

CLIMATE CHANGE

10/2024

Abschlussbericht

Klimaschutzmaßnahmen im LULUCF-Sektor: Potenziale und Sensitivitäten

**Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt Transformation
zu einem vollständig treibhausgasneutralen
Deutschland (CARE)**

von:

Judith Reise, Dr. Klaus Hennenberg, Anke Benndorf,
Dr. Hannes Böttcher
Öko-Institut, Berlin

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 10/2024

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3720 41 506 0
FB001325

Abschlussbericht

Klimaschutzmaßnahmen im LULUCF-Sektor: Potenziale und Sensitivitäten

Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt Transformation
zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland
(CARE)

von
Judith Reise, Dr. Klaus Hennenberg, Anke Benndorf,
Dr. Hannes Böttcher
Öko-Institut, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e.V.
Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg

Abschlussdatum:

November 2023

Redaktion:

Fachgebiet V 1.2 Strategien und Szenarien zu Klimaschutz und Energie
Judith Voß-Stemping

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Februar 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Klimaschutzmaßnahmen im LULUCF-Sektor: Potenziale und Sensitivitäten

Um das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 gemäß des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG) in Deutschland erreichen zu können, müssen anthropogen verursachte Emissionen drastisch reduziert werden. Nicht zu vermeidende Emissionen, z.B. aus der Landwirtschaft, müssen folglich durch natürliche Kohlenstoffsinken aufgenommen werden. Hierzu beauftragte das Umweltbundesamt das Vorhaben „Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland“, kurz „CARE“¹. Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse zu einem Arbeitspaket abschließend zusammen. Konkret bietet er einen Überblick zu den möglichen Beiträgen der natürlichen Kohlenstoffsinken in Deutschland, um die Klimaschutzziele bis 2045 zu erreichen. Es werden die notwendigen Maßnahmen und entsprechenden Wirkungszeiträume wichtiger Senken- und Emissionsminderungspotenziale dargestellt. Außerdem werden die Sensitivitäten dieser Potenziale aufgezeigt, wenn z.B. zukünftig mit vermehrten Störungen, wie Dürreperioden zu rechnen ist.

Maßnahmen, die im Einklang mit natürlichem Klimaschutz stehen, haben Synergien mit dem Erhalt und Schutz von Biodiversität und Ökosystemleistungen. Sie tragen zur Anpassung der Landnutzung an den Klimawandel bei, indem sie Wasserrückhalt, Kühlung in der Landschaft und die Bodenfruchtbarkeit verbessern.

Die Extensivierung der Waldbewirtschaftung zugunsten von höheren Laubholzvorräten ist eine wesentliche Maßnahme, um CO₂ aus der Atmosphäre in der Biomasse der Bäume zu binden. Gleichzeitig müssen Holzprodukte langfristig genutzt werden, um den darin enthaltenen Kohlenstoff zu speichern. Die Wiedervernässung von landwirtschaftlich genutzten organischen Böden, ist die effektivste Maßnahme, um Emissionen aus der Landnutzung zu reduzieren. Weitere wichtige Maßnahmen des natürlichen Klimaschutzes sind die Erhöhung des Bodenkohlenstoffs durch die Etablierung von Agroforstsystemen, der Anbau von Zwischenfrüchten und mehrjährigen Kulturen wie Klee gras. Die Pflanzung von weiteren Stadtbäumen ist ebenfalls eine Möglichkeit für zusätzliche CO₂-Bindung im Siedlungsbereich.

Abstract: Climate protection measures in the LULUCF sector: potentials and sensitivities

To achieve the goal of greenhouse gas neutrality by 2045, as outlined in Germany's Federal Climate Protection Act (KSG), anthropogenic emissions must be drastically reduced. Unavoidable emissions, such as those from agriculture, should be offset by natural carbon sinks. In this context, the German Environment Agency commissioned the project "Transformation to a completely greenhouse gas neutral Germany", or "CARE" for short. This report summarizes the results of one working package. Specifically, it provides an overview of the potential contributions of natural carbon sinks in Germany to meet climate protection targets by 2045. It presents the necessary measures and corresponding timeframes for significant sink and emission reduction potentials. It also highlights the sensitivity of these potentials to increased disturbances, such as future droughts. Measures that align with natural climate protection have synergies with the protection of biodiversity and ecosystem services. They help to adapt land use to climate change by improving water retention, landscape cooling and soil fertility.

Extensification of forest management in favour of higher deciduous tree stocks is a key measure to sequester CO₂ from the atmosphere in tree biomass. At the same time, wood products must be used over the long term to store the carbon they contain. Re-wetting agricultural organic soils is the most effective measure to reduce emissions from land use. Other important natural climate change mitigation measures include increasing soil carbon by establishing agroforestry systems, planting cover crops, and growing perennial crops such as clover grass. The planting of additional urban trees is also a means of additional CO₂ sequestration in urban areas.

¹ Climate protection.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis.....	8
Abkürzungsverzeichnis.....	9
Zusammenfassung.....	10
Summary.....	14
1 Einleitung.....	18
2 Potenziale natürlicher Kohlenstoffsinken in Deutschland.....	20
2.1 Senkenleistung der Wälder in Abhängigkeit von der Waldbewirtschaftung und auf Aufforstungsflächen.....	20
2.2 Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten.....	30
2.3 Erhalt und mögliche Erhöhung des Kohlenstoffspeichers in organischen Böden (Ackerland, Grünland, Wald).....	32
2.4 Erhalt von Grünland und die Ausweitung der Grünlandfläche auf mineralischem Boden...	38
2.5 Erhalt und Erhöhung des Bodenkohlenstoffvorrats im mineralischen Ackerboden.....	43
2.6 Kohlenstoffspeicherung in Bäumen in Siedlungsflächen.....	46
3 Sensitivitätsanalyse natürlicher Kohlenstoffsinken.....	49
3.1 Wald.....	49
3.2 Holzprodukte.....	52
3.3 Wiedervernässung organischer Böden.....	55
3.4 Kohlenstoffspeicherung auf Ackerflächen.....	57
4 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen.....	60
5 Quellenverzeichnis.....	64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Entwicklung des Holzeinschlags inklusive Anteile an Schadh Holz in Millionen m ³ von 1990 bis 2021 (Trockenheit als Schadensursache wird erst seit 2020 erfasst)22
Abbildung 2:	Entwicklung der Waldsenke und des Holzproduktspeichers in Millionen t CO ₂ äq von 1990 bis 202022
Abbildung 3:	Treibhausgasbilanz der lebenden Biomasse in Abhängigkeit vom Holzeinschlag inklusive des Anteils für den Zeitraum von 1990 bis 202024
Abbildung 4:	Senkenleistung der lebenden Biomasse für das in FABio-Forest nachgestellte Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) sowie Varianten mit mehr und weniger Laubholzentnahme26
Abbildung 5:	CO ₂ -Speichersaldo über die Zeit.....27
Abbildung 6:	Anteil der organischen Böden in den Landkreisen.....33
Abbildung 7:	Treibhausgasbilanz von organischen Böden in Abhängigkeit vom mittleren jährlichen Wasserstand34
Abbildung 8:	Standarddeckungsbeitrag für Grünland und Weiden (Mittelwert 2016/17-2020/21) für Bundesländer mit hohen Anteilen an organischen Böden.....37
Abbildung 9:	Entwicklung der Dauergrünlandfläche in Deutschland (1991 bis 2022).....39
Abbildung 10:	Entwicklung der Grünlandfläche41
Abbildung 11:	CO ₂ -Einbindung in Stadtbäumen.....47
Abbildung 12:	Sensitivitäten zu lebenden Bäumen der Waldfläche51
Abbildung 13:	Entwicklung des Holzproduktspeichers durch zusätzlich angenommenen Zufluss (kumulativ) für die Sensitivität einer 50%-igen Steigerung.....54
Abbildung 14:	Sensitivitäten zum Holzproduktspeicher als Differenz zum Szenario mit einem konstanten Zufluss an Holzprodukten (0% Steigerung)55
Abbildung 15:	Anteil wiedervernässter organischer Böden auf landwirtschaftlichen Flächen bis zum Jahr 2050.....56
Abbildung 16:	Sensitivitäten zur Wiedervernässung landwirtschaftlich genutzter organischer Böden als Differenz zum Szenario mit optimalem Vernässungsregime (100% -5 cm).....57
Abbildung 17:	Sensitivitäten zur Anlage von Agroforstsystemen58
Abbildung 18:	Abschätzung der spezifische Treibhausgasminderung und erwartbare Geschwindigkeit der Umsetzung.....62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Szenarien zu Minderungspotenzialen für die Extensivierung und Wiedervernässung von organischen Böden über einen Zeitraum von 20 Jahren.....	35
Tabelle 2:	Planungs- und Baukosten von Wiedervernässungsprojekten..	36
Tabelle 3:	THG-Emissionen bei der Umwandlung von Grünland auf mineralischen Böden zu anderen Flächentypen und von anderen Flächentypen zu Grünland in Deutschland im Jahr 2020.....	39
Tabelle 4:	Beispiel der CO ₂ -Einbindung und Kosten eines Stadtbaums....	48
Tabelle 5:	Parametrisierung der Sensitivitäten geringe, mittlere und starke Störung	50
Tabelle 6:	Mittlerer Zufluss an Holzprodukten in den Holzproduktspeicher	53
Tabelle 7:	Zusätzliche angenommener Zufluss an Holzprodukten in den Holzproduktspeicher (kumulativ) für die Sensitivität einer 50%-igen Steigerung.....	53
Tabelle 8:	Anteil an ökologischem Landbau auf Ackerflächen	59

Abkürzungsverzeichnis

ANK	Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BWI	Bundeswaldinventur
EC	European Commission (Europäische Kommission)
EU	Europäische Union
GAK	Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
LULUCF	Land Use, Land Use Change and Forestry (Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft)
MMS	Mit-Maßnahmen-Szenario
THG	Treibhausgase
UBA	Umweltbundesamt
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change (Rahmenkonvention der Vereinten Nationen über Klimaänderungen)
WBAE	Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat für Globale Umweltveränderungen
WEHAM	Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung

Zusammenfassung

Um das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 aus dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) zu erreichen, müssen anthropogen verursachte Emissionen gesenkt werden. Jedoch lassen sich auch in Zukunft nicht alle Emissionen, z.B. aus der Landwirtschaft, vermeiden. Mit Hilfe von natürlichen Kohlenstoffsenken, wie Wälder oder Grünland können Netto-Null-Emissionen erreicht werden. Daher müssen diese im großen Umfang vor Degradierung geschützt, wiederhergestellt und wo möglich erweitert werden. Natürliche Kohlenstoffsenken speichern den über die Photosynthese gebundenen atmosphärischen Kohlenstoff in sogenannten Pools. Diese umfassen die lebende und tote Biomasse, die Streu und den organischen und mineralischen Boden. Sie sind dynamisch und können weiter anwachsen. Dagegen können reine Kohlenstoffspeicher, wie Holzprodukte, kein weiteres CO₂ aus der Atmosphäre mehr aufnehmen.

Nach den Regeln des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) werden alle Emissionen und Kohlenstoffeinbindungen aus den Pools in Wäldern, Acker- und Grünland, Feucht- und Siedlungsgebieten, sowie die Änderung der Landnutzung im LULUCF-Sektor (Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft) erfasst. Laut KSG soll der LULUCF-Sektor bis 2030 eine Netto-Kohlenstoffsenke von mindestens -25 Mio. t CO₂äq, bis 2040 von mindestens -35 Mio. t CO₂äq und im Jahr 2045 von mindestens -40 Mio. t CO₂äq erreichen. Bisher liegt der LULUCF-Sektor noch deutlich unter diesen Zielen. Im Jahr 2021 war der LULUCF-Sektor eine Netto-Emissions-Quelle von rund 4 Mio. t CO₂äq, während der Sektor im Jahr 2019 noch eine Netto-Kohlenstoffsenke von -6,8 Mio. t CO₂äq war (UBA 2023b)². Der starke Rückgang der Senkenleistung unterstreicht die Notwendigkeit, die Potenziale der natürlichen Senken durch Maßnahmen der nachhaltigen Nutzung und des Schutzes zu stärken.

Maßnahmen, die im Einklang mit dem natürlichen Klimaschutz stehen, tragen nicht nur zum Schutz des Klimas bei, sondern haben ebenfalls viele Synergien mit dem Biodiversitätsschutz sowie dem Erhalt anderer wichtiger Ökosystemleistungen. Dadurch unterstützen sie auch die Anpassung der Landnutzung an den fortschreitenden Klimawandel durch verbesserten Wasserrückhalt, oder als Kühlungselemente in der Landschaft. Diese Synergien werden vor allem dann erreicht, wenn die Klimaschutzmaßnahmen zur Extensivierung der Land- und Waldnutzung und zum Schutz von Lebensräumen beitragen, sowie die Strukturvielfalt in der Landschaft erhöhen. Dafür ist jedoch in den meisten Fällen eine erhebliche Änderung der aktuellen Bewirtschaftungsweise notwendig. Um mögliche schädliche Verlagerungsprozesse zu vermeiden, müssen bei der Umsetzung der Klimaschutzmaßnahmen im Landnutzungssektor, parallel zur Änderung der Landbewirtschaftung, auch bestehende Konsummuster verändert werden. Beispielsweise bewirkt ein reduzierter Verbrauch von tierischen Produkten wie Fleisch und Milch einen geringeren Bedarf an Nutztierhaltung. Der damit einhergehende verringerte Futteranbau schafft erhebliche Flächenpotenziale. Diese können für die Extensivierung landwirtschaftlicher Nutzflächen, Naturschutzmaßnahmen sowie für die Erweiterung der Waldfläche verwendet werden.

Der vorliegende Bericht bietet einen Überblick zu den möglichen Beiträgen der natürlichen Kohlenstoffsenken in Deutschland, um die Klimaschutzziele bis 2045 erreichen zu können. Zusätzlich werden mögliche Einschränkungen der Potenziale gezeigt, wenn zukünftig Extremereignisse wie Dürreperioden oder Stürme aufgrund des fortschreitenden Klimawandels

² Um die Konsistenz mit dem Gesamtvorhaben „Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (CARE)“ zu bewahren, werden in den folgenden Berechnungen Daten aus dem nationalen Inventarbericht von UBA (2022a) verwendet.

häufiger auftreten werden. Dazu wurden mit Hilfe der Modelle FABio-Land und FABio-Forest³ Sensitivitäten der wichtigsten natürlichen Kohlenstoffsinken modelliert.

Die größte Wirkung bei der aktiven Einbindung von CO₂ aus der Atmosphäre haben Maßnahmen zum **Aufbau und Schutz der Kohlenstoffsinke im Wald**:

- ▶ Mit ihren rund 11 Mio. Hektar haben Wälder in Deutschland das größte Flächenpotenzial für die Einbindung von atmosphärischen CO₂. Durch eine Extensivierung der Waldbewirtschaftung zugunsten von höheren Laubholzvorräten können Minderungen von bis zu -48 Mio. t CO₂ bis 2052 erreicht werden. Durch den Schutz von Buchen- und Eichenbestände >120 Jahre können Minderungen von rund 5,5 t CO₂/ha/Jahr erzielt werden.
- ▶ Durch einen vermehrten Vorratsaufbau kann bereits innerhalb von einem Jahr mehr Kohlenstoff in der lebenden Biomasse gespeichert werden. Der Schutz von älteren Laubholzbeständen und strukturreichen, naturnahen Wäldern sind essenziell für den Schutz von Biodiversität.
- ▶ Eine besondere Gefährdung für die Minderungspotenziale im Wald bestehen durch die Zunahme und Intensität von natürlichen Störungen, wie Stürme, Dürreperioden und massenhafter Ausbruch von Borkenkäferbefall. Baumarten haben ein besonders hohes Risiko durch Störungen betroffen zu sein, wenn sie an Standorten kultiviert werden, an die sie nicht optimal angepasst sind. Die Anfälligkeit für Störungen steigt auch dann, wenn unnatürliche Monokulturen und gleichaltrige Bestände vorhanden sind. Das vermehrte Auftreten natürlicher Störungen kann zu einer Verschlechterung der THG-Bilanz auf der Waldfläche von bis zu 35 Mio. t CO₂äq./Jahr beitragen. Für zukünftige Modellierungsarbeiten sollte dem Faktor natürliche Störungen mehr Beachtung geschenkt werden.

Durch die Holzernte verringert sich der Kohlenstoffspeicher in der Waldbiomasse. Gleichzeitig wird der Speicher der Holzprodukte entsprechend erhöht. Holz ist ein wertvoller Rohstoff, der vielseitig eingesetzt werden kann, jedoch tragen nur **langfristig (>20 Jahre) genutzte Holzprodukte** zur wichtigen Kohlenstoffspeicherung bei:

- ▶ Das zusätzliche Holzproduktspeicherpotenzial für den verstärkten Einsatz von Bauholz liegt bei 0,65 Mio. t CO₂äq./Jahr. Dem steht jedoch ein Verlust an Kohlenstoffspeicher im Wald von 1 Mio. t CO₂äq./Jahr gegenüber, weshalb die Langlebigkeit von Holzprodukten umso wichtiger ist. Um den im Holzprodukt gespeicherten Kohlenstoff so lange wie möglich zu erhalten, muss die Kaskadennutzung von Holz konsequent optimiert werden.
- ▶ Aktuell wird der überwiegende Teil der Laubholzernte energetisch genutzt, wodurch unmittelbar CO₂-Emission entstehen. Insbesondere Stammholz sollte nicht energetisch genutzt werden, sondern entweder als lebender Baum den Waldkohlenstoffspeicher erhalten bzw. erhöhen oder als Totholz im Wald verbleiben, wodurch hohe Synergien mit dem Biodiversitätsschutz zu erwarten sind.

Die **Etablierung von neuen Waldflächen** bzw. die Pflanzung von insgesamt drei Milliarden Bäumen in der EU bis 2030 ist ein wichtiges Ziel der EU Biodiversitäts- und EU Waldstrategie. Hierzu möchte Deutschland einen Beitrag leisten, wobei keine konkreten Flächenziele genannt werden:

- ▶ Durch die Etablierung neuer Waldfläche auf Ackerland mit mineralischem Boden können im Schnitt -6,6 t CO₂/ha (beteiligte Pools: lebende Biomasse, mineralischer Boden, Totholz,

³ Das Öko-Institut entwickelt seit 2015 den FABio Modellverbund (Forestry and Agriculture Biomass Model). Er besteht aus vier Teilmodellen: FABio-Land (LULUCF), FABio-Forest (Wald), Agrarmodell LiSE und FABio-Biomass (Biomassepotenziale).

Streu) an jährlicher Minderungsleistung erreicht werden. Dieses Minderungspotenzial steht jedoch erst über einen Zeitraum von ca. 10 Jahren zur Verfügung, da die Bäume zunächst eine gewisse Größe haben müssen, um substanziell CO₂ zu sequestrieren.

- ▶ Um für die Biodiversität wertvolles extensiv genutztes Grünland zu erhalten, sollte neuer Wald auf wenig produktiven Ackerflächen etabliert werden. Dadurch lassen sich auch mögliche Verlagerungseffekte durch den vermehrten Import von Feldfrüchten aus dem Ausland für die Versorgung in Deutschland vermeiden.

Die meisten Emissionen aus dem LULUCF-Sektor von Deutschland stammen aus der Nutzung von organischen Böden. Im Jahr 2020 waren das 53 Mio. t CO₂äq über alle Landnutzungsklassen hinweg, wobei die meisten Emissionen bei der Acker- und Grünlandnutzung entstehen. Die großen Mengen an Kohlenstoff, die im organischen Boden gespeichert sind, entstanden in vormals wassergesättigten Mooren. Daher ist eine der wichtigsten Maßnahmen des natürlichen Klimaschutzes, die Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden durch die **Wiedervernässung von organischen Böden** zu senken:

- ▶ Das Minderungspotenzial durch Wiedervernässung beträgt bis zu -35 t CO₂äq/ha. Bei einer vernässbaren Fläche von 0,9 bis 1,0 Mio. Hektar bis 2045 entspricht dies einem Minderungspotenzial zwischen 32 bis 35 Mio. t CO₂äq. Für eine erfolgreiche Wiedervernässung muss der gesamte Landschaftswasserhaushalt betrachtet werden. Um eine gleichmäßige Wasserversorgung der vernässen Flächen sicherzustellen, müssen Entwässerungsgräben zurückgebaut und regulierbare Stausysteme installiert werden. Dadurch können auch benachbarte Flächen (z.B. Acker und Siedlungen) vor möglichen Überflutungen geschützt werden.
- ▶ Die Wiedervernässung schafft gleichzeitig wertvolle Feuchtlebensräume wie Moore und extensives Feuchtgrünland. Diese Lebensräume tragen auch zur Stabilisierung und Regulierung des Landschaftswasserhaushalts bei.
- ▶ Ein großes Risiko für die erfolgreiche Senkung der Emissionen aus organischen Böden besteht in der Verfügbarkeit von Wasser für die Wiedervernässung bis zu einem Wasserstand von -5 cm unter Flur, der im Jahresdurchschnitt erreicht werden sollte. Ein suboptimales Wasserstandsregime von -20 cm unter Flur führt dazu, dass etwa 20 Mio. t CO₂äq./Jahr weniger an Emissionen gemindert werden können.
- ▶ Aufgrund des fortschreitenden Klimawandels können Dürreperioden häufiger auftreten und einen Wassermangel in der Region weiter verschärfen. Daher müssen bei der Umsetzung der Wiedervernässung, Optionen für den Umgang mit Wassermangel berücksichtigt werden. Zusätzlich müssen die Auswirkungen eines geringeren Wiedervernässungspotenzials auf den Grad der Emissionsminderung, in den zukünftigen Modellierungen des LULUCF-Sektors berücksichtigt werden.
- ▶ Eine zusätzliche Herausforderung für die Umsetzung der Maßnahme besteht in der Flächenverfügbarkeit, die durch die bestehende Nutzung als Acker- und Grünland erschwert ist. Daher müssen entsprechende finanzielle Anreize für Landnutzende zur Verfügung stehen. Außerdem müssen alternative Bewirtschaftungsformen, wie die Kultivierung von torferhaltenden Paludikulturen attraktiv für Landwirtinnen und Landwirte sein. Hierfür müssen finanziell lukrative Produktabsatzmärkte etabliert und gefördert werden.

Weitere Maßnahmen des natürlichen Klimaschutzes in der Landnutzung sind:

- ▶ Die **Anlage von Agroforst auf mineralischem Ackerboden** kann über schnellwüchsige Gehölze sowie Hecken oder Obstbäume erfolgen. Bei der Neuanlage von Hecken auf

Ackerland wird im Mittel über 20 Jahre, mit einer Kohlenstoffbindung von -15,4 t CO₂/ha/Jahr gerechnet. Neben dem positiven Effekt der zusätzlichen Kohlenstoffspeicherung tragen Agroforstsysteme auch zur Diversifizierung der Landschaft bei. Insbesondere wenn heimische und standortgerechte Gehölze verwendet werden, profitiert eine Vielzahl wildlebender Arten, z.B. durch Nistmöglichkeiten. Für eine kontinuierliche Kohlenstoffspeicherung in Boden und Biomasse, müssen Agroforstsysteme regelmäßig gepflegt werden, was in der Förderung solcher Maßnahmen berücksichtigt werden muss.

- ▶ Maßnahmen, die ebenfalls zu einer **Erhöhung des Bodenkohlenstoffvorrates im mineralischen Ackerboden** beitragen können, sind: Verbesserte Fruchtfolgen, der Anbau von Zwischenfrüchten, Untersaaten und mehrjährigen Kulturen wie Klee gras. Viele dieser Maßnahmen werden bereits im ökologischen Landbau genutzt, weshalb sich dieser im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft positiver auf den Bodenkohlenstoffgehalt auswirkt. Die zusätzliche Kohlenstoffeinspeicherung im mineralischen Ackerboden werden je nach Flächenpotenzial von 2,9 bis 5,5 Mio. ha, mit -3 bis -6 Mio. t CO₂ pro Jahr angegeben. Der Kohlenstoff wird in der Biomasse und im Boden überwiegend als Humus gespeichert. Der Humusaufbau verbessert die Bodenfruchtbarkeit und kann in kurzen Zeiträumen erreicht werden. Um den Humus zu erhalten, müssen die Maßnahmen konstant aufrechterhalten werden. Bei der Ausweitung des ökologischen Landbaus ist zu berücksichtigen, dass Flächenerträge sinken. Beispielsweise wird für das Ziel 30% ökologische Landwirtschaft in Deutschland eine zusätzliche Anbaufläche von 1,4 Mio. ha benötigt werden, wenn keine Veränderung der Nachfrage nach landwirtschaftlichen Produkten erfolgt.
- ▶ Der Erhalt und die **extensive Bewirtschaftung von Dauergrünland auf mineralischem Boden**, mit durchschnittlich 89 t C_{org}/ha (0-30 cm Tiefe), leistet einen wichtigen Beitrag zum Schutz einer natürlichen Senke in Deutschland. Der Grünlanderhalt wird als etablierte Maßnahme angesehen, und daher werden aus dieser Maßnahme keine zusätzlichen Emissionseinsparungen auf das Klimaschutzziel angerechnet.
- ▶ Die CO₂-Minderungseffekte, die durch das **Pflanzen von weiteren Stadtbäumen erwartet werden** können, schwanken stark je nach Baumart und Alter des gepflanzten Baumes. Bei der Neupflanzung von 150.000 Stadtbäumen im Alter von 10 Jahren in 2023, kann im Jahr 2030 mit einer CO₂- Einbindung von rund 1.455 t gerechnet werden. Mit zunehmendem Alter der Bäume steigt auch deren jährliche CO₂-Aufnahme. Die Pflanzung und Pflege der Bäume ist mit hohen Kosten verbunden und der städtische Raum ist aufgrund von Versiegelung und erhöhten schädlichen Stoffeinträgen ein herausfordernder Standort für Bäume. Diese Herausforderungen können durch die Wirkung des fortschreitenden Klimawandels, insbesondere verbunden mit Wasserknappheit, noch weiter verschärft werden. Gleichzeitig trägt eine zusätzliche Begrünung zur Kühlung des Siedlungsraums bei und hat somit viele Synergien mit der Anpassung von Städten an Hitzewellen. Außerdem sind Bäume Lebensräume für verschiedene Arten im Siedlungsbereich und sind wichtig für das Wohlbefinden der Stadtbevölkerung.

Summary

To achieve the goal of greenhouse gas neutrality by 2045 set out in the Federal Climate Protection Act (Bundes-Klimaschutzgesetz, KSG), anthropogenic emissions must be reduced. However, not all emissions, e.g. from agriculture, can be avoided in the future. Net-zero emissions can be achieved with the help of natural carbon sinks, such as forests or grasslands. Therefore, these must be protected from degradation, restored, and expanded wherever possible on a large scale. Natural carbon sinks store the atmospheric carbon bound via photosynthesis in so-called pools. These pools include living and dead biomass, litter and organic and mineral soil. They are dynamic and can continue to grow. In contrast, pure carbon storage, such as wood products, cannot absorb any more CO₂ from the atmosphere.

According to the rules of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), all emissions and carbon sequestration from the pools in forests, cropland and grassland, wetlands and settlements, as well as land use change in the LULUCF sector (land use, land use change and forestry), are accounted for. According to the KSG, the LULUCF sector should achieve a net carbon sink of at least -25 Mt CO₂eq by 2030, -35 Mt CO₂eq by 2040 and at least -40 Mt CO₂eq in 2045. So far, the LULUCF sector is still well below these targets. In 2021, the LULUCF sector was a net source of emissions of around 4 million t CO₂eq, while in 2019 the sector was still a net carbon sink of -6.8 million t CO₂eq (UBA 2023b)⁴. The sharp decline in carbon sink performance underlines the need to strengthen the potential of natural sinks through measures of sustainable use and protection.

Measures that are in line with natural climate protection not only contribute to climate protection, but also have many synergies with biodiversity protection and the maintenance of other vital ecosystem services. They support land use adaptation to ongoing climate change through improved water retention and serve as cooling elements in the landscape. These synergies are particularly achieved when climate protection measures contribute to the extensification of land and forest use and the protection of habitats, as well as increasing structural diversity in the landscape. However, in most cases this requires a significant change in current management practices. To avoid potential harmful displacement processes, the successful implementation of climate protection measures in the land use sector necessitates simultaneous adjustments to current land management practices and the alteration of existing consumption patterns. For example, reduced consumption of animal products such as meat and dairy, results in lower demand for livestock farming. The associated reduction in fodder cultivation creates considerable land potential for extensive agricultural land use, conservation efforts, and the expansion of forested areas. This can be used for the extensification of agricultural land, nature conservation measures and the expansion of forest area.

This report provides an overview of the potential contributions of natural carbon sinks in Germany to achieve the climate protection goals by 2045. Additionally, it highlights potential limitations if extreme events such as droughts or storms occur more frequently in the future due to advancing climate change. For this purpose, sensitivities of the most important natural carbon sinks were modelled using the FABio-Land and FABio-Forest models⁵.

Measures for **establishing and preserving carbon sinks in forests** have the most significant impact on actively sequestering CO₂ from the atmosphere:

⁴ To maintain consistency with the overall project "Transformation towards a fully greenhouse gas neutral Germany (CARE)", data from the national inventory report of 2022 (UBA 2022a) are used in the following calculations of this report.

⁵ Since 2015, the Öko-Institut has been developing the FABio Model Consortium (Forestry and Agriculture Biomass Model). It consists of four sub-models: FABio-Land (LULUCF), FABio-Forest (Forest), the agricultural model LiSE, and FABio-Biomass (Biomass Potentials).

- ▶ With approximately 11 million hectares, forests in Germany possess the most extensive land potential for sequestering atmospheric CO₂. An extensification of forest management in favor of higher deciduous wood stocks can lead to reductions of up to -48 million t CO₂ by 2052. Protecting beech and oak stands over 120 years old can yield reductions of approximately 5.5 metric tons of CO₂ per hectare per year.
- ▶ Increased stock build-up can store more carbon in the living biomass within one year. Preserving older deciduous stands and structurally diverse, natural forests is essential for biodiversity protection.
- ▶ The increase and intensity of natural disturbances, such as storms, droughts and mass outbreaks of bark beetle infestations, pose a particular threat to mitigation potentials in the forest. Tree species are particularly vulnerable to disturbances when they are cultivated in locations to which they are not optimally adapted. Susceptibility to disturbance also increases when unnatural monocultures and even-aged stands are present. The increased occurrence of natural disturbances can contribute to a deterioration of the GHG balance on the forest area of up to 35 Mt CO₂eq./year. For future modelling efforts, greater attention should be paid to the factor of natural disturbances.

Timber harvesting reduces the carbon store in the forest biomass. At the same time, the storage of wood products is increased accordingly. Wood is a valuable resource with many different applications, but only **wood products used over the long term (>20 years) contribute to carbon storage:**

- ▶ The additional carbon storage potential from increased wood use for construction timber is 0.65 million t CO₂eq/year. However, this is offset by a loss of carbon storage in the forest of 1 million t CO₂eq/year, which makes the longevity of wood products even more important. To preserve the carbon stored in wood products for as long as possible, the cascade use of wood must be consistently optimised.
- ▶ Currently, most of the hardwood harvesting is used for energy production, which results in immediate CO₂ emissions. Stemwood in particular should not be used for energy production, but should either be maintained as living trees to preserve or increase forest carbon storage or left as deadwood in the forest, which is expected to yield significant synergies with biodiversity conservation.

The **establishment of new forest areas** or the planting of a total of three billion trees in the EU by 2030 is an important goal of the EU Biodiversity and EU Forest Strategy. In this regard, Germany aims to contribute, without specifying concrete land area targets:

- ▶ The establishment of new forested areas on arable land with mineral soil can, on average, achieve an annual mitigation capacity of -6.6 t CO₂/ha (participating pools: living biomass, mineral soil, deadwood, litter). However, this mitigation potential is only available over a period of about 10 years, as the trees initially need to reach a certain size to substantially sequester CO₂.
- ▶ To preserve valuable, extensively managed grasslands for biodiversity, new forests should be established on less productive agricultural land. This approach can also help avoid potential displacement effects resulting from increased imports of crops from abroad to meet Germany's supply needs.

Most emissions from the LULUCF sector in Germany stem from the use of organic soils. In 2020, this amounted to 53 million metric tons of CO₂eq across all land use categories, with most emissions originating from agricultural and grassland use. The substantial carbon stocks stored

in organic soils were formed in previously waterlogged peatlands. Therefore, one of the primary measures for natural climate protection is to reduce emissions from agriculturally used soils through the **rewetting of organic soils**:

- ▶ The mitigation potential through rewetting amounts to up to -35 metric tons of CO₂eq per hectare. With a rewettable area of 0.9 to 1.0 million hectares by 2045, this corresponds to a mitigation potential of 32 to 35 million metric tons of CO₂eq. Successful rewetting requires considering the entire landscape water balance. To ensure a consistent water supply to rewetted areas, drainage ditches must be dismantled, and controllable dam systems must be installed. This can also protect adjacent areas (e.g., fields and settlements) from potential flooding.
- ▶ Rewetting simultaneously creates valuable wetland habitats such as bogs and extensive wet grasslands. These habitats also contribute to landscape water balance stabilization and regulation.
- ▶ A significant risk to the successful reduction of emissions from organic soils lies in the availability of water for rewetting to a water level of -5 cm below surface, which should be achieved on an annual average. A sub-optimal water level regime of -20 cm below ground level results in about 20 million tonnes of CO₂eq. per year less emissions being mitigated.
- ▶ Continuing climate change may increase the frequency of droughts and exacerbate water scarcity in the region. Therefore, water scarcity management options need to be considered when implementing rewetting. In addition, future modelling of the LULUCF sector should consider the impact of reduced rewetting potential on the level of emission reductions.
- ▶ An additional challenge in implementing this measure is the availability of land, which is hampered by its current use as arable land and grassland. Appropriate financial incentives will therefore need to be provided to land users. In addition, alternative management practices, such as peat-preserving paludiculture, need to be attractive to farmers. This requires the creation and promotion of financially viable product markets.

Additional measures of natural climate protection in land use include:

- ▶ The **establishment of agroforestry systems** on mineral cropland can include fast-growing woody plants, hedges or fruit trees. Establishing hedges on cropland is expected to sequester an average of -15.4 tonnes of CO₂ per hectare per year over 20 years. In addition to the positive effects of additional carbon storage, agroforestry systems also contribute to landscape diversification. In particular, the use of native and site-appropriate woody plants benefits a multitude of wildlife species, for example by providing nesting sites. To ensure continued carbon storage in soil and biomass, agroforestry systems need regular maintenance, which should be considered when promoting such measures.
- ▶ Measures that can also **increase soil carbon in cropland mineral soils** include improved crop rotations, cover crops, intercropping and perennial crops such as clover. Many of these measures are already used in organic farming, which is why organic farming has a more positive effect on soil carbon levels than conventional farming. The total additional carbon sequestration in arable mineral soils is estimated to be between -3 and -6 million tonnes of CO₂ per year, depending on the available area, which can be between 2.9 and 5.5 million hectares. The carbon is mainly stored in the soil as humus and in biomass. Building up humus increases soil fertility and can be achieved in a short period of time. To maintain humus, these measures must be consistently maintained. When expanding organic farming, it's important to bear in mind that land yields may decrease. For example, to achieve the

target of 30% organic farming in Germany, an additional 1.4 million hectares of land would be required if demand for agricultural products remained unchanged.

- ▶ The maintenance and extensive management of permanent grassland on mineral soils, with an average of 89 tonnes of organic carbon per hectare (0-30 cm depth), makes a significant contribution to the protection of a natural sink in Germany. As the maintenance of permanent grassland is considered an established measure, no additional emission savings from this measure are credited to the climate protection target.
- ▶ The CO₂ reduction expected from planting additional urban trees varies significantly depending on the species and age of the tree planted. If 150,000 10-year-old urban trees are planted in 2023, an approximate CO₂ sequestration of 1,455 tonnes can be expected by 2030. As the trees age, their annual CO₂ uptake also increases. Planting and maintaining trees are costly, and urban areas are challenging environments for trees due to pavement and increased pollutant deposition. These challenges may be exacerbated by the effects of ongoing climate change, particularly in respect of water scarcity. At the same time, additional vegetation contributes to the cooling of urban areas and offers many synergies with the adaptation of cities to heat waves. Also, trees provide habitats for various species in urban environments and play a vital role in the well-being of urban populations.

1 Einleitung

Im Übereinkommen von Paris von 2015 wird die Zielsetzung formuliert, dass die anthropogenen Emissionen bis 2050 drastisch reduziert werden müssen. Darauf aufbauend verabschiedete das Europäische Parlament das EU-Klimagesetz, in dem festgelegt ist, dass die EU bis 2050 netto-Null Treibhausgasemissionen („Treibhausgasneutralität“) erreichen soll. Das am 24. Juni 2021 vom Bundestag beschlossene Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), sieht vor, dass das netto-Null-Ziel bereits im Jahr 2045 für Deutschland erreicht werden soll (KSG 2019). Dazu müssen neben der drastischen Reduktion von anthropogen verursachten Emissionen auch die natürlichen Kohlenstoffsinken im großen Umfang vor Degradierung geschützt und wiederhergestellt werden. Außerdem könnten z.B. durch eine Erweiterung der bestehenden Waldfläche, natürliche Senken weiter ausgebaut werden. Nach den Regeln des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) werden alle Emissionen und Kohlenstoffeinbindungen aus den organischen und mineralischen Böden, der lebenden und toten Biomasse in den Wäldern, dem Acker- und Grünland, den Feucht- und Siedlungsgebieten, sowie der Änderung der Landnutzung im LULUCF-Sektor (Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Wald) erfasst. Im KSG werden für den LULUCF Sektor in Deutschland quantitative Ziele vorgegeben, um zukünftig nicht vermeidbare Emissionen, z.B. aus der Landwirtschaft, für die Erreichung der Treibhausgasneutralität im Jahr 2045, kompensieren zu können. Daher soll der LULUCF-Sektor bis 2030 eine Netto-Kohlenstoffsenke von mindestens -25 Mio. t CO₂äq, bis 2040 von mindestens -35 Mio. t CO₂äq und im Jahr 2045 von mindestens -40 Mio. t CO₂äq erreichen. Bisher liegt der LULUCF-Sektor noch weit unter diesen Zielen. Im Jahr 2021 war der LULUCF-Sektor eine Netto-Emissions-Quelle von rund 4 Mio. t CO₂äq, während der Sektor im Jahr 2019 noch eine Netto-Kohlenstoffsenke von -6,8 Mio. t CO₂äq war (UBA 2023b)⁶. Der starke Rückgang der Senkenleistung unterstreicht die Notwendigkeit, die Potenziale der natürlichen Senken durch Maßnahmen der nachhaltigen Nutzung und des Schutzes zu stärken.

Durch die Umstellung zu einer nachhaltigen Land- und Waldnutzung können neben den Klimaschutzleistungen gleichzeitig weitere Ökosystemleistungen, wie der Schutz der Biodiversität, des Wasserhaushalts und Luftreinhaltung oder auch der Erhalt der Bodenfruchtbarkeit durch Humusaufbau und der Schutz vor Bodenerosion erreicht werden. Im Koalitionsvertrag der Bundesregierung von 2021 wurde für den Schutz der natürlichen Senken ein „Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz“ (ANK) angekündigt, welches am 29. März 2023 verabschiedet wurde. Durch die Umsetzung von insgesamt 69 Maßnahmen, darunter z. B. den Schutz alter Buchenwälder, die Wiedervernässung von Mooren, die Renaturierung von Salzwiesen und Auen, sowie die Anlage von Hecken auf landwirtschaftlich genutzten Flächen sollen vor allem die Synergien zwischen Klimaschutz und anderen Ökosystemleistungen gestärkt werden. Insgesamt werden für die Umsetzung 4 Milliarden Euro bis zum Jahr 2026 zur Verfügung stehen.

Der vorliegende Bericht bietet einen Überblick zu den möglichen Beiträgen der natürlichen Kohlenstoffsinken in Deutschland zur Erreichung der Klimaschutzziele bis 2045. Dabei werden insbesondere die notwendigen Maßnahmen und entsprechenden Wirkungszeiträume dargestellt, sowie die Sensitivitäten wichtiger Senken- und Emissionsminderungspotenziale. Im nachfolgenden Kapitel 2 werden die natürlichen Senkenpotenziale und Potenziale zur Minderung von Emissionen im LULUCF-Sektor in Deutschland für die kommenden Jahrzehnte, analysiert und quantifiziert. Dabei werden ausschließlich die terrestrischen Ökosysteme betrachtet, die auch aktuell im LULUCF-Sektor bilanziert werden: Wälder, organische und mineralische Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung von Acker- und Grünland, einschließlich

⁶ Um die Konsistenz mit dem Gesamtvorhaben „Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (CARE)“ zu bewahren, werden in den folgenden Berechnungen Daten aus dem nationalen Inventarbericht von UBA (2022a) verwendet.

Moore, sowie die Kohlenstoffeinbindung von Bäumen in Siedlungen. Darüber hinaus wird auf das Potenzial der Kohlenstoffspeicherung durch Holzprodukte eingegangen. In Kapitel 3 wird schließlich dargestellt, inwiefern sich Senken- und Speicherpotenziale sowie Emissionsminderungen ändern, wenn z.B. wiederkehrende Trockenperioden auf die Ökosysteme wirken.

Abschließend werden in Kapitel 4 die wichtigsten Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen zum erfolgreichen Ausschöpfen der natürlichen Senkenpotenziale und Emissionsminderungen zur Erreichung der nationalen Klimaziele dargelegt.

2 Potenziale natürlicher Kohlenstoffsenken in Deutschland

Der globale Kohlenstoffkreislauf zeichnet sich durch einen stetigen Austausch von Kohlenstoff zwischen den Systemen Atmosphäre, Böden, Gesteine und Biosphäre, sowie Meere und Gewässer aus. Der Mensch hat einen erheblichen Einfluss auf diesen Kreislauf, insbesondere durch die Verbrennung von fossilen Stoffen, wie z.B. Steinkohle und durch die Änderung der Landnutzung, z.B. von einem Wald in eine landwirtschaftlich genutzte Fläche. Dadurch werden CO₂ und andere Treibhausgase innerhalb kürzester Zeit freigesetzt. Dadurch wird der Klimawandel immer weiter vorangetrieben, denn terrestrische und marine Ökosysteme können aktuell lediglich die Hälfte der anthropogenen Emissionen in natürlichen Kohlenstoffsenken aufnehmen (Friedlingstein et al. 2020). Kohlenstoffsenken sind definiert als Reservoirs, die über einen Zeitraum hinweg Kohlenstoff aus der Atmosphäre ziehen, z. B. über Photosynthese, und dann in chemischen Verbindungen speichern (IPCC 2013). Natürliche Kohlenstoffsenken, wie Wälder oder Grünland, sind dynamisch und ihr Kohlenstoffspeicher kann weiter anwachsen. Sie speichern den über die Photosynthese gebundenen atmosphärischen Kohlenstoff in sogenannten Pools (lebende und tote Biomasse, Streu, Boden). Dagegen können reine Kohlenstoffspeicher, wie Holzprodukte, kein weiteres CO₂ aus der Atmosphäre mehr aufnehmen.

In Deutschland erstrecken sich Wälder auf ca. einem Drittel der Landesfläche (11 Mio. ha) und sind überwiegend von Nadelbäumen wie Fichte und Kiefern dominiert (BMEL 2016a). Landwirtschaft wird auf rund der Hälfte der deutschen Landesfläche betrieben, wobei davon 13 Mio. ha als Ackerland und 7 Mio. ha als Grünland genutzt werden (UBA 2022a). Durch die Art der Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Ausbreitung von Siedlungen und Infrastruktur beeinflussen wir den Zustand und die Entwicklung der Ökosysteme wie Wälder, Moore und mineralische Böden. Laut dem Bericht des Bundesministeriums für Umwelt (BMU) zum Zustand der Lebensräume in Deutschland werden insgesamt nur 30 % der Lebensräume mit einem günstigen Zustand bewertet (BMU und BfN 2020). Somit kann die Wiederherstellung, der Schutz und die nachhaltige Bewirtschaftung von natürlichen Senken auch einen wesentlichen Beitrag zum Schutz der Biodiversität und zum Erhalt weiterer Ökosystemfunktionen beitragen.

2.1 Senkenleistung der Wälder in Abhängigkeit von der Waldbewirtschaftung und auf Aufforstungsflächen

Wesentliche Einflussfaktoren auf die Kohlenstoffsenke von Wäldern

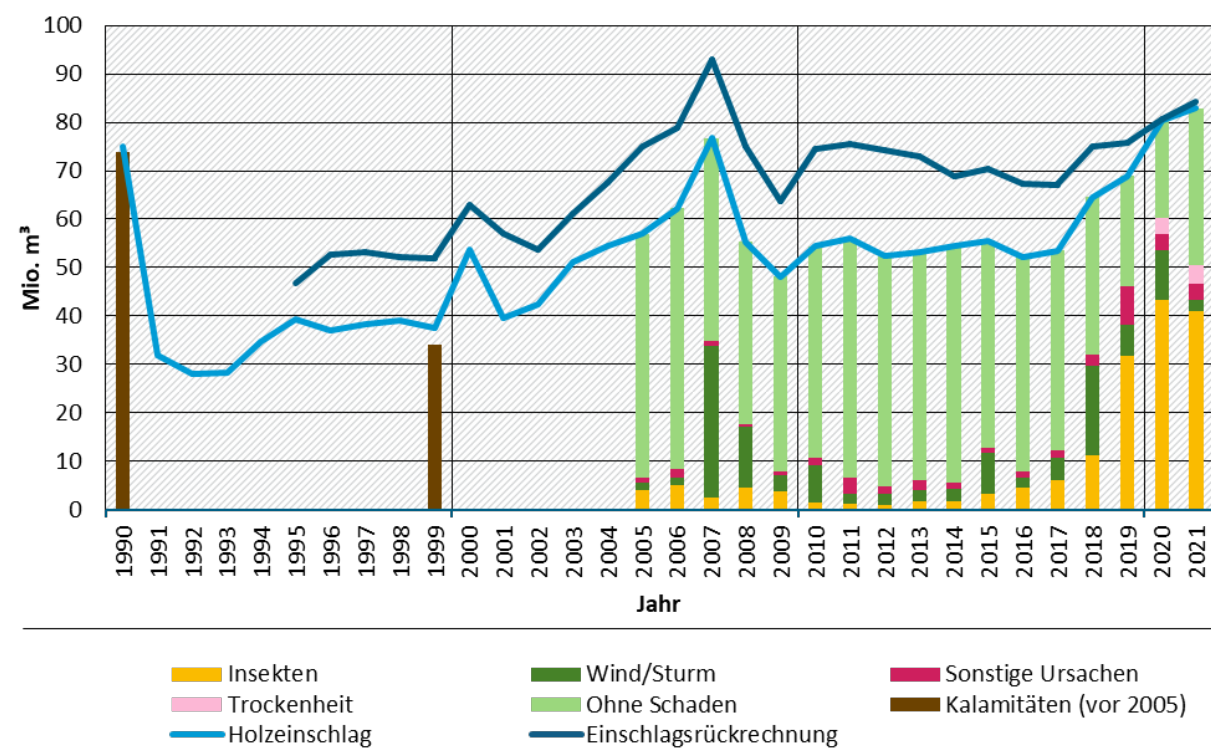
Wälder nehmen im Wesentlichen über Bäume CO₂ aus der Atmosphäre auf und speichern den Kohlenstoff zunächst in ihrer lebenden Biomasse. Dabei haben die Standortfaktoren Klima (Temperatur und Niederschlag) und Bodenbeschaffenheit (z.B. Nährstoffgehalt und Wasserspeicherkapazität) einen großen Einfluss auf das Wachstum und das Absterben der Bäume. Beispielsweise gibt es geringe Niederschlagsmengen im flachen Nordosten Deutschlands (z. B. Brandenburg und Sachsen-Anhalt) im Vergleich zur Mittelgebirgsregion (z. B. Hessen und Thüringen), wodurch auch die Zuwächse der Bäume im Nordosten geringer sind (BMEL 2012). Emissionen treten im Wald insbesondere dann auf, wenn Bäume absterben und sich das Totholz und die Bodenstreu zersetzen, bzw. der im Waldboden gespeicherte Kohlenstoff mineralisiert (Aufspaltung der organischen Substanz durch Mikroorganismen) wird. Durch die Zersetzung des Totholzes werden Emissionen über einen Zeitraum von mehreren Jahren bis Jahrzehnte langsam freigesetzt (Vandekerkhove et al. 2009). Auf Grund der langsamen Zersetzung stellt Totholz einen Kohlenstoffpool dar. Wie schnell das Totholz abgebaut wird, hängt von der Baumart, der Dimension und den vorherrschenden Standortbedingungen ab. So verrottet Totholz umso schneller, je feuchter und wärmer das Klima ist. Auch zersetzt sich stehendes Totholz langsamer als liegendes Totholz. Die Streu wird überwiegend von Laub, Nadeln und

kleineren Ästen gebildet und steht im engen Zusammenhang mit der oberen Bodenschicht, deren Kohlenstoffgehalt aus der Zersetzung von toter Biomasse aus der Streu und dem Totholz gespeist wird. Über weitere Zersetzungsprozesse gelangt ein Teil des so gebildeten Bodenkohlenstoffs in tiefere Bodenschichten (> 30 cm), wo er auf viele Jahrzehnte bis Jahrhunderte gespeichert werden kann. Gemeinsam mit der Streuauflage werden im Mineralboden (bis 30 cm Tiefe) im Durchschnitt über die deutsche Waldfläche rund 150 tC pro ha gespeichert (BMEL 2016b). Einen weiteren wichtigen Einfluss auf die Kohlenstoffdynamik von Wäldern haben Extremereignisse. In den Jahren 2018 bis 2020 haben Stürme, andauernde Trockenheit und schließlich Borkenkäferbefall große Schäden, insbesondere an den Fichten, verursacht (BMEL 2021a; 2022). Zwei Effekte können beobachtet werden:

- ▶ In Jahren mit hohen natürlichen Störungen steigt die Gesamtmenge an Holzentnahme deutlich an. Im Zeitraum der Extremjahre 2018 bis 2021 stieg die Holzentnahme auf bis zu 84 Mio. m³ an. Im Jahr 2007 führte der Orkan Kyrill zu einer Holzentnahme von 93 Mio. m³ (siehe auch hohe Holzentnahme im Jahr 1990 aufgrund von Sturmschäden; Abbildung 1)
- ▶ Große Mengen des entstandenen Schadholzes wurden eingeschlagen. So stieg im Jahr 2020 der Anteil an Schadholz an der Holzernte auf 75 % an. Auch im Jahr 2007 (Orkan Kyrill) wurden mit 40 % hohe Mengen an Schadholz geerntet. Gleichzeitig werden aber vitale Bäume nicht eingeschlagen. Sozusagen „wählt“ z. T. die natürliche Störung aus, welche Bäume entnommen werden. Gleichzeitig ist auch damit zu rechnen, dass nur ein Teil der abgestorbenen Bäume in der Ernte erfasst werden und dass der generelle Zuwachs der Bäume gemindert sein kann.

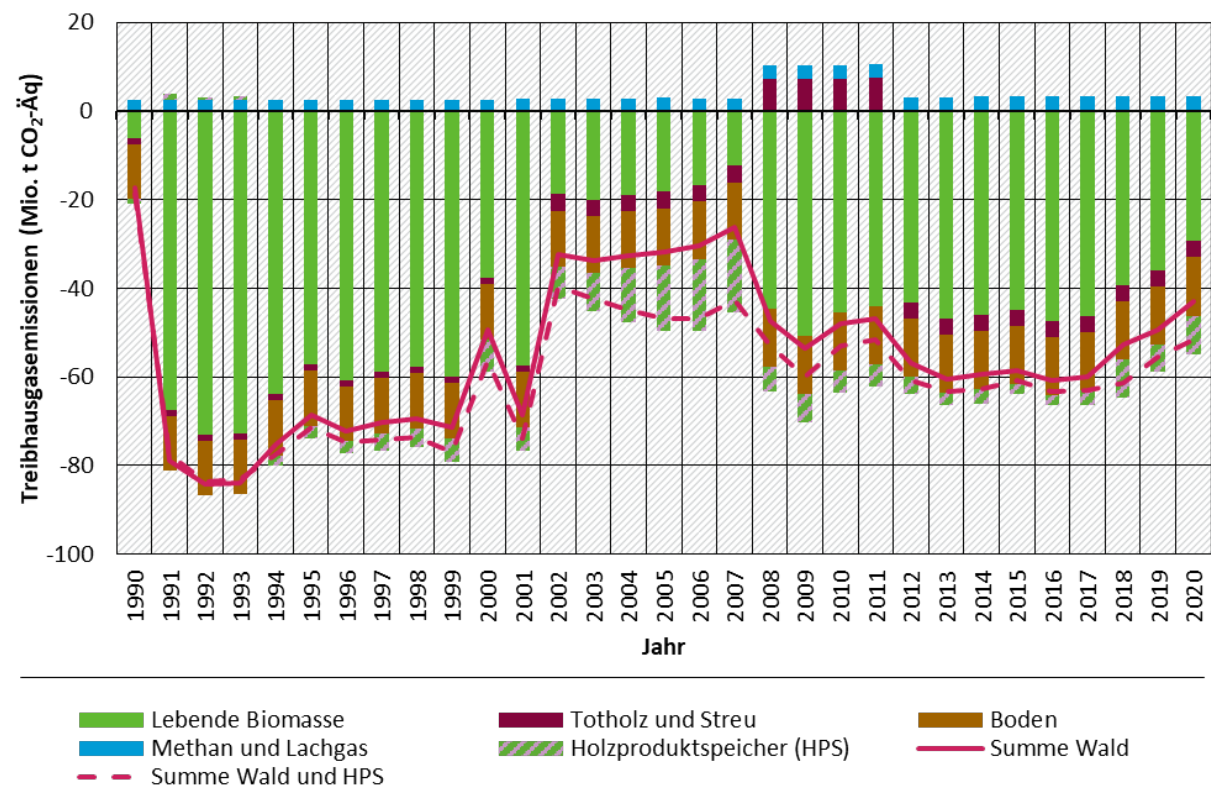
In Summe tragen natürliche Störungen wesentlich zu einer Minderung der Kohlenstoffsенке im Wald bei. Im Zeitraum von 2002 bis 2007, der durch Trockenheit und Stürme (2002 Orkan Jeanette, 2003 Dürre, 2007 Orkan Kyrill) geprägt war, nahm die Senkenleistung auf der Waldfläche laut dem nationalen Treibhausgasinventar unter dem UNFCCC und Kyoto-Protokoll deutlich ab. Dies liegt vor allem an einer verschlechterten Treibhausgasbilanz der lebenden Biomasse (Abbildung 2). Auch für die Jahre 2018 bis 2020 wird ein Rückgang der Senkenleistung berichtet. Ein genaueres Bild über die Ausmaße der Waldschäden in diesem Zeitraum und deren Einfluss auf die Entwicklung der Waldsenke werden mit dem Abschluss der vierten Bundeswaldinventur (BWI-4) erwartet. Die Inventur startete im April 2021 und wurde bis Dezember 2022 durchgeführt. Die sich anschließende Auswertung der Daten wird bis zum Ende des Jahres 2024 andauern (BMEL 2023b). Zu erwarten ist, dass die Senkenleistung geringer ausfällt als aktuell berichtet (Destatis 2023b). Der Einfluss von Schadereignissen auf den Kohlenstoffgehalt der Waldböden ist bisher noch nicht sehr gut erforscht. In der Schweiz wurden nach Sturmereignissen vor allem Kohlenstoffverluste aus der Humusauflage der Waldböden in den höheren Berglagen (über 1.000 m NN) beobachtet. Hauptgrund dafür ist eine erhöhte mikrobiologische Aktivität, durch wärmere und feuchtere Waldböden, die infolge des Sturmwurfs nicht mehr durch Bäume mehr beschattet werden (Mayer et al. 2023). In Wäldern geringerer Höhenlagen war der Effekt nicht so groß, da die Humusauflage geringer ist und somit auch der potenzielle Verlust an Kohlenstoff. Außerdem können die Kohlenstoffspeicher der Waldböden bereits nach 10 Jahren nach dem Sturmerereignis wieder genauso viel Kohlenstoff speichern wie vor dem Ereignis (Mayer et al. 2023).

Abbildung 1: Entwicklung des Holzeinschlags inklusive Anteile an Schadholz in Millionen m³ von 1990 bis 2021 (Trockenheit als Schadensursache wird erst seit 2020 erfasst)



Quelle: Destatis (2023), Jochem et al. (2022) und Hennenberg et al. (2022).

Abbildung 2: Entwicklung der Waldsenke und des Holzproduktspeichers in Millionen t CO₂Äq von 1990 bis 2020

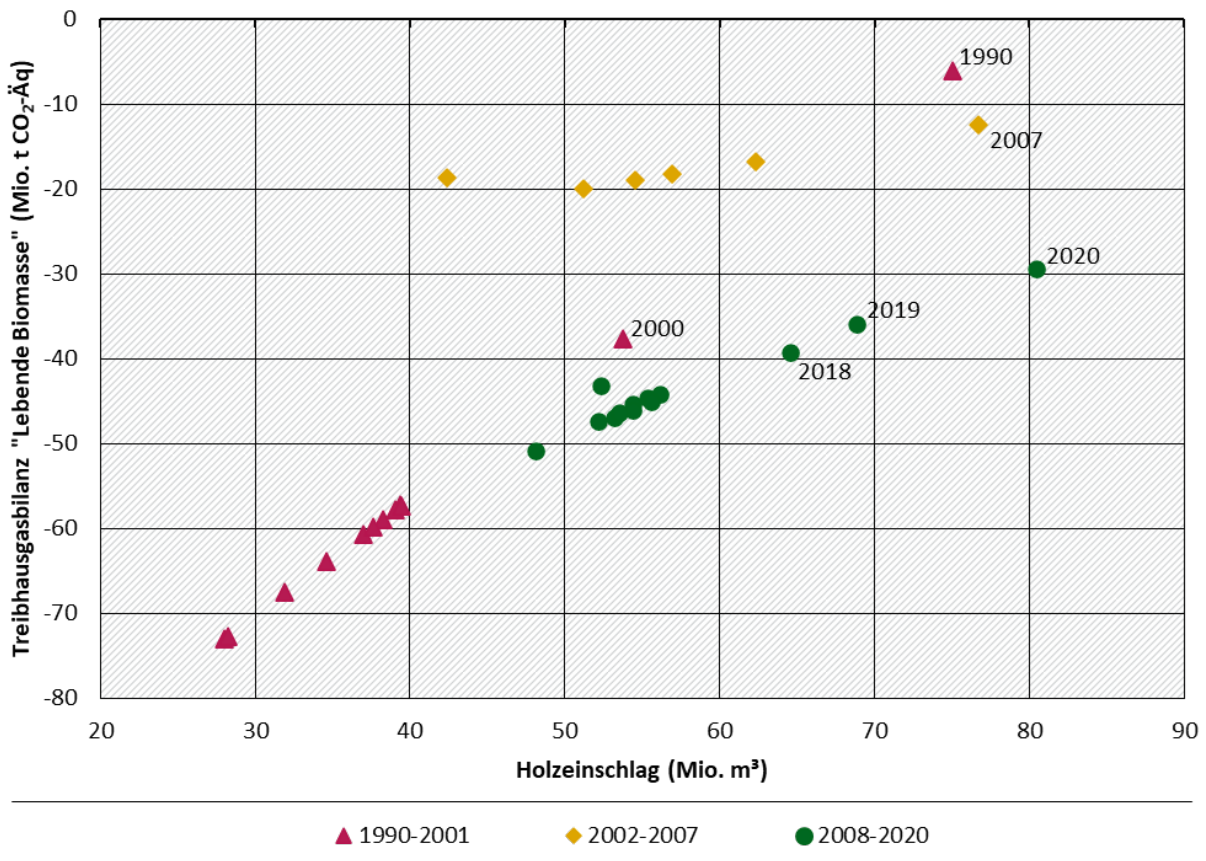


Anmerkung: HPS = Holzproduktspeicher.

Quelle: UBA (2022a).

Ein weiterer wichtiger Zusammenhang ist, dass die Intensität der Holzentnahme (Holzernte und Durchforstung) die Aufnahme und Speicherung von Kohlenstoff im Wirtschaftswald wesentlich beeinflusst (z.B. Pilli et al. 2016). So gilt die Holzentnahme laut IPCC als direkte CO₂-Emission (IPCC 2006). Der Kohlenstoffspeicher des Waldes erhöht sich kontinuierlich, wenn die jährliche Holzentnahme unter der jährlichen Nettozunahme der Holzbiomasse (Zuwachs minus natürliche Mortalität) liegt. Auswertungen der letzten Treibhausgasinventur 2017 weisen auf einen deutlichen Rückgang der Holznutzung zwischen den Jahren 2012 und 2017 im Vergleich zum Zeitraum von 2002 bis 2012 hin (Thünen-Institut 2017). So wurden durchschnittlich jährlich rund 62 Mio. Efm (6 Efm/ha/a) zwischen 2012 und 2017 geerntet, während es in den 10 Jahren davor noch rund 74 Mio. Efm (7 Efm/ha/a) waren (Hennig et al. 2019). Folglich stieg der mittlere Holzvorrat im Wald von 2012 bis 2017 um 19 m³/ha auf 358 m³/ha. Den größten Anteil am Vorratsanstieg hat die Fichte mit 54 Mio. m³ (26 %) (Hennig et al. 2019). Ein geringerer Holzeinschlag führt zum Vorratsaufbau, welcher wiederum zum Ausbau der Waldsenke beiträgt. Angesichts der negativen Ausmaße der Störungen auf die Fichte (s.o.), sollte ein Vorratsaufbau besser in resilienteren Beständen von Laub- und Mischwäldern erfolgen. In den Jahren 2012-2017 lagen die Holzentnahmen für Buche und Eiche >120 Jahren bei 8 bzw. 3 m³/ha. Dies entspricht einem Verlust an Waldsenke von ca. 1 t CO₂/m³. Somit liegt das flächenspezifische Potenzial durch die unterlassene Holzentnahme von Buchen und Eichen >120 Jahren (Durchschnitt 5,5 m³/ha) bei ca. -5,5 t CO₂/ha/Jahr.

Im nationalen Treibhausgasinventar wird der Zusammenhang zwischen Holzentnahme und Senkenleistung berücksichtigt (Abbildung 3). Ausgehend von der Berechnungsmethode in Röhling et al. (2016) wird für die Zeiträume 1990 bis 2001, 2002 bis 2007 und 2008 bis 2020 eine Relation zwischen Holzentnahme und Senkenleistung angenommen, die sich vereinfacht als lineare Regression darstellen lässt. In den Jahren 1990 bis 2001 wird angenommen, dass je entnommenem m³ an Holz die Senkenleistung um ca. 1,4 t CO₂ abnimmt. Im Zeitraum 2008 bis 2020 beträgt die angenommene Relation ca. 0,6 t CO₂/m³ (hier kann es noch zu Nachbesserungen mit Abschluss der BWI-4 kommen). In den Jahren 2002 bis 2007 ist dieser Wert mit 0,2 t CO₂/m³ noch einmal niedriger (Abbildung 3). Dieser geringe Wert aus der Periode 2002 bis 2007 zeigt, dass natürlichen Störungen einen besonders negativen Einfluss auf die Senkenleistung der Wälder haben. Ein wesentlicher Grund hierfür ist die erhöhte natürliche Mortalität der Bäume und die daraus resultierende erhöhte Holzerntemenge. Es kommt zu nicht geplanten Holzentnahmen, die im Vergleich zum regulären Holzeinschlag in Jahren ohne natürliche Störungen die Senkenleistung des Waldes verringern.

Abbildung 3: Treibhausgasbilanz der lebenden Biomasse in Abhängigkeit vom Holzeinschlag inklusive des Anteils für den Zeitraum von 1990 bis 2020

Anmerkung: Lineare Regression:

1990-2001: $1,4197 \times [\text{Mio. t CO}_2\text{-Äq/Mio. m}^3] - 113,14 [\text{Mio. t CO}_2\text{-Äq}]$

2002-2007: $0,2093 \times [\text{Mio. t CO}_2\text{-Äq/Mio. m}^3] - 29,507 [\text{Mio. t CO}_2\text{-Äq}]$

2008-2020: $0,6310 \times [\text{Mio. t CO}_2\text{-Äq/Mio. m}^3] - 79,773 [\text{Mio. t CO}_2\text{-Äq}]$

Quelle: Destatis (2023) und UBA (2022a). Siehe auch Abbildung 1 und Abbildung 2.

Modellgestützte Quantifizierung des Senkenpotenzials durch Anpassung der Waldbewirtschaftung

Grundsätzlich können die Kohlenstoffvorräte in bewirtschafteten Wäldern durch gezielte Maßnahmen in der Waldbewirtschaftung erhöht werden, indem der Aufbau von lebender und toter Biomasse sowie die Kohlenstoffanreicherung im Waldboden gefördert werden. Hierbei gilt es den Aufbau des Vorrates vor allem in den Beständen zu fördern, die wenig anfällig gegenüber Extremereignissen (s.o.) sind, um einen schnell wirkenden Senkenverlust zu vermeiden. Die vergangenen Schadereignisse haben deutlich gezeigt, dass vor allem nicht für den Standort geeignete reine Fichtenbestände am meisten betroffen und zusammengebrochen waren (s.o.). Resiliente Waldbestände zeichnen dagegen zum einen dadurch aus, dass sie eine dem Standort angepasste Baumartenzusammensetzung aufweisen. Hierbei kann sich an den natürlichen Waldgesellschaften orientiert werden, die in Deutschland überwiegend Laubbaum dominierte Bestände bilden würden. Daher spielt der Waldumbau von Nadelbaum dominierten Beständen, hin zu mehr Mischwäldern eine zentrale Rolle für den langfristigen Ausbau und Erhalt der Waldsenke. Die Entwicklung von ungleichaltrigen Beständen führt ebenfalls zu einer Streuung des Risikos gegenüber Störungen. Mit Hilfe von Waldmodellierung kann der Effekt von Maßnahmen wie Waldumbau und Vorratsaufbau in Laubbaum dominierten Beständen auf z.B. die Baumartenzusammensetzung, die Altersstruktur, den Vorrat und somit auch z.B. auf die Entwicklung des Kohlenstoffpools der lebenden Biomasse untersucht werden.

Im Rahmen des Verbundprojektes „Nachhaltigkeitsbewertung alternativer Waldbehandlungs- und Holzverwendungsszenarien unter besonderer Berücksichtigung von Klima- und Biodiversitätsschutz (WEHAM⁷-Szenarien, 2014-2017)“ (Oehmichen et al. 2018) wurden Waldnutzungsszenarien auf Basis der Daten der zweiten Bundeswaldinventur (BWI 2002, 2001 bis 2003) und dritten Bundeswaldinventur (BWI 2012, 2011 bis 2012; BMEL 2016a) entwickelt. In den Szenarien wird die Waldentwicklung von 2012 bis 2052 fortgeschrieben. Im WEHAM-Naturschutzpräferenzszenario (WEHAM-NPS) werden vermehrt Nadelbäume, insbesondere Fichte und Kiefer, geerntet und Laub- und Laubmischwälder gefördert. Im modellierten Zeitraum von 40 Jahren wurde der Nadelholzanteil in Deutschland um 19 % gesenkt und der Laubholzanteil stieg um 15 %, vor allem weil Laubholz weniger stark eingeschlagen wurde und die Umtriebszeit⁸ sowie die Zieldurchmesser im Durchschnitt erhöht wurden. Der durchschnittliche Holzvorrat im Wald konnte somit von 345 m³/ha im Jahr 2012 auf 374 m³/ha in 2052 gesteigert werden. Ebenso wurde der Vorrat an Totholz von ca. 20 m³/ha auf 40 m³/ha erhöht (Oehmichen et al. 2018). Die jährliche Senkenleistung des Waldes im WEHAM-NPS lag bei -31 Mio. t CO₂ bis 2032 und -35 Mio. t CO₂ bis 2052 (Werte ohne Boden). Damit wurden durch die oben beschriebenen Maßnahmen in der Waldbewirtschaftung rund -20 Mio. t CO₂ mehr an Senkenleistung in 2052 erreicht als im WEHAM-Basisszenario, welches anstrebt, das 2012 bestehende Waldmanagement fortzuschreiben (Rüter et al. 2017).

In den durch Gerber et al. (2018) veröffentlichten regionalisierten Ergebnissen der WEHAM-Szenarien wird deutlich, in welchen Gebieten Deutschlands der Holzvorrat bis 2052 vor allem ansteigt. Allerdings liegen keine Angaben zu der korrespondierenden Senkenleistung vor. Darum kann hier lediglich über den Anstieg des Holzvorrates abgeleitet werden, dass insgesamt mehr Kohlenstoff in der Biomasse gespeichert wird. Laut dem WEHAM-NPS tritt von 2012 bis 2052 überwiegend im südlichen Bayern, Südwest-, Mittel- und Nordostdeutschland ein Anstieg des durchschnittlichen Vorrats um ca. 14 bis 20 % auf. Im Szenario WEHAM-NPS kommt es trotz eines durchschnittlichen jährlichen Holzeinschlages zwischen 70 und 80 Mio. m³ zu einer Emissionsquelle im Holzproduktspeicher von bis zu 4 Mio. t CO₂ (Rüter et al. 2017).

In einer weiteren Studie von Gutsch et al. (2018) wurden Ökosystemleistungen der Wälder in Deutschland in unterschiedlichen Szenarien bis 2045 modelliert. Hier wurden ebenfalls ein naturschutzbezogenes Szenario sowie ein Szenario mit einer hohen Biomassenutzung betrachtet. Die Kohlenstoffspeicherung im naturschutzbezogenen Szenario war deutlich höher und lag bei -12,5 t CO₂/ha pro Jahr, während im Referenzszenario lediglich -10,3 t CO₂/ha pro Jahr im Wald gespeichert wurden. Folglich weist das naturschutzbezogene Szenario eine höhere Senkenleistung um gut 20 % insbesondere in Mittel-, Ost- und Südwestdeutschland auf und unterstreicht mögliche Synergien zwischen Kohlenstoffspeicherung im Wald und Naturschutz (Gutsch et al. 2018).

Die Unterschiede in der Intensität der Holzernte haben auch in der Studie „Waldvision“ (Böttcher et al. 2018a) einen großen Effekt auf die Waldsenke. Im Szenario „Waldvision“ wurde die Holzentnahme um 25 % im Vergleich zu einem „Business as Usual“-Szenario (Basisszenario) gesenkt. Wie im WEHAM-NPS (s. o.) wird der Einschlag vor allem beim Laubholz deutlich reduziert. Darüber hinaus werden insgesamt 16,6 % anstatt 4,1 % der Waldfläche einer natürlichen Waldentwicklung ohne forstliche Nutzung überlassen. Folglich erhöht sich der durchschnittliche Holzvorrat auf 501 m³/ha im Jahr 2052 und führt zu einer mittleren Kohlenstoffsenke von -48 Mio. t CO₂ pro Jahr in der lebenden Waldbiomasse. Im Vergleich dazu werden im Basisszenario -14 Mio. t CO₂ im Jahr gebunden. Wie bereits im Szenario WEHAM-NPS

⁷ WEHAM: Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung

⁸ Die Umtriebszeit bezeichnet in der forstwirtschaftlichen Fachsprache den Zeitraum zwischen der Begründung und dem Einschlag eines Baumbestandes. Die Länge des Zeitraumes hängt sehr stark von der Baumart, aber auch vom gewünschten Nutzungsziel ab.

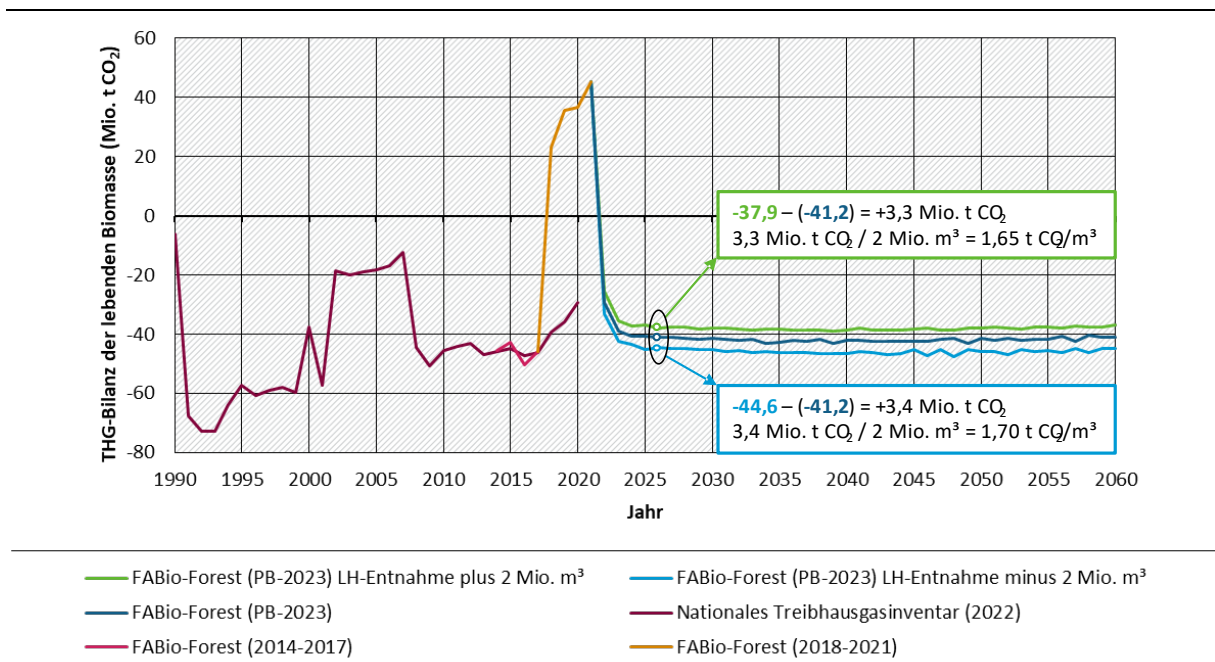
kommt es im Szenario „Waldvision“ durch die geringere Holzentnahme im Holzproduktspeicher zu Emissionen von 14 Mio. t CO₂ pro Jahr, da hier weniger Kohlenstoff gespeichert wird.

Beispiel zur Waldmodellierung – Extensivierung der Laubbaumentnahme

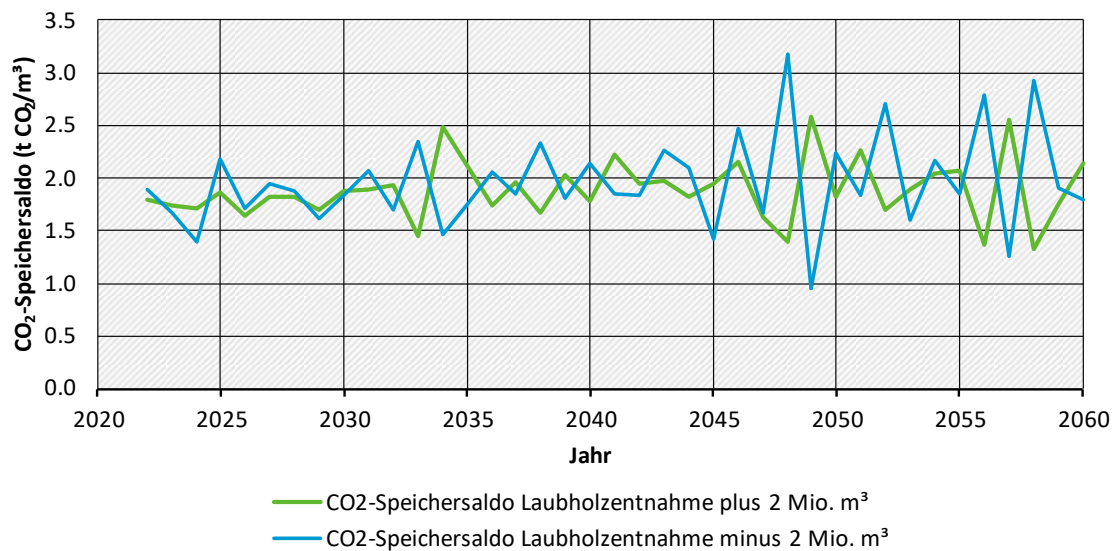
Im Rahmen der Modellierungsarbeiten im Arbeitspaket 1 des UBA-CARE-Projekts wird das Waldmodell FABio-Forest eingesetzt. In FABio-Forest wird der Holzeinschlag durch die Holznachfrage gesteuert. Vom Thünen-Institut wird im Rahmen des Projektionsberichts der Bundesregierung ein Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) berechnet (UBA-Projekt „Politikszenerien XI“). In Anlehnung an die getroffenen Annahmen wird an dieser Stelle ein Szenario in FABio-Forest abgebildet. Wichtige Annahmen sind: die Holzentnahme wird als Mittelwert der Jahre 2013 bis 2017 angenommen. Ebenfalls der Zuwachs und die natürliche Mortalität werden als Mittelwerte der Jahre 2013 bis 2017 eingestellt. Ausgehend von dem in FABio-Forest nachgestellten MMS wird an dieser Stelle als Variante angenommen, dass sich die Nachfrage nach Laubholz für Industrieholz um 2 Mio. m³ erhöht bzw. verringert (z. B. mehr bzw. weniger Scheitholznachfrage, Abbildung 4). Die Differenz der THG-Bilanz der lebenden Biomasse ist ein direktes Ergebnis der veränderten Laubholzentnahme. So kann die Differenz der THG-Bilanz mit den 2 Mio. m³ Laubholz ins Verhältnis gesetzt (siehe Beispielrechnung in der Abbildung 4) und der CO₂-Speichersaldo für jedes Jahr berechnet werden (siehe folgende Abbildung 5).

Dies Ergebnis zeigt, dass die zusätzliche Laubholzentnahme sowie die unterlassene Laubholzentnahme zu einer Veränderung der THG-Bilanz der lebenden Biomasse von etwa 1,7 t CO₂/m³ führt. Dieser Faktor sollte in produktbezogenen THG-Bilanzen für z. B. Scheitholz einbezogen werden.

Abbildung 4: Senkenleistung der lebenden Biomasse für das in FABio-Forest nachgestellte Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) sowie Varianten mit mehr und weniger Laubholzentnahme



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Abbildung 5: CO₂-Speichersaldo über die Zeit

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Kosten, die mit einer Erhöhung der Waldsenke durch eine veränderte Waldbewirtschaftung einhergehen, sind schwer zu bemessen. Der Vergleich der Waldszenarien WEHAM-Basisszenario und WEHAM-Naturschutzpräferenzszenario zur THG-Bilanz der Bäume und der Veränderung der Deckungsbeiträge in den beiden Szenarien ergab Kosten in Höhe von 30 EUR/t CO₂ (siehe Auswertung in Repenning et al. (2019)). Im laufenden BMUV-Projekt STRUBI⁹ werden aktuell Fördersätze für die Extensivierung von Laubwäldern auf Basis von Deckungsbeiträgen hergeleitet.

Minderungspotenziale durch die Etablierung neuer Waldfläche (Aufforstung)

In der EU-Biodiversitätsstrategie (EC 2020) und EU-Waldstrategie (EC 2021) wird das Ziel formuliert, dass bis 2030 insgesamt drei Milliarden Bäume gepflanzt werden sollen. Nähere Angaben, ob es sich dabei ausschließlich um Waldflächen handeln soll, werden dazu jedoch nicht gemacht. Laut Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK) würde der Anteil Deutschlands zur Erfüllung des Ziels ca. 120 Mio. Bäume auf bis zu 100.000 ha betragen. Für die Erreichung des Ziels müssten ab dem Jahr 2023 jedes Jahr 12.500 ha neue Waldfläche entstehen. Würde das Ziel der Vereinten Nationen zur globalen Waldmehrung von 3 % bis 2030 angestrebt werden, so müssten in Deutschland auf rund 340.000 ha neue Waldflächen entstehen, was einer Waldmehrung von jährlich 37.300 ha ab 2023 bedeuten würde. Laut Daten aus dem nationalen Treibhausgasinventar kamen in den Jahren 2016 bis 2020 jährlich ca. 8.000 ha netto an neuer Waldfläche in Deutschland hinzu (UBA 2022a). Dabei gingen rund 5.000 ha im Jahr an Waldfläche zugunsten von Siedlungsflächen verloren. Allerdings wuchs die Waldfläche gleichzeitig um ca. 13.000 ha jährlich. Diese Flächen stammen aus dem Grünland (UBA 2022a). Ein nur sehr geringer Teil neuer Waldfläche (6 ha pro Jahr) stammt aus Ackerflächen (UBA 2022a). Waldflächen, die aus Grünlandflächen stammen, sind häufig ein Ergebnis der natürlichen Sukzession, wenn das Grünland nicht mehr regelmäßig beweidet oder gemäht wird (Schoof et al. 2019). Hier kann im Laufe der Zeit erheblich viel atmosphärischer Kohlenstoff in der aufwachsenden Biomasse gespeichert werden. Bei der Sukzession von Grünland zu verbuschtem Grünland können bis zu -7 t CO₂/ha jährlich durch die holzigen Pflanzen sequestriert werden (UBA 2022a). Allerdings hat das Grünland, als extensiv genutztes Dauergrünland, einen sehr hohen Wert für die Biodiversität der hiesigen Kulturlandschaft. Es

⁹ BMUV-Projekt „Finanzielle Anreize für zusätzliche Klimaschutz- und Biodiversitätsleistungen im Wald - Wälder mit hoher Strukturvielfalt und Biodiversität (STRUBI)“.

profitieren eine Vielzahl seltener und gefährdeter Pflanzen-, Insekten- und Wiesenvogelarten von diesem einzigartigen Offenlebensraum (BfN 2014; Schoof et al. 2019). Daher sollten bevorzugt andere Flächen, wie wenig ertragreiche Äcker, für die Entwicklung von zukünftigen Wäldern genutzt werden.

Der bereits benannte jährliche Verlust an Waldfläche von 5.000 ha, durch die Erweiterung von Siedlungsflächen, z.B. in Form von Infrastruktur in den Jahren 2016 bis 2020, führte zu Emissionen von ca. 1 Mio. t CO₂äq pro Jahr (UBA 2022a). Im Kontrast dazu müssen neu gepflanzte Bäume zunächst einmal über einen langen Zeitraum wachsen, um eine Biomasse und Kohlenstoffspeicherleistung aufbauen zu können, die mit einem bestehenden Waldbestand vergleichbar ist.

Bei einer aktiven Umwandlung von z.B. verbuschten Grünland- zu Waldflächen können zunächst auch Emissionen auftreten, wenn bereits vorhandene Biomasse in Sträuchern und Bäumen ganz oder teilweise entfernt wird, um gewünschte Waldbaumarten zu fördern oder anzupflanzen. Außerdem kann es in den frühen Phasen des Waldaufwuchses zu Emissionen durch die Pflege des Jungbestandes (Durchforstung¹⁰) kommen.

Im Klimaschutzgutachten der wissenschaftlichen Beiräte des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (WBAE 2016) wurde das Minderungspotenzial für Aufforstung auf Grundlage der Baumartenverteilung aus der Altersklasse 1 bis 20 Jahre der BWI 3 aus dem Jahr 2012 mit einem Anteil von 58 % Laubbäumen und 42 % Nadelbäumen berechnet. Bis zum Jahr 2030 beträgt das jährliche Minderungspotenzial ca. -2,5 t CO₂/ha bezogen auf die Biomasse, Streu und das Totholz. Aufgrund des älter werdenden Baumbestandes steigt vor allem die Akkumulation von Kohlenstoff in der Biomasse an und erreicht ein jährliches Minderungspotenzial bis 2050 von ca. -3,7 t CO₂/ha (WBAE 2016). Dieses Minderungspotenzial ist deutlich geringer im Vergleich zu dem, was aus den berichteten Daten des aktuellen deutschen Treibhausgasinventars berechnet werden kann (UBA 2022a): Für die Umwandlung von Ackerland auf mineralischen Böden zu Wald ergibt sich aus den Pools der lebenden Biomasse, des mineralischen Bodens, Totholzes und der Streu eine über 20 Jahre betrachtete, durchschnittliche jährliche Minderung von -6,6 t CO₂/ha. Wird dieses flächenbezogene Minderungspotenzial auf die Zielsetzung der jährlichen Waldflächenmehrung für Deutschland basierend auf der Biodiversitäts- und Waldstrategie der EU bezogen von 12.500 ha jährlich bezogen (s.o.), so ergibt sich ein akkumuliertes Gesamtminderungspotenzial von -0,8 Mio. t CO₂ für die Jahre 2023 bis 2030. Dieses Minderungspotenzial, das sich über 7 Jahre aufbaut, liegt noch immer deutlich unter den Emissionen von 1 Mio. t CO₂, die allein durch die Umwandlung von Waldflächen zu Siedlungen im Jahr 2020 entstanden sind (s.o.). Daher ist der Schutz bestehender Waldflächen eine sehr wichtige Maßnahme, um zukünftig Emissionen zu verhindern und bestehende Kohlenstoffsenken zu schützen.

Darüber hinaus liegen aktuell keine verbindlichen Flächenziele für die Waldmehrung vor, weshalb eine Aussage zu dem tatsächlich erreichbaren Minderungspotenzial nicht möglich ist. Die Flächenkonkurrenz unter den verschiedenen Landnutzungsarten ist sehr hoch und die Priorisierung einer bestimmten Nutzung kann sich sehr schnell durch politische Prozesse ändern. Dies wurde besonders im Zuge der russischen Invasion in die Ukraine deutlich, als die Europäische Kommission die temporäre Wiederaufnahme der landwirtschaftlichen Produktion auf bisher brach liegendem Ackerland bewilligte (European Commission 2022). Somit könnten wichtige potenzielle Aufforstungsflächen gegebenenfalls nicht mehr zur Verfügung stehen.

¹⁰ In der Forstwirtschaft bezeichnet die Durchforstung eine Pflegemaßnahme für den Baumbestand, bei der eine Anzahl Bäume gezielt entnommen werden. Die Gründe der Entnahme können vielfältig sein, z. B. zu schwache, abgestorbene oder nicht dem Wunsch entsprechend gewachsene Bäume. Das allgemeine Ziel einer Durchforstung ist die Förderung von Bäumen, die dem entsprechenden Nutzungsziel dienen, z. B. Konstruktionsholz.

Im Klimaschutzgutachten der wissenschaftlichen Beiräte des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (WBAE 2016) wurde von einem Aufforstungspotenzial auf landwirtschaftlichen Flächen von 850.000 ha zwischen den Jahren 2012 und 2050 ausgegangen. Dies bedeutet, dass seit 2012 ca. 22.000 ha im Jahr an landwirtschaftlicher Fläche in Wald hätten, umgewandelt werden können. Bisher wurde dies nicht erreicht.

Für die Planung von möglichen Flächen für Aufforstungen sollten neben der rechtlichen Verfügbarkeit vor allem ökologische Ziele berücksichtigt werden. Wie bereits erwähnt sollten insbesondere ertragsarmes Ackerland für die Erweiterung der Waldfläche verwendet werden, um artenreiche Grünlandflächen vor weiterer Umwandlung zu schützen. Außerdem sollten die Waldmehrfungsflächen nach Möglichkeit so geplant werden, dass sie durch die Landwirtschaft, Infrastruktur und Siedlungen zerschnittenen Waldstücke miteinander verbinden können. Aufgrund der häufig fehlenden zusammenhängenden Waldflächen in Deutschland kann es für an Wald gebundene Arten problematisch sein zu wandern, um beispielsweise ein neues Revier zu erschließen. Daher empfiehlt der Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik beim BMEL (2021), insbesondere die Vernetzung und Erweiterung von Lebensräumen bei der Aufforstung zu berücksichtigen. Eine wichtige Grundlage könnten die modellierten Waldkorridore zur Verbindung von Wildkatzenpopulationen in Deutschland darstellen, da sich die Wildkatze als Leitart für den Biotopverbund eignet (Fischer 2022; Klar et al. 2008). Demnach besteht vor allem Bedarf für Biotopverbund im südlichen Raum Deutschlands, sowie im Nordosten und Mitteldeutschland (Klar et al. 2008).

Eine Neuanlage von Wald wird im Rahmen der GAK mit ca. 9.000 Euro/ha gefördert. Die Förderung deckt nur die Kosten der Neuanlage der Waldfläche ab, nicht jedoch die Einkommensverluste einer vorhergehenden Nutzung einer Ackerfläche. Hierin ist u. a. der Grund zu sehen, dass im Jahr 2020 eine Förderung für eine Kulturbegründung nur auf ca. 90 ha in Anspruch genommen wurde (siehe Maßnahme D. Erstaufforstung in BMEL (2024)). Um eine Neuanlage von Wald attraktiv zu gestalten, müsste der Wertverlust der Fläche bei Umwandlung von z. B. Ackerland mit einem hohen Verkehrswert hin zu Wald mit einem niedrigen Verkehrswert entschädigt werden. Je nach Region in Deutschland müssten die genannten Fördermittel um ein 2- bis 3-faches höher sein.

Überblick zur Senkenleistung in Wäldern und zur Mehrung der Waldfläche

Einspeicherungspotenzial

Durch die Extensivierung der Waldbewirtschaftung (Verlängerung der Umtriebszeiten im Laubholz, Anhebung der Zieldurchmesser im Laubholz, Schutz von bestehenden Laubwäldern) können im Jahr 2052 je nach Modell und Szenario bis zu -35 Mio. t CO₂ (WEHAM-NPS) und -48 Mio. t CO₂ (Waldvision) in der lebenden Biomasse gespeichert werden. Das flächenspezifische Potenzial durch die unterlassene Holzentnahme von Buchen und Eichen >120 Jahren (Durchschnitt 5,5 m³/ha) liegt bei ca. -5,5 t CO₂/ha/Jahr. Durch die Etablierung neuer Waldfläche auf Ackerland können im Schnitt -6,6 t CO₂/ha (beteiligte Pools: lebende Biomasse, mineralischer Boden, Totholz, Streu) an jährlicher Minderungsleistung erreicht werden.

Zeitliche Verfügbarkeit des Potenzials

Durch die Extensivierung des Holzeinschlags erfolgt zeitnah (ein Jahr) ein Vorratsaufbau. Dieser wird erst nach vielen Jahrzehnten in eine Sättigung gehen, da die Wälder in Deutschland jung sind (ca. 70 Jahre im Mittel). Bei der Etablierung von neuer Waldfläche wird das Minderungspotenzial über einen Zeitraum von min. 10 Jahren aufgebaut, da die Bäume zunächst noch wachsen müssen, bis sie substanzial CO₂ sequestrieren können.

Risiken und Einschränkungen

Die Klimaschutzleistung der Wälder kann, durch verringerten Holzzuwachs und erhöhte Mortalität

von Bäumen aufgrund natürlicher Störungen, wie Stürme, Dürreperioden, Schädlingsbefall und Krankheiten, eingeschränkt sein. Auch Flächen auf denen neue Waldflächen etabliert werden sollen, können insbesondere lange Dürreperioden dazu führen, dass die jungen Bäume absterben. Der fortschreitende Klimawandel stellt dabei ebenfalls ein Risiko dar, da sich die Intensität und Frequenz von Störungsereignissen erhöhen kann. Darüber hinaus spielt auch die Bestandesstruktur, wie z.B. die Baumartenzusammensetzung und die Altersstruktur der Bäume eine Rolle für die Resilienz gegenüber Störungen. Insbesondere Baumarten, die nicht an den Standort angepasst sind, Monokulturen und gleichaltrige Bestände haben besonders hohe Risiken durch Störungen betroffen zu sein. Neben natürlichen Störungen hat auch die Intensität der Holzernte einen direkten Einfluss auf die lebende Biomasse im Wald. Sollte der Bedarf an Holzprodukten zukünftig ansteigen, kann sich dies negativ auf die Waldsenke auswirken. Auf der anderen Seite kann ein verringerter Holzeinschlag dazu führen, dass weniger Holzprodukte zur Verfügung stehen. Für die Klimaschutzwirkung insgesamt ist dabei jedoch auch entscheidend, ob das geerntete Holz energetisch oder stofflich und über einen möglichst langen Zeitraum hinweg genutzt wird (siehe 2.2). Außerdem müssen für Waldbesitzende alternative Einkommensquellen zur Verfügung stehen, wenn diese weniger Holz einschlagen. Für die Etablierung von neuen Waldflächen stellt eine fehlende Flächenverfügbarkeit ein hohes Risiko dar. Aus naturschutzfachlicher Sicht sollte artenreiches Grünland nicht für die Waldmehrung genutzt werden. Darüber hinaus wächst der Bedarf an landwirtschaftlicher Fläche, wenn zukünftig Ackerflächen extensiviert werden, z.B. durch ökologische Landwirtschaft. Außerdem werden durch die Wiedervernässung organischer Böden ebenfalls weniger landwirtschaftliche Flächen zur Verfügung stehen. Dadurch könnte die Produktion von landwirtschaftlichen Gütern weiter ins Ausland verlagert werden. Dabei ist jedoch das Ausmaß dieser Verlagerungsprozesse auch sehr stark vom Lebensmittelkonsum beeinflusst. Insbesondere der aktuelle Verbrauch an tierischen Lebensmitteln fußt auf einen hohen Flächenbedarf, vor allem für den Futteranbau.

Synergien mit weiteren Ökosystemleistungen

Wälder sind als die größten Ökosysteme in Deutschland ebenfalls wichtig für den Erhalt der Biodiversität. Eine besondere internationale Verantwortung trägt Deutschland für die Buchenwälder und seine Artengemeinschaften. Der Schutz von naturnahen Wäldern kann somit nicht nur zum Vorratsaufbau und -schutz beitragen, sondern auch um Biodiversitätsschutzziele zu erreichen. Insbesondere ältere Baumbestände und hohe Totholzvorräte tragen zum Erhalt walddtypischer Arten bei und können durch ihren hohen Holzvorrat und langsamen Mineralisierungsprozess des Totholzes ebenfalls zur Kohlenstoffspeicherung beitragen. Bei der Etablierung von neuen Waldflächen durch Sukzession können sich ebenfalls Synergien mit dem Biodiversitätsschutz ergeben, da die unterschiedlichen Waldentwicklungsstadien jeweils verschiedenen Arten einen Lebensraum bieten können. Außerdem spielen Wälder eine wichtige Rolle im Landschaftswasserhaushalt und wirken als Wasserfilter und tragen zur Wasserretention bei. Darüber hinaus können sie die Auswirkungen von Extremwetterereignissen abpuffern, indem sie Erdbeben verhindern, Sturmböen abschwächen und zur Kühlung der Umgebung bei Hitze beitragen. Wälder tragen auch wesentlich zur Erholung bei und werden vielfältig für Freizeitaktivitäten genutzt.

2.2 Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten

Durch die Holzernte verringert sich der Kohlenstoffspeicher in der Waldbiomasse, während sich der Speicher der Holzprodukte entsprechend erhöht. Somit steht der Kohlenstoffvorrat in der lebenden Waldbiomasse im direkten Zusammenhang mit dem Holzproduktespeicher. Vom Wald aus betrachtet, stellt das geerntete Holz eine Emission dar, jedoch wird diese durch die Verwendungsdauer des Holzproduktes verzögert an die Atmosphäre abgegeben. Lediglich bei einer energetischen Nutzung von Holz entstehen direkt Emissionen.

Die Berechnung des Holzproduktespeichers ist sehr komplex, da die durchschnittliche Lebensdauer von Holzprodukten sehr unterschiedlich ist. Beispielsweise beträgt die Halbwertszeit des Holzproduktespeichers von Sägeholz 35 Jahre, von Holzwerkstoffen 25 Jahre und von Papier oder Pappe 2 Jahre (UBA 2022a). Zusätzlich müssen auch das Recycling von Holz sowie die energetische Nutzung in der Bilanz berücksichtigt werden. Laut nationalem Inventarbericht betrug der Holzproduktespeicher in den Jahren 2012 bis 2017 im Mittel -2,9 Mio. t CO₂äq/Jahr (UBA 2022a). Mit der erhöhten Holzentnahme aufgrund starker natürlicher Störungen und gestiegenen Exporten in den Jahren 2018 bis 2020 erhöhte sich der Holzproduktespeicher im Mittel auf -7,8 Mio. t CO₂äq/Jahr (UBA 2022a). Im Jahr 2020 wurden insgesamt rund 25 % (20 Mio. m³) des gesamten Rohholzeinschlags energetisch verwendet. Dabei wurden 77 % (12 Mio. m³) der Laubrohholzernte und rund 13 % (8 Mio. m³) des Nadelrohholzes direkt verbrannt (Thünen-Institut 2022). Der überwiegende Teil des Nadelrohholzes wurde zu Sägeholz (62 %, 39 Mio. m³) verarbeitet und somit stofflich verwertet.

Nadelholz eignet sich aufgrund seiner vorteilhaften Eigenschaften besonders gut für den Holzbau (WBGU 2020b). Die Holzbauquote bei Wohngebäuden hat sich in Deutschland seit 2010 stetig erhöht und lag 2020 bei rund 19 %. Dabei machten Einfamilienhäuser den größten Anteil aus. Bei Nicht-Wohngebäuden sind es überwiegend landwirtschaftliche Betriebsgebäude, die mit Holz gebaut werden (Schmitz et al. 2022). Zusätzlich können durch die Verwendung von Holz im Hausbau Emissionen aus energieintensiven Materialien wie Stahl und Beton vermieden werden. Die Effekte dieser Substitution sind vor allem abhängig von der Art des Energieträgers (fossil oder erneuerbar), mit dem diese Baurohstoffe hergestellt wurden. So kann sich die Klimabilanz von Nichtholzprodukten verbessern, wenn für deren Fertigung erneuerbare Energien eingesetzt werden können. Die Substitutionseffekte von Holzprodukten werden allerdings nicht im LULUCF-Sektor bilanziert, sondern in den jeweiligen Sektoren, in denen sie schließlich eingesetzt werden.

Die Verwendung von langlebigen Holzprodukten und recyceltem Holz kann insbesondere im Bausektor einen positiven Beitrag zum Klimaschutz (WBGU 2020a). In einer deutschlandweiten Studie von Rüter und Hafner (2021) wurde eine kontinuierliche Steigerung der Holzbauquote auf 55 % für Ein- und Zweifamilienhäuser und 15 % für Mehrfamilienhäuser von 2016 bis 2030 angenommen. Die Höhe des THG-Einsparpotenzials ergab 1,4 Mio. t CO₂äq/Jahr, wobei etwas mehr als die Hälfte des Potenzials (0,78 Mio. t CO₂äq/Jahr) durch Substitutionseffekte erzielt werden konnte und der andere Teil (0,65 Mio. t CO₂äq/Jahr) durch den Effekt der Kohlenstoffspeicherung des verbauten Holzes. Um die Steigerung der Holzbauquote zu realisieren, mussten rund 1,9 Mio. m³/Jahr mehr an Rohholz verwendet werden. Die dadurch entstehende Reduktion der Kohlenstoffsénke im Wald muss berücksichtigt werden. Diese liegt bei ca. 1 Mio. t CO₂äq/Jahr. Dadurch ergibt sich insgesamt ein Minderungsbetrag durch den vermehrten Einsatz von Bauholz von 0,43 Mio. t CO₂äq/Jahr, beziehungsweise 6,5 Mio. t CO₂äq über den Zeitraum von 2016 bis 2030 (Rüter 2019; Rüter und Hafner 2021; Hafner et al. 2017). Werden allein die Senkung des Kohlenstoffspeichers der Waldfläche und die Erhöhung des Holzproduktespeichers betrachtet, so tritt in Summe ein Verlust im Kohlenstoffspeicher auf. Der positive Beitrag zur THG-Bilanz des Bauholzes, tritt nur dann auf, wenn auch eine Substitutionsleistung erreicht wird. Die vermehrte stoffliche Verwendung von Holz, insbesondere im Hausbau, wird auch in der „Charta für Holz 2.0“ aufgegriffen (BMEL 2021b). Dabei sollen sowohl die Kaskadennutzung von Holz als auch die stoffliche Verwendung von Laubholz konsequent optimiert und weiterentwickelt werden. Dies kann schließlich auch dazu beitragen, dass der Druck einer steigenden Nachfrage des Holzrohstoffs nicht zu Lasten der ökologischen Qualität von heimischen Wäldern oder Wäldern im Ausland führt.

Überblick zur Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten

Speicherpotenzial

Aktuell ist die Studienlage zum Potenzial von Holzprodukten in Deutschland sehr dünn. Die durchschnittliche Kohlenstoffspeicherung von Holzprodukten in den Jahren 2012 bis 2017 lag bei - 2,9 Mio. t CO₂äq/Jahr. Das zusätzliche Holzproduktspeicherpotenzial durch den verstärkten Einsatz von Bauholz liegt bei 0,65 Mio. t CO₂äq/Jahr. Dem gegenüber stehen jedoch ein Verlust an Kohlenstoffspeicher im Wald von 1 Mio. t CO₂äq/Jahr.

Zeitliche Verfügbarkeit des Potenzials

Theoretisch steht die Kohlenstoffspeicherung durch das Holzprodukt direkt zur Verfügung, jedoch ist die Verfügbarkeit des Speicherpotenzials an den Aufbau von Kapazitäten für die Herstellung und den Einsatz der Holzprodukte gebunden.

Risiken und Einschränkungen

Würde zukünftig ein hoher Bedarf an Bauholz bestehen, der zu einer erhöhten Holzernte führt, dann würde die Senkenleistung des Waldes entsprechend abnehmen. Wird die Holzernte nicht erhöht, um die Senkenleistung zu erhalten, müsste die Nachfrage nach anderen Holzprodukten sinken, oder es müsste Holz importiert werden. Dies kann mit Risiken für den Schutz der Ressourcen und der Biodiversität im Herkunftsland verbunden sein.

Synergien mit weiteren Ökosystemleistungen

Die Verwendung von Holz als langlebiges stoffliches Holzprodukt oder als Energieholz, hat keinen direkten Einfluss auf die Ökosystemleistungen der Wälder. Gegebenenfalls ergeben sich Änderungen in der Waldbewirtschaftung, wenn ein bestimmtes Holzprodukt angestrebt wird, die sich dann wiederum auf die Altersstruktur und die Baumartenzusammensetzung auswirken können und somit auch auf die Waldökosystemleistungen.

2.3 Erhalt und mögliche Erhöhung des Kohlenstoffspeichers in organischen Böden (Ackerland, Grünland, Wald)

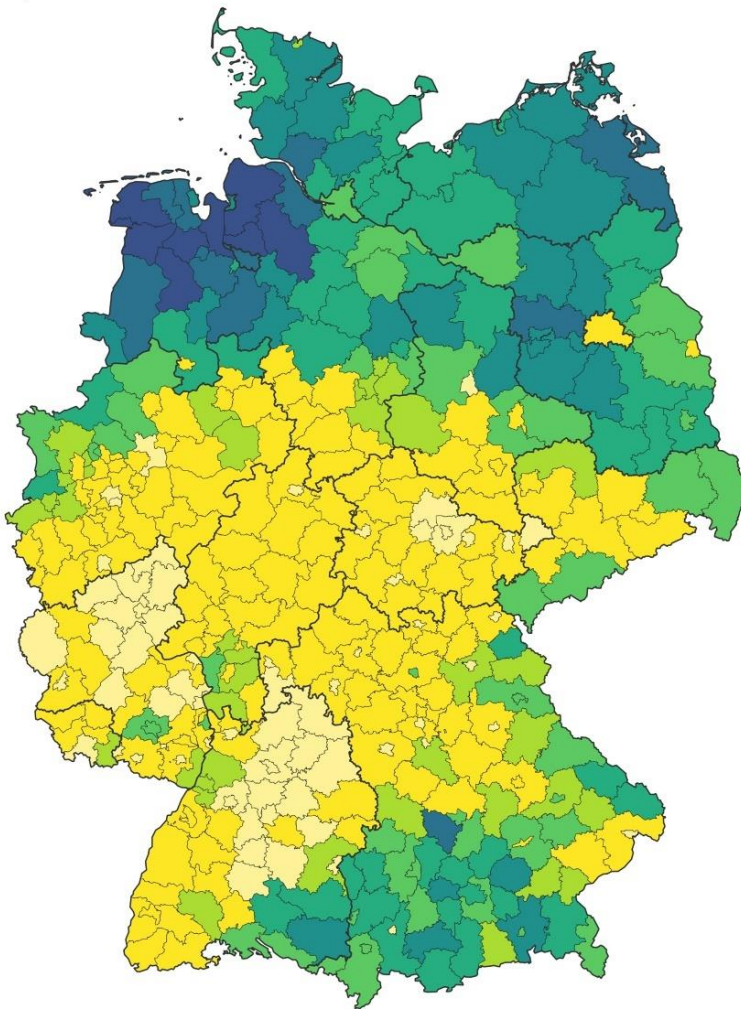
Bereits seit vielen Jahrhunderten wurden im Zuge der Ausbreitung der Landwirtschaft und von Siedlungen Moore in Deutschland entwässert. Moorböden besitzen eine im Vergleich zu mineralischen Böden, sehr große Menge an organischer Substanz, die sich durch den wassergesättigten Zustand unter Sauerstoffausschluss akkumulieren konnte. Daher werden sie häufig als organische Böden bezeichnet. Laut Definition des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2006) müssen organische Böden mindestens 12 bis 18% organischen Kohlenstoff (C_{org}) in der Trockenmasse enthalten und mehr als 10 cm mächtig sein. Der im organischen Boden der Moore gespeicherte C_{org} entweicht durch das Herabsetzen des Wasserspiegels über Oxidation in die Atmosphäre.¹¹ Im Jahr 2020 waren in Deutschland 1,8 Mio. ha Fläche organische Böden, die sich über alle Landnutzungsklassen verteilen. Diese Flächen emittierten 53 Mio. t CO₂äq. Dies entspricht 7,5 % aller Treibhausgasemissionen in Deutschland. Der größte Anteil der Emissionen stammt aus organischen Böden unter Grünland (27 Mio. t CO₂ von insgesamt 28,7 t CO₂äq/ha) und unter Ackerflächen (11 Mio. t CO₂äq von insgesamt 34,6 t CO₂äq/ha). Am geringsten fallen die Emissionen aus organischen Böden unter Wäldern aus mit 3 Mio. t CO₂äq von 11,2 t CO₂äq/ha (UBA 2022a; 2023a). Dies liegt daran, dass nur gut 75 % der Waldflächen auf organischen Böden drainiert sind, die Bodenbearbeitung gering ist und die Bäume auf der Waldfläche Kohlenstoff binden. Folglich sind hier eher geringe Minderungspotenziale zu erwarten. Eine weitere Emissionsquelle stellt der Torfabbau dar, der zu Emissionen von rund

¹¹ Die THG-Emissionsfaktoren zu organischen Böden im deutschen Treibhausgasinventar beziehen sich vor allem auf Tiemeyer et al (2020). Auch gute Hinweise auf die THG-Emissionen für verschieden starke Wasserstandsanhörungen geben Werte in Reichelt und Lechtape (2019, GEST-Ansatz).

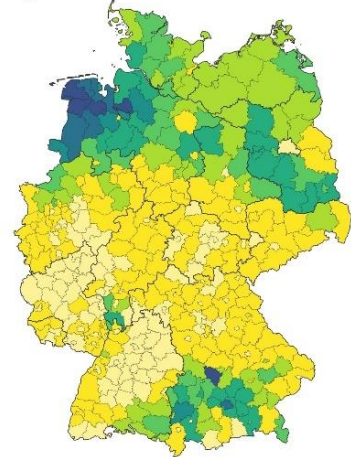
2,3 Mio. t CO₂äq im Jahr 2020 führte. Die Emissionen stammen überwiegend aus der Verwendung von Torfprodukten, aber auch direkt aus den Abbaugebieten (UBA 2022a). Torf ist noch immer ein häufig eingesetztes Substrat im privaten und kommerziellen Gartenbau. In Deutschland wird Torf überwiegend in Niedersachsen von brachliegenden landwirtschaftlichen Flächen entnommen (BMEL 2020). Der Torf wird so lange abgebaut, bis eine Schicht von mindestens 50 cm verbleibt. Dann wird die Fläche wiedervernässt, sodass mittelfristig eine Renaturierung erfolgen kann (MU und NLÖ 2003).

Abbildung 6: Anteil der organischen Böden in den Landkreisen

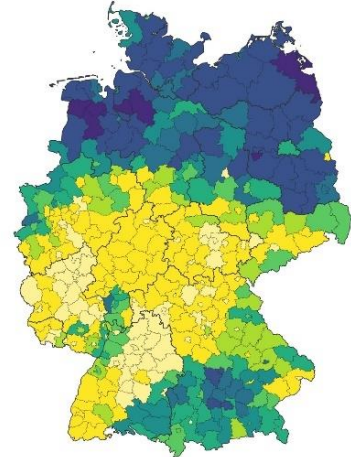
a) Gesamte Fläche



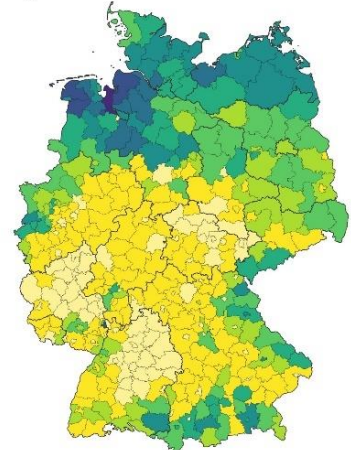
b) Ackerland



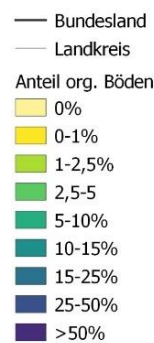
c) Grünland



d) Wald



Anteil an organischen Böden	Anzahl an Landkreisen			
	Gesamte Fläche	Ackerland	Grünland	Wald
0%	67	123	78	93
0-1%	154	148	112	135
1-2,5%	37	52	33	51
2,5-5%	47	32	32	45
5-10%	49	28	38	35
10-15%	27	6	22	26
15-25%	12	6	32	10
25-50%	9	7	47	6
>50%	0	0	8	1

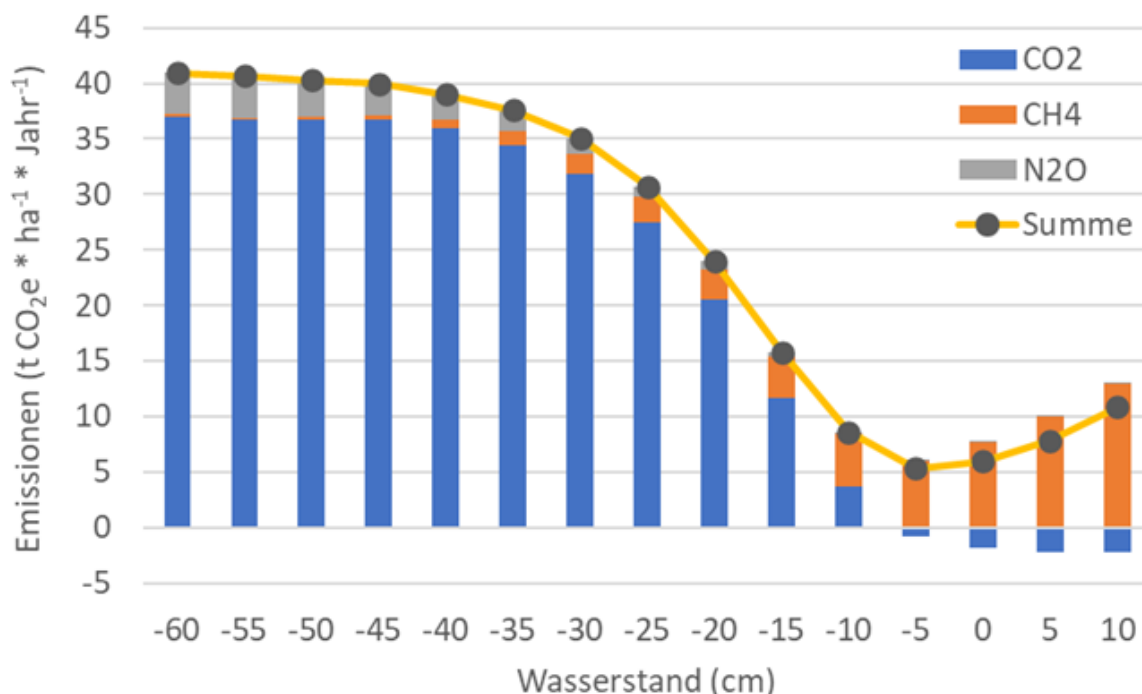


Anmerkung: Aufbauend auf Daten in Tiemeyer et al. (2021) und unter Verwendung von Informationen des Copernicus Land Monitoring Service der Europäischen Union (2018).

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Besonders hohe Anteile an organischen Böden haben die Landkreise im nordwestlichen Niedersachsen, in Mecklenburg-Vorpommern und im westlichen Brandenburg sowie im südlichen Bayern. Im Nordwesten von Niedersachsen liegen die meisten Landkreise mit Anteilen von mehr als 25 % und 15-25 % an organischen Böden. In den restlichen Teilen Niedersachsens, in Mecklenburg-Vorpommern und Südbayern dominieren die Anteile zwischen 5 und 15 % (Abbildung 6). Die überwiegende Nutzung der organischen Böden ist Grünland zur Futtergewinnung für Milchkühe und Mastrinder. In den Landkreisen mit Anteilen organischer Böden über 10 % sind die Potenziale für die Vermeidung von Emissionen durch das Anheben des Wasserspiegels besonders hoch. Im Durchschnitt erreichen die Wasserspiegel im Grünland $-0,5$ m und im Ackerland $-0,6$ m. Durch das Anheben des Wasserspiegels auf $\geq -0,1$ m kann der noch vorhandene Torfkörper vor der Zersetzung geschützt werden und ein großer Teil der Emissionen wird unmittelbar vermieden (Tiemeyer et al. 2020). Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 7 illustriert: mit steigendem Wasserstand sinken die CO_2 - und auch die Lachgas-Emissionen, die Methanemissionen aus Zersetzung unter Sauerstoffausschluss steigen aber gleichzeitig an. Ein THG-optimiertes Management von organischen Böden kann bei Wasserständen zwischen $-0,1$ m und $0,0$ m erreicht werden (Abbildung 7).

Abbildung 7: Treibhausgasbilanz von organischen Böden in Abhängigkeit vom mittleren jährlichen Wasserstand



Quelle: Darstellung aus Hennenberg und Böttcher (2023), angelehnt an Tiemeyer et al. 2021.

Allerdings ist dann ein Anbau von Futterpflanzen und herkömmlichen Feldfrüchten sowie eine intensive Weidenutzung für die meisten Rinderrassen nicht mehr möglich. Dennoch ist auch unter nasserem Verhältnissen eine Grünlandbewirtschaftung als extensive Weidefläche möglich. Bei sehr nassen Verhältnissen können Wasserbüffel für die Beweidung eingesetzt werden. Zusätzlich zum Klimaschutz bietet extensiv genutztes Feuchtgrünland einer Vielzahl von Pflanzen- und Tierarten einen Lebensraum (Isselstein 2018). Um weiterhin eine Landwirtschaft unter nassen Anbaubedingungen zu ermöglichen, können sogenannte Paludikulturen, wie

Rohrkolben (Typha), Schilfrohre (Phragmites) und Torfmoose (Sphagnum), eine Alternative darstellen (Wichtmann et al. 2016).

Bereits 2016 wurden im Klimaschutzgutachten der beiden Beiräte (WBAE 2016) drei Szenarien zur Minderung von Emissionen aus organischen Böden präsentiert. Insgesamt werden durch die Maßnahmen über einen Zeitraum von 20 Jahren Minderungen zwischen 7 und 15,2 Mio. t CO₂äq jährlich erzielt (Tabelle 1). In den Szenarien werden unterschiedliche Anteile an Extensivierungs- und Wiedervernässungsflächen angenommen. Zusätzlich wurde für die Berechnung der Minderungspotenziale, je nach Tiefe des Wasserstandes, von Emissionsminderungen zwischen 20 und 40 t CO₂äq/ha ausgegangen. Bei der Nutzungsumstellung von Acker- oder Intensivgrünland auf extensiv genutztes Grünland wurden Emissionsminderungen von bis 20 t CO₂äq/ha angenommen.

Tabelle 1: Szenarien zu Minderungspotenzialen für die Extensivierung und Wiedervernässung von organischen Böden über einen Zeitraum von 20 Jahren

Szenarien zur Emissionsminderung aus organischen Böden	Fläche Wiedervernässung in Mio. ha	Annahme Minderungspotenzial in t CO ₂ äq/ha für die Wiedervernässung	Fläche für die Extensivierung in Mio. ha	Annahme Minderungspotenzial in t CO ₂ äq/ha für die Extensivierung	Minderungspotenzial gesamt in Mio. t CO ₂ äq pro Jahr
Szenario a)	0,1	40	0,2	-15	7
Szenario b)	0,2	30	0,4	-10	12
Szenario c)	0,3	20	0,6	-6	15

Quelle: WBAE (2016)

In weiteren Szenarien von Tanneberger et al. (2021) werden ebenfalls Emissionsminderungen auf den organischen Böden unter Acker- und Grünlandflächen (-1,5 Mio. ha) durch Maßnahmen von 2020 bis 2030 und 2050 betrachtet. Dabei wird der Torfabbau bis 2030 komplett eingestellt, und es erfolgt eine vollständige Umwandlung von Ackerland auf organischen Böden zu Grünland. Darüber hinaus werden die Wasserstände im Grünland bis auf ein jährliches Mittel von -30 cm angehoben. Auf insgesamt 15 % der Grünlandfläche findet eine vollständige Vernässung statt. Durch diese Maßnahmen können bis 2030 Emissionen von bis zu 17 Mio. t CO₂ vermieden werden. Im Jahr 2050 wird dann von einer vollständigen Wiedervernässung der organischen Böden im Grünland ausgegangen, was zu einer Minderung der Emissionen gegenüber 2020 von bis zu 35,8 Mio. t CO₂ führen kann (Tanneberger et al. 2021).

Etwas geringere Minderungen werden in einem Szenario für die dena-Leitstudie (dena 2021) erreicht. Dies liegt zum einen an einem später einsetzenden Ausstieg aus dem Torfabbau in 2040 und zum anderen werden bis 2050 lediglich 62 % der landwirtschaftlich genutzten organischen Böden wiedervernässt. Bis 2030 wird eine Wiedervernässung allerdings bereits auf 20 % der Flächen mit organischen Böden und zusätzlich eine Bewirtschaftung mit Paludikulturen auf 50 % der Flächen angenommen. Gegenüber dem Jahr 2020 werden durch den Moorbodenschutz im Jahr 2045 Minderungen von -16 Mio. t CO₂äq (Öko-Institut 2021) erreicht.

Die Minderung von Emissionen aus Moorböden (organischen Böden) als wichtiges Klimaschutzziel ist bereits durch die Bund-Länder-Zielvereinbarung im November 2021 bekräftigt worden (BMEL 2021c). Ebenfalls wird hier darauf hingewiesen, dass für eine langfristige positive Klimawirkung der Wiedervernässungsmaßnahmen eine dauerhafte Änderung der Nutzung von organischen Böden notwendig ist. Eine zusätzliche Herausforderung könnte der fortschreitende Klimawandel sein, der in einigen Regionen Deutschlands, wie dem

Nordosten, zu verminderten Niederschlägen und damit einhergehenden sinkenden Wasserspiegeln in wiedervernässten Flächen führen könnte. Dadurch würden – trotz angestrebter Wiedervernässung – wieder Emissionen freigesetzt, wie auch in der Emissionsdynamik in Abbildung 7 erkennbar. Kann aufgrund von Wassermangel in einer Region nur ein Wasserstand von -0,15 m statt von -0,10 m erreicht werden, bedeutet dies höhere Emissionen von gut 7 t CO₂äq/ha. Bei nur -0,20 m statt -0,10 m steigen die Emissionen um etwa 15 t CO₂äq/ha. Dieser Aspekt sollte in Szenarienanalysen als Sensitivität berücksichtigt werden.

Der Druck auf den Landschaftswasserhaushalt ist bereits durch den hohen Wasserverbrauch von Siedlungen, Industrie und landwirtschaftlichen Flächen sehr hoch und müsste im Zuge der Wiederherstellungsmaßnahmen entsprechend angepasst werden. Schließlich werden die Maßnahmen zur Wiedervernässung organischer Böden vielfach eine Erhöhung der Wasserstände im gesamten Wassereinzugsgebiet, in dem die organischen Böden liegen, notwendig machen (Swindles et al. 2019). Dabei sind die Belange möglicher betroffener Landnutzer*innen und Bewohner*innen sowie Restriktionen z. B. durch Infrastruktur zu berücksichtigen.

Zusätzlich kann das Emissionsminderungspotenzial der Wiedervernässung durch Methanemissionen reduziert werden. Diese werden durch methanogene Bakterien bei der Wiedervernässung verursacht (Hendriks et al. 2007). Grund hierfür ist die nährstoffreiche obere Bodenschicht (5-20 cm), die durch die Jahrzehnte lange Nutzung der organischen Böden als Acker entstanden ist und dann durch die Bakterien unter Sauerstoffausschluss zersetzt wird. Allerdings können bis zu 99 % der Methanemissionen reduziert werden, wenn die oberste Bodenschicht vor der Wiedervernässung abgetragen wird (Harpenslager et al. 2015).

Kosten für die THG-Minderung durch Moorbodenschutz werden mit einer großen Spannbreite von 27-107 EUR/t CO₂äq bei einem Mittelwert von 67 EUR/t CO₂äq angegeben (vgl. Zusammenstellung in Harthan et al. (2020)). Bei der Kostenbetrachtung bestehen aber hohe Unsicherheit, da die Literaturwerte häufig aus Naturschutzprojekten mit Flächenkauf stammen und eine Übertragbarkeit auf Moorbodenschutz ohne einen Fokus auf Naturschutz nur eingeschränkt möglich ist. In Wichmann et al. (2022) sind Planungs- und Baukosten für Wiedervernässungsprojekte mit unterschiedlicher Zielstellung zusammengestellt. Es zeigt sich, dass diese Kosten in Projekten mit einem Fokus auf die Minderung der THG-Emissionen bei 3.000 EUR/ha liegen. Liegt zusätzlich aber ein Fokus auf Naturschutz oder Gewässerschutz, so steigen die Planungs- und Baukosten um etwa das Vierfache auf über 11.000 EUR (Tabelle 2).

Tabelle 2: Planungs- und Baukosten von Wiedervernässungsprojekten

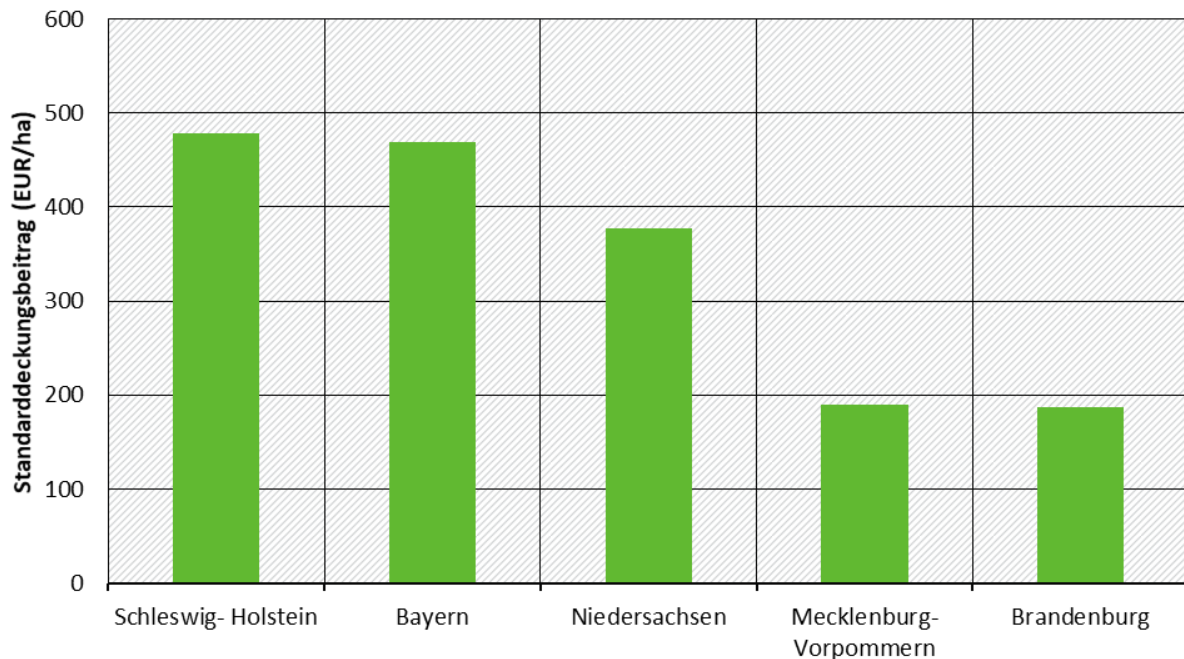
Zielstellung	Anzahl Projekte	Fläche (ha)		Kosten (2019) (EUR/ha)	
Moorschutz	8	27.803		3.019	
Paludikultur	2	323	28.191	2.185	3.008
Klimaschutz	1	65		2.688	
Naturschutz	5	646	718	11.122	11.767
Gewässerschutz	1	72		17.555	

Quelle: Wichmann et al. (2022).

Neben den Planungs- und Baukosten ist zudem zu berücksichtigen, welche Flächennutzung vor der Moorschutzmaßnahme vorlag und wie hoch Verluste bei Aufgabe der Nutzung sind. Im Fall von einer intensiven Milchviehwirtschaft werden z.B. deutlich höhere Deckungsbeiträge je Flächeneinheit erwirtschaftet im Vergleich zu einer extensiven Mutterkuhhaltung. Dies spiegelt

sich z.B. im Standarddeckungsbeitrag der einzelnen moorreichen Bundesländer wider (Abbildung 8). So liegen die Standarddeckungsbeiträge in den Bundesländern mit hoher Milchviehdichte (Schleswig-Holstein, Bayern und Niedersachsen) deutlich höher als in den Bundesländern mit niedrigerer Milchviehdichte (Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg).

Abbildung 8: Standarddeckungsbeitrag für Grünland und Weiden (Mittelwert 2016/17-2020/21) für Bundesländer mit hohen Anteilen an organischen Böden



Anmerkung: Daten auf Basis der Datenbank zu Standarddeckungsbeiträgen des KTBL (2019).

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Wird eine wiedervernässte Fläche als Paludikultur bewirtschaftet, so sind in die Berechnung zu den THG-Minderungskosten zudem Kosten für die Bestandsbegründung der gewählten Kultur, die Betriebskosten sowie Erlöse zu berücksichtigen (Zusammenstellung aus Wichmann et al. (2022)):

- ▶ Kosten für die Bestandsbegründung variieren zwischen 2.000 und 30.000 EUR/ha für Schilf und Rohrkolben und liegen bei ca. 50.000 EUR/ha für Torfmooskultivierung.
- ▶ Für das Wassermanagement ist mit Kosten von bis zu 3.000 EUR/ha/Jahr zu rechnen. Bei der Torfmooskultivierung können Kosten zur Bestandspflege in Höhe von 7.000 EUR/ha/Jahr hinzukommen.
- ▶ Erntekosten bei Schilf und Rohrkolben liegen – je nach angestrebter Nutzung – zwischen 115 und 1.500 EUR/ha/Jahr. Bei Torfmoosen liegen die Erntekosten mit etwa 12.000 EUR/ha/Jahr deutlich höher.
- ▶ Für Erlöse von Schilf und Rohrkolben können je nach hergestelltem Produkt, Erlöse von 250 bis 4.500 EUR/ha/Jahr erwartet werden. Bei Torfmoosen liegen Erlöse bei 1.250 bis 33.000 EUR/ha/Jahr für Kultursubstrate unterschiedlicher Qualität und bei bis zu 150.000 EUR/ha/Jahr für die Produktion von Saatgut.

Da es sich bei Moorvernässung und Paludikultur um verhältnismäßig neue Flächennutzungen handelt, sind in den nächsten Jahren Abnahmen der Kosten zu erwarten. Die hohe Spannweite der einzelnen Kostenpunkte und der Erlöse zeigen zudem, dass es notwendig ist, eine

Bewertung der THG-Minderungskosten im Einzelfall durchzuführen. Daher sollten auslaufenden und zukünftigen Wiedervernässungs- und Paludikulturprojekten ökonomische Daten gesammelt werden, um den Wissensstand zu Kosten und Erlösen zu verbessern. Einerseits werden diese Daten benötigt, um Landwirt*innen verlässlich beraten zu können. Andererseits sollten anhand dieser Daten Fördersätze für Moorschutzmaßnahmen kontinuierlich angepasst werden.

Überblick zum Schutz organischer Böden

Minderungspotenzial

Das Minderungspotenzial durch Wiedervernässung beträgt bis zu -35 t CO₂äq/ha. Bei einer vernässbaren Fläche von 0,9 bis 1,0 Mio. Hektar bis 2045 entspricht dies einem Minderungspotenzial zwischen 32 bis 35 Mio. t CO₂äq.

Zeitliche Verfügbarkeit des Potenzials

Das Minderungspotenzial steht sehr zeitnah (ca. ein Jahr) nach der erfolgreichen Wiedervernässung zur Verfügung.

Risiken und Einschränkungen

Die Flächenverfügbarkeit für die Wiedervernässung ist stark limitiert durch die bestehende Nutzung als Ackerland oder Grünland. Das Minderungspotenzial steht somit im direkten Zusammenhang mit dem Erfolg der Flächenmobilisierung. Weiterhin hängt die Geschwindigkeit der Maßnahmenumsetzung von der Komplexität des örtlichen Wasserhaushaltes ab, der wiederhergestellt werden muss (Entwässerungsgräben verfüllen, Wasserstandsregulierungstechnik installieren). Weitere Risiken bestehen durch die Änderung des Niederschlagsregimes und Trockenperioden, die durch den Klimawandel verschärft werden können. Diese Änderungen wirken sich entsprechend auf den Wasserstand aus, der wiederum das Minderungspotenzial je Flächeneinheit bestimmt (Abbildung 7).

Synergien mit weiteren Ökosystemleistungen

Aktuell befinden sich alle Lebensraumtypen der Moore in Deutschland gemäß FFH-Richtlinie in einem ungünstig bis schlechten Zustand (BMU und BfN 2020). Daher würde die Wiederherstellung von Mooren einen wichtigen Beitrag zum Erhalt dieser gefährdeten Lebensräume und dessen typische Arten, wie das Torfmoos beitragen. Für den Landschaftswasserhaushalt haben Moore eine regulierende Funktion als Wasserspeicher, und sie tragen durch ihre Verdunstungsleistung zur Kühlung ihrer Umgebung bei. Außerdem können Moore durch ihre Artenvielfalt der Erholung und dem Naturerleben dienen. Durch die Erhöhung des Wasserstandes ergeben sich auch neue Nutzungsmöglichkeiten. Insbesondere der Torfmoosanbau als Paludikultur bietet die Möglichkeit, hochwertiges Substrat für den Gartenbau bereit zu stellen und den Torfabbau aus intakten Mooren zu verhindern.

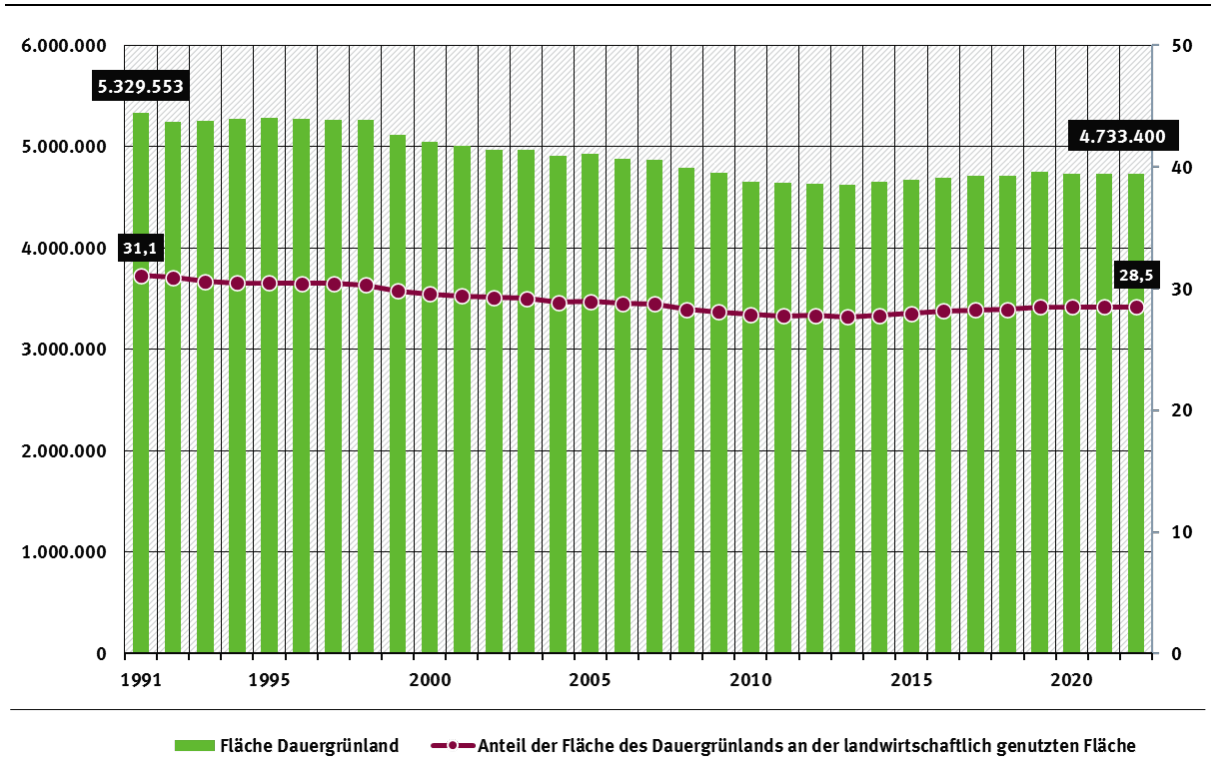
2.4 Erhalt von Grünland und die Ausweitung der Grünlandfläche auf mineralischem Boden

Laut den Flächendaten aus der deutschen Treibhausgasinventur (UBA 2022a) erstreckt sich das Grünland¹² in Deutschland auf ca. 6,3 Mio. ha. Davon liegen rund 5,4 Mio. ha auf mineralischen Böden. Diese Flächenangaben liegen höher als Angaben zum Dauergrünland (Abbildung 9), da Dauergrünland mit einem Alter von mindestens 5 Jahren nur einen Teil der Grünlandfläche im Treibhausgasinventar ausmacht. Mit Beginn der 2000er Jahre nahm die Dauergrünlandfläche in Deutschland von 5,3 Mio. ha deutlich ab auf einen Wert von 4,6 Mio. ha im Jahr 2013. Mit

¹² Im THG-Inventar wird unterschieden zwischen Grünland im engeren Sinne (Wiesen, Weiden) und Gehölzen (Hecken, Brachen etc.). In diesem Bericht wird Grünland im engeren Sinne als Grünland bezeichnet. Grünland hat im Jahr 2020 eine Flächenausdehnung von 6,3 Mio. ha und Gehölze von 0,4 Mio. ha.

Greening-Regeln zum Grünlandumbruchverbot im Rahmen der Förderung unter der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) ab dem Jahr 2015 wurde erreicht, dass die Dauergrünlandfläche bis zum Jahr 2023 auf einen Wert von 4,7 Mio. ha leicht zugenommen hat. (Abbildung 9, siehe Details weiter unten).

Abbildung 9: Entwicklung der Dauergrünlandfläche in Deutschland (1991 bis 2022)



Quelle: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Statistisches Jahrbuch, verschiedene Jahre; für 2022: (Statistisches Bundesamt 2022), Fachserie 3, Reihe 3.1.2 (Umweltbundesamt 2024).

Aufgrund seiner dauerhaften Bodenbedeckung mit überwiegend krautigen Pflanzen hat Grünland einen hohen Bodenkohlenstoffgehalt. Nach einer europäischen Studie von Hiederer (2018) belief sich der Bodenkohlenstoffgehalt von Dauergrünland auf ca. 44 g/kg und war damit mehr als doppelt so hoch wie in langfristig kultivierten Ackerböden mit rund 17 g/kg. Auch im deutschen THG-Inventar wird als Summenwert für Deutschland ein Unterschied zwischen Grünland auf mineralischen Böden mit 89 t C_{org}/ha (0-30 cm Tiefe) und annuellem Ackerland auf mineralischen Böden mit 61 t C_{org}/ha ausgewiesen (UBA 2022a).

Tabelle 3: THG-Emissionen bei der Umwandlung von Grünland auf mineralischen Böden zu anderen Flächentypen und von anderen Flächentypen zu Grünland in Deutschland im Jahr 2020

Flächentyp	Flächentyp zu Grünland (Mio. t CO ₂ äq)	Grünland zu Flächentyp (Mio. t CO ₂ äq)
Wald	0,00	-0,05
Ackerland	-6,84	5,20
Gehölze	1,26	-1,12
Feuchtgebiete	-0,01	-0,01
Siedlungen	-0,58	-0,78

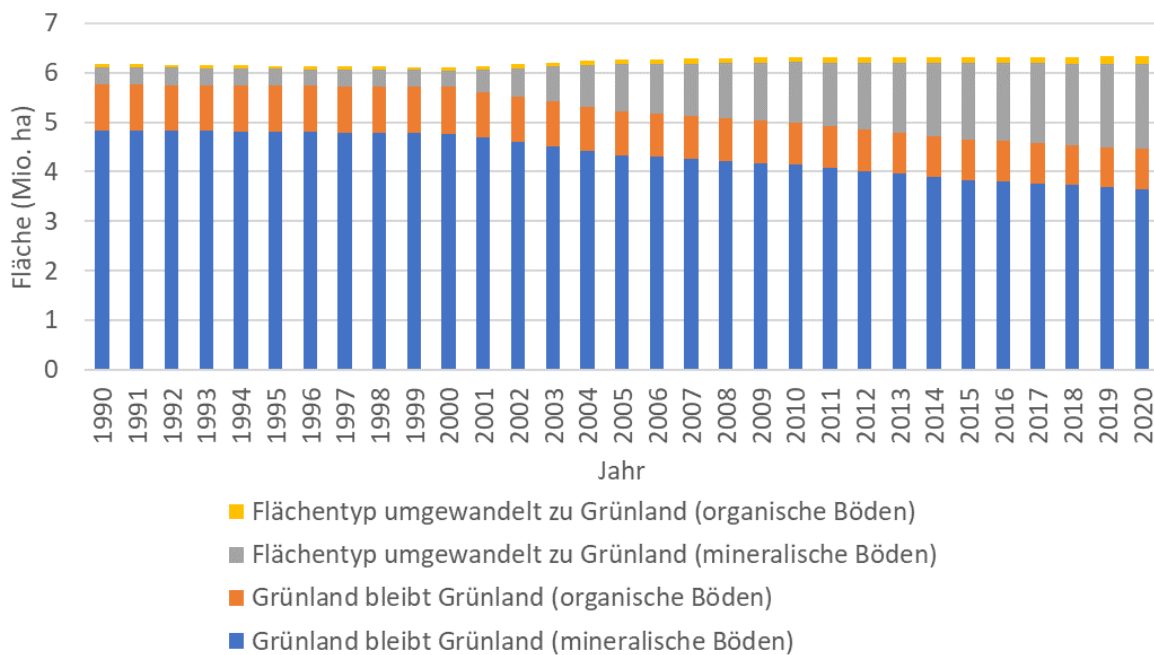
Flächentyp	Flächentyp zu Grünland (Mio. t CO ₂ äq)	Grünland zu Flächentyp (Mio. t CO ₂ äq)
Sonstiges Land	0,00	0,00
Summe	-6,17	3,24
Gesamtbilanz	-2,93	

Quelle: Common Reporting Format-Tabellen zu UBA (2022a).

In der deutschen THG-Berichterstattung ist Grünland auf mineralischen Böden in der Gesamtbilanz im Jahr 2022 eine Kohlenstoffsенке von rund -3 Mio. t CO₂ (Tabelle 3). Diese Senkenleistung beruht vor allem auf der Umwandlung von anderen Flächentypen zu Grünland. Für Grünland, das älter als 20 Jahre ist und Grünland bleibt, wird keine Veränderung des Bodenkohlenstoffgehalts auf mineralischen Böden ausgewiesen (UBA 2022a). Flächen, die zu Grünland auf mineralischen Böden umgewandelt werden, binden im Jahr 2020 -6,2 Mio. t CO₂äq. Den größten Anteil an dieser Senke hat die Umwandlung von 1,5 Mio. Hektar Ackerland zu Grünland auf mineralischen Böden mit rund -4,8 t CO₂/ha (insgesamt -6,8 Mio. t CO₂äq) im Jahr 2020. Die Umwandlung von Siedlungsfläche zu Grünland auf mineralischen Böden ist ebenfalls eine Senke von -0,6 Mio. t CO₂äq. Dagegen ist die Umwandlung von Gehölzen zu Grünland auf mineralischen Böden eine Quelle von 1,3 Mio. t CO₂äq (Tabelle 3). Wird Grünland bei Beibehaltung der Nutzung umgebrochen oder gänzlich zu Ackerland umgewandelt, entweicht der in der Pflanzenbiomasse und im Boden gespeicherte organische Kohlenstoff in die Atmosphäre. Neben CO₂-Emissionen kann es durch die Oxidation von Stickstoff auch zu NO₂-Emissionen kommen. Im deutschen THG-Inventar wird im Jahr 2022 die Umwandlung von Grünland zu anderen Flächentypen auf mineralischen Böden als eine Quelle von 3,2 Mio. t CO₂äq bilanziert. Dabei dominiert die Umwandlung von Grünland zu Ackerland auf mineralischen Böden mit 5,2 Mio. t CO₂äq wiederum die Bilanz (Tabelle 3).

Im Projektionsbericht der Bundesregierung (2021) werden zwei Szenarien miteinander verglichen, die auch den Erhalt von Grünland berücksichtigen. Im Mit-Maßnahmen-Szenario werden die Maßnahmen zum Grünlanderhalt fortgeschrieben. Im Ohne-Maßnahmen-Szenario wird angenommen, dass diese Maßnahmen ausgesetzt werden und es so zu einer erneuten Abnahme des Grünlands kommt. Dieser Szenarienvergleich zeigt, dass ohne den Erhalt des Grünlands bis zum Jahr 2040 eine Quelle von insgesamt 2,4 Mio. t CO₂äq auftreten würde. Dies zeigt die Bedeutung des Grünlanderhalts. Da mittlerweile der Grünlanderhalt eine etablierte Maßnahme ist, erscheint es auf der politischen Ebene aber nicht gerechtfertigt, diese Differenz der Szenarienbetrachtung als zusätzlichen Klimaschutz auszuweisen. Vielmehr ist dies als Indikator zu verstehen, welche Risiken bestehen, wenn der Grünlanderhalt ausgesetzt wird.

Anders als zum Dauergrünland (Abbildung 9) konnte seit 1990 für die Grünlandfläche ein leichter Anstieg festgestellt werden (Abbildung 10). Sehr deutlich wird aber auch, dass die Dynamik der Flächenänderungen in den letzten zwanzig Jahren deutlich zugenommen hat.

Abbildung 10: Entwicklung der Grünlandfläche

Quelle: Common Reporting Format-Tabellen (UBA 2022a). „Flächentypen umgewandelt zu Grünland“ ist die Summe der umgewandelten Flächen der letzten 20 Jahre (bewegliches Fenster).

Mit dieser erhöhten Dynamik geht einher, dass verstärkt auf umgewandelten Flächen Kohlenstoffpools auf- bzw. abgebaut werden. Dabei geschieht die Mineralisierung durch den Umbruch in kürzester Zeit, dagegen würde der Aufbau gleich großer Kohlenstoffspeicher in einem neu angelegten Grünland bis zu 200 Jahre dauern (Poeplau et al. 2011; Flessa et al. 2018). In der Bodenzustandserhebung, die in den Jahren 2011 bis 2018 durchgeführt wurde, wiesen die Grünlandflächen ohne Ackervornutzung die höchsten Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff auf (218 t C_{org}/ha in 0-100 cm Tiefe, Flessa et al. 2018). Dagegen lag dieser Parameter auf Ackerflächen, die noch bis 1990 als Grünland genutzt wurden, nur noch bei rund 140 t C_{org}/ha. Umgekehrt erreichten mineralische Böden auf Flächen, die 1990 zu Grünland umgewandelt wurden, nach über 20 Jahren noch immer keine vergleichbar hohen Kohlenstoffvorräte, sondern nur Werte von 90 t C_{org}/ha (Flessa et al. 2018). In UBA (2022a) wird – gemäß der IPCC-Methode – angenommen, dass Grünland auf organischen Böden ab dem 21sten Jahr keine Veränderungen des Bodenkohlenstoffs mehr zeigt, sondern sich ein neues Gleichgewicht eingestellt hat. Zudem wird die Abnahme an Bodenkohlenstoff nach Umwandlung von Grünland zu einem anderen Flächentyp – ebenfalls gemäß der IPCC-Methode – über den Zeitraum von 20 Jahren gemittelt. Diese Annahmen und die damit ermittelten Werte sind kritisch zu hinterfragen.

Aus den genannten Zusammenhängen zwischen Alter von Grünland und Bodenkohlenstoffvorrat sind der Erhalt und die extensive Bewirtschaftung von Dauergrünland auf mineralischem Boden ein wichtiger Beitrag zum Schutz einer natürlichen Senke in Deutschland. Zudem gehört extensiv bewirtschaftetes Grünland zu den artenreichsten Lebensräumen in Europa, und Deutschland trägt eine EU-weite Verantwortung für die Lebensraumtypen der Flachland- und Bergmähwiesen nach Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (Europäische Kommission 1992). Einen zuverlässigen, gesetzlichen Schutz des Dauergrünlands in ganz Deutschland gibt es bisher nicht. Lediglich drei Bundesländer (Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein und Baden-Württemberg) haben den Umbruch von Dauergrünland gesetzlich verboten, wobei auch hier Befreiungen z. B. für Pflegemaßnahmen möglich sind. Im Rahmen der flächengebundenen

Direktzahlungen der GAP wird der Erhalt des Grünlandes als „Greening“-Auflage gefordert. Dies hat zumindest ab 2015 mit dazu beigetragen, dass weitere Netto-Verluste an Dauergrünlandflächen verhindert werden konnten (siehe Abbildung 9).

Allerdings ist der Verlust an alten Grünlandflächen nicht gesichert, denn die Greening-Regeln erlauben eine Grünlandumwandlung bei gleichzeitiger Neuanlage von Grünland. Zudem sind Biobetriebe von dieser Auflage befreit. Somit kann es weiterhin zur Abnahme der Qualität des Grünlands kommen, z.B. in dem immer weniger Flächen als Weide genutzt wird, sondern regelmäßig gemäht werden, um Futter zu gewinnen (Schoof et al. 2019). Vom Jahr 2020 zum Jahr 2021 konnte für ganz Deutschland eine Zunahme der Dauergrünlandfläche von 3.800 ha verzeichnet werden. In den Bundesländern Brandenburg/Berlin, Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Sachsen und Thüringen trat aber in Summe eine Abnahme an Dauergrünland von -14.600 ha auf. Dem gegenüber stand eine Zunahme in den übrigen Bundesländern von 18.400 ha.

Überblick zum Erhalt von Grünland und der Ausweitung der Grünlandfläche auf mineralischem Boden

Klimaschutzbeitrag und Speicherpotenzial

Der Erhalt und die extensive Bewirtschaftung von Dauergrünland auf mineralischem Boden, mit durchschnittlich 89 t C_{org}/ha (0-30 cm Tiefe), leistet einen wichtigen Beitrag zum Schutz einer natürlichen Senke in Deutschland. Der Grünlanderhalt wird als etablierte Maßnahme angesehen, und daher werden aus dieser Maßnahme keine zusätzlichen Emissionseinsparungen auf das Klimaschutzziel angerechnet. Die Emissionsbilanz der Umwandlung von Ackerland zu Grünland (-6,8 Mio. t CO₂-äq./Jahr) und von Grünland zu Ackerland (5,2 Mio. t CO₂-äq./Jahr) viel im Jahr 2020 leicht zu Gunsten einer CO₂-Einbindung aus. Ohne Regelungen zum Grünlanderhalt wäre ein Nettoverlust an Grünland und entsprechenden THG-Emissionen zu erwarten.

Zeitliche Verfügbarkeit des Potenzials

Sobald sich die Grasdecke etabliert hat, erfolgt eine kontinuierliche C-Einbindung durch die Pflanzen in die Biomasse und in den Boden. Dieses Potenzial kann somit bereits nach kurzer Zeit (ungefähr ein Jahr) zur Verfügung stehen. Der Aufbau des Kohlenstoffspeichers im mineralischen Boden von Grünland baut sich über sehr lange Zeiträume (200 Jahre) auf.

Risiken und Einschränkungen

Bisher ist die Grünlandfläche in nur wenigen Bundesländern gesetzlich geschützt (Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein und Baden-Württemberg). Außerdem können Dauergrünländer, die besonders hohen Bodenkohlenstoffvorrat aufweisen, umgewandelt werden, wenn gleichzeitig eine neue Grünlandfläche angelegt wird. Dabei ist jedoch zunächst mit einem Verlust an Kohlenstoff aus dem Boden zu rechnen, der sich in der neu angelegten Fläche zunächst wieder über Jahrzehnte aufbauen muss. Für die Umwandlung von Ackerflächen zu Grünland auf mineralischen Böden müssen entsprechende Flächenkapazitäten vorhanden sein. Da auf Ackerflächen neben Lebensmitteln, auch Futter- und Energiepflanzen produziert werden können, besteht ein potenzieller Nutzungskonflikt, der gesellschaftlich ausgehandelt werden muss.

Synergien mit weiteren Ökosystemleistungen

Extensiv genutztes Dauergrünland gehört zu den artenreichsten Ökosystemen in Deutschland und ist ein wichtiger Bestandteil der Kulturlandschaft. Somit trägt der Erhalt von Dauergrünland zum Erreichen der nationalen Biodiversitätsschutzziele bei. Weiterhin sind artenreiche Grünländer ein ästhetischer Mehrwert in der Landschaft und bieten Raum für Erholung. Durch die dauerhafte Bodendurchwurzelung wird der Erosion des Bodens vorgebeugt. Außerdem leisten Grünländer einen Beitrag zur Grundwasserneubildung und Wasserfilterung.

2.5 Erhalt und Erhöhung des Bodenkohlenstoffvorrats im mineralischen Ackerboden

In mineralischen Böden wird C_{org} als Humus (tote organische Bodensubstanz aus z. B. Pflanzenresten) gespeichert. Humus entsteht auf landwirtschaftlich genutzten Ackerböden überwiegend aus organischen Düngemitteln (Stallmist, Gülle, Kompost) sowie aus Ernterückständen (Jacobs et al. 2018). Humus hat neben der Funktion als Kohlenstoffspeicher viele weitere wichtige ökologische Funktionen, wie die Speicherung von Pflanzennährstoffen, Förderung der Bodendurchlüftung und -wasserspeicherfähigkeit. Somit hat Humus auch eine hohe Bedeutung bei der Sicherung ackerbaulicher Erträge (Hülsbergen et al. 2023). Durch den vermehrten Abbau der organischen Substanz entstehen Emissionen, und nur ein bestimmter Anteil verbleibt im Boden und kann dort gespeichert werden. Laut den Ergebnissen der nationalen Bodenzustandserhebung (Jacobs et al. 2018) werden die Humusvorräte auf den Ackerflächen vor allem durch den Standort (Klima, Geographie) und die Bodenfaktoren, wie der Tonanteil, bestimmt. Ein sehr tonreicher Boden (> 45 % Ton) kann durchschnittlich doppelt so viel C_{org} speichern wie ein sehr sandiger Boden (< 12 % Ton). Schließlich beeinflusst auch die Bewirtschaftungsweise den Humusgehalt über die Art der Bodenbearbeitung, Düngung und den Wechsel von Feldfrüchten. Eine wirksame Klimaschutzmaßnahme muss daher über Humusaufbau Kohlenstoff aus der Atmosphäre im Boden binden und das bestehende C_{org} schützen. Der Aufbau von C_{org} ist jedoch sowohl mengenmäßig als auch zeitlich begrenzt, da sich ein Gleichgewicht zwischen Kohlenstoffeintrag und -abbau einstellt. Aus diesem Grund ist ein kontinuierlicher Eintrag von Kohlenstoff in den Boden notwendig, um das Niveau der C_{org} -Speicherung beizubehalten. Andernfalls erfolgt ein rascher Abbau des Boden- C_{org} (Jacobs et al. 2018). Laut BBodSchG § 17 ist die Sicherstellung eines standorttypischen Humusgehaltes zu gewährleisten, was vor allem über eine ausreichende Zufuhr an organischer Substanz und durch eine reduzierte Bodenbearbeitung erreicht werden sollte. Über eine extensive Bodenbearbeitung (z. B. weniger intensives Pflügen) wird die Mineralisierung des C_{org} durch Mikroorganismen im Boden vermindert und somit auch die damit verbundenen CO_2 -Emissionen. Für eine ausreichende Versorgung des Bodens mit organischer Substanz kann vor allem ein effizientes Recycling von Nährstoffen im Boden beitragen. Dabei spielen vor allem

- ▶ der Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten für eine ganzjährige Begrünung,
- ▶ der Anbau von mehrjährigen Kulturen wie Klee gras,
- ▶ der Verbleib von Ernteresten auf dem Acker,
- ▶ die organische Düngung,
- ▶ sowie die Anlage von Hecken und Feldgehölzen (z. B. Agroforstwirtschaft, inklusive Kurzumtriebsplantagen) eine maßgebliche Rolle (Sykes et al. 2020; Thünen Institut für Agrarklimaschutz 2018).

Bisher gibt es kaum deutschlandweite Studien, in denen alle oben benannten Maßnahmen bezüglich ihres Klimaschutzpotenzials in einem Szenario simuliert werden und die Einschätzungen zu Anreicherung von C_{org} im Ackerboden scheinen sehr unsicher zu sein und sind von einer hohen regionalen Variabilität gekennzeichnet. Diese Klimaschutzpotenziale sind sehr unsicher (Rumpel et al. 2020; WBAE 2016; Don et al. 2018; BMEL 2016b). Das Thünen-Institut für Agrarklimaschutz hat jedoch eine Abschätzung der Wirkung des Aufbaus von Bodenkohlenstoffvorräten vorgenommen (Don 2022). Dabei wurden die Maßnahmen über einen Zeitraum von 25 Jahren im Vergleich zu einem Basisszenario (ohne Bewirtschaftungsänderung) betrachtet. Je nach Flächenpotenzial von 2,9 bis 5,5 Mio. ha könnten demnach in Deutschland zusätzlich -3 bis -6 Mio. t CO_2 pro Jahr als C_{org} im Boden und in der

Biomasse gespeichert werden. In einer weiteren Studie für Bayern wurde das C_{org} -Speicherpotenzial für landwirtschaftlich genutzte Böden ermittelt (Wiesmeier et al. 2017). Ein Ergebnis der Studie war, dass insbesondere Ackerböden ein hohes Speicherpotenzial aufwiesen, da sie nur zu rund 50 % mit C_{org} gesättigt seien. Dagegen waren Böden des Grünlandes mit 73 % gesättigt. In dem Szenario wurden humusanreichernde Maßnahmen umgesetzt: die Ausweitung des Zwischenfruchtanbaus und des Ökolandbaus, die Anlage von Agroforstsystemen und eine Verbesserung der Fruchtfolgen. Darüber hinaus wurden Ackerflächen zu Grünlandflächen umgewandelt. Insgesamt gehen Wiesmeier et al. (2017) von einem C_{org} -Speicherpotenzial von rund -0,37 Mio. t C (-1,3 Mio. t CO_2) auf landwirtschaftlich genutzten Böden in Bayern über mehrere Jahrzehnte aus.

In der Abschätzung des Thünen-Instituts für Agrarklimaschutz (Don 2022) wies insbesondere der **Anbau von Zwischenfrüchten** ein hohes zusätzliches Speicherpotenzial von bis zu -1 Mio. t $\text{CO}_2/\text{ha}/\text{Jahr}$ auf. In einer globalen Review-Studie von Poeplau und Don (2015) wurden ähnliche Werte durch den langjährigen Anbau von Zwischenfrüchten ermittelt. Eine durchschnittliche Erhöhung der C_{org} -Vorräte um -0,4 t $C_{\text{org}}/\text{ha}/\text{Jahr}$ (-1,5 t $\text{CO}_2/\text{ha}/\text{Jahr}$) könnte über 20 Jahre hinweg erreicht werden. In einer neueren nationalen Studie von Seitz et al. (2022) wurde auf 30 % der Ackerfläche (ca. 4 Mio. ha) der Anbau von Zwischenfrüchten angenommen. Dadurch konnte der Kohlenstoffeintrag in den Boden um 12 % bis zum Jahr 2050 erhöht werden, was ca. -35 Mio. t C_{org} entspricht. Für die Flächen, auf denen die Zwischenfrüchte angebaut wurden, ergaben sich etwas geringere durchschnittliche Kohlenstoffspeicherraten von -0,3 t C/ha/Jahr (-1 t $\text{CO}_2/\text{ha}/\text{Jahr}$) als in den Annahmen von Don (2022). Im aktuellen GAK-Rahmenplan (2023-2026) kann im Förderbereich 4 „Markt- und standortangepasste sowie umweltgerechte Landbewirtschaftung einschließlich Vertragsnaturschutz und Landschaftspflege“ eine Förderung von „Vielfältigen Kulturen im Ackerbau“ erfolgen (GAK 2023). Dabei wird der Anbau von jährlich mindestens fünf verschiedenen Hauptfruchtarten in Kombination mit dem Anbau von Leguminosen (z.B. Klee gras) mit bis zu 110 EUR/ha gefördert.

Im **ökologischen Landbau** kann ebenfalls eine Zunahme des Bodenkohlenstoffvorrats beobachtet werden, was vor allem durch den Einsatz von organischem Dünger und dem vermehrten Anbau von Stickstoff bindenden Luzernen und Klee gras erklärt werden kann. Im Vergleich zu konventionellem Ackerbau kann der Bodenkohlenstoffvorrat um -0,2 bis -0,4 t C/ha/Jahr (-0,7 bis -1,5 t CO_2/ha) gesteigert werden (Gattinger et al. 2012). Laut einer aktuellen deutschlandweiten Studie von Hülsbergen et al. (2023), in der die Umwelt- und Klimawirkungen von 40 ökologisch wirtschaftenden mit 40 konventionell wirtschaftenden Betrieben verglichen wurden, konnte ebenfalls eine Kohlenstoffanreicherung der Ackerböden beobachtet werden. Wie in der Studie von Gattinger et al. (2012) konnte die positive Wirkung vor allem auf die organische Düngung und die vielfältige Fruchtfolge mit Klee gras zurückgeführt werden. Die durchschnittliche jährliche Zunahme an Bodenkohlenstoff lag mit rund -0,27 t C/ha/Jahr (0,99 t $\text{CO}_2/\text{ha}/\text{Jahr}$) im unteren Bereich der Werte von Gattinger et al. (2012). Zu einem sehr ähnlichen Wert von -0,26 t C/ha/Jahr (0,95 t $\text{CO}_2/\text{ha}/\text{Jahr}$) für eine höhere jährliche Kohlenstoffspeicherungsrate im ökologischen Landbau gelangen auch Sanders und Heß (2019) in ihrer Metastudie. Im Koalitionsvertrag der Bundesregierung und im ANK wird ein Anteil der landwirtschaftlich genutzten Flächen von 30 % für den ökologischen Landbau in Deutschland bis zum Jahr 2030 genannt. Im Jahr 2021 lag der Anteil bei 9,7 % (1,6 Mio. ha) laut Statistischem Bundesamt (2022), wovon rund die Hälfte als Dauergrünland bewirtschaftet wird (0,8 Mio. ha). Somit besteht bis 2030 noch ein zusätzliches Flächenpotenzial von ca. 3 Mio. ha.

Die Förderung von ökologischem Landbau erfolgt wie der Anbau von Zwischenfrüchten im Rahmen der GAK, Förderbereich 4 „Markt- und standortangepasste sowie umweltgerechte Landbewirtschaftung einschließlich Vertragsnaturschutz und Landschaftspflege“²¹. In der aktuellen Periode (2023 bis 2026) können die ersten beiden Jahre des Verpflichtungszeitraumes

mit 310 EUR/ha für Ackerflächen, 935 EUR/ha für Gemüseanbau, sowie 310 EUR/ha für Grünland gefördert werden. Die Beibehaltung der Maßnahmen wird dann noch mit 210 EUR/ha für Ackerflächen, 360 EUR/ha für Gemüseanbau und 210 EUR/ha für Grünland gefördert.

Durch die **Anlage und Pflege von Feldgehölzen, Hecken und Baumreihen** auf mineralischen Böden können sich positive Kohlenstoffspeichereffekte für den Boden und in der Biomasse ergeben. Bei einer Neuanlage von Hecken auf Ackerland (mineralischen Böden) kann im Mittel über 20 Jahre mit einer Kohlenstoffbindung von -4,2 t C/ha/Jahr (-15,4 t CO₂/ha/Jahr) gerechnet werden, wobei frisch angelegte Flächen zunächst weniger CO₂ einbinden (Drexler et al. 2021). Für die Kalkulation wird eine lineare Zunahme der Senkenleistung über 20 Jahre von 0 auf 30,8 t CO₂/ha/Jahr angenommen, um die zeitliche Dynamik zu berücksichtigen. Zu einer ähnlichen durchschnittlichen CO₂-Bindung kommt auch das Szenario einer Studie von Tsonkova und Böhm (2020). Hierbei wurde die Etablierung von Agroforstsystemen auf 50 % der deutschen Ackerfläche (ca. 6 Mio. ha) angenommen, wobei für die reine Gehölzfläche 10 % der Ackerfläche betrachtet wurde (0,6 Mio. ha). Dabei ergab sich eine durchschnittliche CO₂-Bindung von -17 t CO₂/ha (Tsonkova und Böhm 2020). Im Vergleich zu einer europäischen Potenzialstudie für Agroforstsystemen von Kay et al. (2019), wo die jährliche mittlere Kohlenstoffbindung je nach ihrer Art der Ausgestaltung des Agroforstsystems zwischen -0,009 und -7,3 t C/ha (0,33 und 26,8 t CO₂/ha) in den Gehölzen betrug, liegen die Ergebnisse der Potenziale für Deutschland im Mittelfeld. Neben dem positiven Effekt der Kohlenstoffspeicherung können Agroforstsysteme auch zur Diversifizierung der Landschaft beitragen. Insbesondere wenn heimische und standortgerechte Gehölze verwendet werden, kann eine Vielzahl von wildlebenden Arten profitieren (Kay et al. 2019).

Um die positiven Effekte durch die zusätzliche Kohlenstoffspeicherung in Boden und Biomasse aufrecht zu erhalten, muss eine kontinuierliche Pflege des Agroforstsystems erfolgen. In dem deutschen GAP-Strategieplan wurde das Ziel formuliert bis 2027 auf 200.000 ha Agroforstgehölze zu pflanzen (BMEL 2023a). Hierfür ist seit 2023 laut GAP erstmalig auch eine Förderung im Rahmen der Öko-Regelung 3 „Beibehaltung einer agroforstlichen Bewirtschaftungsweise auf Acker- und Dauergrünland“ vorgesehen (BMEL 2023a). Diese beträgt 60 EUR/ha bei bereits bestehenden Agroforstflächen, die bestimmten Anforderungen genügen. Der Betrag bezieht sich auf die reine Gehölzfläche. Folglich ist die Förderung von bestehenden Agroforstmaßnahmen auf 10 % eines Hektar Ackerlandes, lediglich 6 EUR/ha. Die Etablierung von Agroforstsystemen soll laut GAP-Strategieplan über die Bundesländer erfolgen. Die EU-GAP-Strategieplanverordnung sieht vor, dass bis zu 100 % der Investitionen für die Einrichtung und Regeneration von Agroforstsystemen gefördert werden können (Europäische Union 2021). Bisher liegen die angedachten Förderquoten der Länder zwischen 40 und 60 %. Insgesamt bewertet der Deutsche Fachverband für Agroforstwirtschaft (DeFAF) die Förderung als zu niedrig, da diese aktuell nicht einmal die Bewirtschaftungskosten der ersten Jahre nach der Anlage eines Agroforstsystems decken würde (Böhm 2022).

Überblick zum Erhalt und zur Erhöhung des Bodenkohlenstoffvorrates im mineralischen Ackerboden

Einspeicherungspotenzial

Bisher gibt es kaum deutschlandweite Potenzialstudien zur CO₂-Einspeicherung in mineralischem Boden unter landwirtschaftlicher Bewirtschaftung. In einer aktuellen Studie wurde die zusätzliche Kohlenstoffspeicherung für Deutschland als C_{org} im Boden (Humus) und in der Biomasse mit -3 bis -6 Mio. t CO₂ pro Jahr angegeben. Die Höhe des Potenzials richtet sich nach der Höhe des zur Verfügung stehenden Flächenpotenzials von 2,9 bis 5,5 Mio. und wurde über einen Zeitraum von 25 Jahren im Vergleich zu einem Basisszenario (ohne Bewirtschaftungsänderung) betrachtet. Zu den Maßnahmen, die zu einer Erhöhung des Bodenkohlenstoffvorrates im mineralischen Boden

beitragen können, gehören verbesserte Fruchtfolgen und der Anbau von mehrjährigen Kulturen wie Klee gras sowie von Zwischenfrüchten und Untersaaten. Außerdem wirken sich der ökologische Landbau, die Anlage von Feldgehölzen (Agroforst) und die Umwandlung von Acker zu Grünland positiv auf die Speicherung von Kohlenstoff im Boden und in der Biomasse aus.

Zeitliche Verfügbarkeit des Potenzials

Durch die Umsetzung der Maßnahmen, kann der Aufbau von organischen Bodenkohlenstoffvorräten bereits sehr zeitnah (1 bis wenige Jahre) und über einen längeren Zeitraum (25 Jahre) hinweg erfolgen.

Risiken und Einschränkungen

Für den kontinuierlichen Aufbau und Erhalt von organischen Bodenkohlenstoffvorräten müssen die Maßnahmen dauerhaft beibehalten werden. Ansonsten kann der Bodenkohlenstoffvorrat auch sehr schnell wieder abgebaut werden. Da diese humusfördernden Maßnahmen eine Extensivierung der Landwirtschaft (ökologischer Landbau) beziehungsweise auch eine Verkleinerung der Fläche für den Feldfruchtanbau bedeuten (Anlage von Feldgehölzen), ist ein attraktives Anreizsystem zur Umsetzung der Maßnahmen notwendig.

Synergien mit weiteren Ökosystemleistungen

Durch die Anreicherung von Humus im Boden kann die Bodenstruktur und -fruchtbarkeit verbessert werden, wodurch die Produktivität der Böden gesteigert werden kann. Außerdem wirkt sich Humus positiv auf die Wasseraufnahme- und -speicherfähigkeit sowie auf die Bodenlebewesen aus. Heimische, standortgereichte Gehölze auf Ackerflächen tragen zur Strukturanreicherung in der Landschaft bei und können von unterschiedlichen Arten als Lebensraum genutzt werden. Darüber hinaus können sie auch als Korridor von wandernden Arten von einer Waldfläche zur nächsten genutzt werden (Habitatvernetzung). Aufgrund der Durchwurzelung wird zusätzlich Bodenerosion vorgebeugt.

2.6 Kohlenstoffspeicherung in Bäumen in Siedlungsflächen

Eine Sonderrolle kommt der Kohlenstoffspeicherung, die mit Bäumen in Siedlungsflächen erreicht werden kann, zu. Bei den Bäumen handelt es sich meist um freistehende Bäume, die sich so in ihrem Wuchsverhalten stark von Bäumen in geschlossenen Waldbeständen unterscheiden. So ist – anders als beim Wald – keine flächenbezogene Analyse, sondern eine Analyse auf Individuenebene sinnvoll.

Auch die Anlage von Heckenstrukturen ermöglicht eine CO₂-Einbindung. Dies wurde bereits im Kapitel 2.5 für die Agrarlandschaft betrachtet. Im Grundzug ist die Wirkung in Siedlungsflächen vergleichbar, es kann aber bei der zu erwartenden Senkenleistung Abweichungen geben, je nachdem welche Gehölzarten gewählt werden oder wie intensiv die Pflege der Heckenstrukturen durchgeführt wird.

In Abbildung 11 ist die jährliche CO₂-Einbindung für vier typische Stadtbäume in Anlehnung an Rötzer et al. (2019) sowie der Mittelwert über diese Baumarten dargestellt. Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Alter ein Stadtbaum mehr an CO₂ einbinden kann. So kann bei einem 30-jährigen Baum mit einer jährlichen CO₂-Einbindung von 21 kg CO₂/Baum gerechnet werden. Im doppelten Alter liegt der Wert mit 61 kg CO₂/Baum etwa dreimal so hoch, und bei einem 90-jährigen Baum mit 120 kg CO₂/Baum sechsmal so hoch.

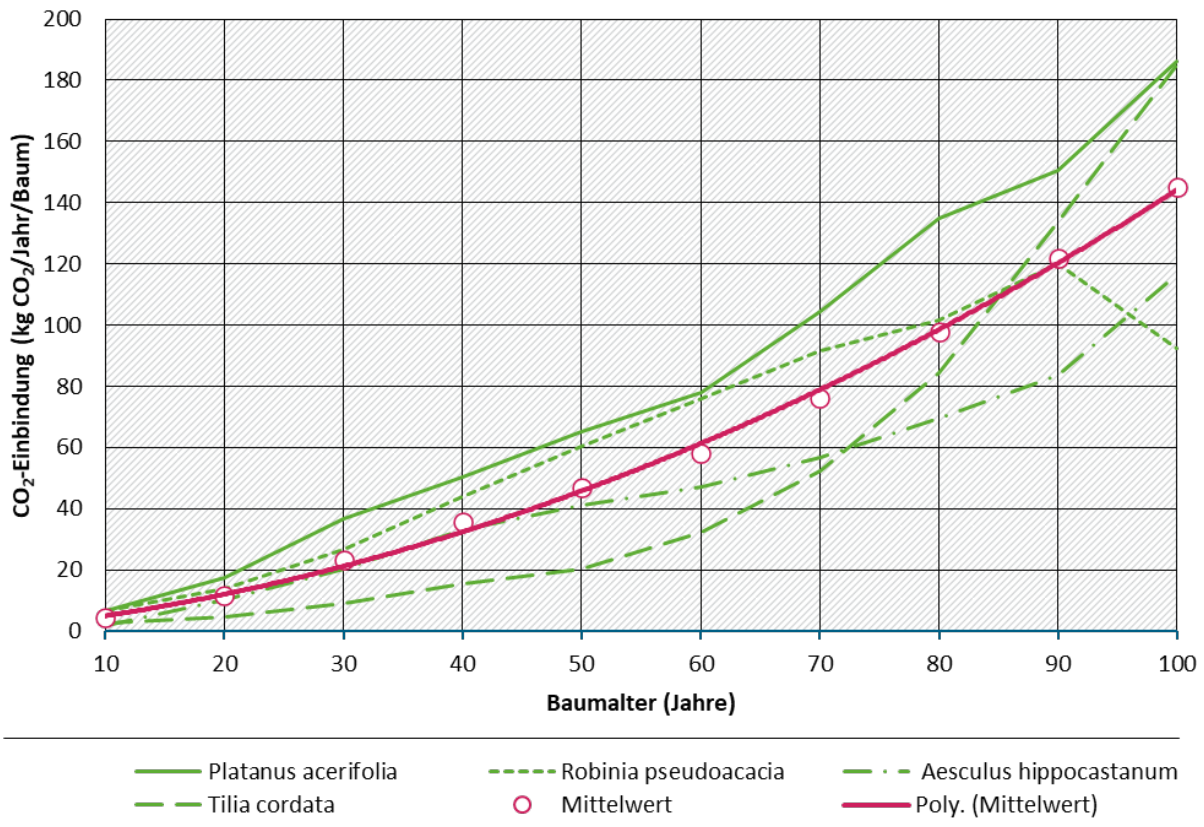
Dieser Zusammenhang zeigt, dass mit der Neupflanzung von Bäumen in den ersten Jahren nur geringe CO₂-Einbindungen erreicht werden können. Werden z. B. im Jahr 2023 – wie im Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz angestrebt – 150.000 Stadtbäume mit einem Alter

von 10 Jahren neu gepflanzt, so kann im Jahr 2030 durch die dann 17 Jahre alten Bäume eine CO₂-Einbindung von 1.455 t CO₂ erwartet werden.

Auch ist zu berücksichtigen, dass die in Abbildung 11 dargestellten Baumarten besonders groß werden können. Für weniger wüchsige Baumarten wie Eberesche, Elsbeere, Eibe oder Obstbaumarten kann eine geringere CO₂-Einbindung erwartet werden.

Leider liegen aber für andere Baumarten keine detaillierten Zuwächse bzw. CO₂-Einbindungen je Alter vor (Rötzer, persönliche Mitteilung). Solange keine Baumart-spezifischen Daten vorliegen, können zu erwartende Abweichungen über einen Abschlagsfaktor berücksichtigt werden.

Abbildung 11: CO₂-Einbindung in Stadtbäumen



Anmerkung: Berechnung auf Basis von Rötzer et al. (2019). Annahme: 50 % C-Gehalt in der Trockenmasse. Regression: $0,0105 x^2 + 0,3907 x$.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Wird im Frühjahr 2023 ein Stadtbaum gepflanzt, so erreicht er im Jahr 2030 eine CO₂-Einbindung von 9,7 kg/Jahr bzw. über den Zeitraum von 8 Jahren eine kumulierte CO₂-Einbindung von 58 kg CO₂. Bis zum Jahr 2045 steigt die jährliche CO₂-Einbindung auf 23,3 kg CO₂/Jahr, und die kumulierte CO₂-Einbindung in den 23 Jahren beträgt 306 kg CO₂. Im Jahr 2100 erreicht der Baum ein Alter von 78 Jahren und speichert 113,5 kg CO₂/Jahr. In Summe werden in dem Baum 3.820 kg CO₂ eingelagert (siehe Tabelle 4).

Die Kosten für die Pflanzung von Stadtbäumen liegen bei ca. 2.500 €/Baum (Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt 2024). Dies bedeutet, dass – bezogen auf CO₂-Einbindung seit dem Pflanzjahr (kumulativ) – bis zum Jahr 2030 die CO₂-Minderungskosten bei über 40.000 EUR/t CO₂ liegen. Selbst bis zum Jahr 2100 sinken die CO₂-Minderungskosten nur auf einen Wert von 655 EUR/t CO₂. Dies zeigt, dass aus Klimaschutzsicht die Pflanzung von Stadtbäumen im Vergleich zu anderen Maßnahmen zu natürlichen Kohlenstoffsenken eine sehr kostenintensive Maßnahme ist. Als Gründe für die Pflanzung von Stadtbäumen sollten andere

Ziele im Vordergrund stehen wie der positive Beitrag zum Stadtklima. Die CO₂-Einbindung ist vielmehr als ein positiver Nebeneffekt zu werten.

Tabelle 4: Beispiel der CO₂-Einbindung und Kosten eines Stadtbaums

Bezugs-jahr	Zeitintervall	Baumalter (Jahre)	CO ₂ -Einbindung im Bezugsjahr (kg CO ₂ /Baum)	CO ₂ -Einbindung im Zeitintervall (kg CO ₂ /Baum)	Investitionskosten (EUR)	CO ₂ -Minderungskosten bis zum Bezugsjahr (EUR/t CO ₂)
2030	8 Jahre	17	9,7	58	2.500 (Frühjahr 2023)	43.144
2045	23 Jahre	32	23,3	506		8.174
2100	78 Jahre	87	113,5	3.820		655

Anmerkung: Eigene Berechnungen in Anlehnung an Abbildung 11. Annahme: Der Baum wird im Alter von 10 Jahren gepflanzt.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Überblick zur Kohlenstoffspeicherung in Bäumen in Siedlungsflächen

Einspeicherungspotenzial

Bei der Neupflanzung von 150.000 Stadtbäumen im Alter von 10 Jahren in 2023, kann im Jahr 2030 mit einer CO₂-Einbindung von rund 1.455 t gerechnet werden. Mit zunehmendem Alter der Bäume steigt auch deren jährliche CO₂-Aufnahme (siehe Tabelle 4). Das Potenzial ist neben dem Alter der Bäume auch von der Baumart abhängig.

Zeitliche Verfügbarkeit des Potenzials

Wie bei der Etablierung neuer Waldflächen, baut sich das Potenzial zunächst über viele Jahrzehnte auf, in denen die Bäume älter werden.

Risiken und Einschränkungen

Die Pflanzung von Bäumen, die bereits in einer Baumschule gepflegt wurden, sind mit hohen Kosten für den Einkauf und die anhaltende Pflege verbunden. Natürliche Störungen, wie Stürme und insbesondere langanhaltende Dürreperioden können zum Absterben der neu gepflanzten Bäume oder zu Zuwachseinbußen durch erhöhten Stress führen. Darüber hinaus können städtische Standorte besonders herausfordernd sein und zu einer verminderten Resilienz gegenüber Störungen führen. Zu den Herausforderungen gehören die Versiegelung und die damit verbundene geringere Wasserverfügbarkeit im Boden, erhöhte schädliche Stoffeinträge durch den Straßenverkehr, sowie die Vereinzelnung der Bäume und dem damit verbundenen fehlenden Schutz in Baumgruppen.

Synergien mit weiteren Ökosystemleistungen

Durch die zusätzliche Begrünung im Siedlungsraum können hohe Synergien mit der Anpassung von Städten an höhere Temperaturen vor allem in den Sommermonaten entstehen. Die Bäume tragen zur Kühlung ihrer Umgebung bei. Außerdem stellen sie wichtige Lebensräume für verschiedene Arten im Siedlungsbereich dar und tragen wesentlich zum Wohlbefinden der Stadtbevölkerung bei.

3 Sensitivitätsanalyse natürlicher Kohlenstoffsenken

Sensitivitätsanalysen in Modellen können dazu genutzt werden, gezielte Fragestellungen zu beantworten. In den folgenden Kapiteln werden mit Hilfe der Modelle FABio-Land und FABio-Forest¹³ die folgenden Fragestellungen analysiert:

- ▶ **Wald:**
Wie verändert sich die THG-Bilanz der lebenden Bäume, wenn natürliche Störungen zunehmen? (s. Kapitel 3.1)
- ▶ **Holzprodukte:**
Wie verändert sich die THG-Bilanz des Holzproduktspeichers, wenn verstärkt langlebige Holzprodukte verwendet werden? (s. Kapitel 3.2)
- ▶ **Wiedervernässung organischer Böden:**
Wie verändert sich die THG-Bilanz organischer Böden, wenn es zu Wasserknappheit kommt? (s. Kapitel 3.3)
- ▶ **Bodenkohlenstoff auf Ackerböden:**
Wie verändert sich die THG-Bilanz der Ackerfläche, wenn verstärkt Agroforstsysteme angelegt oder verstärkt Flächen als ökologischer Landbau bewirtschaftet werden? (s. Kapitel 3.4)

3.1 Wald

Das Waldmodell FABio-Forest ist ein distanzunabhängiges Einzelbaummodell, mit dem deutschlandweit die Entwicklung von Waldbeständen modelliert werden kann (Böttcher et al. 2018b; Pfeiffer et al. 2023). Eingangsdaten stammen aus der Bundeswaldinventuren der Jahre 2002 (BWI-2) und 2012 (BWI-3). Als Untermodelle sind zu nennen:

- ▶ **Waldwachstumsmodell:** Zuwachs einzelner Bäume in Abhängigkeit von Baumart, Durchmesser, Höhe, Konkurrenz und Standortbedingungen sowie von einfachen Annahmen zu Auswirkungen natürlicher Störungen z.B. durch den Klimawandel (genutzt zur Berechnung der Sensitivitäten).
- ▶ **Mortalitätsmodell:** Mortalität einzelner Bäume in Abhängigkeit von Baumart, Durchmesser, Alter, Konkurrenz, Standortbedingungen und Baumartenvielfalt sowie von Annahmen zu natürlichen Störungen z.B. durch den Klimawandel (genutzt zur Berechnung der Sensitivitäten).
- ▶ **Einwuchsmodell:** Einwuchs von Baumarten aus dem im Bestand vorhandenen Artenpool sowie zufällig hinzukommende bzw. gezielt geförderte weitere Baumarten. Eine Überprägung durch Durchforstung ist möglich.
- ▶ **Totholzmodell:** Entwicklung des Vorrats an Totholz (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.
- ▶ **Holzentnahme-Modell:** In FABio-Forest wird die Holznachfrage genutzt, um die Holzentnahme im Wald zu steuern. Ab dem Jahr 2013 wird die historische Holznachfrage

¹³ Das Öko-Institut entwickelt seit 2015 den FABio Modellverbund (Forestry and Agriculture Biomass Model). Er besteht aus vier Teilmodellen: FABio-Land (LULUCF), FABio-Forest (Wald), Agrarmodell LiSE und FABio-Biomass (Biomassepotenziale).

verwendet und ab dem Jahr 2022 fortgeschriebene Werte bzw. Ergebnisse aus Holzverwendungsmodellierung (siehe Pfeiffer et al. 2023).

Mit dem Waldmodell FABio-Forest wurde im Rahmen des UBA-Projekts Politikszenerarien XI (UBA 2022b) ein Szenario (FABio-PB2023) umgesetzt. Die Annahmen in FABio-PB2023 entsprechen den Annahmen des Mit-Maßnahmen-Szenarios (MMS) im Projektionsbericht 2023 der Bundesregierung (UBA 2022b). Die Jahre 2013 bis 2021 wurden anhand von historischen Daten zur Holzentnahme (Jochem et al. 2022), zur beobachteten Mortalität (Waldzustandserhebung, Thünen-Institut 2024), zur Zuwachsentwicklung bis zum Jahr 2017 (Treibhausgasinventur 2017, Thünen-Institut 2017) sowie mit Annahmen zum Zuwachs in den Jahren 2018 bis 2021 (Pfeiffer et al. 2023) parametrisiert.

Ab dem Jahr 2022 werden Annahmen zu den Sensitivitäten geringe, mittlere und starke Störung (z.B. Dürre, Sturm) getroffen (Tabelle 5). Die Sensitivität geringe Störung entspricht der Fortschreibung der Bedingungen für die natürliche Mortalität und für den Zuwachs in den Jahren 2013 bis 2017. In der Sensitivität mittlere Störungen werden für die Mortalitätsrate und den Zuwachs Mittelwerte der Jahre 2002 bis 2017 herangezogen. In diesen Zeitraum fallen natürliche Störungen wie Orkan Janette (2002), Dürre (2003) und Orkan Kyrill (2007). Die Sensitivität starke Störung bezieht sich für die natürliche Mortalität auf den Mittelwert der Jahre 2002 bis 2021, so dass die sehr hohen Mortalitätsraten der Jahre 2018 bis 2021 einfließen. Für den Zuwachs wird der Mittelwert der Jahre 2002 bis 2017 um 10% reduziert, um verringerte Wuchsleistungen durch z.B. Trockenstress zu berücksichtigen. Der Holzeinschlag wird in allen drei Sensitivitäten auf dem Niveau der Jahre 2013 bis 2017 fortgeschrieben (Tabelle 5).

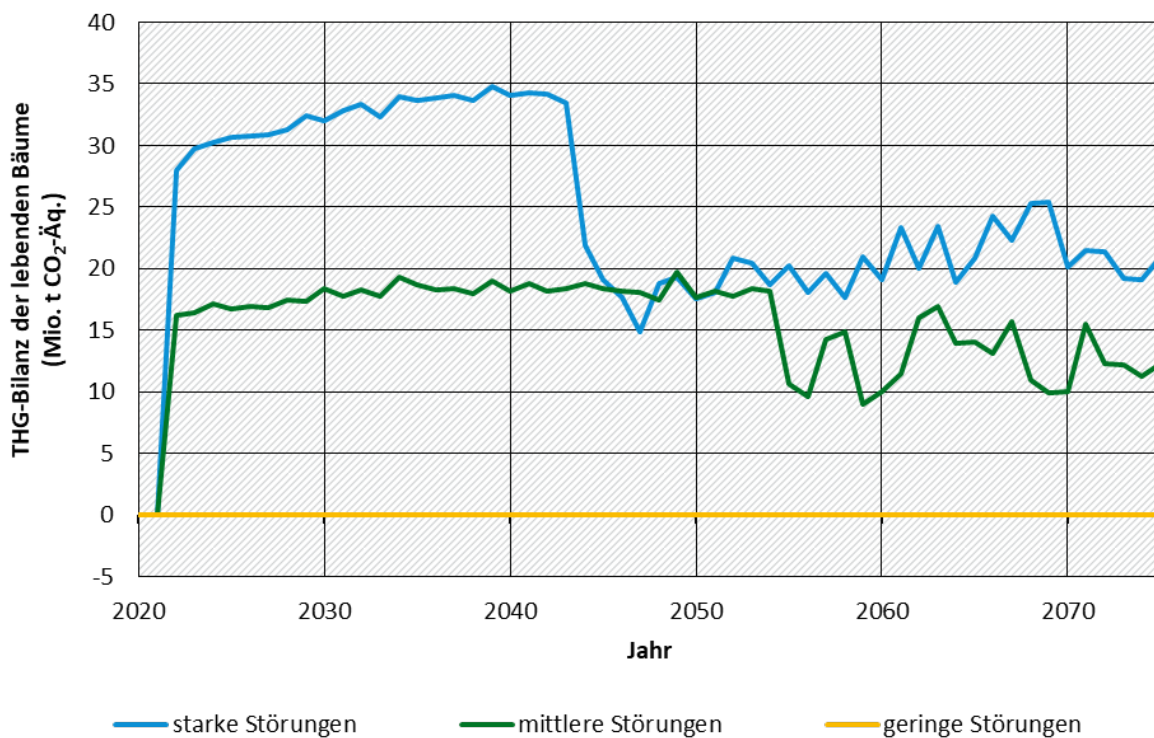
Tabelle 5: Parametrisierung der Sensitivitäten geringe, mittlere und starke Störung

Parametergruppe	Sensitivität geringe Störungen (FABio-PB2023)	Sensitivität mittlere Störungen	Sensitivität starke Störungen
Holzentnahme	Mittlere Holzentnahme wie in den Jahren 2013-2017 (Jochem et al. 2022).		
Natürliche Mortalität	Mittlere Mortalitätsraten wie in den Jahren 2013-2017	Mittlere Mortalitätsraten wie in den Jahren 2002-2017	Mittlere Mortalitätsraten wie in den Jahren 2002-2021
Zuwachs	Mittelwert der Jahre 2013-2017	Mittelwert der Jahre 2002-2017	0,9 * Mittelwert der Jahre 2002-2017

Anmerkung: Mortalitätsraten angelehnt an die Ergebnisse der Waldzustandserhebung (WZE), siehe auch Pfeiffer et al. (2023).

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

In Abbildung 12 ist die THG-Bilanz für die lebenden Bäume auf der Waldfläche als Vergleich der drei Sensitivitäten dargestellt. Um Unterschiede zwischen den berechneten Sensitivitäten und damit Effekte der Annahmen zu natürlichen Störungen besser sichtbar zu machen, werden die Veränderungen in den Sensitivitäten mittlere und starke Störung als Differenz zur Sensitivität geringe Störung ausgewiesen. In dieser Darstellung entspricht die Sensitivität - geringe Störungen - der Null-Linie.

Abbildung 12: Sensitivitäten zu lebenden Bäumen der Waldfläche

Anmerkung: Daten auf Basis von Berechnungen in FABio-Forest.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Die Annahme von mittleren Störungen führt zu einem Verlust an Senkenleistung von 17 bis 20 Mio. t CO₂/Jahr (Jahre 2022 bis 2054). Mit den Annahmen der Sensitivität starke Störungen stellt sich eine Abnahme der Senkenleistung von bis zu 35 Mio. t CO₂/Jahr ein (Jahre 2022 bis 2043; Abbildung 12). Diese Abnahme der Senkenleistung resultiert aus verringerten Zuwächsen und erhöhten Abgängen durch natürliche Mortalität bei gleichbleibender Holzentnahme. Hierdurch werden vor allem bestehende Vorräte in Nadelwäldern kontinuierlich abgebaut. In der Sensitivität starke Störungen ist ab dem Jahr 2044 der Vorrat alter Nadelbäume abgeschöpft. Die Nachfrage nach Nadelholz kann nicht mehr vollständig gedeckt werden, da das Durchforstungsholz und neu hiebsreife Bäume hierfür nicht ausreichen. Das Erntedefizit beläuft sich auf 8 bis 14 Mio. m³. In Summe wird weniger Holz aus dem Wald entnommen und die THG-Bilanz der lebenden Bäume verbessert sich (Abbildung 12). Der gleiche Effekt tritt auch, weniger stark ausgeprägt, in der Sensitivität mittlere Störungen auf (Erntedefizit von 1 bis 7 Mio. m³).

Wird die fehlende inländische Holzentnahme durch Holzimporte gedeckt, so ist damit zu rechnen, dass sich die THG-Bilanz der lebenden Bäume auf den Waldflächen in den Herkunftsländern verschlechtert (Leakage-Effekte). Dieser so genannte CO₂-Speichersaldo liegt bei 1,2 t CO₂/m³ (±0,7 t CO₂/m³; Soimakallio et al. 2022¹⁴ und Textbox in Kap. 2.1). Anhand dieses Faktors kann eingeschätzt werden, wie stark zu erwartende Effekte im Herkunftsland ausfallen:

- Mittlere Störungen ab dem Jahr 2055: bei 1 bis 7 Mio. m³ Holzentnahme im Ausland kann mit einer Verringerung der THG-Bilanz auf Waldflächen in den Herkunftsländern von 1,2 bis 8,4 Mio. t gerechnet werden.

¹⁴ Siehe Erläuterungen im Blog „RED III-Methodik: In der Treibhausgasbilanz für Energieholz fehlt ein wichtiger Aspekt der IPCC-Regeln“ <https://blog.oeko.de/red-iii-methodik-in-der-treibhausgasbilanz-fuer-energieholz-fehlt-ein-wichtiger-aspekt-der-ipcc-regeln/>

- ▶ Starke Störungen ab dem Jahr 2044: bei 8-14 Mio. m³ Holzentnahme im Ausland kann mit einer Verringerung der THG-Bilanz auf Waldflächen in den Herkunftsländern von 9,6 bis 16,8 Mio. t gerechnet werden.

Die Abschätzung der zu erwartenden Veränderung der THG-Bilanz der Waldfläche im Ausland liegt in der Größenordnung der Verbesserungen der THG-Bilanz der lebenden Bäume in Deutschland. An dieser Stelle besteht weiterer Forschungsbedarf, um Leakage-Effekte genauer zu quantifizieren.

Abschließend ist festzuhalten, dass – je nach Intensität der Zunahme natürlicher Störungen – mit einer Verschlechterung der THG-Bilanz auf der Waldfläche von bis zu 35 Mio. t CO₂äq./Jahr gerechnet werden kann. Für zukünftige Modellierungsarbeiten sollte dem Faktor natürliche Störungen mehr Beachtung geschenkt werden. Eine Fortschreibung der Situation aus den Jahren 2013-2017 (siehe MMS im Projektionsbericht der Bundesregierung) ist als eine Unterschätzung möglicher Risiken zu werten. Aus der vorliegenden Sensitivität erscheint es sinnvoller, z.B. mittlere natürliche Störungen anzunehmen und ggf. eine Spannbreite möglicher Entwicklungen anzugeben.

3.2 Holzprodukte

Der Kohlenstoffvorrat im Holzproduktspeicher wird durch Zuflüsse an Holzprodukten gespeist, und er verringert sich durch Abflüsse an Holzprodukten am Ende ihrer Lebensdauer (Kap. 2.2). In den Jahren 2011 bis 2020 wurde ein mittlerer Zufluss an Holzprodukten von 64 Mio. m³/Jahr in Deutschland ermittelt, wovon 42 Mio. m³/Jahr auf Schnittholz und Holzwerkstoffe (inländisch und Export) entfielen (Tabelle 6). Der Abfluss wird in der Bilanzlogik der THG-Berichterstattung über feste Halbwertszeiten angenommen (Kap. 2.2).

Tabelle 6: Mittlerer Zufluss an Holzprodukten in den Holzproduktspeicher

Produktgruppe	Mittlerer Zufluss an Holzprodukten (2011-2020) (Mio. m ³)
Schnittholz (inländischer Konsum)	14,78
Schnittholz (Export)	5,98
Holzwerkstoffe (inländischer Konsum)	7,50
Holzwerkstoffe (Export)	13,72
Papier und Pappe (inländischer Konsum)	8,73
Papier und Pappe (Export)	13,72
Summe	64,43

Anmerkung: Die Zuflüsse für Papier und Pappe werden in den folgenden Analysen als konstant fortgeschrieben.

Quelle: CRF-Tabellen der Submission 2022 (UBA 2022a).

Als Maßnahme zur Erhöhung des Holzproduktspeichers wird vor allem diskutiert, den Zufluss an Holzprodukten mit einer hohen Lebensdauer zu erhöhen. Dies betrifft Schnittholz und Holzwerkstoffe als langlebige Holzprodukte.

Als Sensitivitäten für die beiden langlebigen Produktgruppen Schnittholz und Holzwerkstoffe werden in FABio-Land analysiert:

- ▶ Fortschreiben des Zuflusses an Holzprodukten aus den Jahren 2011 bis 2020
- ▶ Stufenweise Steigerung des Zuflusses an Holzprodukten um 10%, 20%, 30%, 40% und 50% bis zum Jahr 2045 (beispielhafter Pfad für 50%-Steigerung in Tabelle 7).
- ▶ Ab dem Jahr 2045 bleibt der Zufluss an Holzprodukten konstant auf dem neuen Niveau.

Tabelle 7: Zusätzliche angenommener Zufluss an Holzprodukten in den Holzproduktspeicher (kumulativ) für die Sensitivität einer 50%-igen Steigerung

Produktgruppe (Mio. m ³)	2025	2030	2035	2040	2045	2050-2075
Schnittholz (inländischer Konsum)	0,74	2,96	4,43	5,91	7,39	7,39
Schnittholz (Export)	0,30	1,20	1,79	2,39	2,99	2,99
Holzwerkstoffe (inländischer Konsum)	0,38	1,50	2,25	3,00	3,75	3,75
Holzwerkstoffe (Export)	0,69	2,74	4,12	5,49	6,86	6,86
Ergebnis	2,10	8,40	12,59	16,79	20,99	20,99

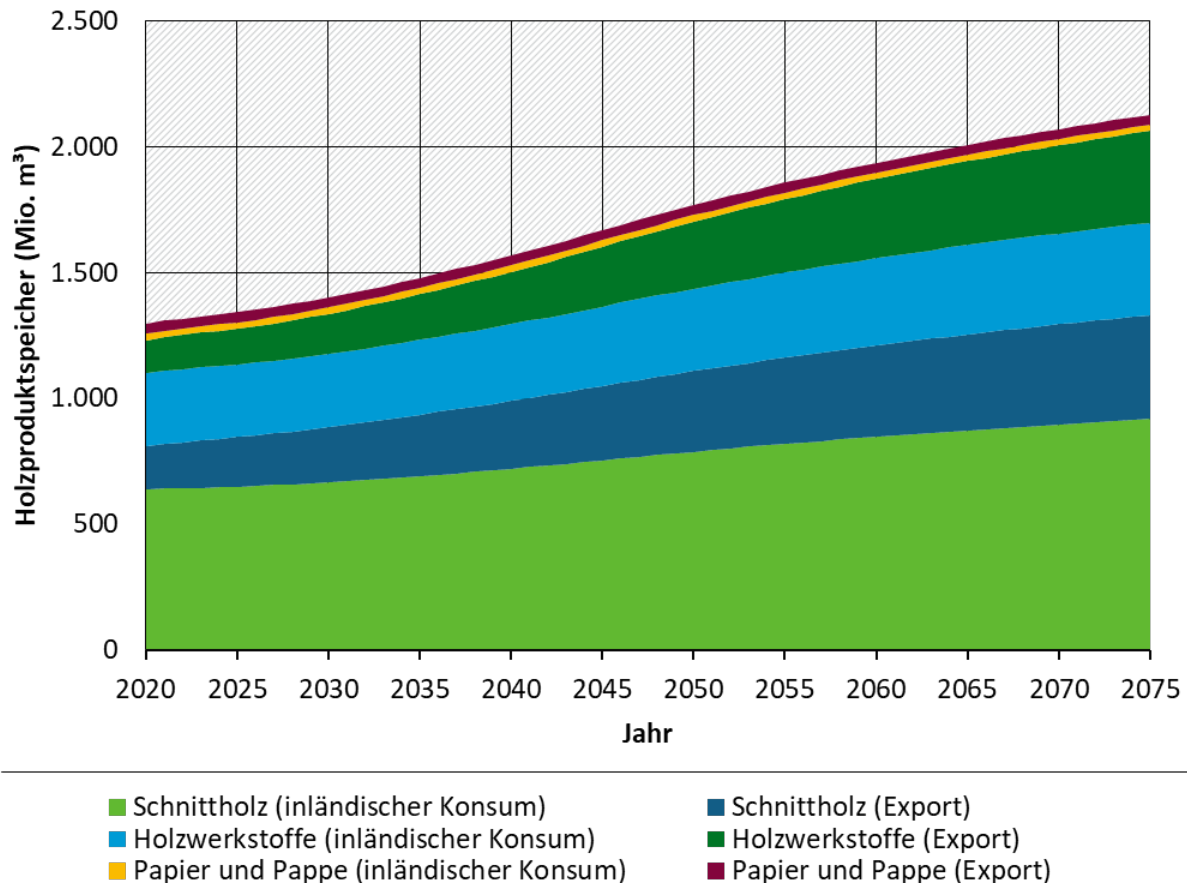
Anmerkung: Bezugswert zur Ableitung der zusätzlich angenommenen Zuflüsse in den Holzproduktspeicher ist der Mittelwert der Jahre 2011-2020 (Tabelle 6). Startzeitpunkt 2023 und lineare Fortschreibung bis 2045. Nach der Inventarmethode (IPCC 2006) werden alle Holzprodukte, die aus Holz aus Deutschland hergestellt werden, in das Inventar eingerechnet. Holzprodukte aus Importholz werden hingegen im Inventar des Herkunftslands bilanziert. In 1 m³ Holz sind 0,7 t CO₂/m³ (z.B. Fichte) bis 1,0 t CO₂/m³ (z.B. Buche) gespeichert.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

In FABio-Land wird, auf Basis der IPCC-Methode zum Holzproduktspeicher und den berichteten Inventar-Daten als Zufluss in den Holzproduktspeicher (CRF-Tabellen der Submission 2022, (UBA 2022a)), ein Vorrat an Holzprodukten generiert. Dieser Vorrat wird exemplarisch für die Entwicklung des Holzproduktspeichers in Abbildung 13 dargestellt. Ausgehend von einem Holzproduktspeicher von 1,3 Mrd. m³ in 2020 steigt bei einer 50%-igen Steigerung des Zuflusses

an Holzprodukten bis zum Jahr 2050 (siehe Tabelle 7) deutlich an und erreicht im Jahr 2075 ein Volumen von 2,1 Mrd. m³ (Abbildung 13).

Abbildung 13: Entwicklung des Holzproduktspeichers durch zusätzlich angenommenen Zufluss (kumulativ) für die Sensitivität einer 50%-igen Steigerung



Anmerkungen: Auf Basis von Berechnungen in FABio-Land (vgl. Annahmen in Tabelle 7).

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

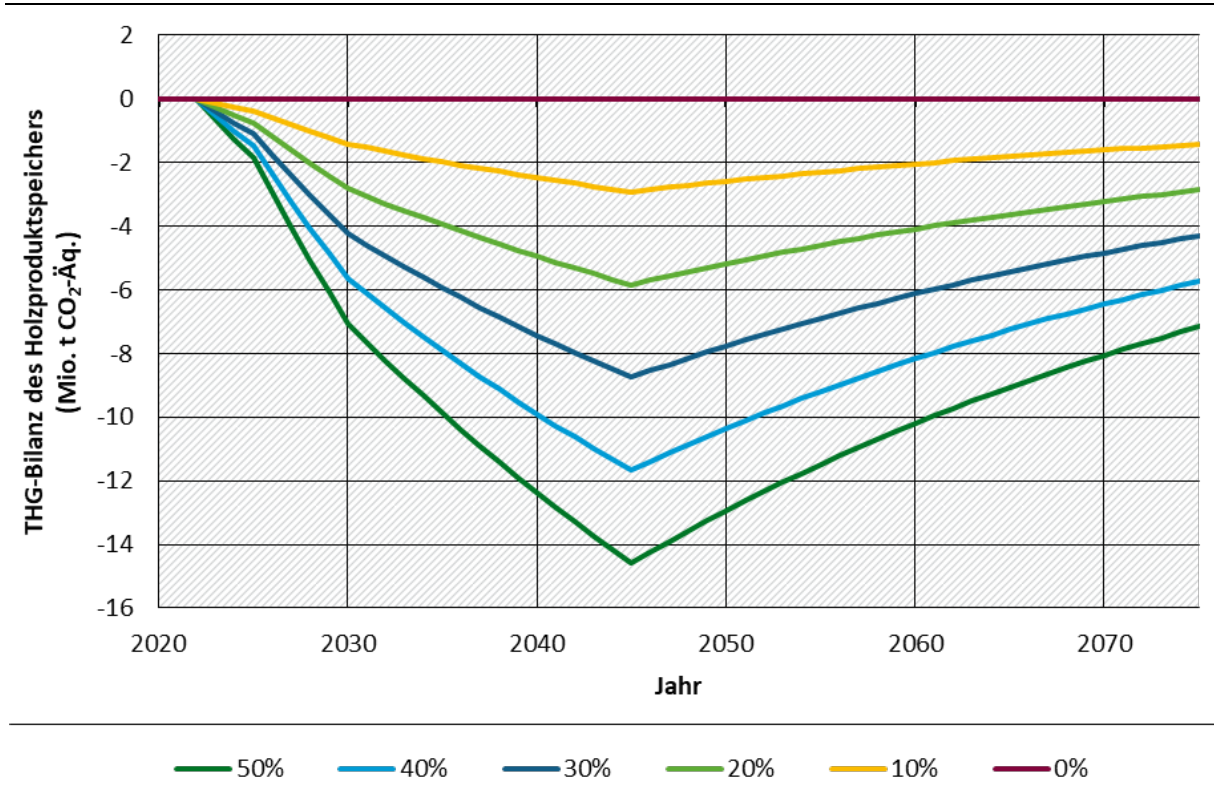
In Abbildung 14 ist die Steigerung der Senkenleistung dargestellt, die sich bei einer Steigerung des Zuflusses an Holzprodukten ergibt. Es wird die Differenz der Ergebnisse aus der Sensitivität 0% und den übrigen Sensitivitäten aufgetragen, um den Effekt aus dem veränderten Zufluss besser sichtbar zu machen.

Mit dem stetig steigenden Zufluss an Holzprodukten in den Holzproduktspeicher bis zum Jahr 2045 steigt auch die Senkenleistung im Holzproduktspeicher. In der Sensitivität 50% erreicht die zusätzliche Senkenleistung im Jahr 2045 einen Wert von ca. 14,5 Mio. t CO₂. Dieser Wert ist niedriger als die Menge an CO₂, die im Holzzufluss gespeichert ist (vgl. Tabelle 7), denn parallel zur Einspeicherung findet schon ein Abfluss statt. Ab dem Jahr 2045 bleibt der Zufluss an Holzprodukten konstant auf dem neuen Niveau. Da die Dynamik der Abflüsse zeitverzögert reagiert, bleibt weiterhin eine zusätzliche Senkenleistung erhalten, die aber kontinuierlich abnimmt, bis ein neuer Gleichgewichtszustand bei erhöhtem Holzproduktspeicher erreicht ist.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass eine vermehrte Nutzung von Holz als langlebige Holzprodukte eine deutliche Senkenleistung erbringen kann. Dies ist aber nur sinnvoll, wenn gleichzeitig die Nutzung von Energieholz und von kurzlebigen Holzprodukten zurückgeht, um die Gesamtmenge der Holznutzung nicht zu erhöhen. Gerade bei Energieholz, welches direkt aus dem Wald entnommen wird, ist eine Umnutzung besonders vorteilhaft. So kann der im Holz

gespeicherte Kohlenstoff entweder länger auf der Waldfläche oder in langlebigen Holzprodukten bleiben (vgl. Fehrenbach et al. 2022). Würde ein steigender Zufluss an Holz in langlebige Produkte erfolgen, ohne dass es zu einer Verringerung anderer Nutzungen kommt, würde dies eine zusätzliche Holzentnahme aus dem Wald in Deutschland oder Importe aus dem Ausland erfordern und die Senkenleistung der Waldfläche verringern (vgl. Kap. 3.1 und Textbox in Kap. 2.1).

Abbildung 14: Sensitivitäten zum Holzproduktspeicher als Differenz zum Szenario mit einem konstanten Zufluss an Holzprodukten (0% Steigerung)



Anmerkungen: Auf Basis von Berechnungen in FABio-Land. Prozentwerte: 0% bis 50% erhöhter Zufluss an Holzprodukten in den Holzproduktspeicher im Vergleich zum Mittelwert der Jahre 2011-2020 (Tabelle 6). Siehe beispielhafter Pfad für den 50% erhöhter Zufluss in Tabelle 7 und Abbildung 13.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

3.3 Wiedervernässung organischer Böden

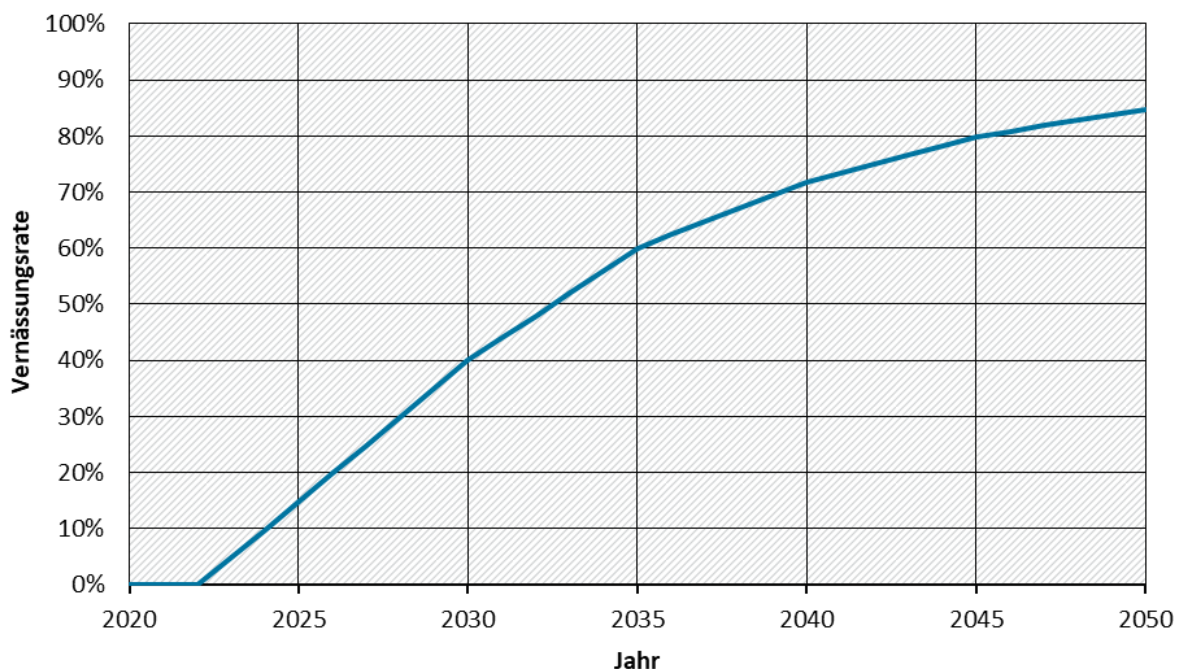
Die Effizienz des Moorbodenschutzes hängt stark ab von der Höhe der Wasserstände, die erreicht werden können (vgl. Abbildung 7). Ausgedehnte Trockenperioden können in Teilen Deutschlands dazu führen, dass die verfügbaren Wassermengen nicht ausreichen, um angestrebte Wasserstände zu erreichen. Hierzu werden die folgenden Sensitivitäten in FABio-Land analysiert:

- ▶ Als Startpunkt wird ein ambitioniertes Szenario zum Moorbodenschutz hinterlegt. So werden bis zum Jahr 2045 80% der landwirtschaftlich genutzten organischen Böden wiedervernässt (Abbildung 15). Da die Sensitivitätsanalyse auf Risiken durch Wassermangel abzielt, wird diese Vernässungsrate nicht verändert.
- ▶ Für das Wasserstandsniveau werden zwei Niveaus in den Sensitivitäten berücksichtigt, -5 cm als optimales Vernässungsregime und -20 cm als suboptimales Vernässungsregime aufgrund von Wassermangel. Für die Intensität der Wiedervernässung werden fünf Kombinationen zu

diesen beiden Wasserstandniveaus als Sensitivitäten angenommen. Diese Annahmen werden auf alle wiedervernässten Flächen in Deutschland angewandt.

- 100% -5 cm; 0% -20 cm: auf 100% der vernässten Fläche in Deutschland kann der optimale Wasserstand erreicht werden.
- 75% -5 cm; 25% -20 cm: auf 75% der vernässten Fläche in Deutschland kann der optimale Wasserstand, auf 25% der Fläche nur ein suboptimaler Wasserstand erreicht werden.
- 50% -5 cm; 50% -20 cm: auf 50% der vernässten Fläche in Deutschland kann der optimale Wasserstand, auf 50% der Fläche nur ein suboptimaler Wasserstand erreicht werden.
- 25% -5 cm; 75% -20 cm: auf 25% der vernässten Fläche in Deutschland kann der optimale Wasserstand, auf 75% der Fläche nur ein suboptimaler Wasserstand erreicht werden.
- 0% -5 cm; 100% -20 cm: auf 100% der vernässten Fläche in Deutschland kann nur ein suboptimaler Wasserstand erreicht werden.

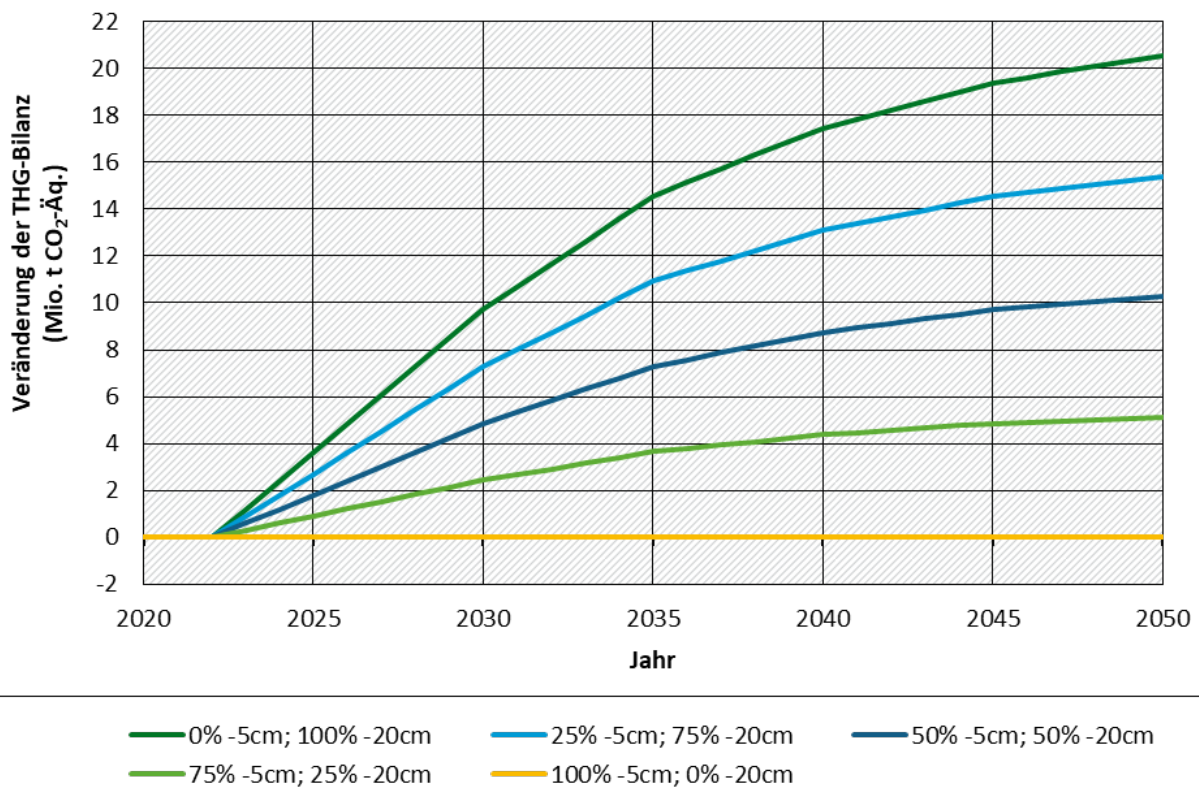
Abbildung 15: Anteil wiedervernässter organischer Böden auf landwirtschaftlichen Flächen bis zum Jahr 2050



Anmerkungen: Auf Basis von Berechnungen in FABio-Land.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Die Effektivität der Wiedervernässung ist direkt an die erreichten Wasserstände gekoppelt. Unter Annahme einer Flächenkulisse mit einer ambitionierten Umsetzung der Wiedervernässung bis zum Jahr 2050 kann ein suboptimales Wasserstandregime dazu führen, dass etwa 20 Mio. t CO₂äq./Jahr weniger an Emissionen gemindert werden als unter der Annahme eines optimalen Wasserstandregime (Abbildung 16). Tritt ein suboptimales Wasserregime bei 25% der vernässten Flächen auf, ist bereits mit einer verpassten Emissionsminderung von 5 Mio. t CO₂äq./Jahr zu rechnen.

Abbildung 16: Sensitivitäten zur Wiedervernässung landwirtschaftlich genutzter organischer Böden als Differenz zum Szenario mit optimalem Vernässungsregime (100% -5 cm)

Anmerkungen: Auf Basis von Berechnungen in FABio-Land.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass Wasserknappheit einen deutlichen Effekt auf die Effektivität von Wiedervernässungsmaßnahmen hat. In zukünftigen Modellierungen zum LULUCF-Sektor sollte dieser Aspekt einfließen. Für die Umsetzung in der Fläche sollten bei der Planung Optionen zum Umgang mit Wassermangel berücksichtigt werden.

3.4 Kohlenstoffspeicherung auf Ackerflächen

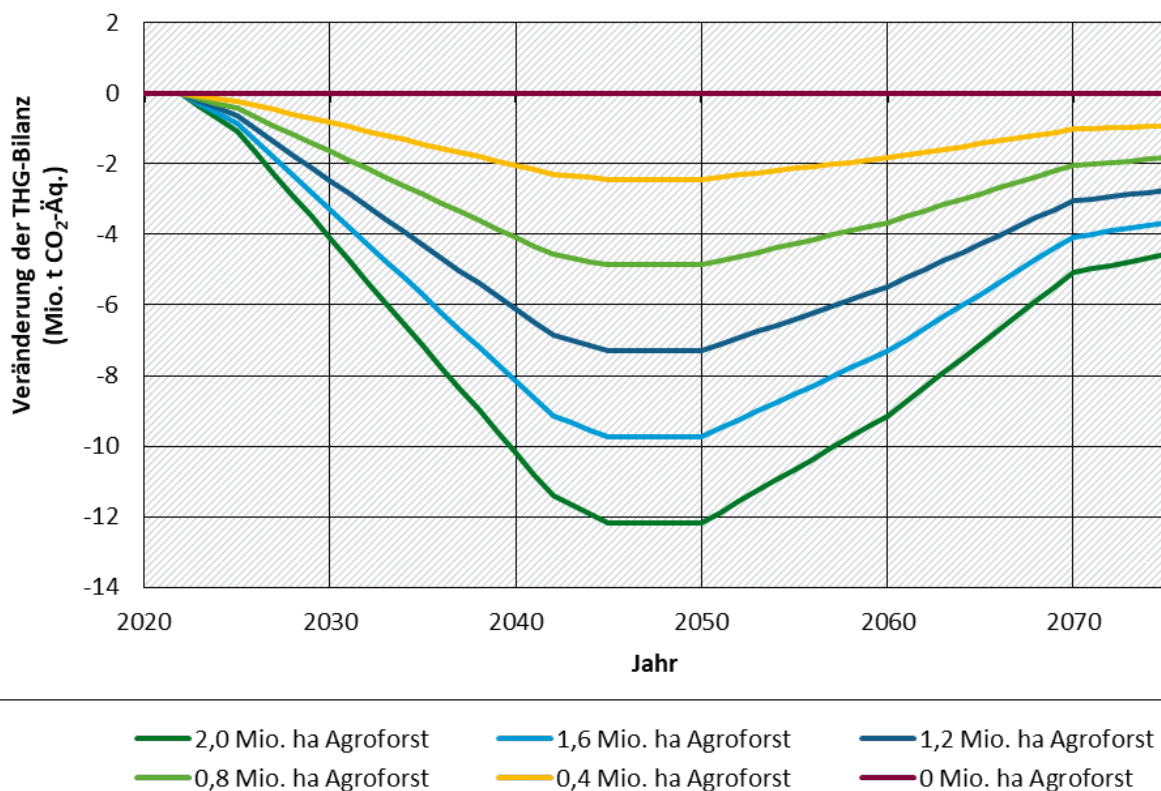
Potenziale zur langfristigen und verlässlichen Erhöhung der Kohlenstoffspeicherung auf Ackerflächen liegen vor in Agroforstsystemen und in der Umstellung von konventionellem auf ökologischen Landbau (siehe Kapitel. 2.5). Im LULUCF-Modell FABio-Land werden die folgenden beiden Möglichkeiten als Sensitivitäten abgebildet:

- ▶ Für das Ausgangsszenario in Kap. 3.3 wird angenommen, dass keine Agroforstsysteme angelegt werden. In fünf Sensitivitäten wird die Fläche an Agroforstsystemen bis zum Jahr 2050 auf 0,4 Mio. ha, 0,8 Mio. ha, 1,2 Mio. ha, 1,6 Mio. ha bzw. 2,0 Mio. ha erhöht. Der Anstieg dieser Flächennutzung erfolgt ab dem Jahr 2030 linear. Ab dem Jahr 2050 werden in geringeren Umfängen zusätzliche Fläche als Agroforstsysteme ausgewiesen (siehe Details in Abbildung 17).
- ▶ Der Anteil an ökologischem Landbau im Ausgangsszenario (Kap. 3.3) liegt im Jahr 2030 bei 30%. Dieser Anteil wird als Sensitivitäten für das Jahr 2030 mit 10% (Stand im Jahr 2020), 20%, 30%, 40% und 50% variiert (siehe Details in Tabelle 8).

Sensitivitäten zu Agroforstsystemen

Nach Anlage von Agroforstsystemen wird in FABio-Land angenommen, dass sich auf den Flächen über die ersten 20 Jahre¹⁵ der Kohlenstoffvorrat erhöht. Bis zum Jahr 2045 wird so in den Sensitivitäten eine maximale jährliche CO₂-Einbindung erreicht. Bei einer Agroforstfläche von 2,0 Mio. ha kann im Jahr 2045 eine CO₂-Einbindung von -12 Mio. t CO₂ erwartet werden (Abbildung 17). Für die verbliebenen Agroforstflächen (ab dem Jahr 21) wird in FABio-Land keine weitere CO₂-Einbindung angenommen. So stellt sich bis zum Jahr 2050 für die CO₂-Einbindung ein Plateau ein. Da ab dem Jahr 2051 weniger neue Agroforstflächen angelegt werden, als in den Pool der verbliebenen Agroforstflächen übergehen, sinkt die CO₂-Einbindung deutlich.

Abbildung 17: Sensitivitäten zur Anlage von Agroforstsystemen



Anmerkungen:

2,0 Mio. ha Agroforst = 1.350.000 ha auf Ackerland und 650.000 ha auf Grünland bis 2050 (2075: 2,75 Mio. ha);

1,6 Mio. ha Agroforst = 1.080.000 ha auf Ackerland und 520.000 ha auf Grünland bis 2050 (2075: 2,2 Mio. ha);

1,2 Mio. ha Agroforst = 810.000 ha auf Ackerland und 390.000 ha auf Grünland bis 2050 (2075: 1,65 Mio. ha);

0,8 Mio. ha Agroforst = 540.000 ha auf Ackerland und 260.000 ha auf Grünland bis 2050 (2075: 1,1 Mio. ha);

0,4 Mio. ha Agroforst = 270.000 ha auf Ackerland und 130.000 ha auf Grünland bis 2050 (2075: 0,55 Mio. ha).

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Sensitivitäten zum ökologischen Landbau

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse den Sensitivitäten zum ökologischen Landbau zusammengestellt. Bereits die Bewirtschaftung von 10% der Ackerfläche auf mineralischen Böden mit Fruchtfolgen nach den Anforderungen des ökologischen Landbaus bewirkt eine CO₂-Einbindung von 0,5 Mio. t CO₂/Jahr. Wird diese Fläche im Jahr 2030 auf 50% gesteigert, können zusätzliche CO₂-Einbindungen von 3,5 Mio. t CO₂/Jahr erreicht werden (Tabelle 8).

¹⁵ Zeitspanne nach IPCC, in der nach Landnutzungsänderungen wirken.

Tabelle 8: Anteil an ökologischem Landbau auf Ackerflächen

	Gesamte ökologisch bewirtschaftet Ackerfläche (Mio. ha)	Zusätzliche ökologisch bewirtschaftete Ackerfläche gegenüber 2020 (Mio. ha)	THG-Minderung (Mio. t CO ₂ -Äq.)	Zusätzliche THG-Minderung gegenüber 2020 (Mio. t CO ₂ -Äq.)
2020 (10%) bzw. 2030 (10%)	0,73	0	-0,54	0
2030 (20%)	1,92	1,18	-1,41	-0,87
2030 (30%)	3,10	2,37	-2,27	-1,74
2030 (40%)	4,28	3,55	-3,14	-2,60
2030 (50%)	5,47	4,73	-4,01	-3,47

Quelle: Angaben zur Flächenbelegung in 2020 (10%) und 2030 (30%) stammen aus dem Agrarmodell LiSE (Modellierung in GreenSupreme). Flächenannahme für 2030 (20%), 2030 (40%) und 2030 (50%) wurden auf der Basis abgeleitet. Die CO₂-Einbindung wird in Anlehnung an Sanders und Heß (2019) mit 0,2 t C/ha/Jahr (0,733 t CO₂/ha/Jahr) angenommen.

Eine Ökologisierung der Landwirtschaft ist nötig, um die Nachhaltigkeitsziele mehrerer Schutzgüter zu erreichen (Gewässerschutz, Trinkwasserschutz, Biodiversitätsschutz, Erhalt der Bodenfruchtbarkeit, Tierwohl; siehe auch Ziele der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung 2021)). Klimaschutz ist ein weiteres Schutzziel, steht aber nicht im Vordergrund für die politische Entscheidung zur Ausweitung des ökologischen Landbaus in Deutschland.

Als ein wichtiger Punkt ist bei der Ausweitung des ökologischen Landbaus zu berücksichtigen, dass Flächenerträge sinken. Ohne eine Veränderung der Nachfrage nach landwirtschaftlichen Produkten wird bereits beim 30%-Ziel an ökologischem Landbau eine zusätzliche Anbaufläche von 1,4 Mio. ha benötigt (Berechnungen in Scheffler und Wiegmann 2022). Dies birgt das Risiko vermehrter Importe und möglicher Umweltbelastungen in den Herkunftsländern.

Beispielsweise können in den Herkunftsländern durch Landnutzungsänderungen THG-Emissionen freigesetzt werden, die die CO₂-Einbindung in Deutschland übersteigen. Auch für andere Schutzgüter können derartige indirekte Effekte erwartet werden. Die Neuanlage von Agroforstsystemen kann zu ähnlichen Effekten führen, da auch hier Flächenkonkurrenzen bestehen. Ein Schlüsselement ist an dieser Stelle die Verringerung der Nachfrage nach landwirtschaftlichen Produkten in Deutschland, die eng an das Konsumverhalten der Bürger gekoppelt ist.

4 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Im Rahmen des Klimaschutzgesetzes ist der LULUCF-Sektor als Nettokohlenstoffsенке eingeplant, um bis 2045 Treibhausgasneutralität in Deutschland zu erreichen. Die für den vorliegenden Bericht ausgewerteten Studien und eigenen Berechnungen unterstreichen, dass dafür gezielte Maßnahmen zum Erhalt und Ausbau der natürlichen Kohlenstoffsенке und zur Reduktion von Emissionen aus der Landnutzung notwendig sind (Kapitel 2).

Maßnahmen, die im Einklang mit dem natürlichen Klimaschutz stehen, tragen nicht nur zum Schutz des Klimas bei, sondern haben ebenfalls viele Synergien mit dem Biodiversitätsschutz sowie wichtigen Ökosystemleistungen. Dadurch unterstützen sie auch die Anpassung der Landnutzung an den fortschreitenden Klimawandel durch verbesserte Wasserretention oder als Kühlungselemente in der Landschaft. Diese Synergien werden vor allem dann erreicht, wenn die Klimaschutzmaßnahmen zur Extensivierung der Land- und Waldnutzung und zum Schutz von Lebensräumen beitragen, sowie die Strukturvielfalt in der Landschaft erhöhen. Insbesondere die Maßnahmen auf landwirtschaftlich genutzten organischen Böden und im Wald erfordern eine erhebliche Änderung der aktuellen Bewirtschaftungsweise. Um mögliche Verlagerungsprozesse zu vermeiden, müssen bei der Umsetzung der Klimaschutzmaßnahmen im Landnutzungssektor parallel zur Änderung der Landbewirtschaftung auch bestehende Konsummuster verändert werden. Beispielsweise bewirkt ein reduzierter Verbrauch von tierischen Produkten wie Fleisch und Milch einen geringeren Bedarf an Nutztierhaltung. Der damit einhergehende verringerte Futteranbau schafft erhebliche Flächenpotenziale. Diese können für die Extensivierung landwirtschaftlicher Nutzflächen, Naturschutzmaßnahmen sowie für die Erweiterung der Waldfläche verwendet werden (Scheffler und Wiegmann 2022). Bleibt aber der Konsum an tierischen Produkten hoch, ist ein Import mit entsprechenden Auswirkungen in Herkunftsländern zu erwarten.

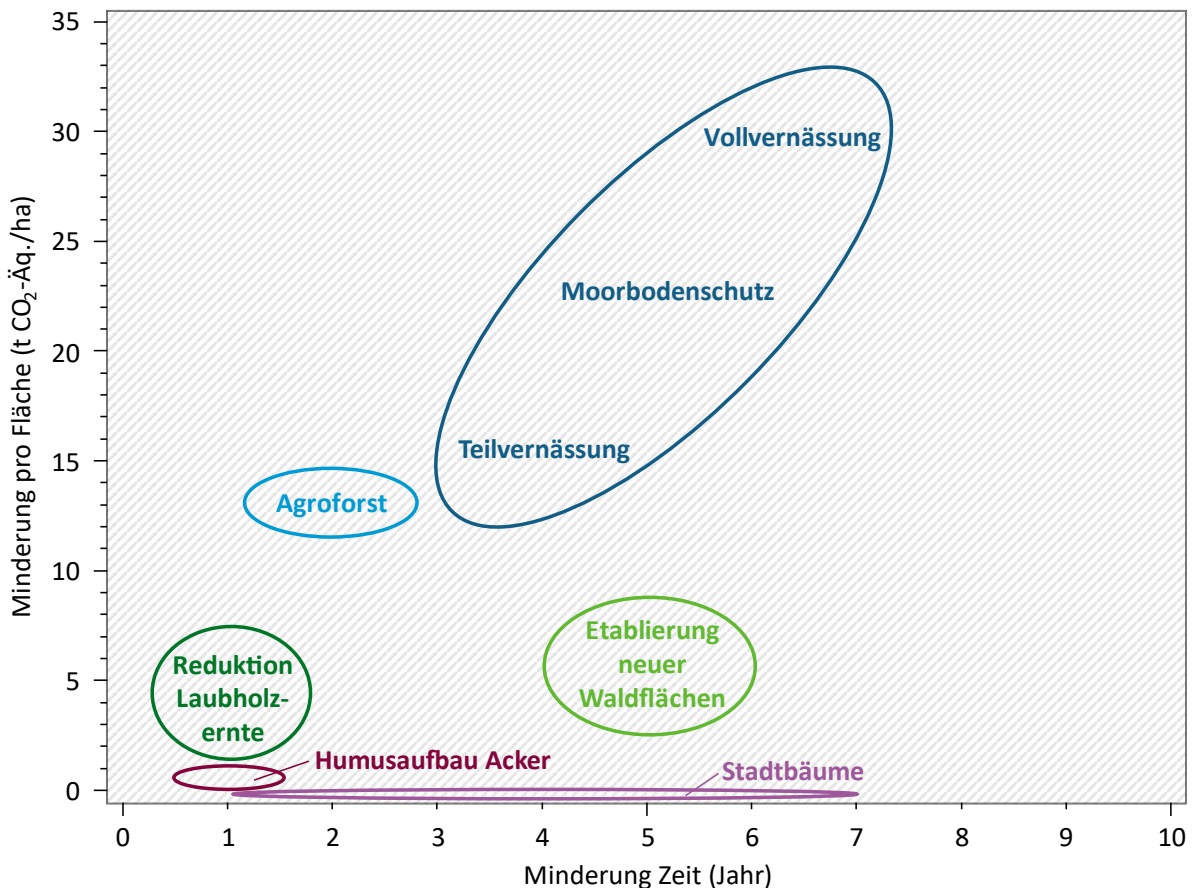
Für die Umsetzung des natürlichen Klimaschutzes in Deutschland gibt es effektive Maßnahmen, die die Landnutzungsemissionen reduzieren und die Senkenleistung ausbauen:

Die **Wiedervernässung von organischen Böden** (Kapitel 2.3) insbesondere unter Acker- und Grünlandnutzung weist mit bis zu $-35 \text{ t CO}_2\text{äq/ha}$ das höchste Potenzial zur Reduktion von Emissionen aus der Landnutzung auf. Durch die Erhöhung des Wasserstandes werden gleichzeitig ökologisch wertvolle feuchte Lebensräume (Moore, extensives Feuchtgrünland) geschaffen, die neben einer speziell angepassten Artenvielfalt auch zur Regulierung des Wasserlandschaftshaushalts beitragen. Die größten Risiken für den Erfolg der Maßnahme bestehen in der Flächenmobilisierung und der Verfügbarkeit von Wasser, um den emissionsmindernden Wasserstand (Optimum von -5 cm unter Flur) im Durchschnitt halten zu können (Kapitel 3.3). Für eine hohe Flächenmobilisierung müssen entsprechende finanzielle Anreize für Landnutzende zur Verfügung stehen. Auch für die torferhaltende Bewirtschaftung der vernässten Flächen mit Paludikulturen müssen finanziell attraktive Produktabsatzmärkte etabliert und gefördert werden. Die Sicherstellung der Wasserverfügbarkeit kann nur über die Betrachtung des gesamten Landschaftswasserhaushaltes gelingen. Neben dem Rückbau von Entwässerungsgräben werden auch regulierbare Stausysteme geplant werden müssen, um eine gleichmäßige Wasserversorgung der vernässten Flächen sicherzustellen und um benachbarte Flächen (z.B. Acker und Siedlungen) vor möglichen Überflutungen zu schützen. Die Umsetzung dieser komplexen Maßnahmen kann je nach Ausgangssituation lange Zeiträume in Anspruch nehmen, weshalb das Emissionsminderungspotenzial aus der Wiedervernässung von organischen Böden sich von Beginn der Planung bis zur Vernässung einige Jahre in Anspruch nehmen kann (Abbildung 18). Zusätzlich kann der fortschreitende Klimawandel zu einer Verschiebung des Niederschlagregimes innerhalb Deutschlands und zu einer hohen Frequenz von Extremereignissen wie Dürren führen, wodurch ein Wassermangel in der Landschaft verschärft würde. Daher müssen bei der Umsetzung der Wiedervernässung, Optionen für den Umgang mit Wassermangel berücksichtigt werden. Zusätzlich müssen die Auswirkungen eines

geringeren Wiedervernässungspotenzials auf den Grad der Emissionsminderung in den zukünftigen Modellierungen des LULUCF-Sektors berücksichtigt werden.

Maßnahmen zum **Aufbau und Schutz der Kohlenstoffsенke im Wald** haben die größte Wirkung bei der aktiven Einbindung von CO₂-Emissionen aus der Atmosphäre. Flächenspezifische Potenziale durch den Schutz von älteren Eichen- und Buchenbeständen (>120 Jahre) liegen bei ca. -5,5 t CO₂/ha/Jahr. Aufgrund der rund 11 Mio. Hektar großen Waldfläche in Deutschland bietet diese große Flächenpotenziale zur Kohlenstoffsequestrierung. Mit einer Extensivierung der Waldbewirtschaftung zugunsten von höheren Laubholzvorräten können Minderungen von bis zu -48 Mio. t CO₂ bis 2052 erreicht werden (Kapitel 2.1). Die Abbildung 18 zeigt, dass die Reduktion der Laubholzernte im Vergleich zu anderen Maßnahmen im Landnutzungssektor eine sehr schnelle, positive Wirkung auf die Emissionsbilanz hat. Zum einen wird der bestehende Kohlenstoffspeicher der lebenden oder toten Biomasse auf der Waldfläche erhalten und zum anderen kann im Fall von noch lebenden Bäumen eine fortlaufende CO₂-Sequestrierung erfolgen. Wie bereits für die Landwirtschaft genannt ist auch für Waldholz mit Verlagerungseffekten zu rechnen. Da der überwiegende Teil der Laubholzernte aktuell energetisch genutzt wird, bestehen bei der Extensivierung der Laubholzentnahme die größten Risiken darin, dass das Energieholz zukünftig aus anderen Ländern importiert wird. Daher muss die energetische Nutzung von Holz parallel zur Extensivierung der Wälder entsprechend eingeschränkt werden. Generell sollte Stammholz nicht energetisch genutzt werden, sondern entweder als lebender Baum den Kohlenstoffspeicher erhalten bzw. erhöhen oder als Totholz im Wald verbleiben, wodurch hohe Synergien mit dem Biodiversitätsschutz zu erwarten sind.

Die **Nutzung von Holz in langlebigen Produkten** trägt zur Kohlenstoffspeicherung bei (Kapitel 2.2). Laubhölzer werden im Vergleich zu Nadelhölzern deutlich seltener in langlebigen Produkten verwendet. Hier sind zukünftig Innovationen für die Verwendung z.B. im Hausbau notwendig. Allerdings darf der Druck einer steigenden Nachfrage des Holzrohstoffs nicht zu Lasten der ökologischen Qualität von heimischen Wäldern oder Wäldern im Ausland führen. Das zusätzliche Holzproduktspeicherpotenzial für den verstärkten Einsatz von Bauholz liegt bei 0,65 Mio. t CO₂äq/Jahr. Dem steht jedoch ein Verlust an Kohlenstoffspeicher im Wald von 1 Mio. t CO₂äq/Jahr gegenüber. Um die Holznachfrage aus dem Wald so gering wie möglich zu halten, muss die Kaskadennutzung von Holz konsequent optimiert und weiterentwickelt werden. Dadurch verbleibt auch der Kohlenstoff möglichst lange im Holzproduktspeicher.

Abbildung 18: Abschätzung der spezifische Treibhausgas-minderung und erwartbare Geschwindigkeit der Umsetzung

Anmerkungen: Zur THG-Minderung pro Fläche siehe Details in Kap. 2. „Minderungszeit“ bezieht sich auf die Dauer nach der Entscheidung für eine Maßnahme, bis mit einer THG-Minderung zu rechnen ist (Details in Kap. 2 und eigene Einschätzung). Der Holzproduktspeicher ist in der Abbildung nicht aufgenommen, da kein Flächenbezug besteht.

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut.

Die **Etablierung neuer Waldflächen auf mineralischem Ackerland** hat mit durchschnittlich - 7 t CO₂/ha pro Jahr ein ähnliches Minderungspotenzial wie die Reduktion der Laubholzernte. Allerdings setzt dieser Effekt in der Regel deutlich später ein als bei anderen Minderungsmaßnahmen, da die jungen Bäume sich zunächst etablieren und ihre Wuchsleistung sich in den ersten 10 Jahren aufbauen muss. Um für die Biodiversität wertvolles extensiv genutztes Grünland zu erhalten, sollte neuer Wald auf wenig produktiven Ackerflächen etabliert werden. Dadurch lassen sich auch mögliche Verlagerungseffekte durch den vermehrten Import von Feldfrüchten aus dem Ausland für die Versorgung in Deutschland vermeiden. Das zur Verfügung stehende Flächenpotenzial ist aktuell nicht bekannt und wird vor allem von den zukünftig bereitstehenden finanziellen Anreizen abhängen. Bis zur Etablierung eines Waldes mit entsprechenden Kohlenstoffspeichern im Boden und in der Biomasse vergehen mehrere Jahrzehnte bis Jahrhunderte. Daher ist der Schutz von bestehenden Wäldern absolut prioritär.

Im Vergleich zu Waldflächen kann die Anlage von **Agroforst auf mineralischen Ackerböden** (Kapitel 2.5) schnell und effektiv erfolgen (Abbildung 18), da schnellwüchsige Gehölze wie z.B. Hybridpappeln verwendet werden können. Die Anlage von Gehölzen, insbesondere in Form von Hecken oder Obstbäumen führt zur Strukturanreicherung der Landschaft und trägt somit zur Biodiversität auf diesen Flächen bei. Darüber hinaus wird die Speicherung von organischem Kohlenstoff im Boden gesteigert. Um den Effekt der zusätzlichen Kohlenstoffeinspeicherung im

Boden und in der Biomasse aufrecht zu erhalten, müssen Agroforstsysteme regelmäßig gepflegt werden. Diese Kosten müssen in der Förderung mitberücksichtigt werden.

Weitere Maßnahmen wie der **Humusaufbau auf Ackerböden** durch z.B. Anbau von Zwischenfrüchten (Kapitel 2.5) können in kurzen Zeiträumen erreicht werden, haben aber einen deutlich geringes flächengewichtetes Minderungspotenzial. Ähnliches trifft auf die **Pflanzung von Stadtbäumen** (Kapitel 2.6) zu, wobei der Effekt der CO₂-Minderung je nach Baumart und Alter des gepflanzten Baumes stark schwanken kann. Dennoch handelt es sich um sehr wichtige Maßnahmen, um beispielsweise die Bodenfruchtbarkeit langfristig für die Landwirtschaft zu erhalten, womit der Humusaufbau zur Ernährungssicherheit beiträgt. Die Etablierung von Bäumen in Siedlungsgebieten führt zu mehr Wohlbefinden in der Bevölkerung und schafft Lebensräume für Tiere und andere Pflanzen. Außerdem leisten Bäume einen wichtigen Beitrag zur Kühlung ihrer Umgebungstemperatur und unterstützen die Anpassung der Städte an Hitzeperioden.

5 Quellenverzeichnis

- BfN - Bundesamt für Naturschutz (2014): Grünland-Report: Alles im Grünen Bereich?. Bundesamt für Naturschutz (Hg.). Online verfügbar unter https://www.bfn.de/sites/default/files/2021-04/PK_Gruenlandpapier_30.06.2014_final_layout_barrierefrei_0.pdf, zuletzt geprüft am 15.07.2022.
- BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2012): Ergebnisdatenbank der Bundeswaldinventur. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://bwi.info/>, zuletzt geprüft am 31.08.2017.
- BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2016a): Der Wald in Deutschland, Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft.
- BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2016b): Waldböden in Deutschland, Ausgewählte Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung. Unter Mitarbeit von Thünen-Institut für Waldökosysteme.
- BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2020): Torf und alternative Substratausgangsstoffe. Bonn. Online verfügbar unter <https://www.ble-medianservice.de/0129/torf-und-alternative-substratausgangsstoffe>, zuletzt geprüft am 07.06.2021.
- BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2021a): Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2020. BMEL (Hg.). Bonn. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/ergebnisse-waldzustandserhebung-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=8, zuletzt geprüft am 19.04.2021.
- BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2021b): Zahlen, Daten und Fakten rund um die Schlachtkapazitäten in Deutschland. BMEL (Hg.). Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Tiere/Tierschutz/austauschfleischbranche.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 11.01.2023.
- BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2022): Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2021. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/ergebnisse-waldzustandserhebung-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=7, zuletzt geprüft am 10.06.2022.
- BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2023a): GAP-Strategieplan für die Bundesrepublik Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/eu-agrarpolitik-und-foerderung/gap/gap-strategieplan.html>, zuletzt aktualisiert am 19.12.2023, zuletzt geprüft am 24.01.2024.
- BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2024): Gemeinschaftsaufgabe zur Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes. GAK-Berichterstattung 2019 bis 2021. Berichterstattung zum Vollzug der GAK 2020., Förderbereich 5: Forstwirtschaftliche Maßnahmen. Online verfügbar unter <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/5000100-2020.pdf>.
- BMEL (2023b): Bundeswaldinventur. Online verfügbar unter <https://www.bundeswaldinventur.de/>, zuletzt aktualisiert am 18.01.2024, zuletzt geprüft am 18.01.2024.
- BMEL, B. e. a. (2021c): Bund-Länder-Zielvereinbarung zum Klimaschutz durch Moorbodenschutz. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/Klimaschutz/moorbodenschutz-blzv.pdf?__blob=publicationFile&v=5, zuletzt geprüft am 18.01.2024.
- BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit; BfN - Bundesamt für Naturschutz (2020): Die Lage der Natur in Deutschland, Ergebnisse von EU-Vogelschutz- und FFH-Bericht. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Bundesamt für Naturschutz. Berlin & Bonn.

- Böhm, C. (2022): Agroforstsysteme in der GAP ab 2023 – ein Überblick (Themenblatt Nr. 3). Deutscher Fachverband für Agroforstwirtschaft (DeFAF) e.V. (Hg.). Online verfügbar unter <https://agroforst-info.de/wp-content/uploads/2022/11/Themenblatt3-Agroforstsysteme-in-der-GAP-ab-2023.pdf>, zuletzt geprüft am 11.04.2023.
- Böttcher, H.; Hennenberg, K. J.; Winger, C. (2018a): Waldvision Deutschland - Beschreibung von Methoden, Annahmen und Ergebnissen. Öko-Institut e.V. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Waldvision-Methoden-und-Ergebnisse.pdf>.
- Böttcher, H.; Hennenberg, K.; Winger, C. (2018b): FABio-Waldmodell, Modellbeschreibung Version 0.54 Stand Nov. 2017. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/FABio-Wald-Modellbeschreibung.pdf>.
- Bundesregierung (2021): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, Weiterentwicklung 2021. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/998006/1873516/3d3b15cd92d0261e7a0bc8f43b7839/2021-03-10-dns-2021-finale-langfassung-nicht-barrierefrei-data.pdf#page=270>, zuletzt geprüft am 20.04.2023.
- dena (2021): dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität, Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Abschlussbericht. Online verfügbar unter https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.
- Destatis - Statistisches Bundesamt (2023): Holzeinschlagsstatistik. Statistisches Bundesamt (Hg.). Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=previous&levelindex=0&step=0&titel=Suche&levelid=1680784726910&acceptscookies=false#abreadcrumb>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.
- Don, A. (2022): Carbon Farming, Nur die »große Lösung« funktioniert (05/2022). DLG-Mitteilungen, M.-E.-V. m. (Hg.).
- Don, A.; Flessa, H.; Marx, K.; Poeplau, C.; Tiemeyer, B.; Osterburg, B. (2018): Die 4-Promille-Initiative „Böden für Ernährungssicherung und Klima“ –Wissenschaftliche Bewertung und Diskussion möglicher Beiträge in Deutschland (Thünen Working Paper, 112). Braunschweig. Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn060523.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2021.
- Drexler, S.; Gensior, A.; Don, A. (2021): Carbon sequestration in hedgerow biomass and soil in the temperate climate zone. In: *Regional Environmental Change* 21. DOI: 10.1007/s10113-021-01798-8.
- EC - European Commission (2020): Biodiversity strategy for 2030. European Commission. Online verfügbar unter https://environment.ec.europa.eu/strategy/biodiversity-strategy-2030_en, zuletzt geprüft am 23.11.2022.
- EC - European Commission (2021): New EU Forest Strategy for 2030, COM(2021) 572 final. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:0d918e07-e610-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF.
- Europäische Kommission (1992): Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992, zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:01992L0043-20130701>, zuletzt geprüft am 24.01.2024.
- Europäische Union (2018): Copernicus Land Monitoring Service. Online verfügbar unter <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018>, zuletzt aktualisiert am 18.01.2024, zuletzt geprüft am 18.01.2024.
- Europäische Union (2021): Verordnung (EU) 2021/2115 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 2. Dezember 2021 mit Vorschriften für die Unterstützung der von den Mitgliedstaaten im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik zu erstellenden und durch den Europäischen Garantiefonds für die Landwirtschaft (EGFL) und den Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER) zu

finanzierenden Strategiepläne (GAP-Strategiepläne) und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 1305/2013 sowie der Verordnung (EU) Nr. 1307/2013. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R2115>, zuletzt geprüft am 24.01.2024.

European Commission (2022): Pressemitteilung: Commission acts for global food security and for supporting EU farmers and consumers. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_1963.

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.

Fischer, L. (2022): Das Totfundmonitoring der Wildkatze in Nordrhein-Westfalen (10). Allgemeine Forstzeitschrift DerWald (Hg.).

Flessa, H.; Don, A.; Jacobs, A.; Dechow, R.; Tiemeyer, B.; & Poeplau, C. (2018): Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands – Ausgewählte Ergebnisse der Bodenzustandserhebung, Thünen-Institut für Agrarklimaschutz. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hg.).

Friedlingstein, P.; O'Sullivan, M.; Jones, M. W.; Andrew, R. M.; Hauck, J.; Olsen, A.; Peters, G. P.; Peters, W.; Pongratz, J.; Sitch, S.; Le Quéré, C.; Canadell, J. G.; Ciais, P. et al. (2020): Global Carbon Budget 2020, Data description paper. In: *Earth System Science Data* 12 (4), S. 3269–3340. Online verfügbar unter <https://essd.copernicus.org/articles/12/3269/2020/>, zuletzt geprüft am 31.08.2021.

GAK (2023): Förderbereich 4: Markt- und standortangepasste sowie umweltgerechte Landbewirtschaftung einschließlich Vertragsnaturschutz und Landschaftspflege. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_laendliche-Regionen/Foerderung-des-laendlichen-Raumes/GAK/Foerderungsbereich4-23.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 26.01.2024.

Gattinger, A.; Muller, A.; Haeni, M.; Skinner, C.; Fliessbach, A.; Buchmann, N.; Mäder, P.; Stolze, M.; Smith, P.; Scialabba, N. E.-H.; Niggli, U. (2012): Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109 (44), S. 18226–18231. DOI: 10.1073/pnas.1209429109.

Gerber, K.; Röhling, S.; Dunger, K.; Klatt, S.; Oehmichen, K. (2018): Regionalisierte Ergebnisse der alternativen WEHAM-Szenarien (Thünen Working Paper, 102).

Gutsch, M.; Lasch-Born, P.; Kollas, C.; Suckow, F.; Reyer, C. P. O. (2018): Balancing trade-offs between ecosystem services in Germany's forests under climate change. In: *Environ. Res. Lett.* 13 (4), S. 45012. DOI: 10.1088/1748-9326/aab4e5.

Hafner et al. (2017): Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden, Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren THG-Holzbau. Zusammenfassung. Ruhr-Universität Bochum (Hg.), zuletzt geprüft am 12.12.2018.

Harpenslager, S. F.; van den Elzen, E.; Kox, M. A.; Smolders, A. J.; Ettwig, K. F.; Lamers, L. P. (2015): Rewetting former agricultural peatlands: Topsoil removal as a prerequisite to avoid strong nutrient and greenhouse gas emissions. In: *Ecological Engineering* (84), S. 159–168. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.08.002.

Harthan, R.; Repenning, J.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Bürger, V.; Cook, V.; Emele, L.; Görz, W.; Henneberg, K.; Jörß, W.; Ludig, S.; Matthes, F.; Mendelevitch, R. et al. (2020): Abschätzung der Treibhausgasreduzierungsleistung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung, Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politikszenerarien IX“)“ (Climate Change, 33/2020). UBA (Hg.). Dessau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-03-19_cc_33-2020_klimaschutzprogramm_2030_der_bundesregierung.pdf, zuletzt geprüft am 11.04.2023.

Hennenberg, K.; Böttcher, H. (2023): Biomasse und Klimaschutz, Im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Analysen zu aktuellen klimapolitischen Fragen im Bereich der Energieeffizienz insbesondere in den Sektoren Industrie, GHD und Gebäude“ (67KE0064). Öko-Institut (Hg.). Berlin, Darmstadt. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Biomasse-und-Klimaschutz_BMWK.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Köhler, B.; Reise, J.; Köppen, S.; Bischoff, M.; Fehrenbach, H.; Pehnt, M.; Werle, M.; Mantau, U. (2022): Aktuelle Nutzung und Förderung der Holzenergie - Teilbericht zu den Projekten BioSINK und BioWISE (Climate Change, 12/2022). Öko-Institut; ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg; Informationssysteme für Rohstoffe. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_12-2022_aktuelle_nutzung_und_foerderung_der_holzenergie.pdf, zuletzt geprüft am 29.03.2022.

Hennig, P.; Schnell, S.; Riedel, T. (2019): Rohstoffquelle Wald - Holzvorrat auf neuem Rekord. In: *AFZ-DerWald* 74 (14), S. 24–27.

Hiederer, R. (2018): Data Evaluation of LUCAS Soil Component Laboratory Data for Soil Organic Carbon (JRC112711). Publications Office of the European Union. Luxembourg. Online verfügbar unter https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public_path/shared_folder/JRC112711_lucas_oc_data_evaluation_final.pdf, zuletzt geprüft am 10.05.2021.

Hülsbergen, K. J.; Schmid, H.; Chmelikova, L.; Rahmann, G.; Paulsen, H., M.; Köpke, U. (2023): Umwelt- und Klimawirkungen des ökologischen Landbaus, Weihenstephaner Schriften Ökologischer Landbau und Pflanzenbausysteme (Bd. 16). Verlag Dr. Köster (Hg.). Berlin. Online verfügbar unter https://syncandshare.lrz.de/getlink/fiWMYsSjm7uGyBzrBFLGpH/Weihenstephaner%20Schriften_16_Studie.pdf, zuletzt geprüft am 10.02.2023.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. IPCC. Online verfügbar unter <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>, zuletzt geprüft am 22.11.2021.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Hg.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Isselstein, J. (2018): Protecting biodiversity in grasslands., In: Marshall, A. und Collins, R. (Hg.): Improving grassland and pasture management in temperate agriculture. (Burleigh Dodds Science Publishing, 51). Cambridge.

Jacobs, A.; Flessa, H.; DON, A.; Heidkamp, A.; Prietz, R.; Dechow, R.; Gensior, A.; Poeplau, C.; Riggers, C.; Schneider, F.; Tiemeyer, B.; Vos, C.; Wittnebel, M. et al. (2018): Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland – Ergebnisse der Bodenzustandserhebung (Thünen Report 64). Braunschweig. Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn060497.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2021.

Jochem, D.; Weimar, H.; Dieter, M. (2022): Holzeinschlag steigt im Jahr 2021 auf 84,2 Mio. m³. In: *Holz-Zentralblatt* (41), S. 713–714. Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn065561.pdf, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

Kay, S.; Rega, C.; Moreno, G.; Herder, M. den; Palma, J. H. N.; Borek, R.; Crous-Duran, J.; Freese, D.; Giannitsopoulos, M.; Graves, A.; Jäger, M.; Lamersdorf, N.; Memedemin, D. et al. (2019): Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe. In: *Land Use Policy* (83), S. 581–593. Online verfügbar unter

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0264837718310470?token=8B2B235D0746982CF12E20E9E771DFA15DF727C927B45A3D4CEE08A01D341560A6772F7BAE581C19DB4C77BA855F6A2E&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230406093612>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

Klar, N.; Fernández, N.; Kramer-Schadt, S.; Herrmann, M.; Trinzen, M.; Büttner, I.; Niemitz, C. (2008): Habitat selection models for European wildcat conservation. In: *Biological Conservation* 141 (1), S. 308–319. DOI: 10.1016/j.biocon.2007.10.004.

KSG (2019): Bundestag. Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften, KSG, Fassung vom 12.12.2019. Fundstelle: Bundesgesetzblatt 2019 (48), S. 2513–2521. Online verfügbar unter https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBL&start=//%27bgbl119s2513.pdf%27#_bgbl_%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl119s2513.pdf%27%5D__1597743255864, zuletzt geprüft am 18.08.2020.

KTBL (2019): SDB-Standarddeckungsbeiträge. Online verfügbar unter <https://daten.ktbl.de/sdb/source.do>, zuletzt aktualisiert am 24.01.2024, zuletzt geprüft am 24.01.2024.

Mayer, M.; Rusch, S.; Didion, M.; Baltensweiler, A.; Walthert, L.; Ranft, F.; Rigling, A.; Zimmermann, S.; Hagedorn, F. (2023): Elevation dependent response of soil organic carbon stocks to forest windthrow. In: *Science of The Total Environment*, 159694 (9 pp.). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159694.

MU - Niedersächsisches Umweltministerium; NLO - Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (2003): Arbeitshilfe zur Anwendung der Eingriffsregelung bei Bodenabbauvorhaben. – Inform.d. Naturschutz Niedersachs. 21 (4) (4/03): 117-152. Online verfügbar unter https://www.umwelt.niedersachsen.de/download/6396/Arbeitshilfe_zur_Anwendung_der_Eingriffsregelung_bei_Bodenabbauvorhaben_Stand_24.9.2002_.pdf, zuletzt geprüft am 29.09.2023.

Oehmichen, K.; Klatt, S.; Gerber, K.; Polley, H.; Röhling, S.; Dunger, K. (2018): Die alternativen WEHAM-Szenarien: Holzpräferenz, Naturschutzpräferenz und Trendfortschreibung, Szenarientwicklung, Ergebnisse und Analyse (Thünen Report, 59). Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut.

Öko-Institut (2021): Natürliche Senken - Die Potenziale natürlicher Ökosysteme zur Vermeidung von THG-Emissionen und Speicherung von Kohlenstoff. Modellierung des LULUCF-Sektors sowie Analyse natürlicher Senken., Kurzgutachten zur dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Deutschen Energie-agentur GmbH (Hg.).

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 e.V. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Referenzszenario-BioSINK.pdf>, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

Pilli, R.; Grassi, G.; Kurz, W. a.; Moris, J. V.; Viñas, R. A. (2016): Modelling forest carbon stock changes as affected by harvest and natural disturbances. II. EU-level analysis. In: *Carbon balance and management* 11 (1). DOI: 10.1186/s13021-016-0059-4.

Poeplau, C.; Don, A. (2015): Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 200, S. 33–41. DOI: 10.1016/j.agee.2014.10.024.

Poeplau, C.; Don, A.; LARS VESTERDAL; Jens Leifeld; BAS VAN WESEMAEL; JENS SCHUMACHER; ANDREAS GENSIOR (2011): Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach. In: *Global Change Biology* 17 (7), S. 2415–2427. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x.

Repenning, J.; Schumacher, K.; Bergmann, T.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Bürger, V.; Cludius, J.; Emele, L.; Jörß, W.; Hennenberg, K.; Hermann, H.; Loreck, C.; Ludig, S. et al. (2019): Folgenabschätzung zu den ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Folgewirkungen der Sektorziele für 2030 des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung. Öko-Institut; Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung; Prognos AG; M-Five;

- Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien; FiBL. Öko-Institut (Hg.). Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Folgenabschaetzung-Klimaschutzplan-2050-Endbericht.pdf>, zuletzt geprüft am 17.01.2019.
- Röhling, S.; Dunger, K.; Kändler, G.; Klatt, S.; Riedel, T.; Stümer, W.; Brötz, J. (2016): Comparison of calculation methods for estimating annual carbon stock change in German forests under forest management in the German greenhouse gas inventory. In: *Carbon Balance Manage* 11. DOI: 10.1186/s13021-016-0053-x.
- Rötzer, T.; Rahman, M. A.; Moser-Reischl, A.; Pauleit, S.; Pretzsch, H. (2019): Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions. In: *Science of The Total Environment* (676), S. 651–664. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719317644>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.
- Rumpel, C.; Amiraslani, F.; Chenu, C.; Garcia Cardenas, M.; Kaonga, M.; Koutika, L.-S.; Ladha, J.; Madari, B.; Shirato, Y.; Smith, P.; Soudi, B.; Soussana, J.-F.; Whitehead, D. et al. (2020): The 4p1000 initiative: Opportunities, limitations and challenges for implementing soil organic carbon sequestration as a sustainable development strategy. In: *Ambio* 49 (1), S. 350–360. DOI: 10.1007/s13280-019-01165-2.
- Rüter, S. (2019): Die Treibhausgas-Relevanz der Holzverwendung im Bausektor (Tagungsband Fachtagung Holzbau Baden-Württemberg 2019 (S. 87–97)). Informationsdienst Holz, Institut für Holzbau Hochschule Biberach. J. Sessing & S. Fagundes (Hg.).
- Rüter, S.; Hafner, A. (2021): Verwendung von Holz in Gebäuden als Beitrag zum Klimaschutz. In: Klimaschutz und Energiewende in Deutschland: Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, S. 1–13. Online verfügbar unter https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-662-62081-6_45-1?noAccess=true.
- Rüter, S.; Stümer, W.; Dunger, K. (2017): Treibhausgasbilanzen der WEHAM-Szenarien. In: *AFZ DerWald* (13), S. 30–31.
- Sanders, J.; Heß, J. (Hg.) (2019): Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und Gesellschaft, Thünen-Institut (Thünen Report Nr. 65). Braunschweig. Online verfügbar unter https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_65.pdf, zuletzt geprüft am 15.10.2021.
- Scheffler, M.; Wiegmann, K. (2022): Gesundes Essen fürs Klima, Auswirkungen der Planetary Health Diet auf den Landwirtschaftssektor: Produktion, Klimaschutz, Agrarflächen. Greenpeace e.V. (Hg.). Online verfügbar unter https://www.greenpeace.de/publikationen/Gesundes%20Essen%20f%C3%BCr%20das%20Klima_0.pdf, zuletzt geprüft am 21.11.2022.
- Schmitz, N.; Iost, S.; Jochem, D.; Polley, H.; Rüter, S.; Weimar, H.; Maack, C.; Lüdtke, J. (2022): Charta für Holz 2.0 Kennzahlenbericht 2021 Forst & Holz. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hg.).
- Schoof, N.; Luick, R.; Beaufoy, G.; Jones, G.; Einarsson, P.; Ruiz, J.; Stefanova, V.; Fuchs, D.; Windmaißer, T.; Hötter, H.; Jeromin, H.; Nickel, H. & Ukhanova, M. (2019): Grünlandschutz in Deutschland – Treiber der Biodiversität, Einfluss von Agrar-Umwelt und Klimamaßnahmen, Ordnungsrecht, Molkereiwirtschaft und Auswirkungen der Klima- und Energiepolitik (BfN-Skript, 539). Bundesamt für Naturschutz (Hg.).
- Seitz, D.; Fischer, L. M.; Dechow, R.; Wiesmeier, M.; Don, A. (2022): The potential of cover crops to increase soil organic carbon storage in German croplands. In: *Plant Soil*, S. 1–17. DOI: 10.1007/s11104-022-05438-w.
- Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt (2024): Stadtbäume für Berlin. Online verfügbar unter <https://www.berlin.de/sen/uvk/natur-und-gruen/stadtgruen/stadtbaeume/stadtbaumkampagne/>, zuletzt aktualisiert am 02.01.2024, zuletzt geprüft am 24.01.2024.
- Soimakallio, S.; Böttcher, H.; Niemi, J.; Mosley, F.; Turunen, S.; Hennenberg, K. J.; Reise, J.; Fehrenbach, H. (2022): Closing an open balance: The impact of increased tree harvest on forest carbon. In: *GCB Bioenergy*. DOI: 10.1111/gcbb.12981.

Statistisches Bundesamt (2022): Ökologischer Landbau in Deutschland: Ackerland und Dauergrünland. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/Tabellen/oekologisches-dauergruen-ackerland.html#fussnote-1-123334>, zuletzt aktualisiert am 09.06.2023, zuletzt geprüft am 24.01.2024.

Swindles, G. T.; Morris, P. J.; Mullan, D. J.; Payne, R. J.; Roland, T. P.; Amesbury, M. J.; Lamentowicz, M.; Turner, T. E.; Gallego-Sala, A.; Sim, T.; Barr, I. D.; Blaauw, M.; Blundell, A. et al. (2019): Widespread drying of European peatlands in recent centuries. In: *Nat. Geosci.* 12 (11), S. 922–928. DOI: 10.1038/s41561-019-0462-z.

Sykes, A. J.; MacLeod, M.; Eory, V.; Rees, R. M.; Payen, F.; Myrriotis, V.; Williams, M.; Sohi, S.; Hillier, J.; Moran, D.; Manning, D.; Goglio, P.; Seghetta, M. et al. (2020): Characterising the biophysical, economic and social impacts of soil carbon sequestration as a greenhouse gas removal technology. In: *Global Change Biology* 26 (3), S. 1085–1108. DOI: 10.1111/gcb.14844.

Tanneberger, F.; Abel, S.; Couwenberg, J.; Dahms, T.; Gaudig, G.; Günther, A.; Kreyling, J.; Peters, J.; Pongratz, J.; Joosten, H. (2021): Towards net zero CO₂ in 2050: An emission reduction pathway for organic soils in Germany. In: *Mires and Peat* (27). DOI: 10.19189/MaP.2020.SNPG.StA.1951.

Thünen Institut für Agrarklimaschutz (2018): Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands, Ausgewählte Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. BMEL (Hg.). Bonn. Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Bodenzustandserhebung.html>, zuletzt geprüft am 06.02.2023.

Thünen-Institut (2017): Treibhausgasinventur 2017. Online verfügbar unter <https://bwi.info/start.aspx>, zuletzt aktualisiert am 18.01.2024, zuletzt geprüft am 18.01.2024.

Thünen-Institut (2022): Thünen-Einschlagsrückrechnung, Amtliche Statistik. Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie (Hg.). Online verfügbar unter <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/waldwirtschaft/zahlen-fakten/holzeinschlag-und-rohholzverwendung>, zuletzt geprüft am 18.07.2022.

Thünen-Institut (2024): Ergebnisse der bundesweiten Waldzustandserhebung. Online verfügbar unter <https://wo-apps.thuenen.de/apps/wze/>, zuletzt geprüft am 20.12.2022.

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>.

Tiemeyer, C.; Barthelmes, K.-D.; Busse, S.; Barthelmes, A. (2021): Aggregierte Karte der organischen Böden Deutschlands. 2., überarbeitete Fassung (Greifswald Moor Centrum-Schriftenreihe, 01/2021). Greifswald Moor Centrum (Hg.). Online verfügbar unter https://www.greifswaldmoor.de/files/dokumente/GMC%20Schriften/2021-01_Tegetmeyer%20et%20al.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

Tsonkova, P.; Böhm, C. (2020): CO₂-Bindung durch Agroforst-Gehölze als Beitrag zum Klimaschutz, "Innovationsgruppe AUFWERTEN – Agroforstliche Umweltleistungen für Wertschöpfung und Energie". Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Sanftleben (Hg.). Cottbus. Online verfügbar unter https://agroforst-info.de/wp-content/uploads/2021/02/06__CO2-Bindung.pdf, zuletzt geprüft am 14.06.2021.

UBA - Umweltbundesamt (2022a): 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 (2022b): THG-Projektionen: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 ("Politiksznarien IX"). Online verfügbar unter

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/thg-projektionen-weiterentwicklung-der-methoden>, zuletzt aktualisiert am 26.01.2024, zuletzt geprüft am 26.01.2024.

UBA - Umweltbundesamt (2023a): Emissionen der Landnutzung, -änderung und Forstwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-der-landnutzung-aenderung>, zuletzt aktualisiert am 18.01.2024, zuletzt geprüft am 18.01.2024.

UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2023b): Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2021, Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2023. Online verfügbar unter https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envy8fz9q/DE_EU-NIR_2023_DE.pdf, zuletzt geprüft am 23.03.2023.

Umweltbundesamt (2024): Grünlandumbruch. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/gruenlandumbruch#gefahrung-des-grunlands>, zuletzt aktualisiert am 24.01.2024, zuletzt geprüft am 24.01.2024.

Vandekerckhove, K.; Keersmaecker, L. de; Menke, N.; Meyer, P.; Verschelde, P. (2009): When nature takes over from man: Dead wood accumulation in previously managed oak and beech woodlands in North-western and Central Europe. In: *Forest Ecology and Management* 258 (4), S. 425–435. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.01.055.

WBAE - Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2016): Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung, Gutachten. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hg.). Berlin.

WBGU - Wissenschaftlicher Beirat für Globale Umweltveränderungen (2020a): Landwende im Anthropozän, Von der Konkurrenz zur Integration. Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen. Berlin.

WBGU - Wissenschaftlicher Beirat für Globale Umweltveränderungen (2020b): Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration. Berlin. Online verfügbar unter https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2020/pdf/WBGU_HG20_20_ZF.pdf, zuletzt geprüft am 13.01.2023.

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-loesungsansaeetze-paludikultur.html?nn=8596366>, zuletzt geprüft am 06.04.2023.

Wichtmann, W.; Schröder, C.; Joosten, H. (2016): Paludiculture - productive use of wet peatlands, Climate protection - biodiversity - regional economic benefits. Online verfügbar unter <https://www.schweizerbart.de/publications/detail/isbn/9783510652839,%20https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857416301677>, zuletzt geprüft am 22.07.2022.

Wiesmeier, M.; Burmeister, J.; Treisch, M. und Brandhuber, R. (2017): Klimaschutz durch Humusaufbau – Umsetzungsmöglichkeiten der 4 Promille-Initiative in Bayern. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/321141231_Klimaschutz_durch_Humusaufbau_-_Umsetzungsmoglichkeiten_der_4_Promille-Initiative_in_Bayern, zuletzt geprüft am 26.03.2021.

Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik beim BMEL (2021): Die Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft an den Klimawandel, Gutachten des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik. Unter Mitarbeit von Bauhus, J.; Dieter, M.; Farwig, N.; Hafner, A.; Kätzel, 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/gutachten-wbw-anpassung-klimawandel.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 09.02.2022.