holzerntemengen nach Baumartengruppen und gesamt in Efm o.R. für das GrundscENARIO Wertoptimierung; Angaben in Efm o.R.69	
Abbildung 23	Holzerntemengen (pro Jahr) nach Baumartengruppen und gesamt in Efm o.R. für das GrundscENARIO Speicheroptimierung.....	70
Abbildung 24	Holzerntemengen (pro Jahr) nach Baumartengruppen und gesamt in Efm o.R. für das Kombinationsszenario Nutzung.....	71
Abbildung 25	Holzerntemengen (pro Jahr) nach Baumartengruppen und gesamt in Efm o.R. für das Kombinationsszenario Standard.....	71
Abbildung 26	Holzerntemengen (pro Jahr) nach Baumartengruppen und gesamt in Efm o.R. (Kombinationsszenario Schutz).....	72
Abbildung 27	Holzerntemengen (pro Jahr) nach Baumartengruppen und gesamt in Efm o.R. für das GrundscENARIO Massenoptimierung .....	75
Abbildung 28	Holzerntemengen (pro Jahr) nach Baumartengruppen und gesamt in t C für das GrundscENARIO Massenoptimierung.....	75
Abbildung 29	Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung pro Jahr für das GrundscENARIO Massenoptimierung.....	76
Abbildung 30	Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung im Zeitraum 2015–2100; kumuliert (GrundscENARIO Massenoptimierung).....	76

Abbildung 31	Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicher im Wald von 2016 bis 2100 für die Grundszenarien in t Kohlenstoff (t C) für das Basisszenario der Holzverwendung .....	87
Abbildung 32	Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung (Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) von 2016 bis 2100 für die Grundszenarien in t Kohlenstoff (t C) für das Basisszenario der Holzverwendung .....	87
Abbildung 33	Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicherleistung im Wald von 2016 bis 2100 (gepunktete Linien) und für die Summe aller Klimaschutzleistungen des gesamten Systems Wald–Holzverwendung (durchgezogene Linien; Wald- und Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) für die Grundszenarien in t Kohlenstoff (t C) für das Basisszenario der Holzverwendung .....	89
Abbildung 34	Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicherleistung im Wald von 2016 bis 2100 (gepunktete Linien) und für die Summe aller Klimaschutzleistungen des gesamten Systems Wald–Holzverwendung (durchgezogene Linien; Wald- und Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) für die Kombinationsszenarien in t Kohlenstoff (t C) für das Basisszenario der Holzverwendung .....	91
Abbildung 35	Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicherleistung im Wald von 2016 bis 2100 (gepunktete Linien) und für die Summe aller Klimaschutzleistungen des gesamten Systems Wald–Holzverwendung (durchgezogene Linien; Wald- und Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) für die Kombinationsszenarien in t Kohlenstoff (t C); Szenario einer erhöhten stofflichen Holzverwendung in der 1. Absatzstufe .....	93
Abbildung 36	Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicherleistung im Wald von 2016 bis 2100 (gepunktete Linien) und für die Summe aller Klimaschutzleistungen des gesamten Systems Wald–Holzverwendung (durchgezogene Linien; Wald- und Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) für die Kombinationsszenarien in t Kohlenstoff (t C); Szenario einer erhöhten stofflichen Holzverwendung in der 1. Absatzstufe .....	94
Abbildung 37	Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicherleistung im Wald von 2016 bis 2100 (gepunktete Linien) und für die Summe aller Klimaschutzleistungen des gesamten Systems Wald–Holzverwendung (durchgezogene Linien; Wald- und Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) für die Kombinationsszenarien in t Kohlenstoff (t C); Szenario einer stark erhöhten stofflichen Holzverwendung in der 1. Absatzstufe .....	95

---

Abbildung 38	Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicher im Wald von 2016 bis 2100 (gepunktete Linien) und für die Summe aller Klimaschutzleistungen des gesamten Systems Wald–Holzverwendung (durchgezogene Linien; Wald- und Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) für die Kombinationsszenarien in t Kohlenstoff (t C); Szenario einer stark erhöhten stofflichen Holzverwendung in der 1. Absatzstufe.....	95
Abbildung 39	Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicher im Wald von 2016 bis 2100 (gepunktete Linien) und für die Summe aller Klimaschutzleistungen des gesamten Systems Wald–Holzverwendung (durchgezogene Linien; Wald- und Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) für die Grundszenarien in t Kohlenstoff (t C); Szenario einer ausschließlich energetischen Holzverwendung in der 1. Absatzstufe .....	96
Abbildung 40	Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicher im Wald von 2016 bis 2100 (gepunktete Linien) und für die Summe aller Klimaschutzleistungen des gesamten Systems Wald–Holzverwendung (durchgezogene Linien; Wald- und Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) für die Grundszenarien in t Kohlenstoff (t C); Szenario einer Erhöhung der Ausbeute im holzwirtschaftlichen Fertigungsprozess .....	97
Abbildung 41	Entwicklung (kumuliert) der Kohlenstoffspeicher im Wald von 2016 bis 2100 (gepunktete Linien) und für die Summe aller Klimaschutzleistungen des gesamten Systems Wald–Holzverwendung (durchgezogene Linien; Wald- und Holzspeicher und Emissionseinsparung durch energetische und stoffliche Substitution) für die Kombinationsszenarien in t Kohlenstoff (t C); Szenario einer Erhöhung der Ausbeute im holzwirtschaftlichen Fertigungsprozess.....	98

**Tabellen**

Tabelle 1	Definition der Baumartengruppen und verwendete Ertragstafeln .....	12
Tabelle 2	Kombinationsszenarien und deren Definition durch Gewichtung der Grundszenarien (Summe aller Gewichte eines Kombinationsszenarios beträgt stets 100 %)	15
Tabelle 3	Beginn der Endnutzung in den Grundszenarien Wertoptimierung und Speicheroptimierung nach dem Bestandesalter sowie die Dauer der Endnutzungsperiode. ....	17
Tabelle 4	Risiken für die Kalamitäten Windwurf und Feuer nach bundesdeutschen Statistiken als Prozentangabe des Ereignisses in 100 Jahren.....	18
Tabelle 5	Wahrscheinlichkeiten für die weitere Simulation mit unveränderter Baumartengruppe in der Diagonale und Fettdruck und für den Baumartwechsel nach Endnutzung des Vorbestandes mit der in der ersten Spalte ausgewiesenen Baumartengruppe. ....	20
Tabelle 6	Rindenanteil pro Baumartengruppe nach Knigge und Schulz (1966) und Raumdichten nach Kollmann 1951/1982 (zitiert in Umweltbundesamt, 2013).....	21
Tabelle 7	Nach Literatúrauswertungen und generellen Abwägungen zur Zusammensetzung der Totholzmasse gewählte Zerfallsraten für oberirdische und unterirdische tote Biomasse mit entsprechende Halbwertszeiten.....	22
Tabelle 8	Anzahl der beprobten Ecken im Bundesland Rheinland-Pfalz nach Waldentscheid der BWI 2 (2002) und der BWI 3 (2012).....	25
Tabelle 9	Selektion auf die im Bundesland Rheinland-Pfalz im Rahmen der BWI 2 (2002) und der BWI 3 (2012) aufgenommenen Traktecken mit gemeinsamer Auswertbarkeit und Verfügbarkeit von Baumdaten .....	26
Tabelle 10	Verhältnis von berichteten Produktionsmengen mit Korrektur für den Großprivatwald zu den Angaben in der Ergebnisdatenbank der BWI, Auswertung 6.03 .....	28
Tabelle 11	Holzverwendung in der 1. Absatzstufe in Rheinland-Pfalz als Grundlage des Basisszenarios der Holzverwendung.....	35
Tabelle 12	Holzverwendung in der 1. Absatzstufe in Rheinland-Pfalz als Grundlage eines Szenarios der verstärkten stofflichen Holznutzung des Laubholzes .....	37
Tabelle 13	Holzverwendung in der 1. Absatzstufe in Rheinland-Pfalz als Grundlage eines Szenarios der möglichst vollständigen stofflichen Holznutzung des Laubholzes in der 1. Absatzstufe .....	37
Tabelle 14	Holzverwendung in der 1. Absatzstufe in Rheinland-Pfalz als Grundlage des Szenarios der Holzverwendung mit einer ausschließlich energetischen Verwertung des Holzes .....	37
Tabelle 15	Aktuelle durchschnittliche jährliche Klimaschutzleistung der Forst- und Holzwirtschaft in Rheinland-Pfalz für den Zeitraum 2013 bis 2015 .....	40
Tabelle 16	Aktuelle durchschnittliche jährliche Klimaschutzleistung der Forst- und Holzwirtschaft bezogen für den landeseigenen Wald und den Zeitraum 2013 bis 2015.....	41

---

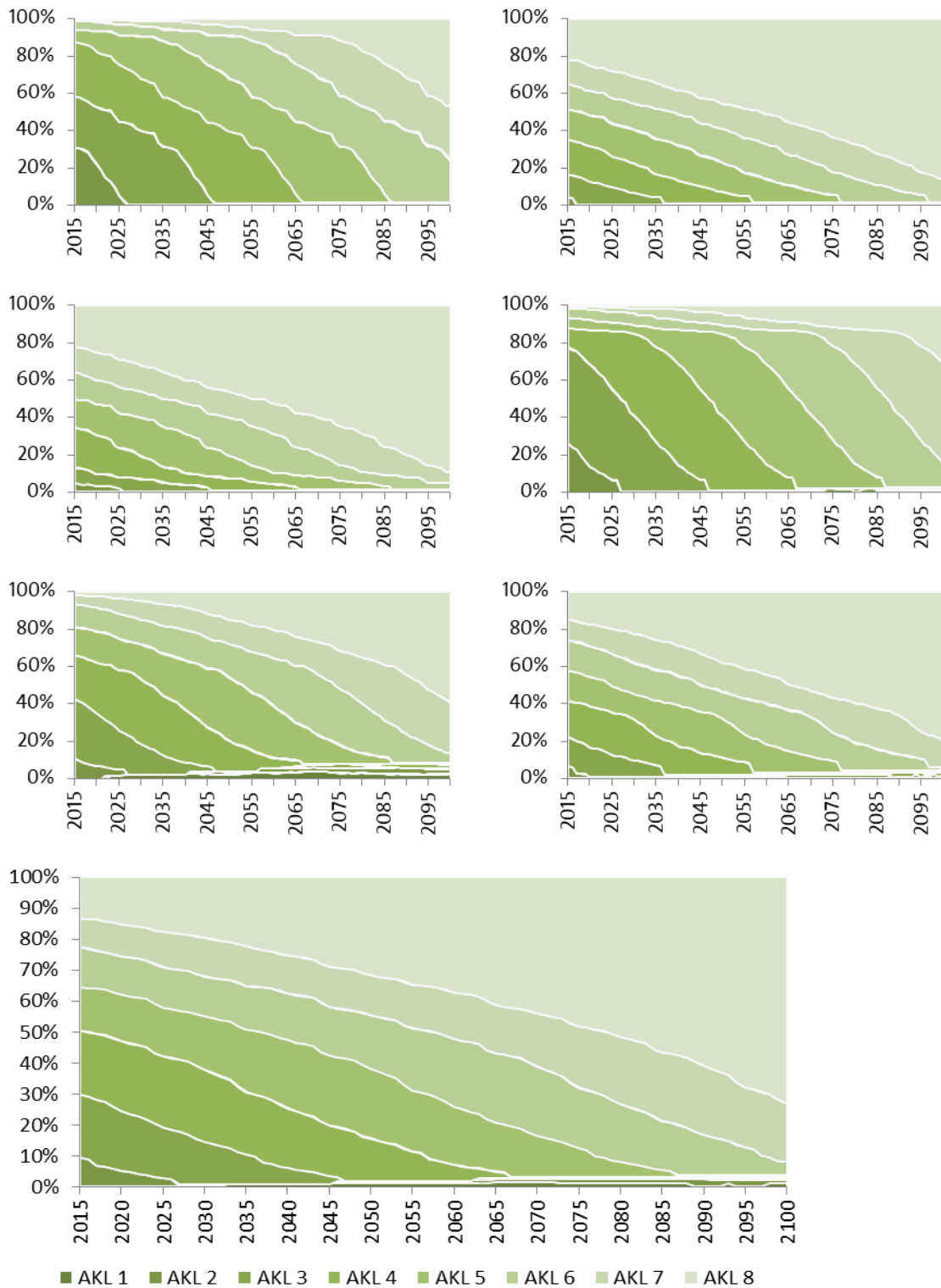
Tabelle 17	Flächenanteil der Baumartengruppen vor (Ausgangszustand 2015, absolute Flächen in [ha] und Anteile in [%]) und zum Ende der Szenarienanalyse von 2016 bis 2100; Angaben als Anteil an der Gesamtfläche in [%].....	44
Tabelle 18	Zuwachskorrekturfaktoren der Baumartengruppen entsprechend der auf Inventuren und Holzerntemengen aufbauenden Anpassung des Modells .....	53
Tabelle 19	Durchschnittliche jährliche Klimaschutzleistung der Waldbewirtschaftung in Rheinland-Pfalz abhängig von der Bewirtschaftungsform (Grund- und Kombinationsszenarien) sowie durchschnittlich jährlich durch Holzernte entnommener Kohlenstoff in den Betrachtungszeiträumen von 2016 bis 2030, bis 2050 und bis 2100.63	
Tabelle 20	Durchschnittliche jährliche Holzerntemengen in Erntefestmetern ohne Rinde für die Grundszenarien von 2016 bis 2100.....	65
Tabelle 21	Durchschnittliche jährliche Holzerntemengen in Efm o. R. für die Kombinationsszenarien von 2016 bis 2100 .....	65
Tabelle 22	Durchschnittliche jährliche Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung des Grundszenarios Massenoptimierung differenziert nach dem Anteil der Beiträge aus der Änderung des Holzproduktespeichers und der Material- und Energiesubstitution .....	79
Tabelle 23	Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung nach der Verwendung in der 1. Absatzstufe im Zeitraum 2016–2100 für das Grundszenario Massenoptimierung.....	81
Tabelle 24	Kohlenstoffeffekte der Holzverwendung differenziert nach Baumartengruppen im Zeitraum 2016–2100 für das Grundszenario Massenoptimierung.....	84
Tabelle 25	Durchschnittliche jährliche Klimaschutzleistung der Forst- und Holzwirtschaft in Rheinland-Pfalz abhängig von der Bewirtschaftungsform (Grundszenarien) für das Basisszenario der Holzverwendung in drei Betrachtungszeiträumen .....	90
Tabelle 26	Durchschnittliche jährliche Klimaschutzleistung der Forst- und Holzwirtschaft in Rheinland-Pfalz abhängig von der Bewirtschaftungsform (Kombinationsszenarien) für das Basisszenario der Holzverwendung in drei Betrachtungszeiträumen .....	91

## 8 Anhang

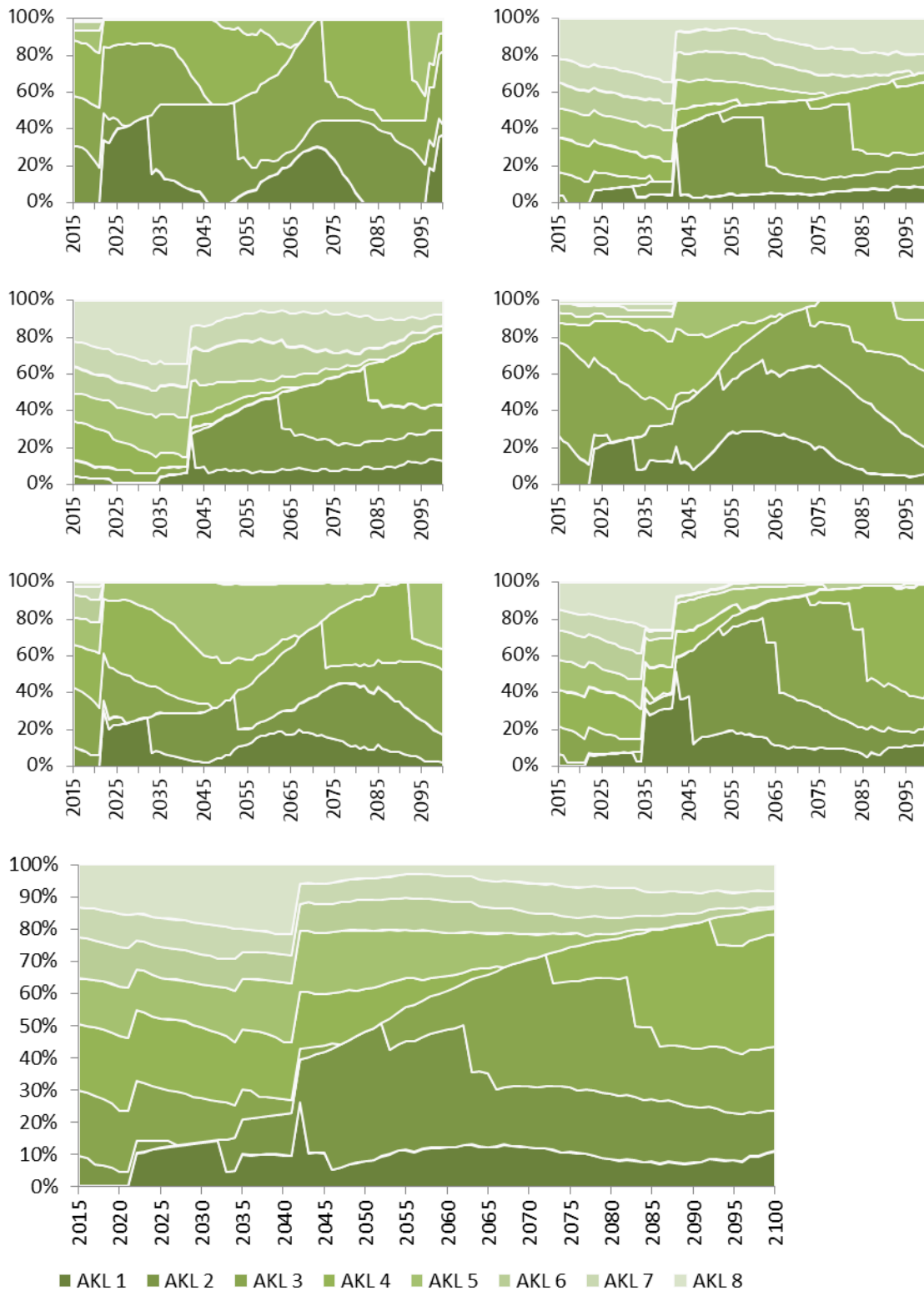
Anhang 1 Produktgruppen mit den zugehörigen spezifischen Produktlebensdauern und Substitutionsfaktoren

Einsatzbereich Fertigprodukt	Substitutions- faktor stofflich [tC/tC]	Lebensdauer [Jahre]	Substitutions- faktor Energie [tC/tC]	Kommentare
Bau Massiv	1,56	65	0	
Möbel Massiv	1,62	25	0	
Verpackung	1,35	3	0	
Sonstige Massiv	1,50	30	0	gew. Durchschnitt aus 1-3
Fußboden	1,35	25	0	
Dämmung	0	50	0	
Möbel HWI	1,46	25	0	
Bau HWI	1,30	50	0	
Sperrholz/LWL	1,62	40	0	
Papier	0,00	2	0,52	Verbrennung zu 80 %
Masten	2,60	30	0	
Sonstige	1,50	40	0	gew. Durchschnitt aus 1-11
Pellets	0	1	0,67	
Scheitholz	0	2	0,54	20 % Abzug wegen des geringeren Wirkungsgrads im Vergleich z. B. zu E1
Energie Industrie	0	1	0,67	
B(H)KW	0	1	0,67	
Rinde Scheitholz	0	2	0,48	10 % Abzug wegen ger. Wirkungsgrad
Rinde Industrie	0	1	0,48	stoffliche Nutzung von 20 % berücksichtigt, 10 % Abzug wegen ger. Wirkungsgrad
Rinde B(H)KW	0	1	0,60	10 % Abzug wegen ger. Wirkungsgrad

Anhang 2 Altersklassenaufbau der Baumartengruppen (erste Reihe ALN und Buche, zweite Reihe Eiche und Douglasie, dritte Reihe Fichte und Kiefer) sowie unten für alle Baumartengruppen im Szenario Nichtnutzung;  
 Altersklasse (AKL) 1: 1-20 , 2: 21-40, 3: 41-60, 4: 61-80, 5: 81-100, 6:101-120, 7: 121-140, 8 > 140



Anhang 3 Szenario Massenoptimierung: Altersklassenaufbau der Baumartengruppen sowie für alle Baumartengruppen;  
 Altersklasse (AKL) 1: 1-20, 2: 21-40, 3: 41-60, 4: 61-80, 5: 81-100, 6:101-120, 7: 121-140, 8 > 140





Anhang 4 Durchschnittliche jährliche Holzerntemenge der Baumartengruppen (Zeilen) und Grundszenarien (Spalten) in Relation zur Fläche der jeweiligen Baumartengruppe im Ausgangszustand im Jahr 2015 (oben) und im Jahr 2100 zum Ende des Betrachtungszeitraums (s. Tabelle 17)

**Massenoptimierung Wertoptimierung Speicheroptimierung Nichtnutzung**

[Efm/(a · ha)]

**je ha im Ausgangszustand 2015**

Kiefer	4.5	4.1	2.0	0
Fichte	8.9	8.3	4.9	0
Douglasie	17.1	14.9	8.2	0
Eiche	6.4	5.9	4.1	0
Buche	10.6	10.3	7.8	0
ALN	6.6	6.3	5.8	0

**je ha im Jahr 2100**

Kiefer	5.6	5.2	2.1	0
Fichte	18.7	16.8	6.5	0
Douglasie	7.8	6.8	5.2	0
Eiche	6.6	6.0	4.2	0
Buche	8.0	7.8	6.8	0
ALN	7.7	7.7	6.5	0