

Klimaschutzszenarien 2050: Modellierung, Analyse und Vergleich von Zielszenarien - Sektor LULUCF

Sektor LULUCF

Darmstadt, Berlin, 4.
Februar 2026

Autorinnen und Autoren

Öko-Institut e.V.

Dr. Klaus Hennenberg
Dr. Mirjam Pfeiffer
Dr. Hannes Böttcher
Margarethe Scheffler
Dennis Appenfeller

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Fraunhofer ISI

Breslauer Str. 48
76139 Karlsruhe
Telefon +49 721 6809-272

Kontakt

info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
Zusammenfassung	7
1 Einleitung	9
1.1 Beschreibung des Sektors	9
1.2 Herausforderung des Sektors	9
2 Vorgehen und Methode	11
2.1 Modellverbund	11
2.1.1 FABio-Land	11
2.1.2 FABio-Forest	12
2.1.3 Schnittstelle	13
2.1.4 CO ₂ -Kostenkurve	13
2.1.5 Einbindung einer CO ₂ -Preis-Steuerung im Modellverbund zur Landnutzung	15
2.1.6 Kritische Betrachtung zur Einbindung des CO ₂ -Preises in die LULUCF-Modellierung	16
2.1.7 Methodische Veränderungen im NIR	18
2.2 Ökonomische Kennwerte	19
2.3 Szenarien	20
3 Ausgestaltung der Instrumente und Parametrisierung in den Szenarien	21
4 Folgenabschätzung	25
4.1 THG-Emissionen	25
4.2 Flächenentwicklungen	30
4.3 Sektorale ökonomische Folgen	33
5 Kernbotschaften	36
Anhang	39
Anhang I. Modellbeschreibung zu FABio-Land	39
Anhang II. Modellbeschreibung zu FABio-Forest	40
Anhang III. Daten zu THG-Emissionen im LULUCF-Sektor	44

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: FABio-Modellverbund	11
Abbildung 2: Kostenkurve für energetisch genutztes Laubholz	15
Abbildung 3: Projektionsbericht 2024: Projizierte Entwicklung der Nettobilanz des LULUCF-Sektors	18
Abbildung 4: THG-Bilanz für den LULUCF-Sektor im Szenario KS1 / KS4 und Sensitivitätsanalyse für Störungen im Wald	26
Abbildung 5: THG-Bilanz für den LULUCF-Sektor in den Szenarien KS1/KS4, KS2 und KS3 (Sensitivität mittlere Störungen im Wald)	28
Abbildung 6: THG-Bilanz für den LULUCF-Sektor in den Szenarien REF, KS1/S4, KS2 und KS3 für die Stützjahre 2030, 2040 und 2045 (Sensitivität mittlere Störungen im Wald)	29
Abbildung 7: Flächenentwicklung in KS1	30
Abbildung 8: Flächenentwicklung in REF, KS1/KS4, KS2 und KS3 für die Stützjahre 2030, 2040 und 2045	31
Abbildung 9: Flächenentwicklung organischer Böden in KS1	31
Abbildung 10: Flächenentwicklung organischer Böden in KS1/KS4, KS2 und KS3 für die Stützjahre 2030, 2040 und 2045	32
Abbildung 11: Investitionen, Investitionszuschüsse und Vergütungen	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Übersicht der Instrumente KS1 „Policy Mix“ und KS4 „Ordnungsrecht“	22
Tabelle 3-2: Übersicht der Instrumente KS2 „ETS/BEHG-Preis“ und KS3 „Einheitlicher THG-Preis“	23
Tabelle 3-3: Annahmen und Einstellungen in den Szenarien KS1 bis KS4	24
Tabelle 5-1: THG-Bilanz für den LULUCF-Sektor im Szenario KS1 / KS4 und Sensitivitätsanalyse für Störungen im Wald	44
Tabelle 5-2: THG-Bilanz für den LULUCF-Sektor im Szenario KS2	45
Tabelle 5-3: THG-Bilanz für den LULUCF-Sektor im Szenario KS3	45

Abkürzungsverzeichnis

BWI	Bundeswaldinventur
FABio	Forestry and Agricultural Biomass Model
gS	Geringe Störungen im Wald
hS	Hohe Störungen im Wald
KS1	Szenario Policy Mix
KS2	Szenario ETS/BEHG-Preis
KS3	Szenario Einheitlicher THG-Preis
KS4	Szenario Ordnungsrecht
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
LiSE	Landwirtschaftsmodell „Livestock, Soil and Energy emissions“
LULUCF	Land use, land use change and forestry
MMS	Mit-Maßnahmen-Szenario
MWMS	Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario
mS	Mittlere Störungen im Wald
REF	Referenzszenario
PB	Projektionsbericht
PV	Photovoltaik
THG	Treibhausgas

Zusammenfassung

Im Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) werden Treibhausgasemissionen (THG) berichtet, die mit der Landnutzung in Deutschland verbunden sind. Die Modellierung erfolgte mit dem LULUCF-Modell FABio-Land, in dem Flächenänderungen und -nutzungen sowie resultierende THG-Emissionen bis 2045 fortgeschrieben werden. Die Waldentwicklung wird im Modell FABio-Forest simuliert, und Ergebnisse werden in FABio-Land eingelesen. Es besteht eine Anbindung an die Modellierung des Landwirtschaftssektors, um die Flächenentwicklung in den Sektoren abzustimmen. Hierzu zählen Veränderungen der Acker- und Grünlandflächen, Wiedervernässung von Moorböden und die Anlage von Agroforst. Maßnahmen, die zu relevanten THG-Minderungen führen, sind die Wiedervernässung drainierter landwirtschaftlicher Moorböden, die Anlage von Agroforstflächen, die Waldmehrung und der Erhalt und Ausbau der CO₂-Festlegung im Wald (Waldsenke).

In dem Szenario Policy Mix (KS1) und Szenario Ordnungsrecht (KS4) werden vergleichbare Maßnahmen angenommen. Im KS1 werden diese vorrangig über Förderung umgesetzt, im KS4 hingegen vorrangig über ordnungsrechtliche Instrumente. So werden in beiden Szenarien in Summe die LULUCF-Ziele nach den Bundes-Klimaschutzgesetz von -25 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2030 und -40 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2045 erreicht. Der Unterschied zwischen KS1 und KS2 zeigt sich aber in den ökonomischen Folgen: im KS1 werden im Jahr 2045 Akteure durch Investitionszuschüsse und Vergütungen für eine unterlassene Laubholzernte um ca. 330 Mio. € entlastet. Diese Entlastung entfällt im KS4.

Im Szenario ETS/BEHG-Preis (KS2) gelten für die Sektoren LULUCF und Landwirtschaft ein gemeinsamer CO₂-Preis. Das LULUCF-Ziel im Bundes-Klimaschutzgesetz im Jahr 2045 wird bei einem CO₂-Preis von knapp 84 €/t CO₂ erreicht. Bei diesem Preis werden im KS2 im Vergleich zum KS1 weniger Moorböden vernässt und weniger Agroforstflächen angelegt. Dafür wird mehr Laubholz im Wald belassen, um dort die Waldsenke aufzubauen. Dies stellt sich ein, da die Vernässung von Moorböden und die Anlage von Agroforstflächen mit höheren CO₂-Preisen verbunden sind als eine Reduzierte Laubholzernte. In Summe liegen Investitionszuschüsse und Vergütungen im KS2 leicht höher als im KS1. Durch Kosteneinsparungen im Landwirtschaftssektor ist das KS2 aber kostengünstiger als das KS1.

Im Szenario Einheitlicher THG-Preis (KS3) ist der LULUCF-Sektor an einen Sektor-übergreifenden CO₂-Preise angebunden. Da alle THG-Minderungen im LULUCF-Sektor, die in den CO₂-Handel eingebunden werden, unter 250 €/t CO₂ liegen, und der gemeinsame CO₂-Preis im Jahr 2045 mit 350 €/t CO₂ deutlich höher ist, werden alle LULUCF-Minderungsoptionen umgesetzt. So wird im Jahr 2045 im LULUCF-Sektor eine Senke von -61 Mio. t CO₂ erreicht, die deutlich über den LULUCF-Zielen im Bundes-Klimaschutzgesetz liegt. Es ist aber zu betonen, dass die erreichte Senkenleistung gerade auf der Waldfläche höhere Risiken aufweist als Minderungsoptionen in anderen Sektoren. Beispielhaft wurden für den Wald Auswirkungen unterschiedlicher Störungsintensitäten auf die THG-Bilanz im LULUCF-Sektor analysiert.

Als Kernbotschaften kann festgehalten werden:

- Nach den methodischen Anpassungen im THG-Inventar 2024 gegenüber dem THG-Inventar 2022 könne LULUCF-Ziele im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) sind voraussichtlich nur erreicht werden, wenn im Wald geringe natürliche Störungen auftreten. Werden für die Waldfläche Risiken für natürliche Störungen stärker berücksichtigt, ist eine Zielverfehlung wahrscheinlich.

- THG-Minderungsoptionen im LULUCF-Sektor erweisen sich als sehr kosteneffizient. Alle betrachteten LULUCF-Maßnahmen sind günstiger als 250 €/t CO₂.
- Bei einer Anbindung der Minderungsoptionen im LULUCF-Sektor an den CO₂-Preis in anderen Sektoren werden die kostengünstigen THG-Minderungsoptionen im LULUCF-Sektor vor den teureren Maßnahmen in anderen Sektoren bevorzugt genutzt. Dies führt zu einer verstärkten Wahl von THG-Minderungsoptionen im LULUCF-Sektor, die mit höheren Risiken verbunden sind als Minderungsoptionen in anderen Sektoren.
- Die Implementierung einer CO₂-basierten Steuerung von Maßnahmen im LULUCF-Sektor birgt die Herausforderung, dass Konkurrenzsituationen und daraus resultierende Preissteigerungen bei land- und forstwirtschaftlichen Produkten zu erwarten und nur schwer zu vermeiden sind.

1 Einleitung

1.1 Beschreibung des Sektors

Der Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF)¹ berichtet die Treibhausgasemissionen (THG), die mit der Landnutzung in Deutschland verbunden sind. Dabei werden Veränderungen der Kohlenstoffspeicher in Vegetation, Totholz, Streu und Boden sowie flächengebundene CH₄- und N₂O-Emissionen berücksichtigt. Die THG-Bilanzierung unterscheidet zwischen verschiedenen Flächenkategorien: Wald, Ackerland, Grünland, Feuchtgebiete, Siedlungen und sonstiges Land, jeweils für mineralische und organische Böden.² Organischen Böden, auch als Moorböden bezeichnet, umfassen intakte Moorstandorte, Anmoore und Moorfolgeböden mit hohem Bodenkohlenstoffgehalt. Zusätzlich werden Veränderungen im Holzproduktspeicher im LULUCF-Sektor erfasst.

Im LULUCF-Sektor können für die einzelnen Kohlenstoffpools der Flächentypen sowie für den Holzproduktspeicher sowohl positive als auch negative CO₂-Emissionswerte auftreten: CO₂-Festlegungen in einem Kohlenstoffpool werden als Senke (negative CO₂-Emissionen) und CO₂-Freisetzung aus einem Kohlenstoffpool als Quellen (positive CO₂-Emissionen) bezeichnet. CH₄- und N₂O-Emissionen stellen stets eine Quelle dar. Bedeutende Emissionsquellen finden sich auf trocken genutzten organischen Böden, insbesondere in der Landwirtschaft. Auch Feuchtgebiete, wie Torfabbauflächen und stehende Gewässer, tragen erheblich zu THG-Emissionen bei. Die bedeutendste Senke bildet die Waldfläche, und in kleinerem Umfang der Holzproduktspeicher. Je nach Ausprägung der Quellen und Senken in einem bestimmten Jahr kann die Netto-THG-Bilanz für den LULUCF-Sektor entweder eine Senke oder eine Quelle darstellen.

1.2 Herausforderung des Sektors

Eine zentrale Herausforderung im LULUCF-Sektor besteht darin, bestehende Emissionsquellen zu reduzieren. Besonders hohe Minderungspotenziale existieren bei landwirtschaftlich genutzten Moorböden und beim Torfabbau. Die Bund-Länder-Vereinbarung zum Moorböden- und Moorschutz sowie die nationale Moorschutzstrategie streben bis zum Jahr 2030 eine THG-Minderung von -5 Mio. t CO₂Äq durch Moorböden- und Moorschutz an. Der Projektionsbericht 2023 (PB-2023, Harthan et al. 2023) prognostiziert im Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario (MWMS), das bestehende und in der Umsetzung befindende Maßnahmen modelliert, jedoch nur eine THG-Minderung von -2,3 Mio. t CO₂Äq. durch Moorböden- und Moorschutz. Der aktuelle Projektionsbericht 2024 (PB-2024, Harthan et al. 2024) korrigiert für das MWMS diesen Wert geringfügig auf 2,1 Mio. t CO₂Äq. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit, Maßnahmen zur Emissionsreduktion im LULUCF-Sektor ambitionierter voranzutreiben als im MWMS angenommen.

Bezüglich der Senken im LULUCF-Sektor liegt die Herausforderung darin, bestehende Kohlenstoffsenken in Wäldern und den Holzproduktspeicher zu erhalten und auszubauen. Insbesondere Wälder sind durch natürliche Störungen wie Stürme, Trockenheit und Käferkalamitäten gefährdet, was zu einer Abnahme der CO₂-Festlegung führen und den Wald sogar von einer Senke zu einer Quelle wandeln kann. Seit dem Jahr 2018 wurden hohe Mortalitätsraten, insbesondere in Fichtenbeständen, aufgrund starker Trockenheit und Käferbefall beobachtet (BMEL).

¹ Land Use, Land Use Change and Forestry (Quellgruppe CRF 4 LULUCF)

² Im deutschen THG-Inventar werden diese Quellgruppen z.T. weiter differenziert.

2024). Die anstehenden Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur (BWI-4) werden Aufschluss über das Ausmaß dieser Entwicklung im THG-Inventar geben.

Das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) legt für den LULUCF-Sektor Senkenziele fest: -25 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2030, -35 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2040 und -40 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2045. Der PB-2023 prognostiziert für das Jahr 2030 eine Zielverfehlung von 6 Mio. t CO₂-Äq im MWMS. Methodische Anpassungen im Nationalen Treibhausgasinventar (UBA 2024) und damit auch im PB-2024 führen zu einer deutlichen Verschlechterung der THG-Bilanz stehender Gewässer und des Waldbodens. In Summe verschlechtert sich die THG-Bilanz des LULUCF-Sektors – allein durch methodische Verbesserungen – um 17 Mio. t CO₂-Äq, wodurch sich die erwartete Zielverfehlung für das Jahr 2030 im LULUCF-Sektor auf ca. 23 Mio. t CO₂-Äq erhöht.

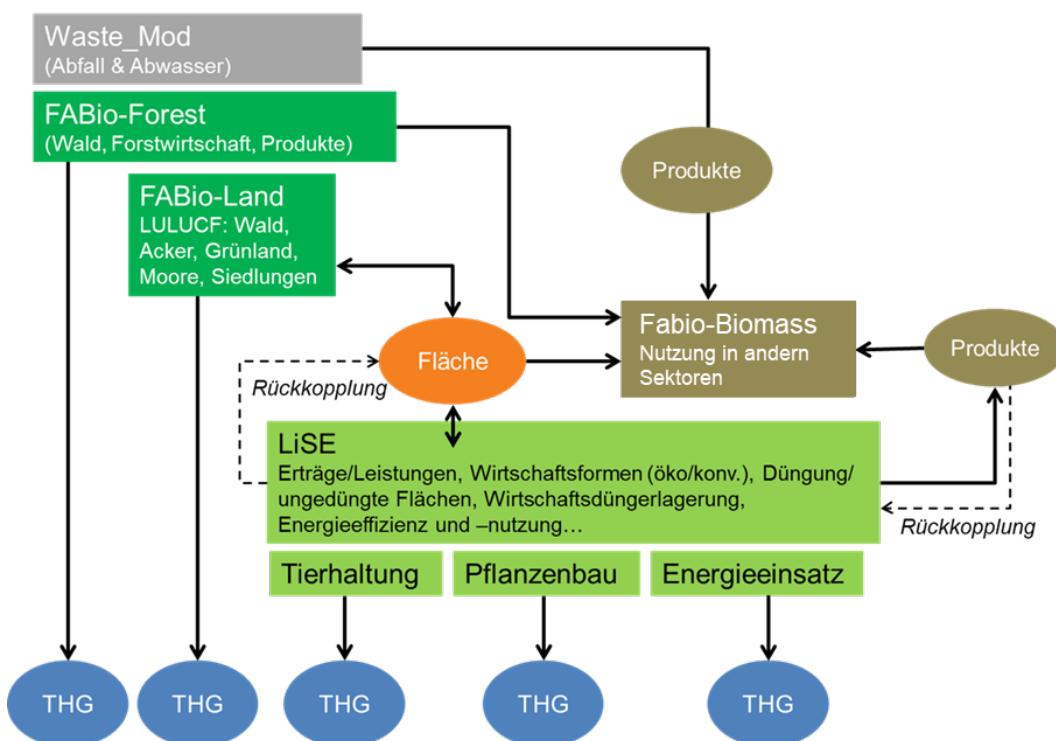
Bestehende und geplante Maßnahmen, wie Förderprogramme im Rahmen des Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK), adressieren bereits geeignete Bereiche zur Verbesserung der THG-Bilanz im LULUCF-Sektor. Dazu gehören Moorbödenenschutz, die Anlage von Agroforstsystmen, Waldmehrung und die Extensivierung der Waldbewirtschaftung. Angesichts der aktuellen Daten- und Berechnungsgrundlage im Treibhausgasinventar, insbesondere nach den genannten methodischen Anpassungen, stellt die Erreichung der LULUCF-Ziele im KSG eine große Herausforderung dar.

2 Vorgehen und Methode

2.1 Modellverbund

Die THG-Emissionen und die Flächenkulisse im LULUCF-Sektor werden mit den Modellen aus der FABio-Modellfamilie simuliert. Da die Strukturen und zeitliche Dynamik der Waldflächen komplex sind, werden die THG-Emissionen der lebenden Bäume im Waldmodell FABio-Forest abgebildet und an FABio-Land übergeben. Die Veränderungen der Flächenkulisse aus FABio-Land, z.B. zu Ackerland, Grünland und wiedervernässten Flächen, wird an das Agrarmodell LiSE übergeben (siehe Sektorbericht Landwirtschaft). Im Gegenzug wird die Anlage von Agroforstflächen von LiSE an FABio-Land gemeldet (Abbildung 1 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Abbildung 1: FABio-Modellverbund



Quelle: eigene Darstellung (Öko-Institut). FABio = Forest and Agricultural Biomass Model; FABio-Land = LULUCF-Modell; FABio-Forest = Waldmodell; LiSE = Landwirtschaftsmodell (Lifestock, Soil and Energy emissions); FABio-Biomass = Biomassemodell. Waste_Mod = Abfall- und Abwassermodell

2.1.1 FABio-Land

Im Zentrum der Modellierung des Sektors Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (*Land use, land use change and forestry*, LULUCF) steht das Modell FABio-Land. In FABio-Land werden alle Quellgruppen nach der Methode des IPCC (IPCC 2006) abgebildet. Hierzu zählen Wald, Ackerland, Grünland, Gehölze, Gewässer, terrestrische Feuchtgebiete, Torfabbauflächen, Siedlungen und sonstige Flächen. Diese Kulisse wird in FABio-Land um wiedervernässte Flächen, Agroforst-Flächen, PV-Freiflächen und Agri-PV-Flächen (Acker- oder Grünland) erweitert. Alle

Flächenkategorien werden in mineralische und organische Böden³ differenziert. Informationen aus den Modellen FABio-Forest und LiSE werden in FABio-Land integriert (siehe Kap. 2.1.3).

Aus den CRF-Tabellen des nationalen Treibhausgasinventars (THG-Inventar) werden jedem Flächentyp Emissionskoeffizienten und für den Übergang von einem Flächentyp zu einem anderen Flächenänderungskoeffizienten basierend auf dem Mittelwert der letzten fünf Jahre zugewiesen. In dieser Studie werden die Daten der Submission 2022 verwendet (UBA 2022). Für die zusätzlichen Flächentypen werden Emissionskoeffizienten aus der Literatur ergänzt (siehe Details in Anhang I). Die Flächenänderungskoeffizienten werden als Basiseinstellung bis zum Jahr 2045 konstant fortgeschrieben. Durch Maßnahmen werden gezielt Flächenänderungskoeffizienten von Zielflächen verändert. Beispielsweise wird der Flächenänderungskoeffizient von Ackerland hin zu wiedervernässten Flächen durch die Maßnahme Moorvernässung erhöht, oder die Flächenänderungskoeffizienten hin zu Siedlungsflächen werden verringert, um den Flächenverbrauch zu begrenzen.

Jedem Flächentyp sind Kohlenstoffpools zugeordnet, die Vegetation, Streu, Totholz und Boden umfassen. Diese Pools können sich vergrößern oder verkleinern. Zusätzlich werden CH₄- und N₂O-Emissionen berücksichtigt. Die Modellierung erfolgt in Jahresschritten. Ergänzend wird der flächenunabhängige Holzproduktspeicher einbezogen. Basierend auf den Holzzuflüssen in diesen Speicher, wie sie in den CRF-Tabellen dokumentiert sind, wird er nach der IPCC-Methode (IPCC 2006) dynamisch modelliert.

Als Ergebnisse werden die Flächenkulisse sowie die THG-Bilanzen der Flächentypen und des Holzproduktspeichers ausgegeben. Eine negative THG-Bilanz bedeutet, dass mehr CO₂ in die Kohlenstoffpools eingebunden als Treibhausgase freigesetzt werden. Diese negativen Emissionen werden als Senke bezeichnet. Überwiegt hingegen die THG-Freisetzung, so wird von einer Quelle gesprochen.

2.1.2 FABio-Forest

Der Wald in Deutschland wird mit dem Waldmodell FABio-Forest abgebildet. FABio-Forest ist ein empirisches, distanzunabhängiges Einzelbaummodell. Auf Basis der erhobenen Baumindividuen an gut 36.600 Erhebungspunkten der dritten Bundeswaldinventur (BWI-3) aus dem Jahr 2012 werden 1 ha-Bestände generiert und deren weitere Entwicklung abhängig von den Gegebenheiten an einem Erhebungspunkt simuliert. Hierzu werden Zuwachsfunktionen, Mortalitätsfunktionen, eine Einwuchsfunktion und die Abbildung der Waldbewirtschaftung inkl. Holzentnahme verwendet (siehe Details in Anhang II).

In FABio-Forst werden Annahmen zur Intensität natürlicher Störungen getroffen, durch die Mortalität und Zuwachs modifiziert werden. Da in diesem Projekt der Fokus nicht auf der Untersuchung klimabedingter Störungssensitivitäten lag, wurde die Störungsintensität „mittlere natürliche Störungen“ verwendet, für die die Mortalitätsraten und Zuwächse den Mittelwerten der Jahre 2002 bis 2017 entsprechen (vgl. Pfeiffer et al. 2023). Zur Einordnung: im Projektionsbericht 2023 und 2024 (Harthan et al. 2023 und 2024) werden die Mortalitätsraten und Zuwächse aus der Periode 2013 bis 2017 mit „geringen natürlichen Störungen“ fortgeschrieben. In diesem Bericht wurden damit

³ Hierunter fallen z.B. intakte Moorflächen, Moorfolgeböden und Anmoore. Auf diesen Flächen sind im Torfkörper große Mengen an Kohlenstoff gespeichert.

Annahmen zu einer ungünstigeren Waldentwicklung getroffen als im aktuellen Projektionsbericht, um Risiken für die Waldsenke zu berücksichtigen.

Die Senkenleistung der Waldfläche wird deutlich durch die Höhe der Holzentnahme beeinflusst. In FABio-Forest wird zuerst wirtschaftlich nutzbares Schadholz sowie Durchforstungsholz entnommen und auf die jährliche Holznachfrage angerechnet, die sich dadurch reduziert. Anschließend wird die noch verbleibende offene Holznachfrage durch den Einschlag von vitalen Bäumen oberhalb des Ernte-Zieldurchmessers bedient. Eine Minderung des Einschlags kann die CO₂-Bilanz der lebenden Bäume verbessern. Die Steuerung der Holzentnahme kann in Szenarien an den CO₂-Preis gekoppelt werden (siehe Kap. 2.1.4).

2.1.3 Schnittstelle

Die im Modellverbund verwendeten Modelle interagieren über Schnittstellen miteinander. Die folgenden Daten werden zwischen den Modellen ausgetauscht:

- FABio-Land an LiSE: Veränderung der landwirtschaftlich genutzten Fläche (inkl. Wiedervernässung)
- LiSE an FABio-Land: Flächenbelegung mit Agroforst und Neuanlage von Dauergrünland
- FABio-Forest an FABio-Land: Senkenleistung der Waldfläche
- LiSE an FABio-Biomass: Landwirtschaftlichen Biomasseproduktion (ohne Lebensmittel)
- FABio-Forest an FABio-Biomass: Holzentnahme
- FABio-Land an FABio-Biomass: Veränderung der Zuflüsse in den Holzproduktspeicher, um Veränderungen der stofflichen und energetischen Biomassenutzung abzubilden

Zudem ist die Anlage an PV-Freiflächenanlagen an die Modellierung im Energiesektor gekoppelt. Die Ergebnisse der LULUCF-Modellierung werden abschließend in die übergreifende THG-Integration eingespeist und ökonomische Kenngrößen für die ökonomische Auswertung bereitgestellt.

2.1.4 CO₂-Kostenkurve

In den Szenarien KS2 „ETS/BEHG-Preis“ und KS3 „Einheitlicher THG-Preis“ werden Emissionsminderungen und Senkenaufbau an einen CO₂-Preis gekoppelt. Dies erfolgt für den LULUCF-Sektor für die drei mengenmäßig bedeutendsten Quellgruppen Wald, landwirtschaftliche organische Böden (Moorvernässung) und Anlage von Agroforst auf organischen Böden. THG-Emissionen der übrigen Quellgruppen werden nicht über den CO₂-Preis angesteuert.

Für Moorvernässung und Anlage von Agroforst bestehen direkte Verbindungen zur Bewirtschaftung in der Landwirtschaft. Da neben den direkten Kosten der Maßnahmen auch weitere landwirtschaftliche Betriebskosten in die Ermittlung eines CO₂-Preises eingehen, wird dieser im Sektor Landwirtschaft ermittelt (siehe Sektorpapier Landwirtschaft).

Um die mögliche Senkenleistung im Wald in Deutschland an einen CO₂-Preis zu koppeln, ist es nötig, dem Holz in Deutschland einen CO₂-Preis zuzuweisen. Hierzu werden der erntekostenfreie Erlös⁴ und die Menge an CO₂, die im Holz gespeichert ist, herangezogen.

Bei der Erstellung einer CO₂-Kostenkurve liegt der Fokus auf energetisch genutztem Laubholz, da bei dieser Nutzungsart nur geringe bis keine THG-Minderungen erwartet werden können (Fehrenbach et al. 2022, Hennenberg et al. 2024). Außerdem bieten Laubholzbestände das Potenzial, mit vertretbarem Risiko Vorräte im Wald aufzubauen (WBW 2021, Reise et al. 2024), und positive Effekte für die biologische Vielfalt werden für Laubmischbestände besonders hoch eingeschätzt (Luick et al. 2021). In Deutschland wurden in den letzten 10 Jahren durchschnittlich 18,7 Mio. m³ Laubholz jährlich aus dem Wald entnommen. Davon fanden 13,6 Mio. m³ an Laubholz eine direkte energetische Verwendung, während 5,1 Mio. m³ in der ersten Verarbeitungsstufe stofflich genutzt wurden (Jochem et al. 2023). Es ist aber davon auszugehen, dass bei der stofflichen Nutzung in den nachfolgenden Verarbeitungsstufen Sägenebenprodukte anfielen, die ebenfalls energetisch genutzt oder für kurzlebige Holzprodukte verwendet wurden.

Zwischen 2011 bis 2017 betrug der erntekostenfreie Erlös im Privatwald für Buche und Eiche durchschnittlich 46,21 €/m³ und im Körperschaftswald 31,87 €/m³.⁵ Die Jahre ab 2018 wurden aufgrund von Trockenheit und Käferkalamitäten, die zu hohen Mengen an Schadholz und gesunkenen Erlösen führten, nicht berücksichtigt. Im Mittel für Privat- und Körperschaftswald lag der erntekostenfreie Erlös bei 39,04 €/m³. Dieser Wert berücksichtigt alle Holzsortimente. Dieser Wert ist für Energieholz als hoch einzustufen, da es meist niedrigere Erlöse erzielt.

Im Holz, das aus dem Wald geerntet wird, ist Kohlenstoff gespeichert. Lufttrockenes Laubholz speichert etwa 1,0 t CO₂/m³ (vgl. FNR 2023). Die oben genannten erntekostenfreien Erlöse beziehen sich auf Derbholz ohne Rinde (Erntefestmeter). Daher ist bei der Berechnung des CO₂-Preises ein Rindenaufschlag von 12 % für Laubholz zu berücksichtigen, denn mit dem Holz verbleibt auch die Rinde im Wald:

$$39,04 \text{ [€/m}^3\text{]} / (1,0 \text{ [t CO}_2\text{/m}^3\text{]} * 1,12) = 34,86 \text{ [€/t CO}_2\text{]}$$

Dieser aus aktuellen Zahlen ermittelte CO₂-Preis für Holz von 34,86 €/t CO₂ basiert auf der Annahme einer ähnlichen Energieholzentnahme wie in den Jahren 2011 bis 2017. Wird Laubholz im Wald belassen, um dort die Senke zu erhöhen, sind eine Feuerholzknappheit und Preissteigerungen zu erwarten. Um dies abzubilden, werden die Kosten für grünen Wasserstoff als teure Energiequelle herangezogen. In den 2040er Jahren werden Kosten für grünen Wasserstoff von über 25 €/GJ erwartet (Sektorbericht Energiewirtschaft). Der Energiegehalt von lufttrockenem Laubholz (15 % Wassergehalt) beträgt 2.550 kWh/m³ bzw. 9,182 GJ/m³ (Harthan et al. 2024). Bei dem oben genannten Faktor von 1,12 t CO₂/m³ entspricht dies 8,198 GJ/t CO₂, was mit dem genannten Preis für grünen Wasserstoff 204,96 €/t CO₂ ergibt.

Basierend auf dieser Kostenabschätzung wird angenommen, dass nur 10 % der Feuerholzkunden bereit sind, einen Preis von über 200,00 €/m³ zu bezahlen. Die übrigen Kunden wechseln zu alternativen Energieträgern, vorwiegend zu Wärmepumpen und in selteneren Fällen zu Wasserstoff. Der durch die Verknappung von Feuerholz verursachte Preisanstieg wird in Abbildung 2 als exponentiellen Zusammenhang dargestellt. Dabei wird das Potenzial an Laubholz,

⁴ Der erntekostenfreie Erlös ist der Erlös, der für Holz erzielt werden kann, wenn die Erntekosten vom Verkaufspreis abgezogen werden.

⁵ Testbetriebsnetz Forst: <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/testbetriebsnetz/testbetriebsnetz-forst-buchfuehrungsergebnisse>

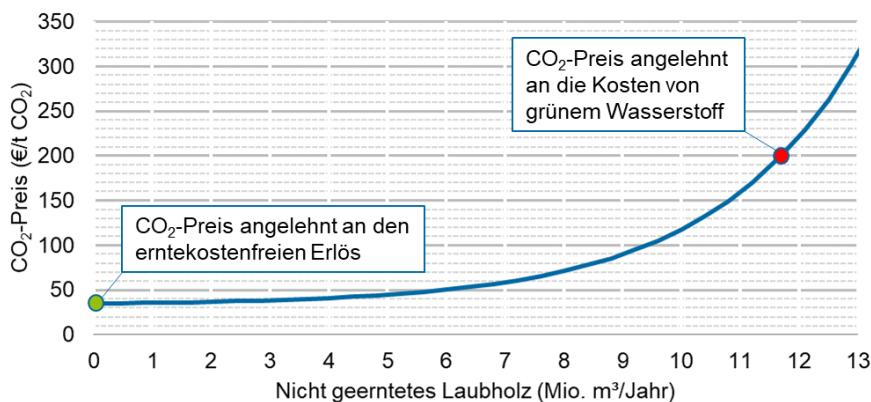
dass im Wald verbleiben könnte, mit 13 Mio. m³ angesetzt (vgl. oben genannte energetische Laubholznutzung).

Die Modellierung ergibt beispielsweise folgende Ergebnisse (vgl. Abbildung 2):

1. Bei einem CO₂-Preis von 50 €/t CO₂ werden etwa 6 Millionen Kubikmeter weniger Laubholz geerntet und nicht als Feuerholz vermarktet.
2. Ein CO₂-Preis von 200 €/t CO₂ führt dazu, dass 11,7 Millionen Kubikmeter Laubholz nicht geerntet werden.
3. Ab einem CO₂-Preis von über 315 €/t CO₂ verbleiben die vollen 13 Millionen Kubikmeter Laubholz im Wald.

Diese für Laubholz entwickelte Kostenkurve dient als Grundlage für die Parametrisierung der Waldmodellierung in den Szenarien KS2 und KS3.

Abbildung 2: Kostenkurve für energetisch genutztes Laubholz



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

2.1.5 Einbindung einer CO₂-Preis-Steuerung im Modellverbund zur Landnutzung

Die CO₂-Steuerung von Klimaschutzmaßnahmen zu den in Kap. 2.1.4 genannt Quellgruppen wurde im Modellverbund von FABio-Forest, FABio-Land und LiSE über den Ansatz von Ranglisten implementiert:

Verringerung der Laubholzentnahme in FABio-Forest:

FABio-Forest verwendet als Ausgangsszenario die Waldentwicklung ab dem Jahr 2022 unter Annahme mittlerer Störungsintensität. Die Holzentnahme wird konstant fortgeschrieben und entspricht dem Durchschnitt der Jahre 2013 bis 2017 (siehe Kap. 2.1.2), d.h. es handelt sich um einen Modelllauf ohne Reduktion der Laubholzernte. In 13 weiteren Modellläufen wird die Laubholzernte ab dem Jahr 2031 bis zu einem Zielwert im Jahr 2045 linear reduziert. Die Reduktion der Laubholzernte im Jahr 2045 variiert von 1 bis 13 Mio. m³/Jahr in Ein-Millionen-Schritten. Für jeden Modelllauf wird eine jahresgenaue Zeitreihe der Emissionskoeffizienten für die lebenden Bäume der Waldfläche an FABio-Land übergeben. Jedem der 13 Modellläufe kann nach Abbildung 2 ein CO₂-Preis zugewiesen werden. In FABio-Land kann ein CO₂-Preis für das Jahr 2045 eingestellt werden. Modellintern wird ermittelt, zwischen welchen der Modellläufen der CO₂-Preis liegt (z.B. 100 €/t CO₂ zwischen einer Laubholzreduktion von 9 bis 10 Mio. m³; siehe Abbildung 2). Für die

Emissionsfaktoren der beiden ermittelten Modellläufe wird ein gewichteter Mittelwert errechnet, wodurch für jeden beliebigen CO₂-Preis eine Zeitreihe der Emissionsfaktoren für die lebenden Bäume der Waldfläche in FABio-Land dargestellt werden kann. Um eine Rangliste zu erstellen, wird in FABio-Land in 10 €/t-Schritten die CO₂-Minderung im Jahr 2045 berechnet.

Ausgehend von den Einstellungen im Szenario KS1 werden die Maßnahmen zur Moorvernässung und zur Anlage von Agroforst ab dem Jahr 2031 konstant gehalten, und die Waldmodellierung erfolgt ohne Reduktion der Laubholzernte (CO₂-Preis < 34,86 €/t CO₂, siehe Kap. 2.1.4). Mit diesen Einstellungen wird im LULUCF-Sektor im Jahr 2045 eine Senke von -29,5 Mio. t CO₂-Äq erreicht. Die Lücke zum Senkenziel von -40 Mio. t CO₂-Äq beträgt somit 10,5 Mio. t CO₂-Äq, die durch Moorvernässung und Agroforst geschlossen werden muss. Bei einem CO₂-Preis von 50 €/t CO₂ reduziert sich die Lücke auf 6,3 Mio. t CO₂-Äq, bei 100 €/t CO₂-Äq auf 3,4 Mio. t CO₂-Äq. Für jeden der genannten CO₂-Preisschritt wird die zu schließende Lücke ausgewiesen.

Moorvernässung und Anlage von Agroforst in LiSE

In LiSE wurden Kosten für die Wiedervernässung von Moorböden auf Acker- und Grünland sowie für die Anlage von Agroforstflächen ermittelt.⁶ Diese Berechnung basiert auf Betriebs-, Investitions- und Opportunitätskosten (entgangene Einnahmen durch veränderte Landnutzung). Die ermittelten Kosten wurden in Relation zu den erwartenden THG-Minderungen gesetzt. Die Kostenstruktur für diese Maßnahmen variiert je nach Region in Deutschland, woraus sich eine Rangliste von CO₂-Preisen und eine zugehörigen Flächenkulisse ergibt. Z.B. ist es bei einem CO₂-Preis von 100 €/t CO₂-Äq. wirtschaftlich, 175.500 ha landwirtschaftliche Fläche auf Moorböden wiederzuvernässen. Dies führt zu einer THG-Minderung von -4,4 Mio. t CO₂-Äq. Die Anlage von Agroforst wird erst ab einem CO₂-Preis von 140 €/t CO₂ wirtschaftlich darstellbar (siehe Sektorbericht Landwirtschaft).

Abgestimmter CO₂-Preis

In einem iterativen Prozess wird der CO₂-Preis ermittelt, bei dem mit den Maßnahmen Wiedervernässung, Anlage von Agroforst und Erhöhung der Waldsenke durch Verringerung der Laubholzernte bis zum Jahr 2045 die THG-Emissionen um -10,5 Mio. t CO₂-Äq gemindert werden. So kann – zusammen mit den Maßnahmen außerhalb des CO₂-Handels – eine Senkenleistung im LULUCF-Sektor von -40 Mio. t CO₂-Äq erreichen werden.

2.1.6 Kritische Betrachtung zur Einbindung des CO₂-Preises in die LULUCF-Modellierung

Diese Studie steuert erstmals die THG-Minderung und den Senkenaufbau über den CO₂-Preis, was methodisches Neuland darstellt. Aus diesem Grund werden an dieser Stelle Punkte angesprochen, die bei zukünftigen Arbeiten vertieft werden sollten.

Die Preissteigerungen für das Laubholz fallen sehr stark aus. Um zu verhindern, dass die Steigerungen für Feuerholz auch die Preise für stofflich genutzten Sortimenten erhöht, muss sichergestellt werden, dass eine CO₂-Abgabe ausschließlich das Energieholz belastet. Dies könnte als Preisaufschlag beim Verkauf von Feuerholz durch Händler oder bei der Vergabe von

⁶ Als Nebenbedingung wird angenommen, dass aus technischen Gründen (z.B. räumliche Nähe zu Infrastruktur) maximal 80 % der landwirtschaftlichen Fläche auf Moorböden vernässt werden kann. Die mögliche Fläche für die Anlage von Agroforst wird auf 10 % der Ackerfläche auf mineralischen Böden gedeckelt.

Flächenlosen an Selbstwerber umgesetzt werden. Private Feuerholzentnahmen wären davon allerdings nach wie vor nicht erfasst.

Eine Herausforderung besteht darin, dass die Feuerholznutzung nicht vollständig von der stofflichen Laubholzproduktion getrennt werden kann. Teile eines Stammes können als Wertholz für eine stoffliche Nutzung verwendet werden, während gleichzeitig andere Teile als Feuerholz genutzt werden. Zudem wird Durchforstungsholz entnommen, um die Qualität der verbleibenden Bäume für eine hochwertigere stoffliche Nutzung zu verbessern. Dies trifft jedoch nicht auf alle Waldbestände zu, da nur eine geringe Menge an Laubholz in der ersten Verwertungsstufe stofflich genutzt wird. Die maximale Menge an Laubholz, die im Rahmen der Modellierung im Wald belassen werden kann, ist daher als ein erster Schätzwert zu verstehen.

Da Märkte global interagieren, ist zu erwarten, dass durch den CO₂-Preis entstehende Kostensteigerungen für Produkte in Deutschland zu höheren Importflüssen führen kann. Dem ist durch eine angepasste CO₂-Besteuerung bei Importen von landwirtschaftlichen und forstwirtschaftlichen Produkten entgegenzuwirken.

Das Grundprinzip des dargestellten Ansatzes ist, Laubholz im Wald zu belassen und so Kohlenstoff weiterhin im Holz zu speichern. Für instabile Beständen oder solche, die bei einem zu starken Vorratsaufbau instabil werden könnten, gibt es mehrere Handlungsoptionen:

1. Es wird das Risiko von stärkeren Mortalitäten in Kauf genommen. Weniger Laubholz wird geerntet, was zu einer Erhöhung des Vorrats im lebenden Bestand und auch zeitverzögert im Totholz führt. Je nach Totholztyp kann die Zersetzung mehrere Jahrzehnte dauern. Diese Option ist im Modellverbund abgebildet, allerdings wird die Veränderung der Totholzvorräte in der aktuellen Version noch nicht von FABio-Forest an FABio-Land übergeben, was tendenziell zu einer Unterschätzung der Waldsenke führt. Da im Waldmodell die Mortalität in dichteren und älteren Beständen ansteigt, ist der Effekt konzeptuell aber bereits abbildungbar angelegt.
2. Zur Vermeidung instabiler Bestände wird Holz entnommen und explizit für langlebige Holzprodukte genutzt, anstatt es zu verbrennen oder als kurzlebige Holzprodukte zu verwenden. Hierbei fällt aber auch Holz im Wald an, dass verrottet (Stammfuß, Kronentopholz, Wurzelraum), und ein Teil des Holzes wird als Sägenebenenprodukt doch energetisch genutzt. Zudem verlassen Holzprodukte sukzessive den Holzproduktspeicher und werden aktuell zu hohen Anteilen als Altholz verbrannt. So ist der C-Speicher dieses Pfads in Summe ggf. nicht besser als Punkt 1 (Holz bleibt im Wald).
3. Geerntetes Holz oder auch Sägenebenenprodukte sind bereits gute C-Speicher. Wenn es keine marktfähige stoffliche Nutzung von Holz gibt, könnte Holz auch dauerhaft eingelagert werden. Technisch sollte es mit wenig Aufwand möglich sein, Holz sicher über 100 Jahre oder länger zu lagern, was auch Altholz oder Schadholz aus natürlichen Störungen einbezieht. Wenn die Dauer der Speicherung dieses „Speicherholzes“ verlässlicher ist als bei Holzprodukten (Schnittholz: Halbwertszeit nach IPCC von nur 35 Jahren), dann könnte die Klimaschutzwirkung höher ausfallen als bei Holzprodukt-Nutzungen mit kürzerer Halbwertszeit.

Substitutionseffekte der energetischen Holznutzung werden nicht auf der Waldebene, sondern in der Modellierung der energieverbrauchenden Sektoren berücksichtigt. Die mögliche Substitution nimmt kontinuierlich ab und ist im Jahr 2045 sehr niedrig, da kaum noch fossile Energieträger eingesetzt werden (vgl. Hennenberg et al. 2024).

Zur Einbindung der CO₂-Bepreisung in die LULUCF-Modellierung besteht weiterer Forschungsbedarf. Künftige Studien sollten die Dynamik der Waldbestände einschließlich der Totholz pools bei unterschiedlich starker Holzentnahme, mögliche Holzproduktspeicher inkl. „Speicherholz“ und zeitliche Veränderungen von Substitutionseffekten auf stofflicher und energetischer Ebene berücksichtigen.

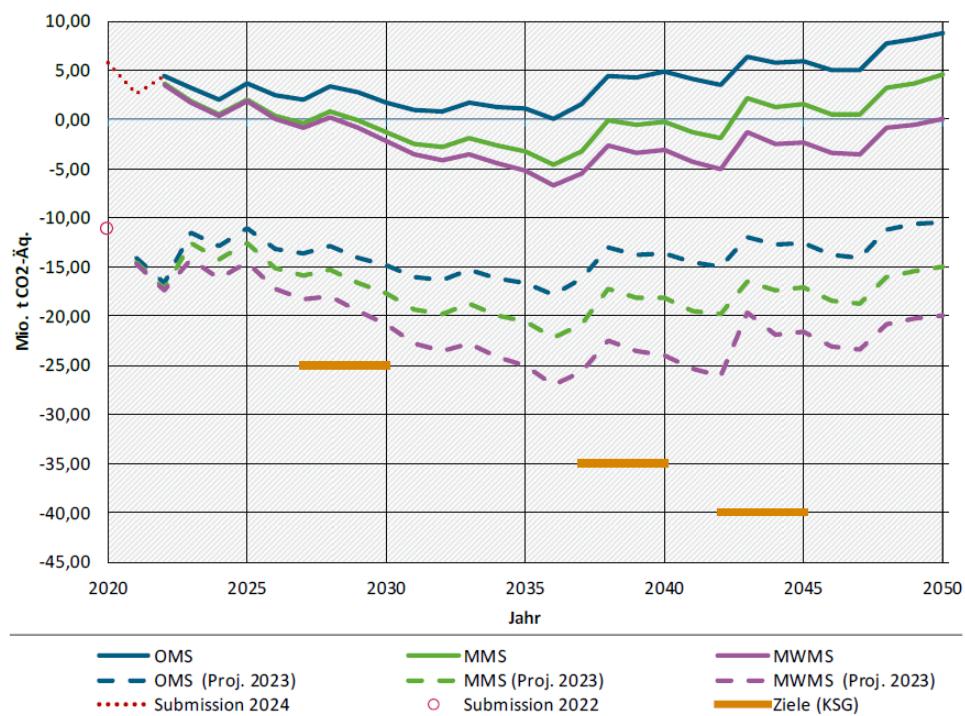
2.1.7 Methodische Veränderungen im NIR

Die Modellierung in dieser Studie orientiert sich an den Ergebnissen aus dem Projektsbericht 2023 (Harthan et al. 2023), der die Daten des Nationalen THG-Inventars aus dem Jahr 2022 (Submission 2022) nutzt. Das letzte berichtete historische Jahr ist somit 2020.

Der kürzlich veröffentlichte Projektsbericht 2024 (Harthan et al. 2024) verwendet hingegen die vorläufigen Daten des Nationalen THG-Inventars von Januar 2024 (Submission 2024). Methodische Verbesserungen im THG-Inventar von der Submission 2022 zur Submission 2024 führten zu einer Verschlechterung der THG-Bilanz um ca. 17 Mio. t CO₂-Äq (Abbildung 3), hauptsächlich aufgrund von:

- Neuaufnahme von CH₄-Emissionen aus stehenden Gewässern in die Berichterstattung (ca. 5 Mio. t CO₂-Äq)
- Wechsel zur modellgestützten Bodenkohlenstoff-Bilanzierung im Wald mithilfe des Bodenmodells YASSO-15 statt Trendfortschreibung der Daten aus der Bodenzustandserhebung (ca. 9 Mio. t CO₂-Äq).

Abbildung 3: Projektsbericht 2024: Projizierte Entwicklung der Nettobilanz des LULUCF-Sektors



Quelle: Harthan (2024). OMS = Ohne-Maßnahmen-Szenario, MMS = Mit-Maßnahmen-Szenario, MWMS = Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario. Ohne Jahreszahl PB-2024, mit Jahreszahl PB-2023. KSG = Bundes-Klimaschutzgesetz.

Es ist zu beachten, dass die im Klimaschutzgesetz verankerten Klimaschutzziele von -25 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2030, bzw. von -35 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2040 und von -40 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2045 auf älteren THG-Inventaren basieren, die die neuen methodischen Verbesserungen nicht berücksichtigen.

Die LULUCF-Modellierung im PB-2024 berücksichtigt diese methodischen Änderungen, da sie auf der Submission 2024 basiert, was zu einer systematischen Verschlechterung der THG-Bilanz in den Projektionen führt (Abbildung 3). Der Effekt verstärkt sich durch die im Bodenmodell simulierte kontinuierliche Abnahme der Kohlenstoffbindung im Waldboden (Sättigung in PB-2024), die im Kontrast zur zuvor praktizierten Fortschreibung einer konstanten Zunahme des Bodenkohlenstoffs entsprechend der Waldzustandserhebung im PB-2023 steht.

Zwischen PB-2023 und PB-2024 unterscheiden sich die Annahmen zu Maßnahmen in der Modellierung der LULUCF-Szenarien nur geringfügig. Die Unterschiede in den Ergebnissen in Abbildung 3 sind somit hauptsächlich methodisch bedingt (vgl. Harthan et al. 2024). Zudem trifft der PB-2024 sehr günstige Annahmen zur Waldentwicklung, indem er die günstigen Bedingungen der Jahre 2013-2017 und die damit einhergehende hohe Senkenleistung der lebenden Bäume für die Fortschreibung nutzt. Starke natürliche Störungen wie in den Jahren 2018 bis 2022 sind nicht berücksichtigt (vgl. Harthan et al. 2024).

Diese methodischen Aspekte sollten bei der Interpretation der Ergebnisse dieser Studie und deren Einordnung gegenüber den KSG-Zielen berücksichtigt werden.

2.2 Ökonomische Kennwerte

In dieser Studie werden als ökonomische Kennwerte Investitionskosten für die drei folgenden Maßnahmen ausgewiesen. Weitere Kosten, z.B. für den Betrieb der Stauhaltung bei Wiedervernässung oder für Opportunitätskosten werden hier nicht betrachtet.

- Wiedervernässung landwirtschaftlich genutzter Moorböden: Wichmann et al. (2022) berichten für Planungs- und Baukosten von Wiedervernässungsprojekten Investitionskosten in Höhe von 1.065 bis 17.555 €/ha. Wie die Autoren empfehlen, wird in dieser Studie als einen deutschlandweiter Schätzwert 4.000 €/ha wiedervernässter Fläche angenommen.
- Anlage von Agroforst auf landwirtschaftlichen Flächen: In Anlehnung an Böhm und Krämer (2020) werden Kosten für die Etablierung von Agroforstflächen von 3.800 €/ha angenommen.
- Waldmehrung auf landwirtschaftlichen Flächen: in Anlehnung an der historischen Förderung von Wiederaufforstung im Rahmen der GAK-Förderung⁷ werden Investitionskosten in Höhe von 10.000 €/ha angesetzt.

Um die Investitionskosten je Maßnahme in den Szenarien zu berechnen, werden diese Kostenfaktoren mit der Fläche multipliziert, auf der eine Maßnahme angewandt wird.

⁷ Im Jahr 2022 betrug der Mittelwert für die Förderung von Wiederaufforstung nach Schadereignissen im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“ (GAK) 8.359 €/ha (<https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/5000100-2022.pdf>). Siehe auch förderfähige Investitionskosten unter: <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/gak-rahmenplan-2023-2026.pdf>

Hinzu kommen Kosten für die Vergütung im Rahmen der Maßnahme Reduzierung der Laubholzentnahme im Wald:

- Maßnahme Reduzierung der Laubholzentnahme im Wald: Je Szenario und Zeitschritt kann dem nicht geernteten Laubholz ein Preis je m³ in Abhängigkeit vom CO₂-Preis zugewiesen werden (siehe Kap. 2.1.4). Die Menge an nicht geerntetem Laubholz wird mit dem CO₂-Preis multipliziert, um die nötige Vergütung zu errechnen.

2.3 Szenarien

Referenzszenario (REF)

Für das Referenzszenario wurden für den LULUCF-Sektor Maßnahmen in Anlehnung an das Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) im Projektionsbericht 2023 angenommen. In Summe sind die Maßnahmen als wenig ambitioniert zu bewerten.

Szenario Policy Mix (KS1)

Das Szenario „Policy Mix“ (KS1) geht davon aus, dass durch gezielte Förderinstrumente die im Bundes-Klimaschutzgesetz festgelegten Ziele erreicht werden: 25 Mio. t CO₂-Reduktion im Jahr 2030 und 40 Mio. t CO₂-Reduktion im Jahr 2045. Besonders hervorzuheben sind Fördermaßnahmen in folgenden Bereichen:

1. Moorböden Schutz
2. Anlage von Agroforstflächen
3. Waldmehrung
4. Stärkung der Waldsenke durch reduzierte Laubholzernte
5. Erhöhte Nutzung von Holzprodukten

Detaillierte Informationen zu diesen Maßnahmen finden sich in Tabelle 1.

Szenario Ordnungsrecht (KS4)

Das Szenario „Ordnungsrecht“ (KS4) zielt darauf ab, die gleichen Klimaschutzziele wie im KS1 zu erreichen, setzt dabei jedoch auf eine Kombination aus Fördermaßnahmen und rechtlichen Vorgaben. Dabei werden ein Teil der Maßnahmen weiterhin wie im KS1 über Förderprogramme umgesetzt (Tabelle 1). Für Maßnahmen mit hohem THG-Minderungspotenzial wird jedoch ein ambitioniertes Ordnungsrecht eingeführt. Dies betrifft insbesondere die Wiedervernässung von Moorböden, die Anlage von Agroforstflächen und die Reduktion der Laubholzernte im Wald (Tabelle 1). Durch den Fokus auf ordnungsrechtliche Maßnahmen erhalten die betroffenen Akteure keinen finanziellen Ausgleich für die Umsetzung dieser Maßnahmen.

Szenario ETS/BEHG-Preis (KS2)

Das Szenario ETS/BEHG-Preis (KS2) gliedert sich in zwei Phasen: bis zum Jahr 2030 ist es identisch mit dem Szenario KS1. Ab dem Jahr 2031 erfolgt die Einführung eines gemeinsamen CO₂-Preises für die Sektoren Landwirtschaft und LULUCF (siehe Methode in Kap. 2.1.5). Dieser Preis

wird so gewählt, dass im LULUCF-Sektor im Jahr 2045 das KSG-Ziel von -40 Mio. t CO₂-Äq. erreicht wird, und steuert die Umsetzung dreier Hauptmaßnahmen:

- a) Reduzierung der Laubholzentnahme im Wald
- b) Wiedervernässung landwirtschaftlich genutzter Moorböden
- c) Anlage von Agroforst auf landwirtschaftlichen Flächen

Die übrigen Quellgruppen werden entsprechend der Annahmen in KS1 abgebildet.

Szenario Einheitlicher THG-Preis (KS3)

Das Szenario „Einheitlicher THG-Preis“ ist wie das Szenario KS2 aufgebaut, aber mit dem Unterschied, dass für alle Sektoren im Jahr 2045 ein gemeinsamer CO₂-Preis in Höhe von 350 €/t CO₂-Äq vorgegeben wird. Dieser CO₂-Preis wirkt wie in KS2 auf die Maßnahmen Reduzierung der Laubholzentnahme im Wald, Wiedervernässung landwirtschaftlich genutzter Moorböden und Anlage von Agroforst auf landwirtschaftlichen Flächen. Dieses Szenario ist nicht an die LULUCF-Ziele im KSG gebunden, wodurch die in Kap. 2.1.5 beschriebene Iteration zwischen den Sektoren Landwirtschaft und LULUCF entfällt.

3 Ausgestaltung der Instrumente und Parametrisierung in den Szenarien

Die folgenden Tabellen beschreiben die Ausgestaltung der Instrumente in den verschiedenen Szenarien. Im Szenario Policy-Mix (KS1) wird die Umsetzung der Maßnahmen vorrangig durch Förderung erreicht (Tabelle 1). Als Ausnahmen sind die Maßnahmen Reduktion des Torfabbau und Erhalt von Dauergrünland zu nennen, die bereits heute im Ordnungsrecht adressiert sind, sowie die Reduktion des Flächenverbrauchs durch Siedlungen. Letzteres ist sinnvoller durch Ordnungsrecht als durch Förderung zu erreichen.

Im Szenario Ordnungsrecht (KS4) werden Förderungen durch ordnungsrechtliche Ansätze ersetzt (Tabelle 1). Eine Ausnahme ist die Waldmehrung, bei der aufgrund der hohen Opportunitätskosten bei der Umwandlung von Ackerland zu Wald weiter eine Förderung benötigt wird.

In den Szenarien ETS/BEHG-Preis (KS2) und Einheitlicher THG-Preis (KS3) werden – ausgehend vom KS1 – die THG-Minderungen für die drei Maßnahmen Wiedervernässung von Moorböden, Anlage von Agroforst und Reduzierung der Laubholzentnahme im Wald an einen Sektor-übergreifenden CO₂-Preis gebunden (Tabelle 2).

Tabelle 1: Übersicht der Instrumente KS1 „Policy Mix“ und KS4 „Ordnungsrecht“

Instrumente	KS1 „Policy Mix“	KS4 „Ordnungsrecht“
Moorbodenschutz 1: Wiedervernässung	Aufbauend auf der Bund-Länder-Vereinbarung zum Moorböden- und der nationalen Moorschutzstrategie wird die Wiedervernässung auf trocken genutzten landwirtschaftlichen Böden vorangetrieben. Der Schwerpunkt liegt auf Förderung von Wiedervernässungsmaßnahmen sowie die Nutzung als Paludikultur im Rahmen von Förderprogrammen im ANK. Hinzu kommen ordnungsrechtliche Maßnahmen zur Flächenmobilisierung wie Mikroflurbereinigungen und Verpflichtungen zum Flächentausch.	Wie KS1, die Förderung der Wiedervernässung (Bonus) wird aber durch ein Malus-System ersetzt. Da die trockene Nutzung der Moorböden zu hohen THG-Emissionen führt und so Umwelt- und Klimaschutzziele entgegensteht, ist dies ab der nächsten GAP-Periode nicht mehr förderfähig (Wegfall der Direktzahlung). Zur Verschärfung der Maluswirkung wird ab 2030 eine CO ₂ -Abgabe in Anlehnung an den CO ₂ -Preis im Gebäudesektor eingeführt. Eine Förderung für Wiedervernässungsmaßnahmen wird beibehalten, sie wird aber über die Zeit verringert, da durch das Malus-System Opportunitätskosten sinken.
Moorbodenschutz 2: Reduzierung Torfabbau	Es werden keine neuen Konzessionen für Torfabbau vergeben. Bestehende Konzessionen laufen bis zum Jahr 2040 aus und die Flächen werden im Zuge der Renaturierung wiedervernässt.	Wie KS1
Moorbodenschutz 3: Optimierung Feuchtgebiete	Der Wasserstand in bestehenden terrestrischen Feuchtgebieten wird aktuell unzureichend gemanaged. Durch Förderprogramme im ANK wird das Wassermanagement dieser Feuchtgebiete bis zum Jahr 2040 optimiert.	Wie in KS1, die Optimierung des Wassermanagements bestehender terrestrischer Feuchtgebiete wird über Verordnungen erreicht.
Erhalt von Grünland	Seit dem Jahr 2015 bestehende Regelungen im Rahmen der GAP, die einen Grünlanderhalt sicherstellen.	Wie in KS1
Anlage von Agroforst auf landwirtschaftlichen Flächen	Mit der Anlage von Agroforstsystemen (inkl. Kurzumtriebsplantagen) wird CO ₂ auf landwirtschaftlichen Flächen eingebunden. Die Anlage und der Erhalt von Agroforstsystemen wird über Förderprogramme im ANK erreicht.	Wie in KS1, die Anlage von Agroforstsystemen wird aber über Verpflichtungen im Rahmen der GAP umgesetzt (siehe Details im Landwirtschaftssektor).

Instrumente	KS1 „Policy Mix“	KS4 „Ordnungsrecht“
Waldmehrung auf landwirtschaftlichen Flächen	Waldmehrung umfasst die Neuanlage von Wald durch Aufforstung oder Naturverjüngung. Auf neuen Waldflächen wird CO ₂ festgelegt. Die Waldmehrung wird über Förderprogramme im ANK erreicht. Ab dem Jahr 2026 bis 2050 erfolgt jährlich eine Waldmehrung von 10.000 ha.	Wie in KS1 als Förderung.
Reduzierung der Laubholzentnahme im Wald	Als Grundannahme wird die Holzentnahme aus den Jahren 2013 bis 2017 fortgeschrieben. Im Zuge von Förderprogrammen im ANK wird die Laubholzentnahme von 21,9 Mio. m ³ im Jahr 2023 auf 18,2 Mio. m ³ im Jahr 2045 reduziert, um Senkenleistung im Wald zu erzielen.	Wie KS1, die Höhe der Holzentnahme inklusive der Reduktion im Laubholz wird nicht über Förderprogramme, sondern über ordnungsrechtliche Vorgaben umgesetzt (z.B. Hiebsätze, Einschlagstopp bei Überschreitung von deutschlandweiten Holzentnahme-Grenzen)
Reduzierung Flächenverbrauch durch Siedlungen	Durch ordnungsrechtliche Maßnahmen, flankiert durch ein Handelssystem für Flächenkontingente, wird sichergestellt, dass der Netto-Flächenverbrauch im Jahr 2030 unter 30 ha pro Tag liegt und dass im Jahr 2045 eine Netto-Null für den Flächenverbrauch erreicht wird.	Wie in KS1
Erhöhung der Nutzung von Holzprodukten	Es erfolgt ein erhöhter Zufluss an Holzprodukten mit hoher Lebensdauer in den Holzproduktspeicher, insbesondere durch Holzbauförderung und -initiativen (z.B. Abbau von Hemmnissen) auf Landes- und Bundesebene, flankiert durch die Charta 2.0 für Holz.	Wie KS1, es wird aber ein stärkerer Fokus auf ordnungsrechtliche Maßnahmen zur Steigerung der Holzbauquote gelegt (stärkerer Hemmnisabbau, Quoten für Holzeinsatz in Baumaterialien).

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Öko-Institut.

Tabelle 2: **Übersicht der Instrumente KS2 „ETS/BEHG-Preis“ und KS3 „Einheitlicher THG-Preis“**

Instrumente	KS2 „ETS/BEHG-Preis“	KS3 „Einheitlicher THG-Preis“
Moorbodenschutz 1: Wiedervernässung	Wiedervernässung über einen CO ₂ -Preis in Rückkopplung mit dem Sektor Landwirtschaft	Wiedervernässung über einen CO ₂ -Preis in Rückkopplung mit allen Sektoren
Moorbodenschutz 2: Reduzierung Torfabbau	Wie in KS1	Wie in KS1
Moorbodenschutz 3: Optimierung Feuchtgebiete	Wie in KS1	Wie in KS1

Instrumente	KS2 „ETS/BEHG-Preis“	KS3 „Einheitlicher THG-Preis“
Erhalt von Grünland	Wie in KS1	Wie in KS1
Anlage von Agroforst auf landwirtschaftlichen Flächen	Anlage von Agroforst über einen CO ₂ -Preis in Rückkopplung mit dem Sektor Landwirtschaft	Anlage von Agroforst über einen CO ₂ -Preis in Rückkopplung mit allen Sektoren
Waldmehrung auf landwirtschaftlichen Flächen	Wie in KS1	Wie in KS1
Reduzierung der Laubholzentnahme im Wald	Reduzierte Laubholzentnahme über einen CO ₂ -Preis in Rückkopplung mit dem Sektor Landwirtschaft	Reduzierte Laubholzentnahme über einen CO ₂ -Preis in Rückkopplung mit allen Sektoren
Reduzierung Flächenverbrauch durch Siedlungen	Wie in KS1	Wie in KS1
Erhöhung der Nutzung von Holzprodukten	Wie in KS1	Wie in KS1

Quelle: Eigene Zusammenstellung, Öko-Institut.

In Tabelle 3 sind die Annahmen und Einstellungen, die zur Parametrisierung der Szenarien verwendet werden, zusammengefasst.

Tabelle 3: Annahmen und Einstellungen in den Szenarien KS1 bis KS4

Instrumente	Jahr	KS1/KS4	KS2	KS3
CO₂-Preis	2045	entfällt	83,88 €/t CO ₂	350,00 €/t CO ₂
Moorbodenschutz 1: Wiedervernässung *	2030		16% AL, 43% AL	
	2045	38% AL, 75% GL	48% AL, 47% GL	80% AL, 80% GL
Moorbodenschutz 2: Reduzierung Torfabbau			Bis 2040 eingestellt	
Moorbodenschutz 3: Optimierung Feuchtgebiete			2030: 80%, 2045: 100%	
Erhalt von Grünland			historische Entwicklung fortgeschrieben	
Anlage von Agroforst auf landwirtschaftlichen Flächen *	2030	105.000 ha	105.000 ha	105.000 ha
	2045	200.000 ha	105.000 ha	834.781 ha
Waldmehrung auf landwirtschaftlichen Flächen *			2030: 50.000 ha, 2045: 250.000 ha	
Reduzierung der Laubholzentnahme im Wald	2030		2,0 Mio. m ³	
	2045	3,5 Mio. m ³ /Jahr	8,7 Mio. m ³ /Jahr	13,0 Mio. m ³ /Jahr
Reduzierung Flächenverbrauch durch Siedlungen (netto)			2030: 30 ha/Tag, 2050: 0 ha/Tag	
Erhöhung der Nutzung von Holzprodukten (Zufluss)			2030/2045: 5,5 Mio. m ³ /Jahr gegenüber historischen Werten	

Quelle: Eigene Darstellung. AL = Ackerland auf organischen Böden, GL = Grünland auf organischen Böden. * kumulative Angaben.

4 Folgenabschätzung

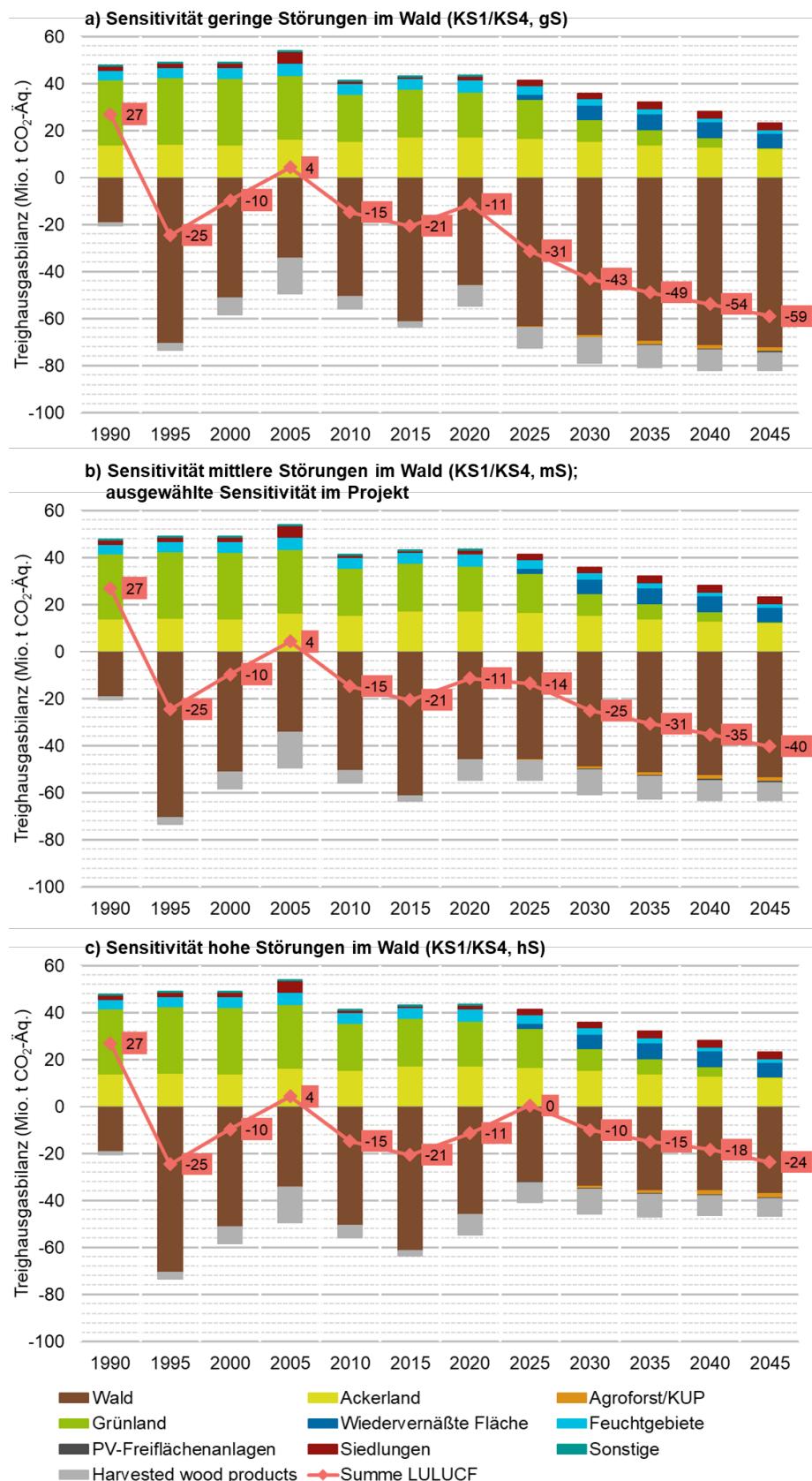
4.1 THG-Emissionen

Die Szenarien „Policy Mix“ (KS1) und „Ordnungsrecht“ (KS4) implementieren identische Maßnahmen mit unterschiedlichen Instrumenten. Folglich sind die Ergebnisse der THG-Bilanz im LULUCF-Sektor für beide Szenarien deckungsgleich und werden gemeinsam präsentiert. Differenzen zeigen sich jedoch bei den sozialen Folgewirkungen (Kap. 4.3).

Abbildung 4 veranschaulicht die zeitliche Entwicklung der THG-Bilanz im LULUCF-Sektor aufgeschlüsselt nach Quellgruppen. Bis zum Jahr 2020 basieren die Werte auf dem nationalen THG-Inventar (Submission 2022, UBA 2022), ab dem Jahr 2021 handelt es sich um Modellprojektionen. Für die Szenarien S1/S4 wurden drei Sensitivitäten für die Waldentwicklung modelliert (siehe Kap. 2.1.2): geringe Störungen (Abbildung 4c; entspricht den Annahmen im PB-2023), mittlere Störungen (Abbildung 4b) und hohe Störungen (Abbildung 4a). Die übrigen Annahmen bleiben in den in Abbildung 4 dargestellten Sensitivitäten konstant.

Die Moorbodenschutzmaßnahmen in KS1/KS4 führen zu einer Reduktion der THG-Emissionen auf Acker- und Grünlandflächen (Abbildung 4; Annahmen und Einstellungen in Tabelle 3). Der Rückgang ist im Grünland ausgeprägter, da hier ein höherer Anteil an Grünlandflächen wiedervernässt wird. In der Fortschreibung erfolgt jährlich zu kleinen Anteilen eine Umwandlung von Acker- zu Grünland auf mineralischen Böden (C-Bindung im Grünland angerechnet) und umgekehrt (C-Freisetzung im Ackerland angerechnet). Dadurch verbleiben die THG-Emissionen für Ackerland auf einem höheren Niveau als für Grünland. Wiedervernässte Moorböden emittieren weiterhin Treibhausgase, jedoch verglichen mit den vorherigen THG-Emissionen auf den Acker- und Grünlandflächen in geringerem Umfang. Die THG-Emissionen bestehender Feuchtgebiete sinken durch Wasserstandsoptimierung und Einstellen des Torfabbaus. Die Anlage von Agroforstsystmen schafft eine neue, formal dem Ackerland zurechenbare Senke im LULUCF-Sektor. Die Senkenleistung des Holzproduktspeichers wird durch einen ausreichenden Holzzufluss aufrechterhalten (Abbildung 4; Tabelle 3).

Abbildung 4: THG-Bilanz für den LULUCF-Sektor im Szenario KS1 / KS4 und Sensitivitätsanalyse für Störungen im Wald



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut (Daten in Tabelle 4 in Anhang III).

Die Senkenleistung der Waldfläche variiert stark in Abhängigkeit von den Annahmen zu natürlichen Störungen. Im Szenario KS1/KS4 mit mittleren Störungen stellt sich im Jahr 2025 eine Senkenleistung im Wald ein, die zwischen den optimalen Wuchsbedingungen von 2013-2017 und den ungünstigen von 2003-2007 liegt. Die verringerte Laubholzernte führt zudem zu einem leichten Anstieg der Senkenleistung (Abbildung 4b). Diese Sensitivität wurde für das Szenario KS1/KS2 gewählt. Unter diesen Bedingungen erreicht der LULUCF-Sektor die Klimaschutzziele des KSG mit -25 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2030 und -40 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2045.

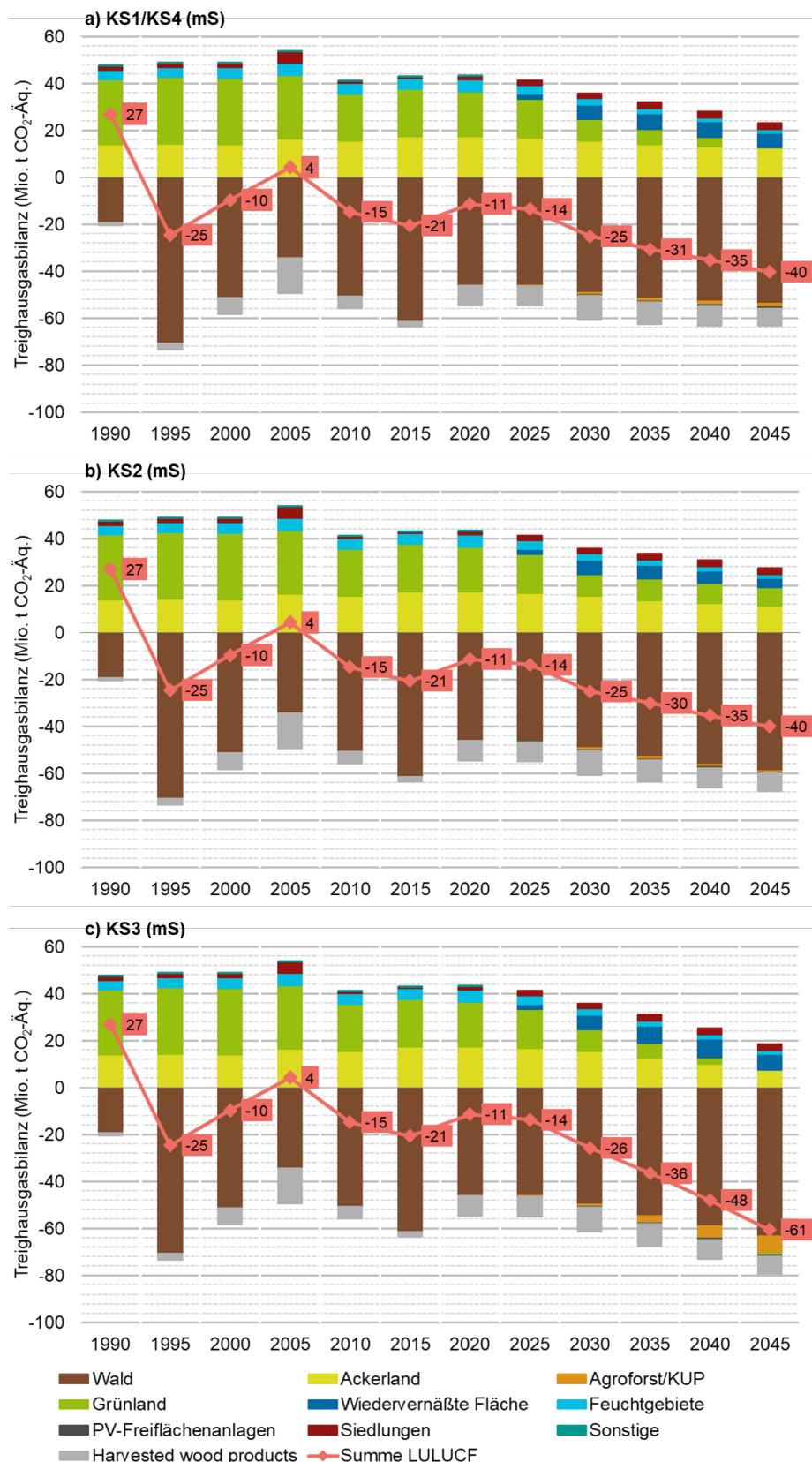
Bei Annahme geringerer natürlicher Störungen, vergleichbar mit den Annahmen im Projektionsbericht 2023 und 2024 (Harthan et al. 2023 und 2024), verbessert sich die Senkenleistung der Waldfläche deutlich und damit auch die THG-Bilanz des LULUCF-Sektors. Die THG-Bilanz des LULUCF-Sektors erreicht dann -43 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2030 und -59 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2045 (Abbildung 4a). Bei Annahme hoher natürliche Störungen im Wald sinkt die Senkenleistung der Waldfläche und die THG-Bilanz im LULUCF-Sektor erreicht nur noch -10 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2030 und -24 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2045 (Abbildung 4c).

Methodische Verbesserungen im aktuellen THG-Inventar führen zu einer systematischen Verschlechterung der THG-Bilanz im LULUCF-Sektor um ca. 17 Mio. t CO₂-Äq (vgl. Kap. 2.1.7). Dieser Aspekt wird in der szenarienübergreifenden Ergebnisbetrachtung berücksichtigt (Kap. 5).

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der Szenarien KS1/KS4, KS2 und KS3 bei Annahme von mittleren natürlichen Störungen. Eine zusammenfassende Darstellung findet sich in Abbildung 6. Im Szenario „ETS/BEHG-Preis“ (KS2) werden Maßnahmen wie Wiedervernässung von Moorböden, Anlage von Agroforst und Reduzierung der Laubholzentnahme über einen gemeinsamen CO₂-Preis in den Sektoren Landwirtschaft und LULUCF abgebildet. Ein CO₂-Preis von 83,88 €/t CO₂-Äq ermöglicht es – ausgehend vom Jahr 2031 –, das im KSG verankerten LULUCF-Sektorziels von -40 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2045 zu erreichen.

Im Vergleich zu KS1/KS4 verschiebt sich in KS2 die Nutzung der CO₂-Minderungsoptionen. Da die CO₂-Minderungskosten auf der Waldfläche am niedrigsten sind, steigt die nicht geerntete Laubholzmenge bis zum Jahr 2045 gegenüber dem Szenario KS1/KS4 von 3,5 Mio. m³/Jahr auf 8,7 Mio. m³/Jahr, was die Senkenleistung der Waldfläche erhöht (Abbildung 6, Details in Abbildung 5a und b). Gleichzeitig nimmt die wiedervernässte Moorbodenfläche ab. Zudem werden in KS2 anteilig mehr Ackerflächen wiedervernässt als in KS1/KS4. Die THG-Minderung durch Wiedervernässung sinkt daher im KS2 gegenüber dem KS1/KS4. Das Gleiche gilt für die Anlage von Agroforstflächen, deren Anlage erst ab einem CO₂-Preis von 143 €/t CO₂ wirtschaftlich ist. Daher werden im KS2 ab dem Jahr 2031 keine weiteren Agroforstflächen angelegt (Abbildung 6, Details in Abbildung 5a und b und Tabelle 3).

Abbildung 5: THG-Bilanz für den LULUCF-Sektor in den Szenarien KS1/KS4, KS2 und KS3 (Sensitivität mittlere Störungen im Wald)

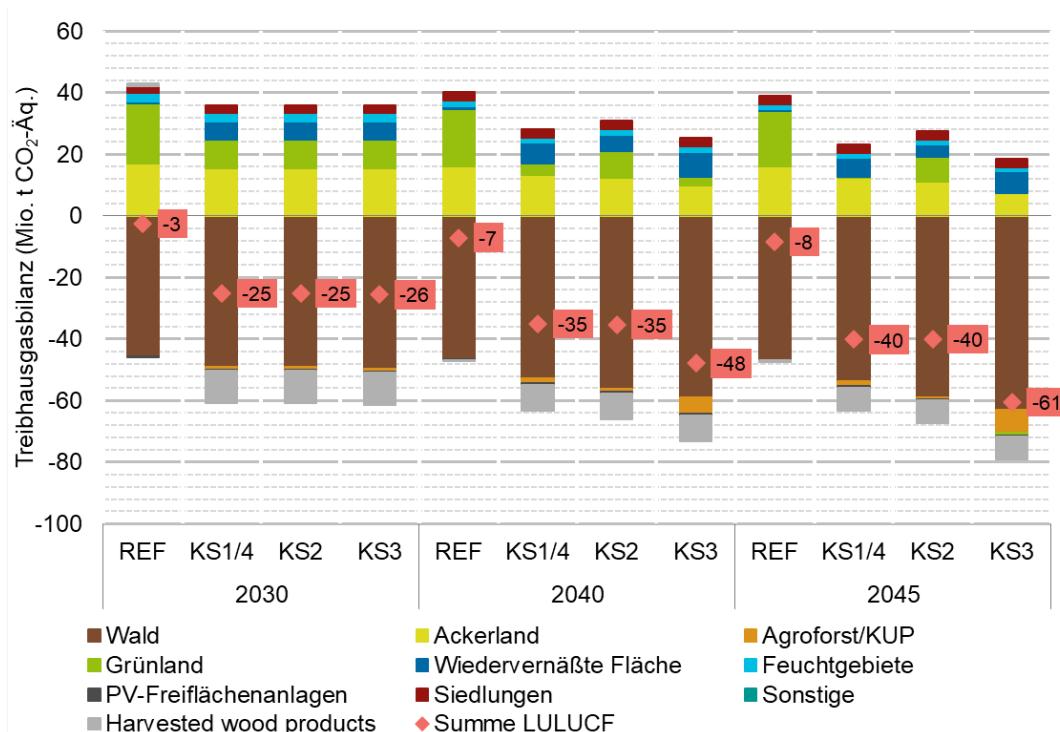


Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut. mS=mittlere natürliche Störungen im Wald (Daten in Tabelle 4 bis Tabelle 6 in Anhang III).

Im Szenario KS3 erreicht der CO₂-Preis im Jahr 2045 ein Niveau, bei dem alle an den Preis gekoppelten Maßnahmen ihr volles Minderungspotenzial ausschöpfen. Die Senkenleistung im Wald steigt deutlich an, da die jährliche Laubholzentnahme bis zum Jahr 2045 um 13,0 Mio. m³ reduziert wird. 80 % der Moorböden auf Acker- und Grünlandflächen werden wiedervernässt, während die verbleibenden trocken bewirtschafteten Moorböden weiterhin Treibhausgase emittieren.⁸ Bei Grünlandflächen gleichen sich CO₂-Einbindung durch Umwandlung von Ackerland zu Grünland und THG-Emissionen aus nicht wiedervernässt Moorböden unter Grünland weitgehend aus. Ackerflächen emittieren zusätzlich zu den verbliebenen Restemissionen aus Moorböden THG durch die Umwandlung von Grünland zu Ackerland (Abbildung 5). Bis zum Jahr 2045 werden zudem in Summe knapp 835.000 Mio. ha Agroforstflächen angelegt.⁹

Das KS3 erzielt im LULUCF-Sektor eine THG-Bilanz von -61 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2045, was die Zielvorgabe des KSG für die Senkenleistung um gut 20 Mio. t CO₂-Äq übertrifft und eine deutliche Verbesserung gegenüber KS1/KS4 darstellt.

Abbildung 6: THG-Bilanz für den LULUCF-Sektor in den Szenarien REF, KS1/S4, KS2 und KS3 für die Stützjahre 2030, 2040 und 2045 (Sensitivität mittlere Störungen im Wald)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut (Daten in Tabelle 4 bis Tabelle 6 in Anhang III).

⁸ Es wird angenommen, dass Moorvernässung auf 20 % der relevanten Flächen durch die Nähe zu z.B. Siedlungen und anderer Infrastruktur technisch nur mit sehr hohen Aufwendungen möglich ist.

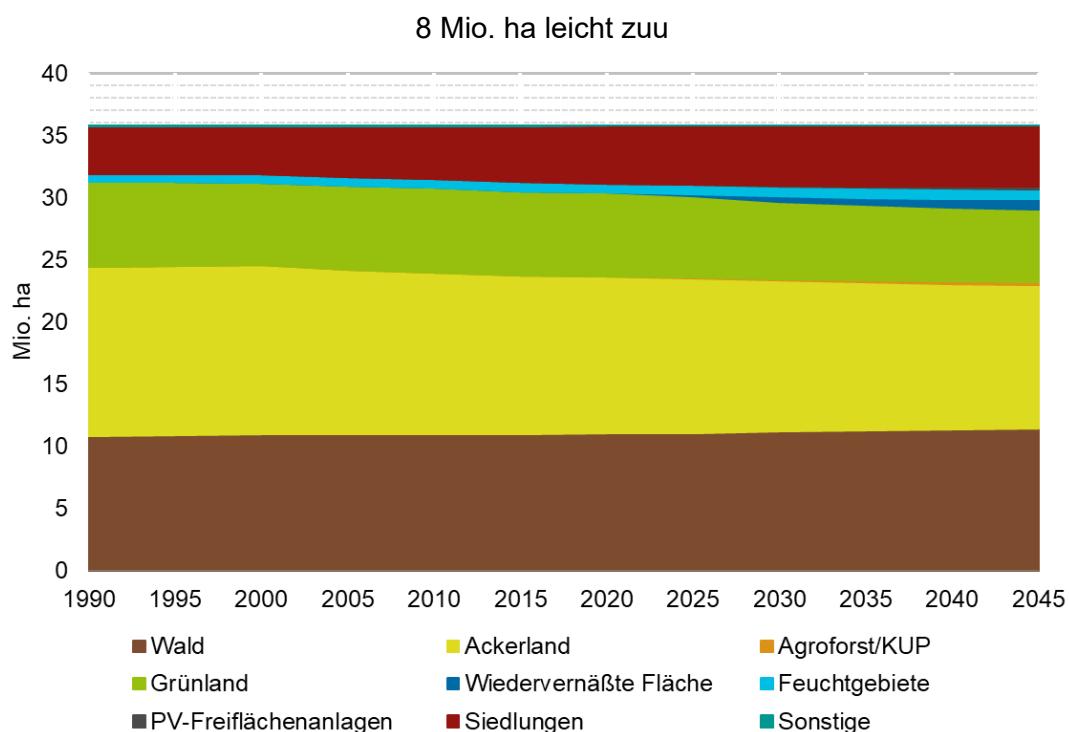
⁹ Für Agroforstflächen wurde die erlaubte Fläche auf 10 % der Ackerfläche gedeckelt, um xxx (siehe Sektorbericht Landwirtschaft).

4.2 Flächenentwicklungen

Die Flächenentwicklung ist eine zentrale Kenngröße für die Ergebnisse im LULUCF-Sektor und bildet die Grundlage für die Berechnung der Investitionskosten (Kap. 2.2). Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Flächenentwicklung von 1990 bis 2045 für das Szenario KS1. Ab dem Jahr 2025 ist ein Zuwachs an wiedervernässten Flächen und in geringerem Umfang an Agroforstflächen zu verzeichnen, während die Waldfläche leicht zunimmt. Gleichzeitig reduzieren sich Acker- und Grünlandflächen.

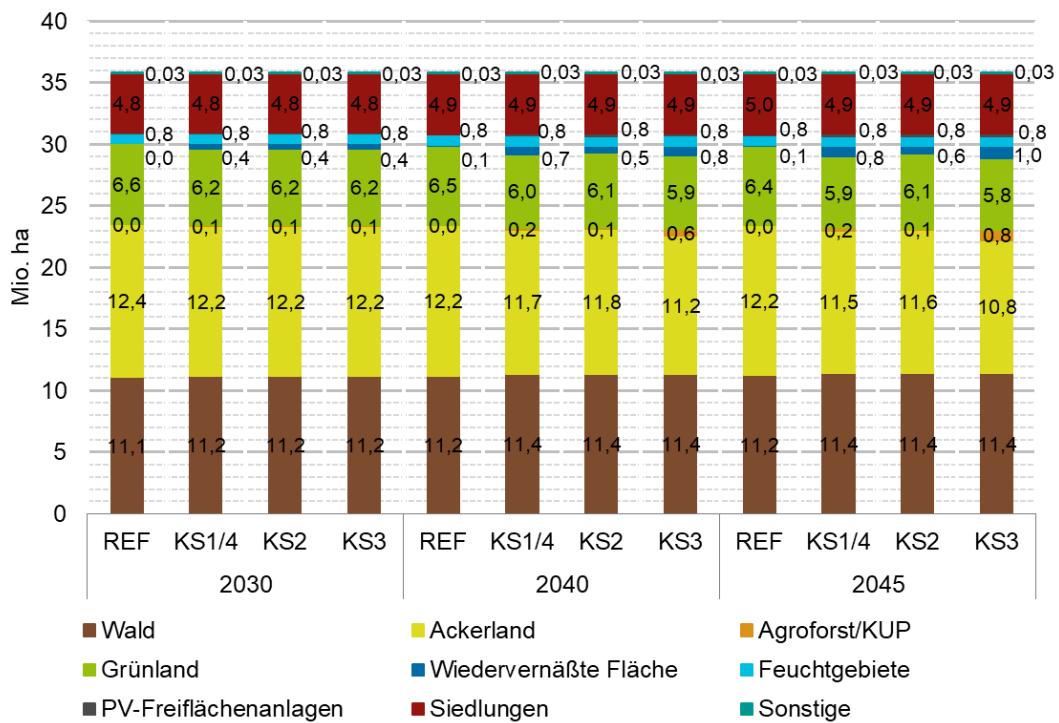
Dieser Trend spiegelt sich auch in der vergleichenden Darstellung der Szenarien KS1/KS4, KS2 und KS3 in Abbildung 8 wider. Besonders im KS3 ist ein deutlicher Anstieg der wiedervernässten Fläche und Agroforstflächen zu beobachten.

Abbildung 7: Flächenentwicklung in KS1



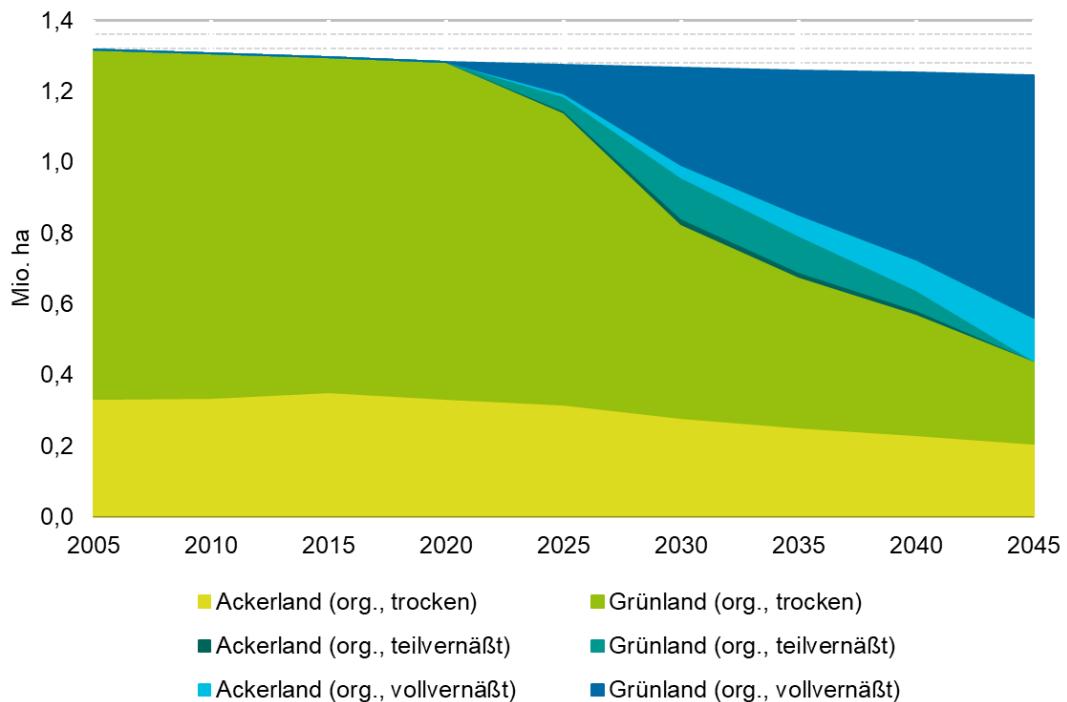
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Abbildung 8: Flächenentwicklung in REF, KS1/KS4, KS2 und KS3 für die Stützjahre 2030, 2040 und 2045



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut. KS1/4: Die Werte für diese beiden Szenarien sind identisch.

Abbildung 9: Flächenentwicklung organischer Böden in KS1

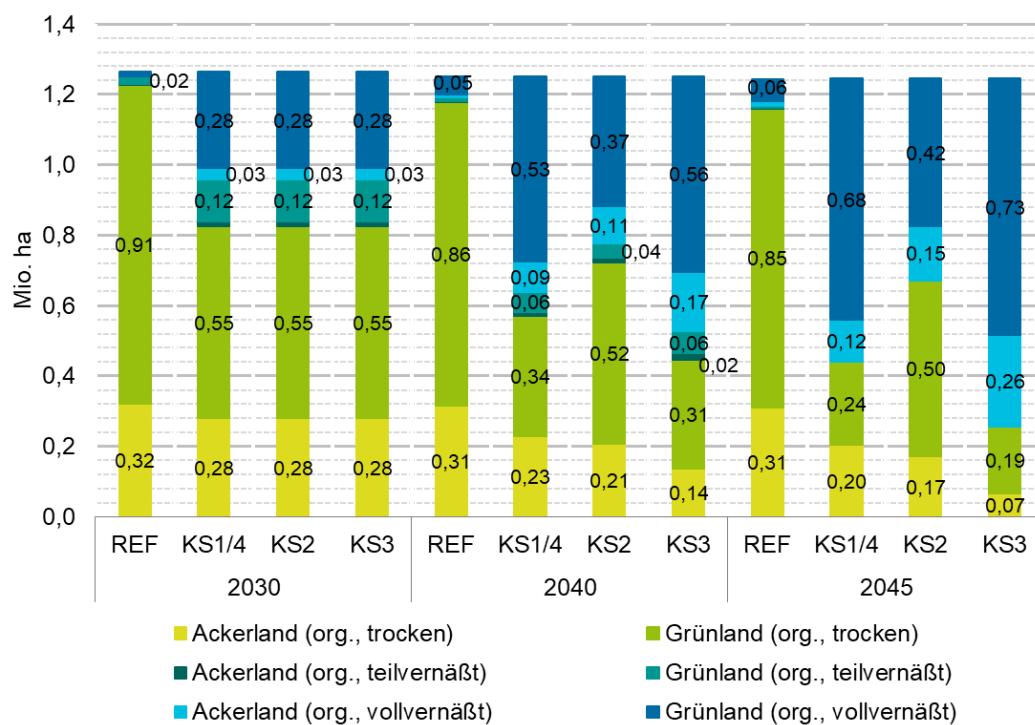


Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut. org. = organische Böden.

Die Dynamik der Wiedervernässung von Moorböden wird am Beispiel des Szenarios KS1 in Abbildung 9 detailliert dargestellt. In diesem Szenario werden vorwiegend Moorböden unter Grünland wiedervernässt, während die Wiedervernässung von Ackerland-Moorböden geringer ausfällt. Die Option einer Teilvernässung spielt bis zum Jahr 2040 eine untergeordnete Rolle.

Die zusammenfassende Darstellung zur Wiedervernässung von Moorböden in Abbildung 10 verdeutlicht die unterschiedlichen Intensitäten in den Szenarien. Im KS3 werden bis zum Jahr 2045 80 % der Moorböden unter Acker- und Grünland wiedervernässt, während im KS2 die wiedervernässte Fläche mit unter 50 % deutlich geringer ausfällt (siehe Begründung in Kap. 4.1).

Abbildung 10: Flächenentwicklung organischer Böden in KS1/KS4, KS2 und KS3 für die Stützjahre 2030, 2040 und 2045

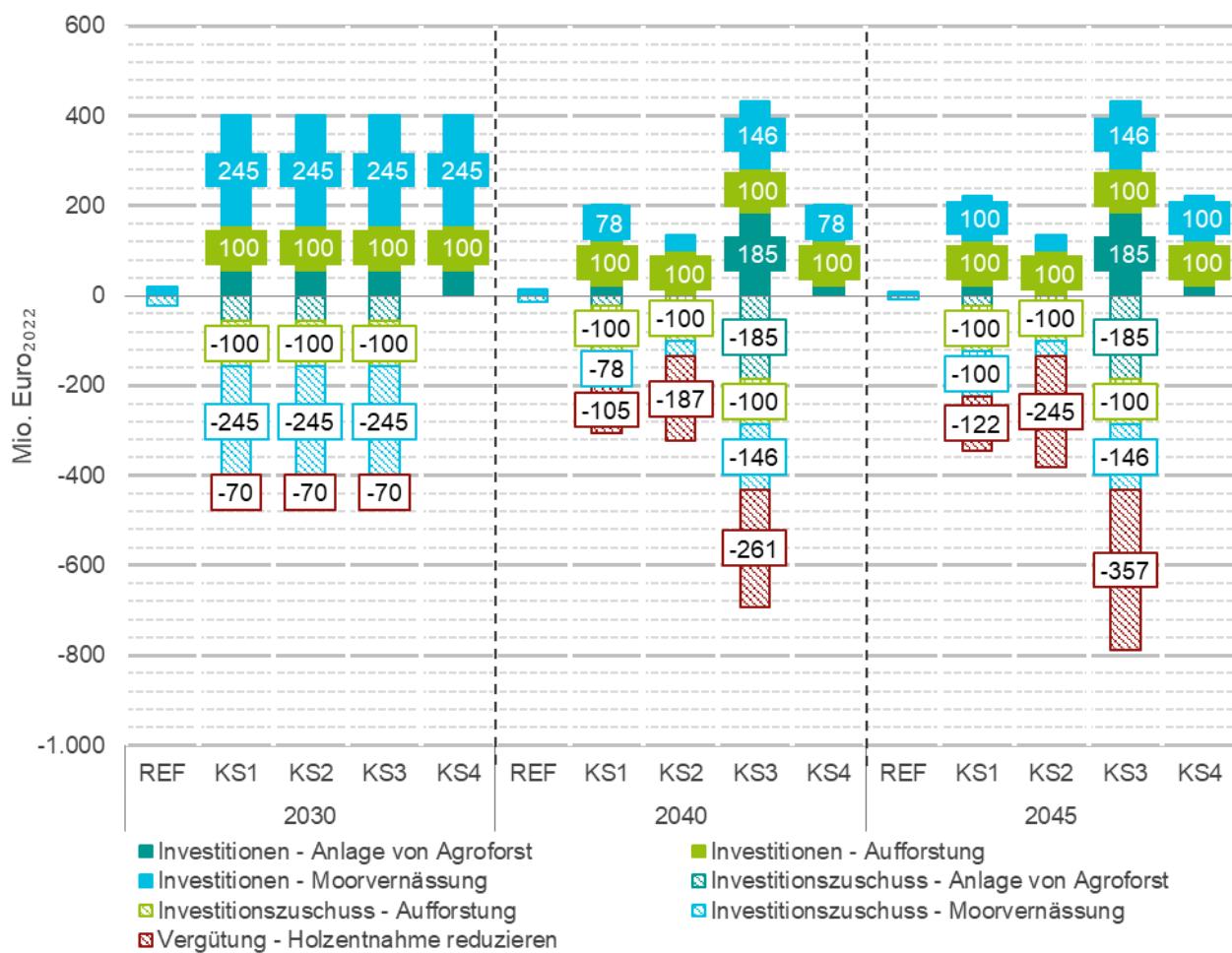


Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut. KS1/4: Die Werte für diese beiden Szenarien sind identisch. org. = organische Böden, nicht angegebene Werte liegen bei 0,01 Mio. ha oder niedriger.

4.3 Sektorale ökonomische Folgen

Zur Bewertung der ökonomischen Folgen im LULUCF-Sektor werden die Investitionskosten für Moorvernässung, Anlage von Agroforst und Aufforstung herangezogen. Weitere Kosten z.B. zum Wertverlust der Flächen werden nicht im LULUCF-Sektor, sondern im Landwirtschaftssektor betrachtet. In den Szenarien KS1 bis KS3 werden die Investitionskosten über einen Zuschuss gegenfinanziert. Hinzu kommt eine Vergütung für Holz, das im Wald belassen wird. Im Szenario KS4 entfallen Zuschüsse und Vergütung, und die erforderlichen Investitionen werden über das Ordnungsrecht angeregt (Abbildung 11).

Abbildung 11: Investitionen, Investitionszuschüsse und Vergütungen



Quelle: Eigene Darstellung; Modellrechnung Öko-Institut.

Bis zum Jahr 2030 treten für die Szenarien KS1 bis KS4 die gleichen Investitionskosten auf, da erst ab dem Jahr 2031 in den Szenarien KS2 und KS3 die Annahmen verändert werden (vgl. Kapitel 2.3). Die Investitionskosten im Jahr 2030 von in Summe 402 Mio. €/Jahr sind deutlich höher als im Referenzszenario (Abbildung 11), da nur durch eine ambitionierte Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen das Sektorziel von -25 Mio. t CO₂-Äq im Jahr 2030 erreicht werden kann. Mit 245 Mio. €/Jahr dominieren die Investitionskosten für die Moorvernässung, gefolgt von 100 Mio. €/Jahr für die Anlage von Aufforstung bzw. Waldmehrung. Die Investitionen für die Anlage von Agroforstsystmenen sind mit 57 Mio. €/Jahr am niedrigsten. Diese Investitionskosten werden in den

Szenarien KS1 bis KS3 über staatliche Förderinstrumente bei den betroffenen landwirtschaftlichen Betrieben ausgeglichen. Hinzu kommen Vergütungen an Waldbesitzende für die unterlassene Laubholzentnahme in Höhe von -70 Mio. €/Jahr. Diese Vergütung wird ebenfalls vom Staat finanziert. In den Szenarien KS1 bis KS3 ergeben sich so im Jahr 2030 Zuschüsse und Vergütungen in Höhe von 472 Mio. €/Jahr (Abbildung 11).

Im Szenario KS4 werden im Jahr 2030 die Verluste durch die unterlassene Laubholzentnahme nicht vergütet und die Investitionen auf den landwirtschaftlichen Flächen nicht gefördert, da die Maßnahmen ordnungsrechtlich umgesetzt werden (Abbildung 11). So werden die Waldbetriebe in Deutschland direkt mit 70 Mio. €/Jahr belastet. Die Belastung ist dabei für einen Forstbetrieb abhängig vom Laubholzanteil an der Betriebsfläche. Mit der Verknappung der Menge an Laubholz ist zu erwarten, dass die Laubholzpreise ansteigen, und zwar insbesondere in kostengünstigen Holzsortimenten wie dem Scheitholz, denn für den Waldbesitzenden ist es attraktiv, die Verpflichtungen einer reduzierten Holzentnahme mit weniger wertvollen Bäumen zu erfüllen. Es kann erwartet werden, dass Waldbesitzende die Kosten direkt oder indirekt über Marktpreisdynamiken an die Kunden weitergeben. Betroffen werden voraussichtlich Kunden für Energieholz, Verpackungsmaterialien und weitere Produkte, die aus weniger wertvollem Laubholz hergestellt werden.

Die Investitionskosten auf landwirtschaftlichen Flächen Höhe von 402 Mio. €/Jahr belasten im Szenario KS4 ebenfalls direkt die landwirtschaftlichen Betriebe (Abbildung 11). Maßnahmen zur Anlage von Agroforst und zur Waldmehrung werden die Betriebe deutschlandweit in einem gleichen Ausmaß betreffen, da sie nicht an eine regionale Flächenkulisse gebunden sind. Diese Kosten werden voraussichtlich zu einer flächendeckenden Erhöhung der Preise für landwirtschaftliche Produkte führen. Auch ist zu erwarten, dass die mit den Maßnahmen einhergehende Verknappung an landwirtschaftlicher Fläche zu einem Anstieg der Land- und Pachtpreise führen wird, und zwar insbesondere in Regionen mit hoher Wertschöpfung je Flächeneinheit (z.B. Tierhaltungsregionen). Die Maßnahmen zur Moorvernässung werden nur regional in Regionen mit entsprechenden Moorstandorten angewandt. So kommt es im Szenario S4 zu einer sehr regionalen Belastung einzelner landwirtschaftlicher Betriebe. Da für Betriebe in anderen Regionen diese Kosten nicht auftreten, ist es fraglich, ob es für die betroffenen Betriebe möglich sein wird, die Kosten an Kunden weiterzugeben. Vielmehr besteht das Risiko, dass Betriebe die Bewirtschaftung der Flächen auf Moorstandorten aufgrund der hohen Kosten einstellen anstatt wiederzuvernässen, oder den Betrieb als Ganzes aufzugeben.

Um im Szenario KS1 und KS4 die LULUCF-Ziele des KSG in den Jahren 2040 und 2045 zu erreichen, gehen die nötigen jährlichen Aufwendungen im Vergleich zu den Jahren bis 2030 zurück. Dies spiegelt sich in den verringerten Investitionskosten wider (Abbildung 11). Die Vergütung für reduzierte Laubholzentnahme steigt aber an, da kontinuierlich weniger Holz entnommen wird und die Preise je t CO₂ steigen (vgl. Kap. 2.1.4).

Im Szenario KS2 wirkt die Steuerung der ausgewählten Maßnahmen über einen niedrigeren gemeinsamen CO₂-Preis mit dem Landwirtschaftssektor von 83,88 €/t CO₂-Äq. So verbleibt im Szenario KS2 gegenüber dem Szenario KS1 zwar mehr Holz im Wald, aber es wird weniger Fläche wiedervernässt bzw. zu Agroforst umgewandelt. Im KS2 sind dafür im LULUCF-Sektor in Summe leicht höhere Kosten für Investitionszuschüsse und Vergütungen nötig als im KS1. Der ökonomische Vorteil liegt aber darin, dass im Landwirtschaftssektor weitere Kosteneinsparungen erfolgen, so dass in Summe über beide Sektoren KSG-Klimaschutzziele im KS2 kostengünstiger als im KS1 erreicht werden (siehe Sektorbericht Landwirtschaft). Mit dieser Kostenoptimierung geht aber einher, dass

mit der Steigerung der Waldsenke eine THG-Minderungsoption gewählt wird, die deutliche Risiken aufweist, dass festgelegtes CO₂ durch natürliche Störungen wieder freigesetzt wird. Diese Risiken sind höher einzustufen als bei der Wiedervernässung von Moorböden oder der Anlage von Agroforstsystenem.

Im KS3 wird durch die sehr hohen CO₂-Preise im Jahr 2045 alles an bereitgehaltenen THG-Minderungsoptionen im LULUCF-Sektor genutzt, so dass die Summe der Investitionszuschüsse und Vergütung der reduzierten Laubholznutzung auf knapp 800 Mio. €/Jahr ansteigen (Abbildung 11). Dieses Szenario zeigt deutlich, dass die THG-Minderungsoptionen im LULUCF-Sektor günstiger sind als in den anderen Sektoren. Dies bedeutet, dass THG-Minderungsoptionen in anderen Sektoren weniger ambitioniert umgesetzt werden müssen, um die THG-Neutralität im Jahr 2045 zu erreichen. Auch an dieser Stelle ist wieder zu betonen, dass die Minderungsoptionen im LULUCF-Sektor höhere Risiken aufweisen, insbesondere beim Vorratsaufbau im Wald (siehe Sensitivitäten in Abbildung 4), als ggf. THG-Minderungsoptionen in den anderen Sektoren.

Vor dem Hintergrund der Ergebnisse aus den Szenarien KS2 und KS3 erscheint es sinnvoll, bei einer Verwendung gemeinsamer CO₂-Preise eine Metrik zu entwickeln, mit der auch Risiken für die unterschiedlichen THG-Minderungsoptionen einbezogen werden (z.B. 100 % Anrechnung, wenn fossiler Energieträger nicht genutzt; 50 % Anrechnung, wenn Waldsenke aufgebaut). Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Ein weiterer Punkt ist, dass in den Szenarien KS2 und KS3 die Anbindung an den CO₂-Preis nur einen Teil der THG-Minderungsoptionen einbezieht und zudem Decklungen der Potenziale eingezogen sind (max. 10 % Ackerland für Wiedervernässung / Agroforst; max. 13 Mio. m³ Laubholz bleiben im Wald). Ohne eine derartige Deckelung würden bei den sehr hohen CO₂-Preisen im Szenario KS3 weitere landwirtschaftliche Flächen wiedervernässt oder zu Agroforst umgewandelt. Dies würde zu Verknappungen der Fläche und eine Konkurrenz der Klimaschutzmaßnahmen mit der Lebensmittelproduktion führen. Lebensmittelpreise würden so indirekt an den CO₂-Preis angebunden. Das gleiche gilt für Holzprodukte. Als Konsequenz würden sich deutlich höhere Verbraucherpreise im Bereich Lebensmittel und energetischer und stofflicher Biomassenutzung (z.B. Bauholz, Papier, Biogas/-methan, Kartoffelstärke in der chemischen Industrie etc.) einstellen. Diese ökonomische Rückkopplung kann im gewählten Modellverbund nicht dargestellt werden.

In allen Szenarien werden deutliche Veränderungen im LULUCF-Sektor abgebildet, die sich auf weitere ökonomische Aspekte auswirken. Die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen auf die Wertschöpfung und den Arbeitskräftebedarf werden im übergreifenden Bericht aufgegriffen (Repennig et al. 2024). Bleibt Laubholz im Wald, entfallen regionale Wertschöpfungsketten für Feuerholz. Dies ist mit einem Verlust an Arbeitsplätzen und regionaler Wertschöpfung in meist strukturschwachen Regionen verbunden. Ähnliche Effekte können auch im Sektor Landwirtschaft erwartet werden.

5 Kernbotschaften

Basierend auf den Ergebnissen der Szenarienanalyse lassen sich folgende Kernbotschaften ableiten:

- Die LULUCF-Ziele im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) sind – nach den methodischen Anpassungen im THG-Inventar 2024 gegenüber dem THG-Inventar 2022 – voraussichtlich nur erreichbar, wenn im Wald geringe natürliche Störungen auftreten. Werden für die Waldfläche Risiken für natürliche Störungen stärker berücksichtigt, ist eine Zielverfehlung wahrscheinlich.
- THG-Minderungsoptionen im LULUCF-Sektor erweisen sich als sehr kosteneffizient: Die Reduktion der Laubholzentnahme ist günstiger als Moorvernässung, welche wiederum kostengünstiger ist als die Anlage von Agroforst. Alle betrachteten LULUCF-Maßnahmen sind günstiger als 250 €/t CO₂.
- Bei einer Anbindung der Minderungsoptionen im LULUCF-Sektor an den CO₂-Preis in anderen Sektoren werden die kostengünstigen THG-Minderungsoptionen im LULUCF-Sektor vor den teureren Maßnahmen in anderen Sektoren bevorzugt genutzt. Dies führt zu einer verstärkten Wahl von THG-Minderungsoptionen im LULUCF-Sektor, die mit spezifischen Risiken verbunden sind. Beispielsweise besteht bei aufgebauten Kohlenstoffpools im Wald das Risiko eines Verlusts durch natürliche Störungen. Eine Anbindung des LULUCF-Sektors an CO₂-Preise anderer Sektoren sollte daher auch die Risiken der gewählten CO₂-Minderungsmaßnahmen berücksichtigen.
- Die Implementierung einer CO₂-basierten Steuerung von Maßnahmen im LULUCF-Sektor birgt die Herausforderung, dass Konkurrenzsituationen und daraus resultierende Preisseigerungen bei land- und forstwirtschaftlichen Produkten zu erwarten und nur schwer zu vermeiden sind.

Literaturverzeichnis

BMEL (2024): Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2023. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hg.). Bonn. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/waldzustandserhebung-2023.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zuletzt geprüft am 22.07.2024.

Böhm, M.; Krämer, C. (2020): Neue und innovative Formen der Direktvermarktung landwirtschaftlicher Produkte, Analyse und Erarbeitung von Handlungsempfehlungen. Abschlussbericht des gleichnamigen Forschungsprojekts im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft (BÖLN). Online verfügbar unter www.orgprints.org/37311/, zuletzt geprüft am 11.02.2021.

Böttcher, H.; Hennenberg, K.; Winger, C. (2018): FABio-Waldmodell, Modellbeschreibung Version 0.54 Stand Nov. 2017. Öko-Institut (Hg.). Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oeekodoc/FABio-Wald-Modellbeschreibung.pdf>, zuletzt geprüft am 04.02.2026.

Fehrenbach, H.; Bischoff, M.; Böttcher, H.; Reise, J.; Hennenberg, K. J. (2022): The missing limb: Including impacts of biomass extraction on forest carbon stocks in greenhouse gas balances of wood use. In: *Forests* 13, S. 1–14. DOI: 10.3390/f13030365.

FNR (2023): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2024. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hg.). Gülzow-Prüzen. Online verfügbar unter https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2023/Mediathek/Broschuere_Basisdaten_Bioenergie_2023_web.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

Harthan, R. O.; Förster, H.; Borkowski, K.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Emele, L.; Görz, W. K.; Hennenberg, K.; Jansen, L. L.; Jörß, W.; Kasten, P.; Loreck, C. et al. (2023): Projektionsbericht 2023 für Deutschland (2. Auflage) (Climate Change, 39/2023). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau.

Harthan, R. O.; Förster, H.; Borkowski, K.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Cook, V.; Emele, L.; Görz, W. K.; Hennenberg, K.; Jansen, L. L.; Jörß, W.; Kasten, P.; Loreck, C. et al. (2024): Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024) (Treibhausgas-Projektionen für Deutschland). Umweltbundesamt (Hg.).

Hennenberg, K.; Pfeiffer, M.; Benndorf, A.; Böttcher, H.; Reise, J.; Mantau, U.; Köppen, S.; Fehrenbach, H.; Bürck, S. (2024): Auswirkungen der energetischen Nutzung forstlicher Biomasse in Deutschland auf deutsche und internationale LULUCF-Senken (BioSINK), Abschlussbericht (Climate Change, 33/2024). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau.

Hrsg. - Wissenschaftlicher Beirat Waldpolitik beim BMEL (2021): Geplante Änderung des Klimaschutzgesetzes riskiert Reduktion der potenziellen Klimaschutzbeiträge von Wald und Holz, Stellungnahme. Unter Mitarbeit von Bauhus, J.; Dieter, M.; Farwig, N.; Hafner, A.; Krätzel, R. et al. Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hg.). Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/waldpolitik/klimaschutzgesetz.pdf?__blob=publicationFile&v=5, zuletzt geprüft am 22.07.2024.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Hg.) (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use. Online verfügbar unter <https://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>, zuletzt geprüft am 22.11.2021.

- Jochem, D.; Weimar, H.; Dieter, M. (2023): Holzeinschlag im Jahr 2022 erreicht 80,7 Mio. m³, Die energetische Verwendung von Rohholz ist annähernd konstant, während die stoffliche Nutzung etwas abnimmt. In: *Holz-Zentralblatt* 149 (40), S. 675–676. Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn067101.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.
- Luick, R.; Hennenberg, K.; Leuschner, C.; Grossmann, M.; Jedicke, E.; Schoof, N.; Waldenspuhl, T. (2021): Urwälder, Natur- und Wirtschaftswälder im Kontext von Biodiversitäts- und Klimaschutz - Teil 1: Funktionen für die biologische Vielfalt und als Kohlenstoffsenke und Speicher. In: *Naturschutz und Landschaftsplanung* 53 (12), S. 12–25. DOI: 10.1399/NuL.2021.12.01.
- Pfeiffer, M.; Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Reise, J.; Mantau, U. (2023): Referenzszenario der Holzverwendung und der Waldentwicklung im UBA-Projekt BioSINK, Öko-Institut Working Paper 4/2023. Öko-Institut (Hg.). Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Referenzszenario-BioSINK.pdf>, zuletzt geprüft am 24.11.2023.
- Reise, J.; Hennenberg, K.; Benndorf, A.; Böttcher, H. (2024): Klimaschutzmaßnahmen im LULUCF-Sektor: Potenziale und Sensitivitäten, Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (CARE) (Climate Change, 10/2024). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/10_2024_cc_lu_lucf_.pdf, zuletzt geprüft am 21.05.2024.
- Repenning, J.; Schumacher, K.; Appenfeller, D.; Kreye, K.; Emele, L.; Harthan, R. O.; Sievers, L.; Grimm, A. (2024): Klimaschutzszenarien 2050: Modellierung, Analyse und Vergleich von Zielszenarien, Übergreifender Bericht. Öko-Institut (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Klimaschutzszenarien-2050.pdf>, zuletzt geprüft am 04.02.2026.
- Tiemeyer, B.; Freibauer, A.; Borraz, E. A.; Augustin, J.; Bechtold, M.; Beetz, S.; Beyer, C.; Ebli, M.; Eickenscheidt, T.; Fiedler, S.; Förster, Christoph, Gensior, Andreas; Giebels, M.; Glatzel, S. et al. (2020): A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. In: *Ecological Indicators* 109. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838>.
- UBA - Umweltbundesamt (2022): Nationaler Inventarbericht, Detaillierte Berichtstabellen CRF 2021. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envyefchw/DEU_2022_2020_14012022_064619_started.xlsx/manage_document.
- UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2024): Nationales Inventardokument zum deutschen Treibhausgasinventar 1990-2022, Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2024 (Climate Change). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/govreg/inventory/envzfm0va/DE_NID_2024_clean_13.03.2024_de.pdf, zuletzt geprüft am 17.04.2024.
- Wichmann, S.; Nordt, A.; Schäfer, A. (2022): Lösungsansätze zum Erreichen der Klimaschutzziele und Kosten für die Umstellung auf Paludikultur, Hintergrundpapier zur Studie „Anreize für Paludikultur zur Umsetzung der Klimaschutzziele 2030 und 2050“. Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt (Hg.). Berlin. Online verfügbar unter <https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/projektmechanismen/Hintergrundpapier-loesungsansaetze-paludikultur.html?nn=8596366>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

Anhang

Anhang I. Modellbeschreibung zu FABio-Land

Am Öko-Institut liegt ein LULUCF-Modell (FABio-Land) als Excel-Anwendung vor, das bereits in zahlreichen Klimaschutzprojekten eingesetzt wurde und deutschlandweit Emissionen aus Quellen und Kohlenstofffestlegungen durch Senken im LULUCF-Sektor modelliert. In FABio-Land sind alle Landnutzungskategorien abgebildet, die in der deutschen Berichterstattung berücksichtigt sind: Wald, Ackerland, Grünland, Gehölze (Hecken etc.), terrestrische Feuchtgebiete, Gewässer, Torfabbau, Siedlung und sonstige Flächen. Die Flächen werden nach mineralischen und organischen Böden, sowie neuen Flächen (Übergangszeit 20 Jahre) und bestehenden Flächen (älter als 20 Jahre) differenziert. Als Kategorie ohne Flächenbezug werden langlebige Holzprodukte ausgewiesen. Zudem sind in FABio-Land weitere Flächenkategorien aufgenommen:

- Wiedervernässte Moorstandorte: Hier können für Acker- und Grünland auf organischen Böden und für Torfabauflächen unterschiedliche Vernässungsintensitäten eingestellt werden (Abstufung in 10cm-Schritten).
- Agroforst und Kurzumtriebsplantagen: Ackerland auf mineralischen Böden kann in diese Kategorie umgewandelt werden.
- Aufforstung: Ackerland auf mineralischen Böden wird aufgeforstet.
- PV-Freiflächenanlagen: Auf Ackerland auf mineralischen Böden können PV-Freiflächenanlagen angelegt werden. Diese Flächen werden als Siedlungsfläche gewertet.
- Agri-PV-Flächen: Mit einer geringen Besatzdichte werden in Acker- und Grünlandflächen PV-Anlagen zugebaut.
- Moor-PV: Auf wiedervernässten Moorstandorten können zusätzlich PV-Anlagen installiert werden.

Die historischen Emissionsfaktoren zu den Flächenkategorien stammen aus den aktuellen CRF-Tabellen (UBA, NIR) und Flächenänderungskoeffizienten vom Thünen-Institut.¹⁰ Für die Flächenkategorie „wiedervernässte Moorstandorte“ werden die Emissionskoeffizienten je Wasserstufe aus Tiemeyer et al. (2020) angenommen.

Als Ausgangspunkt wird die historische Entwicklung der Flächennutzung (Flächenänderungskoeffizienten) und der zugehörigen Emissionen je Flächenkategorie (Emissionsfaktoren) in Deutschland fortgeschrieben. Dabei hat sich in bisherigen Arbeiten der Mittelwert der letzten fünf Jahre als sinnvoller Kompromiss zwischen der Nutzung aktueller Daten und der Vermeidung einer hohen Variabilität erwiesen. Um die Auswirkung von Maßnahmen in Szenarien zu modellieren, können auf dieser Basis durch ein Steuerungsmodul die Flächenänderungen einzelner Flächenkategorien angesteuert werden (z.B. Umbruchverbot für Grünland, anteilige Wiedervernässung von Ackerland auf organischen Böden). Zudem besteht die Möglichkeit, Emissionsfaktoren über die Zeitachse zu verändern (z.B. Änderung der Nutzung ohne Flächenumwandlung). So werden z.B. Änderungen in der Ackerbewirtschaftung (ökologischer Landbau, Kurzumtriebsplantagen, Fruchtfolgen mit Boden-C-Mehrern) in das Modell eingebracht.

¹⁰ Nicht veröffentlichte Daten des Thünen Instituts mit einer jährlichen Auflösung. Diese Daten sind notwendig, da in den CRF-Tabellen die Flächenänderungen für neue Flächen nur als 20-jähriges Mittel ausgewiesen werden.

Eine Ausnahme stellen die Emissionen für die Waldfläche und für langlebige Produkte dar, die nicht in FABio-Land modelliert, sondern über eine Schnittstelle als Ergebnisse aus externen Modellen eingelesen werden. So werden Ergebnisse aus FABio-Forest (s.u.) in die LULUCF-Modellierung integriert, und unterschiedliche Wald-Szenarien können für die LULUCF-Szenarien ausgewählt werden.

Eine zweite Schnittstelle übergibt Daten zur Flächenentwicklung von Ackerland, Grünland, vernässten Flächen (inklusiver Nutzungsmöglichkeit) und Flächen mit PV-Anlagen an das Agrarmodell, um eine Konsistenz zwischen den beiden Teilmodellen zu gewährleisten.

Über eine dritte Schnittstelle werden Informationen aus dem Agrarmodell an FABio-Land zurückgespielt, um eine konsistente Flächenkulisse (z.B. Erhöhung der Grünlandnutzung für Rinderbeweidung im ökologischen Landbau, Anlage von Agroforst/Kurzumtriebsplantagen, für Aufforstung frei werdender Ackerflächen) zu erreichen und um Emissionsfaktoren für Ackerland an Nutzungsänderungen der Flächen (Erhöhung des Boden-C und/oder der lebenden Biomasse z.B. durch ökologischen Landbau, mehr Winterzwischenfrucht, etc.) anzupassen.

Berechnungen in FABio-Land erfolgen mit einer zeitlichen Auflösung von einem Jahr und reichen bis zum Jahr 2075.

Als wichtigste Ausgabeparameter von FABio-Land sind zu nennen:

- Flächenkulisse und Flächenänderungen (ha je Flächenkategorie)
- THG-Emissionen (Mio. t CO₂-Äq je Flächenkategorie)
- Abschätzung der Kosten für Maßnahmen zur Wiedervernässung von Mooren, Extensivierung der Waldbewirtschaftung und der Reduktion des Torfabbaus (eine Erweiterung auf andere Maßnahmen ist möglich).

Anhang II. Modellbeschreibung zu FABio-Forest

Beschreibung

Im Detail wird das Modell in Böttcher et al. (2018) und Pfeiffer et al. (2023) beschrieben. Es basiert zum Stand der vorliegenden Ergebnisse vorrangig auf Daten der zweiten und dritten Bundeswaldinventur (BWI) und beschreibt das Wachstum einzelner durch die Inventuren erfassten Bäume als distanzunabhängiges Einzelbaumwachstumsmodell. Dabei werden die Bäume mit unterschiedlichen Eigenschaften, wie Art, Alter, Durchmesser, Höhe, etc. im Modell beschrieben und mittels Wachstumsfunktionen fortgeschrieben.

Das Modell beinhaltet Module für die Beschreibung des Kohlenstoffs in Holzprodukten, in der Streu und im Boden. Als konkrete Sub-Modelle sind in FABio implementiert¹¹:

- Zuwachsmodell: Zuwachs einzelner Bäume in Abhängigkeit von Baumart, Durchmesser, Höhe, Konkurrenz und Standortbedingungen,

¹¹ Siehe Details unter www.waldvision.de und Pfeiffer et al. (2023).

- Einwuchsmodell: Einwuchs von im Bestand vorhandenen Baumarten sowie zufällig hinzukommende bzw. gezielt geförderte weitere Baumarten. Überprägung durch Durchforstung ist möglich,
- Mortalitätsmodell: Mortalität einzelner Bäume in Abhängigkeit von Baumart, Durchmesser, Alter, Konkurrenz, Standortsbedingungen und Baumartenvielfalt sowie Ergänzungen durch jährlich vorliegende Mortalitätsdaten aus der Waldzustandserhebung (WZE),
- Totholzmodell: Entwicklung des Totholzvorrats (Input durch Erntereste und natürliche Mortalität sowie Zersetzung der Bäume im Zeitverlauf),
- Boden-Kohlenstoff-Modell: Simulierung des Abbaus von Kohlenstoff in Streu und Boden über die Zeit in Abhängigkeit von Klima und Streuqualität,
- Holzprodukte-Modell: Einteilung des zu erntenden Holzes in Verwendungsklassen und Berechnung von Kohlenstoffvorräten in Holzprodukten,
- Holznachfrage-Modell: Die Holzentnahme in FABio-Forest wird durch die Nachfrage nach Stamm- und Industrieholz für Nadel- und Laubbäume im Rahmen der Waldbewirtschaftungsregeln gesteuert. Eine nicht erfüllbare Nachfrage wird als Lücke ausgewiesen.

Mit Hilfe dieser Teilmodelle lassen sich die meisten relevanten Waldbau- und Waldbewirtschaftungsmaßnahmen mit Klimaschutzwirkung darstellen und quantifizieren. Dazu zählen insbesondere:

- Änderung der Holznachfrage
- Änderung der Durchforstungsintensität (Baumdurchmesser, Eingriffsstärke)
- Änderung in der Intensität der Zielstärkennutzung (Zieldurchmesser, Eingriffsstärke),
- Änderung der Extraktionsrate (Verbleib von Holz und Ernteresten im Wald),
- Änderung der Holzverwendung (energetische versus stoffliche Nutzung),
- Änderung der Baumart/Baumartenanteile

Als Indikatoren bzw. AusgabevARIABLEN werden in FABio momentan berechnet:

- Zuwachs der Bestände und Entwicklung des Holzvorrats
- CO₂-Speicherleistung: lebende Biomasse, Bodenkohlenstoff, Totholz und Holzprodukte. Die verwendeten Berechnungsmethoden genügen den IPCC-Anforderungen im LULUCF-Sektor.
- Bestandsstruktur (z.B. Höhenverteilung und Altersstruktur), Baumarten- und Durchmesserverteilung
- Totholzvorrat nach Artengruppen
- Holzentnahme nach Baumarten und Sortimenten (Holzprodukte)

Als zentrales Ergebnis aus FABio-Forest ist insbesondere die Berechnung der CO₂-Speicherleistung zu nennen, die in flächenbezogene Emissionsfaktoren umgerechnet wird, welche an das LULUCF-Modell FABio-Land übergeben werden.

Datengrundlage

Als zentrale Datengrundlage für die Beschreibung des Waldzustands, der Initialisierung und der Parametrisierung des Modells dient die Datenbank der Bundeswaldinventur (BWI) des Thünen-Instituts, die die Ergebnisse der Auswertung der BWI-2 (2002) und BWI-3 (2012) zusammenstellt (BWI-Ergebnisdatenbank unter: <https://bwi.info/>). Die dritte Bundeswaldinventur stellt nach der zweiten Bundeswaldinventur die erste flächendeckende Erhebungswiederholung in Deutschland dar, die Aussagen über eine zeitliche Entwicklung des Waldes ermöglicht.

Das Inventurverfahren der Bundeswaldinventur basiert auf Stichproben in einem Basisnetz von 4km mal 4km Kantenlänge. In einigen Regionen wurde dieses Netz noch einmal auf 2,83km mal 2,83km, bzw. auf 2km mal 2km verdichtet. An jedem Knotenpunkt des Netzes (Trakt) wird ein Quadrat von 150m mal 150m gezogen. Die vier entstehenden Traktecken bilden die Aufnahmepunkte für die Inventur (sofern sie sich im Wald befinden). Insgesamt umfasst der BWI-Datensatz auf diese Weise mehr als 47.000 Traktecken auf denen Bäume stehen.

An den vier Traktecken eines jeden Netzknotens werden Baumerkmale wie Baumart, Brusthöhendurchmesser, Baumhöhe und Anzahl der Bäume über 7 cm Durchmesser durch eine Winkelzählprobe erfasst. Zudem werden umfangreiche Daten zu z.B. Totholz (Totholztypen, Zersetzungsgrad, Durchmesserklassen), Habitaten (besonders geschützte Biotope) und Bäumen mit ökologisch bedeutsamen Strukturen (Biotopbäume wie Höhlenbäume) sowie Schutzgebieten und Nutzungseinschränkungen erfasst. Außerdem werden Merkmale wie Eigentumsart, Bundesland oder bestehende Nutzungseinschränkungen erhoben.

Zur Kalibrierung der Zuwächse im Zeitraum 2013-2017 werden Ergebnisse der Treibhausgasinventur aus dem Jahr 2017, Daten zur Holzentnahme aus der Einschlagsrückrechnung (ESRR, Thünen-Institut) und Daten zur Mortalität aus der Waldzustandserhebung (WZE, Thünen-Institut) herangezogen.

Aktuell werden bei einer Modellierung auf nationaler Ebene in einem Standardlauf 36.692 Traktecken verwendet. Je nach Fragestellung kann der in das Modell eingespeiste Datensatz angepasst werden. Der Stichprobenumfang der Bundeswaldinventur ist repräsentativ für den gesamten deutschen Wald und die meisten Länder. Ist die betrachtete Region allerdings zu klein oder die Fragestellung zu detailliert, dann leidet die Repräsentativität der Stichprobe, so dass Aussagen für kleinräumige Fragestellungen nicht zuverlässig getroffen werden können.

Optionen der Modelleinstellung

Im Modell werden die folgenden Modellparameter bzw. Unterscheidungsmerkmale für Managementoptionen dargestellt:

- Bundesländer: stellen nicht per se ein Unterscheidungsmerkmal für Waldbauoptionen dar, werden aber bereits bei der Datenausgabe vom Modell unterschieden, sind also bereits implementiert.
- Eigentumsarten: Es werden Privatwald (ohne Unterscheidung von klein oder groß wie in der BWI) und Staatswald (beinhaltet Körperschaftswald, Landeswald und Bundeswald) unterschieden.

- Baumarten: Es werden insgesamt 24 Baumartengruppen modelliert, deren Ergebnisse in der nachgeschalteten Auswertung standardmäßig zu 9 Hauptartengruppen zusammengefasst werden (Eiche, Buche, andere Laubbäume hoher Lebensdauer, andere Laubbäume niedriger Lebensdauer, Fichte, Tanne, Douglasie, Kiefer, Lärche)
- Bestandstypen: zusätzlich zu den neun Baumartengruppen werden drei Bestandstypen unterschieden (Reinbestand, Mischung mit Dominanz von Laubbäumen, Mischung mit Nadelbäumen)
- Behandlungstypen (Waldbauphasen): Der Behandlungstyp unterscheidet Bestände in verschiedenen Entwicklungsphasen. Die Waldbauphasen werden mittels des Mediandurchmessers eines Bestands unterschieden und den jeweiligen Bestandstypen zugewiesen. Unterschieden werden:
 - Jungbestandspflege
 - Durchforstung
 - Vorratspflege
 - Nutzung

Anhang III. Daten zu THG-Emissionen im LULUCF-Sektor

Tabelle 4: THG-Bilanz für den LULUCF-Sektor im Szenario KS1 / KS4 und Sensitivitätsanalyse für Störungen im Wald

Mio. t CO ₂ -Äq	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	
Sensitivitäten im Wald													
Wald (geringe Störungen, KS1/KS4)									-63,6	-67,1	-69,8	-71,5	-72,5
Wald (mittlere Störungen, KS1/KS4)	-19,3	-70,7	-51,2	-34,4	-50,7	-61,4	-45,9	-46,1	-49,1	-51,6	-52,9	-53,8	
Wald (hohe Störungen, KS1/KS4)									-32,1	-34,1	-35,9	-36	-37,2
Übrige Quellgruppen													
Ackerland	14,1	14,3	14,0	16,3	15,6	17,4	17,3	16,6	15,5	13,9	13,1	12,3	
Agroforst/ KUP	-	-	-	-	-	-	-	-0,3	-1,0	-1,3	-1,6	-1,6	
Grünland	27,4	28,2	28,2	27,0	19,7	20,1	19,2	16,9	9,1	6,3	3,7	0,5	
Wiedervernässt Fläche	-	-	-	-	-	-	-	2,0	6,1	6,9	6,8	6,0	
Feuchtgebiete	4,1	4,3	4,5	5,4	4,9	4,9	5,3	3,9	2,8	2,2	1,7	1,5	
PV-Freiflächenanlagen	-	-	-	-	-	-	-	-0,1	-0,2	-0,3	-0,5	-0,4	
Siedlungen	1,8	1,9	1,9	4,8	0,7	0,6	1,3	1,9	2,3	2,7	2,8	2,8	
Sonstige	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-	-	-	-	
Harvested wood products	-1,3	-2,7	-7,2	-15,0	-5,1	-2,2	-8,7	-8,4	-10,6	-9,4	-8,4	-7,5	
Summe LULUCF (geringe Störungen im Wald, KS1/KS4)									-31,1	-43,1	-48,8	-53,9	-58,9
Summe LULUCF (mittlere Störungen im Wald, KS1/KS4)	26,9	-24,6	-9,7	4,2	-14,8	-20,5	-11,4	-13,6	-25,1	-30,5	-35,2	-40,2	
Summe LULUCF (hohe Störungen im Wald, KS1/KS4)									0,4	-10	-14,8	-18,3	-23,6

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut. Siehe Abbildung 4 und Abbildung 5a.

Tabelle 5: THG-Bilanz für den LULUCF-Sektor im Szenario KS2

Mio. t CO ₂ -Äq	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Wald (mittlere Störungen)	-19,3	-70,7	-51,2	-34,4	-50,7	-61,4	-45,9	-46,1	-49,2	-52,9	-56,2	-58,9
Ackerland	14,1	14,3	14,0	16,3	15,6	17,4	17,3	16,6	15,5	13,6	12,4	11,1
Agroforst/ KUP	-	-	-	-	-	-	-	-0,3	-1,0	-1,0	-1,0	-0,7
Grünland	27,4	28,2	28,2	27,0	19,7	20,1	19,2	16,9	9,1	9,4	8,7	8,1
Wiedervernässt Fläche	-	-	-	-	-	-	-	2,0	6,1	5,8	5,3	4,0
Feuchtgebiete	4,1	4,3	4,5	5,4	4,9	4,9	5,3	3,9	2,8	2,2	1,7	1,5
PV-Freiflächenanlagen	-	-	-	-	-	-	-	-0,1	-0,2	-0,3	-0,5	-0,5
Siedlungen	1,8	1,9	1,9	4,8	0,7	0,6	1,3	1,9	2,3	2,7	2,8	2,8
Sonstige	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-	-	-	-
Harvested wood products	-1,3	-2,7	-7,2	-15,0	-5,1	-2,2	-8,7	-8,4	-10,6	-9,4	-8,4	-7,5
Summe LULUCF (mittlere Störungen im Wald, KS2)	26,9	-24,6	-9,7	4,2	-14,8	-20,5	-11,4	-13,6	-25,2	-29,9	-35,2	-40,1

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut. Siehe Abbildung 5b.

Tabelle 6: THG-Bilanz für den LULUCF-Sektor im Szenario KS3

Mio. t CO ₂ -Äq	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Wald (mittlere Störungen)	-19,3	-70,7	-51,2	-34,4	-50,7	-61,4	-45,9	-46,1	-49,7	-54,6	-58,9	-63,1
Ackerland	14,1	14,3	14,0	16,3	15,6	17,4	17,3	16,6	15,5	12,4	9,9	7,4
Agroforst/ KUP	-	-	-	-	-	-	-	-0,3	-1,0	-3,2	-5,4	-7,3
Grünland	27,4	28,2	28,2	27,0	19,7	20,1	19,2	16,9	9,1	6,4	2,8	-0,8
Wiedervernässt Fläche	-	-	-	-	-	-	-	2,0	6,1	7,4	8,1	6,9
Feuchtgebiete	4,1	4,3	4,5	5,4	4,9	4,9	5,3	3,9	2,8	2,2	1,7	1,5
PV-Freiflächenanlagen	-	-	-	-	-	-	-	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,4
Siedlungen	1,8	1,9	1,9	4,8	0,7	0,6	1,3	1,9	2,3	2,7	2,8	2,8
Sonstige	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-	-	-	-
Harvested wood products	-1,3	-2,7	-7,2	-15,0	-5,1	-2,2	-8,7	-8,4	-10,6	-9,4	-8,4	-7,5
Summe LULUCF (mittlere Störungen im Wald, KS3)	26,9	-24,6	-9,7	4,2	-14,8	-20,5	-11,4	-13,6	-25,7	-36,4	-47,8	-60,5

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut. Siehe Abbildung 5c.