Umwelt Bundesamt

Für Mensch und Umwelt

Stand: 14. April 2025

Treibhausgasneutralität und die Ziele der natürlichen Kohlenstoffsenke sind noch erreichbar

Szenarienbasierte Erkenntnisse des Umweltbundesamtes

50 Jahre Umweltbundesamt 1974–2024

1 Fazit

Treibhausgasneutralität bis 2045 ist robust erreichbar

Aktuelle sektorübergreifende Szenarienarbeiten des Umweltbundesamtes zeigen, dass mit einer ambitionierten Minderungsstrategie verbunden mit umfassenden Anstrengungen Treibhausgasneutralität bis 2045 theoretisch noch ohne die Technologie der Kohlenstoffabscheidung und -einlagerung möglich ist. Werden ergänzend diese technischen Maßnahmen in die Transformation integriert, wird robust Treibhausgasneutralität und schon 2045 Netto-Negativemissionen ermöglicht.

Trennung von Vermeidung menschenverursachter Treibhausgase und deren gemindertem Ausstoß in die Atmosphäre

Ziel von Klimapolitik muss es bleiben, Treibhausgase erst gar nicht zu erzeugen. Es bedarf zielgerichteter Politiken die menschenverursachten Treibhausgase zu reduzieren und nicht nur deren Ausstoßen zu verhindern. In Reflektion des jeweiligen Wissenstandes und gesellschaftlicher Akzeptanz sind die (menschenverursachten) erzeugten Treibhausgase fortlaufend bis zum Maß der unvermeidbaren Treibhausgase zu definieren und transparent zu bilanzieren. Eine Trennung und transparente Erfolgskontrolle der sektoral und gesamt erzeugten Treibhausgase (ohne Berücksichtigung von CCS) sowie der sektoral und gesamt ausgestoßenen Treibhausgasemissionen (mit Berücksichtigung von CCS; Brutto-Emissionen; Ziel laut Bundes-Klimaschutzgesetz) scheint hilfreich.

Die LULUCF-Ziele in 2040 und 2045 sind erreichbar

Mit unverzüglichen und ambitionierten Klimaschutzmaßnahmen können die im § 3a KSG festgelegten Ziele für den Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) in 2040 und 2045 erreicht werden. Gelingen kann dies mit einer Offensive für Wälder, Moorböden und Agroforst, die zu den wichtigsten Elementen des Instrumenten- und Maßnahmenspektrums zählen. Wichtig ist, dass bereits in 2025 politische Weichenstellungen angestoßen und zielgerichtete unbürokratische Konzepte zur Finanzierung und Umsetzung der Maßnahmen forciert werden. Damit kann es gelingen, den LULUCF-Sektor zurück auf den Zielpfad zu bringen und die Ökosystemleistungen zu stärken und zu sichern.

Moderaten Einstieg in technische Senken

Ambitionierte Minderungen sowie der Aufbau und die Stärkung der natürlichen Senke können durch die technische Senke nicht ersetzt werden. Unter Voraussetzung eines moderaten Einstiegs können technische Senken die robuste Zielerreichung stärken. Ein Hochlauf auf eine Größenordnung von -6 Mio. t CO_2 bis 2045 scheint angemessen. Das Umweltbundesamt empfiehlt den Einstieg an thermischen Abfallverbrennungsanlagen, wo die Gefahr von Lock-in-Effekten am geringsten ist und Biomasse am Ende einer langen Nutzungskaskade steht. Mit dieser Ergänzungsfunktion stellen technische Senken auch angesichts ihrer Umsetzungsunsicherheiten eine No-regret Option für den Klimaschutz dar.

2 Einleitung

Deutschland hat sich das Ziel gesetzt bis zum Jahr 2045, also innerhalb der nächsten 20 Jahre, netto-treibhausgasneutral zu sein und ab 2050 sogar Netto-Negativemissionen zu generieren. Dazu sind größtmögliche Minderungsanstrengungen in allen Lebensbereichen und Sektoren notwendig, um die Treibhausgasemissionen so zeitnah und so weit es geht zu vermeiden. Diese Minderung muss oberste Priorität im Klimaschutz sein und Leitgedanke der klimagerechten Weiterentwicklung unseres Wirtschaftssystems. Neben den dafür erforderlichen umfassenden und weitreichenden Anstrengungen werden gleichzeitig die CO_2-Entnahme aus der Atmosphäre und langfristige Speicherung, also Negativemissionen, notwendig sein, um unvermeidbare Restemissionen auszugleichen. Das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) definiert hierfür in § 3a absolute Senkenziele für den Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (engl. land use, land use change and forestry, LULUCF) für die Jahre 2030, 2035, 2040 und 2045. In § 3b sind Ziele für technische Senken für die Jahre 2035, 2040 und 2045 festgelegt, die im Rahmen einer Rechtsverordnung konkretisiert werden sollen.

Basis für die Ausgestaltung und Konkretisierung bildete bisher die Erarbeitung der Langfriststrategie Negativemissionen, kurz LNe. Die LNe basiert auf ressortabgestimmten Eckpunkten vom 26. Februar 2024 und ist als Beteiligungsverfahren mit Akteur*innen aus Wissenschaft, Wirtschaft, Zivilgesellschaft und Politik organisiert. Ihr Auftrag ist es, für technische Senken Ziele und Maßnahmen im Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen in Deutschland zu definieren. Technische Senken spielen bisher im Klimaschutz keine Rolle. Die natürlichen Senken hingegen schon. Für den LULUCF-Sektor sind klare Ziele formuliert sowie Maßnahmen und Instrumente zum Adressieren dieser hinterlegt. Zentral ist hier das „Aktionsprogramm natürlicher Klimaschutz“ (ANK) zu nennen. Mit der Veröffentlichung der Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur wird deutlich, dass Maßnahmen für den klimaresilienten Waldumbau bisher nicht ausreichend sind. Die aktuellen Projektionsdaten 2025 zeigen, dass die derzeitigen Politiken im LULUCF-Sektor hier noch nicht aktiv genug gegensteuern und bisher zu einer Zielverfehlung im Jahr 2045 um mehr als 75 Mio. t CO_2-Äq. führen (Wehnemann et al., 2025).

Dieses Papier greift aktuelle Forschungsergebnisse des Umweltbundesamtes, insbesondere des Forschungsvorhabens[1] „Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (CARE)“ (Harthan et al., unveröffentlicht), auf und zeigt für die aktuellen Prozesse zu Negativemissionen, wie die Ziele der natürlichen Senken sicher erreicht werden können und wie ein möglicher Einstiegspfad für die technischen Senken aussehen könnte.

[1] Die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt FKZ 3720415060 sind derzeit in Veröffentlichung unter „Ambitionierte Pfade für Treibhausgasneutralität in Deutschland: CARESupreme und CARETech“ (Harthan et al., unveröffentlicht). Das Forschungsvorhaben wird unter der Leitung des Öko-Institut e. V. durchgeführt. Das Forschungsvorhaben modelliert sektorübergreifend und berücksichtigt beispielsweise Wechselwirkungen in der Flächennutzung, Nutzung der Kohlenstoffquelle und resultierende sektorübergreifende Kohlenstoffflüsse, Energienachfragen und -erzeugungen sowie Kohlenstoff- und Energie-Importe/Exporte. In diesem Papier wird ausschließlich auf die Ergebnisse der Senken aus der sektorübergreifenden Gesamtmodellierung eingegangen. In Harthan et al. (unveröffentlicht) werden die Szenarien ganzheitlich ausgeführt.

3 Treibhausgasneutralität bis 2045 ist erreichbar

Die aktuellen Klimaschutzpolitiken machen zwar die Ziele in 2030 über alle Sektoren hinweg greifbar. Gleichzeitig wird deutlich, dass neben den Verfehlungen der europäischen Klimaschutzverordnung[2] auch die mittel- und langfristigen Ziele noch lange nicht sicher erreichbar sind (Wehnemann et al., 2025). Im Forschungsvorhaben „Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (CARE)" werden Minderungspfade und -maßnahmen mittels sektorübergreifender Modellierungen aufgezeigt, wie deutsche Klimaziele und Netto-Treibhausgasneutralität sicher bis 2045 erreicht werden können und welche umfassenden Anstrengungen in den einzelnen Sektoren und sektorübergreifend dafür notwendig sind, siehe dazu Harthan et al. (unveröffentlicht).

Das Szenario „CARESupreme" zeigt mit einer ambitionierten Minderungsstrategie und umfassenden Anstrengungen, dass Treibhausgasneutralität bis 2045 ohne die Technologie der Kohlenstoffabscheidung und -einlagerung (engl. carbon capture and storage, CCS) erreicht werden kann.[3] Wird dieser ökologische nachhaltige Pfad mit einem moderaten Einstieg in die technischen Kohlenstoffsenken (entsprechend § 3b Bundes-Klimaschutzgesetz) ergänzt, werden robust Treibhausgasneutralität und darüber hinaus schon in 2045 Netto-Negativemissionen erreicht. Ein solcher Pfad ermöglicht, auch bei potentiellen hohen klimatischen Auswirkungen auf die natürliche Senke, Treibhausgasneutralität 2045 sicher zu erreichen.

Dies bedeutet, dass konsequent die Handlungs- und Wirtschaftsmuster auf Klima- und Ressourcenschutz auf Basis gesellschaftlichen Konsens ausgerichtet werden, wie im GreenSupreme-Szenario der RESCUE-Studie (Purr et al., 2019). Maßnahmen und Instrumente, zuvorderst die Energieeffizienz, Umstellung auf erneuerbare Energien mit dem Fokus der Elektrifizierung, gesunde Ernährung in Verbindung mit Reduktion der Tierbestände, Kreislaufwirtschaft und Ressourcenschonung werden in einem ambitionierten Umfang politisch und gesellschaftlich umgesetzt. Im Ergebnis werden im Szenario CARESupreme[4] Treibhausgase in Höhe von 47,6 Mio. t CO_2-Äq. durch das menschliche Handeln erzeugt und davon 46,3 Mio. t CO_2-Äq. in die Atmosphäre emittiert. Diese treten vornehmlich in der Landwirtschaft (23,2 Mio. t CO_2-Äq.), der auf ein Nullwachstum erholten und stabilisierten Wirtschaft (Industrie: 16,3 Mio. t CO_2-Äq.) und der Abfallwirtschaft (2,9 Mio. t CO_2-Äq.) auf. Diesen gegenübersteht die LULUCF-Senke in Höhe von -55,9 Mio. t CO_2-Äq., siehe dazu Harthan et al. (unveröffentlicht)und Kapitel 4**. Das LULUCF-Senkenziel von mindestens 40 Mio. t CO_2-Äq. bis 2045 wird damit übertroffen, sodass die natürliche Kohlenstoffsenke als robust, z. B. gegenüber stärkeren Klimawandelauswirkungen, für den Ausgleich der unvermeidbaren Restemissionen betrachtet werden kann.** Ergänzend zur weiteren Absicherung der Zielerreichung von Treibhausgasneutralität und mit Blick auf die aktuellen gesetzlichen Weichenstellungen zu technischen Senken werden auch im Szenario CARESupreme Technologien zur Kohlenstoffabscheidung und -einspeicherung an Abfallverbrennungsanlagen (engl. waste with carbon capture and storage, WACCS) unterstellt. In Summe liefert diese

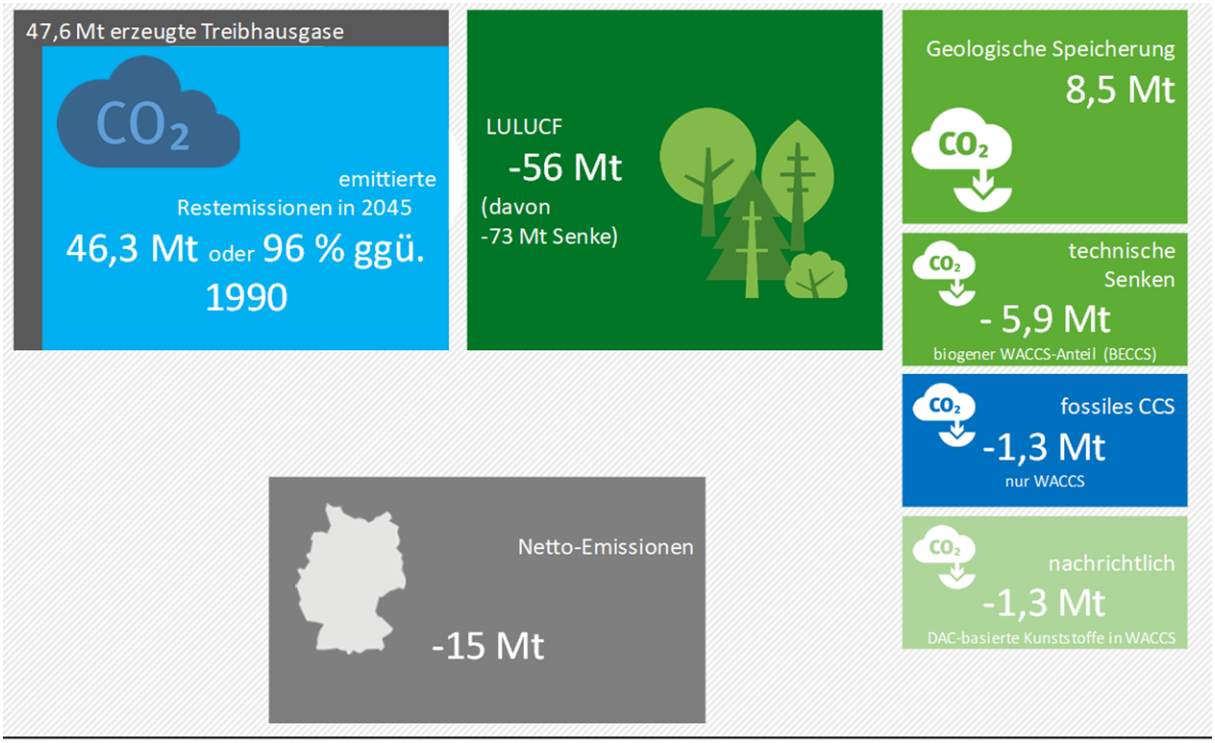
[2] engl. Effort Sharing Regulation (ESR).

[3] Es würden 47,6 Mio. t CO_2-Äq. emittiert, was einer Minderung von 96 % gegenüber 1990 entspricht. Diesen gegenübersteht die LULUCF-Senke in Höhe von -55,9 Mio. t CO_2-Äq. (Harthan et al., unveröffentlicht).

[4] Die genauen Ergebnisse entlang der Sektoren des Bundes-Klimaschutzgesetzes sind in dem in Veröffentlichung befindlichen Bericht „Ambitionierte Pfade für Treibhausgasneutralität in Deutschland: CARESupreme und CARETech" (Harthan et al., unveröffentlicht) zu finden.

Technik im Jahr 2045 einen Senkenbeitrag von -5,9 Mio. t CO_2-Äq. und fossilen nicht emittierten Emissionen aus Abfallverbrennungsanlagen in Höhe von (-)1,3 Mio. t CO_2-Äq.[5].

Abbildung 1: Zentrale Ergebnisse der Treibhausgasbilanzierung für CARESupreme in 2045



Anmerkung: Gerundete Werte. Angaben in CO_2-Äq.. Im CARE-Vorhaben wird noch nicht die aktuellste Submission verwendet. Gleichzeitig wurden im LULUF-Sektor bereits vorab die mit der Bundeswaldinventur 2024 gezeigten Entwicklungen modelliert, sodass die Auswirkungen der extremen Jahre 2018 bis 2020 und 2022 berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass die Ergebnisse als richtungssicher angesehen werden können. Noch nicht beinhaltet sind die Änderungen bei den Emissionen aus Humusverlusten in mineralischen Ackerböden (seit Submission 2025) in Höhe von ca. 7 Mio. t CO_2. Es wird ein mittleres Schadensausmaß für die Abbildung der Klimasensitivität dieses Sektors in der Zukunft unterstellt, siehe dazu Harthan et al. (unveröffentlicht).
Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Es wird deutlich, dass es weiterhin Ziel von Klimapolitik bleiben muss, Treibhausgase erst gar nicht zu erzeugen. **Es bedarf zielgerichteter Politiken die menschenverursachten Treibhausgase zu reduzieren und nicht nur deren Ausstoßen zu verhindern.** Dies beginnt bei einer transparenten Ausweisung und Bilanzierung (vgl. Purr et al., 2023 und Purr et al., 2022). In diesem Sinne ergeben sich folgende Differenzierungen, siehe auch Abbildung 2:

- Sektoral und gesamt erzeugte Treibhausgase (von Menschen verursachte Treibhausgase ohne Berücksichtigung von CCS),
- Sektoral und gesamt ausgestoßene Treibhausgasemissionen (unter Berücksichtigung von CCS; entspricht den Zielen des Bundes-Klimaschutzgesetzes),
- Natürliche Senke,
- Technische Senke.

[5] Bei steigendem Anteil Kunststoffs aus atmosphärischem Kohlenstoff in den thermischen Abfallbehandlungsanlagen werden (-)1,3 Mio. t CO_2-Äq. abgeschieden. Da dieser importiert wird, fließt er nicht als Negativemission in die Bilanz ein. Siehe dazu auch Harthan et al. (unveröffentlicht).

Bei einer solchen Arithmetik, siehe Abbildung 2, können die (menschenverursachten) erzeugten Treibhausgase je nach gesellschaftlichem Ambitionsniveau den unvermeidbaren Treibhausgasen entsprechen oder sehr nahe sein. Diese sind in Reflexion des jeweiligen technischen Wissensstandes und gesellschaftlicher Akzeptanz in der Zeit auch möglicherweise verringerbar. Teile der erzeugten Treibhausgase könnten mit Hilfe von Carbon Capture and Storage-Anlagen am Ausstoß in die Atmosphäre gehindert werden. Es verbleiben die emittierten Restemissionen, die in die Atmosphäre ausgestoßen werden (Brutto-Emissionen) und mit Negativemissionen für Treibhausgasneutralität ausgeglichen werden müssen. Gelingt es nicht, Klima- und Ressourcenschutz in das alltägliche Handeln zu implementieren, werden die erzeugten Treibhausgase über dem Maß der Unvermeidbaren nach dem jeweiligen Wissensstand liegen. Sie beinhalten dann beispielsweise auch schwer vermeidbare Treibhausgase oder Treibhausgase, die nur kostenintensiv sind oder deren Vermeidung gesellschaftlich nicht akzeptiert sind. Hier läge die Abwägung darin, die erzeugten Treibhausgase am Ausstoß zu hindern, die Akzeptanz zur Vermeidung zu erhöhen oder sogar die erzeugten Treibhausgase durch Negativemissionen auszugleichen (siehe Purr & Spindler, 2023).

Abbildung 2: Schematischer Überblick zur Zielarithmetik für ambitionierten nachhaltigen Klimaschutz

Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

4 So sind die LULUCF-Ziele erreichbar

Im Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) werden einerseits THG-Emissionen (Quellen) freigesetzt und andererseits Kohlenstoff (Senken) eingebunden. Klimaschutzmaßnahmen im LULUCF-Sektor zielen darauf ab eine negative Sektorbilanz, also eine Senke, zu erreichen.

Nach § 3a KSG müssen im LULUCF-Sektor pro Jahr mindestens -25 Mio. t CO_2-Äq. bis 2030, mindestens -35 Mio. t bis 2040 und mindestens -40 Mio. t CO_2-Äq. bis 2045 eingebunden werden. Auch wird die besondere Bedeutung des LULUCF-Sektors vor dem Hintergrund der Ökosystemleistungen betont. Das UBA-Forschungsvorhaben „CARE" zeigt, wie in dem Szenario „CARESupreme" mit ambitionierten Maßnahmen und Instrumenten die gesetzlichen LULUCF-Ziele erfüllt werden können. So wird in 2045 eine Senkenleistung in Höhe von -55,9 Mio. t CO_2-Äq. erzielt, also insgesamt rund 16 Mio. t CO_2-Äq. über der gesetzlichen Zielvorgabe. Auch bis 2040 wird das LULUCF-Ziel erreicht (-51,2 Mio. t CO_2-Äq.).[6] **Die Ziele des KSG für den LULUCF-Sektor sind damit langfristig bis 2045 erreichbar, wenn nun schnell und fokussiert gehandelt wird.** Gleichwohl braucht es dafür gesellschaftliche Teilhabe und Akzeptanz für die umfassenden Anstrengungen und Veränderungen in der Bewirtschaftung des Naturraumes durch Land- und Forstwirtschaft.

In den Jahren 2018-2020 und 2022 führten Kalamitäten durch Hitze, Dürre und Insektenbefälle zur Dezimierung der Zuwachsraten im Wald (BMEL 2024). In Verbindung mit bislang noch unzureichenden Waldklimaschutzmaßnahmen kam es zum Ausfall der Waldsenke ab 2018. Aufgrund der Tatsache, dass landbasierte Klimaschutzmaßnahmen beispielsweise Waldmehrung und Waldumbau charakteristisch erst nach Jahren bis Jahrzehnten wirken, wird das 2030er LULUCF-Sektorziel im Szenario CARESupreme zeitversetzt in 2035 erreicht.

Zukünftig könnten der Umgang und die Anrechnung derartiger Störungen durch die Rechtsverordnung im KSG § 3a Absatz 3(2) dahingehend geregelt werden, dass witterungs- und klimabedingte Einflüsse auf die Entwicklung der Senkenleistung von den Klimaschutzmaßnahmen separiert werden. Damit könnte die Wirkung von Maßnahmen auf den LULUCF-Zielerreichungspfad effektiver erfasst und im Hinblick auf ihren Nutzen unabhängig von Klimawandelauswirkungen bewertet werden. Im CARE-Vorhaben werden klimawandelbedingte Störungen im Maßnahmen- und Instrumentenspektrum, welches im Folgenden skizziert wird, bereits antizipiert.[7]

Maßnahmen und Instrumente[8]

Für die Stärkung der Senkenleistung im LULUCF-Sektor spielt der **Waldklimaschutz** eine entscheidende Rolle. Bedingt durch die Umkehr der Waldsenke zu einer Quelle (2018-2022) geht es in den nächsten Jahren bis 2030 zunächst um die Wiederbewaldung der Kalamitätsflächen. Darüber hinaus müssen zur Stärkung einer klimaresilienten Waldsenke (Nadel-)Reinbestände in struktur- und artenreiche Laubmischwälder umgebaut, der Vorratsaufbau in ökologisch stabilen Wäldern gestärkt und möglichst naturnah bewirtschaftet werden. Auch ist der Laubholzeinschlag bis 2045 auf etwa 4,25 Mio. t gegenüber der

[6] Es wird ein mittleres Schadensausmaß für die Abbildung der Klimasensitivität dieses Sektors unterstellt, siehe dazu Harthan et al. (unveröffentlicht). Die Modellierung des LULUCF-Sektors hängt stark vom unterstellten und unvorhersehbaren Ausmaß zukünftiger natürlicher Störungen ab. Daraus kann eine Spannweite bis in den zweistelligen Bereich resultieren.

[7] Im CARE-Vorhaben wurden bereits vorab die mit der Bundeswaldinventur 2024 gezeigten Entwicklungen modelliert, sodass die Auswirkungen der extremen Jahre 2018 bis 2020 und 2022 berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass die Ergebnisse als richtungssicher angesehen werden können. Noch nicht beinhaltet sind die Änderungen bei den Emissionen aus Humusverlusten in mineralischen Ackerböden (seit Submission 2025) in Höhe von ca. 7 Mio. t CO_2. CARE verwendet noch nicht die aktuellste Submission.

[8] Die folgenden Maßnahmen und Instrumente basieren auf dem Szenario CARESupreme, siehe dazu Harthan et al. (unveröffentlicht).

durchschnittlichen Entnahme von 2017-2023 zu reduzieren.[9] In Verbindung mit einem deutlichen Rückgang der Holznutzung für Energiezwecke wird ein wesentlicher Beitrag zum Kohlenstoffspeicher Wald geleistet.[10] Gleichzeitig kann durch die stärkere Nutzung von langlebigen Holzprodukten vor allem im Bausektor der **Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten gesteigert werden. Durch Waldumbau sowie durch nachhaltige und klimafreundliche Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen mit Stärkung der Agroforstsysteme können rund 33 Mio. t CO_2-Äq. in 2045 eingespeichert werden.**

Für die Senkung von Emissionen ist der Moorbodenschutz, insbesondere die **Wiedervernässung drainierter organischer Böden**, der wichtigste Hebel. Die Emissionen aus organischen Böden betragen jährlich 50-60 Mio. t CO_2-Äq.. In 2023 lag der Anteil bei rund 7 % der gesamten Emissionen Deutschlands. Überwiegend geht es dabei um landwirtschaftlich genutzte Flächen (80 %). Diese Emissionen können mit einer sukzessiven Wasserstandsanhebung, teilweise bis hin zur Vollvernässung, von über 80 % der drainierten Böden bis zum Jahr 2045 deutlich reduziert werden.[11] Von besonderer Bedeutung sind unbürokratische Anreize wie Förderungen und Zuschüsse, um entgangene Einnahmen zu kompensieren und alternative nasse Bewirtschaftungsmodelle (sogenannte Paludikulturen) zu ermöglichen. **Durch Moorwiedervernässung (über 80 % der drainierten Flächen) und Optimierung der Wasserstände in allen Feuchtgebieten bis 2045 können die Treibhausgasemissionen insgesamt um rund 26 Mio. t CO_2-Äq. gesenkt werden.**[12]

Ein wichtiger Bereich des Moorbodenschutzes ist zudem der sukzessive **Ausstieg aus dem Torfabbau** und, um die Verlagerung von Emissionen ins Ausland zu vermeiden, ebenso aus der Torfnutzung. In CARESupreme wird der Ausstieg aus der Torfnutzung im Hobbygartenanbau bis 2026 und im gewerblichen Anbau bis 2040 vollzogen und damit eine Minderung von 2,2 Mio. t CO_2-Äq. ermöglicht. Voraussetzung ist, dass bereits heute die Veränderung des Produktionspfads und die Nutzung von Torfprodukten durch Umstieg auf Torfersatzprodukte oder das Vermeiden von Torfprodukten, z. B. torffreie Blumenerden, politisch flankiert und gezielt gefördert werden.

Weitere Hebel, um die hohen Emissionen aus Böden im LULUCF-Sektor zu senken und langfristig die terrestrische Einbindung zu fördern, ist der **Erhalt und dauerhafte Aufbau von Humus** in landwirtschaftlichen Böden. Dazu sind Bodenbewirtschaftungspraktiken anzupassen, vor allem durch Anbau von Dauerkulturen und insbesondere Agroforstsystemen, die über die nächsten Jahre stark auszuweiten sind. Darüber hinaus gilt es mehrgliedrige Fruchtfolgen in Verbindung mit Zwischenfrüchten, insbesondere Leguminosen, sowie der Erhalt von Dauergrünland weiterhin zu fördern.

Um Emissionen in der Kategorie Siedlungen zu reduzieren, ist die **Flächenneuinanspruchnahme** deutlich zu senken. Wenn Flächen für Siedlungs- und Verkehrsinfrastruktur neu erschlossen werden, gehen häufig land- und forstwirtschaftliche Flächen einschließlich ihrer Senkenwirkung verloren. Im Einklang mit dem Umweltprogramm 2030 muss dieser Rückgang schnellstmöglich aufgehalten werden. In CARESupreme wird die

[9] Bis 2030 wird in CARESupreme die Laubholzentnahme um etwa 2 Mio. t gegenüber der durchschnittlichen Entnahme von 2017-2023 reduziert (Harthan et al., unveröffentlicht).

[10] In CARESupreme wird eine Steigerung des Holzproduktspeichers, beispielsweise durch verstärkte Nutzung in Dämmmaterialien, von 5 Mio. m^3 bis 2030 und 19,5 Mio. m^3 bis 2045 unterstellt. Schad- und Mortalitätsholz wird zu hohen Anteilen einer Nutzung zugeführt. Die Erhöhung der Nutzung langlebiger Holzprodukte ermöglicht -14,8 Mio. t CO_2-Äq. (Harthan et al., unveröffentlicht).

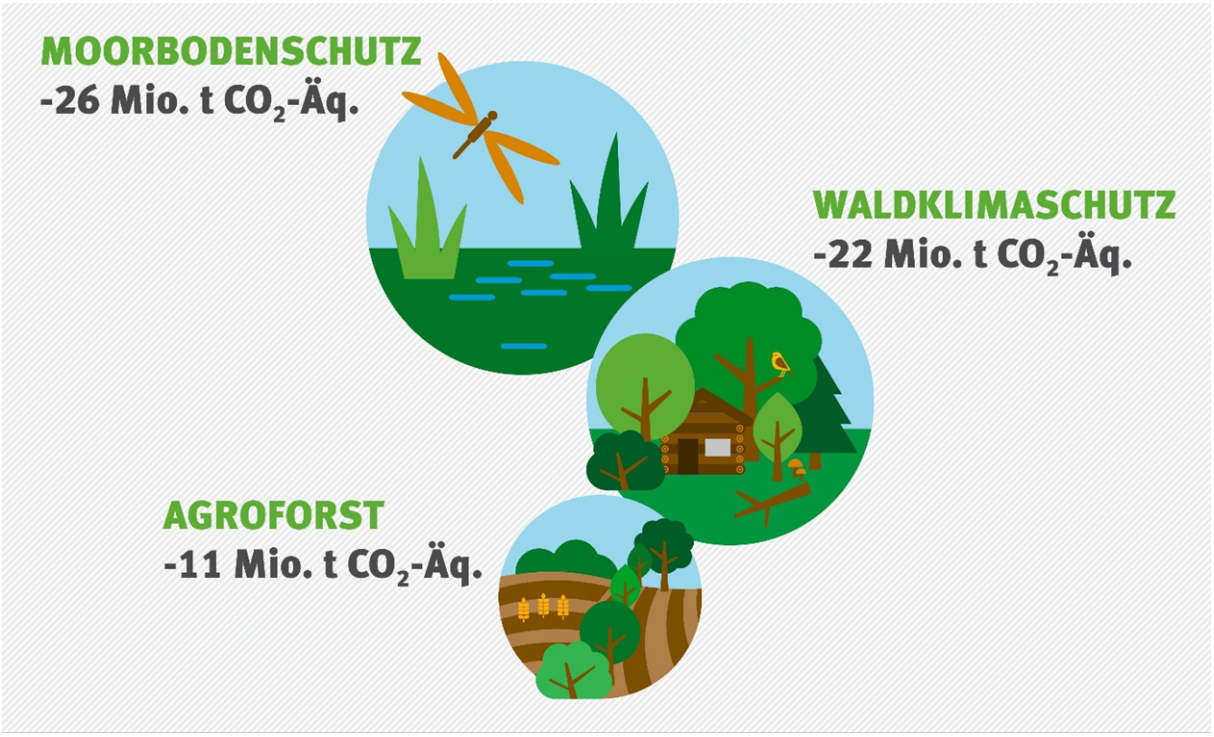
[11] Konkret wird in CARESupreme von einer Wiedervernässung bis 2030 von 42 % (ca. 530 tha) und bis 2045 von 83 % (1046 tha) ausgegangen (Harthan et al., unveröffentlicht).

[12] Dies setzt sich aus -22,9 Mio. t CO_2-Äq. durch Moorbodenschutz auf drainierten landwirtschaftlich genutzten Moorböden und -3,4 Mio. t CO_2-Äq. durch die Optimierung des Wassermanagements bestehender Feuchtgebiete zusammen (Harthan et al., unveröffentlicht).

Flächenneuinanspruchnahme bis 2045 auf 4 Hektar pro Tag herabgesenkt. Bis 2050 sollte die Bilanz zwischen neu erschlossener und umgewandelter Fläche mindestens null betragen.

Es wird deutlich, dass zum einen die LULUCF-Ziele für 2040 und 2045 noch erreichbar sind und zum anderen, dass aufgrund der langen Wirkzeiten von landbasierten Klimaschutzmaßnahmen schnelle und ambitionierte politische Weichenstellungen erforderlich sind. Es geht darum, zielgerichtete, unbürokratische Konzepte zur Finanzierung und Umsetzung zur Erreichung der natürlichen Senkenziele zu erarbeiten und aufzusetzen. **Insbesondere mit einer Offensive für Wälder, Moore und Agroforst können der LULUCF-Sektor zurück auf den Zielpfad gebracht und die gesetzlichen Sektorziele bis 2040 und 2045 sicher erreicht werden. Gleichzeitig werden Ökosystemleistungen in ihre Bedeutung erhalten und gestärkt.** Die gesellschaftliche Einbindung und deren Akzeptanz für diese umfassenden Anstrengungen und Veränderungen sind unabdingbar.

Abbildung 3: Treibhausgas-Wirkung der wichtigsten Maßnahmen im LULUCF-Sektor bis 2045 bei schnellem Handeln



Anmerkung: Agroforst steht hier zusammenfassend für klimafreundliche Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen, womit insbesondere die Stärkung von Agroforst-Systemen, konkret die Einbringung von Gehölzen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen, gemeint ist.
Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

Einordnung von CARESupreme zu den aktuellen Treibhausgas-Projektionen 2025

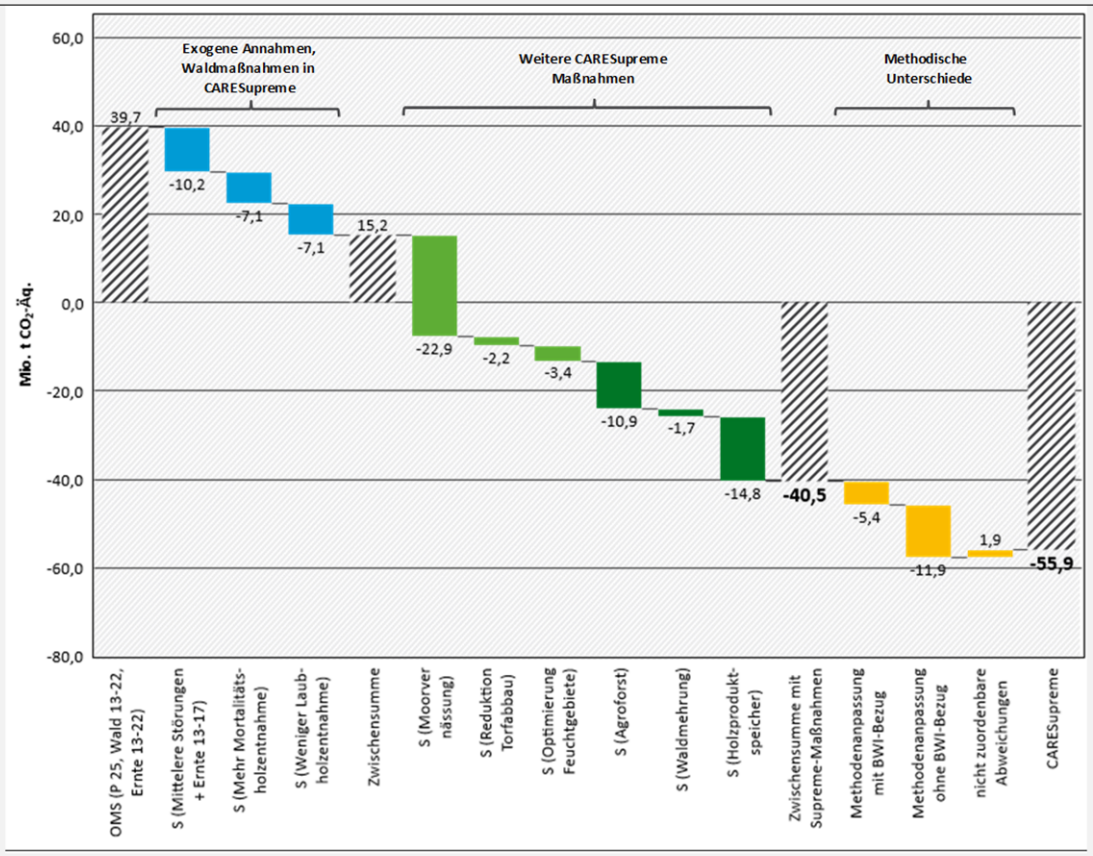
Die Berechnungen im CARE-Vorhaben erfolgten vor Veröffentlichung der vierten Bundeswaldinventur und den Treibhausgas-Projektionen 2025. Gleichwohl wurden vorab bei der Modellierung des LULUCF-Sektors die mit der Bundeswaldinventur 2024 gezeigten Entwicklungen antizipiert, sodass die Auswirkungen der extremen Jahre 2018 bis 2020 und 2022 berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass die Ergebnisse als richtungssicher angesehen werden können (Hennenberg et al. 2024a, Hennenberg et al. 2024b). Zum besseren Verständnis und Transparenz wird im Folgenden am Beispiel des Jahres 2045 eine kompakte Einordnung von CARESupreme zu den Treibhausgas-Projektionen 2025 gegeben. Nähere Informationen finden sich in Harthan et al., unveröffentlicht.

Die Treibhausgas-Projektionen (Wehnemann et al., 2025) zeigen für LULUCF im sogenannten OMS-Szenario im Jahr 2045 etwa 39,7 Mio. t CO_2-Äq.. Würden zur Fortschreibung der Waldentwicklung und zum Waldmanagement vergleichbare exogenen Annahmen wie in CARESupreme unterstellt, läge dieser Wert bei 15,2 Mio. t CO_2-Äq.. Diese Unterschiede kommen Zustande, da in CARESupreme für die Fortschreibungen für etwa 25 % und in den Treibhausgas-Projektionen für etwas 50 % der Jahre extreme Störungen hinterlegt sind. Zum Waldmanagement wird in CARESupreme eine geringere Holzernte als Mittelwert der Jahre 2013-2017 fortgeschrieben, und nicht wie in den Treibhausgas-Projektionen die höhere mittlere Holzernte der Jahre 2013-2022. Auch wird in CARESupreme eine höhere Entnahme von Mortalitätsholz (abgestorbene Bäume) angenommen, so dass eine geringere Menge an vitalen Bäumen geerntet werden. Die Laubholzernte wird zusätzlich bis zum Jahr 2050 kontinuierlich verringert.

Werden dann die wie im Kapitel 4 beschrieben Maßnahmen zur Offensive für Moorböden, Agroforst (inkl. Holzprodukte) unterstellt, wird im Jahr 2045 das Senkenziel des LULUCF-Sektors von -40 Mio. t CO_2-Äq. erreicht.

In den Treibhausgas-Projektion 2025 flossen bereits methodische Anpassungen ein, die in CARESupreme noch nicht zur Verfügung standen, beispielsweise die verbesserte Abbildung des Bodenkohlenstoffs in mehreren Flächentypen und Anpassungen der Waldsenkenleistung bis zum Jahr 2017. Daraus folgt rein methodischen ein Unterschied von rund 16 Mio. t CO_2-Äq.. Im Ergebnis führt dies zu den im Kapitel 3 und 4 benannten -55,9 Mio. t CO_2-Äq. für CARESupreme.

Abbildung 4: Analyse von CARESupreme zu den Treibhausgas-Projektionen 2025 für das Jahr 2045



Anmerkungen: S = CARESupreme, P = Treibhausgas-Projektionen 2025, 13-22 bzw. 13-17 = Fortschreibung der Bedingungen in den Jahren 2013 bis 2022 bzw. 2013 bis 2017.

Quelle: Harthan et al. (unveröffentlicht).

5 Den strategischen Hochlauf technischer Senken moderat und ressourcenschonenden gestalten

Auch wenn Treibhausgasneutralität theoretisch und unter ambitionierten Annahmen noch ohne technische Senken in 2045 erreicht werden kann, wie CARESupreme zeigt, sind technische Senken in Ergänzung zu den natürlichen Senken für eine robuste Zielerreichung angezeigt. Davon unberührt bleiben die Umsetzungsunsicherheiten bei technischen Anwendungen der Kohlenstoffabscheidung und -einspeicherung. Mit Blick auf mögliche Umsetzungs- und Erschließungsmöglichkeiten wird in CARESupreme ab 2035 ein moderater Hochlauf durch Kohlenstoffabscheidung an thermischen Abfallbehandlungsanlagen mit anschließendem Transport und geologischer Einspeicherung (WACCS) skizziert. Bis 2045 werden 60 % der installierten Leistung von Müll-Heizkraftwerken mit Carbon Capture-Anlagen zur anschließenden Speicherung ausgestattet und so Negativemissionen von -5,9 Mio. t CO_2-Äq. in 2045 generiert (siehe Tabelle 1). Dabei wird nur der biogene Anteil von WACCS als Negativemission, unter Voraussetzung, dass die energetische Nutzung von Biomasse als Nullemissionen bilanziert werden, gewertet und ist der Kategorie Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS) zu zuordnen.[13] **BECCS, das nicht auf Rest- und Abfallstoffen basiert, ist für den Hochlauf nicht notwendig.** Dadurch wird zusätzlicher Druck auf die energetische Nutzung von Biomasse verhindert. Mit dem Fokus auf WACCS werden potentielle Lock-in-Effekte oder Pfadabhängigkeiten gemindert und die Abscheidung am Ende einer langen Nutzungskette organisiert (Purr & Spindler, 2023). Dies ermöglicht die fokussierte Adressierung der unvermeidbaren Treibhausgase und schafft Voraussetzungen für den weiteren Einsatz zusätzlicher technischer Maßnahmen nach 2045, wie die direkte Entnahme von CO_2 aus der Atmosphäre (engl. direct air carbon capture, DACC) oder Carbon Capture-Anlagen für unvermeidbare prozessbedingte Emissionen nach gelungener Energiewende in der Industrie. **Ein Hochlauf auf eine Größenordnung von -6 Mio. t CO_2 Negativemissionen in Verbindung mit einem begrenzten Hochlauf der geologischen Einspeicherung von CO_2 von max. 10 Mio. t CO_2 bis 2045 scheint mit Blick auf dieses Szenario angemessen.**

Tabelle 1: Empfehlung für den Hochlauf technischer Negativemissionen

Sektor	2035	2040	2045
	Mio. t CO_2-Äq.		
Gesamt Negativemissionen aus BECCS	**-0,6**	**-3,3**	**-5,9**

Quelle: Harthan et al. (unveröffentlicht)

Der LULUCF-Sektor ermöglicht es, die unvermeidbaren Restemissionen aus den Sektoren Industrie, Landwirtschaft und Abfallwirtschaft und Sonstiges zu kompensieren und Netto-Null zu erreichen, sofern ausreichend gemindert wird (siehe Kapitel 4). Eine Kompensation oder gar Überkompensation kann der LULUCF-Sektor langfristig nicht leisten, sodass technische Negativemissionen angebracht sind. Dies verdeutlich nochmals die Dringlichkeit, Treibhausgase gar nicht erst entstehen zu lassen, siehe Kapitel 3. Gelingt es nicht, nachhaltiges Handeln und Wirtschaften mit Effizienz- und Suffizienzmaßnahmen ausreichend zu integrieren, werden langfristig zum einen mehr Treibhausgase menschenverursacht erzeugt und die Potentiale der natürlichen Senke nur eingeschränkt hebbar sein. Neben den sich verschärfenden Zielkonflikten anderer Umweltherausforderungen führt dies im Klimaschutz zu einem enormen Bedarf an

[13] Das Szenario LNe97 aus dem Begleitprozess zur Langfriststrategie Negativemissionen weist unter verstärkter Nutzung von fossilem CCS große Ähnlichkeit zu diesen Negativemissionsmengen auf.

technischen Senken. Im Forschungsvorhaben „Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (CARE)“ spiegelt sich dies im CARETech-Szenario[14]. Durch ein geringeres Ambitionsniveau und mit folglich abgeschwächten Instrumenten werden mit rund 77 Mio. t CO_2-Äq. deutlich mehr Treibhausgase erzeugt, von denen rund 66 Mio. t CO_2-Äq. ausgestoßen werden. Diesem erhöhten Treibhausgasausstoß steht die LULUCF-Senke mit nur noch -24 Mio. t CO_2-Äq. gegenüber. Es bedürfte in Deutschland Negativemissionen durch DACCS-Anlagen in Höhe von -34 Mio. t CO_2-Äq.. Die Kohlenstoffabscheidung und -einspeicherung läge insgesamt bei -72 Mio. t CO_2-Äq. jährlich (inkl. fossilem CCS an Industrieanlagen).[15] **Es zeigt sich, dass jährlich der Einspeicherungsbedarf um bis zu Faktor 10 höher ist, wenn es nicht gelingt, erfolgreich die Vermeidung von Treibhausgasen sowie den Ausbau und Sicherung der natürlichen Senke umzusetzen.** Um Kosten für die technische Infrastruktur zu reduzieren, fossile Pfadabhängigkeiten zu vermeiden und Abhängigkeiten von bisher nicht realisierten Großprojekten zu minimieren, sollten Treibhausgasemissionen weiterhin so ambitioniert wie möglich gemindert werden und der Hochlauf moderat ausfallen.

Herausforderungen bei der Bilanzierung der technischen Senken

BECCS stellt nur eine Verschiebung der Kohlenstoffsenke dar und keine zusätzliche Senke, solange der LULUCF-Sektor insgesamt seine Senke nicht vergrößert.

Im Fall von BECCS[16] mit mehrjähriger Biomasse stellen die sektorübergreifende Prozesskette und die Verknüpfung mit dem LULUCF-Sektor eine Herausforderung für eine transparente, nachrichtliche Berichterstattung dar. Das Ausweisen von technischen Negativemissionen durch BECCS in einem Jahr suggeriert, dass eine Entnahme aus der Atmosphäre entstanden ist, obwohl nur bereits entzogene und in den Vorjahren im LULUCF-Sektor bilanzierte Treibhausgase genutzt werden. Zudem stellt die Holzentnahme zur energetischen Verwendung zum Entnahmezeitpunkt eine Verringerung der Senkenleistung des LULUCF-Sektors dar und damit eine Schwächung der Netto-Senkenleistung nach § 3a KSG. BECCS leistet nur dann einen zusätzlichen Klimaschutzbeitrag, wenn im gleichen Umfang Kohlenstoff in mehrjährige Biomasse (bilanziert in LULUCF) zusätzlich wieder eingespeichert wird. Insgesamt stellen die Regeln zur Biomassebilanzierung im LULUCF-Sektor eine Ausnahme in der Berichterstattung dar. In allen anderen Sektoren werden Emissionen dort berichtet, wo und wann sie entstehen.

Bei der Holzentnahme wird die Freisetzung des über Jahre hinweg im LULUCF-Sektor eingebundenen Kohlenstoffs als Emission in ebendiesem Sektor bilanziert, obwohl sie tatsächlich erst bei der späteren Verbrennung im Energiesektor verursacht wird. Dadurch können die energiebedingten Emissionen aus der Biomasseverbrennung aus den Sektorbilanzen (und damit letztendlich aus den ‚national totals‘) herausgehalten werden.

Im Falle einer Verbuchung der Abscheidung und geologischen Einspeicherung der Emissionen aus der Verbrennung von Biomasse (BECCS) als negative Emission in der CRT-Kategorie 1.C suggeriert dies eine Senkenleistung im Energiesektor. Tatsächlich findet jedoch maximal ein Ausgleich der im

[14] Im CARETech-Szenario wird ein Transformationspfad aufgezeigt, der vornehmlich auf technische Lösungen und weniger auf verhaltensbasierte (Effizienz und Suffizienz) Lösungen setzt. Damit werden 77 Mio. t CO_2-Äq. erzeugt, was einer Minderung gegenüber 1990 von 94 % entspricht, und davon 66 Mio. t CO_2-Äq. emittiert. Nur -24 Mio. t CO_2-Äq. werden im Sektor LULUCF bei mittleren Schadensausmaß erreicht. In 2045 werden insgesamt 72 Mio. t CO_2 geologisch eingespeichert, davon sind 59 Mio. t CO_2 technische Negativemissionen. Konkret 34 Millionen Tonnen direkt aus der Atmosphäre (DACCs) und etwa 25 Mio. t CO_2 aus BECCS/WACCS.

[15] Das Szenario LNe93-S-ZV aus dem Begleitprozess zur Langfriststrategie Negativemissionen weist unter verstärkter Nutzung von fossilem CCS große Ähnlichkeit zu diesen Negativemissionsmengen auf.

[16] Betrifft auch WACCS, also CCS an thermischen Abfallbehandlungsanlagen, da hier ein Anteil biogenen Ursprungs ist und dieser als Negativemissionen im Klimaschutz wirkt.

LULUCF-Sektor verbuchten Emissionen aus der Biomassenutzung statt bzw. eine Verstetigung der ursprünglich im LULUCF-Sektor stattgefundenen Entnahmeleistung.

Das muss nicht zwangsläufig zu verfälschten Bewertungen des Beitrags durch BECCS führen. Solange allerdings der LULUCF-Sektor insgesamt seine Senkenleistung nicht vergrößert, handelt es sich bei BECCS bilanziell nur um eine Verschiebung des Kohlenstoffs. BECCS leistet nur dann einen zusätzlichen Klimaschutzbeitrag, wenn im gleichen Umfang Kohlenstoff in mehrjährige Biomasse wieder eingespeichert wird.

Nachrichtliches Ausweisen der technischen Senken, um Doppelbilanzierungen und Missverständnisse zu vermeiden.

Wie Aktivitäten, die unter § 3b gefasst werden sollen, in die nationalen Treibhausgas-Inventare integriert werden können, ist noch in Diskussion und steht unterschiedlichen Herausforderungen und Grenzen je Entnahmemethode gegenüber. Vor diesem Hintergrund und vor dem Ziel, keine doppelte Emissionsberichterstattung in Deutschland zu etablieren, sollte § 3b KSG in der bestehenden Berichterstattung nachrichtlich angelegt werden, bis ein international einheitliches Vorgehen gewählt wurde. Dies ermöglicht es, die Minderungsfortschritte aller Sektoren nach wie vor transparent darzustellen und keine Ambitionsabschwächungen durch installierte Abscheideanlagen zu riskieren. Dabei könnten vorerst die biogenen und perspektivisch atmosphärischen berichteten und nicht bilanzierten CO_2-Emissionen aus der Abscheidung separiert als memo item ausgewiesen werden.

6 Literatur

BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2024): Der Wald in Deutschland - ausgewählte Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft [Hrsg.]. Download unter: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/vierte-bundeswaldinventur.html

Harthan, R., Repenning, J., Bei der Wieden, M., Bürger, V., Braungardt, S., Cook, V., Emele, L., Hennenberg, K., Kasten, P., Ludig, S., Mendelevitch, R., Moosmann, L., Pfeiffer, M., Scheffler, M., Steinbach, I., Wiegmann, K., Bussmann, S., Fleiter, T., Lotz, T. M., Mandel, T., Rehfeldt, M., Yu, S.: Ambitionierte Pfade für Treibhausgasneutralität in Deutschland: CARESupreme und CARETech, Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (CARE)“ (FKZ 3720 41 506 0), Umweltbundesamt (Hrsg.). Unveröffentlicht.

Hennenberg, K., Böttcher, H., Pfeiffer, M., Reise, J. (2024a): Entwicklungen der CO2-Speicherleistung des Waldes frühzeitiger abschätzen – Einordung der Ergebnisse der Bundeswaldinventur. https://www.oeko.de/blog/entwicklungen-der-co2-speicherleistung-des-waldes-fruehzeitiger-abschaetzen-einordung-der-ergebnisse-der-bundeswaldinventur/ (23.04.2025)

Hennenberg, K., Pfeiffer, M., Böttcher, H., Reise, J., (2024b): Kurzstudie zur Modellierung der THG-Bilanz der lebenden Bäume im Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) des Projektionsberichts. Treibhausgas-Projektionen für Deutschland. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://doi.org/10.60810/openumwelt-7430

Purr, K., Günther, J., Lehmann, H., Nuss, P. (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE: Langfassung, Climate Change. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://doi.org/10.60810/openumwelt-2677

Purr, K. & Spindler, J. (2023): Carbon Capture and Storage (CCS) - Diskussionsbeitrag zur Integration in die nationalen Klimaschutzstrategien, Position. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://doi.org/10.60810/openumwelt-3631

Purr, K., Schultz, K., Voß-Stemping, J., (2022): Technische Negativemissionen: Ist die klimapolitische Zielarchitektur der Bundesregierung fit for purpose?, Fact Sheet / Umweltbundesamt. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://doi.org/10.60810/openumwelt-3195

Wehnemann, K., Koßmann, M., Purr, K., Pagel, M., Steinbrenner, J., Voß-Stemping, J. (2025): Treibhausgas-Projektionen 2025 – Ergebnisse kompakt, Treibhausgas-Projektionen für Deutschland. Umweltbundesamt. https://doi.org/10.60810/openumwelt-7821

Impressum

Herausgeber

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

DOI: https://doi.org/10.60810/openumwelt-7880

Stand: April/2025

Autorenschaft, Institution

Katja Purr, Judith Voß-Stemping und Karlotta Schultz
Umweltbundesamt

Redaktion und Grafiken

Kirsten op de Hipt, Susanne Kambor und Katja Purr
Umweltbundesamt

Mit Unterstützung von

Klaus Hennenberg, Öko Institut e.V.