

# Muligheder for kulstofopgørelser på bedriftsniveau, der er i overensstemmelse med og kan afspejles i den nationale emissionsopgørelse

---

Rådgivningsnotat fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug

Johannes L. Jensen<sup>1)</sup>, Franca Giannini-Kurina<sup>1)</sup>, Jørgen Eriksen<sup>1)</sup>, Henrik Thers<sup>1)</sup>, Lars Elsgaard<sup>1)</sup>, Lærke W. Callisen<sup>2)</sup>, Steen Gyldenkærne<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet

<sup>2)</sup> Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet

# Datablad

---

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Titel:                        | Muligheder for kulstofopgørelser på bedriftsniveau, der er i overensstemmelse med og kan afspejles i den nationale emissionsopgørelse   |
| Forfatter(e):                 | Johannes L. Jensen, Franca Giannini-Kurina, Jørgen Eriksen, Henrik Thers, Lars Elsgaard fra Institut for Agroøkologi (AU) og Lærke W. Callisen, Steen Gyldenkærne fra Institut for Miljøvidenskab (AU).   |
| Fagfællebedømmelse:           | Professor Lars J. Munkholm, Institut for Agroøkologi, AU<br>Chefkonsulent Ole-Kenneth Nielsen, Institut for Miljøvidenskab, AU  |
| Kvalitetssikring, DCA:        | Chefkonsulent Anne-Luise Skov Jensen, DCA Centerenheden, AU   |
| Rekvirent:                    | Landbrugsstyrelsen, Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri  |
| Dato for bestilling/levering: | 03.07.2024 / 30.09.2024   |
| Journalnummer:                | 2024-0690415  |
| Finansiering:                 | Rapporten er udarbejdet som led i "Rammeaftale om forskningsbaseret myndighedsbetjening" indgået mellem Miljøministeriet, Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri og Aarhus Universitet under ID nr. 2.08 i "Ydelsesaftale Planteproduktion 2024-2027".  |
| Ekstern kommentering:         | Nej.  |
| Eksterne bidrag:              | Nej.  |
| Citeres som:                  | Jensen JL, Giannini-Kurina F, Eriksen J, Thers H, Elsgaard L, Callisen LW, Gyldenkærne S. 2024. Muligheder for kulstofopgørelser på bedriftsniveau, der er i overensstemmelse med og kan afspejles i den nationale emissionsopgørelse. Rådgivningsnotat fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet. 9 sider. Leveret: 30.09.2024. |
| Rådgivning fra DCA:           | Læs mere på <a href="https://dca.au.dk/raadgivning/">https://dca.au.dk/raadgivning/</a>   |

## Baggrund

Landbrugsstyrelsen har i en bestilling sendt til DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug ønsket svar på nedenstående. Det er efter afsendelse af bestillingen aftalt med Landbrugsstyrelsen, at budget ikke indgår som en del af besvarelsen.

Formål: Grundet kompleksiteten i C-TOOL, er det svært at udlede, hvilke konkrete kulstofeffekter diverse landbrugspraksisser og virkemidler har, herunder ift. den enkelte bedrift. Der er derfor efterspørgsel på at få identificeret en mere operationel metode for opgørelse af kulstofeffekter på mineraljorder, som kan anvendes i en reguleringssammenhæng. Dette samtidig med, at der i videst muligt omfang skal være overensstemmelse mellem effekterne i den nationale emissionsopgørelse og reguleringen.

Der ønskes en indledende undersøgelse af, hvilke muligheder der findes for udvikling af bedriftsnære opgørelsesmetoder til beregning af kulstofeffekter af markdrift på mineraljorder, som er i overensstemmelse med IPCC's retningslinjer, og som understøtter overensstemmelse mellem effekten af et givet virkemiddel på bedriftsniveau og effekten i emissionsopgørelsen.

Med den indledende undersøgelse ønskes beskrevet (i) mulighederne for implementering og evt. tilpasning af eksisterende alternative opgørelsesmetoder i C-TOOL for kulstofeffekter på bedriftsniveau, der er i overensstemmelse med emissionsopgørelsen, (ii) eller udvikling af en ny opgørelsesmodel, der kan avendes både på bedriftsniveau og i emissionsopgørelsen (erstatning af C-TOOL). Der skal ideelt fremlægges et forslag til formålet, en køreplan samt et udkast til budget for et eller flere sådanne udviklingsprojekter. Fordele og ulemper ved de forskellige muligheder skal beskrives. Særligt med fokus på, hvordan man kan identificere kulstofeffekter af specifikke landbrugspraksisser, samtidig med der sikres afspejling i emissionsopgørelsen. Undersøgelsen skal derfor ske i tæt samarbejde med DCE. Der bør ligeledes sikres inddragelse af relevante projekter ift. hvilke anbefalinger til kulstofopgørelse på bedriftsniveau, der fremlægges i dette projekt.

Den indledende undersøgelse skal i relevant omfang kortlægge, hvordan man beregner kulstofeffekter på mineraljorde i andre relevante sammenhænge, f.eks. i andre landes emissionsopgørelser eller i værktøjer som f.eks. ESGreentool.

Væsentlige overvejelser til videre udviklingsspor: Medregning af fx nedbør og dyrkningshistorik kan være en udfordring at anvende i en regulering, da landbrugeren ikke har mulighed for at påvirke dette, samt det skønnes svært at tilvejebringe bedriftsspecifikdata der kan anvendes til regulering. Der kan i afdækningen af mulige løsninger derfor tages udgangspunkt i to hypoteser.

a. Hvor reguleringsgrundlaget er helt bedriftsnært og er en spejling af C-TOOL. I denne model vil reguleringsgrundlaget således også omfatte forhold, som landbrugeren ikke kan påvirke såsom nedbør og dyrkningshistorik.

b. Hvor reguleringsgrundlaget alene dækker den isolerede effekt af forhold som landbrugeren selv kan påvirke. Herved opstår en forskel mellem emissionsopgørelsen og et reguleringsgrundlag, da emissionsopgørelsen vil inkludere nedbør og dyrkningshistorik, mens reguleringsgrundlaget vil afhænge af afgrøder, jordtype mv. Håndtering af dette ved fx. en c-tool korrektionsmodel der lægges ovenpå bør belyses.

Det kan undersøges hvordan f.eks. jordtype og kulstofbalance hensigtsmæssigt kan afspejles i reguleringsgrundlaget. For eksempel om det er hensigtsmæssigt at tage udgangspunkt i et standard år, eller om effekten kan beregnes uafhængigt af forventningen til vejrforhold for at sikre konsistens og forudsigelighed i reguleringsgrundlaget.

## Besvarelse

### 1. Introduktion

Der efterspørges en indledende undersøgelse af muligheder for at opgøre kulstoflagring i mineraljord på bedriftsniveau. Opgørelsen skal være i overensstemmelse med og kunne afspejles i de nationale emissionsopgørelser. En national drivhusgasopgørelse skal som udgangspunkt beskrive den samlede opgørelse for det danske domæne, herunder mineraljorderne på landbrugsarealer. En sådan opgørelse kan enten være kategorisk, hvor man for en given afgrøde har defineret en effekt, eller man kan opsætte mere dynamiske modeller. Den nuværende metodik fra IPCC er primært kategorisk, men på det højeste metode-trin (Tier 3) er dynamiske modeller inkluderet som en mulighed. Ændringer i kulstofpuljen i mineraljord i den nationale emissionsopgørelse beregnes for nuværende med C-TOOL modellen svarende til en Tier 3 metode.

Ændringer i jordens kulstoflager påvirkes dels af, hvor stor tilførslen af kulstof fra planter til jord er, dvs. afgrødevalg og tilførsel af organisk materiale som husdyrgødning, dels af størrelsen på jordens kulstoflager. For eksempel viser resultater fra de langvarige gødningsforsøg ved Askov forsøgsstation, at selv i et firemarks sædskifte med græs og tilførsel af husdyrgødning, var der et fald i jordens kulstofindhold i perioden 1924-2016, hvilket blev forklaret ved et forholdsvis højt kulstofindhold forud for opdyrkningen af marken i 1801 (Christensen et al., 2022). Omvendt findes meget høje potentialer for yderligere lagring i jorde med meget lavt kulstofindhold (Machmuller et al., 2015). Derfor vil det være sværere at opretholde jordens kulstoflager på en mark, hvor der historisk har været en stor kulstofftilførsel fra høj græsandel i sædskiftet og brug af husdyrgødning, sammenlignet med en mark med enårige afgrøder og brug af handelsgødning.

Ændringer i jordens kulstoflager er i praksis vanskelige at opgøre, da en pålidelig opgørelse kræver mange målinger og lader sig stort set kun gøre i forsøg under kontrollerede forhold. Derfor er modeller nødvendige, ligesom de kontrollerede forsøg er nødvendige for at kunne validere kulstofmodeller. Kulstoflagringspotentialer af specifikke driftstiltag, såsom halmnedmuldning og græs i sædskiftet, bestemmes vha. langvarige markforsøg (kontrollerede forsøg), hvor tiltag er undersøgt over et langt tidsrum, idet jordens kulstofindhold kun ændrer sig langsomt. Langvarige markforsøg defineres ofte som værende opretholdt i mere end 20 år. Derudover kræves målinger af kulstofindhold og volumenvægt ved etablering af forsøget, dels regelmæssige målinger indtil der opstår en ny balance (eller ligevægt) mellem kulstofftilførsel og -fratørsel. Udover de langvarige markforsøg har vi i Danmark, kvadratnettet, som opdeler hele landet i et 7 x 7 km net (Harbo et al., 2023). I disse kvadratnetspunkter er jordens kulstoflager blevet estimeret cirka hvert 10. år siden 1986/87, og dette datasæt er blevet benyttet til at estimere fordelingen af kulstofpuljer i kulstofmodellen C-TOOL (Taghizadeh-Toosi og Olesen, 2016).

Både nationalt og på europæisk plan er der fokus på Carbon Removal and Carbon Farming (CRCF). EU arbejder intensivt med CRCF direktivet, hvor en operationel metode til at beregne kulstofeffekter på mark/bedriftsniveau rammesættes ([Carbon Removals and Carbon Farming - European Commission \(europa.eu\)](https://ec.europa.eu)).

## 2. Beskrivelse af kulstofmodellen C-TOOL

Kulstofmodellen, C-TOOL, er udviklet over en årrække på Aarhus Universitet ved Institut for Agroøkologi (Giannini-Kurina et al., 2024), og har den fordel, at den er relativt simpel, idet den kræver relativt få input-data sammenlignet med andre kulstofmodeller og er kalibreret til danske forhold.

C-TOOL modellen kan opsplittes i dels (1) beregning af årlig kulstoftilførsel dels (2) balancemodel, hvor der føres regnskab med kulstoftilførsel og tab fra jordens organiske kulstofpulje. Dertil kommer en anvendelsesform, hvor C-TOOL bruges til at beregne nedbrydningskurver for input af forskellige typer kulstof under specifikke betingelser (Jensen et al., 2022; Jensen og Elsgaard, 2023).

Årlig over- og underjordisk kulstoftilførsel beregnes på basis af den dyrkede afgrødes tørstofudbytte og allometriske funktioner (Giannini-Kurina et al., 2024). Dvs. at der for hver afgrøde er antagelser om, hvor stor en andel af den totale overjordiske biomasse som er udbytte af hovedproduktet, hvor stor biomassen af sekundært produkt relativt til udbytte af hovedprodukt er, samt hvor stor en andel den underjordiske biomasse (rødder og rodafsætning) udgør af den totale biomasse. Som eksempel kan nævnes, at halmudbyttet i vinterhvede beregnes ved at gange kerneudbyttet med 0,55. Derudover beregnes kulstoftilførsel fra organisk gødning ud fra viden om tørstof- og kulstofindhold i den aktuelle type gødning.

Modellen består af tre kulstofpuljer: FOM-puljen (Fresh Organic Matter), som indeholder de netop tilførte planterester og en andel af den tilførte husdyrgødning (halveringstid under 1 år); HUM-puljen (Humified Organic Matter), som indeholder det delvist omsatte organiske materiale (halveringstid cirka 20 år); ROM-puljen (Resistant Organic Matter), som indeholder stabilt organisk materiale med meget langsom omsætning (halveringstid cirka 1500 år). Modellen opererer med overjord (0-25 cm) og underjord (25-100 cm), og der regnes med transport af kulstof fra overjord til underjord. Omsætningen af tilført kulstof er i modellen afhængig af månedsspecifik temperatur, ler-indhold og jordens C/N-forhold. Derudover kræver C-TOOL modellen viden om arealets forhistorie samt arealets nuværende kulstofniveau.

## 3. Videre udviklingsspor

C-TOOL er AUs modelværktøj til at estimere kulstoflagring. Udviklingen af C-TOOL startede i 2002, og siden er den blevet tilpasset og parameteriseret til danske forhold (Giannini-Kurina et al., 2024). Modellen opdateres løbende med tilgængelig viden primært fra de langvarige markforsøg, som AU-AGRO råder over, men også via målinger af kulstofinput fra afgrøder. Idet C-TOOL er tilpasset danske forhold, benyttes den også til opgørelse af ændringer i kulstoflager i mineraljorde i forbindelse med den nationale emissionsopgørelse. Da C-TOOL er den model, som der tages udgangspunkt i på AU, når der forskes i og opgøres ændringer i kulstoflager i mineraljorde (<6% organisk kulstof) lægges der op til fortsat at bruge C-TOOL, men der er behov for at optimere og ensarte brugen af modellen, fx mellem AGRO og DCE. Der skal dog en række udviklingsarbejder i gang for at kunne gøre dette:

### **Arbejdspakke 1: Kulstofinput fra afgrøde til jord og aktivitetsdata**

- Databehov: Der er brug for aktivitetsdata på mark/bedriftsniveau herunder hvilken afgrøde der dyrkes, efterafgrøder, håndtering af afgrøderester (såsom halm) og typen og mængden af organisk gødning tilført.

- Kulstofinput fra afgrøde til jord: Beregningen af årlig kulstoftilførsel fra plante til jord bør forbedres. På nuværende tidspunkt antages årlig over- og underjordisk kulstoftilførsel fra afgrøden at være afhængig af høstudbyttet således, at kulstofinput stiger med stigende udbytte. En række nye undersøgelser viser, at et fast afgrødespecifikt kulstofinput for landbrugsafgrøder er mere retvisende (e.g., Jacobs et al., 2020; Jensen et al., 2024; Taghizadeh-Toosi and Christensen, 2021). Opdaterede kulstofinput for afgrøder svarende til 80% af det dyrkede areal forventes tilvejebragt i denne arbejdsplan.

### **Arbejdsplan 2: Parameterisering af jordens kulstofindhold og fordeling af de tre kulstofpuljer**

- Puljefordeling: Et estimat for fordeling af de tre kulstofpuljer, som indgår i C-TOOL modellen, forud for modelkørslen (initialisering) er afgørende for at kunne bestemme ændringer i kulstof i jord retvisende. Derfor vil et vigtigt udviklingsspor være at udarbejde en metode til estimering af puljefordeling på markniveau. En mulig tilgang kunne være at beregne en sådan puljefordeling ved brug af kvadratnettet, som opdeler hele landet i et 7 x 7 km net (Harbo et al., 2023). I kvadratnettet er der ca. hvert 10. år udtaget jordprøver og bestemt organisk kulstof (1986/87, 1996/97, 2008/09 og 2018/19). En sådan kalibrering bør gøres for hvert kvadratnetpunkt, hvor der foreligger gentagne målinger, dog med fokus på 2008/09 og 2018/19, da den rumlige præcision for de nye udtagne punkter er højere end for de tidligere år. Kalibreringen hviler på aktivitetsdata for kvadratnettet, hvilket for nuværende ikke foreligger i en lettilgængelig form. Derfor vil der være et betydeligt arbejde i at opbygge en database for kvadratnetpunkternes historik, som skal anvendes ved kalibreringen. Efter endt kalibrering skal det overvejes, hvordan den estimerede fordeling af de tre kulstofpuljer for kvadratnetpunkterne på bedst mulig vis kan udbredes til alle marker i Danmark.
- Start-kulstofindhold: Ligeledes er et estimat for jordens kulstofindhold ved starten af modelkørslen vigtig for retvisende modellering af ændringer i jordens kulstoflager. Her kan kvadratnettet også benyttes som udgangspunkt, men det bør også undersøges om det nye kulstofkort vil kunne anvendes (Møller et al., 2024).

### **Arbejdsplan 3: Implementering af AP1 og AP2 i den nationale emissionsopgørelse**

- Implementering i den nationale emissionsopgørelse: Det er en forudsætning for implementering i opgørelsen, at der sker indsamling af de nødvendige aktivitetsdata. Når data foreligger, skal systemet sættes op til at kunne håndtere det på den ønskede skala jf. forslag (a) eller (b) nedenfor. I forbindelse med implementering i opgørelsen skal det således undersøges, om der er datamæssige barrierer for forslag (a), og/eller om den eksisterende metode, som anvender 20 zoner for at dække Danmarks areal, skal raffineres med henblik på en mere retvisende opgørelse. Den nationale emissionsopgørelse skal udarbejdes i overensstemmelse med internationalt vedtagne retningslinjer, som sikrer den bedst mulige grad af gennemsigthed, nøjagtighed, sammenlignelighed, konsistens og kompletthed på tværs af landenes rapporteringer. Det er tilladt at skifte metode for beregning af en udledningsskilde i løbet af tidsserien fra 1990 og frem, men der skal være konsistens i resultaterne. Derfor kræves en analyse af, om et evt. metodeskift kan gennemføres, så opgørelsen lever op til kravene, herunder konsistens på tværs af tidsserien. For at den påkrævede tidsseriekonsistens kan sikres, kan en ny metode *tidligst* afspejles i opgørelsen, som afleveres i 2028.
- Løbende dialog: For at sikre, at systemerne i reguleringen sættes op på en måde, som er mulig at afspejle i emissionsopgørelsen, skal der være løbende dialog mellem relevante myndigheder

(LBST m.fl.) og DCE. Denne dialog kan opstartes i projektfasen, men vil fortsætte efter dette projekt er afsluttet og ligger derfor også delvist ud over rammen af projektet.

Arbejdspakke 1 omhandler beregning af kulstofinput, og vil være uafhængig af nedenstående valg af metode. Pointen i det ovenstående er at optimere beregningen af kulstofinput, og at det gøres på samme måde på bedriften og nationalt.

For den efterfølgende beregning af kulstoflagringen følger her to forslag, som begge vil blive undersøgt.

Forslag (a) handler om at benytte C-TOOL til at beregne ændringer i jordens kulstoflager på markniveau baseret på dyrkningspraksis (afgrøde, husdyrgødning), jordtype og temperatur. Nedbør er ikke en inputparameter i C-TOOL. Det er blevet undersøgt om nedbør skulle indgå, men det blev konkluderet, at når modellen benyttes under danske forhold, ville forskelle i jordfugtighed være så små, at det ikke ville påvirke omsætningen af organisk materiale nævneværdigt (Taghizadeh-Toosi og Olesen, 2016). Udviklingspunkterne i AP2 er relevante og nødvendige for denne metode. Metoden vil opgøre det absolutte kulstofindhold på markniveau, herunder fra år til år. DCE beskriver, hvordan resultatet af disse beregninger på markniveau kan inddrages tilsvarende i den nationale emissionsopgørelse.

Forslag (b) handler om at lade DCE beregne det absolutte kulstofindhold i jorden som det sker i dag i aggregerede zoner på mineraljorde (metode kan evt. opgraderes). DCE beregner så hvilket gennemsnitligt årligt kulstofinput per ha, der er nødvendigt for at opretholde nuværende kulstofindhold i jorden i de forskellige zoner. Som eksempel kan tages 5000 kg C pr. ha i en given zone. Hvis en bedrift har alt sit jordtiliggende inden for denne zone, er kravet for at bidrage til en 0 løsning et input på 5000 kg C pr. ha. Hvis der er jord placeret i flere zoner (hvor et andet input er nødvendigt), beregnes et vægtet gennemsnit. Ifølge denne metode skal DCE fortsætte med en landsdækkende zoneinddeling (men gerne bruge aggregerede kulstofinput fra markniveau, evt. meldt ind af AU-AGRO eller andre). På bedriftsniveau vil man altså alene opgøre kulstofinputtet og man er derfor uafhængig af driftshistorik, kulstofindhold i udgangssituationen og jordens C/N forhold, og dermed også initialisering af C-TOOL. En sådan tilgang kan fint inkludere jordens lerindhold, temperatur og type af organisk materiale. Det skal dog bemærkes, at puljefordeling og startkulstofindhold også er nødvendig ved denne tilgang i og med der tages udgangspunkt i et gennemsnitligt kulstofinput per ha, som er nødvendigt for at opretholde nuværende kulstofindhold i jorden i forskellige zoner. Forudsætningen for denne tilgang er, at nedbrydningskurven af tilført kulstof (og dermed lagringen) ikke er afhængig af hvor meget kulstof der er i jorden i forvejen, samt at nedbrydningen af den eksisterende kulstofpulje i jorden, ikke er afhængig af hvor meget nyt kulstof der tilføres.

### **Fordele og ulemper:**

Både (a) og (b) tager udgangspunkt i et beregnet årligt kulstofinput på markniveau. De væsentligste forskelle er, at man ved (a) modellerer ændringer i jordens totale kulstoflager, hvilket man så kan be- eller afkræfte (og korrigere) ved hjælp af jordprøver, mens man i (b) alene opgør inputtet på bedriftsniveau og sammenligner det med det gennemsnitlige beregnede behov for input for at opnå ligevægt pba. af DCEs modellering. Derfor vil begge metoder være i overensstemmelse med tilgangen i den nationale emissionsopgørelse. Fordelen ved (b) ift. (a) er, at den tilgang kræver markant færre informationer. Desuden kan man sige, at metode (a) vil stille højere krav til de jordbrugere, der har et højt kulstofindhold i deres jorde af historiske årsager, hvad enten de selv har opbygget det eller købt eller lejet jorden efterfølgende, hvor metode (b) lægger op til, at det bliver et kollektivt ansvar for landbruget at bevare (og helst øge) det samlede kulstofindhold i de danske mineraljorde.

## 4. Sammenligning med andre lande og ESGreenTool

I forbindelse med besvarelse af bestillingen er der indhentet information fra kollegaer i Tyskland, Schweiz og Sverige omkring hvordan ændringer i kulstof i mineraljorder håndteres i de enkelte landes nationale drivhusgasopgørelser. Hvert land anvender modelleringsteknikker til at estimere ændringer i kulstof-lagrene med varierende grader af regionalisering. Det beskrevne gælder for mineraljord, hvilket varierer i definition mellem forskellige lande i forhold til hvilket kulstof-indhold, der danner grænsen mellem mineralske og organiske jorder.

Tyskland er i gang med at udvikle et standardiseret værktøj til drivhusgasbalancer på bedriftsniveau ved Thünen Institute of Climate-Smart Agriculture. Ændringer i kulstoflageret er i øjeblikket ved at blive integreret i den nationale LULUCF-opgørelse, og den første rapportering af kulstofændringer er planlagt til 2025. Dette gøres ved hjælp af RothC-modellen, der anvender kulstof og management data fra den nationale tyske jordbundsmonitoring. I første omgang regionaliseres kulstof-tendenserne ikke, men planen er at forbedre nøjagtigheden i 2026 ved at indarbejde IACS-management data og remote sensing data, hvilket muliggør regionaliseret modellering på en 100 x 100 m skala. På trods af indsatsen vurderes usikkerheden ved disse modellerede kulstof-tendenser fortsat høj.

Schweiz anvender en Tier 3-tilgang ved hjælp af RothC-modellen til at estimere ændringer i kulstoflageret. I betragtning af mangfoldigheden i det schweiziske landbrug, herunder varierede sædskifter og topografi, simuleres kulstof i jord for 19 afgrøder og 6 typer græsarealer. Modellen opskalerer resultaterne gennem 6000 simuleringer på tværs af 24 regioner og 10 teksturklasser, idet der tages højde for forskelle i klima og management. Disse resultater aggregeres til at repræsentere de nationale kulstofændringer. Modellen er valideret i forhold til langvarige markforsøg, og der arbejdes på at simulere kulstofændringer på en 100 x 100 m skala for at reducere usikkerheden.

Sverige rapporterer ændringer i kulstoflageret for otte agroøkologiske regioner ved hjælp af en dynamisk Tier 3-modeltilgang med ICBM (Introductory Carbon Balance Model). Modellen er skræddersyet til svenske forhold ved hjælp af detaljerede årlige udbytte-, jordtype- og klimadata. ICBM-modellen bruges til at simulere tidligere og fremtidige kulstofændringer, hvilket giver mulighed for fremskrivninger under forskellige klima- og management scenarier. Denne tilgang anses for at være fleksibel og dækkende i forhold til at vurdere kulstof-tendenser og potentielle virkninger af ændringer i arealanvendelse og management på nationalt plan.

Udgangspunktet for beregning af ændringer i kulstof i jord i ESGreenTool er beskrevet i notatet om "Kulstof i jord – implementering i klimaregnskab" (Kristensen et al., 2021). Kort beskrevet beregnes effekten af et enkelt års kulstofinput, hvis nedbrydningsprofil modelleres med C-TOOL. Ud fra dette beregnes årlige emissioner af CO<sub>2</sub>, der akkumuleres over den tidsperiode af år, der arbejdes med, og resultatet sammenlignes med den mængde CO<sub>2</sub>, der ville være blevet udledt, hvis det tilførte kulstof blev forbrændt på dag ét. I denne beregning inkluderes også den andel af den dannede CO<sub>2</sub>, der bliver absorberet i de globale sinks, hvor oceanerne er langt de vigtigste (Petersen et al., 2013). Den skitserede metode bruges til at beregne klimaeffekten af tilført kulstof i forhold til en referencesituation med kulstofinput fra vinterhvede med en gennemsnitlig dansk anvendelse af halm dyrket uden brug af husdyrgødning. Ved denne metode antages, at omsætningen af kulstofinput på det betragtede areal og referencen er ens over tid, så den årlige udledning er uafhængig af driftshistorik og driftspraksis i årene efter det betragtede år samt uafhængig af kulstofindhold i udgangssituationen, jordens C/N forhold, lerindhold, temperatur og type af organisk materiale. Kulstofinput i ESGreenTool baseres på allometriske funktioner fra IPCC (Henriksen et al., 2021).



## Referencer

- Christensen, B.T., Thomsen, I.K., Eriksen, J. 2022. The Askov long-term field experiment (1894–2021) represents a unique research platform. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185, 187–201.
- 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. Accepted for publication in *Environmental Modelling & Software*.
- Harbo, L.S., Olesen, J.E., Lemming, C., Christensen, B.T., Elsgaard, L. 2023. Limitations of farm management data in analyses of decadal changes in SOC stocks in the Danish soil-monitoring network. *European Journal of Soil Science*, 74, e13379.
- Henriksen, J.C.S., Kolind Hvid, S., Oudshoorn, F., Udesen, F., Nielsen, N.I., Kristensen, M.Ø., Petersen, J.S. 2021. Landbrugets klimaværktøj 1.0. Klimaværktøj til beregning af klimaaftrykket på den enkelte bedrift.
- Jacobs, A., Poeplau, C., Weiser, C., Fahrion-Nitschke, A., Don, A. 2020. Exports and inputs of organic carbon on agricultural soils in Germany. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 118, 249–271.
- Jensen, J.L., Elsgaard, L. 2023. Data om kulstoflagring fra udbragt husdyrgødning, No. 2023-0513665, 6 p., May 03, 2023.
- Jensen J.L., Giannini-Kurina F., Eriksen J. 2024. Similar root and stubble biomass carbon in grass-clover leys irrespective of yield, species composition, sward age, and fertilization. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 187, 494-503.
- Jensen, J.L., Thers, H., Elsgaard, L. 2022. Afklaring om videns- og ressourcebehov ved at integrere biokul i C-TOOL modellen til brug for emissionsopgørelser, No. 2022-0341679, 10 p., May 17, 2022.
- Kristensen, T., Mogensen, L., Knudsen, M.T. 2021. Kulstof i jord – implementering i klimaregnskab. Notat udarbejdet i projektet "Landbrugets klimaregnskab".
- Machmuller, M., Kramer, M., Cyle, T., Hill, N., Hancock, D., Thompson, A. 2015. Emerging land use practices rapidly increase soil organic matter. *Nature Communications* 6, 6995.
- Møller, A.B., Greve, M.H., Beucher, A.M. 2024. Opdateret jordbundstypekort, Nr. 2023-0626709, 41 s., mar. 19, 2024. Rådgivningsnotat fra DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug.
- Petersen, B.M., Knudsen, M.T., Hermansen, J.E., Halberg, N. 2013. An approach to include soil carbon changes in life cycle assessments. *Journal of Cleaner Production*, 52, 217–224.
- Taghizadeh-Toosi, A., Christensen, B.T. 2021. Filling gaps in models simulating carbon storage in agricultural soils: The role of cereal stubbles. *Scientific Reports*, 11, 18299.
- Taghizadeh-Toosi, A., Olesen, J.E. 2016. Modelling soil organic carbon in Danish agricultural soils suggests low potential for future carbon sequestration. *Agricultural Systems*, 145, 83-89.