



Økonomisk incitament til pyrolyse i landbruget

ved implementering af CO₂-afgift

Magnus Bo Karlsson

Specialeafhandling

Vejledt af Tobias Pape Thomsen

Studienummer - 64061

Juni 2022



Indhold

ABSTRACT	4
INDLEDNING	6
PROBLEMFELT	7
GLOBALT NIVEAU OG IPCC	7
EU NIVEAU OG "FIT FOR 55"	7
NATIONALT NIVEAU	8
PYROLYSE OG KLIMAEFFEKTER	9
UDFORDRINGER VED SKALERING AF PYROLYSE	10
OPSAMLING	11
PROJEKTDISEGN	12
ANALYSE	14
PRISEN PÅ CO₂	15
CARBON CREDITS	15
DANSK CO ₂ -AFGIFT	21
BEDRIFTSREGNSKABER	30
VÆRKTØJER	30
BIOKUL TILFØJELSER	33
RESULTATER	40
ØKONOMISK INCITAMENT TIL PYROLYSE	42
ØKONOMISK MODEL	42
DISKUSSION AF FORRETNINGSMODELLER	50
PERSPEKTIVERING	59
FORRETNINGSMODELLER	60
OVERENSSTEMMELSE PÅ TVÆRS AF KLIMAREGNSKABER	60
FREMTIDIG RESSOURCETILGÆNGELIGHED	60
KONKLUSION	61
LITTERATUR	64

Abstract

Reaching the political goals for reduction of greenhouse gas emissions in the Danish agricultural sector requires significant effort. Pyrolysis of biomass represents a large reduction potential in the sector, but there is currently insufficient incentive for farmers to utilize biochar on agricultural soil. In this study, the effects of a Danish carbon tax on the economic incentive to utilize pyrolysis is investigated.

Through a dairy farm case study, climate footprints are calculated and the reduction potential of pyrolysis is quantified. Combining these results with an analysis of the carbon tax structure and the carbon credit market, the economic burden of the dairy farm through the carbon tax is estimated in a range of scenarios.

The farm is expected to pay between 2,7 and 4,1 mio. DKK in carbon tax corresponding to 8-11% of the annual turnover. Through pyrolysis, the farm savings in carbon tax are dependent on the details of the implementation of the tax. With subsidies for negative emissions in the agricultural sector, pyrolysis is estimated to reduce the carbon tax between 25% and 60%. Without subsidies, the savings are between 15% and 45%.

In addition to the incentive for pyrolysis achieved through reduced carbon tax, the sale of carbon credits provides additional value. It is necessary to establish business models that distribute the value between farmers and pyrolysis plant owners, in order to realize the potential of pyrolysis in the agricultural sector.

Indledning

Problemfelt

Globalt niveau og IPCC

Menneskelig aktivitet forårsager klimaforandringer som følge af udledning af drivhusgasser til atmosfæren. Det leder til stigende globale temperaturer, som har konsekvenser for mennesker og økosystemer. I FN er der i Parisaftalen vedtaget en målsætning om at begrænse den globale temperaturstigning til 1,5 °C. De nuværende udledninger og udviklingstrends vil medføre langt højere temperaturstigninger, og der er derfor behov for at reducere udledning af drivhusgasser for at begrænse den menneskelige klimapåvirkning (IPCC, 2022).

Derudover er der i et længere tidsperspektiv behov for at stabilisere klimapåvirkningen for at sikre levevilkår for fremtidige generationer. Det kræver at vi stabiliserer den stigende koncentration af drivhusgasser i atmosfæren ved at reducere de globale udledninger for at opnå global netto-nul udledning (IPCC, 2022). Nogle sektorer vil selv med betydelig indsats have restemissioner, som er meget svære eller meget dyre at afskaffe. Eksempelvis landbrugssektoren har emissioner, som er tæt forbundet til fødevarerproduktion, og derfor er uundgåelige. Det er derfor nødvendigt at kompensere for restemissioner gennem optag af CO₂ (COM, 2021).

Optag af CO₂ kan lade sig gøre gennem lagring af kulstof i biomasse i økosystemer eller byggematerialer, eller gennem *Carbon Capture and Storage* (CCS). CCS kan realiseres gennem flere teknologiske løsninger: Direct Air Capture, industriel CCS og pyrogen CCS (COM, 2021).

Direct Air Capture filtrerer store mængder atmosfærisk luft og fjerner CO₂. Industriel CCS involverer fangst af CO₂ på store punktkilder som forbrændingsanlæg og tung industri og lagring i geologiske formationer. Pyrogen CCS indebærer pyrolyse af biomasse, hvorved kulstof lagres i biokul, som kan nedmuldes i landbrugsjord eller anvendes til andre formål (COM, 2021).

Biokul repræsenterer et globalt reduktionspotentiale på 0,5-2 mia. ton CO₂e¹ om året (IPCC), med yderligere positive effekter på klimatilpasning, ørkendannelse, jordkvalitet og fødevarer sikkerhed under best-practice implementering (IPCC, 2020).

EU niveau og "Fit for 55"

I EU forhandles rammerne for pakken *Fit for 55* i øjeblikket, som har til formål at understøtte målsætningen om 55 procents reduktion af EU's drivhusgasudledninger i 2030 i forhold til niveauet i 1990 og klimaneutralitet i 2050 (EU, 2021a).

I pakken sættes fokus på de ikke-kvoteforpligtede sektorer, hvor målet for reduktioner hæves fra 30 til 40 procent i 2030 sammenlignet med niveauet i 2005. Reduktionsmålet nås ved at tildele hvert medlemsland en national forpligtelse til at reducere udledninger i ikke-kvotesektoren. Derfor hæves den danske forpligtelse til at reducere udledninger fra ikke-kvotesektoren. En række virkemidler er allerede vedtaget i Danmark i ikke-kvotesektoren, som bidrager til at opnå reduktionen, men en større reduktion vil være nødvendig for at nå forpligtelsen (Klimarådet, 2022).

¹ CO₂e er en fælles enhed for det opvarmningspotentialet af forskellige drivhusgasser. Med CO₂e omregnes opvarmningspotentialet af drivhusgasser til CO₂-ækvivalenter.

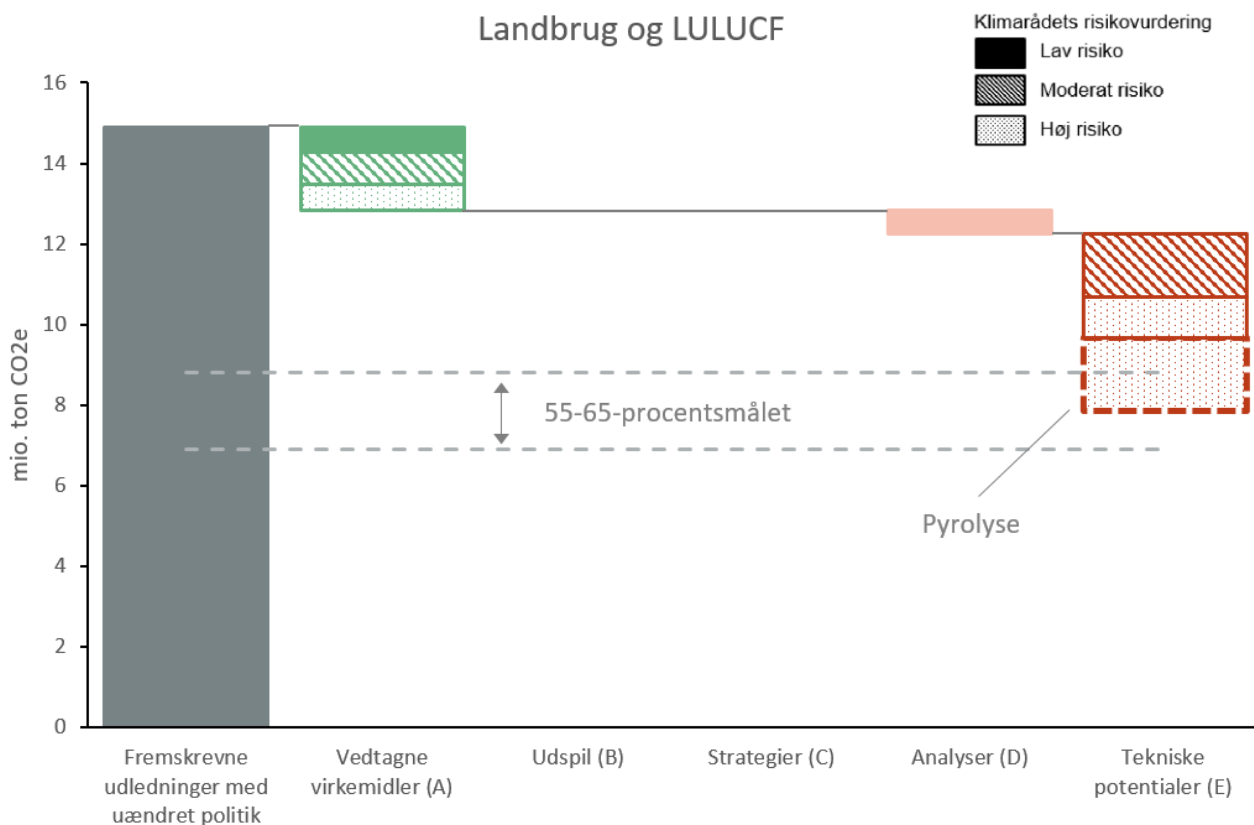
Pakken sætter derudover nye målsætninger for kulstoflagring i LULUCF-sektoren. Det er hensigten, at optag i LULUCF skal kompensere for de restemissioner, som er svære at undgå i landbruget frem mod målet om klimaneutralitet i 2050 (Klimarådet, 2022).

Med de nye nationale forpligtelser i ikke-kvotesektoren og målsætninger i LULUCF betyder det, at *Fit for 55*-pakken som den er beskrevet i skrivende stund, skaber et særligt behov for at reducere de danske udledninger i de sektorer for at opfylde EU-forpligtelser. Det udgør en udfordring, som kræver særsilt opmærksomhed. Indtil nu har det været forventningen, at EU-forpligtelser ville blive opfyldt som følge af den danske målsætning om 70 procents reduktion i 2030 defineret i klimaloven. Det ændrer sig med *Fit for 55*-pakken.

Nationalt niveau

I Danmark er der i LULUCF- og landbrugssektorerne i *Aftale om grøn omstilling af dansk landbrug* defineret et sektormål om at reducere emissioner med 55-65 procent i 2030 sammenlignet med niveauet i 1990 (Regeringen, 2021). Det svarer til en reduktion på 6,1-8,0 mio. ton CO₂e.

I aftalen er 16 virkemidler beskrevet med et samlet reduktionspotentiale på cirka 7 mio. ton CO₂e. Reduktionspotentialer i aftalen er illustreret i figuren nedenfor. Reduktionspotentialer er opgjort med udgangspunkt i Klimarådets konkretiserings- og risikovurdering. Konkretiseringsniveauet er en vurdering af, hvor langt det politiske arbejde med virkemidlet er nået. Risikoniveauet er en vurdering af potentielle udfordringer og barrierer, der kan begrænse effekten af virkemidler.



Figur 1: Virkemidler til reduktion af udledninger i LULUCF og landbrugssektoren (Klimarådet, 2022, egen tilvirkning).

Kun reduktioner svarende til cirka 2 mio. ton CO₂e stammer fra vedtagne virkemidler. Af de resterende cirka 5 mio. ton karakteriserer Klimarådet virkemidler svarende til cirka 0,6 mio. ton CO₂e på analyseniveau og de resterende 4,4 mio. ton CO₂e reduktion som tekniske reduktionspotentialer. Et af virkemidlerne i kataloget af tekniske potentialer er termisk pyrolyse af biomasse.

Pyrolyse vurderes at repræsentere et reduktionspotentiale på 2 mio. ton CO₂e i 2030. Dermed udgør pyrolyse mere end en fjerdedel af det samlede reduktionspotentiale i aftalen på cirka 7 mio. ton CO₂.

Pyrolyse og klimaeffekter

Pyrolyse som et virkemiddel i landbruget omfatter termisk behandling af biomasse i en iltfri atmosfære. Ved at opvarme biomasse til temperaturer omkring 500-600 °C uden tilstedeværelsen af ilt, udvindes flygtige bestanddele, hvoraf en andel kan kondenseres til bioolie. Bioolien kan anvendes direkte i industrielle oliebrændere eller opgraderes til højværdi brændstof. Den ikke-kondenserbare gasfraktion kan anvendes til procesenergi og varmeproduktion eller opgraderes under tilførsel af elektrolysebrint til eksempelvis biometanol eller biometan. De dele af biomassen som ikke ender i gas- eller oliefraktionen omdannes til biokul, et materiale med en høj andel af stabilt kulstof som kun nedbrydes meget langsomt, og dermed kan anvendes til lagring af biogen kulstof i hundredevis til tusindevis af år. I langsomme

pyrolyseprocesser, der er designet med fokus på biokulproduktion, ender omkring halvdelen af kulstoffet i biomassen i biokullet, den anden halvdel udvindes med de flygtige bestanddele (Henriksen et al, 2019).

Udover kulstofsekvistrering påvirker produktion og anvendelse af biokul baseret på landbrugets biomasser klimaet gennem en række andre effekter. Ved opbevaring og anvendelse af våde biomasser som gylle, biogasdigestat og spildevandsslam udledes de kraftige drivhusgasser metan og lattergas til atmosfæren. Ved at stabilisere biomasse gennem pyrolyse undgås emissioner fra opbevaring og anvendelse. Energi i gas- og oliefraktionen fra processen kan anvendes til at erstatte fossile brændstoffer med CO₂-neutralt biobrændstof. Mens den termiske nedbrydning af biomassen fører til at det meste kvælstof ender i gasfraktionen, så genvindes langt størstedelen af de ikke-flygtige næringsstoffer som fosfor, kalium og magnesium i biokullet. Her er fosfor særligt afgørende, da det er en kritisk ikke-fornybar ressource. Fosfor i biokul kan anvendes som et gødningsprodukt på landbrugsjord, men der er endnu usikkerhed omkring plantetilgængeligheden, som afhænger af både inputmateriale og procesparametre (Henriksen et al, 2019).

Det nationale reduktionspotentiale i Danmark ved anvendelse af ikke-indsamlet halm til pyrolyse og som boostersubstrat til biogasbehandling af gylle er vurderet til omkring 2,3 mio. ton CO₂e i 2030, hvoraf pyrolyse bidrager med den største andel af klimaeffekten per ton halm (Thomsen, 2021). Derudover er der potentiale for at pyrolysere biogasdigestat fra større centrale biogasanlæg, som har kapaciteten til at afvande materialet mekanisk, gyllefibre på mindre decentraliserede pyrolyseanlæg eller andre biomasseressourcer som græs og afgrøderester. Udfordringen er at skalere teknologien i et tilstrækkeligt tempo for at nå de politiske målsætninger.

Udfordringer ved skalering af pyrolyse

Klimarådet kategoriserer pyrolyse på det laveste konkretiseringsniveau *Teknisk reduktionspotentiale*, da regeringen ikke har lavet analyser af økonomi, incitamentsstrukturer og andre hensyn. Derudover vurderer Klimarådet, at reduktionspotentialet ved pyrolyse er karakteriseret af høj risiko for et reelt lavere potentiale end den tekniske vurdering. Klimarådet lægger vægt på, at der er implementeringsudfordringer forbundet med udvikling af teknologien, samt udfordringer inden for system- og arealsammenhæng, som omfatter afledte effekter og ressourcetilgængelighed. Det skyldes konkurrerende virkemidler til reduktion af emissioner fra gyllehåndtering og forventningen om stigende konkurrence om biomasseressourcen (Klimarådet, 2022).

Regeringen vurderer i *Klimaprogram 2021* blandt de væsentligste barrierer for pyrolyse i landbruget manglende økonomisk incitament for den enkelte landbruger til at anvende biokul med henblik på CO₂-optag, da en CO₂-afgift endnu ikke er implementeret i landbrugssektoren (Regeringen, 2021). En CO₂-afgift skal være driver for omstillingen i landbruget. Ved at prissætte udledninger og optag skabes incitament for at reducere klimaaftrykket af landbruget. Det fremhæver nødvendigheden af, at reduktionspotentialet ved optag af CO₂ gennem biokul indgår i beregningsforudsætningerne for en kommende afgift.

Landbrugsstyrelsen har igangsat *bedriftudledningsprojektet*, som skal forbedre vidensgrundlaget for at indføre regulering baseret på klimaregnskaber på bedriftsniveau (Landbrugsstyrelsen, 2022). Sideløbende udvikles der flere værktøjer til opgørelse af klimaaftryk i landbruget på bedriftsniveau af både private og offentlige institutioner (Klimarådet, 2016; Bochu et al., 2011; Cool Farm Alliance, 2022; SEGES, 2022). Beregningsforudsætningerne for en CO₂-afgift i landbruget vil sandsynligvis blive baseret på erfaringer, fra de værktøjer som udvikles i dag.

Tilsvarende er det afgørende, at reduktionspotentialet kan medregnes i de nationale emissionsopgørelser, hvis pyrolyse skal kunne medvirke til at opfylde Danmarks EU-forpligtelser i LULUCF og ikke-kvotesektoren. Der er i øjeblikket usikkerhed omkring både dokumentationskrav og sektorplacering af reduktionspotentialet ved CO₂-optag gennem biokul.

Opsamling

På EU-niveau stiller *Fit for 55*-pakken nye krav til LULUCF og ikke-kvotesektoren, som kræver særlig opmærksomhed for at opfylde danske forpligtelser. Der er et større reduktionsbehov i sektorerne, som ikke forventes opfyldt med de vedtagne virkemidler. Derudover er der endnu vej til at nå den danske målsætning om 55-65 procents reduktion i landbruget. Der er et stort reduktionspotentiale i den danske LULUCF og landbrugssektor, men det hviler i høj grad på tekniske reduktioner præget af høj risiko. Pyrolyse udgør det største reduktionspotentiale med en reduktion på 2 mio. ton CO₂e, men uden en CO₂-afgift i landbrugssektoren er der ikke incitament for den enkelte landbruger til at anvende biokul til optag af CO₂.

I dette projekt undersøges potentialet for at skabe incitament for reduktion af landbrugets klimaaftryk gennem pyrolyse ved implementering af en CO₂-afgift. Der tages udgangspunkt i problemformuleringen:

Hvordan påvirker implementering af CO₂-afgift incitamentet til anvendelse af pyrolyse som et virkemiddel for at reducere landbrugets klimaaftryk?

Problemformuleringen vil blive besvaret ud fra følgende arbejdsspørgsmål:

1. Hvordan prissættes CO₂-emissioner?
 - a. På det private marked for carbon credits
 - b. Gennem en dansk CO₂-afgift
2. Hvordan beregnes klimaaftrykket af landbrugsbedrifter som udgangspunkt for implementering af CO₂-afgift i landbruget?
 - a. Med forskellige eksisterende værktøjer
 - b. Hvordan kan anvendelse af biokul tilføjes til beregningen af klimaaftryk på bedriftsniveau?
3. Hvordan kan værdikæder for pyrolyse etableres, der skaber incitament til anvendelse af biokul på dansk landbrugsjord?
 - a. Hvordan påvirker anvendelse af biokul på landbrugsjord bedriftsøkonomi ved implementering af CO₂-afgift i landbrugssektoren?
 - b. Hvordan kan byrder og kreditter ved prissætning af CO₂ fordeles fordelagtigt mellem aktører i værdikæden med henblik på at skabe incitament til reduktioner?

Projektdesign

Udledning af drivhusgasser bliver i stigende grad forbundet med økonomi. Det foregår i gennem prissætning af udledninger i kvotesystemer, private markeder for carbon credits og i enkelte lande gennem CO₂-afgift (EGSR, 2022). Det skaber nye værdikæder, hvor aktører med stort klimaaftryk har nye incitamenter til at reducere deres udledninger. Det skaber forretningsmuligheder for aktører og systemer, der kan bidrage til reduktionen.

Dette projekt bygger på en central antagelse om, at det danske landbrug vil blive reguleret gennem en CO₂-afgift baseret på klimaregnskaber på bedriftsniveau. Det antages, at landbrugets fulde aftryk inklusiv biologiske processer og LULUCF vil blive pålagt CO₂-afgift. Denne antagelse understøttes senere under afsnittet

Dansk CO₂-afgift.

For at besvare problemformuleringen:

Hvordan påvirker implementering af CO₂-afgift incitamentet til anvendelse af pyrolyse som et virkemiddel for at reducere landbrugets klimaaftryk?

undersøges det, hvordan implementering af CO₂-afgift og salg af carbon credits på det private marked påvirker økonomien for aktører i systemet. Der tages udgangspunkt i et samarbejde med en mælkebedrift fra Nordjylland, der anvendes som et casestudie. Der opstilles en økonomisk model af en fremtidig værdikæde, hvor kvæggylle omdannes til biokul gennem pyrolyse. Det er hensigten at undersøge, hvordan økonomiske byrder og gevinster kan fordeles mellem aktører i systemet, på en måde der skaber incitament til reduktioner.

Økonomiske byrder opstår ved implementering af CO₂-afgift i landbruget, hvormed bedriftens udledninger pålægges afgift. Økonomiske gevinster opstår ved reduktion af bedriftens udledninger og ved optag af CO₂ gennem biokul. Disse effekter prissættes både gennem CO₂-afgiften og ved salg af carbon credits på det private marked. Det er derfor nødvendigt at vurdere prisniveauet af CO₂-afgiften i landbruget og prisen på biokulprojekter solgt på det private marked for carbon credits. Det er de to kilder til prissætning af udledninger og reduktioner i systemet.

Arbejdsspørgsmål 1: *Hvordan prissættes CO₂-emissioner?* besvares gennem en vurdering af afgiftssatsen på CO₂-afgiften i landbruget og prisen på biokulprojekter solgt på det private marked for carbon credits.

Der er endnu ikke noget konkret udgangspunkt for at vurdere afgiftssatsen og struktureringen af CO₂-afgiften i landbruget. Der tages derfor udgangspunkt i Ekspertgruppen for Grøn Skattereform og Klimarådets anbefalinger samt regeringens udspil til implementering af CO₂-afgift i industri og øvrige erhverv (EGSR, 2022; Klimarådet, 2022; Regeringen, 2022). Anbefalinger og udspil analyseres med henblik på at forme en vurdering af afgiftssats og strukturering af CO₂-afgiften i landbruget.

Derudover præsenteres en redegørelse for det private marked for carbon credits. Markedets udvikling og struktur beskrives, og relevante diskussionspunkter fremhæves. Afslutningsvis undersøges prisen på biokulprojekter.

Arbejdsspørgsmål 2: *Hvordan beregnes klimaaftrykket af landbrugsbedrifter som udgangspunkt for implementering af CO₂-afgift i landbruget?* besvares ved at undersøge eksisterende værktøjer til beregning af klimaaftryk på bedriftsniveau.

CO₂-afgiften bliver sandsynligvis implementeret gennem opgørelse af klimaaftryk på bedriftsniveau (Regeringen, 2021; Klimarådet, 2022). Den endelige metode til opgørelse af klimaaftryk på bedriftsniveau er under udvikling og endnu ikke defineret. For at vurdere hvordan landbrugeren påvirkes ved implementering af CO₂-afgift, er det nødvendigt at have et beregningsmæssigt udgangspunkt. Derfor undersøges en række eksisterende værktøjer til opgørelse af klimaaftryk på bedriftsniveau, for at skabe indtryk af størrelsesordenen af den økonomiske byrde der følger med CO₂-afgiften. Med udgangspunkt i et samarbejde med en mælkebedrift i Nordjylland beregnes bedriftens klimaaftryk gennem tre forskellige værktøjer. Ved at beregne bedriftens aftryk med flere værktøjer er det muligt at vurdere variationen mellem resultater. På denne måde skabes et indtryk af usikkerheden ved at anvende resultaterne som proxy for det endelige reguleringsgrundlag for CO₂-afgiften.

Ingen af værktøjerne inkluderer metoder til beregning af påvirkningen på bedriftens klimaaftryk ved anvendelse af biokul. Derfor er det nødvendigt at supplere værktøjerne med metoder til beregning af disse effekter. Til dette formål tages udgangspunkt i modeller til beregning af opbevaringsemissioner fra gylle fra Aarhus Universitet og metode til beregning af kulstoflagring gennem biokul (Olesen et al., 2020). Derudover er der et stort reduktionspotentiale forbundet med energiproduktionen ved pyrolyse. Det er ikke relevant at inkludere denne sammenhæng, da reduktionspotentialet ikke tilfalder bedriftens klimaaftryk.

Arbejdsspørgsmål 3: Hvordan kan værdikæder for pyrolyse etableres, der skaber incitament til anvendelse af biokul på dansk landbrugsjord? besvares ved at kombinere resultater fra arbejdsspørgsmål 1 og 2.

Med resultater fra forudgående arbejdsspørgsmål er det muligt at opstille scenarier for påvirkningen på bedriftens økonomi ved anvendelse af biokul. Med udgangspunkt i scenarierne kan fordelingen af økonomiske byrder og gevinster diskuteres, for at undersøge muligheden for at skabe incitament til reduktioner gennem værdikæder for pyrolyse. For at inkludere flere perspektiver i diskussionen er der udført interviews med en række eksperter indenfor pyrolyse-forretningsmodeller, klima & landbrug og CO₂-afgift. De interviewede eksperter er:

- Christian Wieth – Chief Marketing Officer, AquaGreen
- Peter Lindholst – Forretningsudvikler, Stiesdal Fuel Technologies
- Peter Birch Sørensen – Professor ved Økonomisk Institut på Københavns Universitet og medlem i Ekspertgruppen for Grøn Skattereform
- Anne-Mette Langvad – Projektchef ved Klimafonden Skive

Ved prissætning af udledninger gennem CO₂-afgift og det private marked for carbon credits tildeles det biogene kulstof i biomasse ny økonomisk værdi, da det gennem pyrolyse repræsenterer et reduktionspotentiale. Diskussionen omkring fordeling af byrder og gevinster omhandler, hvordan den nye økonomiske værdi bedst kan udnyttes for at skabe incitament til reduktioner i landbruget.

Analyse

Prisen på CO₂

Et afgørende virkemiddel i klimainsatsen er prissætningen af konsekvenserne forbundet med udledning af drivhusgasser (Regeringen, 2020). I dansk kontekst sker det i skrivende stund gennem prissætning af negative eksternaliteter i samfundsøkonomiske analyser, som omfatter udledning af drivhusgasser. Derudover har den danske regering nedsat en ekspertgruppe, som udarbejder anbefalinger for, hvordan en ensartet CO₂-afgift kan implementeres på tværs af sektorer (Klima- Energi og Forsyningsministeriet, 2021). Med en ensartet CO₂-afgift skabes der incitament til at reducere udledning af drivhusgasser op til et omkostningsniveau svarende til afgiftssatsen. Med en afgift på 1.000 kr. per ton CO₂ skabes der incitament til at reducere virksomhedens udledninger ved at investere i virkemidler med en pris på op til 1.000 kr. per ton CO₂.

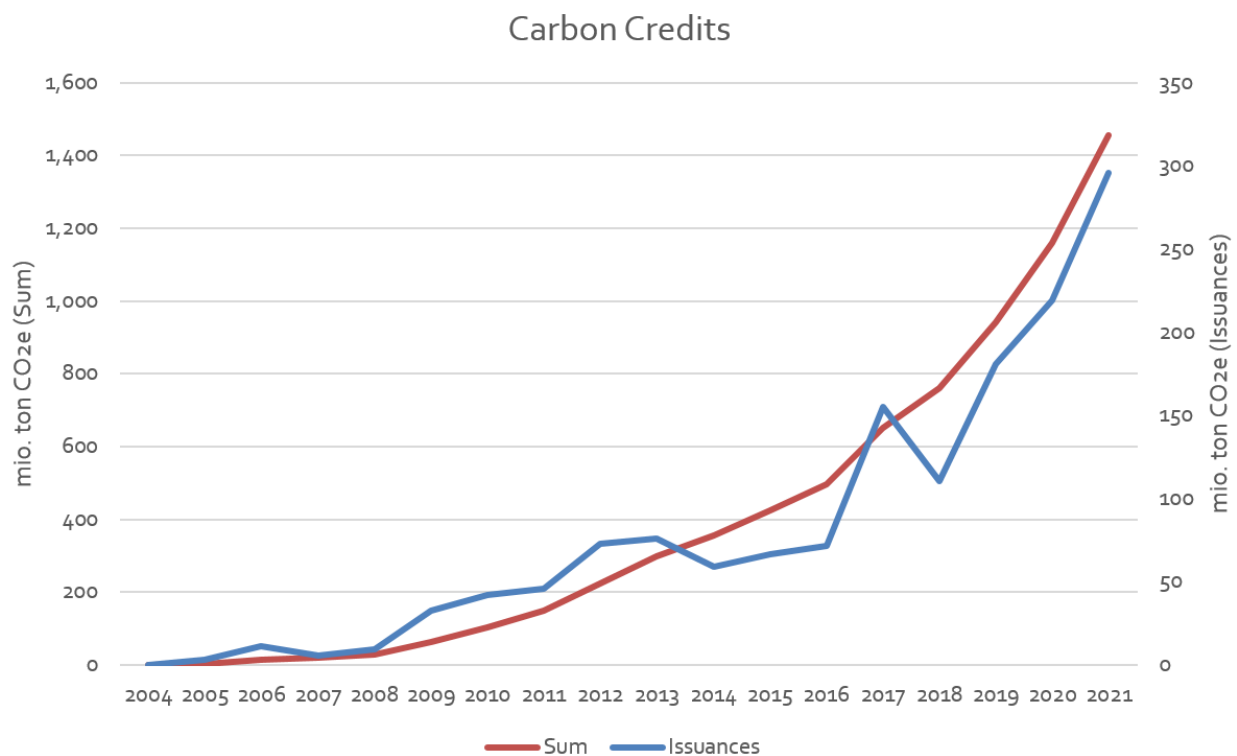
Parallelt med denne udvikling er et privat marked for carbon credits i eksponentiel vækst, hvor projekter der reducerer emissioner eller lagrer kulstof kan sælge rettigheden til reduktionen. Andre private aktører kan dermed kompensere for deres klimaaftryk ved at købe carbon credits. Efterspørgslen på det private marked er drevet af frivillig investering fra virksomheder med klimamålsætninger. Grøn omstilling er blevet en konkurrenceparameter for mange virksomheder, da forbrugere i stigende grad er blevet opmærksomme på klimaaftrykket af deres valg, og ønsker at købe produkter og services med lavest mulig påvirkning på miljø og klima (TSVCM, 2021).

Det private marked eksisterer i dag uafhængigt af nationale emissionsopgørelser og handel med kvoter i internationale kvotesystemer. Reduktioner forbundet med carbon credits indgår udelukkende i private virksomheders klimaregnskaber. Hvis en virksomhed køber carbon credits fra et projekt i udlandet, indgår den udenlandske reduktion ikke i den nationale emissionsopgørelse for virksomhedens hjemland, da nationale emissionsopgørelser er baseret på territorial afgrænsning for at undgå dobbelttælling.

Der er dog udsigt til at det private marked og de nationale emissionsopgørelser vil blive forbundet. I forbindelse med COP26 i Glasgow blev formuleringen af Parisaftalens artikel 6 forhandlet. Artikel 6 har til formål at etablere et marked for handel med CO₂-reduktioner på tværs af aftaleparters landegrænser. Artiklens formulering åbner muligheden for, at stater kan købe og sælge reduktioner indbyrdes men også på det private marked for carbon credits. Det forbinder i praksis de nationale emissionsopgørelser med det private marked, og et FN tilsynsråd etableres for at overse markedet. I praksis vil det fungere sådan, at hvis land A køber carbon credits på det private marked fra et projekt i land B, må land B modregne reduktionen i dets nationale emissionsopgørelse for at undgå dobbelttælling (Lewis & Burzec, 2021).

Carbon credits

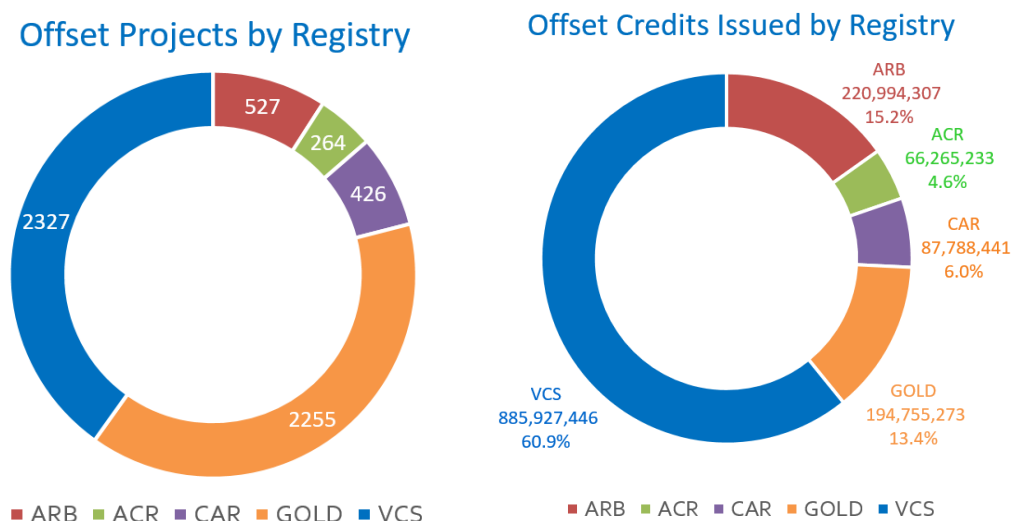
Det private marked for carbon credits (Voluntary Carbon Market, VCM) er et marked med vokseværk. Der er i øjeblikket eksponentiel vækst i registreringen af carbon credits, og nogle organisationer arbejder med en målsætning om at skalere markedet med en faktor 15 sammenlignet med niveauet i 2019 inden 2030 (TSVCM, 2021). Markedet står dog over for nogle centrale udfordringer og har været kritiseret fra flere sider med anklager om greenwashing og spørgsmål omkring troværdigheden af de lovede reduktioner.



Figur 2: Registrerede Carbon Credits på det private marked. Blå: per år, Rød: Sum (Carbon Direct, 2021, egen tilvirkning).

VCM er et privat marked for handel med carbon credits. En carbon credit svarer til 1 ton CO₂e. Private aktører kan udføre projekter, der reducerer emissioner og sælge reduktionen på VCM. Virksomheder eller individer kan købe carbon credits for at kompensere for deres klimaaftryk. Det kan eksempelvis anvendes af virksomheder til at opnå netto-nul målsætninger, eller af individer for at kompensere for en flyrejse. Langt størstedelen af efterspørgslen er drevet af virksomheder.

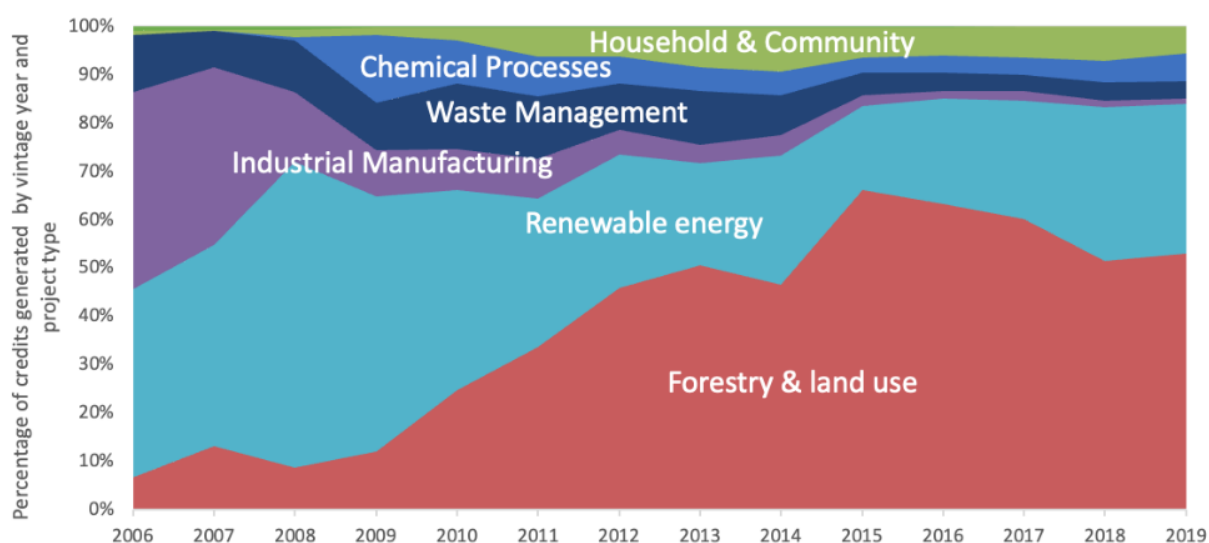
Carbon credits kan i princippet handles direkte mellem private aktører, men registreres som regel på VCM-registre. VCM-registre certificerer carbon credits gennem forskellige standarder afhængigt af projektypen og bogfører køb og salg af carbon credits. Selve handlen foregår oftest gennem mæglere, der indkøber store volumener og rådgiver købere (TSVCM, 2021). Der findes flere VCM-registre, men markedet er domineret af især to aktører. Berkley Carbon Trading Project udgav i april 2021 en samlet database med alle kendte carbon credit projekter, som dækker over et angivet reduktionspotentiale på 1,5 mia. ton CO₂e (Carbon Direct, 2021). De to VCM-registre Gold Standard (GOLD) og Verified Carbon Standard (VCS) omfatter tilsammen 79% af de registrerede projekter. Opgjort i antal carbon credits har VCS den langt største markedsandel med 61%.



Figur 3: Carbon credits fordelt mellem VCM-registre. *Til venstre*: antal projekter. *Til højre*: antal carbon credits. ARB, California Air Resources Board; ACR, American Carbon Registry; CAR, Climate Action Reserve; GOLD, Gold Standard; VCS, Verified Carbon Standard (Carbon Direct, 2021).

Carbon credit projekter omfatter mange forskellige projekttyper. Grundlæggende kan carbon credits opdeles i tre kategorier: Reduktioner, undgåede emissioner og lagring af CO₂. Eksempler på projekter indenfor de tre kategorier kan være, henholdsvis, etablering af vedvarende energi, reduceret skovrydning og CCS.

Som det fremgår af figuren nedenfor, udgør projekter indenfor vedvarende energi og land- og skovbrug størstedelen af markedet, og særligt andelen af land- og skovbrugsprojekter er voksende (Carbon Direct, 2021).



Figur 4: Fordeling af carbon credits på projekttype (Carbon Direct, 2021).

Det er derfor problematisk, at netop de to projekttyper er særligt udfordret på kvalitet. Vedvarende energi er i dag på mange markeder konkurrencedygtig i forhold til fossil energi. Derfor opfylder mange projekter ikke krav om additionalitet, som vil blive beskrevet nærmere senere. For land- og skovbrugsprojekter er der dokumenteret høj grad af overkreditering som følge af udfordringer med monitorering af systemer. Derudover kan mange projekter lede til lækage, og skovbrande udgør en risiko for, at CO₂-lageret tabes (Carbon Direct, 2021).

Lagring af CO₂ er den mest eftertragtede kategori af carbon credits på det private marked. For virksomheder der gerne vil kompensere for deres klimaaftryk, er der højere værdi forbundet med at fjerne CO₂ fra atmosfæren, end der er ved at undgå eller reducere yderligere emissioner. Det skyldes, at der er mindre usikkerhed og metodisk diskussion, forbundet med projekter der lagrer CO₂. Fra virksomhedernes synspunkt er pålidelighed og sikkerhed for, at carbon credits fører til reelle og permanente reduktioner den afgørende faktor. Derfor er biokulprojekter som eksempel langt mere eftertragtede end etablering af vindenergi, hvor diskussion omkring additionalitet sætter spørgsmålstejn ved troværdigheden af virksomhedens kompensation.

Organisationer som Science Based Targets, Race To Zero og The Oxford Offsetting Principles argumenterer alle for, at lagring af CO₂ bør udgøre en stigende andel af carbon credits, og i 2050 under internationale målsætninger om klimaneutralitet bør markedet udelukkende udgøre langtidslagring af CO₂ (Giving Green, 2021).

Kriterier for carbon credits

Carbon credit projekter vurderes ud fra en række grundlæggende kriterier. Kriterierne indgår i standarder for certificering af projekter på VCM-registre. Carbon credits skal være: *reelle*, *additionelle* og *permanente*.

Reelle

Kriteriet om realitet omfatter krav om dokumentation. Projekter skal kunne dokumentere og kvantificere reducerede emissioner, og reduktioner må ikke dobbelttællles. Det kan i nogle tilfælde være udfordrende at dokumentere, at et projekt leder til en reduktion. Ved eksempelvis beskyttelse af et skovområde kan der opstå lækage, hvor skov ryddes i naboområder i stedet, og projektet resulterer derfor ikke i en reel reduktion. En anden udfordring er tab af lagret CO₂ ved eksempelvis skovbrand. VCM-registre forsøger ofte at tage højde for denne risiko ved at kræve en *buffer pool* af carbon credits, der holdes tilbage som forsikring mod tab (Giving Green, 2021).

Begge disse udfordringer er uproblematisk i forbindelse med biokulprojekter. Ved lagring af CO₂ gennem biokul kan kulstofindholdet som lagres måles og vejes. Der er ikke tale om tale om produktionsnedgang som kan lede til lækage, og ved lagring i jord eller langtidvarige produkter som beton er risikoen for tab minimal.

Additionelle

Derudover er det nødvendigt at dokumentere, at et projekt er additionelt. Det vil sige at projektet resulterer i en reduktion, som ikke ville have fundet sted uden salg af carbon credits. Hvis et projekt er rentabelt gennem eksempelvis salg af elektricitet eller statsstøtte er et projekt ikke rentabelt, da det ville have fundet sted uafhængigt af profit fra salg af carbon credits (Gold Standard, 2022). Det kan være udfordrende for mange projekttyper at vurdere additionalitet. Etablering af vindenergi er i dag på mange energimarkeder en rentabel forretning. Derfor kan et vindenergiprojekt ikke vurderes at være additionelt under de omstændigheder.

Reguleringsmæssige omstændigheder kan også påvirke additionalitet. Hvis udførelsen af et projekt er et lovkrav, kan projektet ikke siges at være additionelt. Tilsvarende kan der stilles krav til, at projekter ikke har en konkurrencemæssig fordel som følge af regulering (Giving Green, 2021). Det skaber en særskilt diskussion omkring additionalitet og dobbelttælling i nationale emissionsopgørelser, som vil blive beskrevet i næste afsnit.

Permanente

For projekter der lagrer kulstof, er det til sidst nødvendigt at vurdere lagringens permanens, der omfatter forhold som lagringstid og nedbrydelighed. CO₂ der udledes til atmosfæren har langtidsvarig effekt på global opvarmning (Joos et al., 2013). For at bestemme effekten af at udlede et ton CO₂ antages ofte et 100 års perspektiv, hvor effekten defineres som den kumulative effekt på global opvarmning efter 100 år. Permanens vurderes derfor ofte med udgangspunkt i en vurdering af, hvor meget kulstof er tilbageværende i lagret efter 100 år (Giving Green, 2021). Det kan være udfordrende at vurdere permanens for projekter baseret på naturløsninger som etablering af skovområder eller dyrkningsmetoder som *conservation agriculture*, der opbygger kulstof i jord. For biokulprojekter eller projekter baseret på geologisk lagring af opfanget CO₂ er det mindre udfordrende, da det lagrede kulstof kan vejes og måles.

Additionalitet og dobbelttælling i nationale emissionsopgørelser

Der er en igangværende debat omkring dobbelttælling mellem nationale emissionsopgørelser og det private marked for carbon credits. På den ene side argumenterer kritikere for, at carbon credit projekter ikke kan være additionelle i lande med forpligtende reduktionsmål gennem parisaftalen. Reduktioner i de lande indgår i nationale emissionsopgørelser, og virksomheders kompensationskrav baseret på carbon credit projekter fra samme lande er dobbelttælling (Appunn, 2021).

På den anden side argumenterer VCS for, at der ikke sker dobbelttælling i det nuværende system. Når en virksomhed køber carbon credits, indgår reduktionen ikke i den nationale emissionsopgørelse for virksomhedens hjemland, men udelukkende i organisationens klimaregnskab. Virksomheders klimaregnskaber og nationale emissionsopgørelser er to separate systemer. I takt med at national klimapolitik strammes, og målsætninger bliver mere ambitiøse, er det VCM-registres ansvar at vurdere additionalitet af projekter i det skiftende landskab, for at sikre at carbon credits leder til reelle reduktioner (Verra, 2021).

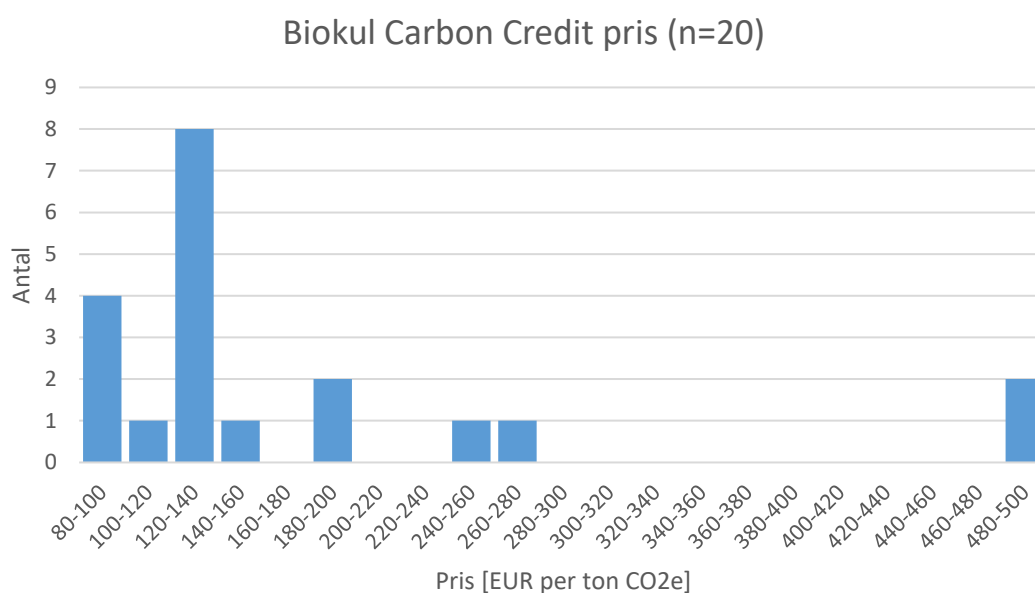
Implementering af en CO₂-afgift skaber nye forudsætninger, som additionaliteten af projekter må vurderes ud fra. Under en CO₂-afgift er det ikke kun en national reduktionsforpligtelse, men også et økonomisk incitament der driver reduktioner i værtslandet. I princippet "betaler" staten gennem CO₂-afgiften for

reduktioner, der bidrager til den nationale målsætning. Hvis afgiften etableres med mulighed for negativ afgift eller rettere sagt tilskud til negative emissioner, betaler staten de facto for reduktionen. Under de omstændigheder bliver diskussionen omkring additionalitet og dobbelttælling endnu mere kompleks. Betydningen af diskussionen omkring dobbelttælling for biokulprojekter vil blive undersøgt nærmere i senere afsnit.

Priser på carbon credits

Der er store prisforskelle på carbon credits mellem projekter. Den gennemsnitlige pris på carbon credits varierer mellem 2-10 euro. Projekter der fjerner CO₂ gennem lagring er gennemsnitligt dyrere, end projekter der reducerer eller undgår emissioner. Projekter der lagrer CO₂ omfatter her både naturbaseret lagring i skov eller jord og teknologisk lagring som industriel eller pyrogen CCS. Gennemsnitsprisen på projekter der lagrer CO₂ og projekter der reducerer eller undgår emissioner, er henholdsvis 7,4 euro og 1,5 euro, en forskel med en faktor fem (Donofrio et al., 2021).

Ser man isoleret på pyrogen CCS eller biokulprojekter, er prisen langt højere. Udbuddet på biokulprojekter på VCM er meget lavt, og det har derfor ikke været muligt at finde prisdata på en større pulje projekter. Nedenfor er prisfordelingen af 20 aktive projekter på platformen puro.earth illustreret (puro.earth, 2022) Prisen varierer mellem 100-500 euro. Størstedelen af projekter koster 100 til 200 euro, og medianen er 130 euro svarende til ca. 970 kr. Biokulprojekter er altså markant dyrere end gennemsnitlige carbon credits. Prisen på 970 kr. per ton CO₂e anvendes som udgangspunkt for at beregne værditilføjesen ved salg af carbon credits i senere afsnit.



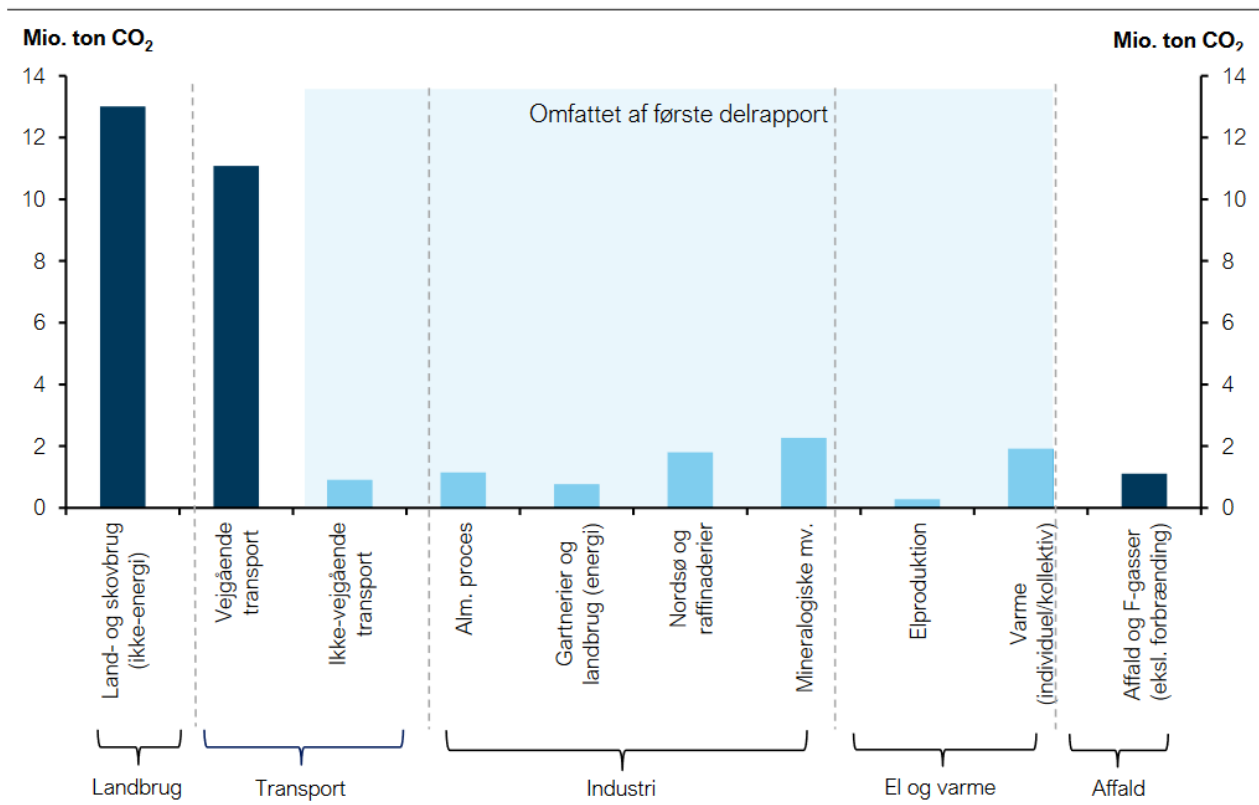
Figur 5: Prisfordeling af biokulprojekter på puro.earth (puro.earth, 2022, egen tilvirkning).

Dansk CO₂-afgift

Regeringen nåede i 2020 en aftale om Grøn skattereform med Venstre, Radikale Venstre, SF og Det Konservative Folkeparti. Det centrale aftalepunkt er en beslutning om at indføre en ensartet CO₂-afgift (Regeringen, 2020). Som følge af aftalen blev en ekspertgruppe nedsat i 2021, som arbejder på anbefalinger til udformningen af CO₂-afgiften. Klimarådet er derudover løbende kommet med anbefalinger til, hvordan CO₂-afgiften kan implementeres hensigtsmæssigt. I april 2022 offentliggjorde regeringen deres udspil til CO₂-afgiften baseret på ekspertgruppens anbefalinger. Landbruget er ikke omfattet af hverken ekspertgruppens anbefalinger eller regeringens udspil. I dette afsnit undersøges det, hvordan CO₂-afgiften kan blive implementeret i landbruget med udgangspunkt i ekspertgruppens og Klimarådets anbefalinger samt regeringens udspil. Vurderingen anvendes som udgangspunkt for at opstille scenarier for den økonomiske påvirkning af CO₂-afgiften i afsnittet *Økonomisk model*.

Ekspertgruppens anbefalinger

I februar 2022 udgav ekspertgruppen for en grøn skattereform (EGSR) første delrapport i gruppens arbejde med at udvikle forslag til en ensartet CO₂-afgift i Danmark. Første delrapport omfatter industri og andre erhverv, ikke-vejgående transport, elproduktion samt individuel og kollektiv opvarmning (EGSR, 2022). Nedenfor er de forventede danske udledninger i 2030 illustreret baseret på *Klimastatus og –fremskrivning 2021*. Sektorer omfattet af første delrapport er markeret. Sektorer omfattet af første delrapport udgør tæt på en tredjedel af udledningerne. Den endelige slutrapport vil derudover omfatte ikke-energirelaterede emissioner fra landbrug og LULUCF samt vejgående transport, og forventes offentliggjort i slutningen af 2022.



Figur 6: Forventede danske udledninger i 2030 baseret på *Klimastatus og –fremskrivning 2021*. Sektorer omfattet af første delrapport markeret (EGSR, 2022).

Klimalovens guidende principper og modstridende hensyn

Ekspertgruppen er pålagt at tage højde for Klimalovens guidende principper i deres anbefalinger. De guidende principper er (Klima- Energi- og Forsyningsministeriet, 2020):

1. *"Klimaudfordringerne er en global problemstilling. Derfor skal Danmark være et foregangsland i den internationale klimaindsats, som kan inspirere og påvirke resten af verden. Danmark har derudover både et historisk og moralsk ansvar for at gå forrest."*
2. *"Indfrielsen af Danmarks klimamål skal ske så omkostningseffektivt som muligt under hensyntagen til både den langsigtede grønne omstilling, bæredygtig erhvervsudvikling og dansk konkurrencekraft, sunde offentlige finanser og beskæftigelse, samt at dansk erhvervsliv skal udvikles og ikke afvikles."*
3. *"Danmark skal vise, at der kan laves en grøn omstilling og samtidig bibeholdes et stærkt velfærdssamfund, hvor sammenhængskraften og den sociale balance sikres."*
4. *"De tiltag, der skal anvendes for at reducere udledningen af drivhusgasser, skal medføre reelle indenlandske reduktioner, men samtidig skal det sikres, at danske tiltag ikke blot flytter hele drivhusgasudledningen uden for Danmarks grænser."*

Der opstår modstridende hensyn som følge af de guidende principper i Klimaloven. Særligt principperne om omkostningseffektivitet og hensynet til, at udledninger ikke blot rykker ud af landet, peger i modstridende retninger. Det grundlæggende syn på omkostningseffektivitet i rapporten er baseret på en økonomisk betragtning af, at en ensartet CO₂-afgift på tværs af alle sektorer vil lede til de billigste reduktioner i samfundet. Hvis afgiftssatsen varierer i forskellige dele af samfundet, vil tiltag blive taget i brug, som er samfundsøkonomisk dyrere end nødvendigt. Samtidig er nogle af de mest CO₂-intensive erhverv omfattet af første delrapport, og en høj CO₂-afgift vil sandsynligvis lede til høj grad af lækage. Ved at tage højde for dette gennem et afgiftsnedslag for dele af erhvervet reduceres lækagen på bekostning af omkostningseffektivitet (EGSR, 2022).

Fællestræk for afgiftsmodeller

Der opstilles tre modeller for CO₂-afgiften i rapporten, som i forskellig grad tager hensyn til lækage. Alle afgiftssatser der nævnes fremover beskriver afgiftsniveauet i 2030, og afgiften indføres lineært fra 2025-2030 (EGSR, 2022).

Fælles for alle modeller er, at der gives et afgiftsnedslag for kvoteomfattede erhverv. Den forventede kvotepris i 2030 er 750 kr. Ud fra samme perspektiv på omkostningseffektivitet som beskrevet ovenfor, bør kvoteomfattede erhverv få et afgiftsnedslag tilsvarende kvoteprisen, for at skabe ensartet tilskyndelse til reduktioner i og uden for kvotesystemet. Derudover er de kvoteomfattede erhverv blandt de mest sårbare overfor lækage, hvilket taler for at give et fuldt afgiftsnedslag svarende til kvoteprisen. To forhold peger derimod i modsat retning. Der uddeles omkring 40% gratiskvoter i kvotesystemet i dag, hvilket medfører, at kvoteprisen ikke er retvisende for kvoteomfattede virksomheders reelle tilskyndelse til reduktion. Derudover har Danmark et højere reduktionsmål på 70% end det generelle mål i EU på 55%. Det taler for, at kvoteomfattede virksomheder i Danmark skal betale mere end kvoteprisen. I modellerne gives der derfor et nedslag i afgiften på 50% af kvoteprisen svarende til 375 kr. ud fra en afvejning af ovenstående forhold (EGSR, 2022).

I to af modellerne gives der tilskud til CCS. Af samme hensyn til omkostningseffektivitet bør negative udledninger pålægges "negativ afgift" - eller rettere sagt gives tilskud - på samme niveau som andre erhverv. EGSR anbefaler derfor en tilskudspulje med et loft på den samlede pulje og på tilskudsniveauet per ton reduktion. Puljen indrettes som en konkurrencemodel, hvor der uddeles tilskud op til puljens loft, og virksomheder konkurrerer på pris. Tilskudssatsen sættes, så den samlede tilskyndelse til CCS (Afgift + evt. kvotepris + tilskud) svarer til skyggeprisen² på CCS. I kvotesektoren og for de mineralogiske processer vurderes skyggeprisen på CCS at være 1.450 kr. per ton CO₂e. I ikke-kvotesektoren er tilskudssatsen baseret på skyggeprisen på CCS på biogasanlæg, som er betydeligt billigere (850 kr. per ton CO₂e).

Det er muligt at en tilsvarende tilskudsmodel til negative udledninger anvendes i landbruget, med fokus på at realisere det store reduktionspotentiale ved pyrolyse. Hvis samme tilgang anvendes til bestemmelse af tilskudssats som i EGSRs anbefalinger, skal den samlede tilskyndelse ved afgift + tilskud være 1.000 kr. ud fra skyggeprisen på pyrolyse (Klimarådet, 2022).

² Skyggepris beskriver den samfundsøkonomiske omkostninger per ton CO₂-reduktion.

Klimarådets anbefalinger

I Klimarådets statusrapport 2022 indgår en ensartet CO₂-afgift som en central anbefaling. Grundlæggende er Klimarådets anbefalinger i overensstemmelse med EGSR. Klimarådet er enige i, at der bør gives et afgiftsnedslag for kvoteomfattede virksomheder. Der bør også indføres supplerende regulering for at tage højde for lækage. Her påpeger Klimarådet dog, at tilskud til CCS - som anbefales af ESGR – ikke er teknologineutralt. Det kan øge de samfundsøkonomiske omkostninger ved at give ulige tilskyndelse til reduktioner gennem CCS sammenlignet med andre potentielt mere omkostningseffektive virkemidler (Klimarådet, 2022).

Som et alternativ peger Klimarådet på et produktionsafhængigt bundfradrag. Med et produktionsafhængigt bundfradrag vil virksomheder kunne udlede en andel deres emissioner afdragsfrit. Andelen af afdragsfrie emissioner bestemmes ud fra produktionens størrelse for ikke blot at give tilskyndelse til produktionsnedgang. På denne måde begrænses lækage økonomisk med et teknologineutralt incitament. Et produktionsafhængigt bundfradrag kan dog være administrativt dyrt og udfordrende, da det er nødvendigt at opføre virksomheders produktion. Det kan involvere allokering af virksomhedens CO₂-udledning på tværs af forskelligartede produkter blandt andre administrative udfordringer (Klimarådet, 2022). Anvendes et bundfradrag i stedet for en tilskudsmodel som et virkemiddel til begrænsning af lækage, har det konsekvenser for den økonomiske tilskyndelse til pyrolyse. Uden tilskud er det økonomiske incitament til at anvende pyrolyse lig afgiftssatsen. Da landbruget sandsynligvis gives et afgiftsnedslag - eller på anden vis får reduceret den økonomiske byrde ved CO₂-afgiften - er tilskyndelsen uden tilskud sandsynligvis ikke tilstrækkelig

Klimarådet anbefaler en afgiftssats på 1.500 kr. per ton CO₂e. Det vurderes at en afgift på 1.500 kr. per ton CO₂e giver tilstrækkelig tilskyndelse til reduktioner for at nå 70 procentsmålet i 2030. Det er baseret på en vurdering af de marginale samfundsøkonomiske omkostninger per ton CO₂e for potentielle virkemidler. Derudover er der beregningsmæssigt antaget, at omstillingen skal ske uden omfattende produktionsnedgang af hensyn til klimalovens guidende principper (Klimarådet, 2020). Derfor stemmer Klimarådets afgiftsniveau på 1.500 kr. tæt overens med EGSRs anbefaling af en samlet tilskyndelse til reduktioner på 1.450 kr., i scenarier hvor der tages højde for lækage gennem tilskud til CCS.

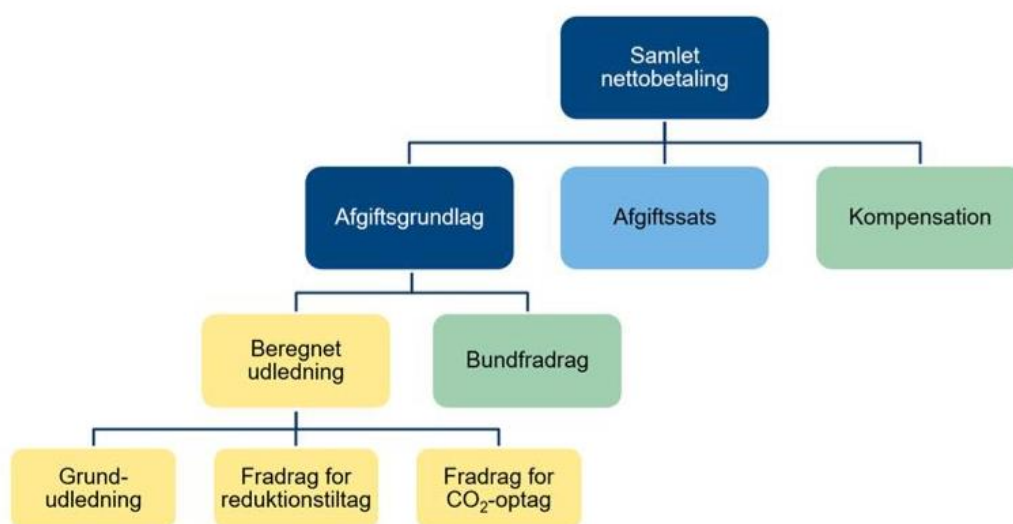
CO₂-afgift i landbruget

Klimarådet kommer også med en række anbefalinger til, hvordan en CO₂-afgift kan implementeres i landbruget. Det er nødvendigt at CO₂-afgiften dækker landbrugets emissioner, da de sammen med udledninger fra LULUCF forventes at udgøre 42% af Danmarks udledninger i 2030 (Klimarådet, 2022). Derudover bliver de samfundsøkonomiske omkostninger tredoblet, hvis landbruget undtages for en CO₂-afgift, og det ville være nødvendigt at fordoble afgiftssatsen i andre sektorer for at nå 70 procentsmålet (Klimarådet, 2022).

En CO₂-afgift i landbruget kræver dog et afgiftsgrundlag på bedriftsniveau, som er mere udfordrende at beregne end i andre sektorer. Størstedelen af landbrugets emissioner stammer fra biologiske processer, som er præget af naturlig variation. I nationale emissionsopgørelser anvendes normtal, gennemsnitsværdier og standard emissionsfaktorer til beregning af emissioner. På national skala er det en rimelig tilgang, da variationer nærmer sig gennemsnittet. På bedriftsniveau vil geografiske variationer og forskelle som følge af driftspraksis i langt højere grad komme til udtryk.

Det skaber potentielt et problem i forbindelse med incitament til reduktioner. Incitamentet til reduktioner i landbruget gennem CO₂-afgift afhænger af, at reduktionspotentialer er omfattet i beregningsgrundlaget for afgiften. Hvis en reduktion ikke indgår i beregningsgrundlaget for afgiften, har landbrugere ikke økonomisk incitament til at investere i reduktionen.

Grundlæggende skitserer Klimarådet nedenstående struktur for en CO₂-afgift i landbruget.



Figur 7: Struktur for CO₂-afgift i landbruget (Klimarådet, 2022).

Bedriftens udledninger beregnes ud fra en grundudledning baseret på aktivitetsdata anvendte reduktionstiltag og optag af CO₂³. Den beregnede udledning pålægges et produktionsafhængigt bundfradrag som beskrevet tidligere. Klimarådet anbefaler som udgangspunkt, at bundfradraget baseres på lækagerisikoen for den specifikke produktion. Lækagerisikoen er en vurdering af, hvor meget udledninger vil stige i udlandet som følge af produktionsnedgang i Danmark. De Økonomiske Råd vurderer, at lækagerisikoen i landbruget er omkring 35%. Det vil sige, at det vurderes, at en reduktion af danske udledninger fra landbruget ved produktionsnedgang leder til stigende udledninger i udlandet svarende til 35% af den danske reduktion (De Økonomiske Råd, 2021).

EGSR fravælger et produktionsafhængigt bundfradrag som metode til lækagebegrænsning, da det vurderes, at det er for administrativt udfordrende at implementere, for de sektorer der er omfattet af første delrapport (EGSR, 2022). Klimarådet vurderer dog, at de administrative udfordringer i forbindelse med et bundfradrag vil være relativt begrænsede i landbruget. På grund af landbrugets relativt simple produktion sammenlignet med andre erhverv, er det lettere at opgøre produktionen på produktenheder (Klimarådet, 2022).

Med en grundudledning - hvor anvendelse af reduktionstiltag og optag af CO₂ modregnes, og der gives et produktionsafhængigt bundfradrag - opnås et afgiftsgrundlag, som pålægges afgiftssatsen. Derudover kan

³ Aktivitetsdata kan være brug af handelsgødning eller antal husdyr. Reduktionstiltag kan være forsuring af gylle eller brug af nitrifikationshæmmere. Optag af CO₂ være brug af biokul eller pløjefri dyrkning

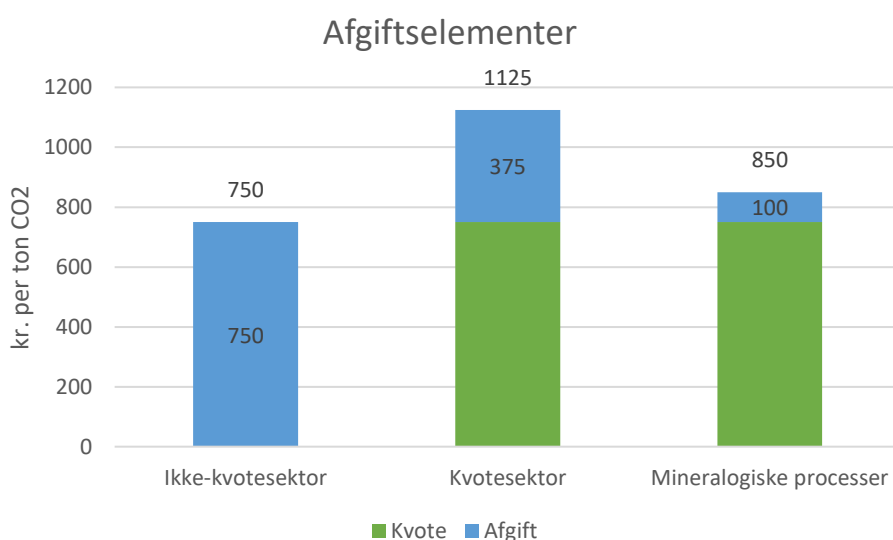
det vælges at give kompensation til landbrugere på grund af faldende jordpriser som følge af afgiften (Klimarådet, 2022). Niveau for bundfradrag og kompensation er en politisk beslutning, som kan justeres for at modvirke produktionsnedgang og lækage på bekostning af samfundsøkonomisk omkostningseffektivitet.

På grund af de tekniske udfordringer ved at beregne klimaaftryk på bedriftsniveau anbefaler Klimarådet, at afgiften indføres i flere tempi. Det er oplagt at indføre afgift med det samme på de dele af landbrugets emissioner, som kan beregnes med stor sikkerhed med den nuværende viden, i stedet for at vente med at implementere en afgift indtil alle landbrugets emissioner kan beregnes med tilstrækkelig sikkerhed.

Landbrugets brug af fossile brændsler er et eksempel på en gruppe emissioner, som kunne pålægges afgift i dag uden større udfordringer (Klimarådet, 2022). Som vidensgrundlaget for beregning af landbrugets emissioner udvides, kan afgiften pålægges flere områder. Med samme tilgang bør reduktionstiltag løbende inkluderes i beregningsgrundlaget for afgiften, i takt med at der skabes pålidelig viden om deres effekter. Effekten af kulstoflagring gennem brug af biokul kan pålideligt beregnes. Derfor er biokul et eksempel på et reduktionstiltag, som kunne implementeres i bedriftsregnskaber allerede i dag.

Regeringens udspil

Regeringen offentliggjorde i april 2022 et udspil til grøn skattereform. Udspillet er baseret på EGSRs (Ekspertgruppen for Grøn Skattereform) anbefalinger om CO₂-afgift i første delrapport. Udspillet omfatter derfor kun de sektorer, der er omfattet af EGSRs første delrapport og ikke landbrug og vejtransport (Regeringen, 2022). Regeringen vælger i udspillet at lægge sig meget tæt op af EGSRs anbefalinger med enkelte mindre forskelle. Der foreslås en afgiftssats på 750 kr. for virksomheder udenfor kvotesektoren, 375 kr. for virksomheder i kvotesektoren - hvilket svarer til en samlet afgiftssats på 1.125 kr. inklusiv kvoteprisen - og 100 kr. for mineralogiske processer, hvilket svarer til en afgiftssats på 850 kr. inklusiv kvoteprisen. Det er illustreret i figuren nedenfor (Regeringen, 2022).

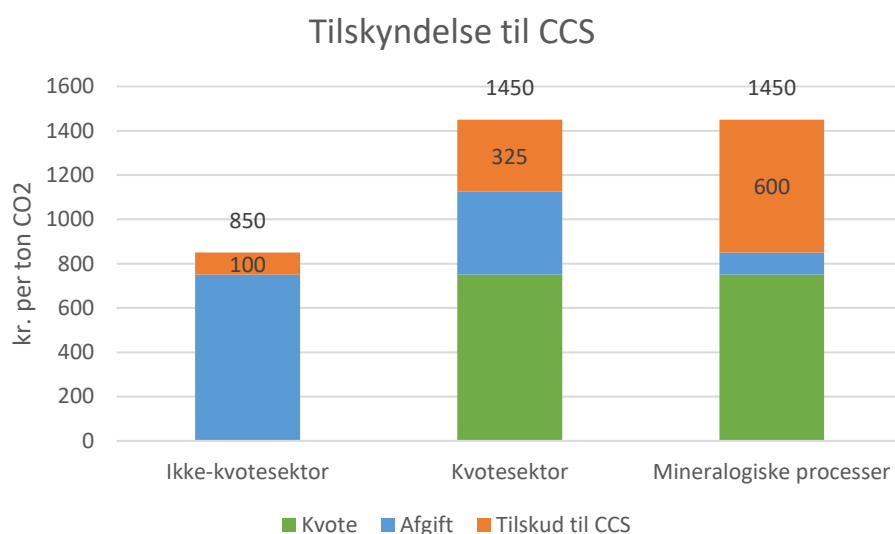


Figur 8: Regeringens udspil til CO₂-afgift (Regeringen, 2022, egen tilvirkning).

Derudover foreslår regeringen en støttepulje til grøn omstilling på 7 mia. kr. Ud af de 7 skal 4 mia. kr. gå til omstillingsstøtte til de virksomheder, som har de største udfordringer i forbindelse med grøn omstilling. De resterende 3 mia. kr. skal gå til tilskud til CCS. Det uddybes ikke yderligere i udspillet, hvordan tilskuddet skal indrettes. Det er derfor forventeligt at tilskuddet bliver struktureret ud fra EGSRs anbefalinger. I udspillet formuleres tilskudssatsen lidt kryptisk som "op mod ca 850 kr. pr ton CO₂". Det antages at "op mod" hentyder til at puljen indrettes som en konkurrencemodell, ligesom det anbefales af EGSR. Med den tilgang konkurrerer virksomheder på pris om at levere de billigste reduktioner gennem CCS.

Det er sværere at fortolke betydningen af "ca 850 kr.". I EGSRs Model 2 er den samlede tilskyndelse til CCS 850 kr. for ikke-kvoteomfattede virksomheder og 1.450 kr. for kvoteomfattede virksomheder og mineralogiske processer. Det er et bredt spænd, hvis det er meningen bag "ca 850 kr.". De to satser i EGSRs Model 2 er baseret på skyggepriser (samfundsøkonomisk pris per ton CO₂-reduktion) på CCS i sektorerne. Det vurderes, at 850 kr. per ton er tilstrækkelig tilskyndelse udenfor kvotesektoren, til at biogasanlæg i højere grad vil udnytte CCS, da de allerede i dag i et vist omfang fanger CO₂ fra biogas for at opgradere til naturgaskvalitet. 1.450 kr. vurderes derimod at være den nødvendige tilskyndelse til CCS i kvotesektoren på store industrielle punktkilder, da det endnu er uprøvet teknologi på stor skala (EGSR, 2022).

Den samlede tilskyndelse på 850 og 1.450 kr. svarer til, at der gives tilskud på 100, 325 og 600 kr. ud over afgiftssatsen for henholdsvis ikke-kvoteomfattede virksomheder, kvoteomfattede virksomheder og mineralogiske processer. Det er illustreret i figuren nedenfor. Det afspejler ønsket om at begrænse lækage særligt i kvotesektoren og for de mineralogiske processer.



Figur 9: Samlet tilskyndelse til CCS i ikke-kvotesektoren, kvotesektoren og for mineralogiske processer (EGSR, 2022, egen tilvirkning).

Delkonklusion

Landbruget er som nævnt ikke omfattet af regeringens udspil. Derfor er det ikke muligt at afgøre endegyldigt, hvordan landbruget vil blive pålagt CO₂-afgift, og hvordan negative emissioner gennem nedpløjning af biokul vil få tilskud.

Det er endnu usikkert om landbruget overhovedet pålægges en afgift på dets ikke-energirelaterede emissioner. Flere spor peger dog i retning af en afgift med et bundfradrag og eventuelt kompensation. For det første på grund af vurderingen af, at de samfundsøkonomiske omkostninger vil tredobles, hvis landbruget går fri for en afgift (Klimarådet, 2022). Sammenlignet med de mineralogiske processer, som kun forventes at udgøre cirka 7% af Danmarks udledninger i 2030, forventes landbrug og LULUCF at udgøre 42% (Klimarådet, 2022). Derfor bliver det betydeligt dyrere at sænke afgiftssatsen markant for landbrugssektoren på samme måde som for de mineralogiske processer. Der er derfor lav sandsynlighed for, at landbruget undtages en afgift.

Derudover anbefaler Klimarådet at strukturere afgiften gennem klimaregnskab på bedriftsniveau med et produktionsafhængigt bundfradrag og eventuel kompensation for faldende jordpriser. EGSR vurderer i første delrapport, at et produktionsafhængigt bundfradrag er for administrativt udfordrende som en alternativ tilgang til lækagebegrænsning, i de sektorer som er omfattet af første delrapport (EGSR, 2022). Det er Klimarådets vurdering at de administrative udfordringer i landbrugssektoren vil være begrænsede på grund af ensartetheden af landbrugets produktion (Klimarådet, 2022). I et interview udført i forbindelse med specialet med Peter Birch Sørensen - professor ved Økonomisk Institut på Københavns Universitet og medlem i EGSR - nævnte Peter Birch, at et bundfradrag er en af de centrale tilgange, som ekspertgruppen undersøger til implementering af CO₂-afgift i landbruget.

Hvordan det endelige afgiftsniveau bliver for landbruget, vil afhænge af en politisk afvejning mellem omkostningseffektivitet og hensyn til klimalovens andre guidende principper som lækagebegrænsning, erhvervsudvikling og social sammenhængskraft. Afvejningen vil i begge retninger få langt større konsekvenser, sammenlignet med det specifikke hensyn der tages til mineralogiske processer i regeringens udspil. På grund af den langt større udledning fra landbrugssektoren vil de samfundsøkonomiske omkostninger blive stærkt påvirket af et højt bundfradrag. Samtidig udgør landbruget et større erhverv, og eksport fra landbruget er langt større end fra de få virksomheder indenfor mineralogiske processer. En høj afgift risikerer at bidrage til større social splittelse mellem by og land, og betydelig produktionsnedgang i landbruget vil ikke være i overensstemmelse med den danske ambition om at være et forgangsland. Det er altså ikke muligt at sige noget meningsfuldt i skrivende stund omkring afgiftssatsen for CO₂-afgiften i landbruget. For at have et beregningsmæssigt udgangspunkt modelleres scenarier senere med en nettoafgiftssats på 750, 375 og 100 kr. Det afspejler afgiftssatsen i de forskellige sektorer i første delrapport og de forskellige afvejninger af omkostningseffektivitet og hensyn til klimalovens andre guidende principper.

Det er også uklart, hvilken tilgang der anvendes, til begrænsning af lækage i landbruget. Der er to sandsynlige tilgange. Klimarådet anbefaler et produktionsafhængigt bundfradrag. Det har konsekvenser for den økonomiske tilskyndelse til anvendelse af biokul. Med den tilgang vil den økonomiske tilskyndelse være lig afgiftssatsen, efter der gives bundfradrag og eventuel kompensation. Derfor vil tilskyndelsen til negative udledninger i landbruget sandsynligvis blive betydeligt lavere end tilskudssatsen på 850 kr. per ton i regeringens udspil. Det er problematisk med henblik på samfundsøkonomisk omkostningseffektivitet. For at opnå en omkostningseffektiv omstilling bør der gives ensartet tilskyndelse til reduktioner på tværs af sektorer. Pyrolyse vurderes at have den laveste skyggepris (samfundsøkonomisk pris per ton CO₂-

reduktion) blandt de teknologiske virkemidler til negative udledninger (Klimarådet, 2022). Derfor er det hensigtsmæssigt at give incitament til pyrolyse på samme niveau som andre negative udledninger for at opnå de billigste reduktioner først.

En alternativ tilgang er at give tilskud til negative udledninger i landbruget gennem en tilskudspulje på samme måde som i regeringens udspil. Der kan argumenteres for, at puljen bør være fælles for negative emissioner på tværs af sektorer ud fra hensyn til omkostningseffektivitet. Med den tilgang vil pyrolyse sandsynligvis udkonkurrere CCS i industri og mineralogiske processer på grund af den lavere skyggepris. Det underminerer lækagebegrænsningen i disse sektorer, som er motivationen for at etablere tilskuddet til at begynde med. Derfor er det hensigtsmæssigt at oprette en separat tilskudspulje til negative emissioner i landbruget. Med samme tilgang som anvendes i EGSRs første delrapport, skal den samlede tilskyndelse til negative emissioner op på 1.000 kr. per ton CO₂ ud fra en vurdering af skyggeprisen på pyrolyse (Klimarådet, 2022).

Bedriftsregnskaber

For at kunne implementere en CO₂-afgift i landbruget er det nødvendigt at opgøre den enkelte bedrifts klimaaftryk ud fra princippet *forureneren betaler*. Det udgør en større udfordring end i mange andre sektorer, da størstedelen af landbrugets klimaaftryk stammer fra biologiske processer (Nielsen et al., 2021). Det omfatter særligt udledning af lattergas fra dyrkning af landbrugsjord, håndtering af gylle og husdyrfordøjelse (Nielsen et al., 2021). Klimaaftrykket af de biologiske processer er mere udfordrende at opgøre end eksempelvis forbrug af fossile brændsler, da de er præget af naturlig variation.

Landbrugsstyrelsen har igangsat forskningsprogrammet *Bedriftsudledningsprogrammet* (Landbrugsstyrelsen, 2022). Programmet skal bidrage til at forbedre vidensgrundlaget for opgørelse af klimaaftryk på bedriftsniveau. Der udbydes i første fase en pulje på cirka 130 mio. kr. i 2022 til forskning i landbrugets klimateffekter. I 2025 igangsættes anden fase, hvor vidensgrundlaget samles til det endelige reguleringsgrundlag for CO₂-afgiften i landbruget.

Den endelige metode til opgørelse af klimaaftryk på bedriftsniveau er altså ikke defineret endnu. I dette projekt er det nødvendigt at have et beregningsmæssigt udgangspunkt for at vurdere, hvordan CO₂-afgiften kan skabe incitament til anvendelse af biokul i landbruget. Med udgangspunkt i et samarbejde med en mælkebedrift fra Nordjylland, opgøres bedriftens klimaaftryk derfor med tre eksisterende værktøjer i stedet. De tre værktøjer er *Klimarådets værktøj til opgørelse af drivhusgasser på den enkelte bedrift*, *SolAgro* og *Cool Farm Tool* (Klimarådet, 2016; Bochu et al., 2011; Cool Farm Alliance, 2022). Ved at anvende flere værktøjer skabes indtryk af variationen mellem resultaterne. På den måde er det muligt at vurdere usikkerheden ved at anvende resultaterne som proxy for det endelige reguleringsgrundlag for CO₂-afgiften.

Ingen af værktøjerne inkluderer metode til beregning af påvirkningen ved anvendelse af pyrolyse. Derfor er det nødvendigt at supplere værktøjerne med metoder specifikke for pyrolyse. Til det formål anvendes modeller for metanemissioner fra opbevaring af kvæggylle fra Aarhus Universitet og metode til beregning af kulstoflagring (Olesen et al., 2020; EBC, 2020).

De tre værktøjer anvendes til at beregne klimaaftrykket af mælkebedriften i Nordjylland, der udgør case i dette projekt. Bedriften består af cirka 3.000 kvæg og 920 hektar landbrugsjord med cirka 75 hektar humusjord. Størstedelen af arealet er græs- og kløvermark, som anvendes til græsning. På det resterende areal dyrkes majs og byg til foder, som suppleres med importeret soja. Bedriften producerer omkring 12.500 ton mælk om året, og al gylle fra bedriften leveres til et biogasanlæg og anvendes efterfølgende til gødning.

Værktøjer

Klimarådets værktøj er udviklet i forbindelse med rapporten *Effektive veje til drivhusgasreduktion i landbruget* (Klimarådet, 2016). Værktøjet er udviklet som en demonstration af muligheden for at lave klimaregnskaber på bedriftsniveau. Der tages i høj grad udgangspunkt i de metoder, der anvendes til opgørelse af landbrugets emissioner i de nationale emissionsopgørelser. Aktivitetsdata som antal dyr, race, stalddtype, afgrøder, gødskning mm. anvendes som inputdata i værktøjet og omsættes til et klimaregnskab gennem anvendelse af normtal og standard emissionsfaktorer (Klimarådet, 2016).

Værktøjerne SolAgro og Cool Farm Tool anvender lignende tilgange (Bochu et al., 2011; Cool Farm Alliance, 2022). De tre værktøjer adskiller sig kun marginalt fra hinanden med hensyn til detaljer omkring, hvordan data indtastes, og hvordan resultater opgøres.

Alle værktøjer indeholder følgende elementer relevante i forbindelse med en mælkebedrift:

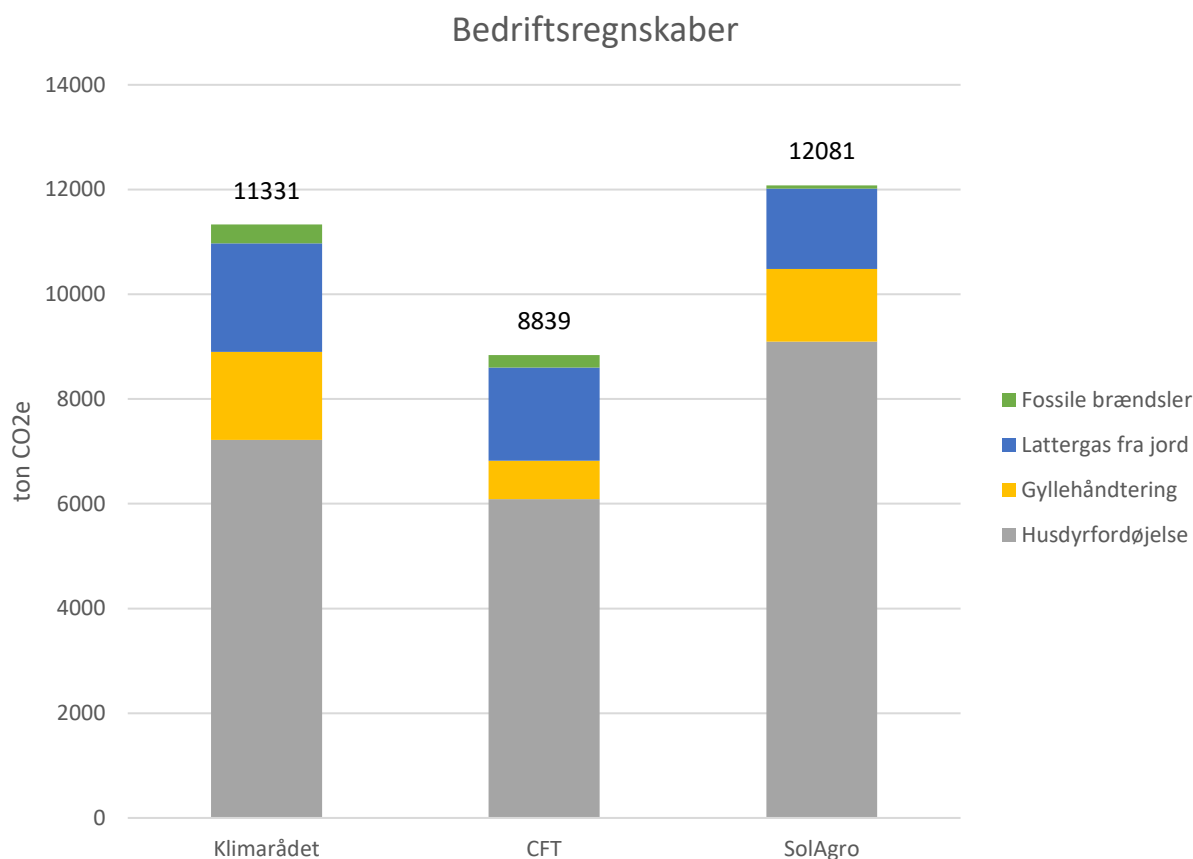
- Antal kvæg
 - Type (malkekæg, kvier, tyre mm.)
 - Race (tung race, jersey)
 - Staldtype (sengestald eller dybstrøelse, fast gulv eller spalter mm.)
 - Foderplan
- Gyllehåndtering
 - Lagringsmetode
 - Biogasbehandling
- Gødningsforbrug
 - Husdyrgødning
 - Handelsgødning
- Afgrøder
 - Type
 - Areal
 - Jordbundstype
- Brændstofforbrug

ESGreen Tool

Ud over de tre udvalgte værktøjer er det desuden forsøgt at inkludere værktøjet ESGreen Tool - udviklet af SEGES Innovation i samarbejde med Økologisk Landsforening (SEGES, 2022). ESGreen Tool udkom i første iteration i begyndelsen af 2022 og er det mest fremtrædende værktøj i Danmark. ESGreen Tool henter automatisk bedriftens data fra eksisterende databaser som eksempelvis gødningsregnskaber. Desværre kunne værktøjet ikke hente data for bedriften, som udgør case i dette projekt på grund af en teknisk fejl. Bedriften er fordelt på flere registreringsnumre, hvilket værktøjet ikke kan tage højde for. Gennem deltagelse i en af *Landbrugets Klimadage* arrangeret af SEGES Innovation er der nået kontakt til udviklingsholdet bag værktøjet. De kunne desværre bekræfte, at det ikke er muligt at anvende værktøjet på bedriften, men at der arbejdes på at overkomme udfordringen i kommende iterationer. Til arrangementet blev værktøjet præsenteret og arbejdet med i workshops. Ud fra erfaringer med værktøjet fra arrangementet vurderes det, at ESGreen Tool ikke adskiller sig særligt fra de øvrige værktøjer. Det kan naturligvis ikke bekræftes kvantitativt.

Resultater

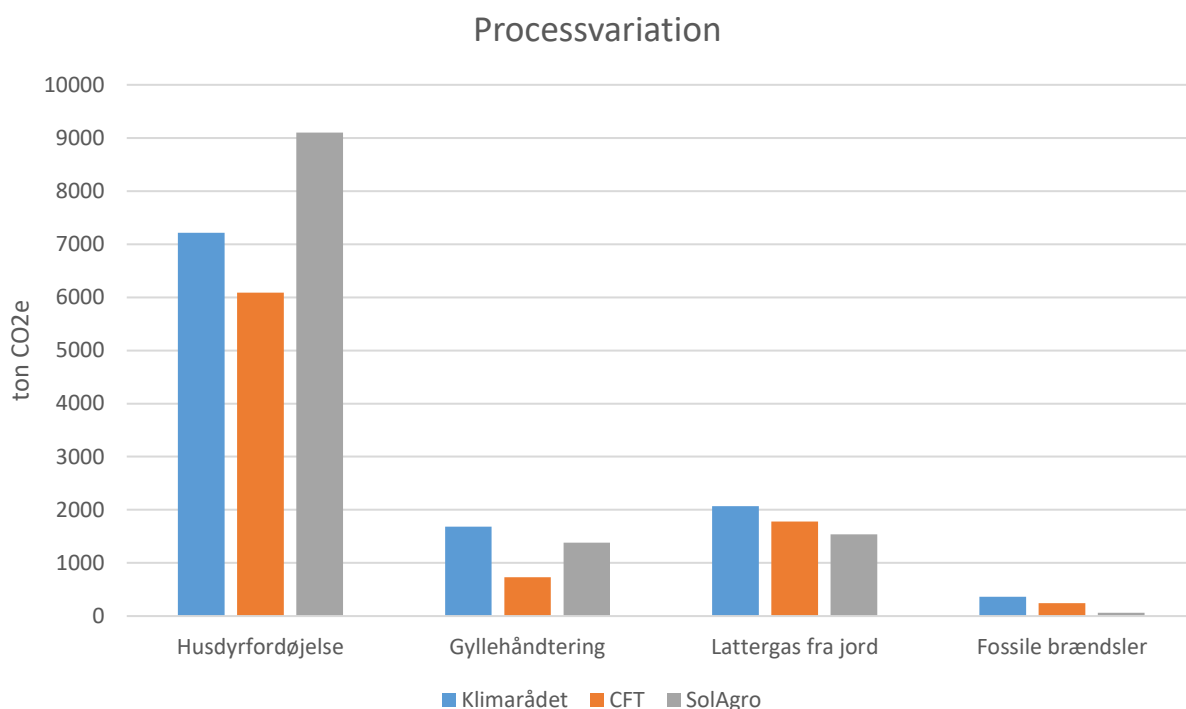
I stedet er der udført klimaregnskaber for bedriften med de tre inkluderede værktøjer. Den nødvendige data er indtastet i alle værktøjer i samarbejde med bedriftsejeren. I figuren nedenfor er resultater fra de tre værktøjer illustreret. Resultater er opgjort i kategorierne husdyrfordøjelse, gyllehåndtering, lattergas fra jord og fossile brændsler.



Figur 10: Resultater fra beregning af klimaaftryk med Klimarådets værktøj, SolAgro og Cool Farm Tool.

Bedriftens klimaaftryk beregnes til cirka 11.000, 9.000 og 12.000 ton CO₂e med henholdsvis Klimarådets værktøj, Cool Farm Tool og SolAgro. Det gennemsnitlige aftryk er 10.750 ton CO₂e. Husdyrfordøjelse udgør i alle værktøjer størstedelen af aftrykket med mellem 65% og 75%. Derefter udgør lattergas fra jord og gyllehåndtering størstedelen af det resterende aftryk, mens aftrykket fra fossile brændsler i alle værktøjer er ubetydeligt.

Nedenfor er de samme resultater opgjort med forskelle mellem aftrykket af de enkelte processer fremhævet. Cool Farm Tool vurderer aftrykket forbundet med kvægbestanden markant lavere end de to andre værktøjer. Aftrykket af husdyrfordøjelse vurderes med Cool Farm Tool cirka 30% lavere end resultatet med SolAgro, og aftrykket af gyllehåndtering vurderes cirka 60% lavere end resultatet med Klimarådets værktøj.



Figur 11: Variation mellem værktøjer opgjort på processer.

Det kunne være interessant at undersøge i detaljer, hvordan de tre værktøjer når frem til forskellige resultater. I dette projekt er det dog mindre relevant, da værktøjerne kun anvendes som proxy for det endelige reguleringsgrundlag for CO₂-afgiften. Derfor udelades en dybere undersøgelse og sammenligning af værktøjernes beregningsmetoder.

Det er nødvendigt at fremhæve, at resultater fra værktøjerne ikke nødvendigvis er retvisende i forhold til det endelige reguleringsgrundlag for CO₂-afgiften. Til et webinar med Landbrugsstyrelsen omkring *Bedriftsudledningsprogrammet* blev det pointeret af styrelsen, at der er grundlæggende forskel på værktøjer, der anvendes frivilligt af landbrugere og rådgivningsvirksomheder, og værktøjer der skal udgøre et reguleringsgrundlag for en afgift. Der er behov for en mere konservativ tilgang og større sikkerhed omkring resultater, for et værktøj der udgør et reguleringsgrundlag end et frivilligt værktøj. Alle tre værktøjer anvendt i dette projekt er frivillige værktøjer. Når resultater anvendes som proxy for det endelige reguleringsgrundlag, må det ses i lyset af Landbrugsstyrelsens kommentar.

Biokul tilføjelser

Ingen af de anvendte værktøjer inkluderer metoder til at beregne påvirkningen på bedriftens klimaaftryk ved anvendelse af biokul. Derfor er det nødvendigt at supplere værktøjerne med modeller af de påvirkede processer. Det omfatter gyllehåndtering og kulstoflagring. Ved pyrolyse separeres gyllen i en væske- og en fiberfraktion. Fiberfraktionen stabiliseres i form af biokul. Dermed ophører metan- og lattergasemissioner fra fraktionen. Biokullet er svært nedbrydeligt, og kulstofindholdet kan derfor lagres i hundredevis til

tusindvis af år (Henriksen et al, 2019). Væskefraktionen opbevares, indtil den udbringes på marken som gødning. Ved opbevaring sker reducerede metan- og lattergasemissioner (Holly, et al., 2017).

Denne tilgang, hvor værktøjer suppleres med moduler for at tage højde for nye virkemidler, er sandsynligvis repræsentativ for, hvordan det endelige reguleringsgrundlag bliver implementeret. Klimarådet anbefaler, at frivillige moduler kan tilføjes til et værktøj, for at tillade landbrugere at dokumentere effekten af reduktionstiltag (Klimarådet, 2016). SEGES innovation anvender samme tilgang. ESGreen Tool vil løbende blive udvidet med nye moduler for at gradvist forbedre værktøjet.

I de følgende afsnit beskrives det, hvordan alternative modeller for metan- og lattergasemissioner samt kulstoflagring anvendes til at supplere værktøjerne. Denne tilgang kræver, at de tilsvarende processer kan fjernes fra værktøjernes resultater for at erstatte dem med nye modeller. Konkret er det nødvendigt at metan- og lattergasemissioner opgøres separat i resultaterne og fordelt mellem gylle og dybstrøelse. Kun Klimarådets værktøj opgør resultater i dette detaljeniveau. Derfor anvendes Klimarådets værktøj som udgangspunkt for bedriftsregnskaberne. Metan- og lattergasemissioner fra gylle erstattes med nye modeller, og der tilføjes kulstoflagring. Emissioner fra dybstrøelse, husdyrfordøjelse, lattergas fra jord og fossile brændsler påvirkes ikke af pyrolyse og modelleres med Klimarådets værktøj.

Metan

For at modellere effekten på metanemissioner fra opbevaring ved omdannelse af gylle til biokul er det nødvendigt at anvende en metode, der kan beskrive udviklingen af emissioner over tid. Alle de udvalgte værktøjer anvender IPCC standard emissionsfaktorer til beregning af metanemissioner fra gyllehåndtering. Med den tilgang beregnes årlige emissioner ud fra antal dyr. Ved pyrolyse undgås emissioner fra gylle efter omdannelse til biokul (Henriksen et al., 2019). For at kunne modellere denne effekt er det nødvendigt at anvende en tidsafhængig model til beregning af opbevaringsemissioner. Til det formål anvendes metode til beregning af opbevaringsemissioner fra kvæggylle fra Aarhus Universitet (Olesen et al., 2020).

Modellen består af følgende ligning:
$$F_t = e^{(\ln A' - \frac{E_a}{RT})}$$

Hvor:

F_t : er metanproduktionsraten (g CH₄ kg⁻¹ VS h⁻¹)

$\ln A'$: er en substratspecifik karakteriseringsfaktor (g CH₄ kg⁻¹ VS h⁻¹)

E_a : er aktiveringsenergien for processen (J mol⁻¹)

R : er den universelle gaskonstant

T : er temperaturen (K)

Modellen beskriver udviklingen af metanemissioner på timebasis som en funktion af temperatur T og en karakteriseringsfaktor for gasproduktionspotentiallet af det modellerede substrat $\ln A'$.

Datagrundlag

Baseret på data fra andre studier af gylleemissioner beregner Olesen et al. gennemsnitlige lnA' værdier for kvæggylle og biogasbehandlet gylle til henholdsvis $29,2 \pm 0,1$ og $27,9 \pm 0,4$ g CH₄ kg⁻¹ VS h⁻¹. Da der ikke er beregnet lnA' værdier for væskefraktionen af biogasbehandlet gylle, anvendes alternative data til at bestemme emissioner fra væskefraktionen. Aktiveringsenergien E_a er bestemt eksperimentelt til 81 kJ mol⁻¹ (Olesen et al., 2020).

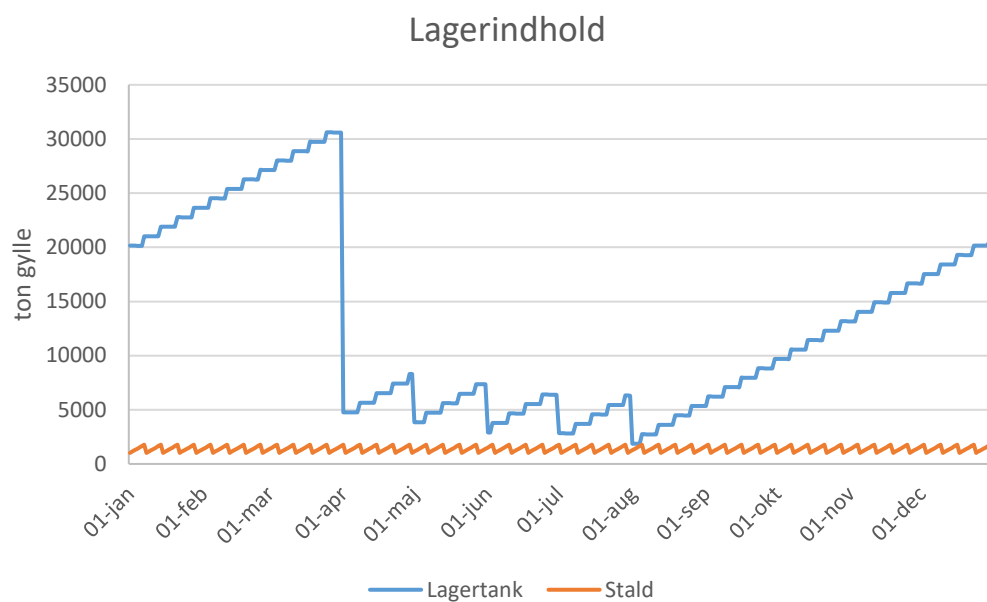
Temperaturen i stalden antages at være 13,8 °C, og temperaturen i lagertanken sættes lig månedlige middeltemperaturer fra DMI (Olesen et al., 2020; DMI, 2022).

Måned	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
Middeltemperatur °C	1.6	1.5	3.3	7.2	11.4	14.5	16.9	16.9	13.6	9.4	5.5	2.8

Tabel 1: Anvendte månedlige middeltemperaturer (DMI, 2022, egen tilvirkning).

Modellen kræver derudover data på gyllemængder og indhold af VS (volatile solids, flygtige bestanddele). Mængden af gylle produceret på bedriften er bestemt ud fra normtal for gennemsnitlig gylleproduktion og baseret på data fra bedriften (Lund, 2018). Til bestemmelse af VS-indhold anvendes normtal for tørstofindhold, og det antages at 80% tørstoffet er VS (Olesen et al., 2020). Derudover modregnes tab af VS ved afgasning af metan og CO₂.

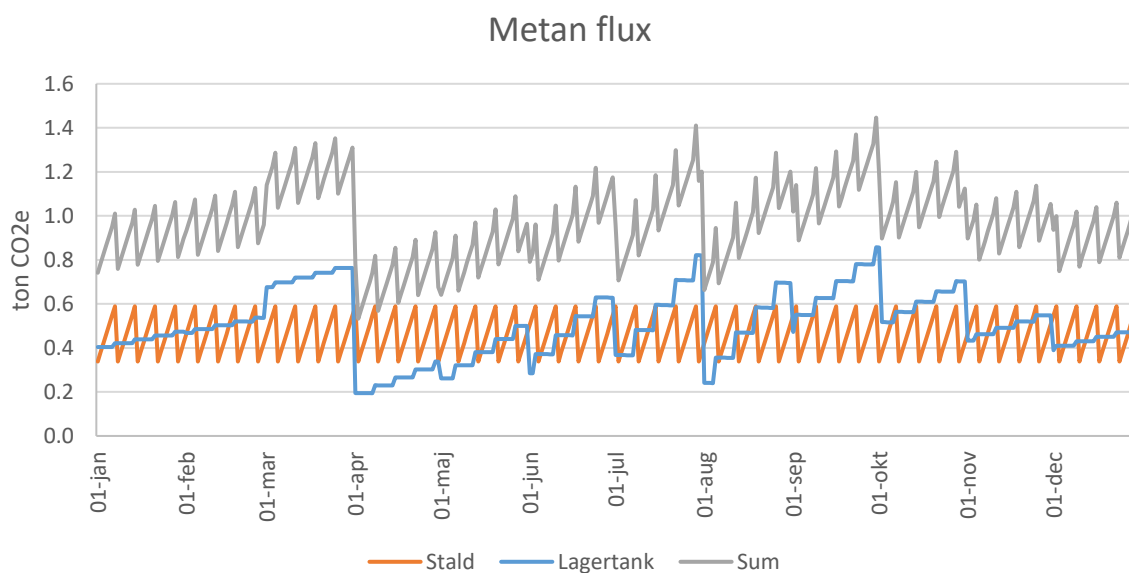
Gyllens skæbne er bestemt ud fra interview med bedriftsejeren. Kvæggylle opsamles under stalden, hvor den opbevares indtil udslusning. Én gang ugentligt henter en vognmand gylle fra bedriften. Cirka halvdelen af gyllen i stalden hentes direkte fra stalden og leveres til biogasanlægget. Ved samme lejlighed tilbageleveres en tilsvarende mængde afgasset gylle til lagertanken. Det vil sige, at udelukkende afgasset gylle opbevares i lagertanken. Rå gylle udsluses direkte til vognmanden. Den 1. april udbringes cirka 60% af årets gylle. Derefter udbringes de resterende 40% over fire udbringninger i løbet af sommeren. I modellen antages det at ske den 1. i maj, juni, juli og august. Indholdet i stald og lagertank over sæsonen er illustreret i figuren nedenfor.



Figur 12: Indhold af gylle i stald og lagertank over sæsonen.

Resultater

Med udgangspunkt i ovenstående data anvendes modellen til at beregne metanemissioner fra bedriftens gyllehåndtering. Nedenfor ses den daglige flux af metan fra bedriften. Det antages, at der ikke opstår metanemissioner fra gyllen, efter den udbringes på marken (Holly et al., 2017).



Figur 13: Daglig flux af metan fra opbevaring af gylle i stalden, afgasset gylle i lagertank og summen af metanemissioner fra opbevaring.

Metanemissioner fra stalden stiger ugentligt med mængden af gylle i stalden, indtil gylle hentes af vognmanden og leveres til biogasanlægget. På grund af den konstante temperatur i stalden er der ingen variation af emissioner over året. Emissioner per ton gylle er generelt højere i stalden end i lagertanken. Det er tydeligt, hvis man ser på Figur 12 overfor Figur 13. Langt større mængder gylle opbevares i lagertanken end i stalden, men resulterer i lavere metanemissioner. Det skyldes at rå gylle indeholder en højere andel VS og har et højere gaspotentiale end afgasset gylle (Olesen et al., 2020).

Ud fra modellens resultater udledes samlet 353 ton CO₂e fra gyllen i form af metan. Det er cirka 25% lavere end resultatet med Klimarådets værktøj, der beregner aftrykket af metanemissioner fra opbevaring af gylle til 465 ton CO₂e med IPCC metoder. Det ville være optimalt at sammenligne resultater på tværs af de tre anvendte værktøjer, men kun med Klimarådets værktøj opgøres resultater i et detaljeniveau, der tillader sammenligning. Ud af de 352 ton CO₂e stammer 48% fra stalden og 52% fra lagertanken. Det antages, at metanemissioner fra lagertanken reduceres med 60% ved separation i væske- og fiberfraktion og stabilisering af fiberfraktionen gennem pyrolyse (Holly et al., 2017).

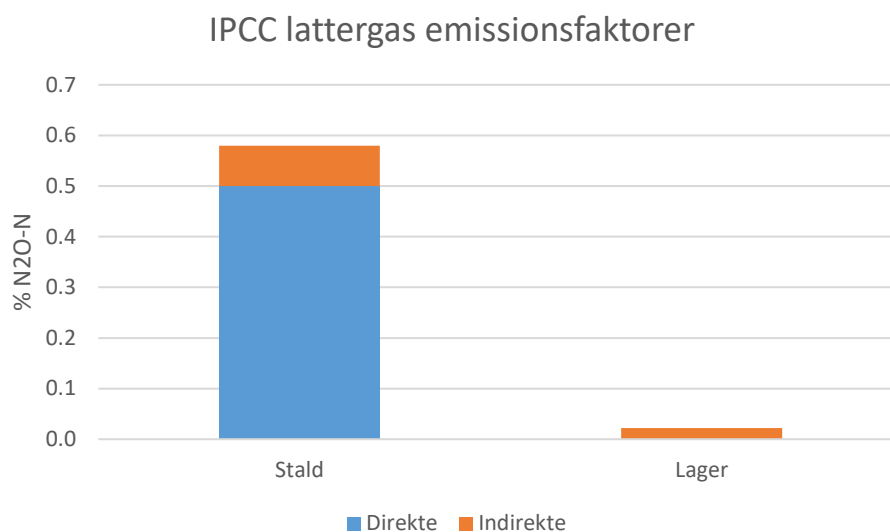
Resultatet vurderes at være præget af høj usikkerhed. Det har ikke været muligt at tage højde for den afgassede gylles temperatur ved tilbagelevering. Bedriftsejeren har bekræftet, at afgasset gylle leveres ved 50 °C. Afhængigt af mængden af gylle i lagertanken ved levering kan det medføre markant højere metanemissioner, indtil gyllen er kølet til omgivelsestemperaturen.

Modellen er derudover meget følsom overfor små ændringer i karakteriseringsfaktoren *lnA*. Den anvendte model er en videreudvikling af en tidligere udgave publiceret af Søren O. Petersen et al. (2016). Petersen et al. fraråder på grund af følsomheden overfor *lnA* brug af modellen til bestemmelse af metanemissioner fra generisk gylle. Det anbefales i stedet at anvende modellen udelukkende med udgangspunkt i eksperimentelt opnåede *lnA*-værdier, for det specifikke substrat der modelleres (Petersen et al., 2016). Olesen et al. forsøger at forbigå denne udfordring ved at justere modellen for at anvende data fra flere studier af gylleemissioner til statistisk bestemmelse af gennemsnitlige *lnA*-værdier.

For at vurdere følsomheden ved *lnA* på de producerede resultater er metanemissioner beregnet med alternative *lnA*-værdier fra datasættet publiceret af Olesen et al. Ved anvendelse af lave og høje *lnA*-værdier fra det statistiske datasæt varierer de beregnede metanemissioner fra opbevaring af gylle med -50% til +93%. Modellens resultater må ses i lyset af denne usikkerhed.

Lattergas

Ligesom metanemissioner er det nødvendigt at vurdere, hvordan lattergasemissioner fra bedriftens gylle påvirkes ved pyrolyse. Lattergasemissioner fra fiberfraktionen ophører efter stabilisering ved pyrolyse. Derfor sker kun emissioner fra stalden og fra væskefraktionen ved pyrolyse af fiberfraktionen. Ingen af de anvendte værktøjer opgør resultater i et detaljeniveau, der tillader differentiering mellem emissioner fra stald og lagertank. Derfor anvendes emissionsfaktorer anvendt i de danske nationale emissionsopgørelser som udgangspunkt for at vurdere fordelingen af emissioner fra de to kilder (Kristensen & Mogensen, 2011).



Figur 14: Fordeling mellem stald og lagertank af N₂O-N kilder med IPCC metoder (Kristensen & Mogensen, 2011, egen tilvirkning).

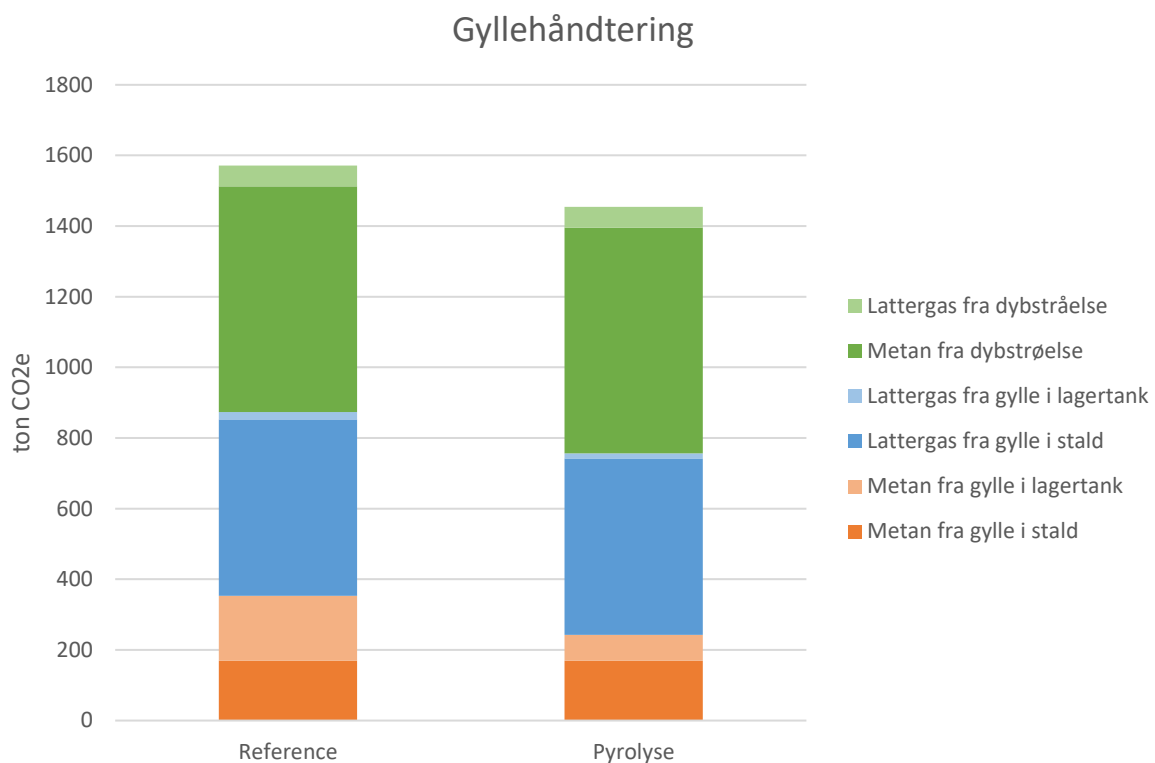
I figuren ovenfor er fordelingen af lattergasemissioner mellem stald og lagertank illustreret. 96% af kvælstof der omdannes til lattergas stammer fra stalden og kun 4% fra lagertanken. Med udgangspunkt i resultater fra Klimarådets værktøj svarer det til, at 499 ton CO₂e udledes fra stalden og 21 ton CO₂e udledes fra lagertanken. Det antages, at lattergasemissioner fra lagertanken reduceres med 30% ved separation i væske- og fiberfraktion og stabilisering af fiberfraktionen gennem pyrolyse (Holly et al., 2017).

Ud over påvirkningen på lattergasemissioner fra opbevaring kan anvendelse af pyrolyse påvirke lattergasemissioner fra jord som følge af ændret gødningspraksis. Lattergasemissioner fra jord afhænger af den totale mængde kvælstof tilført jorden. Landbrugere gøder generelt med den maksimale mængde kvælstof indenfor lovens begrænsninger. Ved anvendelse af biokul ændres sammensætningen af kvælstofkilder tilført jorden. På grund af forskelle mellem udnyttelsesprocenter⁴ kan det have betydning for den total mængde kvælstof og derfor lattergasemissioner. Betydningen af dette for bedriftens klimaaftryk er undersøgt, og påvirkningen vurderes ubetydelig. Ved pyrolyse af substrater med en lavere udnyttelsesprocent - som eksempelvis spildevandsslam - kan ændringerne i udbringning af kvælstof have større betydning.

Gyllehåndtering opsamling

Med tilgangen beskrevet i de forrige afsnit kan påvirkningen ved pyrolyse på emissioner fra gyllehåndtering illustreres. De samlede emissioner fra gyllehåndtering omfatter både gylle og dybstrøelse. Emissioner fra dybstrøelse er beregnet med Klimarådets værktøj.

⁴ Udnyttelsesprocenter bruges til at beregne, hvor meget kvælstof landbrugeren skal opføre i gødningsregnskaber. Eksempelvis er udnyttelsesprocenten for handelsgødning 100%, for kvæggylle 75% og for biogasbehandlet gylle 85%.



Figur 15: Påvirkningen ved pyrolyse på emissioner fra gyllehåndtering.

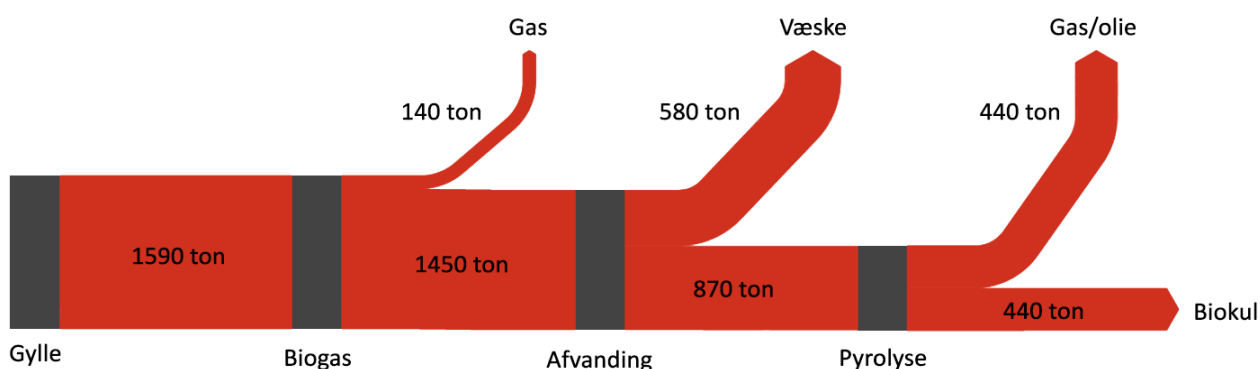
Aftrykket af bedriftens nuværende gyllehåndtering vurderes at være 1.570 ton CO₂e ved anvendelse af alternative metoder til beregning af metan og lattergasemissioner. Det stemmer udmærket overens med resultatet fra Klimarådets værktøj, der vurderer aftrykket til 1.680 ton CO₂e. Forholdet mellem metan og lattergas fra lagertanken stemmer også fint overens med resultater fra Holly et al. (2017). Aftrykket af dybstrøelse fylder meget i opgørelsen. Det skyldes IPCC beregningsmetoden der anvendes i Klimarådets værktøj, hvor metanemissioner er baseret på tørstofindhold. Da dybstrøelse har et højere tørstofindhold end gylle, bliver aftrykket relativt stort sammenlignet med gylle, på trods af at det udgør en mindre andel af den samlede gyllemængde på bedriften.

Ved anvendelse af pyrolyse reduceres metan- og lattergasemissioner fra gylle i lagertanken med cirka 57%. Ud af det samlede aftryk af gyllehåndtering er reduktionen beskeden på cirka 8%. Vurderes effekten per ton gylle, udgør reducerede opbevaringsemissioner en større andel af effekten ved pyrolyse. Opbevaringsemissioner fra dybstrøelse er upåvirket ved anvendelse af pyrolyse, da det antages at udelukkende gylle pyrolyseres. Det er oplagt at øge bedriftens udbytte ved pyrolyse ved også at anvende dybstrøelsen til pyrolyse.

Kulstoflagring

Ud over opbevaringsemissioner påvirkes reduceres bedriftens klimaaftryk ved anvendelse af biokul da kulstof lagres på landbrugsjorden. Til beregning af kulstoflagringspotentiale anvendes normtal på gylleproduktion og tørstofindhold i kombination med data på antal kvæg fra bedriften.

Bedriften producerer årligt cirka 3.750 ton tørstof i form af gylle. Det antages at kvæggylle har et kulstofindhold på 424 mg g^{-1} tørstof svarende til 1,590 ton kulstof. Efter biogasbehandling reduceres kulstofindholdet til 388 mg g^{-1} tørstof (Thomsen et al., 2012). Medregnet et tab på 40% kulstof ved afvanding leveres 870 ton kulstof til pyrolyse efter biogasbehandling (Hamelin et al. 2010). Der tages ikke højde for, at biogasanlægget blander gylle med andre substrater. 50% af kulstoffet ender i biokul og den resterende andel ender i gas- og oliefraktioner. Det vil sige at det producerede biokul indeholder 440 ton kulstof. Det er kulstoflagringspotentiallet, der anvendes som supplement til de anvendte værktøjer. Flow af kulstof gennem systemet er illustreret i figuren nedenfor.

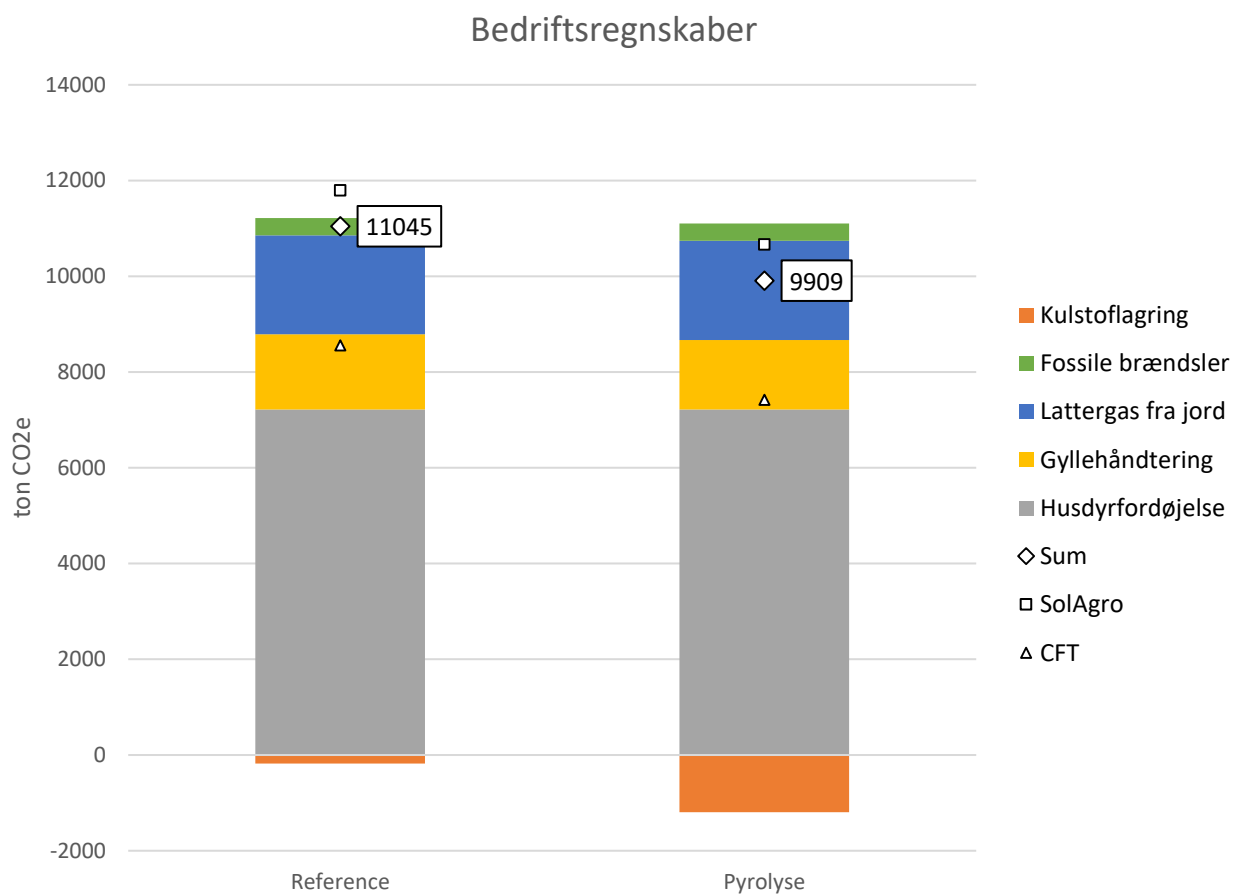


Figur 16: Flow af kulstof gennem det modellerede system.

For at reference- og pyrolysescenarier er sammenlignelige, er det nødvendigt at tilføje kulstoflagring ved udbringning af ubehandlet gylle til resultaterne. Til det formål antages det, at 3% af kulstofindholdet i den biogasbehandlede gylle langtidslagres ved anvendelse som gødning (Thomsen, 2021). Det svarer til 48 ton kulstof eller 175 ton CO_2e .

Resultater

Med de ovenstående tilføjelser til værktøjerne er det muligt at beregne bedriftens aftryk med og uden anvendelse af pyrolyse. Beregningerne er baseret på, at al gylle leveres til pyrolyse efter biogasbehandling, og biokul der produceres af gyllen leveres tilbage til bedriften. Det er tilsvarende den normale praksis omkring levering af gylle til biogas. I figuren nedenfor er resultaterne illustreret. Som nævnt indledningsvist i afsnittet anvendes Klimarådets værktøj som udgangspunkt for at beregne aftrykket af processer, der ikke påvirkes af pyrolyse. Alternative sumpunkter på figuren viser variationen ved anvendelse af henholdsvis SolAgro og Cool Farm Tool. De er beregnet ud fra forskellen mellem resultater fra værktøjerne uden brug af alternative metoder til vurdering af effekten af pyrolyse. Den reduktionen ved anvendelse af biokul vil være den samme uafhængigt af valg af værktøj.



Figur 17: Bedriftsregnskab med og uden påvirkningen ved anvendelse af biokul. Alternative sumpunkter viser variation forbundet med valg af værktøj.

Bedriftens aftryk reduceres med cirka 1.100 ton CO₂e eller 9% som følge af øget kulstoflagring gennem anvendelse af biokul og reducerede opbevaringsemissioner fra gylle. Der tilføjes 440 ton kulstof i form af biokul til bedriftens jord. Det svarer til cirka 840 ton biokul, hvis der antages 75% kulstof og 30% fugtindhold. Hvis biokul kun anvendes på det dyrkede areal på 375 hektar, udbringes omkring 2,2 ton biokul per hektar om året. Der er potentiale for at øge bedriftens udbytte ved pyrolyse ved at pyrolyse halm og dybstrøelse ud over gylle.

Resultater anvendes som udgangspunkt for at beregne bedriftens økonomiske byrde ved implementering af CO₂-afgiften i det følgende afsnit.

Økonomisk incitament til pyrolyse

I dette afsnit undersøges det økonomiske incitament til pyrolyse under CO₂-afgiften. I første afsnit *Økonomisk model* opstilles en række scenarier for, hvordan CO₂-afgiften kan implementeres, og den økonomiske byrde for bedriften beregnes med udgangspunkt i resultater fra bedriftsregnskaber. Derudover beregnes besparelsen ved anvendelse af pyrolyse i de forskellige scenarier.

I det følgende afsnit *Diskussion af forretningsmodeller* undersøges det, hvordan den økonomiske gevinst ved pyrolyse gennem reduceret afgiftssats og salg af carbon credits kan fordeles mellem aktører, så der skabes incitament til reduktioner i landbruget.

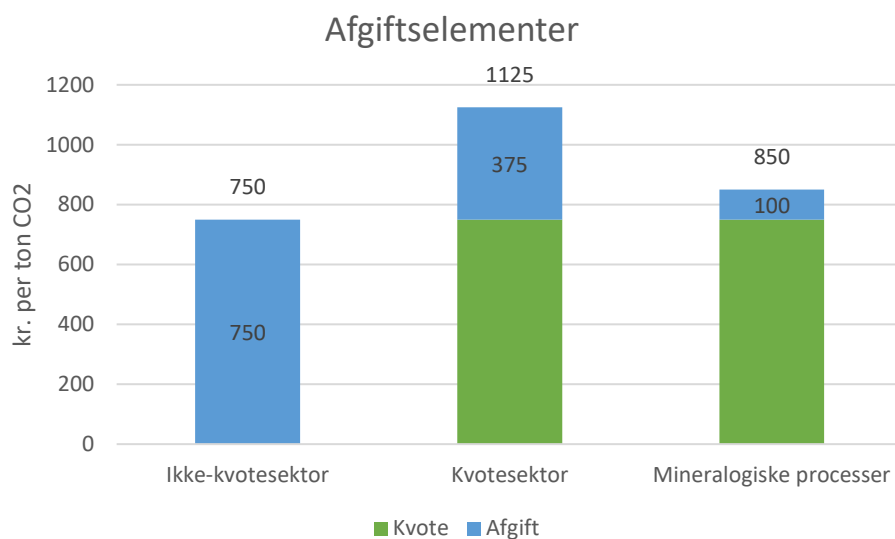
Økonomisk model

Resultater fra bedriftsregnskaber kombineres med analyser af CO₂-afgift og carbon credits i en økonomisk model for at undersøge, hvordan bedriftens økonomiske byrde ved implementering af CO₂-afgiften påvirkes ved anvendelse af pyrolyse.

Det er endnu usikkert, hvordan CO₂-afgiften bliver implementeret i landbruget. Derfor opstilles forskellige scenarier for implementering af CO₂-afgiften. Ekspertgruppen for Grøn Skattereform (EGSR) skal ved slut 2022 udgive deres anbefalinger til regeringen. Scenarier baseres på EGSRs og klimarådets anbefalinger samt regeringens udspil til CO₂-afgift som beskrevet i afsnittet *Dansk CO₂-afgift*. Der opstilles tre scenarier for afgiftssats med to alternative tilgange til lækagebegrænsning.

Afgiftssats

De tre afgiftssatser der undersøges er 750, 375 og 100 kr. per ton CO₂e. Det svarer til afgiftssatsen i henholdsvis ikke-kvotesektoren, kvotesektoren og mineralogiske processer i regeringens udspil. Det afspejler dog ikke den samlede omkostning for de kvoteomfattede virksomheder, der ud over afgiften skal betale kvoteprisen. Medregnet kvoteprisen er omkostningerne henholdsvis 750, 1.125 og 850 kr. per ton CO₂e. Afgiftens elementer i regeringens udspil er illustreret i figuren nedenfor.



Figur 18: Afgiftselementer i regeringens udspil til CO₂-afgift (Regeringen, 2022, egen tilvirkning).

Hvis CO₂-afgiften implementeres i landbruget med samme afgiftsstruktur som i regeringens udspil, ville afgiftssatsen være 750 kr. per ton CO₂e, da landbruget ikke er omfattet af kvotesystemet. Af hensyn til klimalovens guidende principper omkring erhvervsudvikling og lækagebegrænsning beskrevet i afsnittet *Klimalovens guidende principper og modstridende hensyn* bliver der dog sandsynligvis givet et afgiftsnedslag til landbruget. Derfor anvendes 750, 375 og 100 kr. per ton CO₂e som afgiftssats i scenarier i den økonomiske model. Det er usandsynligt at landbruget pålægges en højere afgift end resten af ikke-kvotesektoren. De tre valgte afgiftsniveauer afspejler forskellige afvejninger af klimalovens guidende principper. 750 og 100 kr. per ton CO₂e repræsenterer yderpunkter for afgiftssatsen. 750 kr. per ton CO₂e svarer til, at der intet hensyn tages til klimalovens guidende principper. 100 kr. per ton CO₂e svarer til det maksimale hensyn, der tages til de guidende principper i regeringens udspil.

Produktionsafhængigt bundfradrag

En af to tilgange til begrænsning af lækage, der undersøges i scenarier i den økonomiske model, er et produktionsafhængigt bundfradrag baseret på Klimarådets anbefalinger (Klimarådet, 2022). Et produktionsafhængigt bundfradrag har til formål at begrænse incitament til produktionsnedgang ved implementering af CO₂-afgiften. Der gives et fradrag beregnet per produceret vare. Dermed skabes der gennem afgiften incitament til at reducere CO₂-aftrykket per vare med begrænset incitament til produktionsnedgang.

Der er endnu intet konkret grundlag at basere niveauet for bundfradraget på. Klimarådet anbefaler som udgangspunkt, at bundfradraget baseres på lækagerisikoen for den specifikke produktion. Lækagerisikoen er en vurdering af, hvor meget udledninger vil stige i udlandet som følge af produktionsnedgang i Danmark. De Økonomiske Råd vurderer, at lækagerisikoen i landbruget er omkring 35%. Det vil sige, at det vurderes, at en reduktion af danske udledninger fra landbruget ved produktionsnedgang leder til stigende udledninger i udlandet svarende til 35% af den danske reduktion (De Økonomiske Råd, 2021).

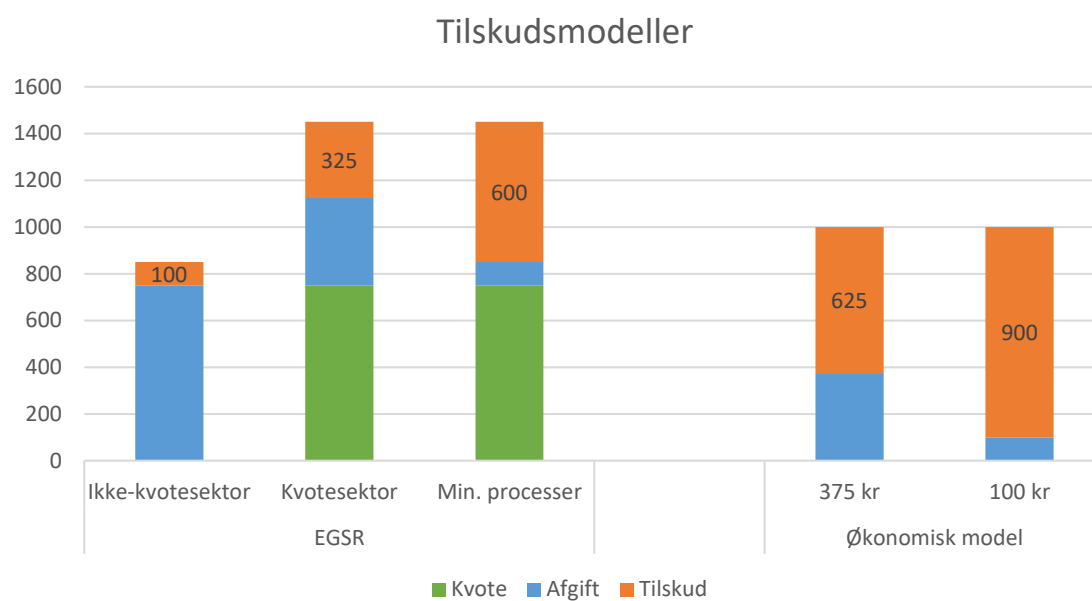
I hverken EGSRs anbefalinger eller regeringens udspil anvendes et bundfradrag til lækagebegrænsning. Derfor antages et bundfradrag på 35% ud fra Klimarådets anbefalinger og De Økonomiske Råds vurdering af lækagerisiko som udgangspunkt for beregninger i scenarier med en afgiftssats på 375 kr. per ton CO₂e. Det er også muligt, at der ønskes en ensartet afgiftssats på 750 kr. for hele ikke-kvotesektoren, og at et højere bundfradrag anvendes som alternativ til et afgiftsnedslag for at holde hånden under landbruget. Derfor anvendes et bundfradrag på 50% ved en afgiftssats på 750 kr. per ton CO₂e. Ved en afgiftssats på 100 kr. per ton CO₂e anvendes intet bundfradrag, da afgiftsnedslaget i forvejen vil begrænse lækage betydeligt.

Tilskud til negative udledninger

Som et alternativ til bundfradrag undersøges påvirkningen ved implementering af en tilskudsordning til negative udledninger i landbruget. I regeringens udspil foreslås en tilskudspulje til CCS. Gennem puljen gives der tilskud ud over afgiftssatsen til at reducere udledninger med CCS (Regeringen, 2022). Det undersøges i den økonomiske model, hvordan en lignende tilskudsordning til negative udledninger påvirker landbruget.

I regeringens udspil er det uklart hvordan tilskuddet struktureres. Derfor anvendes EGSRs anbefalinger som udgangspunkt for at vurdere implementeringen af tilskuddet. EGSR baserer tilskudssatsen på skyggeprisen på CCS. Den samlede tilskyndelse til CCS skal være lig skyggeprisen på CCS for at skabe tilstrækkeligt økonomisk incitament til reduktioner. I kvotesektoren og for de mineralogiske processer vurderes skyggeprisen på CCS at være 1.450 kr. per ton CO₂e. I ikke-kvotesektoren er tilskudssatsen baseret på skyggeprisen på CCS på biogasanlæg, som er betydeligt billigere (EGSR, 2022).

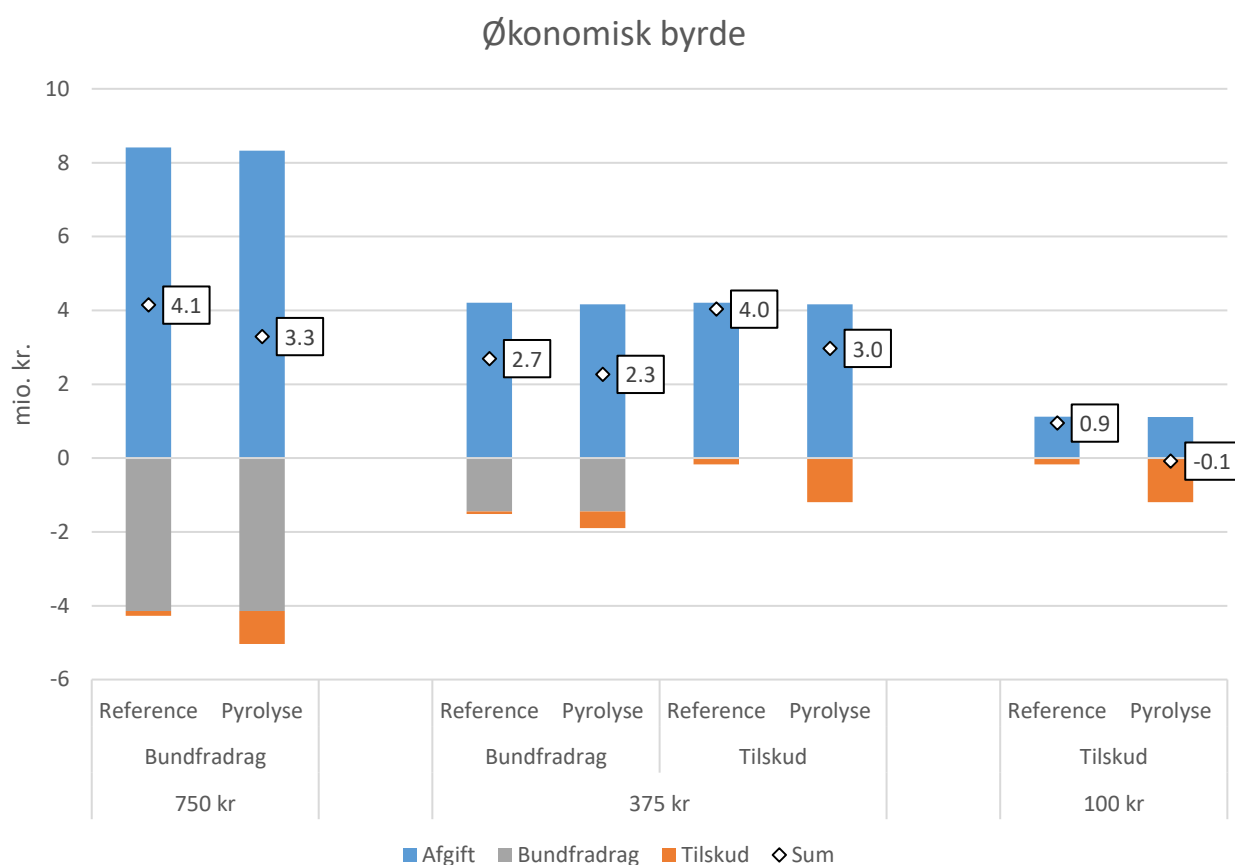
Anvendes samme tilgang i landbruget med fokus på pyrolyse, skal den samlede tilskyndelse til negative udledninger være lig skyggeprisen på pyrolyse, som vurderes at være 1.000 kr. (Klimarådet, 2022). Med en afgiftssats på henholdsvis 375 og 100 kr. per ton CO₂e svarer det til en tilskudssats på 625 og 900 kr. Tilskudsmodeller er illustreret i figuren nedenfor. I EGSRs model gives op til 600 kr. i tilskud til CCS. Det er på niveau med tilskudssatsen på 625 kr. i den økonomiske model ved en afgiftssats på 375 kr. per ton CO₂e. Hvis afgiftssatsen sættes til 100 kr. per ton CO₂e, er det nødvendigt at give 900 kr. i tilskud til negative udledninger. Der undersøges ingen tilskudsmodel ved en afgiftssats på 750 kr. per ton CO₂e, da et scenarie uden bundfradrag ved denne afgiftssats er usandsynligt.



Figur 19: Til venstre: EGSRs anbefalede tilskudsmodel. Til højre: Anvendte tilskudsmodeller i scenarier i den økonomiske model (EGSR, 2022, egen tilvirkning).

Resultater

Med udgangspunkt i ovenstående antagelser opstilles en økonomisk model med scenarier for afgiftssats og tilskudsordning. I figuren nedenfor ses bedriftens økonomiske byrde ved implementering af CO₂-afgiften i landbruget. For alle scenarier vises den økonomiske byrde ved bedriftens nuværende klimaaftryk og ved implementering af pyrolyse.



Figur 20: Økonomisk byrde for den undersøgte bedrift ved implementering af CO₂-afgiften i forskellige scenarier for afgiftssats og tilskudsordning.

Den højeste afgift bedriften vil skulle betale om året med det nuværende klimaaftryk er i ovenstående scenarier 4,1 mio. kr. ved en afgiftssats på 750 kr. og 50% bundfradrag. Den laveste afgift er 0,9 mio. kr. ved en afgiftssats på 100 kr. med tilskud til negative udledninger.

I tabellen nedenfor er den absolutte og relative besparelse ved pyrolyse er opgjort for de fire scenarier. Med bundfradrag er besparelsen generelt lavere end med tilskud.

	Afgiftssats	Besparelse ved pyrolyse	
		Mio. kr.	Procent
Bundfradrag	750 kr.	0,85	21
	375 kr.	0,43	16
Tilskud	375 kr.	1,06	26
	100 kr.	1,03	109

Tabel 2: Absolut og relativ besparelse ved pyrolyse i forskellige scenarier for afgiftssats og tilskudsordning.

Det er usandsynligt, at afgiftssatsen bliver så lav som 100 kr. per ton CO₂e, da det vil gøre det betydeligt samfundsøkonomisk dyrere at nå 70 procentsmålet (Klimarådet, 2022). Det er mere sandsynligt, at der enten gives et afgiftsnedslag, der svarer til en afgiftssats omkring 375 kr., eller at der gives et højt bundfradrag ved en afgiftssats på 750 kr.

Regeringen har i deres udspil vist, at de er villige til at betale til en tilskudspulje for at holde hånden under udsatte erhverv. Ud fra skyggeprisen på pyrolyse skal den samlede tilskyndelse til reduktioner i landbruget være 1.000 kr. per ton CO₂e, før pyrolyse bliver et rentabelt virkemiddel (Klimarådet, 2022). Derfor er det nødvendigt at etablere en tilskudsordning, hvis der skal skabes tilstrækkeligt økonomisk incitament til pyrolyse uden at øge afgiftssatsen uhensigtsmæssigt. Da pyrolyse fylder mere end en fjerdedel af landbrugets reduktioner i regeringens klimaplan, er det sandsynligt, at regeringen derfor vælger en tilskudsmodel, hvis reduktionspotentialet ønskes realiseret (Regeringen, 2020). Det vurderes derfor at scenariet med en afgiftssats på 375 kr. per ton CO₂e og et tilskud på 625 kr. ud over afgiftssatsen til negative udledninger er det mest sandsynlige. I det scenarie skal bedriften betale 4,0 mio. kr. i afgift om året med det nuværende klimaaftryk. Ved anvendelse af pyrolyse reduceres afgiften til 3,0 mio. kr. om året, en besparelse på 1,0 mio. kr. eller 25%.

Bedriftens omsætning afhænger af mælkeprisen, som er meget variabel. Ved lav mælkepris er omsætningen cirka 20 mio. kr. om året. I skrivende stund er mælkeprisen historisk høj, og bedriften forventer at omsætte for op mod 65 mio. kr. i år. Gennemsnitligt omsætter bedriften for 30-40 mio. kr. om året. Bedriftens omkostninger er også variable og afhænger af energi- og foderpriser. Omkostningerne er gennemsnitligt omkring 35 mio. kr. om året. Bedriftsejeren fortæller i interview, at på gode år er en afgift på 4,0 mio. kr. overkommelig. Bedriften har en skala, der gør forretningen relativt robust, men for mange andre mindre bedrifter vil en tilsvarende afgift på 11% af omsætningen være en større udfordring.

Udnyttelse af mere biomasse til biokul

I ovenstående scenarier anvendes udelukkende biokul lavet på gylle produceret på bedriften. Det antages at pyrolyseanlægget etableres i forbindelse med biogasanlægget, da det blandt andet løser logistiske problemer ved anskaffelse af store mængder biomasse. Da kun gylle leveres til biogasanlægget, er det den eneste biomasse, der antages bliver anvendt til pyrolyse.

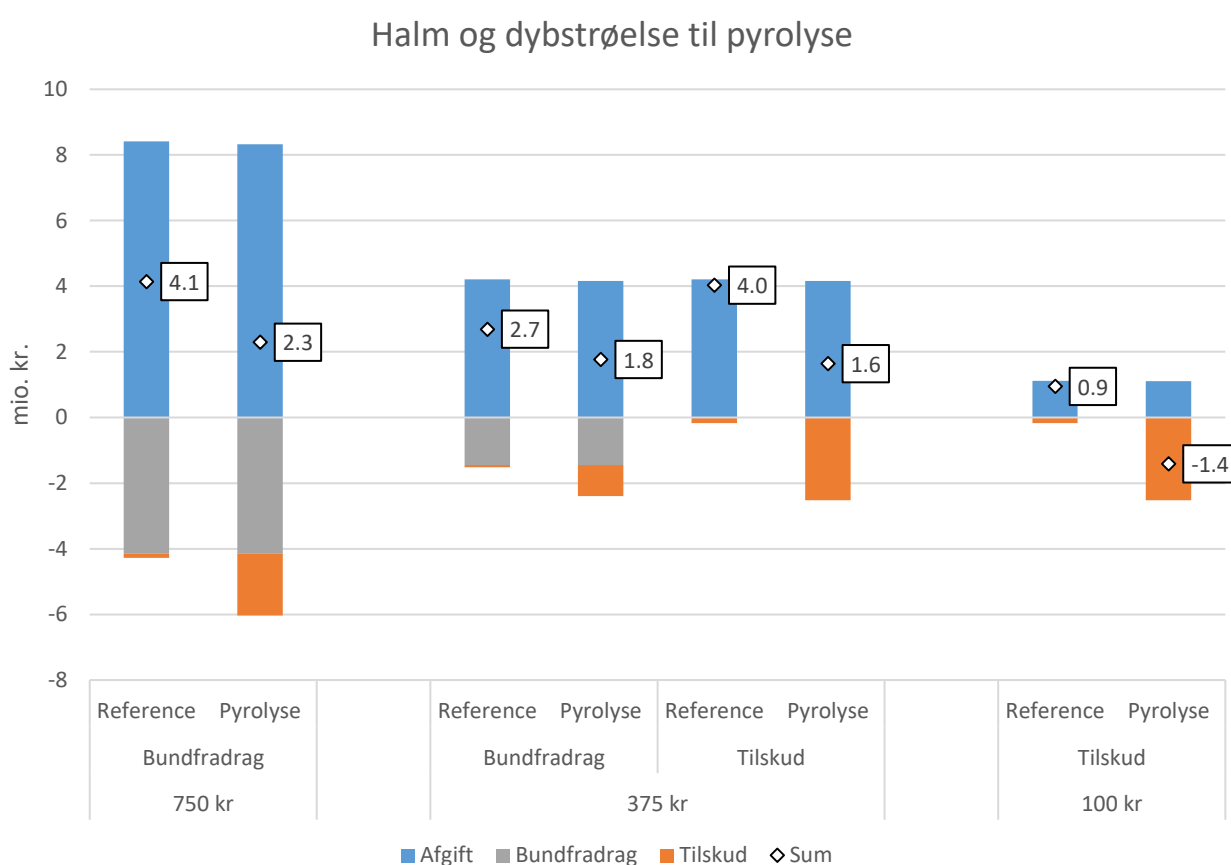
Ved implementering af CO₂-afgiften skabes der et kraftigt incitament til anvende større mængder biokul, da det er et effektivt virkemiddel til at reducere bedriftens afgift, uanset om der gives tilskud til negative udledninger. Derfor er det oplagt at anvende andre restbiomasser på bedriften til pyrolyse. Det omfatter dybstrøelse og halm. Derudover kan landbrugeren i princippet tilkøbe yderligere biokul produceret på eksterne biomasser, hvis det er tilgængeligt på markedet.

Nedenfor undersøges scenarier, hvor bedriftens dybstrøelse og halm anvendes til pyrolyse. Udelukkende effekten af kulstoflagring er beregnet, reducerede opbevaringsemissioner er ikke inkluderet. Kulstoflagring er beregnet med udgangspunkt i værdier i tabellen nedenfor. Tab ved omdannelse til biokul er beregnet med samme metode som i afsnittet *C-Sink* med ændrede afvandingseffektiviteter.

	Ton	% tørstof	Tørstof	% kulstof	Kulstof	Kulstof i biokul
Gylle	42.000	9	3.750	42	1.590	440
Dybstrøelse	3.200	29	930	58	540	230
Halm	1.250	91	1.140	46	520	260

Tabel 3: Anvendte værdier til beregning af kulstoflagring ved anvendelse af halm og dybstrøelse til pyrolyse.

Der tilføjes yderligere 490 ton kulstof i form af biokul til jorden, ud over de 440 ton der stammer fra gylle. Det reducerer bedriftens klimaaftryk med yderligere cirka 1.300 ton CO₂e. Nedenfor er effekten på bedriftens økonomiske byrde ved anvendelse af halm og dybstrøelse til pyrolyse illustreret.



Figur 21: Økonomisk byrde for den undersøgte bedrift ved implementering af CO₂-afgift i scenarier med anvendelse af halm og dybstrøelse til pyrolyse.

Ved anvendelse af halm og dybstrøelse til pyrolyse reduceres bedriftens afgift yderligere. Med en afgiftssats på 375 kr. og tilskud er besparelsen 2,9 mio. kr. eller 59%. Med bundfradrag bliver besparelsen også betydeligt højere og er mellem 34% og 45%.

	Afgiftssats	Besparelse ved pyrolyse	
		Mio. kr.	Procent
Bundfradrag	750 kr.	1,85	45
	375 kr.	0,92	34
Tilskud	375 kr.	2,93	59
	100 kr.	2,36	249

Tabel 4: Absolut og relativ besparelse ved pyrolyse i scenarier med anvendelse af halm og dybstrøelse til pyrolyse.

Delkonklusion

Der er endnu stor usikkerhed omkring, hvordan CO₂-afgiften implementeres i landbruget. Både afgiftssats og detaljer omkring bundfradrag, kompensation og tilskudsordninger er endnu uvist. I den økonomiske model er en serie af scenarier undersøgt for at vurdere et spænd for den økonomiske byrde, som bedriften pålægges ved implementering af CO₂-afgiften, og den besparelse bedriften kan opnå gennem pyrolyse.

I regeringens udspil sættes afgiftssatsen i ikke-kvotesektoren til 750 kr. per ton CO₂e. Det er sandsynligt at der gives et afgiftsnedslag til landbruget af hensyn til klimalovens guidende principper, eller at der etableres et bundfradrag, der på tilsvarende vis reducerer landbrugets økonomiske byrde ved implementering af CO₂-afgiften. Regeringen giver i deres udspil et afgiftsnedslag til mineralogiske processer, der svarer til en afgiftssats på 100 kr. per ton CO₂e. Det vil blive u hensigtsmæssigt omkostningsfuldt for samfundet, hvis landbruget gives et tilsvarende afgiftsnedslag. Derfor vurderes det, at afgiftssatsen for landbruget sandsynligvis vil ende et sted mellem 750 og 100 kr. per ton CO₂e.

I udspillet etableres en tilskudspulje til CCS. Der gives tilskud ud over afgiftssatsen op til skyggeprisen på CCS. Det er muligt at en lignende model implementeres i landbruget med fokus på pyrolyse. Pyrolyse fylder en fjerdedel af landbrugets reduktioner i regeringens klimaplan. Skyggeprisen på pyrolyse vurderes at være 1.000 kr. per ton CO₂e. Hvis pyrolyse skal være et rentabelt virkemiddel i landbruget uden at hæve afgiftssatsen til et uhensigtsmæssigt niveau, er det nødvendigt at etablere en tilskudsordning.

Med udgangspunkt i resultater fra den økonomiske model vurderes det, at bedriften skal betale mellem cirka 2,7 og 4,1 mio. kr. om året i afgift med bedriftens nuværende klimaaft tryk. Det svarer til cirka 8-12% af bedriftens årlige omsætning. Ved anvendelse af pyrolyse afhænger besparelsen i høj grad af detaljer omkring afgiftens implementering. Med en tilskudsordning til negative udledninger tilsvarende den tilskudspulje til CCS regeringen foreslår i deres udspil, vil besparelsen generelt blive høj. Afhængigt af de andre variable varierer besparelsen ved pyrolyse med en tilskudsordning mellem cirka 25% og 60%. Anvendes et bundfradrag i stedet for en tilskudsordning, er besparelsen lavere mellem cirka 15% og 45%.

Diskussion af forretningsmodeller

Med CO₂-afgiften tilføres en betydelig økonomisk værdi til kulstofindholdet i landbrugets biomasse, hvis det omdannes til biokul gennem pyrolyse. Derudover kan biokulprojekter sælges på det private marked for carbon credits, hvilket tilføjer yderligere økonomisk værdi til kulstoffet. Der har igennem en årrække været stigende fokus på den skæve fordeling af den økonomisk gevinst ved biogasproduktion mellem landbrugere og biogaskoncerner (Mørch & Kristensen, 2021). Der er derfor behov for at undersøge, hvordan forretningsaftaler mellem aktører i værdikæden kan etableres, der skaber incitament til reduktioner i landbruget. Det er nødvendigt at lave samarbejdsaftaler, der er rimelige for alle parter, for at sikre effektiv omstilling i landbruget.

Biogaskoncernen Nature Energy og foreningen Landbrugets Biomasseleverandører (LBBL) indgik i starten af 2022 efter flere års forhandlinger en aftale, der sikrer fair forretning omkring biomasse til biogas (Christensen, 2022). Aftalens detaljer er ikke offentliggjort, men aftalepunkterne er blevet overordnet beskrevet. Biomasseleverandører får betaling for leveret biomasse efter markedsprisen for gas. Derudover etablerer aftalen, at tilbagelevering af afgasset biomasse skal opgøres i nærringsstoffer, sådan at det sikres, at landbrugerne får samme gødningsværdi tilbage, som de har leveret. Til sidst indgår det i aftalen, at landbrugeren ejer klimagevinsten ved at afgasse biomassen. Klimaeffekten af de reducerede udledninger fra opbevaring kan dermed indgå i landbrugernes klimaregnskab, eller de kan sælge dem videre på det private marked for carbon credits (Christensen, 2022).

For biogasselskaber er den afgassede biomasse et restprodukt, som der er behov for at afskaffe. For landbrugeren er den afgassede biomasse attraktiv, da den er fordelagtig i gødningsregnskaber sammenlignet med rå gylle. For begge parter er det derfor en god løsning, at biomassen leveres tilbage til landbrugeren. Ved pyrolyse er biokullet ikke et restprodukt. Klimaeffekten ved kulstoflagring gennem biokul udgør gennem salg af carbon credits et af produkterne, som forretningsmodellen for pyrolyse er baseret på. Ud fra resultaterne fra den økonomiske model er det tydeligt, at ved implementering af CO₂-afgiften bliver biokullet også et meget attraktivt produkt for landbrugeren som et virkemiddel til at reducere afgiften.

Derfor er det nødvendigt at forhandle en fair fordeling af den økonomiske gevinst mellem landbrug og pyrolysevirksomhed. I princippet vil frie markeds kræfter med tiden finde frem til en ligevægtsmodel, men for at undgå samme strid som opstod i forbindelse med biogas, er der behov for at undersøge, hvordan en ligevægtsmodel kan se ud allerede i dag.

I dette afsnit undersøges det, hvordan forretningsmodeller for pyrolyse kan etableres, der skaber incitament til reduktioner i landbruget. Resultater fra forrige afsnit *Økonomisk model* anvendes som udgangspunkt for at vurdere det økonomiske incitament til anvendelse af pyrolyse gennem implementering af CO₂-afgiften i landbruget. Værditilføjelse ved salg af carbon credits undersøges med udgangspunkt i EBCs C-Sink metode til certificering af kulstoflagring gennem biokul. Med dette udgangspunkt opstilles scenarier for forretningsmodeller, der illustrerer fordelingen af den økonomiske gevinst ved anvendelse af pyrolyse. Scenarierne diskuteres ud fra ekspertinterviews udført i forbindelse med specialet med informanter indenfor forretningsmodeller for pyrolyse, dansk CO₂-afgift og landbrugets klimaudfordringer.

C-Sink

Til beregning af værditilføjjelsen ved salg af carbon credits anvendes metoden C-Sink. C-Sink er en metode til certificering af kulstoflagring gennem biokul udviklet af EBC⁵ (EBC, 2020). Metoden har til formål at opstille stringente krav for, hvordan aftrykket af kulstoflagring gennem biokul beregnes, med henblik på salg af carbon credits på det private marked. Formålet med metoden er at garantere, at det fulde aftryk ved produktion af biokul frem til produktet forlader producenten, er inkluderet i lagringspotentiallet. C-Sink certificering er dermed et carbon footprint fra *cradle-to-gate* af det producerede biokul. Emissioner fra produktion, opbevaring og transport af biomasse samt energiforbrug og procesemissioner fra pyrolyseanlægget modregnes kulstoflagringen i beregningen af biokullets aftryk (EBC, 2020).

Metode

Beregning af kulstoflagringspotentiallet gennem C-Sink metoden involverer en trinvis proces (EBC, 2020). Nedenfor beskrives metoden, og metoden anvendes til at beregne kulstoflagringspotentiallet ved produktion af biokul på bedriftens gylle.

1. *Kulstofindhold i biokullet bestemmes.*

Som beskrevet i afsnittet *Kulstoflagring* omdannes bedriftens gylle til 440 ton kulstof i form af biokul.

2. *Emissioner fra produktion af biokul opgøres i CO₂e. Metan- og lattergasemissioner omregnes til CO₂e med GWP20⁶. Det inkluderer emissioner fra:*

a. *Produktion af biomasse. Det omfatter forbrug af brændstof, gødning og pesticider mm.*

Der er ikke medregnet nogle direkte emissioner fra produktion af gyllen. Det er uklart, hvordan produktion af gylle skal medregnes ud fra beskrivelsen af C-Sink metoden (EBC, 2020).

b. *Opbevaring af biomasse. Det omfatter metan og lattergasemissioner fra opbevaring.*

Emissioner fra opbevaring af biomasse er beregnet i afsnittene *Metan* og *Lattergas*. Det omfatter kun emissioner fra opbevaring af gylle i stalden, som har et aftryk på 971 ton CO₂e beregnet med GWP20.

c. *Energiforbrug og procesemissioner fra pyrolyse. Det omfatter transport af biomasse og biokul, forbehandling af biomasse og efterbehandling af biokul samt eventuelle metanemissioner fra pyrolyseprocessen. Energioverskud der udvindes i form af varme, olie og gas medregnes ikke med C-Sink metoden.*

⁵ European Biochar Certification

⁶ Global Warming Potential med 20 års perspektiv. På grund af metans korte levetid i atmosfæren bliver aftrykket af særligt metan større opgjort med GWP20.

Emissioner fra produktion af biokul er ikke medregnet. Der er ikke produceret data på energiforbrug og procesemissioner ved pyrolyse i dette projekt. Det antages, at aftrykket af transport og behandling af biomasse og biokul er ubetydeligt ved storskala produktion (Thomsen, 2021).

3. *En sikkerhedsmargen på 10% af alle emissioner fra produktion af biokul tilføjes. Det har til formål at dække aftrykket af andet forbrug som eksempelvis vedligehold af udstyr, pakkematerialer mm.*

Sikkerhedsmargenen på 10% af aftrykket ved produktion af biokul svarer til 97 ton CO₂e.

4. *Det samlede aftryk af emissioner fra produktion samt sikkerhedsmargenen omregnes fra CO₂e til kulstofenheder med forholdet 12/44 ⁷. Det er "kulstofomkostningen" ved produktion af biokullet.*

Det samlede aftryk ved produktion af biokul på 1.068 ton CO₂e svarer til 291 ton kulstof ved omregning med forholdet 12/44.

5. *Kulstofomkostningen modregnes biokullets kulstofindhold, hvilket resulterer i det endelige kulstoflagringspotentiale.*

Kulstoflagringspotentialet ved biokul produceret på bedriftens gylle beregnes til 149 ton kulstof ved at modregne kulstofomkostningerne fra biokullets kulstofindhold.

Da C-Sink metoden beskriver aftrykket ved produktion af biokullet fra *cradle-to-gate*, inkluderer metoden ikke en vurdering af biokullets *permanence* efter anvendelse. I stedet stiller EBC en række krav til, hvordan C-Sink certificeringer kan anvendes i forbindelse med salg af carbon credits. Det inkluderer krav omkring brug af nedbrydningsrater til beregning af kulstoflagring i 100 års perspektiv. EBC henviser til Camps-Arbestain et al. (2015) og IPCC (2019), som anvender H/C-forhold som udgangspunkt for beregning af nedbrydningsrater. Som et konservativt estimat anbefales 0,3% årlig nedbrydelse af kulstof ved anvendelse af biokul i jord. Det svarer til, at 74% af kulstoffet er tilbageværende i jorden efter 100 år. Med udgangspunkt i denne metode svarer kulstoflagringspotentialet på 149 ton kulstof til et reduktionspotentiale på 404 ton CO₂e. Med dette reduktionspotentiale beregnes værditilføjelsen ved salg af carbon credits.

Kritik af C-Sink metoden

Med C-Sink metoden forsøger EBC at opstille en meget konservativ metode til vurdering af kulstoflagring. Inklusionen af værdikædeemissioner og anvendelse af GWP20 til beregning af metan- og lattergasemissioner er tilføjelser ud over den normale praksis. En af de primære udfordringer for carbon credit markedet er usikkerhed omkring realiteten af reduktioner og overestimat af reduktioner. Med en meget konservativ metode sikrer EBC sig mod kritik på disse punkter. Metoden blander dog kulstoflagring

⁷ Forholdet mellem molarmassen af kulstof og CO₂.

og værdikædeemissioner sammen, på en måde der er uhensigtsmæssig, når metoden anvendes på problematiske biomasser som gylle.

C-Sink metoden modregner opbevaringsemissioner fra kulstoflagringen. Opbevaring af gylle medfører et relativt stort klimaaftryk, særligt når metanemissioner regnes med GWP20. I eksemplet ovenfor resulterer det i, at den beregnede kulstoflagring kun udgør en tredjedel af det reelle kulstofindhold i biokullet. Sammenlignes pyrolyse af gylle med et referencescenarie uden pyrolyse, er nettoeffekten, at opbevaringsemissioner reduceres gennem pyrolyse. Denne positive effekt ved pyrolyse bliver ikke kun ignoreret med C-Sink metoden. Når de tilbageværende opbevaringsemissioner modregnes kulstoflagringen, skaber metoden en barriere for at udnytte pyrolyse til behandling af problematiske biomasser. EBC er i gang med at udvikle særskilte certificeringer til biokul baseret på gylle og spildevandsslam, men anbefaler indtil de er færdige at anvende C-Sink metoden i dens nuværende form (EBC, 2020).

Ekspertinterviews

For at danne baggrund for diskussionen af forretningsmodeller for pyrolyse er der udført fire ekspertinterviews med informanter indenfor forretningsmodeller for pyrolyse, dansk CO₂-afgift og landbrugets klimaudfordringer. Interviews er udført tidligt i projektet, og anvendes derfor hovedsageligt til at afdække diskussionspunkter.

De interviewede eksperter er:

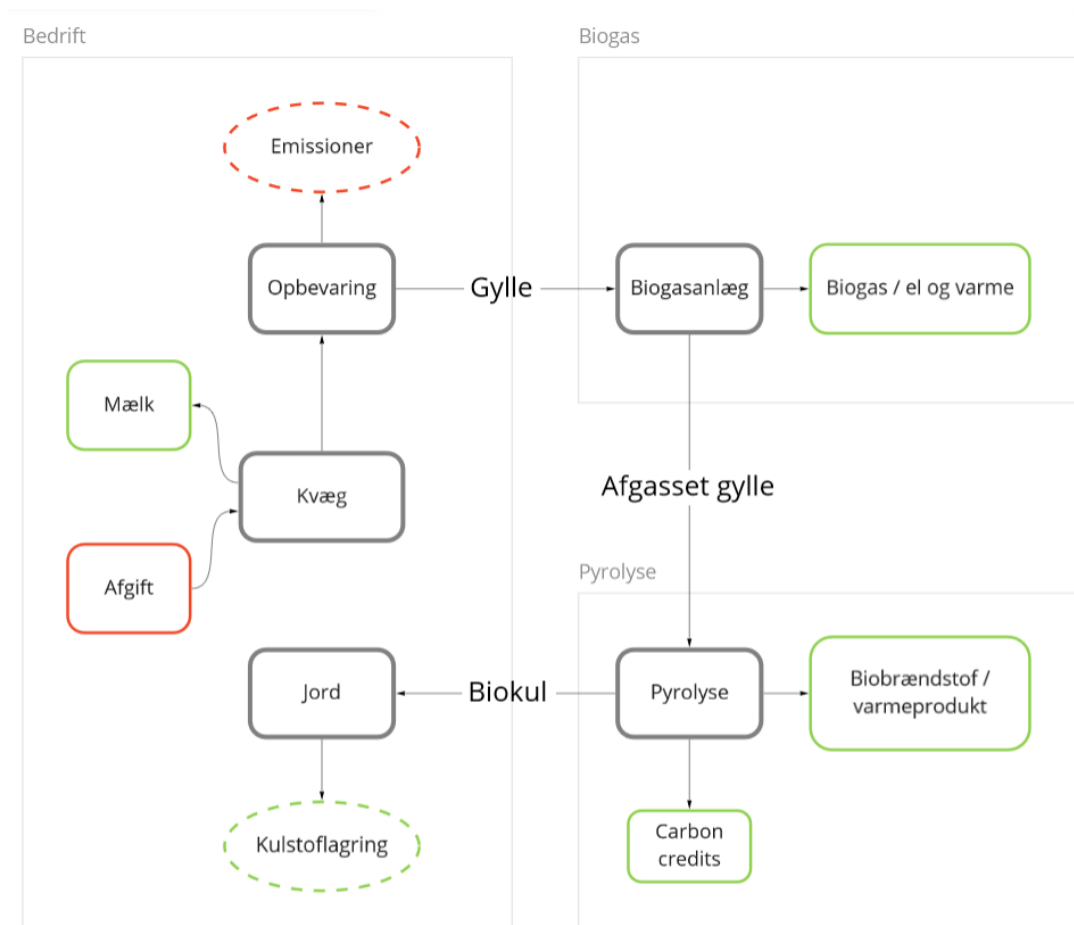
- Christian Wieth – Chief Marketing Officer, AquaGreen
- Peter Lindholst – Forretningsudvikler, Stiesdal Fuel Technologies
- Peter Birch Sørensen – Professor ved Økonomisk Institut på Københavns Universitet og medlem i Ekspertgruppen for Grøn Skattereform
- Anne-Mette Langvad – Projektchef ved Klimafonden Skive

Christian Wieth og Peter Lindholst er ansvarlige for forretningsudvikling i pyrolysevirksomhederne AquaGreen og Stiesdal Fuel Technologies. Begge har indgående indblik i forretningsmodeller for pyrolyse inklusiv statslige afgifts- og tilskudsmodeller og salg af carbon credits.

Peter Birch Sørensen har som medlem i Ekspertgruppen for Grøn Skattereform indsigt i baggrundsviden omkring ekspertgruppens anbefalinger og kunne dele ekspertgruppens foreløbige overvejelser omkring implementering af CO₂-afgiften i landbruget.

Anne-Mette Langvad arbejder med projektet GreenLab Skive, der arbejder for grøn omstilling i landbruget gennem industriel symbiose. Hun har derigennem erfaring med etablering af grønne løsninger på systemniveau i landbruget.

Interviews er udført som semistrukturerede interviews med udgangspunkt i en diskussion af, hvordan økonomisk gevinst ved pyrolyse gennem reduceret CO₂-afgift og potentielt tilskud til negative udledninger samt salg af carbon credits skal fordeles mellem aktører i værdikæden. Alle eksperter blev præsenteret for figuren nedenfor, der anvendtes som et visuelt hjælpemiddel i diskussionen. Figuren illustrerer værdikæden for pyrolyse af gylle. Kilder til indtægt, samt klimaeffekter der påvirkes ved pyrolyse og er omfattet af CO₂-afgiften, er markeret.



Figur 22: Værdikæde for pyrolyse af gylle. Grønne bokse markerer indtægtskilder. Røde bokse markerer udgifter. Stiplede bokse markerer bedriftens klimaeffekter omfattet af CO₂-afgiften.

Figuren tegner et simpelt billede af værdikæden. I realiteten anvendes flere biomasser fra mange kilder på biogasanlægget. For at undgå øget kompleksitet illustreres kun gyllens bevægelse igennem værdikæden.

Med udgangspunkt i figuren ovenfor blev fordelingen af den økonomiske gevinst ved pyrolyse diskuteret i interviews. Derudover blev additionaliteten af biokul carbon credits under CO₂-afgiften diskuteret.

Fordeling af økonomisk gevinst

I det følgende undersøges en række scenarier for fordeling af økonomisk gevinst ved pyrolyse. Scenarier skal ses som skitser af, hvordan forretningsmodeller kan etableres. Det er usikkert, om det bliver muligt at sælge carbon credits baseret på kulstoflagring gennem biokul efter implementering af CO₂-afgiften. Med en CO₂-afgift og potentielt en tilskudsordning til negative udledninger bliver additionaliteten af biokulprojekter på det private marked mindre entydig jf. diskussionen i afsnittet *Additionalitet og dobbelttælling i nationale emissionsopgørelser*. Derfor illustreres den økonomiske gevinst ved salg af carbon credits separat.

Salg af carbon credits baseres på C-Sink metoden. I afsnittet *Kritik af C-Sink metoden* diskuteres anvendeligheden af C-Sink metoden til problematiske biomasser som gylle. På grund af metodens forudsætninger reduceres kulstoflagringspotentiallet ved biokul produceret på bedriftens gylle til en tredjedel af det reelle kulstofindhold. Derfor skal værditilføjjelsen ved salg af carbon credits i nedenstående scenarier ses som et konservativt estimat.

Alle scenarier tager udgangspunkt i en afgiftssats på 375 kr. per ton CO₂e, og ved tilskud sættes den samlede tilskyndelse til negative udledninger til 1.000 kr. per ton CO₂e. I alle scenarier antages det desuden, at landbrugeren tildeles retten til klimagevinsten fra reducerede opbevaringsemissioner. En mere fyldestgørende undersøgelse af forretningsmodeller kræver data på driftsøkonomien ved pyrolyse. Med mere detaljeret indsigt i økonomien for alle involverede parter er det muligt at undersøge påvirkningen ved eksempelvis forskellige salgspriser på biomasse og biokul. Det er udenfor afgrænsningen af dette projekt. Derfor skal diskussionen af scenarier nedenfor i stedet ses som en skitse af mulige forretningsmodeller.

Scenarie 1

I scenarie 1 tages udgangspunkt i en model tilsvarende biogasmodellen. Landbrugeren har ejerskab over biomassen gennem hele værdikæden. Biogas- og pyrolyseanlæg "låner" biomassen og får mulighed for at producere bioenergi på den. Efter pyrolyse leveres biokullet tilbage til landbrugeren. I scenarie 1 får landbrugeren den fulde økonomiske værdi ved kulstoflagringen i form af reduceret afgift og eventuelt salg af carbon credits. Der sker ingen økonomisk udveksling mellem aktører, hvis man ser bort fra betaling for biomasse afhængigt af gaspriser. Pyrolysevirksomheden får ingen gevinst ved kulstoflagringen og kan kun lave forretning på bioenergiproduktion.

Scenarie 2

I scenarie 2 beholder landbrugeren ejerskab over biomasse og kulstoflagring gennem biokul og kan dermed reducere sin afgiftsbyrde, mens pyrolysevirksomheden får retten til at sælge carbon credits på det private marked. Det afhænger selvfølgelig af, at det er muligt at sælge carbon credits baseret på biokulprojekter under CO₂-afgiften. I dette scenarie afhænger fordelingen af økonomisk gevinst af afgiftssatsen, om der etableres en tilskudsordning og prisen på carbon credits.

Scenarie 3

I scenarie 3 fordeles gevinsten ved reduceret afgiftsbyrde og salg af carbon credits mellem landbruger og pyrolysevirksomhed. I scenariet antages lige fordeling af gevinst som et udgangspunkt. Det kan i praksis foregå ved, at landbrugeren beholder ejerskab over biomassen og betaler en aftalt pris til pyrolysevirksomheden for behandling af biomassen afhængigt af afgiftssats og prisen på carbon credits og eventuelt prisen på biobrændstof. Alternativt kan pyrolysevirksomheden betale landbrugeren en tilsvarende pris for ejerskab over den leverede biomasse.

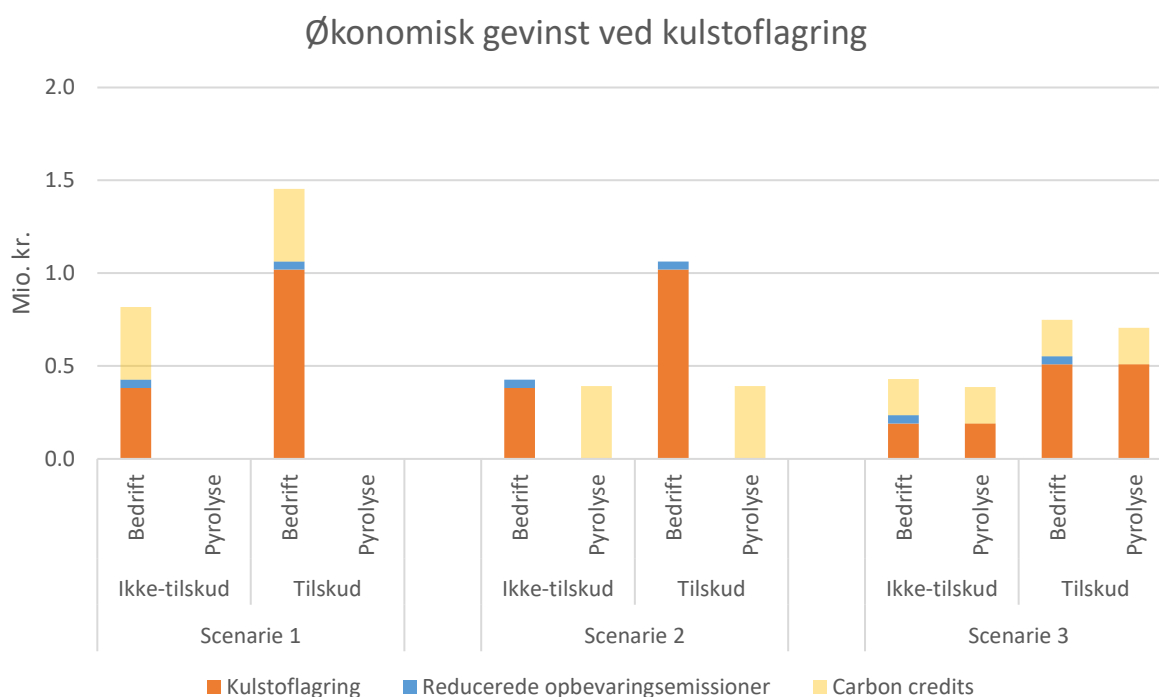
Ud over de ovenstående scenarier er en mulig forretningsmodel, at biokullet sælges til eksterne købere i stedet for at blive leveret tilbage til biomasseleverandøren. Potentielle købere kan være andre landbrugere. På grund af den geografisk skæve fordeling af fosfor i den danske landbrugsjord vil det i

mange tilfælde give mening at transportere fosforrig biokul produceret på gylle fra husdyrintensive områder i det danske vest til plantebedrifter i det danske øst (Poulsen, 2019). Købere kan også være eksempelvis betonproducenter eller andre, der anvender biokul til at reducere klimaaftrykket af deres produkter (Snøhetta, 2021).

I det tilfælde er der behov for en forretningsmodel, hvor ejerskab over kulstoffet skifter hænder fra biomasseleverandøren til pyrolysevirksomheden til køberen. Sælges biokul produceret på husdyrgødning til en plantebedrift, vil værdien som udgangspunkt defineres ud fra kulstoflagringspotentiallet med den tilføjede værdi af gødningseffekten ved anvendelse. Denne forretningsmodel undersøges ikke kvantitativt.

Resultater

I figuren nedenfor ses fordelingen af den økonomiske gevinst ved kulstoflagring i de ovenstående scenarier.



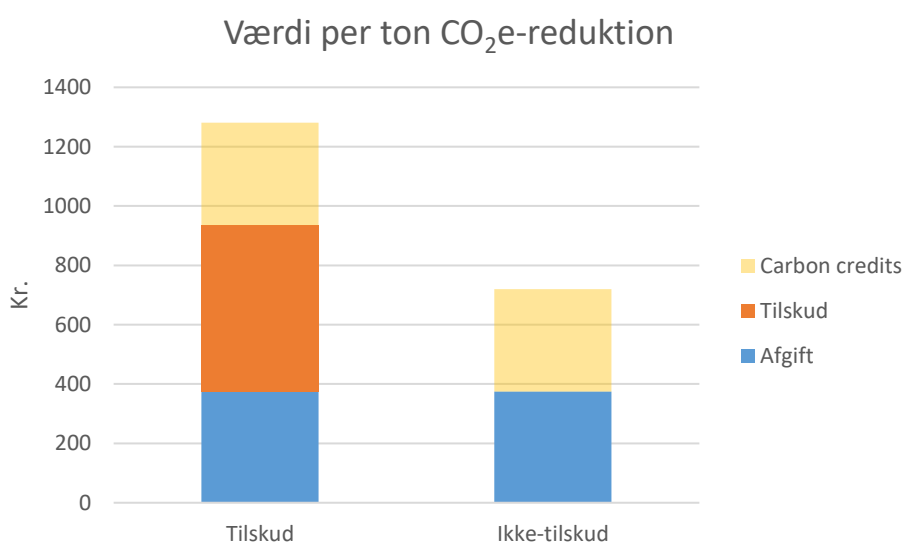
Figur 23: Fordeling af økonomisk gevinst ved kulstoflagring gennem biokul i udvalgte scenarier.

Ved en afgiftssats på 375 kr. per ton CO₂e har kulstoflagringen en økonomisk værdi på cirka 0,4 eller 1,0 mio. kr. afhængigt af, om der gives tilskud til negative udledninger. Hvis det ikke er muligt at sælge carbon credits på grund af manglende additionalitet under CO₂-afgiften, er det den økonomiske værdi, som skal fordeles mellem aktører. Fordeles værdien ligeligt mellem bedriften og pyrolysevirksomhed, er det altså en gevinst på 0,2 eller 0,5 mio. kr. for hver part. Ved fordeling af gevinst mellem landbruger og pyrolysevirksomhed er det nødvendigt, at landbrugeren kompenseres for eventuelle øgede omkostninger ved udbringning af biokul og for den tabte gødningsværdi i gyllen.

Hvis det er muligt at sælge carbon credits, tilføjes cirka 0,4 mio. kr. til den økonomiske værdi af bedriftens gylle. Det er en fordobling af den økonomiske værdi uden tilskudsordning. Med tilskud svarer det til en værdiforøgelse på cirka 40%. Tildeles carbon credits til pyrolysevirksomheden, afhænger fordelingen af økonomisk gevinst mellem bedriften og pyrolysevirksomheden altså af afgiftssatsen, og om der etableres en tilskudsordning.

Muligheden for at sælge carbon credits under CO₂-afgiften afhænger af, om registre på det private marked vurderer, at biokulprojekter er additionelle på trods af CO₂-afgiften. Hvis der etableres en tilskudspulje til negative udledninger i landbruget - ligesom den der foreslås til CCS i regeringens udspil - køber regeringen i princippet kulstoflagringen i de projekter, der modtager tilskud. Dermed kan de projekter ikke med rimelighed siges at være additionelle. Etableres tilskudspuljen efter Ekspertgruppen for Grøn Skattereforms anbefalinger, bliver den baseret på en konkurrencemodell. Med et loft på tilskudspuljen konkurrerer virksomheder på pris om at få adgang til tilskud. Hvis salg af carbon credits kan gøre biokulprojekter rentable uden tilskud, frigives tilskudspuljens midler til andre projekter. På den måde kan der argumenteres for additionaliteten af biokul carbon credits under CO₂-afgiften, hvis de ikke modtager tilskud.

I scenarie 1 i figuren ovenfor ses det, at der opnås tæt på samme tilføjede værdi gennem salg af carbon credits som ved tilskud. Det er som nævnt baseret på C-Sink metoden til beregning af kulstoflagringspotentiale, som må anses som et konservativt estimat af værdien af carbon credits. I figuren nedenfor er værdien af bedriftens reduktion opgjort per ton. Reduktion gennem produktion af CO₂-neutralt brændstof er ikke inkluderet i opgørelsen.



Figur 24: Fordeling af kilder til økonomisk værdi ved et ton CO₂e-reduktion gennem pyrolyse.

Hvis det bliver muligt at sælge carbon credits baseret på det totale kulstofindhold i biokullet, stiger værdien af carbon credits med cirka 300%. Det bliver måske en mulighed med de EBC-metoder, der udvikles i øjeblikket til certificering af kulstoflagring ved anvendelse af biokul baseret på gylle eller andre metoder (EBC, 2020). Det er derfor muligt, at biokulprojekter kan etableres uden tilskud ved salg af carbon credits.

Ud fra ovenstående argument for additionalitet vil det være en mulig forretningsmodel, da salg af carbon credits dermed frigiver tilskudspuljens midler til andre projekter.

Delkonklusion

Der er behov for at skabe forretningsmodeller for pyrolyse i landbruget, der skaber incitament til reduktioner. Med stigende fokus på værdien af biomasse som et virkemiddel i den grønne omstilling er det nødvendigt at sikre fair fordeling af økonomisk gevinst ved nye værdikæder for biomasse. Ejerskab over biomasse og rettigheden til klimagevinster bliver afgørende forhandlingspunkter i et landskab, hvor reduktioner bliver prissat gennem både CO₂-afgift og salg af carbon credits på private markeder. Der er potentiale for at etablere forretningsmodeller for pyrolyse, der medvirker til at reducere landbrugets klimaaftryk og samtidig skaber økonomisk gevinst for både landbrugere og pyrolysevirksomheder.

Salg af carbon credits tilføjer potentielt tilstrækkelig økonomisk værdi til biomassen til at skabe en rentabel forretning for pyrolyse uden en tilskudsordning. Det er tilfældet på trods af, at C-Sink metoden til opgørelse af kulstoflagring skaber u hensigtsmæssige barrierer for carbon credit projekter baseret på pyrolyse af problematiske biomasser som gylle. Salg af carbon credits afhænger af, at biokulprojekter vurderes at være additionelle under CO₂-afgiften. Ved etablering af en tilskudsordning til negative udledninger i landbruget kan biokulprojekter, der får tilskud, ikke med rimelighed vurderes at være additionelle. Hvis der skabes en rentabel forretningsmodel for biokulprojekter ved salg af carbon credits uden tilskud, frigiver salg af carbon credits tilskudspuljens midler til andre projekter. Under de omstændigheder kan der argumenteres for additionaliteten af biokulprojekter under CO₂-afgiften.

Perspektivering

Der er flere perspektiver i naturlig forlængelse af dette projekt, som er relevante at arbejde videre med.

Forretningsmodeller

Dette projekt er afgrænset til at undersøge kun landbrugerens økonomiske påvirkning ved anvendelse af pyrolyse. Derfor produceres der ikke tilstrækkelig data til at udføre detaljeret værdikædeanalyse for at afdække konkrete forretningsmodeller for pyrolyse. Det er oplagt at arbejde videre i den retning.

Med indblik i driftsøkonomi for både biogas- og pyrolyseanlæg kan konkrete spørgsmål omkring fordeling af gevinst mellem aktører besvares. Hvor meget værdi tilføjes til biomassen gennem salg af biogas og biobrændstof? Hvordan påvirker tilskud til biogas forretningsmodeller? Hvad er omkostningen per ton CO₂-reduktion gennem pyrolyse? Med svar på spørgsmål som disse kommer man nærmere en konkret vurdering af, hvordan den økonomiske gevinst gennem reduceret CO₂-afgift og salg af carbon credits kan fordeles på en måde, der skaber incitament til pyrolyse i landbruget.

Overensstemmelse på tværs af klimaregnskaber

Det er også relevant at undersøge, hvordan reduktionspotentialet ved pyrolyse beregnes i klimaregnskaber i forskellige sammenhæng. Der er behov for, udbredt anvendelse af pålidelige valide metoder til beregning af reduktionspotentialer ved pyrolyse. Det gælder både i landbrugets bedriftsregnskaber, kommunale klimaplaner samt nationale og internationale emissionsopgørelser. Da klimaeffekter ved pyrolyse opstår på tværs af sektorer i landbruget, LULUCF og energisektoren er der behov for klare rammer for, hvordan reduktionspotentialet skal opgøres. Det er afgørende, at effekten af pyrolyse er dokumenterbar med de metoder, der anvendes på tværs af politiske niveauer for at sikre incitament til reduktioner.

Fremtidig ressourcetilgængelighed

Derudover er der en relevant diskussion om den fremtidige ressourcetilgængelighed i forbindelse med biogen kulstof. I dette projekt fokuseres på pyrolyse af gylle. Pyrolyse har potentiale for at kompensere for aftrykket af husdyrproduktion gennem kulstoflagring og produktion af biobrændstof. Ved accelereret skalering af teknologien i det spor er der risiko for, at der skabes afhængighed af biomasse fra husdyrproduktion. Hvis husdyrproduktionen reduceres drastisk som følge af fremtidig klimapolitik, kan det medføre en reduktion i den tilgængelige biomasse til pyrolyse med konsekvenser for reduktionspotentialet. Omvendt er risiko for, at afhængigheden begrænser det politiske råderum til at reducere husdyrproduktionen, hvis det vurderes at være hensigtsmæssigt.

En anden risiko forbundet med ressourcetilgængelighed kan opstå i takt med, at produktion af fossilt kulstof udfases som følge af klimaneutralitetsmålsætninger frem mod 2050. Der vil stadig være behov for kulstof i et klimaneutralt samfund efter 2050. Derfor kan der opstå stigende konkurrence på biogen kulstof til anvendelse i kemiindustri, brændstof og byggematerialer. Under de omstændigheder er der potentiale for, at kulstoflagring ikke prioriteres over andre anvendelsesmuligheder for biogen kulstof (Klimarådet, 2022).

Konklusion

Der er behov for betydelige reduktioner i det danske landbrug for at nå de politiske reduktionsmålsætninger. I regeringens klimaplan fremlægges en målsætning om at reducere landbrugets klimaafttryk med cirka 7 mio. ton CO₂e. I planen udgør pyrolyse et reduktionspotentiale på 2 mio. ton CO₂e, som svarer til mere end en fjerdedel af de samlede reduktioner. Pyrolyse er endnu ikke blevet implementeret i den skala, og Klimarådet vurderer, at der er høj risiko forbundet med reduktionspotentialet ved pyrolyse. Særligt manglende økonomisk incitament for den enkelte landbruger til at anvende biokul udgør en barriere. Derfor undersøges det i dette projekt, hvordan implementering af CO₂-afgift og salg af carbon credits påvirker det økonomiske incitament til pyrolyse i landbruget.

Reduktionspotentialet ved pyrolyse skaber økonomisk værdi gennem reduceret afgiftsbyrde for landbrugeren og ved salg af carbon credits. For at vurdere størrelsesordenen af den økonomiske værdi ved anvendelse af pyrolyse undersøges det private marked for carbon credits og mulige scenarier for implementering af CO₂-afgiften i landbruget.

Der er eksponentiel vækst i det private marked for carbon credits, men markedet står overfor en række alvorlige udfordringer med henblik på troværdighed. Der er derfor høj efterspørgsel på biokulbaserede carbon credits, da reduktionspotentialet er pålideligt. Det afspejles i prisen på biokulbaserede carbon credits, som er mellem cirka 100 og 200 euro per ton CO₂e. Til sammenligning er gennemsnitsprisen på carbon credits mellem 2 og 10 euro.

Salg af carbon credits afhænger af, at den reduktion der sælges, vurderes at være additionel. Under en CO₂-afgift opstår en diskussion af additionaliteten af biokulprojekter, da reduktionen potentielt gives tilskud gennem afgiften. Hvis salg af carbon credits kan skabe en rentabel forretningsmodel uden tilskud, frigives tilskudsmidler til andre projekter. Under de omstændigheder kan der argumenteres for additionaliteten af biokulbaserede carbon credits på trods af CO₂-afgiften.

Regeringen offentliggjorde i april 2022 deres udspil til CO₂-afgiften for industri og andre erhverv. Med udgangspunkt i regeringens udspil samt Ekspertgruppen for Grøn Skattereform og Klimarådets anbefalinger til CO₂-afgiften vurderes afgiftssats og potentielle tilgange til begrænsning af lækage i landbruget. Det vurderes, at afgiftssatsen sandsynligvis vil blive mellem 750 og 100 kr. per ton CO₂e. For at begrænse lækage er mulige tilgange enten et produktionsafhængigt bundfradrag eller en tilskudsordning til negative emissioner. Hvis der skal skabes tilstrækkeligt økonomisk incitament, til at pyrolyse bliver et rentabelt virkemiddel i landbruget, skal den samlede tilskyndelse gennem afgiften være cirka 1.000 kr. per ton CO₂e, svarende til skyggeprisen på pyrolyse. Derfor er en tilskudsordning sandsynligvis nødvendig, hvis reduktionspotentialet ved pyrolyse skal realiseres gennem afgiften.

For at vurdere den økonomiske påvirkning af CO₂-afgiften i landbruget tages udgangspunkt i en mælkebedrift i Nordjylland som case. CO₂-afgiften vil sandsynligvis blive implementeret med udgangspunkt i klimaregnskaber på bedriftsniveau. Det endelige reguleringsgrundlag er endnu ikke defineret. Derfor anvendes tre eksisterende værktøjer til bedriftsregnskaber for at beregne bedriftens klimaafttryk. Værktøjerne suppleres med metoder til beregning af reducerede opbevaringsemissioner og kulstoflagring gennem pyrolyse. Metan fra fordøjelsen udgør størstedelen af bedriftens klimaafttryk efterfulgt af gyllehåndtering og lattergas fra jord. Ved anvendelse af pyrolyse reduceres bedriftens klimaafttryk med cirka 9%, hovedsageligt på grund af øget kulstoflagring gennem biokul.

Med resultater fra bedriftsregnskaber og en vurdering af CO₂-afgiftens implementering i landbruget opstilles en række scenarier for bedriftens økonomiske byrde som følge af afgiften samt den potentielle besparelse ved anvendelse af pyrolyse. Det vurderes sandsynligt, at bedriften vil skulle betale mellem cirka 2,7 og 4,1 mio. kr. om året i afgift svarende til 8-11% af bedriftens omsætning. Ved anvendelse af pyrolyse afhænger bedriftens besparelse af detaljer omkring afgiftens implementering. Anvendes en tilskudsordning til begrænsning af lækage vil besparelsen være mellem 25% og 60% af afgiftsbyrden. Anvendes et bundfradrag i stedet, er besparelsen lavere mellem cirka 15% og 45% af afgiftsbyrden.

Ved prissætning af reduktioner gennem både CO₂-afgift og carbon credits tilføres betydelig økonomisk værdi til biogen kulstof, da det gennem pyrolyse repræsenterer et reduktionspotentiale. Det er derfor nødvendigt at sikre fair forretningsmodeller, der skaber incitament til reduktioner i landbruget. Der undersøges en række scenarier for fordeling af økonomisk gevinst mellem landbruger og pyrolysevirksomhed. Der er med enten tilskud eller gennem salg af carbon credits potentiale for at skabe en rentabel forretning omkring pyrolyse i landbruget. Uden mere data på driftsøkonomi m.m. ved pyrolyse er det ikke muligt at udføre en fyldestgørende værdikædeanalyse.

Litteratur

Appunn K. (2021) *Will COP26 set right the booming Carbon Offset Market?* Energypost.eu <https://energypost.eu/will-cop26-set-right-the-booming-carbon-offset-market/> set 21-04-2022

Bochu J. et al. (2011) *Development of Carbon Calculator to promote low carbon farming practices*. Joint Research Center – IES

Camps-Arbestain M. et al. (2015) *A biochar classification system and associated test methods*. Biochar for Environmental Management, s. 165-194

Carbon Direct (2021) *Carbon Direct Commentary: Release of the Voluntary Registry Offsets Database*.

Carbonplan (2022) *Unpacking ton-year accounting*. <https://carbonplan.org/research/ton-year-explainer> set 19-04-2022

Christensen H. (2022) *Efter års tovtækkerier: Biomasseleverandører lander aftale med Nature Energy*. Landbrugsavisen.dk <https://landbrugsavisen.dk/efter-%C3%A5rs-tovtr%C3%A6kkerier-biomasseleverand%C3%B8rer-lander-aftale-med-nature-energy> set 24-05-2022

COM (2021) *Sustainable Carbon Cycles*.

Cool Farm Alliance (2022) *Cool Farm Tool*. <https://app.coolfarmtool.org/> set 12-05-2022

De Økonomiske Råd (2021) *Klimalækage og dansk landbrug*. <https://dors.dk/oevrige-publikationer/kronikker-artikler/klimalaekage-dansk-landbrug> set 23-05-2022

DMI (2022) *Klimanormaler for Danmark*. <https://www.dmi.dk/vejarkiv/normaler-danmark/> set 16-05-2022

Donofrio S. et al. (2021) *Markets in Motion – State of the Voluntary Carbon Markets 2021*. Ecosystem Marketplace

EBC (2020) *Certification of the carbon sink potential of biochar*. Version 2.1E of 1st February 2021

EGSR (2022) *Grøn skattereform*.

EU (2021) *The European Climate Law*.

EU (2021a) *Fit for 55-pakken – Oversigt over fremskridtene med lovgivningsforslagene i "Fit for 55"-pakken*.

Fearnside P.M. et al. (2000) *Accounting for time in Mitigating Global Warming through land-use change and forestry*. Mitigation and adaption strategies for global change, Vol. 5, s. 239-270

Giving Green (2021) *Overview – Voluntary Carbon Market*.

Gold Standard (2022) *What does "additionality" mean and why is it important?* Goldstandard.org <https://www.goldstandard.org/resources/faqs> set 29-05-2022

Hamelin L. et al. (2010) *Life cycle assessment of biogas from separated slurry*. Danish Ministry of the Environment

Henriksen U.B. et al. (2019) *Reduktion af landbrugets klimaaftryk ved termisk pyrolyse af afgrøderester og organiske gødningsfraktioner*.

Holly M.A. et al. (2017) *Greenhouse gas and ammonia emissions from digested and separated dairy manure during storage and after land application*. Agriculture, Ecosystems & Environment, Vol. 239, s. 410-419

IPCC (2019) *Method for estimating the change in mineral soil organic carbon stocks from biochar amendments: basis for future methodological development*. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC

IPCC (2020) *Climate Change and Land*. Intergovernmental Panel on Climate Change

IPCC (2022) *Climate Change 2022 Impacts, Adaptation and Vulnerability*

Joos F. et al. (2013) *Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis*. Atmos. Chem. Phys. Vol. 13, s. 2793-2825

Klima- Energi og Forsyningsministeriet (2020) *Klimaloven*.

Klima- Energi og Forsyningsministeriet (2021) *Klimaprogram 2021*.

Klimarådet (2016) *Effektive veje til drivhusgasreduktion i landbruget – Forslag til klimaregnskab for den enkelte landbrugsbedrift*.

Klimarådet (2022) *Statusrapport 2022*.

Klimarådet (2020) *Kendte veje og nye spor til 70 procents reduktion*.

Kristensen T. & Mogensen L. (2011) *Kvægbedriften – udledning af drivhusgasser* i Kristensen T. & Lund P. Kvæg og Klima – Udledning af klimagasser fra kvægbedriften med fokus på metan emissionen. DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug.

Landbrugsstyrelsen (2022) *Forskningsprogram for bedriftsbaserede opgørelser af udledninger af drivhusgasser og næringsstoffer*. Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri

Lewis K.K. & Burzec M. (2021) *After COP26: The interplay between Article 6 of the Paris Agreement and the Voluntary Carbon Market*. https://www.ey.com/en_pl/law/after-cop26-the-interplay-between-paris-agreement-and-the-voluntary-carbon-market set 25-04-2022

Lund P. (2018) *Normtal for husdyrgødning – 2018*.

Mørch T.R. & Kristensen V.E. (2021) *Langvarig strid om prisen for landmænds gylle intensiveres*. AgriWatch <https://agriwatch.dk/Nyheder/Landbrug/article13276017.ece> set 24-05-2022

NCX (2022) *How To Sell Carbon Credits With NCX*. <https://ncx.com/landowners/> set 19-04-2022

Nielsen O. et al. (2021) *Denmarks National Inventory Report 2021*. Danish center for environment and energy

Olesen J.E. et al. (2020) *Bæredygtig Biogas – Klima- og miljøeffekter af biogasproduktion*. DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug.

Petersen S.O. et al. (2016) *Estimation of methane emissions from slurry pits below pig and cattle confinements*. PloS ONE, Vol. 11

Poulsen HD et al. (2019) *Fosfor i dansk landbrug – ressource og miljøudfordring*. Aarhus

Universitet

Puro.earth (2022) *CORC Supplier Listing*. <https://puro.earth/CORC-co2-removal-certificate/> set 26-04-2022

Regeringen (2020) *Aftale om Grøn skattereform*.

Regeringen (2021) *Aftale om grøn omstilling af dansk landbrug*.

Regeringen (2022) *Grøn skattereform*.

SEGES (2022) *Landbrugets digitale klimaværktøj*. <https://www.seges.dk/da-dk/software/esgreen-tool> set 12-05-2022

Snøhetta (2021) *Biocrete – A carbon negative concrete*. <https://snohetta.com/project/558-biocrete-a-carbon-negative-concrete> set 25-05-2022

Solomon S. et al. (2009) *Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions*. PNAS, Vol. 106, s. 1704-1709

Thomsen I.K. et al. (2012) *Carbon dynamics and retention in soil after aerobic of dairy cattle feed and faeces*. Soil Biology and Chemistry, Vol. 58, s. 82-87

Thomsen T.P. (2021) *Climate Footprint Analysis of Straw Pyrolysis & Straw Biogas: Assessment of the Danish climate crisis mitigation potential of two new straw management options*. Roskilde University

TSVCM (2021) *Taskforce on scaling voluntary carbon markets – Final report*.

Verra (2021) *The Future of the Voluntary Carbon Market*. <https://verra.org/the-future-of-the-voluntary-carbon-market/> set 22-04-2022

Verra (2022) RFP: *VVB for Innovative Improved Forest Management Methodology*. <https://verra.org/rfp-vvb-for-innovative-improved-forest-management-methodology/> set 22-04-2022

Vijay V. et al. (2021) *Review of large-scale biochar field trials for soil amendment and the observed influences on crop yield variations*. Front. Energy Res.