

## Modellsimulering til følsomhedsberegninger af kulstoflagring som funktion af græsvarighed, fraktionering af kulstof i husdyrgødning og lerprocent i jord

Forfatter: Rikke Lykke Eriksen<sup>a</sup>

<sup>a</sup> SEGES Innovation, Planter & Miljø

STØTTET AF

**Promille**afgiftsfonden for landbrug

## Sammendrag

Kulstofmodeller, der benyttes til beregning af ændringer i jordens kulstofindhold over tid, er baseret på inputdata samt en række antagelser og sammenhænge, der kan have stor betydning for de estimater, som beregnes ved brug af modellerne. Det er derfor vigtigt at forudsætningerne og datagrundlaget, som modellerne baseres på, er så retvisende og virkelighedsnære som muligt.

De fleste kulstofmodeller benytter allometriske funktioner til beregning af C-input fra over- og underjordiske afgrøderester. En særlig udfordring ved flere kulstofmodeller, herunder den danske model C-TOOL, er at kulstofinputtet, beregnet med en allometrisk funktion, ikke differentierer mellem omlægsår og liggende år i flerårige afgrøder, herunder græs. Til at belyse denne udfordring, vurderes betydningen af C-input fra forskellige kulstofmodeller med og uden differentiering for varighed i følsomhedsberegninger for græs.

Den danske C-TOOL model indeholder desuden parametre, der ligeledes har indflydelse på den beregnede ændring i kulstofindholdet i landbrugsjord over tid, herunder lerprocent og størrelsen på den fraktion af kulstof i husdyrgødning, der allokeres direkte til en mere stabil kulstofpulje i jorden (HUM). Derfor belyser denne rapport ligeledes betydningen af jordens lerprocent samt fraktionen af kulstof i husdyrgødning, der allokeres til HUM-puljen ( $f_{HUM}$ ), for estimerede ændringer i jordens kulstofindhold med C-TOOL modellen ved følsomhedsberegninger.

På baggrund af resultaterne fra modelsimuleringer for ændring i jordens kulstofindhold i denne rapport, kan det konkluderes, at de tre undersøgte variabler; lerprocent,  $f_{HUM}$  og C-input fra forskellige kulstofmodeller, alle kan have afgørende betydning for den estimerede ændring i jordens kulstofindhold over tid.

## Introduktion

Dynamiske kulstofmodeller, der anvendes til beregning af ændringer i jordens kulstofindhold over tid, er centrale i bl.a. de nationale klimaopgørelser. I Danmark benyttes kulstofmodellen C-TOOL, der ligesom andre lignende kulstofmodeller er afhængig af inputdata for organisk kulstof fra f.eks. planterester og husdyrgødning (Taghizadeh-Toosi et al., 2014). Modellernes vigtighed i bl.a. de nationale opgørelser forudsætter, at beregninger foretaget med modellerne er så retvisende og virkelighedsnære som muligt.

Kulstofinput fra planterester der efterlades i marken, kan indeles i en overjordisk og en underjordisk rest, og inkluderer derfor både eksempelvis stub, halm, rødder og rodexudater. Kulstofinputtet fra planterester beregnes i kulstofmodeller typisk på baggrund af udbyttedata ved brug af allometriske funktioner (Keel et al., 2017).

Allometriske funktioner bygger på antagelsen om en lineær sammenhæng mellem udbytte og mængden af planterester, både de over- og underjordiske (Keel et al., 2017). Direkte målinger af kulstofinputtet fra planterester i marken er svære og tidskrævende at udføre, hvorimod udbyttet ofte er en kendt faktor. Derfor bidrager allometriske funktioner til, at kulstofinputtet fra planterester i stedet kan beregnes ud fra antagelsen om, at der er en lineær sammenhæng mellem udbyttet og den mængde planterest som efterlades i marken. Resultater fra nyere forsøg peger dog på, at beregning af kulstofinput ved brug af allometriske funktioner ikke er lige retvisende for alle afgrødetyper, herunder bl.a. flerårige afgrøder såsom græs (Jensen et al., 2022).

En særlig udfordring ved flere kulstofmodeller, som benytter allometriske funktioner, er, at beregninger af kulstofinputtet i flerårige afgrøder ikke differentierer mellem omlægsår og liggende år. I stedet benytter modellerne én gennemsnitlig værdi for kulstofinputtet i alle år. For en flerårig græsmark er det rimeligt at antage, at kulstofinputtet vil være markant større i et omlægsår, baseret på det øjeblikkeligt høje input fra rodbiomasse og stub ved opløjning. Konkret betyder denne udfordring, at et beregnet kulstofinput fra en græsmark i C-TOOL modellen, repræsenterer et gennemsnit af kulstofinputtet i brugsår og omlægsår, hvilket bevirker, at det bl.a. med C-TOOL ikke er muligt at undersøge effekten af varighed på kulstofinput, og dermed dets effekt på udviklingen i jordens kulstofindhold.

På baggrund af disse tilsyneladende fejlbehæftede forsimplinger i den allometriske funktion for beregning af kulstofinput fra græs i C-TOOL modellen, forsøger denne rapport at belyse effekten af disse i sammenligning med alternative kulstofmodeller ved følsomhedsberegninger fra modelsimuleringer for kulstofinput ved brug af C-værktøj (Poulsen, 2021).

Foruden inputdata fra afgrøderester, inkluderer C-TOOL modellen også andre parametre, der har betydning for ændringer i jordens kulstofindhold over tid (Taghizadeh-Toosi et al., 2014). Kulstofinput fra husdyrgødning er én af disse, og ved beregning af kulstofinput fra husdyrgødning anvendes der ikke allometriske funktioner, som dermed ikke er en udfordring i denne henseende (Keel et al., 2017). En anden parameter som derimod kan have betydning for beregningerne af jordens kulstofindhold over tid, er allokering af kulstof i husdyrgødning mellem FOM og HUM-puljen. I C-TOOL tilføres al kulstof fra afgrøderester til FOM-puljen i overjorden, mens organisk gødning, herunder husdyrgødning primært tilføres FOM-puljen og sekundært til HUM-puljen i en fraktion bestemt af jordens lerindhold (Taghizadeh-Toosi et al., 2014). Den direkte tilførsel af kulstof i husdyrgødning til HUM-puljen skyldes, at en del plantemateriale i husdyrgødningen vil være mikrobielt omsat allerede inden det tilføres jorden. Ved input af husdyrgødning i C-værktøjet (og C-TOOL) allokeres en fraktion ( $f_{HUM}$ ) af husdyrgødningens kulstofindhold direkte til HUM-puljen (Taghizadeh-Toosi et al., 2014). Da HUM-puljen anses som en mere stabil kulstofpulje, vil mængden af kulstof allokeret til denne pulje sandsynligvis have en betydning for jordens kulstofindhold over tid. Ifølge Taghizadeh-Toosi et al. (2014) er  $f_{HUM}$  estimeret på baggrund af ældre data for husdyrgødning. På baggrund af disse data vil værdien af  $f_{HUM}$  for

husdyrgødning være 0,14-0,16. I takt med at mere og mere husdyrgødning føres igennem biogasanlæg i dag (Henrichsen et al., 2023), vil en større andel af kulstofindholdet i husdyrgødning formegentlig være mere omsat inden det spredes på marken. Det kan fordre, at en større andel af kulstoffet allokeres til den mere stabile HUM-pulje, end de anslåede 14-16%. Det er dog usikkert, hvorvidt der findes data, som kan understøtte denne teori.

En anden parameter med betydning for mængden af kulstof, der kan lagres i landbrugsjord, er lerprocenten. Der er bred konsensus omkring lerindholdets betydning for kulstofomsætning i jorden, da ler kan binde en større mængde organisk stof, og dermed påvirke omsætnings hastigheden for kulstoffet via dets tilgængelighed for jordens mikroorganismer (Lavalley et al., 2020). I C-TOOL modellen er der en indbygget funktion, hvor omsætnings hastigheden af alle kulstofpuljerne påvirkes af jordens angivne lerprocent (Taghizadeh-Toosi et al., 2014).

I denne rapport undersøges derfor ligeledes betydningen af  $f_{HUM}$  og jordens lerprocent for udviklingen i jordens kulstofindhold over tid ved følsomhedsberegninger fra modelsimuleringer i C-værktøj.

## Metoder

Alle scenarieberegninger er foretaget i C-værktøj, som er et regnearksværktøj udviklet af SEGES Innovation til scenarieberegninger af forskellige tiltags betydning for kulstofindholdet i jorden. Værktøjet er opbygget med implementering af C-TOOL modellen (Poulsen, 2021). Værktøjet indeholder funktioner, som gør det muligt at opstille scenarier med forskellige afgrøder, sædskifte, halmhåndtering, tilførsel af husdyrgødning og jordbundsforhold. På baggrund af indtastede inputdata beregner værktøjet udviklingen i jordens kulstofpuljer i over- og underjorden for mere end 100 år frem i tiden.

### Følsomhedsberegninger for kulstoflagring i jord med forskellig lerprocent

Beregninger af effekten af forskelligt ler-indhold i jorden på det beregnede C-input er foretaget med udgangspunkt i 9 forskellige lerprocenter for tre startindhold af kulstof.

$$C_{input} \times 9 \text{ ler\%} \times 3 \text{ SOC}_{start}$$

Scenarierne i modelsimuleringerne er specificeret i nedenstående tabel:

LER PCT.	SOC <sub>START</sub>
1%	105
1%	115
1%	125
4%	105
4%	115
4%	125
7%	105
7%	115
7%	125
10%	105
10%	115
10%	125
13%	105

13%	115
13%	125
16%	105
16%	115
16%	125
19%	105
19%	115
19%	125
22%	105
22%	115
22%	125
25%	105
25%	115
25%	125

Ovenstående scenarier er beregnet for vårbyg med forudsætningen om et kerneudbytte på 70 hkg, hvor halmen nedmuldes.

#### **Følsomhedsberegninger for kulstoflagring ved forskellig fraktionering af C i husdyrgødning**

Beregninger af scenarier med forskellig fraktionering af C i husdyrgødning til HUM-puljen ( $f_{HUM}$ ), er foretaget med udgangspunkt i 6 forskellige fraktioneringsniveauer for 2 forskellige lerprocenter. Alle beregninger er foretaget med udgangspunkt i et startindhold af kulstof jorden i på 115 ton C pr. ha.

$$C_{input} \times 6 f_{HUM} \times 2 \text{ ler\%} \times SOC_{start}$$

Scenarierne i modelsimuleringerne er specificeret i nedenstående tabel:

$F_{HUM}$	LER PCT.
0,1	1%
0,1	2%
0,12	1%
0,12	2%
0,14	1%
0,14	2%
0,16	1%
0,16	2%
0,18	1%
0,18	2%
0,2	1%
0,2	2%

Følsomhedsberegningerne er foretaget for vårbyg med forudsætning om et kerneudbytte på 70 hkg pr. ha, hvor halmen bjærges. Desuden er indsat en tildeling af husdyrgødning i april på 40 tons kvæggylle pr. ha.

### Følsomhedsberegninger for kulstoflagring med græs ved brug af C-input fra forskellige kulstofmodeller

Effekten af græs på jordens kulstofindhold er beregnet i scenarier ved brug af C-input fra forskellige kulstofmodeller, med og uden differentiering mellem græsmarkens varighed.

I modelsimuleringerne er kulstofinput beregnet ved brug af nedenstående kulstofmodeller:

1. C-TOOL, original allometrisk funktion (Taghizadeh-Toosi et al., 2014)
2. C-TOOL, optimeret allometrisk funktion (differentierer mellem omlægsåret og brugsår).
3. Bolinder-funktion (Bolinder et al., 2007).
4. CCB-funktion (Franko et al., 2011).
5. ICBM-funktion, (Andrén et al., 2004).
6. IPCC-funktion, (2006 IPCC - Guidelines for national greenhouse gas inventories).

Effekten på det beregnede kulstofinput ved de ovennævnte modeller bestemmes i en række scenarier, som varierer i varighed af græsmarker (1-5 år) og udbyttenedgang ift. varighed.

$$C_{input} \times 5 \text{ varighed} \times SOC_{start}$$

Scenarierne er specificeret i nedenstående tabel, hvoraf det fremgår hvorvidt modellerne differentierer mellem græsmarkernes varighed:

MODEL	AFGRØDE	C-INPUT OVERJORD, TON/HA	UDBYTTE (FE) V. C- INPUT OVERJORD
<b>BOLINDER</b>	Græs liggende år	2,02	2350
	Græs omlægsår	5,12	5975
<b>C-TOOL NY</b>	Græs liggende år	4,56	8800
	Græs omlægsår	7,46	8800
<b>IPCC 2006 + 2019</b>	Græsvarighed 1 år	6,02	5400
	Græsvarighed 2 år	3,72 (gns input)	4500
	Græsvarighed 3 år	2,94 (gns input)	3565
	Græsvarighed 4 år	2,57 (gns input)	3135
	Græsvarighed 5 år	2,34 (gns input)	2865
<b>C-TOOL ORIGINAL</b>	Græs	7,04	8800
<b>CCB</b>	Græs	2,41	3135
<b>ICBM</b>	Græs	3,18	3975

C-input i overjord er tilnærmet med udbyttet (højre kolonne i tabel), hvor C-værktøjets output for den overjordiske rest samt den andel af den underjordiske rest, der går til overjorden (90%), ligger sammen:

$$C_{input \text{ overjord}} = Rest_{overjord} + 0,9 * Rest_{underjord}$$

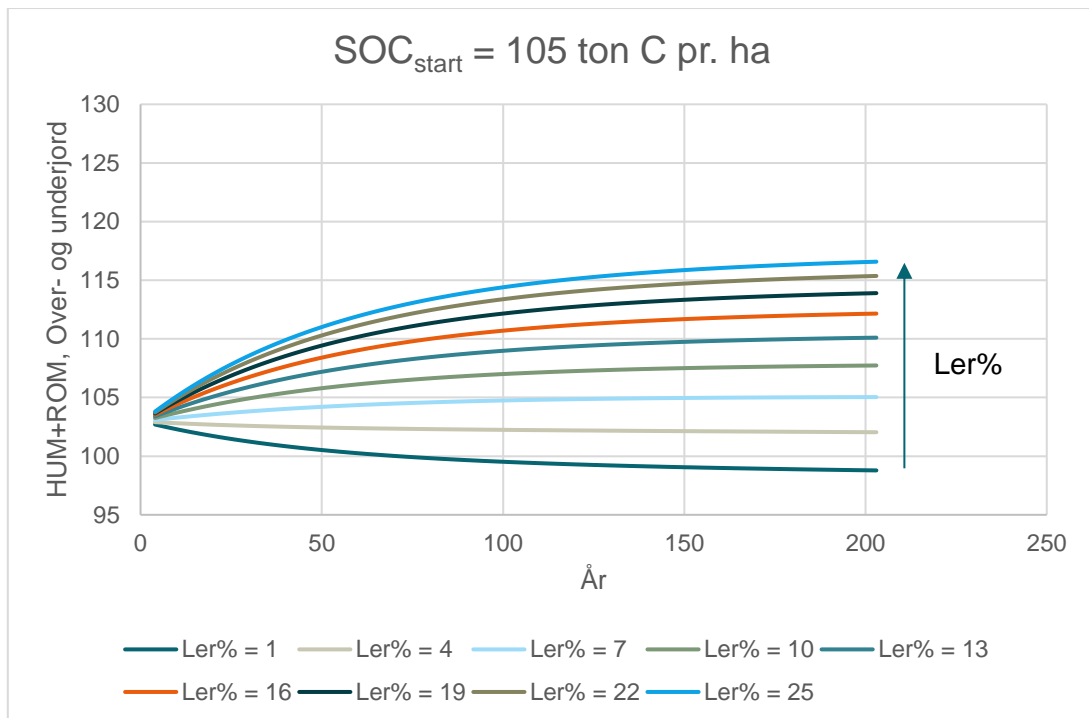
Modelsimuleringerne er foretaget for afgrøden 'kløver- og lucernegræs under 50% kløver (omdrift)' for en jord med ler pct. på 2% og med et startindhold af kulstof i jorden på 83 ton C pr. ha.

## Resultater og diskussion

### Betydning af lerprocent for kulstoflagring

I dette afsnit fremgår resultaterne fra modelsimuleringer med stigende lerprocent i jorden for jorde med hhv. lavt (105 ton C pr. ha), middel (115 ton C pr. ha) og højt (125 ton C pr. ha) indhold af organisk kulstof i jorden ved beregningernes år 0.

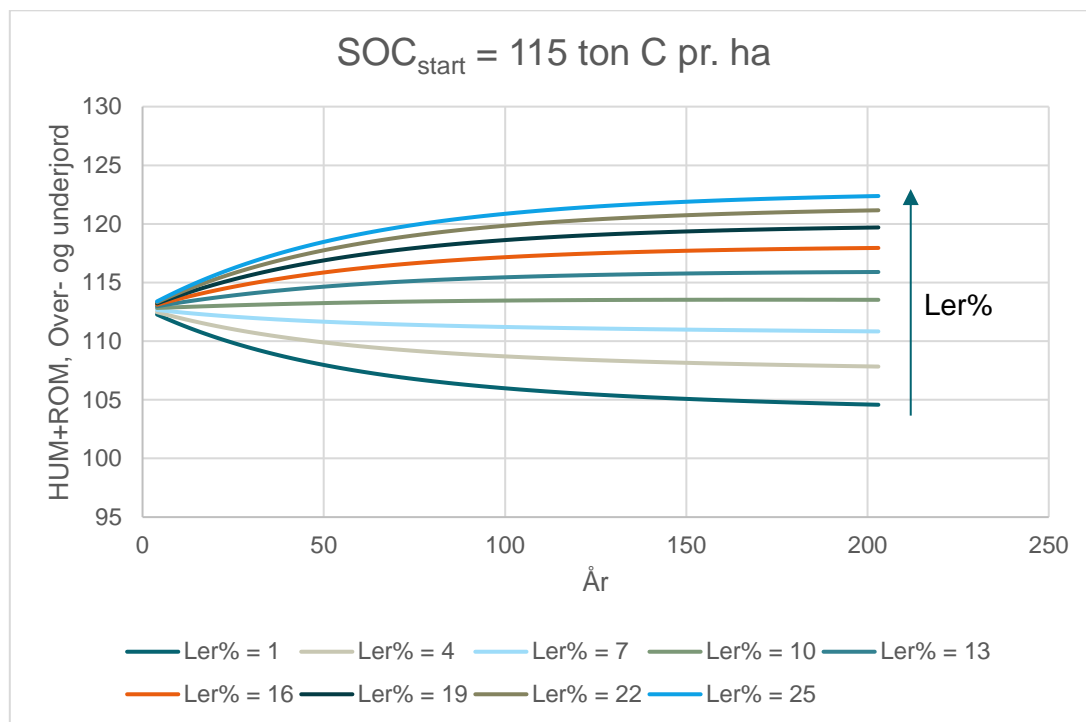
I figur 1 fremgår de beregnede ændringer i både over- og underjord for de to stabile kulstofpuljer, HUM og ROM, ved forskellige lerprocenter i jorden over 200 år ved et indhold af organisk kulstof i jorden på 105 ton C pr. ha ved beregningens start år.



Figur 1: Ændring i jordens kulstofindhold i HUM og ROM-puljerne for over- og underjord ved lerprocent fra 1% til 25% med et start-indhold af organisk kulstof på 105 ton C pr. ha.

I ovenstående scenarie med et lavt indhold af organisk kulstof i jorden fra beregningernes start, viser modelsimuleringerne, at kulstofindholdet i over- og underjordens HUM og ROM-puljer stiger for jorde med en lerprocent  $\geq 7\%$ . For 7% ler, stiger kulstofindholdet i den beregnede periode med ca. 2,5 ton C pr. ha, mens det for 25% ler stiger med ca. 12 ton C pr. ha på 200 år. Modsat vil der i jordene med 1% og 4% ler ske et fald i kulstofindholdet i HUM og ROM-puljerne i over- og underjorden.

I figur 2 fremgår de beregnede ændringer i både over- og underjord for de to stabile kulstofpuljer, HUM og ROM, ved forskellige lerprocenter i jorden over 200 år ved et indhold af organisk kulstof i jorden på 115 ton C pr. ha ved beregningens start år.

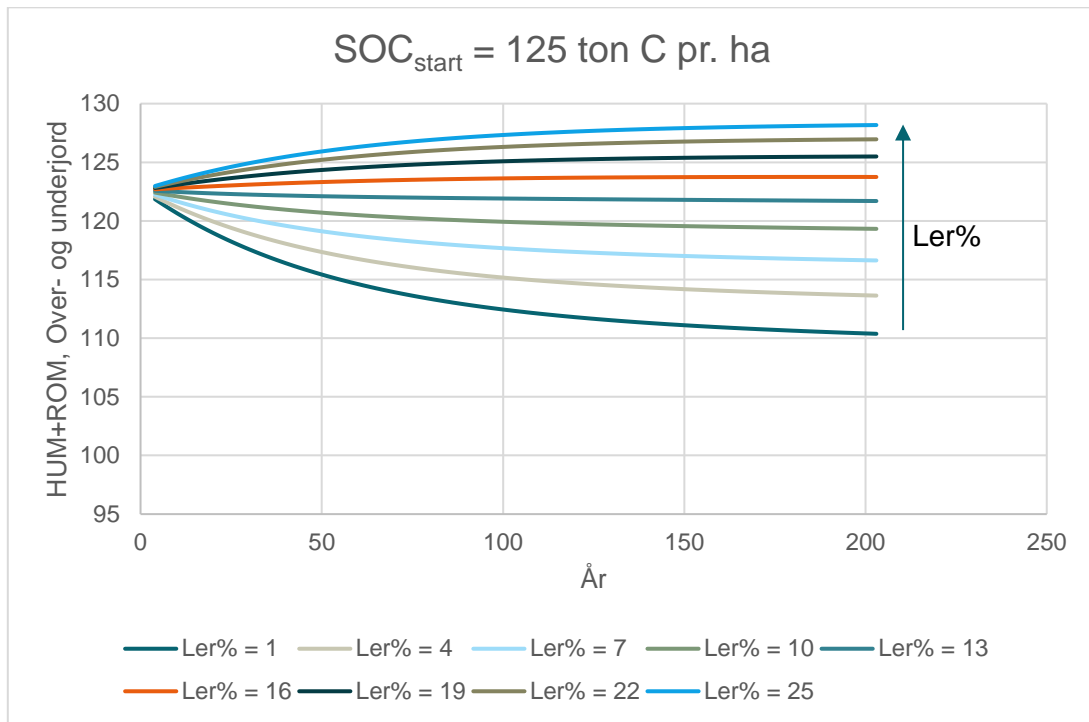


Figur 2: Ændring i jordens kulstofindhold i HUM og ROM-puljerne for over- og underjord ved lerprocent fra 1% til 25% med et start-indhold af organisk kulstof på 115 ton C pr. ha.

Modellsimuleringer af scenarie for jord med et middel indhold af organisk kulstof på 115 ton C pr. ha ved beregningens start, viser ligesom scenariet med lavt organisk kulstofindhold, at over- og underjordens organiske kulstofindhold i HUM og ROM-puljerne stiger med stigende lerprocent. I dette scenarie er det dog kun jorde med en lerprocent  $\geq 10\%$ , hvor kulstofindholdet i jordene øges, mens kulstofindholdet i jorde  $< 10\%$  ler falder.

I figur 3 fremgår de beregnede ændringer i både over- og underjord for de to stabile kulstofpuljer, HUM og ROM, ved forskellige lerprocenter i jorden over 200 år ved et indhold af organisk kulstof i jorden på 115 ton C pr. ha ved beregningens start år.





Figur 3: Ændring i jordens kulstofindhold i HUM og ROM-puljerne for over- og underjord ved lerprocent fra 1% til 25% med et start-indhold af organisk kulstof på 125 ton C pr. ha.

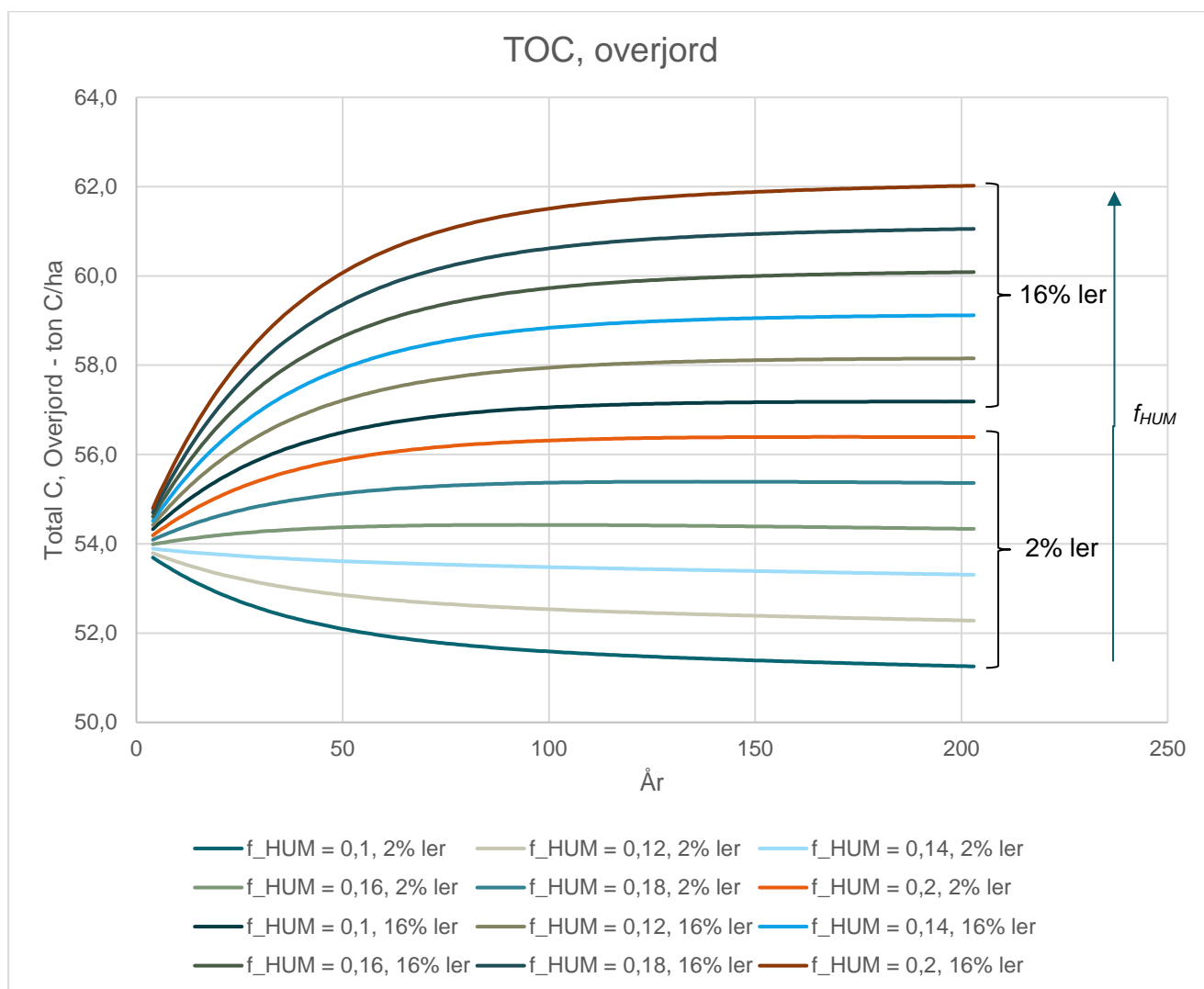
Modellsimuleringer for scenarie med et højt indhold af organisk kulstof på 125 ton C pr. ha som udgangspunkt for beregningerne, viser at kun i jorde med en lerprocent  $\geq 16\%$  ses en stigning i jordens organiske kulstofindhold på 200 år. Dermed falder jordens kulstofindhold i jorde med en lerprocent  $\leq 13\%$ , hvor kulstoffabet fra jorden stiger i takt med faldende lerprocent.

På tværs af scenarierne ses tydeligt sammenhængen mellem ler% og kulstofinput til HUM og ROM-puljerne i C-TOOL modellen. Scenarierne viser, at lerprocenten kan have en stor betydning for kulstofindholdet i de to mere stabile kulstofpuljer i jorden; HUM og ROM. Resultaterne viser generelt at kulstoføgningen forstørres eller at kulstoffabet formindskes, i takt med stigende lerprocent i jorden. Modsat vil risikoen for tab af kulstof fra jorden øges med lavere lerprocent. Jordens startindhold af kulstof har ligeledes en stor betydning for, hvorvidt kulstofindholdet i jorden falder eller stiger. Er der et højt indhold af kulstof i jorden fra start vil færre af ovenstående scenarie påvirke jordens kulstofindhold positivt over tid.

#### Betydning af kulstoffraktion fra husdyrgødning allokeret til HUM-puljen på kulstoflagring

Dette afsnit beskriver resultaterne fra modellsimuleringer for ændring i overjordens totale organiske kulstofindhold over en periode på 200 år for scenarier, hvor jorden indeholder hhv. 2% og 16% ler, og med lav til høj fraktionering (0,1-0,2) af kulstof i husdyrgødning til HUM-puljen i jorden ( $f_{HUM}$ ). Beregningerne har taget udgangspunkt i et indhold af organisk kulstof i jorden på 115 ton C pr. ha ved beregningernes start. Resultaterne vises kun for overjordens indhold af organisk kulstof, som indeholder 54 ton C pr. ha ved beregningens start år.

Resultaterne af beregninger for alle scenarier fremgår af figur 4.



Figur 4: Ændring i overjordens totale organiske kulstofindhold (TOC) ved varierende fraktioneringsniveauer af kulstof i husdyrgødning til HUM-puljen ( $f_{HUM}$ ). Der er regnet for jord med en lerprocent på 2% og 16% med et startindhold af organisk kulstof på 115 ton C pr. ha.

Scenarierne, der fremgår af figuren, viser en klar sammenhæng mellem fraktionen af kulstof i husdyrgødning ( $f_{HUM}$ ), der allokeres direkte til den mere stabile HUM-pulje og indholdet af kulstof i overjorden. Her fremgår det, at jo større  $f_{HUM}$ , des mere positivt vil det påvirke kulstofændringen i jorden over 200 år. I ovenstående scenarier, er det kun scenarier med  $f_{HUM}$  på 0,1-0,14 for jord med 2% ler, der ses et fald i overjordens kulstofindhold over tid. I de resterende scenarier, øges overjordens kulstofindhold. Den største øgning ses for scenariet med den højeste  $f_{HUM}$  på 0,2 ved den høje lerprocent på 16%.

Som beskrevet i indledningen, angiver Taghizadeh-Toosi et al. (2014) at  $f_{HUM}$  for husdyrgødning vil variere mellem 0,14 og 0,16 afhængig af lerindholdet i jorden. I ovenstående scenarie med 2% ler er det afgørende for jordens kulstofindhold, hvorvidt der regnes med 0,14 eller 0,16 for  $f_{HUM}$ , eftersom af 0,14 resulterer i et mindre fald i overjordens kulstofindhold, mens 0,16 viser en mindre stigning.

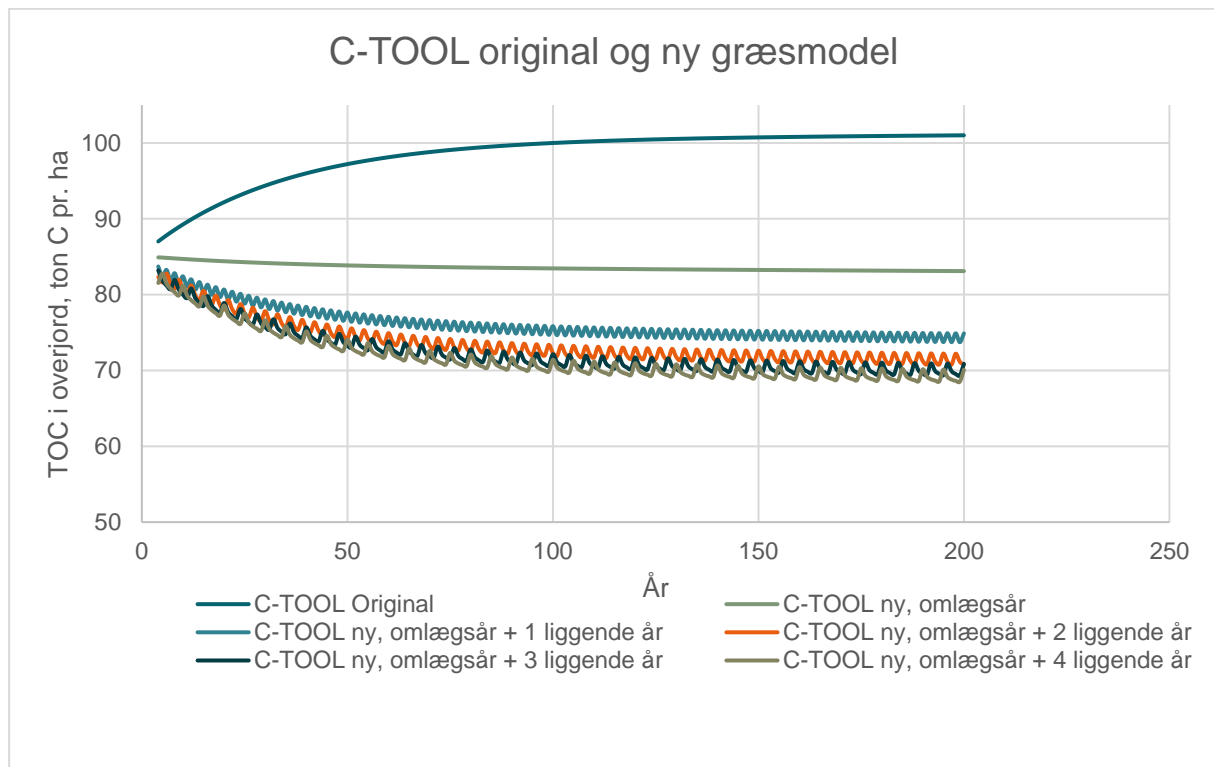
Skulle det fremadrettet vise sig, at  $f_{HUM}$  for eksempelvis afgasset gylle bør være højere end de anslåede 0,14-0,16, viser ovenstående scenarier også, at det kan have en markant betydning for ændringen i jordens kulstofindhold. I scenarier med  $f_{HUM}$  på hhv. 0,18 og 0,2 vil overjordens kulstofindhold da øges med yderligere 1-2 ton C pr. ha i forhold til scenarierne med  $f_{HUM}$  på 0,16 for begge lerprocenter.

Desuden illustrerer ovenstående scenarier tydeligt afhængigheden mellem  $f_{HUM}$  og lerprocenten i jorden, gennem scenarierne med et højt (16%) og lavt (2%) lerindhold.

### Betydning af C-input fra forskellige kulstofmodeller for kulstoflagring med græs

Dette afsnit beskriver resultaterne af modelsimuleringer for kulstoflagring i græsmarker med C-TOOL (original og ny) og de udvalgte alternative input-metoder. Efterfølgende vurderes output fra C-TOOL (original og ny) i sammenligning med de alternative metoder.

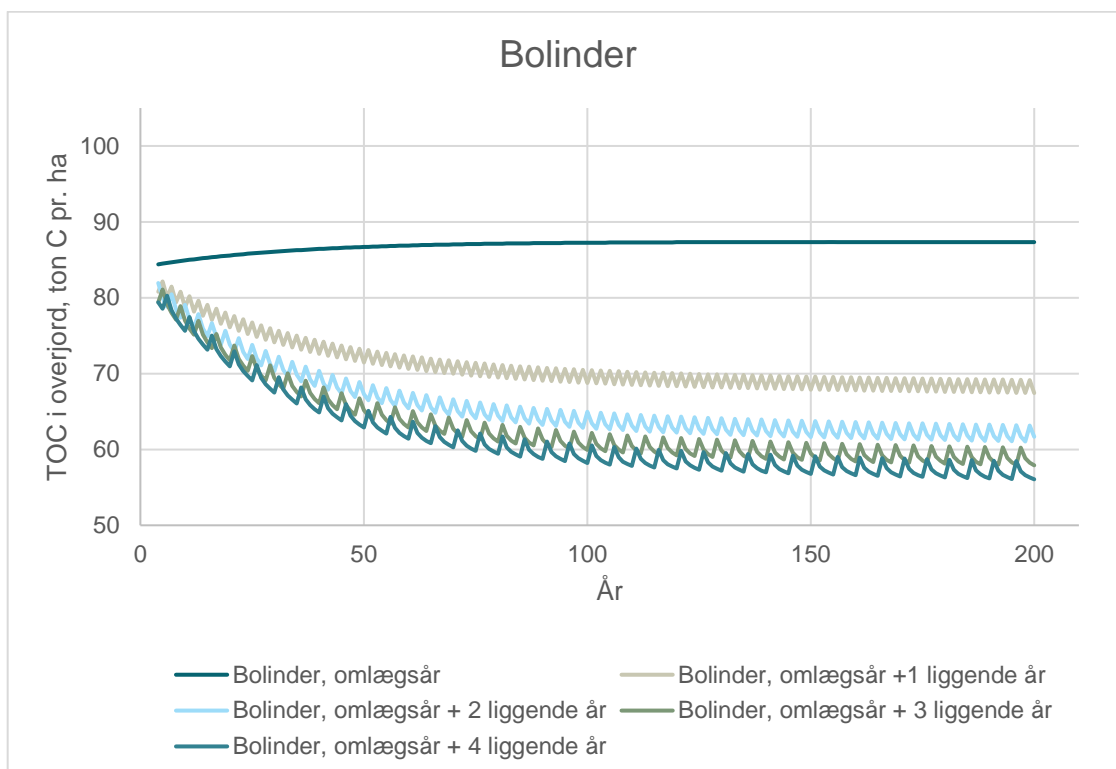
I figur 5 fremgår resultater af modellsimuleringer foretaget med C-input fra den originale C-TOOL model, som er indbygget i C-værktøj samt et opdateret C-værktøj med en inputmodel, hvor der differentieres mellem græsmarkernes liggende år og omlægsår (C-TOOL ny).



Figur 5: Ændring i overjordens totale kulstofindhold beregnet med original C-TOOL model og ny C-TOOL model, for en jord med startindhold af organisk kulstof på 83 ton pr. ha og en lerpct. på 2%.

Det fremgår af figuren, at den originale C-TOOL models høje årlige C-input resulterer i en betydelig stigning i overjordens organiske kulstofindhold fra 83 ton C pr. ha i år 0 til ca. 101 ton C pr. ha (+18 ton C pr. ha) i år 200. I scenarierne beregnet med den nye model, hvor der modsat i den originale, differentieres mellem omlægsår og liggende år for græsmarken, ses et fald i overjordens totale organiske kulstofindhold. Den mindste ændring i jordens kulstofindhold ses for scenariet, hvor græsmarken omlægges hvert eneste år, hvor et større C-input fra omlægningen medregnes hvert år. I dette scenarie, bevaret jordens oprindelige kulstofindhold efter de 200 år, og forbliver dermed 83 ton C pr. ha. I de resterende scenarier med ét til fire liggende år, ses en puls i grafen for omlægsåret, som respons på det større C-input ved omlægning. Faldet i overjordens organiske kulstofindhold stiger i takt med at græsmarkens antal liggende år øges, hvor det maksimale kulstoftab på -13 ton C pr. ha over en periode på 200 år ses for den nye C-TOOL model, hvor der regnes med ét omlægsår efterfulgt af fire liggende år. Til sammenligning falder kulstofindholdet i overjorden med -8 ton C pr. ha for scenariet med ét omlægsår efterfulgt af ét liggende år. Anvendelse af den nye C-TOOL model med differentiering mellem omlægs- og liggende år til beregninger for ændringer i jordens kulstofindhold med græs, giver dermed et markant anderledes resultat end den originale C-TOOL model.

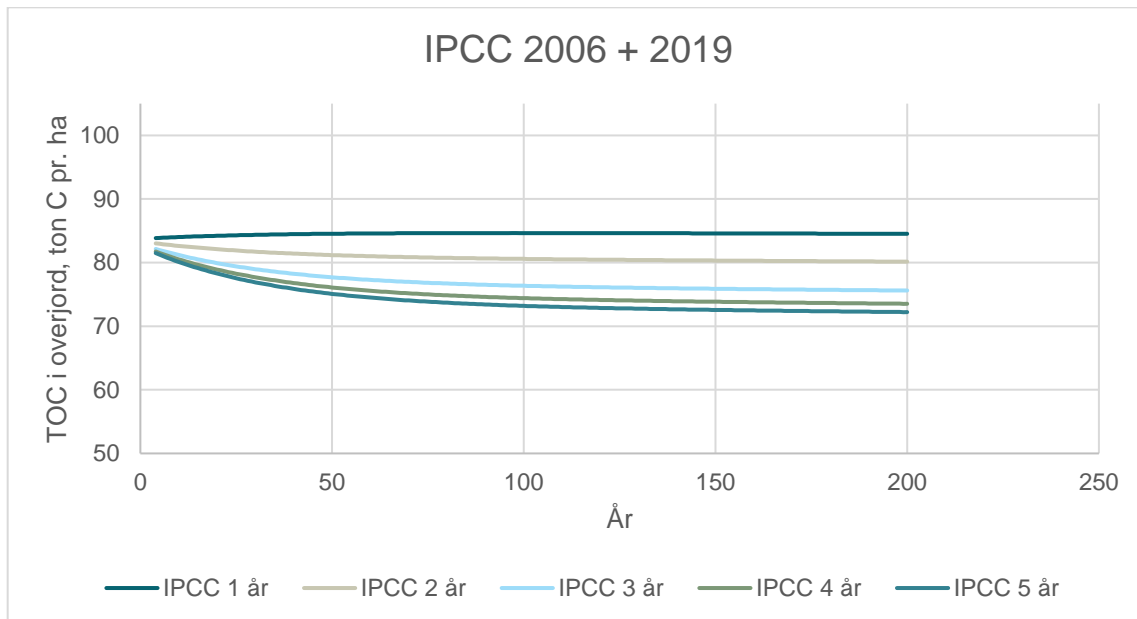
Bolinder er en anden C-input model, der ligesom den nye C-TOOL model differentierer mellem omlægsår og liggende år. Modellsimuleringernes resultater for ændring i overjordens organiske kulstofindhold med Bolinder modellen fremgår af figur 6.



Figur 6: Ændring i overjordens totale kulstofindhold beregnet med Bolinder modellen, for en jord med startindhold af organisk kulstof på 83 ton pr. ha og en lerpct. på 2%.

Til sammenligning med den nye C-TOOL model, hvor scenariet med omlægning af græsmarken hvert år resulterer i et stabiliseret kulstofindhold i overjorden, vil det samme scenarie beregnet med Bolinder modellen resultere i en mindre stigning på +4 ton C pr. ha. Til gengæld er tabet af kulstof i jorden over en periode på 200 år større ved brug af denne model. I et scenarie med ét omlægsår og ét liggende år reduceres overjordens indhold af organisk kulstof med -14 ton C pr. ha, mens det største tab er beregnet for scenariet med ét omlægsår og fire liggende år. Her er overjordens organiske kulstofindhold reduceret med -27 ton C pr. ha efter 200 år.

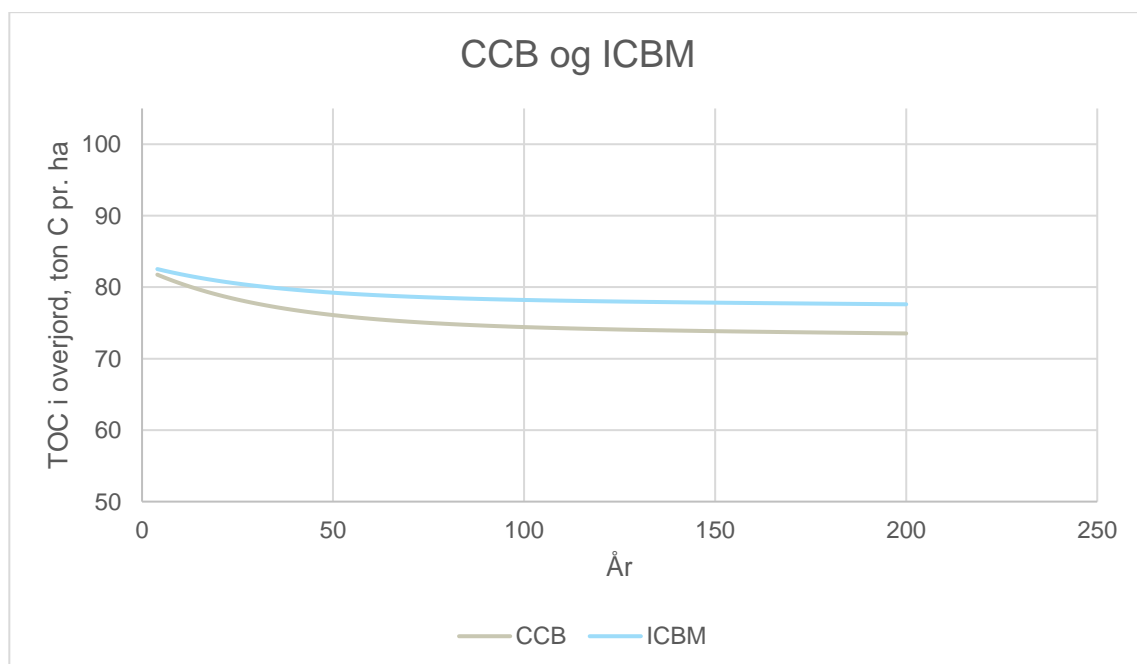
I IPCC's (2006+2019) input model benyttes, modsat de resterende modeller, et specifikt gennemsnitligt C-input for græs, afhængig af markens varighed (liggetid). Her reduceres C-inputtet i takt med græssets varighed. Resultaternes fra modellsimuleringer med brug af IPCC modellens C-input fremgår af figur 7.



Figur 7: Ændring i overjordens totale kulstofindhold beregnet med IPCC (2006+2019) modellen, for en jord med startindhold af organisk kulstof på 83 ton pr. ha og en lerpct. på 2%.

Ved brug af IPCC (2006+2019) modellen, vil et scenarie med varighed af græs på 1 år, svarende til ét omlægsår ved brug af de forgående modeller, resultere i en mindre stigning i overjordens organiske kulstofindhold på +1,5 ton C pr. ha. De resterende scenarier med en græsvarighed på 2-5 år viser et fald i kulstofindholdet på mellem -3 og -11 ton C pr. ha, hvor kulstoffabet stiger ved længere græsvarighed.

CCB og ICBM er to input modeller, der begge, ligesom den originale C-TOOL model, ikke differentierer mellem varigheden af græsmarkerne i forhold til omlægsår og liggende år. Det betyder, at der regnes med samme gennemsnitlige C-input til jorden, uafhængigt af græssets varighed. Scenarieberegninger ved brug af de to modeller fremgår af figur 8.



Figur 8: Ændring i overjordens totale kulstofindhold (TOC) beregnet med modellerne CCB og ICBM, for en jord med startindhold af organisk kulstof på 83 ton pr. ha og en lerpct. på 2%.

I modsætning til den originale C-TOOL model, der ligeledes ikke differentierer C-input i forhold til græssets varighed, viser beregningerne ved brug af C-input fra CCB og ICBM-modellerne at overjordens indhold af organisk kulstof falder over en periode på 200 år. Ved brug af CCB's C-input ændres kulstofindholdet i overjorden fra 83 ton C pr. ha i år 0 til 73,5 ton C pr. ha i år 200, svarende til et kulstofstab på -9,5 ton pr. ha. Kulstoffabet med ICBM's C-input er en del mindre på -5,5 ton C pr. ha. Men som beskrevet står disse modeller i kontrast til en stigning i overjordens organiske kulstof på +18 ton C pr. ha, beregnet for det samme scenarie ved brug af den originale C-TOOL model.

Sammenligning af både den originale og den nye C-TOOL model med andre eksisterende inputmodeller til beregning af ændringer i jordens kulstofindhold viser betydningen af C-inputtet og hvorvidt der differentieres i dette i forhold til omlægsår og liggende år. For modeller som den originale C-TOOL model, CCB og ICBM, der alle bruger det samme C-input for græs uafhængigt af græssets varighed, har størrelsen på C-inputtet i den enkelte model en afgørende betydning for de beregnede ændringer i jordens kulstofindhold. Ved brug af samme forudsætninger i modelsimuleringerne, vil brug af den originale C-TOOL model, som den eneste, resultere i en markant øgning af kulstofindholdet i overjorden. Beregninger for samme scenarie ved brug af de resterende modeller, viser alle et fald i overjordens kulstofindholdet, dog med undtagelse af IPCC (2006+2019) og Bolinder, når der regnes med omlægning af græsmarken hvert år. Sammenlignes de tre modeller, der differentierer mellem omlægsår og liggende år, opnås der lignende resultater ved brug af C-input for IPCC (2006+2019) og den nye C-TOOL model, mens input fra Bolinder modellen resulterer i markant større tab af kulstof over de 200 år, når der medregnes liggende år. C-TOOL (ny) er dog den eneste af de tre, hvor der ikke ses en mindre stigning i kulstofindholdet blandt beregninger for scenariet, hvor græsset omlægges hvert eneste år.

Overordnet set, har C-input og den allometriske funktion, som ligger bag kulstofmodellerne, en stor betydning for den beregnede ændring i jordens kulstofindhold både på kort og lang sigt. Desuden bidrager metoder, der differentierer mellem omlægsår og liggende år, med muligheden for tilpasse C-input til varigheden af græsmarkerne, hvilket kan have stor betydning for den beregnede ændring i jordens kulstofindhold afhængig af den anvendte metode.

## Konklusion

På baggrund af resultaterne fra modelsimuleringer for ændring i jordens kulstofindhold, kan det konkluderes, at de tre undersøgte variabler; lerprocent,  $f_{HUM}$  og C-input fra forskellige kulstofmodeller, alle kan have afgørende betydning for den estimerede ændring i jordens kulstofindhold over tid.

Resultaterne fra modelsimuleringer med forskellig lerprocent viser generelt at kulstoføgningen forstørres eller at kulstoffabet formindskes, i takt med stigende lerprocent i jorden. Modsat vil risikoen for tab af kulstof fra jorden øges med lavere lerprocent. Jordens startindhold af kulstof har ligeledes en stor betydning for, hvorvidt kulstofindholdet i jorden falder eller stiger, hvor et større kulstofindhold ved beregningens start typisk giver et mindre positivt udfald for jordens kulstofindhold.

For  $f_{HUM}$  viser resultaterne fra modelsimuleringerne tydeligt en sammenhæng mellem at stigende  $f_{HUM}$  vil resultere i en stigende kulstofindhold i overjorden. Da  $f_{HUM}$  er afhængig af lerprocenten, viser beregningerne ligeledes, at et højt indhold af ler i jorden (16%), i kombination med en høj  $f_{HUM}$  (0,2) giver den største stigning i kulstofindhold i overjorden. Den anvendte fraktionering for den mængde kulstof i husdyrgødning, som allokeres direkte til HUM-puljen, kan dermed ligeledes have stor betydning for den estimerede kulstofændring.

Modelsimuleringer med brug af C-input fra forskellige kulstofmodeller for græs viser overordnet set, at det anvendte C-input beregnet via allometriske funktioner på baggrund af udbyttedata, har en stor betydning for den estimerede ændring i overjordens kulstofindhold. Ved sammenligning af metoder, der ikke tager højde for varigheden af græs, med metoder der differentierer mellem omlægsår og liggende år, viser beregningerne, at der kan være betydelige forskelle mellem estimaterne, selv ved anvendelse af én model, i scenarier med forskellig varighed af græs. Blandt de anvendte modeller, er det kun scenarier med brug af C-TOOL (original) samt IPCC og Bolinder (med omlægsår hvert år), der resulterer i en stigning i overjordens kulstofindhold. De resterende scenarier for de undersøgte modeller, viser alle et større eller mindre fald i overjordens kulstofindhold. Dette kan indikere, at estimater for kulstofændringer i græsmarker med C-TOOL (original), er baseret på et for højt gennemsnitligt C-input, mens den nye C-TOOL model, der indeholder differentiering i varighed, leverer estimater, der er på linje med de øvrige inddragede modeller.

## Referencer

- [1] Andrén, O., Kätterer, T. & Karlsson, T. 2004. ICBM regional model for estimations of dynamics of agricultural soil carbon pools. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 70, 231-239.
- [2] Bolinder, M.A., Janzen, H.H., Gregorich, E.G., Angers, D.A. & VandenBygaart, A.J. 2007. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118, 29-42.
- [3] Franko, U., Kolbe, H., Thiel, E. & Ließ, E. 2011. Multi-site validation of a soil organic matter model for arable fields based on generally available input data. *Geoderma*, 166, 119-134.
- [4] Henriksen, L.; Kaiser, K.; Christensen, M.N.; Hyldgaard, B.; Wiborg, I.A.; Toft, L.V.; Hvid, S.K.; Holm, M.; Tybirk, P.; Nielsen, N.I. 2023. Klimavirkemidler til dansk landbrug. 89 sider. SEGES Innovation P/S
- [5] IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. (eds. Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. & Tanabe, K.). Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Published: IGES, Japan.
- [6] Jensen, J. L., Beucher, A. M., & Eriksen, J. (2022). Soil organic C and N stock changes in grass-clover leys: Effect of grassland proportion and organic fertilizer. *Geoderma*, 424, 116022.
- [7] Keel, S. G., Leifeld, J., Mayer, J., Taghizadeh-Toosi, A., & Olesen, J. E. (2017). Large uncertainty in soil carbon modelling related to method of calculation of plant carbon input in agricultural systems. *European Journal of Soil Science*, 68(6), 953-963.
- [8] Lavallee, J. M., Soong, J. L., & Cotrufo, M. F. (2020). Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global change biology*, 26(1), 261-273.
- [9] Poulsen, H. V. (2021) Værktøj til beregning af kulstoflagring i jord. *Landbrugsinfo.dk*. [Værktøj til beregning af kulstoflagring i jord \(landbrugsinfo.dk\)](https://landbrugsinfo.dk/vaerktoej-til-beregning-af-kulstoflagring-i-jord)
- [10] Taghizadeh-Toosi, A., Christensen, B. T., Hutchings, N. J., Vejlin, J., Kätterer, T., Glendinning, M., & Olesen, J. E. (2014). C-TOOL: A simple model for simulating whole-profile carbon storage in temperate agricultural soils. *Ecological Modelling*, 292, 11-25.