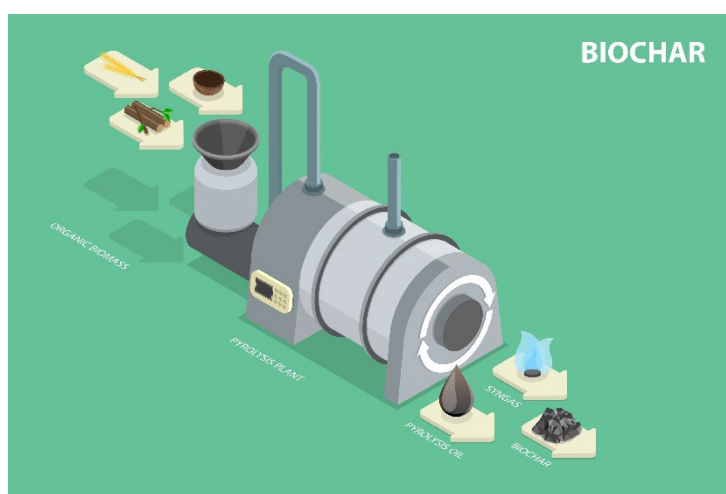


Biokul i den nationale emissionsopgørelse

Notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

Dato: 13. juli 2026 | 44



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

Kategori: Rådgivningsnotat

Titel: Biokul i den nationale emissionsopgørelse

Forfattere: Ole-Kenneth Nielsen & Laura S.H. Arendal

Institution: Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab (ENVS)

Faglig kommentering: Mette H. Mikkelsen & Jakob M. Benfeldt

Kvalitetssikring, DCE: Vibeke V. Nielsen

Ekstern kommentering: Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet. Kommentarerne findes [her](#).

Rekvirent: Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet

Bedes citeret: Nielsen, O.-K., & Arendal, L.S.H. 2026. Biokul i den nationale emissionsopgørelse. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 12 s. – Notat nr. 2026|44

Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse

Foto forside: Colorbox

Sideantal: 12

Indhold

1	Indledning	4
2	C-TOOL modellen	5
3	Resultater	6
4	Implementering i den nationale drivhusgasemissionsopgørelse	10
5	Referencer	12

1 Indledning

Gennem internationale aftaler har lande forpligtigelser til at opgøre og rapportere deres drivhusgasemissioner. Danmark har forpligtigelser under EU-forordninger og under FN's rammekonvention for klimaforandringer (UNFCCC) og Parisaftalen. Rapporterings-reglerne forhandles under UNFCCC og angiver formater og regler for, hvordan landene skal opgøre og rapportere drivhusgasemissionerne. De nuværende retningslinjer for rapportering under UNFCCC forpligter landene til at anvende 2006 IPCC Guidelines som det tekniske grundlag for udarbejdelse af emissionsopgørelsen. Der er en opfordring til landene om at anvende 2013 IPCC Wetlands Supplement og lande kan på frivillig basis anvende 2019 IPCC Refinement.

2006 IPCC Guidelines indeholder ingen metoder til at inkludere biokul i beregningen af kulstofændringer i jord. 2019 IPCC Refinement inkluderede en metode til at inkludere biokul i emissionsberegningen baseret på metodetrin 2 (Tier 2), men uden standardværdier for de variable, der indgår i metoden. Standardværdier er inkluderet i et appendix, hvilket er den procedure IPCC anvender, når der ikke er tilstrækkeligt videnskabeligt grundlag til at inkludere standardværdier.

Danmark anvender en Tier 3 metode til at estimere kulstofændringer i mineraljorde indenfor landbrug. Kulstofændringer estimeres med C-TOOL modellen.

Da Danmark anvender en Tier 3 metode, er det nødvendigt at undersøge, hvorvidt biokul kan inkluderes i modelleringen, og specifikt om der er interaktioner mellem biokul tilført jorden og den eksisterende kulstofpulje i jorden. Desuden er betydningen af forskellige typer af biokul og jordtyper for dynamikkerne i jordens kulstof undersøgt.

2 C-TOOL modellen

C-TOOL er en mekanistisk model, der simulerer ændringer i jordens organiske kulstofpulje ned til 1 meters dybde (Petersen, 2007; Giannini-Kurina et al., 2024). Modellen er trænet og valideret på data fra mineraljord under normal landbrugspraksis for tempererede områder i Nordeuropa. C-TOOL går tilbage til 2002, og bliver brugt til at kvantificere ændringer i jordens organiske kulstofpulje i relation til de nationale emissionsopgørelser for Danmark.

C-TOOL består af seks teoretiske puljer; tre puljer i overjorden (0-25 cm) og tre i underjorden (25-100 cm), som for begge jordlag korresponderer til frisk organisk materiale (Fresh organic matter (FOM)), humificeret organisk materiale (Humified organic matter (HUM)) og resilient organisk materiale (Resistant organic matter (ROM)). FOM-puljen har en halveringstid på under et år, mens halveringstiden i HUM-puljen er omkring 36 år, og halveringstiden i ROM-puljen er næsten 1.500 år.

Organisk kulstof tilføres i C-TOOL via FOM-puljen i over- og underjorden, og også via HUM-puljen i overjorden. Modellen håndterer tilførslen af organisk kulstof både fra planterester og husdyrgødning. Organisk kulstof i jorden omsættes i C-TOOL til CO₂ og transporteres mellem puljerne og jordlagene via basal første-ordre kinetik, der primært drives af størrelsen på puljen, jordtype (lerindhold, C:N-forhold), og lufttemperatur.

3 Resultater

I alt blev 17 typer af biokul (Biochar; BC) inkluderet i projektet, fordelt på fem biomasser; halm fra vinterhvede, træ, digestat (restprodukt fra biogasproduktion), græspulp, og spildevandsslam. For både græspulp og spildevandsslam var der kun en enkelt prøve tilgængelig, og data fra disse typer af biokul er derfor ikke tilstrækkelige til at beregne repræsentative gennemsnitsværdier for den totale mængde organisk kulstof i prøverne eller de tre kulstoffraktioner i biokul. Resultaterne for disse biokultyper anses derfor ikke som bredt repræsentative for biomassen. Se desuden afsnit 4 angående implementering i den nationale emissionsopgørelse, da der ikke nødvendigvis er behov for at kende biomassetypen, hvis bedre oplysninger er tilgængelige.

Biokulprøverne, der indgår i denne analyse, er beskrevet i tabel 1.

Tabel 1. Oversigt over biokulprøverne, gjort tilgængelige for DCE af GEUS og TI.

Biokulnummer	Biomasse	Total organisk kulstof	Reaktivt organisk kulstof	Non-inert kulstof	Inertinit
		%	%	%	%
BC1	Vinterhvedehalm	74,25	1,2	23,79	75,09
BC2	Vinterhvedehalm	76,05	1,3	30,46	78,24
BC3	Vinterhvedehalm	75,33	2,1	28,06	69,86
BC4	Vinterhvedehalm	79,12	0,6	11,63	87,77
BC5	Vinterhvedehalm	79,08	0,5	20,57	78,91
BC6	Vinterhvedehalm	69,11	0,6	7,62	91,82
BC7	Vinterhvedehalm	68,45	0,5	8,39	91,11
BC8	Træ	86,79	1,4	0,00	98,60
BC9	Træ	92,22	0,5	0,00	99,54
BC10	Træ	88,71	0,6	0,00	99,44
BC11	Digestat	26,29	1,1	31,63	67,27
BC12	Digestat	50,11	2,0	44,66	53,38
BC13	Digestat	48,59	0,5	10,72	88,83
BC14	Digestat	45,01	0,4	13,15	86,41
BC15	Digestat	58,33	0,6	13,65	85,76
BC16	Græspulp	56,62	1,9	22,25	75,90
BC17	Spildevandsslam	27,26	1,2	10,40	88,33

Note: Data for kulstoffraktioner er gennemsnit af tre analyser for de enkelte biokul

Biokul består udover organisk kulstof også af uorganiske forbindelser. Derfor er der for prøverne angivet mængden af totalt organisk kulstof (TOC). I dette notat er anvendt betegnelsen biokul-kulstof, når der kun henvises til kulstofmængden i biokul.

For hver biokulprøve er andelen af reaktivt organisk kulstof, non-inert kulstof og inertinit blevet bestemt. Disse tre fraktioner antages at være sammenlignelige med de tre puljer i C-TOOL i forhold til nedbrydningshastighed (halveringstid). Dog er halveringstiden af biokullets tre fraktioner ikke målt i dette studie, og denne antagelse er derfor ikke verificeret eller yderligere underbygget.

For at modellere ændringerne i jordens organiske kulstofpulje i C-TOOL er mængden af reaktivt organisk kulstof fra biokul tilført FOM-puljen i overjorden, men mængden af non-inert kulstof fra biokul er tilført HUM-puljen i overjorden. Idet det ikke er muligt at tilføre organisk kulstof direkte til ROM-puljen i C-TOOL, er det organiske kulstof i inertinit-fraktionen lagt til modelresultaterne efter beregningerne i C-TOOL er foretaget. Dette betyder i praksis, at det organiske kulstof fra inertinit beregningsmæssigt ikke bliver nedbrudt i modellen, dog er halveringstiden i ROM-puljen i overjorden 1.497 år, og tabet af organisk kulstof i ROM-puljen vil derfor over 100 år være ca. 4,5%. Derudover flyttes organisk kulstof i ROM-puljen også fra overjorden til underjorden i C-TOOL, og nedbrydningshastigheden er lavere i underjorden end i overjorden. Derved ville tabet af organisk kulstof i ROM-puljen (og derfor inertinit) være mindre end 4,5%, hvis det var muligt at tilføre organisk kulstof fra inertinit direkte til ROM-puljen.

Baseret på implementeringen af biokul i C-TOOL som beskrevet ovenfor, har TI beregnet en række scenarier for tilførsel af de 17 biokulprøver under to forskellige jordtyper (sandet jord og leret jord), to temperaturscenarier (uden og med temperaturstigning). Derudover er der to forskellige tilgange til tilførsel af biokul til jorden; enten tilførsel én gang i det første år eller tilførsel en gang hvert år i hele modelperioden. DCE har modtaget resultaterne fra disse scenarier for overjorden (årlig tilførsel af biokul) og for både overjorden og underjorden (et års tilførsel af biokul). Der er i begge biokulscenarier blevet tilføjet 1 ton biokul-kulstof per hektar.

For at kunne beregne effekten af tilførsel af biokul på kulstofdynamikken i jorden, og derved kvantificere den ophobede mængde kulstof relevant for en tilskudsordning, bruges TI's scenarier, hvor biokul er tilført én gang i starten af model-perioden.

Generelt set vil én enkelt tilførsel af biokul til jorden resultere i en stigning i mængden af kulstof i jorden i det pågældende år. Derefter vil mængden af kulstof aftage med tiden. For at beregne nettoeffekten af biokultilførsel skal den estimerede mængde kulstof i jorden fra et reference-scenarie, hvor intet biokul er tilført, men alle andre parametre er ens, trækkes fra den estimerede mængde kulstof, der er i jorden, efter biokul er tilført (Lign. 1). For at kvantificere den langsigtede effekt af tilførsel af biokul bliver scenarierne sammenlignet 100 år efter tilførsel af biokul. C-TOOLs resultater fra både over- og underjorden indgår i denne analyse.

$$\text{Effekt} = \text{Kulstofmængde}_{\text{Med biokul}} - \text{Kulstofmængde}_{\text{Reference}} \quad (\text{Lign. 1})$$

I (Lign. 1) refererer $\text{Kulstofmængde}_{\text{Med biokul}}$ til C-TOOLs modellerede totale kulstofmængde i 0-1 m for scenarier, hvor biokul er tilført i det første modelår. $\text{Kulstofmængde}_{\text{Reference}}$ refererer til den totale modellerede kulstofmængde i C-TOOL for reference-scenariet for det pågældende biokulscenarie. Idet der er 17 biokulprøver, der simuleres for både sandet og leret jord, for både konstante og stigende temperaturforhold er der 68 biokulscenarier og fire referencescenarier. Den modellerede effekt af biokultilførsel beregnes 100 år efter tilførsel af biokul.

I tabel 2 angives gennemsnitsværdierne for den modellerede 100-årseffekt for de fire kombinationer af modelparametre (jordtype og temperaturscenarie) for hver type af biokul.

Tabel 2. Gennemsnitsværdier for den modellerede effekt af tilførsel af biokul, 100 år efter tilførsel. Værdier er angivet i ton kulstof per tilføjet ton biokul-kulstof.

Jord	Biomasse type	Digestat	Græspulp	Spildevands-slam	Vinterhvede-halm	Træ
	# prøver Temp. Scenarie					
Leret	Ingen stigning	0,698	0,766	0,887	0,824	0,995
Sandet	Ingen stigning	0,697	0,765	0,887	0,834	0,992
Leret	Stigning	0,697	0,765	0,886	0,823	0,992
Sandet	Stigning	0,695	0,764	0,886	0,823	0,992
Gennemsnit		0,697	0,765	0,886	0,826	0,993

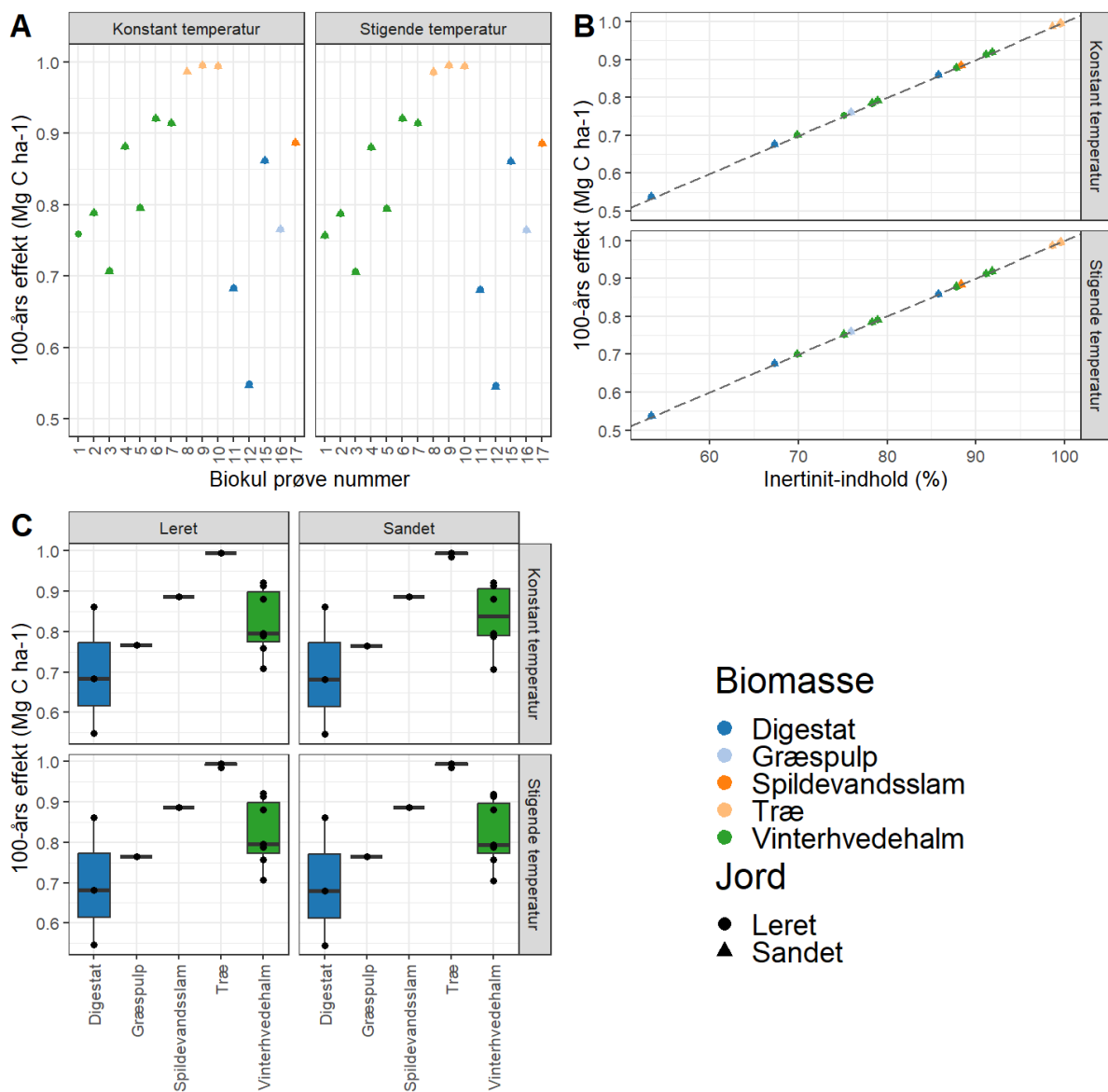
Nogle modelresultater har været markant og uforklarligt anderledes end forventede teoretiske resultater. Disse resultater er derfor ikke inkluderet i denne analyse. I alt er 8 scenarier for digestat, et scenarie for vinterhvedehalm, og et scenarie for træbaseret biokul udeladt. For digestat er der for to af biokulprøverne modelleret markant lavere effekt end inertinitandelen tilsiger. Da inertinit ikke nedbrydes i den nuværende opsætning af C-TOOL, er der ikke nogen plausibel forklaring på, at kulstoffet skulle nedbrydes hurtigere end i referencetilstanden. For det ekskluderede scenarie med vinterhvedehalm, så viser det en kulstoflagring, der er større end inertinitandelen, hvilket ikke er matematisk muligt. Angående det ekskluderede træscenarie, så viser det en urealistisk omsætning af kulstof i forhold til de andre modelkørsler og i forhold til det matematisk mulige, når modellen ikke omsætter inertinitfraktionen.

Generelt set er forskellene i den modellerede 100-årseffekt mellem jordtyperne og temperaturscenarier minimale (Tabel 2, Figur 1). Dog er modellen ikke verificeret med empirisk data, og disse resultater giver derfor blot en indikation på, hvordan denne implementering af biokul i C-TOOL vil være. Dette modelleringsstudie kan ikke give konklusivt svar på, hvor meget kulstof fra biokul, der vil være i jorden efter 100 år, idet der ikke er foretaget eksperimenter.

Forskellene mellem biokul fra forskellige biomasser er korreleret med inertinitindholdet i det pågældende biokul (Figur 1B). Dette er fordi, andelen af tilført organisk kulstof via inertinit ikke nedbrydes i denne opsætning af C-TOOL (se ovenfor). Nedbrydningen af tilført organisk kulstof fra reaktivt organisk kulstof og non-inert kulstof fra biokul er høj på 100-års skala (hhv. 100% nedbrudt og 85% nedbrudt), og bidrager derfor minimalt til den langvarige ophobning af kulstof i jorden fra biokul.

Der er minimal forskel på effekten af tilførsel af det samme biokul på tværs af jordtype og temperaturscenarie (Tabel 2, Figur 1).

For biokulprøver, hvor inertinit-fraktionen er relativt lav (f.eks. nogle af biokulprøverne fra digestat), findes en større andel af det tilførte organiske kulstof fra biokul i FOM- og HUM-puljerne, og den observerede effekt er derfor en smule større end selve inertinitindholdet i biokullet. Dog er den samlede effekt mindre end for typer, hvor inertinitindholdet er højere (Figur 1B).



Figur 1. Den modellerede effekt af at tilføre 1 ton biokul-kulstof efter 100 år (Mg C ha^{-1}) A) opdelt efter biokulprøve, B) korreleret med inertnit-indholdet (%), og C) i et boxplot aggregeret efter biomassetype. Cirkler repræsenterer observationer fra leret jord, mens trekanter repræsenterer observationer fra sandjord. Resultaterne er også opdelt efter temperaturscenarie i modelleringen.

4 Implementering i den nationale drivhusgasemissionsopgørelse

Idet tilførsel af biokul tidligst forventes at begynde i 2027 i Danmark er inklusion af biokul i de danske emissionsopgørelser først relevant for den rapport, der afleveres til EU og UNFCCC i 2029, som er den første rapport, der inkluderer data for 2027. Da der skal være metodemæssig konsistens mellem emissionsopgørelse og emissionsfremskrivningen vil den samme metode til at inkludere biokul i emissionsopgørelsen skulle bruges til klimafremskrivningerne udarbejdet i 2027 og fremefter.

Resultaterne fra dette projekt indikerer, at forskellen i den modellerede effekt af tilførsel af biokul til forskellige jordtyper er minimal. Dog er det nødvendigt at vide, hvilken jordtype biokullet er tilført, for at biokul kan indgå i den nationale modellering af kulstofomsætning i dansk landbrugsjord til emissionsopgørelserne. Hvis biokultilførsel registreres på markniveau sammen med andre aktivitetsdata, der allerede bruges af DCE, vil jordtypen automatisk indgå i de informationer, der indsamles. Hvis information om tilførsel af biokul til landbrugsjord registreres via et andet system, vil jordtype (f.eks. JB-nummer eller markens placering på et kort) skulle registreres.

Resultaterne fra modelstudiet indikerer også, at der for C-TOOL ikke er nogen forskel på biokul fra forskellige typer af biomasse, men at inertinitindholdet overordnet set er den kontrollerende faktor for mængden af kulstof, der opkobles efter 100 år. Derfor er det at foretrække, at andelen af inertinit, non-inert kulstof, og reaktivt organisk kulstof angives sammen med andelen af totalt organisk kulstof for det pågældende biokul. Brugen af disse specifikke informationer vil give en mere præcis modellering sammenlignet med brugen af gennemsnitsværdier for biokul produceret af forskellige typer af biomasse, idet der kan være stor forskel på både mængden af organisk kulstof og inertinitindhold i biokul af samme biomasse (Tabel 1, Figur 1).

For DCE er de nødvendige aktivitetsdata mængden af biokul-kulstof tilført en mark, inklusive enten markens jordtype eller præcise geografiske placering, samt information om selve biokullet samt andelen af inertinit, non-inert kulstof, og reaktivt organisk kulstof i det pågældende biokul (Tabel 3). Til brug for emissionsopgørelsen er det tilstrækkeligt at kende den tilførte mængde biokulkulstof, men det anbefales, at der enten også rapporteres den totale mængde biokul eller andelen af organisk kulstof (TOC-indhold). Dette reducerer muligheden for fejl og giver mulighed for bedre at kvalitetssikre de rapporterede oplysninger.

Hvis den præcise geografiske placering ikke er oplyst, vil det være nødvendigt at vide, i hvilken landsdel biokullet er tilført. Hvis anvendelse af biokul registreres på markblokniveau ved anvendelse af markbloknummer, så kan landsdel og jordtype udledes, og behøver derfor ikke at blive rapporteret.

Tabel 3 Informationer om biokul for inklusion i de nationale emissionsopgørelser.

	Enhed	Værdi
(Tilført mængde eller TOC-indhold)	t biokul eller %	
Tilført mængde	t biokulkulstof	
Reaktivt organisk kulstof	%	
Non-inert kulstof	%	
Inertinit	%	
Landsdel ¹		
Jordtype ²		

¹ Landsdele: Bornholm, København/Københavns Omegn/Nordsjælland, Sjælland, Fyn, Syddjylland, Vestjylland, Østjylland, Nordjylland

² Indikation af jordtype skal være i lerindhold i procent eller JB-nummer.

5 Referencer

Giannini-Kurina, F., Serra, J., Christensen, B. T., Eriksen, J., Hutchings, N. J., Olesen, J. E., & Jensen, J. L. (2024). Modelling and validating soil carbon dynamics at the long-term plot scale using the rCTOOL R package. *Environmental Modelling & Software*, 106229. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106229>

Petersen, B. M. (2007). Modelling organic matter turnover in agricultural soils. University of Copenhagen, University of Aarhus.