



Ea Energianalyse

Januar
2024

Analyse af samfunds- økonomiske effekter ved biokul

Kulstoflagring i landbruget med biokul

Udarbejdet for CIP fonden

Udarbejdet af:

Ea Energianalyse
Gammeltorv 8, 6 tv.
1457 København K
www.eaea.dk



Indhold

1. Opsamling og konklusioner	5
2. Klimatiltag – muligheder og omkostninger	11
3. Pyrolyseteknologi	17
4. Udvalgte effekter ved biokul	19
5. Klimakreditter	38
6. Omkostningsanalyse	41
Referencer	53
Bilag 1: Nedbrydningskurver	57

Forkortelser og betegnelser

BECCS	Kulstoffangst fra røggas fra biomasseforbrænding efterfulgt af CO ₂ -lagring
C	Kulstof
Capex	Kapitaludgifter
CCS	Kulstoffangst og lagring
CH ₄	Metan
CO ₂	Kuldioxid
CO ₂ e	Kuldioxid-ækvivalenter
DACS	Kulstoffangst fra luft efterfulgt af CO ₂ -lagring
EU	Den Europæiske Union
FN	Forenede Nationer
GJ	Gigajoule
H	Brint
IEA	Det Internationale Energiagentur
ILUC	Indirect Land Use Change, indirekte ændringer i arealanvendelse
IPCC	Det Internationale Klimapanel
K	Kalium
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-time
N	Kvælstof
N ₂ O	Lattergas
NH ₃	Ammoniak
NO _x	Kvælstofoxider
Opex	Driftsudgifter
P	Fosfor
TS	Total Solids, samlet tørstofindhold
VS	Volatile Solids (TS minus aske)





1. Opsamling og konklusioner

Denne rapport undersøger, om CO₂-lagring ved hjælp af biokul kan være et samfundsøkonomisk fordelagtigt klimatiltag i Danmark. Pyrolyse med produktion og spredning af biokul vurderes både i en international og dansk sammenhæng at være et lovende virkemiddel til at reducere drivhusgasudledningen i landbruget. Selvom litteraturen peger på, at spredning af biokul kan have positive effekter i landbruget, er det primære formål med pyrolysen i denne sammenhæng at opnå negative CO₂e emissioner. Derfor er pyrolyse her sammenlignet direkte med etablering af biomassebaseret kulstoffangst (post combustion) i forbindelse med kraftvarme. Endvidere perspektiveres pyrolyse overfor andre teknologier til kulstoffangst, såsom kulstoffangst fra røggas (BECCS) og Direct Air Capture and Storage (DACCS).

Pyrolyse er en termisk nedbrydning af biomasse, der forekommer ved opvarmning i et iltfattigt miljø. Ved pyrolysen dannes biokul og pyrolysegasser. En del af pyrolysegassen kan kondenseres til pyrolyseolie. Processen kan styres, så en væsentlig del af biomassen omdannes til biokul, som kun nedbrydes meget langsomt efter spredning på landbrugsjord. Den såkaldte langsomme pyrolyse, som behandles her, er demonstreret på forskellige typer biomasse. I Danmark er de første større anlæg under etablering.

Med de internationale klimaforhandlinger og Parisaftalen som ramme, har Danmark og EU sat sig ambitiøse klimamål med målsætninger om henholdsvis 70% og 55% CO₂-reduktion i 2030 og CO₂-neutralitet i

2050¹. I EU er der igangsat en større proces for at få de nødvendige reguleringsmæssige rammer på plads (Fit for 55) med bl.a. skærpelse af EU's kvotesystem, indførelse af bindende målsætninger for CO₂-optag i skov og landbrug og målsætninger om øget anvendelse af VE i energiforsyningen samt i transportsektoren. Som noget nyt er der nu også fastsat reduktionsmål for skibsfarten.

Udviklingen de seneste år har vist et betydeligt potentiale for relativt billige CO₂-reduktioner i energisektoren – især på grund af billiggørelse af sol og vind og udviklingen af varmepumpeteknologi til lavtemperaturvarme. Også elektrificering af landtransport har taget fart i Danmark og internationalt med gennembrud for udvikling og hurtig udbredelse af elbiler. De områder, hvor det har vist sig vanskeligere at opnå ambitiøse CO₂-reduktioner, er, udover landbrugssektoren, især de dele af industrien og transportsektoren, der ikke umiddelbart kan elektrificeres direkte. Dele af industri- og transportsektoren vil fortsat have behov for flydende eller gasformige brændsler, og i landbruget er udledning af klimagasser især knyttet til de biologiske processer omkring husdyrhold og dyrkning af jorden.

Den seneste klimafremskrivning fra Energistyrelsen viser behov for nye tiltag, der kan lukke den forventede manko på 5,5 mio. ton CO₂ for at nå 70% målet i 2030. I den grønne landbrugsaftale fra oktober 2021 blev der aftalt bindende reduktionsmål for land- og skovbrugssektorerne på 6,1 – 8 mio. ton, hvoraf en betydelig del ligger i et udviklingsspør. Selvom bl.a. regeringens klimapartnerskaber, Klimarådet og SEGES har peget på en lang række muligheder for CO₂-reduktioner i landbruget, er der usikkerhed om økonomi og barrierer.

Blandt de væsentlige tiltag er udtagning af lavbundslande, skovrejsning, tilsætning af foderstoffer til kvæg samt ændring af gyllehåndtering, herunder ved produktion af biogas. Hertil kommer pyrolyse, der forventes at kunne levere et betydeligt bidrag. Bl.a. Klimarådet har peget på, at reduktion af dyrehold i Danmark er et nødvendigt virkemiddel. Det påpeges i debatten om klimatiltag i landbruget, at fx skovrejsning på produktiv landbrugsjord og reduktion af dyrehold reducerer udledningen i Danmark men ikke internationalt, da produktionen i et vist omfang blot flytter til udlandet.

Effekten af pyrolyse og udbringning af biokul

Ved pyrolyse af halm og afgasset biomasse fra biogasanlæg (digestat) og efterfølgende udbringning af den producerede biokul på landbrugsjord, vil der potentielt opstå en række positive eller negative sideeffekter sammenlignet med referencen uden pyrolyse. En række af disse effekter er søgt kvantificeret ved et litteraturstudie og er vist i Tabel 1.

¹ Den nuværende regering vil fremrykke 2050 målet til 2045.



Effekt	Beskrivelse	Kvantificeres
<i>Lagring af kulstof</i>	Ved at sprede biokul på marker bindes stabilt kulstof i jorden. Stabiliteten af kulstof er afhængig af pyrolyseprocessen og jordens forhold.	Ja, primær effekt
<i>Udledning af lattergas og metan</i>	Udledning af de potente drivhusgasser lattergas (N ₂ O) og metan (CH ₄), kan ændres ved anvendelse af biokul i landbruget.	Ja, sideeffekt
<i>Recirkulering af næringsstoffer</i>	Ved udbringning af halm/digestat/biokul på landbrugsjord vil forskellige kombinationer og mængder af næringsstoffer blive recirkulerede, så der skal bruges mindre kunstgødning.	Ja, sideeffekt
<i>Ændret behov for kalkning</i>	Spredning af biokul kan hæve jordens pH-værdi og dermed reducere kalkbehovet på landbrugsjord	Ja, sideeffekt
<i>Ammoniakudslip</i>	Ammoniakemissioner til luften reduceres, når afgasset biomasse separeres i en fast og flydende fraktion, før det spredes på jorden.	Ja, sideeffekt
<i>Partikelforurening</i>	Der er risiko for udslip af partikler i røggassen fra pyrolyseanlægget og forbrændingsanlægget.	Ja, sideeffekt
<i>Udvaskning af kvælstof</i>	Udbringning af biokul har muligvis effekt på kvælstofudvaskning og kan dermed bidrage til en reduktion af en betydelig miljøpåvirkning.	Ja, i følsomhedsanalyse

Tabel 1: Overblik over udvalgte effekter ved pyrolyse og udbringning af biokul på landbrugsjord

Analysen viser, at der kan være positive sideeffekter ved separering af afgasset biomasse fra biogasanlæg (digestat). En del af disse effekter vedrører udledning af CO₂e til atmosfæren, herunder reduceret metanudledning, og kan karakteriseres som samfundsøkonomiske effekter. En del af disse effekter kvantificeres med betydelig usikkerhed. Andre effekter vedrører øget udnyttelse af kvælstof ved separation af afgasset biomasse, samt en reduceret brug af landbrugskalk, hvilket kan nyttiggøres lokalt og i et vist omfang indregnes i en selskabsøkonomisk businesscase.

Hertil kommer, at produktion af biokul giver potentiale for bedre borttransport og nyttiggørelse af fosfor i områder med fosforoverskud. Denne effekt er dog ikke kvantificeret her.

For halmpyrolyse mistes muligheden for udnyttelse af kvælstof, hvilket betyder en lokal omkostning. Reduceret behov for kalkning som effekt af udbringning af biokul vil omvendt betyde en gevinst.

De mest usikre effekter vurderes at være i hvilket omfang, biokul kan reducere kvælstofudvaskning. Reduceret kvælstofudvaskning kan have en afgørende betydning for de samfundsøkonomiske effekter ved biokul, da dette ikke kun reducerer forurening af vandløb og fjorde, men også reducerer lattergasemissioner.

I Tabel 2 vises et overblik over de centrale værdier for kvantificerede sideeffekter, med og uden reduceret kvælstofudvaskning, samt den del af værdien for sideeffekterne der vurderes at kunne nyttiggøres på lokalt niveau.

Værdi af sideeffekter (kr./ton TS)	Digestat-pyrolyse	Halm-pyrolyse	BECCS
Alle effekter inklusive reduceret kvælstofudvaskning	242	1	-80
Basecase – hvor usikre effekter af reduceret kvælstofudvaskning ikke indgår	97	-9	-80
Den andel af basecase, der vurderes at kunne nyttiggøres lokalt	20	-7	-74

Tabel 2: Værdi af sideeffekter kr./ton TS for 2028 i løbende priser.

Udover den betydelige usikkerhed omkring kvælstofudvaskning, er der usikkerhed omkring kvantificering af ammoniakemissioner ved separation af digestat. For digestat vægter ammoniakemissioner med ca. 60 kr./ton TS i basecase.

Den økonomiske analyse

Der er gennemført analyse af samfundsøkonomi og selskabsøkonomi i en basecase og der er udført følsomhedsanalyser. Samfundsøkonomi er udført med en diskonteringsrente på 3,5% (realrente) og selskabsøkonomi med et nominelt forrentningskrav (WACC) på 7,5%. I de samfundsøkonomiske analyser indgår sideeffekter svarende til basecase i Tabel 2, imens kun den andel af sideeffekterne, der vurderes at kunne nyttiggøres lokalt, indgår i de selskabsøkonomiske beregninger. I både den samfunds- og den selskabsøkonomiske analyse er der i basecase indregnet indtægter fra kommercielt salg af klimakreditter. Markedet for klimakreditter er under udvikling, og værdien i basecase er for pyrolyseteknologierne forsigtigt sat til 40% af CO₂-kvoteprisen.

I analysen er økonomien ved pyrolyse af halm eller afgasset biomasse fra biogasanlæg sammenlignet med etablering af kulstoffangst på et halmfyret kraftvarmeværk (BECCS), der ligesom pyrolyse kan levere negative CO₂e-emissioner. Det antages at de to pyrolyseanlæg etableres i størrelsen ca. 20 MW med en tilførsel af årligt knap 40.000 ton biomasse. BECCS-anlægget er ca. fire gange større. I nedenstående Tabel 3 ses hoveddata fra analysen, imens omkostninger per lagret ton CO₂ er vist i Tabel 4.

Analysen viser et potentielt samfundsøkonomisk overskud for de to pyrolyseanlæg, imens alle tre anlæg har selskabsøkonomisk underskud. Et samfundsøkonomisk overskud betyder, at lagring af CO₂ kan gennemføres uden omkostninger for samfundet.

	Samfundsøkonomi Nutidsværdi over 20 år Mio. kr.			Selskabsøkonomi Årlig pengestrøm 2030 Mio. kr.		
	Digestat	Halm	*BECCS	Digestat	Halm	*BECCS
Indfyret effekt, MW:	20	20	84	20	20	84
Capex:	-161	-161	-478	-20	-20	-59
Opex:	-114	-114	-262	-8,7	-8,7	-20
Separation/halmind- køb:	-58	-410		-4,4	-30	
Elforbrug:	-74	-74	-465	-5,7	-5,7	-35
Salg pyrolyseolie**:		553			45	
Varmesalg***:	245	152	174	18	11	11
Transport + lagring:			-984			-90
Mellemsum:	-163	-55	-2015	-20	-8,8	-193
Klimakreditter****:	117	110	891	8,1	7,5	61
Sideeffekter:	55	-5	-103	0,9	-0,2	-7,3
I alt:	10	50	-1228	-12	-1,4	-139

*BECCS-anlægget etableres på eksisterende kraftvarmeanlæg, og det antages at kulstoffangsten ikke påvirker kraftvarmeanlæggets drift eller økonomi. Omkostninger til kulstoffangst er fra Energistyrelsens teknologikatalog.

**Værdien af pyrolyseolie er baseret på egne beregninger af omkostninger til produktion af grøn metanol.

***Værdien af varme er baseret på egne beregninger af omkostninger ved etablering af halmfyr.

****Der indregnes et forsigtigt skøn af værdien ved salg af klimakreditter svarende til 40%-50% af prisen i EU's kvotemarked for den netto-lagrede kulstofmængde. Det antages dog – med betydelig usikkerhed – at den reelle værdi i markedet bør nærme sig kvoteprisen, under forudsætning om balance mellem udbud og efterspørgsel.

Tabel 3: Samfundsøkonomisk nutidsværdi og selskabsøkonomisk pengestrøm for pyrolyse og BECCS-anlæg (mio. kr.). Positive værdier viser økonomisk overskud.

I Tabel 4 ses økonomien opgjort som kr. per ton nettolagret CO₂ i et 100-års perspektiv. Ved nettolagret CO₂ forstås den tilbageværende CO₂ i lageret fratrukket den CO₂, der ville være lagret ved udbringning/nedmuldning af halm eller digestat. Der opstår en positiv nettoeffekt allerede efter kort tid. Efter ca. 15-30 år er den fulde effekt svarende til 100-års perspektivet nået.

	Samfundsøkonomi diskonteret			Selskabsøkonomi 2030		
	Digestat	Halm	BECCS	Digestat	Halm	BECCS
Netto-lagret CO ₂ , kton	236	220	1.384	20	19	119
Overskud, kr. per ton CO ₂ :	43	229	-887	-567	-76	-1169
Overskud (ekskl. sideeffekter) kr. per ton CO ₂ :	-191	250	-812	-609	-64	-1107
Overskud (ekskl. sideeffekter og ekskl. klimakreditter) kr. per ton CO ₂ :	-689	-248	-1456	-1008	-463	-1623

Tabel 4: Nettolagring af CO₂ samt samfundsøkonomisk og selskabsøkonomisk overskud for pyrolyse og BECCS. (Positive tal er overskud og negative tal er underskud/omkostning)

Der er som nævnt gennemført følsomhedsberegninger for udvalgte parametre. Beregningerne viser for halmpyrolysens vedkommende særlig følsomhed overfor halmprisen og overfor salgsprisen på

pyrolyseolie. Digestatpyrolyse er relativt robust overfor parametervariationer. BECCS-anlægget har i analysen 5000 årlige fuldlasttimer. Hvis det kan øges til fx 8000 fuldlasttimer, bliver omkostningerne per lagret ton CO₂ reduceret med ca. 200 kr./ton.

Samlede konklusioner og perspektivering

Analysen viser, at med de anvendte centrale forudsætninger, er der et samfundsøkonomisk overskud ved at lagre CO₂ som biokul. Overskuddet er uden indregning af selve klimagevinsten. Selskabsøkonomisk er der sandsynligvis underskud, især i de første år, hvor forrentning og afskrivning vejer tungt, og hvor prisen på klimakreditter beregningsmæssigt er lavere.

Der vurderes at være særlig usikkerhed omkring værdien af klimakreditter og værdien af den producerede pyrolyseolie, idet der endnu ikke er udviklede markeder med solide prisreferencer. Omkring pyrolyseolie ses stigende efterspørgsel efter grønne brændstoffer i transportsektoren, og det er sandsynligt at PtX-brændstoffer bliver prissættende, som det antages i denne analyse.

De økonomiske barrierer for udbygning af pyrolyse vurderes til især at knytte sig til usikkerheder om indtægtsiden. Hertil kan komme reguleringsmæssige barrierer, der ikke er behandlet her.

Arbejdet med reduktion af klimagasser i landbrug og skovbrug viser et betydeligt potentiale, men også store usikkerheder om økonomi, barrierer og effekter på ILUC. Det vurderes derfor sandsynligt, at teknologier med kulstoffangst som pyrolyse, BECCS og DACS bliver nødvendige, især i perioden efter 2030. Analyserne i denne rapport peger på pyrolyse som konkurrencedygtigt overfor BECCS. På eksisterende DACS anlæg koster kulstofflagring flere tusind kroner per ton, og bl.a. IEA vurderer det usandsynligt, at prisen kommer under ca. 1500 kr./ton på lang sigt. Hertil kommer, at pyrolyseolie kan bidrage til reduktion af fossile brændsler i sektorer, der ikke kan elektrificeres. Klimaeffekten ved reduktion af fossile brændsler i disse sektorer er international, og derfor ikke indregnet eksplicit i denne rapport's samfundsøkonomiske analyse.





2. Klimatiltag – muligheder og omkostninger

Ved COP 21 i Paris traf medlemslandene under FN's klimakonvention en beslutning om at begrænse klodens temperaturstigning til under 2 °C (helst til 1,5 °C). I EU er beslutningen at nå netto-nul CO₂-emissioner i 2050 og en reduktion på 55% i 2030². I Danmark er det besluttet, at drivhusgasudledningerne skal reduceres med 70% i 2030 sammenlignet med 1990, og Danmark skal nå netto-nul emissioner i 2050. Disse drivhusgasreduktioner kræver en omstilling af samfundet. Formålet med denne rapport er at vurdere, hvorvidt pyrolyse og CO₂-lagring med biokul kan være et samfundsøkonomisk relevant klimavirkemiddel i Danmark. Derfor er det relevant at sammenligne dette med andre klimatiltag.

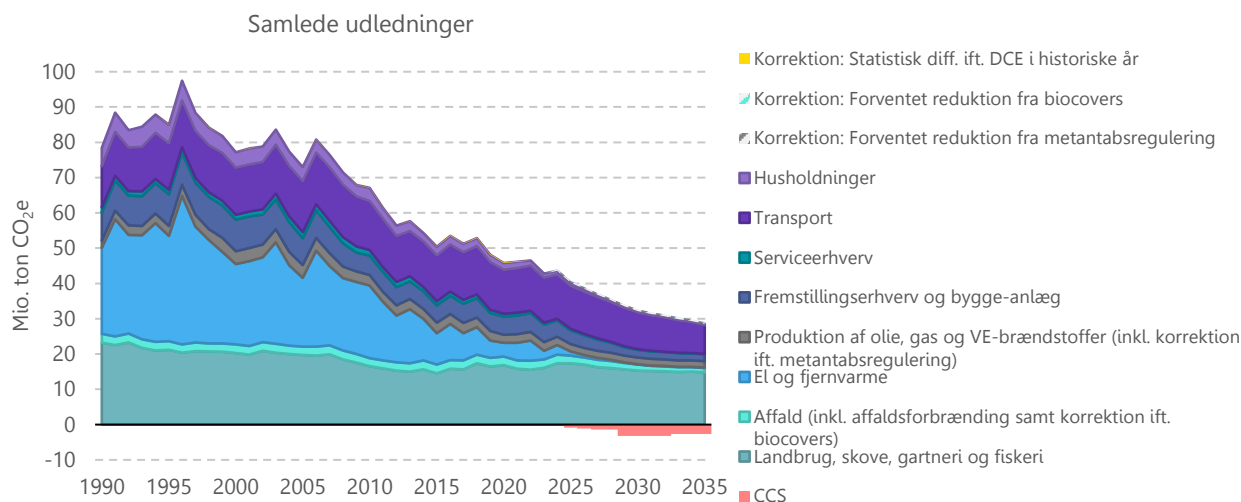
Vejen til 2030

Med EU-målsætningen om at reducere udledningen af klimagasser med 55% i 2030, er der igangsat en større proces for at få de nødvendige reguleringsmæssige rammer på plads som benævnes Fit for 55 (EU, 2023). De værktøjer, der især har fokus er:

² Sammenlignet med 1990

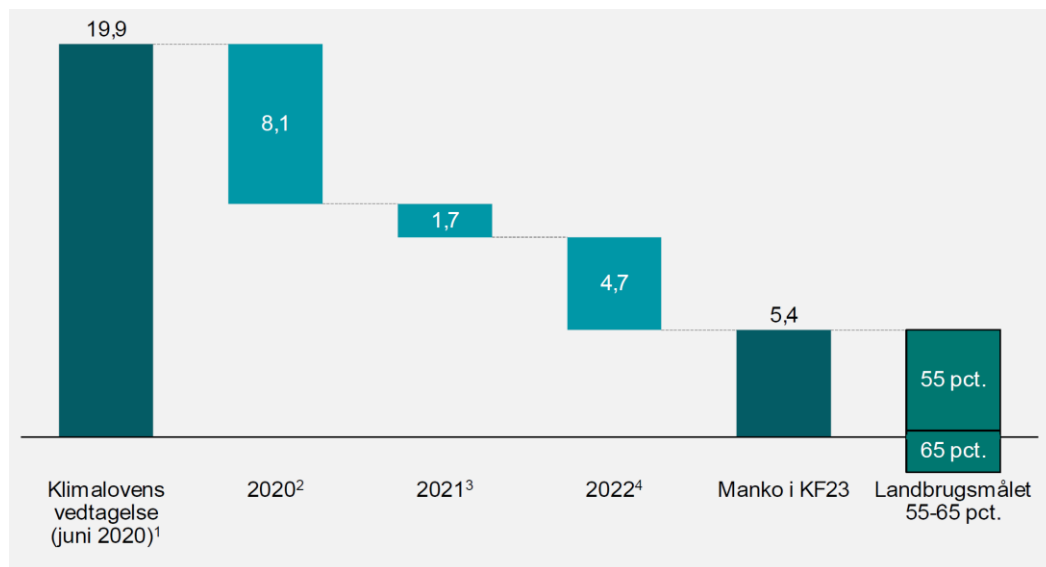
- Skærpelse og udvidelse af EU's CO₂-kvotesystem og indførelse af den såkaldte Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) for import af visse varer. Kvotesystemet udvides til at omfatte skibsfart.
- Skærpede mål for de ikke-kvotebelagte sektorer gennem den såkaldte Burden Sharing Mechanism. Her er målet for Danmark hævet til 50%.
- Øget energieffektivitet gennem skærpelse af energieffektiviseringsdirektivet og mål om 11,7% lavere energiforbrug i 2030 sammenlignet med baseline.
- Indførelse af bindende målsætninger for CO₂-optag i skov og landbrug, de såkaldte LULUCF sektorer. Målet er optag af 310 mio. ton CO₂ per år i 2030. Målet er fordelt som forpligtende mål for medlemslandene
- Målsætninger for transportsektoren, herunder stigende krav om grønne brændstoffer i luftfart og skibsfart, og et reduktionsmål på 80% for skibsfart i 2050.
- Skærpelse af VE-direktivet bl.a. med strengere bæredygtighedskrav og krav om samlet mindst 42,5% VE i 2030, samt vedtagelse af RFNBO-direktivet med særlige krav til produktion af grøn brint. Overordnet stilles krav om additional VE-produktion på timebasis, for at elektrolysebaseret brint kan defineres som grøn.

Med vedtagelsen af klimaloven skal Danmark reducere drivhusgasudledningerne med 70% i 2030 sammenlignet med 1990, svarende til en samlet emission på ca. 24 mio. tons CO₂, og skal være 100% klimaneutral senest 2050. Endvidere er der fastlagt et indikativt reduktionsmål på 50-54% i 2025. Den nuværende regering har besluttet at fremrykke målet om klimaneutralitet til 2045, og har fastlagt et mål om 110% reduktion i 2050. Ifølge fremskrivningen af Danmarks emissioner vist i Figur 1, ender de samlede emissioner over 70%-målsætningen i 2030 uden yderligere tiltag. Der resterer fortsat en manko på ca. 6 mio. tons. Hertil kommer, at der er usikkerhed om de indregnede effekter af vedtagne tiltag er helt retvisende.



Figur 1: Fremskrivning af Danmarks CO₂-emissioner (Energistyrelsen, 2023a).

Den seneste klimafremskrivning udarbejdet af Energistyrelsen viser en manko for opfyldelse af målet i 2030 på 5,4 mio. ton CO₂-ækvivalenter, som vist i Figur 2. Det fremgår af fremskrivningen, at der er behov for yderligere tiltag især i landbrugssektoren for at nå 2030-målet.



¹ Manko fra BF20. Denne er udgivet i juni 2020 og indeholder politikker frem til 1. maj 2020.

² Ændring i manko fra BF2020 til KF2021. KF2021 indeholder effekter af politikker frem til d. 31. dec. 2020.

³ Ændring i manko fra KF2021 til KF2022. KF2022 indeholder effekter af politikker frem til 31. dec. 2021

⁴ Ændring i manko fra KF2022 til KF2023. KF2023 indeholder effekter af politikker frem til 31. dec. 2022

Figur 2: Udvikling i reduktionsmankoen i 2030 siden klimalovens vedtagelse (Klima- Energi- og forsyningsministeriet, 2023).

I Regeringens Klimaprogram 2023 redegøres for, at mankoen bl.a. kan indfries ved opfyldelse af det bindende reduktionsmål for land- og skovbrugssektoren. Det skønnes, at der udestår et reduktionsbehov på ca. 5,1-7,2 mio. ton CO₂e i 2030. Som et afgørende virkemiddel i den sammenhæng nævnes indførelse af en CO₂e-afgift på landbruget, bl.a. på baggrund af anbefalinger fra den nedsatte ekspertgruppe, der ventes at afrapportere i foråret 2024. Med "Aftale om grøn omstilling af landbruget" i 2021 aftalte et bredt flertal i Folketinget at land- og skovbrugssektorens drivhusgasudledninger skal nedbringes med 55-65% svarende til ca. 6,1-8,0 mio. t. CO₂e³ (Regeringen et al., 2021). I de efterfølgende og pågående forhandlinger vil en CO₂-afgift sandsynligvis spille en væsentlig rolle.

Landbrugsspecifikke klimatiltag

Forud for den politiske aftale om grøn omstilling af landbruget, havde Regeringens Klimapartnerskab for Fødevarer og Landbrug afleveret en rapport, der identificerede en lang række reduktionsmuligheder. Bio-raffinering, herunder pyrolyse og efterfølgende udbringning af biokul, forventes have et reduktionspotentiale på 2 mio. tons ifølge aftalen (Regeringen et al., 2021). Fodertilsætningsstoffer og ændret håndtering af gylle og gødning forventedes ligeledes have et reduktionspotentiale på 1 mio. tons CO₂ for hvert af de to tiltag. Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri og øvrige relevante ministerier varetager gennemførelsen og implementeringen af den grønne landbrugsaftale. Bl.a. skal der følges op på udviklingssporet senest i 2023, mens den samlede aftale skal genbesøges i 2023 eller 2024.

I forhold til reduktion gennem metanreducerende foder blev i 2023 udgivet en strategi der specificerer tekniske muligheder, potentiale og omkostninger (Ministeriet for Landbrug Fødevarer og Fiskeri & Miljøministeriet, 2023b). De to mest modne tiltag er brug af tilsætningsstoffet Bovaer samt øget fedttildeling. Effekten fra øget fedttildeling er medregnet i klimafremskrivningen fra og med 2025 og bliver opgjort til 0,14 ton CO₂e årligt. Dette bliver beskrevet som en moden teknologi med få barrierer, dog med flere opmærksomhedspunkter, herunder klimabelastning for produktion af fedtstof. Omkostningen for øget fedttildeling bliver estimeret til 1.200 kr./ton CO₂e. Fodertilsætningsstoffet Bovaer er godkendt i Danmark,

³ Inklusiv den såkaldte LULUCF sector.

men anvendes kun i begrænset omfang. Den metanreducerende effekt forventes at være 30% og er ved at blive undersøgt under danske forhold. Hvis den forventede effekt holder, ville dette svare til en mulig reduktion med en yderligere effekt, udover effekter for øget fedttildeling, på 0,45 mio. ton CO₂e, eller en selvstændig effekt på 0,59 mio. ton CO₂e årligt for kvæg i stalde. For kvæg på græs er potentialet mere usikkert. Omkostningerne for Bovaer bliver opgjort til 425 kr./ton CO₂e.

For reduktioner ved gylle- og gødningshåndtering udgav Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri sammen med Miljøministeriet ligeledes en strategi i 2023, der specificerer tekniske muligheder, potentiale og omkostninger (Ministeriet for Landbrug Fødevarer og Fiskeri & Miljøministeriet, 2023a). Her bliver nitrifikationshæmmere fremhævet som en moden teknologi. Herudover specificeres potentialer og omkostninger for staldforsuring, gyllekøling samt teltoverdækning af gylle. Nitrifikationshæmmere i gødning kan reducere lattergasudslip. De er designet til at forbedre kvælstofudnyttelsen i marken, men deres klimaefekt er dog mindre kendt og undersøges i igangværende forskningsprojekter, der forventes afsluttet i 2024. Både staldforsuring og gyllekøling er kendte teknologier for ammoniakreduktion, men der mangler dokumentation for reduktionseffekt af drivhusgasser. Teltoverdækning i kombination med flydelag er en umoden teknologi, hvor der mangler viden om effekt samt drift og opbygning. Et overblik over nævnte klimatiltag, potentialer, og omkostninger vises i Tabel 5.

		Potentiale (mio. tons CO ₂ e)	Omkostning (kr./ton CO ₂ e)	Kilde
Metanreducerende foder	Bovaer	0,59 (kvæg i stalde) 0,05 (kvæg på græs)	425	(Ministeriet for Landbrug Fødevarer og Fiskeri & Miljøministeriet, 2023b)
	Øget fedttildeling	0,14 (allerede medregnet i klimafremskrivningen 2023)	1.200	(Ministeriet for Landbrug Fødevarer og Fiskeri & Miljøministeriet, 2023b)
Gylle- og gødningshåndtering	Nitrifikationshæmmere tilsat husdyrgødning	0,20	1.325	(Ministeriet for Landbrug Fødevarer og Fiskeri & Miljøministeriet, 2023a)
	Nitrifikationshæmmere tilsat kunstgødning	0,34	1.225	(Ministeriet for Landbrug Fødevarer og Fiskeri & Miljøministeriet, 2023a)
	Staldforsuring	0,04	820	(Ministeriet for Landbrug Fødevarer og Fiskeri & Miljøministeriet, 2023a)
	Gyllekøling	0,02	4.700	(Ministeriet for Landbrug Fødevarer og Fiskeri & Miljøministeriet, 2023a)
	Teltoverdækning med flydelag	0,16	375	(Ministeriet for Landbrug Fødevarer og Fiskeri & Miljøministeriet, 2023a)

Tabel 5: Overblik over kvantificerede klimatiltag fra delstrategier for CO₂e reduktioner i landbruget.

Klimarådet udgav i februar 2023 rapporten *'Landbrugets omstilling ved en drivhusgasafgift'*, hvor konsekvenserne af at indføre en drivhusafgift på 750 kr./ton blev beregnet. I baggrundsrapporten vurderes fordertilsætningsstoffer og pyrolyse ikke at være tilstrækkeligt modne teknologier og derfor for usikre til at indgå i beregningerne (Klimarådet, 2023a). De kvantificerede tiltag for landbrugssektoren er listede i Tabel 6. For de fleste af tiltagene er priserne angivet under forskellige forhold, her forsimplet til den højeste og laveste værdi (uden tilskud). I Klimarådets statusrapport fremhæves usikkerheder forbundet med pyrolyse, herunder biomassetilgængelighed og effekter på jordbunden (Møllgaard et al., 2023). I det dertilhørende baggrundsnotat estimeres reduktionspotentialet for pyrolyse til 0,15 mio. tons CO₂e i 2030 med betydelig usikkerhed (Klimarådet, 2023b).

Klimatiltag	Omkostning (kr./ton CO ₂ e)	
	Lavt	Højt
Udtagning af landbrugsjord	91	292
Skovrejsning	352	618
Udtagning af omdriftsjord til permanent brak	1.027	2.400
Hypig udslusning i slagtesvinestalde	147	
Gyllekøling i svinestalde	365	2.017
Biogas	148	320
Gylleforsuring	306	1.135
Overdækning af gyllebeholdere	23	542
Øget fedttildeling	382	504
Nitrifikationshæmmere	1.333	2.247
Kvælstofnormreduktion	605	2.419
Efterafgrøder	123	2.113
Mellemafgrøder	759	

Tabel 6: Overblik over kvantificerede tiltag i landbrugssektoren. Beregnet efter tal fra Klimarådet (2023).

I Tabel 7 er omkostninger for tiltag sammenlignet på tværs af de to kilder, hvor dette vurderes muligt. Tabellen viser betydelige forskelle især vedrørende øget fedttildeling, nitrifikationshæmmere tilsat kunstgødning samt gyllekøling.

		Potentiale	Omkostning (kr./ton CO ₂ e)		
		(mio. tons CO ₂ e) ^a	Reduktionspotentialer på landbrugsområdet ^a	Klimarådet: Lavt ^b	Klimarådet: Højt ^b
Metanreducerende foder	Øget fedttildeling	0,14 (allerede medregnet i klimafremskrivningen 2023)	1.200	382	504
Gylle- og gødningshåndtering	Nitrifikationshæmmere tilsat husdyrgødning	0,20	1.325		1.333
	Nitrifikationshæmmere tilsat kunstgødning	0,34	1.225		2.247
	Staldforsuring/Gylleforsuring	0,04	820	306	1.135
	Gyllekøling	0,02	4.700	365	2.017
	Teltoverdækning med flydelag/Overdækning af gyllebeholdere	0,16	375	23	542

^a Gylle- og gødningshåndtering: (Ministeriet for Landbrug Fødevarer og Fiskeri & Miljøministeriet, 2023a)

Metanreducerende foder: (Ministeriet for Landbrug Fødevarer og Fiskeri & Miljøministeriet, 2023b)

^b (Klimarådet, 2023a)

Tabel 7: Sammenligning af samfundsøkonomiske omkostninger ved klimatiltag i landbruget.

Opsummering

Med klimaloven skal Danmark reducere drivhusgasudledningerne med 70% i 2030 sammenlignet med 1990, og være 100% klimaneutral senest 2050. Regeringen vil fremrykke målet om klimaneutralitet til 2045, og vil fastlægge et mål om 110% reduktion i 2050. Der er en manko på ca. 6 mio. tons CO₂ for at nå 2030-målet og der er behov for yderligere tiltag, især i landbrugssektoren. Som et afgørende virkemiddel nævnes indførelse af en CO₂e-afgift på landbruget. Med "Aftale om grøn omstilling af landbruget" i 2021 aftalte et bredt flertal i Folketinget at land- og skovbrugssektorens drivhusgasudledninger skal nedbringes med 55-65%. Her estimeredes bioraffinering, herunder pyrolyse og efterfølgende udbringning af biokul, til at have et reduktionspotentiale på 2 mio. tons CO₂e. I Klimarådets rapport for omstilling af landbrugssektoren vurderes pyrolyse derimod som værende for usikkert, med henvisning til at teknologien ikke er moden nok til at indgå i deres beregninger (Klimarådet, 2023a), og potentialet for pyrolyse vurderes til 0,15 mio. tons i 2030 (Klimarådet, 2023b). De samlede muligheder for reduktioner i landbrugssektoren er forbundet med usikkerhed, da der ikke er klar konsensus for modenhed af tiltag eller omkostninger forbundet med dem.

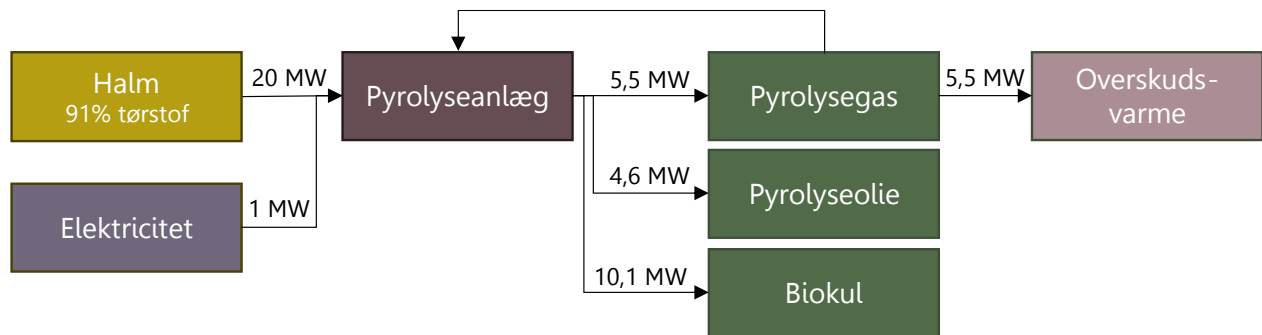
3. Pyrolyseteknologi

Biokul produceres ved pyrolyse, der er den termiske nedbrydning af biomasse, som forekommer ved opvarmning i et iltfattigt miljø. Det er den grundlæggende kemiske reaktion, der er forløber for både forbrændings- og forgasningsprocesser. En bred vifte af input kan bruges i pyrolyseprocessen. Produkterne fra pyrolyse inkluderer biokul og gasser, og en del af pyrolysegassen kan kondenseres til pyrolyseolie. Pyrolyseprocesser opdeles ofte i langsom pyrolyse eller hurtig pyrolyse. Hurtig pyrolyse er i øjeblikket det mest anvendte pyrolysesystem, hvor pyrolyseprocessen tager få sekunder og det primære formål er at producere pyrolyseolie (Energistyrelsen, 2023b). Ved langsom pyrolyse tager processen typisk under en halv time og her bliver en stor del af inputtet til processen omdannet til biokul. Langsom pyrolyse er begrænset i sin udbredelse og blev i 2022 tilføjet til Energistyrelsens teknologikatalog for fornybare brændstoffer, da pyrolyseolie og gas kan erstatte fossile brændstoffer til for eksempel transport eller industriel varme (Energistyrelsen, 2023b).

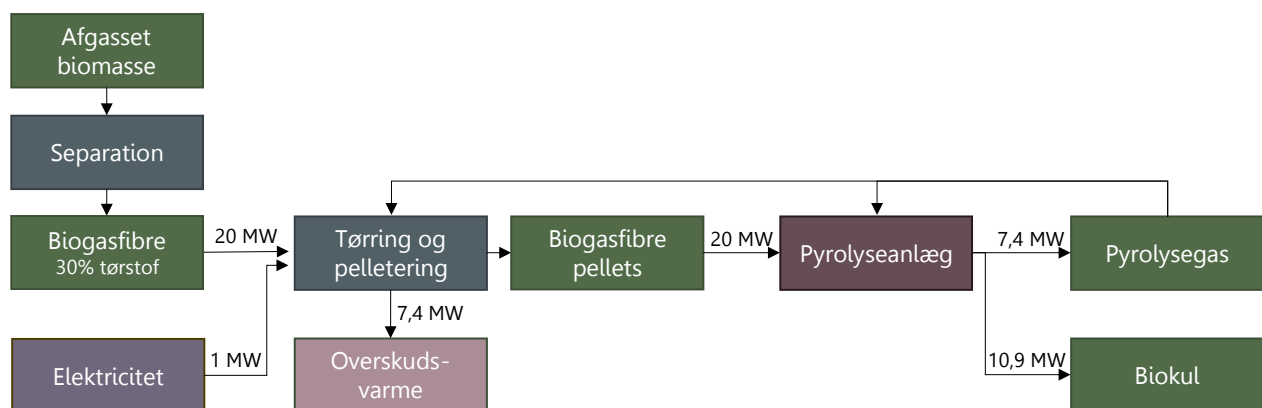
Teknologier til konvertering af pyrolyseolie vurderedes til at befinde sig i tidlig udvikling, hvor teknologien er demonstreret i et relevant miljø (Technology Readiness Level 5) (Energistyrelsen, 2023b). På EU-niveau bliver pyrolyseteknologier for konvertering af biomasse vurderet til at være et sted mellem tidlig udvikling og til stadiet af systemprototype i operationelt miljø (Technology Readiness Level 5-7) (Motola V. et al., 2023), der er dog eksempler på højere teknologi modenhedsniveauer (Technology Readiness Level 8-9) (European Commission & Joint Research Centre, 2023). Det første større anlæg for langsom pyrolyse i Danmark er ved at blive bygget som del af projektet SkyClean Scale-up, der blev tildelt 124 mio. kr. fra Pyrolysepuljen i 2022. Anlægget har en kapacitet på 20 MW. Den samme pulje uddelte også støtte til projektet Stor-skala Fluid Bed Pyrolyse med 51,4 mio. kr. for at etablere et 10 MW demonstrationsanlæg (Energistyrelsen, 2022b).

Selvom meget forskelligt input kan anvendes til produktion af biokul, er det væsentligt at den anvendte biomasse ikke medfører et større miljøaftryk i forhold til for eksempel indirekte ændringer af arealanvendelse, der kan lede til tab af biodiversitet. Dette er et opmærksomhedspunkt fra IPCC i forhold til biokul (de Coninck et al., 2018). På grund af dette aspekt, så vel som omkostninger og tilgængelighed, er det relevant at kigge på restbiomasse. Da udbringning af biokul er et landbrugsrelateret tiltag er det herudover relevant at se på ressourcer i landbrugssektoren. Det Nationale Bioøkonomipanel forudser et godt potentiale for forøget udbytte, herunder øgede mængder af halm. Herudover beskrives pyrolyse af biogasfibre som en effektiv udnyttelse af biomasse gennem et kaskadepincip (Det Nationale Bioøkonomipanel, 2022). Der foregår en biogasudbygning i Danmark og i 2030 skal det danske gasforbrug være helt dækket af biogas (Klima- Energi- og Forsyningsministeriet, 2021). Dette peger på, at der vil være en stor tilgængelighed af både halm og afgasset biomasse, hvilket også konkluderes i Niras' rapport om biomasse mængder til pyrolyse for CIP-fonden (Niras, 2023).

I denne analyse modelleres to pyrolyseanlæg, et med halminput og et med input af biogasfibre. Biogasfibre er den faste fraktion fra separeret afgasset biomasse, digestat fra biogasanlæg. De to anlæg skitseres i Figur 3 og Figur 4. Det antages, at det første fulde driftsår for det modellerede anlæg er 2028, og at den tekniske levetid for anlægget er 20 år.



Figur 3: Overblik over modelleret pyrolyseanlæg for halm



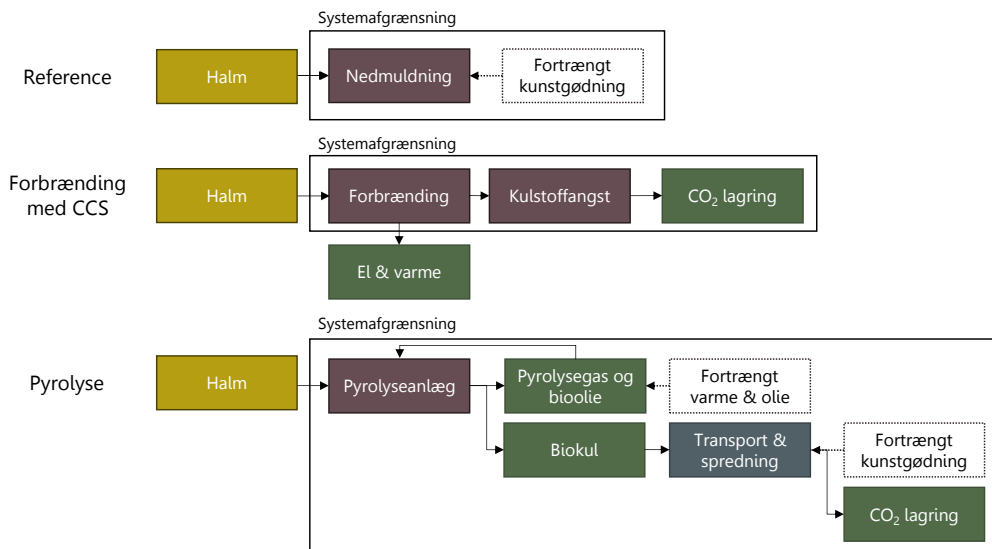
Figur 4: Overblik over modelleret pyrolyseanlæg for biogasfibre

4. Udvalgte effekter ved biokul

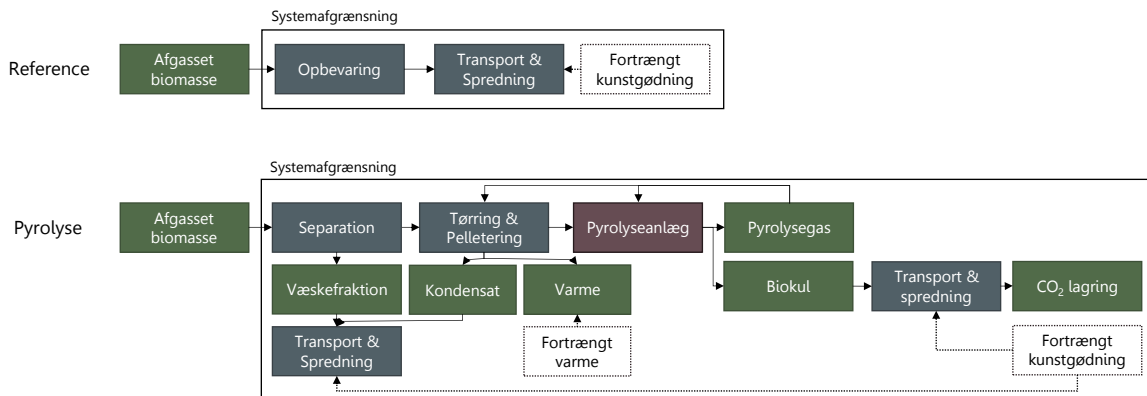
Produktion og spredning af biokul ses som et lovende tiltag for CO₂-reduktioner i landbrugssektoren. I en international sammenhæng har biokul fået stor opmærksomhed. FN's klimapanel, IPCC, beskriver kulstofslagrings med biokul som en metode med flere fordele, herunder forbedret jordproduktivitet (de Coninck et al., 2018). Kvantificeringen af klimaeffekter er central for at kunne vurdere, hvorvidt biokul er et relevant klimavirkemiddel. Herudover er der andre sideeffekter ved udbringning af biokul, der er relevante at kvantificere for de specifikke cases. Dette kapitel specificerer og motiverer hvilke effekter, der er inkluderet i analysen.

Overblik over cases

For at vurdere effekter ved brug af halm og afgasset biomasse til biokul skal disse cases ses i forhold til en reference, der illustrerer, hvad der ellers ville ske med biomassen. For halm er referencen at biomassen nedmuldes i landbrugsjorden. Her bliver en del af næringsstofferne i halmen udnyttet. For afgasset biomasse fra biogas er referencen, at biomassen bliver opbevaret og derefter spredes på landbrugsjord. I denne reference bliver næringsstoffer også udnyttet. En gængs anvendelse af halm er til forbrænding for el og/eller varmeproduktion. Når forbrænding af halm kobles med CO₂-fangst og -lagring, er dette også et virkemiddel til CO₂-reduktion. Derfor undersøges disse cases også med den samme reference, nedmuldning af halm. De modellerede cases for hhv. halm og afgasset biomasse fra biogas er illustrerede i Figur 5 og Figur 6.



Figur 5: Overblik over cases for halm



Figur 6. Overblik over cases for afgasset biomasse fra biogas

Effekter ved udbringning af biokul

Udbringning af biokul kan medføre en række effekter. I dette afsnit gøres rede for nogle af effekterne ved anvendelse af biokul, der opstår ved udbringning af biokul på mark, produceret på hhv. halm og afgasset biomasse for de illustrerede cases i en dansk kontekst. For de effekter, der vurderes være mest relevante og kvantificerbare, identificeres indikatorer og værdier med baggrund i relevant litteratur, der kvantificerer forskellen ved udbringning af biokul sammenlignet med referencerne vist i Figur 5 og Figur 6.

Der er vigtigt at bemærke, at dette studie forholder sig til anvendelsen af biokul for de illustrerede cases i en dansk kontekst, og at de anvendte forudsætninger og data ikke nødvendigvis kan overføres til andre cases eller geografiske regioner. På samme måde er niveauerne for effekter ved udbringning af biokul vidt forskellige og afhænger bl.a. af i) jordtypen hvori biokullet udbringes, ii) klimazonen, iii) pyrolyseanlæggets temperatur og iv) sammensætningen af biokullets biomassekilde.

Der er en omfattende litteratur indenfor anvendelse af biokul. Denne rapport tager indledningsvist udgangspunkt i Aarhus Universitets *'Knowledge Synthesis on Biochar in Danish Agriculture'* fra september 2022 (Elsgaard et al., 2022), som giver en omfattende beskrivelse af litteraturen om biokul, som forfatterne har søgt målrettet til en dansk kontekst, idet deres kilder primært omhandler biokul i en dansk kontekst – eller anvendt/undersøgt under lignende klimatiske- og agrikulturelle forhold.

Det understreges, at størstedelen af tidligere undersøgelser og forskning i biokul for så vidt angår de agronomiske og miljømæssige konsekvenser ved udbringning af biokul er i) udført under laboratorieforhold, der ikke tilstrækkelig grad afspejler den dynamiske, komplekse virkelighed i landbrugsjord/på en mark, ii) ikke undersøger virkningen over længere tid end ét år, og iii) at biokullets sammensætning og produktion ikke var ordentligt beskrevet/karakteriseret (Elsgaard et al., 2022). Derudover skal det tages som et forbehold, at mange positive effekter ved udbringning af biokul først indtræder ved en betydelig mængde biokul tilført, eller at der er tilført biokul hen over en periode. Ved anvendelse af halmbaseret biokul vil effekterne opnås hurtigere end ved biokul produceret på biogasfibre, som kræver tilførsel af biokul igennem mange år. I øvrigt ses effekterne ikke i nær samme udstrækning i dansk jord, hvor jordkvaliteten typisk er høj, i sammenligning med f.eks. sandede jorde, hvor effekterne typisk vil indfindes i højere grad og inden for en kortere tidsperiode. Skal det fulde potentiale for jordforbedring opnås ved anvendelse af biokul, skal biokullet udbringes på udpinte jorde.

Udvalgte effekter

I vurderingen af relevante effekter er der forsøgt at inkludere de mest relevante effekter i en dansk kontekst. I en international sammenhæng undersøger Azzi et al. (2021a), hvilke effekter der bliver kvantificeret i en række livscyklusanalyse (LCA) studier. Her identificeres 16 forskellige sideeffekter ved anvendelsen af biokul. Disse effekter er sammenlignet for relevans i en dansk kontekst, som beskrevet i Elsgaard et al. (2022) og Thomsen (2021). Herudover er effekternes relevans vurderet ud fra de specifikke typer af biomasse brugt i dette studie: halm og afgasset biomasse. De udvalgte effekter listes med en kort beskrivelse i Tabel 8.

Effekt	Beskrivelse	Kvantificeres
<i>Lagring af kulstof</i>	Ved at sprede biokul på marker bindes det stabile kulstof i jorden. Stabiliteten af kulstof er afhængig af pyrolyseprocessen og jordens forhold.	Ja, primær effekt
<i>Udledning af lattergas og metan</i>	Udledning af de potente drivhusgasser lattergas (N ₂ O) og metan (CH ₄), kan ændres ved anvendelse af biokul i landbruget.	Ja, sideeffekt
<i>Recirkulering af næringsstoffer</i>	Ved udbringning af halm/digestat/biokul på landbrugsjord vil forskellige kombinationer og mængder af næringsstoffer blive recirkulerede, så der skal bruges mindre kunstgødning.	Ja, sideeffekt
<i>Ændret behov for kalkning</i>	Spredning af biokul kan hæve jordens pH-værdi og dermed reducere kalkbehovet på landbrugsjord	Ja, sideeffekt
<i>Ammoniakudslip</i>	Ammoniakemissioner til luften reduceres, når afgasset biomasse separeres i en fast og flydende fraktion før det spredes på jorden.	Ja, sideeffekt
<i>Partikelforurening</i>	Der er risiko for udslip af partikler i røggassen fra pyrolyseanlægget og forbrændingsanlægget.	Ja, sideeffekt
<i>Udvaskning af kvælstof</i>	Udbringning af biokul har muligvis effekt på kvælstofudvaskning og kan dermed bidrage til en reduktion af en betydelig miljøpåvirkning.	Ja, i følsomhedsanalyse

Tabel 8: Overblik over udvalgte effekter.

Ikke kvantificerede effekter

Udskillelse af tungmetaller

Udbringning af biokul kan betyde, at der tilføres tungmetaller til jorden, som over tid kan akkumulere. Tungmetallerne i biokullet hænger direkte sammen med den anvendte biomasse til produktionen af



biokul. Omvendt viser nogle studier, at biokul forhindrer udvaskning af tungmetaller (Hama Aziz & Kareem, 2023). Forventningen er, at der fremover vil blive anvendt grænseværdier for indholdet af tungmetaller i biokul, for eksempel som specificeret i den frivillige ordning under *European Biochar Certificate (EBC)*, der opstiller grænseværdier for indholdet af tungmetaller ved anvendelse i hhv. økologisk og konventionelt landbrug.

Lettere håndtering af afgasset biomasse

I håndtering af digestat fra biogasanlæg er udbringning af fiberfraktionen problematisk, da den er besværlig at håndtere og indeholder en stor mængde fosfor, hvilket gør at fosforloftet hurtigt bliver ramt. I en separation af den afgassede biomasse bliver den vanskelige fiberfraktion frasorteret, hvilket muliggør en nemmere udbringning af væskefraktionen.

Omfordeling af fosfor

Biokul fremstillet ved pyrolyse kan hjælpe med at omfordele fosfor til jorde, der har behov for det. Det danske fosforloft, der begrænser mængden af fosfor, som må udbringes per areal, gælder både for organisk gødning og kunstgødning. Produktion og transport af biokul muliggør en omfordeling af fosfor til jorde, der har behov for det, samtidig med at fosforloftet bliver overholdt.

Andre potentielle sideeffekter ved udbringning af biokul

Udover de ovennævnte effekter, er der en række sideeffekter, der ikke inkluderes i analysen pga. begrænsninger i forhold til relevans, analysens omfang, eller for høje usikkerheder. Dette er et område i udvikling og med begrænset praktisk viden. Her listes en række potentielle sideeffekter, der er ekskluderede fra denne analyse. Listen er ikke udtømmende.

- Øget udbytte bliver ofte inkluderet som en effekt fra udbringning af biokul, men vil ikke være med i denne analyse, da der ikke er set et øget udbytte i dansk kontekst (Elsgaard et al., 2022).
- Ved brug af primær biomasse, for eksempel energiafgrøder, vil det være relevant at inkludere ILUC, dvs. indirekte ændring af landanvendelse som følge af øget behov for land til energiproduktion. Da der i denne analyse bruges restprodukter, halm og digestat til produktion af biokul, inkluderes disse effekter ikke.
- Udover effekten på udvaskning af kvælstof har udbringning af biokul muligvis også en effekt på udvaskning af fosfor. Dette er ikke inkluderet i denne analyse, da studier både peger på øget og reduceret udvaskning af fosfor (Glaser & Lehr, 2019).
- Der foreligger usikkerheder forbundet med ændret behov for pesticider ved udbringning af biokul.
- Biokul kan øge vandretention i jorden. For eksempel refererer Elsgaard et al. (2022), til en undersøgelse, hvori det fremgår, at tilførsel af biokul medførte en stigning af vandindholdet i jorden, der var tilgængeligt for planter.
- I et gennemsnit på tværs af studier om ændringen af aggregatstabiliteten i jorden ved tilførsel af biokul rapporteres om en stigning i aggregatstabilitet. Dog er der en betydelig usikkerhed forbundet hermed (Elsgaard et al., 2022).
- I forhold til mikrobiel diversitet og aktivitet peger flere studier på positive effekter på ved brug af biokul, men der er også rapporter, der viser negative effekter. Især er der store usikkerheder i forhold til langtidseffekter.

Kvantificering af effekter

Herunder følger kvantificering af de effekter ved anvendelse af biokul i en dansk kontekst, der er listede i Tabel 8.



Biomassens sammensætning

Der er stor variation i biomassen sammensætning, hvilket har en effekt i beregningen af sideeffekter. Spændet er størst i forhold til afgasset biomasse, da der er stor variation i input til biogasanlæg og indholdet i den afgassede biomasse, digestatet, afhænger af input. Et særligt opmærksomhedspunkt er kvælstofindholdet, da udnyttelse af kvælstof, emissioner af N₂O og NH₃, beregnes ud fra kvælstofindholdet i digestatet. Kvælstofindholdet varierer fra omkring 31 til 140 kg N/ton TS (Stoumann Jensen, 2015). På grund af manglende data for en repræsentativ komposition af digestat bruges et skøn. Kompositioner er sammenlignede fra forskellige kilder. For flertallet manglede information om specifikt input til anlæggene (Angouria-Tsorochidou et al., 2022; Jørgensen, 2009; Stoumann Jensen, 2015; Tersbøl, 2017). Derfor bruges komposition fra Hamelin et al., (2014). Her er forskellige kompositioner definerede, og den brugte komposition er for digestat fra et input på gylle og majsensilage. Denne komposition er valgt, fordi de specificerede parametre ligger relativt centralt i forhold til andre kompositioner, og fordi fremtidige input til biogasanlæg forventes at indeholde en større andel af fiberholdig biomasse.

For halm svinger kulstofindhold fra 404 til 541 kg C/ton askefri TS med et askeindhold fra 1,2% til 23% og en gennemsnitlig⁴ værdi på 488 kg C/ton askefri TS (Phyllis2, 2023). Den brugte komposition for halm er fra Elsgaard et al. (2022), hvor kulstofindholdet ligger langt under gennemsnittet, men dog indenfor spændet. Et højere kulstofindhold vil betyde en øget mulighed for kulstoflagring ved biokul, givet at andelen af kulstof i biokul er den samme. I Tabel 9 vises et overblik over den komposition af digestat og halm, der er brugt i analysen. Med andre kompositioner ville resultaterne for kvantificering af sideeffekter ændres. Dette adresseres i en følsomhedsberegning, se Følsomhed for biomassekomposition.

	Digestat	Halm
Tørstofindhold	9%	91%
ton VS/ton TS	81%	
kg N/ton TS	61	4.2
kg P/ton TS	13	0.72
kg K/ton TS	43	13.6
kg C/ton TS	446	420
Kilde	Hamelin et al., 2014	Elsgaard et al., 2022

Tabel 9: Overblik over komposition for digestat og halm. Digestat er beregnet output fra biogasanlæg med gylle (43.5%) og majsensilage (56.5%) input (Hamelin et al., 2014).

Separation af digestat

I pyrolysecasen separeres den afgassede biomasse i en fast fraktion, også kaldt biogasfibre eller fiberfraktion, og en flydende fraktion, også kaldt væskefraktion. Herefter bliver fiberfraktionen brugt som input til tørrings- og pelletingsenheden på pyrolyseanlægget, som illustreret i Figur 6. Der regnes med, at fiberfraktionen har et tørstofindhold på 30% og et kulstofindhold på 436 kg C/ton fiberfraktion. Herudover separeres næringsstoffer som beskrevet af IEA Bioenergi (Drosg et al., 2015).

Lagring af kulstof

Når halm eller fiberfraktionen fra afgasset biomasse bruges i et pyrolyseanlæg, bliver kulstoffet fordelt i den producerede pyrolysegas, -olie og biokul. Der er et højt indhold af stabilt kulstof i biokul. Når biokullet spredes ud på marken, bindes mere kulstof i jorden end hvis biomassen blev spredt direkte ud. Stabiliteten af det bundne kulstof i jorden, dvs. hvor længe der går, før en vis andel af kulstoffet i det spredte biokul udledes til atmosfæren, afhænger bl.a. af biokullets bearbejdning, herunder temperaturen anvendt i

⁴ Simpelt gennemsnit for 93 målinger for halm fra korn, hvede, havre, raps, og rug.

pyrolyseanlægget, fysisk-kemiske forhold i jorden og sammensætningen af restproduktet til pyrolyseprocessen.

FN's klimakonvention (UNFCCC) har vedtaget en 100-årig periode som grundlag for beregning af Global Warming Potential (GWP) for nationale opgørelser og reduktionsmål. Dette balancerer behovet for at være tilstrækkeligt langsigtet til at anerkende den kumulative indvirkning af drivhusgaskoncentrationer på den langsigtede klimastabilisering, samtidig med at den er tilstrækkeligt kort til at måle fremskridtene mod reduktionsmål i de kommende år og årtier. En kortere periode ville risikere en overvurdering af reduktionseffekten fra biokul, mens en længere periode ville undervurdere effekten i det kommende århundrede, som er hovedfokus for den nuværende klimapolitik. Derfor blev en 100-årig permanensmetrik for biokul foreslået i IPCC's retningslinjer fra 2019. Ved brug af et 100-årigt tidsperspektiv vil de gradvise emissioner fra nedbrydning af biokul herefter ikke tages i betragtning. Dette bør der tages hensyn til i fremtidige opgørelser, hvis biokul skulle udgøre en væsentlig del af reduktionsindsatsen i det kommende århundrede (Woolf et al., 2021).

Indholdet af kulstof i biokul og nedbrydningstiden varierer i høj grad. Tabel 10 viser resultater fra et metastudie for beregning af langtidslagring af kulstof i jord gennem biokul. Da biokul består af forskellige forbindelser med varierende nedbrydningsmønstre, bruger Woolf et al. (2021) en multi-pool model, hvor data fra en række publicerede studier analyseres. Her konkluderes at andelen af kulstof lagret i jorden falder, jo lavere en pyrolysetemperatur, der anvendes, og jo højere temperaturen er i den jord, hvorpå biokullet er udbragt. I en dansk kontekst anbefaler Elsgaard et al. (2022), at en årlig, gennemsnitlig jordtemperatur på 10°C anvendes til vurdering af nedbrydningstiden af kulstof lagret i jord vha. udbragt biokul. Pyrolyseprocessen i denne analyse sker ved 550-600°C, derfor er 79% stabilitet med en tidshorisont på 100 år relevant i dette tilfælde.

Jordtemperatur hvor biokul spredes	Tidshorisont	Pyrolysetemperatur		
		350-450°C	450-600°C	≥600°C
5°C	100 år	84%	89%	94%
10°C		72%	79%	88%
15°C		63%	71%	82%
20°C		57%	67%	79%
25°C		54%	64%	76%
5°C	500 år	55%	66%	78%
10°C		30%	44%	57%
15°C		19%	32%	44%
20°C		15%	26%	37%
25°C		13%	23%	34%
5°C	1000 år	35%	49%	63%
10°C		14%	25%	37%
15°C		8,3%	16%	25%
20°C		6,6%	12%	20%
25°C		6%	10%	17%

Tabel 10: Andel af kulstof i biokul, der ventes at være fortsat bundet i jorden efter hhv. 100, 500 og 1000 år (Woolf et al., 2021).

En mere præcis metode for at specificere biokuls kulstofstabilitet i jord er ved brug af det molære forhold mellem brint og biogent kulstof (H/C_{org}), hvor et lavere H/C_{org} -forhold indikerer en større stabilitet. I Elsgaard et al. (2022) bruges 0,7 H/C_{org} -forhold som et konservativt estimat, hvor det nævnes, at studier viser



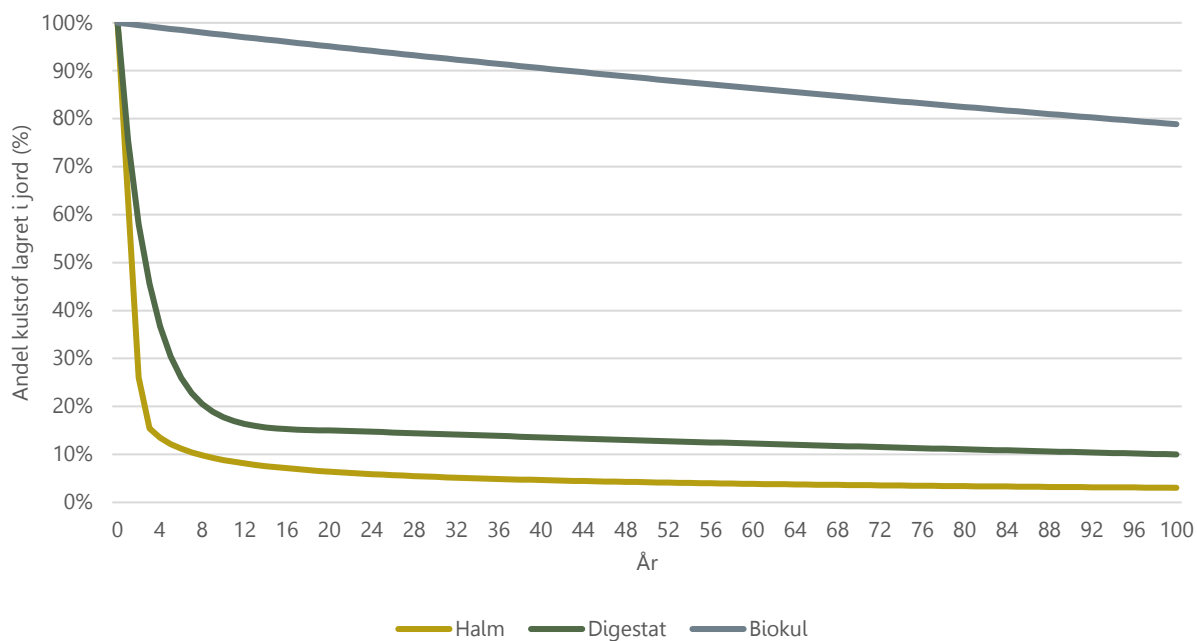
0,4 H/C_{org} . Ved brug af 0,7 H/C_{org} i en dansk sammenhæng med jordtemperatur på 10 °C resulterer dette i en kulstofstabilitet på 69% over 100 år i forhold til 86% ved 0,4 H/C_{org} . Data fra Stiesdal over vejledende sammensætning for gennemsnitlige produktionsværdier viser et H/C_{org} -forhold på 0,3, hvilket betyder en kulstofstabilitet på 92%. Her bruges en lineær regressionsmodel for at beregne kulstofstabilitet ved hjælp af H/C_{org} -forholdet, samt variabler specificerede til jordtemperatur samt tidshorisont (Woolf et al., 2021). Herudover er der andre metoder til at estimere kulstofstabilitet for biokul. En specifik metode er at måle R_O -værdien, hvor reflekterende organiske stoffer bliver identificeret under mikroskop. R_O -målinger er mere målrettede sammenlignet med H/C -forholdet, men kræver også mere specialiseret udstyr. Resultater viser en sammenhæng mellem pyrolysetemperatur og R_O -værdien, hvor en højere temperatur giver en højere R_O -værdi og større andel stabilt kulstof (Sanei et al., 2024). Her specificeres, at ved en pyrolysetemperatur over 600°C er R_O -værdien over 2% i de analyserede biokulsprøver, hvilket betyder at al kulstof var stabilt.

IPCC foreslår en simpel, let anvendelig tilgang for at estimere opholdstiden af det tilførte kulstof, hvor der udelukkende tages udgangspunkt i pyrolysetemperaturen. Ved 350-450°C, 450-600°C og >600°C estimeres andel stabilt kulstof efter 100 år til hhv. 65%, 80% og 89% (IPCC, 2019). Brug af pyrolysetemperatur er en gængs metode. Ved en pyrolysetemperatur på 550-600°C betyder dette en kulstofstabilitet på 79% ved danske forhold ifølge Woolf et al. (2021) og 80% ved brug af IPCC's (2019) opgørelsesmetode. De to tal er tæt på hinanden, men for at muliggøre langsigtet analyse over 100 år, samt relevansen i at tage højde for jordtemperatur ved spredning af biokul, bruges Woolf et al. (2021). Der er dog en risiko for, at denne tilgang kan undervurdere andelen af kulstof lagret af biokul, hvis biokullet for eksempel har et lavt H/C_{org} -forhold, derfor laves en følsomhedsanalyse med 92% kulstofstabilitet, beregnet efter et lavt H/C_{org} -forhold på 0,3. Tabel 11 viser et overblik over anvendt data i denne analyse for andel kulstof lagret i jord over tid.

År	Halmreference	Digestatreference	Biokul
2	26%	58%	
20	6%	15%	
100	3%	10%	79%
500			44%
Kilde	(Elsgaard et al., 2022)	(Elsgaard et al., 2022)	(Woolf et al., 2021)

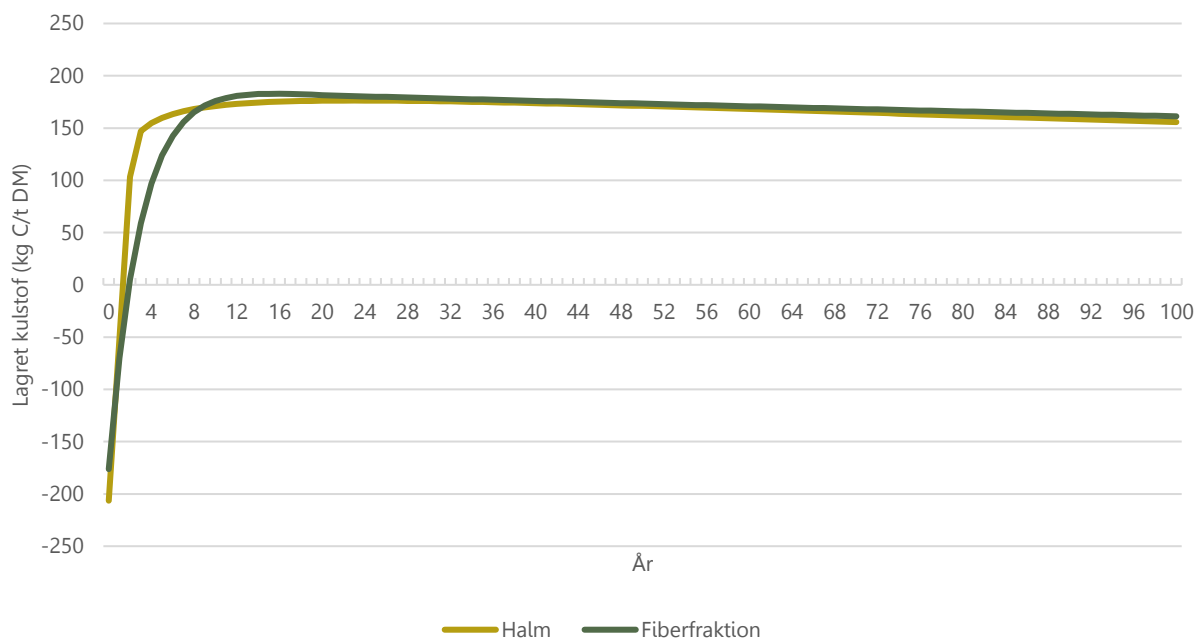
Tabel 11: Overblik over andel stabilt kulstof i jord over tid.

Ved brug af datapunkter introduceret i Tabel 11 er nedbrydningskurver beregnet for de årlige andele af stabilt kulstof, illustreret i Figur 7. Se metodebeskrivelse i Bilag 1.



Figur 7: Andel kulstof lagret i jord over de første 100 år. Se Bilag 1 for metode.

I de første år vil der være en højere lagring af kulstof i referencecasen end i pyrolysecasen, som vist i net-tokurverne i Figur 8, hvor referencecasen er fratrukket pyrolysecasen. Årsagen er, at alt kulstof ikke ender som biokul, men det bliver delt i gas, olie og biokul i pyrolyseprocessen.



Figur 8: Kulstof lagret i jord over 100 år i pyrolysecasen i forhold til referencecasen for hhv. halm og fiberfraktionen.



Udledning af lattergas og metan

Biokul har potentiale til at reducere lattergasudledninger, idet udbringning af biokul kan øge jordens pH-værdi, øge kationbytningskapaciteten, reducere uorganisk N-indhold i jorden og øget fastholdelse af jordens vandindhold (Elsgaard et al., 2022). Metanudledninger kan mindskes ved brug af biokul, idet udbringning af biokul bl.a. har evnen til at øge ilttilførslen til jorden, hvilket mindsker selve produktionen af metan i jorden og i nogle tilfælde kan medføre stigning i tilstedeværelsen af metanoxiderende bakterier (Elsgaard et al., 2022). Elsgaard et al. (2022) fremhæver, at empiriske undersøgelser viser en gennemsnitlig reduktion af lattergasudledninger op til 38%, men at det er usikkert i hvilket omfang, denne reduktion vedvarer efter en årrække, og at der mangler undersøgelser i en dansk kontekst. I en international sammenhæng er der både rapporteret øgede og reducerede udledninger af metan og lattergas efter udbringning af biokul (Wang et al., 2014). Ændring af lattergas og metan fra udbringning af biokul ses i et for stort spænd til at kunne give et bud på kvantificering af den potentielle effekt.

Derimod er processer i forhold til håndtering og opbevaring af biomasse relateret til udledning af metan og lattergas, hvilket kvantificeres i analysen. I forhold til digestat bliver den afgassede biomasse i referencen opbevaret, hvorefter den udbringes på marken. Der sker en eftergasning af digestatet i opbevaringsperioden, som indebærer udledning af metan. Denne udledning adskiller sig fra pyrolysecasen, hvor det efter separation kun er væskefraktionen, som opbevares og udbredes, mens fiberfraktionen tørres og pelleteres. Man regner med de direkte lattergasemissioner fra gødsning med kvælstof er de samme fra hhv. organisk og kunstgødning (IPCC, 2019). De specificerede udnyttelsesprocenter for kvælstof i dansk landbrug (Gødskningsbekendtgørelsen, 2023) muliggør en overgødsning ved brug af organisk gødning, da mere kvælstof må appliceres på jord ved brug af organisk gødning i forhold til kunstgødning, men dette er ikke medregnet. Dette betyder, at der ikke er regnet med nogen forskel på direkte N_2O udledninger mellem de forskellige halm og digestat cases. I forhold til indirekte lattergasemissioner fra jord er de for en stor del relaterede til NH_3 - og NO_x -udledning samt kvælstofudvaskning (IPCC, 2019).

Implementering

Forskellen i metanudslip kommer fra opbevaring af digestat. Metanemissioner fra opbevaring af digestat beregnes med metoden specificeret i IPCC's retningslinjer for opgørelser af emissioner fra gyllehåndtering (Gavrilova et al., 2019). Her indregnes en reduktion på 50% for afgasset biomasse og metanpotentialer er specificeret for det brugte mix af digestat (Hamelin et al., 2014). Metankonverteringsfaktoren er antaget til 1% svarende til højkvalitetsopbevaring i dansk klima (Gavrilova et al., 2019). Dette giver et beregnet metanudslip fra opbevaring af digestat på 1,53g CH_4 /kg VS. Digestatet separeres i pyrolysecasen i en fiberfraktion og en væskefraktion. Fiberfraktionen bliver her tørret og pelleteret, og derfor reduceres metanemissionerne i forbindelse med opbevaring af afgasset biomasse i forhold til referencen.

De indirekte N_2O -emissioner er opgjort ved brug af standard faktorer, 0,014 kg N_2O -N/ kg NH_3 samt 0,011 kg N_2O -N/kg udvasket N (IPCC, 2019). Det betyder, at der er en sammenhæng mellem N_2O -emissioner og både NH_3 -emissioner og kvælstofudvaskning.

Udnyttelse af næringsstoffer (N, P og K)

Ved tilførsel af biokul kan en vis mængde mineralsk gødsning undgås. En central antagelse er, at næringsstoffer i udbragt biomasse nyttiggøres i jorden, dvs. at der ikke er nogen overgødsning. Ved udbringning af halm/digestat/biokul på landbrugsjord vil forskellige kombinationer og mængder af næringsstoffer i form af fosfor, kalium og kvælstof blive recirkulerede. Forskellen mellem cases kvantificeres som ændret behov for kunstgødning. Højere temperaturer anvendt i pyrolyseprocessen vil typisk medføre lavere mængder kvælstof i det producerede biokul. Elsgaard et al. (2022) konkluderer, i) at der i en dansk kontekst er mangel på viden om udnyttelsen af N-indholdet fra biokul i landbrugsjord, og ii) at N-indholdet i biokul er meget stabilt forbundet til stabile kulstofforbindelser. Frigivelse af N vil formentlig først ske efter en længere periode, idet N-indholdet er bundet til stabile kulstofforbindelser. Af disse årsager konkluderer Elsgaard et al. (2022), at det ikke er relevant at fastsætte en decideret udnyttelsesgrad for N i biokul.



Fosforindholdet i biokul afhænger først og fremmest af den type biomasse, der bruges til at producere biokullet i pyrolyseprocessen, mens tilgængeligheden for jorden af biokullets P-indhold afhænger af i) biokullets påvirkning af jorden herunder pH værdien, ii) P adsorption til biokul, og iii) biokul som en kilde til P. Tilgængeligheden af P fra biokul vil være lavere i den første periode efter udbringningen, når der sammenlignes med udbringningen af biokullets biomassekilde, men over tid vil indholdet af P tilgængeligt i jorden til plantevækst blive højere end P tilgængeligt fra samme biomassekilde direkte udbragt. Mens de fleste undersøgelser viser, at P-indholdet stiger ved højere pyrolysetemperaturer, er der samtidig studier, der viser, at det tilgængelige P i biokul falder ved højere pyrolysetemperaturer (Elsgaard et al., 2022). For kalium konkluderer Elsgaard et al. (2022), at størstedelen af K-indholdet fra udbragt biokul vil være tilgængeligt for optag til plantevækst.

Implementering

Den centrale forskel mellem de to referencer og pyrolysecases er i forhold til udnyttelse af N, da der ikke antages nogen forskel på udnyttelse af P og K mellem disse cases. Her er der to primære usikkerheder, den første er andel N udnyttet i referencecasen for digestat, da dette beregnes fra input til biogasanlægget, her beregnet til 75% af N, der følger input til biogasanlægget beskrevet i Tabel 9. Den anden usikkerhed er i forhold til tab af N i udnyttelse af N fra tørring af fiberfraktionen i pyrolyseanlægget. Her antages et tab på 15%, hvilket giver en højere samlet udnyttelse af N i pyrolysecasen. Ved et tab på 40%, dvs. at 60% af N-indholdet i fiberfraktionen bliver opsamlet fra kondensat fra tørringsprocessen, er der ingen relevant forskel mellem referencecasen og pyrolysecasen. Der regnes med at være en forskel på udnyttelse af kvælstof der svarer til udnyttelsesprocenten angivet i Gødskningsbekendtgørelsen (2023), specificeret i Tabel 12. For fosfor tæller det fulde fosforindhold i biokul med i fosforloftet (Gødskningsbekendtgørelsen, 2023), og der antages derfor ikke nogen forskel i udnyttelse af fosfor mellem reference- og pyrolysecases. For kalium antages ligeledes at det samlede K-indhold vil være tilgængeligt i biokul.

	Halm			Digestat	
	Nedmuldning (reference)	Forbrænding	Pyrolyse og udbringning af biokul	Spredning af afgasset biomasse (reference)	Separation, pyrolyse af fiberfraktion til biokul samt spredning af væskefraktion
Udnyttelse af N-indhold	40% ^a	0%	0%	75% ^b	81% ^c

^a Antages at svare til "anden organisk gødning" (Gødskningsbekendtgørelsen, 2023)
^b Beregnet udefra input til biogasanlæg (Hamelin et al., 2014)
^c Kvælstof i den flydende fraktion og kondensat fra tørring udnyttes til 85% (iflg. gødskningsbekendtgørelsen). Der antages et tab på 15% kvælstof fra fast fraktion i kondensat.

Tabel 12: Overblik over udnyttelse af kvælstof.

Ændret behov for kalkning

Spredning af biokul kan hæve jordens pH-værdi og dermed reducere kalkbehovet på landbrugsjord i forhold til referencecasen. Dette er lokalspecifikke effekter, der er vanskelige at generalisere, men der forventes en effekt danske sammenhæng (Elsgaard et al., 2022).

Implementering

Data fra et svensk studie, Azzi et al. (2021), bruges til at kvantificere effekten, der beregnes til et mindsket behov for kalkning i størrelsen på 10%. Dette beregnes til en forskel på 26 kg CaCO₃/ton udbragt biokul i pyrolysecases i forhold til referencen. Det er dog usikkert, hvorvidt de lokalspecifikke forhold der ligger til grund for den beregnede reduktion kan appliceres i en generel dansk kontekst.

Ammoniakudslip

Udslip af ammoniak er en kilde til luftforurening og indirekte N₂O emissioner. Muligheder for at reducere ammoniakudslip ved separation af afgasset biomasse er behæftet med usikkerhed, og der er brug for en

bedre forståelse for at kunne kvantificere disse effekter (Pedersen et al., 2022). Nogle studier viser, at ved spredning af afgasset biomasse på jord omdannes en større andel af kvælstofindholdet til ammoniak, der udledes til atmosfæren, i forhold til spredning af separeret digestat (Aguirre-Villegas et al., 2019; Angouria-Tsorochidou et al., 2022). Ved spredning af kvælstof afhænger ammoniakudslip af flere faktorer. For kunstgødning er der ved et vægtet EU-gennemsnit højere emissioner end ved recirkulering af kvælstof fra både halm og digestat (Hutchings et al., 2023). Dette betyder, at der er en positiv effekt på NH₃-emissioner og dertilhørende N₂O-emissioner ved recirkulering af kvælstof, især i halmreferencen, hvor forskellen er størst.

Implementering

Kvantificering af NH₃-emissioner i digestatreferencen følger metoden beskrevet i Hamelin et al. (2014), hvor 2% af N udledes som NH₃ ved opbevaring og 12% af N udledes som NH₃ i spredning af digestat. Forskellen i NH₃-emissioner mellem spredning af afgasset biomasse og spredning af væskefraktionen samt kondensat er behæftet med usikkerhed, men svarer til en reduktion på 22% ifølge Angouria-Tsorochidou (2022), med 10% ifølge Aguirre-Villegas et al. (2019) og 57% ifølge Støckler Holm (2023) i pyrolysecasen i forhold til referencen. Der er i udgangspunktet brugt et simpelt gennemsnit af de ovenstående tre studier, det vil sige en reduktion på 29% NH₃-emissioner i digestat pyrolysecasen i forhold til referencen. For at estimere forskellen mellem NH₃-emissioner ved brug af kunstgødning og recirkulering af kvælstof bruges generelle NH₃-emissionsfaktorer (Hutchings et al., 2023). Kunstgødning har en noget højere NH₃-emissionsfaktor end udbringning digestat og den er mere end dobbelt så høj i forhold til NH₃-emissionsfaktoren for nedmulding af halm. Herudover er der indirekte N₂O-emissioner som følge af NH₃-emissioner, som tidligere beskrevet.

Partikelforening

Brugen af biokul kan være forbundet med udskillelsen af skadelige, luftbårne partikler. Både under opbevaring og udbringning af biokul kan støvpartikler fra biokul spredes i luften. Denne effekt kan mindskes ved at tilføre fugt til biokullet inden udbringning. Dog mangler der viden om, hvordan dette foretages korrekt i en dansk kontekst (Elsgaard et al., 2022). I forhold til konvertering af biomasse kan sundhedsskadelige fine partikler med en størrelse på $\leq 2,5 \mu\text{m}$, så kaldt PM_{2,5}, udledes i røggas fra forbrændings- og pyrolyseanlæg.

Implementering

Partikeludslip fra pyrolyseanlægget og forbrændingsanlægget kvantificeres som PM_{2,5}-udslip. På grund af manglede data om PM_{2,5}-udslip fra det undersøgte pyrolyseanlæg bruges data fra et mindre anlæg på 0,5 MW (Azzi et al., 2021b). Partikelemissioner fra et større anlæg forventes have bedre røggasrensning og det anlæg, der undersøges i denne analyse, er på 20 MW. Derfor reduceres PM_{2,5}-emissioner med 90% til 0.006 kg PM_{2,5}/ton TS-input. For forbrændingscasen bruges data fra Energistyrelsens teknologikatalog.

Kvælstofudvaskning

Kvælstof, der ikke bliver optaget i afgrøder, bliver udskilt i vandløb og kan resultere i algeopblomstringer og iltvind. Det er muligt at tilførsel af biokul på jord kan have en effekt og reducere udvaskning af kvælstof. Nogle studier viser, at biokul kan bremse nitratudvaskning fra planters rodzone ved at fange nitrat i sine porer. Dette kan reducere mængden af nitrat tilgængelig for visse mikroorganismer, men der mangler forskning i Danmark om, hvordan biokul og nitratudvaskning påvirker hinanden (Elsgaard et al., 2022).

Implementering

I følsomhedscases reduceres udvaskning af kvælstof ved brug af biokul med 13% ifølge Borchard et al. (2019)

Prissætning af sideeffekter

De forskellige sideeffekter er prissat med varierende metode til prissætning, der specificeres her. Udledning af lattergas og metan normaliseres til CO₂e ved brug af GWP100 faktorer, 27 for CH₄ og 273 for N₂O



(IPCC, 2021) og prissættes med ETS-kvotepris fremskrevet til 2050 (Energistyrelsen, 2022a). Ammoniakudslip prissættes som gennemsnitlig skyggepris til alternativt landbrugssektorielt tiltag, forsuring ved udbringning af gødning (Miljøstyrelsen, 2013). Partikeludslip prissættes med enhedspriser for PM_{2,5}-emissioner, der udtrykker en skadesomkostning (Miljøstyrelsen, 2013). Forskel på udnyttelse af næringsstoffer (N, P og K) prissættes med pris på kunstgødning fremskrevet til 2025 (World Bank, 2023). Undgået kalkning prissættes med pris på landbrugskalk CaCO₃ (Teagasc, 2022). Kvælstofudvaskning er prissat med skyggepris for reduceret nitratudvaskning (Hansen et al., 2014). Et overblik over brugte priser ses i Tabel 13.

	kr.	Enhed	Kilde
Drivhusgasemissioner	623	ton CO _{2e}	(Energistyrelsen, 2022a)
Udslip til luft	11	kg NH ₃	(Miljøstyrelsen, 2013)
	168	kg PM _{2,5}	
Kunstgødning	5	kg N	(World Bank, 2023)
	17	kg P	
	5	kg K	
Kalk	0,2	kg CaCO ₃	(Teagasc, 2022)
Kvælstofudvaskning	63	kg N udvasket	(Hansen et al., 2014)

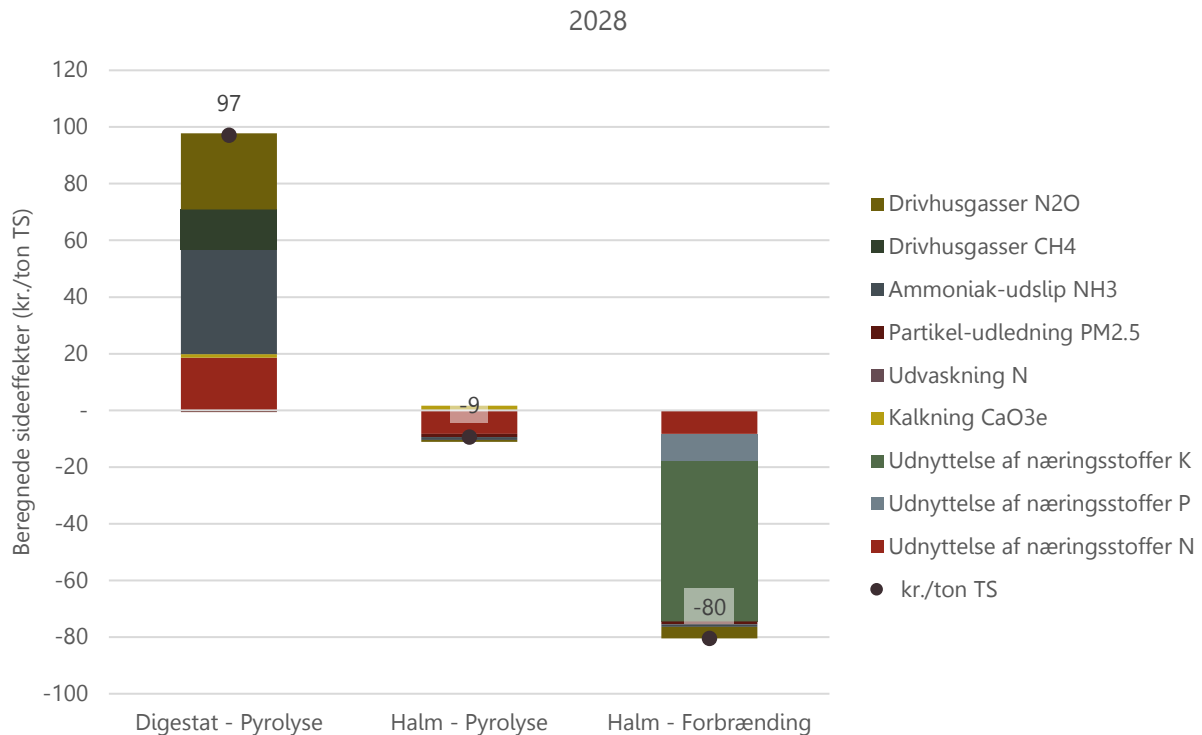
Tabel 13: Overblik over brugte priser for kvantificerede sideeffekter for år 2023.

Sideeffekter – resultater

Ved brug af den beskrevne metode til kvantificering og prissætning af sideeffekter ses det, at der er væsentlige samfundsøkonomiske fordele ved sideeffekter ved brug af afgasset biomasse til biokul, og at der derimod er omkostninger forbundet med sideeffekter for brug af halm til biokul. De store fordele ved brug af digestat til biokul stammer primært fra reducerede ammoniak- og metanudledninger, der forekommer som konsekvens af separation af den afgassede biomasse. Resultaterne i Tabel 14 og dertilhørende Figur 9 viser overblik over omkostninger og besparelser for første modellerede fulde driftsår, år 2028, ved brug af hhv. halm og digestat til biokul opdelt på mulige lokale omkostninger og undgåede omkostninger for den enkelte landmand og de bredere effekter for samfundet. Opdelingen i lokale og bredere samfundsøkonomiske omkostninger viser, at den primære værdi er på samfundsniveau, forudsat en prissætning af disse eksternaliteter.

		Digestat - Pyrolyse	Halm - Pyrolyse	Halm – BECCS
Udnyttelse af næringsstoffer	N	19	-8	-8
	P	-	-	-9
	K	-	-	-57
Kalkning	CaO _{3e}	1	2	-
	Lokale	20	-7	-74
		-	-	-
Partikel-udledning	PM _{2,5}	-1	-1	-1
Ammoniak-udslip	NH ₃	37	-1	-1
Drivhusgasser	CH ₄	14	-	-
	N ₂ O	27	-1	-4
	Samfund	77	-3	-6
Løbende priser	kr./ton TS	97	-9	-80

Tabel 14: Overblik over kvantificerede sideeffekter i løbende priser kr./ton TS i forhold til referencen for år 2028.



Figur 9: Overblik over kvantificerede sideeffekter per ton TS for år 2028 i løbende priser.

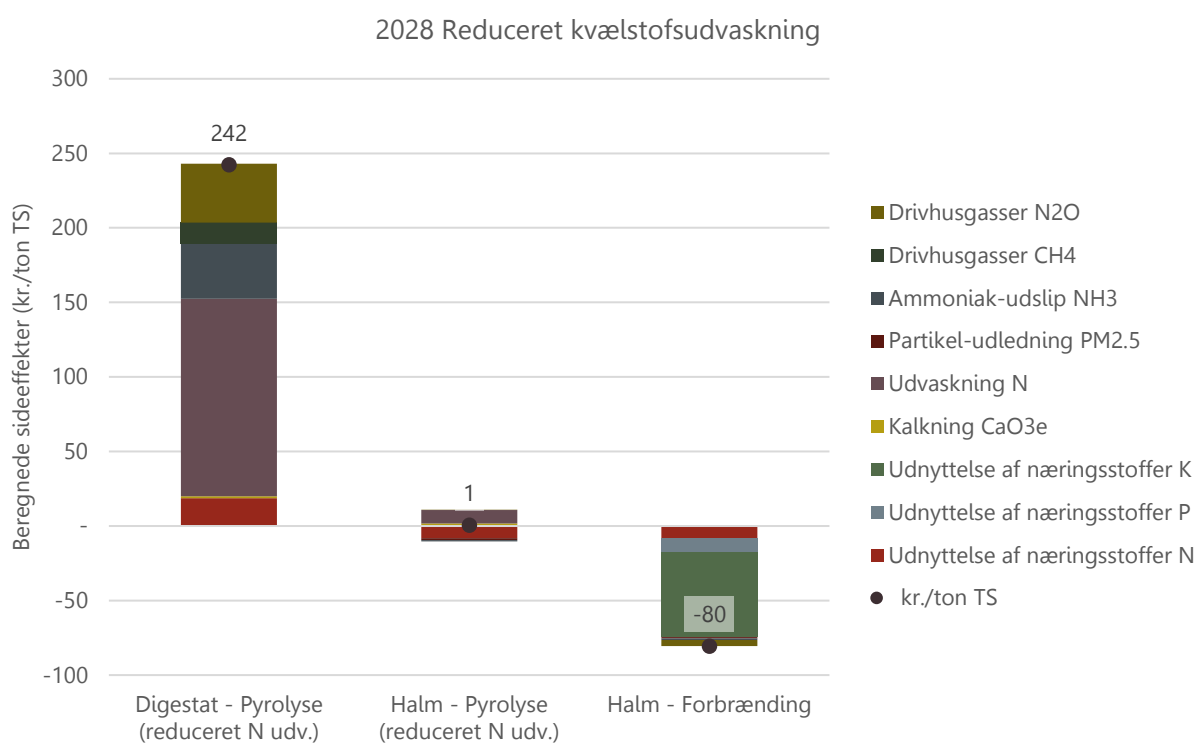
For digestat hænger størstedelen af de kvantificerede sideeffekter sammen med, at den afgassede biomasse separeres, og at fiberfraktionen udnyttes. Her er især de reducerede ammoniakudslip behæftet med stor usikkerhed, da der mangler viden indenfor emnet. Udgangspunktet er her, at pyrolyseanlægget er en drivende faktor til separation af digestat. Med et andet udgangspunkt, hvor fiberfraktionen allerede er separeret, afhænger effekten af, hvad referencen er for de separerede biogasfibre. For halm repræsenterer omkostningerne undgået mulighed for recirkulering af næringsstoffer i referencecasen.

Reduceret kvælstofudvasning

Spredning af biokul har muligvis en effekt på kvælstofudvasning. Denne effekt er dog behæftet med usikkerhed, især i forhold til hvor store mængder af biokul der skal til. Et metastudie for effekter ved biokul kvantificerer dog en reduktion af kvælstofudvasning til 13% (Borchard et al., 2019). Udover en direkte miljøeffekt ved reduceret kvælstofudvasning, ville reduceret kvælstofudvasning også betyde en afledt effekt på indirekte N₂O-emissioner. De kvantificerede sideeffekter ved reduceret kvælstofudvasning vises i Tabel 15 og dertilhørende Figur 10. For både halm og digestat har reduceret kvælstofudvasning en effekt, effekten for halm er dog beskeden i absolutte tal i forhold til digestat grundet det markant lavere N-indhold per ton TS i halm, men her går de samlede sideeffekter for halmpyrolysecasen fra at være en omkostning på 9 kr./ton TS lagret til en besparelse på 1 kr./ton TS med reduceret kvælstofudvasning i forhold til referencen.

		Digestat - Pyrolyse	Halm - Pyrolyse	Halm – BECCS
Udnyttelse af næringsstoffer	N	19	-8	-8
	P	-	-	-9
	K	-	-	-57
Kalkning	CaO _{3e}	1	2	-
	Lokale	20	-7	-74
Kvælstofudvaskning	N	133	9	-
Partikel-udledning	PM _{2,5}	-1	-1	-1
Ammoniak-udslip	NH ₃	37	-1	-1
Drivhusgasser	CH ₄	14	-	-
	N ₂ O	40	0	-4
	Samfund	223	7	-6
Løbende priser	kr./ton TS	242	1	-80

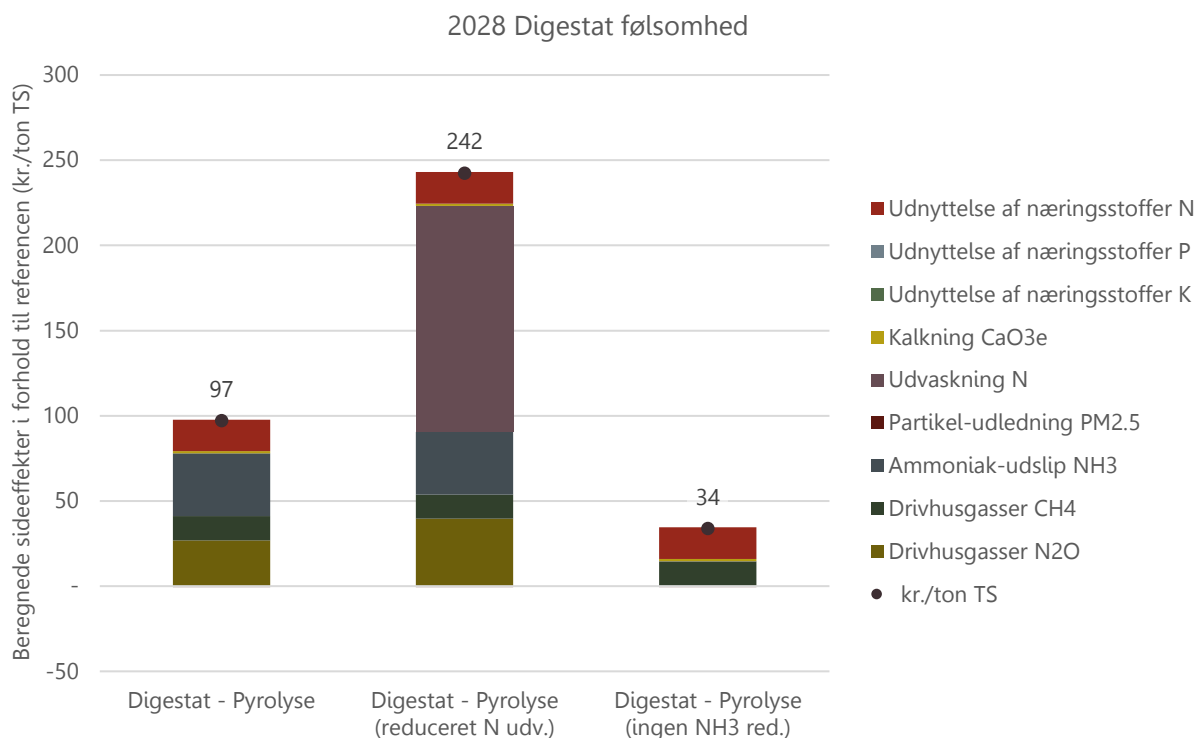
Tabel 15: Overblik over kvantificerede sideeffekter inklusiv reduceret kvælstofudvaskning i løbende priser kr./ton TS i forhold til referencen for år 2028.



Figur 10: Overblik over kvantificerede sideeffekter med i kr./ton TS i forhold til referencen for år 2028 med en reduceret kvælstofudvaskning i pyrolysecases.

Reduceret ammoniakudslip

Der er stor usikkerhed forbundet med reducerede ammoniakudslip ved separation af digestat. Dette har også en effekt på lattergasemissioner, da reducerede ammoniakudslip betyder en reduktion af indirekte N₂O-emissioner. Her foretages derfor en følsomhedsberegning, hvor der ikke regnes med reducerede ammoniakudslip ved separation af digestat. Disse resultater ses i forhold til de to foregående beregninger for sideeffekter i Figur 11. Her reduceres værdien for sideeffekter fra 97 i grundskønnet til 34, hvis der ikke regnes med en reduktion af ammoniakemissioner, da værdien ved undgåede NH₃- samt N₂O-emissioner frafalder.



Figur 11: Forskel på kvantificerede sideeffekter ved ingen reduktion af ammoniakemissioner i forhold til inkludering af kvælstofudvaskning og grundskønnet.

Følsomhed for biomassekomposition

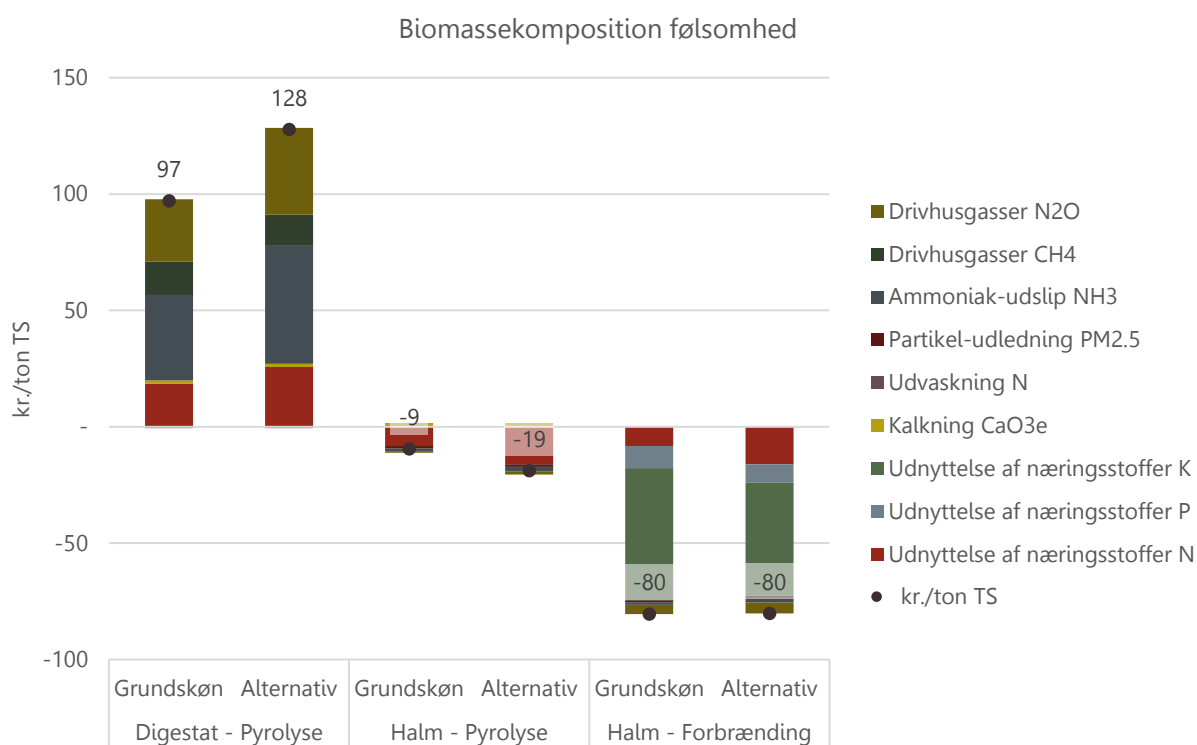
Som nævnt i afsnittet Biomassens sammensætning påvirker kompositionen af biomassen kvantificering af sideeffekter. Ved brug af en alternativ komposition, listet i Tabel 16, øges forskellen mellem kvantificerede effekter for halm og digestat i pyrolysecasen. Forskellene stammer fra et øget kvælstofindhold.

	Digestat		Halm	
	Alternativ	Grundskøn	Alternativ	Grundskøn
Tørstofindhold	8%	9%	88%	91%
ton VS/ton TS	74%	81%		
kg N/ton TS	85	61	8.1	4.2
kg P/ton TS	16	13	0.60	0.72
kg K/ton TS	52	43	11.7	13.6
kg C/ton TS	408	446	488	420
Kilde	Forskellige kilder*	Hamelin et al., 2014	(Phyllis2, 2023)**	Elsgaard et al., 2022

* Simpelt gennemsnit fra følgende kilder (Angouria-Tsorochidou et al., 2022; Hamelin et al., 2014; Jørgensen, 2009; Stoumann Jensen, 2015; Tersbøl, 2017). ** Simpelt gennemsnit for 93 målinger for halm fra korn, hvede, havre, raps, og rug.

Tabel 16: Overblik over alternativ biomassekomposition brugt i følsomhedsanalyse vist i Figur 12.

Det øgede kvælstofindhold i digestatet påvirker både muligheden for øget udnyttelse af kvælstof i pyrolysecasen og giver en øget reduktion af ammoniak- og lattergasudslip, som vist i Figur 12. For halm betyder øget kvælstofindhold, at der er mere kvælstof, som bliver udnyttet i referencen. I halmforbrændingscasen opvejer det øgede kvælstofindhold ikke helt det lavere kalium- og fosforindhold. Derfor er den mistede værdi for næringsstoffer lavere med den alternative komposition.



Figur 12: Overblik over kvantificerede sideeffekter med alternativ biomassekomposition.

Kvantificerede sideeffekter for lagring af kulstof

De opsummerende resultater vist i Tabel 17 er normaliserede i forhold til sparede CO₂e-emissioner sammenlignet med referencecasen for hhv. halm og digestat. Dette er for år 2028 i et 100-årigt perspektiv ved 79% stabilitet for kulstof i biokul. Ved en øget kulstofstabilitet i biokul, her 92% i et 100-årigt

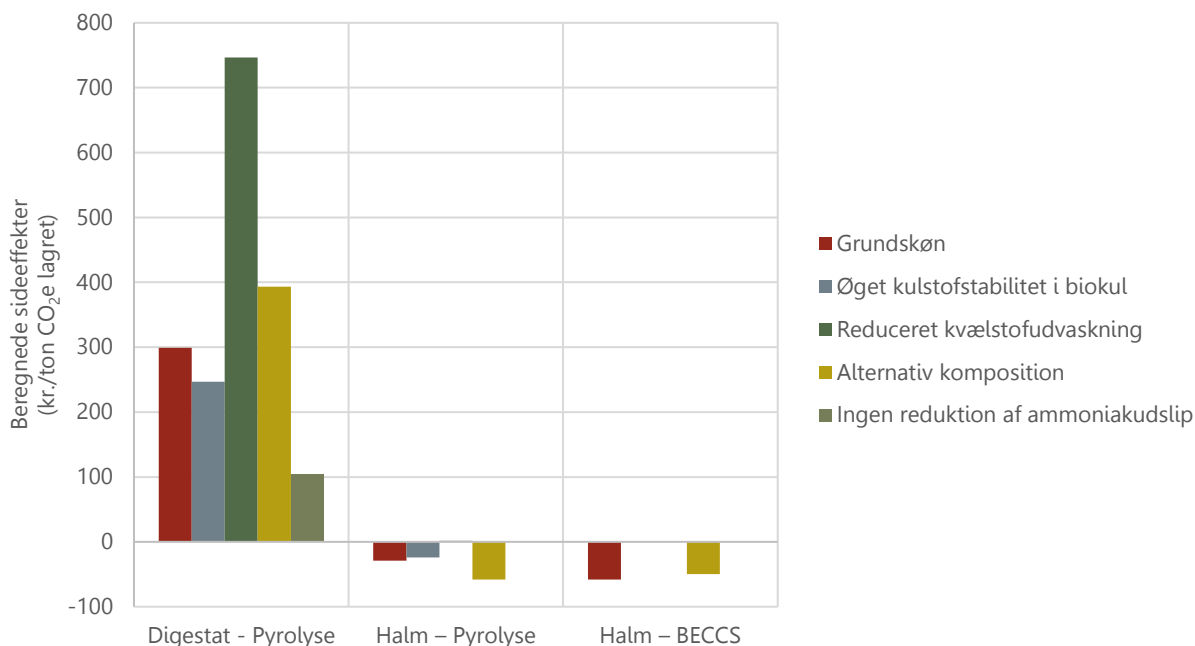
tidsperspektiv frem for 79%, betyder dette øgede CO₂e-reduktioner i forhold til referencen. I en følsomhedsberegning med øget kulstofstabilitet bliver værdien for de kvantificerede sideeffekter per ton tørstof-input fordelt ud over flere CO₂e-reduktioner, og værdien reduceres derfor proportionelt for de to pyrolysecases.

Medregning af en reduceret kvælstofudvaskning har den mest afgørende betydning af de undersøgte følsomheder. For digestatcasen bliver den samfundøkonomiske værdi af sideeffekterne mere end fordoblet og for halm ændres fortegnet, da den store værdi for reduceret kvælstofudvaskning overgår de negative effekter, primært værdien for mistet mulighed for udnyttelse af næringsstoffer i referencen. De undersøgte alternative kompositioner af biomasseinput indeholder begge to et øget kvælstofindhold. Dette betyder en øget samfundsmæssig værdi af sideeffekter ved digestatpyrolyse på grund af en øget mulig udnyttelse af kvælstof til gødning, samt en reduktion af ammoniakemissioner og de dertilhørende indirekte lattergasemissioner. For halm betyder dette en øget udnyttelse af kvælstof i halmreferencen, hvilket leder til en øget værdi af referencen i forhold til halmpyrolysen. På grund af et lavere kaliumindhold i den alternative komposition reduceres den samlede mistede næringsværdi for halmforbrændingscasen i forhold til grundskønnet.

Reduktion af ammoniakudslip ved separation af den afgassede biomasse i digestatcasen har en væsentlig betydning for de kvantificerede sideeffekter, da dette udover den direkte effekt har en positiv effekt på indirekte lattergasemissioner. Hvis denne effekt frafalder, betyder det, at den samfundsmæssige værdi for sideeffekter ved digestatpyrolyse reduceres til en tredjedel i forhold til grundskønnet. At der stadigvæk er en positiv samfundsmæssig værdi af sideeffekter, stammer fra reducerede metanemissioner samt øget udnyttelse af kvælstof. I alt spænder værdien af de kvantificerede sideeffekter bredt, fra 104 til 746 kr./ton CO₂e for digestatpyrolyse og fra -58 til 2 kr./ton CO₂e for halmpyrolysecasen i de forskellige følsomheder, som vist i Figur 13.

		Digestat - Pyrolyse	Halm – Pyrolyse	Halm – BECCS
Grundskøn	Lokale	61	-20	-54
	Samfund	238	-9	-4
	kr./ton CO₂e	299	-29	-58
Øget kulstofstabilitet i biokul	Lokale	51	-17	-54
	Samfund	196	-7	-4
	kr./ton CO ₂ e	247	-24	-58
Reduceret kvælstofudvaskning	Lokale	61	-20	-54
	Samfund	685	22	-4
	kr./ton CO ₂ e	746	2	-58
Alternativ komposition	Lokale	83	-44	-45
	Samfund	310	-14	-5
	kr./ton CO ₂ e	393	-58	-50
Ingen reduktion af ammoniakudslip	Lokale	61		
	Samfund	43		
	kr./ton CO ₂ e	104		

Tabel 17: Overblik over kvantificerede sideeffekter i kr./ton CO₂e lagret i forhold til referencen for år 2028.



Figur 13: Overblik over estimater for forskellige følsomheder i kr./ton CO₂e lagret i forhold til referencen for år 2028 i løbende priser.

Opsummering

Dette kapitel specificerer udvalgte effekter ved brug af biokul fra halm og biogasfibre i en dansk kontekst. Den primære ønskede effekt ved brug af biokul er lagring af kulstof. Her specificeres metode til kvantificering af denne primære effekt. Prissætning af mulige klimakreditter fra lagring af kulstof bliver beskrevet i kapitel 5. De udvalgte sideeffekter, udledning af lattergas og metan, udnyttelse af næringsstoffer, ændret behov for kalkning, ammoniakudslip, partikelforurening, samt udvaskning af kvælstof, er søgt kvantificeret samt prissat. Der er betydelige usikkerheder forbundet med kvantificeringen af de nævnte sideeffekter grundet manglede viden og konsensus indenfor litteraturen. Herudover er der stor usikkerhed i forhold til prissætning af eksternaliteterne, især i forhold til ammoniakudslip, partikeludledning samt kvælstofudvaskning.

Ved brug af den specificerede metode og prissætning bliver reduktion af ammoniakudslip og reducerede drivhusgasemissioner de vigtigste sideeffekter for digestatpyrolysecasen og for halmpyrolysecasen er det den mistede mulighed for udnyttelse af kvælstof i referencen, der giver den største påvirkning af værdien af sideeffekter. Brug af biokul kan lede til en reduceret kvælstofudvaskning. Denne effekt er forbundet med usikkerhed og ikke regnet med i grundskønnet, men når der bliver taget højde for den i en følsomhed, bliver denne effekt dominerende, delvis da dette også leder til reducerede lattergasudledninger.

Med en reference der er, at afgasset biomasse ikke bliver separeret i en fiberfraktion og en væskefraktion, og forudsat at de kvantificerede eksternaliteter bliver prissat, har sideeffekter for pyrolyse af fiberfraktionen fra afgasset biomasse en værdi for samfundet. Værdien spænder bredt, men er positiv i samtlige af de undersøgte følsomhedsberegninger. For halm er der en mindre omkostning for sideeffekter i forhold til at bruge halm til pyrolyse, der primært stammer fra den mistede mulighed for udnyttelse af kvælstof. Det er kun ved reduceret kvælstofudvaskning, at sideeffekter ved pyrolyse af halm giver en positiv værdi. For BECCS repræsenterer omkostningen for sideeffekterne til stor del den samlede gødningsværdi for halm i referencen.

5. Klimakreditter

I dette kapitel vurderes mulighederne for indkomst gennem salg af klimakreditter. Der ses på markedsopbygning og prisdannelse i de såkaldte "Voluntary Carbon Markets", og der søges at konkludere på, hvilken betydning EU's nye model Carbon Removal Certification Framework (CRCF) kan få for prisdannelsen.

Hvad er klimakreditter

En klimakredit er et certifikat på optag eller reduceret udledning af klimagasser. Verificerede klimakreditter efterspørges typisk af virksomheder, der ønsker at nå bestemte klimamål eller ønsker at sælge et grønnere produkt ved at give mulighed for klimakompensation. Der anvendes forskellige standarder til at verificere klimakreditter, og priserne i markedet har stor spredning.

EU's kvotemarked regnes som det vigtigste værktøj til at nå klimamålene mod 2050, men omhandler ikke negative emissioner. Værdisætning af negative emissioner er derfor primært et nationalt anliggende, eller det kan ske ved salg af klimakreditter. Derfor har EU-Kommissionen igangsat Carbon Removal Certification Framework (CRCF) som et EU-styret certificeringssystem med det formål at skabe øget troværdighed i markedet for klimakreditter (Voluntary Carbon Market).

Der er i markedet stigende fokus på verificerbar additionalitet. Der skal være stor troværdighed i effekten af klimatiltaget, og troværdighed i, at det er selve handlen med klimakreditten, der er den udløsende faktor. Det er vigtigt at forstå, at en handlet klimakredit både kan tælle med i den købende virksomheds grønne regnskab, og i det nationale klimaregnskab. Set fra et nationalt synspunkt har markedet for klimakreditter den fordel, at det får klimatiltag til at ske, som ellers ville kræve øgede tilskud eller afgifter. Af hensyn til prissætningen er det omvendt vigtigt, at den nationale regulering ikke i sig selv giver tilstrækkeligt incitament til at klimatiltaget ville "komme af sig selv".

Prisen på klimakreditter bestemmes bl.a. af kvaliteten (troværdighed, additionalitet, sideeffekter) og af den købende virksomheds alternative reduktionsmuligheder. Ea vurderer det muligt og sandsynligt, at priserne i EU's CO₂-kvotemarked over tid bliver en afgørende prisreference for højkvalitetskreditter.

Segmentering af markedet for klimakreditter

Historisk set har der været et stort prisspænd på de frivillige markeder for klimakreditter. Lige fra lavpris-klimakreditter (der i mange tilfælde er af tvivlsom kvalitet) som dem, der giver købere af flyrejser mulighed for at "kompensere fuldstændigt" for deres flyrejser, til dyre kompensationer fra Direct Air Capture (DAC)-projekter som virksomheder som Microsoft og Amazon har underskrevet i de senere år. Selvom de komplette finansielle detaljer i disse DAC-kontrakter ikke altid offentliggøres, er det ud fra de tilgængelige oplysninger og skøn over omkostningerne ved DAC rimeligt at antage, at disse projekter sandsynligvis har modtaget mere end 2.000 kr./ton, og i nogle tilfælde betydeligt mere.

I betragtning af den stigende efterspørgsel efter CO₂-kompensationer (og betalingsvillighed for disse produkter) er det Eas opfattelse, at segmenteringen af det frivillige klimakreditmarked sandsynligvis vil fortsætte, og at emissionsreduktionsprodukter derfor vil variere betydeligt i værdi.

Prissætning af høj-værdi klimakreditter

Det antages, at biokul-certifikater vil blive vurderet i den høje ende af kvalitetsspektret for CO₂-kompensationer, hvorfor denne del af analysen fokuserer på denne del af markedet. Det er Eas vurdering, at høj-værdi negative emissionsprodukter sandsynligvis vil fortsætte med at blive vurderet til en høj pris. Det vil sige, at de kan være interessante for aktører som Microsoft, der tidligere har vist stor villighed til at betale for store mængder negative emissioner. Det forventes, at dette vil fortsætte, efterhånden som flere aktører tilslutter sig seriøse målsætninger om at kompensere for deres CO₂-emissioner.

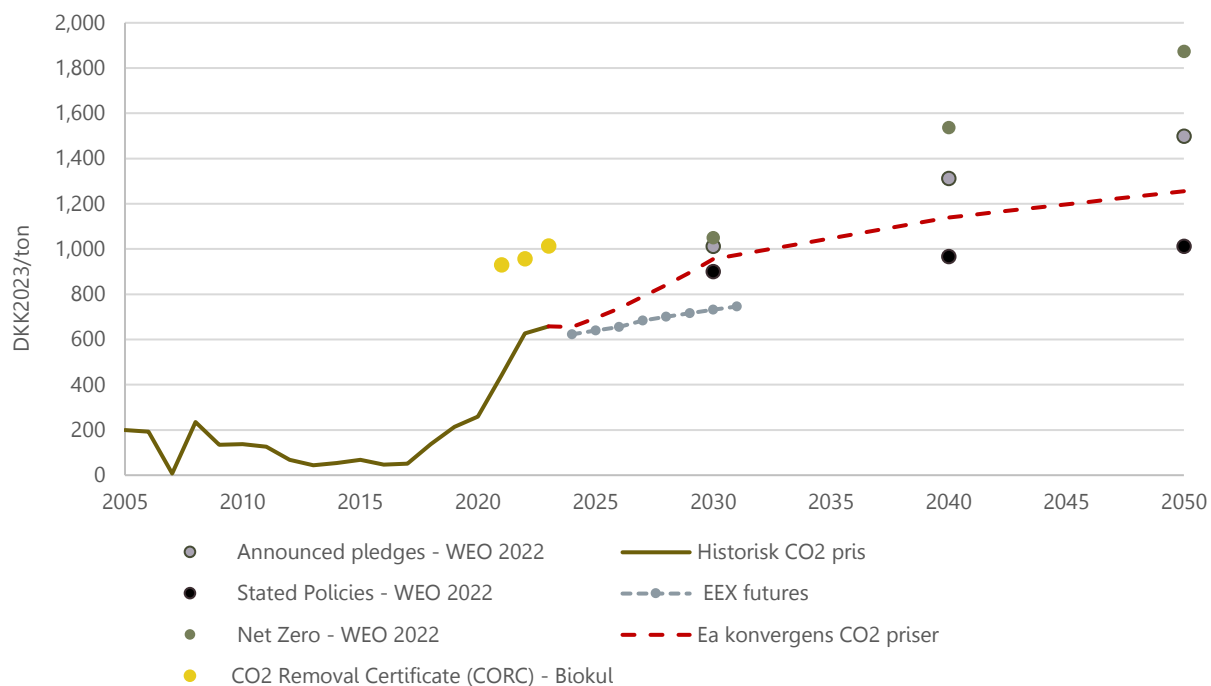
Ea foreslår, at EU's kvotepris (EUA) skal ses som en minimumspris for produkter fra "øverste hylde". Baggrunden for denne vurdering er følgende:

- 1) Hvis en aktør køber en EUA (som giver ejeren ret til at udlede et ton CO₂ inden for EU's ETS-system) og ikke bruger den, vil det i teorien reducere antallet af udledninger inden for EU's ETS-system. Men nogle af dem, der efterspørger høj-værdi produkter for CO₂-reduktioner, vil måske gerne kunne dokumentere, at de bidrager til "reelle negative emissioner". For nogle aktører vil EU-kvoter (eller lignende kvoter) derfor ikke være tilstrækkelige, og deres betalingsvillighed vil derfor være højere end EUA-prisen.
- 2) Organisationer/virksomheder/regeringer, som ønsker at være klimaneutrale, har sandsynligvis allerede reduceret de "nemme" udledninger, der ofte er dækket af kvotesystemer. For at nå klimaneutralitet (eller negativitet) har de derfor de mere vanskelige (dvs. dyre) reduktioner tilbage.

Estimerede omkostninger til EUA'er

Estimeringen af de fremtidige omkostninger ved EUA'er baserer Ea på forwardpriser, der findes på markedet, og estimerer fra Det Internationale Energiagenturs (IEA) årlige publikation, World Energy Outlook (WEO). I øjeblikket er forwardpriser tilgængelige frem til 2031, og WEO-publikationerne inkluderer estimater for CO₂-kvotepriser for avancerede økonomier for årene 2030, 2040 og 2050. Den seneste WEO, fra 2022, indeholder priser for tre scenarier: a) annoncerede løfter, b) erklærede politikker og c) netto-nul i 2050.

Eas tilgang til at estimere en enkelt pris for hvert fremtidigt år involverer primært at stole på fremtidige priser i de kommende år og gradvist at konvergere 100% til et gennemsnit af IEA's Announced Pledges og Stated Policies-scenariepriser i 2030. Alle de ovennævnte prispunkter samt de historiske EUA-priser er vist i Figur 14.



Figur 14: Eas tilgang til estimering af fremtidige EUA-priser

Der foreligger usikkerheder omkring stabiliteten af kulstoflagringer fra udbringning af biokul. Denne usikkerhed forventes betyde en reduktion i betalingsvilligheden i forhold til eg. klimakreditter fra DAC eller bioenergi med CO₂-fangst og lagring (BECCS). Derfor vurderes prisen for biokul-klimakreditter at svare til 80% af EUA-prisen, hvorimod BECCS-klimakreditter vurderes svare til EUA-prisen.



6. Omkostningsanalyse

I dette kapitel analyseres omkostningerne i de cases, som er præsenteret i kapitel 4. I analysen anvendes den samfundsøkonomiske diskonteringsrente på 3,5%, og der indregnes ikke skatter og afgifter. Til beskrivelse af samfundsøkonomiske omkostninger anvendes så vidt muligt fremskrivning af markedspriser, herunder værdien af klimakreditter. I tillæg til samfundsøkonomien, vurderes økonomien i et selskabsøkonomisk perspektiv med en WACC på 7,5% og inflation på 2%.

Helt overordnet tages der udgangspunkt i, at der etableres et betydeligt antal pyrolyseanlæg i Danmark. Dette kan betyde, at priser på især klimakreditter og biomasseinput forudsætter et betydeligt markedsvolumen. Vi antager, at de capex- og opex-data, der anvendes, indeholder en vis learning effekt.

I analysen antages det, at første fulde produktionsår er 2028, og der ses på en 20-års driftsperiode. Anlæggenes scrapværdi efter 20 år sættes beregningsmæssigt til nul. Det antages endvidere, at en tredjedel af investeringen ligger 1,5 år før idriftsættelse, og at to tredjedele af investeringen ligger 0,5 år før idriftsættelse. Etableringsfasen er altså to år, med tyngden af investeringen knap et år før idriftsættelse.

Primære forudsætninger

De primære forudsætninger for analysen er investerings- og driftsomkostninger, anlæggenes energibalancer samt priser for køb og salg af biomasse, elektricitet, pyrolysegas samt pyrolyseolie. Hertil kommer mere spekulative indtægter ved salg af klimakreditter samt godskrivelse af de sideeffekter for landbruget der er beskrevet i kapitel 4.

Capex og energibalancer

Energistyrelsen udgiver en serie af teknologikataloger til hjælp for langsigtede samfundsøkonomiske analyser på energiområdet. Bl.a. kataloget *Technology Data for Renewable Fuels* med et kapitel om "slow pyrolysis" skrevet af COWI i foråret 2022 (Energistyrelsen, 2023b). I forbindelse med nærværende rapport har Stiesdal leveret opdaterede data for et 20 MW halmpyrolyseanlæg og et 20 MW digestatpyrolyseanlæg. I nedenstående tabel ses de anvendte opdaterede data sammenlignet med katalogdata.

Anlægstype	Anvendt 2023		Teknologikatalog 2023	
	Halm	Digestat	Halm	Digestat
Biomasse input - energi	100%	100%	100%	100%
Output biokul energi	-48%	-52%	-40%	-38%
Output olie energi	-22%	0%	-22%	-17%
Output gas/varme	-26%	-35%	-21%	-19%
Elforbrug energi	5%	5%		
Output/input	91%	83%		
Capex, mio kr/Mw-ind	7,5	7,5	9,6	10,3
Opex, procent af capex	5%	5%	3,5%	3,4%

Tabel 18: Anvendte hoveddata sammenlignet med katalog data. Kilde: Stiesdal og *Technology data for renewable fuels* (Energistyrelsen, 2023b).

Der ses noget lavere vurdering af den nødvendige investering og højere produktion af biokul end i teknologikataloget fra 2023. Forskellene kan skyldes ovennævnte antagelser om learning effect, samt muligvis materialeprisstigninger på det tidspunkt teknologikataloget blev skrevet. Endvidere er der uden tvivl gjort bestræbelser for at optimere teknologien med høj andel biokul, høj varmeudnyttelse af pyrolysegas og lavt procesvarmetab. Sammenligningen viser, at der bør regnes følsomhed med lavere produktion af biokul.

Prisen på halm og afgasset biomasse (digestat)

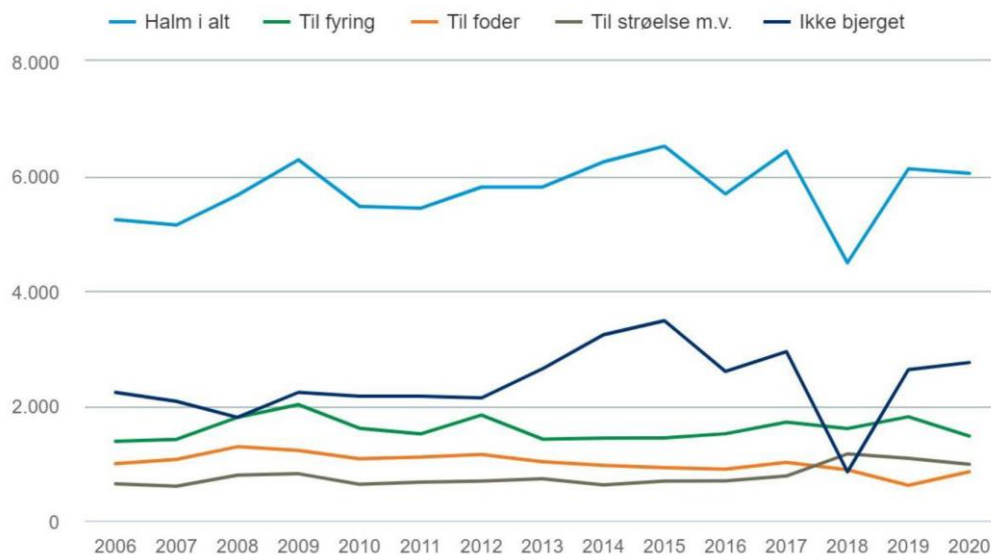
Halm

Prissætning af halm foregår ofte ved lokale aftaler. Større indkøbere gennemfører typisk en udbudsproces. Det er vanskeligt at få adgang til en retvisende prisstatistik, men Energistyrelsens samfundsøkonomiske beregningsforudsætninger anvendes i mange tilfælde som reference ved planlægning af energianlæg. Rapporten "Brug af halm i biogasanlæg" udarbejdet for Energistyrelsen af bl.a. SEGES i efteråret 2022 opgør den danske halmressource baseret på Danmarks Statistik, se Figur 15. Den danske ressource udgør ca. 6 mio. tons/år, hvoraf ca. 3 mio. tons ikke bjerges (Villadsgaard Toft et al., 2022).

Det må umiddelbart antages, at den del, der ikke bjerges, enten er mindre konkurrencedygtig (dyrere at bjerger) eller ikke er egnet til de formål, halm traditionelt anvendes til. Et 20 MW pyrolyseanlæg forbruger knap 40.000 tons halm/år. 50 anlæg vil forbruge ca. 2 mio. tons. Hertil kommer, at der forventes en betydelig stigning i forbruget af halm til biogasproduktion. En ressourcevurdering udarbejdet af Energistyrelsen indregner et øget halmforbrug til biogas på mere end 1,5 mio. tons mod 2050. Hertil kommer

dybstrøelse. En større udbygning med halm-pyrolyse kan derfor påvirke halmprisen generelt i Danmark, især hvis efterspørgslen efter halm til biogas stiger som vurderet af Energistyrelsen.

Enhed: Mængde (mio. kilo) | Afgrøde: Alle afgrøder | Område: Hele landet | Anvendelse:



Figur 2: Mængden af halm anvendt til forskellige formål fra 2006 til 2020. Kilde: (Danmarks Statistik, 2020)

Figur 15: Den danske halmressource (Villadsgaard Toft et al., 2022).

Det er vanskeligt at vurdere fremtidens halmressourcer til energiformål. Der må som nævnt regnes med stigende efterspørgsel efter halm til biogasanlæg, som antages at konkurrere om den samme halmkvalitet der kan anvendes til pyrolyse. Hertil kommer udviklingen i efterspørgsel til foder, strøelse samt til fyring, som muligvis er faldende. På udbudssiden kan dykningen tilrettelægges så halmmængderne øges, men omvendt kan øget hjemlig produktion af proteinfoder og andre tiltag reducere halmmængderne. Endelig vil der være mulighed for import af halm fra nabolande.

Det vurderes som et centralt valg for fremskrivning af halmprisen at anvende Energistyrelsens prisfremskrivning i publikationen "Samfundsøkonomiske beregningsforudsætninger for energipriser og emissioner, 2022" (Energistyrelsen, 2022a) som basisforudsætning.

Halmpris	
DKK2021/ton	
2027	657
2030	667
2035	686
2040	699

Tabel 19: Fremskrivning af halmprisen

Digestat

Det fremgår af regeringens klimafremskrivning, at den danske biogasproduktion ventes at stige til ca. 50 PJ årligt fra 2030. Biogasbranchen forventer højere produktion, bl.a. som følge af efterspørgsel efter certifikater i Danmarks nabolande, der giver mulighed for støttefri biogas. Som tidligere nævnt, ventes halm at udgøre en stigende del af biomassegrundlaget i de danske biogasanlæg. Ved produktion af 50 PJ biogas, har Energistyrelsen beregnet en nødvendig tilførsel af biomasse på i alt. ca. 30 mio. tons med 1,9 mio. tons halm. Tørstofindholdet er vurderet til 5-6 mio. ton tilført. Det svarer til et højt gasudbytte på ca. 70 m³ biogas/ton biomasse, der kan opnås som følge af højt tørstofindhold og lang opholdstid i anlæggene. Ca. 65% af tørstoffet omsættes i biogasprocessen, og ved efterfølgende separering kan ca. 50% udskilles i fiberfraktionen. Herved er der et teknisk potentiale til pyrolyse på op til 1 mio. ton digestat (TS).

I dag bringes den afgassede biomasse som hovedregel ud på marken med almindeligt udbringningsudstyr. På grund af det høje tørstofindhold kan det nogen steder give tekniske udfordringer, samt udfordringer med kvælstoftab og med overskridelse af fosforgrenseværdier. Derfor er der flere steder interesse for at bortseparere en del af tørstoffet.

På den baggrund antages det her, at et pyrolyseanlæg vil få stillet afgasset biomasse gratis til rådighed, mod at tilbagelevere den tynde fraktion. Pyrolyseanlægget bekoster separering, hvilket overslagsmæssigt vurderes til en omkostning på knap 4 kr./ton tilført biomasse svarende til ca. 120 kr./ton TS i fiberfraktionen. Oplysninger fra branchen indikerer dog, at separation muligvis kan gøres mere omkostningseffektivt.

Salg af varme

Ved begge koncepter (halm og digestat) indgår salg af varme gennem afbrænding af pyrolysegas. For halm-casen antages det, at varmesalg foregår ved salg til et lokalt fjernvarmeselskab. Et alternativ hertil kan i nogle tilfælde være salg til en lokal procesvirksomhed med højtemperaturkrav. Salg til procesvirksomhed kan give højere varmepris, men giver muligvis øgede udfordringer til samlokalisering eller til etablering af lavtryksledning til pyrolysegas. Vi antager derfor, at salg til fjernvarme er basecase.

På nuværende tidspunkt er der stadig en del fjernvarmeselskaber, der anvender ledningsgas som grundlast. Dette er under udfasning, og forventes at være marginalt i perioden fra 2030 til 2050. Efter 2030 forventes grundlast som hovedregel at være en kombination af varmepumper, kraftvarme på affald eller biomasse og biomassekedler. For varmegærker, der står overfor en reinvestering, vurderes værdien af varme at ligge på omkring 75 kr./GJ, men lavere i sommermånederne.

For digestat-casen antages det, at varmesalg er til det lokale biogasanlæg og der er salg til nærliggende varmemeforbrugende anlæg til opgradering af biogas til ledningsgas. Den efterhånden foretrukne opgraderingsteknik er aminopgradering, hvilket kræver en betydelig mængde varme leveret ved min. 120 grader. En skitsemæssig energibalace viser, at varmebehov til biogas og opgradering og varmeproduktion baseret på pyrolysegas er i samme niveau på årsbasis.

I dag anvender en del biogasanlæg og opgraderingsanlæg afgiftsfri ledningsgas til opvarmning, da det tidligere har været billigste opvarmningsform. Nogle anlæg anvender (så vidt vi ved) halmfyring, og få anlæg anvender egen biogas. Ved anvendelse af CO₂-fri opvarmning øges biogassens værdi gennem certifikathandel. På grund af højere gaspriser og på grund af indfasning af CO₂-afgifter for procesvarme (grøn skattereform), ventes det fremadrettet at være uøkonomisk at fortsætte med gas som brændsel. Derfor er det grundantagelsen i denne analyse, at også biogasanlæg vil overgå til fastbrændsel. Muligvis i nogle tilfælde frasepareret fiberfraktion, men ofte halm. Omkostningerne ved halmfyring med høj benyttelsestid er som nævnt ovenfor ca. 75 kr./GJ, og svagt stigende som funktion af halmprisen. 75 kr./GJ vurderes også som et centralt skøn af varmeomkostningen ved anvendelse af luft/vand varmepumper ved en aftarstemperatur omkring 80 grader.

Det ses i Tabel 20, at varmegærdien for halmcases beregningsmæssigt er lidt lavere, som følge af antagelsen om lavere varmegærdi i sommermånederne. I praksis vil værdien af varme afhænge af lokale afsætningsmuligheder.

Varmepriis		
DKK2021/GJ		
	Halm	Digestat
2027	64,4	76,9
2030	65,4	78,1
2035	67,3	80,3
2040	68,6	81,8

Tabel 20: Priser ved afsætning af varme i de to cases. Kilde: Egne beregninger

Afsætning af pyrolyseolie

Værdien af pyrolyseolie er særdeles vanskelig at anslå, da der endnu ikke er opbygget et marked med prisreferencer. Det antages på baggrund af oplysninger fra sektoren, at olien umiddelbart kan afsættes til olieraffinaderier som erstatning for råolie, eller muligvis direkte til et rederi som grønt brændstof. I begge tilfælde antages det, at der ikke er behov for særlig videre-processering af pyrolyseolien.

Ved afsætning til et raffinaderi antages det, at pyrolyseoliens andel af et færdig-raffineret produkt kan sælges i markedet som VE-brændstof via oprindelsesgaranti/certifikat. Den fremtidige værdi af pyrolyseolien kan da følge en kombination af to referencepriser:

A: Værdien af brændstoffet svarer til råolie + sparet CO₂ + særligt VE-tillæg som afspejler merprisen ved biodiesel sammenlignet med fossil diesel. VE-tillægget er her fundet ved vurdering af prisforskel seneste år mellem fossil diesel og biodiesel i Danmark og UK.

B: I denne reference vil værdien af pyrolyseolie følge en fremskrivning af omkostningerne til alternativt VE-brændstof til skibsfarten, fx produktion af grøn metanol i overensstemmelse med EU's RFNBO-forordning.

I Tabel 21 ses resultatet af værdisætning af pyrolyseolie baseret på de to referencer. Det antages at reference B er mulig at opnå ved fokus på skibsfarten som vigtigste afsætning.

Oliepriis		
DKK2021/GJ		
	Pris A	Pris B
2027	163	311
2030	167	306
2035	181	293
2040	196	280

Tabel 21: Priser ved afsætning af pyrolyseolie, to prismodeller. Kilde: Egne beregninger

Salg af klimakreditter

Indtægterne for salg af klimakreditter afhænger af pris og mængde. Som beskrevet i kapitel 5, er markedet for klimakreditter under udvikling, og indtil videre er der meget sparsom viden om den potentielle dybde i markedet for højværdikreditter. DACS og BECCS vurderes at være højværdikreditter tæt forfulgt af biokul fra pyrolyse. Når biokul her antages at få lidt lavere værdi i markedet, er det bl.a. som følge af forventninger om lavere holdbarhed af kulstoflagringen på lang sigt (> 100 år).

Mængde

Med vores forståelse af markedet, herunder af intentionerne med EU's Carbon Removal Certification Framework, så er det den additionelle mængde af kulstoflagring, der kan certificeres. Hvilken tidsperiode dette skal ses i er ikke tydeligt, men vi forudsætter at der ses på et 100-årsperspektiv. Med udgangspunkt i kurver for henfald af kulstof ved halmnedmuldning, spredning af digestat og spredning af biokul vist i kapitel 4, samt med de energibalancer, der anvendes, fås følgende mængder kulstoflagring, som vi forventer, der kan certificeres, efter bl.a. CRC-standarden:

- 570 kg CO₂/ton TS i halm
- 593 kg CO₂/ton TS i digestat.

Pris

Som beskrevet i kapitel 5, er der stor usikkerhed om prisdannelsen i markedet, når der begynder at komme volumen på udbudssiden. Vi forventer, at pyrolyse og BECCS i nogle år vil konkurrere om højværdisegmentet, og efter 2040 vil DACS muligvis få betydning med volumen. Vi antager, at EU's CO₂-kvotemarked bliver en afgørende prisreference, men vurderer ikke at 100% af kvoteprisen kan opnås for større volumener over tid. Vi anvender derfor 80% af kvoteprisen som benchmark. Af forsigtighedshensyn anvender vi dog kun halvdelen af denne pris som et robust "centralt skøn" ved større udbygning.

DKK2021	Halm	Digestat	
Kvotepris år 2030	855	855	
Kvotepris år 2040	1019	1019	
Kvotepris år 2050	1123	1123	
Værdi 2030	390	406	Kr/ton TS
Værdi 2040	465	484	Kr/ton TS
Værdi 2050	512	533	Kr/ton TS

Tabel 22: Fremskrivning af CO₂-kvoteprisen og beregnet benchmarkværdi af klimakreditter for biokul. Der anvendes 50% af benchmarkværdien som centralt skøn i analysen.

BECCS og DACS

Der er andre måder at opnå negative emissioner på, end gennem produktion og spredning af biokul. Ud over de såkaldt naturlige metoder som skovrejsning, ændret skovdrift og øget anvendelse af træ i byggeri, er der teknologier som BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) og DACS (Direct Air Capture and Storage). Et overblik over udvalgte CO₂-reduktionstiltag ses i kapitel 2.

BECCS

Betegnelsen BECCS forbindes typisk med forbrændingsanlæg for biomasse, men anvendes i litteraturen også om opsamling og lagring af CO₂ fra biologiske anlæg som bioethanolanlæg og biogasanlæg. En lang række pilot- og demonstrationsanlæg er etableret over de seneste 10-15 år, og i USA er fuldskalaanlæg i drift på biometanol. I Danmark udskilles CO₂ fra biogas kommercielt, men lagres endnu ikke. I England, Sverige, Norge og Nederlandene er fuldskalaanlæg på biomasse- og affaldsforbrænding under planlægning, og i Danmark er fuldskalaanlæg under etablering på Avedøreværkets halmkedel og på Asnæsværkets træflis kedel. I langt de fleste anlæg anvendes såkaldt "Amin scrubning".

Ved beregning af omkostninger ved BECCS tages der i denne analyse primært udgangspunkt i data fra Energistyrelsens teknologikatalog (Post-combustion, carbon capture retrofit, 100 MW(th)), etableret på et eksisterende 84 MW_{th} halmfyret kraftvarmeanlæg med 5000 fuldlasttimer per år. Der er i omkostningsvurderingen ikke forskel mellem et kraftvarmeværk der fyrer med biomasse eller et kraftvarmeværk der fyres med fx kul. De afgørende parametre er skala, antal årlige fuldlasttimer samt mulighed for at afsætte overskudsvarmen.

Det antages med usikkerhed at omkostninger alene til transport og lagring udgør 725 kr./ton omkring 2025, faldende lineært over tid til 300 kr./ton i 2050. Faldet i omkostninger til transport og lagring skyldes primært en forudsætning om etablering af mere kystnær lagringsinfrastruktur eller lagring på land i Danmark.

Det antages, at der udtages højtryksdamp fra halmkedlen til Aminprocessen, hvorved der tabes elproduktion. Den tabte el nyttiggøres som varme ved investering i varmepumper. Den tabte elproduktion udgør ca. 0,5 MWh per ton CO₂.

BECCS, DKK 2021 per ton CO ₂ fanget	
Capex fangstanlæg:	326
Opex fangstanlæg	153
Elforbrug:	200
Varmesalg:	-65
Transport og lagring	660
I alt:	1274

Tabel 23: Beregnede omkostninger ved BECCS ca. 2028. Kilde: Teknologikatalog og egne beregninger.

DACS

Ved normal forbrænding af biomasse er der kun ca. 10% CO₂ i røggassen, hvilket betyder at der skal scrubbes forholdsvis store røggasmængder for at fange CO₂. CO₂-indholdet i atmosfærisk luft er ca. 400 ppm (0,04 %). Der skal altså ledes et gasvolumen igennem et DAC-anlæg der er ca. 250 gange større end for et BECC-anlæg, for at fange den samme mængde CO₂. Det kræver betydeligt større anlæg, større krav til optimering, og et væsentligt større energiforbrug.

Til gengæld er der større frihed til at placere fangstanlæg tæt ved gode lagringsmuligheder, og tæt ved VE-produktionsanlæg. Der er en række DAC-teknologier under udvikling, hvor især S-DAC (Solid adsorption) og F-DAC (Fluid absorption) vurderes at have potentiale på mellemlang sigt. Energibehovet i optimerede fuldskalaanlæg vurderes i forskellige kilder at ligge på 2 – 3 MWh per ton CO₂. Det største anlæg i

drift er ORCA anlægget på Island, der anvender S-DAC teknologi og fanger ca. 4.000 ton CO₂/år. Fuldskaalaanlæg er på vej i USA med offentlig støtte på mere end 1 mia. USD.

Der er betydelig usikkerhed om fremtidens omkostningsniveau for DACS. I rapporten *The economics of direct air capture and storage* (Global CCS Institute, 2022), vises scenarier med et langsigtet omkostningsniveau fra ca. 135 USD/ton til 400 USD/ton. I rapporten *Global Assessment of Direct Air Capture Costs* (IEAGHG, 2021) peges på en mulig langsigtet omkostning efter opskalering på ca. 200 USD/ton. Andre kilder henviser til det betydelige energiforbrug som en alvorlig udfordring for udbredelse af DAC-teknologien.

Analyseresultater

I Tabel 24 og i Tabel 25 ses hoveddata for de to pyrolyseanlæg og for BECCS. I Tabel 24 ses opdeling på hovedposter og i Tabel 25 ses data i kr./ton nettolagret CO₂e et hundrede år efter lagringen (100-årsperspektiv). Ved nettolagret CO₂e forstås den tilbageværende CO₂e lageret fratrukket den CO₂e der ville være lagret ved udbringning/nedmuldning af halm eller digestat.

	Samfundsøkonomi Nutidsværdi over 20 år Mio. kr.			Selskabsøkonomi Årlig pengestrøm 2030 Mio. kr.		
	Digestat	Halm	*BECCS	Digestat	Halm	*BECCS
Indfyret effekt, MW:	20	20	84	20	20	84
Capex:	-161	-161	-478	-20	-20	-59
Opex:	-114	-114	-262	-8,7	-8,7	-20
Separation/halmindekøb:	-58	-410		-4,4	-30	
Elforbrug:	-74	-74	-465	-5,7	-5,7	-35
Salg pyrolyseolie**:		553			45	
Varmesalg***:	245	152	174	18	11	11
Transport + lagring:			-984			-90
Mellemsum:	-163	-55	-2015	-20	-8,8	-193
Klimakreditter****:	117	110	891	8,1	7,5	61
Sideeffekter:	55	-4	-100	0,9	-0,2	-7,3
I alt:	10	51	-1225	-12	-1,4	-139

*BECCS-anlægget etableres på eksisterende kraftvarmeanlæg, og det antages at kulstoffangsten ikke påvirker kraftvarmeanlæggets drift eller økonomi. Omkostninger til kulstoffangst fra Energistyrelsens teknologikatalog

**Værdien af pyrolyseolie er baseret på egne beregninger af omkostninger til produktion af grøn metanol

***Værdien af varme er baseret på egne beregninger af omkostninger ved etablering af halmfyr

****Der indregnes et forsigtigt skøn af værdien ved salg af klimakreditter svarende til 40%-50% af prisen i EU's kvotemarked for den nettolagrede kulstofmængde. Det antages dog – med betydelig usikkerhed – at den reelle værdi i markedet bør nærme sig kvoteprisen, under forudsætning om balance mellem udbud og efterspørgsel.

Tabel 24: Samfundsøkonomisk nutidsværdi og selskabsøkonomisk pengestrøm for pyrolyse- og BECCS-anlæg (mio. kr.). Opdelt på hovedposter.

Det ses af Tabel 25, at der i basisberegningen er et samfundsøkonomisk overskud på godt 40 kr./ton nettolagret CO₂ ved digestatbaseret pyrolyse, godt 230 kr./ton ved halmbaseret pyrolyse og en omkostning på knap 900 kr./ton ved at etablere CO₂-fangst og -lagring på et halmfyret værk.

Uden indregning af muligheden for at sælge klimakreditter og uden indregning af især landbrugets sideeffekter, er der en samfundsøkonomisk omkostning på knap 700 kr./ton CO₂ for digestat, 250 kr./ton for halm og knap 1500 kr./ton for BECCS.

Den selskabsøkonomiske pengestrømsanalyse tager udgangspunkt i en WACC på 7,5% og en inflation på 2%. Pengestrømsanalysen er viser situationen ca. to år efter idriftsættelse, og capex er beregnet som serie-lån, for at ligestille afdrag på lån med en lineær afskrivningsprofil over 20 år. I den selskabsøkonomiske opstilling indregnes kun den del af sideeffekterne, der kan betragtes som lokale sideeffekter, altså som vurderes at kunne nyttiggøres lokalt, primært ved ændret gødningsudnyttelse. Ændret gødningsudnyttelse er prissat med markedspriser på handelsgødning.

	Samfundsøkonomi diskonteret			Selskabsøkonomi 2030		
	Digestat	Halm	BECCS	Digestat	Halm	BECCS
Netto-lagret CO ₂ , kton	236	220	1.384	20	19	119
Overskud kr. per ton CO₂:	43	233	-885	-567	-76	-1169
Overskud (ekskl. sideeffekter) kr. per ton CO ₂ :	-191	250	-812	-609	-64	-1107
Overskud (ekskl. sideeffekter ekskl. klimakreditter) kr. per ton CO ₂ :	-689	-248	-1456	-1008	-463	-1623

Tabel 25: Nettolagring af CO₂ samt samfundsøkonomisk og selskabsøkonomisk balance for pyrolyse og BECCS. (Positive tal er overskud og negative tal er underskud/omkostning)

Følsomhedsberegninger

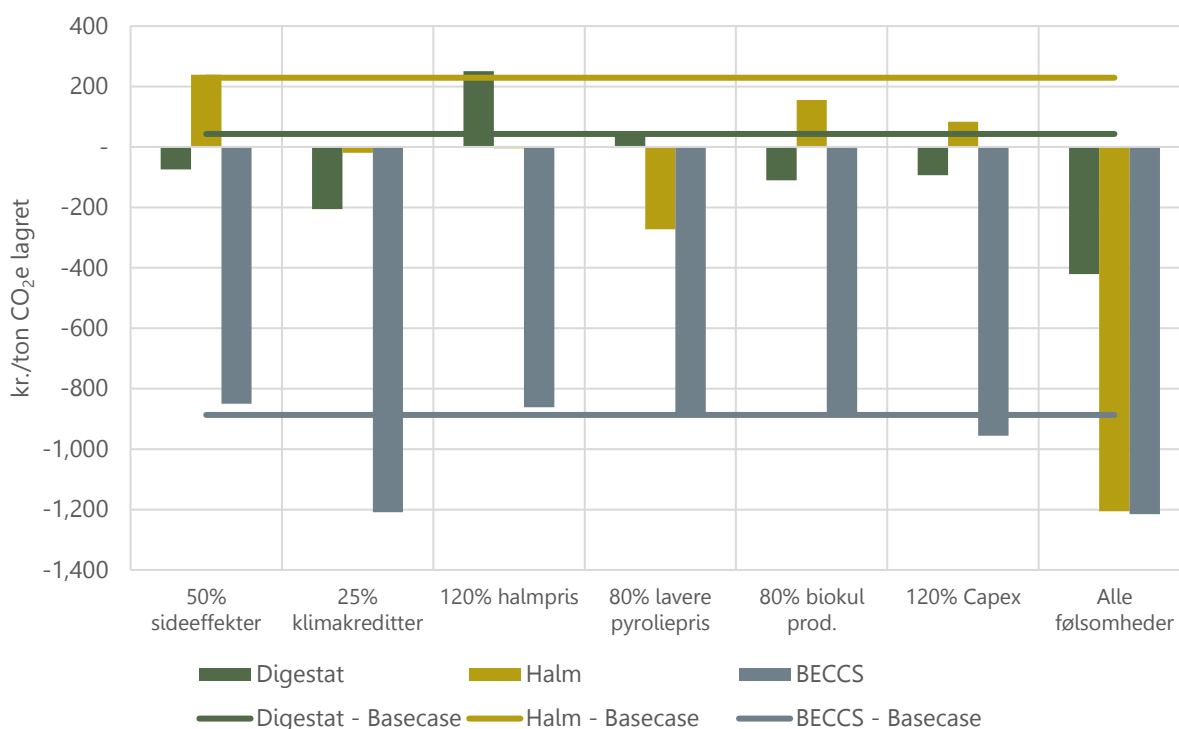
Der er gennemført en række følsomheder af den samfundsøkonomiske omkostning per ton netto-lagret CO₂. Følsomhederne er vist i to nedenstående tabeller. I * Klimakreditter: Da der i basecase indregnes 50% af den pris på klimakreditter der vurderes at kunne opnås, er 25% klimakreditter en halvering af basecase-prisen.

Tabel 26 og dertilhørende Figur 16 er de følsomheder samlet, der som hovedregel påvirker økonomien negativt, og i Tabel 27 og Figur 17 ses resultatet af følsomheder, der kan påvirke økonomien positivt. Bemærk dog, at en højere halmpris påvirker halm-pyrolyse negativt, imens digestat-pyrolyse og BECCS får bedre økonomi ved højere halmpriser, fordi højere halmpris beregningsmæssigt øger afsætningsprisen for varme.

Nutidsværdi kr/ton CO ₂	Digestat	Halm	BECCS
Basecase	43	233	-885
1: 50% sideeffekter	-74	242	-849
2: 25% klimakreditter *	-206	-15	-1207
3: 120% halmpris	250	-1	-860
4: 80% lavere pyrooliepris	43	-268	-885
5: 80% biokul prod.	-111	161	-885
6: 120% Capex	-94	87	-954
Alle følsomheder:	-421	-1203	-1214

* Klimakreditter: Da der i basecase indregnes 50% af den pris på klimakreditter der vurderes at kunne opnås, er 25% klimakreditter en halvering af basecase-prisen.

Tabel 26: Følsomhedsanalyser. Faktorer der kan påvirke økonomien negativt. (positive tal er overskud)



Figur 16: Følsomhedsanalyser. Faktorer der kan påvirke økonomien negativt. (positive tal er overskud).

Der ses, at især halmpyrolyse påvirkes ved følsomhedsberegningerne, og især salgsprisen på pyrolyseolie og prisen på halm har betydning. Dog påvirkes samfundsøkonomien for alle tre teknologier af den usikre forudsætning omkring prisen ved salg af klimakreditter.

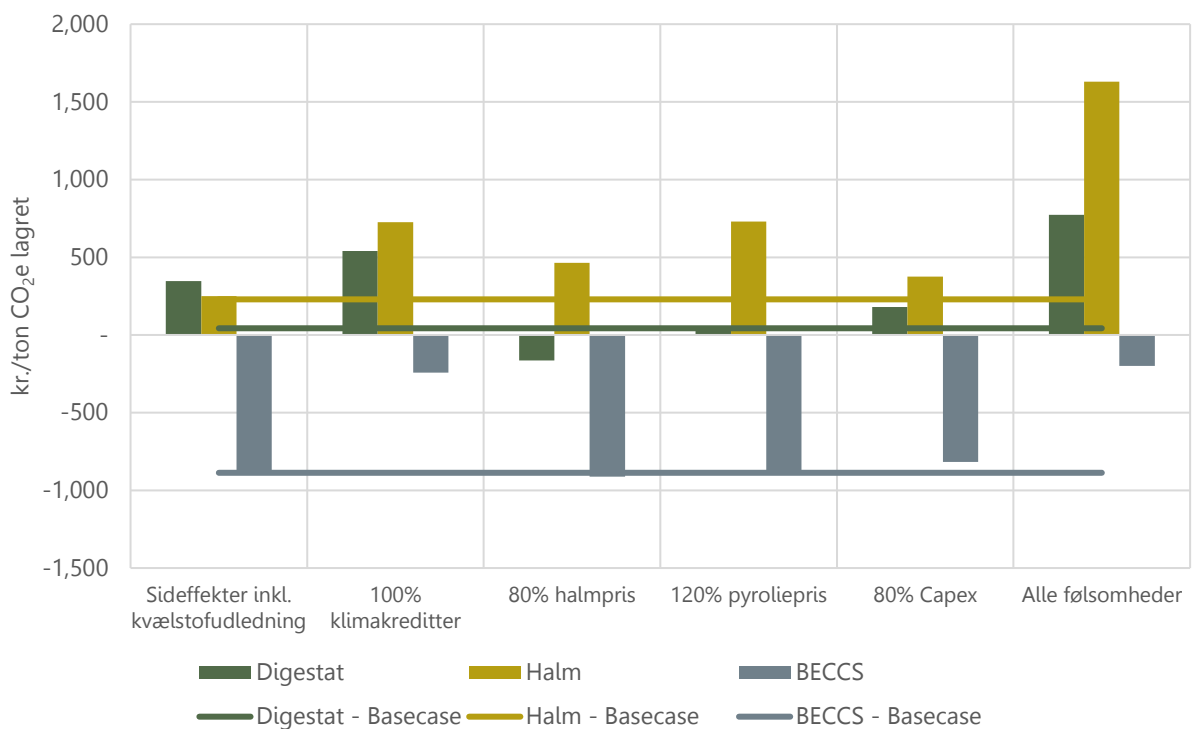
I Tabel 27 og dertilhørende Figur 17 ses resultatet af følsomheder, der kan påvirke samfundsøkonomien positivt. Især digestatpyrolyse kan påvirkes positivt, såfremt de usikre antagelser omkring kvælstofudledning viser sig at kunne indregnes. Lavere halmpriser forbedrer samfundsøkonomien med ca 120 kr/ton

CO₂ for halmpyrolyse, men har større negativ effekt for digestatpyrolysen på grund af lavere afregningspris for varme. Igen er det prisen på pyrolyseolie der har størst indflydelse på resultatet for halmpyrolyse.

Nutidsværdi kr/ton CO ₂	Digestat	Halm	BECCS
Basecase	43	233	-885
1: Sideeffekter inkl. kvælstofudledning	351	245	-885
2: 100% klimakreditter*	540	731	-241
3: 80% halmpris	-165	467	-910
4: 120% pyrolysepris	43	735	-885
5: 80% Capex	179	379	-816
Alle følsomheder:	755	1624	-197

Tabel 27: Følsomhedsanalyser. Faktorer der kan påvirke økonomien positivt (positive tal er overskud).

* Klimakreditter: Da der i basecase indregnes 50% af den pris på klimakreditter der vurderes at kunne opnås, er 100% klimakreditter en fordobling af basecase-prisen.



Figur 17: Følsomhedsanalyser. Faktorer der kan påvirke økonomien positivt (positive tal er overskud).

Omkostningsinterval for tre teknologier

Med udgangspunkt i ovenstående følsomhedsberegner for pyrolyse og for BECCS, og med udgangspunkt i litteraturen vedrørende omkostningsudvikling for DACCS, vil vi vurdere at nedenstående omkostningsinterval er relativt robust. Intervallet vedrører tre teknologier, der kan levere negative emissioner ved kulstoffangst og lagring. I intervallet er der ikke indregnet indtægter ved salg af klimakreditter.

Forventet samfundsøkonomisk omkostningsinterval omkring 2040

Pyrolyse: 150 kr./ton – 700 kr./ton (20 -100 USD/ton)

BECCS: 700 kr./ton – 1500 kr./ton (100 – 200 USD/ton)

DACCS: 1500 kr./ton – 3000 kr./ton (200 – 400 USD/ton)

Referencer

- Aguirre-Villegas, H. A., Larson, R. A., & Sharara, M. A. (2019). Anaerobic digestion, solid-liquid separation, and drying of dairy manure: Measuring constituents and modeling emission. *Science of the Total Environment*, 696. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134059>
- Angouria-Tsorochidou, E., Seghetta, M., Trémier, A., & Thomsen, M. (2022). Life cycle assessment of digestate post-treatment and utilization. *Science of the Total Environment*, 815. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152764>
- Azzi, E. S., Karlun, E., & Sundberg, C. (2021a). Assessing the diverse environmental effects of biochar systems: An evaluation framework. *Journal of Environmental Management*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112154>
- Azzi, E. S., Karlun, E., & Sundberg, C. (2021b). Small-scale biochar production on Swedish farms: A model for estimating potential, variability, and environmental performance. *Journal of Cleaner Production*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124873>
- Borchard, N., Schirrmann, M., Cayuela, M. L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizábal, T., Sigua, G., Spokas, K., Ippolito, J. A., & Novak, J. (2019). Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: A meta-analysis. In *Science of the Total Environment* (Vol. 651, pp. 2354–2364). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.060>
- de Coninck, H., A. Revi, M. Babiker, P. Bertoldi, M. Buckeridge, A. Cartwright, W. Dong, J. Ford, S. Fuss, J.-C. Hourcade, D. Ley, R. Mechler, P. Newman, A. Revokatova, S. Schultz, L. Steg, & T. Sugiyama. (2018). Strengthening and Implementing the Global Response. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, & T. Waterfield (Eds.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report* (pp. 313–444). Cambridge University Press.
- Det Nationale Bioøkonomipanel. (2022). *Anbefalinger Bioressourcer til grøn omstilling*.
- Drosg, B., Fuchs, W., Al, T., Madsen, S. M., & Linke, B. (2015). *Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing*.
- Elsgaard, L., Adamsen, A. P. S., Møller, H. B., Winding, A., Jørgensen, U., Mortensen, E. Ø., Arthur, E., Abalos, D., Andersen, M. N., Thers, H., & Sørensen, P. (2022). *Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture*. https://pure.au.dk/portal/files/283110980/Biokul_vidensyntese_samlet_1909_2022.pdf
- Energistyrelsen. (2022a). *Samfundsøkonomiske beregningsforudsætninger for energipriser og emissioner*. <http://www.ens.dk>.
- Energistyrelsen. (2022b, June 28). *Pyrolysepuljen: Tre projekter modtager 194 mio. kr. til grøn omstilling af dansk landbrug*. <https://ens.dk/presse/pyrolysepuljen-tre-projekter-modtager-194-mio-kr-til-groen-omstilling-af-dansk-landbrug>
- Energistyrelsen. (2023a). *Klimastatus og -fremskrivning 2023*. <http://www.ens.dk>

- Energistyrelsen. (2023b). *Technology Data for Renewable Fuels - Version 0011*.
<https://ens.dk/service/fremskrivninger-analyser-modeller/teknologikataloger/teknologikatalog-fornybare>
- EU. (2023). *Fit for 55*. <https://europa.eu/!wngWMB>
- European Commission, & Joint Research Centre. (2023). *SET Plan Progress Report 2023 – Coordinated energy research and innovation for a competitive Europe*.
<https://doi.org/10.2760/956347>
- Gavrilova, O., Leip, A., Dong, H., Douglas MacDonald, J., Alfredo Gomez Bravo, C., Amon, B., Barahona Rosales, R., del Prado, A., Aparecida de Lima, M., Oyhantçabal, W., John van der Weerden, T., Widiawati, Y., Bannink, A., Beauchemin, K., & Clark, H. (2019). *Chapter 10: Emissions from Livestock and Manure Management in Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- Glaser, B., & Lehr, V. I. (2019). Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45693-z>
- Global CCS Institute. (2022). *The economics of direct air capture and storage*.
- Gødskningsbekendtgørelsen. (2023). *Bekendtgørelse om jordbrugets anvendelse af gødning i planperioden 2023/2024. Nr. 1060*.
- Hama Aziz, K. H., & Kareem, R. (2023). Recent advances in water remediation from toxic heavy metals using biochar as a green and efficient adsorbent: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8.
<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100495>
- Hamelin, L., Naroznova, I., & Wenzel, H. (2014). Environmental consequences of different carbon alternatives for increased manure-based biogas. *Applied Energy*, 114, 774–782. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.033>
- Hansen, J., Hjorth Mikkelsen, M., Albrektsen, R., Dubgaard, A., & Jacobsen, B. H. (2014). *Scenarier for ammoniakemissionen fra Danmark i 2020 og 2030*.
- Hutchings, N., Webb, J., & Amon, B. (2023). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023*.
- IEAGHG. (2021). *Global Assessment of Direct Air Capture Costs*. www.ieaghg.org
- IPCC. (2019). *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 11: N2O Emissions from Managed Soils, and CO2 Emissions from Lime and Urea Application*.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Jørgensen, P. J. (2009). *Biogas - grøn energi*. www.forskerforendag.dk
- Klima- Energi- og Forsyningsministeriet. (2021). *Grøn Gasstrategi*.
- Klima- Energi- og forsyningsministeriet. (2023). *Klimaprogram 2023*.

- Klimarådet. (2023a). *Baggrundsnotat om landbrugets omstilling ved en drivhusgasafgift*.
- Klimarådet. (2023b). *Sektorvurderinger Baggrundsnotat til Klimarådets Statusrapport 2023, kapitel 3*.
- Miljøstyrelsen. (2013). *Virkemiddelkatalog for NOX, PM2.5, NMVOC og NH3*. Miljøministeriet.
- Ministeriet for Landbrug Fødevarer og Fiskeri, & Miljøministeriet. (2023a). *Hurtigere fra laboratoriet til marken og stalden. Strategier for tekniske reduktionspotentialer på landbrugsområdet: Gylle- og gødningshåndtering*. www.fvm.dk
- Ministeriet for Landbrug Fødevarer og Fiskeri, & Miljøministeriet. (2023b). *Hurtigere fra laboratoriet til marken og stalden. Strategier for tekniske reduktionspotentialer på landbrugsområdet: Metanreducerende foder*. www.fvm.dk
- Møllgaard, P., Bredahl Jacobsen, J., Buus Kristensen, N., Elmeskov, J., Halkier, B., Heiselberg, P., Trydeman Knudsen, M., Morthorst, P. E., & Richardson, K. (2023). *Statusrapport 2023 Danmarks nationale klimamål og internationale forpligtelser*.
- Motola V., Scarlat N., Hurtig, O., Buffi M., Georgakaki A., Letout S., Mountraki A., Salvucci R., & Schmitz, A. (2023). *Clean Energy Technology Observatory: Bioenergy in the European Union - 2023 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets*. <https://doi.org/10.2760/327569>
- Niras. (2023). *Kortlægning af biomasser til biokul og CO2-potentialer*.
- Pedersen, J., Hafner, S. D., Peter, A., & Adamsen, S. (2022). *Vurdering af separation af flydende husdyrgødning som ny ammoniakreducerende udbringningsteknik*. <https://bit.ly/3IUqUmO>
- Phyllis2. (2023). *Database for (treated) biomass, algae, feedstocks for biogas production and biochar*. TNO Biobased and Circular Technologies. <https://phyllis.nl/>
- Regeringen, Venstre, Dansk Folkeparti, Socialistisk Folkeparti, Radikale Venstre, Enhedslisten, Det Konservative Folkeparti, Nye Borgerlige, Liberal Alliance, & Kristendemokraterne. (2021). *Aftale om grøn omstilling af dansk landbrug*.
- Sanei, H., Rudra, A., Przywitt, Z. M. M., Kousted, S., Sindlev, M. B., Zheng, X., Nielsen, S. B., & Petersen, H. I. (2024). Assessing biochar's permanence: An inertinite benchmark. *International Journal of Coal Geology*, 281, 104409. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104409>
- Støckler Holm, A. (2023). *EGU Vienna, 25 April 2023, Emissions of Ammonia during Liquid Manure Storage and Subsequent Field Application*.
- Stoumann Jensen, L. (2015). *Udvikling af beregningsmodel til bestemmelse af gødningsværdi og fastsættelse af udnyttelsesprocent for biomasser til biogasanlæg*. www.plen.ku.dk
- Teagasc. (2022). *Lime is a Key Ingredient this Spring on Farms*. <https://www.teagasc.ie/publications/2022/lime-is-a-key-ingredient-this-spring-on-farms.php>
- Tersbøl, M. (2017). *Etablering af økologiske biogasanlæg - en håndbog*.

- Thomsen, T. P. (2021, September 29). *Climate Footprint Analysis of Straw Pyrolysis & Straw Biogas: Assessment of the Danish climate crisis mitigation potential of two new straw management options*. <https://forskning.ruc.dk/en/publications/climate-footprint-analysis-of-straw-pyrolysis-amp-straw-biogas-as>
- Villadsgaard Toft, L., Andersen Juul, T., Ugilt Larsen, S., Hjort-Gregersen, K., & B Møller, H. (2022). *Brug af halm i biogasanlæg*. https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Bio-energi/221006_brug_af_halm_i_biogasanlaeg.pdf
- Wang, Z., Dunn, J. B., Han, J., & Wang, M. Q. (2014). Effects of co-produced biochar on life cycle greenhouse gas emissions of pyrolysis-derived renewable fuels. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 8(2), 189–204. <https://doi.org/10.1002/bbb.1447>
- Wolf, 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 and Technology*, 55(21), 14795–14805. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02425>
- World Bank. (2023). *Commodity Markets Outlook: Under the Shadow of Geopolitical Risks, October 2023*.

Bilag 1: Nedbrydningskurver

At etablere nedbrydningskurver for halm, digestat og biochar er afgørende for at kvantificere atmosfærisk kulstofdispersion over tid. I de brugte datakilder for halm og digestat (Elsgaard et al., 2022) samt for biokul (Woolf et al., 2021) er få år specificerede, se Tabel B1. Derfor genereredes kurver for at identificere data for de mellemliggende år. Der blev sat to primære mål: identificere værdier for år uden data og opretholde en kulstofnedbrydningsprocent inden for $\pm 0,05\%$ for de kendte år.

År	Halmreference	Digestatreference	Biokul
2	26%	58%	
20	6%	15%	
100	3%	10%	79%
500			44%
Kilde	(Elsgaard et al., 2022)	(Elsgaard et al., 2022)	(Woolf et al., 2021)

Tabel B1: Overblik over andel stabilt kulstof i jord over tid.

Regressionsmetoden blev brugt for at definere koefficienter for den givne kurvefunktion. De kendte værdier for år og nedbrydningsværdier for halm og digestat, sammen med den specifikke funktion, der skulle tilpasses, bestemte valg af værktøj. For halm gav kurvetilpasning i Excel en effektiv tilpasning. Excel opfyldte dog ikke kravene til digestat og biokul. Derfor blev Python, med NumPy og SciPy, brugt til en mere præcis tilpasning, hvilket tillader bedre inputdata og funktionsmanipulation. NumPy og SciPy er essentielle Python-biblioteker. NumPy håndterer multidimensionale arrays og matematiske funktioner, mens SciPy udvider disse funktioner til videnskabelig databehandling. Ved at bruge Python med NumPy og SciPy kunne en mere præcis kurvetilpasning opnås for digestat og biokul.

For halm og digestat var en enkelt matematisk funktion ikke tilstrækkelig for nøjagtigt at tilpasse alle dataene i en kurve. Her blev kurven opdelt i to separate domæner, eller intervaller af år, og en separat funktion blev tilpasset til hvert domæne. Dette forbedrer nøjagtigheden af tilpasningen og giver en bedre repræsentation af de underliggende data. Hver kurve havde specifikke tilpasningskriterier, hvilket førte til at opdele kurverne i to domæner for separat tilpasning. De valgte funktioner var skræddersyet til de specifikke karakteristika for hver datasæt og nedbrydningens natur observeret i de givne år.

Halmreference

For halm blev en lineær funktion brugt til at tilpasse dataene for de første to år, og en power-law funktion blev brugt til at tilpasse dataene for de resterende år. For halm gav Excel-værktøjet en effektiv tilpasning med to forskellige regressionsmetoder ved hjælp af den indbyggede kurvetilpasningsmetode: en lineær tilpasning (Ligning 1) og en power-law-tilpasning (Ligning 2). Hvor x repræsenterer årene og $f(x)$ repræsenterer procentdelen af fast kulstof for alle de tilpasninger, der er beskrevet i dette kapitel. De andre termer, der vises i formlen, er koefficienterne, der findes ved regressionen for at opfylde det oprindelige input.

$$f(x_1) = a_1 \cdot x_1 + b_1 \quad \text{Ligning 1}$$

$$f(x_2) = a_2 \cdot x_2^{b_2} \quad \text{Ligning 2}$$

$$x_1 \in [1, 2]; x_2 \in [2, 100]$$

Digestatreference

For digestat blev en eksponentiel nedbrydningsfunktion med en offset brugt til de første 20 år, og en eksponentiel nedbrydningsfunktion uden en offset blev brugt til de resterende år. Dette hjælper med at sikre, at modellen nøjagtigt repræsenterer de observerede data i hvert tidsinterval. Funktionen "Curve_fit" i Pythons SciPy-bibliotek blev brugt til tilpasning af eksponentiel funktion. Curve_fit tilpasser en funktion til data ved hjælp af ikke-lineær mindste kvadraters optimering. Som for halm blev årenes domæne delt i to for at udføre to separate tilpasninger. For de første 20 år var den valgte model en eksponentiel nedbrydningsfunktion med en offset, c_4 (Ligning 3), og for de resterende år blev en eksponentiel nedbrydningsfunktion uden en offset valgt (Ligning 4).

$$f(x_4) = a_4 \cdot e^{-b_4 \cdot x_4} + c_4 \quad \text{Ligning 3}$$

$$f(x_5) = e^{-a_5 \cdot x_4 + b_5} \quad \text{Ligning 4}$$

$$x_4 \in [1, 20]; x_5 \in [20, 100]$$

Biokul

For biokul brugtes en eksponentiel nedbrydningsfunktion med offset, hvor funktionen Curve_fit blev brugt for at tilpasse datapunkterne i en eksponentiel funktion, ligesom beskrevet for de første år for digestatreference. Her specificeres punkter for de mellemliggende år med Ligning 5.

$$f(x_5) = a_5 \cdot e^{-b_5 \cdot x_5} + c_5 \quad \text{Ligning 5}$$

$$x_5 \in [1, 100, 500]$$

De brugte parametre for samtlige ligninger er listede i Tabel B2.

	a_x	b_x	c_x
Ligning 1: a_1, b_1	-0.37	1	
Ligning 2: a_2, b_2	0.26	-0.46	
Ligning 3: a_3, b_3, c_3	85.09	0.34	14.91
Ligning 4: a_4, b_4	-0.005	2.81	
Ligning 5: a_5, b_5, c_5	65.46	0.004	34.54

Tabel B2: Brugte parametre for nedbrydningskurver.