

Opgørelse af CO₂-emissioner fra organiske jorde

Fagligt notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

Dato: 7. januar 2025 | 01



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Fagligt notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

Kategori: Rådgivningsnotat

Titel: Opgørelse af CO₂-emissioner fra organiske jorde

Forfattere: Steen Gyldenkærne¹, Lærke Work Callisen¹, Mogens H. Greve², Amélie Marie Beucher², Peter Lystbæk Weber², Lars Elsgaard², Poul Erik Lærke², Simon Stisen³, Julian Koch³ og Gregor Levin¹

Institutioner: ¹Institut for Miljøvidenskab, DCE, Aarhus Universitet,
²Institut for Agroøkologi, DCA, Aarhus Universitet,
³GEUS, De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland

Faglig kommentering: Jørgen E. Olesen, Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi og
Ole-Kenneth Nielsen, Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab

Kvalitetssikring, DCE: Hanne Bach
Sproglig kvalitetssikring: Ann-Katrine Holme Christoffersen, Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab

Rekvirent: Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet

Bedes citeret: Gyldenkærne, S., Callisen, L.W., Greve, M.H., Beucher, A.M., Weber, P.L., Elsgaard, L., Lærke, P.E., Stisen, S., Koch, J. & Levin, G. 2025. Opgørelse af CO₂-emissioner fra organiske jorde. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 29 s. Fagligt notat nr. 2025|01

Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse

Foto forside: Steen Gyldenkærne

Sideantal: 29

Indhold

1	Om bestillingen	4
2	Sammendrag	5
3	Ny model til opgørelse af CO₂-udledninger fra organiske jorder	6
3.1	Den nuværende opgørelse som er afleveret til EU i marts 2024	6
3.2	Ny model til opgørelse af CO ₂ -udledning	7
4	Beregnete udledninger for 2022	14
5	Opgørelse af tidsserien 1990 til 2022 samt KF24	16
5.1	Data til rådighed	16
5.2	Opgørelsen 1990-2022	16
5.3	Opgørelse fra 2022 og 2023 samt fremskrivninger	19
6	Usikkerheder	21
7	Konklusion	25
8	Litteratur	27

1 Om bestillingen

Klima- Energi- og Forsyningsministeriet (KEFM) har bestilt et dokumentationsnotat, der skal beskrive den endelige model for emissioner af CO₂ udviklet i projektet for reviderede drivhusgasopgørelser for kulstofrige jorder, og præsentere tidsserieberegninger. Notatet skal beskrive centrale antagelser, begrænsninger, forbehold og usikkerheder for modellen. Derudover skal det indeholde tidsserien for emissioner af CO₂ fra dyrkede organiske jorde for 1990 til 2040 baseret på uændrede forudsætninger fra Klimafremskrivning 2024 (KF24) samt en tidsserie, hvor der ikke indgår udtag af organiske jorde.

Notatet er baseret på resultaterne fra projektet "**Udvikling og implementering af ny viden om de organiske jorders udledninger af drivhusgasser i den nationale drivhusgasopgørelse**" finansieret af Klima, Energi og Forsyningsministeriet (KEFM). Det omtales i det følgende som 'Projektet', og udgøres af følgende delelementer:

- Udarbejdelse af en nyt Tørvekort rapporteret i Beucher et al., (2024)
- Sammenstilling litteraturdata til udarbejdelse af emissionsfaktorer (EF) for organiske jorder i relation til grundvandsstand rapporteret i Elsgaard (2024)
- Måling af CO₂-emission fra organiske jorder med 6-12 % OC og >12 % OC under laboratorieforhold rapporteret i Liang et al., (2024)
- Udarbejdelse af et grundvandsstandskort (GVS-kort) for lavbundsletter rapporteret i Koch et al., (2023)
- Sammenstilling af de opnåede resultater til en national opgørelsesmetode ved DCE (dette notat).

2 Sammendrag

Der er opstillet en ny model til beregning af netto-udledningerne af CO₂ fra organiske landbrugsjorder. Organiske jorder defineres som jorder med et organisk kulstof (OC) indhold, der er større end 6 procent (>6 %). Den nye model bliver implementeret i den nationale opgørelse som afleveres til EU 15. januar 2025 og gælder for hele tidsserien fra 1990 til 2023. Den nye model er en pixelbaseret opgørelse med en pixelstørrelse på 10 × 10 m fra år 2022 og frem. Den årlige nationale udledning for 2022 beregnes ved at summere de pixler, som skal indgå i opgørelsen. Pixlerne omfatter hele det areal med organiske jorder, som indgår i Tørv2022-kortet. Udledningen på pixelniveau beregnes ud fra en modelleret vandstand i den pågældende pixel på baggrund af et grundvandskort udarbejdet af GEUS. Dette er også udarbejdet med en opløsning på 10 × 10 m. Udledningen for hver pixel beregnes ud fra en sigmoid-responsfunktion, hvor CO₂-udledningen afhænger af tykkelsen af tørvlaget over grundvandsstanden.

For årene fra 1990 til 2021, er der opstillet en række antagelser for at kunne udarbejde en fuld tidsserie.

I arbejdet med den nye model blev det fundet, at der ikke er behov for at have forskellige modeller for jorder med >12 % organisk kulstof og jorder med 6-12 % organisk kulstof i det omfang jorderne har samme tykkelse.

Med den nye model opgøres udledningerne i 2022 til 2795 kt CO₂-ækv. per år. Dette svarer til en reduktion på knap 3 % i sammenligning med opgørelsen afleveret til EU i marts 2024 på 2876 kt CO₂-ækv. per år. For 1990, er de tilsvarende tal hhv. 5929 og 6046 kt CO₂-ækv. per år, og for 2030, er de hhv. 1662 og 1788 kt CO₂-ækv. per år. De angivne tal inkluderer ikke udledninger af metan (CH₄) og lattergas (N₂O). CH₄- og N₂O-udledningerne er endnu ikke opgjorte men forventes ikke at påvirke reduktionsmålet væsentligt, da der primært vil være tale om en parallelforskydning af de samlede udledninger i opadgående retning.

Metodeændringerne til det nationale udledningsestimat for organiske jorder for 2022 består primært af overgang til en pixelbaseret tilgang, hvor emissionen beregnes som en funktion af grundvandsstand og tørvedybde frem for som tidligere ved faste emissionsfaktorer. Desuden beregnes udledninger fra jorder med 6-12 % OC med den nye metode på samme måde som jorde med >12 % OC. Inklusionen af grundvandsstand og tørvedybde i beregningerne vil reducere udledningsestimatet i forhold til tidligere estimater, da det før har været antaget, at alle jorde var fuldt drænede og at udledningen dermed ikke var reduceret af høj GVS eller lille tørvedybde. Omvendt har inddragelsen af 6-12 % OC jorder med samme udledningsberegning bidraget til en forøgelse af den samlede emission, da det tidligere var antaget at disse jorder havde en udledning på halvdelen af højorganogene jorder. Samlet set betyder de to overordnede metodeændringer, at den beregnede nationale udledning er reduceret med 3 % i forhold til det foregående estimat.

Som følge af dette vil bidraget til det danske klimamål fra de organiske jorder forblive nogenlunde uændret, idet reduktionen i udledningerne fra 1990 til 2030 i KF24-opgørelsen var opgjort til 4054 kt CO₂-ækv., mens reduktionen med den nye metode opgøres til 4267 kt CO₂-ækv.

3 Ny model til opgørelse af CO₂-udledninger fra organiske jorder

Den tidligere nationale drivhusgasopgørelse for de organiske jorder var baseret på et tørvekort for 2010 (Tekstur2014, Adhikari et al., 2014) og målte danske emissionsfaktorer for jorder med et OC-indhold på >12 %. For jorder med 6-12 % OC, var der anvendt en emissionsfaktor på halvdelen % af dem for jorder med > 12 % OC (Nielsen et al. 2024a). Nyere forskning viste at dette grundlag var usikkert, både med hensyn til arealet og anvendte emissionsfaktorer. Samtidig kan der ikke anvendes IPCC-standardfaktorer i den danske opgørelse, fordi udledningerne fra de organiske jorder udgør en meget stor andel af de samlede udledninger, og derfor skal der anvendes nationalt udarbejdede faktorer. På denne baggrund blev der via KEFM allokeret finansielle midler til udvikling af en forbedret opgørelse.

Da CO₂-emissionen afhænger af dræningstilstanden (Tiemeyer et al., 2020; Evans et al., 2021; Koch et al., 2023), har der i projektet været fokus på at inddrage grundvandsstanden som parameter i den nye model.

I projektet er udviklet en model, hvor tørveudbredelse, -dybde og grundvandsstanden anvendes til beregning af udledningen af CO₂ fra de organiske jorder i den nationale emissionsopgørelse. Opgørelsen sker med udgangspunkt i Tørv2022-kortene og disses pixelværdier for OC-indhold og tørvedybde (Beucher et al., 2024), et grundvandsstandskort udviklet af GEUS (Koch et al., 2023) samt danske og tyske emissionsmålinger (Elsgaard, 2024).

I lighed med den nuværende opgørelse, inddrages kun arealer, som ligger inden for Internet Markkortet (IMK-kortet). IMK-kortet angiver den præcise beliggenhed af de enkelte marker i Danmark og indrapporteres af landmændene til Styrelsen for Grøn Arealomlægning og Vandmiljø (SGAV).

3.1 Den nuværende opgørelse som er afleveret til EU i marts 2024

Opgørelsen, der som blev afleveret til EU i marts 2024, er baseret på Tørv2022, udarbejdet af DCA i efteråret 2023 kombineret med de udledningsfaktorer (EF), som er anvendt i opgørelsen fra 2024, dvs. en differentieret EF for de organiske jorde (>12 % OC) på hhv. 11,5 t CO₂-C ha⁻¹ år⁻¹ for jorde med afgrøder i omdrift og 8,4 ton CO₂-C ha⁻¹ år⁻¹ for vedvarende græs, og de halve værdier for arealer med 6-12 % OC (Nielsen et al., 2024a). Sondringen mellem afgrøder i omdrift og vedvarende græs er foretaget på baggrund af SGAVs opdeling i Gødningsvejledningen med skønsmæssige ændringer af enkelte afgrødekoder som af SGAV er karakteriseret som " Græsmarksplanter, omdrift" og " Græs, permanent."

Implementeringen af Tørv2022-kortet i 2024-opgørelsen (år 1990-2022) medførte en mindre justering af basisåret (1990) på baggrund af en justering af arealet i 1975 i den danske jordklassificering. Det blev besluttet at fastholde arealet for 2010 (Tekstur2014-kortet) ud fra en vurdering af kvaliteten af 2010-kortlægningen. Den primære ændring i 2024 i forhold til tidligere opgørelser var en implementering af Tørv2022, som viste et betydeligt mindre areal i 2022 end tidligere antaget. Arealerne i opgørelsen blev herefter baseret på de tre tilgængelige kort for hhv. 1975, 2010 og 2022. Arealerne i de mellemliggende

år, mellem de tre tidspunkter, blev opgjort ved lineær interpolation mellem årene.

3.2 Ny model til opgørelse af CO₂-udledning

Som nævnt, da CO₂-emissionen afhænger af dræningstilstanden, har der i projektet været fokus på at inddrage grundvandsstanden (GVS) som parameter i den nye model, hvor udledningen beregnes ud fra en sigmoid (ikke-lineær) funktion med minimum- og maksimum-parametre, ofte kaldet en Gompertz-funktion. En sådan sigmoid-funktion anvendes allerede i den tyske nationale emissionsopgørelse (Tiemeyer et al., 2020) og forventes at blive mere udbredt inden for EU fremover.

I den nye model, vil emissionsopgørelsen fremadrettet blive opgjort på 10 × 10 m pixelniveau for hele arealet med organiske jorder, som indgår i Tørvekortene, dvs. tørveudbredelseskortene og for Tørv2022 endvidere tørvedybden (Landbrugsministeriet 1976, Adhikari et al., 2014, Beucher et al., 2024). Den samlede emission vil herefter være en sum af emissionen fra de enkelte pixler. For nuværende rapporteres kun udledninger fra organiske jorder, som ligger inden for landbrugsarealet, nærmere specifikt IMK-areale (SGAV, 2024). IMK-areale omfatter de markpolygoner som landbrugerne indtegner i SGAVs indberetningsværktøj og omfatter derfor ikke randzoner langs marker, bræmmer, arealer under hegn osv.

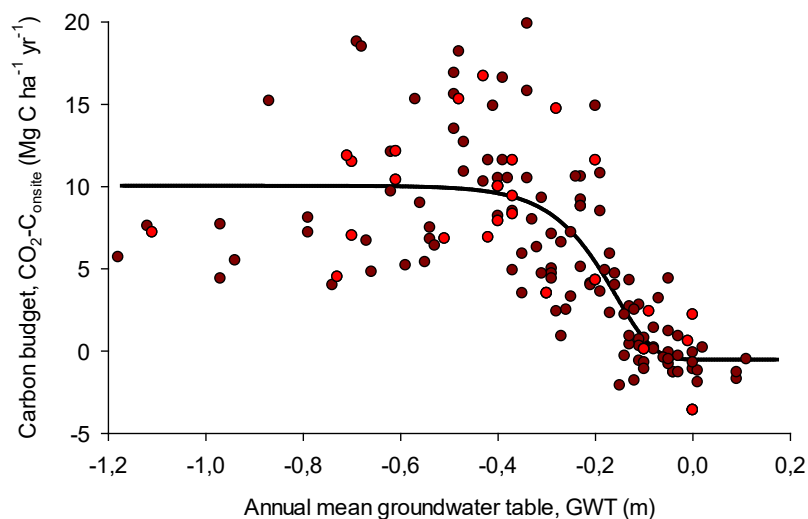
GEUS har udarbejdet et GVS-kort for lavtliggende områder i Danmark, som bliver anvendt i den nye model (Koch et al., 2023). Kortet er baseret på "Machine learning" og udarbejdet på baggrund af data fra bl.a. GEUS, DCA og DCE. Kortet angiver afstanden (negative GVS-værdier angiver en dybde under terræn) fra overfladen til en beregnet sommervandstand på 10 × 10 m pixelniveau for et areal, som dækker de organiske jorde og ådale (1,2 mio. ha). Kortets primære formål er at kortlægge den rumlige variation i middelgrundvandsstanden, da denne har stor betydning for emissionsberegningen. Kortets nøjagtighed er beskrevet i Koch et al. (2023). Usikkerheden er betydelig på pixelniveau, men vurderes at være robust på større skala, særligt til nationale emissionsopgørelser.

Da langt de fleste målinger til brug for udarbejdelsen af GVS-kortet er foretaget om sommeren, er kortet i første omgang et estimat for en typisk sommerperiode. Derudover stammer de fleste målinger fra år 2010 (foretaget i forbindelse med SINKS 1-projektet), og dermed repræsenterer GVS-kortet primært niveauet omkring 2010. I IPCC Guidelines og i publicerede studier af sammenhæng mellem CO₂-emission og GVS, anvendes den årlige middelvandstand. Det er derfor nødvendigt at omregne den beregnede sommervandstand til årlig middelvandstand, hvilket er gjort i artiklen af Koch et al. (2023). Da en dataanalyse viste at GVS i danske organiske jorder i gennemsnit ligger ca. 25 cm dybere om sommeren end om vinteren, foretages en omregning fra sommermiddelvandstand til årsmiddelvandstand som en generel korrektion på +12,5 cm for at få årsmiddelvandstanden. Korrektionen foretages på pixelniveau og flytter GVS tættere på terræn for negative GVS-værdier.

Der findes for nuværende ikke data eller tilstrækkeligt videnskabeligt grundlag for at bestemme hvordan GVS på organiske jorde har udviklet sig mellem 1990 og 2022. Det er således ikke muligt på nuværende tidspunkt at udvikle et GVS-kort for 1990 og det må antages, at GVS-kortet, udviklet i forbindelse med projektet, udgør det bedste tilgængelige estimat tilbage til 1990.

3.2.1 Udlædningsfunktion for CO₂ som funktion af drænet tørvedybde

I den nye model anvendes en sigmoid-funktion til at beskrive, hvordan udlædningen af CO₂ afhænger af GVS. Modellens parametre er bl.a. en minimumudlædning og en maksimumudlædning. På baggrund af en sammenstilling af danske og tyske data fra kammermålinger af CO₂ fluxe, har Elsgaard (2024) præsenteret en funktion (Fig. 1), hvor den maksimale udlædning blev opgjort til 10 ton CO₂-C ha⁻¹ år⁻¹ svarende til funktionen publiceret af Koch et al. (2023). Størsteparten af målingerne er udført på dybe, højorganogene lavbundsjord eller i højmoser (begge med >12 % OC).



Figur 1 Sammenstilling af resultater fra danske (røde punkter) og tyske (mørke punkter) målinger af netto CO₂-emissioner på organiske jorde, vist som funktion af den årlige middel grundvandsstand, GVS (= GWT). De viste data er sammenstillet fra Tiemeyer et al. (2020) og Koch et al. (2023). Den optrukne kurve angiver en tilpasset Gompertz-funktion. Fra Elsgaard (2024).

Funktionsforløbet i Fig. 1 beskrives i Elsgaard (2024) som:

$$\text{Ton CO}_2\text{-C ha}^{-1} \text{ år}^{-1} = -0,625 + 10,615 \cdot \text{Exp}[-7,436 \cdot (\text{Exp}(13,056 \cdot \text{GVS}))] \quad \text{Lign. 1}$$

hvor GVS den årlige middel grundvandsstand angivet som negativt tal i enheden meter. Funktionen anvendes i dette notat som:

$$\text{Ton CO}_2\text{-C ha}^{-1} \text{ år}^{-1} = -0,625 + 10,615 \cdot \text{Exp}[-7,436 \cdot (\text{Exp}(13,056 \cdot \text{GVS}'))] \quad \text{Lign. 2}$$

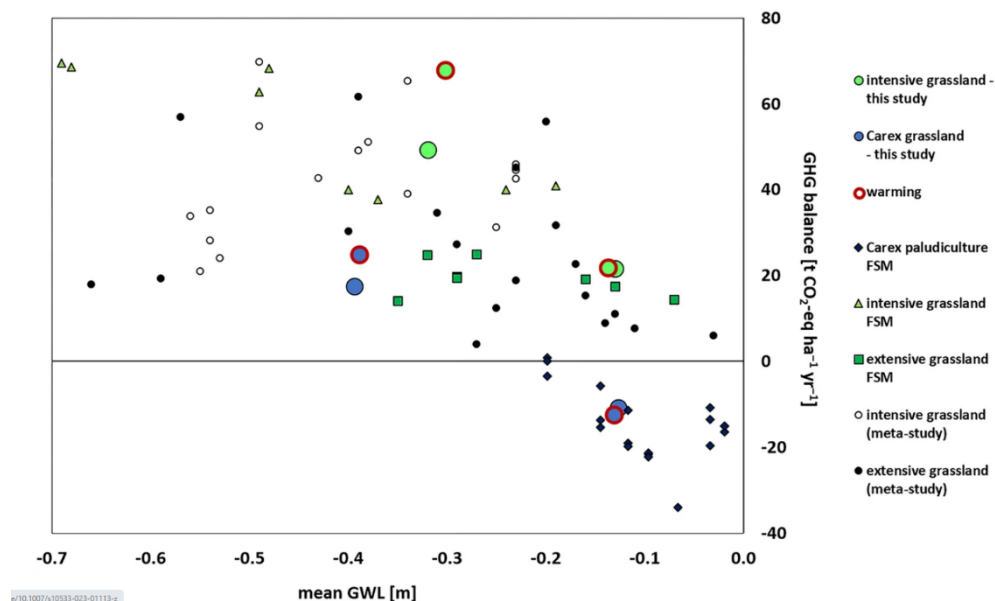
hvor GVS' er den drænedede tørvedybde, dvs. den værdi af GVS eller tørvedybden (-m) som ligger tættest på terræn. Som det fremgår af kurveforløbet, approksimeres den maksimale gennemsnitlige udlædning allerede ved en årlig middel GVS på ca. 50 cm under terræn.

Målinger med høj GVS (>-10 cm) viser i nogle tilfælde et optag af CO₂. Det anbefales dog for nuværende, at funktionsforløbet ikke anvendes til at beregne bindinger i landbrugsjorde, da dokumentationen for at der finder optag sted, ikke er tilstrækkeligt. Funktionen bør heller ikke udbredes til ikke-landbrugsarealer, da de primære data er udarbejdet til og på baggrund af data fra landbrugsarealer. I anvendelse af modellen, er alle estimerede negative udlædninger (CO₂-optag) derfor sat til 0.

3.2.2 Vedvarende græs og omdrift

IPCC Guidelines (IPCC, 2014) skelner mellem CO₂-emissioner fra arealer med vedvarende græs og omdriftsarealer, hvor vedvarende græs har en lavere udledning end afgrøder i omdrift, hhv. 3,8-6,1 ton C ha⁻¹ år⁻¹ og 7,9 ton C ha⁻¹ år⁻¹. Variationen i IPCC-værdierne for vedvarende græs er relateret til GVS, hvor der angives en emission på 3,8 ton C ha⁻¹ år⁻¹ for dårligt drænedede arealer med en GVS <-30 cm og 6,1 ton C ha⁻¹ år⁻¹ for næringsrige dybt drænedede arealer. Det datagrundlag, som indgår i IPCC Guidelines er noget uklart og indeholder en del litteratur, der ikke er fagfællebedømt. Holzknrecht et al. (2024) har gennemført et internationalt reviewstudie, hvor data primært fra de nordiske lande og Tyskland er blevet gennemgået for at finde evidens for systematiske forskelle mellem emissioner som følge af driftsformen (omdrift vs. vedvarende græs). Denne gennemgang fremhæver, at udledningen af drivhusgasser fra organiske jorde ikke påvirkes væsentligt af ændringer i arealanvendelsen fra arealer i omdrift til arealer med vedvarende græs; i stedet er udledningen tættere forbundet med GVS. Så selvom IPCC-standardemissionsfaktorer ofte er benyttet som grundlag for at konkludere, at der opnås en reduktion af drivhusgasemissioner ved at omlægge omdriftsarealer til græsarealer, fandt Holzknrecht et al. (2024) ingen signifikant forskel i CO₂- eller CH₄-udledning mellem disse arealanvendelser. Dette er også vist i tyske studier som omtalt nedenfor (Bockermann et al., 2024). Samlet set tyder resultaterne på, at det kan være mere korrekt at fokusere på grundvandsforvaltning end på arealanvendelse for at reducere udledningen af drivhusgasser fra organiske jorde (Holzknrecht et al., 2024). Hertil kommer også dybden af den tilbageværende tørveprofil.

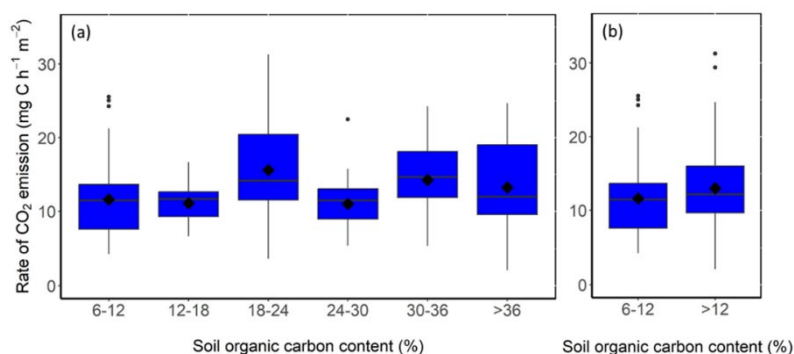
Figur 2 viser de tyske målinger opdelt på arealanvendelse. Det skal bemærkes, at målingerne viser den samlede drivhusgasudledning i CO₂-ækvivalenter, så tallene er inklusive lattergas og metan. Som nævnt, kan der ikke findes forskel mellem vedvarende græs og omdrift. At IPCC Guidelines skelner mellem vedvarende græs og omdrift, skyldes mest sandsynligt, at græs kan gro ved en højere vandstand og følgelig har en lavere gennemsnitlig GVS-betinget udledning. Da den nye metode med GVS-betinget emission allerede tager vandstanden i betragtning, bliver der derfor ikke skelnet mellem emissionsfaktorer for vedvarende græs og arealer i omdrift i det efterfølgende.



Figur 2 Drivhusgasudledninger i forskellige afgrøder i tyske målinger i forhold til GVS. Opgjort som summen af CO₂, Metan(CH₄) og Lattergas (N₂O). Efter Bockermann et al. (2024).

3.2.3 Indflydelsen af indholdet af organisk kulstof på CO₂-emissionen

Da udledningsfunktionen (Lign. 1 og 2) primært er baseret på højorganogene jorder med >12 % OC, og den danske definition af organiske jorder er >6 % OC, er der behov for en vurdering af udledningsfunktionen i forhold til den danske definition. Liang et al. (2024) har i laboratoriet målt udledningerne fra jorder med varierende OC i intervallet 6-50 % OC og ikke fundet signifikant forskel i CO₂-udledningen pr. arealenhed for topjorde med samme tørvedybde (Figur 3). I den nye model er det derfor antaget, at udledningsfunktionen også kan anvendes på jorder med 6-12 % OC.



Figur 3 Laboratiemålinger af emissionen af CO₂-C fra uforstyrrede organiske profiler af topjord (Liang et al., 2024). Data repræsenterer 103 organiske jorder i Danmark, opdelt i klasser med forskelligt organisk kulstof (OC) indhold (a) og samlet for de to klasser med 6-12 % OC og >12 % OC (b).

3.2.4 Tykkelsen af de organiske jorders profiler

Den observerede, løbende nedgang i det organiske areal skyldes, at det organiske stof forsvinder ved mikrobiel omsætning til CO₂. Derfor vil udledningen reduceres over tid, indtil jorderne er i ligevægt med den årlige tilførsel.

Dette sker når topprofilen nedbrydes, og der ikke længere findes dybereliggende organiske lag, som kan opretholde den øverste organiske jordprofil med et højt OC-indhold.

Hvis jorderne forbliver drænedede, vil de i denne proces over tid ikke længere blive klassificeret som organiske men som mineralske (dvs. med mindre end 6 % OC), hvor deres kulstofændringer i opgørelsen bliver opgjort med en dynamisk modellering (C-TOOL), som er mere detaljeret beskrevet af Nielsen et al. (2024a).

Der er udarbejdet to kort, hhv. et SOC-kort, som angiver det gennemsnitlige OC-indhold i de øverste 30 cm og et tørvedybdekort (Beucher et al., 2024). Udledningsfunktionen for CO₂ som funktion af GVS, er hovedsageligt baseret på dybe organiske jorder. Hvis den organiske profil ikke er særlig dyb, vil anvendelsen af funktionen overestimere udledningen, hvis GVS står dybere end den organiske profil. Profilens dybde defineres ud fra SOC-kortet og dybdekortet. OC-værdien i SOC-kortet er en beregnet gennemsnitlig SOC-koncentration i de øverste 30 cm uanset at tørvedybdekortet vurderer denne pixel til at have en dybde som er < 30 cm og helt ned til 0 cm. SOC-kortet har første prioritet i opgørelsen og tørvedybdekortet inddrages kun når tørvedybden er > 30 cm. Alle jorder som har en tørvedybde ≤ 30 cm klassificeres som værende 30 cm dybe.

Udledningen fra ≤ 30 cm jordprofiler er vurderet ud fra en gennemgang af litteraturen. Tallene viser en udledning på 60-80 % af det maksimale for en dyb tørvejord. Dette stemmer overens med figur 1, hvor den maksimale udledning opnås ved en GVS på ca. -30 til -50 cm under terræn. I tabel 1 er vist de litteraturdata, der er fundet med et organisk lag svarende til pløjelaget, dvs. jordens øverste 25 cm.

Tabel 1 Fundne litteraturdata for udledninger fra jorder med begrænset profildybde, hvor GVS er dybere end eller tæt på dybden af det organiske lag.

Lokalitet	Dybde	GVS, cm	% OC (± SE)	t CO ₂ -C ha ⁻¹ år ⁻¹	Kilde
DK_OT_SB	0-25	< -60	32 ± 0	6,2 ^a	Kandel et al.,2018
DK_OT_SB	25-50	< -60	6 ± 1		Kandel et al.,2018
DK_PO_SB	0-25	< -60	33 ± 0	5,8 ^a	Kandel et al.,2018
DK_PO_SB	25-50	< -60	6 ± 1		Kandel et al.,2018
Cmed W39	0-30	-39	34,3	8,5 ^b	Leiber-Sauheitl et al.,2014
Clow W29	0-30	-29	11,3	8,6 ^b	Leiber-Sauheitl et al.,2014
Gennemsnit				7,3	

SE, standardfejl på middelværdien; ^aSoil Respiration, ^bNECB = Net Ecosystem Carbon Balance.

For de ≤ 30 cm jorder anvendes i opgørelsen en udledning på 75 % per hektar i forhold til den maksimale udledning, jf. Lign. 2, hvis GVS ligger > 30 cm under terræn. Hvis GVS er ≤ 30 cm, anvendes GVS direkte i Lign 2.

Tabel 2 viser IMK-arealet med hhv. ≤ 30 cm jordprofiler og dybe tørvejorder jf. den anvendte fordeling af IMK-koderne på hhv. omdriftsarealer og vedvarende græsarealer. Arealerne er opgjort efter den klassificering for fordeling af arealer som anvendes i den nationale opgørelse (Nielsen et al., 2024a). For omdriftsarealer er ca. 50 % jordprofiler ≤ 30 cm, mens den resterende del er på dybe jorder med en profildybde > 30 cm. For vedvarende græs er der som

forventet en overvægt af dybe organiske jorder (63 %) fordi de typisk er mindre omsatte som følge af mindre intens dræning.

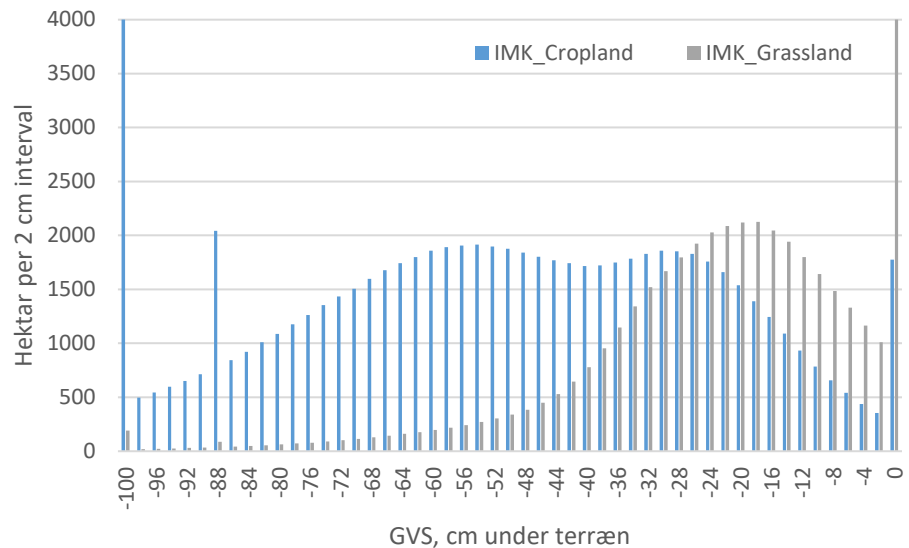
Tabel 2 Fordelingen af organiske jorder (>6 %) på <=30 cm jorder og dybe jorder i 2022 i hektar inden for IMKs landbrugsarealer.

	ha		I alt	%	
	<=30 cm jord	Dyb jord		<=30 cm	Dybe
IMK_Cropland	38659	36476	75135	51%	49%
IMK_Grassland	15488	26309	41797	37%	63%
I alt	54146	62785	116932	46%	54%

Brugen af Lign. 2 forudsætter en dyb organisk profil i hele funktionsforløbet, hvilket betyder at for profiler <= 30 cm skal funktionen begrænses. I opgørelsen kombineres de tre kort: SOC-kortet, tørvedybdekortet og GVS-kortet på følgende vis:

- Hvis tørvedybden er <= 30 cm på tørvedybdekortet, og GVS står dybere end tørvedybden, beregnes udledningen som 75 % af funktionens maksimale værdi = $10,0 * 0,75 = 7,5$ ton CO₂-C ha⁻¹ år⁻¹.
- Hvis tørvedybden er > 30 cm, og GVS står højere end tørvedybden, anvendes GVS kortets årsmiddelvandstand som grundlag for udledningsberegningen i henhold til Gompertz-funktionen.
- Hvis tørvedybden er > 30 cm og GVS står under tørvedybden, anvendes tørvedybden som beregningsgrundlag for udledningsberegningen i kombination med Gompertz-funktionen.

I figur 4 er vist GVS-fordelingen (årsmiddelvandstand) for de organiske jorder inden for IMK, fordelt på den anvendte arealklassifisering for Cropland og Grassland (Levin 2024). Denne opdeling kan ikke sammenlignes med en klassisk opdeling på afgrøder i omdrift og vedvarende græs, fordi en del "vedvarende" græsarealer indgår i den anvendte Cropland-definition. Arealer med en GVS under -100 cm og ≥ 0 cm er aggregeret. Som det ses, er arealer med organisk jord i omdrift generelt placeret på dybt drænedede jorder, mens de vedvarende græsarealer har en høj GVS, hvilket ud fra et dyrkningsmæssigt henseende er meget logisk. Som følge af DCEs arealklassificering, er det store areal inden for IMK_Cropland med høj vandstand (terræn-nær) ikke nødvendigvis et udtryk for at der er afgrøder i en-årig omdrift.



Figur 4 Fordelingen af hektar på 2 cm GVS-intervaller fordelt på hhv. IMK_Cropland og IMK_Grassland. Arealer med GVS på hhv. <-100 cm og > 0 cm er summerede, hvorfor det høje arealtal. Søjlen ved -88 cm skyldes en systemafhængig teknikalitet. De pixler der bliver modelleret med dyb GVS har fået tildelt en GVS sommervandstand på -100 cm som ved omregning til årsmiddelvandstanden bliver til -88 cm.

Tabel 3 viser de gennemsnitlige GVS i hhv. GVS-kortet og den beregnede gennemsnitlige effektive udlednings-GVS' (dvs. korrigeret til tørvedybden i tilfælde, hvor tørven ikke når ned til GVS) i forhold til udledningsfunktionen for jorder, der er klassificeret som dybe. Det fremgår, at udledningen bliver korrigeret for mange af pixlerne i omdriftsarealer (Cropland) til en lavere udledningsbetinget GVS som følge af, at den organiske profil ligger højere end GVS. For omdriftsarealer, korrigeres den gennemsnitlige GVS til GVS' således fra -52 cm til -39 cm. For de vedvarende græsarealer (Grassland) korrigeres kun i begrænset omfang, hvilket er en kombination af, at de oftere er dybe og samtidig har højere GVS. Den gennemsnitlige korrektion er her kun 1 cm.

Tabel 3 Gennemsnitlig GVS ifølge GEUS' kort og effektiv GVS (GVS'), som er korrigeret for tørvedybde, cm

Arealklasse	GEUS, GVS	Effektiv GVS (GVS')
IMK_Cropland	-52	-39
IMK_Grassland	-23	-22

4 Beregnede udledninger for 2022

Den nationale opgørelse inkluderer kun det areal, som ligger inden for SGAV's IMK-markkort og som er vurderet som landbrugsareal, dvs. med udeladelse af afgrødekoder for f.eks. juletræer og skov. Disse arealer ligger alle inden for LULUCF-opgørelsens arealklasser for Cropland og Grassland. Opgørelsen for 2022 udarbejdes på pixelniveau (10 × 10 m) som summeres.

Tabel 4 viser de beregnede gennemsnitlige EF for omdrifts- og græsarealer i 2022 for hhv. ≤ 30 cm jorder og de dybe jorder. Det ses, at de beregnede gennemsnitlige udledninger er opgjort til 5,78 ton C ha⁻¹ år⁻¹ for de ≤ 30 cm omdriftsjorder og 7,15 ton C ha⁻¹ år⁻¹ for de dybe jorder. For IMK_Grassland-arealerne, er de beregnede årlige udledninger betydeligt lavere. De hidtidige opgørelsesmetode skelnede mellem udledningsfaktorer for 6-12 % OC og >12 % OC jorder, hhv. på 5,75 og 11,5 ton C ha⁻¹ år⁻¹ for omdriftsarealer og med 4,2 og 8,4 ton C ha⁻¹ år⁻¹ for vedvarende græs (Nielsen et al., 2024a). Den nye model omfordeler udledningerne, som gør at det ikke er muligt at foretage en direkte sammenligning. Der er sket en generel opjustering af udledningerne fra 6-12 % jorder og en nedjustering af udledningerne fra jorder med >12 % OC. Dette skal kombineres med en vandstandsafhængighed og inkludering af tykkelsen på den organiske profil.

Den lave EF for vedvarende græs er en funktion af en generel høj vandstand for disse pixelværdier. Hvis DCEs fordeling af IMK-afgrødekoder var anderledes med flere græskoder placeret i "Grassland-kategorien", ville dette medføre en lidt højere gennemsnitlig EF for vedvarende græs. Denne ville dog være afhængig af de enkelte pixels værdier for GVS og tørvedybde og en tilsvarende lavere EF for "Cropland-kategorien." Den samlede udledning vil dog være præcis den samme. En generel overførsel af de ovenstående udledningsfaktorer til andre forhold er derfor ikke muligt, og beregninger af udledninger under andre forhold skal derfor ske med anvendelse af stedspecifikke data.

Tabel 4 Beregnede gennemsnitlige udledningsfaktorer, ton CO₂-C ha⁻¹ år⁻¹ fra hhv. IMK_Cropland som primært er omdriftsarealer og græs i omdrift og for IMK_Grassland som udelukkende er vedvarende græsarealer.

Arealklasse	Ton CO ₂ -C ha ⁻¹ år ⁻¹	
	EF, ≤ 30 cm jord	EF, Dyb Jord
IMK_Cropland	6,42	8,07
IMK_Grassland	3,40	5,14

Den samlede CO₂-udledning for 2022 er opgjort i tabel 5 til 762 kt CO₂-C svarende til 2.795 kt CO₂. Dette er 80,8 kt CO₂-ækv. lavere, svarende til knap 3 % i forhold til den seneste rapportering for 2022. I opgørelsen til EU, med andre emissionsfaktorer er de samlede udledninger opgjort til 784 kt C svarende til 2.876 kt CO₂, inklusiv udvaskning af opløst organisk stof, DOC (Nielsen et al., 2024a). DOC er organisk stof som følger drænvandet ud i bække og åer. Dette udgør en meget lille del af udledningerne fra de organiske jorder. I opgørelsen for dybe jordprofiler anvendes IPCCs standardemissionsfaktor for DOC (IPCC, 2014) og for ≤ 30 cm jordprofiler er den reduceret til 75 % af standardemissionsfaktoren på 310 kg CO₂-C ha⁻¹ år⁻¹.

Tabel 5 Estimerede CO₂-udledninger i 2022, inkl. udvaskning af opløst organisk stof (DOC).

	Ha		EF		Udledning	
	<= 30 cm jord	Dyb jord, ha	<= 30 cm	Dyb jord	t CO ₂ -C år ⁻¹	kt CO ₂ år ⁻¹
IMK_Cropland	38659	36476	6,42	8,07	542,6	1989,4
IMK_Grassland	15488	26309	3,38	5,14	187,6	687,7
Arealer	54146	62785			730,1	2677,1
Udvasket, DOC			0,233	0,310	32,1	117,5
I alt					762,2	2794,7
Rapporteret 2022 i 2024, Fra arealer					759,1	2783,2
Rapporteret 2022 i 2024, Udvasket, DOC					25,2	92,3
I alt, rapporteret i 2022 i 2024					784,2	2875,5
Forskkel mellem gammel og ny metode					-22,0	-80,8

De lavere gennemsnitlige EF for vedvarende græs skyldes dels omplaceringen af nogle vedvarende græsarealer til omdrift og dels at disse arealer ligger på jorder, som har meget høj vandstand (Figur 4).

5 Opgørelse af tidsserien 1990 til 2022 samt KF24

Ved opgørelsen tilbage i tid, er der brug for at foretage en del antagelser, fordi der ikke findes viden om arealanvendelsen på IMK-niveau, den fysiske udbredelse af de organiske jorder, deres tørvedybder og deres aktuelle GVS på pixelniveau. Dette gør det meget usikkert at afklare ændringen i samlede emissioner mellem 1990 og 2022.

5.1 Data til rådighed

Disse data er til rådighed for udarbejdelsen af en tidsserie

- Tørvevektorkort for 1975, defineret ud fra jordens øverste 20 cm dybde (Landbrugsministeriet, 1976)
- Tørvepixelkort for 2010 (Tekstur2014) på $30,4 \times 30,4$ m defineret ud fra jordens øverste 30 cm (Adhikari et al., 2014)
- Tørvekort for 2022 på 10×10 m, der er et % SOC-kort defineret ud fra jordens øverste 30 cm (Beucher et al., 2024)
- Tørvedybde for 2022 på 10×10 m (Beucher et al., 2024)
- Nedskrivningsfunktion for SOC på 0,16 %-point per år for jordprofiler ≤ 34 cm (Beucher et al., 2024)
- GVS-kort på 10×10 m, som antages at gælde for hele perioden 1990 og frem (Koch et al. 2023)
- DCEs årlige arealmatricer med opdeling af hele landet på 25×25 m i af-rapporteringsklasserne, jf. IPCC med overlap af IMK-kortet fra 2011 og frem (Nielsen et al. 2024a)
- IMK kort fra 2010 (SGAV, 2024)
- Markblokkort af meget forskellig kvalitet og med forskelligartet indhold tilbage til 1998 (SGAV, DCE-egen datasamling)

5.2 Opgørelsen 1990-2022

Som følge af, at udledningen i 2022 er en sammenkobling af en ikke-lineær sigmoid-funktion, en varierende GVS og en varierende tørvedybde, er det ikke muligt at opstille en samlet model, som kan føres tilbage i tid. Der er derfor behov for at der arbejdes med udledningsklasser, som på bedst mulig måde kan definere emissionsfaktorer (EF) for afgrænsede klasser uden at overparametrisere antagelserne.

Som udgangspunkt anvendes de fire udledningskategorier, som er nævnt i tabel 4: Jordprofiler med ≤ 30 cm i hhv. Cropland- og Grassland-kategorierne samt to beregnede gennemsnitsværdier for de dybe jorder.

Det er muligt at udvide GVS-kortet til at omfatte det samlede areal af 1975-kortet, Tekstur2014 og Tørv2022, men da der ikke kendes tørvedybder for disse arealer, kan der ikke direkte udarbejdes udledningsestimater med Lign. 2. Dybdekortet for Tørv2022 har en r^2 værdi på 0,33 (dvs. en forklaringsgrad på 33 %), hvilket er lavt. Det antages, at et muligt tørvedybdekort for 2010 vil have tilsvarende usikkerhed. Da der ikke findes et tørvedybdekort for andre år end 2022, er det antaget, at arealet med ≤ 30 cm jordprofiler i Tørv2022 er konstant og GVS-kortet har samme fordeling i 2010 og 1990 (1975), uagtet at kortene dækker forskellige arealer.

Den opstillede model opdeler udledningerne fra hhv. ≤ 30 cm jordprofiler og dybe jorder. Omfanget af ≤ 30 cm jordprofiler tilbage i tid kendes ikke. På trods af at enkelte jorde skifter kategori fra dybe til ≤ 30 cm profiler og fra ≤ 30 cm jorder til mineral jorde, antages det at det samlede areal af ≤ 30 cm jordprofiler er konstant, fordi ≤ 30 cm jordprofilerne befinder sig i periferien af tørveområderne og det antages at der forsvinder lige så store arealer ud af kategorien (overgår til mineral jorde) som der tilføjes fra arealer, som tidligere var kategoriseret som dybe tørvejorde. Dermed er det kun arealet af klassen dybe tørvejorde som reduceres over tid i de historiske opgørelser.

Med disse antagelser kan de gennemsnitlige EF anvendes sammen med antagelser om arealanvendelsen.

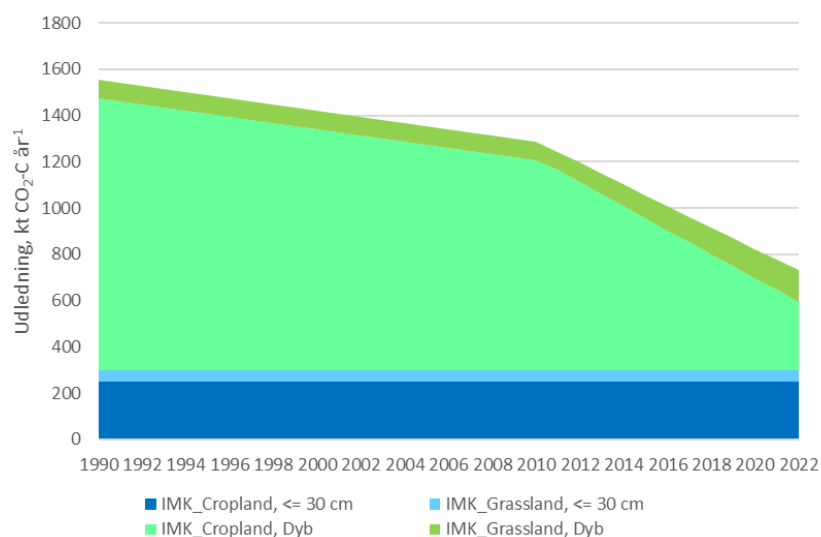
Arealanvendelsen er opgjort ud fra SGAV's kortmateriale (IMK). Disse findes tilbage til 2010. Før dette, findes markblokkortene tilbage til 1998. Markblokkortene indeholder i gennemsnit ca. 3 marker per markblok hvor den specifikke afgrødes placering inden for markblokken er ukendt. Erfaringer med placeringen af de enkelte marker ved sammenligninger ud fra flyfoto, markblokkort og de tidlige IMK-kort er, at vedvarende græsmarker, som ligger på de organiske jorder inden for markblokken, typisk ligger det samme sted. Tilbage i tid har der været en stor udvikling i afgrødekoder. Det vil derfor være umuligt at inddrage viden om en mere præcis dyrkning af markerne ud fra de tidlige afgrødekoder. Kombineret med en usikkerhed på placeringen antages, at arealet med vedvarende græs på organiske jorder er konstant og kan anvendes tilbage til 1990 ved en kombination af IMK og Arealmatricen for 2011 (Nielsen et al., 2024a). Årstallet 2011 er valgt, da arealmatricen findes på pixelniveau i 2011, men ikke for 2010. Det skal nævnes, at i denne sammenhæng kan arealstatistikkerne fra Danmarks Statistik ikke anvendes, fordi de ikke repræsenterer samme opgørelses-/fordelingsmetode.

Det antages at fordelingen af GVS over tid er den samme som vist i figur 4, og dermed at fordelingen af de områder, som ligger inden for Tørv2022s dybdekort, kan anvendes som proxy for hele tidsserien. Som for 2022-opgørelsen, er fordelingen af afgrødekoderne på Cropland og Grassland foretaget på samme måde som i den nationale opgørelse (Nielsen et al. 2024a). Hvis man foretog en anden fordeling af IMK-koderne, ville det påvirke de gennemsnitlige retninger i tabel 4, men da opgørelsen er en summering af udledningen fra de enkelte pixler (knap 12 mio. i alt), vil dette ikke påvirke det samlede estimat.

Arealfordelingen af organiske jorder i 2022 er vist i tabel 2. Heraf fremgår, at 41.797 ha blev klassificeret inden for IMK_Grassland. I 2011, er dette areal opgjort til 30.761 ha. Årsagen til stigningen i dette areal kan skyldes flere faktorer, herunder landbrugernes indrapportering til IMK, tilskudsordninger til mere permanente græsarealer osv. Det antages i dette notat, at der findes et konstant areal på 30.761 ha som klassificeres inden for IMK_Grassland for perioden 1990-2011.

Arealet, som håndteres som IMK_Cropland, vil derfor være forskellen mellem det totale areal med >6 % OC fratrukket arealet med IMK_Grassland.

Som vist i tabel 3, er den gennemsnitlige GVS inden for IMK_Cropland -52 cm, og når der tages hensyn til tørvetykkelsen i nedbrydningsfunktionen (Lign.2), bliver den gennemsnitlige effektive udledningsdybde -39 cm. Som følge af nedbrydningen af det organiske materiale i jorden, vil tørvetykkelsen have været større tilbage i tid. En analyse af jordprøverne taget i forbindelse



Figur 6 Beregnede CO₂-udledninger 1990-2022 for de fire forskellige arealklasser opgjort som kt CO₂-C år⁻¹.

For 2023 og frem, vil der ikke blive beregnet årlige EF men kun opgjort absolute udledninger ud fra summen af pixelværdierne inden for de forskellige arealkategorier. Disse kan omregnes til årlige emissionsfaktorer.

Tabel 6 Beregnede gennemsnitlige udledningsfaktorer, ton CO₂-C ha⁻¹ år⁻¹ fra hhv. IMK_Cropland (primært omdriftsarealer og græs i omdrift) og IMK_Grassland (vedvarende græsarealer). Tallene er ekskl. udvasket organisk stof, DOC.

Arealklasse	EF	EF				
	<= 30 cm jordprofiler	Dyb Jord				
	1990-2022	1990	2011	2022	Ændring 1990-2022	% reduktion i EF fra 1990 til 2022
IMK_Cropland	6,42	8,18	8,16	8,07	0,11	1,40%
IMK_Grassland	3,38	5,16	5,15	5,14	0,02	0,40%

5.3 Opgørelse fra 2022 og 2023 samt fremskrivninger

Den præsenterede nye opgørelsesmetode for IMK-arealerne vil fremadrettet være baseret på den aktuelle anvendelse (IMK-kode) og den givne lokalitet (GVS) samt nedskrivning af arealer som klassificeres med <= 30 cm jordprofiler, jf. opgørelsesmetoden i Beucher et al. (2024). Denne metode blev anvendt i Klimafremskrivningen udarbejdet i 2024 (KF24). Metoden anvender en nedskrivning af OC-procenten i jordprofiler <34 cm med 0,16 %-point år⁻¹, mens arealet med dybe jorder holdes konstant.

Tabel 7 viser de estimerede udledninger for 1990, 2011, 2022 samt for 2030, 2035 og 2040 med KF24 forudsætninger for udtagning af organiske lavbundsarealer (Nielsen et al., 2024b). Tallene for 2030 og frem skal anses for foreløbige, idet der kan ske mindre justeringer i hvilke lavbundsarealer som udtages. I KF24 (Nielsen et al., 2024b) indgik ikke omfanget af dybe organiske jorder. I KF25 anvendes, udover ovennævnte omklassificering til mineraljord, en nedgang i arealet med dyrkede organiske jorder, hvor proportionsforholdene mellem udtagne <= 30 cm jordprofiler og dybe jorder ikke er endelig fastlagt. For 1990, er udledningen opgjort til 5,929 mio. ton CO₂, i 2022 til 2,795 mio. ton CO₂ og faldende til 1,662 mio. ton CO₂ i 2030, svarende til en reduktion på 72 % af 1990-niveauet. De angivne tal inkluderer ikke udledninger af CH₄ og

N₂O, CH₄- og N₂O-udledningerne er endnu ikke opgjorte, men forventes ikke at påvirke reduktionsmålet væsentligt, da der mere eller mindre vil være tale om en parallelforskydning af de samlede udledninger i opadgående retning.

Tabel 7 Udledninger fra organiske jorder (> 6 % OC) for 1990, 2011, 2022 og fremskrevne udledninger (KF 24) for 2030, 2035 og 2040.

Udledninger	Ny opgørelse			Med KF24		
	1990	2011	2022	2030	2035	2040
Areal > 6 % OC, ha	213073	175144	116932	73021	61527	53593
IMK_Cropland, kt C år ⁻¹	1424	1111	543	Ikke opdelt i Cropland		
IMK_Grassland, kt C år ⁻¹	131	131	188	og Grassland		
	1555	1242	730	433	359	309
DOC, kt C år ⁻¹	62	50	32	20	17	15
I alt, kt CO ₂ år ⁻¹	5929	4739	2795	1662	1379	1188
Ændring fra 1990, kt CO ₂ år ⁻¹				4267	4550	4740
% reduktion siden 1990				72%	77%	80%

Tabel 8 viser de tilsvarende tal, hvor der i fremskrivningen ikke er taget højde for en udtagning af organiske landbrugsjorder, jf. KF24. Det mindre areal i 2030 og frem skyldes forventede konvertering af organiske jorder med >6 % OC til mineraljorder (<= 6 % OC).

Tabel 8 Beregnede udledninger fra organiske jorder for 1990, 2011, 2022 og fremskrivninger for 2030, 2035 og 2040 uden udtag af organiske jorder, jf. KF24.

Udledninger	Ny opgørelse			Uden KF24		
	1990	2011	2022	2030	2035	2040
Areal > 6 % OC, ha	213073	175144	116932	96377	89289	81358
IMK_Cropland, kt C	1269	991	484	Ikke opdelt i Cropland		
IMK_Grassland, kt C	109	108	155	og Grassland		
	1378	1099	639	599	554	503
DOC, kt C	62	50	32	27	26	24
I alt, kt CO ₂	5278	4214	2462	2298	2125	1931
Ændring fra 1990, kt CO ₂				3631	3804	3997
% reduktion siden 1990				61%	64%	67%

Til sammenligning vises i tabel 9 de opgjorte udledninger, der blev afrapporteret til EU i marts 2024.

Tabel 9 Rapporterede udledninger fra organiske jorder for 1990, 2011, 2022 og KF24 for 2030, 2035 og 2040 indberettet til EU i marts 2024.

Udledninger	Gammel opgørelse			Med KF24		
	1990	2011	2022	2030	2035	2040
Areal > 6 % OC, ha	213073	175144	116932	73021	61527	53593
IMK_Cropland, kt C	1040	806	286	179	145	127
IMK_Grassland, kt C	560	464	473	293	246	228
	1600	1270	759	472	391	355
DOC, kt C	49	39	25	16	13	12
I alt, kt CO ₂	6046	4799	2876	1788	1482	1346
Ændring 1990, kt CO ₂				4258	4563	4699
% reduktion siden 1990				70%	75%	79%

6 Usikkerheder

Grundlæggende er det biologiske processer, der styrer CO₂-dannelsen fra organiske jorde, hvor mange faktorer påvirker emissionerne. Der er således betydelig usikkerhed forbundet med opgørelsen som ikke let kan kvantificeres. I det følgende gives en kvalitativ gennemgang af datagrundlaget og de parametre, som indgår.

Usikkerhedsvurderingen er meget afhængig af, hvilket niveau man betragter. Om det er usikkerheden på udledningen fra den enkelte pixel, på markniveau eller på nationalt niveau for et givet år, eller om det er usikkerheden på ændringen i udledningen over tid, f.eks. bidraget til det danske klimamål. Hvis variationen eller spredningen på de indgåede variable har en normalfordeling for de enkelte delkomponenter, kan man antage at summen af de mange pixler udgør en sand middelværdi for CO₂-udledningen.

Det kræver at:

- Tørvekortets samlede areal kan opfattes som en repræsentativ middelværdi
- Fordelingen af tørvedybderne er normalfordelte og der ikke er nogen bias
- GVS er normalfordelt og der ikke er nogen bias
- Udledningsfunktionen er en repræsentativ funktion for den gennemsnitlige nedbrydningsrate
- De antagelser der er anvendt til etablering/konstruktion af 1990-udledningen, er valide.

En bias (skævvridning) på de parametre der anvendes som konstante for hele tidsserien vil påvirke klimamålet. Dette skyldes at klimamålet er et mål i relative termer. Samtidig vil det også påvirke den absolutte udledning, hvis der forekommer ændringer i nogle af parametrene.

Det er ikke muligt at tilvejebringe historiske data, der ikke eksisterer, derfor er det kun ændringer i de anvendte antagelser om arealanvendelsen som vil kunne påvirke opgørelsen. Det vurderes, at estimatet af tørvearealet for basisåret 1990 vil forblive uændret. Der vil være en mulighed for at Tørv2022-kortet kan forbedres, hvilket vil påvirke de samlede udledningerne enten i opad- eller nedadgående retning. Beucher et al. (2024) har vurderet at Tørv2022 har en nøjagtighed på 75 %.

Tørvedybde-kortet har en væsentlig indflydelse på det samlede estimat. Som vist i tabel 3, bliver udledningsestimatet ofte begrænset af tørvedybdekortet og ikke af GVS-kortet for de arealer som er klassificeret som arealer i omdrift. Dette har mindre betydning for de arealer som er klassificeret med vedvarende græs, fordi de ofte er mere våde.

Nedbrydningen af organisk stof sker primært i de øverste 50 cm fra jordoverfladen. For GVS-kortet, angiver Koch et al. (2023) en middelfejl i grundvandsstanden i intervallet 0-50 cm af -20 cm i forhold til målt GVS (-5 cm i forhold til alle træningsdata). Derudover foretager Koch et al. (2023) en scenariekørsel som inkluderer denne usikkerhed, dvs. grundvandsstandskortet er korrigeret med middelfejlen. I basisscenariet i Koch et al. (2023) er der opgjort en udledning på 2,6 mio. ton CO₂-ækv. år⁻¹ og i scenariekørselen en udledning som er

23 % lavere på 2,0 mio. ton CO₂-ækv. år. Analysen udført af Koch et al. (2023) omfatter kun jorder med >12 % OC, og scenariekørslen understreger følsomheden af GVS i estimering af CO₂. Ifølge GEUS, har "GVS-kortet en systematisk fejl i forhold til observationerne, hvor de højere GVS bliver simuleret for dybt, og de dybe GVS bliver simuleret for højt. Fejlen skyldes formentlig primært den tidlige forenkling, at grundvandsstandsobservationer, som stammer fra forskellige tidspunkter blandes sammen uden at tage højde for datoer, hvilket gør GVS-dataene usikre." GEUS vurderer, at man ikke kan konkludere, at modellen generelt simulerer en for lav GVS. Derfor vurderes at GVS-kortet er det sikreste udgangspunkt til brug for en udledningsberegning vha. udledningsfunktionen (Lign. 2).

I forbindelse med fremskrivningen, er det antaget, at der forsvinder 0,16 %-point OC år⁻¹ for organiske jorder, som har en profil, som er mindre end 34 cm. Ifølge Beucher et al. (2024), er der en stor usikkerhed i denne vurdering, hvorfor nedskrivningen af det organiske areal i fremskrivning med 20.500 ha, som frem til 2030 overgår til at være mineraljord, er forbundet med en stor usikkerhed (Klimafremskrivning 2024).

Valget af en sigmoid-funktion (Gompertz-funktion) til at beskrive sammenhængen mellem nettoudledningen CO₂ og den årlige middelgrundvandsstand på de organiske jorder (Figur 1), er en pragmatisk tilgang til en kompleks problemstilling. Samme tilgang anvendes i den tyske nationale emissionsopgørelse (Tiemeyer et al., 2020), og er ligeledes benyttet af Koch et al. (2023) samt i EU-projektet MARVIC, hvor der indgår data fra flere forskellige EU-lande og målemetoder (Jens Leifeld, Agroscope, Schweitz, pers. comm.). En tilsvarende responsfunktion benyttes også til at beskrive CO₂-emissionen fra økosystemrespiration på hollandske organiske jorde, selvom den ikke dækker øvrige kulstofbalancer (Nijman et al., 2024).

Gompertz-funktionen forudsætter, at den mikrobielle aktivitet og CO₂-dannelse i drænedede jorde aftager med dybden, hvilket medfører, at CO₂-emissionen er størst i de øverste lag af jorden (fx 0-30 cm) sammenlignet med dybere jordlag (fx 50-70 cm). Dette bygger på antagelsen om, at nedbrydningen af den dybere og mere oprindelige tørv sker langsommere end i de øvre jordlag, som er påvirket af kulturtekniske dyrkningstiltag som kalkning, gødskning og pløjning. Empiriske undersøgelser af mikrobiel aktivitet i forskellige dybder af tørvejorde understøtter denne sammenhæng (Saurich et al., 2019; Quadra et al., 2023). Flere faktorer kan begrænse den mikrobielle respiration og vækst i dybere jordlag, herunder mangel på næringsstoffer, lavt pH og svært omsætteligt organisk kulstof.

Der findes dog også publicerede modeller, der ikke anvender en asymptotisk Gompertz-funktion, men i stedet antager en lineær sammenhæng mellem jordens dræningsdybde og CO₂-emission (Evans et al., 2021). Begge modeller er behandlet i Koch et al. (2023), hvor det konkluderes, at der opnås bedre fit til de danske empiriske data ved brug af en Gompertz-funktion end ved en lineær model.

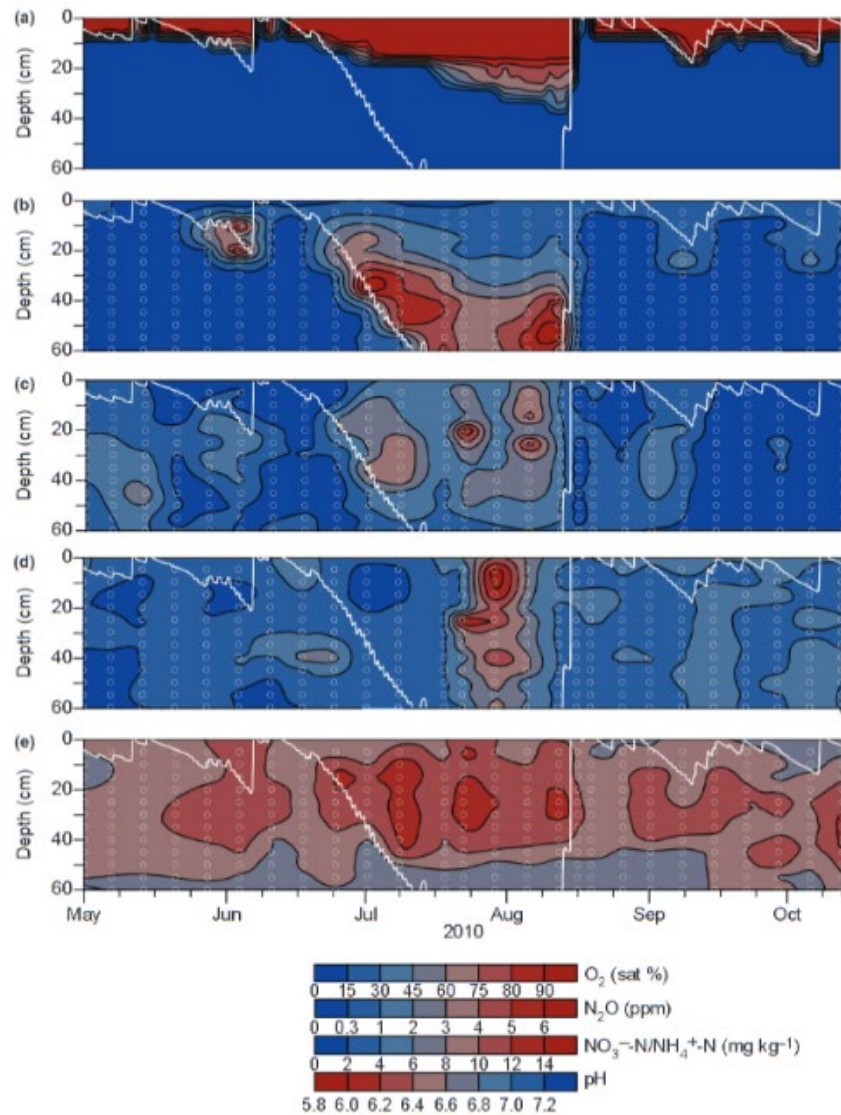
Valget af en sigmoid-funktion betyder, at der opnås en maksimal udledning ved en given drænet tørvedybde, og at udledningen ikke stiger selvom drændybden øges yderligere. For de empiriske data vist i figur 1, opnås en maksimal udledning på ca. 10 ton CO₂-C ved en GVS på 40-50 cm dybde. Det betyder at funktionens dynamiske område ligger i dybden mellem 0 og 40-50 cm

GVS. Data for målte CO₂-udledninger ved lave årlige middelgrundvandsstande og en korrekt modellering af den årlige middelvandstand samt den tilbageværende tørvedybde er derfor meget afgørende for resultatet af den nye model for opgørelse af CO₂-emissionen.

I takt med at flere metoder og empiriske CO₂-målinger bliver tilgængelige, vil nye data kunne integreres og bidrage til at kvalificere funktionsudtrykket vist i figur 1. En bredere datasyntese med målinger fra flere Europæiske lande og typer af organisk jorder tyder på inddragelse af CO₂-målinger ved brug af mikrometeorologiske metoder (Eddy Covarians målinger) kan bidrage til generelt lavere emissionsestimater. Sådanne målinger foreligger dog endnu ikke for drænedede organiske landbrugsjorde i Danmark, og systematiske sammenligninger mellem forskellige målemetoder er fåtallige (Poyda et al., 2017; Schrier-Uijl et al., 2009). Den valgte metode baseres alene på årsmiddelvandstanden, da det er disse data som er til rådighed fra kammermålinger af CO₂-udledning og den tilgang som anvendes i internationale studier. Reelt vil emissionen være størst om sommeren og sommervandstanden vil muligvis være en bedre indikator for års-emissionen. Nogle arealer vil ligeledes have en større sæsondynamik (vinter minus sommervandstand) end andre, hvilket der ikke tages højde for med den valgte metodik.

Nedbrydningen af organisk stof sker både når jorden er vandmættet, og dermed iltfattig, og når jorden er drænet og dermed iltrig. Under vandmættede forhold, går nedbrydningen dog meget langsommere. Nedbrydningen af organisk stof til CO₂ kræver ilt (O₂) eller en anden elektronacceptor, som fx nitrat eller sulfat. Heraf er O₂-koncentrationen ned gennem jordprofilen den vigtigste komponent. I figur 7 er vist modellerede O₂-koncentrationer ned gennem en mosejord (Maglemosen nord for København, Jørgensen et al., 2012). Det kan konstateres, at O₂-koncentrationen er meget lav ved 30 cm under terræn, selv når grundvandet står betydeligt dybere, hvilket passer godt med, at målte nedbrydningsdata har sit maksimum inden dette grundvandsniveau nås (figur 1). Den biologiske aktivitet i relation til O₂-koncentrationen er bl.a. målt af Parr og Reuszer (1959). Luftens indhold af O₂ er 21 %. Ved en O₂-koncentration på 2,5 %, var den biologiske aktivitet reduceret med 30 % og ved en O₂-koncentration på 0 %, var den biologiske aktivitet reduceret med 87 %.

Dette bidrager til forståelsen for at anvende en model som har et maksimum udledning i forhold til grundvandsstanden.



Figur 7 Målte/modellerede O₂-koncentrationer i Maglemeden, øverste figur (a). Fra Jørgensen et al. (2012).

Langt hovedparten af de målte udledninger der anvendes til bestemmelse af nedbrydningsfunktionen, er udført på tørvejorder med højt til meget højt indhold af organisk kulstof. Den danske definition af organiske jorder omfatter jorder med >6 % OC. Liang et al. (2024) har i laboratorieforsøg målt samme respirationsrater over en stor variation i % OC, hvor jordprøverne er udtaget i en dybde på mellem 10-15 cm, dvs. i den øverste jordprofil. Her er der ikke fundet signifikante sammenhænge mellem CO₂-emission og % OC eller totalt kulstofindhold. Spredningen på de målte respirationsrater er meget stor for de forskellige grupper med samme OC-indhold (figur 3).

I vurderingen af udledningerne, er der som udgangspunkt antaget, at man kan overføre nedbrydningsfunktionen (Lign. 1) til jorder med 6-12 % OC i det omfang at de har samme dybde som jorder med >12 % OC i mangel på bedre data; ligesom det antages at jorder med 6-12 % OC ikke har samme dybde som jorder med >12 %, fordi udbredelseskortet som indeholder gennemsnits-OC % i de øverste 30 cm, ikke direkte kan sammenlignes med tørvedydekortet. Disse antagelser er forbundet med en stor usikkerhed.

7 Konklusion

Den nye model vurderes at estimere de organiske jorders udledninger af CO₂ med en højere nøjagtighed af fordelingen af udledningerne mellem forskellige jordbundsforhold og OC-indhold end den hidtidige anvendte metode. Der er dog store usikkerheder forbundet med modellen, som ikke umiddelbart kan kvantificeres.

Metodeændringerne til det nationale udledningsestimat for organiske jorder for 2022 består primært af overgang til en pixelbaseret tilgang, hvor emissionen beregnes som en funktion af grundvandsstand og tørvedybde frem for som tidligere ved faste emissionsfaktorer. Desuden beregnes udledninger fra jorde med 6-12 % OC med den nye metode på samme måde som jorde med >12 % OC. Inklusionen af eksplicit GVS og tørvedybde i beregningerne vil reducere udledningsestimatet i forhold til tidligere estimater, da det før har været antaget, at alle jorder var fuldt dræned, og at udledningen dermed ikke var reduceret af høj GVS eller lille tørvedybde. Omvendt har inddragelsen af 6-12 % OC-jorde med samme udledningsberegning bidraget til en forøgelse af den samlede emission, da det tidligere var antaget at disse jorde havde 50 % udledning. Samlet set betyder de to overordnede metodeændringer at det nationale udledningsestimat er reduceret med 3 % i forhold til det foregående estimat.

Fordelingen af afgrødekoderne på Cropland og Grassland foretages på samme grundlag som den nuværende nationale opgørelse. Hvis man foretog en anden fordeling af IMK-koderne, ville det påvirke de gennemsnitlige EF i forskellige retninger i tabel 4, men da opgørelsen er en summering af udledningen fra de enkelte pixler (knap 12 mio. i alt) vil dette ikke påvirke det samlede estimat.

Der er på nuværende tidspunkt kun få data med målinger af udledninger på jorder med 6-12 % OC, ligesom der ikke findes data, som understøtter at der skelnes mellem jorder med 6-12 % OC og over 12 % OC. Derfor justeres udledningsfaktoren for 6-12 % OC-jorder til samme niveau som for jorder med > 12 % OC.

Der er udviklet en afskrivningsmodel til at håndtere udledningen fra jordprofiler ≤ 30 cm. Den gradvise reduktion i organisk indhold over tid illustrerer nødvendigheden af at forholde sig til tørvedybden og langtidseffekterne af vådlægning i udtagningsstrategien, da jorder med dybe organiske profiler har et større potentiale for at reducere CO₂-udledninger på en lang tidshorisont.

Med den nye model, opgøres udledningerne i 2022 til 2795 kt CO₂-ækv. per år. Dette svarer til en reduktion på knap 3 % i sammenligning med opgørelsen afleveret til EU i marts 2024 på 2876 kt CO₂-ækv. per år. For 1990, er de tilsvarende tal hhv. 5929 og 6046 kt CO₂-ækv. per år, og for 2030, er de hhv. 1662 og 1788 kt CO₂-ækv. per år. De angivne tal inkluderer ikke udledninger af metan (CH₄) og lattergas (N₂O). CH₄- og N₂O-udledningerne er endnu ikke opgjorte men forventes ikke at påvirke reduktionsmålet væsentligt, da der primært vil være tale om en parallelforskydning af de samlede udledninger i opadgående retning.

Som følge af dette, vil bidraget til det danske klimamål fra de organiske jorder forblive nogenlunde uændret, idet reduktionen i udledningerne fra 1990 til 2030 i KF24-opgørelsen var opgjort til 4054 kt CO₂-ækv. (tabel 9) mens den med den nye opgørelsesmetode kan opgøres til 4267 kt CO₂-ækv. (tabel 7).

Der er ikke foretaget samlede usikkerhedsberegninger, da en række af usikkerhederne endnu ikke er tilstrækkeligt kortlagte. Igangværende forskning forventes over de kommende år at afklare en række af disse usikkerheder og at kunne forbedre grundlaget for emissionsberegningerne. På grund af den store fokus på udledninger fra organiske jorder, vil der fremover komme nye data fra målinger, som vil være med til at kvantificere den anvendte udledningsmodel. Derfor kan der fremover forventes korrektioner.

8 Litteratur

Adetzu, D.V., Koganti, T., Petersen, R.J., Zak, D., Nilsson, I-M. F., Hoffmann, C.C., Beucher, A. & Greve, M.H. 2024: Estimating the soil subsidence and carbon losses from long term anthropogenic use of peatlands: A case study on a Danish raised bog, *Mires and Peat*, 23 pp., <http://www.mires-and-peat.net/>, DOI: 10.19189/MaP.2023.OMB.Sc.2328103

Adhikari, K., Hartemink, A.E., Minasny, B., Bou Kheir, R., Greve, M.B. & Greve, M.H. 2014: Digital mapping of soil organic contents and stocks in Denmark. *PLOS One* 9 (8), e105519. doi:10.1371/journal.pone.0105519

Beucher, A., Weber, P.L., Hermansen, C., Pesch, C., Koganti, T., Møller, A.B., Gomes, L., Greve, M. & Greve, M.H. 2023. Updating the Danish peatland map with a combination of new data and modelling approaches. Advisory report from DCA – Danish Centre for Food and Agriculture, Aarhus University, 66 pages. Submitted 26.05.2024. https://pure.au.dk/ws/portalfiles/portal/379113275/T_rv2022_Rapport_2605_2024rev3.pdf

Bockermann, C., Eickenscheidt, T. & Drösler, M. 2024: Adaptation of fen peatlands to climate change: rewetting and management shift can reduce greenhouse gas emissions and offset climate warming effects. *Biogeochemistry* 167, 563–588 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10533-023-01113-z>

Castillo, M.T., Martinez-Garcia, L.B., Poláková, J., Svoboda, A., Leifeld, J., Larysch, E., Pardon, P., Dankers, C., Lesschen, J.P., Panagea, I. & Gómez Calero, J.A. 2024: Deliverable 4.1. Evaluating the mitigation potential (and uncertainties) of carbon farming practices (carbon removal in soil and biomass, GHG emissions from soil), <https://zenodo.org/records/14357697>

Elsgaard L. 2024: Dokumentationsnotat vedr. forskningsprojekter om analyse af danske emissionsdata (>12 pct. OC) samt relation mellem emission fra jorder med 6-12 pct. OC og >12 pct. OC. Rådgivningsnotat fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet. 7 sider. Leveret: 26.01.2024.

Evans, C.D.; Peacock, M.; Baird, A.J.; Artz, R.R.E.; Burden, A.; Callaghan, N.; Chapman, P.J.; Cooper, H.M.; Coyle, M.; Craig, E. 2021: Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions. *Nature* 2021, doi:10.1038/s41586-021-03523-1.

Holzknicht, A., Land, M., Dessureault-Rompré, J., Elsgaard, L., Lång, K. & Berglund, Ö. 2024: Effects of converting cropland to grassland on greenhouse gas emissions from peat and organic-rich soils in temperate and boreal climates: a systematic review. *Environmental Evidence*, in press.

IPCC 2014, 2013: Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds). Published: IPCC, Switzerland.

Jørgensen, C.J, Struwe, S. & Elberling, B. 2012: Temporal trends in N₂O flux dynamics in a Danish wetland – effects of plant-mediated gas transport of

N₂O and O₂ following changes in water level and soil mineral-N availability, *Global Change Biology* (2012) 18, 210–222, doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02485.x

Kandel, T.P., Lærke, P.E. & Elsgaard, L. 2018: Annual emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from a temperate peat bog: Comparison of an undrained and four drained sites under permanent grass and arable crop rotations with cereals and potato, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volumes 256–257, Pages 470–481, ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.03.021>.

Koch, J., Elsgaard, L., Greve, M.H., Gyldenkerne, S., Hermansen, C., Levin, G., Wu, S. and Stisen, S. 2023: Water-table-driven greenhouse gas emission estimates guide peatland restoration at national scale, *Biogeosciences*, 20, 2387–2403, <https://doi.org/10.5194/bg-20-2387-2023>, 2023.

Landbrugsministeriet, 1976: Den danske Jordklassificering, Teknisk redegørelse, Landbrugsministeriet, Sekretariatet for Jordbundsklassificering, November 1976.

Leiber-Sauheitl, K., Fuß, R., Voigt, C. & Freibauer, A. 2014: High CO₂ fluxes from grassland on histic Gleysol along soil carbon and drainage gradients, *Biogeosciences*, 11, 749–761, <https://doi.org/10.5194/bg-11-749-2014>, 2014.

Levin, G. 2024: Land-use mapping 2022. Documentation of adjustments in the applied methodology for assessment of land-use changes. Aarhus University, DCE - Danish Centre for Environment and Energy, 17 s. – Scientific note no. 2024 | 17

Liang, Z., Hermansen, C., Weber, P.L., Pesch, C., Greve, M.H., de Jonge, L.W., Mäemnpää, M. Leifeld, J. & Elsgaard, L. 2024: Underestimation of carbon dioxide emissions from organic-rich agricultural soils. *Commun Earth Environ* 5, 286 (2024). <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01459-8>

Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H.G., Levin, L., Callisen, L.W., Andersen, T.A., Johannsen, V.K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Stupak, I., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S.B., Baunbæk, L., & Hansen, M.G. 2024a: Denmark's National Inventory Document 2024. Emission Inventories 1990-2022 - Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Paris Agreement. Aarhus University, DCE - Danish Centre for Environment and Energy, 936 pp. Scientific Report No. 622

Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Hjelgaard, K., Nielsen, M., Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., Andersen, T.A., Callisen, L.W., Gyldenkerne, S., & Levin, G. 2024b: Projection of greenhouse gases 2023-2040. Aarhus University, DCE - Danish Centre for Environment and Energy, 148 pp. Scientific Report No. 610.

Nijman, T.P.A., van Giersbergen, Q., Heuts, T.S., Nouta, R., Boonman, C.C.F., Velthuis, M., Kruijt, B., Aben, R.C.H., Fritz, C. 2024: Drainage effects on carbon budgets of degraded peatlands in the north of the Netherlands. *Science of The Total Environment*, 935, 172882. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172882>.

Parr, J.F. & H.W. Reuszer, 1959: Organic Matter Decomposition as Influenced by Oxygen Level and Method of Application to Soil, Journal Paper 1326, Purdue University, Lafayette, Indiana.

Pedersen, E.F. 1978: Tørvelagets sammensynkning og mineralisering i Store Vildmose, Statens Planteavlfsforsøg 1425. beretning.

Petersen, S.O., Hoffmann, C.C., Schäfer, C-M., Blicher-Mathiesen, G., Elsgaard, L., Kristensen, K., Larsen, S.E., Torp, S.B. & Greve, M.H. 2012: Annual emissions of CH₄ and N₂O, and ecosystem respiration, from eight organic soils in Western Denmark managed by agriculture, *Biogeosciences*, 9, 403–422, 2012, doi:10.5194/bg-9-403-2012

Poyda, A., Reinsch, T., Skinner R.H., Kluss, C., Loges, R. & Taube, F. 2017: Comparing chamber and eddy covariance based net ecosystem CO₂ exchange of fen soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 180, 252-266.

Quadra, G.R., Boonman, C.C.F., Vroom, R.J.E., Temmink, R.J.M., Smolders, A.J.P., Geurts, J.J.M., Aben, R.C.H., Weideveld, S.T.J. & Fritz, C. 2023: Removing 10 cm of degraded peat mitigates unwanted effects of peatland rewetting: a mesocosm study. *Biogeochemistry* 163 (1), 65–84. <https://doi.org/10.1007/s10533-022-01007-6>.

Säurich, A., Tiemeyer, B., Dettmann, U. & Don, A. 2019: How do sand addition, soil moisture and nutrient status influence greenhouse gas fluxes from drained organic soils? *Soil Biology and Biochemistry*, 135, 71-84.

Schrier-Uijl, A.P., Kroon, P.S., Hensen, A., Leffelaar, P.A., Berendse, F. & Veenendaal, E.M. 2009: Comparison of chamber and eddy covariance-based CO₂ and CH₄ emission estimates in a heterogeneous grass ecosystem on peat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 825–831. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.007>.

SGAV, 2024: Markkort modtaget fra SGAV i henhold til dataudvekslingsaftale mellem SGAV og AU.

Tiemeyer, B.; Freibauer, A.; Borraz, E.A.; Augustin, J.; Bechtold, M.; Beetz, S.; Beyer, C.; Ebli, M.; Eickenscheidt, T.; Fiedler, S. 2020: A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. *Ecological Indicators* 2020, 109, 105838, doi:10.1016/j.ecolind.2019.105838

Yli-Halla, M., Lötjönen, T., Kekkonen, J., Virtanen, S., Marttila, H., Liimatainen, M., Saari, M., Mikkola, J., Suomela, R. & Joki-Tokola, E. 2022: Thickness of peat influences the leaching of substances and greenhouse gas emissions from a cultivated organic soil. *Science of the Total Environment*, 806, 150499.