

TEXTE

48/2026

Abschlussbericht

Treibhausgaseinsparpotenziale einer reduzierten Flächenneuinanspruchnahme in Deutschland

Ergebnisband

von:

Tobias Wagner, Dr. Klaus Hennenberg
Öko-Institut e.V., Darmstadt

Dr. Jens-Martin Gutsche
Gertz Gutsche Rümenapp Stadtentwicklung und Mobilität GbR, Hamburg

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 48/2026

REFOPLAN des Bundesministeriums Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3721 15 103 0

FB001993

Abschlussbericht

Treibhausgaseinsparpotenziale einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme in Deutschland

Ergebnisband

von

Tobias Wagner, Dr. Klaus Hennenberg
Öko-Institut e.V., Darmstadt

Dr. Jens-Martin Gutsche
Gertz Gutsche Rümenapp Stadtentwicklung und Mobilität
GbR, Hamburg

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.
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt

Gertz Gutsche Rümenapp Stadtentwicklung und Mobilität GbR
Ruhrstraße 11
22761 Hamburg

Abschlussdatum:

September 2025

Redaktion:

Fachgebiet I 2.5 Nachhaltige Raumentwicklung, Umweltprüfungen
Detlef Grimski

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8236>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, April 2026

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

Vorbemerkung

Zwei neuere Publikationen aus dem Jahr 2025 enthalten projektrelevante Datenaktualisierungen, die zum Zeitpunkt der inhaltlichen Projektbearbeitung (Frühjahr 2022 – Sommer 2024) noch nicht vorlagen:

1. Nationales Inventardokument zum deutschen Treibhausgasinventar aus dem Jahr 2025

Zentrale Parameter und Ansätze dieses Projekts basieren auf dem jährlich vom Umweltbundesamt herausgegebenen Nationalen Inventardokument / Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar. Grundlage für die Forschungsarbeiten war der zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung aktuelle Inventarbericht aus dem Jahr 2023 zum Treibhausgasinventar 1990 – 2021. Das aktuelle Nationale Inventardokument aus dem Jahr 2025 zum Treibhausgasinventar 1990 – 2023 berücksichtigt zusätzlich Daten aus der im Herbst 2024 veröffentlichten Bundeswaldinventur. Weiterhin ist eine Methodenänderung zur Modellierung des Kohlenstoffvorrats in mineralischen Böden in die Berechnung eingeflossen. Anders als in dem Nationalen Inventarbericht aus dem Jahr 2023, werden jetzt sowohl Wälder als auch Acker- und Grünlandflächen auf mineralischen Böden als kontinuierliche Kohlenstoffquellen modelliert. Wie sich diese veränderten Ansätze auf die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojektes auswirken, konnte nicht mehr betrachtet werden. Die weiteren Entwicklungen in der nationalen LULUCF-Modellierung gilt es daher genau zu beobachten.

2. Revision der Indikatorwerte 2020 bis 2022 für den Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche durch das Statistische Bundesamt

Dieser Forschungsbericht bezieht sich an mehreren Stellen auf die vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten Indikatorwerte für den Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche. Die Angaben zur Siedlungs- und Verkehrsfläche entstammen der amtlichen Flächenstatistik, die jährlich veröffentlicht wird. Für die Jahre 2020 bis 2022 hat das Statistische Bundesamt mit Pressemitteilung vom 5. August 2025 die Indikatorwerte außerplanmäßig revidiert. Das Statistische Bundesamt führt hierzu aus:

„Durch die Nacherfassung von Waldwegen durch die Vermessungsbehörden kam es zu großflächigen Umklassifizierungen von Vegetationsflächen zu Wegen (Bestandteil der Siedlungs- und Verkehrsfläche), die erst 2023 berechnet werden konnten. Im Gegensatz zu neu erschlossenen bzw. angelegten Siedlungs- und Verkehrsflächen gehen Nacherfassungen bereits existierender Flächen nicht als Erhöhung der Siedlungs- und Verkehrsfläche in die Indikatorberechnung ein. Aus diesem Grund wurden die Indikatorwerte neu berechnet: Für den Indikator „Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche“ wurde der gleitende Vierjahresdurchschnitt im Jahr 2020 (2017 bis 2020) um 1 Hektar pro Tag nach unten revidiert (bisher veröffentlichter Wert: +54 Hektar pro Tag, revidierter Wert: +53 Hektar pro Tag). Für das Jahr 2021 (2018 bis 2021) sinkt der revidierte Indikatorwert um 2 Hektar pro Tag (bisher veröffentlichter Wert: +55 Hektar pro Tag, revidierter Wert: +53 Hektar pro Tag). Die größte Revisionsdifferenz zeigt sich für das Jahr 2022 (2019 bis 2022) mit 3 Hektar pro Tag (bisher veröffentlichter Wert: +52 Hektar pro Tag, revidierter Wert: +49 Hektar pro Tag).“

Alle Berechnungen des vorliegenden Projekts basieren auf den nicht revidierten Werten und sind im Forschungsbericht so dokumentiert. Auf die Größenordnung der Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen hat die Revision jedoch keine Auswirkungen.

Kurzbeschreibung: Treibhausgaseinsparpotenziale einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme in Deutschland: Ergebnisband.

Diese Studie untersucht die Treibhausgaswirkung von Flächenneuanspruchnahme und die Einsparpotenziale, die sich durch eine reduzierte Flächenneuanspruchnahme potenziell erschließen lassen. Im Fokus stehen LULUCF-bedingte Treibhausgaswirkungen, also Wirkungen die im Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft verursacht werden. Treibhausgaswirkungen, die aus der Errichtung von technischer Infrastruktur und der Errichtung von Gebäuden resultieren, wurden quantitativ abgeschätzt.

Im Ergebnis des Projektes wurde ermittelt, dass eine durchschnittliche Außenentwicklungsmaßnahme in Deutschland pro Hektar knapp 40 t CO₂-Äq an LULUCF-bedingten Emissionen verursacht. Die Wirkung entsteht zum Großteil während der Baumaßnahme aufgrund des Verlusts von Kohlenstoffvorräten im Boden durch das Abschieben und Auskoffern und aufgrund des Verlusts von Kohlenstoffvorräten in der Vegetation, hauptsächlich von Waldflächen. Der Aufwuchs der neuen Siedlungsvegetation und die meist notwendigen naturschutzrechtlichen Ausgleichsmaßnahmen kompensieren im Lauf der Jahre nennenswerte Teile der entstandenen Emissionen. Insgesamt verursacht die Flächenneuanspruchnahme in Deutschland auf dem aktuellen Niveau von etwa 52 Hektar pro Tag gut 1 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr. Durch eine ambitionierte Reduktion der Flächenneuanspruchnahme und eine Kompensation durch verstärkte Innenentwicklung lassen sich in Summe bis 2050 etwa 20 Mio. t. CO₂-Äq. einsparen.

In dem Projekt wurde zudem der Excel-basierte LULUCF Wirkungsrechner entwickelt, mit dem Gemeinden ihre fallspezifischen Planungsvorhaben abbilden, die LULUCF-bedingte Treibhausgaswirkung ermitteln und mit den Einsparpotenzialen alternativer Flächenentwicklungsoptionen vergleichen können.

Abstract: Potential greenhouse gas savings from a reduced land take in Germany: Results volume.

This study analyses the greenhouse gas impact of land take and the potential savings that can potentially be achieved by reducing land take. The focus is on LULUCF-related greenhouse gas impacts, i.e. impacts caused by land use, land use change and forestry. Greenhouse gas impacts resulting from the construction of technical infrastructure and buildings were quantitatively estimated.

As a result of the project, it was determined that an average external development measure in Germany causes almost 40 tonnes of CO₂-eq of LULUCF-related emissions per hectare. The impact arises largely during the construction phase due to the loss of carbon stocks in the soil as a result of excavation and trenching and due to the loss of carbon stocks in the vegetation, mainly forest areas. Over the years, the growth of new urban vegetation and the usually necessary compensatory measures under nature conservation law compensate for a significant proportion of the emissions. Overall, at the current level of around 52 hectares per day, land take in Germany causes a good 1 million tonnes of CO₂ eq. per year. An ambitious reduction in land take and compensation through increased internal development could save a total of around 20 million tonnes of CO₂ eq. by 2050.

The project also developed the Excel-based LULUCF impact calculator, which municipalities can use to map their case-specific planning projects, determine the LULUCF-related greenhouse gas impact and compare it with the savings potential of alternative development options.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis.....	10
Abkürzungsverzeichnis.....	12
Zusammenfassung.....	13
Summary	18
1 Einleitung.....	22
1.1 Hintergrund und Ziel.....	22
1.2 Entwickelte Produkte.....	22
1.3 Aufbau dieses Berichts.....	23
2 Methodisches Vorgehen, Grundlagen und Begriffe.....	24
2.1 Treibhausgaswirkungen der Flächenneuanspruchnahme.....	24
2.2 Betrachtete Nutzungsarten.....	24
2.3 Überblick über das methodische Vorgehen bzgl. LULUCF.....	26
2.4 Begriffsbestimmungen.....	28
2.5 Differenzierung zwischen Flächenneuanspruchnahmen für Siedlungen und für außerörtliche Verkehrsflächen	30
3 Flächenkulisse.....	32
3.1 Entstehung von Siedlungsfläche im Außenbereich.....	32
3.1.1 Flächennutzung vor der Flächenneuanspruchnahme	32
3.1.2 Flächennutzung nach der Flächenneuanspruchnahme.....	33
3.1.3 Nutzungsänderungen durch die Flächenneuanspruchnahme.....	34
3.1.4 Neu gepflanzte Bäume.....	35
3.2 Nutzungsänderungen im Innenbereich: Innenentwicklung.....	36
3.2.1 Bedarf an Innenentwicklung pro Hektar vermiedener Außenentwicklung.....	36
3.2.2 Möglichkeiten der Innenentwicklung	37
3.2.3 Gemeindespezifische Nutzungsänderung im Zuge der Innenentwicklung.....	38
3.2.4 Verlust an Bestandsbäumen im Zuge der Innenentwicklung	39
3.3 Außerörtliche Verkehrsflächen	40
3.3.1 Flächennutzung vor der Flächenneuanspruchnahme	40
3.3.2 Flächennutzung nach der Flächenneuanspruchnahme.....	40
3.3.3 Nutzungsänderungen durch die Flächenneuanspruchnahme.....	41
3.3.4 Neupflanzung von Bäumen im Zuge der Realisierung außerörtlicher Verkehrsflächen	41

4	Treibhausgaseinsparpotenziale einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme: LULUCF.....	42
4.1	Treibhausgaswirkungen pro Hektar umgenutzter Fläche.....	42
4.1.1	Überblick.....	42
4.1.2	Beispielhafte Außenentwicklungsmaßnahmen auf mineralischem Boden.....	43
4.1.3	Nutzungsänderungen aufgrund von Innenentwicklung.....	45
4.1.4	Nutzungsänderungen auf organischen Böden.....	47
4.1.5	Zusammenfassung.....	49
4.2	Treibhausgaswirkungen der Flächenneuanspruchnahme Deutschlands.....	51
4.2.1	Gesamt-Treibhausgaswirkung.....	51
4.2.2	Differenzierung zwischen den sechs Einzeleffekten.....	52
4.2.3	Differenzierung zwischen Siedlungsbereich und außerörtlichem Verkehr.....	52
4.2.4	Differenzierung zwischen den Vorher-Nutzungen.....	53
4.2.5	Differenzierung zwischen den Gemeinden und Bundesländern.....	54
4.3	Einsparpotenziale und Szenarien.....	56
4.3.1	Innenentwicklung.....	56
4.3.2	Schutz von Wäldern.....	60
4.4	Diskussion.....	61
4.4.1	Nutzungsänderungen auf organischen Böden.....	61
4.4.2	Verdrängung landwirtschaftlicher Nutzungen.....	62
4.4.3	Anstieg des Bodenkohlenstoffvorrats aufgrund von Flächenneuanspruchnahme.....	64
4.4.4	Flächenneuanspruchnahme für den Ausbau der Erneuerbaren Energien.....	65
4.4.5	Vergleich mit den Ergebnissen des Nationalen Treibhausgasinventars.....	66
4.5	Zusammenfassung und Ausblick.....	68
5	Treibhausgaseinsparpotenziale einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme: Infrastruktur und Gebäude.....	70
5.1	Errichtung von Infrastruktur.....	70
5.1.1	Treibhausgasemissionen pro Hektar Außen- bzw. Innenentwicklung.....	70
5.1.2	Treibhausgasemissionen in Deutschland.....	73
5.2	Errichtung von Gebäuden.....	75
5.2.1	Treibhausgasemissionen pro Quadratmeter Gebäudegeschossfläche.....	76
5.2.2	Treibhausgasemissionen in Deutschland.....	76
5.3	Gesamtschau.....	79
6	Quellenverzeichnis.....	81

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zugrundeliegendes Flächenschema	26
Abbildung 2:	Überblick über das im Projekt entwickelte LULUCF-Modell	28
Abbildung 3:	Bisherige Flächenneuanspruchnahme (2013-2018) differenziert nach Siedlungsbereich und außerörtlichen Verkehrsflächen	31
Abbildung 4:	Flächenanteile vor der Entstehung von Siedlungsfläche im Außenbereich (Bundesdurchschnitt)	33
Abbildung 5:	Flächenanteile nach der Entstehung von Siedlungsfläche im Außenbereich (Bundesdurchschnitt)	34
Abbildung 6:	Unterscheidung von acht möglichen Formen der Innenentwicklung	38
Abbildung 7:	Flächenanteile der Vornutzungen pro Hektar Flächenneuanspruchnahme für außerörtliche Verkehrsflächen im bundesweiten Mittel	40
Abbildung 8:	Flächenanteile nach der Flächenneuanspruchnahme für außerörtliche Verkehrsflächen pro durchschnittlichem Hektar im bundesweiten Mittel	41
Abbildung 9:	LULUCF-bedingte Treibhausgaswirkungen einer durchschnittlichen Außenentwicklungsmaßnahme in Deutschland.....	43
Abbildung 10:	Treibhausgaswirkung der Nutzungsänderung von 1 Hektar Ackerland in 1 Hektar versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche auf mineralischem Boden im Jahr 2025	44
Abbildung 11:	Treibhausgaswirkung der Nutzungsänderung von 1 Hektar Laubwald in 1 Hektar Siedlungs- und Verkehrsfläche mit niedriger Vegetation und 32 gepflanzten Jungbäumen auf mineralischem Boden im Jahr 2025.....	45
Abbildung 12:	Treibhausgaswirkung der Nutzungsänderung von 1 Hektar Siedlungs- und Verkehrsfläche mit niedriger Vegetation in 1 Hektar versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche auf mineralischem Boden im Jahr 2025	46
Abbildung 13:	Treibhausgaswirkung der „Nutzungsänderung“ von 1 Hektar Siedlungs- und Verkehrsfläche mit niedriger Vegetation in 1 Hektar Siedlungs- und Verkehrsfläche niedriger Vegetation auf mineralischem Boden im Jahr 2025	47
Abbildung 14:	Treibhausgaswirkung der Nutzungsänderung von 1 Hektar Grünland in 1 Hektar versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche auf organischem Boden im Jahr 2025.	48
Abbildung 15:	Treibhausgaswirkung der Flächenneuanspruchnahme in Deutschland (LULUCF) bei 55 ha pro Tag	51
Abbildung 16:	Differenzierung der Treibhausgaswirkung der Flächenneuanspruchnahme in Deutschland nach den sechs Einzeleffekten	52
Abbildung 17:	Differenzierung der Treibhausgaswirkung der Flächenneuanspruchnahme in Deutschland nach den Bereichen Siedlung und außerörtlicher Verkehr	53
Abbildung 18:	Gegenüberstellung der Anteile unterschiedlicher Vorher-Nutzungen an der umgenutzten Fläche und den verursachten Treibhausgasemissionen	54
Abbildung 19:	Differenzierung der Treibhausgaswirkung nach den Gemeinden in Deutschland..	55
Abbildung 20:	Treibhausgaswirkung eines durchschnittlichen Hektars Flächenneuanspruchnahme in Deutschland (mineralischer Boden, Wirkungszeitraum: 25 Jahre).....	56
Abbildung 21:	Szenarien der Flächenneuanspruchnahme in Deutschland in Hektar pro Tag	57

Abbildung 22:	Treibhausgasemissionen der drei betrachteten Szenarien.....	57
Abbildung 23:	Beiträge der Elemente „Siedlung: Außenentwicklung“, „Siedlung: zusätzliche Innenentwicklung“ und „Verkehr außerhalb“ zu den gesamten Treibhausgasemissionen im Szenario „Ambitioniertes Flächensparen“	59
Abbildung 24:	Vergleich der Treibhausgaswirkungen von einem durchschnittlichen Hektar Außenentwicklung und der zur Kompensation benötigten Innenentwicklung	60
Abbildung 25:	Treibhausgaswirkungen im Szenario „Konstanter Flächenverbrauch: Waldschutz“	61
Abbildung 26:	Sensitivitätsanalysen zur Treibhausgaswirkung unterschiedlicher Effekte.....	64
Abbildung 27:	Treibhausgaswirkung der Nutzungsänderung von 1 Hektar Ackerland in unversiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche mit niedriger Vegetation.....	66
Abbildung 28:	Treibhausgaswirkung von Nutzungsänderungen zu Siedlungs- und Verkehrsfläche gemäß Nationalem Treibhausgasinventar zwischen 2012 und 2021.....	67
Abbildung 29:	Treibhausgasemissionen aus der Errichtung von öffentlicher technischer Infrastruktur in zwei Beispielmunicipalitäten pro Hektar Außenentwicklung	70
Abbildung 30:	Treibhausgasemissionen aus der Errichtung von öffentlicher technischer Infrastruktur in zwei Beispielmunicipalitäten pro in der Außenentwicklung realisiertem Quadratmeter Geschossfläche	71
Abbildung 31:	Vergleich der Treibhausgasemissionen aus der Errichtung von öffentlicher technischer Infrastruktur zwischen Außenentwicklung und Innenentwicklung, Beispielmunicipalität Hamburg	73
Abbildung 32:	Treibhausgasemissionen durch Errichtung von öffentlicher technischer Infrastruktur in Deutschland	74
Abbildung 33:	Variante: Treibhausgasemissionen durch Errichtung von Infrastruktur in Deutschland mit Dekarbonisierung der Baumaterialien	75
Abbildung 34:	Treibhausgasemissionen aus der Errichtung von Gebäuden von Ein- bzw. Mehrfamilienhäusern.....	76
Abbildung 35:	Treibhausgasemissionen durch Errichtung von Gebäuden in Deutschland.....	77
Abbildung 36:	Variante: Treibhausgasemissionen durch Errichtung von Gebäuden in Deutschland mit Dekarbonisierung	78
Abbildung 37:	Treibhausgaswirkungen und Einsparpotenziale aller betrachteten Aspekte.....	79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Aspekte der Treibhausgaswirkung von Flächenneuanspruchnahme.....	24
Tabelle 2:	Der LULUCF-Modellierung zugrundeliegende Nutzungsarten	25
Tabelle 3:	Flächenanteile vor der Entstehung von Siedlungsflächen im Außenbereich für exemplarische räumliche Bezüge	32
Tabelle 4:	Flächenanteile nach der Entstehung von Siedlungsflächen im Außenbereich für exemplarische räumliche Bezüge	33
Tabelle 5:	Nutzungsänderungsmatrix für die Entstehung von Siedlungsfläche im Außenbereich (Bundesdurchschnitt).....	35

Tabelle 6:	Durchschnittliche Anzahl an neu gepflanzten Jungbäumen pro Hektar neu entstandener Siedlungsfläche im Außenbereich	36
Tabelle 7:	Nutzungsänderungsmatrix der Innenentwicklung pro Hektar vermiedene Außenentwicklung in der Beispielgemeinde Ebstorf	39
Tabelle 8:	Treibhausgaswirkungen sämtlicher Vorher-Nachher-Konstellationen auf mineralischem Boden in Tonnen CO ₂ -Äq. pro Hektar und 25 Jahren Wirkungszeitraum bei Nutzungsänderung im Jahr 2025	49

Abkürzungsverzeichnis

Siehe auch Kapitel 2.4, in dem zentrale Begriffe aufgeführt und erläutert sind.

Abkürzung	Erläuterung
Äq.	Äquivalente
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BKG	Bundesamt für Kartografie und Geodäsie
CO₂-Äq.	Neben CO ₂ sind teilweise auch andere Treibhausgase wie Methan oder Lachgas für die Berechnung der LULUCF-Treibhausgaswirkungen der Flächenneuanspruchnahme relevant. Nicht-CO ₂ -Emissionen werden mithilfe der IPCC-Umrechnungsfaktoren aus dem AR 5 in die Einheit „CO ₂ -Äquivalente“ („CO ₂ -Äq.“) umgerechnet.
GGR	Gertz Gutsche Rümenapp Stadtentwicklung und Mobilität GbR, Hamburg
ha	Hektar
iLUC	Indirect land use changes, indirekte Landnutzungsänderungen
IÖR	Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V.
LULUCF	Land use, land use change and forestry
Methodikband	Als Methodikband wird der ergänzende Bericht (Wagner et al. 2025) bezeichnet, der im Detail die methodischen Grundlagen der im vorliegenden Ergebnisband dargelegten Ergebnisse beinhaltet.
Mio.	Millionen
PV-FFA	Photovoltaik-Freiflächenanlagen
SuV	Siedlung und Verkehr bzw. Siedlungs- und Verkehrsfläche
t	Tonnen
THG	Treibhausgas
UBA	Umweltbundesamt, Dessau

Zusammenfassung

Die Flächenneuanspruchnahme (Flächenverbrauch) ist in Deutschland mit ungefähr 55 Hektar pro Tag nach wie vor auf einem hohen Niveau. Dass der Flächenverbrauch zahlreiche ökologische, ökonomische und soziale Nachteile aufweist, ist allgemein unstrittig. Entsprechend haben sowohl die Bundesländer als auch der Bund Ziele formuliert, die Flächenneuanspruchnahme in den kommenden Jahren zu reduzieren. Auf Bundesebene wird angestrebt, den Flächenverbrauch bis zum Jahr 2030 auf unter 30 Hektar pro Tag und bis zum Jahr 2050 durch den Übergang zu einer Flächenkreislaufwirtschaft auf Netto-Null zu reduzieren.

Bislang finden Berechnungen zu den Treibhausgasauswirkungen von Bauvorhaben, insbesondere auf den Kohlenstoffvorrat in Vegetation und Boden, nur selten Eingang in den Planungsprozess. Das liegt auch daran, dass noch keine einfachen Instrumente zur Verfügung standen.

Das wesentliche Ziel des vorliegenden Projekts mit dem Langtitel „Reproduzierbare und methodisch verständliche Aufbereitung der durch die Reduzierung der Flächenneuanspruchnahme erzielbaren qualitativen/quantitativen THG-Minderungspotenziale als Planungshilfe für regionalen und kommunalen Freiflächen- und Klimaschutz“ besteht darin, dieses Defizit aufzulösen und eine verständliche und belastbare Methode zu entwickeln, mit der die durch Flächensparen erzielbaren Potenziale zur Treibhausgasminderung ermittelt und anschaulich dargestellt werden können.

Der vorliegende Bericht stellt den wissenschaftlichen Ergebnisband dar. Die Ergebnisse hinsichtlich der Flächen- und Treibhausgasauswirkungen von Außen- und Innenentwicklungsmaßnahmen werden detailliert dargestellt. Der Ergebnisband wird durch einen Methodikband komplementiert. Darüber hinaus stellt das Projekt eine Handlungshilfe für Kommunen in Form einer Broschüre sowie den Excel-basierten LULUCF Wirkungsrechner zur Verfügung, mit dem Gemeinden ihre fallspezifischen Planungsvorhaben abbilden, die LULUCF-bedingte Treibhausgaswirkung in Erfahrung bringen und die Einsparpotenziale alternativer Varianten einsehen können.

Die Systemgrenze umfasst grundsätzlich die Aspekte Landnutzungsänderungen, Errichtung von technischer Infrastruktur, Errichtung von Gebäuden, Nutzung von Infrastruktur und Nutzung von Gebäuden. Ein starker Bearbeitungsschwerpunkt liegt auf dem Bereich der Landnutzungsänderungen (LULUCF, land use, land use change and forestry). Diese Akzentuierung erfolgt aus unterschiedlichen Gründen, darunter weil zu Projektbeginn für diesen Aspekt ein besonders großer Bedarf an Informationen und Instrumenten zur Quantifizierung der Treibhausgaswirkungen der Flächenneuanspruchnahme bestand. Die Errichtung von technischer Infrastruktur und von Gebäuden werden gegenüber dem LULUCF-Aspekt nachrangig untersucht. Die Treibhausgaswirkung aus der Nutzung von Infrastruktur und Gebäuden wird in Form eines Exkurses abgeschätzt.

Als grundsätzliche methodische Randbedingung wird festgelegt, dass eine Reduktion der Flächenneuanspruchnahme stets durch eine verstärkte Innenentwicklung kompensiert wird. Der in der Außenentwicklung nicht realisierte Wohn- und Gewerberaum wird stattdessen vollständig in der Innenentwicklung realisiert.

Eine zentrale Grundlage zur Abschätzung der Treibhausgaswirkung der Flächenneuanspruchnahme ist eine detaillierte Abschätzung der Nutzungsänderungen. Diese wird beschrieben über die Zusammensetzung eines durchschnittlichen Hektars Flächenneuanspruchnahme hinsichtlich der Anteile unterschiedlicher Nutzungsarten der Vorher-Nutzung (Acker, Grünland, Wald, ...) und der Nachher-Nutzung (Gebäude, sonstige Versiegelung, Rasen, Gebüsch, ...).

Zusätzlich wird die durchschnittliche Anzahl an Baumneupflanzungen pro Hektar Flächenneuanspruchnahme abgeschätzt. Differenziert wird zudem zwischen mineralischen und organischen Böden. Die Abschätzung der Nutzungsänderungen eines durchschnittlichen Hektars Flächenneuanspruchnahme erfolgt differenziert für alle Gemeinden in Deutschland (Gebietsstand: 31.12.2021). Auf diese Weise kann berücksichtigt werden, dass sich die Gemeinden sowohl hinsichtlich der Anteile der Vornutzungen als auch hinsichtlich der mit der Flächenneuanspruchnahme realisierten städtebaulichen Dichte unterscheiden. Zudem zeigt die reale Flächenneuanspruchnahme eine unterschiedliche Bedeutung der verschiedenen Nutzungen (Wohnen, Gewerbe, Mischflächen, ...) in Gemeinden unterschiedlichen Typs. Die differenzierte Schätzung der Nutzungsänderungen nach Gemeinde erlaubt zudem deren Gewichtung bei der Ableitung von Aussagen für höhere Gebietseinheiten (Kreise, Länder, Deutschland insgesamt). Als Gewichtungsfaktoren werden je nach Fragestellung die jährliche Flächenneuanspruchnahme in der Vergangenheit sowie die Annahmen der untersuchten Zukunftsszenarien verwendet.

Ein wichtiges Element der Zukunftsszenarien ist der Ersatz eines bestimmten Anteils der Außenentwicklung durch eine verstärkte Innenentwicklung. Da auch Maßnahmen der Innenentwicklung eine Treibhausgaswirkung haben, werden auch für deren Abschätzung Flächennutzungsänderungen benötigt. Zu deren Herleitung wird zwischen unterschiedlichen Formen der Innenentwicklung unterschieden, die auf Basis vorliegender Studien für unterschiedliche Gemeindetypen unterschiedlich gewichtet werden.

Neben der Entstehung neuer Wohn- und Gewerbeflächen ist auch der Neu- und Ausbau außerörtlicher Verkehrswege Teil der Flächenneuanspruchnahme. Da sich außerörtliche Verkehrswege nicht durch eine verstärkte Innenentwicklung ersetzen lassen und sich ihre Reduktion nur durch eine Reduzierung des Ausbausvolumens erreichen lässt, werden außerörtliche Verkehrsflächen gesondert betrachtet.

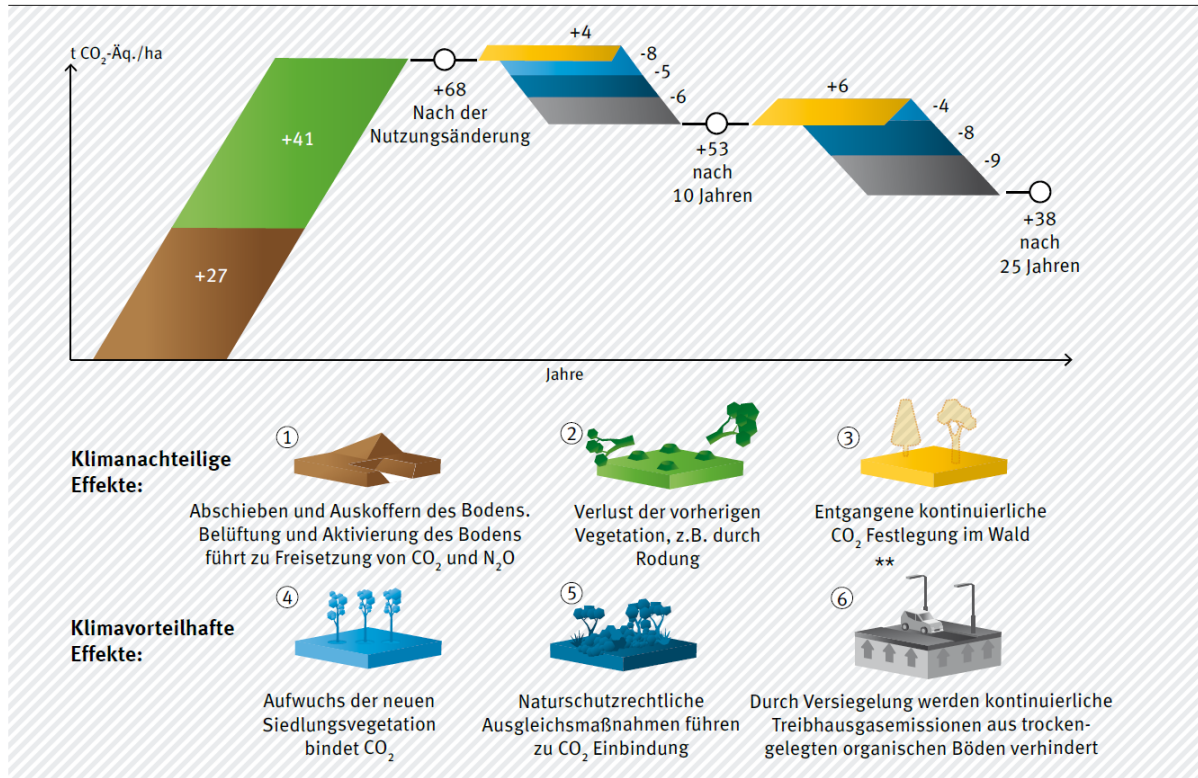
Die Gemeinde- bzw. Gemeindetyp-spezifischen Nutzungsänderungen führen zu Veränderungen im Kohlenstoffvorrat in Boden und Vegetation und verursachen dadurch entsprechende Treibhausgaswirkungen. Die im Projekt entwickelte Methodik ist geeignet, um sämtliche Vorher-Nachher-Konstellationen abzubilden. Auch Innenentwicklungsmaßnahmen lassen sich abbilden.

LULUCF-bedingt verursacht eine durchschnittliche Außenentwicklungsmaßnahme in Deutschland knapp 40 t CO₂-Äq. pro Hektar. Die Wirkung entsteht zum Großteil während der Baumaßnahme aufgrund des Verlusts von Kohlenstoffvorräten im Boden durch das Abschieben und Auskoffern und aufgrund des Verlusts von Kohlenstoffvorräten in der Vegetation, hauptsächlich von Waldflächen. Ein weiterer klimanachteiliger Effekt besteht darin, dass auf den umgenutzten Waldflächen in den Folgejahren keine kontinuierliche Netto-Einbindung von Kohlenstoff mehr erfolgen kann.

Der Aufwuchs der neuen Siedlungsvegetation und die meist notwendigen naturschutzrechtlichen Ausgleichsmaßnahmen kompensieren im Lauf der Jahre nennenswerte Teile der entstandenen Emissionen. Auch in dem Sonderfall, dass Siedlungsprojekte auf trockengelegten organischen Böden realisiert werden, werden Treibhausgase eingespart, da die Versiegelung die kontinuierlichen Treibhausgasemissionen unterbindet. Dies gilt aber nur für wenige Standorte in Deutschland. Aufgrund von Unsicherheiten und den Einschränkungen hinsichtlich der Wiedervernässung ist eine Bebauung bzw. Versiegelung trockengelegter organischer Böden keine empfehlenswerte Maßnahme zur Verbesserung der Klimabilanz – weder von Einzelvorhaben noch bundesweit.

Abbildung 1: LULUCF-bedingte Treibhausgaswirkungen einer durchschnittlichen Außenentwicklungsmaßnahme in Deutschland

Treibhausgaswirkungen des Flächenverbrauchs (LULUCF)
Wirkung einer durchschnittlichen Außenentwicklungsmaßnahme
 in Tonnen CO₂-Äquivalente* pro Hektar



* Da neben CO₂ teilweise auch andere Treibhausgase wie Methan oder Lachgas eine Rolle spielen, werden die Treibhausgaswirkungen mithilfe der aktuellen IPCC-Umrechnungsfaktoren in der Einheit „CO₂-Äquivalente“ („CO₂-Äq.“) angegeben.
 ** Effekt 6 umfasst mitunter auch veränderte Emissionsfaktoren durch Nutzungsänderungen ohne Versiegelung.
 Weitere klimarelevante Effekte (nicht quantifiziert): Anstieg des Kohlenstoffvorrats im Boden nach Nutzungsänderung in Siedlungsfläche, u. a. durch Düngung und Bewässerung; Auf dem umgenutzten Standort verringerte landwirtschaftliche Aktivität (Düngemittel, Traktor, ...); Indirekte Landnutzungsänderungen/Verdrängungseffekte; Veränderte Oberflächenalbedo.

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut/GGR

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR; siehe Abbildung 11

Die Hochrechnung für Deutschland ergibt, dass die Flächenneuanspruchnahme auf dem aktuellen Niveau von etwa 55 Hektar pro Tag Treibhausgasemissionen in Höhe von etwa 1,0 bis 1,4 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr verursacht. Würde die Flächenneuanspruchnahme bis zum Jahr 2050 auf diesem Niveau verbleiben, ergäben sich in Summe über den Zeitraum von 2025 bis 2050 Treibhausgasemissionen in Höhe von etwa 30 Mio. t CO₂-Äq. Die Relevanz der LULUCF-bedingten Treibhausgaswirkungen der Flächenneuanspruchnahme wird insgesamt als überschaubar, aber nicht irrelevant eingeschätzt.

Durch eine ambitionierte Reduktion der Flächenneuanspruchnahme auf ein Niveau von 20 Hektar pro Tag bis zum Jahr 2030 und dann weiter bis 2050 linear abnehmend auf Netto Null bei gleichzeitiger Kompensation durch verstärkte Innenentwicklung lassen sich in Summe bis 2050 knapp 20 Mio. t CO₂-Äq. einsparen. Bei einer moderaten Reduktion der Flächenneuanspruchnahme auf 30 Hektar pro Tag bis zum Jahr 2030 und dann weiter bis 2050 linear abnehmend auf Netto Null ergibt sich ein Einsparpotenzial von knapp 17 Mio. t CO₂-Äq. Bezogen auf eine 1 Hektar große vermiedene Außenentwicklungsmaßnahme, die stattdessen in der Innenentwicklung realisiert wird, ergibt sich ein Treibhausgaseinsparpotenzial von über 80 %.

Die Nutzungsänderung von Waldflächen verursacht trotz eines überschaubaren Flächenanteils von 11 % beinahe 50 % der Treibhausgasemissionen. Auch auf Gemeindeebene zeigt sich, dass die klimanachteiligsten Außenentwicklungsmaßnahmen in solchen Gemeinden stattfinden, deren durchschnittlicher Hektar Vorher-Fläche gemäß Modellierung den größten Waldflächenanteil aufweist. Vor diesem Hintergrund bietet auch der konsequente Schutz von Waldflächen in der Hochrechnung für Deutschland ein erhebliches Einsparpotenzial von in Summe etwa 12 Mio. t CO₂-Äq. bis 2050, selbst wenn die Flächenneuanspruchnahme auf dem aktuellen Niveau von etwa 55 Hektar pro Tag verbleibt.

Der entwickelten Methodik liegen zahlreiche methodische Setzungen zugrunde, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Generell wird bei der Parameterauswahl ein konservativer Ansatz verfolgt, d. h. in unklaren Fällen ist standardmäßig der Parameter ausgewählt, der der Arbeitshypothese des Projekts (Flächenneuanspruchnahme erzeugt hohe Treibhausgaswirkungen) zuwiderläuft. Auch unter den standardmäßig nicht quantifizierten Aspekten – darunter Verdrängungseffekte landwirtschaftlicher Nutzungen, alternative Modellierungsansätze für Siedlungsentwicklung auf organischem Boden oder die Berücksichtigung von höheren Bodenkohlenstoffvorräten auf Siedlungsflächen als auf angrenzenden Freiraumflächen – überwiegen diejenigen, die tendenziell zu noch höheren Treibhausgaswirkungen der Flächenneuanspruchnahme führen würden. Dies unterstützt die Robustheit der getroffenen Aussagen hinsichtlich der Einsparpotenziale, die durch eine Reduktion der Flächenneuanspruchnahme erzielt werden könnten. Demgegenüber quantifiziert das Nationale Treibhausgasinventar für Flächenneuanspruchnahme im Durchschnitt eine klimavorteilhafte Wirkung (Nettosenke), insbesondere aufgrund einer abweichenden Modellierung des Aufwuchses der neuen Siedlungsvegetation.

Vor diesem Hintergrund sollten weitere Studien durchgeführt werden, um Unsicherheiten zu verringern. Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich der Entwicklung des Kohlenstoffvorrats in der Siedlungsvegetation nach einer Flächenneuanspruchnahme und der Auswirkung von Bauvorhaben auf den Kohlenstoffvorrat in mineralischen und organischen Böden.

Mit dem Albedo-Effekt und dem Einfluss des Klimawandels auf den Kohlenstoffvorrat in Böden wurden zwei Aspekte weder standardmäßig noch in Form von Sensitivitätsanalysen berücksichtigt, die potenziell nennenswerte Auswirkungen auf die Projektergebnisse haben könnten.

Hinsichtlich der Errichtung von technischer öffentlicher Infrastruktur und von Gebäuden, die im Projekt hinter dem LULUCF-Aspekt nachrangig untersucht wurden, sind folgende Erkenntnisse zentral: Die Errichtung von technischer öffentlicher Infrastruktur verursacht bei der Außenentwicklung Treibhausgasemissionen in Höhe von etwa 115 bis 150 t CO₂-Äq. pro Hektar. Die Emissionen sind damit etwa 3- bis 4-mal so hoch wie die LULUCF-bedingte Treibhausgaswirkung einer durchschnittlichen Außenentwicklungsmaßnahme in Deutschland. Der Großteil der Emissionen resultiert aus Fahrbahnen und Gehwegen, d. h. aus der Herstellung und der Aufbringung des Asphalts. Durch Innenentwicklung lässt sich eine Verringerung der Treibhausgasemissionen um etwa 60 % erschließen.

In der Hochrechnung für Deutschland verursacht die Flächenneuanspruchnahme bei einem Niveau von 55 Hektar pro Tag hinsichtlich der Neuerrichtung öffentlicher technischer Infrastruktur jährliche Emissionen von knapp 3 Mio. t CO₂-Äq. Im Szenario „Moderates Flächensparen“ sind ab dem Jahr 2028 jährliche Einsparungen von über 0,5 Mio. t CO₂-Äq. möglich. Insgesamt sind über den Zeitraum bis 2050 Treibhausgasminderungen von etwa 30 Mio. t CO₂-Äq. möglich. Wird berücksichtigt, dass sich die Vorkettenemissionen aus der

Bereitstellung der Baumaterialien deutlich verringern werden, ergibt sich ein Einsparpotenzial bis 2050 von etwa 15 Mio. t CO₂-Äq.

Hinsichtlich der Neuerrichtung von Gebäuden verursacht die Flächenneuanspruchnahme in Deutschland bei einem Niveau von 55 Hektar pro Tag jährliche Emissionen von etwa 20 Mio. t CO₂-Äq. Die Emissionen sind damit deutlich höher als in den Bereichen LULUCF (etwa 1 Mio. t CO₂-Äq.) und Errichtung technischer Infrastruktur (etwa 3 Mio. t CO₂-Äq.). Diese Ergebnisse verdeutlichen die Relevanz des Themas der „grauen Emissionen“. Die relativen Einsparpotenziale durch eine verringerte Flächenneuanspruchnahme und eine stärkere Innenentwicklung fallen im Vergleich zu LULUCF und der Errichtung von technischer Infrastruktur gering aus. Das absolute Einsparpotenzial über den Zeitraum bis 2050 beläuft sich auf etwa 7 Mio. t CO₂-Äq, bei einer grob modellierten Dekarbonisierung der Vorketten auf etwa 4 Mio. t CO₂-Äq. Hauptgrund ist, dass hier lediglich das Einsparpotenzial einer Verschiebung der Bauvorhaben in die Innenentwicklung und teilweise eine kompaktere Bauweise abgebildet ist. Die Einsparpotenziale sind diesbezüglich begrenzt. Größere Einsparpotenziale lassen sich hinsichtlich der Materialwahl, dem Baustil, usw. erschließen. Dies ist aber weitestgehend unabhängig von einer Außen- oder Innenentwicklung. Auch zeigt sich hier die Limitierung der Einsparpotenziale, sofern keine Suffizienzmaßnahmen betrachtet werden (z.B. Verringerung der Wohnfläche pro Person).

Die Gesamtschau aller untersuchten Aspekte zeigt, dass etwa 70 % der Emissionen, die zwischen 2025 und 2050 durch die Flächenneuanspruchnahme in Deutschland verursacht werden, durch die Errichtung der Gebäude entstehen. Auch die anderen quantifizierten Aspekte haben sichtbare Anteile an den Gesamtemissionen der Flächenneuanspruchnahme, der LULUCF-Aspekt darunter die geringsten. Durch ein moderates Flächensparen lassen sich in Summe bis 2050 Einsparpotenziale von etwa 50 Mio. t CO₂-Äq. erschließen. Hinsichtlich der Einsparpotenziale dominieren die Aspekte LULUCF und Errichtung technischer Infrastruktur, was auf die hohen relativen Einsparpotenziale der Innenentwicklung im Vergleich zur Außenentwicklung zurückzuführen ist.

Summary

At around 55 hectares per day, land take in Germany remains at a high level. The fact that land take has numerous environmental, economic and social disadvantages is generally undisputed. Accordingly, both the federal states and the national government have formulated targets to reduce land take in the coming years. At national level, the aim is to reduce land consumption to less than 30 hectares per day by 2030 and to net zero by 2050 through the transition to a circular land economy.

To date, calculations on the greenhouse gas impact of construction projects, particularly on carbon stocks in vegetation and soil, have rarely been included in the planning process. This is also due to the fact that no simple instruments were available.

The main objective of the present project with the long title 'Reproducible and methodologically comprehensive preparation of the qualitative/quantitative GHG reduction potentials achievable through the reduction of land take as a planning aid for regional and municipal open space and climate protection' is to resolve this deficit and to develop a comprehensive and robust method with which the greenhouse gas reduction potentials achievable through land saving can be determined and clearly presented.

This report represents the results volume. The results with regard to the land and greenhouse gas impacts of external and internal development measures are presented in detail. The results volume is complemented by a methodology volume. In addition, the project provides a guidance for municipalities in the form of a brochure as well as the Excel-based LULUCF impact calculator, which municipalities can use to map their case-specific planning projects, find out the LULUCF-related greenhouse gas impact and view the savings potential of alternative variants.

The system boundary basically covers the aspects of land use changes, construction of technical infrastructure, construction of buildings, utilisation of infrastructure and utilisation of buildings. There is a strong focus on the area of land use change (LULUCF, land use, land use change and forestry). There are various reasons for this focus, including the fact that there was a particularly high need for information and instruments to quantify the greenhouse gas impacts of land use change at the start of the project. The construction of technical infrastructure and buildings is analysed to a lesser extent than the LULUCF aspect. The greenhouse gas impact from the use of infrastructure and buildings is estimated in the form of an excursus.

As a general methodological boundary condition, it is defined that a reduction in land take is always compensated for by increased internal development. The residential and commercial space not realised in external development is instead fully realised in internal development.

A key basis for estimating the greenhouse gas impact of land take is a detailed estimate of land use changes. This is described via the composition of an average hectare of land take in terms of the proportions of different types of use before (arable land, grassland, forest, ...) and after (buildings, other sealed surfaces, lawns, shrubbery, ...). In addition, the average number of new tree plantings per hectare of land taken is estimated. A distinction is also made between mineral and organic soils. The estimate of the changes in use of an average hectare of land take is differentiated for all municipalities in Germany (territorial status: 31 December 2021). In this way, it can be taken into account that the municipalities differ both in terms of the proportion of previous uses and in terms of the urban density realised with the land take. In addition, the real land take shows a different importance of the different uses (residential, commercial, mixed use, ...) in municipalities of different types. The differentiated estimation of changes in land use by municipality also allows them to be weighted when deriving statements for higher territorial units (districts, federal states, Germany as a whole). The annual land take in the past and the

assumptions of the analysed future scenarios are used as weighting factors, depending on the question.

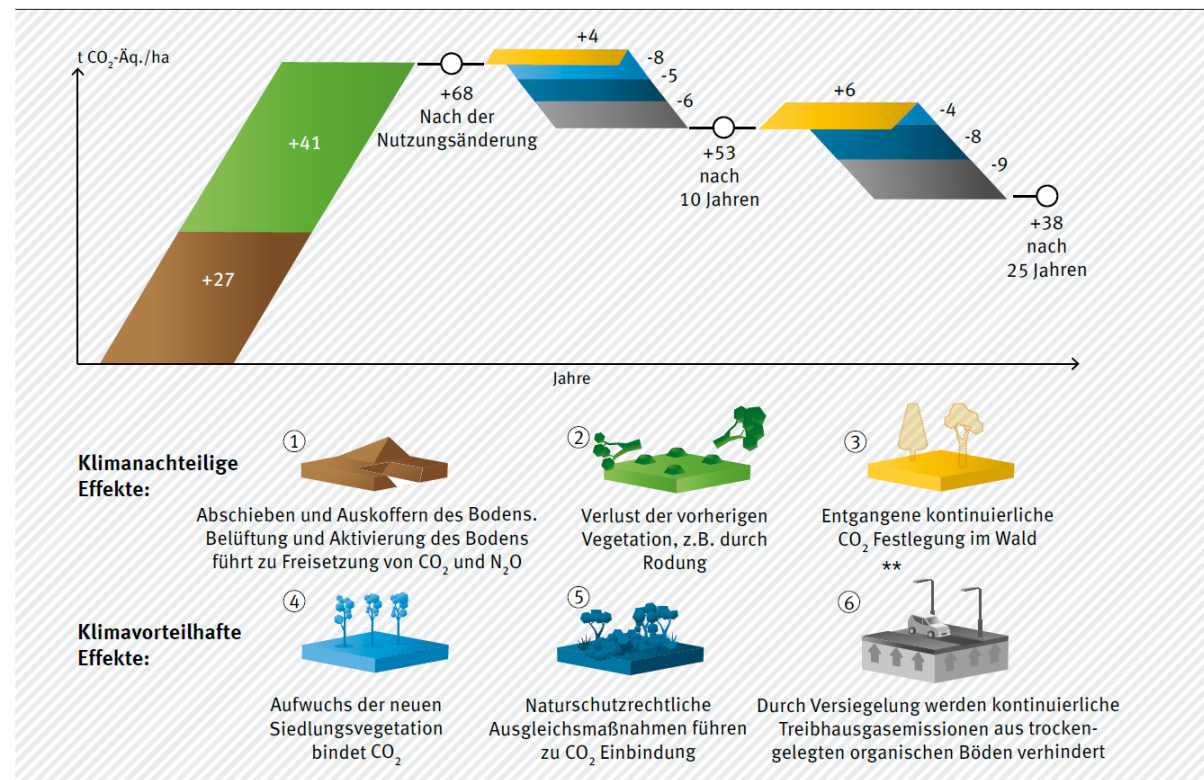
An important element of the future scenarios is the replacement of a certain proportion of external development with increased internal development. As internal development measures also have a greenhouse gas effect, land use changes are also required for a complete evaluation. To derive these, a distinction is made between different forms of internal development, which are weighted differently for different types of municipalities on the basis of existing studies.

In addition to the creation of new residential and commercial areas, the construction and expansion of external transport routes is also part of land take. As out-of-town transport routes cannot be replaced by increased internal development and their reduction can only be achieved by reducing the volume of development, out-of-town transport areas are analysed separately.

The land use changes specific to the municipality or type of municipality lead to changes in the carbon stock in the soil and vegetation and thus cause corresponding greenhouse gas impacts. The methodology developed in the project is suitable for modelling all before and after constellations. Internal development measures can also be mapped.

Figure 2: LULUCF-related greenhouse gas impacts of an average land-use measure in Germany

Treibhausgaswirkungen des Flächenverbrauchs (LULUCF)
Wirkung einer durchschnittlichen Außenentwicklungsmaßnahme
 in Tonnen CO₂-Äquivalente* pro Hektar



* Da neben CO₂ teilweise auch andere Treibhausgase wie Methan oder Lachgas eine Rolle spielen, werden die Treibhausgaswirkungen mithilfe der aktuellen IPCC-Umrechnungsfaktoren in der Einheit „CO₂-Äquivalente“ („CO₂-Äq.“) angegeben.
 ** Effekt 6 umfasst mitunter auch veränderte Emissionsfaktoren durch Nutzungsänderungen ohne Versiegelung.
 Weitere klimarelevante Effekte (nicht quantifiziert): Anstieg des Kohlenstoffvorrats im Boden nach Nutzungsänderung in Siedlungsfläche, u. a. durch Düngung und Bewässerung; Auf dem ungenutzten Standort verringerte landwirtschaftliche Aktivität (Düngemittel, Traktor, ...); Indirekte Landnutzungsänderungen/Verdrängungseffekte; Veränderte Oberflächenalbedo.

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut/GGR

Source: own figure, Öko-Institut / GGR; see Figure 11

LULUCF-related, an average external development measure in Germany causes almost 40 tonnes of CO₂ eq. per hectare. Most of this impact occurs during the construction work due to the loss of carbon stocks in the soil as a result of excavation and trenching, and due to the loss of carbon stocks in the vegetation, mainly forest areas. A further unfavourable effect on the climate is that no continuous net sequestration of carbon can take place on the converted forest areas in subsequent years.

The growth of new urban vegetation and the usually necessary compensatory measures under nature conservation law offset a significant proportion of the emissions generated over the years. Greenhouse gases are also saved in the special case where settlement projects are realised on drained organic soils, as the sealing prevents continuous greenhouse gas emissions. However, this only applies to a few locations in Germany. Due to uncertainties and the restrictions regarding rewetting, building on or sealing drained organic soils is not a recommended measure for improving the carbon footprint - neither for individual projects nor nationwide.

The projection for Germany shows that land take at the current level of around 55 hectares per day causes greenhouse gas emissions of around 1.0 to 1.4 million tonnes of CO₂ eq. per year. If land take remained at this level until 2050, greenhouse gas emissions would total around 30 million tonnes of CO₂ eq. over the period from 2025 to 2050. The relevance of the LULUCF-related greenhouse gas effects of land take is regarded as moderate overall, but not irrelevant.

An ambitious reduction in land take to a level of 20 hectares per day by 2030 and then a further linear decrease to net zero by 2050, compensated by increased internal development, could save a total of just under 20 million tonnes of CO₂ eq. by 2050. A moderate reduction in land take to 30 hectares per day by 2030 and then a linear decrease to net zero by 2050 would result in potential savings of just under 17 million tonnes of CO₂ eq. The greenhouse gas savings potential for a 1-hectare external development measure that is avoided and instead realised in internal development is over 80%.

The land use change of forest areas causes almost 50% of all greenhouse gas emissions, despite a modest share in the total land use of 11%. At the municipal level, too, it can be seen that the most climate-impacting external development measures take place in those municipalities whose average hectare of land beforehand has the largest proportion of forest area according to the modelling. Against this background, the consistent protection of forest areas also offers considerable potential savings for Germany totalling around 12 million tonnes of CO₂ eq. by 2050, even if land take remains at the current level of around 55 hectares per day.

The methodology developed is based on numerous methodological assumptions that are subject to uncertainties. In general, a conservative approach is taken when selecting parameters, i.e. in unclear cases, the parameter that is contrary to the project's working hypothesis (land take generates high greenhouse gas impacts) is selected by default. Even among the aspects generally not quantified - including displacement effects of agricultural uses, alternative modelling approaches for settlement development on organic soil or the consideration of higher soil carbon stocks on settlement areas than on adjacent open space areas - those that would tend to lead to even higher greenhouse gas impacts of land take predominate. This supports the robustness of the statements made with regard to the savings potential that could be achieved by reducing land take. In contrast, the National Greenhouse Gas Inventory for land take quantifies on average a climate-advantageous effect (net sink), in particular due to a different modelling of the growth of new settlement vegetation.

Against this background, further studies should be carried out in order to reduce uncertainties. There is a particular need for research regarding the development of carbon stocks in urban

vegetation after land take and the impact of construction projects on carbon stocks in mineral and organic soils.

With the albedo effect and the influence of climate change on the carbon stock in soils, two aspects that could potentially have a significant impact on the project results were neither considered by default nor in the form of sensitivity analyses.

With regard to the construction of technical public infrastructure and buildings, which were examined in the project subordinate to the LULUCF aspect, the following findings are central: The construction of technical public infrastructure causes greenhouse gas emissions of around 115 to 150 tonnes of CO₂ eq. per hectare for external development. The emissions are therefore around 3 to 4 times higher than the LULUCF-related greenhouse gas impact of an average external development measure in Germany. The majority of emissions result from roadways and pavements, i.e. from the production and application of asphalt. A reduction in greenhouse gas emissions of around 60% can be achieved through internal development.

In the projection for Germany, at a level of 55 hectares per day, land take for the construction of new public technical infrastructure causes annual emissions of just under 3 million tonnes of CO₂ eq. In the 'moderate land saving' scenario, annual savings of over 0.5 million tonnes of CO₂ eq. are possible from 2028 onwards. Overall, greenhouse gas reductions of around 30 million tonnes of CO₂ eq. are possible over the period up to 2050. If it is taken into account that the upstream emissions from the provision of building materials will decrease significantly, the potential savings by 2050 amount to around 15 million tonnes of CO₂ eq.

With regard to the construction of new buildings, land take in Germany at a level of 55 hectares per day causes annual emissions of around 20 million tonnes of CO₂ eq. The emissions are thus significantly higher than for LULUCF (around 1 million tonnes of CO₂ eq.) and the construction of technical infrastructure (around 3 million tonnes of CO₂ eq.). These results illustrate the importance of the topic of 'grey emissions'. The relative savings potential from a reduced land take and increased internal development is low compared to LULUCF and the construction of technical infrastructure. The absolute savings potential over the period up to 2050 amounts to around 7 million t CO₂-eq, with a roughly modelled decarbonisation of the upstream emissions to around 4 million t CO₂-eq. The main reason for this is that only the savings potential of relocating construction projects to internal development and in some cases a more compact construction method is taken into account here. The savings potential in this respect is limited. Greater savings potential can be realised with regard to the choice of materials, the style of construction, etc. However, this is largely independent of whether the development is external or internal. Furthermore, there is a clear limitation to the savings potential if no sufficiency measures are considered (e.g. reduction in living space per person).

Looking at all the aspects analysed, around 70% of the emissions caused by land take in Germany between 2025 and 2050 are caused by the construction of buildings. The other quantified aspects also have a visible share of the total emissions from land take, with the LULUCF aspect being the smallest. Moderate land saving can result in a total savings potential of around 50 million tonnes of CO₂ eq. by 2050. In terms of savings potential, the LULUCF and technical infrastructure aspects dominate, which is due to the high relative savings potential of internal development compared to external development.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Ziel

Die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche (Flächenverbrauch) ist in Deutschland mit mehr als 50 ha pro Tag nach wie vor auf einem hohen Niveau. Dass diese Flächenneuanspruchnahme zahlreiche ökologische, ökonomische und soziale Nachteile aufweist, ist allgemein unstrittig. Entsprechend haben sowohl die Bundesländer als auch der Bund Ziele formuliert, die Flächenneuanspruchnahme in den kommenden Jahren zu reduzieren. Auf Bundesebene wird in der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie angestrebt, den Flächenverbrauch bis zum Jahr 2030 auf durchschnittlich unter 30 Hektar pro Tag und bis zum Jahr 2050 durch den Übergang zu einer Flächenkreislaufwirtschaft auf Netto-Null zu reduzieren.

Der Flächenverbrauch hat auch Auswirkungen auf das Klima. Mit nahezu jeder Flächenneuanspruchnahme für Siedlungs- und Verkehrszwecke werden die Kohlenstoffvorräte in den natürlichen Kohlenstoffspeichern Boden und Vegetation vollständig oder teilweise freigesetzt. Das heißt, es kommt zu Treibhausgasemissionen. Bislang finden Berechnungen zu diesen Treibhausgaswirkungen nur selten Eingang in die kommunale Bauleitplanung. Das liegt auch daran, dass zur Berechnung der Treibhausgaswirkung noch keine einfachen Instrumente zur Verfügung standen.

Das wesentliche Ziel des vorliegenden Projekts mit dem Langtitel „Reproduzierbare und methodisch verständliche Aufbereitung der durch die Reduzierung der Flächenneuanspruchnahme erzielbaren qualitativen/quantitativen THG-Minderungspotenziale als Planungshilfe für regionalen und kommunalen Freiflächen- und Klimaschutz“ bestand deshalb darin, dieses Defizit aufzulösen und eine verständliche und belastbare Methode zu entwickeln, mit der die durch Flächensparen erzielbaren Potenziale zur Treibhausgasminderung ermittelt und anschaulich dargestellt werden können. Dabei sollte insbesondere auch ermittelt werden, welche Einsparpotenziale sich ergeben, wenn auf die Entwicklung neuer Flächen auf der grünen Wiese verzichtet wird und die Flächenbedarfe durch eine verstärkte Innenentwicklung erschlossen werden.

1.2 Entwickelte Produkte

Um das beschriebene Ziel zu erreichen, wurden folgende Produkte entwickelt:

1. Wissenschaftlicher Ergebnisband
 - ▶ Der vorliegende Bericht stellt den wissenschaftlichen Ergebnisband dar. Die Ergebnisse hinsichtlich der Flächen- und Treibhausgaswirkungen von Außen- und Innenentwicklungsmaßnahmen werden detailliert dargestellt. Der Ergebnisband wird durch einen Methodikband komplementiert.
2. Wissenschaftlicher Methodikband
 - ▶ Der wissenschaftliche Methodikband liegt als separater Bericht vor. Er beschreibt detailliert sämtliche Modellierungen und Zwischenschritte, um die Treibhausgaswirkungen der Flächenneuanspruchnahme abzubilden.
3. Handlungshilfe
 - ▶ Die Handlungshilfe liegt als 32-seitige DIN A4-Broschüre vor. Zielgruppe der Handlungshilfe sind insbesondere Kommunen. Mithilfe der Handlungshilfe sollen Kommunen anschaulich

aufgezeigt bekommen, welche Zusammenhänge zwischen den geplanten Bauvorhaben und den Kohlenstoffvorräten in Vegetation und Boden bestehen. Außerdem sollen sie in die Lage versetzt werden, selbstständig quantitative Abschätzungen zum CO₂-Fußabdruck der Bauvorhaben durchzuführen.

4. LULUCF Wirkungsrechner

- ▶ Der Excel basierte LULUCF Wirkungsrechner kann kostenlos über die Homepage des Umweltbundesamts heruntergeladen werden (www.uba.de/lulucf_wirkungsrechner). Er richtet sich ebenfalls insbesondere an Kommunen und komplementiert die Handlungshilfe. Der LULUCF Wirkungsrechner ermöglicht Kommunen, ihre individuellen Planungen abzubilden, die Treibhausgaswirkung zu berechnen und mit den Emissionen alternativer Planungsoptionen zu vergleichen.

1.3 Aufbau dieses Berichts

Der vorliegende wissenschaftliche Ergebnisband enthält in Kapitel 2 eine einleitende Übersicht zum methodischen Vorgehen und zu zentralen Begriffen und Konzepten. Die detaillierte Darstellung der Methodik und Modelle, auf denen die Berechnungen der Treibhausgasemissionen basieren, erfolgt im Methodikband, der als separater Bericht veröffentlicht ist.

Kapitel 3 beschreibt, welche flächenhaften Auswirkungen Außen- und Innenentwicklungsmaßnahmen haben, d. h. insbesondere auf welchen Flächen im Außenbereich Flächenneuanspruchnahme in der Regel stattfindet, aus welchen versiegelten und vegetativen Elementen sich Siedlungs- und Verkehrsfläche nach der Bebauung durchschnittlich zusammensetzt und welche treibhausgasrelevanten Nutzungsänderungen sich bei der Innenentwicklung ergeben.

Kapitel 4 stellt die LULUCF-bedingten Treibhausgaswirkungen dar, sowohl für einen Hektar Nutzungsänderung bei unterschiedlichen Vorher-Nachher-Konstellationen als auch in der Hochrechnung für ganz Deutschland. In Form von Szenarien werden die Einsparpotenziale einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme dargestellt und es wird untersucht, welche Veränderungen sich ergeben, wenn ausgewählte Randbedingungen variiert werden.

Kapitel 5 stellt die Treibhausgaswirkungen und Einsparpotenziale hinsichtlich der Errichtung von Infrastruktur und Gebäuden dar. In einem Exkurs wird auch das Einsparpotenzial bezüglich der Nutzung von Infrastruktur und Gebäude quantifiziert. In einer Gesamtschau wird gezeigt, welche Aspekte die Treibhausgaswirkung von Flächenneuanspruchnahme dominieren, und welche Aspekte die größten Einsparpotenziale bieten.

2 Methodisches Vorgehen, Grundlagen und Begriffe

2.1 Treibhausgaswirkungen der Flächenneuanspruchnahme

Die Inanspruchnahme von Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke ist mit Baumaßnahmen und Eingriffen in den Boden und/oder die Vegetation auf der Fläche verbunden und verursacht Treibhausgaswirkungen. Grundsätzlich wurden die fünf Aspekte, die in Tabelle 1 aufgelistet sind, im Rahmen des vorliegenden Projekts betrachtet. Der Schwerpunkt und die konkrete Berechnung der Emissionen lag auf dem Bereich der Landnutzungsänderungen (LULUCF, land use, land use change and forestry). Treibhausgaswirkungen als Folgen der Errichtung von technischer Infrastruktur und von Gebäuden sowie der Nutzung von Infrastruktur und Gebäuden wurden nur quantitativ abgeschätzt. Sie sind im Kapitel 5 beschrieben. Diese Fokussierung wurde vorgenommen, weil für den Aspekt LULUCF ein besonders großer Bedarf an Informationen und Instrumenten bestand, mit denen kommunale und regionale Planungsträger die Treibhausgaswirkung von Siedlungsentwicklung im Rahmen der Bauleitplanung abschätzen können.

Tabelle 1: Aspekte der Treibhausgaswirkung von Flächenneuanspruchnahme

Aspekt	Treibhausgaswirkungen Außenentwicklung	Einsparpotenziale durch Innenentwicklung
Landnutzungsänderungen	Verlust von Kohlenstoff in Vegetation und Boden	Schonung der Kohlenstoffvorräte, Erhalt von kontinuierlichen Kohlenstoffsinken
Errichtung technischer Infrastruktur	Verbrauch treibhausgasintensiver Materialien wie Asphalt, Beton, Stahl, usw.	Reduzierter Materialverbrauch durch Nutzung bestehender Infrastruktur
Errichtung von Gebäuden	Verbrauch treibhausgasintensiver Materialien wie Beton, Stahl, usw.	Effizienterer Materialeinsatz durch Bau von Mehrfamilienhäusern anstatt Einfamilienhäusern
Verkehrsaufkommen	Energieverbrauch für den Antrieb der Verkehrsmittel	Verringerung der durchschnittlich zurückzulegenden Distanzen
Temperierung und Betrieb der Gebäude	Energieverbrauch für Gebäudebetrieb, im Neubau insbesondere Strom	Höhere Energieeffizienz in Mehrfamilienhäusern gegenüber Einfamilienhäusern

Quelle: Öko-Institut

2.2 Betrachtete Nutzungsarten

Tabelle 2 führt die Nutzungsarten auf, die der LULUCF-Modellierung zugrunde liegen. Die Festlegung erfolgte auf Basis des IÖR Flächenschemas (IÖR 2018, siehe Abbildung 3).

Die Vornutzungsarten im Außenbereich (d. h. vor der Flächenneuanspruchnahme) „Abbau- und Haldenfläche“, „Moor“, „Sumpf“ sowie alle Wasserflächen wurden nicht weiter berücksichtigt, da auf diesen Flächen nahezu keine Flächenneuanspruchnahme stattfindet.

Bei der Siedlungs- und Verkehrsfläche wird nur zwischen versiegelter Fläche (durch Gebäude bedeckte Fläche, öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude (insbesondere Straßen) und private versiegelte Fläche ohne Gebäude), Fläche mit niedriger Vegetation (Rasen, Garten, ...) und Flächen mit mittlerer Vegetation (Gehölz, Hecken, Gebüsch) unterschieden. Diese Einteilung deckt sich nicht mit der Einteilung des IÖR Flächenschemas, beispielsweise bestehen

Wohnbauflächen oder Straßenverkehrsflächen (siehe Abbildung 3, roter Bereich „Siedlungs- und Verkehrsfläche“) nicht ausschließlich aus versiegelter Fläche.

Tabelle 2: Der LULUCF-Modellierung zugrundeliegende Nutzungsarten

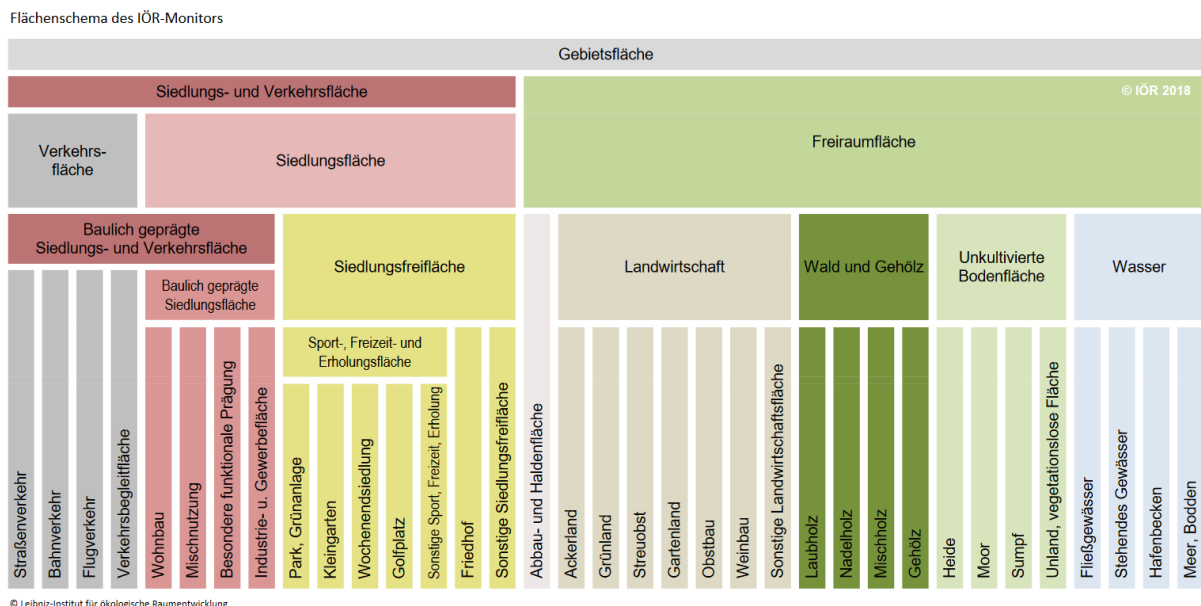
Vornutzungsarten Freiraumfläche	Vor- und Nachnutzungsarten Siedlungs- und Verkehrsfläche	
Ackerland	Durch Gebäude bedeckte Fläche	Für LULUCF-Modellierung zusammengefasst zu: „Versiegelte Fläche“
Grünland	Öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude, insb. Straßen	
Streuobst	Private versiegelte Fläche ohne Gebäude	
Gartenland	Fläche mit niedriger Vegetation (Rasen, Garten, ...)	
Obstbau	Fläche mit Gehölz, Hecken, Gebüsch	
Weinbau		
Sonstige Landwirtschaftsfläche		
Laub-/Nadel-/Mischholz		
Gehölz		
Heide		
Unland, vegetationslose Fläche		

Quelle: Öko-Institut

Darüber hinaus werden auf Siedlungs- und Verkehrsflächen Einzelbäume berücksichtigt¹. Es wird angesetzt, dass nach einer Flächenneuanspruchnahme eine bestimmte Anzahl an Jungbäumen gepflanzt wird, die im Anschluss aufwachsen, siehe Kapitel 2.4.4 im Methodikband. Bei Innenentwicklungsmaßnahmen werden gefälltte Bestandsbäume berücksichtigt, siehe Kapitel 3.4.2 im Methodikband.

¹ Diese Einzelbäume werden als Punktobjekte ohne Fläche mit einem definierten Kohlenstoffvorrat modelliert. Die von der Baumkrone überdeckte Fläche wird vollständig anteilig unter den übrigen Nutzungsarten aufgeteilt.

Abbildung 3: Zugrundeliegendes Flächenschema



Quelle: IÖR 2018

2.3 Überblick über das methodische Vorgehen bzgl. LULUCF

Im Folgenden wird ein Überblick über das methodische Vorgehen zur Quantifizierung der Treibhausgaseinsparpotenziale einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme bezüglich LULUCF gegeben. Abbildung 4 zeigt, aus welchen Teilmodellen das Gesamtmodell besteht und wie die Teilmodelle miteinander verknüpft sind.

Die relevanten Treibhausgaswirkungen ergeben sich aus Nutzungsänderungen. In dem Projekt wurden die wesentlichen Parameter durch die Auswertung von empirischen Daten und von Literaturstudien sowie Expertenbefragungen zusammengetragen. Eine detaillierte Beschreibung kann im Methodikband nachgelesen werden; auf die relevanten Kapitel wird nachfolgend regelmäßig verwiesen. Im Einzelnen wurde ermittelt:

1. auf welchen Freiraum-Nutzungsarten Flächenneuanspruchnahme in den vergangenen Jahren in Deutschland üblicherweise stattgefunden hat, d. h. welche Nutzungen im Freiraum für die Schaffung von Siedlungs- und Verkehrsfläche aufgegeben wurden. Dazu wurden Daten des IÖR-Monitors² ausgewertet (Teilmodell „Außenentwicklung: Flächen“ in Abbildung 4, Kapitel 2.3 im Methodikband).
2. aus welchen Nutzungsarten und mit welcher Vegetation sich neu entstandene Siedlungs- und Verkehrsflächen im Durchschnitt anteilig zusammensetzten (versiegelte Fläche, Fläche mit niedriger Vegetation, Fläche mit Hecken/Gehölz, Bäume pro Hektar). Diese Informationen wurden über eine Auswertung von Luftbildern gewonnen (siehe Kapitel 2.4, insbesondere Kapitel 2.4.3 im Methodikband) und komplettieren das Teilmodell „Außenentwicklung: Flächen“.
3. mit welcher konkreten Nutzungsänderungsmatrix sich Flächenneuanspruchnahme in Deutschland repräsentativ beschreiben lässt (Nutzungsart „vorher“ hat Nutzungsart „nachher“ zur Folge, siehe Tabelle 5 in Kapitel 3.1.3).

² Beim IÖR-Monitor handelt es sich um eine Forschungsdateninfrastruktur. Er stellt Informationen zur Flächennutzungsstruktur und deren Entwicklung sowie zur Landschaftsqualität für die Bundesrepublik Deutschland bereit (IÖR 2018).

4. welche Treibhausgaswirkungen pro Hektar Nutzungsänderung (Nutzungsart „vorher“ geht in Nutzungsart „nachher“ über) entstehen. Dafür wurde Literatur ausgewertet und Einschätzungen von Expert*innen zusammengetragen (Teilmodell „Treibhausgaswirkungen pro Hektar“ in Abbildung 4, siehe Kapitel 4 im Methodikband).
5. welche Nutzungsänderungen sich ergeben, wenn zur Vermeidung von Flächenneuanspruchnahme Innenentwicklung betrieben wird. Dazu hat das Projektteam eigene Modellierungen vorgenommen und diese mit Einschätzungen von Expert*innen optimiert (Teilmodell „Innenentwicklung: Flächen“ in Abbildung 4, siehe Kapitel 3 im Methodikband).

Die LULUCF-bedingte Treibhausgaswirkung errechnet sich durch Multiplikation der umgenutzten Fläche mit den Treibhausgaswirkungen pro Hektar dieser Nutzungsänderung (Nutzungsart „vorher“ zu Nutzungsart „nachher“).

Der erste Faktor dieser Multiplikation, die umgenutzte Fläche, ist im nachfolgenden Kapitel 3 dargestellt. Der zweite Faktor, die Treibhausgaswirkungen pro Hektar, findet sich in Kapitel 4.1. Das Ergebnis der Multiplikation, d. h. die Treibhausgaswirkungen der Siedlungsentwicklung in Deutschland, ist das Thema von Kapitel 4.2.

Durch die Variation der Flächenkulisse in Form von Szenarien zur Entwicklung des Flächenverbrauchs in Deutschland (Abbildung 4 links unten: Teilmodell „Szenarien zur Entwicklung der Flächenneuanspruchnahme (FNI) in Deutschland“, siehe Kapitel 6 im Methodikband) lassen sich die Treibhausgas-Einsparpotenziale einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme, insbesondere durch eine verstärkte Innenentwicklung, ableiten. Diese Abschätzung findet sich in Kapitel 4.3.

Abbildung 4: Überblick über das im Projekt entwickelte LULUCF-Modell



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR
 Mit „CO₂“ sind alle relevanten Treibhausgase gemeint.

2.4 Begriffsbestimmungen

Im Folgenden werden zunächst einige zentrale Begriffe erklärt:

- **Flächenneuansprache/Flächenverbrauch**
 Die Begriffe Flächenneuansprache und Flächenverbrauch bezeichnen die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche in Deutschland. Die Bundesregierung hat im Jahr 2002 den Indikator „Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche in Hektar pro Tag“ als Nachhaltigkeitsindikator unter dem Thema Flächeninanspruchnahme in der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie verankert und im Jahr 2016 als Indikator 11.a in die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie überführt. Der Indikator wird als gleitender Vierjahresdurchschnitt berechnet, d. h. er ergibt sich als arithmetisches Mittel aus den Zahlen des aktuellen Anstiegs der Siedlungs- und Verkehrsfläche und des Anstiegs der drei vorangegangenen Berichtsjahre (Destatis 2025). Flächenverbrauch findet stets im Freiraum statt, d. h. Freiraumflächen werden in Siedlungs- und Verkehrsflächen umgenutzt.

- ▶ **Siedlungs- und Verkehrsfläche (Nutzungsarten)**
Siedlungs- und Verkehrsfläche umfasst die Nutzungsarten Wohnbau, Industrie- und Gewerbe, Mischnutzung, Besondere funktionale Prägung, Straßenverkehr, Schienenverkehr, Flugverkehr, Verkehrsbegleitfläche, Park / Grünanlage, Kleingarten, Wochenendsiedlung, Golfplatz, sonstige Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen, Friedhöfe und sonstige Siedlungsfreiflächen. Für dieses Projekt wurde das Flächenschema des Instituts für ökologische Raumentwicklung (IÖR Flächenschema) zugrunde gelegt (siehe Abbildung 3).
- ▶ **Bodenversiegelung**
Bodenversiegelung (mitunter auch als Flächenversiegelung bezeichnet) bedeutet, dass der Boden luft- und wasserdicht abgedeckt wird, wodurch Regenwasser nicht oder nur unter erschwerten Bedingungen versickern kann. Auch der Gasaustausch des Bodens mit der Atmosphäre wird gehemmt. Die Siedlungs- und Verkehrsfläche darf nicht mit „versiegelter Fläche“ gleichgesetzt werden, da sie auch unversiegelte Frei- und Grünflächen enthält. Hierzu gehören beispielsweise auch alle den Gebäuden unmittelbar zugehörigen Flächen wie Haus- und Vorgärten, Stellplätze, oder auch Grünanlagen, Spielplätze und Friedhöfe (Destatis 2025).
- ▶ **Außenentwicklung**
Außenentwicklung ist die bauliche Entwicklung von Flächen im planungsrechtlichen Außenbereich, d. h. außerhalb der Städte und Gemeinden. In diesem Bericht werden mit dem Begriff Außenentwicklung die Maßnahmen zusammengefasst, die Freiraumflächen in Siedlungs- und Verkehrsflächen umnutzen. Flächenneuanspruchnahme / Flächenverbrauch findet im Außenbereich statt.
- ▶ **Innenentwicklung**
Innenentwicklung ist die bauliche Entwicklung von Flächen im planungsrechtlichen Innenbereich, d. h. innerhalb von im Zusammenhang bebauten Ortsteilen der Städte und Gemeinden. In diesem Bericht werden mit dem Begriff Innenentwicklung in der Regel die Maßnahmen bezeichnet, die auf bestehenden Siedlungs- und Verkehrsflächen stattfinden. Innenentwicklung kann mit einer LULUCF-wirksamen Nutzungsänderung verbunden sein, wenn beispielsweise ein Kleingarten in Wohnbau umgenutzt wird. Innenentwicklung kann auch ohne LULUCF-wirksame Nutzungsänderung stattfinden, wenn beispielsweise eine Aufstockung durchgeführt wird. Die Innenentwicklung ist ein wichtiges Instrument, um den Flächenverbrauch einzudämmen und soll auch unter dem Gesichtspunkt der Treibhausgaswirkung als alternative Option zur Außenentwicklung betrachtet werden.
- ▶ **Außerörtliche Verkehrsflächen**
Mit außerörtlichen Verkehrsflächen sind solche Verkehrsflächen bezeichnet, die auch nach der Flächenneuanspruchnahme im Außenbereich liegen, d. h. sie sind umgeben von Freiraumflächen. Beispiele für außerörtliche Verkehrsflächen sind Autobahnen, Bundesstraßen, usw. Außerörtliche Verkehrsflächen sind eine Teilmenge der im IÖR Flächenschema (Abbildung 3) grau hinterlegten Verkehrsflächen.
- ▶ **Durchschnittlicher Hektar**
Flächenneuanspruchnahme findet auf zahlreichen unterschiedlichen Flächen in Deutschland statt. Auch die Nutzung nach der Flächenneuanspruchnahme unterscheidet sich mitunter stark. An mehreren Stellen werden Projektergebnisse pro durchschnittlichem Hektar dargestellt. Damit ist je nach Kontext eine durchschnittliche Flächenneuanspruchnahme im Umfang von 1 ha gemeint für einen bestimmten räumlichen Bezug, insbesondere Deutschland oder einzelne Gemeinden in Deutschland. Der

durchschnittliche Hektar meint einen virtuellen Hektar, der sich aus allen relevanten Nutzungsarten zusammensetzt, sowohl hinsichtlich der Vor- als auch der Nachnutzung.

- ▶ **Flächenkulisse**
Mit Flächenkulisse sind die Flächennutzungen und -nutzungsänderungen von unterschiedlichen räumlichen Bezügen bezeichnet, insbesondere solche, die für die Quantifizierung der Treibhausgaswirkung von Flächenneuanspruchnahme relevant sind.
- ▶ **Organischer Boden**
Es wird allgemein zwischen mineralischen und organischen Böden differenziert. Organische Böden sind Moorböden, Moorfolgeböden oder Anmoore, die über lange Zeiträume große Mengen an Kohlenstoff gebunden haben. In Deutschland sind weite Teile der organischen Böden zur besseren anthropogenen Nutzung trockengelegt, weshalb sie eine kontinuierliche Treibhausgasemissionsquelle darstellen (siehe Kapitel 4.1.4).

2.5 Differenzierung zwischen Flächenneuanspruchnahmen für Siedlungen und für außerörtliche Verkehrsflächen

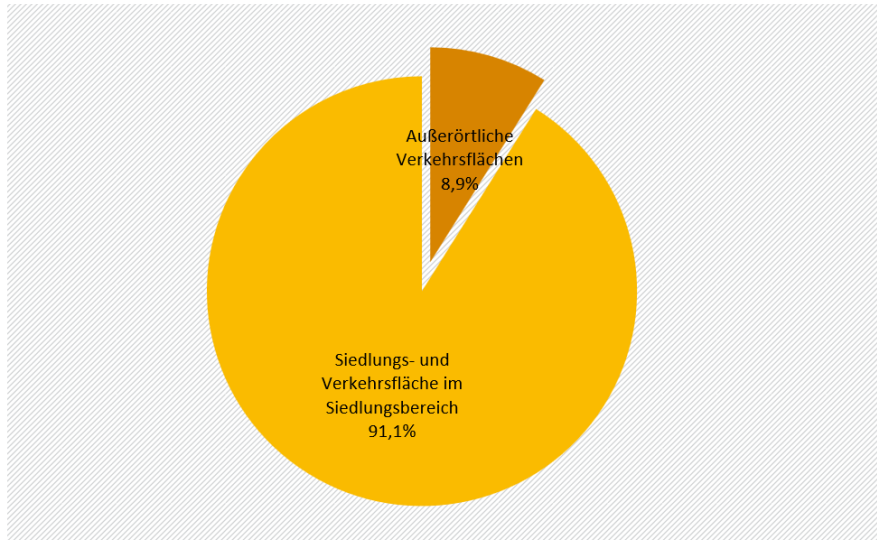
Der Modellierung liegt der Ansatz zugrunde, dass Flächenneuanspruchnahme grundsätzlich auch durch eine äquivalente Innenentwicklung ersetzt werden kann. Eine Ausnahme diesbezüglich stellen außerörtliche Verkehrsflächen dar – also die Verkehrsflächen, die auch nach ihrem Bau nicht im Siedlungsbereich, sondern im Außenbereich liegen (beispielsweise Autobahnen, Bundesstraßen, Flughäfen, usw., siehe die Begriffsbestimmungen in Kapitel 2.4). Diese Verkehrsflächen werden durch Innenentwicklung nicht kompensiert. Eine Reduktion der jährlichen Flächenneuanspruchnahme zum Bau von außerörtlichen Verkehrsflächen muss daher durch eine Verminderung deren Ausbaus erfolgen, z. B. eine Konzentration auf die Erhaltung der bestehenden Straßen- und Schienenwege anstelle eines weiteren Aus- und Neubaus.

Vor diesem Hintergrund wurde unterschieden zwischen Flächenneuanspruchnahmen für

- ▶ Siedlungs- und Verkehrsflächen im Siedlungsbereich und für
- ▶ außerörtliche Verkehrsflächen.

Offizielle Zahlen zum Anteil dieser Flächen an der gesamten Flächenneuanspruchnahme gibt es nicht. Auf Basis einer Sonderauswertung des IÖR-Flächenmonitors der Siedlungs- und Freiraumentwicklung im Auftrag des Büros Gertz Gutsche Rümenapp (IÖR 2023) entfallen etwa 91 % der gesamten Flächenneuanspruchnahme auf Siedlungs- und Verkehrsflächen im Siedlungsbereich, bei denen auch die dabei neu geschaffenen Verkehrsflächen im neu geschaffenen Siedlungsbereich liegen. Die restlichen ca. 9 % der Flächenneuanspruchnahme entfallen auf außerörtliche Verkehrsflächen (Autobahnen, Bundesstraßen, etc.).

Abbildung 5: Bisherige Flächenneuanspruchnahme (2013-2018) differenziert nach Siedlungsbereich und außerörtlichen Verkehrsflächen



Quelle: IÖR-Flächenmonitor (IÖR 2023), eigene Auswertung und Darstellung, Öko-Institut / GGR

3 Flächenkulisse

Dieses Kapitel stellt dar, auf welchen Flächen im Außenbereich Flächenneuanspruchnahme in den vergangenen Jahren in der Regel stattfand, aus welchen versiegelten und vegetativen Elementen sich Siedlungs- und Verkehrsfläche nach der Bebauung durchschnittlich zusammensetzt und welche treibhausgasrelevanten Nutzungsänderungen sich bei der Innenentwicklung ergeben. Die folgenden Darstellungen konzentrieren sich auf die wichtigsten Ergebnisse, die für die Berechnung der Treibhausgaswirkungen benötigt werden. Der Methodikband, auf den im Folgenden an ausgewählten Stellen verwiesen wird, beschreibt ausführlich, wie die Ergebnisse ermittelt wurden. Es wird unterschieden zwischen der Entstehung von Siedlungsfläche im Außenbereich, Nutzungsänderungen im Innenbereich und außerörtlichen Verkehrsflächen.

3.1 Entstehung von Siedlungsfläche im Außenbereich

3.1.1 Flächennutzung vor der Flächenneuanspruchnahme

Außenentwicklung findet überwiegend auf den in Kapitel 0 genannten Flächen statt (Tabelle 2). Diese finden sich in der ersten Spalte der Tabelle 3 wieder. Tabelle 3 zeigt für ausgewählte Gebietskörperschaften, in welchem Maße die einzelnen Nutzungsarten vom Flächenverbrauch betroffen waren, d. h. auf welchen Flächen Siedlungsfläche im Außenbereich entstand. Die Methodik der Herleitung der Werte ist in Kapitel 2.3 im Methodikband detailliert beschrieben. Die Werte für die Landkreise sind jeweils gewichtete Mittelwerte der Einzelgemeinden. Die Wichtung der Gemeinden erfolgte anhand ihres Anteils an der Flächenneuanspruchnahme im Zeitraum 2009-2021.

Tabelle 3: Flächenanteile vor der Entstehung von Siedlungsflächen im Außenbereich für exemplarische räumliche Bezüge

Nutzungsart „vorher“	Gemeinde Ebstorf	Stadt Erfurt	Vogelsbergkreis *)	Freistaat Bayern *)	Deutschland *)
Ackerland	69%	55%	32%	43%	42,6%
Grünland	8%	13%	53%	39%	29,9%
Streuobst	0%	< 1%	< 1%	< 1%	1,0%
Gartenland	0%	3%	< 1%	1%	1,4%
Obstbau	0%	< 1%	< 1%	< 1%	0,4%
Weinbau	0%	< 1%	< 1%	< 1%	0,4%
Sonst. Landwirtschaftsfl.	< 1%	< 1%	< 1%	< 1%	0,6%
Laubholz	6%	2%	3%	2%	2,7%
Nadelholz	2%	< 1%	< 1%	4%	3,0%
Mischholz	1%	< 1%	1%	3%	2,5%
Gehölz	< 1%	6%	5%	1%	3,9%
Heide	0%	< 1%	< 1%	< 1%	0,3%

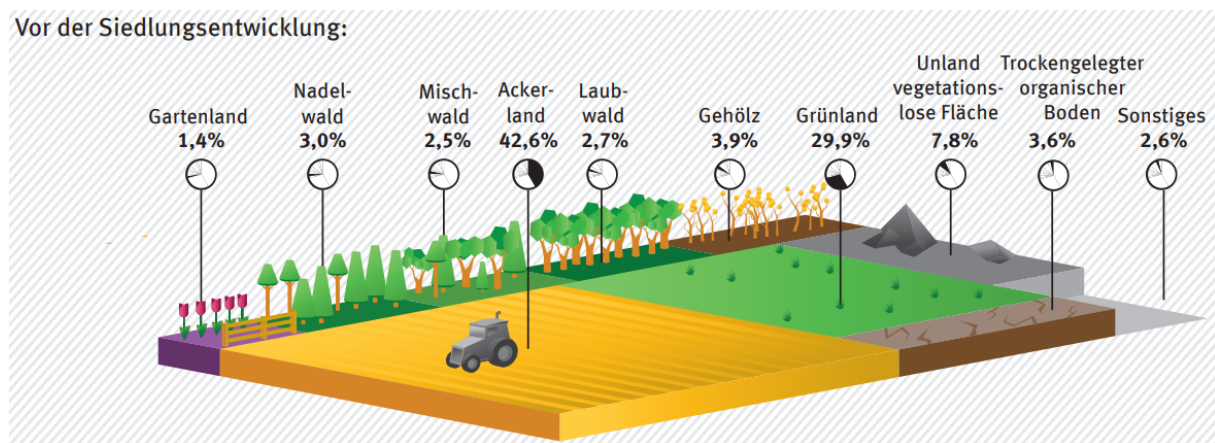
Nutzungsart „vorher“	Gemeinde Ebstorf	Stadt Erfurt	Vogelsbergkreis *)	Freistaat Bayern *)	Deutschland *)
Unland, veg.-lose Fläche	5%	17%	4%	2%	7,8%
Trocken gelegter organischer Boden	9%	< 1%	< 1%	3%	3,6%

Quelle: eigene Auswertung Öko-Institut / GGR auf Basis von Daten des IÖR-Flächenmonitors (IÖR 2023), OpenStreetMap (OSM 2023), des Greifswald Moor Centrum (Tegetmeyer et al. 2021), des Bundesamt für Naturschutz (BfN 2023), Destatis (Destatis 2023) sowie des Bundesamt für Kartografie und Geodäsie [BKG] (BKG 2022)

*) Anhand der Flächenneuanspruchnahme 2009-2021 gewichtetes Mittel der enthaltenen Städte und Gemeinden.

Zusätzlich veranschaulicht Abbildung 6 die in der letzten Spalte der Tabelle 3 aufgeführten Werte in einer Grafik.

Abbildung 6: Flächenanteile vor der Entstehung von Siedlungsfläche im Außenbereich (Bundesdurchschnitt)



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

3.1.2 Flächennutzung nach der Flächenneuanspruchnahme

Tabelle 4 zeigt für eine kleine und eine große Beispielmunicipal, einen Landkreis, ein Bundesland und für Deutschland, wie sich die Flächenkulisse nach der Flächenneuanspruchnahme anteilig darstellt. Wie schon in Tabelle 3 sind die Werte für den Vogelsbergkreis, den Freistaat Bayern und Deutschland insgesamt gewichtete Mittelwerte der betreffenden Einzelgemeinden, erneut gewichtet anhand des Anteils an der Flächenneuanspruchnahme 2009-2021.

Tabelle 4: Flächenanteile nach der Entstehung von Siedlungsflächen im Außenbereich für exemplarische räumliche Bezüge

Nutzungsart „nachher“	Gemeinde Ebstorf	Stadt Köln	Vogelsbergkreis *)	Freistaat Bayern *)	Deutschland *)
Durch Gebäude bedeckte Fläche	16%	18%	16%	17%	16,3%
Öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude, insbesondere Straßen	9%	9%	9%	9%	9,0%

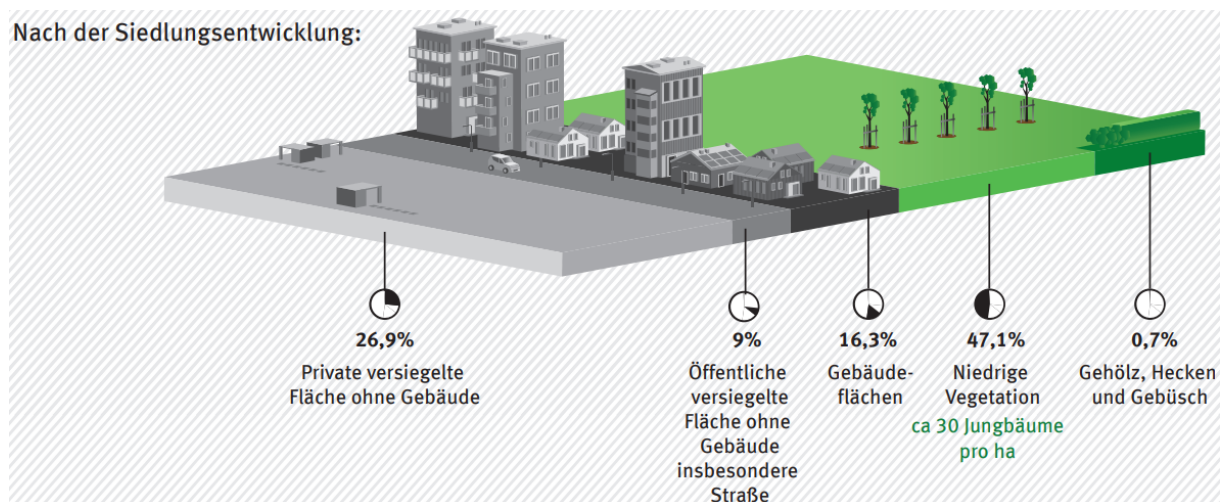
Nutzungsart „nachher“	Gemeinde Ebstorf	Stadt Köln	Vogelsbergkreis *)	Freistaat Bayern *)	Deutschland *)
Private versiegelte Fläche ohne Gebäude	26%	27%	27%	27%	26,9%
Fläche mit niedriger Vegetation (Rasen, Garten, ...)	48%	45%	48%	46%	47,1%
Fläche mit Gehölz, Hecken, Gebüsch	< 1%	< 1%	< 1%	< 1%	0,7%

Quelle: eigene Auswertung Öko-Institut / GGR auf Basis von Daten des IÖR-Flächenmonitors (IÖR 2023), OpenStreetMap (OSM 2023), ALKIS (ALKIS 2023), Destatis (2023), des BKG (BKG 2022) sowie einer Luftbilddauswertung der Firma mundialis im Auftrag von GGR / Öko-Institut

*) Anhand der Flächenneuanspruchnahme 2009-2021 gewichtetes Mittel der enthaltenen Städte und Gemeinden.

Abbildung 7 veranschaulicht die in der letzten Spalte der Tabelle 4 aufgeführten Werte für Deutschland.

Abbildung 7: Flächenanteile nach der Entstehung von Siedlungsfläche im Außenbereich (Bundesdurchschnitt)



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Empirische Grundlage der in Tabelle 4 bzw. Abbildung 7 ausgewiesenen Werte ist eine detaillierte Luftbilddauswertung von über 2.000 Hektar Siedlungsfläche unterschiedlicher Nutzung und räumlicher Lage in Deutschland, die seit den 1970er Jahren im Außenbereich entstanden ist. Diese wird in Kapitel 2.4.3 im Methodikband detailliert beschrieben.

3.1.3 Nutzungsänderungen durch die Flächenneuanspruchnahme

Durch Flächenneuanspruchnahme wird die Flächenkulisse „vor der Inanspruchnahme“ (Kapitel 3.1.1) in eine Flächenkulisse „nach der Inanspruchnahme“ (Kapitel 3.1.2) überführt. Für jede Gemeinde wurde in dem Projekt eine Nutzungsänderungsmatrix hergeleitet (siehe Methodikband Kapitel 2.5.1), die beschreibt, wie viele Quadratmeter im Mittel von welcher Nutzungsart „vorher“ in welche Nutzungsart „nachher“ umgenutzt werden, wenn in der betreffenden Gemeinde ein Hektar Siedlungsfläche im Außenbereich entsteht. Die Summe aller

Werte der Nutzungsänderungsmatrix jeder einzelnen Gemeinde beträgt genau 1 Hektar. Das Ergebnis für Deutschland ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Nutzungsänderungsmatrix für die Entstehung von Siedlungsfläche im Außenbereich (Bundesdurchschnitt)

Nach der Flächenneuanspruchnahme Vor der Flächenneuanspruchnahme	Durch Gebäude bedeckte Fläche	Öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude, insb. Straßen	Private versiegelte Fläche ohne Gebäude	Niedrige Vegetation (Rasen, Garten, ...)	Gehölz, Hecken, Gebüsch
Ackerland	701 qm	388 qm	1162 qm	2049 qm	30 qm
Grünland	528 qm	289 qm	866 qm	1515 qm	22 qm
Streuobst	18 qm	9 qm	27 qm	46 qm	1 qm
Gartenland	24 qm	13 qm	38 qm	65 qm	1 qm
Obstbau	6 qm	3 qm	10 qm	17 qm	0 qm
Weinbau	6 qm	3 qm	10 qm	16 qm	0 qm
Sonst. Landwirtschaftsfl.	11 qm	6 qm	17 qm	29 qm	0 qm
Laubholz	45 qm	25 qm	73 qm	127 qm	2 qm
Nadelholz	48 qm	27 qm	81 qm	144 qm	2 qm
Mischholz	42 qm	23 qm	68 qm	117 qm	2 qm
Gehölz	66 qm	36 qm	108 qm	186 qm	3 qm
Heide	5 qm	3 qm	8 qm	14 qm	0 qm
Unland, vegetationsl. Fl.	132 qm	74 qm	221 qm	389 qm	6 qm

Quelle: eigene Auswertung Öko-Institut / GGR auf Basis von Daten des IÖR-Flächenmonitors (IÖR 2023), OpenStreetMap (OSM 2023), Destatis (Destatis 2023), des Greifswald Moor Centrum (Tegetmeyer et al. 2021), des BfN (BfN 2023), des BKG (BKG 2022) sowie einer Luftbildauswertung der Firma mundialis im Auftrag von GGR / Öko-Institut

3.1.4 Neu gepflanzte Bäume

Auch neue Bäume wirken sich auf den Kohlenstoffvorrat aus. Tabelle 6 zeigt die geschätzte durchschnittliche Anzahl an neu gepflanzten Jungbäumen pro Hektar neu entstandener Siedlungsfläche im Außenbereich. Empirische Grundlage bildet die bereits in Kapitel 3.1.2 erwähnte Luftbildauswertung von über 2.000 Hektar Siedlungsfläche, deren Bestandteil auch eine automatisierte Einzelbaumerkennung war.³

³ Details vgl. Kapitel 2.4.4 im Methodikband.

Tabelle 6: Durchschnittliche Anzahl an neu gepflanzten Jungbäumen pro Hektar neu entstandener Siedlungsfläche im Außenbereich

Einzelbäume	Gemeinde Hermsdorf/ Erzgebirge	Stadt München	Vogelsbergkreis *)	Freistaat Bayern *)	Deutschland *)
Neu gepflanzte Jungbäume pro Hektar neu entstandener Siedlungsfläche im Außenbereich	32,4	34,5	31,2	31,1	31,8

Quelle: eigene Auswertung Öko-Institut / GGR auf Basis von Daten des IÖR-Flächenmonitors (IÖR 2023), OpenStreetMap (OSM 2023), Destatis (Destatis 2023), ALKIS (ALKIS 2023), des BKG (BKG 2022) sowie einer Luftbilddauswertung der Firma mundialis im Auftrag von GGR / Öko-Institut

*) Anhand der Flächenneuanspruchnahme 2009-2021 gewichtetes Mittel der enthaltenen Städte und Gemeinden.

In der Interpretation sehen die Autoren zwei zum Teil gegenläufige Zusammenhänge: So werden in Gemeinden mit eher dörflicher Struktur in der Regel geringere städtebauliche Dichten mit mehr Bäumen pro Hektar realisiert als in den Städten. Umgekehrt haben in Gemeinden mit eher dörflicher Struktur Nutzungen mit weniger Bäumen pro Hektar, z. B. Gewerbegebiete, einen höheren Anteil am durchschnittlichen Hektar Flächenneuanspruchnahme als in Gemeinden mit städtischer Struktur.⁴ So kann es – wie in Tabelle 6 gezeigt – vorkommen, dass in einer kleineren Gemeinde (hier: Hermsdorf/Erzgebirge) weniger Bäume pro Hektar Flächenneuanspruchnahme gepflanzt werden als in einer großen Stadt (hier: München).⁵

3.2 Nutzungsänderungen im Innenbereich: Innenentwicklung

Die Innenentwicklung ist ein Mittel, um Flächenneuanspruchnahme zu verringern. In der vorliegenden Studie wurde deshalb auch ermittelt, welche Treibhausgas-Einsparpotenziale sich ergeben würden, wenn alternativ Innenentwicklung betrieben wird. Allerdings verursacht auch die Innenentwicklung eine Treibhausgaswirkung, die berücksichtigt werden muss (s. Kapitel 4, insb. Kapitel 4.1.3).

Nachfolgend wird quantifiziert, welche Nutzungsänderungen im Innenbereich entstehen müssten, um einen Hektar Außenentwicklung durch Innenentwicklung zu ersetzen, d. h. um die im Außenbereich geplanten Nutzungen im Innenbereich zu realisieren.

3.2.1 Bedarf an Innenentwicklung pro Hektar vermiedener Außenentwicklung

Eine detaillierte Beschreibung der methodischen Herangehensweise findet sich in Kapitel 3.2 im Methodikband.

Um zu quantifizieren, wie viel Innenentwicklung es braucht, um einen Hektar Außenentwicklung zu ersetzen, wurde zwischen den Nutzungen mit Gebäuden (Wohnen, Mischnutzungen, besondere funktionale Prägung, Industrie und Gewerbe) und den Nutzungen (fast) ohne Gebäude (Plätze, Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen, sonstige Siedlungsfreiflächen) unterschieden:

⁴ Vgl. hierzu im Detail Kapitel 2.4.4 des Methodikbandes.

⁵ Es handelt sich bei den Kennwerten um Kennwerte für die Gemeindetypkombinationen (siehe Kapitel 2.4.1 im Methodikband), nicht um empirische Einzelwerte der genannten Städte und Gemeinden.

- ▶ Bei den Nutzungen mit Gebäuden wird die Geschossfläche (Wohnen, Mischnutzung, besondere funktionale Prägung) bzw. Baumasse (Industrie und Gewerbe) der vermiedenen Außenentwicklung in der rechnerischen Abschätzung vollständig durch ein entsprechendes Bauvolumen in der Innenentwicklung ersetzt.⁶
- ▶ Bei den Nutzungen (fast) ohne Gebäude wird hingegen davon ausgegangen, dass diese in der Innenentwicklung nicht vollständig ersetzt werden müssen, weil bestehende Infrastrukturen, Plätze und Grünflächen genutzt werden können. Es wird daher davon ausgegangen, dass nur 30 % der Bodenfläche der im Außenbereich entstehenden Plätze, nur 20 % der Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen sowie nur 10 % der sonstige Siedlungsfreiflächen auch in der Innenentwicklung realisiert werden.⁷

3.2.2 Möglichkeiten der Innenentwicklung

Eine detaillierte Beschreibung der methodischen Herangehensweise findet sich in Kapitel 3.3.1 im Methodikband.

Für die bauliche Umsetzung des Bedarfs an Innenentwicklung wird zwischen acht möglichen Formen der Innenentwicklung unterschieden: Innenentwicklung erfolgt zum einen auf Ebene von Einzelgebäuden sowie zum anderen auf der Ebene größerer Entwicklungsflächen (siehe Abbildung 8).

Neue Einzelgebäude entstehen in Baulücken, entweder als Neubau auf unbebauten Grundstücken, als (häufig vergrößerter) Ersatzneubau abgerissener Gebäude oder durch den Bau zusätzlicher Gebäude auf bereits teilweise bebauten Grundstücken, z. B. in Folge einer Grundstücksteilung. Zusätzliche Geschossfläche entsteht zudem durch den Umbau bestehender Einzelgebäude, z. B. durch Aufstockung oder Anbau. Auch die Aktivierung von Leerstand, z. B. durch eine Sanierung, erhöht die genutzte Geschossfläche in einer Gemeinde.

Im Gegensatz zu diesen Projekten an Einzelgebäuden brauchen Vorhaben auf größeren Entwicklungsflächen in der Regel eine neue innere Gebietserschließung. Häufige Formen sind die Nachnutzung von Brachen (z. B. ehemaligen Industrie-, Bahn- oder Kasernenflächen) sowie die Bebauung von Siedlungsfreiflächen (z. B. alten Sportplätzen oder Kleingartenflächen).

⁶ Vgl. Kapitel 3.2.1 im Methodikband. Diese Annahme ist konservativ, die in der Realität Wohnungen in der Innenentwicklung eher kleiner sind als Wohnungen in der Außenentwicklung.

⁷ Vgl. Kapitel 3.2.2 im Methodikband.

Abbildung 8: Unterscheidung von acht möglichen Formen der Innenentwicklung

Form	Innenentwicklung auf der Ebene „Einzelgebäude“						Ebene „Entwicklungsfläche“	
	Neubau			Umbau		Sanierung	Neubau	
	1) Schließung Baulücke	2) Abriss und Neubau	3) Zusätzliche Gebäude	4) Aufstockung, Ausbau Dachg.	5) Anbau	6) Leerstandsaktivierung	7) Brachflächenentwicklung	8) Entw. Siedlungsfreiflächen
vorher								
nachher								
Be-schreibung	Bebauung freier Baugrundstücke	Abriss bestehender Gebäude und Ersatz durch neue, oft größere Gebäude	Zusätzliche Gebäude auf bereits bebauten Grundstücken (auch „Pfeifenstiel“)	Zusätzliche Etagen auf bestehende Gebäude ohne zusätzliche Flächenüberbauung	Seitliche Erweiterung bestehender Gebäude	Keine bauliche Veränderung (außer ggf. Sanierung)	Nachnutzung ungenutzter baulich geprägter Siedlungs- und Verkehrsflächen, oft mit neuer Erschließung	Bebauung bisheriger Siedlungsfreiflächen (z.B. Sportplätze, Kleingärten, Parks) ggf. mit neuer Erschließung

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

3.2.3 Gemeindespezifische Nutzungsänderung im Zuge der Innenentwicklung

Als Projektergebnis liegt für jede Gemeinde in Deutschland eine Nutzungsänderungsmatrix für die Innenentwicklung vor (siehe Tabelle 7). Diese hat eine ähnliche Struktur wie die Nutzungsänderungsmatrix der Außenentwicklung in Kapitel 3.1.3. Zu beachten ist, dass alle Nutzungsänderungen als Hektar pro Hektar vermiedene Außenentwicklung (und nicht pro Hektar Innenentwicklung) zu verstehen sind. Aus diesem Grund ist die Summe der Einzelwerte der Matrix auch nicht (wie in Tabelle 5 in Kapitel 3.1.3) 1 Hektar, sondern die Summe der Nutzungsänderungen in den jeweiligen Gemeinden beträgt weniger als 1 Hektar. Dies hat zwei Gründe:

- ▶ Es wird weniger als ein Hektar Innenentwicklungsfläche⁸ benötigt, um einen Hektar Außenentwicklungsfläche zu ersetzen. So werden zum einen gemäß Kapitel 3.2.1 in der Innenentwicklung deutlich weniger Plätze, Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen sowie sonstige Siedlungsfreiflächen geschaffen als in der ersetzten Außenentwicklung, weil vorhandene Flächen und Infrastrukturen mitgenutzt werden können. Zum anderen wird in der Innenentwicklung tendenziell dichter gebaut als in der Außenentwicklung.
- ▶ Bei Innenentwicklungsmaßnahmen werden einige Teilflächen der Plangebiete nicht baulich verändert, z. B. bestehende Gebäude oder Erschließungsflächen sowie Randstreifen der Grünanteile.

Tabelle 7 zeigt dies beispielhaft anhand der Nutzungsänderungsmatrix der Innenentwicklung für die bereits mehrfach als Beispiel genutzte Gemeinde Ebstorf.

⁸ Nähere Ausführungen zum Flächenbedarf der Innenentwicklungsformen finden sich in Kapitel 3.3.2 im Methodikband.

Tabelle 7: Nutzungsänderungsmatrix der Innenentwicklung pro Hektar vermiedene Außenentwicklung in der Beispielgemeinde Ebstorf

Nach der Innenentwicklungsmaßnahme Vor der Innenentwicklungsmaßnahme	Durch Gebäude bedeckte Fläche	Öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude, insb. Straßen	Private versiegelte Fläche ohne Gebäude	Niedrige Vegetation (Rasen, Garten, ...)	Gehölz, Hecken, Gebüsch
Durch Gebäude bedeckte Fläche	0 qm	8 qm	0 qm	5 qm	0 qm
Öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude, insb. Straßen	0 qm	0 qm	0 qm	0 qm	0 qm
Private versiegelte Fläche ohne Gebäude	122 qm	56 qm	0 qm	49 qm	0 qm
Niedrige Vegetation (Rasen, Garten, ...)	838 qm	152 qm	850 qm	2.827 qm	0 qm
Gehölz, Hecken, Gebüsch	1 qm	21 qm	38 qm	6 qm	0 qm

Quelle: eigene Auswertung und Darstellung, Öko-Institut / GGR

Die Nutzungsänderungsmatrix der Innenentwicklung weist noch eine weitere Besonderheit auf. So wird ein nicht unerheblicher Wert für die „Nutzungsänderung“ von Flächen mit niedriger Vegetation in (erneut) Flächen mit niedriger Vegetation ausgewiesen. Obwohl sich die Nutzungsart vom „vorher“- in den „nachher“-Zustand nicht ändert, kann der Vorgang mit einem Kohlenstoffverlust verbunden sein, beispielsweise weil durch die Bautätigkeit die Rasenfläche stark beansprucht wird oder weil der Oberboden zunächst vollständig abgeschoben wurde und anschließend wieder mit niedriger Vegetation bepflanzt wurde, siehe Kapitel 4.1.3.

3.2.4 Verlust an Bestandsbäumen im Zuge der Innenentwicklung

Maßnahmen der Innenentwicklung können mit einem Verlust an Bestandsbäumen verbunden sein. Dies gilt, obwohl bereits eine Reihe von Städten und Gemeinden Bestandsbäume durch entsprechende Satzungen schützen.

Wie in Kapitel 3.4.2 im Methodikband genauer beschrieben, wurde für jede der acht Innenentwicklungsformen festgelegt, wie viele Bestandsbäume pro Hektar Innenentwicklung verloren gehen. Dafür liegt keine empirische Grundlage vor, sondern das Vorgehen basiert auf Beispielprojekten.⁹ Daraus ergibt sich, dass im bundesweit gewichteten Mittel¹⁰ etwa 3,4

⁹ Aus Sicht der Autoren stellt eine empirische Quantifizierung der Anzahl an durch Innenentwicklungsmaßnahmen verloren gehenden Bestandsbäumen eine Forschungslücke dar, der das Umweltbundesamt oder andere Institutionen des Bundes oder der Länder in Zukunft nachgehen könnten.

¹⁰ Gewichtet am Anteil der Städte und Gemeinden an der bisherigen Flächenneuanspruchnahme (2009-2021) sowie an dem Anteil der acht Innenentwicklungsformen am Gesamtvolumen der Innenentwicklung in den einzelnen Gemeinden.

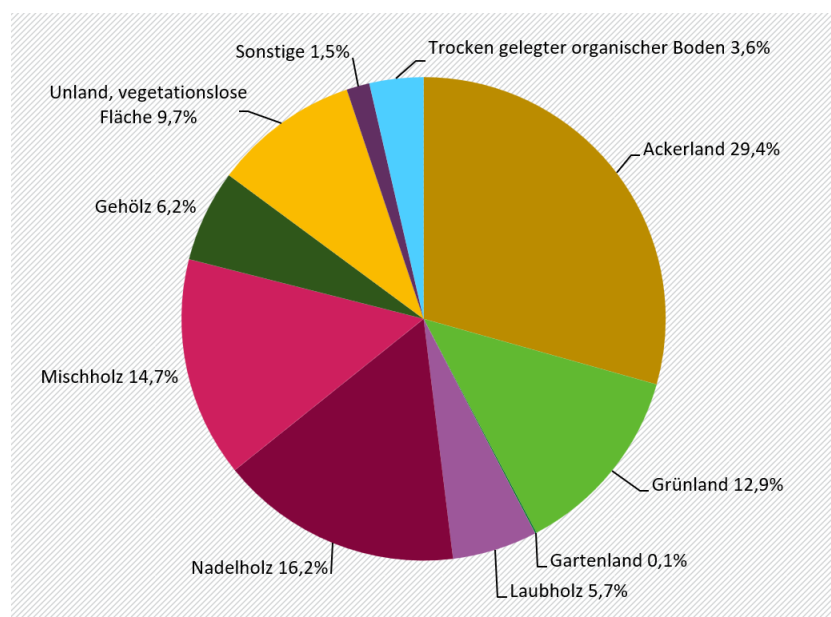
Bestandsbäume pro Hektar vermiedener Außenentwicklung durch Maßnahmen der Innenentwicklung verloren gehen¹¹.

3.3 Außerörtliche Verkehrsflächen

3.3.1 Flächennutzung vor der Flächenneuanspruchnahme

Hinsichtlich der Flächenneuanspruchnahme für außerörtliche Verkehrsflächen wurde nicht zwischen den Gemeinden differenziert, da deren individuelle Eigenschaften (Anteile der Vornutzungen, Flächenanteile der realisierten Nutzungen, städtebauliche Dichte) für die deutschlandweit relativ einheitlichen Verkehrsanlagen außerhalb der Siedlungsbereiche nicht berücksichtigt werden müssen. Bei allen in diesem Kapitel genannten Werten handelt es sich daher um bundesweite Kennwerte. Abbildung 9 stellt das Ergebnis für die Vornutzungen dar.

Abbildung 9: Flächenanteile der Vornutzungen pro Hektar Flächenneuanspruchnahme für außerörtliche Verkehrsflächen im bundesweiten Mittel



Quelle: eigene Auswertung Öko-Institut / GGR auf Basis von Daten des IÖR-Flächenmonitors (IÖR 2023), des Greifswald Moor Centrum (Tegetmeyer et al. 2021), Destatis (Destatis 2023) sowie des BKG (BKG 2022)
Trocken gelegte organische Böden sind anders als in Tabelle 12 im Methodikband separat ausgewiesen.

Im Vergleich zur Flächenneuanspruchnahme für Siedlungs- und Verkehrsflächen im Siedlungsbereich (Abbildung 6) werden mehr Waldflächen umgenutzt.¹²

3.3.2 Flächennutzung nach der Flächenneuanspruchnahme

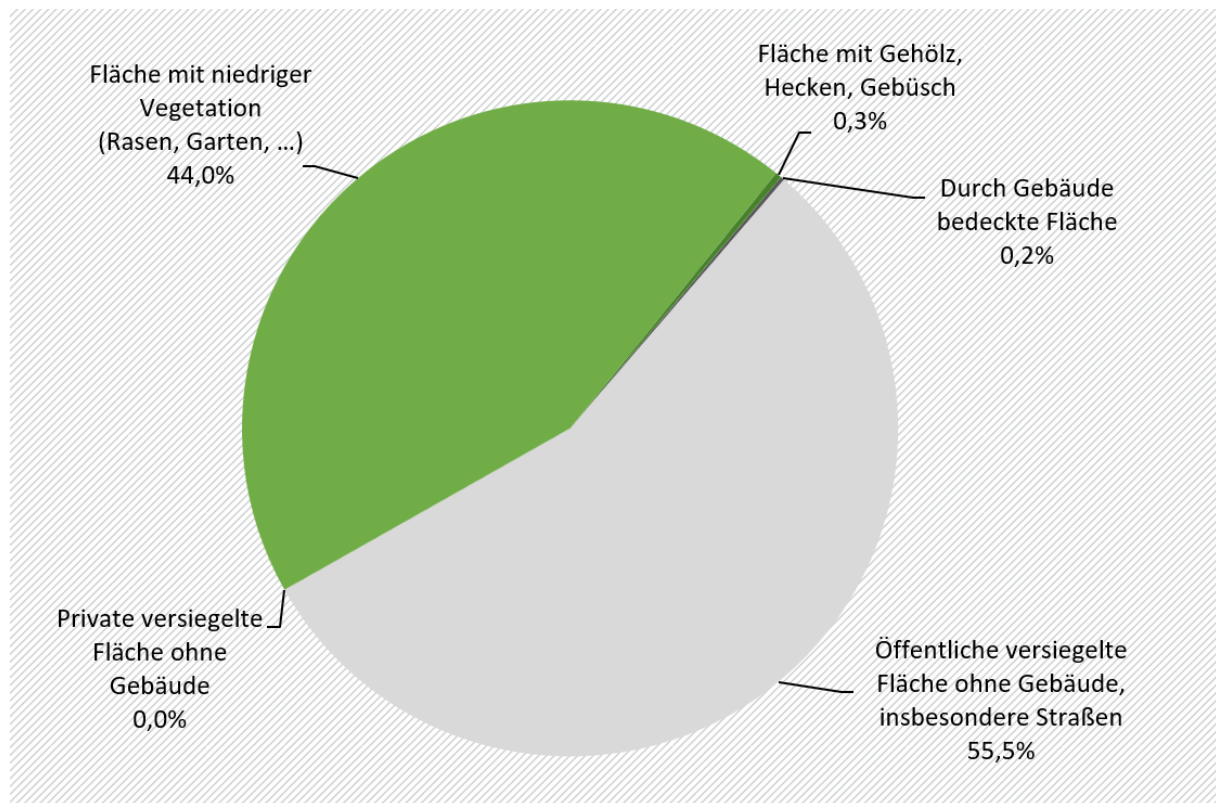
Abbildung 10 stellt das Ergebnis für den Zustand „nach der Flächenneuanspruchnahme“ dar. Die außerörtlichen Verkehrsflächen setzen sich vor allem aus öffentlichen Versiegelungsflächen ohne Gebäude sowie aus Flächen mit niedriger Vegetation zusammen. Letzteres sind im

¹¹ In Kapitel 4.3.1 wird ein Szenario vorgestellt, bei dem u. a. von einem behutsameren Umgang mit Grünflächen und Bestandsbäumen im Zuge von Innenentwicklungsmaßnahmen ausgegangen wird. In diesem Fall wird im bundesweit gewichteten Mittel von etwa 1,5 Bäumen pro Hektar vermiedene Außenentwicklung ausgegangen, die durch ersetzende Maßnahmen der Innenentwicklung im Innenbereich verloren gehen.

¹² Details zur Herleitung finden sich in Kapitel 2.6.1 im Methodikband.

Wesentlichen die Flächen des Verkehrsbegleitgrüns. Auf die hierauf befindlichen Bäume geht Kapitel 3.3.4 gesondert ein.

Abbildung 10: Flächenanteile nach der Flächenneuanspruchnahme für außerörtliche Verkehrsflächen pro durchschnittlichem Hektar im bundesweiten Mittel



Quelle: eigene Auswertung Öko-Institut / GGR auf Basis von Daten des IÖR-Flächenmonitors (IÖR 2023), OpenStreetMap (OSM 2023), ALKIS (ALKIS 2023), des BKG (BKG 2022) sowie einer Luftbildauswertung der Firma mundialis im Auftrag von GGR / Öko-Institut

3.3.3 Nutzungsänderungen durch die Flächenneuanspruchnahme

Analog zum Vorgehen bzgl. der Entstehung von Siedlungsflächen im Außenbereich (Kapitel 3.1.3) liegt auch bzgl. außerörtlicher Verkehrsflächen eine bundesweite Nutzungsänderungsmatrix als Projektergebnis vor. Diese findet sich in Kapitel 2.6.3 im Methodikband.

3.3.4 Neupflanzung von Bäumen im Zuge der Realisierung außerörtlicher Verkehrsflächen

Im Mittel werden pro Hektar Flächenneuanspruchnahme für außerörtliche Verkehrsflächen etwa 13 Jungbäume gepflanzt (siehe Kapitel 2.6.4 im Methodikband).

4 Treibhausgaseinsparpotenziale einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme: LULUCF

Dem vorliegenden Projekt lag folgende Kernfrage zugrunde:

- ▶ Welche Treibhausgaswirkungen entstehen durch die Flächenneuanspruchnahme in Deutschland und welche Minderungspotenziale lassen sich durch eine reduzierte Flächenneuanspruchnahme erschließen?

Dieses Kapitel 4 beantwortet die obenstehende Frage hinsichtlich den LULUCF-bedingten Treibhausgaswirkungen. Die Treibhausgaswirkung, die sich aus der Errichtung und Nutzung von Infrastrukturen und Gebäuden ergibt, wird in Kapitel 5 behandelt. Die LULUCF-bedingten Wirkungen stehen im Fokus des vorliegenden Projekts.

4.1 Treibhausgaswirkungen pro Hektar ungenutzter Fläche

4.1.1 Überblick

Die Treibhausgaswirkung der Flächenneuanspruchnahme ergibt sich bzgl. des LULUCF-Aspekts aus Veränderungen in der Flächennutzung. Wird eine bestimmte Vorher-Nutzung in eine bestimmte Nachher-Nutzung überführt, ergeben sich Veränderungen im Kohlenstoffvorrat in Boden und Vegetation mit entsprechenden Treibhausgaswirkungen. Abbildung 11 zeigt

- ▶ das Ergebnis für eine durchschnittlichen Außenentwicklungsmaßnahme in Deutschland und
- ▶ die sechs Einzeleffekte, aus denen sich die LULUCF-bedingte Treibhausgaswirkung der Flächenneuanspruchnahme zusammensetzt.

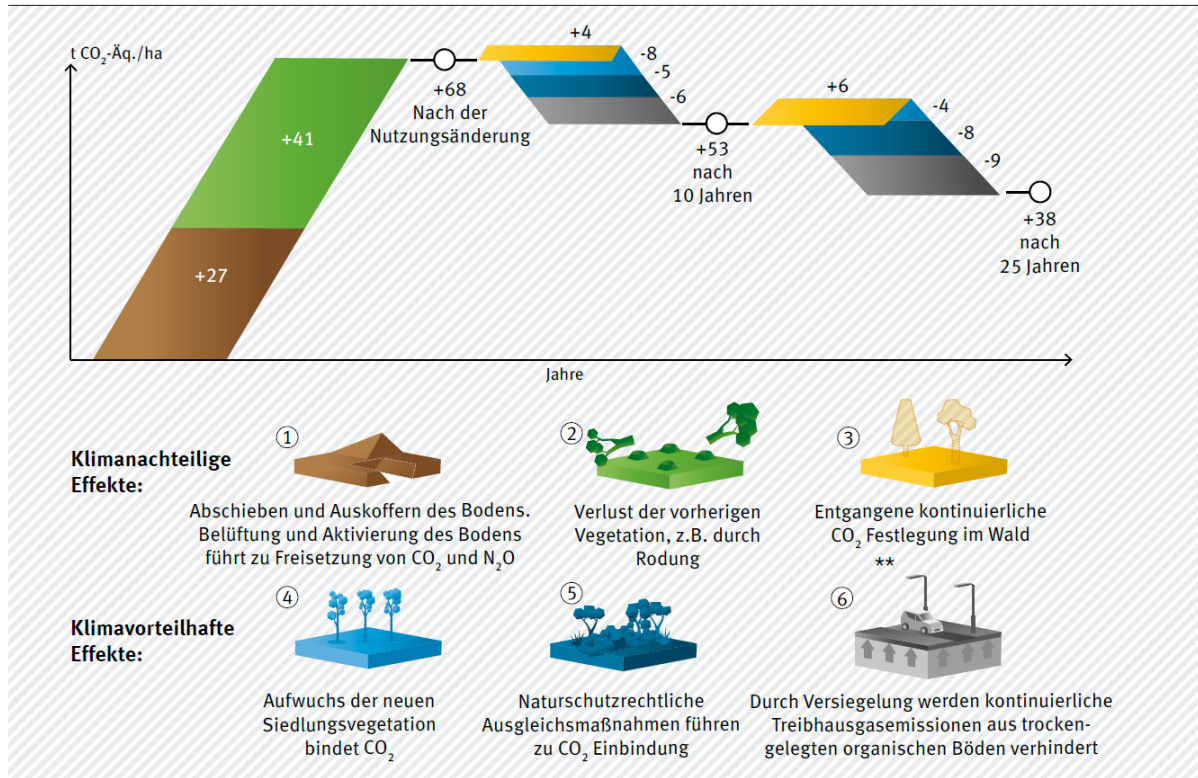
LULUCF-bedingt verursacht eine durchschnittliche Außenentwicklungsmaßnahme in Deutschland pro Hektar knapp 40 t CO₂-Äq. Dabei sind drei für das Klima nachteilige Effekte (obere Hälfte von Abbildung 11) und drei für das Klima vorteilhafte Effekte (untere Hälfte) zu unterscheiden. Die Auswirkungen durch das Abschieben bzw. Auskoffern des Bodens (Effekt 1) und durch den Verlust der vorherigen Vegetation (Effekt 2) entstehen unmittelbar bei der Nutzungsänderung. Alle anderen Effekte sind kontinuierliche Effekte, deren Wirkungen Jahr für Jahr nach der Nutzungsänderung entstehen. Auf der klimanachteiligen Seite zählt hierzu, dass die verlorene Waldvegetation in Zukunft keinen zusätzlichen Kohlenstoff mehr einlagern kann (Effekt 3).

Die drei klimanachteiligen Wirkungen werden durch die Kohlenstoffeinbindung in der aufwachsenden neuen Vegetation auf der neuen Siedlungs- und Verkehrsfläche (Effekt 4) sowie die Anreicherung von Kohlenstoff in Boden und Vegetation aufgrund von naturschutzrechtlichen Ausgleichsmaßnahmen (Effekt 5) teilweise kompensiert.

Ein Sonderfall sind Nutzungsänderungen auf trockengelegten organischen Böden (Effekt 6). Hier kann eine Versiegelung dazu beitragen, die kontinuierlichen Treibhausgasemissionen zu verringern. Dies gilt aber nur für wenige Standorte in Deutschland. Das Thema wird in Kapiteln 4.1.4 und 4.4.1 detailliert behandelt.

Abbildung 11: LULUCF-bedingte Treibhausgaswirkungen einer durchschnittlichen Außenentwicklungsmaßnahme in Deutschland

Treibhausgaswirkungen des Flächenverbrauchs (LULUCF)
Wirkung einer durchschnittlichen Außenentwicklungsmaßnahme
 in Tonnen CO₂-Äquivalente* pro Hektar



* Da neben CO₂ teilweise auch andere Treibhausgase wie Methan oder Lachgas eine Rolle spielen, werden die Treibhausgaswirkungen mithilfe der aktuellen IPCC-Umrechnungsfaktoren in der Einheit „CO₂-Äquivalente“ („CO₂-Äq.“) angegeben.
 ** Effekt 6 umfasst mitunter auch veränderte Emissionsfaktoren durch Nutzungsänderungen ohne Versiegelung.
 Weitere klimarelevante Effekte (nicht quantifiziert): Anstieg des Kohlenstoffvorrats im Boden nach Nutzungsänderung in Siedlungsfläche, u. a. durch Düngung und Bewässerung; Auf dem umgenutzten Standort verringerte landwirtschaftliche Aktivität (Düngemittel, Traktor, ...); Indirekte Landnutzungsänderungen/Verdrängungseffekte; Veränderte Oberflächenalbedo.

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

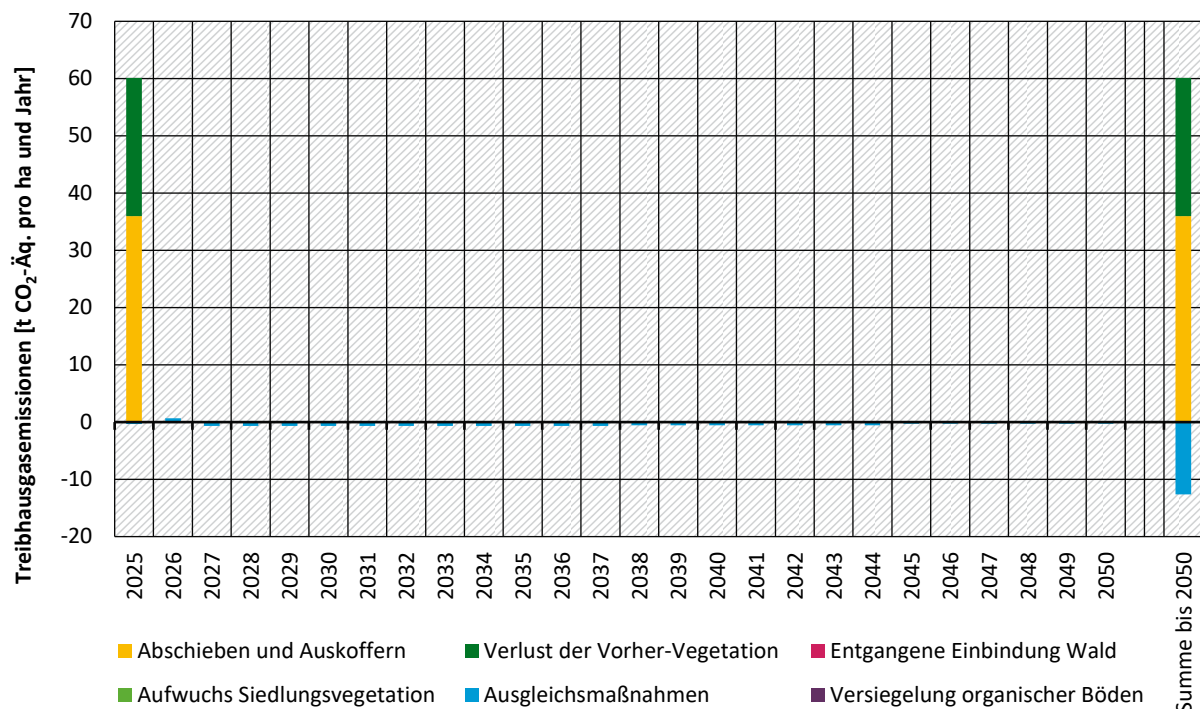
Alle Details zur Definition der sechs Effekte, zur Methodik und den Berechnungsalgorithmen sind im separaten Methodikband in Kapitel 4.1 bis 4.8 dokumentiert. Darin sind auch die Aspekte, die in Abbildung 11 unten links unter „Weitere klimarelevante Aspekte (nicht quantifiziert)“ genannt sind, im Detail beschrieben und Begründungen für die standardmäßige Nichtberücksichtigung angeführt.

4.1.2 Beispielhafte Außenentwicklungsmaßnahmen auf mineralischem Boden

Das in Abbildung 11 dargestellte Ergebnis für eine durchschnittliche Außenentwicklungsmaßnahme in Deutschland setzt sich aus den Ergebnissen für unterschiedliche Nutzungsänderungen zusammen. Entsprechend gehen die Ergebnisse für sämtliche Nutzungsänderungen, d. h. für bestimmte Vorher-Nachher-Konstellationen, mit ein. Einige Nutzungsänderungsbeispiele sind im Folgenden dargestellt. Der entwickelten Methodik entsprechend werden stets Nutzungsänderungsbeispiele aufgeführt, die eine bestimmte Vorher-Nutzung in eine bestimmte Nachher-Nutzung überführen. Die dem Projekt zugrundeliegenden Nutzungsarten sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Abbildung 12 zeigt exemplarisch die Treibhausgaswirkung von der Nutzungsänderung von 1 Hektar Ackerland in 1 Hektar versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche auf mineralischem Boden im Jahr 2025.¹³

Abbildung 12: Treibhausgaswirkung der Nutzungsänderung von 1 Hektar Ackerland in 1 Hektar versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche auf mineralischem Boden im Jahr 2025



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

- ▶ Abschieben und Auskoffern des Bodens im Zuge der Nutzungsänderung (Effekt 1) verursachen etwa 35 t CO₂-Äq. pro Hektar, der Verlust der Vorher-Vegetation (Effekt 2) etwa 25 t CO₂-Äq.
- ▶ Die Treibhausgaswirkung dieser exemplarischen Nutzungsänderung wird von den Wirkungen dominiert, die unmittelbar im Jahr der Nutzungsänderung (im Jahr 2025) eintreten.
- ▶ Ausgleichsmaßnahmen (Effekt 5) kompensieren im Lauf der Jahre einen Teil der klimanachteiligen Wirkung der Nutzungsänderung. In Summe über 25 Jahre werden gut 10 t CO₂-Äq. durch die Ausgleichsmaßnahmen kompensiert.
- ▶ Hinsichtlich dieser Vorher-Nachher-Konstellation weisen Effekte 3, 4 und 6¹⁴ keinen Beitrag zur Treibhausgaswirkung auf.

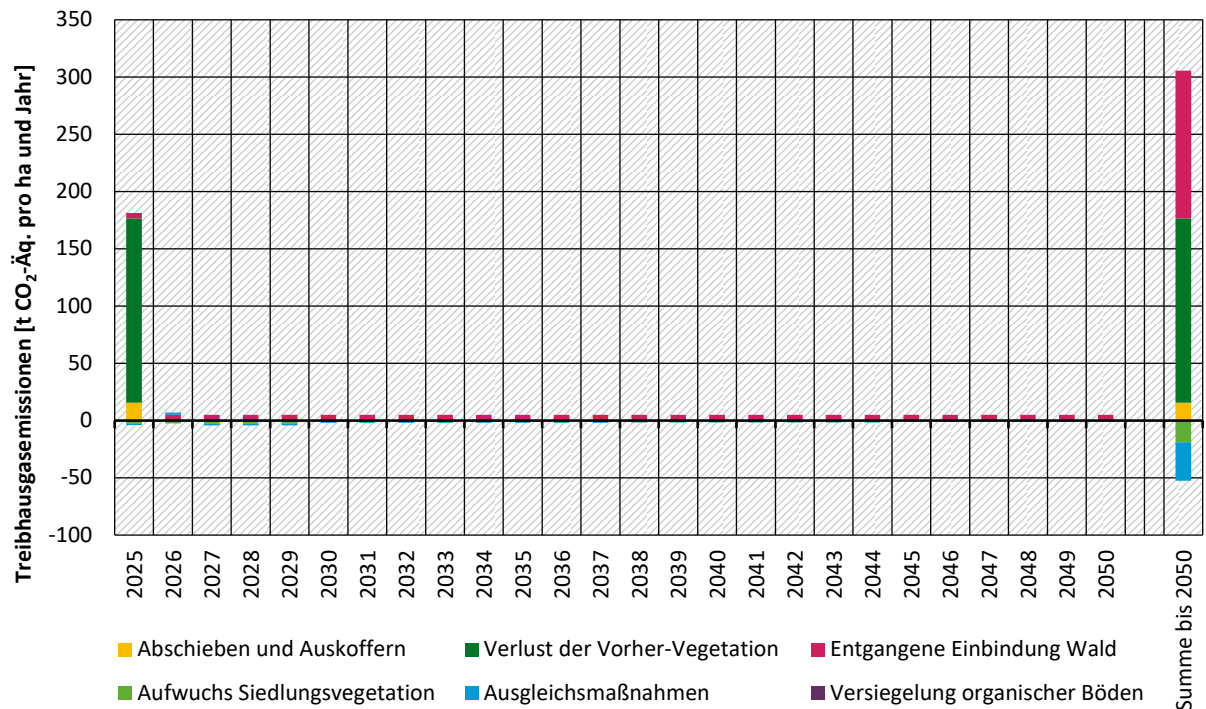
Abbildung 13 zeigt exemplarisch die Treibhausgaswirkung von der Nutzungsänderung von 1 Hektar Laubwald in 1 Hektar Siedlungs- und Verkehrsfläche mit niedriger Vegetation auf

¹³ Dieses Beispiel wird nur in seltenen Fällen eine reelle Flächenneuanspruchnahme abbilden, da sich reelle Flächenneuanspruchnahme aus mehreren Nutzungsänderungen zusammensetzt (z. B. 1 Hektar Ackerland in versiegelte Fläche plus 1 Hektar Ackerland in niedrige Siedlungsvegetation).

¹⁴ Also die entgangene Einbindung in Wäldern (Effekt 3), der Aufwuchs neuer Siedlungsvegetation (Effekt 5) und die Versiegelung organischer Böden (Effekt 6, siehe Abbildung 11).

mineralischem Boden im Jahr 2025 und unter der Annahme, dass unmittelbar nach der Außenentwicklungsmaßnahme 32 Jungbäume¹⁵ gepflanzt werden.

Abbildung 13: Treibhausgaswirkung der Nutzungsänderung von 1 Hektar Laubwald in 1 Hektar Siedlungs- und Verkehrsfläche mit niedriger Vegetation und 32 gepflanzten Jungbäumen auf mineralischem Boden im Jahr 2025



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

- ▶ Verglichen mit der in Abbildung 12 dargestellten Nutzungsänderung von 1 Hektar Ackerland in 1 Hektar versiegelte Fläche fällt die Treibhausgaswirkung von der hier dargestellten Nutzungsänderung von 1 Hektar Laubwald deutlich größer aus: Im Jahr der Nutzungsänderung verursachen die klimanachteiligen Effekte Emissionen in Höhe von ca. 180 t CO₂-Äq. In Summe bis 2050 ergeben sich klimanachteilige Wirkungen von etwa 300 t CO₂-Äq., die durch den Aufwuchs der neuen Siedlungsvegetation und durch Ausgleichsmaßnahmen um etwa 50 t CO₂-Äq. reduziert werden.
- ▶ Über den hier ausgewählten Betrachtungszeitraum bis 2050 ist die Treibhausgaswirkung der entgangenen CO₂-Einbindung im Wald (Effekt 3, siehe Abbildung 11) annähernd so groß, wie die Treibhausgaswirkung durch den Verlust der Vorher-Vegetation im Laubwald (Effekt 2). Dabei ist zu berücksichtigen, dass Wäldern, die in Siedlungs- und Verkehrsfläche umgenutzt werden, ein vergleichsweise niedriger Kohlenstoffvorrat in der Vegetation von etwa 40 t Kohlenstoff pro Hektar zugewiesen ist, der vom Thünen-Institut für sogenannte Entwaldungsflächen bestimmt wurde (siehe auch Kapitel 4.3 im Methodikband).

4.1.3 Nutzungsänderungen aufgrund von Innenentwicklung

Auch Innenentwicklungsmaßnahmen weisen eine LULUCF-bedingte Treibhausgaswirkung auf. Sie lässt sich analog zur Wirkung von Außenentwicklungsmaßnahmen berechnen.

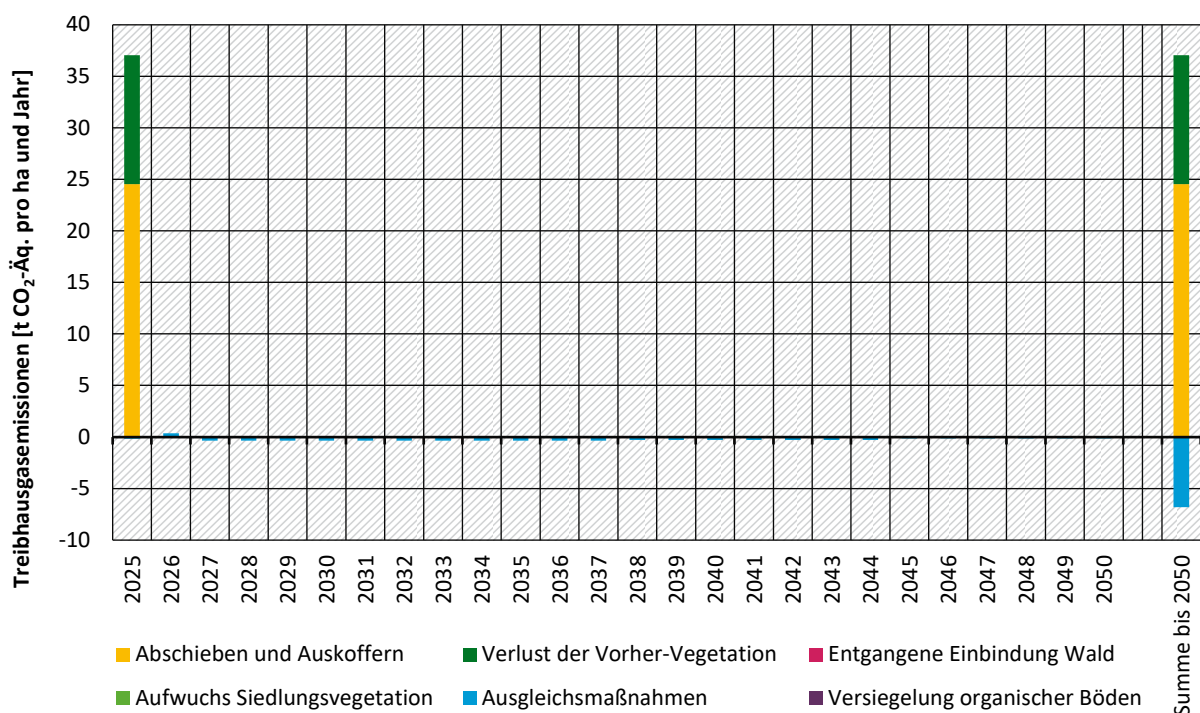
¹⁵ Siehe Kapitel 3.1.4.

Innenentwicklungsmaßnahmen weichen dadurch von Außenentwicklungsmaßnahmen ab, dass es sich bei der Vorher-Nutzung um eine der drei folgenden Nutzungen handelt

- ▶ Versiegelte Fläche
- ▶ Fläche mit niedriger Vegetation (Rasen, Garten, ...)
- ▶ Fläche mit Gehölz, Hecken, Gebüsch

Abbildung 14 zeigt exemplarisch die Treibhausgaswirkung von der Nutzungsänderung von 1 Hektar Siedlungs- und Verkehrsfläche mit niedriger Vegetation in 1 Hektar versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche auf mineralischem Boden im Jahr 2025.

Abbildung 14: Treibhausgaswirkung der Nutzungsänderung von 1 Hektar Siedlungs- und Verkehrsfläche mit niedriger Vegetation in 1 Hektar versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche auf mineralischem Boden im Jahr 2025

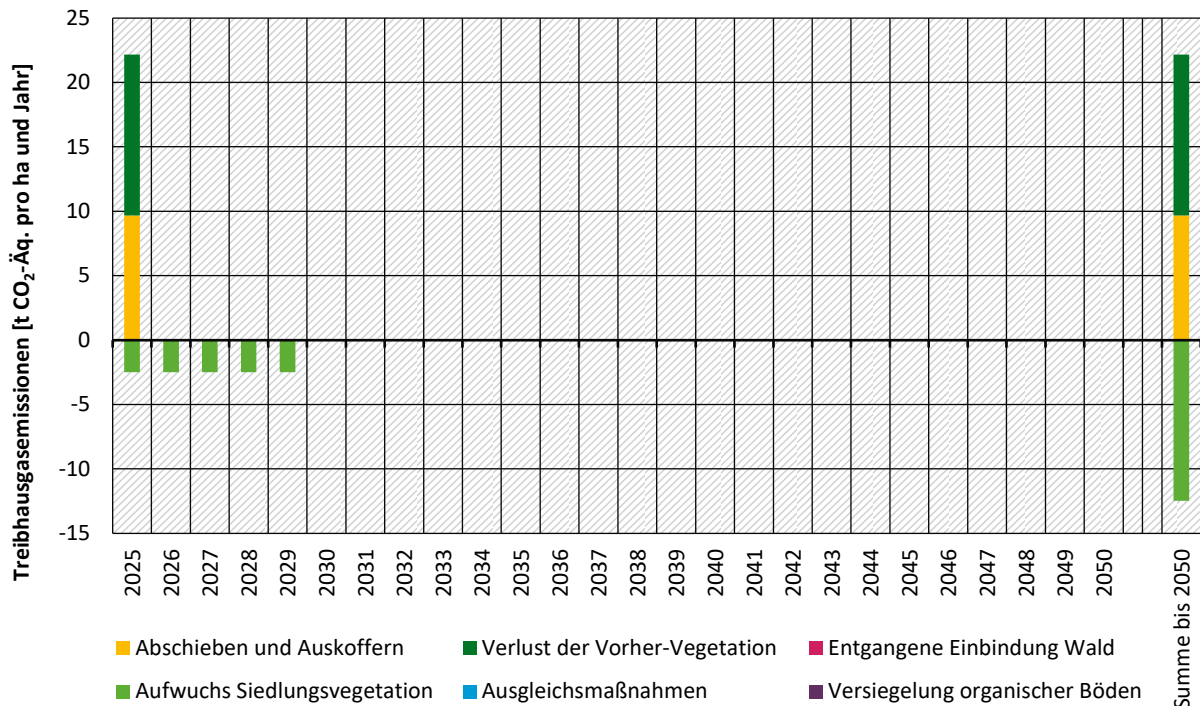


Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

- ▶ Die abgebildete exemplarische Nutzungsänderung führt zu Treibhausgasemissionen in Höhe von gut 35 t CO₂-Äq. im Jahr der Nutzungsänderung. Durch Ausgleichsmaßnahmen wird diese Wirkung um gut 5 t CO₂-Äq. reduziert. Damit liegt das Ergebnis lediglich etwa 30 % geringer als das Ergebnis für die Versiegelung von 1 Hektar Ackerland (siehe Abbildung 12).

Ein Sonderfall bei der Innenentwicklung ergibt sich, wenn Flächen im „vorher“- und im „nachher“-Zustand mit niedriger Vegetation bestanden sind. Konservativ wird davon ausgegangen, dass solche „Nutzungsänderungen“ mit denselben Treibhausgasemissionen verbunden sind, die sich für den Fall ergeben, dass die Fläche zunächst abgeschoben wird und anschließend wieder mit niedriger Vegetation bepflanzt wird. Abbildung 15 zeigt die Treibhausgaswirkung dieser „Nutzungsänderung“.

Abbildung 15: Treibhausgaswirkung der „Nutzungsänderung“ von 1 Hektar Siedlungs- und Verkehrsfläche mit niedriger Vegetation in 1 Hektar Siedlungs- und Verkehrsfläche niedriger Vegetation auf mineralischem Boden im Jahr 2025



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

- Die Treibhausgaswirkung dieser „Nutzungsänderung“ beträgt in Summe über den Betrachtungszeitraum konservativ knapp 10 t CO₂-Äq. Die Freisetzung des Kohlenstoffs durch den Verlust der Vorher-Vegetation wird binnen 5 Jahren wieder vollständig durch den Aufwuchs der neuen niedrigen Vegetation ausgeglichen. Die Wirkung des Eingriffs in den Boden hingegen bleibt im Saldo bestehen.

Zusammenfassend gilt für Nutzungsänderungen aufgrund von Innenentwicklung:

- Die LULUCF-bedingte Treibhausgaswirkung von Innenentwicklungsmaßnahmen ist eine relevante Größe, die für eine vollständige Abbildung der Treibhausgaswirkung der Siedlungsentwicklung zu berücksichtigen ist.
- Die entwickelte Methode ist geeignet, um auch die LULUCF-bedingte Treibhausgaswirkung von Innenentwicklungsmaßnahmen abzubilden.

4.1.4 Nutzungsänderungen auf organischen Böden

Es gibt mineralische und organische Böden in Deutschland. Organische Böden sind Moorböden, Moorfolgeböden oder Anmoore, die über lange Zeiträume große Mengen an Kohlenstoff gebunden haben. Organische Böden weisen wesentlich höhere Kohlenstoffvorräte im Boden auf als mineralische Böden (Flessa et al. 2019). Organische Böden bedecken ungefähr 5 % der Landesfläche von Deutschland (Wittnebel et al. 2023).

In Deutschland sind weite Teile der organischen Böden durch den Menschen, z. B. zum Torfabbau und anschließender landwirtschaftlicher Nutzung, trockengelegt worden. Sobald organische Böden trockengelegt werden, gelangt Sauerstoff in den Boden und der kohlenstoffreiche Torf wird zersetzt. So gelangt der Bodenkohlenstoff in Form von CO₂ in die

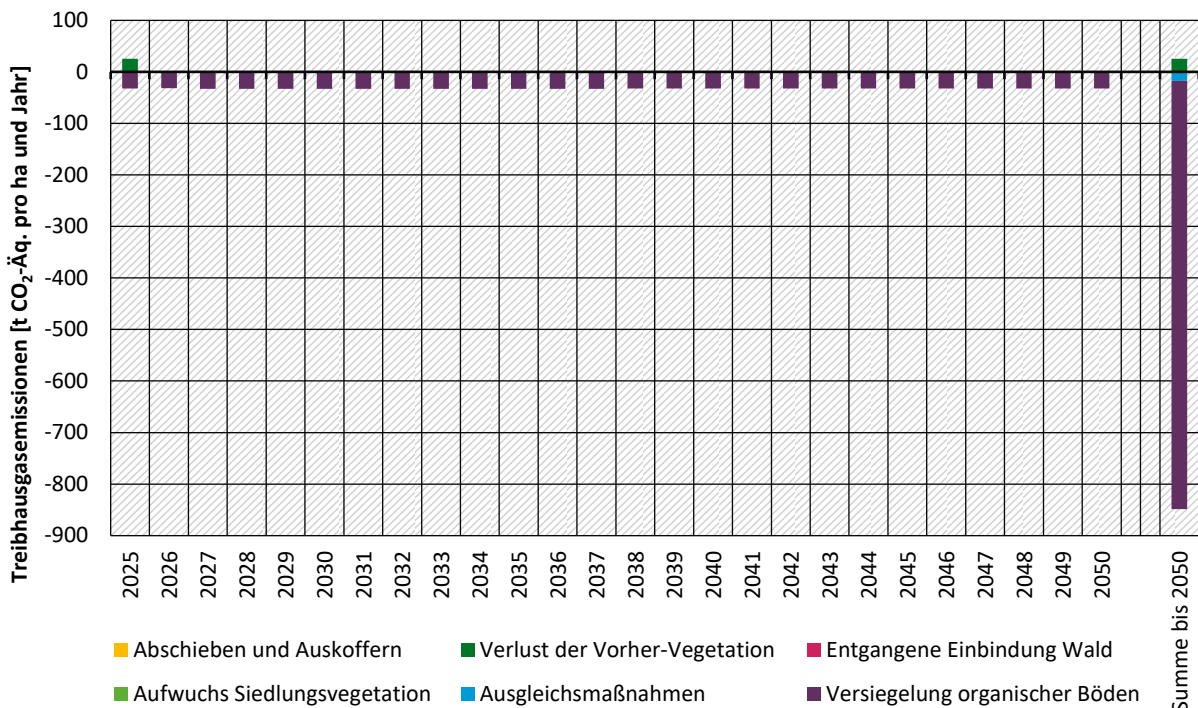
Atmosphäre. Dieser Jahrzehnte bis Jahrhunderte andauernde kontinuierliche Prozess ist aktuell für ca. 7 % der jährlichen Treibhausgasemissionen Deutschlands verantwortlich.

In Deutschland sind intakte d. h. feuchte organische Böden mittlerweile weitgehend geschützt. Es gibt zwar in Ausnahmefällen noch Planungen, die eine Trockenlegung vorsehen. In einem konservativen Ansatz liegt diesem Projekt aber die Annahme zugrunde, dass es keine Trockenlegungen von intakten organischen Böden aufgrund von Flächenneuanspruchnahmen oder Nutzungsänderungen in der Innenentwicklung mehr gibt.

Wo Nutzungsänderungen zu Siedlungs- und Verkehrsflächen auf organischen Böden stattfinden, wird stattdessen angesetzt, dass die Böden bereits trockengelegt sind. Das heißt, dass auf diesen Flächen im Vorher-Zustand bereits große kontinuierliche Treibhausgasemissionen auftreten.

Werden trockengelegte organische Böden im Zuge von Nutzungsänderungen versiegelt, ist standardmäßig angesetzt, dass die kontinuierliche Emission, die ansonsten stattgefunden hätte, dadurch unterbunden wird. Dieser kontinuierlich wirkende, d. h. jährlich zu verbuchende, Effekt ist standardmäßig in sämtlichen Berechnungen als Effekt 6 „Versiegelung organischer Böden“ berücksichtigt (siehe auch Abbildung 11 sowie Kapitel 4.8 im Methodikband). Die Wirkung dieses Effekts ist außerordentlich groß, wie Abbildung 16 exemplarisch anhand der Nutzungsänderung von 1 Hektar Grünland zu 1 Hektar versiegelter Siedlungs- und Verkehrsfläche auf organischem Boden zeigt.

Abbildung 16: Treibhausgaswirkung der Nutzungsänderung von 1 Hektar Grünland in 1 Hektar versiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche auf organischem Boden im Jahr 2025



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

In Summe bewirkt die Versiegelung von 1 Hektar Grünland auf organischen Böden über den Zeitraum von 2025 bis 2050 eine Treibhausgaseinsparung von über 800 t CO₂-Äq. und kann damit die Versiegelung von etwa 15 Hektar Ackerland auf mineralischem Boden hinsichtlich der Treibhausgaswirkung ausgleichen (siehe Abbildung 12). Entsprechend können schon geringe Nutzungsänderungen auf organischem Boden großen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben.

Es wurden bisher allerdings noch keine konkreten wissenschaftlichen Untersuchungen zu den Treibhausgasemissionen von Bauvorhaben auf trockengelegten organischen Böden durchgeführt. Insbesondere bei den Wirkungen, die sich durch eine Verbringung des abgeschobenen und ausgekofferten Bodens ergeben, bestehen Unsicherheiten. Wird der Boden auf einer anderen Fläche mit organischem Boden verbracht, geht der verbrachte organische Boden aus, der überdeckte organische Boden wird aber geschützt. Wird der Boden auf mineralische Flächen ausgebracht, bleibt es nur bei der Ausgasung des verbrachten Bodens. Auch ist noch zu klären, ob die Verbringung des organischen Bodens den Abbau der organischen Substanz beschleunigt, so dass verstärkte klimanachteilige Effekte eintreten würden. Darüber hinaus stehen die bebauten und die angrenzenden Flächen nicht mehr für eine Wiedervernässung als Maßnahme im Moorbodenschutz zur Verfügung. Vor diesem Hintergrund ist eine Bebauung bzw. Versiegelung trockengelegter organischer Böden keine empfehlenswerte Maßnahme zur Verbesserung der Klimabilanz – weder von Einzelvorhaben noch bundesweit.

4.1.5 Zusammenfassung

Die LULUCF-bedingten Treibhausgaswirkungen der Flächenneuanspruchnahme ergeben sich aus Veränderungen in der Flächennutzung. Die im Projekt entwickelte Methodik bildet sämtliche Vorher-Nachher-Konstellationen ab. Die Methodik differenziert sechs unterschiedliche Einzeleffekte, aus deren Summe sich die Treibhausgaswirkung ergibt. Vier der sechs Effekte wirken kontinuierlich, weshalb die Gesamtwirkung davon abhängt, welcher Betrachtungszeitraum gewählt wird. Nutzungsänderungen auf mineralischem und auf organischem Boden lassen sich abbilden. Auch Innenentwicklungsmaßnahmen lassen sich abbilden. Tabelle 8 zeigt die Treibhausgaswirkungen pro Hektar umgenutzter Fläche für sämtliche Vorher-Nachher-Konstellationen auf mineralischem Boden bei einem Betrachtungszeitraum von 2025 bis 2050.

Tabelle 8: Treibhausgaswirkungen sämtlicher Vorher-Nachher-Konstellationen auf mineralischem Boden in Tonnen CO₂-Äq. pro Hektar und 25 Jahren Wirkungszeitraum bei Nutzungsänderung im Jahr 2025

Vor der Flächenneuanspruchnahme \ Nach der Flächenneuanspruchnahme	Siedlungs- und Verkehrsfläche		
	Versiegelte Fläche ¹⁶	Niedrige Vegetation (Rasen, Garten, ...)	Gehölz, Hecken, Gebüsch
Ackerland	42	14	-65
Grünland	52	16	-63
Streuobst	66	29	-49
Gartenland	42	14	-65
Obstbau	66	36	-43
Weinbau	22	-1	-80
Sonstige Landwirtschaftsfläche	42	14	-65

¹⁶ Darin sind die drei Nutzungsarten „Durch Gebäude bedeckte Fläche“, „Öffentliche versiegelte Fläche ohne Gebäude, insbesondere Straßen“ und „Private versiegelte Fläche ohne Gebäude“ zusammengefasst.

Vor der Flächenneuanspruchnahme \ Nach der Flächenneuanspruchnahme	Siedlungs- und Verkehrsfläche		
	Versiegelte Fläche ¹⁶	Niedrige Vegetation (Rasen, Garten, ...)	Gehölz, Hecken, Gebüsch
Laubwald	283	253	174
Nadelwald	301	271	193
Mischwald	292	262	183
Gehölz	201	173	94
Heide	15	-21	-100
Unland	-13	-24	-103
SuV: versiegelt	-	-6	-85
SuV: niedrige Vegetation	34	14	-65
SuV: Gebüsch / Gehölz / Hecken	113	93	14

Positives Vorzeichen: Treibhausgasemission; negatives Vorzeichen: Treibhausgaseinsparung.

Bei der Nutzungsänderung von Freiraumflächen in Siedlungs- und Verkehrsflächen ist stets angesetzt, dass 30 Jungbäume pro Hektar gepflanzt werden, siehe Kapitel 3.1.4 und 3.3.4.

Quelle: eigene Auswertung Öko-Institut / GGR

- ▶ Nutzungsänderungen von Wald sind mit besonders hohen Treibhausgasemissionen verbunden.
- ▶ Auch Nutzungsänderungen von Gehölzen / Hecken sind mit hohen Treibhausgasemissionen verbunden.
- ▶ Auf mineralischem Boden sind Nutzungsänderungen zu Siedlungs- und Verkehrsfläche bei einer aufsummierten Wirkdauer von 25 Jahren stets mit Treibhausgasemissionen verbunden. Die Höhe der Saldoemissionen ist allerdings in vielen Vorher-Nachher-Konstellationen überschaubar. Durch den Aufwuchs der neuen Siedlungsvegetation und die kausal unmittelbar mit der Nutzungsänderung verbundenen naturschutzrechtlichen Ausgleichsmaßnahmen wird in vielen Fällen ein Großteil der klimanachteiligen Wirkungen ausgeglichen.
- ▶ Die klimanachteiligen Wirkungen treten überwiegend unmittelbar im Jahr der Nutzungsänderung ein. Die Kompensation durch Aufwuchs der neuen Siedlungsvegetation und Ausgleichsmaßnahmen erfolgt hingegen erst langsam über Jahre bzw. Jahrzehnte.
- ▶ Nutzungsänderungen auf organischem Boden stellen einen Sonderfall dar. Es wird aktuell davon ausgegangen, dass die Versiegelung des organischen Bodens im Zuge der Nutzungsänderung hohe kontinuierliche Treibhausgaseinsparungen bewirkt. Aufgrund von Unsicherheiten hinsichtlich des Wirkmechanismus und der Einschränkungen bei Wiedervernässungsmaßnahmen sind Nutzungsänderungen zu Siedlungs- und Verkehrsfläche auf organischem Boden nicht empfehlenswert.

4.2 Treibhausgaswirkungen der Flächenneuanspruchnahme Deutschlands

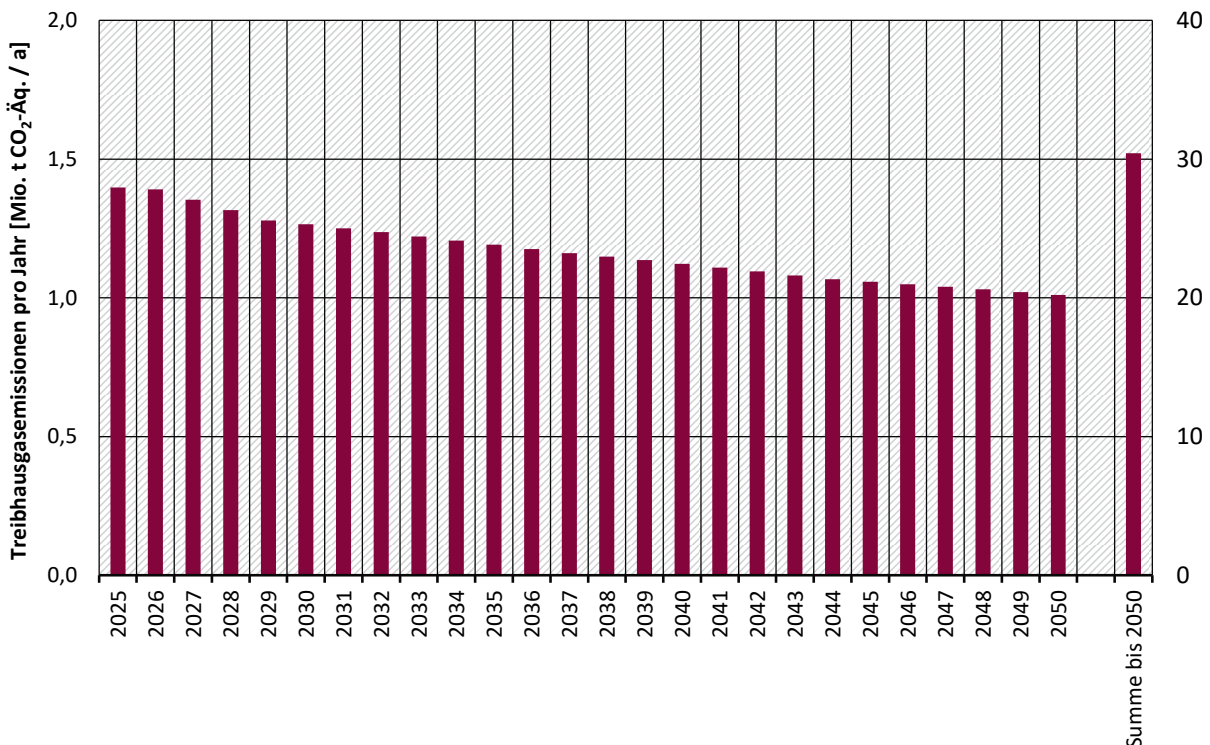
Die LULUCF-bedingte Gesamt-Treibhausgaswirkung der Flächenneuanspruchnahme in Deutschland ergibt sich aus der Summe aller Treibhausgaswirkungen der Nutzungsänderungen. Im Folgenden wird zunächst die Gesamt-Treibhausgaswirkung dargestellt und im Anschluss nach unterschiedlichen Aspekten differenziert. Es wird jeweils unterstellt, dass die Flächenneuanspruchnahme in Deutschland auf dem Niveau von 55 ha pro Tag verbleibt.

4.2.1 Gesamt-Treibhausgaswirkung

Wenn die Flächenneuanspruchnahme in Deutschland auf dem Niveau von 55 ha pro Tag verbleibt, werden dadurch pro Jahr Treibhausgasemissionen in Höhe von etwa 1,0 bis 1,4 Mio. t CO₂-Äq. verursacht (siehe Abbildung 17). In Summe über den Zeitraum von 2025 bis 2050 werden Treibhausgasemissionen in Höhe von etwa 30 Mio. t CO₂-Äq. emittiert.

Die jährlichen Emissionen sinken im Lauf der Jahre von etwa 1,4 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2025 auf etwa 1,0 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2050 ab. Das liegt daran, dass Außenentwicklungsmaßnahmen kurzfristig nennenswerte Treibhausgasemissionen bewirken, mittel- bis langfristig aber auch relevante Mengen an Kohlenstoff wieder eingebunden werden.

Abbildung 17: Treibhausgaswirkung der Flächenneuanspruchnahme in Deutschland (LULUCF) bei 55 ha pro Tag



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

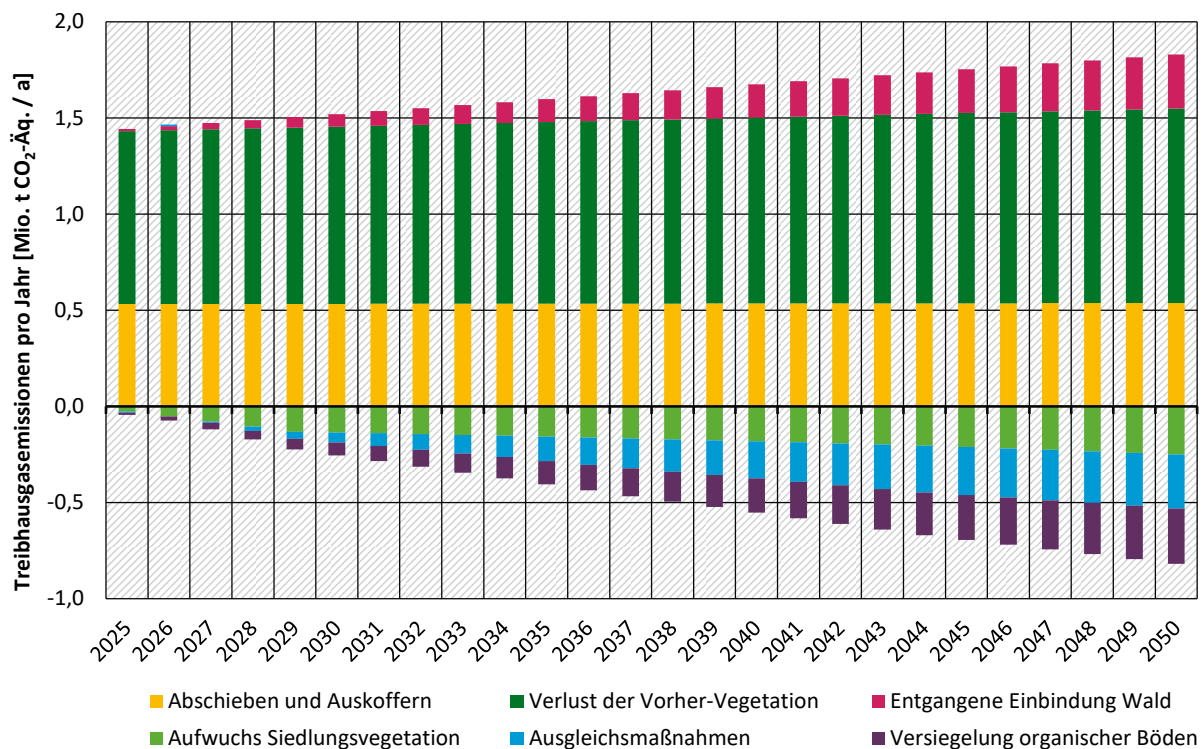
Die Treibhausgasemissionen in Deutschland betragen im Jahr 2022 insgesamt etwa 750 Mio. t CO₂-Äq.; der gesamte LULUCF-Sektor verursachte etwa 55 Mio. t CO₂-Äq. bei einer Senkenleistung von etwa 50 Mio. t CO₂-Äq. (Saldo des LULUCF-Sektors etwa 5 Mio. t CO₂-Äq.) (UBA 2023). Die in Abbildung 17 für das Jahr 2025 dargestellten Emissionen in Höhe von etwa 1,4 Mio. t CO₂-Äq. entsprechen den jährlichen Emissionen der privaten Haushalte der Stadt Frankfurt am Main (ifeu 2023). Vor diesem Hintergrund wird die Größenordnung bzw. die

Relevanz der LULUCF-bedingten Treibhausgaswirkungen der Flächenneuinanspruchnahme als überschaubar, aber nicht irrelevant angesehen.

4.2.2 Differenzierung zwischen den sechs Einzeleffekten

In Abbildung 18 ist dargestellt, aus welchen Einzeleffekten sich die Treibhausgaswirkung der Flächenneuinanspruchnahme in Deutschland zusammensetzt. Einen Überblick über die sechs Einzeleffekte gibt Kapitel 4.1.1. Die in Abbildung 18 dargestellten Emissionen entsprechen im Saldo den in im vorherigen Kapitel dargestellten Emissionen (Vgl. Abbildung 17).

Abbildung 18: Differenzierung der Treibhausgaswirkung der Flächenneuinanspruchnahme in Deutschland nach den sechs Einzeleffekten



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

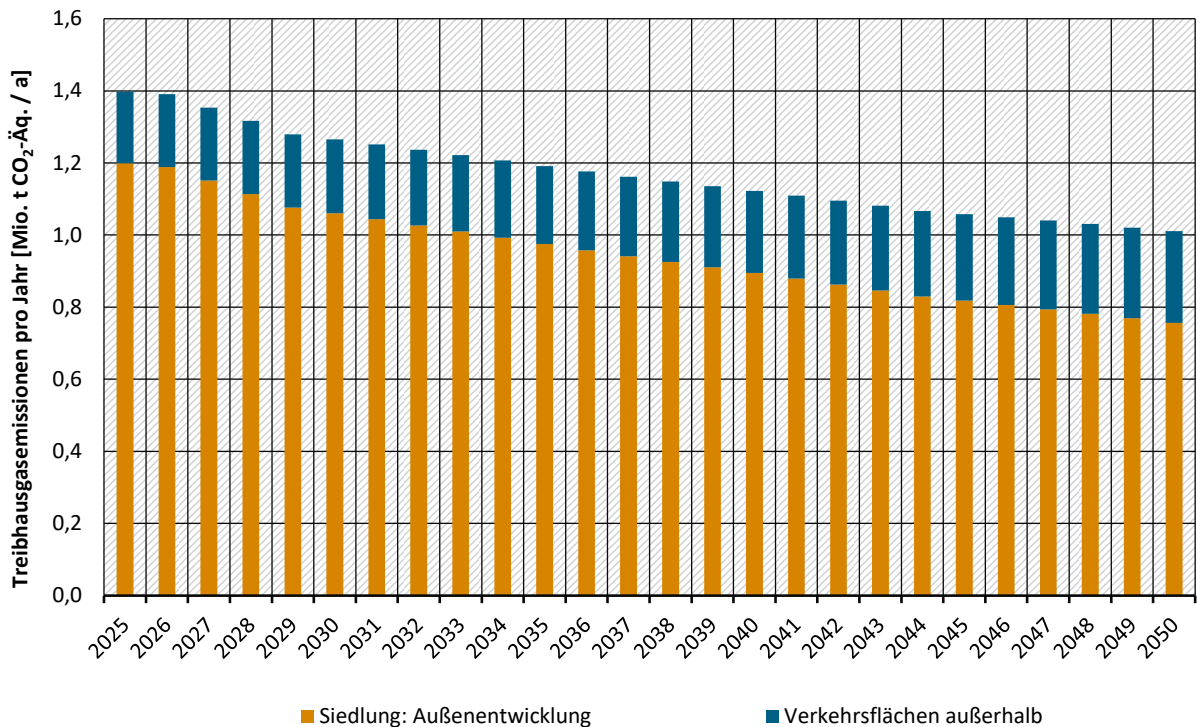
- ▶ Die größte Treibhausgaswirkung ergibt sich aus dem Verlust der Vorher-Vegetation, d. h. aus der Rodung von Wäldern, dem Grünlandumbruch oder anderen Aktivitäten, die zur Freisetzung des in der Vorher-Vegetation gebundenen Kohlenstoffs führen.
- ▶ Die zweitgrößte Treibhausgaswirkung ergibt sich aus dem Abschleiben und Auskoffern.
- ▶ Auch die kontinuierlich wirkenden Effekte – die entgangene Einbindung im Wald, der Aufwuchs der Siedlungsvegetation, die naturschutzrechtlichen Ausgleichsmaßnahmen und die Versiegelung organischer Böden – verursachen sichtbare Treibhausgaswirkungen. Die Höhe der Wirkungen dieser Effekte werden größer, weil sie kontinuierlich wirken, sodass für jedes Jahr die Wirkungen der vorherigen Jahre noch hinzuzuaddieren sind.

4.2.3 Differenzierung zwischen Siedlungsbereich und außerörtlichem Verkehr

Teilweise finden Außenentwicklungsmaßnahmen statt, um außerörtliche Verkehrswege zu errichten. Im bundesweiten Durchschnitt beträgt der Flächenanteil für außerörtliche Verkehrsflächen an der gesamten Flächenneuinanspruchnahme etwa 9 % (siehe Kapitel 2.5).

Abbildung 19 zeigt, wie sich die Treibhausgaswirkung der Flächenneuanspruchnahme in Deutschland für den Fall einer konstant hohen Flächenneuanspruchnahme von 55 Hektar pro Tag auf die beiden Bereiche Siedlung und außerörtlicher Verkehr aufteilt.

Abbildung 19: Differenzierung der Treibhausgaswirkung der Flächenneuanspruchnahme in Deutschland nach den Bereichen Siedlung und außerörtlicher Verkehr



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

- ▶ Mit etwa 200.000 t CO₂-Äq. im Jahr 2025 verursachen neue außerörtliche Verkehrsflächen knapp 15 % der gesamten Treibhausgaswirkung von etwa 1,4 Mio. t CO₂-Äq. Der Anteil an den Treibhausgasemissionen ist etwa 1,5-mal so hoch wie der Flächenanteil (ca. 9 %, s. o.).
- ▶ Während sich die Emissionen im Siedlungsbereich im Lauf der Jahre verringern, steigen sie hinsichtlich der außerörtlichen Verkehrsflächen leicht an. Im Jahr 2050 beträgt der Anteil an den Treibhausgasemissionen ca. 25 %. Ursächlich dafür ist insbesondere der höhere Anteil an Waldflächen, die für außerörtliche Verkehrsflächen umgenutzt werden.

4.2.4 Differenzierung zwischen den Vorher-Nutzungen

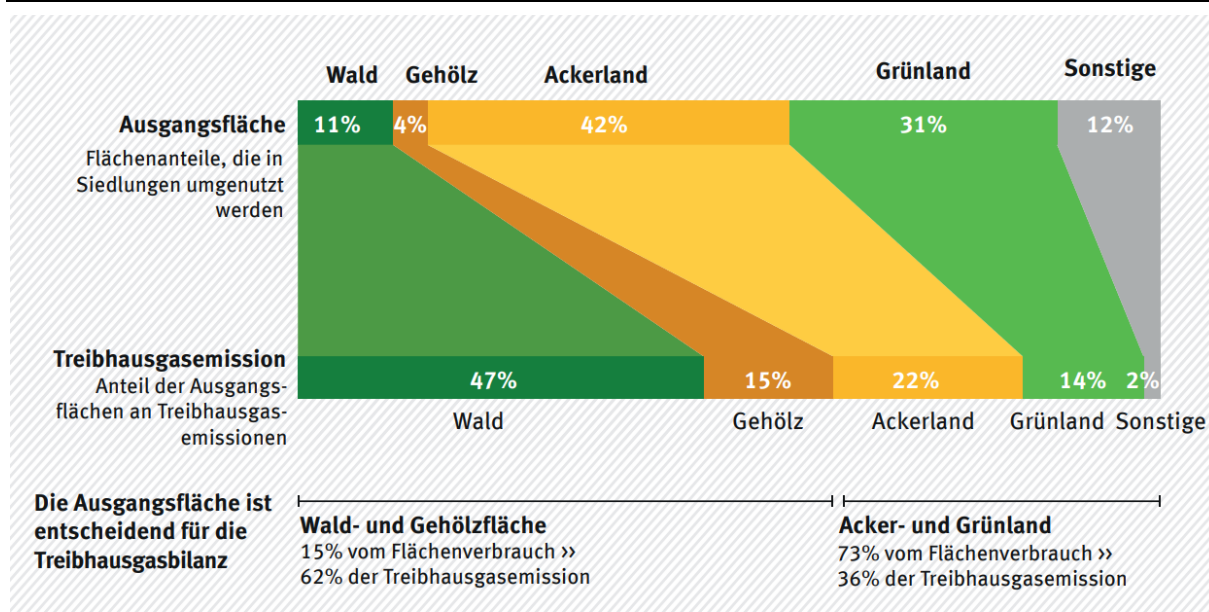
In den vergangenen Jahren fand die Flächenneuanspruchnahme in Deutschland überwiegend auf Ackerland oder Grünland statt. Trotz Verboten bzw. starken Einschränkungen wurden auch Waldflächen und Gehölze zu Siedlungs- und Verkehrsflächen umgenutzt. Abbildung 20 zeigt im oberen Bereich die jeweiligen Flächenanteile. Bezogen auf die gesamte Flächenneuanspruchnahme waren 11 % der umgenutzten Fläche Waldflächen und 4 % Gehölzflächen¹⁷.

Da die Treibhausgaswirkungen von 1 Hektar umgenutzter Fläche stark davon abhängen, welche Vorher-Nutzung aufgegeben wurde, weichen die Anteile hinsichtlich der Treibhausgaswirkung mitunter stark von den Flächenanteilen ab. Abbildung 20 zeigt im unteren Bereich die jeweiligen

¹⁷ Diese Flächenanteile stimmen nicht mit den in Abbildung 6 dargestellten Flächenanteilen überein, da in Abbildung 20 auch die Flächenneuanspruchnahme für außerörtliche Verkehrsflächen berücksichtigt ist, die zu deutlich größeren Anteilen auf Waldflächen stattfindet als Flächenneuanspruchnahme im Umfeld des Siedlungsbereichs.

Anteile an der gesamten Treibhausgaswirkung. Die Nutzungsänderung von 1 Hektar Wald in Siedlungs- und Verkehrsfläche verursacht über sechs-mal höhere Treibhausgasemissionen als die Nutzungsänderung von 1 Hektar Ackerland¹⁸ (siehe Kapitel 4.1.5).

Abbildung 20: Gegenüberstellung der Anteile unterschiedlicher Vorher-Nutzungen an der umgenutzten Fläche und den verursachten Treibhausgasemissionen



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

- ▶ Die Nutzungsänderung von Waldflächen verursacht trotz eines überschaubaren Flächenanteils von 11 % beinahe 50 % der Treibhausgasemissionen¹⁹.
- ▶ Auch die Nutzungsänderung von Gehölzen verursacht mit etwa 15 % einen deutlich höheren Anteil an den Treibhausgasemissionen als der Flächenanteil von 4 %.
- ▶ Obwohl über 70 % der Flächenneuanspruchnahme auf Acker- oder Grünland stattfindet, verursachen diese Nutzungsänderungen lediglich knapp 40 % der Treibhausgasemissionen.

4.2.5 Differenzierung zwischen den Gemeinden und Bundesländern

Als Projektergebnis liegen die LULUCF-bedingten Treibhausgaswirkungen der Flächenneuanspruchnahme für alle ca. 11.000 Einzelgemeinden Deutschlands vor. Die methodische Herleitung wird in Kapitel 5.1 im Methodikband beschrieben. Wesentliche Einflussfaktoren, durch die sich die Treibhausgaswirkung von Außenentwicklungsmaßnahmen in Gemeinde A von Gemeinde B unterscheidet, sind insbesondere

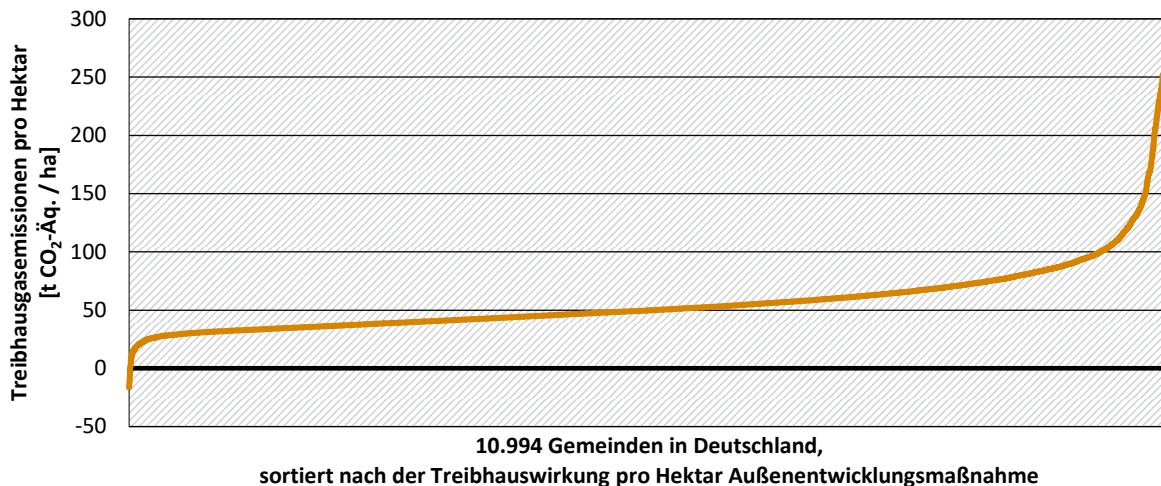
- ▶ welche Nutzungsarten aufgegeben werden, d. h. wie hoch der Flächenanteil von Wald- und Gehölzflächen, Acker- und Grünland, organischen Böden, usw. an der umgenutzten Fläche ist, und
- ▶ welche Nutzungsarten nach der Nutzungsänderung auf den Flächen entstehen, insbesondere wie hoch der Vegetationsanteil ist, was unter anderem anhand von der Bodenpreisklasse und dem Raumtyp der Gemeinden modelliert ist (siehe Kapitel 2.4 im Methodikband).

¹⁸ bezogen auf einen Wirkungszeitraum von 25 Jahren.

¹⁹ bezogen auf den Wirkungszeitraum von 2025 bis 2050.

Die absolute Treibhausgaswirkung in t CO₂-Äq. pro Gemeinde (und Jahr) ist von überschaubarer Aussagekraft, da das Ergebnis stark davon bestimmt wird, wie hoch die absolute Flächenneuanspruchnahme einer bestimmten Gemeinde ist. Aussagekräftiger sind die in Abbildung 21 dargestellten Ergebnisse pro Hektar Flächenneuanspruchnahme in den unterschiedlichen Gemeinden.

Abbildung 21: Differenzierung der Treibhausgaswirkung nach den Gemeinden in Deutschland



Die aufsummierte Wirkungsdauer beträgt 25 Jahre. Es sind Außenentwicklungsmaßnahmen auf mineralischem Boden dargestellt.

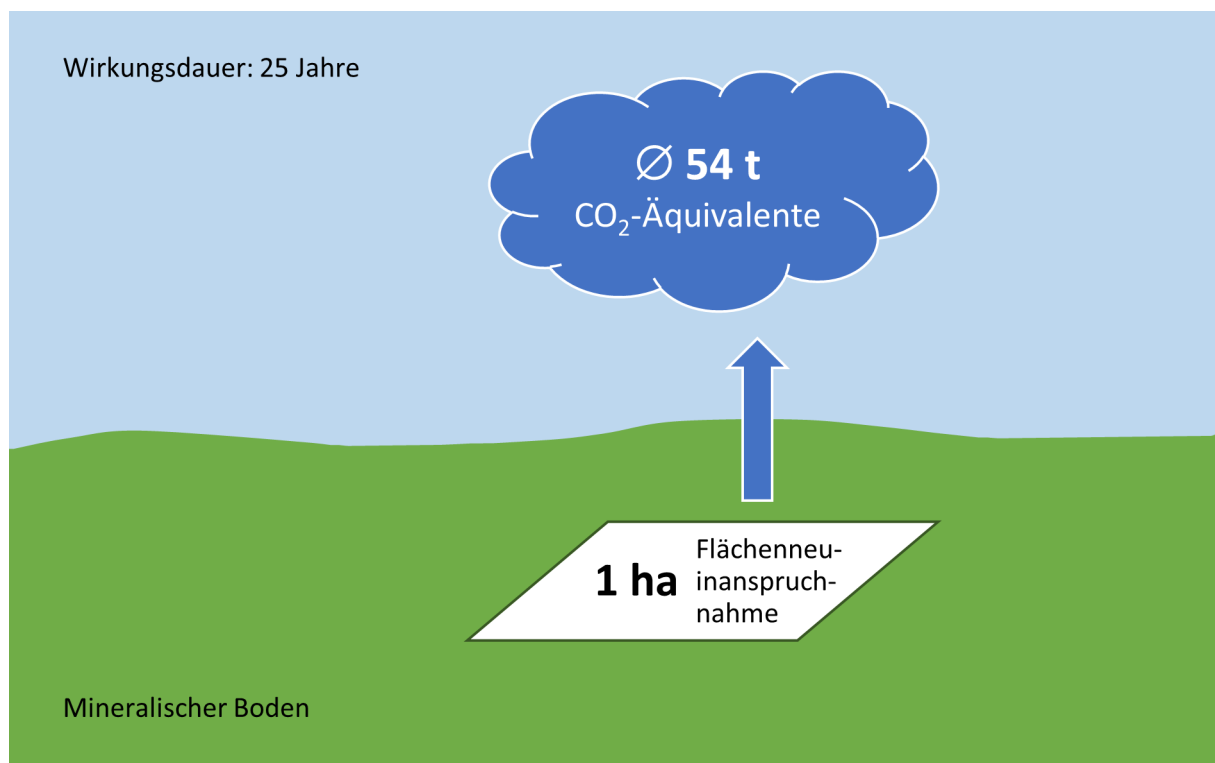
Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

- ▶ Abgesehen vom äußersten linken Ende liegt die Linie oberhalb der Nulllinie, d. h. dass Außenentwicklungsmaßnahmen auf mineralischem Boden in nahezu allen Gemeinden Deutschlands mit einer im Saldo klimanachteiligen Wirkung verbunden sind²⁰.
- ▶ Für den Großteil der ca. 11.000 Gemeinden Deutschlands gilt, dass ein Hektar Flächenneuanspruchnahme auf mineralischem Boden Treibhausgasemissionen zwischen etwa 30 und etwa 80 t CO₂-Äq. verursacht.
- ▶ Die Gesamtbandbreite ist groß: Während in Ausnahmefällen eine klimavorteilhafte Wirkung von ca. -20 t CO₂-Äq. pro Hektar verursacht wird, liegen die Emissionen in manchen Gemeinden Deutschlands bei über 250 t CO₂-Äq. pro Hektar. Besonders hohe Emissionen ergeben sich in solchen Gemeinden, deren Siedlungsbereich überwiegend von Waldflächen umgeben sind, sodass die Modellierung einen hohen Anteil an umgenutzten Waldflächen unterstellt.

Wichtet man die Gemeindewerte aus Abbildung 21 anhand der realen Flächenneuanspruchnahme 2009-2021 in den einzelnen Gemeinden, so kommt man zu dem Ergebnis, dass die durchschnittliche Flächenneuanspruchnahme auf mineralischem Boden in Deutschland über einen Wirkungszeitraum von 25 Jahren etwa 54 t CO₂-Äq. pro Hektar verursacht (Abbildung 22). Die in Abbildung 11 dargestellte Treibhausgaswirkung einer durchschnittlichen Außenentwicklungsmaßnahme beträgt 38 t CO₂-Äq. pro Hektar und ist damit nennenswert niedriger. Hauptursache sind die ca. 3,6 % organischen Böden, die in Abbildung 11 berücksichtigt sind und durch deren Versiegelung nennenswerte Mengen an Treibhausgasemissionen vermieden werden.

²⁰ Bezogen auf einen Wirkungszeitraum von 25 Jahren.

Abbildung 22: Treibhausgaswirkung eines durchschnittlichen Hektars Flächenneuanspruchnahme in Deutschland (mineralischer Boden, Wirkungszeitraum: 25 Jahre)



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

4.3 Einsparpotenziale und Szenarien

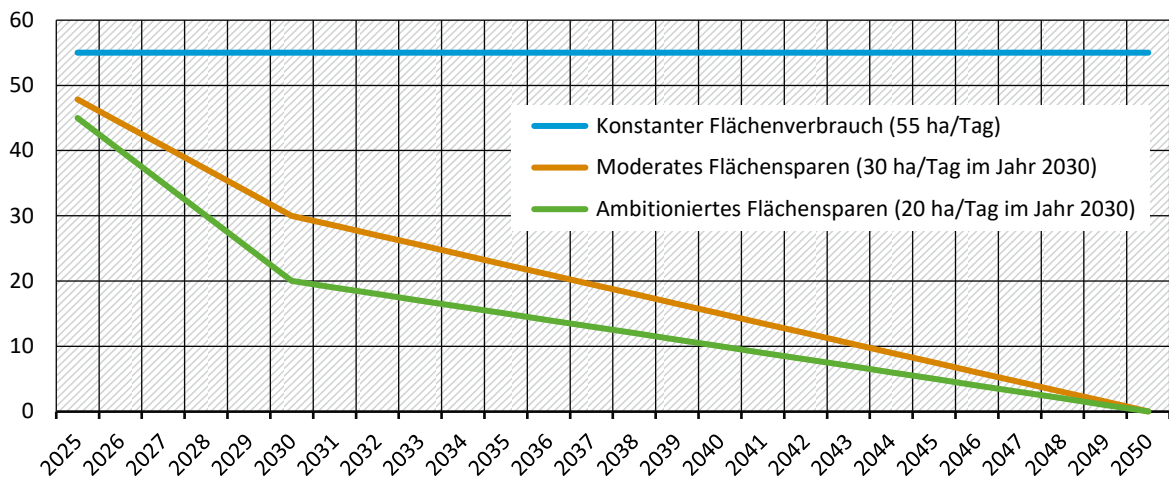
In diesem Kapitel werden die Treibhausgaseinsparpotenziale dargestellt, die sich ergeben, wenn

- ▶ die Flächenneuanspruchnahme in Deutschland reduziert wird und stattdessen durch eine verstärkte Innenentwicklung kompensiert wird
- ▶ im Zuge von Innenentwicklungsmaßnahmen behutsamer mit Grünflächen und Bestandsbäumen umgegangen wird
- ▶ eine Nutzungsänderung von Waldflächen weitgehend ausgeschlossen ist.

4.3.1 Innenentwicklung

Den im vorigen Kapitel dargestellten Ergebnissen liegt die Annahme zugrunde, dass die Flächenneuanspruchnahme in Deutschland bis zum Jahr 2050 auf einem konstanten Niveau von 55 Hektar pro Tag verbleibt. Davon abweichend wird im Folgenden dargestellt, welche Veränderungen sich hinsichtlich den Treibhausgasemissionen ergeben, wenn die Flächenneuanspruchnahme in Deutschland kontinuierlich zurückgeht und im Jahr 2050 ein Niveau von Netto-Null erreicht. Es wird zwischen zwei Zielszenarien differenziert: Mit moderatem Flächensparen wird im Jahr 2030 ein Niveau von 30 Hektar pro Tag erreicht, mit ambitioniertem Flächensparen ein Niveau von 20 Hektar pro Tag. In beiden Szenarien wird für den Zeitraum nach 2030 angenommen, dass bis zum Jahr 2050 das Flächensparziel der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie Netto-Null erreicht wird (siehe Abbildung 23 sowie Kapitel 6.1 im Methodikband).

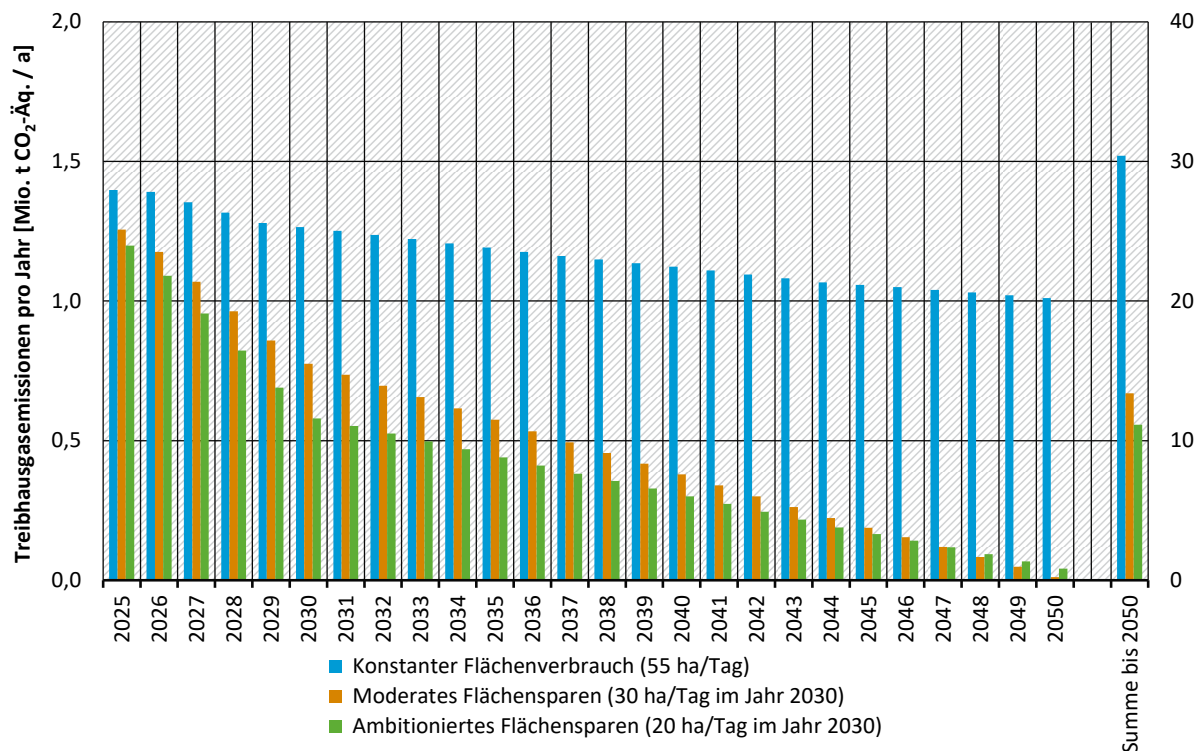
Abbildung 23: Szenarien der Flächenneuinanspruchnahme in Deutschland in Hektar pro Tag



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Den Modellrechnungen liegt die Annahme zugrunde, dass die Reduktion der Flächenneuinanspruchnahme mit verstärkten Aktivitäten im Bereich der Innenentwicklung verbunden ist. Konkret wird angesetzt, dass jeder Quadratmeter Geschossfläche bzw. jeder Kubikmeter Gewerbebaumasse, der durch Flächensparen in der Außenentwicklung nicht realisiert wird, stattdessen zu 100 % durch Innenentwicklungsmaßnahmen kompensiert wird (siehe Kapitel 3.2.1). Die Gesamtreibhausgasemissionen für die drei betrachteten Szenarien sind in Abbildung 24 dargestellt. Die Treibhausgaswirkungen, die durch die zusätzliche Innenentwicklung verursacht werden, sind darin berücksichtigt.

Abbildung 24: Treibhausgasemissionen der drei betrachteten Szenarien

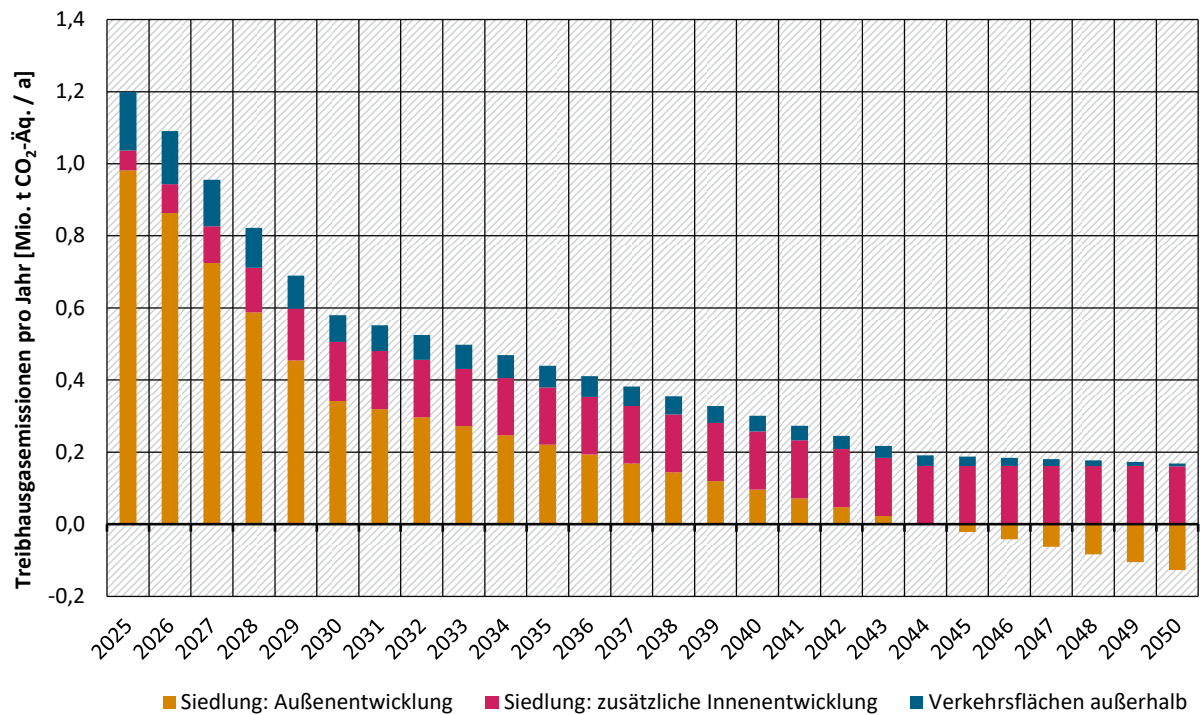


Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

- ▶ Wenn es gelingt, die Flächenneuanspruchnahme in Deutschland zu reduzieren und der dadurch verlorene Wohn- und Gewerberaum stattdessen in der Innenentwicklung realisiert wird, lassen sich im Vergleich zu einer Stagnation der Flächenneuanspruchnahme bei 55 Hektar pro Tag kontinuierliche und robuste Treibhausgasemissionseinsparungen erreichen.
- ▶ Wird die Flächenneuanspruchnahme bis zum Jahr 2030 auf ein Niveau von 20 Hektar pro Tag reduziert (Szenario „Ambitioniertes Flächensparen“), liegen die jährlichen Treibhausgasemissionen im Jahr 2030 bei etwa 0,6 Million Tonnen CO₂-Äq., während im Szenario „Moderates Flächensparen“ (d. h. die Ziele der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie werden mit 30 Hektar pro Tag gerade noch so erreicht) rund 0,75 Million Tonnen CO₂-Äq. und im Szenario „Konstanter Flächenverbrauch“ in demselben Jahr noch Emissionen von etwa 1,2 Mio. t CO₂-Äq. verursacht würden. Insgesamt würde sich somit durch Flächensparen allein bezogen auf das Jahr 2030 eine Emissionseinsparung von etwa 450.000 t bis 600.000 t CO₂-Äq. ergeben. Das entspricht etwa den jährlichen Emissionen einer Stadt mit bis zu 100.000 Einwohnerinnen und Einwohnern.
- ▶ In Summe über den Zeitraum von 2025 bis 2050 werden im Szenario „Ambitioniertes Flächensparen“ etwa 11 Mio. t CO₂-Äq. verursacht, während es im Szenario „Moderates Flächensparen“ etwa 14 Mio. t CO₂-Äq. sind und im Szenario „Konstanter Flächenverbrauch“ etwas mehr als 30 Mio. t CO₂-Äq. sind, sodass sich im Szenario „Ambitioniertes Flächensparen“ ein Einsparpotenzial von bis zu 20 Mio. t CO₂-Äq. und im Szenario Moderates Flächensparen fast 17 Mio. t CO₂-Äq. realisieren ließe.

Abbildung 25 zeigt exemplarisch für das Zielszenario „Ambitioniertes Flächensparen“, wie groß die Beiträge der Außenentwicklung zu Siedlungszwecken, der zusätzlichen Innenentwicklung und des außerörtlichen Verkehrs sind.

Abbildung 25: Beiträge der Elemente „Siedlung: Außenentwicklung“, „Siedlung: zusätzliche Innenentwicklung“ und „Verkehr außerhalb“ zu den gesamten Treibhausgasemissionen im Szenario „Ambitioniertes Flächensparen“

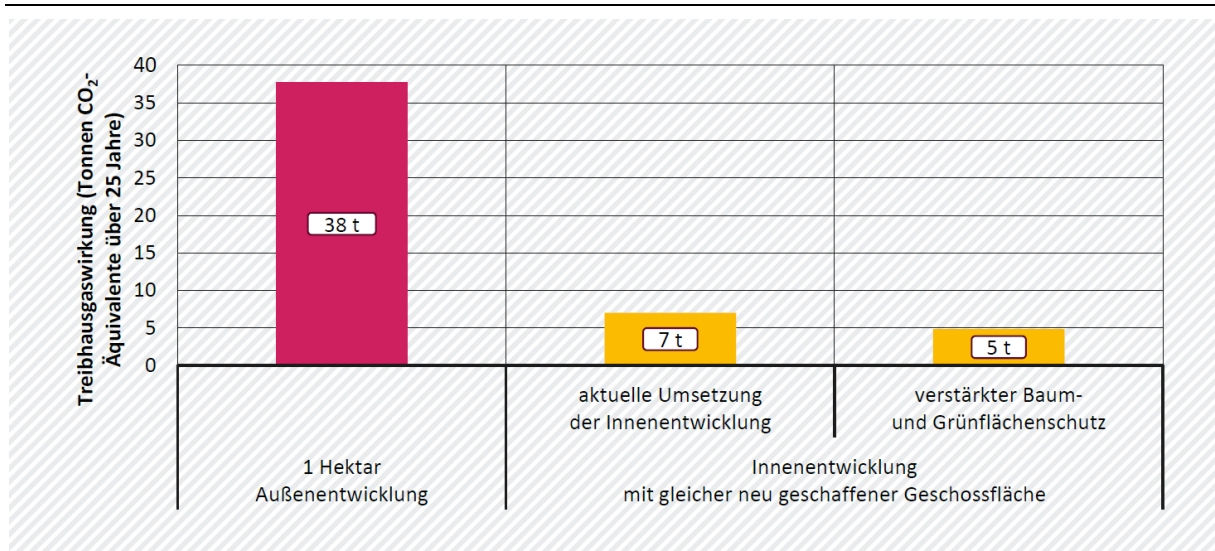


Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

- Im Jahr 2030 werden täglich 20 Hektar Außenentwicklung sowie das Äquivalent zu 35 Hektar Außenentwicklung in der Innenentwicklung realisiert. Obwohl also im Jahr 2030 bereits etwa 65 % der Flächenneuanspruchnahme durch Innenentwicklungsmaßnahmen kompensiert werden, führen die Innenentwicklungsmaßnahmen lediglich zu Emissionen von etwa 160.000 t CO₂-Äq. und machen damit lediglich einen Anteil von knapp 30 % der im Jahr 2030 zu verbuchenden Emission aus.

Diese nennenswerten Treibhausgaseinsparungen durch Kompensation von Außenentwicklung durch Innenentwicklung sind möglich, weil die Treibhausgaswirkung pro Hektar Außenentwicklung deutlich höher ist als die Treibhausgaswirkungen der Innenentwicklungsmaßnahmen, die zur Kompensation von einem Hektar Außenentwicklung benötigt werden. Die entsprechenden Ergebniswerte sind in Abbildung 26 dargestellt. Die methodische Herleitung ist in Kapitel 5.2 im Methodikband dokumentiert.

Abbildung 26: Vergleich der Treibhausgaswirkungen von einem durchschnittlichen Hektar Außenentwicklung und der zur Kompensation benötigten Innenentwicklung



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

- ▶ Bezogen auf durchschnittliche Außen- bzw. Innenentwicklungsmaßnahmen, ermöglichen Innenentwicklungsmaßnahmen Treibhausgaseinsparungen von über 80 %.
- ▶ Die Treibhausgaswirkung von Innenentwicklungsmaßnahmen ergibt sich zu nennenswerten Teilen aus der Fällung von Bestandsbäumen und der Nutzungsänderung von Grünflächen. Durch einen behutsamen Umgang mit Bestandsbäumen und städtischen Grünflächen lassen sich die mit der Innenentwicklung verbundenen Treibhausgasemissionen um weitere ca. 30 % von ca. 7 auf ca. 5 t CO₂-Äq. senken. Ein Erhalt der Bestandsbäume entfaltet auch Synergien mit dem Bereich der Klimaanpassung, beispielsweise wird so das städtische Mikroklima verbessert (Rehfeldt et al. 2024).

4.3.2 Schutz von Wäldern

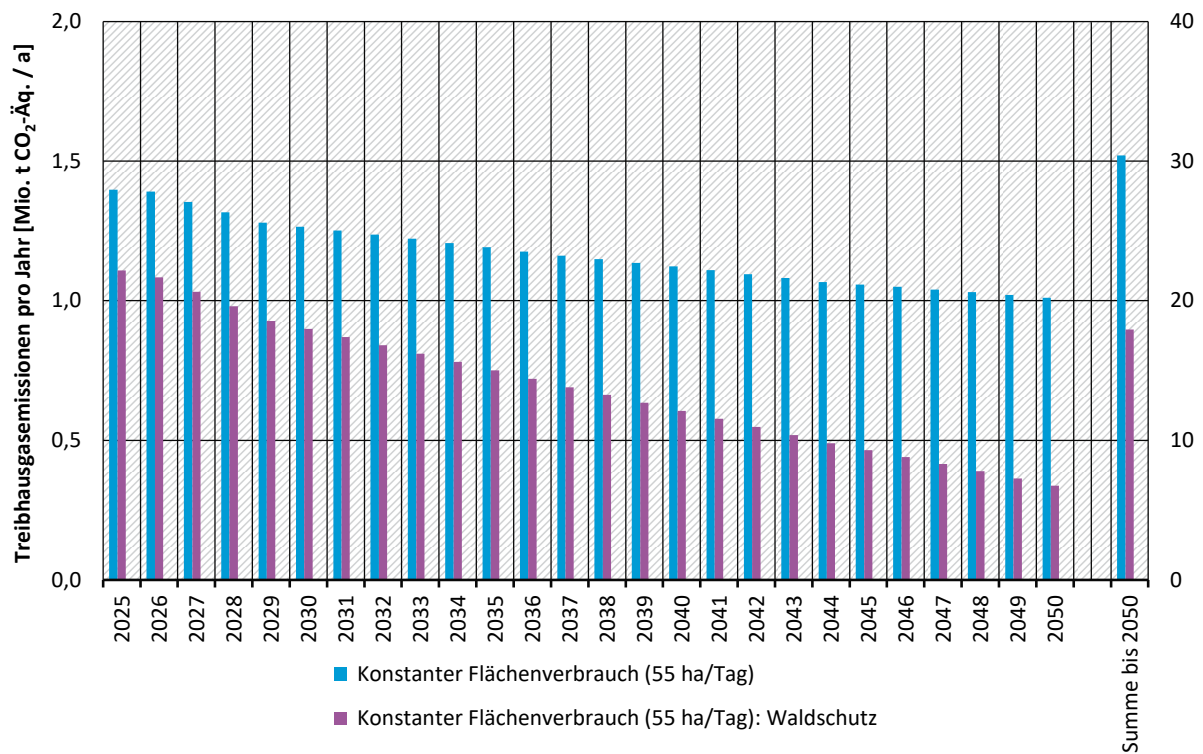
Werden Wälder zu Siedlungs- und Verkehrsfläche umgenutzt, werden lebende Bäume geerntet und Totholz und Streu von der Fläche entfernt. Konservativ liegen dem Modell die Annahmen zugrunde, dass ein Teil des Ernteholzes stofflich genutzt wird und dass das in Teilen marktfähige Ernteholz andere Holzernnten substituiert (siehe Methodikband Kapitel 4.3). Beide Annahmen reduzieren den klimanachteiligen Effekt der Flächenneuanspruchnahme von Wäldern. Darüber hinaus wird mit lediglich etwa 40 t C pro Hektar ein deutlich niedrigerer Kohlenstoffvorrat angesetzt als für durchschnittliche Waldflächen, da für Entwaldungsflächen entsprechende Messungen des Thünen-Instituts vorliegen (siehe Methodikband Kapitel 4.3). Dennoch dominieren die Nutzungsänderungen von Wäldern die Treibhausgaswirkung der Flächenneuanspruchnahme (siehe Kapitel 4.2.4).

Neben der einmaligen Freisetzung des Kohlenstoffs, der in der Waldbiomasse gebunden ist, führt die Nutzungsänderung zu Siedlungs- und Verkehrsfläche auch dazu, dass der Wald in den nachfolgenden Jahren nicht mehr kontinuierlich als Nettosenke fungieren, d. h. nicht mehr kontinuierlich mehr Kohlenstoff einbinden als abgeben kann, weder im Boden noch in der Vegetation.

Vor diesem Hintergrund stellt Abbildung 27 dar, wie sich die Treibhausgasemissionen verändern, wenn im Szenario „Konstanter Waldschutz“ die Randbedingung eingeführt wird, dass Waldflächen nicht mehr in Siedlungs- und Verkehrsflächen umgenutzt werden, sondern

stattdessen andere Flächen. Details zur Ausgestaltung des Szenarios sind im Methodikband in Kapitel 2.3.2.1 aufgeführt.

Abbildung 27: Treibhausgaswirkungen im Szenario „Konstanter Flächenverbrauch: Waldschutz“



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

- ▶ Durch einen strengen Schutz von Waldflächen vor Nutzungsänderungen in Siedlungs- und Verkehrsfläche lassen sich deutliche Treibhausgaseinsparpotenziale erschließen.
- ▶ In Summe bis 2050 beträgt das Einsparpotenzial etwa 12 Mio. t CO₂-Äq., wenn die Flächenneuanspruchnahme mit 55 Hektar pro Tag konstant gehalten wird und eine Verschiebung hinsichtlich der Vorher-Flächenanteile angesetzt wird.

4.4 Diskussion

Den Berechnungen liegen zahlreiche methodische Setzungen zugrunde, die teilweise erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Treibhausgaswirkungen ausüben. Darüber hinaus sind relevante Aspekte standardmäßig nicht im Modell berücksichtigt, insbesondere weil diesbezüglich gesicherte Daten fehlen. Diese Aspekte werden im Folgenden diskutiert. Außerdem wird ein Vergleich zwischen den vorliegenden Treibhausgasergebnissen und dem Nationalen Treibhausgasinventar angestellt.

4.4.1 Nutzungsänderungen auf organischen Böden

Werden im Zuge von Nutzungsänderungen zu Siedlungs- und Verkehrsfläche trockengelegte organische Böden versiegelt, werden die kontinuierlichen Emissionen, die ansonsten stattgefunden hätten, unterbunden. Standardmäßig hängen im Modell die voraussichtlichen Nachher-Nutzungen und insbesondere die Versiegelungsanteile im Nachher-Zustand nicht vom Bodentyp ab, sondern von zahlreichen anderen Parametern wie z. B. dem Bodenpreisniveau der Gemeinde. So ergibt sich im Durchschnitt über Deutschland ein Versiegelungsanteil von ungefähr 52 % (siehe Kapitel 3.1.2). Demgegenüber setzt das Nationale Treibhausgasinventar

an, dass Flächen mit organischen Böden im Siedlungsbereich zu lediglich 15 % versiegelt sind (UBA 2023, dort Kapitel 6.8.2.4).

Vor diesem Hintergrund stellt Abbildung 28 dar, wie sich die Gesamttreibhausgaswirkung der Flächenneuanspruchnahme in Deutschland im Szenario „Konstanter Flächenverbrauch“ verändert, wenn 15 % versiegelter Flächenanteil auf organischen Böden im Siedlungsbereich angesetzt werden anstatt 52 %.

- ▶ Der Parameter hat nennenswerten Einfluss auf die Gesamtergebnisse. Der klimavorteilhafte Effekt, der sich aus der Versiegelung trocken gelegter organischer Böden ergibt, wird durch die Veränderung des Parameters deutlich reduziert.
- ▶ Wird der im Nationalen Treibhausgasinventar angesetzte Versiegelungsgrad zugrunde gelegt, erhöhen sich die Gesamtemissionen, die im Szenario „Konstanter Flächenverbrauch“ über den Zeitraum von 2025 bis 2050 mit der Flächenneuanspruchnahme in Deutschland verbunden sind, um knapp 10 %.

Über den Versiegelungsanteil hinausgehend, bestehen insbesondere bei den Wirkungen, die sich durch eine Verbringung des abgeschobenen und ausgekofferten organischen Bodens ergeben, Unsicherheiten. Von einer quantitativen Analyse wird aufgrund der großen Unsicherheiten abgesehen. Die Zusammenhänge und die sich daraus ergebenden Konsequenzen sind in Kapitel 4.1.4 detailliert beschrieben. An dieser Stelle besteht weiterer Forschungsbedarf.

4.4.2 Verdrängung landwirtschaftlicher Nutzungen

Als in den 2010er Jahren immer mehr Ackerflächen für den Anbau von Mais, Raps und anderen Energiepflanzen zur Gewinnung von Biokraftstoffen genutzt wurden, wurde im Rahmen der sogenannten „iLUC“-Debatte²¹ intensiv darüber diskutiert, ob der Anbau der Energiepflanzen zu klimanachteiligen Verdrängungseffekten führt. Die Hypothese lautet: Wird in Deutschland eine Energiepflanze auf einer Ackerfläche angebaut, auf der bislang eine andere Kultur angebaut wurde, fehlen dem Weltmarkt die bislang auf dieser Fläche erwirtschafteten Erntegüter. Die Gesamtnachfrage nach landwirtschaftlichen Erzeugnissen bleibt davon unberührt. Das dem Markt fehlende landwirtschaftliche Erzeugnis muss daher auf einer anderen Fläche erzeugt werden. Zu einem nennenswerten Teil erfolgt die Kompensation des fehlenden landwirtschaftlichen Produkts durch eine Ausweitung der landwirtschaftlichen Fläche in Ländern, die wertvolle Naturflächen nicht konsequent vor der Nutzungsänderung in landwirtschaftliche Nutzflächen schützen, beispielsweise in Südamerika oder Südostasien, mitunter zulasten von Regenwaldgebieten. Ob bzw. zu welchem Grad die Hypothese zutrifft, lässt sich bis heute nicht gesichert beantworten. Auf EU-Ebene wurden aber in der Erneuerbaren Energien-Richtlinie²² Maßnahmen eingeführt, um die Risiken von iLUC-Effekten durch Biokraftstoffe zu minimieren (Böttcher et al. 2020).

Wird eine landwirtschaftlich genutzte Fläche in Deutschland in Siedlungs- und Verkehrsfläche umgenutzt, kann dieser Vorgang ebenso als Auslöser von Verdrängungseffekten interpretiert werden wie der Anbau von Energiepflanzen. Die logischen und kausalen Zusammenhänge sind analog.

Die Bandbreite möglicher Auswirkungen von Verdrängungseffekten ist groß. Beispielsweise kann ein verlorener Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland durch zwei Hektar (geringerer Flächenertrag als in Deutschland) gerodeten Regenwald in Südamerika kompensiert

²¹ iLUC: indirect land use changes, indirekte Landnutzungsänderungen

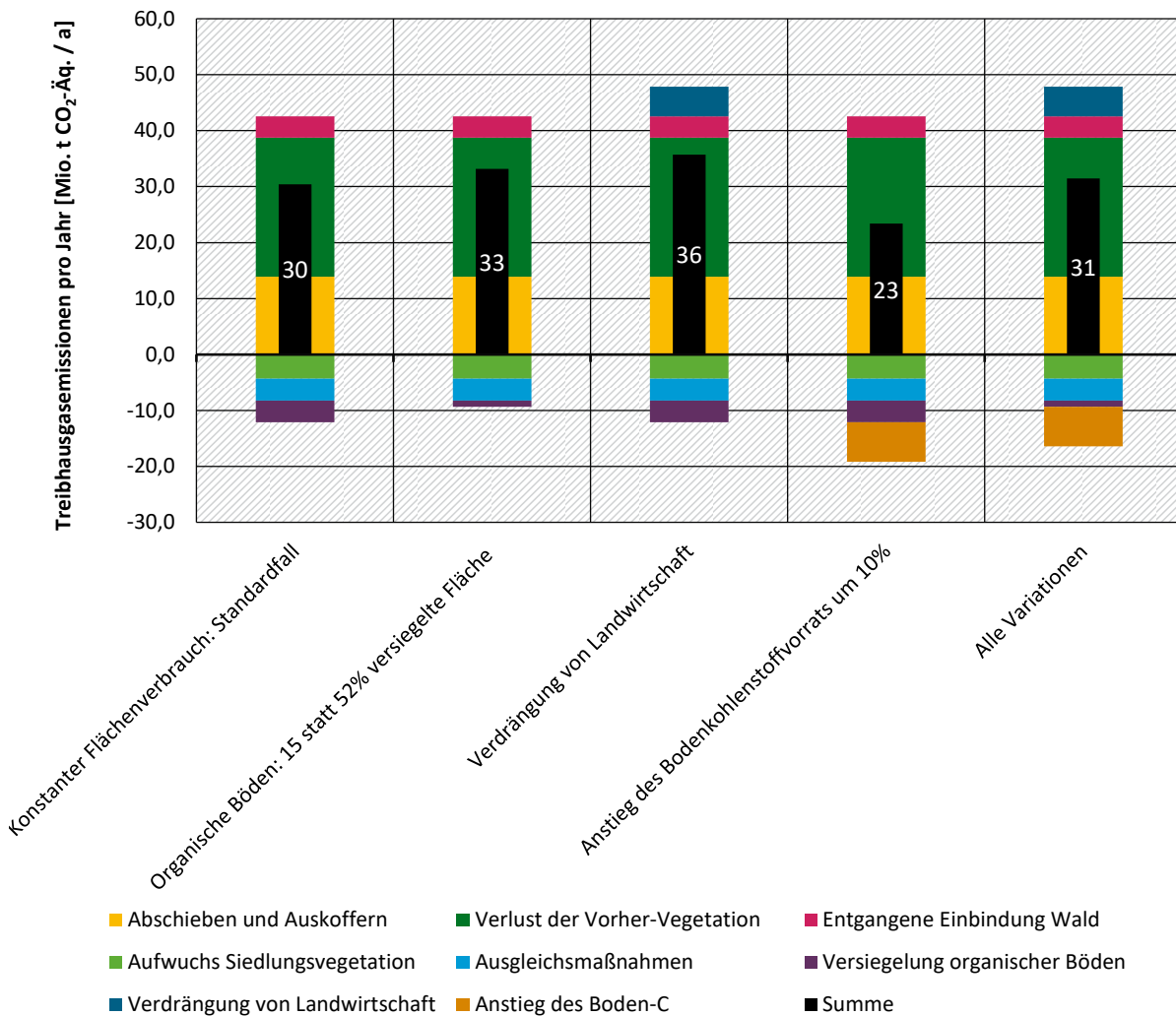
²² <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>

werden (enorme Treibhausgaswirkung) oder durch eine Professionalisierung der landwirtschaftlichen Produktion in Malaysia mit entsprechenden Ertragszuwächsen ohne Anstieg der Produktionsfläche (keine LULUCF-bezogene Treibhausgaswirkung). Durchschnittliche Treibhausgaskennwerte wurden in einer Überblickstudie von Woltjer et al. (2017) zusammengestellt. Die Kennwerte werden im vorliegenden Projekt verwendet, um die zusätzliche Treibhausgaswirkung von Verdrängungseffekten landwirtschaftlicher Nutzungen durch Flächenneuanspruchnahme in Deutschland zu quantifizieren. Dabei ist angesetzt, dass lediglich Außenentwicklungsmaßnahmen zulasten von Ackerland zu Verdrängungseffekten führen. Das Ergebnis ist in Abbildung 28 als zusätzlicher Posten „Verdrängung von Landwirtschaft“ abgebildet.

In Summe über den Zeitraum bis 2050 werden zusätzliche Treibhausgasemissionen in Höhe von etwa 5 Mio. t CO₂-Äq. verursacht, was einem Anstieg des Gesamtergebnisses um etwa 15 % entspricht. Etwaige Verdrängungseffekte sind daher durchaus relevant, aber nicht dominant.

Das im vorliegenden Projekt entwickelte Modell berücksichtigt konsequent naturschutzrechtliche Ausgleichsmaßnahmen, die für viele Nutzungsänderungen zu Siedlungs- und Verkehrsfläche verpflichtend sind und mit klimavorteilhaften Wirkungen verbunden sind. In vielen Fällen werden Ausgleichsmaßnahmen allerdings ebenfalls auf landwirtschaftlich genutzten Flächen realisiert, was zu zusätzlichen Verdrängungseffekten führen kann, die in der obenstehenden Sensitivitätsanalyse nicht berücksichtigt sind.

Abbildung 28: Sensitivitätsanalysen zur Treibhausgaswirkung unterschiedlicher Effekte



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

4.4.3 Anstieg des Bodenkohlenstoffvorrats aufgrund von Flächenneuanspruchnahme

Empirische Studien haben gezeigt, dass der Bodenkohlenstoffvorrat von Siedlungsflächen häufig über dem Niveau der angrenzenden Freiraumflächen liegt. Der Auftrag zusätzlichen humosen Bodens, die intensive Bewirtschaftung der innerstädtischen Grünflächen (Inputs, Bewässerung) aber auch die schleichende Degradation landwirtschaftlich genutzter Böden werden als mögliche Ursachen angeführt (UBA 2023, Kapitel 6.1.2.1.6). In Anlehnung an das Vorgehen im Nationalen Treibhausgasinventar ist dieser Zusammenhang in allen vorliegenden Projektergebnissen standardmäßig nicht quantifiziert. Zu den Gründen für dieses standardmäßige Vorgehen zählt, dass dem Aufbringen von humosem Boden in vielen Fällen eine Entnahme des humosen Bodens an anderer Stelle vorausgeht, sodass im Saldo über alle beteiligten Flächen kein Anstieg des Bodenkohlenstoffvorrats bewirkt wird und dass es noch keine Studien gibt, die für konkrete Flächen einen Anstieg des Bodenkohlenstoffvorrats kausal auf die Nutzungsänderung in Siedlungsfläche zurückführen konnten.

Nichtsdestotrotz legt die Empirie nahe, dass Flächenneuanspruchnahme mit einem Anstieg des Bodenkohlenstoffvorrats verbunden sein kann. Die Relevanz dieses standardmäßig nicht quantifizierten Aspekts wird daher im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse betrachtet. Abbildung 28 zeigt, wie sich das Gesamtergebnis für die Flächenneuanspruchnahme in Deutschland im

Szenario „Konstanter Flächenverbrauch“ verändern würde, wenn Außenentwicklungsmaßnahmen stets zu einem Anstieg des Bodenkohlenstoffvorrats um 10 % über einen Zeitraum von 20 Jahren führen würden.

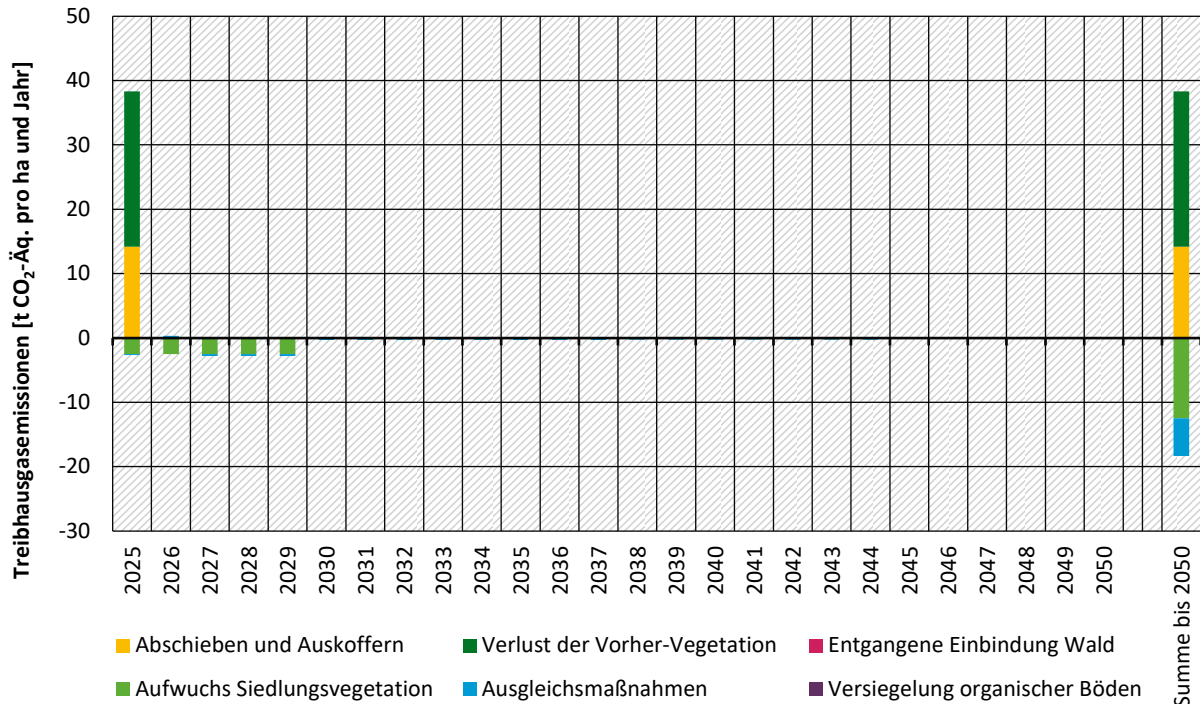
In Summe über den Zeitraum von 2025 bis 2050 würden sich in dieser Variante Treibhausgasemissionen von 23 Mio. t CO₂-Äq. ergeben, d. h. das Ergebnis fiel um knapp 25 % niedriger aus. Eine Ergebnisumkehr erfolgt nicht, d. h. das Gesamtergebnis, dass eine Reduktion der Flächenneuanspruchnahme zu nennenswerten Treibhausgaseinsparungen führt, bleibt bestehen. Dennoch sinken die Einsparpotenziale in dieser Variante erheblich, obwohl Studien teilweise nachgewiesen haben, dass der Bodenkohlenstoffvorrat auf den Siedlungs- und Verkehrsflächen noch um deutlich mehr als die angesetzten 10 % höher liegt als auf den angrenzenden Freiraumflächen (UBA 2023, Kapitel 6.1.2.1.6). Vor diesem Hintergrund besteht weiterer Forschungsbedarf, inwiefern Flächenneuanspruchnahme tatsächlich kausal im Saldo zu einem Nettoanstieg des Bodenkohlenstoffvorrats führt.

4.4.4 Flächenneuanspruchnahme für den Ausbau der Erneuerbaren Energien

Auch neue Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) oder Windenergieanlagen, die auf Ackerland, Grünland, Waldflächen oder anderen Freiraumflächen errichtet werden, stellen Außenentwicklungsmaßnahmen dar, die in die Flächenstatistik als Flächenneuanspruchnahme hineinzählen. Ambitionierte Ziele zum Ausbau der Erneuerbaren Energien sind nur mit einem nennenswerten Ausbau von PV-FFA und Windenergie an Land zu erreichen. Die den Ergebnissen zugrundeliegenden Zielszenarien mit einer Flächenneuanspruchnahme von 30 bzw. lediglich 20 Hektar pro Tag im Jahr 2030 und einer Absenkung auf Netto-Null im Jahr 2050 sind damit schwer vereinbar.

Sowohl die Errichtung von PV-FFA als auch von Windenergieanlagen stellen hinsichtlich der Modellierung der LULUCF-bedingten Treibhausgaswirkungen einen Spezialfall dar. Das entwickelte Modell ist grundsätzlich geeignet, um die Wirkungen zu erfassen. Dennoch passen die methodischen Setzungen mitunter nicht zu diesen beiden Spezialfällen. In der Logik der im vorliegenden Projekt entwickelten Methodik setzt sich die Errichtung einer PV-FFA auf Ackerland aus den Nutzungsänderungen „Ackerland → Versiegelte Fläche“ und „Ackerland → Niedrige Vegetation“ zusammen, da ein kleiner Flächenanteil durch die Fundamente und Tragwerke der Solarmodule versiegelt ist und ein deutlich größerer Flächenanteil in der Regel mit niedriger Vegetation bestanden ist. Die Treibhausgaswirkung für die Nutzungsänderung „Ackerland → Niedrige Vegetation“ ist in Abbildung 29 dargestellt.

Abbildung 29: Treibhausgaswirkung der Nutzungsänderung von 1 Hektar Ackerland in unversiegelte Siedlungs- und Verkehrsfläche mit niedriger Vegetation



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Im Vergleich zu anderen Nutzungsänderungen ist das Saldoergebnis nach 25 Jahren mit etwa 20 t CO₂-Äq.²³ pro Hektar umgenutzter Fläche niedrig, siehe Tabelle 8. Darüber hinaus liegt dem Modell die Annahme zugrunde, dass Außenentwicklungsmaßnahmen stets ein vollflächiges Abschieben des Oberbodens vorausgeht, was zu den in Abbildung 29 unter „Abschieben und Auskoffern“ dargestellten Emissionen in Höhe von etwa 14 t CO₂-Äq. führt, obwohl das Abschieben des Oberbodens für die Errichtung von PV-FFA in vielen Fällen vermeidbar ist.

Vor diesem Hintergrund wird die Beeinträchtigung der Aussagekraft der dargestellten Einsparpotenziale in den Zielszenarien mit teilweise unrealistisch starkem Rückgang der Flächenneuanspruchnahme als überschaubar eingeschätzt, da die nicht abgebildeten Treibhausgaswirkungen von beispielsweise PV-FFA von nachrangiger Relevanz sind. Darüber hinaus sollte bei der Errichtung von PV-FFA und Windenergieanlagen darauf geachtet werden, den Boden so wenig wie möglich in Bewegung zu setzen.

In einer Gesamtbilanz ist zudem zu berücksichtigen, dass mit PV-FFA und Windenergieanlagen erneuerbarer Strom erzeugt wird, und zwar mit einer deutlich höheren Flächeneffizienz als mit Bioenergie (Böhm 2023). Werden Verdrängungseffekte von fossilen Energieträgern durch erneuerbaren Strom in die Betrachtung einbezogen, spielen die Treibhausgasemissionen aus der Flächenneuanspruchnahme eine untergeordnete Rolle und für die Gesamtbilanz sind deutliche Treibhausgasminderungen durch PV-FFA und Windenergieanlagen zu erwarten (vgl. Fehrenbach & Bürck 2020).

4.4.5 Vergleich mit den Ergebnissen des Nationalen Treibhausgasinventars

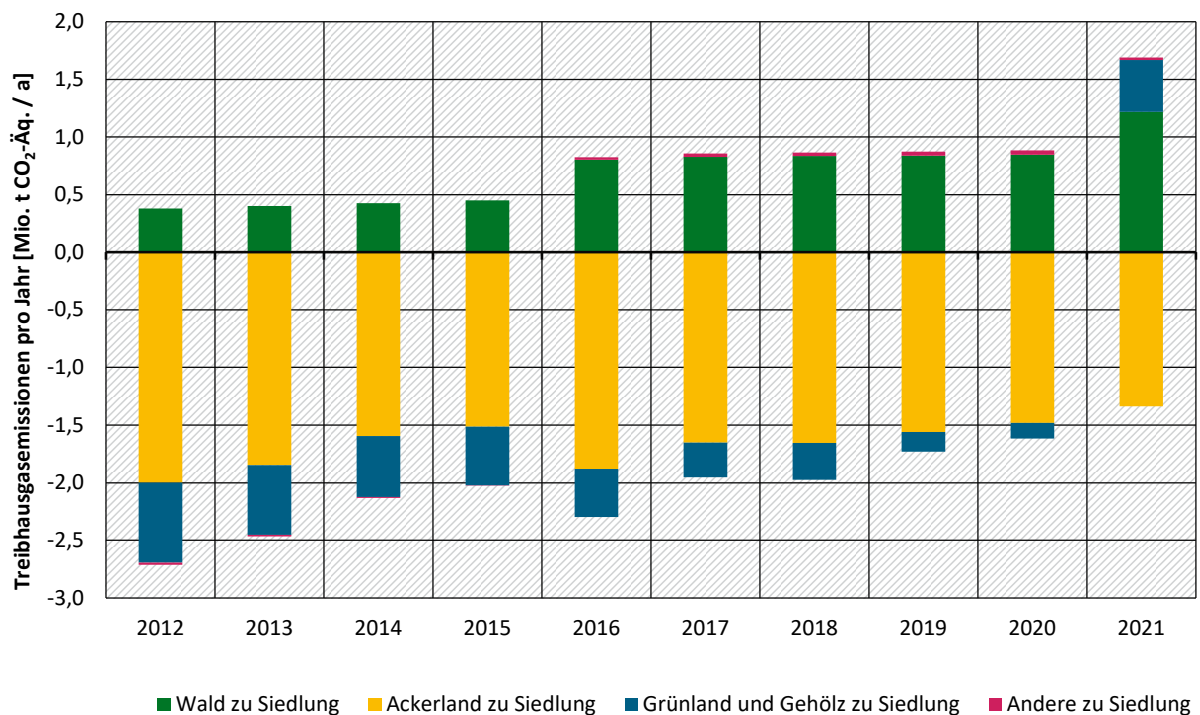
Generell ist das Nationale Treibhausgasinventar die wichtigste Referenz hinsichtlich den LULUCF-bedingten Treibhausgaswirkungen in Deutschland. Die im vorliegenden Projekt

²³ Emissionen von etwa 38 t CO₂-Äq. stehen Einsparungen von etwa 18 t CO₂-Äq. gegenüber, im Saldo also etwa 20 t CO₂-Äq.

entwickelte Methodik zur Quantifizierung der Treibhausgaswirkung der Flächenneuanspruchnahme basiert in wesentlichen Aspekten auch auf den Informationen, Daten und methodischen Zusammenhängen, die den Berechnungen im Nationalen Treibhausgasinventar zugrunde liegen. In wichtigen Aspekten weicht das vorliegende Projekt aber vom Vorgehen im Nationalen Treibhausgasinventar ab, weshalb sich nennenswerte Unterschiede in den Ergebnissen ergeben.

Abbildung 30 zeigt die Treibhausgaswirkungen, die im Nationalen Treibhausgasinventar für die Nutzungsänderung von Freiraumflächen in Siedlungs- und Verkehrsflächen in den vergangenen 10 Jahren berichtet wurden.

Abbildung 30: Treibhausgaswirkung von Nutzungsänderungen zu Siedlungs- und Verkehrsfläche gemäß Nationalem Treibhausgasinventar zwischen 2012 und 2021



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR auf Basis von Abbildung 81 in UBA (2023)

Die Saldowirkung betrug im Durchschnitt über die letzten 10 Jahre etwa - 1,5 Mio. t CO₂-Äq., d. h. gemäß Nationalem Treibhausgasinventar war Flächenneuanspruchnahme im Durchschnitt über die letzten 10 Jahre mit einer Einsparung von Treibhausgasen bzw. einer Netto-Einbindung von Kohlenstoff verbunden. Die im vorliegenden Projekt ermittelten Treibhausgaswirkungen der Flächenneuanspruchnahme in Deutschland liegen bei Netto-Treibhausgasemissionen von etwa 1,2 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr (siehe Abbildung 17). Der Vergleich mit dem Nationalen Treibhausgasinventar plausibilisiert die Größenordnung der im vorliegenden Projekt quantifizierten jährlichen Wirkungen.

Nichtsdestotrotz ergibt sich im Kern ein fundamental unterschiedliches Ergebnis hinsichtlich der Frage, ob Flächenneuanspruchnahme eine netto-vorteilhafte oder -nachteilige Wirkung entfaltet. Hauptursächlich sind die methodischen Setzungen, die den jeweiligen Berechnungen zugrunde liegen. Im Methodikband wird in Kapitel 4 an den entsprechenden Stellen auf Unterschiede zum Nationalen Treibhausgasinventar hingewiesen. Zwei Unterschiede werden als besonders relevant identifiziert:

- ▶ Für die Vegetation, die auf der neuen Siedlungsfläche aufwächst, wird im Nationalen Treibhausgasinventar angesetzt, dass sich der Kohlenstoffvorrat in der Biomasse zu jeweils etwa 50 % aus einerseits Hecken / Gehölzen und andererseits aus Grünland zusammensetzt. In Summe ergibt sich im Nationalen Treibhausgasinventar ein durchschnittlicher Kohlenstoffvorrat von knapp 30 t Kohlenstoff pro Hektar Siedlungsfläche. Im vorliegenden Projekt wurde mithilfe von luftbildgestützten Auswertungen der Flächenanteil von mittlerer Vegetation (Hecken / Gehölzen) zu lediglich ca. 1 % bestimmt. Die Kronen ausgewachsener Stadtbäume bedecken im Bestand einen nennenswerten Flächenanteil. Nach einer Flächenneuanspruchnahme ist allerdings zunächst von Jungbäumen auszugehen, die deutlich geringere Kohlenstoffvorräte und zunächst niedrige Zuwachsraten aufweisen. Im vorliegenden Projekt ergibt sich für eine neu in Anspruch genommene Fläche 10 Jahre nach der Entwicklungsmaßnahme im Durchschnitt ein Kohlenstoffvorrat von lediglich etwa 4 t Kohlenstoff pro Hektar. Dieser deutliche Unterschied wird als Hauptgrund für die abweichenden Ergebnisse interpretiert.
- ▶ In den Ergebnissen des vorliegenden Projekts ist die Kohlenstoffeinbindung, die auf den Waldflächen stattgefunden hätte, die in Siedlungs- und Verkehrsflächen umgenutzt wurden, stets als klimanachteilige Wirkung verbucht. Im Nationalen Treibhausgasinventar erfolgt keine entsprechende Verbuchung als Auswirkung von Flächenneuanspruchnahme. Dieser Unterschied kann durch die unterschiedlichen Fragestellungen begründet werden. Im vorliegenden Projekt stehen die Auswirkungen im Vordergrund, die sich aus heutigen oder anstehenden Entscheidungen in der Zukunft ergeben werden. Beim Nationalen Treibhausgasinventar hingegen besteht das Ziel darin, eine akkurate Bestandsaufnahme dessen vorzunehmen, was in Deutschland in den vergangenen Jahren Realität war. Die entgangene Senkenleistung von umgenutzten Waldflächen beträgt im Durchschnitt etwa 0,2 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr (siehe Abbildung 18), was einen relevanten aber weniger entscheidenden Grund für die Abweichung zwischen dem Nationalen Treibhausgasinventar und den vorliegenden Projektergebnissen darstellt.

4.5 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorliegende Projekt stellt eine Methodik zur Verfügung, um die LULUCF-bedingte Treibhausgaswirkung von Flächenneuanspruchnahme zu quantifizieren. Die Methodik ist anwendungsfreundlich: Es müssen lediglich qualitative und quantitative Kenntnisse über die umgenutzten Flächen vorliegen. Diese lassen sich mit den Treibhausgaskennwerten aus der Nutzungsänderungsmatrix in Tabelle 8 kombinieren, um zu dem Treibhausgasergebnis zu kommen. Die Methodik ist auch geeignet, um Vorhaben in der Innenentwicklung abzubilden.

In der Hochrechnung für Deutschland ergibt sich eine LULUCF-bedingte Treibhausgaswirkung der Flächenneuanspruchnahme in Deutschland von gut 1 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr. Damit ist die Wirkung in ihrer Höhe überschaubar, aber nicht irrelevant für die Erreichung der Sektorziele. Durch eine ambitionierte Reduktion der Flächenneuanspruchnahme und eine Kompensation durch verstärkte Innenentwicklung lassen sich ab dem Jahr 2028 Einsparpotenziale von über 0,5 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr erschließen, in Summe bis 2050 etwa 20 Mio. t CO₂-Äq.

Eine durchschnittliche Außenentwicklungsmaßnahme in Deutschland verursacht Treibhausgasemissionen von etwa 38 t CO₂-Äq. pro Hektar. Wird dieselbe Geschossfläche bzw. Gewerbebaumasse stattdessen in der Innenentwicklung realisiert, werden durchschnittlich lediglich etwa 7 t CO₂-Äq. verursacht.

Die Gemeinden Deutschlands unterscheiden sich mitunter deutlich hinsichtlich den Treibhausgaswirkungen ihrer durchschnittlichen Außenentwicklungsmaßnahmen. Dabei

kommt es insbesondere auf den Anteil von Wald- und Gehölzflächen an, der in Siedlungsfläche umgenutzt wird und auf den Anteil organischen Bodens. Obwohl für die umgenutzten Waldflächen ein deutlich geringerer Kohlenstoffvorrat in der Vegetation angesetzt ist als auf durchschnittlichen Waldflächen in Deutschland, führt die Nutzungsänderung von Wäldern zu besonders hohen Treibhausgasemissionen. Die in vielen Bundesländern erforderliche Kompensation der Waldflächen durch Neuanlage von Wäldern in identischem Flächenumfang schafft erst Jahrzehnte später einen annähernden Ausgleich, wenn Deutschland bereits treibhausgasneutral sein soll.

Der entwickelten Methodik liegen zahlreiche methodische Setzungen zugrunde, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Generell wird bei der Parameterauswahl ein konservativer Ansatz verfolgt, d. h. in unklaren Fällen ist standardmäßig der Parameter ausgewählt, der der Arbeitshypothese des Projekts (Flächenneuanspruchnahme erzeugt hohe Treibhausgaswirkungen) zuwiderläuft. Besonders „konservativ“ ist dabei die Annahme, dass die in der Außenentwicklung nicht realisierte Geschossfläche zu 100 % durch Bautätigkeiten in der Innenentwicklung kompensiert wird. Reell sind die Wohnungen in der Innenentwicklung üblicherweise kleiner. Auch unter den standardmäßig nicht quantifizierten Aspekten – darunter Verdrängungseffekte landwirtschaftlicher Nutzungen, alternative Modellierungsansätze für Nutzungsänderungen auf organischem Boden oder die Berücksichtigung von höheren Bodenkohlenstoffvorräten auf Siedlungsflächen als auf angrenzenden Freiraumflächen – überwiegen diejenigen, die tendenziell zu noch höheren Treibhausgaswirkungen der Flächenneuanspruchnahme führen würden. Dies unterstützt die Robustheit der getroffenen Aussagen hinsichtlich der Einsparpotenziale, die durch eine Reduktion der Flächenneuanspruchnahme erzielt werden könnten. Demgegenüber quantifiziert das Nationale Treibhausgasinventar für Flächenneuanspruchnahme im Durchschnitt eine klimavorteilhafte Wirkung (Nettosenke), insbesondere aufgrund einer abweichenden Modellierung des Aufwuchses der neuen Siedlungsvegetation.

Vor diesem Hintergrund sollten weitere Studien durchgeführt werden, um Unsicherheiten zu verringern. Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich der Entwicklung des Kohlenstoffvorrats in der Siedlungsvegetation nach einer Flächenneuanspruchnahme und der Auswirkung von Bauvorhaben auf den Kohlenstoffvorrat in mineralischen und organischen Böden.

Mit dem Albedo-Effekt und dem Einfluss des Klimawandels auf den Kohlenstoffvorrat in Böden wurden zwei Aspekte weder standardmäßig noch in Form von Sensitivitätsanalysen berücksichtigt, die potenziell nennenswerte Auswirkungen auf die Projektergebnisse haben könnten.

5 Treibhausgaseinsparpotenziale einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme: Infrastruktur und Gebäude

Im Fokus des vorliegenden Projekts standen die LULUCF-bedingten Treibhausgaswirkungen von Flächenneuanspruchnahme (siehe Kapitel 2.1). Darüber hinaus wurden die mit der Errichtung von Infrastruktur und Gebäuden verbundenen Treibhausgaswirkungen untersucht. Die Wirkungen aus der Nutzung von Infrastruktur und Gebäuden wurden lediglich in Form eines Exkurses betrachtet.

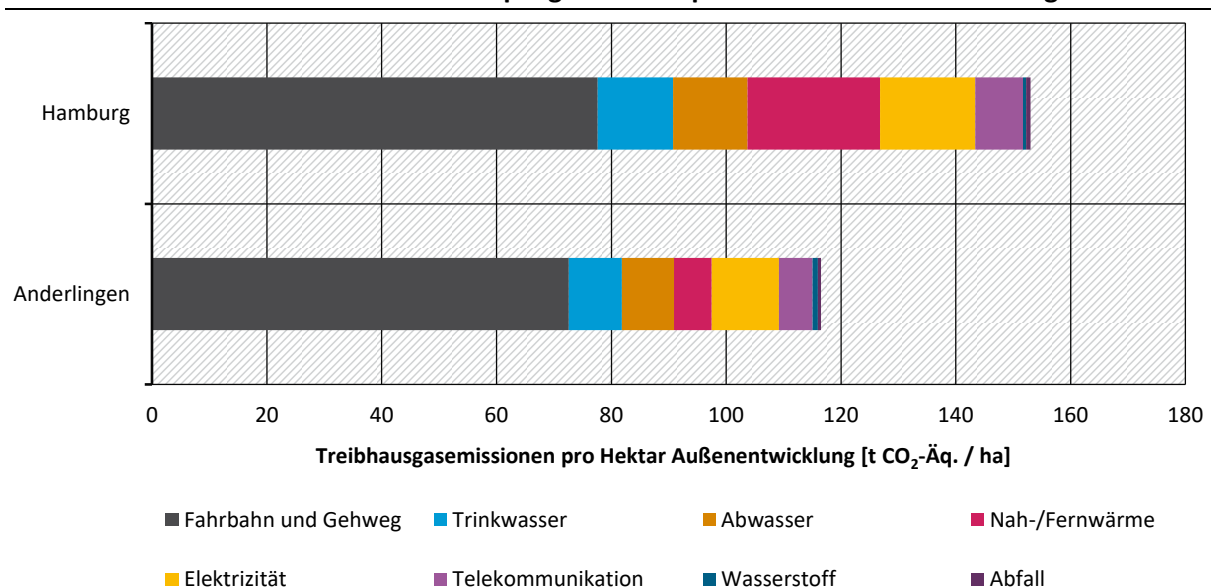
5.1 Errichtung von Infrastruktur

Die zugrundeliegende Systemgrenze umfasst die Herstellung der benötigten Baumaterialien und den Baustellenbetrieb zur erstmaligen Neuerrichtung der zusätzlichen öffentlichen technischen Infrastrukturen. Kontinuierlich anfallende Instandhaltungs- oder -setzungsmaßnahmen sind nicht innerhalb der Systemgrenze. Außerhalb der Systemgrenze liegen U-Bahnen, Straßenbahnen, Haltestellen und Lärmschutzwände. Außerdem liegt private technische Infrastruktur außerhalb der Systemgrenze. Die Details zur zugrundeliegenden Methodik sind in Kapitel 7.1 im Methodikband erläutert.

5.1.1 Treibhausgasemissionen pro Hektar Außen- bzw. Innenentwicklung

In Abbildung 31 sind die Treibhausgasemissionen dargestellt, die mit der Errichtung von öffentlicher technischer Infrastruktur pro Hektar Außenentwicklung in zwei ausgewählten Beispielgemeinden verbunden sind. Wie in Kapitel 7.1.2 im Methodikband beschrieben ist, hängen die Emissionen von der städtebaulichen Dichte der betrachteten Gemeinden ab. Mit Hamburg und Anderlingen sind in Abbildung 31 Beispielgemeinden von der höchsten und der niedrigsten Kategorie der städtebaulichen Dichte dargestellt.

Abbildung 31: Treibhausgasemissionen aus der Errichtung von öffentlicher technischer Infrastruktur in zwei Beispielgemeinden pro Hektar Außenentwicklung



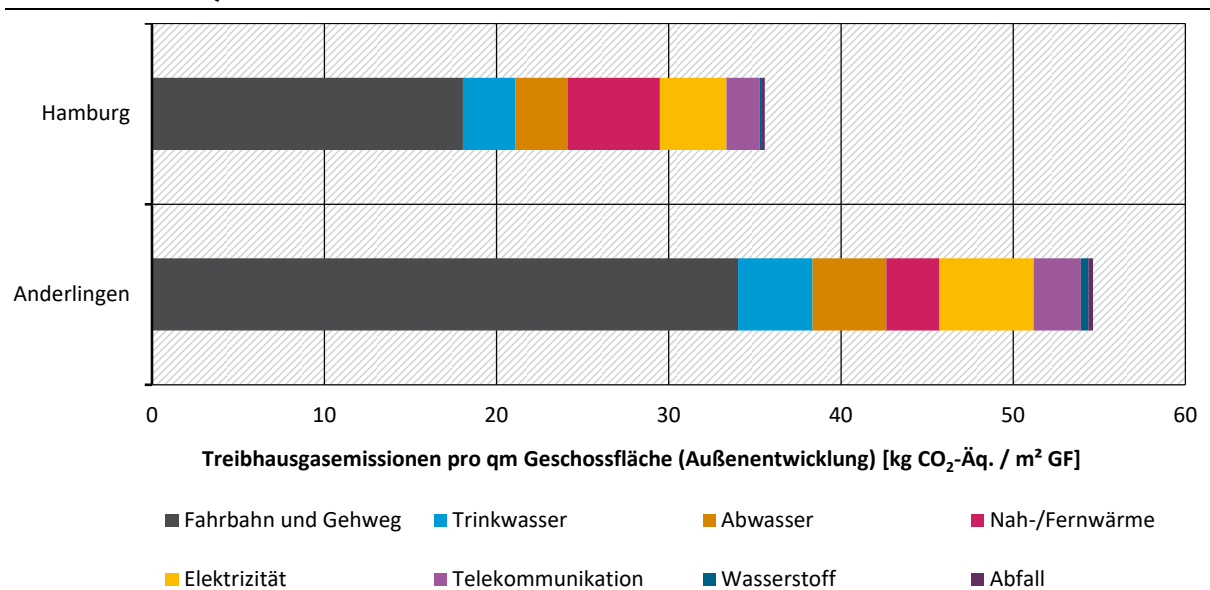
Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Es lassen sich die folgenden Erkenntnisse daraus ziehen:

- ▶ Pro Hektar Außenentwicklung entstehen Treibhausgasemissionen in Höhe von etwa 115 bis 150 t CO₂-Äq. Die Emissionen sind damit etwa 3- bis 4-mal so hoch wie die LULUCF-bedingte Treibhausgaswirkung einer durchschnittlichen Außenentwicklungsmaßnahme in Deutschland.
- ▶ Der Großteil der Emissionen resultiert aus Fahrbahnen und Gehwegen, d. h. aus der Herstellung und der Aufbringung des Asphalts.
- ▶ Außer den zusätzlich benötigten Abfallsammelfahrzeugen und den nur in seltenen Fällen zu verlegenden Wasserstoffleitungen tragen auch alle anderen Infrastruktursektoren sichtbare Beiträge zum Gesamtergebnis bei.
- ▶ Bezogen auf einen Hektar Außenentwicklungsfläche ist die Gesamtemission in Hamburg als Repräsentantin von Gemeinden mit der höchsten städtebaulichen Dichte um etwa 30 % höher als in Anderlingen als Repräsentantin von Gemeinden mit der niedrigsten städtebaulichen Dichte. Ursächlich dafür ist einerseits, dass in höherer städtebaulicher Dichte der Flächenanteil, der für öffentliche technische Infrastrukturen genutzt wird, größer ist. Andererseits müssen die Infrastrukturen für eine intensivere Nutzung ausgelegt sein, weshalb insbesondere größere Leitungsquerschnitte installiert werden, was zu höheren Materialaufwendungen führt.

In Abbildung 32 ist für dieselben Beispielmunicipalitäten dargestellt, welche Treibhausgasemissionen sich aus der Errichtung von öffentlicher technischer Infrastruktur pro Quadratmeter Geschossfläche ergeben, der in der Außenentwicklung realisiert wird.

Abbildung 32: Treibhausgasemissionen aus der Errichtung von öffentlicher technischer Infrastruktur in zwei Beispielmunicipalitäten pro in der Außenentwicklung realisiertem Quadratmeter Geschossfläche



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Es lassen sich die folgenden Erkenntnisse daraus ziehen:

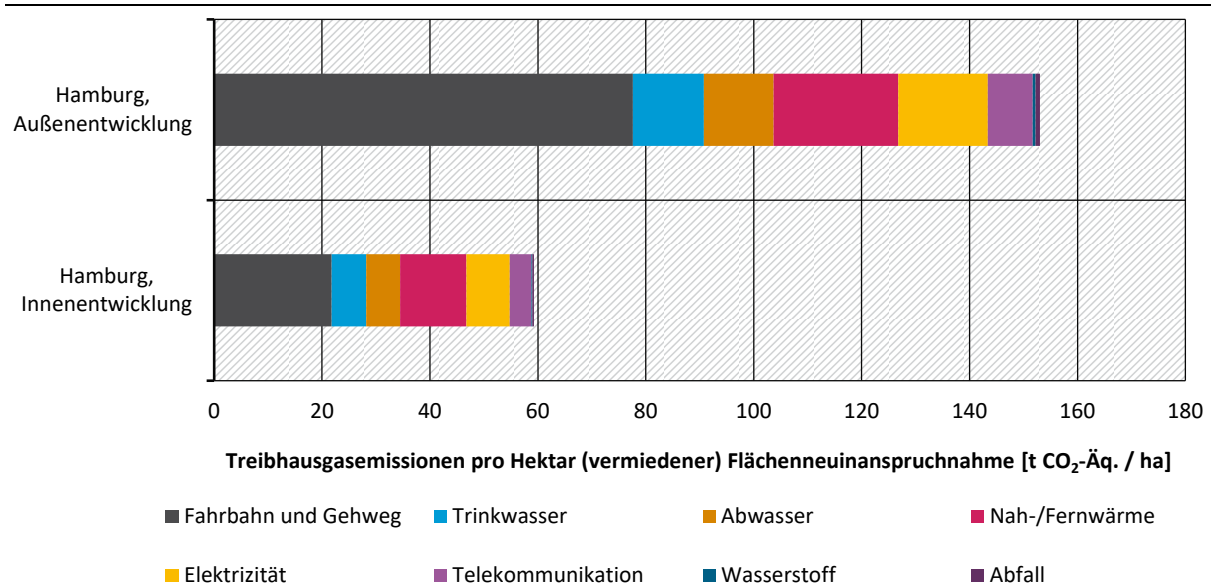
- ▶ Wird berücksichtigt, wie viel „Nutzen“ aus einem Hektar Außenentwicklungsfläche gezogen werden kann, d. h. wie viele Wohn- bzw. Gewerbeeinheiten bzw. wie viele Quadratmeter Geschossfläche realisiert werden, ergibt sich für Gemeinden mit hoher städtebaulicher Dichte ein besseres, d. h. niedrigeres, Treibhausgasergebnis als für Gemeinden mit geringer städtebaulicher Dichte.
- ▶ Pro Quadratmeter Geschossfläche sind die Treibhausgasemissionen in Hamburg als Repräsentantin von Gemeinden mit der höchsten städtebaulichen Dichte mit etwa 35 kg CO₂-Äq. um etwa 35 % geringer als in Anderlingen als Repräsentantin von Gemeinden mit der niedrigsten städtebaulichen Dichte.
- ▶ Die Beiträge der unterschiedlichen Infrastruktursektoren sind durch den Wechsel der Bezugsgröße unverändert.

Wird Außenentwicklung vermieden und stattdessen durch Innenentwicklung in identischem Umfang kompensiert, d. h. werden genauso viele Quadratmeter Geschossfläche bzw. Kubikmeter Gewerbebaumasse in der Innenentwicklung realisiert wie in der Außenentwicklung entfallen, müssen weniger technische Infrastrukturen neu errichtet werden. Insbesondere die Formen von Innenentwicklung, die auf Ebene von Einzelgebäuden stattfinden – beispielsweise Aufstockungen, Abriss und Neubau an gleicher Stelle oder die Schließung von Baulücken (siehe Kapitel 3.2.2) – führen selten dazu, dass neue technische Infrastrukturen benötigt werden. Mitunter kann eine Vergrößerung von Leitungsquerschnitten oder anderweitige Anpassung der Dimensionierung fällig werden. Die genauen methodischen Randbedingungen können in Kapitel 7.1.2 im Methodikband nachgeschlagen werden.

Vor diesem Hintergrund bestätigt Abbildung 33 das erwartete Ergebnis, denn die Abbildung zeigt, dass Außenentwicklungsmaßnahmen mit deutlich höheren Treibhausgasemissionen verbunden sind als Innenentwicklungsmaßnahmen. Konkret wird das in Abbildung 31 dargestellte Ergebnis für einen Hektar Außenentwicklung in Hamburg mit den Treibhausgasemissionen verglichen, die sich ergeben, wenn stattdessen eine verstärkte Innenentwicklung realisiert wird, die die entgangene „Funktion“ der vermiedenen Außenentwicklung vollständig kompensiert. Im Detail gilt:

- ▶ Durch Innenentwicklung lässt sich eine Verringerung der Treibhausgasemissionen um etwa 60 % erschließen.

Abbildung 33: Vergleich der Treibhausgasemissionen aus der Errichtung von öffentlicher technischer Infrastruktur zwischen Außenentwicklung und Innenentwicklung, Beispielgemeinde Hamburg



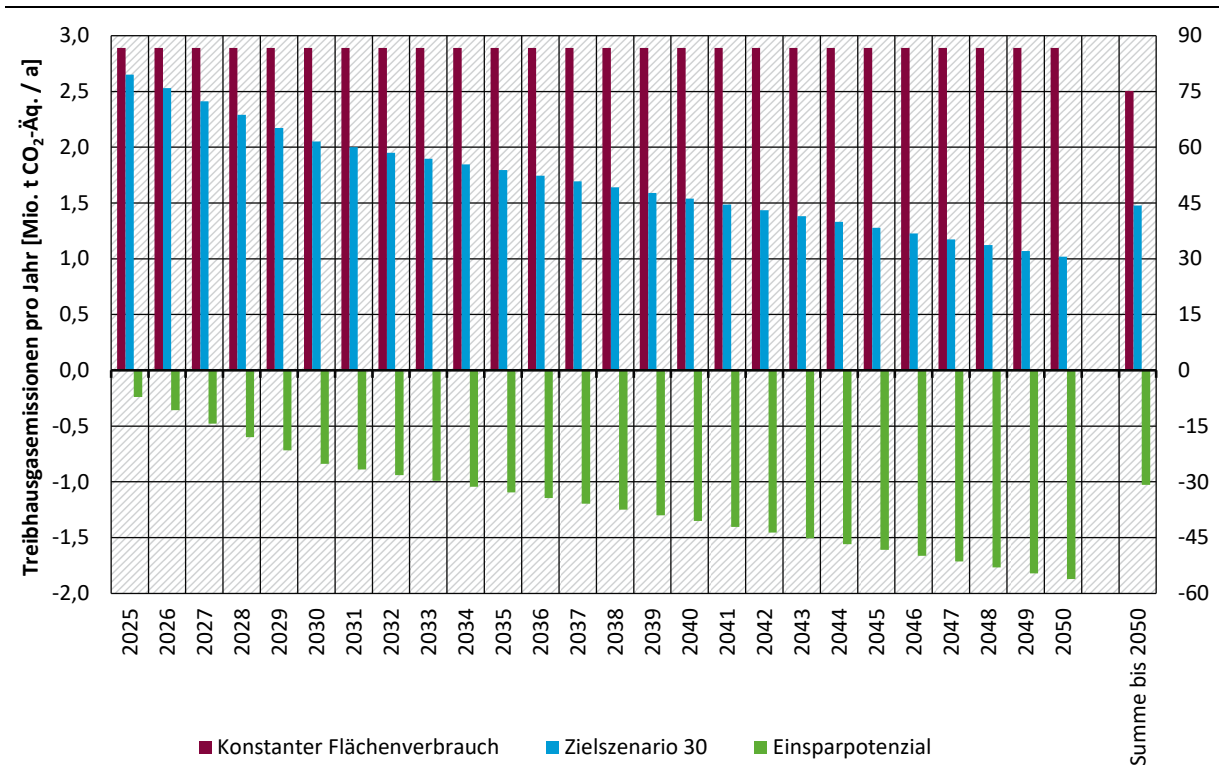
Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

5.1.2 Treibhausgasemissionen in Deutschland

Aus den Ergebnissen für die Gemeindetypen bzw. die Einzelgemeinden in Deutschland und den in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Szenarien, wie sich die Flächenneuinanspruchnahme in Deutschland entwickelt, lässt sich eine Hochrechnung für Deutschland vornehmen. Abbildung 34 zeigt, wie viele Treibhausgasemissionen in Deutschland durch die Errichtung von öffentlicher technischer Infrastruktur in den beiden Szenarien „Konstanter Flächenverbrauch“ und „Moderates Flächensparen“²⁴ verursacht werden. Dargestellt sind die jährlichen Emissionen im Zeitverlauf bis 2050 sowie am rechten Rand die kumulierte Treibhausgaswirkung über den Zeitraum 2025 bis 2050. Die Zielszenarien setzen sich aus einem Teil verbleibender Flächenneuinanspruchnahme und einem Teil zusätzlicher Innenentwicklung zum Ausgleich der vermiedenen Flächenneuinanspruchnahme zusammen.

²⁴ Reduktion der Flächenneuinanspruchnahme auf 30 Hektar pro Tag im Jahr 2030, siehe Kapitel 4.3.1.

Abbildung 34: Treibhausgasemissionen durch Errichtung von öffentlicher technischer Infrastruktur in Deutschland



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

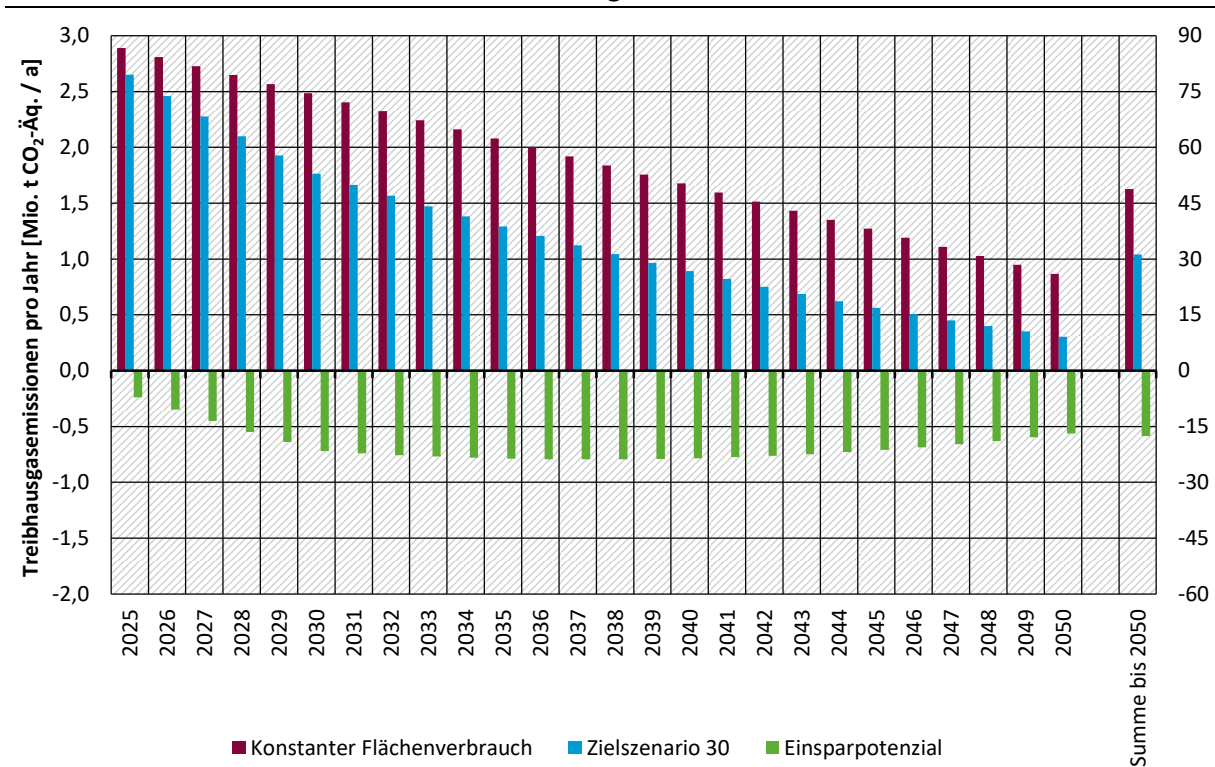
Es lassen sich die folgenden Erkenntnisse daraus ziehen:

- ▶ Hinsichtlich der Neuerrichtung öffentlicher technischer Infrastruktur verursacht die Flächenneuanspruchnahme in Deutschland bei einem Niveau von 55 Hektar pro Tag jährliche Emissionen von knapp 3 Mio. t CO₂-Äq.
- ▶ Wenn es gelingt, die Flächenneuanspruchnahme weiter zu senken (30 Hektar pro Tag im Jahr 2030, null Hektar pro Tag im Jahr 2050) und die so vermiedene Flächenneuanspruchnahme durch zusätzliche Innenentwicklung vollständig kompensiert wird, ergeben sich deutliche Einsparpotenziale. Schon ungefähr ab dem Jahr 2028 sind jährliche Einsparungen von einer halben Million t CO₂-Äq. möglich.
- ▶ Insgesamt sind über den Zeitraum bis 2050 Treibhausgasinderungen von etwa 30 Mio. t CO₂-Äq. möglich.

In einer sehr groben und einfachen Abschätzung stellt Abbildung 35 in Form einer Variante dar, welche Ergebnisse sich ergeben, wenn eine Dekarbonisierung der Emissionen aus der Bereitstellung der Baumaterialien unterstellt wird.²⁵

²⁵ Es wird angesetzt, dass sämtliche Emissionen bis 2050 linear auf 30 % des aktuellen Niveaus sinken.

Abbildung 35: Variante: Treibhausgasemissionen durch Errichtung von Infrastruktur in Deutschland mit Dekarbonisierung der Baumaterialien



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Es lassen sich die folgenden Erkenntnisse daraus ziehen:

- ▶ In der Variante „Dekarbonisierung“ sinken auch im Szenario „Konstanter Flächenverbrauch“ die Emissionen deutlich.
- ▶ Das Einsparpotenzial einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme ist entsprechend deutlich geringer als in der Variante ohne Dekarbonisierung. In Summe über den Zeitraum 2025 bis 2050 lassen sich noch etwa 15 Mio. t CO₂-Äq. einsparen.

5.2 Errichtung von Gebäuden

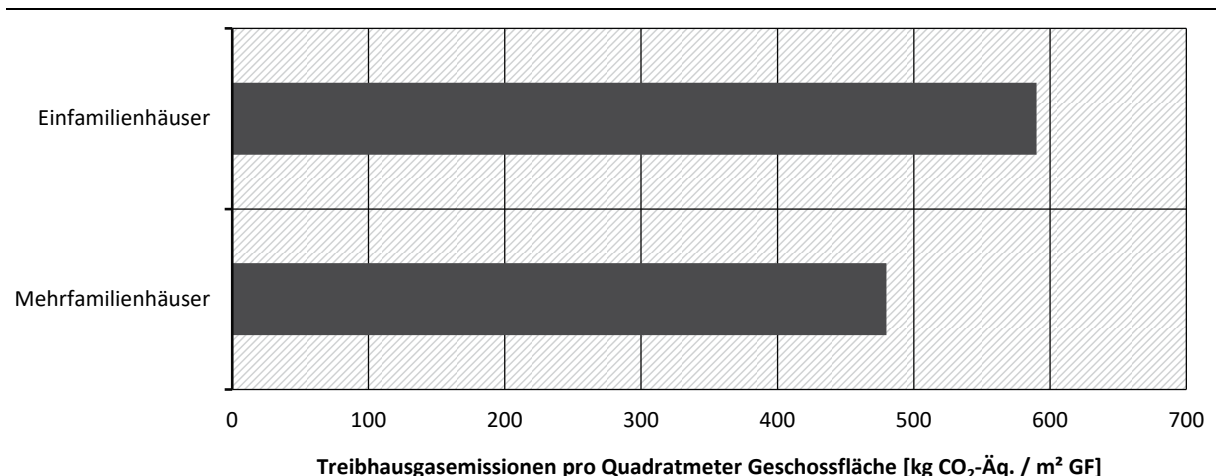
Die Systemgrenze umfasst die Herstellung der benötigten Baumaterialien und den Baustellenbetrieb zur erstmaligen Neuerrichtung der zusätzlichen Gebäudegeschossfläche. Kontinuierlich anfallende Instandhaltungs- oder -setzungsmaßnahmen sind nicht innerhalb der Systemgrenze. Ausschließlich Gebäude, die in den Nutzungen Wohnbau, Mischnutzung und besondere funktionale Prägung errichtet werden, sind Teil der Systemgrenze. Für diese Gebäude wird zunächst bestimmt, wie viele Treibhausgasemissionen im Zuge von Außenentwicklungsmaßnahmen mit tendenziell kleineren Gebäudeeinheiten – d. h. mit einer geringeren Anzahl an Wohneinheiten pro Gebäude und einem schlechteren A:V-Verhältnis – entstehen und anschließend mit den Treibhausgasemissionen verglichen, die im Zuge von Innenentwicklungsmaßnahmen mit tendenziell größeren Gebäudeeinheiten – d. h. mit einer größeren Anzahl an Wohneinheiten pro Gebäude und einem besseren A:V-Verhältnis – entstehen. Für alle anderen Nutzungen, insbesondere für Industrie- und Gewerbegebiete, erfolgt keine Quantifizierung der Emissionen, die mit der Gebäudeerrichtung verbunden sind, da keine veränderte Gebäudekubatur bei Innenentwicklungsmaßnahmen angenommen wird bzw. keine

Literaturquellen für eine fundierte Quantifizierung vorliegen. Die Details zur zugrundeliegenden Methodik sind in Kapitel 7.2 im Methodikband erläutert.

5.2.1 Treibhausgasemissionen pro Quadratmeter Gebäudegeschossfläche

Mithilfe einer Literaturrecherche zu aktuellen Ökobilanzstudien, die die Treibhausgasemissionen aus der Errichtung von Wohngebäuden untersuchen und einen Vergleich zwischen Ein- und Mehrfamilienhäusern umfassen, wurden die Treibhausgasemissionen festgelegt, die sich aus der Errichtung von Gebäuden ergeben. Aus dem arithmetischen Mittel von fünf entsprechenden Studien ergeben sich die beiden in Abbildung 36 dargestellten Durchschnittswerte²⁶. Sie beziehen sich auf einen Quadratmeter Geschossfläche²⁷.

Abbildung 36: Treibhausgasemissionen aus der Errichtung von Gebäuden von Ein- bzw. Mehrfamilienhäusern



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Im Durchschnitt verursachen Mehrfamilienhäuser pro Quadratmeter Geschossfläche etwa 20 % geringere Treibhausgasemissionen als Einfamilienhäuser. Es ist naheliegend, kann im Rahmen des vorliegenden Projekts aber nicht belegt werden, dass ein effizienterer Einsatz der Baumaterialien Hauptgrund für die niedrigeren Emissionen pro Quadratmeter Geschossfläche ist. Auch andere Parameter können ursächlich für den Unterschied zwischen Ein- und Mehrfamilienhäusern sein, darunter die eingesetzten Baustofftypen (z. B. Holz versus Stahlbeton), die Notwendigkeit eines Kellers bzw. einer Tiefgarage, die Dicke der Wände, usw.

5.2.2 Treibhausgasemissionen in Deutschland

Der Modellierung der Flächenkulisse der Siedlungsentwicklung (siehe Kapitel 3) lässt sich auch die Information entnehmen, wie viele Quadratmeter Geschossfläche in den Gemeinden Deutschlands bzw. in Summe in Deutschland in der Außenentwicklung realisiert werden bzw. bei einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme stattdessen in der Innenentwicklung realisiert werden. Es wird nicht angesetzt, dass Außenentwicklung stets ausschließlich in Form von Einfamilienhäusern und Innenentwicklung in Form von Mehrfamilienhäusern realisiert wird, sondern es wird jeweils ein Mix beider Gebäudeformen angenommen (siehe Kapitel 7.2.2 im Methodikband). Der Anteil von Mehrfamilienhäusern steigt mit der städtebaulichen Dichte in

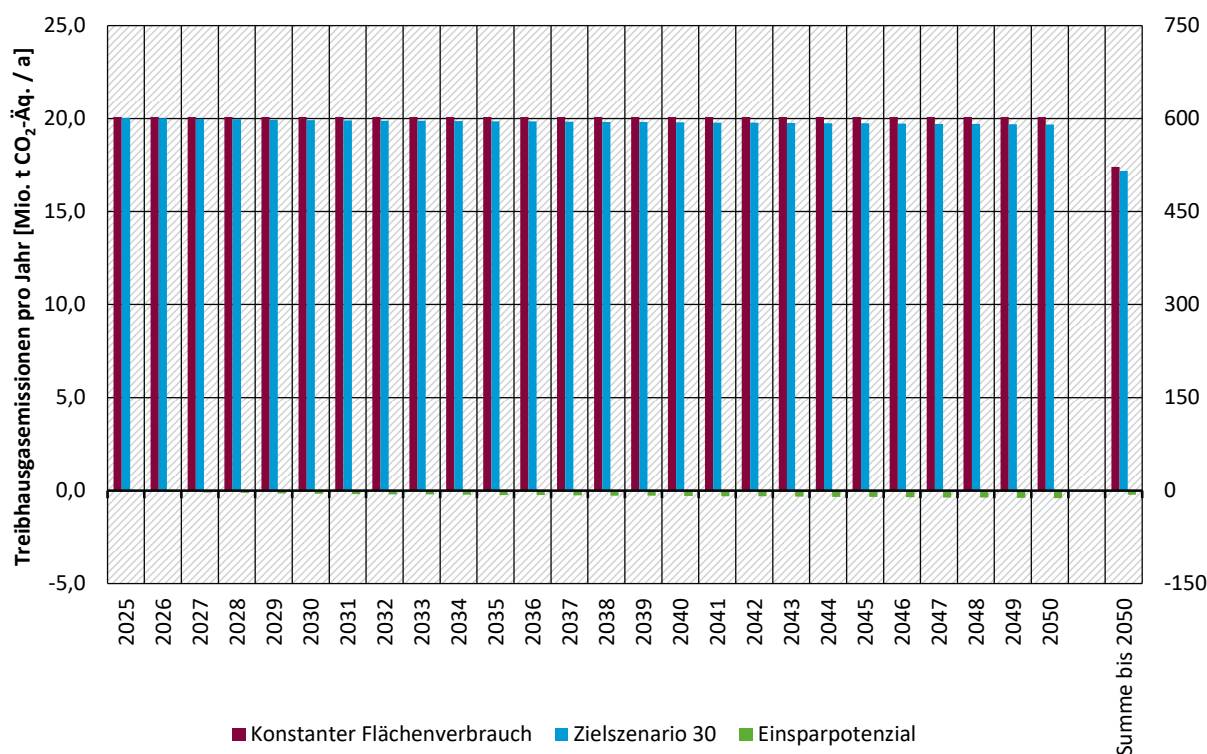
²⁶ Siehe Kapitel 7.2.3 im Methodikband.

²⁷ Die gebräuchliche Referenzgröße in den Ökobilanzstudien ist ein Quadratmeter Nettoraumfläche. Die recherchierten Ergebnisse werden in einem vereinfachten Ansatz ohne Umrechnung auf einen Quadratmeter Geschossfläche bezogen.

den Gemeinden. Außerdem wird der Anteil von Mehrfamilienhäusern in der Innenentwicklung etwa 10 % höher angesetzt. In Kombination mit den in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Szenarien, wie sich die Flächenneuanspruchnahme in Deutschland entwickelt, lässt sich eine Hochrechnung für Deutschland vornehmen.

Abbildung 37 zeigt, wie viele Treibhausgasemissionen in Deutschland durch die Errichtung von Gebäuden in den beiden Szenarien „Konstanter Flächenverbrauch“ und „Zielszenario 30 ha“ verursacht werden. Dargestellt sind die jährlichen Emissionen im Zeitverlauf bis 2050 sowie am rechten Rand die kumulierte Treibhausgaswirkung über den Zeitraum 2025 bis 2050. Die Zielszenarien setzen sich aus einem Teil verbleibender Flächenneuanspruchnahme und einem Teil zusätzlicher Innenentwicklung zum Ausgleich der vermiedenen Flächenneuanspruchnahme zusammen.

Abbildung 37: Treibhausgasemissionen durch Errichtung von Gebäuden in Deutschland



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Es lassen sich die folgenden Erkenntnisse daraus ziehen:

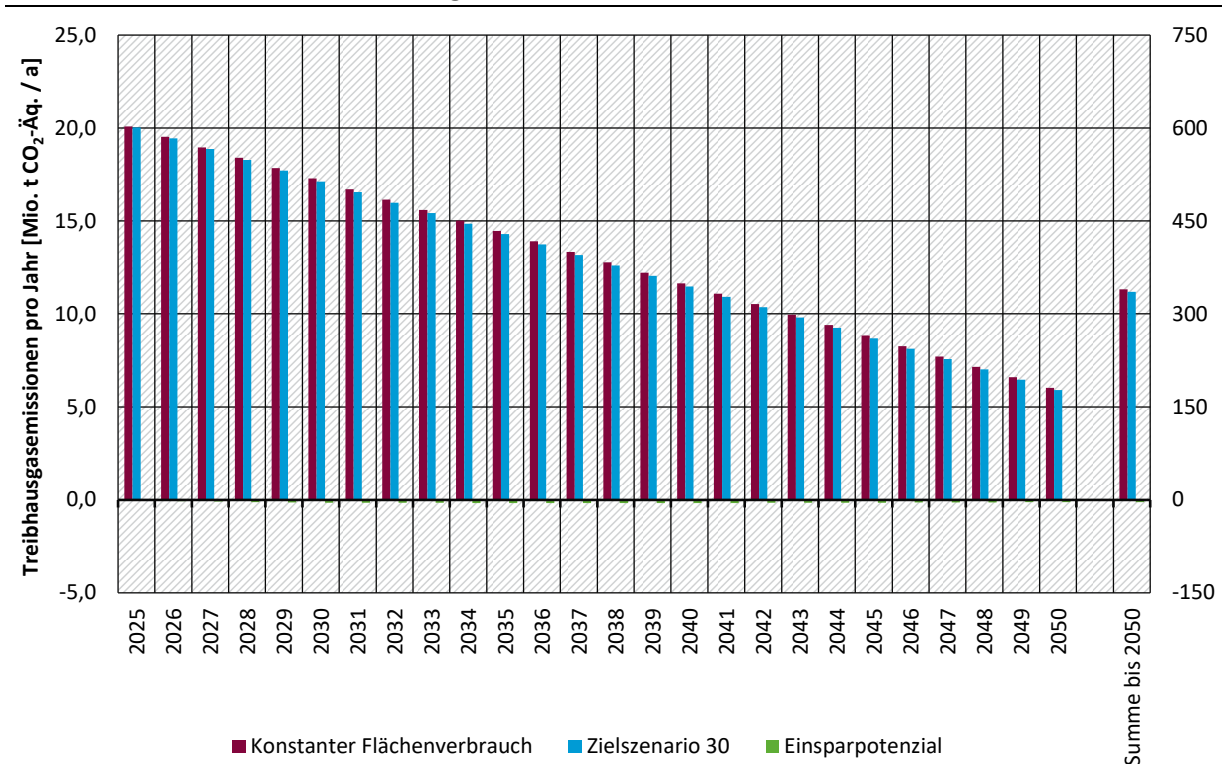
- Hinsichtlich der Neuerrichtung von Gebäuden²⁸ verursacht die Flächenneuanspruchnahme in Deutschland bei einem Niveau von 55 Hektar pro Tag jährliche Emissionen von etwa 20 Mio. t CO₂-Äq. Die Emissionen sind damit deutlich höher als in den Bereichen LULUCF (etwa 1 Mio. t CO₂-Äq.) und Errichtung technischer Infrastruktur (etwa 3 Mio. t CO₂-Äq.), obwohl die Errichtung von Industrie- und Gewerbebauten nicht in den etwa 20 Mio. t CO₂-Äq. enthalten ist. Diese Ergebnisse verdeutlichen die Relevanz des Themas der „grauen Emissionen“.

²⁸ in den Nutzungen Wohnbau, Mischnutzung und besondere funktionale Prägung, d. h. insbesondere exklusive Gebäuden in Industrie- und Gewerbegebieten.

- ▶ Die relativen Einsparpotenziale durch eine reduzierte Flächenneuanspruchnahme und eine stärkere Innenentwicklung fallen unter den gesetzten Annahmen im Vergleich zu LULUCF und der Errichtung von technischer Infrastruktur gering aus.
- ▶ Das absolute Einsparpotenzial über den Zeitraum bis 2050 beläuft sich auf etwa 7 Mio. t CO₂-Äq. und fällt damit niedriger aus als in den Bereichen LULUCF und Errichtung technischer Infrastruktur.

Analog zur Errichtung technischer Infrastruktur stellt Abbildung 38 in einer sehr groben und einfachen Abschätzung in Form einer Variante dar, welche Ergebnisse sich ergeben, wenn eine Dekarbonisierung der Emissionen aus der Bereitstellung der Baumaterialien und der benötigten Energieträger unterstellt wird.²⁹

Abbildung 38: Variante: Treibhausgasemissionen durch Errichtung von Gebäuden in Deutschland mit Dekarbonisierung



Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

Es lassen sich die folgenden Erkenntnisse daraus ziehen:

- ▶ Analog zur Errichtung von Infrastruktur sinken in der Variante „Dekarbonisierung“ auch im Szenario „Konstanter Flächenverbrauch“ die Emissionen deutlich.
- ▶ Das absolute Einsparpotenzial einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme verringert sich dadurch im Vergleich zur Variante ohne Dekarbonisierung weiter. In Summe über den Zeitraum 2025 bis 2050 lassen sich noch etwa 4 Mio. t CO₂-Äq. einsparen.

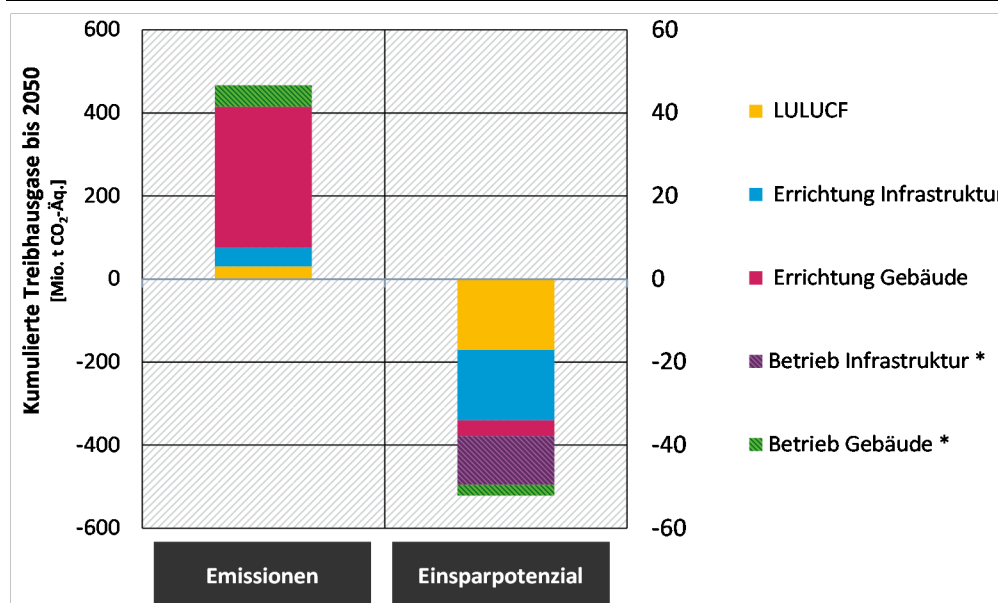
²⁹ Es wurde angesetzt, dass sämtliche Emissionen bis 2050 linear auf 30 % des aktuellen Niveaus sinken.

5.3 Gesamtschau

Flächenneuanspruchnahme entfaltet in nahezu allen Sektoren eine Treibhausgaswirkung. Im Rahmen des vorliegenden Projekts ist die LULUCF-bedingte Treibhausgaswirkung der Flächenneuanspruchnahme detailliert untersucht und quantifiziert worden. Auch hinsichtlich der Errichtung von technischer Infrastruktur und Gebäuden ist die Treibhausgaswirkung quantifiziert, allerdings in geringerer Detailtiefe. Hinsichtlich des Betriebs der Infrastruktur und der Gebäude ist lediglich eine überschlägige Abschätzung vorgenommen worden, siehe Kapitel 7.3 im Methodikband.

Abbildung 39 zeigt auf der linken Seite den Beitrag der untersuchten Aspekte zu den kumulierten Treibhausgasemissionen der Flächenneuanspruchnahme in Deutschland bis 2050 für das Szenario „Konstanter Flächenverbrauch“. Auf der rechten Seite sind die kumulierten Einsparpotenziale der jeweiligen Aspekte dargestellt für das Szenario „Moderates Flächensparen“ (siehe Kapitel 4.3.1) und für den Fall einer grob modellierten Dekarbonisierung der zugrundeliegenden Emissionsfaktoren. Danach ergibt sich bis zum Jahr 2050 ein Einsparpotenzial von rund 50 Mio. t CO₂-Äq.

Abbildung 39: Treibhausgaswirkungen und Einsparpotenziale aller betrachteten Aspekte



*: Die Aspekte „Betrieb Infrastruktur“ und „Betrieb Gebäude“ sind lediglich überschlägig abgeschätzt.

Die absoluten Emissionen, die mit dem Betrieb der Infrastruktur verbunden sind (linke Seite der Abbildung), sind nicht quantifiziert, da hier keine seriöse Aussage möglich ist; eine Quantifizierung des Einsparpotenzials für den Fall einer verstärkten Innenentwicklung hingegen ist auf Basis von wissenschaftlichen Studien möglich, siehe Kapitel 7.3.1 im Methodikband.

Quelle: eigene Darstellung, Öko-Institut / GGR

- ▶ Etwa 70 % der Emissionen, die zwischen 2025 und 2050 durch die Flächenneuanspruchnahme in Deutschland verursacht werden, entstehen durch die Errichtung der Gebäude. Dieses Ergebnis verdeutlicht die Relevanz des Themas der „grauen Emissionen“.
- ▶ Auch die anderen quantifizierten Aspekte haben sichtbare Anteile an den Gesamtemissionen der Flächenneuanspruchnahme, der LULUCF-Aspekt darunter die geringsten.

- ▶ Im Vergleich zu den hohen Emissionen, die aus der Errichtung von Gebäuden resultieren, lassen sich durch eine verstärkte Innenentwicklung zur Kompensation einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme lediglich geringe Einsparpotenziale hinsichtlich der Errichtung von Gebäuden erschließen. Hauptgrund ist, dass hier lediglich das Einsparpotenzial einer Verschiebung der Bauvorhaben in die Innenentwicklung und teilweise eine kompaktere Bauweise abgebildet ist. Die Einsparpotenziale sind diesbezüglich begrenzt. Größere Einsparpotenziale lassen sich hinsichtlich der Materialwahl, dem Baustil, usw. erschließen. Auch zeigt sich hier die Limitierung der Einsparpotenziale, sofern keine Suffizienzmaßnahmen, also insbesondere kleineren Wohnungen, betrachtet werden.
- ▶ Größere absolute Einsparpotenziale lassen sich hinsichtlich LULUCF, der Errichtung technischer Infrastruktur (jeweils etwa ein Drittel des Gesamt-Einsparpotenzials) und des Betriebs der Infrastruktur (ca. 20 % des Gesamt-Einsparpotenzials) erschließen. Die nennenswerten absoluten Einsparpotenziale hinsichtlich der Aspekte LULUCF und Errichtung technischer Infrastruktur ergeben sich trotz der überschaubaren absoluten Emissionen, die durch diese beiden Aspekte verursacht werden (linke Seite von Abbildung 39) aufgrund der hohen relativen Einsparpotenziale der Innenentwicklung im Vergleich zur Außenentwicklung (Errichtung von technischer Infrastruktur: ca. 60 %, siehe Kapitel 5.1.1; LULUCF: ca. 80 %, siehe Kapitel 4.3.1).
- ▶ Die Relevanz des im vorliegenden Projekt schwerpunktmäßig untersuchten Aspekts LULUCF steigt im Lauf der Jahre, da die damit verbundenen Emissionen und Einsparungen weitgehend unabhängig von der Dekarbonisierung der Wirtschaft sind.

6 Quellenverzeichnis

- ALKIS – Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem (2023): Auszüge aus unterschiedlichen Bundesländern. <https://hvbg.hessen.de/geoinformation/afis-alkis-atkis-modell/amtliches-liegenschaftskatasterinformationssystem> (10.09.2025)
- Böhm, J. (2023): Vergleich der Flächenenergieerträge verschiedener erneuerbarer Energien auf landwirtschaftlichen Flächen - für Strom, Wärme und Verkehr. *Ber Landwirtschaft* 101(1), DOI:10.12767/buel.v101i1.462, <https://buel.bmel.de/index.php/buel/article/view/462/682> (11.07.2024)
- Böttcher, H.; Hennenberg, K.; Hünecke, K.; Fehrenbach, H.; Rettenmaier, N.; Bischoff, M.; Reise, J. (2020): Naturschutz und fortschrittliche Biokraftstoffe. BfN-Skripten 580. Ergebnisse des gleichnamigen F+E-Vorhabens (FKZ: 35168 22 800), https://bfm.bsz-bw.de/frontdoor/deliver/index/docId/69/file/Skript_580.pdf (08.09.2025)
- BKG – Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (2022): Verwaltungsgebiete 1:5 000 000, Stand 31.12.2021 (VG5000 31.12.), verfügbar unter <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/verwaltungsgebiete/verwaltungsgebiete-1-5-000-000-stand-31-12-vg5000-12-31.html> bzw. https://daten.gdz.bkg.bund.de/produkte/vg/vg5000_1231/ (22.09.2025)
- BfN – Bundesamt für Naturschutz (2023): Schutzgebiete. Geodaten des BfN, bereitgestellt als WFS-Dienst unter <https://geodienste.bfn.de/ogc/wfs/schutzgebiet>. Verwendeter Datenstand: 2023; unter dem genannten WFS-Dienst werden durch das BfN inzwischen partiell aktualisierte Daten bereitgestellt.
- Destatis – Statistisches Bundesamt (2025): Erläuterungen zum Indikator „Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche“. Nachhaltigkeitsindikator über die Inanspruchnahme zusätzlicher Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/Methoden/anstieg-suv.pdf?__blob=publicationFile&v=25 (13.03.2025)
- Destatis – Statistisches Bundesamt (2023): Flächenstatistik (Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung) 2008-2021. <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/33111/details> (10.09.2025)
- Fehrenbach, H.; Bürck, S. (2020): CO₂-Opportunitätskosten von Biokraftstoffen in Deutschland. Erstellt im Auftrag der Deutschen Umwelthilfe (DUH). ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/pdf/CO2_Opportunit%C3%A4tskosten_Biokraftstoffe_1602022_002.pdf (11.07.2024)
- Flessa, H.; Don, A.; Jacobs, A.; Dechow, R.; Tiemeyer, B.; Poeplau, C. (2019): Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands - Ausgewählte Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hg.), Bonn. https://www.thuenen.de/media/institute/ak/Allgemein/news/Bodenzustandserhebung_Landwirtschaft_Kurzfassung.pdf (02.07.2024)
- ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (2023): Kommunale Energie- und Treibhausgasbilanzierung in Frankfurt am Main - Beschreibung der Methodik der kommunalen Treibhausgasbilanzierung in Frankfurt und Darstellung aktueller Ergebnisse für das Bilanzjahr 2021 und Entwicklungen. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg. <https://energiemanagement.stadt-frankfurt.de/Service/Dokumente/Energie-und-Treibhausgasbilanz-Frankfurt-2021.pdf> (02.07.2024)
- IÖR – Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (2023): Sonderauswertung aus dem IÖR-Monitor der Siedlungs- und Freiraumentwicklung im Auftrag des Büros Gertz Gutsche Rümenapp
- IÖR – Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (2018): Monitor der Siedlungs- und Freiraumentwicklung (IÖR-Monitor): Flächenschema. <https://www.ioer-monitor.de/methodik/> (02.07.2024)

OpenStreetMap und Mitwirkende (2023): Gebäudedatensatz der OpenStreetMap-Geodaten, extrahiert aus dem Open-StreetMap-Gesamtdatensatz für Deutschland, Stand 3/2023. Die aktuelle Fassung des Open-StreetMap-Gesamtdatensatz für Deutschland kann z. B. heruntergeladen werden über <https://download.geofabrik.de/europe/germany.html> (22.09.2025)

Rehfeldt, K.; Zölch, T.; Erlwein, S.; Pauleit, S.; Linke, S. (2024): Potenziale und Wirkungen grüner Infrastrukturen für Klimaresilienz am Beispiel von zwei ausgewählten Münchner Stadtquartieren. In: Kreuzt, S.; Stokman, A. [Hrsg.]: Transformation urbaner linearer Infrastrukturlandschaften. Wie Straßen und Gewässer zu attraktiven und klimaangepassten Stadträumen werden können. Oekom science. ISBN: 978-3-98726-080-3

Tegetmeyer, C.; Barthelmes, K.-D.; Busse, S.; Barthelmes, A. (2021) Aggregierte Karte der organischen Böden Deutschlands. 2., überarbeitete Fassung. Greifswald Moor Centrum-Schriftenreihe 01/2021 (Selbstverlag, ISSN 2627-910X). https://www.greifswaldmoor.de/files/dokumente/GMC%20Schriften/2021-01_Tegetmeyer%20et%20al.pdf (16.09.2025)

UBA – Umweltbundesamt (2023): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2023 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2021. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/28_2023_cc_berichterstattung_unter_der_klimarahmenkonvention.pdf (02.07.2024)

UBA – Umweltbundesamt (2017): Flächenanspruchnahme für Siedlungen und Verkehr reduzieren. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-flaeche/flaechensparen-boeden-landschaften-erhalten/flaechenanspruchnahme-fuer-siedlungen-verkehr#siedlungs-und-verkehrsflächen-in-deutschland> (02.07.2024)

Wagner, T.; Hennenberg, K.; Gutsche, J.-M. (2025): Treibhausgaseinsparpotenziale einer reduzierten Flächenneuanspruchnahme in Deutschland. Methodikband. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. FKZ: 3721 15 103 0.

Wittnebel, M.; Frank, S.; Tiemeyer, B. (2023): Aktualisierte Kulisse organischer Böden in Deutschland. Thünen-Institut für Agrarklimaschutz. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn066303.pdf (02.07.2024)

Woltjer, G.; Daioglou, V.; Elbersen, B.; Ibañez, G. B.; Smeets, E.; González, D. S.; Barnó, J. G. (2017): Study Report on Reporting Requirements on Biofuels and Bioliquids Stemming from the Directive (EU) 2015/1513. European Commission. <https://edepot.wur.nl/450070> (08.09.2025)