

# Afklaring om videns- og ressourcebehov ved at integrere biokul i C-TOOL modellen til brug for emissionsopgørelser

---

Rådgivningsnotat fra DCA – National Center for Fødevarer og Jordbrug

Johannes Lund Jensen, Henrik Thers og Lars Elsgaard

Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet

## Datablad

---

Titel:	Afklaring om videns- og ressourcebehov ved at integrere biokul i C-TOOL modellen til brug for emissionsopgørelser
Forfatter(e):	Postdoc Johannes Lund Jensen, Postdoc Henrik Thers og Lektor Lars Elsgaard. Institut for Agroøkologi, AU
Fagfællebedømmelse:	Professor Jørgen E Olesen, Institut for Agroøkologi, AU
Kvalitetssikring, DCA:	Specialkonsulent Lene Hegelund, DCA Centerenheden, AU
Rekvirent:	Departementet, Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri (FVM)
Dato for bestilling/levering:	04.03.2022 / 29.03.2022 til kommentering / 17.05.2022
Journalnummer:	2022-0341679
Finansiering:	Besvarelsen er udarbejdet som led i "Rammeaftale om forskningsbaseret myndighedsbetjening" indgået mellem Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri (FVM) og Aarhus Universitet under ID nr. 2.24 i "Ydelsesaftale Planteproduktion 2022-2025".
Ekstern kommentering:	Ja. FVM har kommenteret på et udkast til notatet. Kommentarket kan findes via dette <a href="#">LINK</a>
Eksterne bidrag:	Nej
Kommentarer til besvarelse:	Notatet præsenterer resultater, som ved notatets udgivelse ikke har været i eksternt peer review eller er publiceret andre steder. Ved en evt. senere publicering i tidsskrifter med eksternt peer review vil der derfor kunne forekomme ændringer.
Citeres som:	Jensen JL, Thers H, Elsgaard L. 2022. Afklaring om videns- og ressourcebehov ved at integrere biokul i C-TOOL modellen til brug for emissionsopgørelser. 10 sider. Rådgivningsnotat fra DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet, leveret: 17.05.2022.
Rådgivning fra DCA:	Læs mere på <a href="https://dca.au.dk/raadgivning/">https://dca.au.dk/raadgivning/</a>

## Baggrund

I *Aftale om grøn omstilling af dansk landbrug* af 4. oktober 2021 indgår en række udviklingsindsatser, som samlet set har et teknisk potentiale til at levere 5 mio. tons CO<sub>2</sub>e frem mod 2030. En af udviklingsindsatserne er brun bioraffinering såsom pyrolyse, der producerer biokul. Anvendelsen af biokul på landbrugsjord kan lagre stabilt kulstof i jorden og bidrager dermed til at reducere landbrugets klimaaftryk. Det tekniske reduktionspotentiale fra brun bioraffinering, herunder biokul vurderes at udgøre op til ca. 2 mio. ton CO<sub>2</sub>e i 2030.

Til afklaring af hvordan lagring af biokul i landbrugsjord kan tælle med i Danmarks nationale emissionsopgørelse ønsker Ministeriet for Landbrug, Fødevarer og Fiskeri følgende spørgsmål besvaret:

1. Hvilken data og dokumentation har DCA behov for, for at kunne medregne effekter (inkl. kulstoflagring) af anvendelse af biokul på landbrugsjord?
2. Er C-TOOL den mest hensigtsmæssige måde hvormed den kulstoflagrende effekt af biokul i landbrugsjord kan medregnes i emissionsopgørelsen? Findes der alternative beregningsmetoder eller modeller, der er mere hensigtsmæssige at anvende?
3. Er den eksisterende viden og dokumentation om effekter tilstrækkelig til at kunne udvikle modellen? Forventes det nødvendige vidensgrundlag til udviklingsarbejdet at blive tilvejebragt i videnssynthesen om biokul, eller vil det kræve yderligere analyse, dataindsamling, forsøg el.lign.? Hvis der er behov for yderligere viden/data/dokumentation, beskrives dette.
4. Hvad vil det ressourcemæssige omfang være af at udvikle/opdatere C-TOOL (eller en ny model) og vil udviklingen kræve yderligere end der er aftalt med Klima, Energi- og forsyningsministeriets SINKS III-kontrakt? (økonomisk/tidsmæssigt)?

Endvidere ønskes en række spørgsmål vedr. integration af biokul i C-TOOL besvaret. Spørgsmålene er stillet på baggrund af en tidligere besvarelse fra DCA: C-TOOL og muligheder for beregning af kulstoflagring på bedriftsniveau (Jensen et al., 2021).

- a) Hvordan kan der opnås viden om, hvordan biokul kan fordeles mellem C-TOOLS tre kulstofpuljer? Vil det evt. være hensigtsmæssigt at modellere tilførsel af biokul på anden vis, f.eks. i en fjerde kulstofpulje?
- b) Hvordan kan man i modellen håndtere forskellige typer biokul baseret på forskellige biomassetyper og fremstillet under forskellige processer?
- c) Hvilke data- og dokumentationskrav til at inkludere biokul i C-TOOL vil gøre sig gældende? F.eks. oplysninger om biokemiske (og fysiske) egenskaber for udbragt biokul, udbringningsforhold (f.eks. pløjedybde, harvning), mængde udbragt, andet?
- d) Hvad vil det kræve at undersøge, hvordan de faktorer (f.eks. faktorer som C/N forhold, lerindhold, vandindhold og temperatur), der påvirker nedbrydningshastigheden af andre organiske materialer, påvirker omsætningen af biokul?
- e) Vil en integration af biokul i C-TOOL tage højde for en evt. samlet ændring i jordens ligevægtspunkt?
- f) Såfremt nedpløjning af biokul påvirker udledningen af andre drivhusgasser fra marken (f.eks. lattergasemissioner), hvordan vil denne effekt kunne indgå i C-TOOL og/eller medregnes i emissionsopgørelsen på anden vis?

- g) Den modelberegnete nettoreduktionseffekt af at lagre biokul kan f.eks. afhænge af, om der ved biokul-produktionen anvendes halm og husdyrgødning, hvorved der tilføres mindre kulstof til jorden fra disse kilder. Hvordan forventes et lavere halm- og husdyrgødningsinput, men højere biokul-input at påvirke den estimerede kulstoflagring/CO<sub>2</sub>-udledning på kort vs. lang sigt?
- 1) Problemstillingen kan evt. belyses vha. et regneeksempel, hvor kulstoflagringen (dvs. reduktionseffekten) ønskes modelleret i hhv. et 20 og et 100 års tidsperspektiv, når mineraljorde tilføres 42.000 ton C i form af biokul. Reduktionseffekten bedes sammenlignet med et scenarie, hvor 240.000<sup>1</sup> ton halm nedpløjes direkte. I forhold til antagelser om biokullets kemiske egenskaber (H/C ratio mv.) bedes DCA vælge repræsentative værdier.
  - 2) Kan man antage en lineær sammenhæng ift. effekten hvis der f.eks. fjernes dobbelt så meget halm?
  - 3) Indsæt gerne en kurve der viser – alt andet lige – hvor hurtigt kulstofindholdet i nedpløjet halm antages at afgasse som CO<sub>2</sub>, som kan illustrere hvor meget kulstof der antages lagret i jorden over en 100-årig periode fra nedpløjningsåret.
- h) Hvordan indgår ændringer i biomassemasseanvendelsen på nationalt plan i modellen, herunder påvirkning af den samlede kulstofbalance i jorden? Her tænkes f.eks. på et scenarie, hvor mængden af halm, der i dag efterlades på markerne, falder nationalt, mens tilførsel af biokul stiger.

## Besvarelse

### Spørgsmål 1. Hvilken data og dokumentation har DCA behov for, for at kunne medregne effekter (inkl. kulstoflagring) af anvendelse af biokul på landbrugsjord?

I forhold til hvad der kræves for at kunne inkludere biokul i C-TOOL, behandles dette i svar til spørgsmål af samme karakter (spørgsmål c). I det omfang spørgsmålet refererer til påkrævede data og dokumentation for at biokul kan indregnes i den danske nationale emissionsopgørelse, ligger kompetancen hos DCE.

### Spørgsmål 2. Er C-TOOL den mest hensigtsmæssige måde hvormed den kulstoflagrende effekt af biokul i landbrugsjord kan medregnes i emissionsopgørelsen? Findes der alternative beregningsmetoder eller modeller, der er mere hensigtsmæssige at anvende?

Første del af spørgsmålet kan næppe besvares før der opnås erfaringer med en version af C-TOOL, hvor biokul er forsøgt integreret. Der findes andre dynamiske modeller (RothC) for omsætning af kulstof i jord, hvor en tilpasning til biokul er beskrevet, baseret på tilføjelse af en labil og stabil pulje af biokul (se svar på det lignende spørgsmål i bestillingens anden halvdel, spørgsmål a). For RothC modellen gælder dog generelt, at den ikke er kalibreret til danske forhold og ikke benyttes i den nationale emissionsopgørelse. IPCC (2019) har lavet et foreløbigt og simplificeret udkast til at forudsige stabiliteten af biokul i et 100-års perspektiv ( $F_{perm}$ ) – hvilket er en værdi, der angiver hvor mange procent af tilført C i biokul, der forventes at

---

<sup>1</sup> Grundet antagelse om, at der går 240.000 ton halm til at producere 42.000 ton C i form af biokul, jf. rapport fra EA Energianalyse og under antagelse af, at der er tale om en reduktion af mængden af halm, der ikke bjerges og anvendes til andre formål.

være tilbage i jorden efter 100 år. Kun produktionstemperaturen for biokullet ligger til grund for disse foreløbige IPCC estimater, der varierer fra gennemsnit på 65% (CI, 50-80%) for biokul produceret ved 350-450°C til 89% (CI, 76-100%) for biokul produceret ved >600°C, hvor tallene i parentes angiver 95% confidensinterval (CI). IPCCs metode udmærker sig ved at være så simpel at den kan bruges blot med kendskab til biomassen og pyrolyse temperaturen. Denne grove forsimpelse medfører stor usikkerhed på resultatet for en given biokul. Der er således usikkerheder forbundet med de extrapolationer, der ligger til grund for de enkelte  $F_{perm}$  data (i.e., fremskrivning til 100 år baseret på få års målinger), og der tages ikke højde for fx jordbundsfaktorer eller forskellige råmaterialer anvendt til produktionen af biokul, som begge har betydning for stabiliteten af biokul i jord (Lehmann et al., 2015). IPCC benævner selv deres udkastet som 'Basis for future methodological development'.

**Spørgsmål 3.** Er den eksisterende viden og dokumentation om effekter tilstrækkelig til at kunne udvikle modellen? Forventes det nødvendige vidensgrundlag til udviklingsarbejdet at blive tilvejebragt i videnssynthesen om biokul, eller vil det kræve yderligere analyse, dataindsamling, forsøg el.lign.? Hvis der er behov for yderligere viden/data/dokumentation, beskrives dette

Videnssynthesen om biokul er ikke et udviklingsarbejde, men en status på eksisterende viden. Hvis der er behov for, at C-TOOL bliver tilpasset til fremadrettet at håndtere kulstoflagring i form af biokul under varierende danske klima- og jordbundsforhold kræves en målrettet indsats. Dette omfatter dels en videreudvikling af C-TOOL modellen samt forsøg/data til at verificere modellen.

**Spørgsmål 4.** Hvad vil det ressourcemæssige omfang være af at udvikle/opdatere C-TOOL (eller en ny model) og vil udviklingen kræve yderligere end der er aftalt med Klima, Energi- og forsyningsministeriets SINKS III-kontrakt? (økonomisk/tidsmæssigt)?

SINKS-III ansøgningen omfatter generel vedligehold, opdatering og forbedring af C-TOOL modellen, først og fremmest i relation til input og omsætning af frisk organisk materiale. Der indgår overvejelser omkring biokul og løbende ajourføring med international videnskabelig litteratur på området. En mere målrettet indsats kræver at opgaven prioriteres særskilt med midler ud over SINKSIII.

**Spørgsmål a.** Hvordan kan der opnås viden om, hvordan biokul kan fordeles mellem C-TOOLS tre kulstofpuljer? Vil det evt. være hensigtsmæssigt at modellere tilførsel af biokul på anden vis, f.eks. i en fjerde kulstofpulje

Dette vil kræve at forskellige scenarier afprøves. Pulcher et al. (2022) inkluderede biokul i RothC modellen, som er en kulstofmodel sammenlignelig med C-TOOL. De gjorde det ved at tilføje to nye biokul-puljer til modellen – en letomsættelig (4%) og en stabil pulje (96%). Derudover inkluderede de biokuls indvirkning på omsætningen af jordens egen kulstofpulje ("priming effekten"). I forhold til C-TOOL skal det afprøves, hvorvidt biokul skal fordeles i de eksisterende tre kulstofpuljer i C-TOOL eller om der skal tilføjes yderligere puljer. Desuden skal det afdækkes, om der skal tilføjes en interaktion mellem omsætning af biokul og omsætning af jordens øvrige kulstofpuljer i modellen. Ydermere skal det afdækkes om ler-indhold, C/N-forhold og temperatur påvirker omsætteligheden af biokul anderledes end omsætteligheden af de friske kilder til kulstofinput, som C-TOOL modellen omfatter.

Forfatterne i Pulcher et al. (2022) bemærker, at nedbrydningen af biokul under markforhold er hurtigere end antaget fra laboratoriestudier, men de understreger samtidig at deres resultater kun er gyldige for deres specifikke eksperimentelle forhold (jordtype, klima, biokul-type), og derfor kan de ikke direkte overføres til danske forhold. For eksempel anvendte Pulcher et al. (2022) biokul med et H:C forhold på 0,5, hvilket er højere end man normalt vil forvente (og hvilket vil øge nedbrydeligheden sammenlignet med en biokul med et lavere H:C forhold). Der er således behov for at kunne validere en modifikation af C-TOOL modellen med udgangspunkt i relevante danske typer af biokul og ved hjælp af gentagne målinger af jordens kulstofindhold i langvarige markforsøg med biokul-tilførsel under danske jordbunds- og klimaforhold. En mulig platform til sådanne undersøgelser findes ved AU Askov, hvor lysimeter forsøg er anlagt i 2015 med to typer biokul (pyrolyseret halm og gyllefibre) nedmuldet i tre forskellige jordtyper (sandjord, lerblandet sandjord og lerjord).

**Spørgsmål b. Hvordan kan man i modellen håndtere forskellige typer biokul baseret på forskellige biomassetyper og fremstillet under forskellige processer?**

Håndtering af forskellige typer biokul i C-TOOL kræver et større udviklingsarbejde, da kulstofindholdet i og omsætningsraten af biokul er meget varierende (Woolf et al., 2021). Der vil skulle opstilles forskellige omsætningskurver afhængig af den anvendte pyrolysetemperatur eller ud fra H:C forholdet i biokullet. Indholdet af kulstof i biokul vil kunne estimeres ud fra produktionsmetoden og typen af råmateriale det er produceret ud fra, hvis direkte målinger ikke kan fremskaffes (Woolf et al., 2021).

**Spørgsmål c. Hvilke data- og dokumentationskrav til at inkludere biokul i C-TOOL vil gøre sig gældende? F.eks. oplysninger om biokemiske (og fysiske) egenskaber for udbragt biokul, udbringningsforhold (f.eks. pløjedybde, harvning), mængde udbragt, andet?**

Det afhænger af, hvor detaljeret man vil gå til værks. Mængden af udbragt biokul skal kendes. Kulstofindholdet i biokul skal også kendes eller estimeres ud fra produktionsmetoden og typen af råmateriale. For at differentiere mellem forskellige typer af biokul er det nødvendigt at have viden om den anvendte pyrolysetemperatur eller H:C forholdet i biokullet. Med viden om mængden af udbragt biokul, produktionsmetoden, type råmateriale og pyrolysetemperatur (eller H:C forholdet) vil man kunne opstille forskellige omsætningskurver til brug i C-TOOL. Der vil dog også være behov for at tage højde for hvorvidt fx jordtemperaturens effekt på omsætning af biokul og frisk organisk materiale kan sidestilles, eller om biokul kræver en særlig temperaturfunktion i modellen. Der foreligger ikke viden omkring eventuelle effekter af pløjedybde og harvning, som ville kunne overføres til C-TOOL modellen.

**Spørgsmål d. Hvad vil det kræve at undersøge, hvordan de faktorer (f.eks. faktorer som C/N forhold, lerindhold, vandindhold og temperatur), der påvirker nedbrydningshastigheden af andre organiske materialer, påvirker omsætningen af biokul?**

Dette må i første omgang afdækkes ved analyse af relevant litteratur, eventuelt suppleret med faktorielle laboratorieforsøg. Woolf et al. (2021) har foreslået en metode til at indregne effekten af jordtemperatur på tilbageholdelsen af C i biokul. Baseret på deres analyse vil der ved en jordtemperatur på 5°C blive tilbage-

holdt 89% biokul i jorden efter 100 år ved en pyrolysetemperatur på 450-600°C, mens der vil være tilbageholdt 64% ved en jordtemperatur på 25°C. Ud fra sådanne data vil der kunne laves scenarier for danske forhold, der vil bidrage til at kvalificere model outputtet fra C-TOOL.

**Spørgsmål e. Vil en integration af biokul i C-TOOL tage højde for en evt. samlet ændring i jordens ligevægtspunkt?**

Jordens ligevægtspunkt er ikke defineret i C-TOOL modellen. Hvorvidt jorden er i ligevægt i C-TOOL modelleringen afhænger både af den årlige kulstoftilførsel, jordtype, puljefordeling, temperatur og jordens kulstoflager ved starten. Om jordens ligevægtspunkt ændres, når der tilføres biokul, og hvordan det evt. kunne integreres i C-TOOL er der på nuværende tidspunkt ikke nogen, som har set på. Vi har heller ikke et datasæt, som vil kunne bruges til at validere, om en integrering af en sådan effekt i modellen vil være rigtig.

**Spørgsmål f. Såfremt nedpløjning af biokul påvirker udledningen af andre drivhusgasser fra marken (f.eks. lattergasemissioner), hvordan vil denne effekt kunne indgå i C-TOOL og/eller medregnes i emissionsopgørelsen på anden vis?**

N-emissioner er ikke inkluderet i C-TOOL modellen. I den nationale emissionsopgørelse beregnes N<sub>2</sub>O emissioner ved brug af IPCC emissionsfaktorer for tilført N. Disse faktorer vil eventuelt skulle tage højde for mindre N<sub>2</sub>O emissioner, når der er tilført biokul. Dette vil dog kræve grundig dokumentation under danske forhold og for den specifikke type af biokul. Woolf et al. (2021) peger på at indregning af N<sub>2</sub>O effekter i den endelige drivhusgasbalance vil have en lille effekt på det samlede resultat. Det er således effekten af kulstoflagring, der er langt mest betydende og overskygger den mulige effekt af mindsket lattergasemission, hvilket også er vist af Thers et al. (2019) for et dansk scenarie med biokul fra rapshalm.

**Spørgsmål g. Den modelberegnete netto reduktionseffekt af at lagre biokul kan f.eks. afhænge af, om der ved biokul-produktionen anvendes halm og husdyrgødning, hvorved der tilføres mindre kulstof til jorden fra disse kilder. Hvordan forventes et lavere halm- og husdyrgødningsinput, men højere biokul-input at påvirke den estimerede kulstoflagring/CO<sub>2</sub>-udledning på kort vs. lang sigt?**

- g-1: Problemstillingen kan evt. belyses vha. et regneeksempel, hvor kulstoflagringen (dvs. reduktionseffekten) ønskes modelleret i hhv. et 20 og et 100 års tidsperspektiv, når mineraljorde tilføres 42.000 ton C i form af biokul. Reduktionseffekten bedes sammenlignet med et scenarie, hvor 240.000 ton halm nedpløjes direkte. I forhold til antagelser om biokullets kemiske egenskaber (H/C ratio mv.) bedes DCA vælge repræsentative værdier.
- g-2: Kan man antage en lineær sammenhæng ift. effekten hvis der f.eks. fjernes dobbelt så meget halm?
- g-3: Indsæt gerne en kurve der viser – alt andet lige – hvor hurtigt kulstofindholdet i nedpløjet halm antages at afgasse som CO<sub>2</sub>, som kan illustrere hvor meget kulstof der antages lagret i jorden over en 100-årig periode fra nedpløjningsåret

**Svar g-1.** I nedenstående Tabel 1 er lavet et regneeksempel, der sammenligner kulstoflagringseffekten af at tilføre mineraljorde 42.000 t C i form af biokul og samtidig fratræde 240.000 t tørstof i halm til brug for

produktionen af biokul i hhv. et 20 og 100 års perspektiv. Baseret på dette forsimplede regnestykke, med de antagelser og forudsætninger der er beskrevet i fodnoterne til tabellen, vil den samlede ekstra kulstoflagringseffekt være 26.320 t C i et 20 års perspektiv og 31.020 t C i et 100 års perspektiv.

**Tabel 1:** Scenarier for effekten på kulstoflagring af at tilføre mineraljorde 42.000 t C i biokul og samtidig fraføre 240.000 t tørstof i halm til brug for produktionen af biokul i hhv. et 20 og 100 års perspektiv (antagelsen om, at der kan produceres 42.000 t C i form af biokul ud fra 240.000 t halm, er oplyst af Ministeriet for Landbrug, Fødevarer og Fiskeri i bestillingen).

	<b>20 års perspektiv</b>	<b>100 års perspektiv</b>
Biokul-tilførsel (t C)	42.000	42.000
Tilbageholdelse af C i biokul (%) <sup>1</sup>	96	81
Kulstoflagring (t C)	40.320	34.020
Tilført halm (t tørvægt)	240.000	240.000
Halm-C tilførsel (t C)	100.000	100.000
Tilbageholdelse af C i halm (%) <sup>2</sup>	14	3
Kulstoflagring (t C)	14.000	3.000
<b>Netto C lagring ved biokul (t C)</b>	<b>26.320</b>	<b>31.020</b>

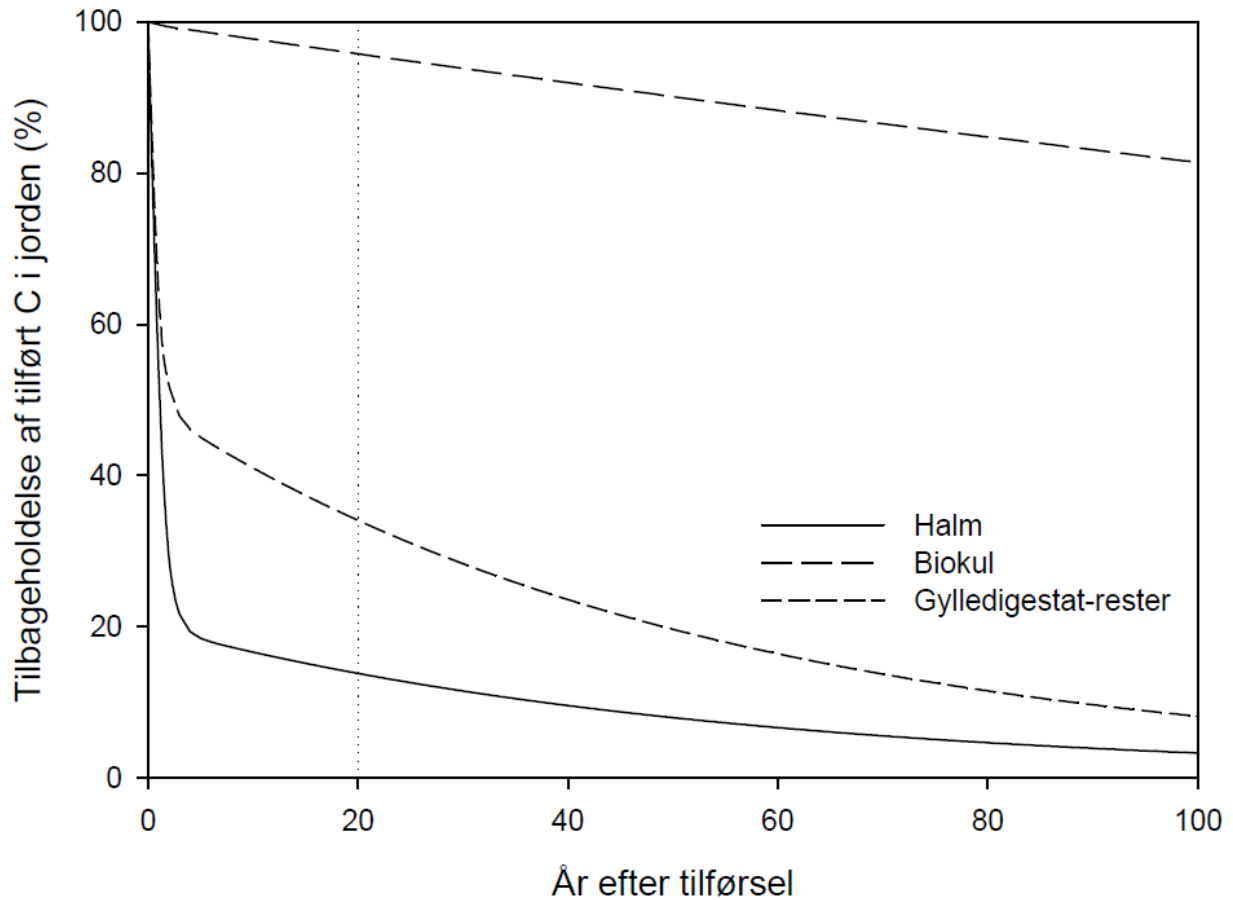
<sup>1</sup> Udregnet ud fra Supplerende materiale til Woolf et al. (2021) ved jordtemperatur på 10°C.

<sup>2</sup> Baseret på C-TOOL (Taghizadeh-Toosi et al., 2014) modelkørsel ved et lerindhold på 12,5%, C/N-forhold på 10 og ved en årlig gennemsnits lufttemperatur på 8°C.

Svar g-2: Ja, det kan man godt.

Svar g-3: Figur 1 viser kulstofftilbageholdelses-kurver for hhv. halm, biokul og gylledigestat-rester. Det er disse kurver, som ligger til grund for scenarieberegningerne i Tabel 1, hvorfor der henvises til Tabel 1 for antagelser og forudsætninger. Kulstofftilbageholdelseskurven for gylledigestat-rester er baseret på Hansen et al. (2020), som estimerede at 36,7% af tilført C i gylledigestat-rester skal tilgå HUM-puljen i C-TOOL modellen direkte.





**Figur 1:** Tilbageholdelsen af C i halm, biokul og gylledigestat-rester (i % af tilført C), som funktion af år efter tilførsel. Den lodrette prikkede linje angiver tilbageholdelsen efter 20 år. Tilbageholdelsen af C i biokul er udregnet ud fra Supplerende materiale til Woolf et al. (2021) ved jordtemperatur på 10°C, mens tilbageholdelsen af C i halm og gylledigestat-rester er baseret på C-TOOL (Taghizadeh-Toosi et al., 2014) modelkørsel ved et lerindhold på 12,5%, C/N-forhold på 10 og ved en årlig gennemsnits lufttemperatur på 8°C. For gylledigestat-rester antages det, at 36,7% af tilført C skal tilgå HUM-puljen i C-TOOL modellen direkte, hvilket er baseret på Hansen et al. (2020).

Spørgsmål h. Hvordan indgår ændringer i biomassemasseanvendelsen på nationalt plan i modellen, herunder påvirkning af den samlede kulstofbalance i jorden? Her tænkes f.eks. på et scenarie, hvor mængden af halm, der i dag efterlades på markerne, falder nationalt, mens tilførsel af biokul stiger.

Dette bør afklares med DCE, der udfører arbejdet med den nationale emissionsopgørelse.

## Referencer

- Hansen, JH, Hamelin, L, Taghizadeh-Toosi, A, Olesen, JE, Wenzel, H. Agricultural residues bioenergy potential that sustain soil carbon depends on energy conversion pathways. *GCB Bioenergy*. 2020; 12: 1002– 1013. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12733>
- IPCC (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S., eds), Appendix 4 - Method for estimating the change in mineral soil organic carbon stocks from biochar amendments: Basis for future methodological development. Published: IPCC, Switzerland.
- Jensen, J.L., Kristensen, T., Thers, H., Olesen, J.E., Elsgaard, L. (2021) C-TOOL og muligheder for beregning af kulstoflagring på bedriftsniveau. 8 sider. Rådgivningsnotat fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet, leveret: 15.12.2021. [https://pure.au.dk/portal/files/228108178/CTOOL\\_og\\_C\\_lagring\\_p\\_bedriftsniveau\\_1512\\_2021.pdf](https://pure.au.dk/portal/files/228108178/CTOOL_og_C_lagring_p_bedriftsniveau_1512_2021.pdf)
- Lehmann, J., Abiven, S., Kleber, M., Pan, G., Singh, P.B., Sohi, S.P., Zimmerman, A.R. (2015). Persistence of biochar in soil. In: *Biochar for Environmental Management* (Eds., Lehmann, J., Joseph, S.), pp. 235-282. Routledge, New York, NY.
- Pulcher, R., Balugani, E., Ventura, M., Greggio, N., Marazza, D. (2022). Inclusion of biochar in a C-dynamics model based on observations from an 8-year field experiment. *SOIL*, 8, 199-211. <https://doi.org/10.5194/soil-8-199-2022>
- Taghizadeh-Toosi, A., Olesen, J.E., Kristensen, K., Elsgaard, L., Østergaard, H.S., Lægdsmand, M., Greve, M.H., Christensen, B.T. (2014). Changes in carbon stocks of Danish agricultural mineral soils during 1986 - 2009: effects of management. *European Journal of Soil Science* 65, 730-740
- Thers, H., Djomo, S. N., Elsgaard, L., Knudsen, M.T. (2019). Biochar potentially mitigates greenhouse gas emissions from cultivation of oilseed rape for biodiesel. *Science of The Total Environment*, 671, 180-188. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.257>
- Woolf, D., Lehmann, J., Ogle, S., Kishimoto-Mo, A. W., McConkey, B., Baldock, J. (2021). Greenhouse gas inventory model for biochar additions to soil. *Environmental Science & Technology*, 55, 14795-14805. DOI: 10.1021/acs.est.1c02425