

CLIMATE CHANGE

28/2023

# Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2023

Nationaler Inventarbericht zum Deutschen  
Treibhausgasinventar 1990 – 2021

CLIMATE CHANGE 28/2023

# **Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2023**

Nationaler Inventarbericht zum Deutschen  
Treibhausgasinventar 1990 – 2021

Umweltbundesamt – UNFCCC-Submission

## Impressum

### Herausgeber

Umweltbundesamt

Wörlitzer Platz 1

06844 Dessau-Roßlau

Tel: +49 340-2103-0

Fax: +49 340-2103-2285

[buergerservice@uba.de](mailto:buergerservice@uba.de)

Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://www.twitter.com/umweltbundesamt)

### Abschlussdatum:

April 2023

### Redaktion:

Fachgebiet V 1.6 Emissionssituation

Dirk Günther (Fachgebietsleitung), Patrick Gniffke, Yaman Tarakji (unterstützend)

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Juni 2023

## 6 Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (CRF Sektor 4)

### 6.1 Übersicht (CRF Sektor 4)

#### 6.1.1 Kategorien und Gesamtemissionen und -senken 1990 - 2021

Im LULUCF-Sektors (Common Reporting Framework Sektor 4) wird in Deutschland über positive (Quelle) und negative (Senke) CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kohlenstoffpools<sup>85</sup>

- ober- und unterirdische Biomasse
- Totholz, Streu (Tote organische Substanz)
- organische und mineralische Böden
- Holzprodukte (4.G)

für die Landnutzungskategorien

- Wald (4.A.1)
- Acker (4.B.1)
- Grünland (4.C.1)
- Feuchtgebiete (4.D.1)
- Siedlungen (4.E.1)

sowie die jeweiligen Landnutzungsänderungen zwischen diesen Nutzungskategorien (CRF 4.A.2 - 4.E.2) berichtet. In der Kategorie Sonstiges Land (4.F) treten keine anthropogen bedingten Emissionen auf, da die Flächen nicht genutzt werden. Landnutzungsänderungen zu Sonstigem Land finden nicht statt, da einmal genutztes Land per Definition nicht wieder in ungenutztes überführt werden kann.

Des Weiteren werden inventarisiert:

- CO<sub>2</sub>-Emissionen aus
  - dem industriellen Torfabbau (4.D.1)
  - Moorbrand (4.(V))
- N<sub>2</sub>O-Emissionen aus
  - organischen Böden der Landnutzungskategorien 4.A, 4.C (nur Gehölze und Hecken), 4.D, 4.E - (Emissionen aus den Kategorien 4.B Ackerland und 4.C Grünland im engeren Sinn (i.e.S) werden unter Landwirtschaft CRF 3.D.a.6 berichtet)
  - direkte (CRF 4.(III)) und indirekte (CRF 4.(IV)) Emissionen aus der Humusmineralisation in Mineralböden infolge Landnutzungsänderung bzw. Landbewirtschaftung (Emissionen aus der Kategorie 4.B.1 werden unter Landwirtschaft CRF 3.D.a.5 berichtet)
  - dem industriellen Torfabbau (4.(II))
  - Waldbrand (4.(V))
- CH<sub>4</sub>-Emissionen aus
  - organischen Böden (4.(II))
  - Entwässerungsgräben organischer Bodenflächen (4.(II))
  - dem industriellen Torfabbau (4.(II))
  - Waldbrand (4.(V))

<sup>85</sup> CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Waldbränden werden über die Kohlenstoffänderung im Wald implizit berücksichtigt.

○ Moorbrand (4.(V))

Bei der Berichterstattung über die Freisetzung/Einbindung der Treibhausgase in jeder Landnutzungskategorie wird unterschieden zwischen Flächen, die in der Berichtsperiode

- keiner Landnutzungsänderung unterliegen, somit unverändert in der Landnutzungskategorie verbleiben (Verbleibkategorie 4.A.1 - 4.F.1)
- eine Umnutzung erfahren: Diese werden vom Zeitpunkt der Umnutzung in der Kategorie berichtet, deren Nutzung sie zugeführt wurden. Die Änderungsflächen werden in diesen neuen Landnutzungskategorien für 20 Jahre in Übergangskategorien (4.A.2 - 4.F.2) berichtet. Nach 20 Jahren in einer Übergangskategorie werden diese Flächen dann in die Verbleibkategorie übernommen. Kommt es vor Ablauf der Übergangsfrist von 20 Jahren erneut zu Landnutzungsänderungen, werden die betroffenen Flächen vom Zeitpunkt der Nutzungsänderung an sofort der neuen Übergangskategorie zugeschlagen. Die Frist von 20 Jahren beginnt dann erneut (effektive Übergangszeit).

Tabelle 325 zeigt eine Übersicht über das deutsche LULUCF-Berichtssystem, in der alle Landnutzungskategorien, Subkategorien und Pools sowie mögliche Übergangskategorien und THG-Emissionen tabellarisch zusammengefasst sind.

**Tabelle 325: Übersicht über das Deutsche LULUCF-Berichtssystem: Landnutzungskategorien, Subkategorien und Pools, Übergangsmöglichkeiten und damit verbundene Emissionen an Treibhausgasen**

Kategorie <sup>1)</sup>	Landnutzung/-änderung (Flächen) <sup>2)</sup>			Pools(Emissionen) <sup>2)</sup>					
	Verbleib	von	zu	Biomasse	mineralisch	Boden organisch	Gewässer	Wildfeuer	DOM
forl	x			CO <sub>2</sub> [EF <sub>Biomasse_forest_management</sub> ]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>dir</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>indir</sub> [EF <sub>BZE + Modell Yasso</sub> ]	CO <sub>2</sub> +DOC, N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> _org_soil+CH <sub>4</sub> _ditch org_soil [EF <sub>Org_soil</sub> IPCC default values_Wald]	/	CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O [AD <sub>Offizialstatistik</sub> , EF <sub>Waldbrand</sub> ]	CO <sub>2</sub> [EF <sub>DOM_forest_management</sub> ]
forl		zu allen LUC, außer cro1, crow, croh, croo, crob, gra1, gra2, wet2, wet4, wet5, set2, othl		CO <sub>2</sub> [EF <sub>Biomasse_deforestation</sub> ]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>dir</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>indir</sub> [EF+Yasso]	CO <sub>2</sub> +DOC, N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> _org_soil+CH <sub>4</sub> _ditch org_soil, <sup>3)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> [EF <sub>DOM_deforestation</sub> ]
forl			von allen LUC, außer cro1, crow, croh, croo, crox, gra1, set1 <sup>9)</sup> , wet2, wet4, wet5, set2	CO <sub>2</sub> [EF <sub>Biomasse_afforestation</sub> ]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>dir</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>indir</sub> [EF+Yasso]	CO <sub>2</sub> +DOC, N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> _org_soil+CH <sub>4</sub> _ditch org_soil [EF <sub>Org_soil</sub> IPCC default values_Wald]	/	/	CO <sub>2</sub> [EF <sub>DOM_afforestation</sub> ]
cro1	x			/	/	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+CH <sub>4</sub> _ditch org_soil <sup>5)</sup>	/	/	/
cro1		zu allen LUC, außer forl, wet2, wet4, wet5, set2, othl		CO <sub>2</sub> [EF cropland <sub>annuell</sub> ]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sup>8)</sup>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+CH <sub>4</sub> _ditch org_soil N <sub>2</sub> O <sup>3)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> , nur zu forl
cro1			von allen LUC, außer forl, wet2, wet4, wet5, set2	CO <sub>2</sub> [EF cropland <sub>annuell</sub> ]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sup>4)</sup>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+CH <sub>4</sub> _ditch org_soil <sup>5)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> , nur von forl
croh	x			/	/	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+CH <sub>4</sub> _ditch org_soil <sup>5)</sup>	/	/	/
croh		zu allen LUC, außer forl, wet2, wet4, wet5, set2, othl		CO <sub>2</sub> [EF croh]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sup>8)</sup>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+CH <sub>4</sub> _ditch org_soil, N <sub>2</sub> O <sup>3)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> , nur zu forl
croh			von allen LUC, außer forl, wet2, wet4, wet5, set2	CO <sub>2</sub> [EF croh]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sup>4)</sup>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+CH <sub>4</sub> _ditch org_soil <sup>5)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> , nur von forl

Kategorie <sup>1)</sup>	Landnutzung/-änderung (Flächen) <sup>2)</sup>			Pools(Emissionen) <sup>2)</sup>					
	Verbleib	von	zu	Biomasse	Boden	Boden	Gewässer	Wildfeuer	DOM
					mineralisch	organisch			
<b>croo</b>	x			CO <sub>2</sub> [Modell Obst]	/	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch_org_soil <sup>5)</sup>	/	/	/
<b>croo</b>		zu allen LUC, außer wet2, wet4, wet5, set2, othl		CO <sub>2</sub> [Modell Obst]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sup>8)</sup>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch_org_soil, N <sub>2</sub> O <sup>3)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> , nur zu forl
<b>croo</b>			von allen LUC, außer forl, wet2, wet4, wet5, set2	CO <sub>2</sub> [Modell Obst]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sup>4)</sup>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch_org_soil <sup>5)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> , nur von forl
<b>croo</b>	x			CO <sub>2</sub> [Modell KUP]	/	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch_org_soil <sup>5)</sup>	/	/	/
<b>croo</b>		zu allen LUC, außer wet2, wet4, wet5, set2, othl		CO <sub>2</sub> [Modell KUP]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sup>8)</sup>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch_org_soil, N <sub>2</sub> O <sup>3)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> , nur zu forl
<b>croo</b>			von allen LUC, außer forl, wet2, wet4, wet5, set2	CO <sub>2</sub> [Modell KUP]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sup>4)</sup>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch_org_soil <sup>5)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> , nur von forl
<b>croo</b>	x			CO <sub>2</sub> [Modell Baumschule]	/	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch_org_soil <sup>5)</sup>	/	/	/
<b>croo</b>		zu allen LUC, außer forl, wet2, wet4, wet5, set2, othl		CO <sub>2</sub> [Modell Baumschule]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sup>8)</sup>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch_org_soil, N <sub>2</sub> O <sup>3)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> , nur zu forl
<b>croo</b>			von allen LUC, außer forl, wet2, wet4, wet5, set2	CO <sub>2</sub> [Modell Baumschule]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sup>4)</sup>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch_org_soil <sup>5)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> , nur von forl
<b>croo</b>	x			CO <sub>2</sub> [Modell Wein]	/	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch_org_soil <sup>5)</sup>	/	/	/
<b>croo</b>		zu allen LUC, außer forl, wet2, wet4, wet5, set2, othl		CO <sub>2</sub> [Modell Wein]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sup>8)</sup>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch_org_soil, N <sub>2</sub> O <sup>3)</sup>	/	/	zu forl, CO <sub>2</sub>
<b>croo</b>			von allen LUC, außer forl, wet2, wet4, wet5, set2	CO <sub>2</sub> [Modell Wein]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sup>4)</sup>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch_org_soil <sup>5)</sup>	/	/	von forl, CO <sub>2</sub>
<b>croo</b>	x			CO <sub>2</sub> [Modell Weihnachtsbaum]	/	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch_org_soil <sup>5)</sup>	/	/	/
<b>croo</b>		zu allen LUC, außer forl, wet2, wet4, wet5, set2, othl		CO <sub>2</sub> [Modell Weihnachtsbaum]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sup>8)</sup>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch_org_soil, N <sub>2</sub> O <sup>3)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> , nur zu forl
<b>croo</b>			von allen LUC, außer forl, wet2, wet4, wet5, set2	CO <sub>2</sub> [Modell Weihnachtsbaum]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sup>4)</sup>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch_org_soil <sup>5)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> , nur von forl

Kategorie <sup>1)</sup>	Landnutzung/-änderung (Flächen) <sup>2)</sup>			Pools(Emissionen) <sup>2)</sup>					
	Verbleib	von	zu	Biomasse	Boden mineralisch	Boden organisch	Gewässer	Wildfeuer	DOM
gra1	x			/	/	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch org_soil <sup>5)</sup>	/	/	/
gra1		zu allen LUC, außer forl, wet2, wet4, wet5, set2, othl		CO <sub>2</sub> [EF grassland <sub>annuell</sub> ]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>dir</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>indir</sub>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch org_soil, N <sub>2</sub> O <sup>3)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> , nur zu forl
gra1			von allen LUC, außer forl, wet2, wet4, wet5, set2	CO <sub>2</sub> [EF grassland <sub>annuell</sub> ]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>dir</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>indir</sub>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch org_soil <sup>5)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> , nur von forl
gra2	x			CO <sub>2</sub> [Modell Hecke/Feldgehölz]	/	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+CH <sub>4</sub> _ditch org_soil, N <sub>2</sub> O [EF <sub>org_soil</sub> IPCC default values]	/	/	/
gra2		zu allen LUC, außer wet2, wet4, wet5, set2, othl		CO <sub>2</sub> [Modell Hecke/Feldgehölz] <sup>6)</sup>	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>dir</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>indir</sub>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch org_soil, N <sub>2</sub> O <sup>3)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> , nur zu forl
gra2			von allen LUC, außer forl, wet2, wet4, wet5, set2	CO <sub>2</sub> [Modell Hecke/Feldgehölz]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>dir</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>indir</sub>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch org_soil, N <sub>2</sub> O [EF <sub>org_soil</sub> IPCC default values_Wald]	/	/	CO <sub>2</sub> , nur von forl
gra3	x			CO <sub>2</sub> [Modell Hecke/Feldgehölz]	/	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch org_soil, N <sub>2</sub> O	/	/	/
gra3		zu allen LUC, außer wet2, wet4, wet5, set2, othl		CO <sub>2</sub> [Modell Hecke/Feldgehölz] <sup>6)</sup>	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>dir</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>indir</sub>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch org_soil, N <sub>2</sub> O <sup>3)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> , nur zu forl
gra3			von allen LUC, außer forl, wet2, wet4, wet5, set2	CO <sub>2</sub> [Modell Hecke/Feldgehölz]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>dir</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>indir</sub>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch org_soil, N <sub>2</sub> O	/	/	CO <sub>2</sub> , nur von forl
wet1	x			CO <sub>2</sub> [Modell Terrestrische Feuchtgebiete]	/	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch org_soil, N <sub>2</sub> O	/	/	/
wet1		zu allen LUC, außer wet2, wet4, wet5, set2, othl		CO <sub>2</sub> [Modell Terrestrische Feuchtgebiete]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>dir</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>indir</sub>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch org_soil, N <sub>2</sub> O <sup>3)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> , nur zu forl
wet1			von allen LUC, außer wet2, wet4, wet5, set2	CO <sub>2</sub> [Modell Terrestrische Feuchtgebiete]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>dir</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>indir</sub>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4</sub> _org_soil+ CH <sub>4</sub> _ditch org_soil, N <sub>2</sub> O	/	/	CO <sub>2</sub> , nur von forl
wet2	x	/	/	/	/	/	/	/	/



Kategorie <sup>1)</sup>	Landnutzung/-änderung (Flächen) <sup>2)</sup>			Pools(Emissionen) <sup>2)</sup>					
	Verbleib	von	zu	Biomasse	mineralisch	Boden organisch	Gewässer	Wildfeuer	DOM
wet3	x			/	/	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4_</sub> org_soil+ CH <sub>4_ditch</sub> org_soil, N <sub>2</sub> O [on-site emissions]	/	/	/
wet3		zu allen LUC, außer wet2, wet5, set2, othl		CO <sub>2</sub> [EF <sub>peat_extraction</sub> ]	/	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4_</sub> org_soil+ CH <sub>4_ditch</sub> org_soil, N <sub>2</sub> O <sup>3)</sup>	CH <sub>4</sub> [EF <sub>wet4org_soil</sub> ] <sup>7)</sup>	/	CO <sub>2</sub> , nur zu forl
wet3			von allen LUC, außer wet2,wet4, wet5, set2	CO <sub>2</sub> [EF <sub>peat_extraction</sub> ]	/	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O [on-site emissions]	/	/	CO <sub>2</sub> , nur von forl
wet3				/	/	CO <sub>2</sub> [off-site emissions]	/	/	/
wet4	x			/	/	/	CH <sub>4</sub> [EF <sub>wet4org_soil</sub> ] + CH <sub>4</sub> [EF <sub>wet4min_soil</sub> ]	/	/
wet4		/		/	/	/	/	/	/
wet4			nur von wet3	/	/	/	CH <sub>4</sub> [EF <sub>wet4org_soil</sub> ]	/	/
wet5	x	/	/	/	/	/	CH <sub>4</sub> [EF <sub>wet5</sub> ]	/	/
set1	x			CO <sub>2</sub> [Modell Siedlung]	/	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4_</sub> org_soil+ CH <sub>4_ditch</sub> org_soil, N <sub>2</sub> O	/	CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O [Moorbrand]	/
set1		zu allen LUC, außer wet2, wet4, wet5, set2, othl		CO <sub>2</sub> [Modell Siedlung]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>dir</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>indir</sub>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4_</sub> org_soil+ CH <sub>4_ditch</sub> org_soil, N <sub>2</sub> O <sup>3)</sup>	/	/	zu forl, CO <sub>2</sub>
set1			von allen LUC, außer wet2, wet4, wet5, set2	CO <sub>2</sub> [Modell Siedlung]	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>dir</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>indir</sub>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4_</sub> org_soil+ CH <sub>4_ditch</sub> org_soil, N <sub>2</sub> O	/	/	von forl, CO <sub>2</sub>
set2	x	/	/	/	/	/	/	/	/
othl	x			/	/	/	/	/	/
othl		zu allen LUC, außer wet2, wet4, wet5, set2		/	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>dir</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>indir</sub>	CO <sub>2</sub> +DOC, CH <sub>4_</sub> org_soil+ CH <sub>4_ditch</sub> org_soil, N <sub>2</sub> O <sup>3)</sup>	/	/	CO <sub>2</sub> , nur zu forl
othl		/		/	/	/	/	/	/

1) Begriffsbestimmung s. Tabelle 335 Kapitel 6.1.2

2) Die Ausweisung von Flächen und die Berechnung der Emissionen erfolgen für alle Pools und Landnutzungskategorien auf Bundeslandebene

3) N<sub>2</sub>O, CRF 3.D.a.6, bei LUC zu gra1 und anderen Ackerlandkategorien (cro\*)

4) N<sub>2</sub>O, CRF 3.D.a.5, bei LUC von anderen Ackerlandkategorien (cro\*)

5) N<sub>2</sub>O, CRF 3.D.a.6

6) bei LUC zu forl, nur 50 % Verlust der Biomasse

7) nur bei LUC zu wet4

8) N<sub>2</sub>O, CRF 3.D.a.5 bei LUC zu cro1, croo, cros, crot, crow, crox

9) Ausnahmen: Halde, Tagebau, Deponie zu Wald sind möglich

Abbildung 51, Abbildung 52 und Abbildung 53 geben für die vorliegende Submission 2023 eine Übersicht über die zeitliche Entwicklung der Treibhausgasemissionen (Summe aus CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O als CO<sub>2</sub>-Äquivalente) aus den Bereichen 4.A-4.E, aufgeteilt nach Unterkategorien, Pools und Treibhausgasen. Auf der X-Achse ist die Jahresleiste im Berichtszeitraum und auf der Y-Achse die Emissions- (positive Werte) und die Senkenwirkung (negative Werte) in Kilotonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (kt CO<sub>2</sub>-Eq.) dargestellt.

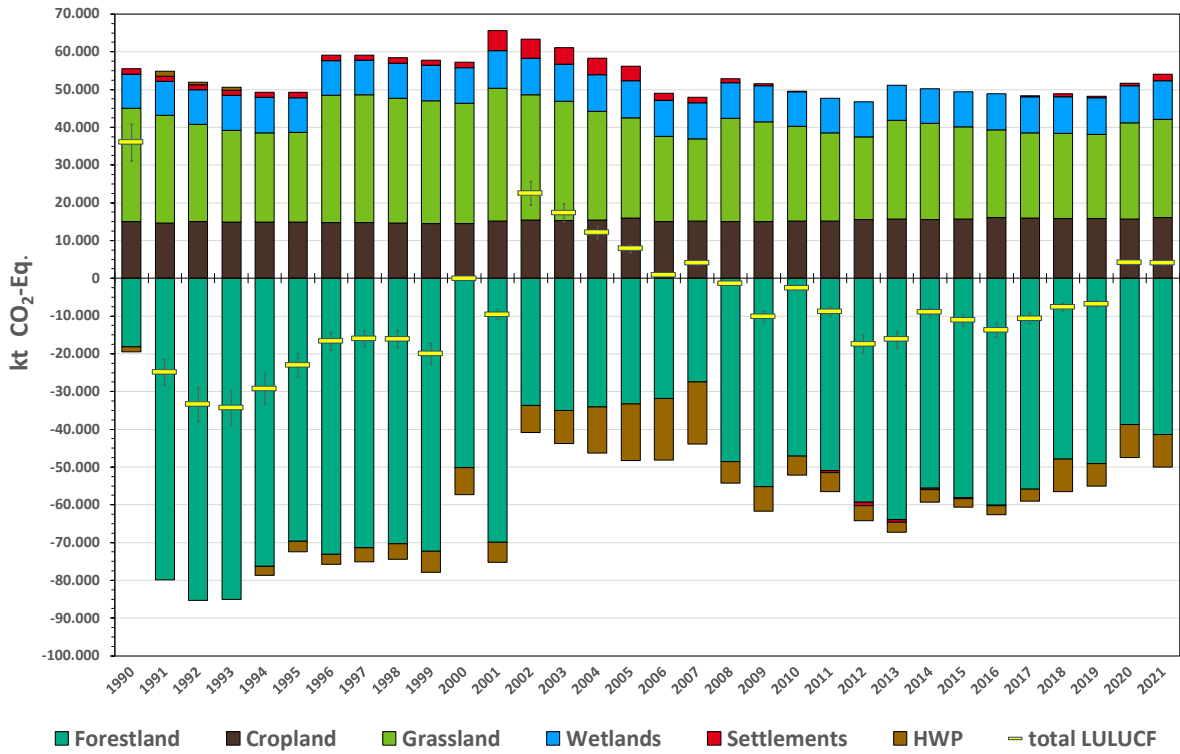
Die deutlichen Änderungen der Emissionen in den Jahren 1990, 2002 und 2008 sind auf stark veränderte Emissionsfaktoren für die Forstbiomasse durch die Holznutzung zurückzuführen. Diese hat in der Inventurperiode 1991 bis 2001 gegenüber 1990 stark abgenommen (1990 verstärkte Aufarbeitung von Sturmschäden), zwischen 2002 - 2008 war eine Zunahme, 2008 eine leichte Abnahme zu verzeichnen (siehe Kapitel 6.4.2.2.1). Die Abnahme der Senkenfunktion der Forstbiomasse zwischen 2017 und 2020 ist auf die Waldschäden infolge der großen Trockenheit in diesen Berichtsjahren zurückzuführen. Die Zeitreihen spiegeln neben den Veränderungen bei der Forstbiomasse die Trends der Landnutzungsänderungen wider (siehe Kapitel 6.3.5). Für die Erfassung von Landnutzungsänderungen wurden Datensätze der Stichjahre 1990, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 und 2021 verwendet (vergl. Kapitel 6.3). Die Landnutzungsänderungen wurden zwischen den Stichjahren linear interpoliert, so dass sich zwischen den Stichjahren jeweils konstante mittlere Landnutzungsänderungen ergeben (siehe Tabelle 351).

Der Verlauf der Nettoemissionen von 1990 bis 2021 zeigt, dass der LULUCF-Sektor in den meisten Jahren als Senke fungierte. Hauptursache hierfür ist die Landnutzungskategorie Wald. Die Pools Waldbiomasse und -böden tragen einen bedeutenden Teil zur Senke bei. Einen Anteil an der Senkenfunktion liefern ebenfalls die Holzprodukte durch ihre Funktion als Kohlenstoffspeicher. Dem gegenüber stehen hauptsächlich die Emissionen aus den landwirtschaftlich genutzten Flächen der Landnutzungskategorien Acker- und Grünland. Diese beiden Kategorien weisen über die Jahre anhaltend hohe Emissionen aus entwässerten organischen Böden auf. Die Landnutzungskategorie Feuchtgebiete trägt hauptsächlich durch den industriellen Torfabbau zur Freisetzung von THG-Emissionen bei. In den Jahren 1990, 2002 bis 2007 sowie 2020 und 2021 war der LULUCF-Sektor eine Quelle für Treibhausgase. Dies ist im Wesentlichen auf die geringere Senkenfunktion des Waldes durch verstärkte Holzeinschläge zurückzuführen. Hauptursache hierfür ist die Aufarbeitung von Waldschäden infolge unterschiedlicher Kalamitäten (z.B. Stürme, Trockenheit, Schädlingsbefall).

Dominierendes Treibhausgas ist Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), welches Netto als bedeutende Senke wirkt. Die Freisetzung von Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) ist demgegenüber gering. Detaillierte Beschreibungen der Emissionen und deren Zeitreihen finden sich in den jeweiligen Kapiteln der Landnutzungskategorien (Kapitel 6.4.1, Kapitel 6.5.1, Kapitel 6.6.1, Kapitel 6.7.1, Kapitel 6.8.1 und Kapitel 6.10.1).

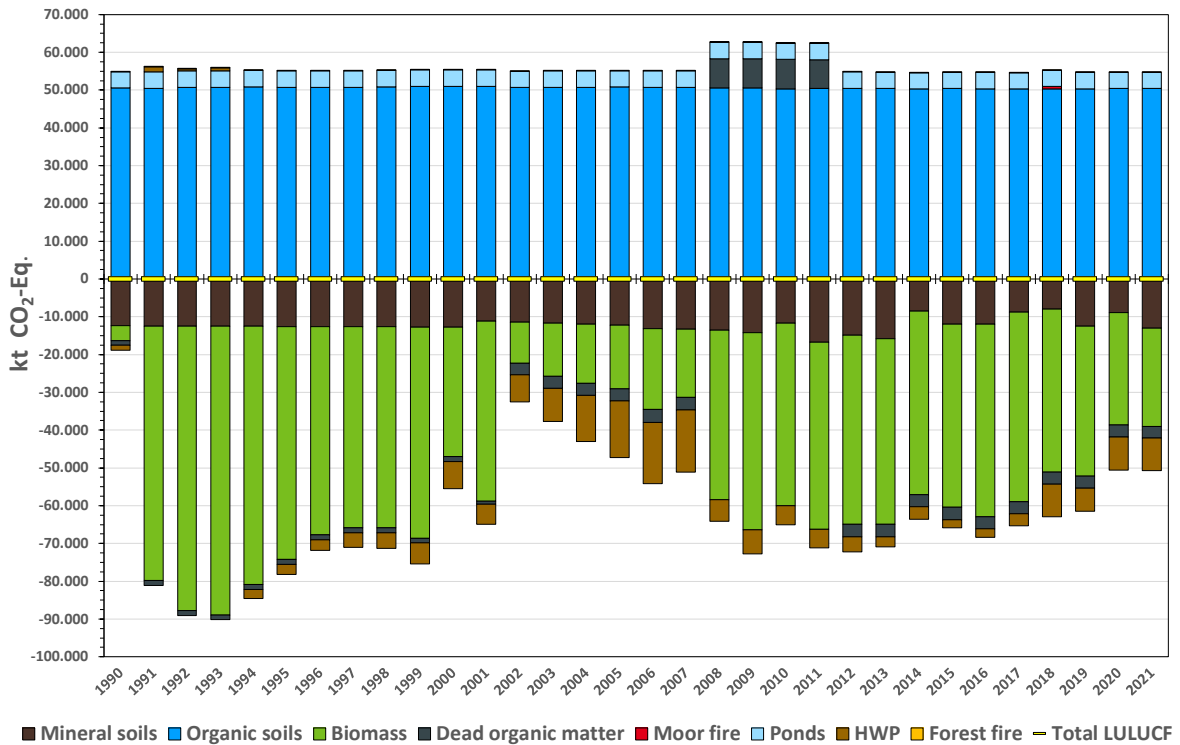
**Abbildung 51: Zeitreihen der Treibhausgasemissionen und – senken (Summe aus CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O) [kt CO<sub>2</sub>-Äquivalente nach IPCC AR5] im LULUCF-Sektor seit 1990, unterschieden nach Unterkategorien**

Emissions CRF-Sektor 4: Time Series Land Use Categories



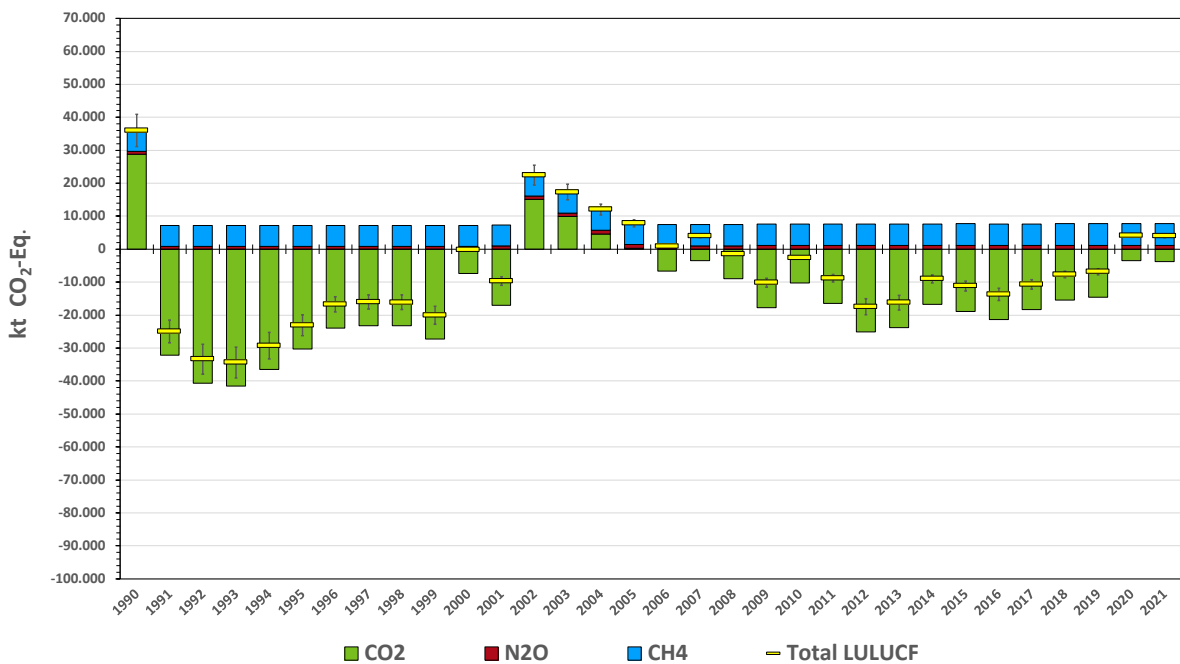
**Abbildung 52: Zeitreihen der Treibhausgasemissionen und –senken (Summe aus CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O) [kt CO<sub>2</sub>-Äquivalente nach IPCC AR5] im LULUCF-Sektor seit 1990, unterschieden nach Pools**

Emissions CRF-Sector 4: Time Series Pools



**Abbildung 53: Zeitreihen der Treibhausgasemissionen und –senken (Summe aus CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O) [kt CO<sub>2</sub>-Äquivalente nach IPCC AR5] im LULUCF-Sektor seit 1990, unterschieden nach Treibhausgasen (GHG)**

Emissions CRF-Sector 4: Greenhouse Gases



Die Gesamtunsicherheit des deutschen LULUCF-Inventars (ohne Holzprodukte) beträgt 13,6 %. Ausführungen hierzu finden sich in den entsprechenden Kapiteln der einzelnen Landnutzungskategorien sowie im Kapitel 6.1.2.10.

### 6.1.2 Methodische Grundlagen

Das für den CRF-Sektor 4 in den 2006 IPCC Guidelines geforderte System der Landnutzungssysteme wurde von Deutschland übernommen; die Umsetzung ist in Tabelle 326 dargestellt, weitere Erläuterungen finden sich in Kapitel 6.2 (vergl. auch Kapitel 6.3).

**Tabelle 326: Zuordnung der deutschen Berichtskategorien zu den IPCC-Landnutzungskategorien**

IPCC-Kategorie	Deutsche Landnutzungskategorie bzw. Subkategorie			
	Kürzel	Volltext	Beschreibung	
4.A Forest Land	forl	<b>Wald</b>	Laub-, Nadel- und Mischwaldflächen	
		<b>Ackerland</b>	Summe aus Ackerland <sub>annuell</sub> , Hopfenanbauflächen, Weinanbauflächen, Obstanbauflächen, Baumschulen, Weihnachtbaumkulturen, Kurzumtriebsplantagen	
	cro1	<b>Ackerland<sub>annuell</sub></b>	Flächen zum Anbau von Feldfrüchten und Gemüse	
	croh	<b>Hopfenanbauflächen</b>	Mit speziellen Vorrichtungen ausgestattete Agrarfläche für den Anbau von Hopfen	
	crow	<b>Weinanbauflächen</b>	Weingärten sind mit speziellen Vorrichtungen ausgestattete Agrarflächen, auf denen Weinstöcke angepflanzt sind	
	4.B Cropland	croo	<b>Obstanbauflächen</b>	Obstplantagen sind Flächen, die vorwiegend dem Intensivobstanbau dienen und mit Obstbäumen und Obststräuchern bestanden sind. Im Unterschied zu Streuobst handelt es sich hierbei um gleichmäßige und dichter angelegte Monokulturen.
		crot	<b>Baumschulen</b>	Baumschulen sind Flächen, auf denen Holzgewächse aus Samen, Ablegern oder Stecklingen unter mehrmaligem Umpflanzen (Verschulen) gezogen werden.
		crox	<b>Weihnachtsbaumkulturen</b>	Weihnachtsbaumkultur bezeichnet eine landwirtschaftliche Fläche, die vorrangig mit Weihnachtsbäumen bepflanzt ist
		cro5	<b>Kurzumtriebsplantagen</b>	Kurzumtriebsplantagen sind Flächen, auf denen Baumarten mit dem Ziel baldiger Holzentnahme angepflanzt werden und deren Bestände eine Umtriebszeit von nicht länger als 20 Jahren haben.
			<b>Grünland</b>	Summe aus Grünland i.e.S., Gehölzen und Hecken
4.C Grazing Land	gra1	<b>Grünland im engeren Sinne</b>	Grünland im engeren Sinn (Wiesen, Weiden, Mähweiden, Nassgrünland, Hutungen....)	
	gra2	<b>Gehölze</b>	Flächen, die mit einzelnen Bäumen, Baumgruppen, Büschen und Sträuchern bestockt sind und nicht unter die Wald-, Grünland i.e.S-Definition fallen	
	gra3	<b>Hecken</b>	Hecken bestehen aus ein- oder mehrreihig, linear dicht beieinander stehender Sträucher (vereinzelt auch Bäume)	
4.D Wetlands		<b>Feuchtgebiete</b>	Summe aus Terrestrischen Feuchtgebieten, Natürlichen Gewässern, Torfabbau sowie Stehenden und Fließenden künstlichen Gewässern	
	wet1	<b>Terrestrische Feuchtgebiete</b>	Terrestrische Feuchtgebiete, die nicht unter eine der anderen Landnutzungskategorien fallen (z.B. naturnahe Moore)	
	wet2	<b>Natürliche Gewässer</b>	Natürliche Wasserflächen und Wasserläufe	
	wet3	<b>Torfabbau</b>	Flächen auf organischen Böden zur Torfgewinnung	
	wet4	<b>Stehende künstliche Gewässer</b>	Künstliche stehende Gewässer (Wasserflächen), wie Stauseen, Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen sowie Teiche, Speicher, künstliche Süßwasserbecken aller Art (Ausnahme: Abwasser-behandlungsanlagen)	
	wet5	<b>Fließende künstliche Gewässer</b>	Künstliche, fließende Gewässer (Wasserläufe), wie Entwässerungsgräben der Wasserwirtschaft (Ausnahme: Entwässerungsgräben auf organischen Böden), Hafenbecken an Binnengewässern und Kanäle	
4.E Settlements		<b>Siedlungen</b>	Summe aus Siedlungen und Straßen	
	set1	<b>Gebäude und Freiflächen</b>	Flächen zu Wohn-, Produktions- und Verkehrszwecken sowie innerstädtische Grünflächen und Flächen zur Freizeitgestaltung und Erholung	
	set2	<b>Straßen</b>	Verkehrswege für die Nutzung von Straßenfahrzeugen und Fußgängern	
4.F Other Land	othl	<b>Sonstiges Land</b>	Vegetationslose, nicht bewirtschaftete Flächen	

### Grundlegende Elemente und Schritte bei der Erstellung des LULUCF-Inventars

1. **Landnutzungsmatrix<sub>jährlich</sub> [Area<sub>ann</sub>]**: Jährliche Berechnung der Gesamtfläche für die Unterkategorien „verbleibende Landnutzung“ und „Landnutzungsänderung“ für die

Kategorien *Wald, Ackerland<sub>annuell</sub>, Hopfen, Wein, Obst, Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen, Kurzumtriebsplantagen, Grünland im engeren Sinn, Gehölze, Hecken, terrestrische Feuchtgebiete, natürliche Gewässer, fließende künstliche Gewässer, stehende künstliche Gewässer, Torfabbau, Siedlungen und sonstiges Land*, für alle Zeitreihen unterteilt nach mineralischen und organischen Böden. Die Landnutzung und deren Flächenausweisung wurden explizit bestimmt für die Jahre 1990, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 und 2021. Für die Zeiträume zwischen diesen Jahren wurden die ermittelten Flächen den IPCC-Guidelines folgend (2006 IPCC Guidelines IPCC (2006b), Vol. 4 Ch. 3 Fig. 3.1) linear interpoliert (siehe Kapitel 6.3).

2. **Emissionsfaktoren für Kohlenstoffvorräte, Lachgas- und Methanemissionen im Jahr der Landnutzungsänderung [ $EF_{ann}$ ]:** Die Emissionsfaktoren für die verschiedenen Pools werden differenziert nach Landnutzungskategorie für jeden Erhebungspunkt individuell berechnet (Kapitel 6.1.2 ff). Die Kohlenstoffvorräte, Lachgas- und Methanemissionen pro Flächeneinheit sind über die Zeit nicht konstant.
3. **Kohlenstoffvorratsänderungen für die jährlichen Landnutzungsänderungen [ $E_{ann}$ ]** werden nach der Formel  $E_{ann} [z.B. t C] = EF_{ann} [z.B. t C/ha] * Area_{ann} [ha]$  berechnet, unter der Annahme, dass die gesamte Kohlenstoffvorratsänderung im Jahr der Landnutzungsänderung auftritt.
4. **Einführung einer maximal zwanzigjährigen Übergangszeit [ $Area_{20y}$ ]:** Die Berechnung der Landnutzungsmatrix beginnt 1970, um die Landnutzungsänderungsflächen vor dem eigentlichen Berichtszeitraum zu ermitteln (siehe Kapitel 6.3.4). Ermittelte Übergangsflächen werden der jeweiligen Landnutzungsänderungskategorie im Jahr des Übergangs zugeschlagen und verbleiben für maximal 20 Jahre in dieser Kategorie. Nach 20 Jahren werden die Flächen in die Verbleibkategorie der Zielnutzung überführt. Folgerichtig sind ab dem zweiten Berichtsjahr die Flächen in den Verbleibkategorien kleiner, in den Übergangskategorien größer, als in einer jährlichen Landnutzungsmatrix. Die Flächen sind in den CRF-Tabellen, Tabelle 349 und Tabelle 350 dargestellt. Sind Flächen innerhalb der 20 Jahre Übergangszeit erneut von Landnutzungsänderungen betroffen, werden diese unmittelbar zum Zeitpunkt der Umnutzung in die neue Übergangskategorie überführt und die Frist von 20 Jahren beginnt erneut.
5. **Emissionsfaktoren [ $EF$ ] und implizite Emissionsfaktoren [ $IEF$ ] für die zwanzigjährige Übergangszeit [ $IEF_{20y}$ ]:** Diese Faktoren sind in den CRF-Tabellen dargestellt. Es werden jährliche Emissionsfaktoren in Emissionsfaktoren bzw. implizite Emissionsfaktoren umgerechnet, die zu den Flächen der Landnutzungsmatrix mit zwanzigjähriger Übergangszeit passen. Die Konversion von  $EF_{ann}$  zu  $IEF_{20y}$  führt nach der Verrechnung mit den mineralischen und organischen Bodenflächen für die Emissionen aus Pools zu angepassten, also impliziten, IEFs. Auch wenn die absoluten Emissionen unverändert bleiben, werden die IEF beeinflusst von den jährlichen Nettoänderungen der Flächen und den unterschiedlichen  $IEF_{20y}$  der Mineralböden in den Übergangskategorien infolge von erneuten Landnutzungsänderungen innerhalb der 20-jährigen Übergangszeit. Dabei kommen folgende Formeln zur Anwendung:
  - **Mineralböden:** Die gesamte Kohlenstoffvorratsänderung infolge Landnutzungsänderung wird nach der Formel  $IEF_{20y} = EF_{ann} / 20$  linear auf 20 Jahre Übergangszeit aufgeteilt; d.h. nur ein Zwanzigstel der Gesamtemission wird jährlich veranschlagt. Aufgrund der Einführung der effektiven Übergangszeit, muss der Kohlenstoffvorrat in den Mineralböden an jedem Aufnahmepunkt nachverfolgt und archiviert werden, da dieser, bei erneuter

Landnutzungsänderung innerhalb der 20 Jahre Übergangsfrist, verrechnet mit dem neuen Zielwert, die Grundlage zur Berechnung des neuen **EF<sub>ann</sub>** bildet (s. Kapitel 6.1.2.1.1)

- **Organische Böden I:** In den Landnutzungskategorien Wald und Gehölze werden jedes Jahr die gleiche Menge CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O emittiert, in den Übergangskategorien genauso wie in der Verbleibkategorie der neuen Landnutzung. Dies gilt auch für die N<sub>2</sub>O-Emissionen aller anderen Landnutzungskategorien; **IEF<sub>20y</sub> = EF<sub>ann</sub>**.
  - **Organische Böden II:** Für Flächen auf organischen Böden unter Ackerland (inkl. aller Subkategorien), Grünland i.e.S., Feuchtgebieten (inkl. aller Subkategorien) und Siedlungen werden die CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Emissionen jährlich berechnet, mittels Responsefunktionen in Abhängigkeit vom Grundwasserspiegel.
  - **Netto-Kohlenstoffvorratsänderung, Kohlenstoffzu- und -abnahme in der Biomasse annueller, krautiger Pflanzen und toter organischer Substanz (Ackerland<sub>annuell</sub>, Hopfenanbau, Grünland i.e.S., Gewässer, Torfabbau):** Alle Emissionen werden vollständig im Jahr der Landnutzungsänderung veranschlagt, nach der Formel **IEF<sub>20y</sub> = E<sub>ann</sub> / [Area<sub>20y</sub>]**.
  - **Netto-Kohlenstoffvorratsänderung, Kohlenstoffzunahme in Biomasse und toter organischer Substanz bei Landnutzungsänderung zu Wald, Wein- und Obstbau, Weihnachtsbaumkulturen, Baumschulen, Kurzumtriebsplantagen, Gehölze, Feuchtgebiete und Siedlungen:** Die gesamte Kohlenstoffvorratsänderung infolge Landnutzungsänderung wird nach der Formel **IEF<sub>20y</sub> = EF<sub>ann</sub>** berechnet; d.h. jedes Jahr wird auf der gesamten Landnutzungsänderungsfläche die Kohlenstoffsénke veranschlagt.
  - **N<sub>2</sub>O aus dem Verlust von organischer Substanz in Mineralböden infolge von Landnutzungsänderung zu Acker:** Es wird dieselbe Methode wie bei Kohlenstoffvorratsverlusten in Mineralböden verwendet. Die gesamte Kohlenstoffvorratsänderung infolge Landnutzungsänderung wird linear auf die 20 Jahre Übergangszeit aufgeteilt, nach der Formel **IEF<sub>20y</sub> = E<sub>ann</sub> / Area<sub>20y</sub>**; d.h. nur ein Zwanzigstel der Gesamtemission wird jährlich veranschlagt. In Bezug auf erneute Landnutzungsänderung innerhalb der 20-Jahresfrist gilt ebenfalls dasselbe.
6. **Gesamte Kohlenstoffvorratsänderungen für Flächen mit zwanzigjähriger Übergangszeit**, werden für die Klimarahmenkonvention nach folgender Formel: **E<sub>20y</sub> [kt C] = IEF<sub>20y</sub> [t C/ha] \* Area<sub>20y</sub> [kha]** berechnet.
  7. **Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen** aus den Kohlenstoffwerten für den NIR durch Multiplikation der Kohlenstoffvorratsänderungen mit dem Faktor -44/12.
  8. **Berechnung der N<sub>2</sub>O-Emissionen** aus Stickstoffwerten durch Multiplikation der Stickstoffvorratsänderungen mit dem Faktor -44/28; die Umrechnung der N<sub>2</sub>O-Werte in CO<sub>2</sub>-Äquivalente erfolgt mit dem Faktor 265 (GWP 100 des IPCC AR5).
  9. **Umrechnung von CH<sub>4</sub>-Emissionen** in CO<sub>2</sub>-Äquivalente erfolgt mit dem Faktor 28 (GWP 100 des IPCC AR5).

Die Submission 2023 wurde nach den Regelwerken

- 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006b)
- 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol (IPCC et al., 2014a)



- 2013 Supplement to the IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands (IPCC et al., 2014b)
- 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC)

zusammengestellt. Maßgebliche Maßnahmen zur Inventarverbesserung, die in dieser Submission zur Anwendung kamen und zu Neuberechnungen führten sind:

- Komplette Neuimplementierung des LULUCF-Berechnungsmodells in den Programmiersprachen R und C++ (siehe unten)
- Einführung zusätzlicher Landnutzungssubkategorien (s. Tabelle 326):
  - Hecken (unter der Landnutzungskategorie Grünland; s. Kapitel 6.2.3)
  - Natürliche Gewässer (unter der Landnutzungskategorie Feuchtgebiete; s. Kapitel 6.2.4)
  - Stehende künstliche Gewässer (unter der Landnutzungskategorie Feuchtgebiete; s. Kapitel 6.2.4)
  - Fließende künstliche Gewässer (unter der Landnutzungskategorie Feuchtgebiete; s. Kapitel 6.2.4)
  - Straßen (unter der Landnutzungskategorie Siedlungen; s. Kapitel 6.2.5)
- Thematische, räumliche und zeitliche Aktualisierung der Kartengrundlage zur Ermittlung der Aktivitätsdaten bezüglich der Ausweisung von Landnutzungen und Landnutzungsänderungen sowie Anpassung der Landnutzungsmatrix über die Zeit (s. Kapitel 6.3.1 ff)
- Implementierung von Modellen zur Erfassung der Emissionen aus den neuen Landnutzungskategorien, inkl. Ermittlung der Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren (s. Kapitel 6.6.2 und 6.8.2)
  - Einführung neuer regionalisierter Emissionsfaktoren für Mineralböden der Subkategorie Gebäude und Freiflächen der Landnutzungskategorie Siedlungen (s. Kapitel 6.1.2.1.6) und der Landnutzungskategorie Sonstiges Land (s. Kapitel 6.1.2.1.7)
  - Implementierung flächendeckender, hochauflösender Karten regionalisierter Mineralbodenkohlenstoff- bzw. -stickstoffvorräte für die Landnutzungskategorien Ackerland<sub>annuell</sub>, Grünland und Wald in die Methodik zur Erfassung der THG-Emissionen aus Mineralböden (s. Kapitel 6.1.2.1ff)
  - Mineralböden Wald: Erweiterung der „stock-difference-method“ mit der computergestützte Modellierung mit YASSO15 und Verbindung beider Methoden mit der „overlap method“ (s. Kapitel 6.1.2.1ff und Kapitel 6.4.2.5ff)
  - Waldbrand: Berücksichtigung der Biomasse der Pools Totholz und Streu bei Bränden, beginnend mit dieser Submission (s. Kapitel 6.4.2.7.5)

Abgesehen von diesen Änderungen kamen die Methoden, Datenquellen und Emissionsfaktoren des Vorjahres zur Anwendung.

### **Implementierung des Inventarmodells**

Die Berechnungen zur Ermittlung aller Emissionen und inventarrelevanten Größen für den LULUCF-Sektor Deutschlands werden mittels eines digitalen Programmsystems gekoppelt mit einem kombinierten Geoinformations-/Datenbanksystem vollständig automatisiert umgesetzt. Für Submission 2023 wurde das Programmsystem komplett neu implementiert, um die steigenden Anforderungen an die Performance als Folge der Umsetzung von Reviewforderungen erfüllen zu können. Das Inventarmodell ist als Package in R (The R Core Team, 2022) implementiert und nutzt stark die R-Packages `data.table` (Dowle et al., 2022) und `Rcpp`



(Eddelbuettel & François, 2011), um eine ausreichende Performance zu gewährleisten. Als Interface für die LULUCF-Datenbank dienen die R-Packages DBI<sup>86</sup> (Wickham & Müller, 2022) und RPostgres (Wickham et al., 2022). Die Software wird in einer internen Versionskontrollumgebung<sup>87</sup> verwaltet.

#### 6.1.2.1 Kohlenstoffemissionen aus Mineralböden (4.A bis 4.F)

##### 6.1.2.1.1 Übersicht Methodik

Die Fläche der Mineralböden wurde als Differenz der Gesamtflächen und der Flächen organischer Böden berechnet (Kapitel 6.1.2.2).

Die Veränderungen der Kohlenstoff- bzw. Stickstoffvorräte in Mineralböden werden, gemäß Gleichung 2.25 in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006b), als Differenz zwischen den jeweiligen Vorräten vor und nach den entsprechenden Landnutzungsänderungen berechnet. Die Emissionsfaktoren sind landesspezifisch. Für die Landnutzungskategorien Wald, Ackerland<sub>annuell</sub> und Grünland wurden sie erstmalig aus Karten der Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte von Mineralböden Deutschlands entnommen. Die Karten basieren auf den Ergebnissen der Bodenzustandserhebungen für Wald und Landwirtschaft, die mittels unterschiedlicher rechnergestützter Methoden, in Abhängigkeit von zahlreichen Standortfaktoren (z.B. Klima, Topographie, Geologie, Pedologie, Nutzung) flächendeckend, georeferenziert regionalisiert wurden (siehe Kapitel 6.4.2.5.3).

Für die Landnutzungskategorie Sonstiges Land wurde ein repräsentativer, flächengewichteter Kohlenstoffvorrat für Mineralböden bis 30 cm Bodentiefe aus den Daten der landwirtschaftlichen Bodeninventur ermittelt. Für die Kategorie Siedlungen wurden landesspezifische Kohlenstoffvorräte basierend auf den Ergebnissen der Bodenzustandserhebungen Wald und Landwirtschaft, in Abhängigkeit von der Richtung der Landnutzungsänderung, der Vornutzung und dem Versiegelungsgrad der Flächen, abgeleitet (siehe Kapitel 6.1.2.1.6). Die Berichterstattung für Mineralböden folgt somit einem Tier 2 bzw. 3-Ansatz.

Bei Mineralböden der Landnutzungskategorien 4.B, 4.C, 4.D, 4.E und 4.F wird bei gleichbleibender, gleichnamiger Nutzung unterstellt, dass die Kohlenstoffein- und -austräge in die Böden gleich groß, die Systeme somit im Gleichgewicht sind. Begründungen finden sich in Kapitel 6.5.2.3 und Kapitel 6.6.2.3. In den CRF-Tabellen sind die entsprechenden Felder mit NA gekennzeichnet (gemäß Forderung des ERT 2021).

In der Verbleibkategorie Wald werden erstmalig die Kohlenstoff- und Stickstoffvorratsänderungen in Mineralböden ab dem Jahr 2009 auf jährlicher Basis mit dem Modell Yasso berechnet und die entsprechenden Bodeneigenschaftskarten jährlich, flächendeckend aktualisiert (Kapitel 6.4.2.5ff.).

In der Kategorie *Feuchtgebiete* (4.D) kommen Mineralböden nur in den Subkategorien *terrestrische Feuchtgebiete* und *Gewässer* vor. Bei Landnutzungsänderungen zu *Gewässern* werden keine Kohlenstoffvorratsänderungen angesetzt. Bei Landnutzungsänderungen von Gewässern zu anderen Landnutzungsformen wird, wenn bekannt, die Differenz zwischen Vorgewässer- und Zielnutzung veranschlagt, andernfalls keine Änderungen unterstellt.

Die Kohlenstoffvorratsänderungen in Mineralböden infolge von Landnutzungsänderungen werden für jede Übergangskategorie als Differenz des Kohlenstoffvorrates der Zielnutzungskategorie und des Kohlenstoffvorrates der Ursprungskategorie berechnet. Für

---

<sup>86</sup> DBI <https://dbi.r-dbi.org/>

<sup>87</sup> GitLab <https://about.gitlab.com/>

Wald, Ackerland<sup>annuell</sup> und Grünland werden die Zielwerte den jeweiligen Karten entnommen, die jährlich aktualisiert werden. Die Gesamtänderung wird gemäß IPCC-Default (IPCC, 2006b) auf einen Zeitraum von 20 Jahren linear verteilt. Die Summe der Kohlenstoffvorratsänderungen infolge von Landnutzungsänderungen in den Mineralböden Deutschlands errechnet sich für 20 Jahre dann wie folgt:

$$\Delta C = C_{final} - C_{initial}$$

$\Delta C$ : Veränderung des Kohlenstoffvorrates infolge Landnutzungsänderung in Mineralböden einer Übergangskategorie [t C (20\*a)<sup>-1</sup>]

$C_{final}$ : Mineralbodenkohlenstoffvorrat [t C] der Zielkategorie

$C_{initial}$ : Mineralbodenkohlenstoffvorrat [t C] der Ausgangskategorie

Ausnahme hiervon bilden Landnutzungsänderungen hin zu Siedlungen. In diesem Fall werden einmalig, nur im Jahr der Nutzungsänderung, 11 % des Kohlenstoffvorrates des Mineralbodens der Vornutzung als Emission veranschlagt (Kapitel 6.1.2.1.6).

Für die Berücksichtigung der 20-jährigen Übergangszeit wird die für die jeweilige Übergangskategorie ermittelte gesamte Vorratsänderung (EF<sub>ann</sub>) durch 20 dividiert. So erhält man die impliziten Emissionsfaktoren für die Übergangskategorien für Landnutzungsänderungen aus einer Verbleibkategorie heraus (IEF<sub>20y</sub>).

$$\Delta C_i = \left\{ \frac{(C_{final,i} - C_{initial,i})}{20}, i = 0 \right.$$

$\Delta C_i$ : Veränderung des Kohlenstoffvorrates von Mineralböden im Jahr  $i$  nach einer Landnutzungsänderung [t C a<sup>-1</sup>]

$C_{final,i}$ : Finaler Bodenkohlenstoffvorrat der Zielkategorie im Jahr  $i$  nach Landnutzungsänderung [t C]

$C_{initial,i}$ : Aktueller Bodenkohlenstoffvorrat der Ausgangskategorie [t C] im Jahr  $i$  nach Landnutzungsänderung

$i$ : Jahr nach Landnutzungsänderung (0 - 19)

Der jeweils neue aktuelle Bodenkohlenstoffvorrat ergibt sich dann aus der Summe des aktuellen Kohlenstoffvorrates im Boden der Ausgangsnutzung und der berechneten Vorratsänderung ( $\Delta C_i + C_{initial,i}$ ).

Von Landnutzung betroffene Flächen verbleiben längstens 20 Jahre in einer Übergangskategorie. Dann haben sie den Kohlenstoffvorrat der Zielkategorie erreicht und werden in die entsprechende Verbleibkategorie überführt. Die Einführung der effektiven Übergangszeit bedingt, dass eine von Landnutzungsänderung betroffene Fläche unmittelbar zum Zeitpunkt der jeweiligen Nutzungsänderung in die neue, entsprechende Übergangskategorie überführt wird. Die ist unabhängig davon, wie lange sie schon in einer Übergangskategorie geführt wurde. Da die Kohlenstoffvorratsänderung nach o.a. Gleichung vom Ausgangs- und Zielvorrat abhängig ist, muss der Kohlenstoffvorrat von Mineralböden an allen Punkten zu jeder Zeit bekannt sein. Während der Zielvorrat ( $C_{final}$ ) durch die entsprechende Bodenkarte vorgegeben wird, ist der Ausgangsvorrat variabel und stellt den Wert dar, der bis zur erneuten Landnutzungsänderung in der vorhergehenden Übergangskategorie erreicht wurde. Die Berechnung der Kohlenstoffvorratsänderung erfolgt auch für vorzeitig aus Übergangskategorien scheidenden Flächen nach den o.a. Algorithmen, wobei  $C_{initial}$  dann der aktuelle, bis zur erneuten Landnutzungsänderung in der vorhergehenden Übergangskategorie erreichte Kohlenstoffvorrat im Mineralboden am Detektionspunkt ist. Die so berechnete Kohlenstoffvorratsänderung wird wiederum auf 20 Jahre verteilt:  $\Delta C/20$  ergibt somit die jährliche Änderungsrate, die dem aktuellen initialen Bodenkohlenstoffvorrat dann bis zu einer erneuten Landnutzungsänderung bzw. dem Übergang in die Verbleibkategorie zugeschlagen wird. Die impliziten Emissionsfaktoren sind letztlich das Mittel aller IEF<sub>20y</sub> einer Übergangskategorie in einem Berichtsjahr.

### 6.1.2.1.2 Datengrundlage und Verfahren

Grundlage zur Ermittlung der flächendeckend repräsentativen durchschnittlichen Kohlenstoffvorräte in Mineralböden, in Abhängigkeit von der Landnutzung, bilden folgende Datenquellen:

- Ergebnisse der Bodenzustandserhebungen im Wald (BZE-Wald I und BZE-Wald II; Wellbrock et al. (2016))
- Ergebnisse der Bodenzustandserhebung auf landwirtschaftlichen Böden in Deutschland (BZE-LW; Jacobs et al. (2018))
- Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:1.000.000 (BÜK 1000; BGR 1995 & 1997, Düwel et al. (2007))
- Karte der Bodenregionen und Bodengroßlandschaften 1:5.000.000 (BGL 5000; BGR 2008)
- Karte der Bodenklimaräume (ROSSBERG et al., 2007)
- Karte organischer Böden (ROSSKOPF et al., 2015)
- Karten aus dem LUCAS – Programm
- Stickstoff, pH (BALLABIO et al., 2016)
- Tongehalt, verfügbare Wasserkapazität (BALLABIO et al., 2016)
- Geomorphografische Karte Deutschlands (BGR 2007)
- Hydrogeologische Karte Deutschlands (BGR & SDG 2019)
- Karte der Netto-Bodenerosion und der Ablagerungsraten in Europa (BORELLI et al., 2018)
- Digitales Höhenmodell Europas (EU-DEM; European Union Copernicus Land Monitoring Service and EEA, 2016)
- Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, div. Jahre)
- Datensätze des Basis-Digitalen Landschaftsmodells (B-DLM) des Amtlichen Topographisch- Kartographischen InformationSystems (ATKIS®) der Jahre 2000, 2005, 2010, 2015 und 2020 (AdV 2000; 2005; 2010; 2015; 2020)
- Corine Land Cover aus den Jahren 1990 und 2000 für die Ermittlung der Landnutzungsänderungen von 1990 zu 2000
- INSPIRE-Standardgitter mit einer Auflösung von 100 m neu abgetastet (Eurostat Grid Generation Tool for ArcGIS, <https://www.efgs.info/information-base/best-practices/tools/eurostat-grid-generation-tool-arcgis/>, letzter Zugriff: 10. Dezember 2020)
- IPCC-Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4, Agriculture, Forestry and Other Land Use (IPCC, 2006b)

Aufgrund der unterschiedlichen Datenlage für die einzelnen Landnutzungskategorien wurden standortspezifische Mineralbodenkohlenstoff- und -stickstoffvorräte für unterschiedliche Landnutzungskategorien getrennt bestimmt. Die Werte für den *Wald*, *Ackerland<sub>annuell</sub>* und die *Grünland*-Kategorien entstammen Karten von Kohlenstoff- und Stickstoffvorräten der Mineralböden Deutschlands, die basierend auf den Ergebnissen der Bodenzustandserhebungen im Wald (BZE-Wald I und BZE-Wald II; WELLBROCK et al. 2016) und der Landwirtschaft (JACOBS et al. 2018) entwickelt wurden und mit dieser Submission erstmalig zur Anwendung kommen. Diese Landnutzungskategorien umfassen derzeit ca. 85 % der Fläche Deutschlands und stellen somit die Hauptnutzungen dar. Die unterschiedlichen Modelle zur Kartenerstellung sind für den Wald in Kapitel 6.1.2.1.3, für *Ackerland<sub>annuell</sub>* und *Grünland* in Kapitel 6.1.2.1.4 und Kapitel 6.1.2.1.5 beschrieben.

Für die perennierenden Ackerlandsunterkategorien *Hopfen*, *Obstanbau*, *Weinbau*, *Weihnachtsbaumkulturen*, *Baumschulen* und *Kurzumtriebsplantagen* (Kapitel 6.1.2.1.4) sowie

*Terrestrische Feuchtgebiete* und *Sonstiges Land* (Kapitel 6.1.2.1.7) wurden flächengewichtete, nutzungs- und bodenspezifische, durchschnittliche Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte für Mineralböden mittels der Daten der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft ermittelt. Die Mineralbodenkohlenstoffvorräte für Siedlungsböden wurden aus den Ergebnissen dieser Bodenzustandserhebungen abgeleitet (s. Kapitel 6.1.2.1.6).

#### 6.1.2.1.3 Wald

Die Berichterstattung bezüglich THG-Emissionen aus Mineralböden im Wald weist, beginnend mit dieser Submission, mehrere Neuerungen auf:

1. Die Berichterstattung erfolgt methodisch unterschiedlich für zwei Zeiträume.
  - Für den Zeitraum 1990 - 2008 erfolgt die Ermittlung der Kohlenstoff- und Stickstoffvorratsunterschiede in Mineralböden wie bisher nach der „stock-difference-methode“ (Kapitel 6.4.2.5.4).
  - Für den Zeitraum ab 2008 basieren die Ergebnisse auf dem mathematischen Modell Yasso15 (Järvenpää et al., 2018; Tuomi et al., 2009). Die Zweiteilung wurde notwendig, da erst seit dem Jahr 2008 ausreichend Input-Datensätze vorliegen, die eine korrekte Berechnung der organischen Kohlenstoffvorräte in Mineralböden mit Yasso15 ermöglichen.
  - Die beiden Ansätze wurden mittels der Überlappungsmethode (overlap method) zusammengeführt (2006 IPCC Guidelines). Das methodische Vorgehen wird ausführlich in Kapitel 6.4.2.5.3 und Kapitel 6.4.2.5.4 beschrieben.
2. Die Ergebnisse der Bodenzustandserhebungen (Grueneberg et al. (2014)) bezüglich des Kohlenstoff- und Stickstoffvorrats von Mineralböden im Wald wurden regionalisiert
  - Anhand der Ergebnisse der Bodenzustandserhebung Wald, sowie der Legendeneinheiten der BÜK 1000 sowie mittels Yasso15 wurden Regionen gleicher Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte im Wald ausgewiesen, in Abhängigkeit von pedologischen, geologischen und klimatischen Gegebenheiten. Die Ergebnisse werden jährlich, in Form zeitlich dynamischer, georeferenzierter Karten dargestellt (siehe Kapitel 6.4.2.5.3). Die in den Karten ausgewiesenen Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte sind Grundlage aller Berechnungen im Zusammenhang mit mineralischen Waldböden.

#### 6.1.2.1.4 Ackerland

Die Kohlenstoffvorräte von Mineralböden für Ackerflächen mit annuellen Kulturen, für Hopfen-, Wein- und Obstanbauflächen sowie für Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen und Kurzumtriebsplantagen, wurden aus den Ergebnissen der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft abgeleitet (Jacobs et al., 2018). Die Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW) ist eine Stichprobeninventur mit systematischer Stichprobenverteilung. Flächendeckend wurden in einem Raster von 8 x 8 km systematisch alle landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands bis 1 m Bodentiefe beschrieben, beprobt und analysiert. Die Ergebnisse der BZE-LW sind repräsentativ sowohl für die Verteilung bodenkundlicher Charakteristika und Kennwerte, als auch für die aktuelle landwirtschaftliche Landnutzung Deutschlands.

#### Ackerland mit annuellen Kulturen

Für die Landnutzungskategorie *Ackerland<sub>annuell</sub>* wurden durch Regionalisierung der Ergebnisse der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft flächendeckende Rasterkarten der Bodenkohlenstoffvorräte und C/N-Verhältnisse für die Mineralbodenflächen Deutschlands auf

einem Raster von 100 x 100 m erstellt. Sie wurden mittels Verfahren des Ensemble Learnings ermittelt. Dies erfolgt durch die Anwendung von Algorithmen aus dem Maschinenlernen auf Basis von Entscheidungsbaum-Ensembles, die mit unabhängigen Teildatensätzen erzeugt werden. Grundlage waren die Daten der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft sowie eine Vielzahl an Kovariaten aus den Bereichen

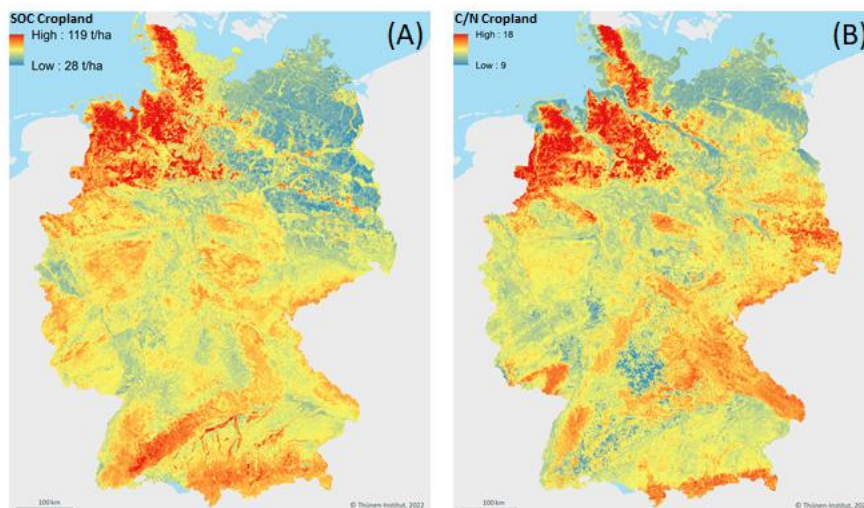
- Boden, Geologie, Geomorphologie, Hydrologie
- Klima
- Organische Kenngrößen, Vegetationsindices
- Topographie, Relief

Um die Multikollinearität des Modells zu verringern, wurden stark miteinander korrelierende Kovariaten ( $R > 0,9$ ) aus dem Ensemble entfernt; letztlich fanden 34 Parameter Eingang in die Modellrechnungen. Nähere Erklärungen zum Verfahren und den Kovariaten finden sich bei (Sakhaee et al.) und (Gebauer et al.).

Beim C/N-Modell wurden die Algorithmen *Random Forest* und *Support Vector Machine for Regression* als Basislerner verwendet. Die Vorhersagen der Basislerner wurden dann gemittelt, um die endgültige Vorhersage zu liefern. In den meisten Fällen des Ensemblelernens wird die Abstimmung jedes Basislerner unabhängig durchgeführt. Die Hyperparameter-Abstimmung des vorliegenden Ensemble-Ansatzes war jedoch Teil des Trainings-/Lernprogramms (Shahhosseini et al., 2022).

Das SOC-Modell wurde mit einer neuartigen Methode, *Regressor Chaining* (Spyromitros-Xioufis et al., 2016), erstellt. Diese Methode kann die Vorhersage von Bodeneigenschaften verbessern, indem sie interkorrelierte Parameter nutzt (Santana et al., 2021). So wurde zuerst ein *Regressor Chaining*-Modell entwickelt, welches C/N-Verhältnisse unter Verwendung von *Random Forest* vorhersagte. Die vorhergesagten C/N-Verhältnisse werden dann in einem Ensemble-Ansatz (*Random Forest* und *Support Vector Machine for Regression*) für die SOC-Vorhersage verwendet. Ähnlich wie beim Ensemble-Ansatz, der zum Erstellen des C/N-Modells verwendet wurde, war auch das Hyperparameter-Tuning des *Regressor Chaining*-Ansatzes ein Teil des Trainings/Lernens. Weitere Details und Erläuterungen zur *Regressor Chaining*-Methode finden sich bei Spyromitros-Xioufis et al. (2016). Die Hyperparameter-Abstimmung aller Modelle erfolgte mit dem *Differential Evolution (DE)*-Algorithmus (Sakhaee et al.).

Zur Überprüfung der Robustheit der Modelle bei der Kombination von Hyperparameter-Tuning und Modellbewertung wurde ein stratifizierter, hierarchischer/verschachtelter („nested“) Ansatz der Kreuzvalidierung umgesetzt (Sakhaee et al.).





**Abbildung 54: Karte der (A) SOC-Vorräte [t C ha<sup>-1</sup> 30 cm<sup>-1</sup>] und (B) C/N- Verhältnisse in den Mineralböden Deutschlands, bewirtschaftet als Ackerland mit annualen Kulturen (Ackerland<sub>annuell</sub>)**

Abbildung 54 zeigt die so ermittelten Rasterkarten. Die gemessenen (Ergebnisse der BZE-LW, Jacobs et al. (2018)) und vorhergesagten Mittelwerte und Mediane der C/N-Verhältnisse und Bodenkohlenstoffvorräte (siehe Abbildung 54) sowie die zur Einschätzung des Modells notwendigen statistischen Kennwerte sind in Tabelle 327 dargestellt.

**Tabelle 327: Mittelwerte und Mediane der gemessenen und vorhergesagten C/N-Verhältnisse und Bodenkohlenstoffvorräte [t C ha<sup>-1</sup> 30 cm<sup>-1</sup>] in Mineralböden unter annuallem Ackerland (Ackerland<sub>annuell</sub>)**

Ackerland <sub>annuell</sub>		Lagemaße		Statistische Kennwerte Modellgüte				Anzahl
		Mittel	Median	RMSE	MAE	MAPE [%]	Bias [%]	
C/N	gemessen	11,10	10,43	1,5	0,98	8,39	-0,02	2204
	vorhergesagt	11,12	10,57					
SOC [t C ha <sup>-1</sup> 30 cm <sup>-1</sup> ]	gemessen	61,18	55,58	20,92	13,84	23,24	-0,05	2204
	vorhergesagt	59,04	57,11					

### Ackerland mit perennierenden Kulturen

Die im Rahmen der BZE-LW untersuchte Anzahl an Bodenprofilen auf Standorten mit Sonderkulturen bzw. perennierender Biomasse (Obst, Wein, Hopfen, Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen und Kurzumtriebsplantagen) war sehr gering. Daher war eine Regionalisierung der Ergebnisse im Hinblick auf eine Karte nicht möglich.

Für die Subkategorien Hopfen, Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen und Kurzumtriebsplantagen war die Standortanzahl sogar zu gering, um für diese Kulturen spezifische mittlere Mineralbodenkohlenstoffvorräte ableiten zu können, da folglich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen diesen Subkategorien nachgewiesen bzw. berechnet werden konnten. Daher wird für diese Flächen das Mittel aller Sonderkulturflächen Deutschlands als Wert unterstellt. Nichtsdestotrotz werden die Hopfenanbau-, Baumschul-, Weihnachtsbaumkultur- und Kurzumtriebplantagenflächen extra ausgewiesen.

Für die Wein- und Obstanbauflächen konnten, aufgrund der größeren Häufigkeit gegenüber den anderen Sonderkulturen, spezifische Mineralbodenkohlenstoffvorräte ausgewiesen werden, die sich signifikant von allen anderen Sonderkulturen und untereinander unterscheiden. Die Weinanbauggebiete Deutschlands liegen im Wesentlichen in der gleichen Klimazone, weshalb sich eine weitere Stratifizierung der Böden hinsichtlich des Klimaeinflusses erübrigt. Dagegen liegen die beiden Hauptobstanbauggebiete Deutschlands, im Norden (Altes Land) und im äußersten Süden (Bodenseeregion), in unterschiedlichen Klimazonen (Sakhaee et al., 2022). Ein Vergleich der Kohlenstoffvorräte der Mineralböden von Obstanbaugebieten des Nordens mit denen des Südens zeigt bezüglich des mittleren Bodenkohlenstoffvorrats zwar deutliche Unterschiede (80 t C/ha gegenüber 66 t C/ha), aber diese sind aufgrund der absoluten Anzahl der Stichproben als auch aufgrund des sehr großen Range (93 t C/ha im Norden, im Süden 60 t C/ha) nicht statistisch signifikant. Aus diesem Grunde kommt bundesweit ein einheitlicher Wert für Obstbau zur Anwendung.

Die Werte der mittleren Kohlenstoffvorräte für Mineralböden der einzelnen Ackerlandsubkategorien sind in Tabelle 328 dargestellt.

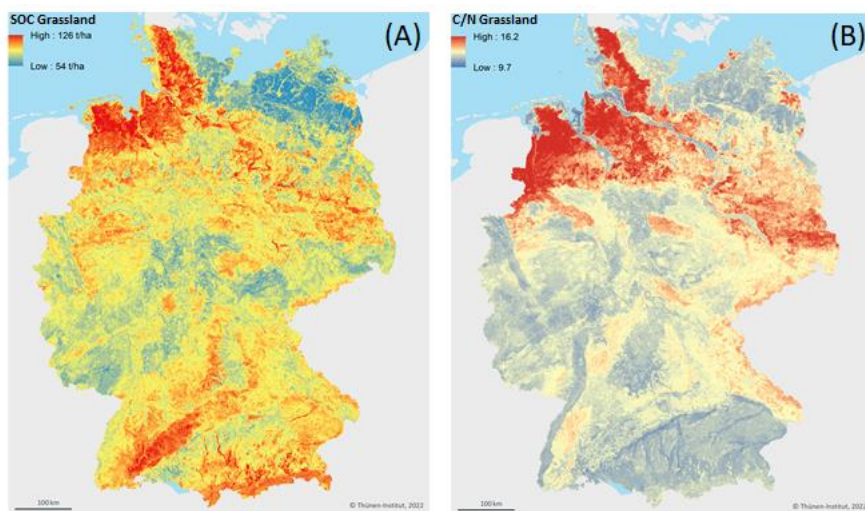
**Tabelle 328: Mittlerer flächenbezogener Mineralbodenkohlenstoffvorrat bis 30 cm Bodentiefe [t C ha<sup>-1</sup> 30cm<sup>-1</sup>] und dessen Unsicherheiten [%] für Ackerflächen mit annuellen und perennierenden Kulturen**

Mineralboden	Kohlenstoffvorrat [t C ha <sup>-1</sup> ]	Unsicherheit [%]
Hopfenanbauflächen	62,89	7,84
Weinanbauflächen	49,30	11,36
Obstanbauflächen	71,69	8,87
Baumschulen	62,89	7,84
Weihnachtsbaumkulturen	62,89	7,84
Kurzumtriebsplantagen	62,89	7,84

**6.1.2.1.5 Grünland**

Die Landnutzungskategorie *Grünland* setzt sich aus den Subkategorien *Grünland im engeren Sinne*, *Gehölze* und *Hecken* zusammen (vergl. Kap. 6.2.3). Bezüglich der Ausprägung der Eigenschaften der Mineralböden dieser Subkategorien bzw. deren Kohlenstoff- und Stickstoffvorräten wird unterstellt, dass diese sich nutzungs- und lagebedingt nicht signifikant unterscheiden. Daher wurden die Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte der Mineralböden für alle drei Subkategorien einheitlich aus den Ergebnissen für Grünland der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft abgeleitet (Jacobs et al., 2018).

Analog zum *Ackerland<sub>annuell</sub>* wurde eine flächendeckende Karte der C-Vorräte und der C/N-Verhältnisse der Grünlandböden Deutschlands, basierend auf den Ergebnissen der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft und zahlreicher Kovariaten, erstellt. Eine Kurzbeschreibung des methodischen Vorgehens ist in Kapitel 6.1.2.1.4 aufgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der grundlegenden Methodik findet sich bei (Sakhaee et al.). Die Rasterkarten sind in Abbildung 55, die gemessenen und geschätzten Lagemaße sowie einige statistische Kennwerte zur Beurteilung der Güte des Vorhersagemodells in Tabelle 329 dargestellt.



**Abbildung 55: Karte der (A) SOC-Vorräte [t C ha<sup>-1</sup> 30 cm<sup>-1</sup>] und (B) C/N- Verhältnisse in den Mineralböden Deutschlands unter Grünland**

**Tabelle 329: Mittelwerte und Mediane der gemessenen und vorhergesagten C/N-Verhältnisse und Bodenkohlenstoffvorräte [t C ha<sup>-1</sup> 30 cm<sup>-1</sup>] in Mineralböden unter *Grünland***

Ackerland <sub>annuell</sub>		Lagemaße		Statistische Kennwerte Modellgüte				
		Mittel	Median	RMSE	MAE	MAPE [%]	Bias [%]	Anzahl
C/N	gemessen	11,13	10,52	1,75	1,08	8,97	-0,01	740
	vorhergesagt	11,09	10,68					

SOC [t C ha <sup>-1</sup> 30 cm <sup>-1</sup> ]	gemessen	88,09	83,21	30,48	21,42	27,57	-0,1	740
	vorhergesagt	59,04	57,11					

### 6.1.2.1.6 Siedlungen

Die Ausführungen im Folgenden beziehen sich nur auf die Landnutzungssubkategorie *Gebäude- und Freiflächen*, da die Einführung der Subkategorie *Straßen* mit dieser Submission zunächst nur statisch erfolgte (siehe Kapitel 6.1.1). Daher werden die Bezeichnungen *Siedlungen* sowie *Gebäude- und Freiflächen* in diesem Kapitel synonym verwendet, wenn auf eine weitergehende Differenzierung nicht ausdrücklich hingewiesen wird.

#### Emissionen infolge aktiver Baumaßnahmen

Im Falle einer Landnutzungsänderung hin zu Siedlungen, wird der zu berichtende humose Oberboden (30 cm Bodentiefe) auf der betroffenen Fläche vollständig abgetragen. Nach der deutschen Gesetzgebung ist der Mutterboden jedoch besonders zu schützen (§ 202 Bundesanzeiger Verlag (2015)) und muss im Falle von Baumaßnahmen unvermischt, geschützt und konservierend gelagert, im Falle einer Versiegelung lateral, unkontaminiert und unvermischt verbracht werden (BMJ & BfJ, 1998; KrWG, 2012); sowie 16 Landesbauordnungen). So wird der Bodenanteil der versiegelten Fläche i.d.R. auf den unversiegelten Flächen aufgetragen (nach Möglichkeit auf dem Baugrundstück oder Nachbarflächen), so dass kein oder nur wenig Kohlenstoff verloren geht. Es findet lediglich eine laterale Translokation statt. Die Gesamtbilanz bezüglich des Kohlenstoffs bleibt nahezu gleich. Die IPCC Guidelines 2006 sehen diesen Fall ausdrücklich vor, dass es gute Praxis ist, die potentiellen Kohlenstoffverluste um den Anteil des lateral verbrachten Bodens zu reduzieren (IPCC (2006b), Kapitel 8.3.3.1). Nichtsdestotrotz wird der Boden auf den betreffenden Flächen gestört (ausgebaggert, transportiert, wieder ausgebracht; u.U. mehrere Monate sachgerecht auf Halde gelagert), wodurch die Struktur gestört und der Boden verstärkt belüftet wird; zumindest kurzfristig. Dadurch wird i.d.R. eine verstärkte Umsetzung organischer Bodensubstanzen durch Mikroorganismen initialisiert. Die so freigesetzten Mengen an CO<sub>2</sub> müssen erfasst und in der Bilanz veranschlagt werden. Die Quantifizierung dieser Kohlenstoffverluste erfolgt auf Basis nachstehender Annahmen und Unterstellungen:

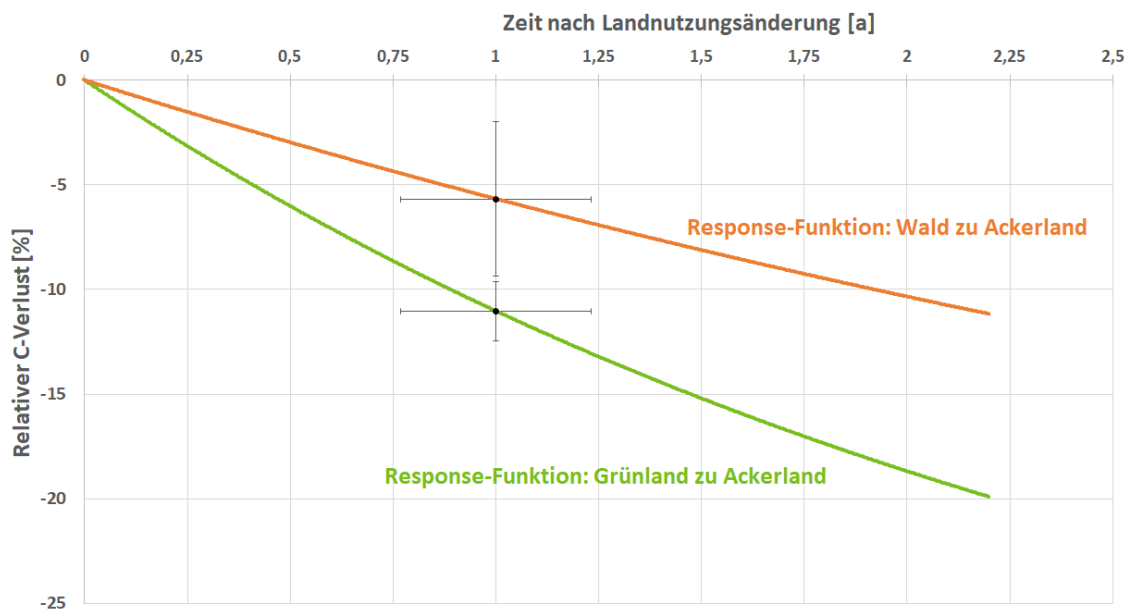
- Es liegen keine spezifisch erhobenen wissenschaftlichen Daten über infolge von Baumaßnahmen verursachte Kohlenstoffverluste der organischen Substanz von Oberböden vor und müssen daher geschätzt werden. Für die Schätzung dieses Anteils werden Response-Funktionen herangezogen, die die Kohlenstoffverluste der organischen Substanz von Mineralböden durch Umnutzung von Grünland bzw. Wald zu Ackerland beschreiben (Poeplau et al., 2011) (s. Abbildung 56). Infolge derartiger Landnutzungsänderungen kommt es ebenfalls zu massiven, anhaltenden Störungen des Oberbodens und einer verstärkten Belüftung desselben.
- Grünland zu Ackerland:  $\Delta C_{SOC\_Ini\_prev} = 36,11 \cdot [1 - \exp(-t/2,74)]$
- Wald zu Ackerland:  $\Delta C_{SOC\_Ini\_prev} = 32,19 \cdot [1 - \exp(-t/5,15)]$
- $\Delta C_{SOC\_Ini\_prev}$ : Relative Kohlenstoffvorratsänderung [%]
- t: Zeit nach Störung [a]
- Die Bauzeiten in Deutschland betragen i.d.R., je nach Vorhaben, 6 – 25 Monate (Schulz, 2012). Mittels statistischer Daten – Mittelwerte der Zeitreihen der Anzahl entsprechender vollzogener Baufertigstellungen seit 2010 (Statistisches Bundesamt, 2020) – konnte für Deutschland ein gewichtetes Mittel für Bauzeiten errechnet werden. Dieser Wert beträgt 11,9 Monate. Konservativ werden 12 Monate angesetzt (t = 1 in den Response-Funktionen).



Setzt man die so berechnete mittlere Bauzeit in die Response-Funktionen ein, ergeben sich gegenüber dem Initialvorrat relative Kohlenstoffverluste von

- Funktion Grünland zu Ackerland: -11,0 %
- Funktion Wald zu Ackerland: -5,7 %

**Abbildung 56: Relativer Kohlenstoffverlust ([%]; Unsicherheiten: 95 % - Konfidenzintervall [%]) humoser Oberbodenhorizonte infolge baubedingter Störungen, abgeleitet aus Response-Funktionen für Grünland bzw. Wald zu Ackerland (Poeplau et al., 2011) bei einer durchschnittlichen Bauzeit von 12 Monaten**



Da Landnutzungsänderungen von *Grünland* zu *Siedlung* vier- bis fünfmal häufiger vorgenommen werden, als Nutzungsänderungen von *Wald* zu *Siedlung*, wird, in einem konservativen Ansatz, die Response - Funktion *Grünland* zu *Ackerland* herangezogen, um die Kohlenstoffverluste aus humosen Oberbodenhorizonten infolge baubedingter Störungen abzuschätzen. Für eine mittlere Bauzeit von 12 Monaten errechnen sich so Kohlenstoffverluste von  $-11 \pm 1,4$  % C (Unsicherheit<sub>relativ</sub>: 12,7 %) (s. Abbildung 56) vom aktuellen Mineralbodenkohlenstoffvorrat der betreffenden Fläche zum Zeitpunkt der Landnutzungsänderung. Die so ermittelten Kohlenstoffverluste werden im Inventar einmalig, nur im Jahr der Landnutzungsänderung, verbucht.

## Kohlenstoffvorräte in Siedlungsböden

### Fakten und Annahmen

Innerstädtische, unversiegelte Böden zeigen mitunter vergleichbare Kohlenstoffvorräte, wie Wald- und Grünlandböden außerhalb des Siedlungsraumes (Klingenuß et al. (2020); Cambou et al. (2018); Edelmann (2013); Raciti et al. (2012); Pouyat et al. (2009)). Insbesondere in Hausgärten, Park- und Grünanlagen, Kleingartenkolonien und sonstigen mit Bäumen und Sträuchern bestandenen Flächen weisen Oberböden aber meist Kohlenstoffvorräte auf, die deutlich über denen von Vergleichsböden außerhalb des Siedlungsbereichs liegen, unabhängig von der Nutzung (Klingenuß et al. (2020); Cambou et al. (2018); Edmondson et al. (2012); Edelmann (2013); Pouyat et al. (2009)). Zurückzuführen ist dieser Umstand auf den Auftrag Innerstädtische, unversiegelte Böden zeigen mitunter vergleichbare Kohlenstoffvorräte, wie

Wald- und Grünlandböden außerhalb des Siedlungsraumes (Klingenuß et al. (2020); Cambou et al. (2018); Edelmann (2013); Raciti et al. (2012); Pouyat et al. (2009)). Insbesondere in Hausgärten, Park- und Grünanlagen, Kleingartenkolonien und sonstigen mit Bäumen und Sträuchern bestandenen Flächen weisen Oberböden aber meist Kohlenstoffvorräte auf, die deutlich über denen von Vergleichsböden außerhalb des Siedlungsbereichs liegen und dies unabhängig von der Nutzung (Klingenuß et al. (2020); Cambou et al. (2018); Edmondson et al. (2012); Edelmann (2013); Pouyat et al. (2009)). Zurückzuführen ist dieser Umstand auf den Auftrag zusätzlichen humosen Bodens, die schleichende Degradation landwirtschaftlich genutzter Böden (Edmondson et al., 2014) sowie die intensive Bewirtschaftung der innerstädtischen Grünflächen (Input, Bewässerung) (Edmondson et al., 2014); Pouyat et al. (2009)). Vasenev et al. (2013) wiesen diesen Umstand in Stadtböden der Großregion Moskau für Kohlenstoffkonzentrationen in Oberböden, besonders aber auch in Unterbodenhorizonten nach. Sie bezeichnen diese Horizonte als „cultural layers“, da diese insbesondere durch das menschliche Wirtschaften überprägt sind. Diese Kohlenstoffvorratsunterschiede zwischen innerstädtischen und angrenzenden außerstädtischen Böden wurden in allen o.a. Studien quantifiziert. Nichtsdestotrotz können aus diesen Daten keine allgemein gültigen, relativen Veränderungsraten abgeleitet werden, die eine Abschätzung des Kohlenstoffvorrates von unversiegelten Siedlungsböden (nach Landnutzungsänderung), ausgehend von den Bodenkohlenstoffvorräten der Vornutzungen, ermöglichen, da

- die Spannweite der Vorratsunterschiede extrem groß ist, in Abhängigkeit von Standortseigenschaften, Landnutzung und Bewirtschaftung: Edmondson et al. (2014) ermittelten für Böden innerstädtischer Grünflächen der Stadt Leicester (England) 21 – 89 % höhere Kohlenstoffvorräte als im angrenzenden landwirtschaftlich genutzten Grünland ( $86 \text{ t ha}^{-1} \text{ 21 cm}^{-1}$ ; Ackerland:  $73 \text{ t ha}^{-1} \text{ 21 cm}^{-1}$ ). Cambou et al. (2018) zeigen für Paris, dass die Kohlenstoffvorratsunterschiede innerstädtischer Böden, nutzungsabhängig (Parkanlagen > Gärten  $\geq$  Gehölzflächen) gegenüber Vergleichsböden der Region (Wald > Landwirtschaftsflächen) 30 – 110 % betragen.
- der Trend bezüglich der Nutzungsformen nicht einheitlich ist (Klingenuß et al., 2020)

Aus diesen Gründen wird in einem konservativen Ansatz unterstellt, dass unversiegelte, innerstädtische Böden Kohlenstoffvorräte aufweisen, die denen der Böden entsprechen, aus denen sie sich nach einer Landnutzungsänderung entwickeln.

Des Weiteren wird angenommen, dass der Bereich, der von Gebäuden bestanden ist, beim Bau tiefgründig ausgekoffert wurde und somit keinen Kohlenstoff bzw. in absolut zu vernachlässigenden Mengen enthält. Der humose Oberboden dieser Flächen wird, gemäß der Gesetzeslage, lateral auf dem Baugrundstück und Nachbarflächen verbracht. Dies führt dazu, dass Verluste an Bodenkohlenstoff infolge baubedingter Störungen des Oberbodens auf den unversiegelten Flächen vollständig ausgeglichen werden. Sie entsprechen letztlich dem SOC-Vorrat des Mineralbodens unter der Vornutzung, der zum Zeitpunkt der Landnutzungsänderung für den betroffenen Punkt aktuell dokumentiert ist ( $\text{SOC}_{\text{ni,prev}}$ ).

Cambou et al. (2018), Edmondson et al. (2012), Wei et al. (2014), Edelmann (2013) und Raciti et al. (2012) zeigen, dass erhebliche Mengen an Bodenkohlenstoff unter versiegelten, nicht mit Gebäuden bestandenen Flächen zu finden sind. Nichtsdestotrotz weisen die Autoren für derartig versiegelte Flächen, im Vergleich zu unversiegelten Nachbarflächen, geringere Bodenkohlenstoffvorräte nach; je nach Studie sind diese zwischen 54 % - 74 % (Unsicherheiten 15 – 83 %) geringer, bei einem Mittelwert von -65 % (Unsicherheit 93 %), einem Median von -66 %. Aufgrund dieser Studien wird für das deutsche Inventar konservativ angenommen, dass unter versiegelten, nicht mit Gebäuden bestandenen Flächen, i.d.R. Verkehrsflächen (im vorliegenden

NIR die Landnutzungskategorie *Straßen*), der Kohlenstoffvorrat 1/3 des Ausgangsvorrates ( $SOC_{ini\_prev}$ ) beträgt.

Abschätzung der Emissionen aus Mineralböden bei Landnutzungsänderungen zu Siedlung

Das Vorgehen erfolgt gemäß den Annahmen und Ausführungen in den o.a. Abschnitten des Kapitels:

- Vom  $SOC_{ini\_prev}$  werden pauschal 11 % des Kohlenstoffvorrates abgezogen und einmalig im Jahr der Landnutzungsänderung als Emission ausgewiesen:  $Emission_{LUC\_Siedlung} = SOC_{ini\_prev} * -0,11$
- $SOC_{ini\_prev}$  ist ebenfalls der Ausgangswert zur Abschätzung des mineralischen Bodenkohlenstoffvorrates für die von der Landnutzungsänderung betroffene Fläche. Die Berechnung erfolgt nach Gleichung 19, die den oben aufgeführten Unterstellungen Rechnung trägt.

#### Gleichung 19:

$$SOC_{min\_set} = SOC_{ini\_prev} * (AF_{unversiegelt} * CF_{unversiegelt} + AF_{Gebäude} * CF_{Gebäude})$$

$SOC_{min\_set}$ : Organischer Mineralbodenkohlenstoffvorrat der Subkategorie *Gebäude und Freilandflächen* nach Landnutzungsänderung [t C ha<sup>-1</sup> 30 cm<sup>-1</sup>]

$SOC_{ini\_prev}$ : Organischer Kohlenstoffvorrat des Mineralbodens der Vornutzung zum Zeitpunkt der Landnutzungsänderung [t C ha<sup>-1</sup> 30 cm<sup>-1</sup>]

$AF_{unversiegelt}$ : Flächenfaktor = 0,6; 60 % unversiegelter Flächenanteil an der Fläche der Subkategorie *Gebäude und Freilandflächen*, gemäß der Unterstellungen in Kapitel 6.2.5

$CF_{unversiegelt}$ : Kohlenstofffaktor unversiegelte Fläche = 1; 100 %  $SOC_{ini\_prev}$

$AF_{Gebäude}$ : Flächenfaktor = 0,4; 40 % versiegelter Gebäudeflächenanteil an der Fläche der Subkategorie *Gebäude- und Freilandflächen*, gemäß der Unterstellungen in Kapitel 6.2.5

$CF_{Gebäude}$ : Kohlenstofffaktor Gebäudefläche<sub>versiegelt</sub> = 0; 0 %  $SOC_{ini\_prev}$

Der so ermittelte Vorrat wird allen weiteren Berechnungen mit Stadtböden an diesem Punkte zugrunde gelegt. Er wird im Jahr der Landnutzungsänderung, ohne Übergangszeit, direkt dem Punkt zugewiesen. Abgesehen von den durch die Baustörung hervorgerufenen Emissionen fallen keine weiteren Verluste aus Mineralböden an, da der ausgekofferte Boden lateral ausgebracht wird.

Für alle Siedlungsflächen, deren Vornutzung nicht bekannt ist (das sind alle Flächen, die vor und seit dem Jahr 1990 in der Verbleibkategorie geführt werden), wird für die Mineralböden ein auf Bundeslandebene regionalisierter, mittlerer flächen- und vornutzungsgewichteter Kohlenstoffvorrat zugrunde gelegt. Dafür wurde für jede Übergangskategorie der Mittelwert des Anteils an der gesamten Landnutzungsänderung zu Siedlung für den Zeitraum von 1990 – 2018 ermittelt. Dieser Anteil wurde mit dem für die entsprechende Landnutzungskategorie typischen Bodenkohlenstoffvorrat multipliziert. Die Summe dieser Werte ergibt dann den  $SOC_{ini\_prev}$  für Mineralböden auf Siedlungsflächen der jeweiligen Bundesländer. Zur Abschätzung des tatsächlichen flächenbezogenen Vorrates kommt Gleichung 19 zur Anwendung. Die Unsicherheit der Abschätzung der Flächenzuteilung wird mit 10 % angenommen. So ergeben sich für die *Gebäude und Freilandflächen*, deren Vornutzung nicht bekannt ist, die in Tabelle 330 aufgeführten Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte für Mineralböden in den einzelnen Bundesländern. Die so ermittelten Vorräte werden allen weiteren Berechnungen mit Stadtböden an diesen Punkten zugrunde gelegt.

**Tabelle 330: Mittlere Kohlenstoff- [t C ha<sup>-1</sup> 30 cm<sup>-1</sup>] und Stickstoffvorräte [t N ha<sup>-1</sup> 30 cm<sup>-1</sup>] in Mineralböden auf Siedlungsflächen (Subkategorie *Gebäude und Freiflächen*) mit Versiegelungskorrektur (SOC<sub>min\_set\_1990</sub> bzw. N<sub>min\_set\_1990</sub>) und deren Unsicherheiten [%]**

Mineralboden	Kohlenstoffvorrat [t C ha <sup>-1</sup> 30 cm <sup>-1</sup> ]	Unsicherheit C [%]	Stickstoffvorrat [t N ha <sup>-1</sup> 30 cm <sup>-1</sup> ]	Unsicherheit N [%]
Brandenburg	38,9	28,2	3,1	27,2
Berlin	39,2	37,2	3,2	44,9
Baden-Württemberg	43,6	18,6	4,2	18,8
Bayern	43,0	18,5	4,1	17,9
Bremen	55,7	42,1	5,0	31,4
Hessen	36,1	27,8	3,5	31,4
Hamburg	50,1	92,0	3,5	77,6
Mecklenburg-Vorpommern	35,3	32,1	3,1	30,1
Niedersachsen	48,9	22,0	3,8	20,3
Nordrhein-Westfalen	42,6	19,2	3,7	18,3
Rheinland-Pfalz	37,7	21,0	3,8	21,6
Schleswig-Holstein	51,6	30,4	4,0	23,9
Saarland	42,4	34,5	4,0	46,0
Sachsen	37,7	28,7	3,2	29,0
Sachsen-Anhalt	44,0	30,7	3,8	32,5
Thüringen	40,2	22,6	3,8	23,0

### Abschätzung der Emissionen aus Mineralböden bei Landnutzungsänderungen von Siedlung

Das Vorgehen im Falle von Landnutzungsänderungen von Siedlungsflächen zu anderen Landnutzungskategorien folgt der allgemeinen Methodik (Kapitel 6.1.2.1). Ausgangspunkt der Berechnung ist der jeweils für den betroffenen Punkt aktuell dokumentierte SOC-Vorrat. Es gilt die effektive, maximal 20-jährige Übergangszeit.

#### 6.1.2.1.7 Terrestrische Feuchtgebiete und Sonstiges Land

##### Terrestrische Feuchtgebiete

Die Ableitung der mittleren Kohlenstoffgehalte für Mineralböden in Terrestrischen Feuchtgebieten (für Gewässerflächen werden keine Bodenkohlenstoffvorräte ausgewiesen; Torfabbauf Flächen finden sich ausschließlich auf organischen Böden) erfolgte auf Grundlage des Basis-Digitalen Landschaftsmodells (B-DLM; ATKIS®), der Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:1.000.000 (BÜK 1000; BGR (1995 & 1997); BGR (1997)) sowie der Ergebnisse der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW; Jacobs et al. (2018)). Hierfür wurden die im B-DLM ausgewiesenen nassen Flächen (Grundwasserflurabstand < 10 cm), die keine organischen Böden enthalten, mit den Leitbodenassoziationen der BÜK 1000 (vergl. Kapitel 6.1.2.1.2) verschnitten. Die so für die einzelnen Leitbodenassoziationen ermittelten Flächenanteile an nassen Böden wurden dann die für diese Flächen in der BZE-LW erhobenen Bodenkohlenstoffvorräte für Grünland zugeordnet. So konnte für jede betroffene Leitbodenassoziation ein spezifischer Kohlenstoffvorrat für nasse Mineralböden abgeleitet werden. Aus diesen wurde ein flächengewichteter mittlerer Bodenkohlenstoffvorrat für Mineralböden in Terrestrischen Feuchtgebieten Deutschlands berechnet (Tabelle 331).

**Tabelle 331: Mittlerer flächenbezogener Kohlenstoffvorrat [t C ha<sup>-1</sup>] und dessen Unsicherheiten (%) in Mineralböden von Terrestrischen Feuchtgebieten bis 30 cm Bodentiefe**

Mineralboden	Kohlenstoffvorrat [t C ha <sup>-1</sup> ]	Unsicherheit [%]
Terrestrische Feuchtgebiete	109,31	8,50

### Sonstiges Land

Die der BÜK 1000 (BGR) zugrunde liegende Datenbank weist nahezu keine Leitprofile für Böden auf *Sonstigem Land* aus, lediglich für Wald-, Acker- und Grünlandstandorte. Aus den, für diese Landnutzungskategorien, in der Legende hinterlegten Bodeneigenschaften, wurden bisher die Kohlenstoffvorräte für Mineralböden abgeleitet. Diese waren mit 56 t C/ha sehr hoch und beruhten ausschließlich auf Schätzwerten. Daher musste zur Verbesserung des Inventars eine Methode zur Ableitung des Kohlenstoffvorrats für Mineralböden unter *Sonstigem Land* entwickelt werden, die auf vorhandenen, gemessenen Daten basiert und regionale Standortfaktoren berücksichtigt. Deshalb wurde zur Abschätzung der Datensatz der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (Jacobs et al., 2018) zugrunde gelegt. Da es sich bei *Sonstigem Land* i.d.R. meist um vegetationslose Flächen handelt, die überwiegend sehr geringe Gehalte an organischer Bodensubstanz aufweisen aber durchaus auch deutlich mit organischer Substanz angereichert sein können (z.B. im Einzugsbereich von Gewässern), wurde der jeweils geringste in der BZE-LW aufgenommene Wert eines Bundeslandes für die Abschätzung des mittleren Kohlenstoff- bzw. Stickstoffvorrats für Mineralböden verwendet. Weiter wurde unterstellt, dass dieser Wert die obere Schranke der Bodenkohlenstoff- bzw. -stickstoffvorräte der Landnutzungskategorie *Sonstiges Land* für das jeweilige Bundesland repräsentiert. Der Mittelwert wurde dann anhand der Standardabweichung der C- und N-Vorräte aller der jeweiligen Bestimmung zugrunde liegender Mineralbodenstandorte bestimmt. Die so auf regionaler Ebene der Bundesländer ermittelten Werte für die Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte von Mineralböden werden, beginnend mit dieser Submission, für alle Emissionsberechnungen im Zusammenhang mit der Landnutzungskategorie *Sonstiges Land* genutzt. Die mittleren Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte sind in Tabelle 332 aufgeführt.

**Tabelle 332: Mittlere Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte [t C ha<sup>-1</sup>] und deren Unsicherheit (Standardabweichung [%]) in Mineralböden auf *Sonstigem Land* bis 30 cm**

Mineralboden	Kohlenstoffvorrat [t C ha <sup>-1</sup> 30 cm <sup>-1</sup> ]	Unsicherheit C [%]	Stickstoffvorrat [t N ha <sup>-1</sup> 30 cm <sup>-1</sup> ]	Unsicherheit N [%]
Brandenburg	10,3	44,0	0,9	40,5
Berlin	29,1	30,1	2,5	14,4
Baden-Württemberg	10,0	21,1	1,0	22,1
Bayern	10,0	24,6	0,9	24,8
Bremen	23,1	37,1	2,0	37,1
Hessen	21,5	19,2	2,0	19,8
Hamburg	21,1	50,2	2,2	40,2
Mecklenburg-Vorpommern	13,4	35,2	1,7	29,0
Niedersachsen	19,3	35,6	1,1	26,3
Nordrhein-Westfalen	16,8	26,1	2,2	20,8
Rheinland-Pfalz	7,6	18,3	1,1	19,1
Schleswig-Holstein	17,9	36,2	1,7	26,8
Saarland	32,8	19,9	1,8	25,3
Sachsen	22,1	25,9	1,9	23,3
Sachsen-Anhalt	17,8	28,2	1,6	28,7
Thüringen	15,1	29,2	1,6	29,0

#### 6.1.2.1.8 Unsicherheiten

Falls nicht explizit ausgewiesen, wird immer die Hälfte des 95-% Konfidenzintervalls als Unsicherheit angegeben und bei nicht normalverteilten Stichproben mit oberer und unterer

Schranke.. Die Unsicherheiten für die Kohlenstoffvorräte der Mineralböden in Wäldern sowie deren Veränderungen in der Zeit, wurden mittels statistischer Methoden aus den Messwerten der Bodenzustandserhebung Wald (Wellbrock et al. (2016); siehe Kapitel 6.4.3.3) und die für die Landnutzungskategorien *Ackerland<sub>annuell</sub>*, *Hopfen*, *Wein*, *Obst*, *Baumschulen*, *Weihnachtsbaumkulturen* und *Kurzumtriebsplantagen*, *Terrestrische Feuchtgebiete*, *Siedlungen* und *Sonstigem Land* aus den Messwerten der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft berechnet (Jacobs et al.). Die Unsicherheiten für *Ackerland<sub>annuell</sub>* und *Grünland* wurden aus den von dem Modell zur Kartenerstellung berechneten Interquartilsabständen abgeleitet.

#### 6.1.2.1.9 Geplante Verbesserungen

Mit dieser Submission hat Deutschland die Empfehlung des ERT aus dem Review-Prozess 2020 umgesetzt (ARR 2020: L.8, Table 5) und die Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte von Mineralböden regionalisiert. Die Ergebnisse wurden in flächendeckenden, hochauflösenden, georeferenzierten und dynamisch fortzuschreibenden thematischen Karten festgehalten. Außerdem wurde die Berichterstattung bezüglich Mineralböden der Verbleibkategorie Wald mit den Ergebnissen des mathematischen Modells YASSO15 ergänzt.

Geplante Verbesserungen sind in den nächsten Jahren:

- Implementierung regionalisierter Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte für die Mineralböden der Landnutzungskategorie *Terrestrische Feuchtgebiete*
- Einführung von Modellen zur Berechnung der Kohlenstoff- bzw. Stickstoffvorratsänderungen in Mineralböden in der Landnutzungskategorie *Ackerland*. Voraussetzung hierfür ist die Entwicklung eines Modells zur Ableitung von flächendeckenden, regionalisierten Bewirtschaftungsdaten aus dem Datensatz des InVeKoS (in Arbeit)
- Einführung modellgestützter Berechnung der Kohlenstoff- bzw. Stickstoffvorratsänderungen in Mineralböden der Landnutzungskategorie *Grünland*. Für Modelle im Grünlandbereich gibt es derzeit keine wirklich belastbaren Validierungsdatensätze. Voraussetzung hierfür sind daher Ergebnisse der Wiederholungsbeprobung der Bodenzustandserhebung (gestartet 2022).

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 471 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 470 abgebildet.

#### 6.1.2.2 Emissionen aus organischen Böden (3.D; 4.A bis 4.F; CRF-Tabelle 4(II))

Über die CO<sub>2</sub>-, N<sub>2</sub>O- und CH<sub>4</sub>-Emissionen aus organischen Böden wird in den Landnutzungskategorien Wald, Ackerland, Grünland i.e.S., Gehölze, terrestrische Feuchtgebiete, industrieller Torfabbau und Siedlungen berichtet (N<sub>2</sub>O aus gedrähten organischen Böden unter Acker und Grünland in CRF-Sektor 3.D.a.6). Außerdem werden die Methanemissionen aus Entwässerungsgräben erfasst sowie die Kohlenstoffverluste mit der gelösten organischen Substanz (DOC). In Deutschland wird der Großteil der organischen Böden entwässert.

Die Emissionsberechnung erfolgt durch Multiplikation der Moorflächen pro Subkategorie mit einem nutzungsspezifischen Emissionsfaktor. Bei Landnutzungsänderungen wird sofort der Emissionsfaktor der Zielkategorie verwendet:

$$E_{orgsoil} = \sum_{i=1}^n (A_i * EF_i)$$

$E_{orgsoil}$ : CO<sub>2</sub>-, N<sub>2</sub>O- und CH<sub>4</sub>-Emissionen aus organischen Böden einer Landnutzungskategorie [kt C]



Ai:	Moorfläche unter bestimmter Landnutzung [kha]
EFi:	Landnutzungsspezifischer Emissionsfaktor [ $t\ C\ ha^{-1}\ a^{-1}$ ]
i:	Übergangs- bzw. Verbleibkategorien
n:	Anzahl der Übergangs- bzw. Verbleibkategorien

Dem vorliegenden Inventar liegen sehr detaillierte Karten zur Lage und Drainage der organischen Böden zugrunde (Kapitel 6.1.2.2.1). Ebenso konnten sehr umfangreiche Messdaten von Treibhausgasemissionen aus organischen Böden in Deutschland verwendet werden, die im Verbundprojekt „Organische Böden“ des Thünen-Instituts<sup>88</sup> und Vorgängerprojekten mit standardisierten Messprotokollen erhoben bzw. in geringerem Umfang der nationalen Literatur entnommen wurden.

Gegenüber der Vorjahressubmission wurde die Berechnung der Emissionen aus organischen Böden erneut modifiziert und verbessert. Die Berechnungen erfolgen nun alle in Abhängigkeit vom Grundwasserflurabstand für jeden einzelnen der 1.822.109 Detektionspunkte auf organischen Böden. Der Grundwasserflurabstand entstammt einer digitalen, dynamischen Grundwasserkarte, die jährlich aktualisiert wird (s. Kapitel 6.1.2.2.2). Für die CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Emissionen erfolgt die Berechnung der Emissionen anhand von Responsefunktionen in Abhängigkeit vom Grundwasserflurabstand individuell für jeden einzelnen Erhebungspunkt (s. Kapitel 6.1.2.2.2). Die Responsefunktionen kommen für alle Landnutzungskategorien außer Wald und Gehölze zur Anwendung. Die Datenbasis und Ableitung der Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren entspricht einem IPCC Tier-3-Ansatz. Um Transparenz und Konsistenz mit anderen Aktivitätsdaten, der Abschätzung der N<sub>2</sub>O-Emissionen und anderer Pools (DOC, Grabenentwässerung) zu wahren, wurde daraus eine nationale Tier-2-Methodik für das Inventar entwickelt (Tiemeyer et al., 2020b).

Mit der Implementierung dieser Systeme wurde die Empfehlung der EU-Kommission umgesetzt, für die Emissionen aus organischen Böden in Deutschland Systeme zu entwickeln, mit denen künftig Veränderungen der Kohlenstoffvorräte von Böden infolge von Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Verringerung der Emissionen bzw. Kohlenstoffsequestrierung in den Verbleibkategorien 4.B und 4.C bzw. Acker- (CM) und Weidelandbewirtschaftung (GM) erfasst und berichtet werden können ("Member State recommendations on reporting systems for cropland & grazing land management emissions & removals" (Ecofys & Environment Agency Austria, 2017), gemäß der EU-Verordnung (EU) 2018/841. Zudem ermöglicht das System die in der EU-Verordnung ab 2026 verbindliche Berichterstattung über Emissionen aus "bewirtschafteten Feuchtgebieten".

#### 6.1.2.2.1 Aktivitätsdaten

Im Auftrag des Thünen-Instituts wurde bis 2013 eine „Karte organischer Böden“ (Parametrisierter Flächendatensatz zu den organischen Böden in Deutschland) neu erstellt, die die IPCC-Definition organischer Böden vollständig abbildet (Roßkopf et al., 2015):

- Räumliche Auflösung / Maßstab: Verfahrensbedingt heterogen, ~1:10.000 – 1:200.000; Rasterweite 25 m.
- Zeitliche Auflösung: regional in Abhängigkeit von der jeweiligen Datengrundlage unterschiedlich (Anfang des 20. Jahrhunderts bis heute).
- Datensätze: in enger Zusammenarbeit mit den Behörden der Bundesländer wurden die vorhandenen Bodendaten, Moorkataster und Datensätze aus geologischen, forstlichen oder landwirtschaftlichen Kartierungen so umfassend und hochauflösend wie möglich einbezogen und harmonisiert.

<sup>88</sup> [www.organische-boeden.de](http://www.organische-boeden.de)

- Datenselektion (Minimalkriterium): In Anlehnung an die Bodenkundliche Kartieranleitung (KA 5, Sponagel (2005)) und die Vorgaben für organische Böden gemäß IPCC (2006b) wurden diejenigen Blattlegendeneinheiten digital (vektoriell) vorliegender Ausgangsdaten herangezogen, die überwiegend Böden mit einem Mindestgehalt von 9 % organischem Kohlenstoff (15 % organische Bodensubstanz) in der Mischprobe der oberen 20 cm beschreiben.

Die neue Flächenkulisse organischer Böden umfasst 1,824 Mio ha. Die neue Karte organischer Böden löst die bisher verwendete grobe Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BGR 1995 & 1997) ab, in der keine flachgründigen oder mit Mineralboden vermischten Torfe enthalten waren (alte Flächenkulisse: 1,725 Mio ha). Durch die sehr viel genauere Lagezuordnung in der neuen Karte organischer Böden haben sich die Flächenanteile der Landnutzungskategorien gegenüber den Submissionen vor 2015 verschoben. Grünland im engen Sinne dominiert die Nutzung bei weitem. Durch die starke Verdichtung des Punkterasters, beginnend mit der Submission 2020 (siehe Kapitel 6.3), können nun kleinräumige Strukturen erfasst und eine sehr genaue Zeitreihe der Landnutzungen und Landnutzungsänderungen auf organischen Böden berichtet werden.

Tabelle 333 zeigt die Flächen organischer Böden nach Landnutzungskategorien. Die regionale Verteilung der Wasserstände in organischen Böden, die Grundlage zur Berechnung der Emissionen ist, wird abgeleitet nach (Bechtold et al., 2014) und beruht u.a. auf der Karte organischer Böden (Roßkopf et al., 2015) und langjährigen Messreihen von Wasserpegeln in organischen Böden.

Die im Landwirtschaftssektor (CRF-Tabelle 3.D.a.6) berichtete Fläche für organische Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung unterscheidet sich nicht von der im LULUCF-Sektor. Die Anbauflächen für Ackerböden sind in den beiden berichtspflichtigen Sektoren identisch. Im LULUCF-Sektor werden die Gebiete der Unterkategorien „Grünland i.e.S.“ und „Gehölze“ unter Grünland subsumiert. Gehölzflächen sind kein Agrarland im engeren Sinn, daher werden sie unter 3.D.a.6 nicht aufgeführt; im LULUCF-Sektor müssen sie für die konsistente Darstellung der gesamten deutschen Fläche jedoch einbezogen werden.

**Tabelle 333: Flächen organischer Böden und der Entwässerungsgräben nach Landnutzungskategorien für das Jahr 2021**

	Fläche organischer Böden [ha]	Fläche Entwässerungsgräben [ha]
Wald	278.080	3.164
Ackerland	328.971	3.152
Grünland i.e.S.	939.166	14.887
Gehölze	28.326	437
Terrestrische Feuchtgebiete	113.088	713
Gewässer	29.802	76
Torfabbau	17.425	66
Siedlungen	87.219	1.257
Sonstiges Land	32	0
<b>Σ</b>	<b>1.822.109</b>	<b>23.755</b>

Zur Erfassung der CH<sub>4</sub>-Emissionen aus Entwässerungsgräben musste deren Fläche und die angrenzende Landnutzung ermittelt werden. Zu diesem Zwecke wurde um die linearen Elemente des ATKIS-Basis-DLM, die Entwässerungsgräben darstellen, Pufferzonen gebildet, in Abhängigkeit von den Legendenangaben. Unter Bezugnahme auf die Karte organischer Böden (Roßkopf et al., 2015) und das ATKIS-Basis-DLM konnte so die gesamte Fläche der Gräben zur Entwässerung von organischen Böden für alle Landnutzungskategorien ermittelt werden (Tabelle 333).



#### 6.1.2.2.2 Emissionsberechnung

Die Emissionsfaktoren wurden entsprechend den Richtlinien im 2013 IPCC Wetlands Supplement (IPCC et al., 2014b) entwickelt.  $\text{CO}_2$  aus dem Boden ( $\text{CO}_2\text{-C}_{\text{on-site}}$ ) und  $\text{CH}_4$  aus dem Boden ( $\text{CH}_4_{\text{land}}$ ) wurden für alle Landnutzungskategorien außer Wald mittels empirischer Modelle berechnet (Tier 3). Für Waldböden wurden die entsprechenden Emissionsfaktoren dem 2013 IPCC Wetlands Supplement (IPCC et al., 2014b) entnommen. Für  $\text{N}_2\text{O}$  wurden Emissionsfaktoren aus nationalen jährlichen Messwerten entwickelt (Tier 2). Für  $\text{CO}_2$  aus gelöstem organischen Kohlenstoff ( $\text{CO}_2\text{-C}_{\text{DOC}}$ ) und  $\text{CH}_4$  aus Gräben ( $\text{CH}_4_{\text{Ditch}}$ ) wurden die Standardwerte aus dem 2013 IPCC Wetlands Supplement (IPCC et al., 2014b) übernommen.

##### **$\text{CO}_2$ aus dem Boden ( $\text{CO}_2\text{-C}_{\text{on-site}}$ ):**

Die Datengrundlage sind repräsentativ erhobene, qualitätsgeprüfte, nationale jährliche Messwerte (261 Messjahre, 118 Standorte, 17 verschiedene Moorgebiete). Aus diesen Daten haben Tiemeyer et al. (2020b) eine empirische (nichtlineare) Response-Funktion der Emission in Abhängigkeit vom Grundwasserstand abgeleitet. Diese wurde verwendet, um für die Jahre 2000, 2005, 2010, 2015 und 2021 an jedem Punkt auf organischen Böden die Emission zu berechnen. Zwischen diesen Jahren wurde linear interpoliert; vor 2000 wurden die Emissionen des Jahres 2000 übernommen, da die Eingangsdaten für diese Jahre nicht vorhanden sind. Die benötigten Wasserstände wurden mittels des Machine-Learning-Modells aus (Bechtold et al., 2014) separat für die entsprechenden Jahre berechnet. Da das Modell transformierte Wasserstände vorhersagt, wurde das Gesetz des bewussten Statistikers (law of the unconscious statistician) benutzt, um punktweise Erwartungswerte der Wasserstände und Emissionen zu berechnen. Die Modellunsicherheiten wurden mittels Bootstrapping ermittelt.

Der Response-Funktion aus Tiemeyer et al. (2020b) liegen nur wenige, unsichere Messwerte aus Waldflächen zugrunde. Deshalb wurde für Punkte unter Waldnutzung der Standardemissionsfaktor aus dem 2013 IPCC Wetlands Supplement (IPCC et al., 2014b) verwendet. Dieser kam auch für die Subkategorien *Gehölze* und *Hecken* zur Anwendung.

##### **$\text{CH}_4$ aus dem Boden ( $\text{CH}_4_{\text{land}}$ ):**

Die Datengrundlage sind repräsentativ erhobene, qualitätsgeprüfte, nationale jährliche Messwerte (296 Messjahre, 137 Standorte, 17 verschiedene Moorgebiete). Die Emissionsberechnung erfolgte analog zum Vorgehen bei  $\text{CO}_2$  auf Basis von Tiemeyer et al. (2020b) und Bechtold et al. (2014). Da die Responsefunktion für Wald auf sehr wenigen Datenpunkten basiert und stark von nur zwei Messwerten bestimmt wird, wurde für Punkte unter Waldnutzung und die Kategorie *Gehölze* der Standardemissionsfaktor aus dem 2013 IPCC Wetlands Supplement (IPCC et al., 2014b) verwendet.

##### **$\text{N}_2\text{O}$ :**

Die Datengrundlage sind repräsentativ erhobene, qualitätsgeprüfte, nationale Messwerte, die mindestens ein Jahr umfassen (320 Standorte, 21 verschiedene Moorgebiete). Da keine funktionalen Zusammenhänge identifiziert werden konnten, wurden die Mittelwerte der Messwerte je Landnutzungskategorie als Emissionsfaktor herangezogen (Tiemeyer et al., 2020b).

#### 6.1.2.2.3 Implizite Emissionsfaktoren (IEF)

Im Rahmen der Inventarerstellung werden zur Berechnung der Emissionen aus organischen Böden, für jedes Treibhausgas und jede Landnutzungskategorie spezifische, implizite Emissionsfaktoren verwendet. Die im 2013 IPCC Wetlands Supplement (IPCC et al., 2014b) aufgeführten Emissionsfaktoren gelten für spezifische Zustände organischer Böden. Bei der

Ermittlung der Emissionen aus einer Landnutzungskategorie, müssen die nicht drainierten, nassen Flächen, der Kohlenstoffaustrag mit dem Bodenwasser in Form von gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) sowie die Methanemissionen aus Entwässerungsgräben organischer Böden jedoch ebenfalls berücksichtigt werden. Dadurch ergeben sich die in Tabelle 334 dargestellten impliziten Emissionsfaktoren (IEF) für CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionen aus organischen Böden Deutschlands für das Jahr 2019.

**Tabelle 334: Implizite Emissionsfaktoren (IEF) und deren Unsicherheiten (95%-Perzentile) für CO<sub>2</sub>-onsite + DOC, CH<sub>4</sub><sub>land</sub> + CH<sub>4</sub><sub>ditch</sub> und N<sub>2</sub>O-onsite aus organischen Böden Deutschlands (4.A - 4.E; 4(II)) für das Jahr 2021**

Landnutzung	CO <sub>2</sub> -onsite + DOC		CH <sub>4</sub> <sub>land</sub> + CH <sub>4</sub> <sub>ditch</sub>		N <sub>2</sub> O-onsite	
	IEF	95%-Perzentile	IEF	95%-Perzentile	IEF	95%-Perzentile
	t CO <sub>2</sub> -C ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>		kg CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>		kg N <sub>2</sub> O-N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	kg CH <sub>4</sub>
Wald	2,90	(2,34 - 3,55)	3,29	(1,04 - 6,62)	2,78	(-0,32 - 5,81)
Acker <sub>annuell</sub>	9,63	(6,56 - 11,03)	10,30	(6,19 - 16,87)	11,04	(4,22 - 17,87)
Hopfen	9,09	(0,14 - 17,72)	12,54	(-0,2 - 26,64)	11,05	(-1,17 - 23,26)
Weinanbau	8,58	(2,98 - 13,65)	8,53	(2,46 - 15,98)	11,10	(1,83 - 20,37)
Obstanbau	9,51	(5,8 - 12,65)	10,22	(5,54 - 16,41)	11,05	(5,02 - 17,09)
Baumschulen	9,72	(6,67 - 11,46)	7,81	(4,65 - 12,51)	11,07	(8,08 - 14,05)
Weihnachtsbaumkulturen	9,64	(6,49 - 11,31)	12,46	(7,38 - 19,66)	11,03	(4,32 - 17,73)
Kurzumtriebsplantagen	9,37	(1,46 - 16,65)	9,15	(-0,2 - 20,47)	2,95	(-0,12 - 6,03)
Grasland i.e.S	7,82	(1,92 - 10,58)	34,83	(17,01 - 166,39)	4,52	(0,89 - 8,15)
Gehölze	2,89	(2,5 - 3,34)	4,20	(2,4 - 6,96)	2,76	(0,69 - 4,79)
Hecken	2,89	(2,29 - 3,58)	4,01	(1,42 - 8)	2,77	(-0,46 - 5,92)
Terrestrische Feuchtgebiete	5,23	(1,99 - 8,81)	165,78	(62,23 - 300,11)	0,69	(0,17 - 2,07)
Torfabbau	1,60	(1 - 2,21)	5,90	(2,49 - 10,78)	0,90	(0,45 - 1,35)
Siedlung	7,86	(5,22 - 11,57)	15,06	(10,05 - 15,06)	3,88	(1,58 - 6,71)

### 6.1.2.3 Kohlenstoffemissionen aus der Biomasse (4.A bis 4.F)

#### 6.1.2.3.1 Allgemeines

Im Rahmen der deutschen Inventarerstellung werden Emissionen aus dem Pool ober- und unterirdische pflanzliche Biomasse ausgewiesen für

- die Verbleibkategorien Wald, Hopfen, Wein, Obst, Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen, Kurzumtriebsplantagen, Gehölze, Hecken, Terrestrische Feuchtgebiete, Siedlungen
- sämtliche Übergangskategorien

Für die Verbleibkategorien Acker<sub>annuell</sub> und Grünland i.e.S. werden bei gleichbleibender Kulturart (annuell oder perennierend) keine Kohlenstoffvorratsänderungen ausgewiesen, da gemäß der IPCC-Richtlinien (2006 IPCC Guidelines, IPCC (2006b)), in diesen Subkategorien ein Gleichgewichtszustand für die Kohlenstoffflüsse des annualen Biomasse -Pools unterstellt wird. Nach der Gain-Loss Methode ist somit  $\Delta C = 0$  (Equation 2.7 in den 2006 IPCC Guidelines, IPCC (2006b)). Die entsprechenden Felder in den CRF-Tabellen werden mit NA gekennzeichnet. Für die Verbleibkategorien Gewässer und Sonstiges Land fallen keine Emissionen aus der pflanzlichen Biomasse an, da die Standorte vegetationslos sind.

Unterschieden nach Kulturart können annuelle Ackerlandkulturen mit dem bestehenden System zur Landnutzungsausweisung derzeit nicht räumlich explizit und umfänglich nachgewiesen werden. Dies hat zur Folge, dass ein nach Kultur und Anbaufläche gewichteter mittlerer Kohlenstoffvorrat als Mischwert für die Biomasse aller annualer Ackerlandkulturen aus Daten der Officialstatistik (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3.2.1) abgeleitet werden muss (s. Kapitel 6.1.2.3.3). Dies ist die einzige konsistente (inhaltlich und zeitlich) Datenquelle, die nahezu flächendeckend (mit den Einschränkungen der Officialstatistik; z.B. Ausschlussgrenzen) eine ertrags- und flächengewichtete Ableitung repräsentativer Kohlenstoffvorräte für krautige Pflanzen aus landwirtschaftlicher Produktion in Deutschland ermöglicht. Im Falle von

Landnutzungsänderungen von und zu annuellem Ackerland bilden diese die Grundlage aller Berechnungen der Emissionen aus der Biomasse.

Emissionen aus der Biomasse werden in dem Jahr ausgewiesen, in dem sie anfallen. Hierzu wird eine Methodik genutzt, die insbesondere die spezifische Zusammensetzung und Entwicklung der pflanzlichen Biomasse in den einzelnen Landnutzungskategorien erfasst. Unterteilt in verschiedene Kompartimente werden die Kohlenstoffvorräte der pflanzlichen Biomasse bzw. deren Änderung während deren Lebens- und Bewirtschaftungszyklen fortdauernd modelliert und aufgezeichnet (s. Kapitel 6.1.3.2).

#### 6.1.2.3.2 Allgemeine Berechnungsmethoden

Bei Landnutzungsänderungen werden die Kohlenstoffvorratsänderungen in der annuellen und perennierenden Biomasse erfasst und berichtet. Die Berechnung der Biomassevorratsänderungen erfolgt gemäß der Gain-Loss Methode (2006 IPCC Guidelines). Die Einbindung bzw. die Emission von CO<sub>2</sub> wird über die Kohlenstoffvorratsänderungen, getrennt nach ober- und unterirdischer Biomasse, anhand nationaler Daten ermittelt.

Die Abschätzung der Kohlenstoffvorratsänderungen in der Biomasse erfolgt durch Subtraktion des vollständigen Biomassekohlenstoffvorrats unmittelbar vor Nutzungsänderung vom Vorrat, der im ersten Jahr nach der Nutzungsänderung aufwächst, bezogen auf die von der Änderung betroffene Fläche (n. Gleichung 2.16, 2006 IPCC Guidelines, IPCC (2006b)):

$$\Delta C_{Bio} = \sum_{i=1}^n (A_i * EF_{final} - A_i * EF_{initial})$$

$\Delta C_{Bio}$ : Veränderung des Kohlenstoffvorrates in der Biomasse einer Landnutzungskategorie im Jahr der Nutzungsänderung [t]

$A_i$ : Fläche der Landnutzungsänderung [ha]

$EF_{final}$ : Pflanzenspezifischer Biomassekohlenstoffvorrat im ersten Jahr nach der Nutzungsänderung [t ha<sup>-1</sup>]

$EF_{initial}$ : Pflanzenspezifischer Biomassekohlenstoffvorrat vor der Landnutzungsänderung [t ha<sup>-1</sup>]

$n$ : Anzahl der Übergangskategorien

$i$ : Übergangskategorien

#### 6.1.2.3.3 Annuelle Kulturen und Grünland: Berechnungsmethoden und Emissionsfaktoren

Für annuelle Feldfrüchte und Grünland bedeutet die in Kapitel 6.1.2.3.2 angeführte Berechnungsmethode, dass

- nach Landnutzungsänderungen von/zu diesen Kategorien der vollständige Kohlenstoffvorrat der Biomasse im Jahr der Landnutzungsänderung zur Anrechnung kommt; bei Landnutzungsänderungen hin zu diesen Kategorien, wird ab dem zweiten Jahr ein Gleichgewichtszustand angenommen
- in den Verbleibkategorien wird für die pflanzliche Biomasse dieser Kulturen ein Gleichgewicht unterstellt, folglich werden keine Emissionen berichtet (entsprechende Felder werden in den CRF-Tabellen mit NA ausgewiesen)

Der Kohlenstoffvorrat für die ober- und unterirdische Biomasse der Pflanzen annueller Acker- und Gartenlandkulturen sowie *Grünland i.e.S.* wird jährlich auf Basis der Ernteerhebungen des statistischen Bundesamtes abgeleitet, wobei die gleichen Datenquellen und Algorithmen wie für die Berechnung der Ernterückstände in CRF-Sektor 3.D verwendet werden. Die Officialstatistik ist die einzige deutschlandweite, konsistente (inhaltlich und zeitlich) Datenquelle, die flächendeckend eine Ableitung repräsentativer Emissionsfaktoren für krautige Pflanzen aus landwirtschaftlicher Produktion in Deutschland ermöglicht (vergl. Kapitel 6.1.2.3.1).

Die Grundlage für die Ermittlung der mittleren Kohlenstoffvorräte für Früchte von Acker- und Gartenlandkulturen bilden die Erträge und Anbauflächen von 65 Feldfrüchten. Diese sind:

- Winterweizen, Sommerweizen, Roggen, Triticale, Wintermenggetreide, Wintergerste, Sommergerste, Hafer, Sommermenggetreide, Körnermais;
- Futtererbsen, Ackerbohnen;
- Kartoffeln, Zuckerrüben, Runkelrübe;
- Winterraps;
- Klee, Luzerne, Gras, Silomais;
- Blumenkohl, Brokkoli, Chinakohl, Grünkohl, Kohlrabi, Rosenkohl, Rotkohl, Weißkohl, Wirsing, Eichblattsalat, Eissalat, Endiviensalat, Feldsalat, Kopfsalat, Lollo Salat, Radicchio, Römischer Salat, Rucolasalat, sonstige Salate, Spinat, Rhabarber, Spargel, Staudensellerie, Knollenfenchel, Knollensellerie, Meerrettich, Möhren, Radieschen, Rettich, Rote Rüben, Einlegegurken, Schälgurken, Speisekürbisse, Zucchini, Zuckermais, Buschbohnen, Dicke Bohnen, Stangenbohnen, Frischerbsen-Drusch, Frischerbsen, Bundzwiebeln, Speisezwiebeln, Petersilie, Porree, Schnittlauch.

Für Grünland i.e.S. sind dies die Erträge und Anbauflächen aller statistisch erfassten

- Wiesen
- Mähweiden
- Weiden
- Almen und Hutungen

Die Ableitung der trockenen Biomasse einzelner Pflanzenteile aus den Ernteerträgen erfolgt nach Rösemann et al. (2015) mittels Verhältniszahlen und Wassergehaltsangaben aus unterschiedlichen Quellen. Die Daten und Methoden sind konsistent mit denen zur Berechnung des Stickstoffs in Ernterückständen (CRF 3.D.a.4).

Für die Berechnung des Kohlenstoffvorrats der Biomasse wurde, abweichend vom IPCC Standardwert (50 Gew-%), ein durchschnittlicher Kohlenstoffgehalt von 45 Gew-% angenommen, da Osowski et al. (2004) Kohlenstoffgehalte für Pflanzen in Mitteleuropa von 44–48 Gew-% ausweisen und Pöpken (2011), bei ihren Untersuchungen von Nutzgehölzpflanzen für das deutsche Inventar ebenfalls mittlere Werte von 45–46 % ermittelte.

Mithilfe all dieser Daten werden mittlere Kohlenstoffvorräte bezogen auf die Fläche berechnet, in dem, pflanzenspezifisch, die jeweiligen Anbauflächen ([ha]) mit den entsprechenden Erträgen ([t Biomasse ha<sup>-1</sup>]) multipliziert werden. Diese Produkte (pflanzenspezifisch, absolute Erntemengen einzelner krautiger Pflanzen bzw. Teile derselben [t]) werden auf Trockenmasse und Kohlenstoffgehalt umgerechnet, summiert und durch die entsprechende Flächensumme ([ha]) dividiert. Das Ergebnis sind flächen- und ertragsgewichtete Mittel für krautige Pflanzen aus landwirtschaftlicher Produktion [t C ha<sup>-1</sup>], die repräsentativ für Deutschland sind. Diese flächenbezogenen mittleren Kohlenstoffvorräte [t C ha<sup>-1</sup>] der ober- und unterirdischen Biomasse von Feldfrüchten und Gräsern werden als Emissionsfaktoren angesetzt. Dieses Vorgehen entspricht den Methoden der 2006 IPCC Guidelines.

Die Ergebnisse für annuelle Kulturen der Acker- und Gartenbauflächen sind in Tabelle 335 dargestellt, die für Grünlandkulturen i.e.S. in Tabelle 336.

Tabelle 335 zeigt, dass die Werte für die Biomasse der annualen Acker- und Gartenlandkulturen im Zeitverlauf einen positiven, signifikanten Trend aufweisen. Daher wird den Berechnungen der Kohlenstoffvorratsänderungen infolge Landnutzungsänderung immer der aktuelle Wert des jeweiligen Jahres zugrunde gelegt.

**Tabelle 335: Flächenbezogener Kohlenstoffvorrat [t C ha<sup>-1</sup> ± Hälfte des 95 % Konfidenzintervalls] der Biomasse annueller Kulturen auf Acker- und Gartenbauland**

Jahr	Ackerland <sup>annuell</sup> Kohlenstoffvorrat [t C ha <sup>-1</sup> ]		
	Biomasse <sub>total</sub>	Biomasse <sub>oberirdisch</sub>	Biomasse <sub>unterirdisch</sub>
1990	5,17 ± 0,61	3,72 ± 0,51	1,45 ± 0,33
1995	5,54 ± 0,65	4,12 ± 0,57	1,42 ± 0,32
2000	5,89 ± 0,69	4,40 ± 0,60	1,49 ± 0,33
2005	6,08 ± 0,71	4,58 ± 0,63	1,50 ± 0,34
2010	5,96 ± 0,70	4,51 ± 0,62	1,45 ± 0,32
2011	6,09 ± 0,71	4,55 ± 0,62	1,54 ± 0,35
2012	6,43 ± 0,75	4,84 ± 0,66	1,59 ± 0,36
2013	6,32 ± 0,74	4,81 ± 0,66	1,51 ± 0,34
2014	7,21 ± 0,84	5,45 ± 0,75	1,76 ± 0,40
2015	6,48 ± 0,76	4,95 ± 0,68	1,53 ± 0,34
2016	6,36±0,75	4,81±0,66	1,55±0,35
2017	6,64±0,78	4,96±0,68	1,68±0,38
2018	5,50±0,64	4,12±0,56	1,39±0,31
2019	6,12±0,72	4,58±0,63	1,54±0,34
2020	6,41 ± 0,75	4,80 ± 0,66	1,61 ± 0,36
2021	6,58 ± 0,77	4,90 ± 0,67	1,68 ± 0,38

Für Grünland i.e.S. weisen die Kohlenstoffvorräte der pflanzlichen Biomasse in der Zeitreihe keinen signifikanten Trend auf und die jährlichen Veränderungen sind deutlich geringer als die Unsicherheiten. Daher wird ein mittlerer Kohlenstoffvorrat für die Biomasse von Grünland i.e.S. abgeschätzt und einheitlich den Berechnungen aller Jahre zugrunde gelegt (siehe Tabelle 336). Dieser mittlere Kohlenstoffvorrat über die Zeit wurde mittels Bootstrapping ermittelt. Bootstrapping ist ein Verfahren der Stichprobenwiederholung (resampling), bei dem statistische Kennwerte anhand einer Stichprobe (im vorliegenden Fall die mittleren Kohlenstoffvorräte der ober- und unterirdischen Biomasse krautiger Grünlandpflanzen der Jahre 1990 - 2015) berechnet werden. Dieses Verfahren empfiehlt sich dann besonders, wenn die theoretische Verteilung der Statistik nicht bekannt ist und ein Parameter (im vorliegenden Fall der Mittelwert) der Grundgesamtheit (nicht der Stichprobe) und dessen durchschnittliche Abweichung vom wahren Parameterwert abzuschätzen ist. Die so berechneten Werte für krautige Pflanzen des Grünlands i.e.S. sind in Tabelle 336 dargestellt; sie liegen allen entsprechenden Berechnungen im Inventar zugrunde. Der Standardfehler der errechneten Mittelwerte für die Grundgesamtheit beträgt 2,3 % (Hälfte des 95 % - Konfidenzintervalls).

**Tabelle 336: Flächenbezogener Kohlenstoffvorrat [t C ha<sup>-1</sup>] von Grünland im engeren Sinne (± Hälfte des 95 % Konfidenzintervalls)**

Grünland i.e.S.	Kohlenstoffvorrat [t C ha <sup>-1</sup> ]		
	Biomasse <sub>total</sub>	Biomasse <sub>above</sub>	Biomasse <sub>below</sub>
Grünland i.e.S.	6,81 ± 2,06	3,78 ± 1,37	3,03 ± 1,54

#### 6.1.2.3.4 Perennierende Kulturen: Berechnungsmethoden und Emissionsfaktoren

Für perennierende pflanzliche Biomasse außerhalb des Waldes werden anthropogen bedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen infolge von Kohlenstoffvorratsänderungen zu dem Zeitpunkt ausgewiesen, an dem sie auftreten. Hierzu ist es notwendig, die kompletten Wachstumszyklen der unterschiedlichen Gehölzpflanzen und Begleitvegetation zu erfassen und in der Zeit, in Abhängigkeit von Umtriebszyklen und Betriebsdauer, abzubilden. Je nach Landnutzung und Kultur setzt sich der Kohlenstoffvorrat der pflanzlichen Biomasse aus unterschiedlichen

Kompartimenten zusammen. Die Landnutzungskategorien bzw. perennierenden Kulturen, die unterstellte Zusammensetzung der pflanzlichen Biomasse sowie deren Umtriebszyklen sind in Tabelle 337 dargestellt.

**Tabelle 337: Landnutzungskategorien mit perennierenden Gehölzkulturen außerhalb des Waldes, deren Kompartimente und Umtriebszyklen [a]**

Landnutzungskategorie	Kürzel	Kompartimente (Gewichtungsfaktor)	Umtriebszyklus [a]	Umtriebszyklus+
Obstanbau	croo	Obstgehölze (1), Grünland (0,75)	20	nächster Zyklus
Weinanbau	crow	Rebstöcke (1), Grünland (0,75)	30	nächster Zyklus
Baumschulen	crot	Forstgehölze (0,33), Ziergehölze (0,33), Grünland (0,33)	10	Gleichgewicht
Weihnachtsbaumkulturen	crox	Nadelhölzer (1), Grünland (0,75)	10	nächster Zyklus
Kurzumtriebsplantagen	cros	Laubgehölze (1)	10	nächster Zyklus
Hecken/Feldgehölze	gra2	Heckengehölze/Laubbäume (1)	12	nächster Zyklus
Terrestrische Feuchtgebiete	wet1	Heckengehölze/Laubbäume (0,33); Grünland (0,66)	12	Gleichgewicht
Siedlungen	set1	Heckengehölze/Laubbäume (0,25); Grünland (0,25)	12	Gleichgewicht

Die Kompartimente werden während der Umtriebszeiten unterschiedlich behandelt. Der aktuelle Kohlenstoffvorrat der Biomasse eines Standortes ergibt sich für ein spezifisches Jahr aus der Summe der aktuellen Vorräte der Kompartimente. Folgende weiteren Unterstellungen liegen der Berechnungsmethodik zugrunde:

- Der Biomassevorrat perennierender Kulturen außerhalb des Waldes wird an jedem Stichprobenpunkt verfolgt; das beinhaltet die jährliche Erfassung der Veränderung des absoluten Vorrats
- Der Biomassevorrat der unterschiedlichen perennierenden Kulturen ist abhängig von deren Umtriebszyklen. Der systemrelevante maximale Vorrat wird im letzten Jahr des Zyklus erreicht
- Nach Ablauf der Umtriebszeit beginnt ein neuer Wachstumszyklus, unabhängig davon, ob sich die Kultur noch in einer Übergangskategorie oder einer Verbleibkategorie befindet
- Unabhängig von den Umtriebszyklen dauert die Übergangszeit max. 20 Jahre (Konzept der effektiven Übergangszeit (Kapitel 6.1.2)); nach Ablauf derselben, wird die Kultur in die der jeweiligen Übergangskategorie entsprechende Verbleibkategorie überführt und verbleibt im aktuellen Umtriebszyklus. Es ändert sich nur die Allokation der aktuellen Vorräte bzw. der Emission
- Bei Landnutzungsänderung von einer Landnutzungskategorie mit perennierenden Kulturen zu jedweder anderen Landnutzungskategorie, wird der aktuelle Kohlenstoffvorrat aller Kompartimente vollständig im Jahr der Landnutzungsänderung als Emission veranschlagt
- Allen Punkten, die für das Jahr 1990 perennierende Kulturen aufwiesen, wurde ein Stadium der kulturspezifischen Umtriebszeit mit einem Zufallsgenerator zugewiesen
- Alle Punkte Sonstiger perennierender Ackerkulturen werden mittels Zufallsgenerator einer der Kategorien *Baumschulen*, *Weihnachtsbaumkulturen*, *Kurzumtriebsplantagen* zugeordnet, in Abhängigkeit vom jeweiligen prozentualen Anteil, der sich aus den Daten der Offizialstatistik zu den entsprechenden Erhebungszeitpunkten ergibt. Daten zu Kurzumtriebsplantagen werden explizit erst seit 2010 erhoben.

Die jährliche Berechnung der Emission erfolgt nach Gleichung 2.7 IPCC 2006, Vol. 4:



**Gleichung 20**

$$Emission [t CO_2 ha^{-1} a^{-1}] = (C_{curr\ year} - C_{prev\ year}) * -44/12$$

$C_{curr\ year}$ : Kohlenstoffvorrat im aktuellen Jahr [t C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

$C_{prev\ year}$ : Kohlenstoffvorrat des vorhergehenden Jahres [t C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

Dabei wird der Kohlenstoffvorrat spezifisch, für die unterschiedlichen Kulturen, wie folgt bestimmt:

**Gleichung 21**

$$C_{cultspec} = C_{cultspec\_abo} + C_{cultspec\_bel}$$

$C_{cultspec}$ : Kulturspezifischer Kohlenstoffvorrat der Biomasse [t C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

$C_{cultspec\_abo}$ : Oberirdischer kulturspezifischer Kohlenstoffvorrat der Biomasse [t C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

$C_{cultspec\_bel}$ : Unterirdischer kulturspezifischer Kohlenstoffvorrat der Biomasse [t C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

Zur Berechnung der Kohlenstoffvorräte der ober- und unterirdischen pflanzlichen Biomasse, werden die dafür benötigten Kohlenstoffvorräte der Subkompartimente mit einem spezifischen Gewichtungsfaktor multipliziert, in Abhängigkeit von der Bezugsgröße (z.B. Fläche, oberirdische Biomasse) des jeweiligen Subkompartiments. Die Terme für Schnitt und krautige Pflanzen (gra1) sind kulturspezifisch optional:

**Gleichung 22**

$$C_{abo} = C_{stem,branch} * GF + C_{cut} * GF + C_{gra1\_abo} * GF$$

$C_{abo}$ : Oberirdischer Kohlenstoffvorrat der Biomasse [t C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

$C_{stem,branch}$ : Oberirdischer Kohlenstoffvorrat der Gehölze (Stamm, Äste) [t C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

GF: Kulturspezifischer Gewichtungsfaktor<sub>Bezugsgröße</sub>

$C_{cut}$ : Kohlenstoffvorrat des Schnittgutes [t C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

$C_{gra1\_abo}$ : Oberirdischer Kohlenstoffvorrat der krautigen Biomasse [t C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

**Gleichung 23**

$$C_{bel} = C_{roots} * GF + C_{gra1\_bel} * GF$$

$C_{bel}$ : Unterirdischer Kohlenstoffvorrat der Biomasse [t C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

$C_{roots}$ : Unterirdischer Kohlenstoffvorrat des Gehölzes (Wurzeln) [t C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

$C_{gra1\_bel}$ : Unterirdischer Kohlenstoffvorrat der krautigen Biomasse [t C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

GF: Kulturspezifischer Gewichtungsfaktor<sub>Bezugsgröße</sub>

**6.1.2.3.5 Ableitung der Emissionsfaktoren für perennierende Gehölzkulturen**

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Methodenentwicklung zur Erfassung der Biomasse mehrjährig verholzter Pflanzen außerhalb von Waldflächen“ wurden landesspezifische Kohlenstoffvorräte für die ober- und unterirdische Biomasse von Obstgehölzen, Wein und Weihnachtsbaumkulturen in Deutschland erhoben. Außerdem wurden mittels dieser Daten und Ergebnissen der Bundeswaldinventur mittlere Kohlenstoffvorräte für die Pflanzenbestände in Baumschulen abgeschätzt. Die mittlere Baumbiomasse für Kurzumtriebsplantagen und Hopfen wurde landesspezifisch aus Literatur- und Forschungsprojektdaten hergeleitet.

**6.1.2.3.5.1 Obstgehölze**

Im Rahmen des oben genannten Forschungsprojektes wurden aus den zwei Hauptobstanbaugebieten Deutschlands (Altes Land: Norddeutschland und Bodenseegebiet:

Süddeutschland) insgesamt 100 Obstbäume (91 Apfel-, 6 Kirsch- und 3 Pflaumenbäume) unterschiedlichen Alters und Sorte destruktiv untersucht. Zusätzlich wurden an 210 lebenden Apfelbäumen folgende Parameter erhoben:

- Stammfußdurchmesser
- Brusthöhendurchmesser
- Höhe

Betrachtet wurde ausschließlich der Erwerbsobstbau. Anhand aller im Forschungsprojekt erhobenen Daten sowie Ergebnissen der Officialstatistik (Baumobstanbauerhebung Statistisches Bundesamt (FS 3, R 3.1.4)<sup>89</sup>) konnte der Gesamtkohlenstoffvorrat in der ober- und unterirdischen Biomasse der unterschiedlichen Obstgehölze für unterschiedliche Altersklassen und für alle Jahre der Obstanbauerhebungen (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3.1.4) (2002, 2007, 2012, 2017) ermittelt werden. Dabei wurden die für Apfelbäume abgeleiteten Werte auch den Birnen zugeteilt, die für Kirsche und Pflaume sowohl den Zwetschgen als auch den Mirabellen und Renekloden.

Für das Inventar können Obstanbauflächen nur pauschal georeferenziert, nicht differenziert nach Art der Obstgehölze ausgewiesen werden. Daher wurde aus den Daten ein langjähriger flächengewichteter, durchschnittlicher Kohlenstoffvorrat für die oberirdische Phytomasse von Obstgehölzen abgeleitet, Dies erfolgt mittels Division der Summe des Gesamtkohlenstoffvorrats jeder Partition einer Altersklasse durch die jeweils bestockte Fläche. Für die unterirdische pflanzliche Biomasse konnte dies nicht durchgeführt werden, da die im Forschungsprojekt erhobenen Originaldaten probenahmebedingt sehr stark variierten und keine signifikante Abhängigkeit von der oberirdischen Biomasse abgeleitet werden konnte. Aus diesem Grunde wurde die unterirdische pflanzliche Biomasse aus der oberirdischen Biomasse anhand der Gleichung von MOKANY et al. (2006)<sup>90</sup> ermittelt.

Aus den so abgeleiteten Werten konnte dann für die oberirdische Biomasse durch Regression eine Sigmoidfunktion abgeleitet werden, die hochsignifikant das Verhältnis von Kohlenstoffvorrat in Obstgehölzen in Relation zum Alter beschreibt:

#### Gleichung 24

$$C_{C_{croo\ stem,branch}} = -1,9798 + \frac{16,9435}{\left(1 + e^{\frac{a-13,0365}{6,1938}}\right)}$$

$C_{C_{croo\ stem,branch}}$ : Kohlenstoffvorrat Stamm und Äste der Obstgehölze [t C ha<sup>-1</sup>]

a: Anzahl Jahre nach Neubegründung (1, 2, 3 - 20) nach Bestandserneuerung

Diese Formel sowie die daraus abgeleiteten Werte für die unterirdische Biomasse (Mokany et al.) liegen im Inventar allen Berechnungen mit Obstgehölzen zugrunde.

Weitere Unterstellungen sind:

<sup>89</sup> Bei der Baumobstanbauerhebung handelt es sich um eine repräsentative statistische Erhebung im Erwerbsobstbau Deutschlands, die alle 5 Jahre durchgeführt wird. Der vorliegenden Submission liegen die Ergebnisse der Obstanbauerhebungen der Jahre 2002, 2007, 2012 und 2017 zugrunde. Bei der Erhebung werden vom Statistischen Bundesamt u.a. die Stückzahlen von Apfel-, Birn-, Süß-, Sauerkirsch-, Pflaumen-, Zwetschgen-, Mirabellen- und Reneklodenbäumen in unterschiedlichen Altersklassen ermittelt, sowie die mit diesen Bäumen in der jeweiligen Altersklasse bestockten Flächen. Die Baumobstanbauerhebung ist eine Vollerhebung

<sup>90</sup>  $Phytomasse_{\text{unterirdisch}} = 0,489 * (Phytomasse_{\text{oberirdisch}} \text{ Gehölze})^{0,890}$  - MOKANY et al. (2006) haben in ihrer Übersichtsarbeit Wurzel/Spross-Verhältnisse für zahlreiche Vegetationstypen in Abhängigkeit von Biomasse, klimatischen und standortkundlichen Parametern abgeleitet, die als Default-Werte in die IPCC – Guidelines 2006 (IPCC 2006) übernommen wurden



- Der Schnitt beträgt jährlich 20 % der oberirdischen Biomasse (PÖPKEN 2011)
- 75 % der Obstanbauflächen sind mit krautigen Pflanzen/Gras bewachsen
- Die Umtriebszeit der Obstgärten wird auf 20 Jahre festgelegt (Angaben zwischen 12 – 25 Jahren; rechnerisch, ermittelt aus der Verteilung der Baumbiomasse der unterschiedlichen Altersklassen nach Destatis: 18,3 Jahre); dann erfolgt eine vollständige Bestandserneuerung (nicht Gras)

Der oberirdische pflanzliche Biomassevorrat für Obstanbauflächen errechnet sich nach

#### Gleichung 25

$$C_{croo_{abo}} = C_{croo_{stem,branch}} + C_{croo_{cut}} + C_{gra1_{abo}} * 0,75$$

$C_{croo_{stem,branch}}$ : Kohlenstoffvorrat Stamm und Äste der Obstgehölze [t C ha<sup>-1</sup>]

$C_{croo_{cut}}$ : Kohlenstoffvorrat des jährlichen Schnittguts [t C ha<sup>-1</sup>]

$C_{gra1_{abo}}$ : Kohlenstoffvorrat für die oberirdische Biomasse von Grünland i.e.S. [3,78 t C ha<sup>-1</sup>]

Der unterirdische pflanzliche Biomassevorrat für Obstanbauflächen errechnet sich nach:

#### Gleichung 26

$$C_{croo_{roots}} = 0,489 * C_{croo_{abo}}^{0,89}$$

$C_{croo_{roots}}$ : Kohlenstoffvorrat der unterirdischen Biomasse von Obstgehölzen [t C ha<sup>-1</sup>]

$C_{croo_{abo}}$ : Kohlenstoffvorrat der oberirdische Biomasse von Obstgehölzen [t C ha<sup>-1</sup>]

#### Gleichung 27

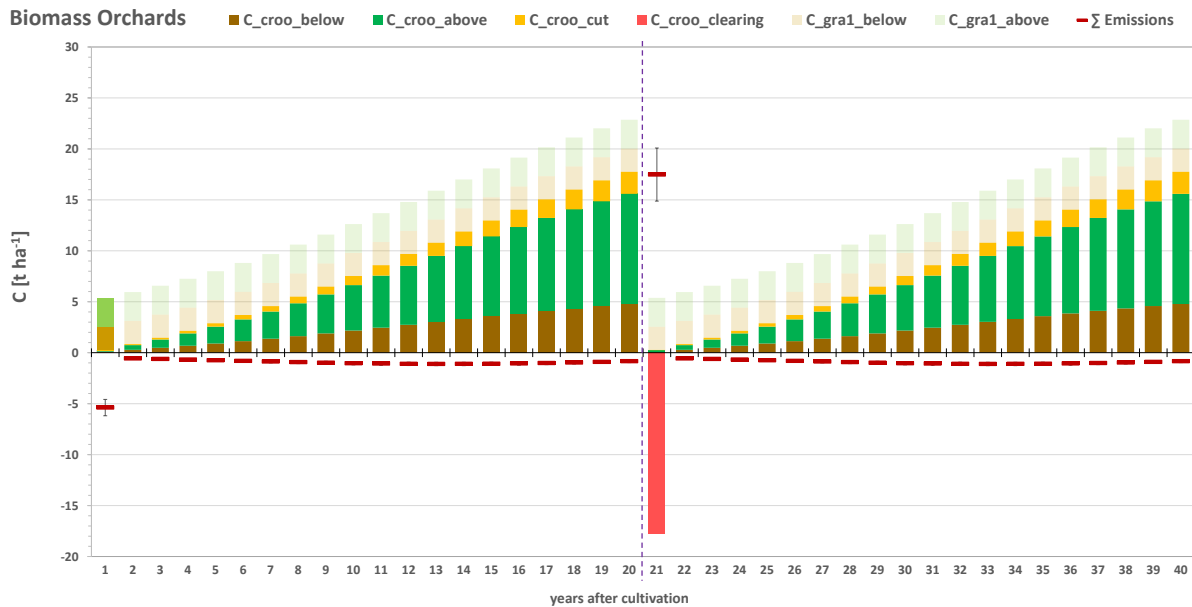
$$C_{croo_{bel}} = C_{croo_{roots}} + C_{gra1_{bel}} * 0,75$$

$C_{croo_{bel}}$ : Kohlenstoffvorrat der unterirdischen Biomasse von Obstgehölzen [t C ha<sup>-1</sup>]

$C_{croo_{roots}}$ : Kohlenstoffvorrat der Wurzelbiomasse in [t C ha<sup>-1</sup>]

$C_{gra1_{bel}}$ : Kohlenstoffvorrat für die unterirdische Biomasse von Grünland i.e.S. [3,03 t C ha<sup>-1</sup>]

Zur Berechnung des gesamten Kohlenstoffvorrats in der pflanzlichen Biomasse von Obstanbauflächen und deren Verrechnung als Emissionen, kommen die in Kapitel 6.1.2.3.2 und Kapitel 6.1.2.3.3 aufgeführten Methoden zur Anwendung. Die Entwicklung der Kohlenstoffvorräte im Obstanbau während mehrerer Umtriebszyklen, sowie die damit verbundenen Emissionen, sind in Abbildung 57 dargestellt.



**Abbildung 57: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha<sup>-1</sup>] in Kompartimenten der pflanzlichen Biomasse von Obstanbauflächen sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha<sup>-1</sup>] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (|). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung emissionsrelevant**

**6.1.2.3.5.2 Wein**

Zur Ermittlung landesspezifischer Kohlenstoffvorräte für Weinstöcke wurden im Projekt „Methodenentwicklung zur Erfassung der Biomasse mehrjährig verholzter Pflanzen außerhalb von Waldflächen“ (Pöpken, 2011) 74 Weinstöcke destruktiv untersucht. Die Rebstöcke waren 15 bzw. 25 Jahre alt. Ermittelt wurden die Masse sowie der Wasser- und Kohlenstoffgehalt der ober- und unterirdischen Pflanzenteile (Pöpken, 2011). Aus diesen Daten konnte mittels nichtlinearer Regression ein hochsignifikanter Zusammenhang zwischen Alter und Kohlenstoffvorrat der ober- und unterirdischen Biomasse von Rebstöcken ermittelt werden. Da in Deutschland durchschnittlich 4.000 Weinstöcke auf einem Hektar stocken (Pöpken, 2011), wurden zur Berechnung des Kohlenstoffvorrats pro Flächeneinheit die C-Vorräte der einzelnen Pflanzenkompartimente bzw. der Gesamtpflanze mit 4.000 multipliziert und somit die Vorräte pro ha ermittelt. Die Berechnung der ober- und unterirdischen pflanzlichen Biomasse erfolgt nach folgenden Gleichungen:

**Gleichung 28: Berechnung der oberirdischen Biomasse für Rebstöcke**

$$C_{Crown\ vine} = (-0,004 * a^2 + 0,0234 * a) * \frac{4000}{1000}$$

*C<sub>Crown vine</sub>*: Kohlenstoffvorrat des Rebstocks [t C ha<sup>-1</sup>]  
*a*: Anzahl Jahre nach Neubegründung (1 – 30)

**Gleichung 29: Berechnung der unterirdischen Biomasse für Rebstöcke**

$$C_{Crown\ roots} = (0,0001 * a^2 + 0,0096 * a) * \frac{4000}{1000}$$

*C<sub>Crown roots</sub>*: Kohlenstoffvorrat der Wurzel des Rebstocks [t C ha<sup>-1</sup>]  
*a*: Anzahl Jahre nach Neubegründung (1 – 30)

Nicht zuletzt aus Gründen des Erosionsschutzes werden in Deutschland auf den Zwischenstreifen im Weinbau Grünlandpflanzen kultiviert. Wie im Obstbau wird auch im Weinbau der durchschnittliche Flächenanteil von Grünlandpflanzen mit 75 % angenommen. In weiteren Untersuchungen wurde festgestellt, dass jährlich ca. 0,81 t C ha<sup>-1</sup> Schnitt anfallen. Grasanteil und Schnitt werden nur bei erstmaliger Bestandsneubegründung und bei Nutzungsänderung von Wein zu einer anderen Landnutzungskategorie in Rechnung gestellt. Die Betriebsdauer ist gleich der Umtriebszeit und beträgt 30 Jahre. So errechnet sich für den Weinanbau der Kohlenstoffvorrat in der Biomasse nach folgenden Formeln:

**Gleichung 30: Summe der oberirdischen Biomasse im Weinanbau in [t C ha<sup>-1</sup>]**

$$C_{crow_{abo}} = C_{crow_{vine}} + C_{crow_{cut}} + C_{gra1_{abo}} * 0,75$$

*C<sub>crow\_abo</sub>*: Kohlenstoffvorrat der oberirdischen Biomasse auf Weinanbauflächen [t C ha<sup>-1</sup>]

*C<sub>crow\_vine</sub>*: Kohlenstoffvorrat der oberirdischen Biomasse des Rebstocks [t C ha<sup>-1</sup>]

*C<sub>crow\_cut</sub>*: Kohlenstoffvorrat des jährlichen Schnittguts des Rebstocks [t C ha<sup>-1</sup>]

*C<sub>gra1\_abo</sub>*: Kohlenstoffvorrat der oberirdischen Biomasse des Grünlandes zwischen den Pflanzreihen [t C ha<sup>-1</sup>]

**Gleichung 31: Summe der unterirdischen Biomasse im Weinanbau in [t C ha<sup>-1</sup>]**

$$C_{crow_{bel}} = C_{crow_{roots}} + C_{gra1_{bel}} * 0,75$$

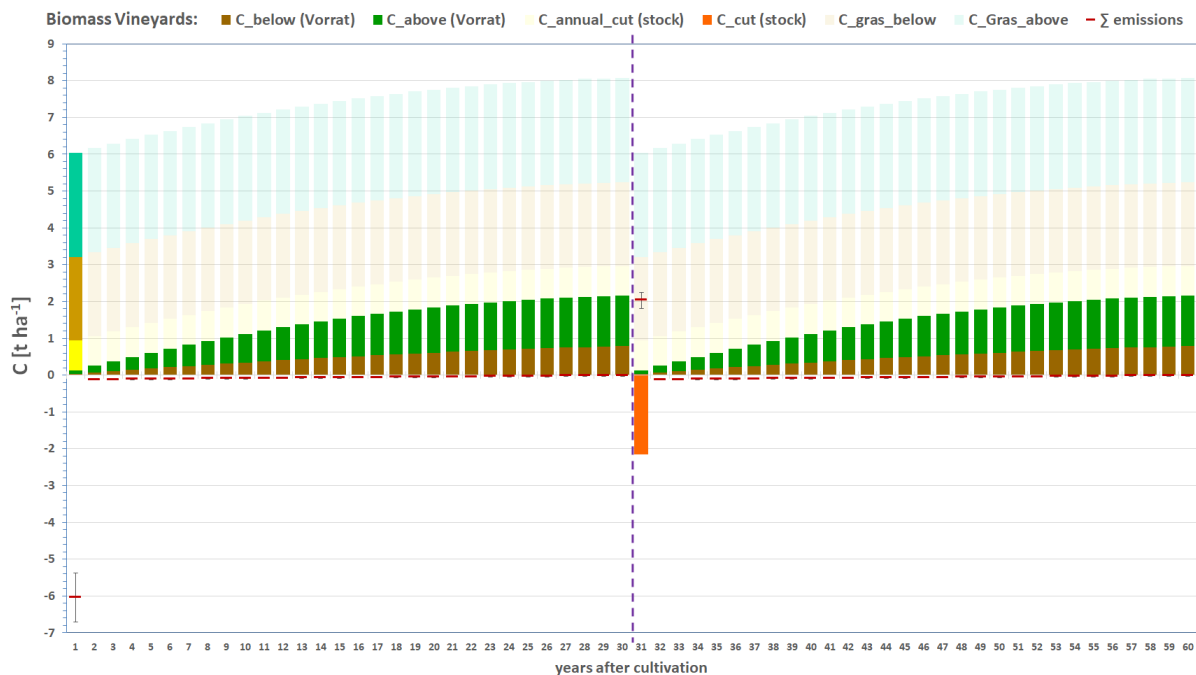
*C<sub>crow\_bel</sub>*: Kohlenstoffvorrat der unterirdischen Biomasse auf Weinanbauflächen [t C ha<sup>-1</sup>]

*C<sub>crow\_roots</sub>*: Kohlenstoffvorrat der unterirdischen Biomasse des Rebstocks [t C ha<sup>-1</sup>]

*C<sub>gra1\_bel</sub>*: Kohlenstoffvorrat der unterirdischen Biomasse des Grünlandes zwischen den Pflanzreihen [t C ha<sup>-1</sup>]

Zur Berechnung des gesamten Kohlenstoffvorrats in der pflanzlichen Biomasse von Weinanbauflächen und deren Verrechnung als Emissionen kommen die in Kapitel 6.1.2.3.2 und Kapitel 6.1.2.3.3 aufgeführten Methoden zur Anwendung. Die Entwicklung der Kohlenstoffvorräte im Weinbau in der Zeit, sowie die damit verbundenen Emissionen sind in Abbildung 58 dargestellt.

**Abbildung 58: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha<sup>-1</sup>] in Kompartimenten der Biomasse von Weingärten sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha<sup>-1</sup>] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (|). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung emissionsrelevant**



### 6.1.2.3.5.3 Baumschulen

Aussagen über die Art der in Baumschulen (crot) aufgezogenen Gehölze gibt die Baumschulerhebung, die im Turnus von 4 Jahren als Vollerhebung vom Statistisches Bundesamt (FS 3, R 3.1.7) durchgeführt wird. Die Erhebung 2017 zeigte, dass auf den deutschen Baumschulflächen hauptsächlich Zier- und sonstige Gehölze angebaut (ca. 80 %) wurden; die Aufschulung von Forstpflanzen erfolgte auf ca. 20 % der Fläche (Statistisches Bundesamt (FS 3, R 3.1.7)). Da für Deutschland keine Untersuchungen über den durchschnittlichen Biomassevorrat im Aufwuchs von Baumschulen vorliegen, wurde aus landesspezifischen Biomassevorratswerten für Gehölzpflanzen ein mittlerer Kohlenstoffvorrat pro Baumschulflächeneinheit hergeleitet. Hierfür wurde Folgendes unterstellt:

- Der Gehölzbestand setzt sich zu zwei Dritteln aus Ziergehölzen und zu einem Drittel aus Waldbäumen zusammen (letztere werden zwar nur auf ca. 20 % der Fläche aufgezogen; da in Baumschulen aber auch Nadelgehölze für Weihnachten und auch im Zierpflanzenanbau, außerdem „Waldbäume“ wie Eiche und Buche geschult werden, wurde der Anteil auf 33 % aufgewertet)
- Baumschulpflanzen werden max. 10 Jahre geschult
- Die Altersklassen innerhalb der Gehölzgruppen sind gleichverteilt
- 6000 Pflanzen pro ha (dies entspricht einem mittleren Pflanzenabstand von ca. 120/130 cm)
- Zusätzlich 1/3 der Fläche ist mit krautigen Pflanzen/Gras bestanden; dies wird im Jahr der Begründung einmalig veranschlagt, dann erst wieder bei Nutzungsänderung von crot zu anderer LUC

- Umtriebszeit: 10 Jahre; es wird unterstellt, dass 10 Jahre nach der Betriebsbegründung das Gehölzsystem ins Gleichgewicht fällt, Entnahme und Zuwachs sich die Waage halten. Daher wird ab dem 10. Jahr der Mittelwert der in 10 Jahren produzierten Gehölzbiomasse als Gleichgewichtswert unterstellt. Es werden ab dem 11. Jahr keine Emissionen mehr berichtet.

Für Ziergehölze wurden stellvertretend die aus den Ergebnissen des Projekts „Methodenentwicklung zur Erfassung der Biomasse mehrjährig verholzter Pflanzen außerhalb von Waldflächen“ (Pöpkén) abgeleiteten Kohlenstoffvorräte für Obstgehölze herangezogen. So wurden hälftig, für größere Gehölze, die für Kirsche und Pflaume ermittelten Kohlenstoffvorräte, für kleinere Gehölze, die für Apfelbäume zugrunde gelegt (s. Kapitel 6.1.2.3.5.1). Zur Berechnung der Biomasse der Waldbäume wurden die Methoden angewendet, die zur Berechnung der Waldbiomasse von (Bösch & Kändler) entwickelt wurden und in Kapitel 6.4.2.2 beschrieben sind. Die unterirdische Biomasse wurde für die einzelnen Gehölzgruppen anhand der Formel von Mokany et al. (2006b) abgeschätzt (s. Kapitel 6.1.2.3.5.1).

Aus den Kohlenstoffvorräten der einzelnen Gehölzgruppen wurden Mittelwerte in Abhängigkeit vom Alter gebildet, die den Kohlenstoffvorrat in der pflanzlichen Biomasse der Gehölzpflanzen einer Baumschule repräsentieren. Diese wurden zum Alter in Relation gesetzt, wodurch sowohl für die oberirdische als auch die unterirdische Biomasse hochsignifikante Regressionsgleichungen ermittelt werden konnten, die allen entsprechenden Berechnungen zugrunde liegen:

#### Gleichung 32: Oberirdische Biomasse für Baumschulen in [t C ha<sup>-1</sup>]

$$C_{crot_{abo}} = 0,2673 * a^2 - 0,0744 * a + \frac{C_{gra1_{abo}}}{3}$$

*C<sub>crot\_abo</sub>*: Kohlenstoffvorrat für die oberirdische Biomasse von Baumschulen in [t C ha<sup>-1</sup>]

*a*: Anzahl Jahre nach Neubegründung (1 – 10)

*C<sub>gra1\_abo</sub>*: Kohlenstoffvorrat für die oberirdische Biomasse von Grünland i.e.S. [3,78 t C ha<sup>-1</sup>]

#### Gleichung 33: Unterirdische Biomasse für Baumschulen in [t C ha<sup>-1</sup>]

$$C_{crot_{bel}} = 0,0599 * a^2 + 0,1562 * a + \frac{C_{gra1_{bel}}}{3}$$

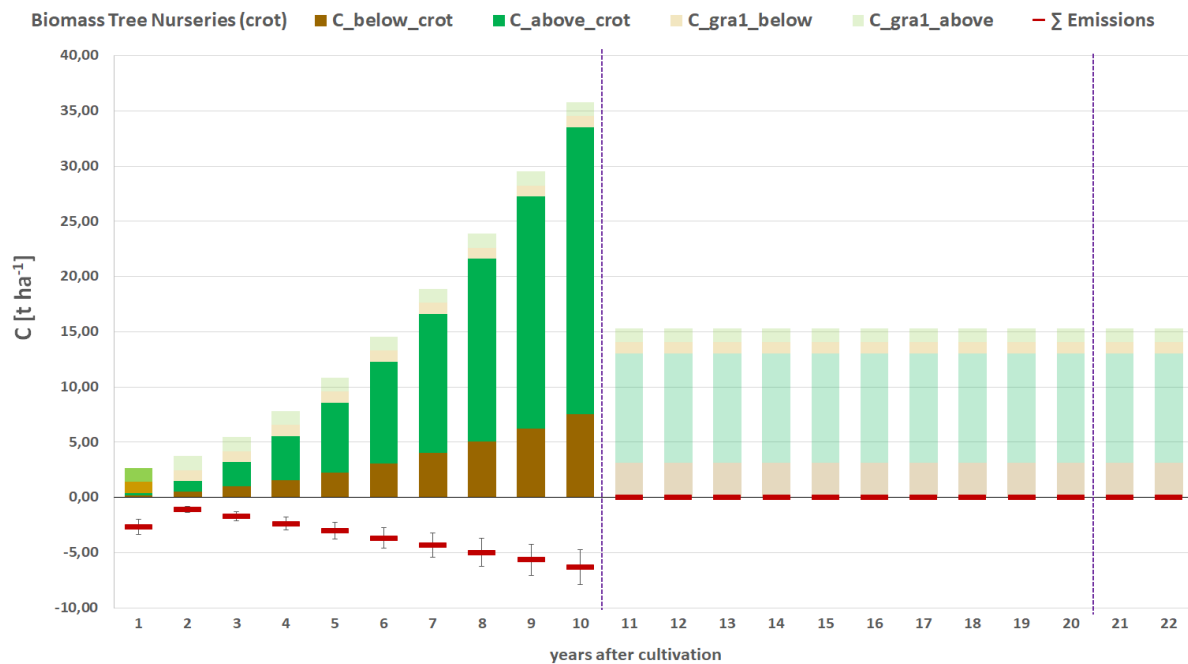
*C<sub>crot\_bel</sub>*: Kohlenstoffvorrat für die oberirdische Biomasse von Baumschulen in [t C ha<sup>-1</sup>]

*a*: Anzahl Jahre nach Neubegründung (1 – 10)

*C<sub>gra1\_bel</sub>*: Kohlenstoffvorrat für die unterirdische Biomasse von Grünland i.e.S. [3,03 t C ha<sup>-1</sup>]

Abgesehen von den o.a. Abweichungen, kommen zur Berechnung des gesamten Kohlenstoffvorrats in der pflanzlichen Biomasse von Baumschulen, den damit verbundenen Emissionen und deren Allokation, die in Kapitel 6.1.2.3.2 und Kapitel 6.1.2.3.3 aufgeführten Methoden zur Anwendung. In Abbildung 59 ist die Entwicklung der Kohlenstoffvorräte in Baumschulen während aufeinander folgender Umtriebszyklen sowie die damit verbundenen Emissionen dargestellt.

**Abbildung 59: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha<sup>-1</sup>] in Kompartimenten der pflanzlichen Biomasse von Baumschulen (SOC) sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha<sup>-1</sup>] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (I). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung und Ablauf der Betriebsdauer emissionsrelevant**



#### 6.1.2.3.5.4 Weihnachtsbaumkulturen

Flächen zur Kultivierung von Weihnachtsbäumen (crox) setzen sich i.d.R. aus Nadelgehölzen und krautigen Pflanzen zusammen. Der Flächenanteil letzterer wird mit 75 % unterstellt; zur Berechnung des Kohlenstoffvorrates in der krautigen Biomasse wird als Proxy der Wert für Grünland i.e.S. herangezogen. Über die pflanzliche Biomasse von Weihnachtsbäumen gibt es kaum Daten. PÖPKEN (2011) führt Untersuchungen der Universität Kopenhagen an, die einen Wert von 50 t Biomasse ha<sup>-1</sup> ergaben, bei einer Umtriebszeit von 8 – 12 Jahren. Daher wurde die Dauer für einen durchschnittlichen Umtriebszyklus auf 10 Jahre festgelegt. Da sich die 50 t Biomasse ha<sup>-1</sup>, entsprechend 22,5 t Kohlenstoff ha<sup>-1</sup>, auf die gesamte Biomasse beziehen, wurde nach der Formel von MOKANY et al. (2006) der unterirdische Anteil daran mit 5,95 t C ha<sup>-1</sup> bestimmt. So ergibt sich für die oberirdische Biomasse der Weihnachtsbäume ein Wert von 16,56 t C<sup>-1</sup>, die zur Ermittlung der jährlichen Kohlenstoffvorratsänderungen in der oberirdischen Biomasse der Weihnachtsbäume linear auf die Jahre eines Umtriebszyklus verteilt wurden, so dass sich der oberirdische Kohlenstoffvorrat berechnet nach:

#### Gleichung 34: Oberirdische Biomasse von Weihnachtsbaumkulturen

$$C_{crox_{abo}} = a * 1,656 + C_{gra1_{abo}} * 0,75$$

$C_{crox_{abo}}$ : Kohlenstoffvorrat in der Biomasse von Weihnachtsbaumkulturen [t C ha<sup>-1</sup>]

$C_{gra1_{abo}}$ : Kohlenstoffvorrat in der oberirdischen Biomasse von krautigen, annualen Pflanzen [3,78 t C ha<sup>-1</sup>]

a: Anzahl Jahre nach Neubegründung (Umtriebszyklus 10 Jahre)

Die unterirdische Biomasse errechnet sich für die Gehölze nach der Gleichung von MOKANY et al. (2006) zuzüglich der unterirdischen Biomasse der krautigen Pflanzen:

**Gleichung 35: Unterirdische Biomasse von Weihnachtsbaumkulturen**

$$C_{croz_{bel}} = 0,489 * x^{0,89} + C_{gra1_{bel}} * 0,75$$

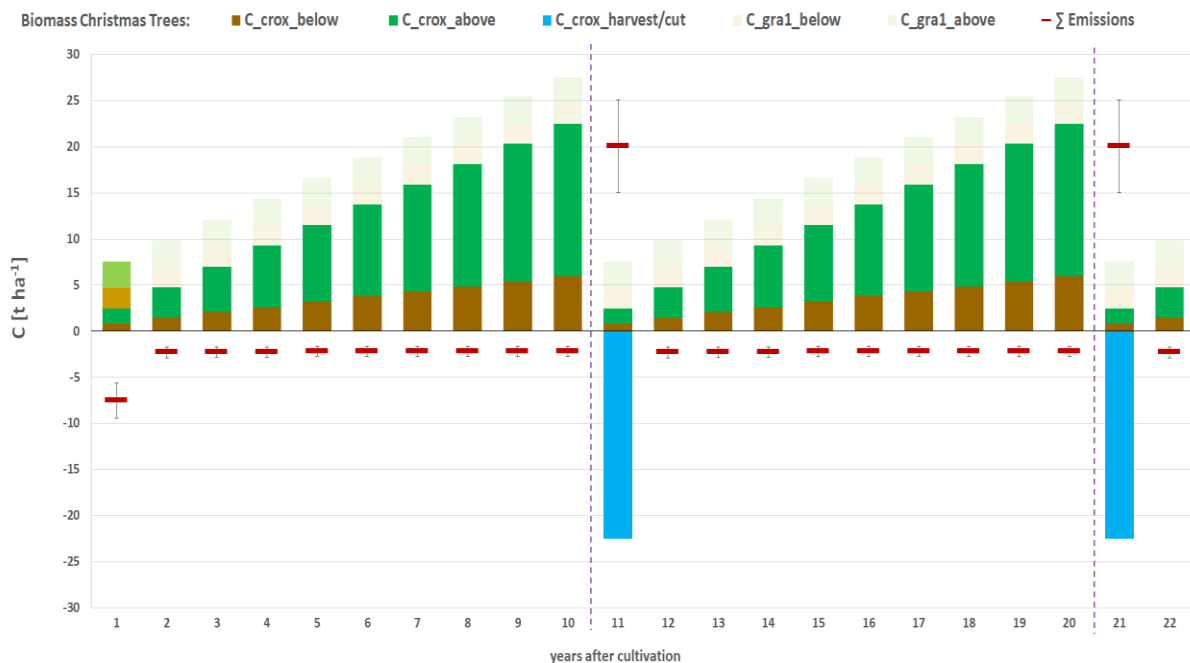
$C_{croz_{bel}}$ : Kohlenstoffvorrat in der unterirdischen Biomasse von Weihnachtsbaumkulturen [t C ha<sup>-1</sup>]

x: Kohlenstoffvorrat der oberirdischen Biomasse  $C_{crox_{abo}}$

$C_{gra1_{bel}}$ : Kohlenstoffvorrat in der unterirdischen Biomasse von krautigen, annuellen Pflanzen [3,03 t C ha<sup>-1</sup>]

Nach einem Umtriebszyklus wird ein vollständiger Ersatz der holzigen Biomasse in Weihnachtsbaumkulturen unterstellt; ansonsten kommen die in Kapitel 6.1.2.3.2 und Kapitel 6.1.2.3.3 aufgeführten Methoden zur Anwendung. Dies führt zur in Abbildung 60 dargestellten Entwicklung der Kohlenstoffvorräte in Weihnachtsbaumkulturen während aufeinander folgender Umtriebszyklen sowie den damit verbundenen Emissionen.

**Abbildung 60: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha<sup>-1</sup>] in Kompartimenten der Biomasse von Weihnachtsbaumkulturen (crox) sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha<sup>-1</sup>] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (j). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung emissionsrelevant**

**6.1.2.3.5 Kurzumtriebsplantagen**

Kurzumtriebsplantagen (KUP) sind in Deutschland nach § 2 des Bundeswaldgesetzes BWaldG (2015) kein Wald und werden deshalb im deutschen Inventar ausschließlich in der Landnutzungskategorie Ackerland berichtet. Da KUP auch im Rahmen der Bundeswaldinventur als Ackerland ausgewiesen werden, ist eine Doppelzählung ausgeschlossen. Die nach der Ernte anfallende Biomasse, welche ausschließlich energetisch genutzt wird, wird als Kohlenstoffänderung unter 4.B verbucht. Somit werden Doppelzählungen im Energiesektor sowie unter Holzprodukten (HWP) (s. Kapitel 6.10.1) vermieden.

Zur Ermittlung landesspezifischer, mittlerer Kohlenstoffvorräte in der Biomasse von Kurzumtriebsplantagen (KUP) wurden Daten aus der einschlägigen Literatur abgeleitet. Grundlegend waren die Übersichtsarbeiten von Walter et al. (2015), Horn (2013), Gurgel (2011), Kern et al. (2010), Biertümpfel et al. (2009), Boelcke (2007), Stolzenburg (2006) und Maier and Vetter (2004). Diese Arbeiten enthalten die Ergebnisse von 23 Versuchsstandorten zu



Kurzumtriebsplantagen, die über ganz Deutschland verteilt sind (Bayern, Baden-Württemberg, Thüringen, Sachsen, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Niedersachsen), alle Klimazonen (Niederschlag: 550 – 1550 mm; Jahresdurchschnittstemperatur: 6,8 – 10,1°C) und Bodenarten umfassen (leichte bis schwere Böden) und vom Tiefland bis ins Mittelgebirge reichen. Auf insgesamt 62 Versuchsfeldern wurden die Kurzumtriebsplantagen überwiegend mit Pappeln (58 %) und Weiden (34 %) aber auch mit Birken (3 %), Erlen, Robinien und Blauglockenbäumen (5%) bestockt. Die Umtriebszeiten betragen zwischen einem und zehn Jahren, bei einem Mittel von 4,2 Jahren. Da diese Studien bezüglich räumlicher Verteilung, Standortbedingungen, Bewuchs und Management<sup>91</sup> das ganze Spektrum des Betriebes von Kurzumtriebsplantagen in Deutschland widerspiegeln, sind sie repräsentativ.

Aus den Ergebnissen dieser Studien konnte der durchschnittliche jährliche Trockenertrag mit 9,05 (-6,0 % / +9,9 %) t ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> oberirdische Biomasse für Kurzumtriebsplantagen in Deutschland abgeleitet werden. Angelehnt an die Verhältnisse in Deutschland, wurde eine durchschnittliche Betriebsdauer von 20 Jahren und ein durchschnittlicher Umtriebszyklus von 10 Jahre unterstellt. Nach Ablauf der Umtriebszeit wird der Bestand auf den Stock gesetzt; d.h. es erfolgt die Anrechnung der kompletten oberirdischen Biomasse als Emission, die unterirdische Biomasse bleibt erhalten. Emissionen ergeben sich in der Folge nur aus Zuwachs der oberirdischen Biomasse. Nach Ablauf der Betriebsdauer erfolgt die vollständige Entfernung der ober- und unterirdischen Phytomasse, danach eine Bestandsneubegründung. Zur Herleitung der Wachstumskurven der oberirdischen Biomasse wird der mittlere jährliche Trockenertrag mit dem Faktor 0,45 in Kohlenstoff umgerechnet und mit der Anzahl der Jahre der Betriebsdauer multipliziert.

#### Gleichung 36: Oberirdische Biomasse von Kurzumtriebsplantagen

$$C_{cros\,abo} = a * 9,05 * 0,45$$

$C_{cros\,abo}$ : oberirdische Biomasse von Kurzumtriebsplantagen in [t ha<sup>-1</sup>]

9,05: Durchschnittlicher Trockenertrag der oberirdischen Biomasse in Kurzumtriebsplantagen [t ha<sup>-1</sup>]

0,45: Kohlenstoffanteil trockener pflanzlicher Biomasse

a: Anzahl Jahre nach Neubegründung

Die unterirdische Biomasse wurde mittels des oberirdischen Kohlenstoffvorrates anhand der Formel von (Mokany et al.) bestimmt.

#### Gleichung 37: Unterirdische Biomasse von Kurzumtriebsplantagen

$$C_{cros\,bel} = 0,489 * x^{0,89}$$

$C_{cros\,bel}$ : unterirdische Biomasse von Kurzumtriebsplantagen in [t ha<sup>-1</sup>]

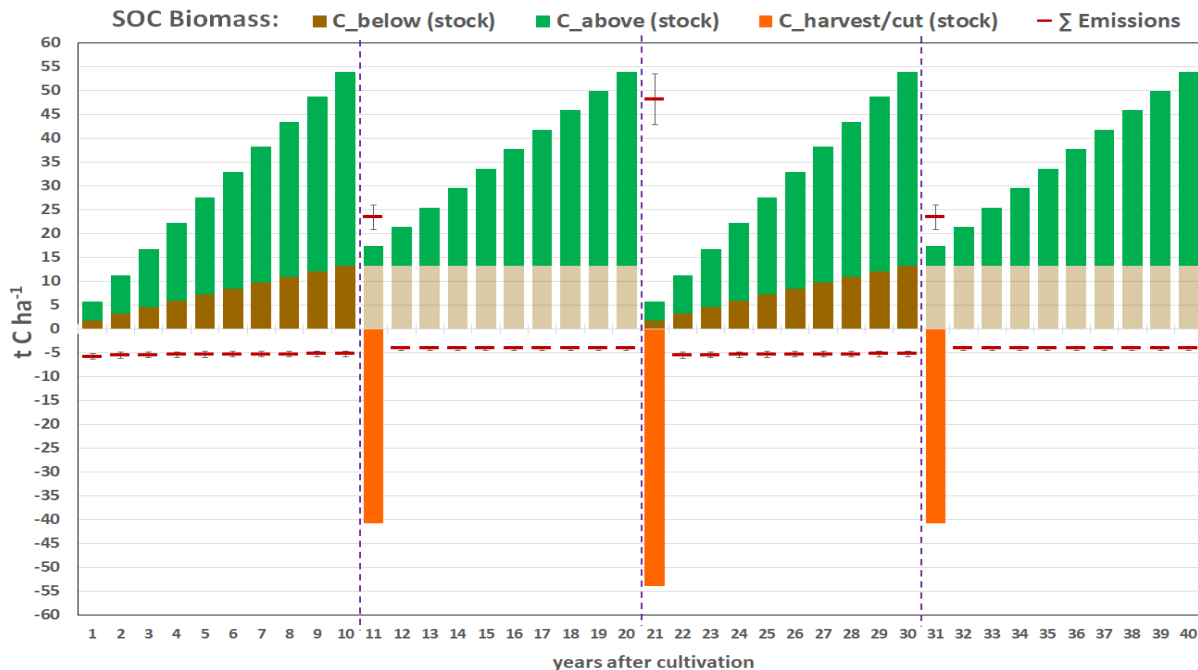
x: Kohlenstoffvorrat in der oberirdischen Biomasse  $C_{cros\,abo}$

Zur Berechnung des gesamten Kohlenstoffvorrates in der pflanzlichen Biomasse von Kurzumtriebsplantagen, deren Verrechnung als Emissionen und deren Allokation, kommen die in Kapitel 6.1.2.3.2 und Kapitel 6.1.2.3.3 aufgeführten Methoden zur Anwendung. In Abbildung

<sup>91</sup> Umsetzung der Befunde ARR 2021, KL.12, Table 5; 2020, KL.5+6, Table ; 2018, KL.10+11; zur Verbesserung der Transparenz: Da in Deutschland flächendeckend keinerlei Daten zur Bewirtschaftung/Düngung landwirtschaftlicher Flächen erhoben werden, können hier keine konkreten Angaben zur Düngung von Kurzumtriebsplantagen getroffen werden. Allgemein gehen entsprechende Untersuchungen und Anbauempfehlungen jedoch davon aus, dass eine Düngung nur in absoluten Ausnahmefällen notwendig ist, da in der Regel die Versorgung mit den Hauptnährstoffen ausreichend ist ((DBU); S. 19) und: "Insgesamt kann im Mittel für Kurzumtriebsbestände derzeit von Eintragsraten von  $\geq 10$  kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> ausgegangen werden, so dass der durch die Erntemaßnahmen entstehende Entzug von N allein durch die jährlichen Einträge aus der atmosphärischen Deposition kompensiert wird" ((DBU); S. 20)

61 ist die Entwicklung der Kohlenstoffvorräte in Kurzumtriebsplantagen während aufeinander folgender Umtriebszyklen sowie die damit verbundenen Emissionen dargestellt.

**Abbildung 61: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha<sup>-1</sup>] in Kompartimenten der pflanzlichen Biomasse von Kurzumtriebsplantagen (SOC) sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha<sup>-1</sup>] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (|). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung und Ablauf der Betriebsdauer emissionsrelevant**



### 6.1.2.3.5.6 Hopfen

Die Werte zur Biomasse von Hopfenanbauflächen entstammen Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen des Hopfenforschungszentrums der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Portner et al. (2019) ermittelten an zwei Standorten in der Hallertau quantitativ die gesamte oberirdische Biomasse von Hopfen sowie der Zwischenfrüchte. Der Anteil der unterirdischen Biomasse wurde nach T. Graf et al. (2014); T. M. Graf (2016) und Sobotik et al. (2018) auf 50 % der oberirdischen Biomasse abgeschätzt. Für die Hopfenanbauflächen errechnen sich dann die in Tabelle 338 aufgeführten Kohlenstoffvorräte für die einzelnen Phytomassekompartimente. Die unter Hopfenanbaufläche aufgeführten Werte sind Grundlage aller Emissionsberechnungen im Zusammenhang mit Hopfenanbauflächen. Zur Berechnung der Vorratsänderungen in der Phytomasse der Hopfenpflanzen infolge Nutzung und Landnutzungsänderung sowie Anrechnung der Emissionen, kommen die in Kapitel 6.1.2.3.2 und Kapitel 6.1.2.3.3 aufgeführten Methoden zur Anwendung.

**Tabelle 338: Flächenbezogener Kohlenstoffvorrat [t C ha<sup>-1</sup>] (± Hälfte des 95 % Konfidenzintervalls) der Biomasse von Hopfenkulturen, Zwischenfrüchten und deren Summe nach Portner et al. (2019)**

Kultur	Kohlenstoffvorrat [t C ha <sup>-1</sup> ]		
	Phytomasse <sub>total</sub>	Phytomasse <sub>above</sub>	Phytomasse <sub>below</sub>
Hopfen	4,77 ± 0,84	3,18 ± 0,32	1,59 ± 0,80
Zwischenfrucht	0,61 ± 0,3	0,45 ± 0,18	0,15 ± 0,08
<b>Hopfenanbaufläche</b>	<b>5,38 ± 0,89</b>	<b>3,64 ± 0,39</b>	<b>1,74 ± 0,80</b>

### 6.1.2.3.6 Berechnungsmethodik und Ermittlung der Emissionsfaktoren für Hecken und Feldgehölze

Zur Bestimmung des Kohlenstoffvorrates für Hecken wurden von Pöpken (2011) im Rahmen des Forschungsprojektes „Methodenentwicklung zur Erfassung der Biomasse mehrjährig verholzter Pflanzen außerhalb von Waldflächen“ 50 Hecken untersucht. Die Ausprägung der aufgenommenen Hecken variierte bezüglich:

#### 1. des Alters

- ca. 4-20 Jahre

#### 2. der Ausdehnung

- Höhe ca. 2-9 m
- Tiefe ca. 1-6 m
- Länge ca. 100-500 m

#### 3. der Artenzusammensetzung

- typische Heckenpflanzen, wie Hundsrose (*Rosa canina*), Schlehe (*Prunus spinosa*), Hasel (*Corylus avellana*), Holunder (*Sambucus spec.*), Rot- und Weißdorn (*Crataegus spec.*), Heckenkirschen (*Lonicera spec.*) und Weiden (*Salix spec.*)
- Bäume, wie Feldahorn (*Acer campestre*), Hainbuche (*Carpinus betulus*), Weide (*Salix spec.*), Buche (*Fagus sylvatica*), Linde (*Tilia spec.*) und Ulme (*Ulmus spec.*),

so dass ein repräsentatives Spektrum dieser Feldgehölze erfasst wurde. An diesen Gehölzproben wurden im Labor die Masse, der Wasser- und Kohlenstoffgehalt gemessen, so dass der absolute und der flächenbezogene Kohlenstoffvorrat in Verbindung mit den Feldmaßen ermittelt werden konnte. Anhand dieser Daten konnte mittels Regression ein hochsignifikanter Zusammenhang zwischen dem durchschnittlichen Kohlenstoffvorrat der Biomasse von Hecken und deren Alter ermittelt werden.

#### Gleichung 38: Oberirdische Biomasse für Hecken und Feldgehölze

$$C_{gra2_{abo}} = 1,5506 * x^{1,6015}$$

$C_{gra2_{abo}}$ : Durchschnittlicher Kohlenstoffvorrat der oberirdischen Biomasse in Hecken/ Feldgehölzen [t C ha<sup>-1</sup>]

x: Alter der Hecken/Feldgehölze nach Begründung [a]

Da bei der Untersuchung von Pöpken (2011) aus Gründen des Naturschutzes lediglich die oberirdische Biomasse erfasst werden konnte, wurde zur Abschätzung der unterirdischen Biomasse die Formel von (Mokany et al.) herangezogen.

#### Gleichung 21: Unterirdische Biomasse für Hecken und Feldgehölze

$$C_{gra2_{bel}} = 0,489 * C_{gra2_{abo}}^{0,89}$$

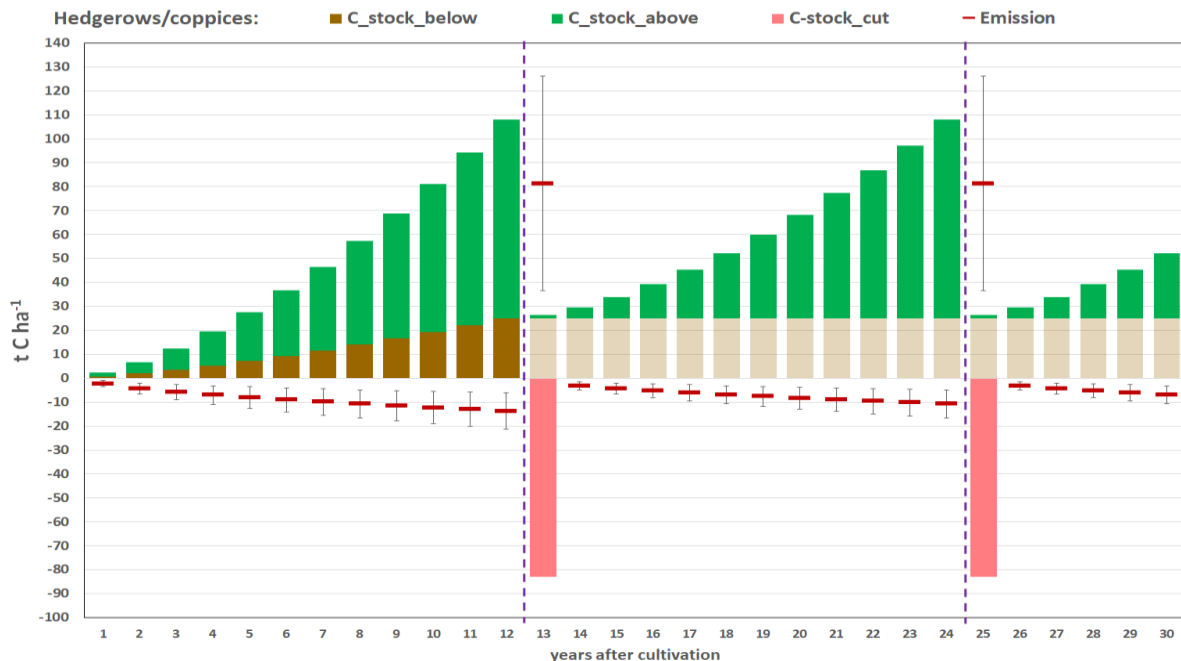
$C_{gra2_{bel}}$ : Durchschnittlicher Kohlenstoffvorrat der oberirdischen Biomasse in Hecken/ Feldgehölzen [t C ha<sup>-1</sup>]

Der Gesamtvorrat pro Altersklasse ergibt sich dann aus der Summe aller Kompartimente. Für einen Umtriebszyklus werden 12 Jahre unterstellt. Dies entspricht dem durchschnittlichen Umtriebszyklus für Hecken in Deutschland, wonach der Pflegeschnitt erfolgt, die Hecke auf den Stock gesetzt wird. Das bedeutet, dass ab dem 13-ten Jahr, da die unterirdische Biomasse erhalten bleibt, sich Emissionen nur aus Zuwachs und Schnitt der oberirdischen Biomasse

ergeben. Die Entwicklung des Kohlenstoffvorrates in der pflanzlichen Biomasse von Hecken/Feldgehölzen ist in Abbildung 62 dargestellt.

Bei Landnutzungsänderungen von Hecken/Feldgehölzen zu anderen Landnutzungskategorien, wird i.d.R. die Summe des aktuellen Kohlenstoffvorrats aller Kompartimente der Biomasse von Hecken/Feldgehölzen mit dem Vorrat der Biomasse der Folgenutzung verrechnet, der im ersten Jahr zuwächst (vergl. Kapitel 6.1.2.3.2 und Kapitel 6.1.2.3.3). Ausnahme von dieser Regel bildet der Nutzungsübergang von Hecken/Gehölzen zu Wald. In diesem Fall wird nur die Hälfte der aktuellen Biomasse der Hecken/Gehölze als Verlust gegengerechnet. Diese Korrektur wurde eingeführt, da eine diesbezügliche Auswertung der Daten der Bundeswaldinventuren ergab, dass bei ca. 50 % der Fälle solcher Landnutzungsänderungen die Biomasse der Kategorie Hecken/Feldgehölze vollständig in die des Waldes übergeht.

**Abbildung 62: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha<sup>-1</sup>] in Kompartimenten der Biomasse von Hecken/Gehölzen sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha<sup>-1</sup>] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (|); transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung emissionsrelevant**



### 6.1.2.3.7 Terrestrische Feuchtgebiete und Siedlungen

#### Terrestrische Feuchtgebiete (wet1)

Terrestrische Feuchtgebiete sind in der Regel mit Gehölzen (einzelne Büsche bis Wälder), Moosen und Gräsern bewachsen, von denen letztere überwiegen. Aufgrund dessen wird im Inventar folgende Annahme für die Flächenverteilung der Kohlenstoffvorräte in der Biomasse unterstellt: 1/3 Gehölzanteil und 2/3 Moos-/Grasanteil. Da für derartige Flächen keine spezifischen Biomasseerhebungen in Deutschland vorliegen, werden die Werte für Hecken/Feldgehölze (Kapitel 6.1.2.3.6) und Grünland i.e.S. (Kapitel 6.1.2.3.3) näherungsweise zugrunde gelegt. Der Kohlenstoffvorrat terrestrischer Feuchtgebiete berechnet sich dann für die unter- und oberirdische Biomasse wie folgt:

**Gleichung 39: Biomasse terrestrischer Feuchtgebiete**

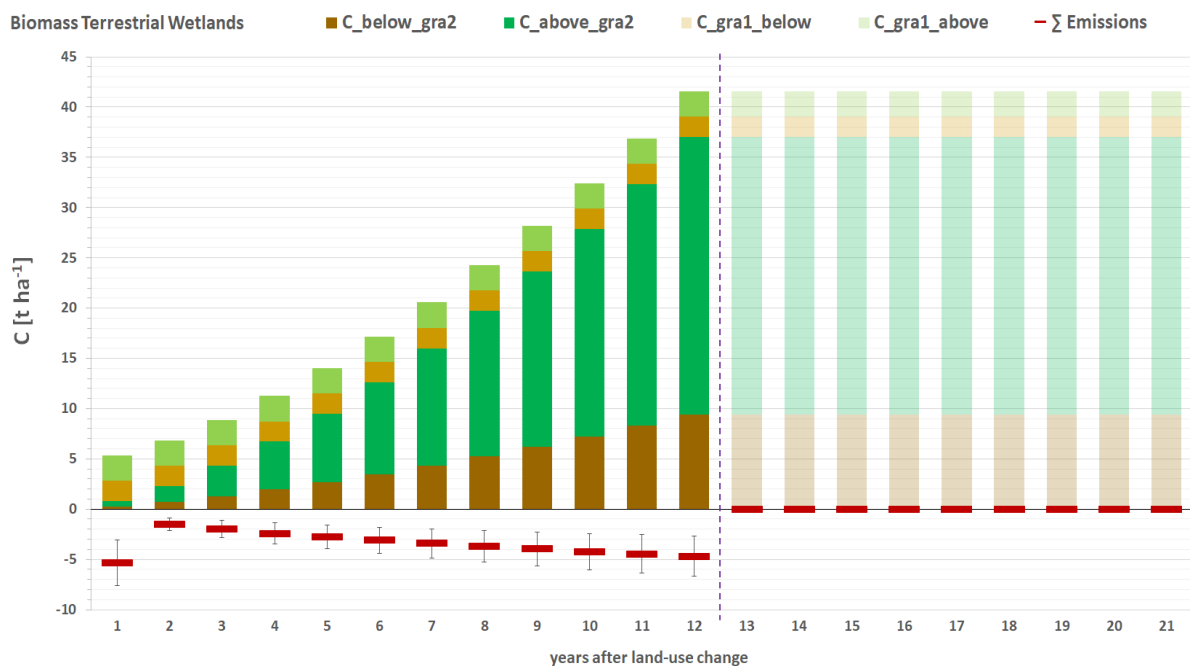
$$C_{wet1} = \frac{1}{3} C_{gra2} + \frac{2}{3} C_{gra1}$$

$C_{gra2}$ : Kohlenstoffvorrat der ober-/unterirdischen Biomasse von Hecken/Feldgehölzen im Jahr x nach Bestandsbegründung [t C ha<sup>-1</sup>] (Kapitel 6.1.2.3.6)

$C_{gra1}$ : Kohlenstoffvorrat in der ober-/unterirdischen pflanzlichen Biomasse von Grünland i.e.S [t C ha<sup>-1</sup>] (Kapitel 6.1.2.3.3)

Zur Berechnung des gesamten Kohlenstoffvorrats in der pflanzlichen Biomasse von Terrestrischen Feuchtgebietsflächen und deren Verrechnung als Emissionen, kommen die in Kapitel 6.1.2.3.6 und Kapitel 6.1.2.3.3 aufgeführten Methoden zur Anwendung. Abweichend davon wird unterstellt, dass nach 12 Jahren ein Gleichgewichtsvorrat erreicht wird, somit ab dem 13. Jahr am betreffenden Erhebungspunkt keine Emissionen mehr berichtet werden. Die Ergebnisse der Kohlenstoffvorratsentwicklung in der Zeit zeigt die folgende Abbildung.

**Abbildung 63: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha<sup>-1</sup>] in Kompartimenten der pflanzlichen Biomasse von Terrestrischen Feuchtgebieten (wet1) sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha<sup>-1</sup>] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (j). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung emissionsrelevant**

**Siedlungen (set1)**

Flächen im Siedlungs- und Verkehrsbereich weisen erhebliche Anteile an unversiegelten, mit Vegetation bedeckten Flächen auf. Stichprobenuntersuchungen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung haben ergeben, dass der Anteil der überbauten und versiegelten Fläche an der ausgewiesenen Siedlungs- und Verkehrsfläche zwischen 40–50 % beträgt (Einig et al., 2009). Daher wird die begrünte Fläche im deutschen Inventar im Mittel auf 50 % der Siedlungsfläche festgelegt.

Da über die Biomasse bzw. den Kohlenstoffvorrat auf diesen Flächen keine spezifisch erhobenen Daten vorliegen, wird angenommen, dass die begrünte Fläche zur Hälfte aus Gehölzen, zur anderen Hälfte aus Rasen-/Gras-/Grünflächen besteht. Diese Annahmen entsprechen in etwa den Werten, die in der Schweiz diesbezüglich zugrunde gelegt werden. Mit Methoden der

Fernerkundung wurde hier der Anteil an Bäumen (32,1 %) und Büschen (15,3 %) am Pflanzenbedeckungsgrad mit 47,4 % ermittelt (FOEN, 2010). Da im Siedlungs- und Verkehrsbereich die Variation der anzutreffenden Gehölze sehr groß ist - vom Kleingartengehölz über Hecken jeglicher Ausgestaltung bis zu Straßen- und Waldbäumen - wurde bezüglich der Biomasse dieser Gehölze in dieser Landnutzungskategorie die Methode zur Ermittlung der Biomasse von Hecken/Feldgehölzen zugrunde gelegt (gra2; Kapitel 6.1.2.3.6), für die Rasen- und Grünflächen der für Grünland i.e.S.(gra1; Kapitel 6.1.2.3.3). Der Kohlenstoffvorrat für die Biomasse einer Siedlungsfläche ergibt sich dann nach:

#### Gleichung 40: Biomasse von Siedlungsflächen

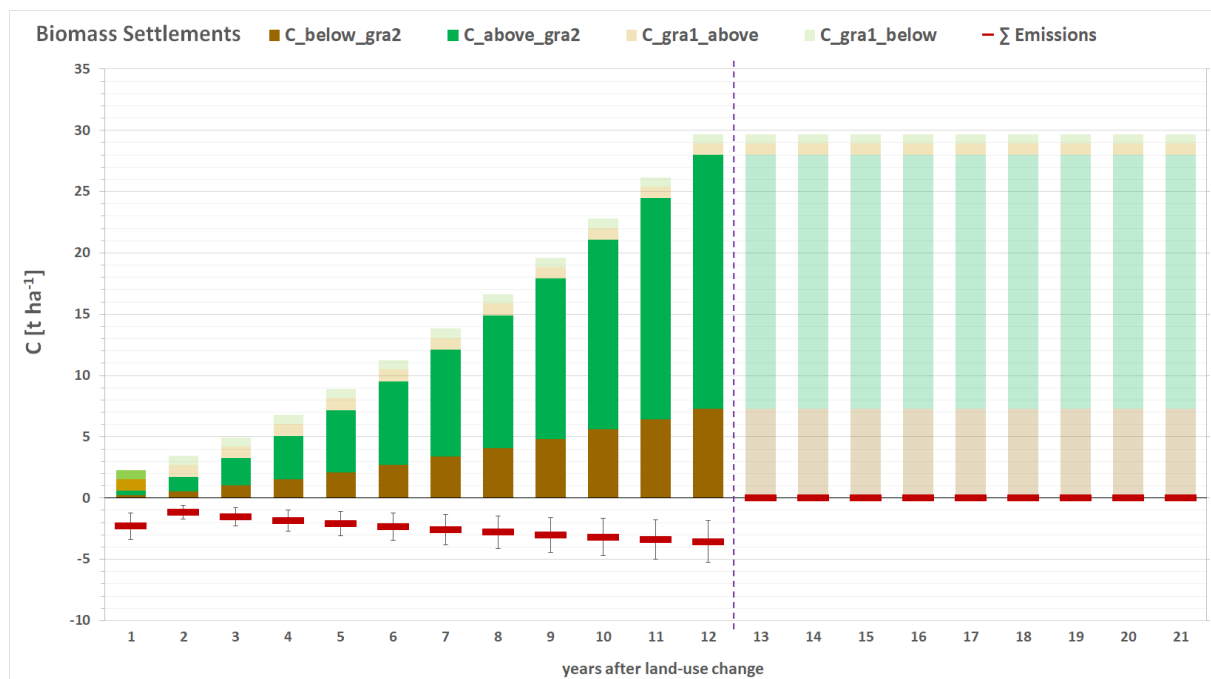
$$C_{set1} = \frac{\frac{1}{2} C_{gra2} + \frac{1}{2} C_{gra1}}{2}$$

$C_{gra2}$ : Kohlenstoffvorrat der ober-/unterirdischen Biomasse von Hecken/Feldgehölzen im Jahr x nach Bestandsbegründung [t C ha<sup>-1</sup>](Kapitel 6.1.2.3.6)

$C_{gra1}$ : Kohlenstoffvorrat in der ober-/unterirdischen pflanzlichen Biomasse von Grünland i.e.S [t C ha<sup>-1</sup>] (Kapitel 6.1.2.3.3)

Die Berechnung des gesamten Kohlenstoffvorrats in der pflanzlichen Biomasse von Siedlungsflächen und deren Verrechnung als Emissionen erfolgt nach den in Kapitel 6.1.2.3.6 und Kapitel 6.1.2.3.3 aufgeführten Methoden. Abweichend davon wird unterstellt, dass nach 12 Jahren ein Gleichgewichtsvorrat erreicht wird, somit ab dem 13. Jahr am betreffenden Erhebungspunkt keine Emissionen mehr berichtet werden. Die Ergebnisse der Kohlenstoffvorratsentwicklung in der Zeit zeigt die folgende Abbildung.

**Abbildung 64: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha<sup>-1</sup>] in Kompartimenten der pflanzlichen Biomasse von Siedlungsflächen (set1) sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha<sup>-1</sup>] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (I). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung emissionsrelevant**



**6.1.2.3.8 Wald**

Die Berechnung der Vorratsänderungen der pflanzlichen Biomasse im Wald infolge von Landnutzung und Landnutzungsänderung erfolgt nach den in Kapitel 6.1.2.3.1 ff. aufgeführten Methoden. Weitergehende Angaben zu Methodik und Herleitung der Emissionsfaktoren für die Waldbiomasse finden sich in Kapitel 6.4.2.2ff. Für die Berechnung der Umwandlung von Wald in andere Nutzungen (Entwaldung) wurde der für Deutschland ermittelte Durchschnittswert für Entwaldungsflächen der Bundeswaldinventuren 2002, 2012 und der Kohlenstoffinventur 2017 (AFZ 2019, (Frank Schwitzgebel & Riedel, 2019)) für die jeweiligen Berichtsjahre zugrunde gelegt. Methodik und Herleitung der Werte siehe Kapitel 6.4.2.2ff. Die Werte sind in Tabelle 356 dargestellt. Die jährliche Kohlenstoffvorratsänderung in der Waldbiomasse nach Aufforstung zeigt Tabelle 355 in Kapitel 6.4.2.2.2).

**Tabelle 339: Zeitreihe der mittleren Kohlenstoffvorräte  $\pm$  Hälfte des 95 %-Konfidenzintervalls der Biomasse von Entwaldungsflächen [t C ha<sup>-1</sup>]**

Jahr	Biomasse – Kohlenstoff [t C ha <sup>-1</sup> (EF 1)]				
	BiO <sub>total</sub>	BiO <sub>above</sub>	BiO <sub>below</sub>	Totholz	Streu
1990	28,93 $\pm$ 7,86	24,53 $\pm$ 7,47	4,39 $\pm$ 1,47	1,88 $\pm$ 0,98	19,00 $\pm$ 0,60
1995	28,93 $\pm$ 7,86	24,53 $\pm$ 7,47	4,39 $\pm$ 1,47	1,88 $\pm$ 0,98	18,94 $\pm$ 0,60
2000	28,93 $\pm$ 7,86	24,53 $\pm$ 7,47	4,39 $\pm$ 1,47	1,88 $\pm$ 0,98	18,88 $\pm$ 0,59
2005	36,27 $\pm$ 9,86	31,52 $\pm$ 9,60	4,75 $\pm$ 1,59	1,82 $\pm$ 0,95	18,81 $\pm$ 0,59
2010	39,48 $\pm$ 10,73	34,88 $\pm$ 10,63	4,60 $\pm$ 1,54	1,48 $\pm$ 0,77	18,75 $\pm$ 0,59
2015	40,88 $\pm$ 11,11	36,06 $\pm$ 10,99	4,82 $\pm$ 1,62	1,97 $\pm$ 1,03	18,69 $\pm$ 0,59
2016	40,88 $\pm$ 11,11	36,06 $\pm$ 10,99	4,82 $\pm$ 1,62	1,97 $\pm$ 1,03	18,68 $\pm$ 0,59
2017	40,88 $\pm$ 11,11	36,06 $\pm$ 10,99	4,82 $\pm$ 1,62	1,97 $\pm$ 1,03	18,66 $\pm$ 0,59
2018	40,88 $\pm$ 11,11	36,06 $\pm$ 10,99	4,82 $\pm$ 1,62	1,97 $\pm$ 1,03	18,65 $\pm$ 0,59
2019	40,88 $\pm$ 11,11	36,06 $\pm$ 10,99	4,82 $\pm$ 1,62	1,97 $\pm$ 1,03	18,65 $\pm$ 0,59
2020	40,88 $\pm$ 11,11	36,06 $\pm$ 10,99	4,82 $\pm$ 1,62	1,97 $\pm$ 1,03	18,65 $\pm$ 0,59
2021	40,88 $\pm$ 11,11	36,06 $\pm$ 10,99	4,82 $\pm$ 1,62	1,97 $\pm$ 1,03	18,65 $\pm$ 0,59

**6.1.2.4 Kohlenstoffemissionen aus toter organischer Substanz (4.A bis 4.F)**

Emissionen aus toter organischer Substanz werden nur für die Landnutzungskategorie Wald und den Landnutzungsänderungen von Wald zu einer der Kategorien 4.B - 4.E berichtet. Dabei wird die tote organische Substanz in die zwei Pools Totholz und Streu unterteilt. Die methodische Beschreibung und die zugehörigen Ergebnisse finden sich in den Kapiteln 6.4.2.3 für Totholz und 6.4.2.4 für Streu in der Landnutzungskategorie Wald.

In den Landnutzungsänderungskategorien 4.B - 4.E werden die Emissionen aus der toten organischen Substanz mit den Emissionen aus der lebenden Biomasse erfasst, da bei der Abschätzung der Emissionen aus der lebenden Biomasse jeweils die der gesamten Pflanze zugrunde gelegt wird. Daher werden die Emissionen aus toter organischer Substanz in diesen Übergangskategorien in den CRF-Tabellen mit dem Vermerk IE (included elsewhere) versehen, um eine doppelte Anrechnung zu vermeiden. In der Kategorie 4.F wird der Vermerk NO (not occurring) verwendet, da es sich bei Flächen in dieser Kategorie per Definition um vegetationslose Flächen handelt.

**6.1.2.5 Direkte N<sub>2</sub>O-Emissionen aus Stickstoff-Düngung von Waldflächen und anderen Flächen (4(I))**

Stickstoffdüngung von Wäldern, Feuchtgebieten und Siedlungen finden in Deutschland nicht statt. In der CRF-Tabelle 4(I) wird für alle Aktivitäten daher „NO“ (not occurring) eingetragen.



### 6.1.2.6 Emissionen aus fließenden und stehenden künstlichen Gewässern sowie der Entwässerung von organischen und mineralischen Böden (4(II))

Gemäß der 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006b) und des 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2019a) wird erstmalig unter *Flooded Land remaining Flooded Land* über Methanemissionen aus künstlichen stehenden und fließenden Gewässern berichtet, die Wasserstandsschwankungen unterliegen. Hierzu wurde die Landnutzungssubkategorie *Flooded Land* in folgende Kategorien weiter unterteilt:

1. *Natürliche Gewässer (wet2)*: Alle fließenden und stehenden Gewässer, die nicht unter wet4 und wet5 fallen
2. *Stehende künstliche Gewässer (wet4)*:
  - Stauseen, Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen
  - Teiche, Speicher, künstliche Süßwasserbecken aller Art (Ausnahme: Abwasserbehandlungsanlagen)
3. *Fließende künstliche Gewässer (wet5)*: Kanäle und Entwässerungsgräben der Wasserwirtschaft (Ausnahme: Entwässerungsgräben auf organischen Böden), Hafenbecken an Binnengewässern

Emissionen aus der Entwässerung von Böden in Deutschland werden für organische und mit dieser Submission erstmalig auch für mineralische Böden, durch Erfassung der Emissionen aus den Entwässerungsgräben, berichtet. Emissionen infolge Wiedervernässung von organischen Böden werden nur für Methan im Falle der Überflutung ehemaliger Torfabbauflächen berücksichtigt, sonst in der CRF-Tabelle als NO (nicht vorkommend) angegeben. Die Methodik entspricht den entsprechenden Ausführungen des 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2019a).

Gemäß des 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2019a) kommt der Managed Land Proxy (MLP) zum Ansatz. Bei diesem wird unterstellt, dass alle Emissionen, die von bewirtschaftetem Land stammen, anthropogen verursacht sind.

Die Kohlenstoffemissionen aus der Entwässerung der organischen Böden werden in den CRF-Tabellen 4.A bis 4.F übernommen. In der CRF-Tabelle 4(II) werden für organische Böden die Werte für N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> sowie für CO<sub>2</sub> IE (included elsewhere) eingetragen. Die Methanemissionen der restlichen Subkategorien werden in der CRF-Tabelle 4.(II) berichtet. Die methodische Beschreibung für die Herleitung der Aktivitätsdaten und der Emissionsfaktoren der organischen Böden erfolgt im Kapitel 6.1.2.2 „Emissionen aus organischen Böden“.

#### Methodik

##### Stehende künstliche Gewässer - wet4

Unter stehenden künstlichen Gewässern werden die Emissionen aus

- Stauseen, Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen
- Teichen, Speichern, künstlichen Süßwasserbecken aller Art

subsummiert. Die Berechnungen der Methanemissionen beider Subkategorien erfolgen nach der Defaultmethode des 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2019a), für

Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen nach Formel 7.10 (IPCC (2019a); S. 7.12):

$$F_{\text{CH}_4_{\text{tot}}} = F_{\text{CH}_4_{\text{reservoir}}} + F_{\text{CH}_4_{\text{downstream}}}$$

$$F_{\text{CH}_4_{\text{reservoir}}} = \alpha_r * EF_{r_{\text{CH}_4>20a}} * A_{\text{reservoir}}$$

$$F_{\text{CH}_4_{\text{downstream}}} = \alpha_r * EF_{r_{\text{CH}_4>20a}} * A_{\text{reservoir}} * R$$

$F_{\text{CH}_4_{\text{tot}}}$ : Gesamte jährliche Methanemissionen aus künstlichen Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen älter als 20 Jahre [kg CH<sub>4</sub> a<sup>-1</sup>]

$F_{\text{CH}_4_{\text{reservoir}}}$ : Annuelle Methanemissionen von der Oberfläche künstlicher Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen (älter 20 Jahre) [kg CH<sub>4</sub> a<sup>-1</sup>]

$F_{\text{CH}_4_{\text{downstream}}}$ : Annuelle Methanemissionen künstlicher Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen (älter 20 Jahre) stromabwärts des Damms [kg CH<sub>4</sub> a<sup>-1</sup>]

$\alpha_r$ : Anpassungsfaktor für den Emissionsfaktor in Abhängigkeit vom trophischen Zustand von Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen (dimensionslos)

$EF_{r_{\text{CH}_4>20a}}$ : Methan - Emissionsfaktor für Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen älter als 20 Jahre [kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

$A_{\text{reservoir}}$ : Oberfläche von Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen (älter 20 a) [ha]

R: Verhältnis der Methanemissionen von Stauseen/ Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen (älter 20 a) stromabwärts des Damms [kg CH<sub>4</sub> a<sup>-1</sup>] zu Methanemissionen von deren Oberfläche [kg CH<sub>4</sub> a<sup>-1</sup>]

Teiche, Speicher, künstliche Süßwasserbecken aller Art nach Formel 7.12 (IPCC (2019a); S. 7.17):

$$F_{\text{CH}_4_{\text{ponds}}} = \alpha_p * EF_{p_{\text{CH}_4>20a}} * A_{\text{ponds}}$$

$F_{\text{CH}_4_{\text{ponds}}}$ : Gesamte jährliche Methanflüsse von Teichen, Speichern und künstlichen Süßwasserbecken aller Art [kg CH<sub>4</sub> a<sup>-1</sup>]

$\alpha_p$ : Anpassungsfaktor für den Emissionsfaktor in Abhängigkeit vom trophischen Zustand von Teichen, Speichern, künstlichen Süßwasserbecken aller Art (dimensionslos)

$EF_{p_{\text{CH}_4>20a}}$ : Methan - Emissionsfaktor für Teiche, Speicher und künstliche Süßwasserbecken älter als 20 Jahre [kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

$A_{\text{ponds}}$ : Oberfläche von Teichen, Speichern und künstlichen Süßwasserbecken aller Art (älter 20 a) [ha]

### Fließende, künstliche Gewässer - wet5

Unter fließenden, künstlichen Gewässern werden hauptsächlich Kanäle und Entwässerungsgräben der Wasserwirtschaft sowie Hafenbecken an Binnengewässern zusammengefasst. Die Berechnung der Methanemissionen für diese Subkategorie folgt der Defaultmethode des 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines, ebenfalls nach Formel 7.12 (IPCC (2019a); S. 7.17):

$$F_{\text{CH}_4_{\text{channels}}} = \alpha_c * EF_{c_{\text{CH}_4>20a}} * A_{\text{channels}}$$

$F_{\text{CH}_4_{\text{channels}}}$ : Gesamte jährliche Methanflüsse von Kanälen, Entwässerungsgräben der Wasserwirtschaft und Hafenbecken an Binnengewässern [kg CH<sub>4</sub> a<sup>-1</sup>]

$\alpha_c$ : Anpassungsfaktor für den Emissionsfaktor in Abhängigkeit vom trophischen Zustand von Kanälen, Entwässerungsgräben der Wasserwirtschaft und Hafenbecken an Binnengewässern (dimensionslos)

$EF_{c_{\text{CH}_4>20a}}$ : Methan - Emissionsfaktor für Kanäle, Entwässerungsgräben der Wasserwirtschaft und Hafenbecken an Binnengewässern älter als 20 Jahre [kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

$A_{\text{channels}}$ : Oberfläche von Kanälen, Entwässerungsgräben der Wasserwirtschaft und Hafenbecken an Binnengewässern (älter 20 a) [ha]

### **Aktivitätsdaten**

Grundlage zur Ermittlung der Aktivitätsdaten für die Teilkategorien der Subkategorie *Gewässer* bilden folgende Datenquellen:

- Datensätze des Basis-Digitalen Landschaftsmodells (B-DLM) des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS®) der Jahre 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 und 2021 (AdV 2000; 2005; 2010; 2015, 2020, 2021)
- Ein Datensatz der Bundesanstalt für Gewässerkunde mit georeferenzierten Informationen zu künstlichen stehenden Gewässern > 50 ha
- Studie zur Erfassung der Teichflächen in Bayern (Seitel & Oberle, 2022).
- Datensätze der Officialstatistik zu Aquakulturbetrieben und deren Anlagengröße auf Ebene der Bundesländer (Statistisches Bundesamt, 2022a)

Durch Kombination statistischer Daten mit Datensätzen, die mittels Methoden der Geoinformation georeferenziert ermittelt wurden, konnten die Flächengrößen der stehenden

und fließenden künstlichen Gewässer Deutschlands, differenziert nach Typ festgestellt werden. Die Fläche der natürlichen Gewässer ergibt sich durch Abzug der so ermittelten Flächen von der Gesamtgewässerfläche Deutschlands.

Die Flächen für die Gewässerkategorien wurden im Inventar statisch gehalten, da

- die Aufnahme in das B-DLM erst in den jüngeren Jahren erfolgte und im Vergleich mit den Vorjahren zu detektierende Flächenänderungen keine echten Landnutzungsänderungen darstellen sondern kartographische Artefakte
- die Flächendaten eine Kombination aus georeferenzierten und statistischen Daten sind, die letztlich keine Georeferenz mehr aufweisen

Grundlage der Flächenfestlegung sind die Flächen der LUM 2021 (bestes B-DLM). Für Landübergänge bezüglich der Feuchtgebietskategorie gelten folgende Regeln:

- Keine Landnutzungsänderungen von und zu *Natürlichen Gewässern* und *Fließenden künstlichen Gewässern* zu anderen Landnutzungskategorien, bis eine zuverlässige, georeferenzierte AD-Grundlage verfügbar sein wird. Dies gilt im Wesentlichen auch für *Stehende künstliche Gewässer*, mit einer Ausnahme: Landnutzungsänderungen von *Torfabbau* zu *Stehenden künstlichen Gewässern* werden einseitig zugelassen
- Keine Landnutzungsänderungen von *Natürlichen Gewässern*, *Stehenden künstlichen Gewässern* und *Fließenden künstlichen Gewässern* untereinander
- *Terrestrische Feuchtgebiete* und *Torfabbau* werden wie bisher behandelt, abgesehen davon, dass Landnutzungsänderungen von und zu diesen von *Natürlichen Gewässern*, *Stehenden künstlichen Gewässern* und *Fließenden künstlichen Gewässern* ausgeschlossen werden (Ausnahme *Torfabbau* zu *Stehenden künstlichen Gewässern*)

## Emissions- und Anpassungsfaktoren

### Natürliche Gewässer

Gemäß 2019 Refinement (IPCC) müssen für „Natürliche Gewässer“ keine THG-Emissionen berichtet werden; folglich werden keine Emissionsfaktoren (EF) benötigt.

### Stehende künstliche Gewässer - wet4

#### Emissionsfaktoren

Zur Berechnung der Methanemissionen aus stehenden künstlichen Gewässern Deutschlands (sowohl Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen, als auch Teiche, Speicher, künstliche Süßwasserbecken aller Art), werden als Emissionsfaktoren die Default-Werte aus dem 2019 Refinement (IPCC) übernommen. Für die kühl gemäßigten Breiten beträgt dieser für

Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen (> 20 a):

$EF_{r,CH_4>20a} = 54,0$  [kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>] (95 % - Konfidenzintervall: -10,6 % / 10,2 %) (IPCC (2019a); S. 7.15; Tabelle 7.9)

Teiche, Speicher, künstliche Süßwasserbecken aller Art:

$EF_{p,CH_4>20a} = 183$  [kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>] (95 % - Konfidenzintervall: -35,5 % / 24,6 %) (IPCC (2019a); S. 7.18; Tabelle 7.12)

#### Anpassungsfaktoren

Der Anpassungsfaktor  $\alpha$  für den trophischen Zustand der Gewässer wurde für Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen ( $\alpha_r$ ) und für Teiche, Speicher, künstliche Süßwasserbecken aller Art ( $\alpha_p$ ) landesspezifisch ermittelt. Grundlage hierfür war das

Forschungsprojekt „Ökologische Bewertung von künstlichen und erheblich veränderten Seen sowie Mittelgebirgsseen anhand der biologischen Komponente Phytoplankton nach den Anforderungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie“ (Hoehn et al., 2009), in dessen Rahmen u.a. für 280 künstliche und 16 natürliche stehende Gewässer Deutschlands (z.B. Mittelgebirgsseen, Baggerseen, Tagebauseen, Talsperren und Sondertypen im Tiefland) u.a. die Trophieklassen ermittelt wurden. Anhand dieser wurde jeder Trophieklasse ein mittlerer Anpassungsfaktor  $\alpha$  nach Tabelle 7.11 (S. 7.15) des 2019 Refinement (IPCC) zugeteilt. Hierfür wurden der Range der im Refinement (IPCC) für die einzelnen Trophieklassen aufgeführten Anpassungsfaktoren an die höhere Auflösung der Forschungsarbeit angepasst, indem der Range durch die Anzahl der Subkategorien geteilt und die Spannweite linear auf die Trophieklassen aufgeteilt wurde. Aus den daraus entstandenen neuen oberen und unteren Grenzen wurden dann die Mittelwerte als trophische Anpassungsfaktoren  $\alpha_i$  den deutschen Trophieklassen zugeteilt (Tabelle 340).

**Tabelle 340: Ermittlung des mittleren Trophic Adjustment Factors  $\alpha_i$  (nach 2019 IPCC Refinement) für künstliche, stehende Gewässer Deutschlands nach Trophieklassen (Hoehn et al., 2009)**

LAWA 2009; Hoehn et al.		IPCC (2019 refinement)		Zuordnung trophische Anpassungsfaktoren $\alpha_i$			Unsicherheit (Unterstellung: Range = 95 %KI)	
Trophieklasse	Abkürzung	Trophieklasse	$\alpha_i$	$\alpha_i$ US	$\alpha_i$ OS	$\alpha_i$ Trophieklassenmittel	[%]	Verteilung
oligotroph	ol	Oligotrophic	0,7	0,7	0,7	0,7	50	normal
mesotroph 1	meso 1	Mesotrophic	0,7 - 5,3	0,7	3	1,85	62,2	normal
mesotroph 2	meso 2			3	5,3	4,15	27,7	normal
eutroph 1	eu 1	Eutrophic	5,3 - 14,5	5,3	9,9	7,6	30,3	normal
eutroph 2	eu 2			9,9	14,5	12,2	18,9	normal
polytroph 1	poly 1		14,5 - 39,4	14,5	22,8	18,65	22,3	normal
polytroph 2	poly 2			22,8	31,1	26,95	26,7	normal
hypertroph	hyper	Hypereutrophic		31,1	39,4	35,25	26,7	normal

Die so ermittelten Anpassungsfaktoren wurden über die Trophieklasse den Gewässern der deutschen Studie zugeordnet und anhand der Anzahl der unterschiedlichen Gewässertypen in den diversen Trophieklassen gewichtet (Tabelle 341).

**Tabelle 341: Ermittlung mittlerer trophischer Anpassungsfaktoren anhand des Gewässerzustandes künstlicher, stehender Gewässer Deutschlands basierend auf (HOEHN et al. 2009)**

Gewässertyp	oligotroph	mesotroph	mesotroph	eutroph	eutroph	polytroph	polytroph	$\Sigma$ Gewässer
	h	h 1	h 2	h 1	h 2	h 1	2 / hypertroph h	
Anzahl								
Baggersee	11	24	21	21	11	3	2	93
Teich						1	8	9
natürlicher See	4	4	5		1		2	16
Speicher	1				1		4	6
Tagebausee	20	8	5	1				34
Talsperre	35	27	33	11	12	11	9	138
$\Sigma$ total	71	63	64	33	25	15	25	296
$\Sigma$ ohne natürliche Seen	67	59	59	33	24	15	23	280
$\alpha_i$ Trophieklassenmittel	0,7	1,85	4,15	7,6	12,2	18,65	31,1	

	ol	meso 1	meso 2	eu 1	eu 2	poly 1	poly 2 / hyper	Anpassungsfaktor
	$\alpha_i$ Trophieklassenmittel *Anzahl							$\alpha_i$ Mittel
Baggersee	7,7	44,4	87,15	159,6	134,2	55,95	62,2	5,9
Teich						18,65	248,8	29,7
natürlicher See	2,8	7,4	20,75		12,2		62,2	6,6
Speicher	0,7				12,2		124,4	22,9
Tagebausee	14	14,8	20,75	7,6				1,7
Talsperre	24,5	49,95	136,95	83,6	146,4	205,15	279,9	6,7
$\alpha_r$ Talsperre/Tagebau-/Baggersee	46,2	109,15	244,85	250,8	280,6	261,1	342,1	5,8
$\alpha_p$ Teich/Speicher	0,7				12,2	18,65	373,2	27,0

Es zeigt sich, dass die so ermittelten trophischen Anpassungsfaktoren für Teiche und Speicher deutlich größer sind als in den anderen künstlichen Gewässern, da diese Gewässer überwiegend eutroph bis hypertroph sind. Die anderen künstlichen Gewässer weisen eine untereinander vergleichbare mittlere Trophiestufe auf. Diese ähnelt sehr derjenigen der natürlichen Seen. Ausnahme bilden lediglich die Tagebauseen, die überwiegend oligo-bis mesotroph sind (Hoehn et al., 2009).

Für künstliche Seen über organischen Böden bzw. einem durch organische Böden geprägten Einzugsgebiet wird eine Gleichverteilung der Seen zwischen Meso- und Eutrophie unterstellt, da diese, je nach Umland, Zufluss, Gewässerausprägung und Bewirtschaftung alle diese Trophiestufen aufweisen können (Riedmüller et al., 2013) und (Mauersberger & Kopp, 2006).

Aufgrund dieser Ergebnisse werden gewichtete, mittlere trophische Anpassungsfaktoren für

1. Teiche, Speicher und künstliche Süßwasserbecken aller Art  $\alpha_p = 27,0$  (Tabelle 341)
2. Stauseen / Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen
  - mineralischer Untergrund/Einzugsgebiet  $\alpha_r$  mineralisch = 5,8 (Tabelle 341)
  - organischer Untergrund/Einzugsgebiet  $\alpha_r$  organisch = 7,6

ausgewiesen.

Für den Faktor R, der das Verhältnis der Methanemissionen von Stauseen/ Wasserreservoirs (älter als 20 a) am bzw. unterhalb des Auslasses des Damms zu Methanemissionen von deren Oberfläche beschreibt, wird ebenfalls auf den Default-Faktor des 2019 Refinement (IPCC 2019) zurückgegriffen. Der Wert für dieses Verhältnis ist dimensionslos und beträgt im Median (95%-Konfidenzintervall des Median):

$R = 0,09$  (-44,4 % / 144,4 %) (Tabelle 7.1; S. 7.15; IPCC 2019)

#### Fließende, künstliche Gewässer – wet5

Der Default-Wert für den Emissionsfaktor beträgt für Kanäle, Entwässerungsgräben der Wasserwirtschaft und Hafenbecken an Binnengewässern

$EF_{c,CH_4>20a} = 183 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (95 % - Konfidenzintervall: -35,5 % / 24,6 %) (IPCC 2019; S. 7.18; Tabelle 7.12),

der Default-Wert für den dimensionslosen Anpassungsfaktor für den Emissionsfaktor in Abhängigkeit vom trophischen Zustand der Fließgewässer

$\alpha_c = 1$  (IPCC 2019; S. 7.17; Gleichung 7.12)

**6.1.2.7 Direkte Lachgas-Emissionen (N<sub>2</sub>O) aus Stickstoff-Mineralisierung (CRF-Tabelle 4(III))**

Die direkten (CRF-Tabelle 4 (III)) N<sub>2</sub>O-Emissionen, die durch Verluste an organischer Bodensubstanz infolge von Landnutzungsänderungen bzw. Bewirtschaftungsmaßnahmen entstehen, wurden gemäß der IPCC Guidelines 2006 ermittelt. Hierfür wurden die für die einzelnen Landnutzungsänderungsflächen ermittelten Kohlenstoffvorratsänderungen durch die mittleren C/N – Verhältnisse der entsprechenden Böden dividiert und somit die absoluten Veränderungen im Stickstoffvorrat der Böden bestimmt (Gleichung 11.8 in den IPCC Guidelines 2006, IPCC (2006b)). Die N-Vorräte für Waldböden entstammen den auf den Ergebnissen der BZE-Wald (Wellbrock et al., 2016) basierenden Bodenkarten (s. Kapitel 6.1.2.1.3, Kapitel 6.4.2.5.3 und Kapitel 6.4.2.5.4). Die Emissionsfaktoren für die restlichen Landnutzungskategorien wurden aus den regionalisierten Ergebnissen der BZE-Landwirtschaft bezüglich der C/N-Verhältnisse der Mineralböden (Jacobs et al., 2018) abgeleitet (s. Kapitel 6.1.2.1.4, Kapitel 6.1.2.1.5; Kapitel 6.1.2.1.6 und Kapitel 6.1.2.1.7). Die C/N-Verhältnisse für Mineralböden der Kategorie *Terrestrische Feuchtgebiete* konnten noch nicht regionalisiert werden.

Zur Ermittlung der direkten Emissionen wurden die absoluten Stickstoffvorratsunterschiede mit dem IPCC Standardwert von 0,01 kg N<sub>2</sub>O-N (kg N)<sup>-1</sup> gemäß Gleichung 11.1 in den IPCC Guidelines 2006 (IPCC, 2006b) verrechnet. Die so ermittelten N<sub>2</sub>O-Emissionen sind in der CRF-Tabelle 4(III) und die impliziten Emissionsfaktoren sind in Tabelle 342 aufgeführt. Die Unsicherheiten sind in den entsprechenden Kapiteln der einzelnen Landnutzungskategorien (vgl. Kapitel 6.4.3, 6.5.3, 6.6.3, 6.7.3 und 6.8.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz) zusammengefasst.

Die Lachgasemissionen unterliegen ebenfalls der Übergangszeit und werden analog zu den Kohlenstoffvorratsänderungen auf 20 Jahre verteilt. Auch bezüglich der effektiven Übergangszeit gelten die für den Kohlenstoff anzuwendenden Methoden. Zur Herleitung der impliziten Stickstoffemissionsfaktoren für den Wald gelten die diesbezüglich für den Kohlenstoff gemachten Ausführungen (vgl. Kapitel 6.1.2.1.1).

Die direkten Lachgas-Emissionen infolge des Zersatzes organischer Substanz aus der Verbleibkategorie Ackerland<sup>92</sup>, werden gemäß IPCC Guidelines 2006 im Sektor Landwirtschaft unter 3.D.a.5 berichtet.

---

<sup>92</sup> Summe der Emissionen aus den Verbleibkategorien und der Übergangskategorien untereinander der Landnutzungskategorien *Ackerland<sub>annuell</sub>, Hopfenanbau, Obstanbau, Weinanbau, Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen* und *Kurzumtriebsplantagen*



**Tabelle 342: Implizite Emissionsfaktoren für direkte Lachgasemissionen [kg N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>] infolge von Verlusten an organischer Substanz aus Mineralböden nach Landnutzungsänderung für das Jahr 2021**

Implizite Emissionsfaktoren <sub>Mineralböden</sub> [kg N <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ] für das Jahr 2021															
Initial\Final	Wald	Acker <sub>annuell</sub>	Hopfen	Weinanbau	Obstanbau	Baumschulen	Weihnachtsbaumkulturen	Kurzumtriebsplantagen	Grünland i.e.S.	Gehölze	Hecken	Terrestr. Feuchtgebiete	Torf	Siedlungen	Sonstiges Land
Wald		5,00	0	0	0	0	0	0	2,20	1,75	2,33	0,19	NO	0,57	NO
Acker <sub>annuell</sub>	0,65		0,05	0,15	0,03	0,09	0,07	0,07	0	0	0,01	0,02	NO	0,27	NO
Hopfen	0,71	0,70		0,85	0,01	0	0	0	0	0	0	0	NO	0,69	NO
Weinanbau	0,07	0,16	0		0	0	0	0	0	0	0	0	NO	0,30	NO
Obstanbau	1,46	1,29	0,60	1,37		0,51	0,56	0,61	0,03	0,11	0,07	0	NO	0,33	NO
Baumschulen	0,73	0,67	0	0,83	0,00		0	0	0	0,01	0	0	NO	0,76	NO
Weihnachtsbaumkulturen	0,72	0,72	0	0,80	0,01	0		0	0,01	0,01	0	0	NO	0,50	NO
Kurzumtriebsplantagen	0,00	0,58	0	0	0,01	0	0		0	0	0	0	NO	0,32	NO
Grünland i.e.S.	1,30	1,09	0,75	1,10	0,59	0,84	0,83	0,82		0	0,01	0,07	NO	0,64	NO
Gehölze	1,50	1,20	0,93	0,95	0,21	0	0,84	0,81	0		0,04	0,03	NO	1,18	NO
Hecken	1,15	1,12	0	0	0,15	1,04	0	0	0,959	0		0	NO	10,87	NO
Terrestr. Feuchtgebiete	2,11	1,81	0	0,88	1,36	1,92	0	0	0,68	0,86	0		NO	1,02	NO
Torf	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO		NO	NO
Siedlungen	0,75	0,49	0,32	0,33	0,03	0,15	0,09	0,09	0,02	0,05	0,08	0,02	NO		NO
Sonstiges Land	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NO	0,01	

*kursive Werte: Berichtet im Sektor Landwirtschaft (3.D.a.5)*

positiv: Lachgasemission

### 6.1.2.8 Indirekte Lachgas-Emissionen (N<sub>2</sub>O) aus bewirtschafteten Böden (CRF-Tabelle 4(IV))

Die indirekten N<sub>2</sub>O-Emissionen, die durch Verluste an organischer Bodensubstanz infolge von Landnutzungsänderungen bzw. Bewirtschaftungsmaßnahmen entstehen, wurden gemäß der IPCC Guidelines 2006 (IPCC (2006b)) ermittelt und in der CRF-Tabelle 4(IV) ausgewiesen. Die indirekten N<sub>2</sub>O-Emissionen infolge atmosphärischer Deposition werden im Sektor Landwirtschaft (CRF 3.B.2.5) berichtet. In der CRF-Tabelle 4(IV) sind die entsprechenden Spalten deshalb mit dem Notation Key IE versehen.

Zur Ermittlung der indirekten Lachgasemissionen wurden die für die einzelnen Landnutzungsänderungsflächen ermittelten Kohlenstoffvorratsänderungen durch die flächengewichteten mittleren C/N – Verhältnisse der entsprechenden Böden dividiert und somit die absoluten Veränderungen im Stickstoffvorrat der Böden bestimmt (Gleichung 11.8 in den IPCC Guidelines 2006). Die N-Vorräte für Waldböden entstammen den Bodenkarten (s. Kapitel 6.1.2.1.3, Kapitel 6.4.2.5.3 und Kapitel 6.4.2.5.4), die auf den Ergebnissen der BZE-Wald (WELLBROCK et al. 2016) basieren. Die Emissionsfaktoren für die restlichen Landnutzungskategorien wurden aus den regionalisierten Ergebnissen der BZE-Landwirtschaft bezüglich der C/N-Verhältnisse der Mineralböden (JACOBS et al. 2018) abgeleitet (s. Kapitel 6.1.2.1.4, Kapitel 6.1.2.1.5; Kapitel 6.1.2.1.6 und Kapitel 6.1.2.1.7). Die C/N-Verhältnisse für Mineralböden der Kategorie *Terrestrische Feuchtgebiete* konnten noch nicht regionalisiert werden.



Zur Abschätzung der indirekten Lachgasemissionen wurden die N-Vorratsunterschiede nach Gleichung 11.10 der IPCC Guidelines 2006 mit den Standardfaktoren  $Frac_{Leach-(H)}$  ( $0,3 \text{ kg N}_2\text{O-N (kg N)}^{-1}$ ) und dem  $EF_5$  ( $0,0075 \text{ kg N}_2\text{O-N (kg N)}^{-1}$ ) multipliziert (IPCC, 2006b). Die Emissionsfaktoren für die indirekten Lachgasemissionen sind für das Jahr 2019 in Tabelle 343 aufgeführt und die Unsicherheiten werden in den Unsicherheiten-Kapiteln der Landnutzungskategorien beschrieben (vgl. Kapitel 6.4.3, 6.5.3, 6.6.3, 6.7.3 und 6.8.3). Die Ergebnisse werden in die CRF-Tabelle 4(IV) eingetragen.

Die Lachgasemissionen unterliegen ebenfalls der Übergangszeit und werden analog zu den Kohlenstoffvorratsänderungen auf 20 Jahre verteilt. Auch bezüglich der effektiven Übergangszeit gelten die für den Kohlenstoff anzuwendenden Methoden. Zur Herleitung der impliziten Stickstoffemissionsfaktoren für den Wald gelten die diesbezüglich für den Kohlenstoff gemachten Ausführungen (vgl. Kapitel 6.1.2.1.1).

Die direkte Lachgas-Emissionen infolge des Zersetztes organischer Substanz aus der Verbleibkategorie Ackerland<sup>93</sup>, werden gemäß IPCC Guidelines 2006 im Sektor Landwirtschaft unter 3.D.a.5 berichtet.

**Tabelle 343: Implizite Emissionsfaktoren für indirekte Lachgasemissionen [ $\text{kg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ] infolge von Verlusten an organischer Substanz aus Mineralböden nach Landnutzungsänderung für das Jahr 2021**

Implizite Emissionsfaktoren <sup>Mineralböden</sup> [ $\text{kg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ] für das Jahr 2021															
Initial\Final	Wald	Acker <sub>annuell</sub>	Hopfen	Weinanbau	Obstanbau	Baumschulen	Weihnachtsbaumkulturen	Kurzumtriebsplantagen	Grünland i.e.S.	Gehölze	Hecken	Terrestr. Feuchtgebiete	Torf	Siedlungen	Sonstiges Land
Wald		1,09	0	0	0	0	0	0	0,49	0,39	0,54	0,04	NO	0,13	NO
Acker <sub>annuell</sub>	0,15		0,01	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0	0	0	0,01	NO	0,06	NO
Hopfen	0,16	0,16		0,19	0	0	0	0	0	0	0	0	NO	0,16	NO
Weinanbau	0,02	0,04	0		0	0	0	0	0	0	0	0	NO	0,07	NO
Obstanbau	0,33	0,29	0,13	0,31		0,11	0,13	0,14	0,01	0,03	0,01	0	NO	0,07	NO
Baumschulen	0,00	0,15	0	0,19	0		0	0	0	0	0	0	NO	0,07	NO
Weihnachtsbaumkulturen	0,16	0,16	0	0,18	0	0		0	0	0	0	0	NO	0,17	NO
Kurzumtriebsplantagen	0,16	0,13	0	0	0	0	0		0	0	0	0	NO	0,11	NO
Grünland i.e.S.	0,29	0,24	0,17	0,25	0,13	0,19	0,19	0,18		0	0	0,02	NO	0,14	NO
Gehölze	0,34	0,27	0,21	0,21	0,05	0	0,19	0	0		0,01	0,01	NO	0,27	NO
Hecken	0,26	0,25	0	0	0,03	0,23	0	0	0,15	0		0	NO	2,45	NO
Terrestr. Feuchtgebiete	0,47	0,41	0	0,20	0,31	0,43	0	0	0	0,19	0		NO	0,23	NO
Torf	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO		NO	NO
Siedlungen	0,17	0,11	0,07	0,07	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0	NO		NO
Sonstiges Land	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NO	0	

*kursive Werte:* Berichtet im Sektor Landwirtschaft (3.D.a.5)

positiv: Lachgasemission

<sup>93</sup> Summe der Emissionen aus den Verbleibkategorien und der Übergangskategorien untereinander der Landnutzungskategorien Ackerland<sub>annuell</sub>, Hopfenanbau, Obstanbau, Weinanbau, Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen und Kurzumtriebsplantagen

### 6.1.2.9 Verbrennung von Biomasse (CRF-Tabelle 4(V))

Die Verbrennung von Biomasse im Landnutzungssektor tritt in Deutschland einzig durch Waldbrände auf. Die dadurch entstandenen Emissionen werden in der CRF-Tabelle 4(V) eingetragen. Die methodische Beschreibung zu den Waldbränden befindet sich im Waldbrand-Kapitel 6.4.2.7.5 in der Landnutzungskategorie Wald.

Für die Landnutzungskategorien *Ackerland*, *Grünland*, *Feuchgebiete* und *Sonstiges Land* gibt es keine Emissionen aus der Verbrennung von Biomasse. Dabei wird für alle Kategorien nach kontrollierten Feuern und Wildfeuern unterschieden. Spontane Feuer (Wildfeuer) in diesen Landnutzungskategorien sind in Deutschland seltene Ereignisse und werden daher nicht erfasst: die Treibhausgasemissionen daraus sind zu vernachlässigen. In der CRF-Tabelle 4(V) wird NO (not occurring) eingetragen.

Anthropogen verursachte Großbrände, wie der Moorbrand 2018, konnten im Jahr 2021 nicht verzeichnet werden.

Kontrollierte Feuer (On-site burning von Biomasse) sind in Deutschland per Gesetz verboten (§ 3 DirektZahlVerpflV; Bundesgesetzblatt (2004)) und treten in Deutschland nicht auf. Dies betrifft alle Landnutzungskategorien. In der CRF-Tabelle 4(V) wird NO (not occurring) eingetragen.

### 6.1.2.10 Unsicherheiten

Die Unsicherheitenbestimmung im LULUCF Teil des deutschen Treibhausgasinventars folgt den Richtlinien der 2006 IPCC Guidelines und der Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2000). Bei Normalverteilung wird das 95 % Konfidenzintervall angegeben bzw.  $\pm$  die Hälfte des 95 % Konfidenzintervalls oder  $1,96 \times$  der Standardfehler in % vom Mittelwert. Bei asymmetrischen Verteilungen, hier triangular- oder logarithmisch-normalverteilte Daten, werden die Unsicherheiten in Prozent vom Lagemaß dargestellt, als obere und untere Schranke; in der Regel ermittelt über die Quantile ( $p = 0,025$  bzw.  $p = 0,975$ ). Bei der Unsicherheitenfortpflanzungsrechnung wurde gemäß der oben angegebenen Richtlinien, im Sinne einer konservativen Abschätzung, der Abstand zwischen dem Extremwert des schiefen Achsenabschnitts zum Lagemaß per Definition zur Hälfte des 95 % Konfidenzintervalls erklärt. Für die Holzprodukte konnte wegen fehlender Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren keine Unsicherheitenberechnung durchgeführt werden.

Die Gesamtunsicherheit des LULUCF-Teils des deutschen THG-Inventars beträgt demnach 13,6 % bezüglich des Levels der Emissionen. Den größten Beitrag zur Gesamtunsicherheit bedingen die CO<sub>2</sub>-Emissionen (88,1 %), der Einfluss der Methan- (3,8 %) und Lachgasemissionen (8,1 %) ist gering.

Bezogen auf die Pools tragen die organischen Böden mit Abstand den größten Beitrag (94,2 %) zur Gesamtunsicherheit des LULUCF-Inventars bei, der Beitrag der Biomasse beträgt 2,4 %, der der toten organischen Substanz und der Methanemissionen aus Gewässern jeweils 1,4 %, der aller anderen Kategorien < 1 %.

Insgesamt bedingen die Landnutzungskategorien *Grünland i.e.S* (91,2 %), *Wald* (4,3 %) und *Ackerland<sub>annuell</sub>* (4,3 %) 98,8 % der Gesamtunsicherheit des deutschen LULUCF-Inventars.

### 6.1.3 Qualitätssicherung und -kontrolle

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und für 4.A bis 4.G sowie die Landflächen zusätzlich auch eine kategorie-spezifische Qualitätskontrolle sowie eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Bei der QS kamen detaillierte Checklisten und Einzelchecks zur Überprüfung und Dokumentation der Ergebnisse entsprechend dem Qualitätsmanagement des Thünen Instituts (TI 2016) zum Einsatz. Die Thünen-Checklisten sowie andere für die QK wichtigen Dokumente werden von der Nationalen Koordinierungsstelle archiviert und sind somit auch zur externen Überprüfung verfügbar

#### **6.1.3.1 Qualitätsmanagement Emissionsinventare des Thünen-Instituts**

Das Qualitätsmanagement der Emissionsinventarerstellung am Thünen-Institut wurde konform zu den IPCC-Richtlinien und dem QSE-Handbuch (Kapitel 1.3.3) entwickelt. Rahmenbedingungen und Durchführung des Qualitätsmanagements sind im Konzept (BMELV, 2016) und in der Ausführungsbestimmung des Konzepts (TI, 2016) ausführlich beschrieben. Alle Dokumente und Daten werden in der Inventarbeschreibung abgelegt, die von der Nationalen Koordinierungsstelle archiviert wird. Die Vorgaben und Abläufe der Ausführungsbestimmung wurden vollständig eingehalten. Im Folgenden werden die besonderen zusätzlichen Qualitätskontrollen für diese Submission beschrieben.

#### **6.1.3.2 Eingangsdaten, Berechnungsverfahren und Emissionsergebnisse**

Im ersten Schritt wurde die Landnutzungsmatrix qualitätskontrolliert und zur Emissionsberechnung freigegeben. Die Prüfungen umfassten die Entscheidungsbäume und die Ergebnisse der jährlichen Landnutzungsmatrix und der 20-jährigen Übergangszeit. Im Folgenden sind wichtige Testkriterien für die Landnutzungsmatrix gelistet, die in der Prüfung zum Einsatz kamen. Diese gehen über die Anforderungen der Ausführungsbestimmung hinaus. Sie gelten für die gesamte Landnutzungsmatrix und die beiden Teilmatrizen für Mineral- und organische Böden:

- Die nationale Fläche ist konstant.
- Die nationale Fläche ist die gleiche wie im Vorjahr.
- Die Flächen der Landnutzungskategorien sind gleich oder kaum unterschiedlich zum Vorjahr bzw. Unterschiede sind erklärbar.
- Die Flächen und Flächentrends sind konsistent mit statistischen Daten bzw. Unterschiede sind erklärbar.
- Die Summen der Gesamtflächen, bestehend aus verbleibenden Flächen und Landnutzungsänderungen, sind korrekt.
- Sonstige Flächen sind konstant oder nehmen ab; es findet keine Landnutzungsänderung zu sonstigen Flächen statt.
- Torfabbauflächen wurden getrennt ausgewiesen.

Die Emissionsberechnungen wurden mit der qualitätsgeprüften Landnutzungsmatrix durchgeführt. Aus den Flächendaten und Emissionsfaktoren bzw. impliziten Emissionsfaktoren (IEF) werden in Tabellen schrittweise die Emissionsberechnungen für jährliche Landnutzungsänderungen und die Übergangszeit durchgeführt. Die Tabellen wurden geprüft hinsichtlich:

1. Korrektheit der Berechnungen,
2. Konsistenz in der Zeitreihe,
3. Konsistenz mit den Berechnungen des Vorjahres.

Außerdem kamen folgende Testkriterien zum Einsatz:

Emissionsfaktoren:

- Die Berechnungen der Emissionsfaktoren bzw. impliziten Emissionsfaktoren (IEF) sind korrekt.
- Die Zeitreihe der Emissionsfaktoren ist konsistent; Änderungen von Jahr zu Jahr sind erklärbar.
- Die Emissionsfaktoren sind gleich denen des Vorjahres außer bei Änderungen in Daten und Methoden: neue Emissionsfaktoren sind plausibel und Unterschiede zu denen des Vorjahres sind erklärbar und vollständig dokumentiert.
- Unsicherheiten sind korrekt angegeben und konsistent mit denen des Vorjahres.

#### Berechnungen:

- Die Basisberechnungen, die Berechnungen für die jährlichen Landnutzungsänderungen und die Übergangszeit sind korrekt.
- Die Übersichtstabellen, die die Grundlage für die CRF-Tabellen und den Text bilden, sind korrekt.
- Die Emissionsergebnisse sind konsistent mit denen des Vorjahres bzw. Unterschiede aufgrund neuer Daten und Methoden erklärbar.

#### Ergebnisse der Qualitätskontrollen:

1. Alle Berechnungen sind korrekt.
2. Die Zeitreihen sind konsistent. Größere Änderungen von Jahr zu Jahr sind ausschließlich bedingt durch die Periodizität der Daten und lineare Interpolationen dazwischen.
3. Es wurden keine unerklärbaren Ausreißer der relativen Differenzen der Emissionen zum Vorjahr gefunden. Alle Änderungen gegenüber dem Vorjahr waren korrekt dokumentiert und sind im Nationalen Inventarbericht enthalten.

Nach Eingabe der Aktivitätsdaten und impliziten Emissionsfaktoren (IEF) in die ZSE-Datenbank (Zentrales System Emissionen) wurde zur Kontrolle ein Abgleich der im ZSE berechneten Emissionen mit den außerhalb der Datenbankumgebung errechneten Emissionsergebnissen durchgeführt. Die Schritte der Qualitätskontrolle und ihre Ergebnisse sind in der Inventarbeschreibung vollständig dokumentiert, die ebenfalls von der Nationalen Koordinierungsstelle archiviert wird.

#### **6.1.3.3 Verifizierung**

Für die Erstellung des Inventars im LULUCF-Sektor werden vor allem Daten von Inventuren und Erhebungen verwendet, die ein Alleinstellungsmerkmal in Deutschland aufweisen. Das heißt, es gibt keine vergleichbaren Daten, die es ermöglichen würden, diese zu verifizieren. Darunter zählen beispielsweise die Bundeswaldinventur (BWI), die Bodenzustanderhebungen Wald und Landwirtschaft (BZE), die ATKIS-Daten, die Waldbrandstatistik u.a., die als Primärstatistiken zur Verfügung stehen. Um die Qualität der Daten zu gewährleisten, haben Inventuren wie zum Beispiel die BWI und BZE eigene umfangreiche Qualitätssicherungen und -kontrollen (siehe auch Kapitel 6.4.4). Alle verwendeten Ergebnisse beinhalten Fehlerangaben, die in die Unsicherheitenberechnung des LULUCF-Inventar einfließen.

Die Ergebnisse bzw. impliziten Emissionsfaktoren (IEF), differenziert nach Kohlenstoffpools und Landnutzungskategorien, wurden mit denen der Nachbarstaaten verglichen. Details dazu finden sich in den jeweiligen Kapiteln „Kategorie-spezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung“ der Landnutzungskategorien.

### 6.1.3.4 Reviews und Reports

Aus den Reviewprozessen der letzten Jahre konnten entscheidende Empfehlungen der Gutachter umgesetzt werden. Im Folgenden werden nur die wichtigsten Verbesserungen aufgelistet:

1. Regionalisierung der Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte von Mineralböden (Kapitel 6.1.2.1 ff)
  - Dieser Punkt wurde vollständig umgesetzt. Dabei wurden flächendeckende hochauflösende Rasterkarten der Bodenkohlenstoffvorräte und C/N-Verhältnisse für die Mineralbodenflächen Deutschlands erstellt. Die Karten beinhalten Regionalisierungen in Abhängigkeit von pedologischen, geologischen, hydrologischen, topographischen und klimatischen Standortfaktoren
  - Für den Waldbereich wurden zur Umsetzung der Forderung ein Modellansatz mit Yasso umgesetzt (Kapitel 6.4.2.5)
2. Hinzunahme der DOM bei Waldbränden: Neben der Biomasse wurde mit der Submission auch die Verbrennung von Totholz und Streu bei Waldbränden berücksichtigt (siehe Kapitel 6.4.2.7.5)
3. Umsetzung der Berechnung der Emissionen aus Mineralböden der Verbleibkategorien von Acker- und Grünland, mittels des Tier 1 - Ansatzes der 2006 IPCC Guidelines, zum Nachweis, dass die Annahme eines Gleichgewichtes konservativ ist (Kapitel 6.5.2.3.2 und Kapitel 6.6.2.3)

### 6.1.4 Geplante Verbesserungsmaßnahmen

Außer den in Kapitel 6.1.2.1.9 aufgeführten mittel- bis langfristigen Maßnahmen zur Verbesserung der Berichterstattung im Bereich Mineralböden, sind kurzfristig nur kleinere Maßnahmen zur Konsolidierung des Aktivitätsdatenbestandes bezüglich der neuen Gewässerkategorien geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 471 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 470 abgebildet.

## 6.2 Definitionen von Landnutzung, Klassifizierungssysteme und ihre Widerspiegelung in den LULUCF-Kategorien

### 6.2.1 Wälder

Die dem deutschen Inventar zugrunde liegende Definition von Wald entspricht den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 4, Chapter 2.2). Die Zuordnung nationaler Landnutzungssysteme zu dieser Kategorie erfolgt nach Tabelle 345 in Kapitel 6.3.2.1.

Grundlage der Berichterstattung ist die Walddefinition der Bundeswaldinventur (Polley, 2001):

Wald im Sinne der BWI ist, unabhängig von den Angaben im Kataster oder ähnlichen Verzeichnissen, jede mit Forstpflanzen bestockte Grundfläche. Als Wald gelten auch kahl geschlagene oder verlichtete Grundflächen, Waldwege, Waldeinteilungs- und Sicherungstreifen, Waldblößen und Lichtungen, Waldwiesen, Wildäsungsplätze, Holzlagerplätze, im Wald gelegene Leitungsschneisen, weitere mit dem Wald verbundene und ihm dienende Flächen einschließlich Flächen mit Erholungseinrichtungen, zugewachsene Heiden und Moore, zugewachsene ehemalige Weiden, Almflächen und Hutungen sowie Latschen- und Grünerlenflächen. Heiden,