

Styrket grundlag for vurdering
af klimaeffekter ved pyrolyse af tre
forskellige typer af biomasse til biokul

Formål og framing

CIP Fonden undersøger mulighederne for, at CO₂e-lagring med biokul i landbruget kan indfri de politiske mål for tekniske reduktionspotentialer i Landbrugsaftalen fra 2021, og undersøger hvad der skal til for på den måde at opnå markedsdrevne, negative klimaemissioner fra landbruget.

For at styrke forståelsen af klimaeffekterne knyttet til biokul og deres udvikling over tid og for bedre at kunne tage højde for kulstofindholdet i den type biokul, der produceres i Danmark, har CIP Fonden bedt RUC-IMT om at undersøge nogen centrale aspekter omkring klimaeffekterne af at implementere biomasse-pyrolyse i en dansk kontekst anno 2023 med perspektiver frem imod 2050. Det arbejde RUC-IMT har udført for CIP-fonden i denne forbindelse er struktureret omkring 4 del-opgaver som beskrevet på næste side.

Materialet skal bidrage til et bedre grundlag for beregning af samfundseffekter og samfundsøkonomi ved fremstilling og brug af biokul og fortrængningsomkostningerne ved kulstof-lagring med biokul som klimavirkemiddel.

Arbejdet og resultaterne er ikke fag-fællebedømt. Dele af studiet er desuden nyt og ikke umiddelbart sammenligneligt med tidligere studier. Der er risiko for fejl og mangler. Input og kommentarer er velkomne (tpapet@ruc.dk)!

Der vil blive arbejdet videre med de forskellige analyser og metoder i andre projekter for at forbedre forståelsen og øge robustheden og anvendeligheden heraf.



Projektstruktur

Det arbejde RUC-IMT har udført for CIP-fonden i relation til det igangværende biokulprojekt er struktureret omkring følgende 4 del-opgaver:

- 1) Revideret opgørelse af klimaeffekter for tre typer biomasse i form af 100 års effekter sammenlignet med reference-situationen
- 2) Udarbejdelse af tidsprofil for klimaeffekterne ved biokul lavet af de tre typer biomasser
- 3) Akkumulerede profiler over tid ved gentagne års produktion og lagring af CO₂e med biokul
- 4) Overvejelser om arealkrav til udbringning af biokul svarende til en sekvestreringseffekt på 2 mio ton CO₂e

Produktet



Primære resultater i
slide-deck format



Kort baggrundsrapport i
*.doc el. pdf format



Datatabeler bag tidslinjer
i regneark

Forudsætninger og afgrænsning

Alle analyser er lavet med et udgangspunkt i de biomasser og klimaeffekter der undersøges i AU's vidensyntese. Der er desuden et gennemgående fokus på forskellen mellem effekterne af den nuværende anvendelse af en given biomasse og effekterne fra et system hvor den samme biomasse pyrolyseres og biokullet bringes ud i dansk landbrugsjord. Systemerne der analyseres er som følger:

Referenceanvendelse af halm: Nedmuldes direkte. Ingen lager-emissioner. Giver kulstofsekvistrering i jorden.

Referenceanvendelse af fibre fra afvandning af digestat/biogasrestfibre og spildevandsslam: Opbevares og udbringes efterfølgende på dansk landbrugsjord. Emissioner fra lager. Giver kulstofsekvistrering i jorden.

Pyrolyse (inkl tørring hvor nødvendigt): Stabiliserer biologisk aktivt materiale (slam/fibre), øger stabilitet af kulstof i jorden og bidrager med et energioverskud til substitution af andre energiformer.

Se flere eksempler på rammer og afgrænsninger i baggrundsnotatet



Opgave 1: Revideret opgørelse af klimaeffekter for tre typer biomasse i form af 100 års effekter sammenlignet med reference-situationen



Resultater fra den danske vidensyntese om brug af biokul i dansk landbrug - klimaeffekter for tre typer biomasse som 100 års effekter sammenlignet med reference-situationen

1 ton tørstof	Merværdi af lagring (negative emissioner)	Undgåede emissioner	Fortrængningsgevinst ved energioverskud	Samlet CO ₂ gevinst (som Σ af 3 faktorer)
	Kg CO ₂ e per ton tørstof			
Spildevandsslam	+142	+506	+365	+1013
Halm	+381	-	+596	+977
Restfibre fra biogas	+293	+197	+373	+863

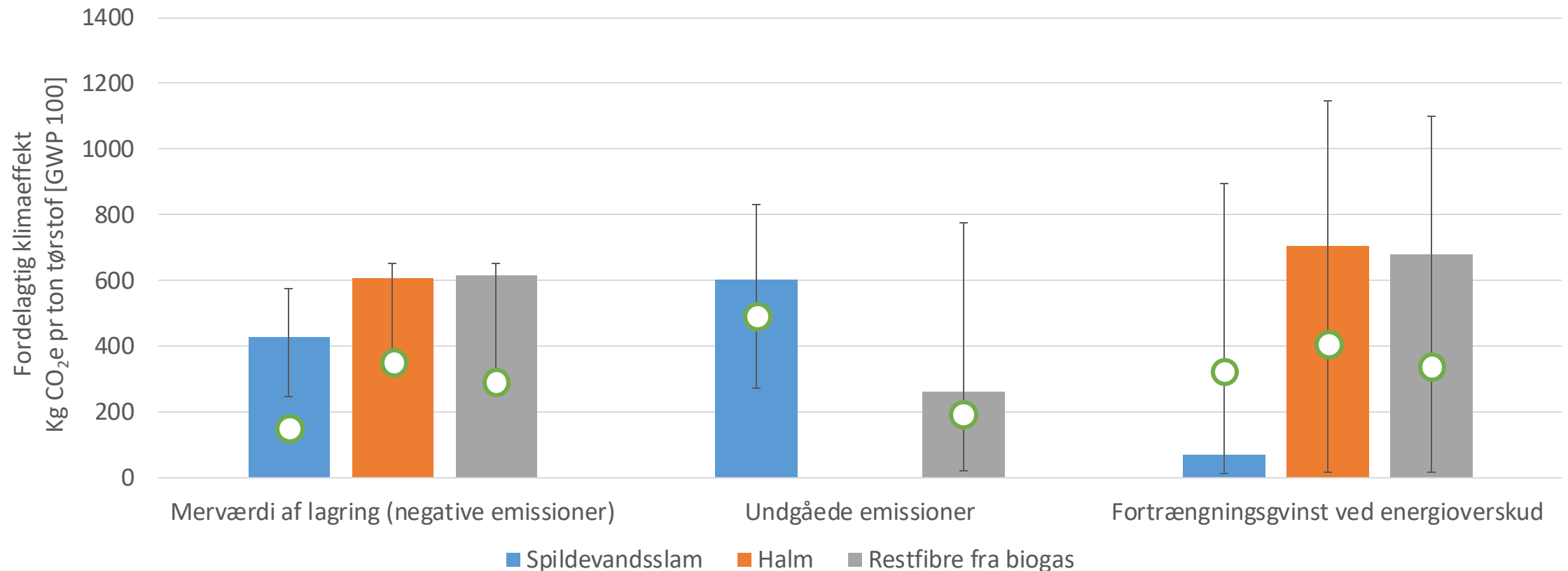
Data fra Elsgaard et al (2022) Knowledge synthesis on Biochar in danish agriculture

Resultater fra opgave 1# Revideret opgørelse af klimaeffekter for tre typer biomasse i form af 100 års effekter sammenlignet med reference

1 ton tørstof	Merværdi af (kulstof-) lagring (negative emissioner)	Undgåede emissioner (fra opbevaring)	Fortrængningsgevinst ved energioverskud	Samlet CO ₂ gevinst (som Σ af 3 faktorer)	Samlet CO ₂ gevinst (forventet CFA-resultat)
	Kg CO ₂ e per ton tørstof				
Spildevandsslam	430 (250-580)	600 (270-830)	70 (10-900)	≈1100 (≈500-2300)	n.a.
Halm	610 (350-650)	0	710 (20-1180)	≈1300 (≈400-1800)	1050 (700-1200)
Restfibre fra biogas	620 (260-650)	260 (20-780)	680 (20-1100)	≈1550 (≈300-2500)	n.a.

Data fra RUC-IMT (2023) baseret på en række kilder og egne beregninger. Se baggrundsrapport. Afrundet. Centrale skøn fremhævet, og resultatspæn i parentes. Variation af resultatet ”fortrængningsgevinst ved energioverskud” illustrerer forskellen på best-case og worst-case energianvendelse.

Opg 1# Revideret opgørelse af klimaeffekter for tre typer biomasse i form af 100 års effekter sammenlignet med reference



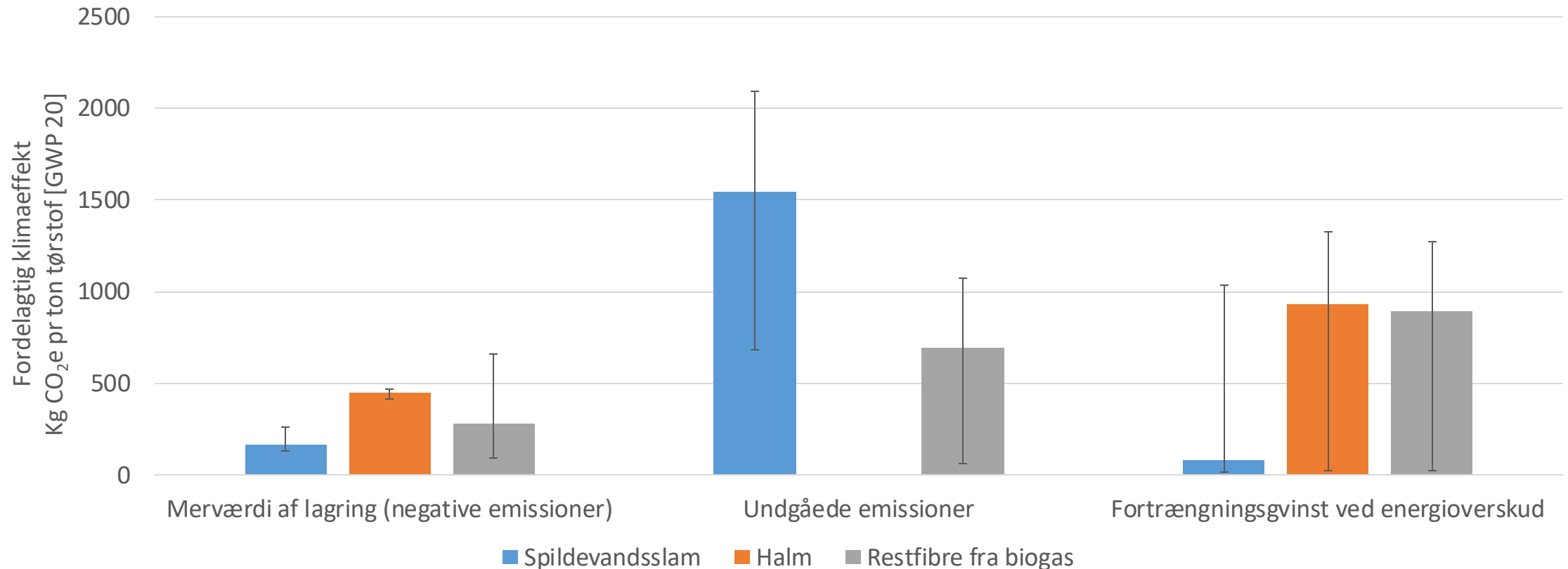
○ Data fra Elsgaard et al (2022) Knowledge synthesis on Biochar in danish agriculture
Resten fra RUC-IMT (2023). Se baggrundsrapport. Resultatspæn på værdi af energioverskud
viser best-case >< worst-case energianvendelse.

Opg 1 xtra# Revideret opgørelse af klimaeffekter for tre typer biomasse i form af 20 års effekter sammenlignet med reference-situationen

1 ton tørstof	Merværdi af (kulstof-) lagring (negative emissioner)	Undgåede emissioner (fra opbevaring)	Fortrængningsgevinst ved energioverskud	Samlet CO ₂ gevinst (som Σ af 3 faktorer)	Samlet CO ₂ gevinst (forventet CFA-resultat)
	Kg CO ₂ e per ton tørstof				
Spildevandsslam	170 (130-260)	1540 (680-2100)	80 (20-1040)	≈1800 (≈800-3400)	n.a.
Halm	450 (420-470)	0	930 (20-1370)	≈1400 (≈400-1800)	950 (600-1200)
Restfibre fra biogas	280 (100-320)	690 (70-1940)	890 (20-1280)	≈1850 (≈200-3500)	n.a.

Data fra RUC-IMT (2023) baseret på en række kilder og egne beregninger. Se baggrundsrapport. Afrundet. Centrale skøn fremhævet, og resultatspæn i parentes. Variation af resultatet ”fortrængningsgevinst ved energioverskud” illustrerer forskellen på best-case og worst-case energianvendelse.

Opg 1 xtra# Revideret opgørelse af klimaeffekter for tre typer biomasse i form af 20 års effekter sammenlignet med reference-situationen



RUC-IMT (2023). Se baggrundsrapport. Resultatspæn på værdi af energioverskud viser best-case >< worst-case energianvendelse.



Opgave 2: Tidsprofil for klimaeffekterne ved biokul lavet af tre typer biomasse

Opg 2# Tidsprofil for klimaeffekterne ved biokul lavet af tre typer biomasse

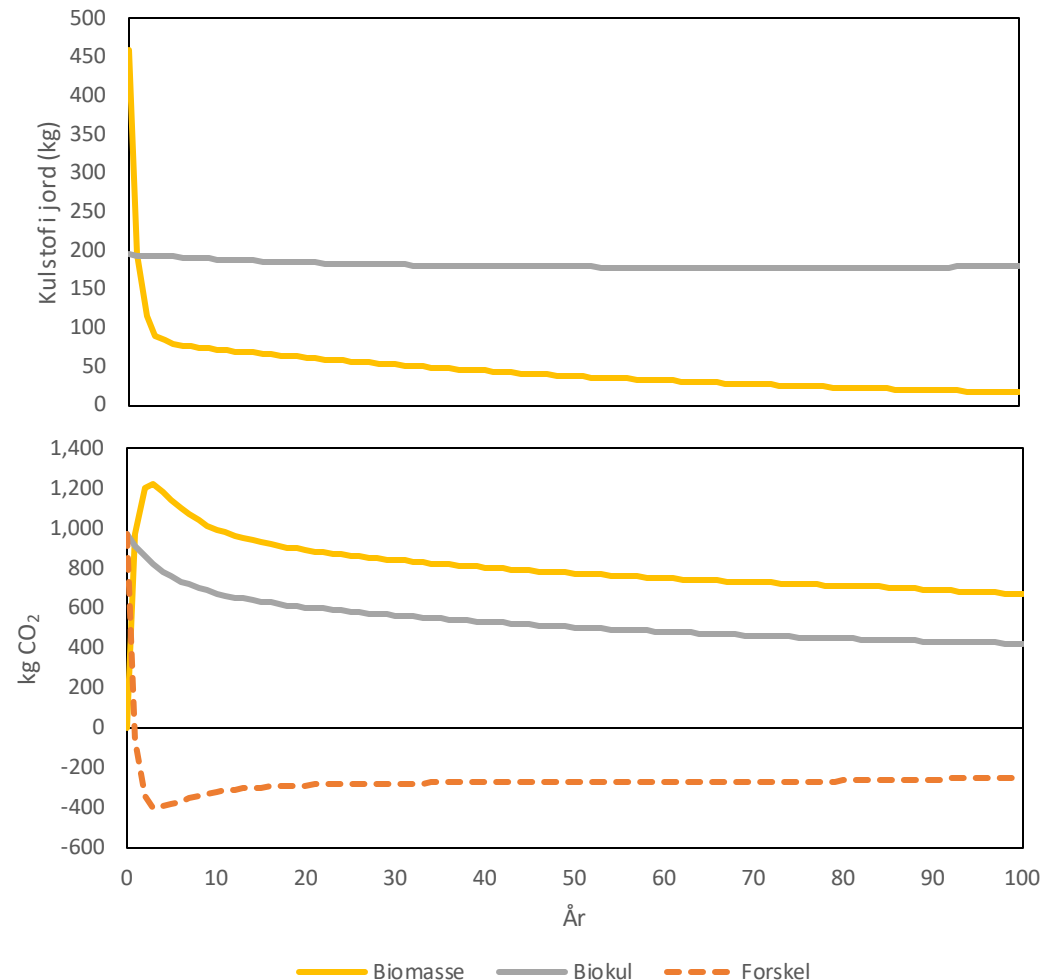
I denne vurdering undersøges det hvordan klimaeffekterne ved produktion og anvendelse af biokul anno 2023 udvikler sig over tid som alternativ til at kigge på dem i et isoleret, statisk GWP100 eller GWP20 perspektiv.

Der fokuseres på følgende:

- 1) Udgangspunkt i en model der estimerer radiative forcing (drivhuseffekt) af de drivhusgasser der udledes til atmosfæren som konsekvens af en 2023 handling og 100 år frem.
 - Reference system >< system med pyrolyse
 - Undgåede emissioner + Effekt af kulstoflagring i jorden + emissioner fra pyrolyse + undgåede emissioner fra substitueret energiproduktion (simpel model med enten ren naturgas eller marginal fjernvarme)
- 2) Fremhævet profil for C-sink-effekt af nedmuldning af biomasse >< biokul i 2023 og 100 år frem.

Analysen er lavet udelukkende omkring et centralt skøn og inkluderer ikke en følsomhedsanalyse. Der henvises til opgave 1 for at få en fornemmelse af usikkerheder.

Forklaring Opg 2# Tilgang til Beregning af kulstoffets bevægelse over tid



Ud fra mineraliseringskurver (øverst) bestemmes mængden af kulstof i jord over tid i biokul- og referencescenarier.

Med dette udgangspunkt kan årlige udledninger af CO₂ fra jorden bestemmes.

I biokulscenarier udledes desuden en andel af kulstoffet i år nul ifm. pyrolyse-processen.

Kombineres disse kulstofbalancer med henfaldsfunktioner kan den atmosfæriske koncentration af CO₂ fremskrives i de to scenarier (nederst).

Klimaeffekten af at anvende biokul i stedet for at nedmulde biomasse er forskellen mellem klimaeffekten i de to scenarier (stiplet linje).

Forklaring Opg 2# Om undgåede emissioner og energiproduktion

Undgåede emissioner fra biomasselager

Ud over emissioner relateret til kulstof i jord og CO₂ fra pyrolyse-processen, er undgåede emissioner fra lagring samt energiproduktion inkluderet i den samlede vurdering af klimaeffekten ved anvendelse af biokul.

Undgåede emissioner fra lagring er de CO₂-, metan- og lattergasemissioner som undgås ved stabilisering af biomasse som biokul. Disse emissioner ligger alle i år nul, og effekten aftager over tid ved anvendelse af relevante henfaldsfunktioner.

Substitutionsværdi af energiproduktion

Klimaeffekten af energiproduktion er inkluderet for at tage højde for værdien af energiproduktionen ved pyrolyse af biomasse. Det gøres ved at emissionsprofilen fra reference-scenarierne tilføjes drivhusgasemissioner fra en repræsentativ energiproduktion af samme størrelse og kvalitet som i pyrolysescenarierne. Emissioner fra energiproduktion antages at ligge i år nul.

For slam antages det at pyrolyseenergi erstatter marginal fjernvarmeproduktion i en AquaGreen type anlægskonfiguration. For halm og digestat antages i stedet naturgas-substitution i industri- (halm) eller biogasanlæg (biogasrestfibre) i en SkyClean type anlægskonfiguration.

Opg 2# Valg af metode til omregning til CO₂e

Tidsprofiler over den samlede klimaeffekt af de inkluderede effekter for slam, halm og digestat er beregnet i enheden for opvarmningseffekt: W/m². Tidsprofilerne omregnes til CO₂e med to forskellige tilgange der beskriver hhv. den diskrete klimaeffekt i et givent år og den akkumulerede klimaeffekt fra år nul frem til et givent år:

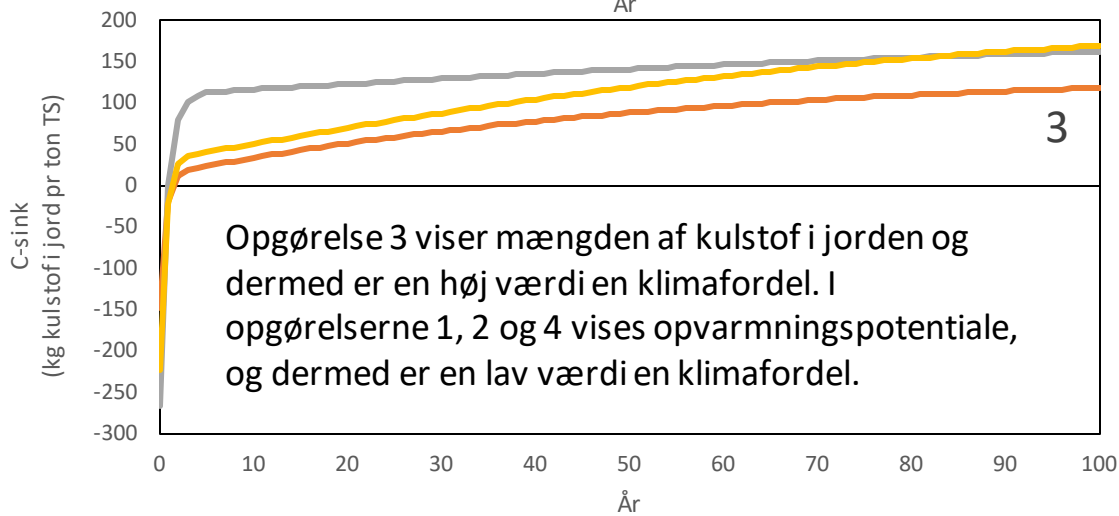
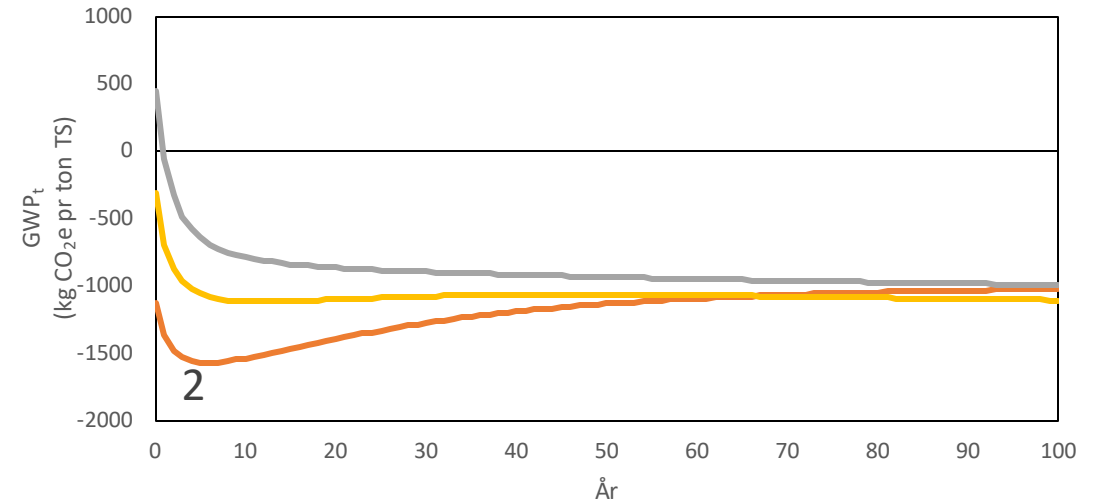
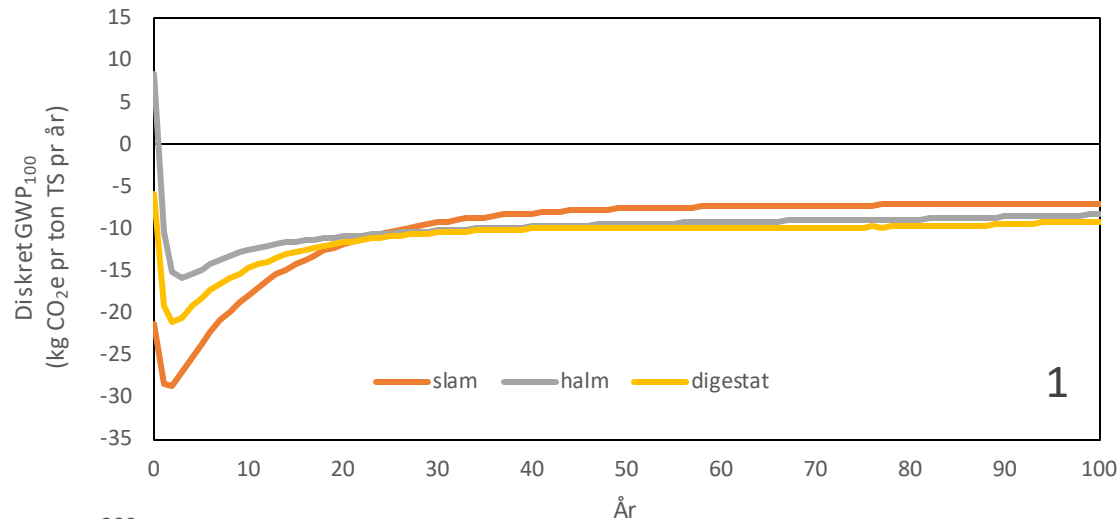
- Tilgang 1: Den diskrete opvarmningseffekt isoleret i år t omregnet til CO₂e med 100 årig tidshorisont (Diskret GWP₁₀₀)
- Tilgang 2: Den akkumulerede opvarmningseffekt frem til år t omregnet til CO₂e med tidshorisont t (GWP_t)

Derudover illustreres tidsprofiler af den isolerede C-Sink effekt i jorden

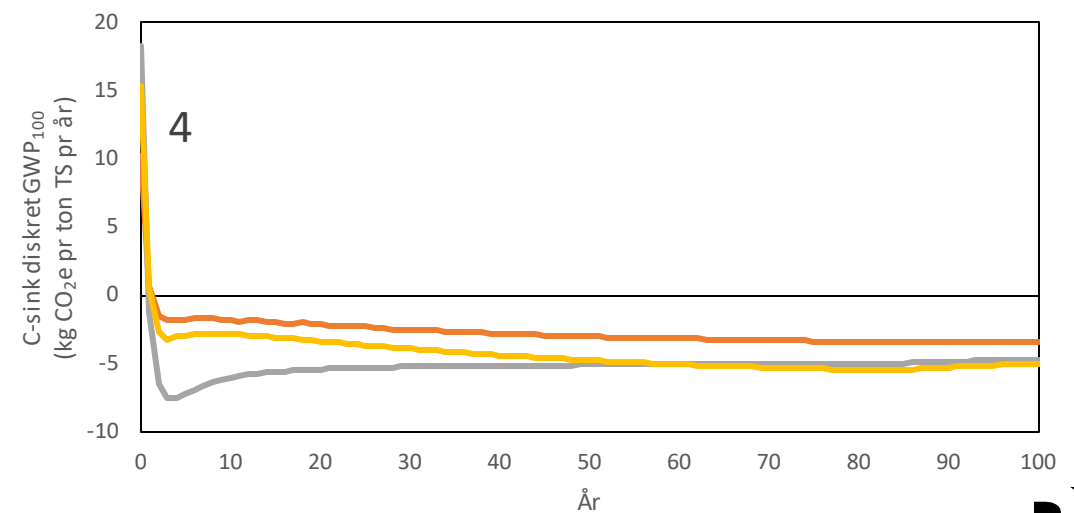
- Som kg kulstof i jorden
- C-sink omregnet til CO₂e. *Her benyttes tilgang 1 og beregningen baseres på en opgørelse af alle CO₂-emissioner da der skal tages højde for henfald/optag fra atmosfæren. Pga denne tilgang inkluderes pyrolyse-emissioner også i beregningen.*

Valg af CO₂e omregningsmetode 1 eller 2 afhænger af anvendelsesformål! Ved anvendelse til beregning af økonomisk nutidsværdi af klimaeffekter forventes det at være mest relevant at tage udgangspunkt i den diskrete klimaeffekt i et givent år og dermed tilgang 1 der er udviklet specifikt til dette formål. Ved brug af tilgang 1 i en samfundsøkonomisk analyse er det vigtigt at værdien af fortrængningseffekter i et givet år sættes efter GWP100 CO₂-ækvivalenter.

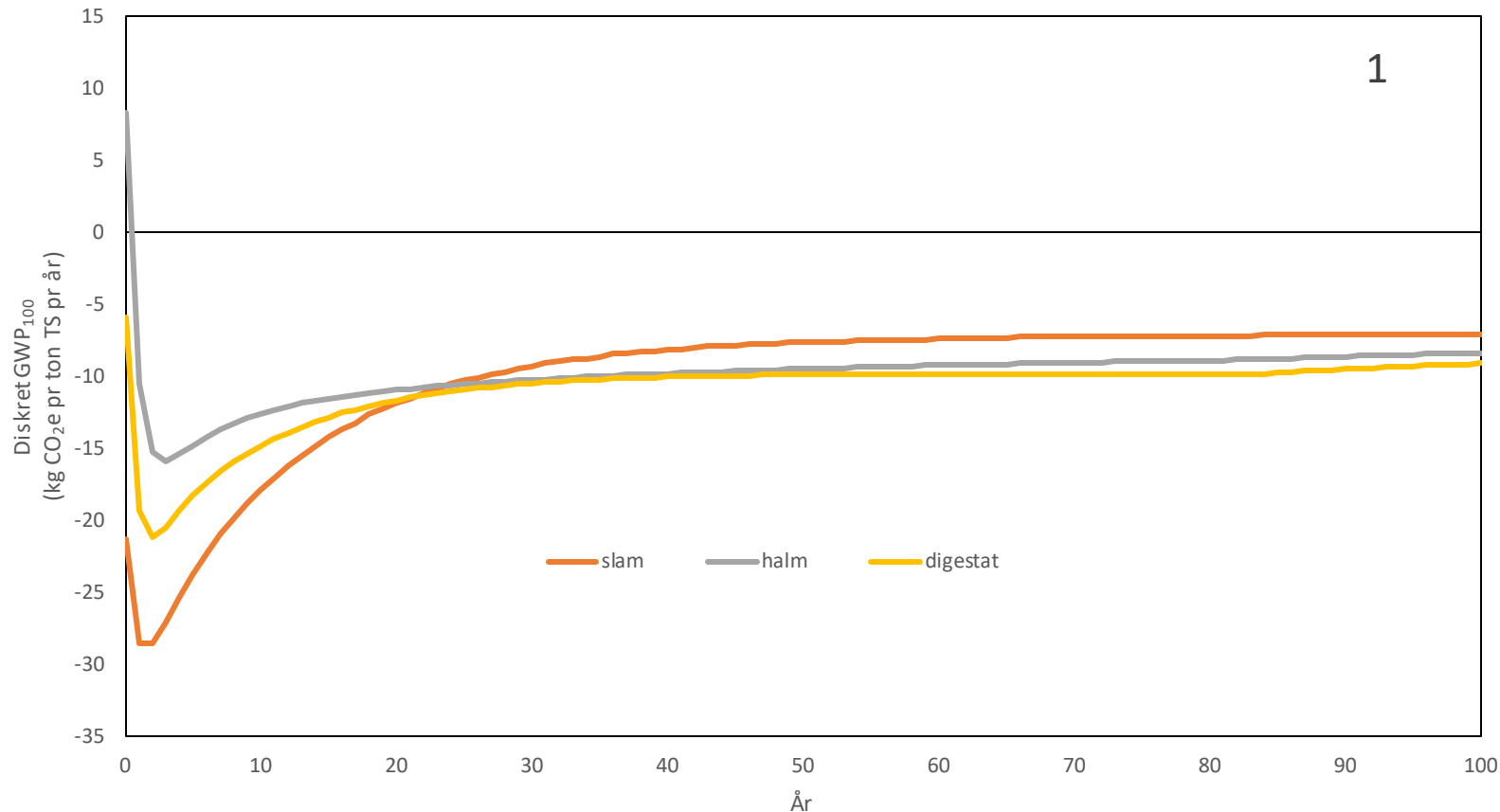
Opg 2# Tidsprofil for klimaeffekterne ved biokul lavet af tre typer biomasse



Opgørelse 3 viser mængden af kulstof i jorden og dermed er en høj værdi en klimafordel. I opgørelserne 1, 2 og 4 vises opvarmningspotentiale, og dermed er en lav værdi en klimafordel.



Opg 2# Tidsprofil for klimaeffekterne ved biokul lavet af tre typer biomasse



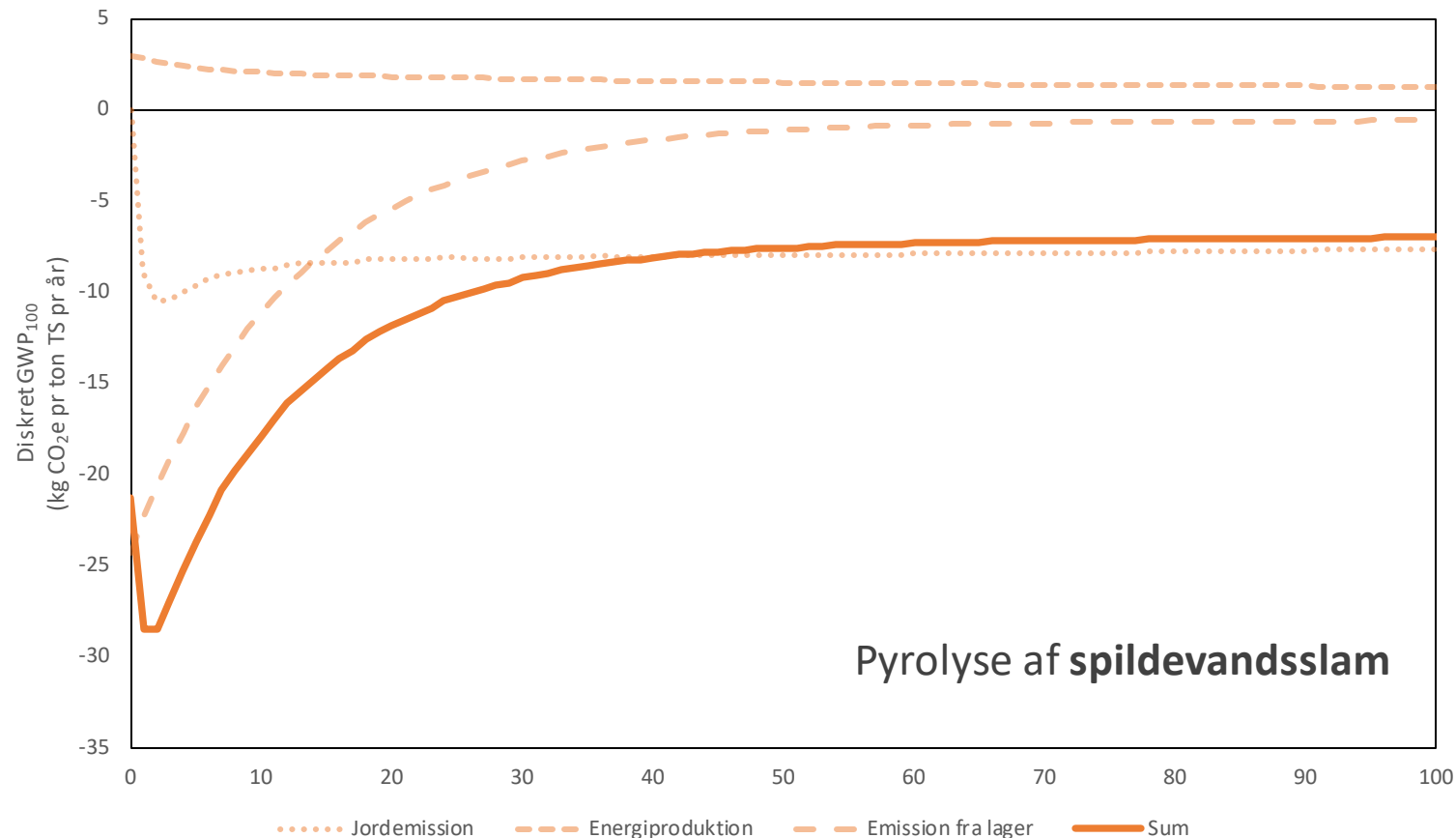
Samlet klimaeffekt af produktion og anvendelse af biokul sammenlignet med referenceanvendelse (slam, halm og digestat) Effekter inkluderet: kulstoflagring, emissioner fra lagring af biomasse, energiproduktion.

Kurver viser den diskrete opvarmningseffekt i år t ved produktion og anvendelse af biokul i år 0. Opvarmningseffekt er omregnet til CO₂e med et 100 års perspektiv ved at besvare spørgsmålet:

Hvor stor en CO₂-puls skal ske i år 0 for at nå samme opvarmningseffekt i år t?

For alle 3 typer biomasse ligger effekten på omkring 1 ton CO₂e pr ton tør biomasse hvis de årlige effekter akkumuleres i et konventionelt 100 års perspektiv. Opgørelsen er baseret på isolerede effekter og ikke en fuldstændig opgørelse!

Opg 2# De enkelte effekters påvirkning



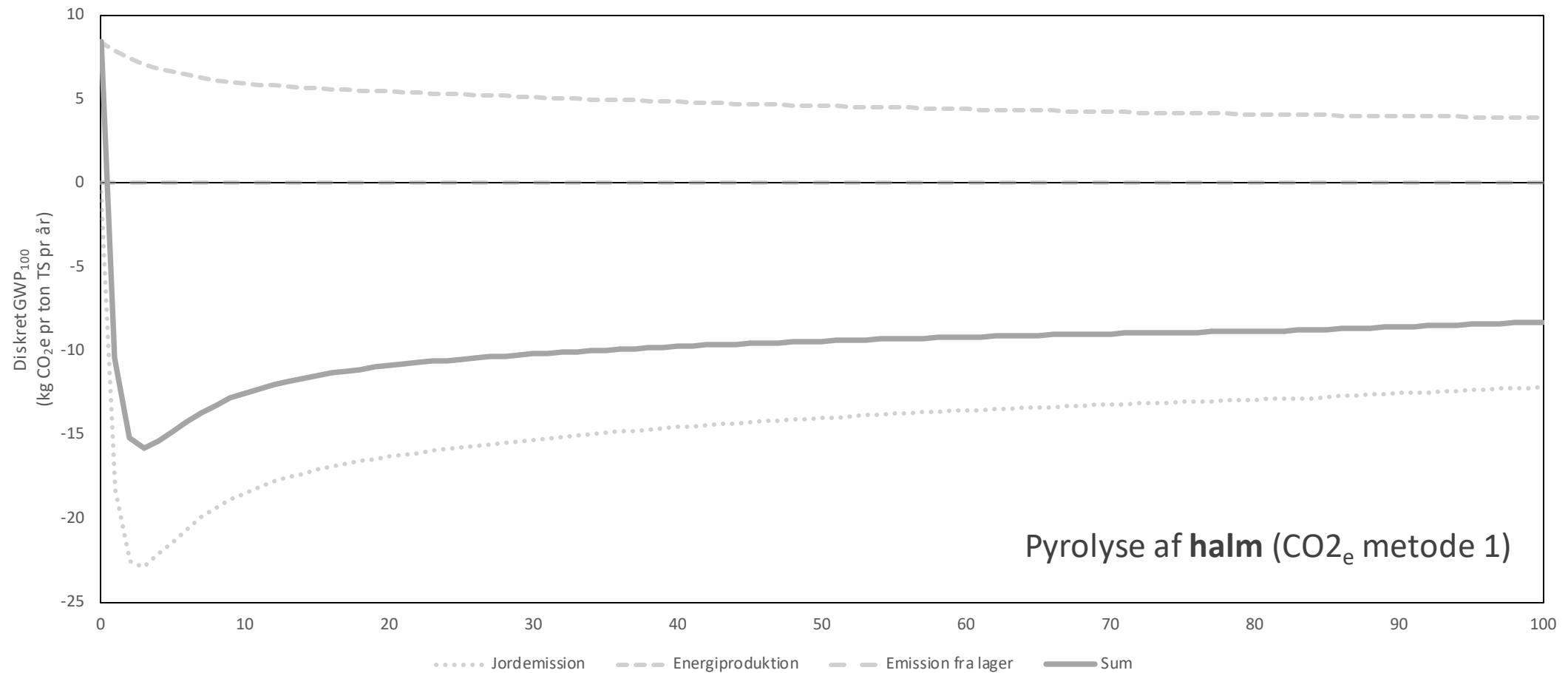
Med spildevandsslam som eksempel er kurvens delkomponenter illustreret. Opvarmningseffekt er omregnet til CO₂e med omregningsmetode 1.

Energiproduktion ved pyrolyse i slam-scenarie medfører en emission som er lidt større end i referencen baseret på marginal fjernvarme da biogen CO₂ er regnet med. Det resulterer i den konstante byrde som ses ifm. energiproduktionen.

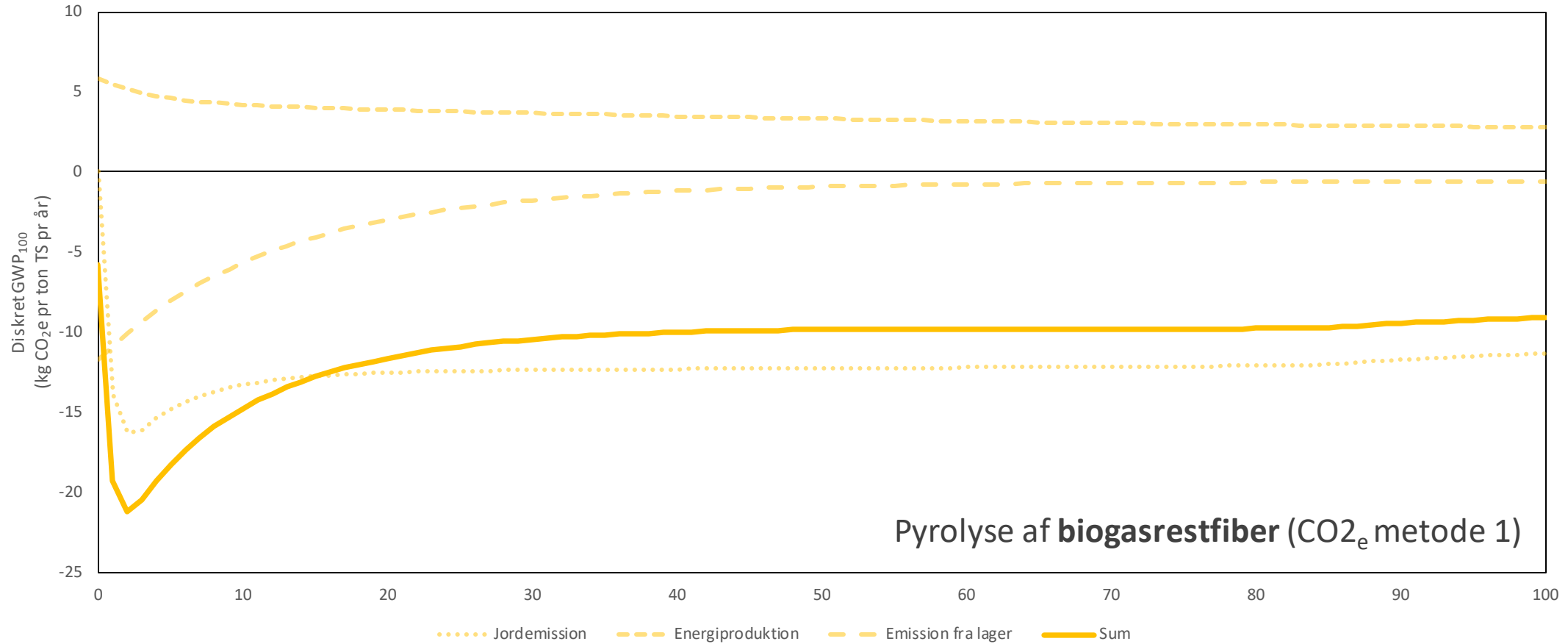
Emissioner fra lager undgås i biochar-scenariet. Det ses på kurven som den store puls i år 0 der henfalder frem mod år 100.

Mht. jordemissioner sker hurtig mineralisering af ca 60% af kulstof i slammet de første 4 år efterfulgt af langsommere mineralisering af det resterende kulstof frem mod år 100. Til sammenligning mineraliseres kulstof i biochar kun meget langsomt. Det resulterer i at reducerede jordemissioner giver en stor fordel i starten som derefter stiger gradvist frem mod år 100.

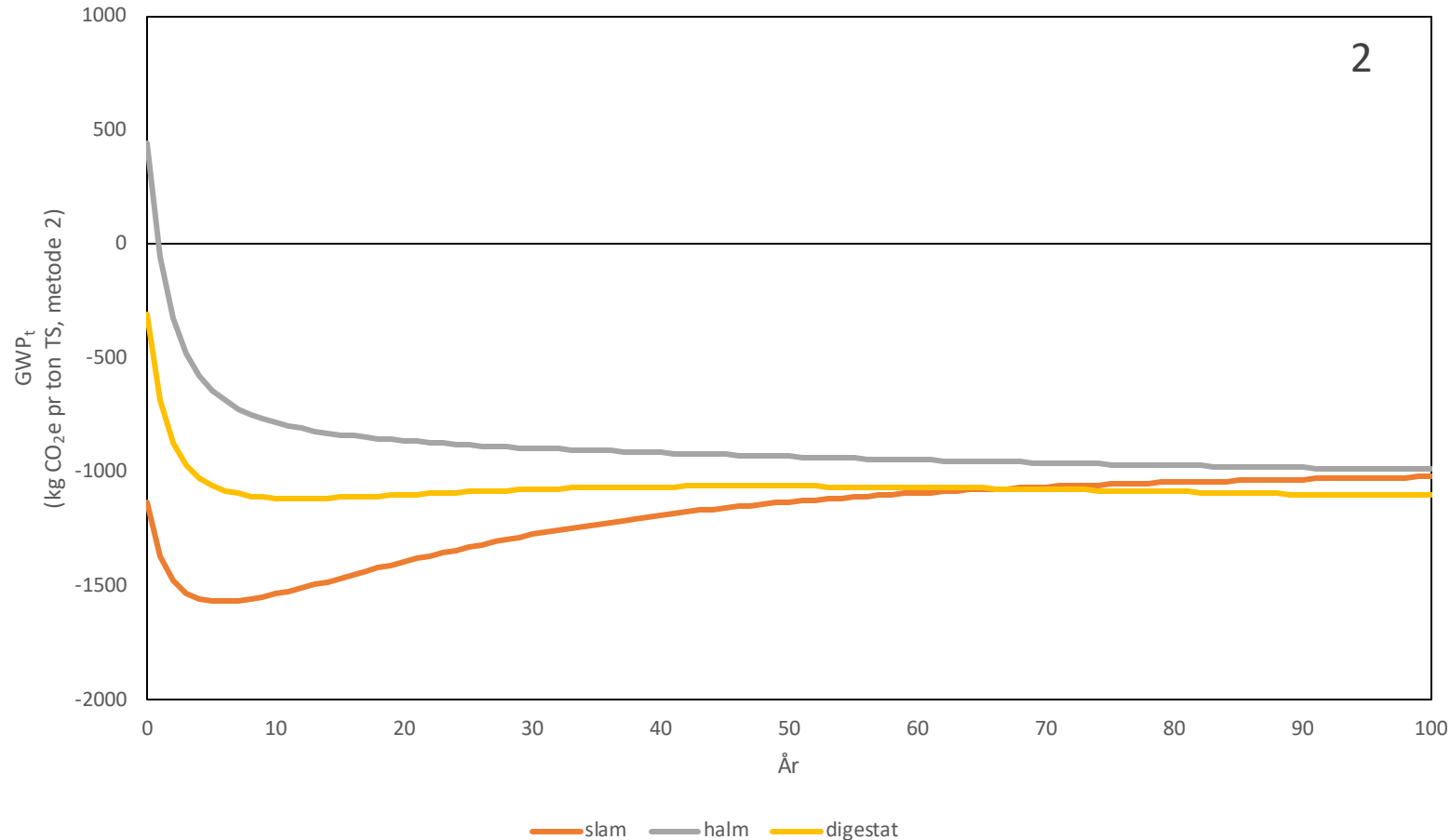
Opg 2# De enkelte effekters påvirkning



Opg 2# De enkelte effekters påvirkning



Opg 2# Akkumuleret klimaeffekt omregnet til CO₂e



Samlet akkumuleret klimaeffekt af anvendelse af biochar sammenlignet med referencebiomasse (slam, halm og digestat).

Effekter inkluderet: kulstoflagring, emissioner fra lagring af biomasse, energiproduktion.

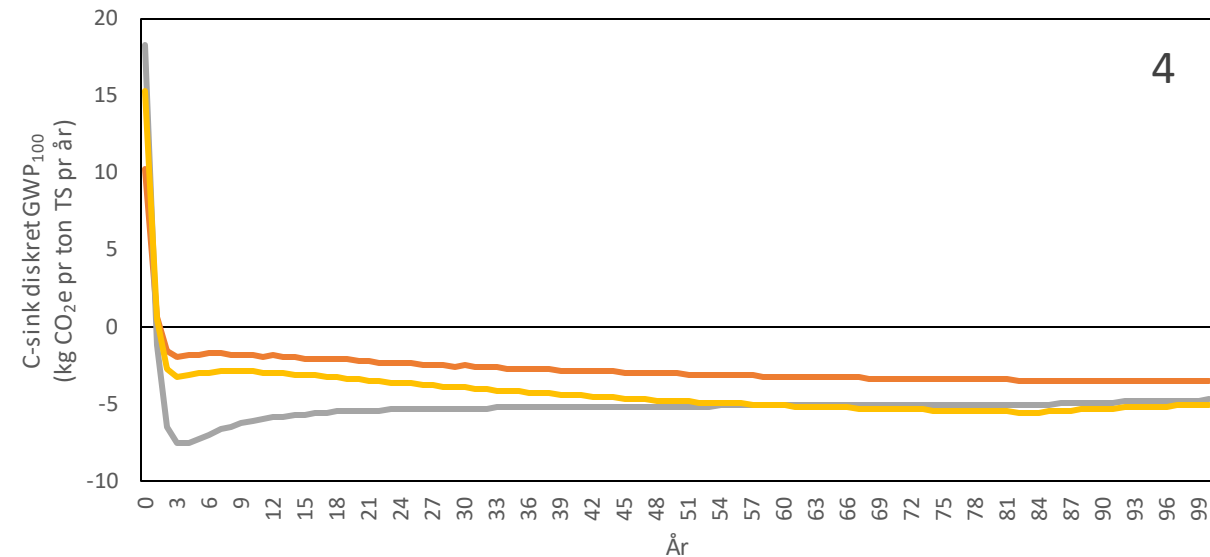
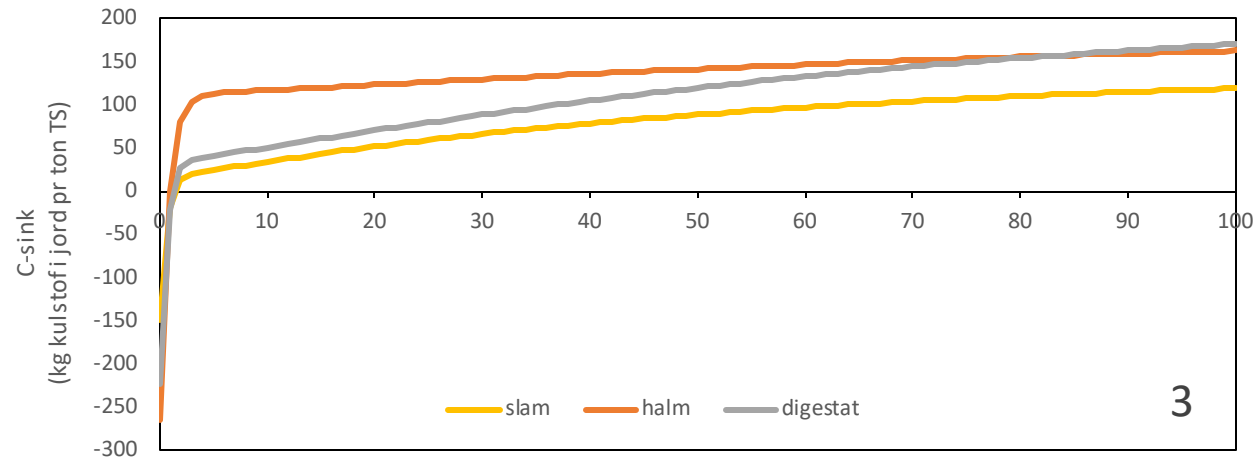
Kurver viser den akkumulerede opvarmningseffekt i år t ved produktion og anvendelse af biokuli år 0.

Opvarmningseffekt er omregnet til CO₂e ved at besvare spørgsmålet:

Hvor stor en CO₂-puls skalske i år 0 for at nå samme akkumulerede opvarmningseffekt i år t?

Med et GWP20 eller GWP30 perspektiv er forskellene mellem de tre typer biomasse store pga effekter fra undgåede emissioner i lageret. På den længere bane lander resultaterne fra de 3 forskellige typer biomasse stort set samme sted med omkring 1 ton CO₂e pr ton TS i et GWP 100 perspektiv.

Opg 2# Fokus på C-sink



Kurver viser C-sink effekten isoleret fra de andre effekter ved anvendelse af biokul sammenlignet med referencebiomasse (slam, halm og digestat).

Øverst ses mængden af kulstof i jorden fra 0-100 år, nederst er forskellen i kulstofemissioner (inklusive pyrolyseemissioner) ved anvendelse af biokul omregnet til CO₂e med metode 1.

Ved pyrolyse sker et større tab af kulstof til processemissioner i år 0. Derfor tilføjes mindre kulstof til jorden sammenlignet med reference-scenarier. I referencer sker hurtig mineralisering af kulstof i løbet af de første år. Til sammenligning nedbrydes biochar kun meget langsomt.

Summen af de modsatte effekter bliver at **der lagres mere kulstof i jorden efter 1-2 år i de forskellige biochar-scenarier sammenlignet med deres referencesystemer.**

Opg 2# Forskel mellem dynamisk og statisk tilgang til C-sink

Der er lavet indledende sammenligninger af statisk og dynamisk metode til beregning af C-sink effekt. Med den statiske metode omregnes den lagrede mængde kulstof ved tidshorizonten til CO₂e. Med den dynamiske metode omregnes den akkumulerede klimaeffekt af jordemissioner og pyrolyse-emission til CO₂e ved tidshorizonten.

Der ser ud til at være en signifikant forskel på resultatet ved beregning af C-sink effekt når den statiske og dynamiske metode sammenlignes. Med den dynamiske metode vurderes en lavere effekt på tværs af scenarier. Effekten er mest udtalt for biomasser med en flad mineraliseringskurve ved direkte tilførsel til jorden.

Der vil blive arbejdet videre med denne analyse for at lave en mere robust vurdering af forskellen mellem de to tilgange og afklare de forskellige grunde hertil.



Opgave 3: Akkumuleret klimaeffekt over tid ved gentagne års produktion og lagring af CO₂ med biokul

Opg 3# Akkumuleret klimaeffekt over tid ved gentagne års produktion og lagring af CO₂ med biokul

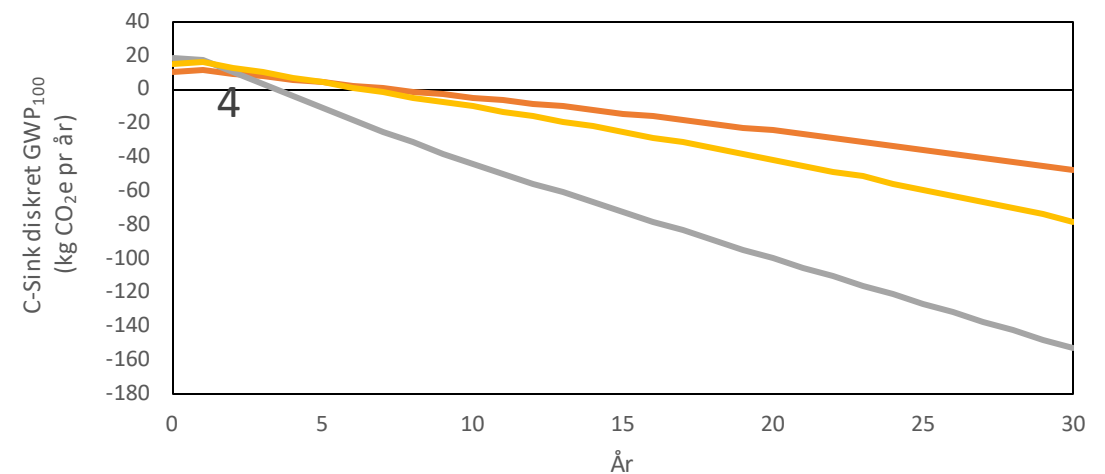
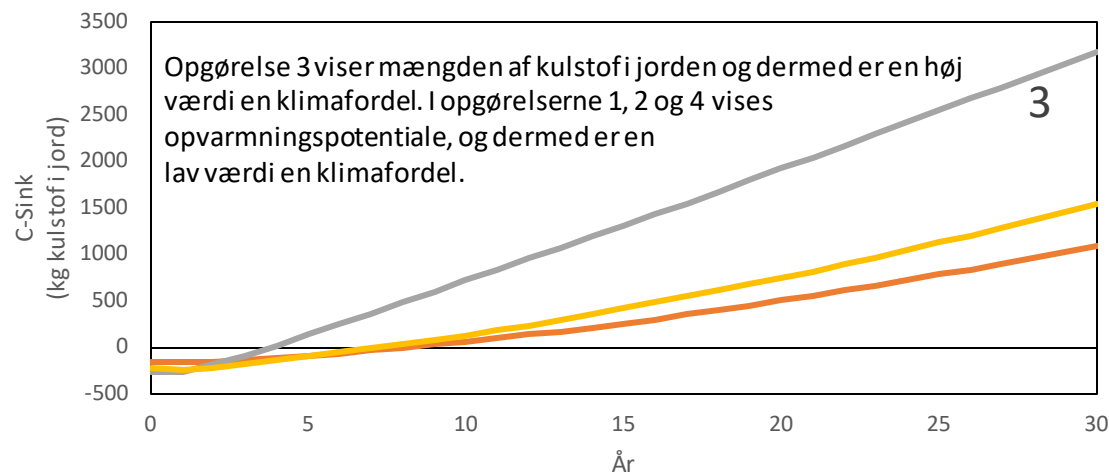
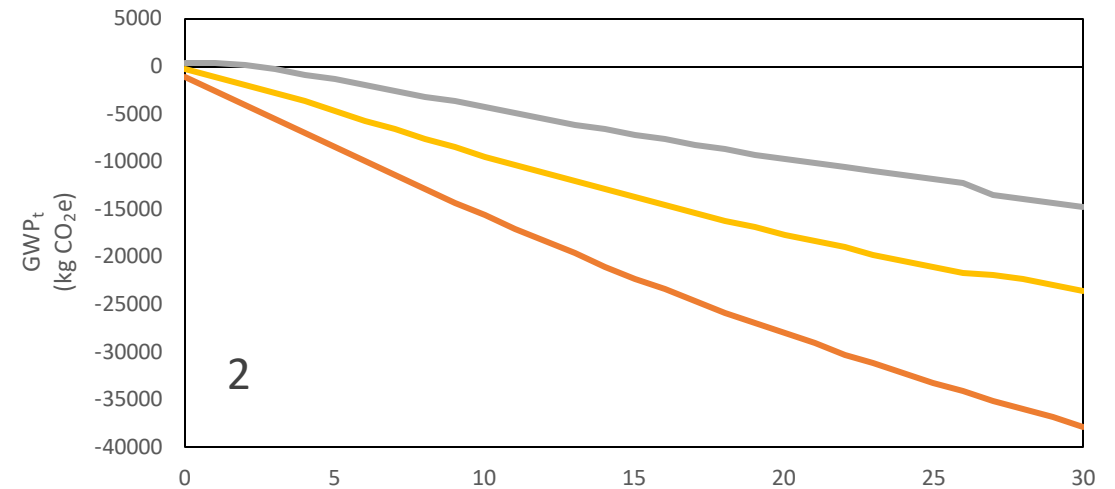
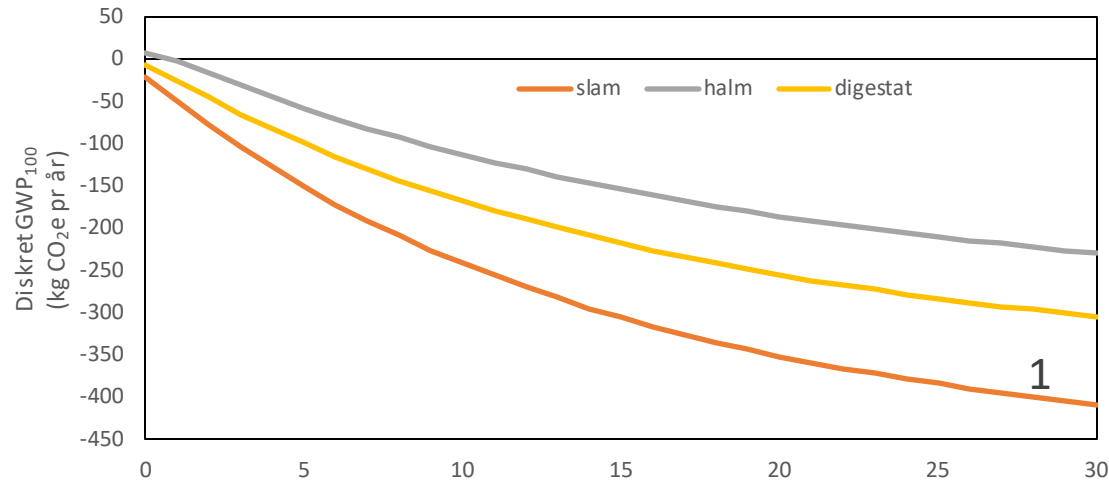
I denne vurdering undersøges klimaeffekterne ved gentagen årlig produktion og anvendelse af biokul fra 2023 og 30 år frem

Analysen inkluderer de samme effekter som opgave 2, og der regnes også i opgave 3 med de samme to varianter af CO₂e opgørelser samt en fremhævet profil for C-sink effekt af nedmuldning af biomasse >< biokul fra år nul (2023) og 30 år frem.

Som forventet bliver forskellene imellem behandling af de forskellige typer biomasse mere tydelig over tid og effekten af slampyrolyse bliver størst af de tre undersøgte typer af biomasse på baggrund af en massiv effekt af at undgå metanemissioner fra slamlager. Forskelle i totalmængder vil til gengæld betyde, at ved en analyse af det absolutte klimapotential ved en fuldstændig pyrolyse af de tre typer biomasse vil potentialet fra slampyrolyse være det mindste.



Opg 3# Akkumuleret klimaeffekt over tid ved gentagne års produktion og lagring af CO₂ med biokul – 1 ton tør biomasse behandlet pr år





Opgave 4: Overvejelser om arealkrav til udbringning af biokul svarende til en sekvestreringseffekt på 2 mio ton CO₂e



Opg 4# Overvejelser om arealkrav til udbringning af biokul svarende til en sekvestreringseffekt på 2 mio ton CO₂e

Overordnet set så vurderes det at være en potentiel risiko at et ensidigt fokus på pyrolyse af meget fosforholdige biomasser vil begrænse klimaeffektpotentialet – både ift nødvendige biomasseressourcer samt ift begrænsninger fra fosfor-loftet, og gøre det svært at nå det politiske mål fra landbrugsaftalen 2021 om at pyrolyse/ Brun Bioraffinering skal bidrage med 2 mio ton CO₂e i landbrugssektoren i 2030.

Nedslag i opsamlingen fra opgave 4 (se baggrundsnotatet og tilhørende regneark):

- I sit hovedscenarie vurderer Niras at der skal bruges mindre end 25% af det danske landbrugsareal til udbringning af biokul fra pyrolyse af tilrådighedværende biogasrestfibre, spildevandsslam og halm (rester uden anden økonomisk anvendelse).
- I nærværende analyse vurderes det samstemmende at udbringning af sammenlignelige mængder biokul vil kræve anvendelse af 10-50% af det danske landbrugsareal, forventeligt indsnævret til at ligge omkring 30% at udbringe biokul fra disse biomasser.
- Disse scenarier når dog ikke målet om 2 mio ton CO₂e fra C-sink effekter alene

Opg 4# Overvejelser om arealkrav til udbringning af biokul svarende til en sekvestreringseffekt på 2 mio ton CO₂e

Udbringning af 3 forskellige typer biokul under et fosforloft på 30 kg P/ha/år

	Forventet max-udbringning jf. opgørelse fra Niras* på baggrund af bl.a. Vidensyntesen	Forventet max-udbringning jf. nærværende analyse
	[Ton tør biokul per ha per år]	[Ton tør biokul per ha per år]
Biokul fra spildevandsslam	0.5	0.4 – 0.7
Biokul fra biogasrestfibre	0.5	0.4 – 0.8
Biokul fra halm	8	7 - 25

* Niras (2023) Kortlægning af biomasser til biokul og CO₂-potentialer, udgivet som del af CIP-fondens biokul-projekt

Opg 4# Overvejelser om arealkrav til udbringning af biokul svarende til en sekvestreringseffekt på 2 mio ton CO₂e

- Skulle målet om 2 mio ton nås ved udbringning af biokul fra biogasrestfibre alene vil der med tal fra videnssyntesen skulle bruges 5x det danske landbrugsareal (pga P-loft) mens det med tal fra denne analyses opgave 1 vurderes at der skal bruges omkring 2.5 x det danske landbrugsareal.
- Skulle målet om 2 mio ton nås ved udbringning af biokul udelukkende fra halm vil der med tal fra videnssyntesen kun skulle bruges 20% det danske landbrugsareal mens det med tal fra understøttelsen i opgave 1 vurderes at der kun skal bruges omkring 10% af det danske landbrugsareal.
- Disse forskelle skyldes primært forskellige antagelser omkring stabiliteten af kulstof i det udbragte biokul.
- Der er ikke hverken biogasrestfibre eller halm nok til at nå 2 mio ton målet alene. Halm alene kan dog dække behovet hvis anvendelsen af halm i Danmark ændres drastisk.
- Målet om 2 mio ton (100 års perspektiv) kan nås hvis følgende mængder kan opnås: 0.6 mio ton TS fra biogasrestfibre, 2.5 mio ton TS fra halm og halm-lignende afgrøder + 0.25 mio ton TS fra have-parkaffald.
- Med nuværende P-loft lægges beslag på ca halvdelen af landbrugsarealet til fosfor-gødsning, hvoraf biokul fra pyrolyse af biogasrestfibre står for ca 80%.

Opg 4# Overvejelser om arealkrav til udbringning af biokul svarende til en sekvestreringseffekt på 2 mio ton CO₂e

- Ifølge en analyse fra AU (Rasmussen et al 2022) kan biomassepotentialerne i Dansk landbrug forøges med en faktor 5-10 i frem imod 2050 i forhold til baseline 2015-19
- Omfattende pyrolyse heraf vil kunne give C-sink effekter på 3-6 mio ton CO₂e (100 års perspektiv) i forhold til direkte nedmuldning. Det vil med et nuværende P-loft lægge beslag på 90-300% af det danske landbrugsareal.
- Grønne biomasser og halm vil under disse forudsætninger give de største bidrag til kulstofsekvestrering mens de fosfortunge biomasser vil give et mindre bidrag til kulstofsekvestrering men lægge beslag på de største arealer.
- De mængder biokul der forventes udbragt af den enkelte landmand vil være indenfor rammerne af normal praksis når det gælder biokul fra slam eller gødningsfibre. Biokul fra halm kan i grænsetilfælde tænkes udbragt så store mængder at det vil forudsætte et komprimeret biokulprodukt fx fra pilleteret biomasse.
- I fremtidsscenerierne er der et overflow af fosfor i systemet som – med eller uden pyrolyse, vil gøre det svært at recirkulere de store mængder med de nuværende fosforlofter.
- En meget indledende og statisk vurdering af effekten på jordens kulstofpulje viser at det vil tage 200-1000 år at fordoble kulstofindholdet i jorden anno 2023 ved fuldstændig pyrolyse af til rådighedværende biomasser i dag. I det mest optimistiske 2050 scenarie vil det tage 50-100 år.