

Vejen til effektiv CO₂-lagring med biokul

Januar 2024

Forord

CIP Fonden præsenterer med denne rapport en handlingsplan for en markedsdrevne produktion af biokul i Danmark, som kan bidrage til, at landbruget kan nå dets CO₂-reduktionsmål, og Danmark samtidig kan nå de samlede klimamål.

Udgangspunktet er, at vi skal bruge de teknologiske muligheder til gode klimaløsninger for samfundet, hvor der er store potentialer og mulighed for sidegevinster.

Planen er udarbejdet for at fremme markedet for biokul, og øge interessen hos investorer og andre deltagere i værdikæden og dermed skabe grundlag for markedsdrevne, negative emissioner baseret på landbrugets rester.

Fødevarereproduktion er i dag en af de største kilder til de globale, menneskeskabte klimaforandringer. Landbruget i Danmark står for knap 1/4 af de danske udledninger, der primært skyldes biologiske processer*. Dansk landbrug og fødevarereproduktion er i et krydsfelt med krav om lavere klimaaftryk og nødvendige investeringer i grøn omstilling, men også et fortsat behov for fødevarereproduktion og eksport.

Klimamæssigt har verden brug for, at flere fødevarer produceres klimaeffektivt og på et mindre areal. Udvikling og brug af nye løsninger kan gøre dansk landbrug og fødevarereproduktion til klimaeeksemplet, hvor lavere udledninger er forenelige med fortsat vækst og eksport.

Landbrugsaftalen fra 2021 forudsætter, at hovedparten af landbrugets CO₂-reduktioner realiseres gennem nye teknologier og ikke gennem afvikling eller neddrøling af landbrugets samlede produktion. Folketinget har med Landbrugsaftalen besluttet, at pyrolyse og produktion af biokul skal være et centralt virkemiddel til reduktion af landbrugets udledninger af klimagasser med et potentiale på op til 2 mio. ton CO₂-lagring årligt.

Pyrolysen er en fleksibel teknologisk platform, som kan tilpasses ændringer i landbruget og skabe merværdi for en lang række afgrøde- og landbrugsrester. Knytter man en betaling for CO₂-lagringen har teknologien potentiale til at blive udrullet på markedsvilkår og frigøre ressourcer, der kan investeres i yderligere grøn omstilling. Biokul kan med klare rammevilkår spille en afgørende rolle og har potentialet til at blive for landbruget, hvad vind har været for energisektoren.

Biokul er et klimavirkemiddel og et stabilt kulstoflager ligesom DACCS og BECCS. Der er ikke tale om konkurrerende virkemidler, men om virkemidler der supplerer hinanden. Landbruget har fordel af et virkemiddel, der langtidslagrer den CO₂, planterne optager. Industrien og energisektoren har brug for virkemidler, der kan indfange CO₂ fra produktionen og lagre den.

CO₂-lagring møder nogle gange den kritik, at det var bedre, hvis der blev investeret i reelle CO₂-reduktioner fremfor i lagringsteknologier. Der skal ske massive reduktioner de kommende år, men det ene udelukker ikke det andet. Hvis vi skal leve op til Parisaftalens målsætning, er vi ifølge FN's klimapanel, IPCC, nødt til at anvende negative emissionsteknologier.

Vi skal ikke alene reducere udledningen af CO_{2e}, vi skal også trække eksisterende drivhusgasser ud af luften.

CIP Fondens handlingsplan for en markedsdrevne produktion af biokul skal ses i sammenhæng med vores vision om et bæredygtigt landbrug, der baserer sig på innovation og brug af nye teknologier. Med det sigte, at Danmark kan vedblive med at være et foregangsland, og vi kan fastholde den stærke position på de globale markeder.

Rapporten kan både læses i sin helhed, men også bruges som opslagsværk alt efter, hvad man interesserer sig for. Nogle pointer fremgår flere gange – det er fordi, de er vigtige!

CIP Fonden følger i 2024 op med et fokus på de eksportmuligheder, som lagring af CO₂ i biokul rummer.

God læselyst!

Anne Arhning
Medlem af CIP Fondens bestyrelse

Charlotte Jepsen
Ledende partner i CIP Fonden



Anne Arhning
Uafhængigt bestyrelsesmedlem



Charlotte Jepsen
Ledende partner i CIP Fonden

* [Hvad er CO2? \(lf.dk\)](#)

Sammenfatning

Biokul har potentialet til at spille en hovedrolle i omstillingen af dansk landbrug. Det er en moden teknologi, som kan lagre CO₂ effektivt i mange århundreder. De samfundsøkonomiske fortrængningsomkostninger for kulstoflagring med biokul er meget konkurrencedygtige sammenlignet med andre klimavirkemidler.

Teknologien bag biokul har potentiale til at blive udrullet på markedsvilkår og kan dermed frigøre ressourcer, der kan investeres i yderligere grøn omstilling. Forudsætningen for markedsdrevne CO₂-reduktioner i landbruget er, at der betales for lagringen i biokullet gennem fx klimakreditter. En støtteordning i opstartsfasen kan afhjælpe noget af usikkerheden i businesscasen i dag. Fravær af direkte regulering af biokul skaber usikkerhed og er en hæmmende faktor for markedsudviklingen.

NYT KLIMAVIRKEMIDDEL BASERET PÅ GAMMELKENDT TEKNOLOGI

Biokul som anerkendt og effektivt klimavirkemiddel er forholdsvis nyt både herhjemme og i udlandet. Men det er naturens egen CCS, man udnytter ved produktion af biokul, og biokul har man lavet gennem mange år.

Som vi kender det fra naturens fotosyntese, optager planterne CO₂ fra luften. Når man så opvarmer planteresterne, fx græs, halmrester eller trærester, i en pyrolyseovn til omkring 500-600 grader i et iltfrit miljø, fordeler kulstoffet fra biomassen sig nogenlunde ligeligt mellem gasser (grøn energi) og et restprodukt i form af biokul, hvor kulstoffet kan lagres

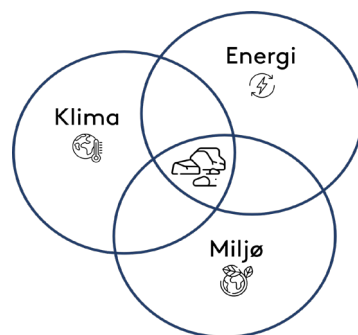
stabilt og meget langvarigt.

Når man laver biokul af restbiomasser og på den måde indfanger og fjerner CO₂ fra atmosfæren og lagrer det, er der tale om en såkaldt negativ emissionsteknologi.

TEKNOLOGI MED TRE KLARE FORMÅL

Pyrolyse af restbiomasser kan levere på tre væsentlige områder på én og samme tid:

Figur A: Biokul leverer på flere fronter



Kilde: CIP Fondens tilvirkning

Pyrolyseprocessen producerer grønne energiprodukter i form af pyrolysegas og bioolier, der kan bruges til fx grønne brændstoffer, og processen skaber desuden overskudsvarme, der kan afsættes til fjernvarme eller til opvarmning af anlæg eller bygninger. Denne form for grøn energi er ikke afhængig af, om vinden blæser eller solen skinner, og er derfor et godt supplement i fremtidens energisystem.

Klimaet har gavn af, at restbiomasserne bruges i et pyrolyseanlæg i stedet for at ligge hen og fx blive kørt ud på en mark, hvor de



forrådner. Når de i stedet behandles, undgår man emissioner af stærke drivhusgasser fra restbiomassen. Og når den grønne energi fra processen bruges på områder, hvor den erstatter andre klimabelastende alternativer, er der klimamæssigt tale om fortrængning. Endelig kan biokullene i sig selv og på dokumenterbar vis lagre kulstof som en CCS teknologi. Dét er nyt.

"Biokul har en række positive sideeffekter, når det bruges på landbrugsjord. Den bliver bedre til at holde på vandet til gavn for planterne, og der er mulighed for at recirkulere vigtige næringsstoffer som fosfor og kalium til områder, der mangler det."

Nyt er derimod ikke de mulige miljømæssige gevinster ved at bruge biokullene på jorden. Det er faktisk derfor, at man gennem efter-

hånden mange år har lavet biokul. I andre lande har biokul meget længe været brugt som et naturligt middel til at forbedre jorden. Allerede for mere end 2.500 år siden begyndte man at bruge biokul til jordforbedring i Amazonas. Jorden i regnskoven er ofte sandet og ufrugtbar under det første, tynde jordlag. Ved at tilføje biokul har det været muligt at omdanne jorden til en mere næringsrig og frugtbar jord til dyrkning af fx fødevarer.

I Europa og en række andre lande bliver biokul i dag især brugt til at forbedre jorden på landbrugsbedrifter og som gødningsprodukt til have/park-anlæg, i gartnerier og private haver.

Når man bruger biokul, bliver jorden mere tørkeresistent, dens udledning af potente klimagasser reduceres, og udvaskningen af

kvælstoffer fra jorden til vandområder kan reduceres.

Biokul kan også bruges andre steder, fx som fodertilsætning, i byggematerialer og til isolering, til jordoprensning og filtrering og mere eksotisk også i helseprodukter.

EFFEKTIV LAGRING AF CO₂ OG ANDRE KLIMAEFFEKTER

Selv om biokullet fx bruges til gødning, lagrer det stadig kulstoffet stabilt og langvarigt.

“Der er videnskabelig konsensus om, at biokul er et troværdigt klimavirkemiddel med langvarige lagringseffekter.”

80 pct. af kulstoffet i biokullene er der stadig efter 100 år og ...

75 pct. er der stadig efter 1.000 år

Allerede efter få år lagrer biokul mere kulstof netto, når man sammenligner med alternativet, som fx er at sprede halmrester eller digestat (restfibre fra biogas) ud på markerne.

“Ved siden af den direkte CO₂-lagring, som fjerner CO₂ fra atmosfæren, er der yderligere klimaeffekter i form af undgåede emissioner og fortrængning.”

Klimaeffekterne af dansk produceret biokul er opløftende, og et ton tørstof af restbiomasse kan som regel “veksles” til minimum et ton klimagevinster. Halm og restfibre fra biogas har de største, samlede klimaeffekter på længere sigt, mens behandling af fx spildevandsslam til biokul især har klimaeffekter på

1 ton biokul ~ 2 ton lagret CO₂e

kortere sigt i form af undgående emissioner.

RESTBIOMASSE NOK TIL AT OPFYLDE POLITISK MÅLSÆTNING

Biokul er det sidste led i en cirkulær anvendelse af biomasser og tager udgangspunkt i restprodukter, der ikke har nævneværdig anden anvendelse. Vi taler bl.a. om halmrester og andre afgrøderester, restfibre fra biogasproduktion og spildevandsslam, som kan tilføres kommerciel værdi, hvis det anvendes i pyrolyseprocessen og omdannes til grøn energi og biokul, der kan lagre CO₂.

“... der er nok restbiomasser til at nå Landbrugsaftalens målsætning om lagring af 2 mio. ton CO₂ årligt.”

Især halmrester, restfibre fra biogasproduktion og dybstrøelse er vigtige i produktionen af biokul, fordi de indeholder forholdsvis meget kulstof. Den gode nyhed er, at der er nok restbiomasser til at nå Landbrugsaftalens målsætning om lagring af 2 mio. ton CO₂e årligt. Og der er potentiale til flere restbiomasser fra landbruget i Danmark med op til 10 mio. ton flere bioressourcer i 2030, jf. det Nationale Bioøkonomiske Panel (2022). Primært i form

Figur B: Rester af halm, digestat, dybstrøelse, spildevandsslam og have/park affald kan understøtte lagring af 2 mio. ton CO₂e



Kilde: NIRAS (2023)

af flere halm- og strårester, der er velegnet til at lave biokul af.

Biokul er samtidig en god mulighed for effektivt at genbruge fosfor fra biomasserne og omfordele mellem landbrugsjorde – uden import af fosfor, som ellers er en knap ressource. Fosforlofterne for landbrugsjord sætter i praksis grænsen for, hvor meget biokul man kan udbringe på en mark ad gangen.

PYROLYSETEKNOLOGIEN KAN UDRULLES PÅ MARKEDSVILKÅR, HVIS DER BETALES FOR CO₂-LAGRINGEN

Etablering af pyrolyseanlæg forudsætter store initiale investeringer, hvilket kræver, at der er klarhed om de regulatoriske rammer og de fremtidige, langsigtede indtægtsstrømme. Her skal både være styr på aftageraftaler for restbiomasser som input og biokul som output og på, at der sker en betaling for omkostningerne til CO₂-lagringen.

“CCS-omkostningerne ved biokul kan enten dækkes gennem klimakreditter, CCS-støtte i en periode eller gennem en højere betalingsvillighed hos forbrugere for de produkter, der laves inden for værdikæden”

Analysen af værdikæden og de potentielle indtægtsstrømme viser, at teknologien bag biokul har potentiale til at blive udrullet på markedsvilkår og derved kan frigøre ressourcer, der kan investeres i yderligere grøn omstilling.

“.. pyrolyse og biokul er på et teknologisk stadie, hvor der er potentiale for udrulning på markedsvilkår og med bidrag til CCS i landbrugssektoren, hvor der ikke er andre alternativer i den størrelsesorden”

Hvis lagring af CO₂ med biokul skal kommercialiseres, kræver det et samarbejde på tværs af brancher og aktører, som ikke nødvendigvis

normalt arbejder sammen, og det kræver, at alle involverede har en gevinst ved at deltage i værdikæden. Forenklet vil værdikæden bestå af 1) en leverandør af biomasse (fx landbrug eller biogasanlæg), 2) et pyrolyseværk, 3) aftagere af biokul (fx landbrug), 4) aftagere af energiprodukter (fx rederier) og 5) aftagere af overskudsvarme fra pyrolyseværket (et varmegærk).

HVAD BETYDER NOGET FOR RENTABILITETEN?

Business casen afhænger af den anvendte biomasse, behovet for forudgående behandling og biomassens energi- og kulstofindhold samt afsætningspriserne på energi i form af varme og grønne olieprodukter. Nogle restbiomasser er omtrent gratis som fx restfibre fra biogas, mens andre koster penge som fx halmrester. Og så er der rester, som man ligefrem får penge for at tage imod, nemlig spildevandsslam. Biomasserne varierer også efter, hvor meget behov de har for forudgående tørring og separering.

Rentabiliteten styrkes også af symbioser og samlokalisering, dvs. når pyrolyseværket placeres i nærheden af en inputleverandør, fx et biogasanlæg eller et spildevandsanlæg, eller i nærheden af en outputaftager, fx en energipark, eller i nærheden af infrastruktur som fx fjernvarmenettet.

“For at værdikæden er økonomisk bæredygtig, skal der være en gevinst for landbruget ved at levere til og efterfølgende bruge biokullet på markerne.”

For at biokulproduktion og -lagring i landbruget skal kunne betale sig, skal der skabes en indtjening for CO₂-lagring i biokul, der sammen med indtægterne fra energien kan aflønne landbruget, som leverer biomassen, pyrolyseværket, der producerer biokullet, og

landbruget, der aftager biokullet igen og lagrer det.

Nogen skal med andre ord betale for biokul-lets positive klimaeffekt!

CIP Fonden har undersøgt den privatøkonomiske rentabilitet i CCS med biokul for den samlede værdikæde og finder, at det i dag kan betale sig at producere biokul af restfibre fra biogas i et simpelt set-up, hvor der også laves pyrolysegas, samt af halmrester, hvis der samtidig også produceres bioolie. Altså hvis der kan opnås medfinansiering for CO₂-lagringen i størrelsesordenen 400-700 kr. pr. ton.

Biokul af spildevandsslam er også rentabelt, hvis der kan opnås en lidt højere betalingsvillighed til at komme af med slammet, end der i dag betales til landmænd, der bringer slammet direkte ud på markerne.

KLIMAKREDITTER KAN MEDFINANSIERE CO₂-LAGRING I BOKUL

Et klimacertifikat er et bevis på, at der er fjernet et ton CO₂ fra atmosfæren. Når et certifikat handles, kaldes det en klimakredit.

CO₂-lagring i biokul har gode forudsætnin-ger for at finde medfinansiering gennem det voksende, globale marked for klimakreditter, fordi teknologien leverer en troværdig og langvarig lagring, der ikke kan fortrydes, og en let kommunikerbar løsning med flere co-benefits.

Markedet for klimakreditter er i en rivende udvikling, der drives af stigende efterspørgsel efter produkter med lavere klimaaftryk og af virksomheder med ambitiøse klimamål om fx at blive net-zero, men ikke nødvendigvis kan nedbringe alle emissioner selv eller blandt deres nærmeste samarbejdspartnere. Kli-

makreditter kan så bruges som modregning i virksomheders klimaregnskaber.

”Betalingsvilligheden for klimakreditter afhænger primært af varigheden af klima-effekten og af dokumentation og sikkerhed i projektet.”

Prisen for en klimakredit baseret på CCS med biokul koster omkring 130 EUR pr. ton CO₂e. I sommeren 2023 blev der for første gang solgt klimakreditter baseret på danske biokul fra SkyClean til 160 EUR pr. ton CO₂.

BEHOV FOR STANDARDISEREDE RAMMER

Markedet for klimakreditter – og herunder biokulkreditter – kan styrkes, hvis der etableres en ensartet, standardiseret certificeringsramme med klare retningslinjer for, hvordan klimaeffekterne opgøres, anvendes og kommunikeres, og med klar verifikation fra en uafhængig tredjepart. Et fast system for Monitoring, Reporting and Verification (MRV).

Der eksisterer i dag forskellige standarder globalt på det frivillige marked for klimakreditter. Selv om de også har MRV-systemer, kan det være svært at navigere mellem de forskellige standarder. EU arbejder på en standardiseret certificeringsramme for kulstoffjernelse, som forventes færdig omkring 2028, der kan blive normdannende for fremtidens klimacertifikater.

”En europæisk standard for certificering af kulstoffjernelse er på vej og vil kunne styrke markedet for køb og salg af klimacertifikater”

Derfor vil det også være et vigtigt signal til markedet, om EU i de aktuelle forhandlinger når frem til at klassificere biokul som et klimavirkemiddel med lange og stabile lagrings-effekter på lige fod med andre teknologier til CO₂-lagring som fx DACCS og BECCS.

KLARE SIGNALER FRA INTERNATIONAL REGULERING

FN's klimapanel, IPCC, besluttede i 2018 at anerkende biokul som en såkaldt Net Zero Emission-teknologi og har efterfølgende estimeret et globalt reduktionspotentiale på 2,6 mia. ton CO₂e årligt. Der er med andre ord brug for en bred vifte af CCS-teknologier, hvis vi skal lykkes med at holde temperaturstigningerne nede. Både for at indfange emissioner fra hard-to-abate-industrier, men også for at trække CO₂ fra fortidens udledninger ud af atmosfæren.

EU tillod i 2022 for første gang biokul baseret på planterester som et gødningsprodukt i EU og efterfølgende også biokul af husdyrgødning via den reviderede Gødningsforordning. Nu kan det sælges inden for EU, hvis biokullet er CE-mærket og fx lever op til bestemte grænseværdier for biokullets indhold.

BOKUL FINDES NÆSTEN IKKE I DANSK REGULERING

I sommeren 2023 fik Danmark for første gang indarbejdet biokul af landbrugsrester som gødningsprodukt i reguleringen. Men kun i reglerne for, hvordan man bruger biokul. Det betyder imidlertid ikke, at man også har lov til at bruge biokullet på markerne.

I Danmark er det som udgangspunkt ikke tilladt at bruge biokul baseret på landbrugets sidestrømme. Det kræver en særlig miljøtilladelse. Nærmere bestemt en § 19-tilladelse fra kommunen. Tilladelsen er midlertidig og gælder kun brug på bestemte marker og konkrete mængder biokul. Den type tilladelse bruges i tilfælde, hvor der ikke er anden regulering. Det kan man ikke basere en markedsudrulning på.

Regler om biokul i Danmark skal udledes indirekte gennem andre regler. Paradoksalt nok



tillader dansk regulering på den måde faktisk udbringning af biokul baseret på affald som fx spildevandsslam på markerne. Det er alt andet lige en af de restbiomasser, der kan indeholde flest problematiske stoffer. Så noget biokul må man bruge i Danmark.

Paradoks at biokul baseret på affald er tilladt i Danmark, mens biokul af renere biomasser som fx halmrester eller græs kræver en særlig miljøtilladelse.

BEHOV FOR KLARE RAMMEVILKÅR

Et fravær af direkte regulering af biokul skaber usikkerhed og er hæmmende for markedsudviklingen.

Det samme gælder reglerne for placering af pyrolyseanlæg, som kan nødvendiggøre tidskrævende ændringer af lokalplaner mv. Her kan man med fordel lære noget af opbygningen af markedet for biogas og give mulighed for også at placere pyrolyseanlæg i landzoner.

Der træffes ikke større investeringsbeslutninger for markedsudrulning, når der er væsentlig usikkerhed om såvel tidshorisont som afgørelser og med risiko for lokal variation.

“Der er behov for klare rammevilkår og navnlig for en klar hjemmel til at bruge biokul i dansk landbrug, når de lever op til grænseværdier for biokulenes indhold”

Da biokul kan produceres på baggrund af en række forskellige restbiomasser, bør en hjemmel til at bruge biokul på danske marker være uafhængig af hvilken biomasse, der anvendes. I stedet skal der reguleres på indholdet af biokullet. Det skal sikre enkelthed og entydighed i reguleringen.

Samfundsøkonomisk omkostning ved at lagre et ton CO₂e:

Biokul af halm	250 kr.
Biokul af digestat	700 kr.
BECCS	1.450 kr.
DACCS	1.500 kr.

Når man også tager højde for mulige miljøeffekter og indtægter fra klimakreditter, ender biokul med at være en samfundsøkonomisk gevinst, mens BECCS stadig er forbundet med en omkostning.

Kilde: EA Energianalyse (2024)

RISIKO FOR NEGATIVE EFFEKTER KAN FOREBYGGES

Da biokul er noget nyt til brug i landbruget, bør der gøres en ekstra indsats for at forebygge potentielt negative miljø- og bæredygtighedskonsekvenser. Det kan fx gøres gennem valg af grænseværdier for biokullets indhold af forskellige stoffer. Her bør man anvende et forsigtighedsprincip, hvor man tager afsæt i de mest restriktive, eksisterende grænseværdier på tværs af gødningsprodukter og for den skyld også EU-reguleringen og kravene i de forskellige klimacertifikater.

Ikke fordi der er påvist negative effekter ved brugen af biokul i landbruget. Men for at skabe tryghed om brugen. Der skal ikke tillades mere ved udbringning, end der gør i dag på andre områder gødningsmæssigt. Omvendt er der heller ikke noget, der taler for, at biokul skal opfattes mere restriktivt end andre gødningsprodukter.

Fortsat forskning og videnopbygning fra praksis er nødvendig. Den viden bør systematiseres og danne grundlag for guidelines for brugen af biokul.

Så kan et marked etableres og følges af forsk-

ningsforsøg og målinger, som kan guide den fremadrettede udvikling i reguleringen.

KONKURRENCEDYGTIG SAMFUNDSPRIS FOR CO₂-LAGRING MED BOKUL

Samfundsøkonomisk er prisen for at lagre et ton CO₂ fra atmosfæren med biokul konkurrencedygtig sammenlignet med andre CCS-teknologier som DACCS og BECCS.

Biokul er derfor en effektiv og relativ prisbillig måde for samfundet at opnå klimaforbedringer på sammenlignet med andre klimavirkemidler.

“Samfundsøkonomisk er der en relativ lav fortrængningsomkostning forbundet med at bruge biokul som klimavirkemiddel”.

Hvis man også tager højde for nogle af de sideeffekter af miljømæssig karakter, der kan være ved de forskellige metoder, forbedres nettoresultatet samfundsøkonomisk for især biokul baseret på restfibre fra biogas (digestat), mens det eksempelvis forværres for BECCS og er omtrent neutralt for biokul baseret på halmrester.

Tager man også højde for, at der kan være en aflønning for den service, som CO₂-lagringen udgør, fx via klimakreditter, vil billedet ændres, og brug af biokul ender med at blive en mindre gevinst for samfundet, mens BECCS stadig netto er forbundet med en samfundsøkonomisk omkostning, selv om denne metode også kan opnå finansiering via klimakreditter.

Ved også at inddrage potentielle indtægter fra klimakreditter i det samfundsøkonomiske regnestykke fås et indtryk af, hvor vidt der er behov for, at statskassen understøtter denne form for CCS. Det kan der være i en opstartsperiode for markedet, og mens det

internationale marked for klimakreditter er under etablering, standardisering og konsolidering. Men på sigt har kulstofflagring med biokul altså udsigt til også at blive økonomisk bæredygtig for samfundet.

Biokul som klimavirkemiddel er en samfundsøkonomisk god investering. Og et af de få klimavirkemidler med så stort potentiale, især i landbruget. Det bør derfor overvejes at fremme markedet gennem klar regulering, effektive godkendelsesprocesser og gennem CCS-støtte i markedets opstart til at dække nogle af omkostningerne ved CO₂-lagringen, som ellers skulle dækkes af et endnu usikkert marked for klimakreditter.

ANBEFALINGER OG EN UDRULNINGSPLAN FOR PRODUKTION AF BOKUL I STOR SKALA

Biokul har potentialet til at spille en afgørende rolle i den grønne omstilling af dansk landbrug. Det er en moden teknologi, som ligger bag, og biokul kan lagre store mængder kulstof effektivt i op til 1000 år. Hertil kommer, at de samfundsøkonomiske skyggepriser for CO₂-lagring med biokul er meget konkurrencedygtige sammenlignet med andre klimavirkemidler. Modsat de store CO₂-fangstanlæg ved kraftvarmeværker og store industrivirkemidler kan denne form for CO₂-fangst og -lagring ske decentralt og tæt ved de steder, hvor biomasseresterne findes.

For landbruget under ét vil al den biokul, som lagres på landbrugsjorden, reducere det samlede reduktionskrav til landbruget. Selvom der fx frasælges klimakreditter, vil nettolagringen stadig tælle med i de nationale og sektorbaserede emissionsopgørelser.

“Alle reduktioner som følge af brug af biokul i landbruget vil nedbringe det kollektive krav til landbruget under ét – også selv om der fx frasælges klimakreditter”

Den kollektive gevinst i form af reducerede nettoudledninger fra landbruget er derfor et tilsvarende mindre behov for en CO₂-afgift eller andre redskaber målrettet landbruget.

Biokul har potentiale til at bidrage til Danmarks 2030-målsætning og de senere målsætninger om klimaneutralitet i 2045 og nettonegativ i 2050. Ikke med 2 mio. ton CO₂-lagring allerede i 2030, som har været målsætningen i Landbrugsaftalen, da der ikke kan nås at opbygge kapacitet til det, men inden for relativt få år derefter er det sandsynligt afhængigt af rammerne.

Selv om andre lande har lavet biokul i længere tid, har de ikke haft klimaeffekter som det største fokus. Danmark har et potentiale til at udbygge en industri for biokul i lyset af allerede etablerede logistikmuligheder for en række restbiomasser, mulighederne for at afsætte grøn energi og overskudsvarme gennem veludbygget infrastruktur, og et blik for mulige samlokaliseringer.

Teknologimæssigt er Danmark også godt med og vil i begyndelsen af det nye år huse et af de største anlæg til biokulproduktion i Europa. Andre danske producenter har også større, kommercielle anlæg på vej.

Så der er basis for, at biokul, teknologien bag, og en effektiv dokumentation af klimaeffekterne kan blive en ny, dansk eksportmæssig styrkeposition. Eksportmulighederne og opbygning af kompetencer og learning-effekter er temaet for CIP Fondens næste indsats inden for emnet.

De væsentligste udfordringer lige nu for at bruge denne lovende teknologi i Danmark knytter sig til fravær af direkte regulering af biokul i dansk lovgivning, til nye værdikæde-

samarbejder, hvor der skal opnås indtægt til dækning af omkostningerne ved CO₂-lagringen, og til et øget kendskab til, og praksisviden om, hvordan man kan bruge biokul. CIP Fonden anbefaler på den baggrund følgende:



CIP Fondens hovedanbefalinger

- **Etabler hjemmel for brug af biokul af landbrugets rester**
- **Understøt opstart med CCS- støtte, der afløses af markedet for klimakreditter**
- **Etabler guidelines for brug af biokul i landbruget**

Tabel A: CIP Fondens anbefalinger til at fremme biokul som middel til kulstoflagring i landbruget

	Regulator 	Markedsaktører 	Forskere og videnspersoner 
Centrale anbefalinger	Etabler hjemmel for biokul af landbrugets sidestrømme Understøt opstart med CCS-støtte, der afløses af markedet for klimakreditter Etabler guidelines for brug af biokul i landbruget		
Generelle anbefalinger	- Start med rammeregulering og grænseværdier for biokullets indhold baseret på de mest strikse, nuværende grænser på tværs af forskellige reguleringer af forsigtighedshensyn, som så i takt med ny viden kan strammes eller lempes Tværministeriel task-force med fokus på hjemler og procesforenkling for hurtigere etablering af biokulproduktion - Udvikl metode til at opføre CO₂-lagringen netto med biokul i de nationale emissionsopgørelser, så lagringen også kan anerkendes og indregnes i forhold til politiske målsætninger - Inddrag udpegning af relevante områder til pyrolyseanlæg i kombination med kommunernes nuværende opgave med at udpege egnede områder til biogasproduktion og energiparker for hurtigere etablering	- Udbred kendskabet blandt potentielle investorer til teknologien for at accelerere interessen - Etabler logistikkæder med mulighed for langvarige aftageraftaler (PPA'er) for biomasse og biokul - Accelerer skalering og læringsproces for at udvikle pyrolyseteknologien til storskala - Påbegynd udvikling af energiprodukter til højværdianvendelse og forbered mulig opgradering, metanisering og fremtidig koordination med PtX	Kategoriser forskningsresultater efter evidens, biomasse, pyrolyseproces og anvendelsesområde for at gøre indsigterne mere anvendelsesorienterede. - Igangsæt langvarige markforsøg og få overblik over langsigtede miljø- og agronomiske effekter af brug på landbrugsjord - Udvikl praksisviden for optimal brug af biokul og foretag erfaringsudveksling - Udvikl kompetenceudvikling, undervisningsaktiviteter og læringsredskaber til de mennesker, der skal udbygge, drive og myndighedsbehandle mv. processer omkring biokul
Specifikke anbefalinger	Sidestil pyrolyseanlæg med biogasanlæg i Planloven for at understøtte mulig placering i nærhed til restbiomasser - Understøt hurtigere miljøklassifikation af pyrolyseanlæg og dermed processen for miljøvurderinger med udgangspunkt i standardeksempler - Tilpas fosforlofterne ift. biokuls frigivelse over tid - Arbejd for at få CO₂-lagring med biokul i andre sektorer, fx byggebranchen, anerkendt i nationale emissionsopgørelser (via IPCC) - Lav standardproces for kommunale vurderinger og §19-godkendelser, indtil central regulering er klar - Etabler et "overensstemmelsesvurderingsorgan" til at godkende biokul med CE-mærkning som gødningsprodukt	- Udvikl metoder til markhåndtering af biokul (landbruget og materialeleverandører) - Udvikl kombination af biokul og andre gødningsprodukter for at opnå de bedste effekter	- Undersøg biokuls effekt på udvaskning af kvælstoffer fra jord til vandmiljø - Undersøg samspillet bedre mellem biokul, jordtype og effekten på forskellige former for levende organismer i jorden under danske forhold

Kilde: CIP Fonden

Indhold

Sammenfatning	7
1. Hvorfor CO₂-lagring med biokul?	12
1.1. Hvad i alverden er biokul?.....	12
1.2. Biokul er metoden til CO ₂ -fangst og -lagring (CCS).....	13
1.3. Biokul kan blive central i den grønne omstilling.....	13
1.4. Marked under opbygning.....	14
1.5. Hvad venter vi på?.....	14
2. Hvad er udfordringerne for biokul?	15
2.1. Teknologi.....	15
2.2. Restbiomasser.....	15
2.3. Belønning for CO ₂ -lagring.....	16
2.4. Efterspørgsel efter biokul.....	16
2.5. Regulering og rammer.....	16
2.6. Samfundsværdi.....	17
2.7. Fortsat vidensbehov.....	17
2.8. Kendskab og accept.....	17
3. Korte svar om biokul	19
3.1. Hvad er biokul og hvad bruger man det til?.....	19
3.2. Hvad kan man lave biokul af?.....	20
3.3. Hvad er klimaeffekterne af at lave biokul?.....	21
3.4. Hvor længe kan man lagre CO ₂ med biokul?.....	21
3.5. Hvor meget biokul kan man lave?.....	22
3.6. Hvad er et klimacertifikat og en klimakredit?.....	23
3.7. Hvordan hjælper biokul landbruget?.....	23
3.8. Hvad betyder biokul for biodiversiteten?.....	24
4. Hvordan er økonomien bag biokul?	25
4.1. Hvad betyder noget for prisen for at lagre CO ₂ ?.....	25
4.2. Hvorfor er biokul interessant for det enkelte landbrug?.....	26
4.3. Business case for biokul.....	26
4.4. Hvor meget kapacitet skal man bygge?.....	29
4.5. Hvad betyder en CO ₂ -afgift for markedet for biokul?.....	30
5. Hvad får samfundet ud af det?	31
5.1. Biokul bidrager til klima, grøn energi og miljø.....	31
5.2. Mulige miljøeffekter af biokul på landbrugsjorden.....	32
5.3. Samfundsøkonomisk godt klimavirkemiddel.....	33
5.4. Andre samfundseffekter af biokul?.....	36
6. Hvad siger reguleringen om biokul?	37
6.1. International tilgang til biokul.....	37
6.2. Biokul i dansk regulering.....	37
6.3. Hvor må man bygge pyrolyseanlæg?.....	39
6.4. Økonomisk støtte til biokul.....	40
6.5. Biokuls klimaeffekt i nationale emissionsopgørelser.....	41
7. Hvordan markedsføres man biokul?	42
7.1. Relevante aktører.....	42
7.2. Bæredygtig værdikæde.....	43
7.3. Klimakredit som økonomisk virkemiddel.....	43
7.4. Gevinster ved samlokalisering.....	44
7.5. Ejerskabsformer og investorer.....	44
7.6. Hvordan bliver biokul produktionen udbygget?.....	45
8. Erfaringer fra andre lande	46
8.1. Voksende globalt marked.....	46
8.2. Biokul har mange anvendelsesområdet.....	47
8.3. Hvad kan vi lære af andre lande?.....	47
9. Hvordan kommer vi videre?	49
9.1. Status for biokul i Danmark.....	49
9.2. Kan man nå 2 mio. ton CO ₂ -lagring med biokul i 2030?.....	50
9.3. Hvad skubber på markedsdannelsen, og hvad holder udviklingen tilbage?.....	50
9.4. anbefalinger.....	52
Kilder	54
Bilag	56
A. Oversigt over danske producenter af biokul.....	56
B. Antagelser bag business cases for biokul.....	58

Oversigt over figurer

Figur 1.1. Process bag biokul og CO ₂ -lagring i landbrugsjord.....	12
Figur 1.2. Eksempler på anvendelse af biokul.....	13
Figur 2.1. Flere typer af udfordringer for markedet for biokul.....	15
Figur 3.1. Kaskadeanvendelse af biomasser, hvor de prioriteres efter formål og anvendelse.....	20
Figur 3.2. Total biomassepotentiale.....	21
Figur 3.3. Biokul lagrer mere CO ₂ end alternativet allerede inden 2 år.....	21
Figur 3.4. Mængder af udvalgte, relevante biomasser til biokul.....	22
Figur 3.5. Hvor meget kulstoflagring kan biomassen understøtte?.....	22
Figur 3.6. Produktion af biokul kan finansieres gennem salg af klimakreditter.....	23
Figur 4.1. Stigende priser på klimakreditter baseret på biokul.....	28
Figur 5.1. Biokul leverer på flere fronter.....	31
Figur 5.2. Som CCS-teknologi leverer biokul langsigtet og stabil lagring.....	31
Figur 5.3. Effekterne af biokul på landbrugsjord afhænger af flere forskell.....	32
Figur 5.4. Illustration af samfundsøkonomisk skyggepris for CO ₂ -lagring med biokul.....	33
Figur 5.5. Placering af biomasser i Danmark efter kulstofindhold.....	36
Figur 6.1. Forskellige krav for biokul på landbrugsjord- lettest hvis baseret på affald.....	38
Figur 6.2. Etablering af biokulproduktion og eksempler på processer.....	40
Figur 7.1. Eksempel på værdikæde med biogasanlæg.....	42
Figur 7.2. Eksempler på værdistrømme for pyrolysegassen.....	42
Figur 7.3. Værdikæde med salg af klimakredit.....	43
Figur 7.4. Eksempel på trade-off i forhold til samlokaliseringsevner.....	44
Figur 7.5. Hvordan kan teknologien udvikle sig?.....	45
Figur 8.1. Stigende biokulproduktio i EU, der svarer til 7-9 stk. 20 MW anlæg i 2023.....	46
Figur 8.2. Tyskland står for størstedelen af biokulproduktionen i Europa, ultimo 2022.....	46

Oversigt over tabeller

Tabel 4.1. Varierende indhold af kulstof og fosfor alt efter valg af biomasse.....	25
Tabel 4.2. Kan CO ₂ -fangst og -lagring med biokul produceres billigere end 750 kr. pr. ton?.....	29
Tabel 5.1. Samfundsøkonomiske skyggepriser for forskellige metoder til CCS.....	34
Tabel 5.2. Forskellige metoder til at lagre CO ₂ langvarigt - Hvad er fordele og ulemper?.....	35
Tabel 9.1. Kan man nå den politiske målsætning om 2 mio. ton CO ₂ i 2030 med biokul?.....	50
Tabel 9.2. Vejen til effektiv CO ₂ -lagring med biokul.....	53

Oversigt over bokse

Boks 4.1. Tre eksempler på biokulcases baseret på forskellige restbiomasser.....	27
Boks 5.1. Miljømæssige sideeffekter af biokul på landbrugsjord.....	32
Boks 6.1. §19 tilladelse ("risiko for forurennet jord").....	38
Boks 6.2. Godkendelsesprocesser for etablering af pyrolyseanlæg.....	40

I CIP Fonden udtænker og udvikler vi projekter, der understøtter transformationen af det danske samfund i en mere bæredygtig retning. Vi er en uafhængig og almennyttig forening, der leverer konkrete og implementerbare løsninger for en langsigtet omstilling af det danske samfund.

Se mere på cipfonden.dk

Disclaimer

Informationen i denne rapport er af generel karakter og er ikke beregnet til at udgøre professionel rådgivning og bør ikke behandles som en erstatning for specifik juridisk eller professionel rådgivning. CIP Fonden afgiver ingen erklæringer eller garantier med hensyn til fuldstændigheden eller nøjagtigheden af informationen heri og påtager sig ingen forpligtelser eller ansvar med hensyn til fuldstændigheden, nøjagtigheden, eller brugen af informationen fremlagt i denne rapport. CIP Fonden påtager sig intet ansvar for tab, direkte eller indirekte, der kan opstå som følge af investeringsbeslutninger baseret på oplysninger fremlagt i denne rapport. CIP Fondens formål er at udarbejde forslag og løsninger, der understøtter samfundets bæredygtige udvikling

Ordforklaring

BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage Betegner en proces, hvor der opsamles biogen CO ₂ fra røgen i en skorsten (punktkilde). Derefter lagres den biogene CO ₂ i geologiske strukturer i undergrunden.
Biogen CO₂	er en betegnelse, der bruges til at beskrive CO ₂ , der kommer fra biologiske materialer som fx halm og spildevandsslam.
Biokul	er et porøst, kulstofholdigt restprodukt efter pyrolysning af restbiomasser, som kan bruges til at reducere drivhusgasudledningerne fra biomassen, som kulstoflager og som produkt med jordforbedrende egenskaber.
Biomasser	er materiale fra tidligere levende organismer, fx trærester, planterester og andre landbrugsrester og organisk affald fra husholdninger og industri.
CO₂	Kuldioxid Den mest kendte drivhusgas, som består af kulstof og ilt.
CO_{2e}	CO₂-ækvivalenter Måleenhed, der bruges til at sammenligne effekten af forskellige drivhusgasser som f.eks. metan og lattergas, der er mere potente end CO ₂ .
CCS	Carbon Capture and Storage Dækker over forskellige CO ₂ -fangst metoder, der bruges til at lagre CO ₂ meget langvarigt i fx undergrunden.
CCU	Carbon Capture and Utilization Udnytter indfanget CO ₂ til andre produkter og processer. Indfanget CO ₂ kan fx bruges til at lave grønne brændstoffer.
DACCS	Direct Air Carbon Capture and Storage En teknologi, hvor CO ₂ trækkes direkte ud af luften i atmosfæren.
Digestat	er det restmateriale (fibre og væske), der er tilbage efter biogasbehandling af en biomasse.
ETS	Emission Trading Systems kendes på dansk som EU's kvotesystem for CO ₂ , hvor der kan handles med et begrænset antal CO ₂ -kvoter mellem virksomheder i kvotesektoren (energiproduktion, store industri anlæg samt flytrafik).
Fosfor	er et essentielt næringsstof (P), der bl.a. indgår i gødningsstoffer. Fosfor er

en begrænset og ikke-fornybar ressource, der udvindes ved minedrift.

Fossil CO₂	er en betegnelse for den CO ₂ , der bliver frigivet ved afbrænding af fossile brændsler som gas, olie og kul. Der er ikke kemisk forskel på fossil og biogen CO ₂ .
Lattergas	er en drivhusgas (N ₂ O), der ligesom CO ₂ medvirker til global opvarmning. 298 gange så stærk som CO ₂ ift. klimapåvirkning.
LULUCF	Land Use, Land-Use Change and Forestry Sektor for arealanvendelse, ændringer i arealanvendelsen og skovbrug, dvs. typisk landbrugsareal, naturarealer og skove.
Metan	er en drivhusgas (CH ₄), der ligesom CO ₂ medvirker til global opvarmning. 25 gange så stærk som CO ₂ ift. klimapåvirkning.
Net-zero	er når en virksomhed eller et land reducerer sine udledninger og samlet set ikke udleder flere drivhusgasser, end der kompenseres for via CO ₂ optag.
PAH'er	Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Tjærestoffer, der kan dannes under pyrolyseprocessen, hvis der ikke er styr på processen, og restbiomassen "brændes på"
PFAS	Per- og poly Flour Alkyl Substances Kemiske flourstoffer eller "evighedskemikalier", der findes i fx regntøj, køk kenudstyr og maling pga. deres vand-, snavs- og fedtafvisende egenskaber. PFOS er en undergruppe heraf og har tidligere været brugt til fx brand sluknings skum.
PtX	Power-to-X Dækker over teknologi, der producerer brændstoffer, kemikalier og materialer på baggrund af grøn brint produceret ved elektrolyse.
PyCCS	Pyrogenic Carbon Capture and Storage CO ₂ -fangst og -lagring udført via pyrolyse af biomasser med kulstoffangst og -lagring i biokul.
Pyrolyse	er spaltning af et materiale (biomasse) gennem opvarmning til høje temperaturer uden ilt i hhv. en luftig fraktion (pyrolysegas) og i et restprodukt (biokul).
TRL	Technology Readiness Index Et indeks over hvor udviklet og kommercielt moden en teknologi er fra 1-9. Pyrolyse vurderes omkring 8 i modenhedsskala.

Hvorfor CO₂-lagring med biokul?

Kapitel 1

Når man laver biokul af restbiomasser, får man på én og samme gang grøn energi, CO₂-lagring og et produkt i hånden, som kan bruges flere steder, bl.a. som gødning i landbruget. Det er ikke så kendt, men med stort potentiale og klar til markedsføring, hvis rammerne sættes.

1.1. Hvad i alverden er biokul?

Biokul har i de seneste år fået stigende opmærksomhed som en bæredygtig og potentiel løsning på flere udfordringer på én og samme tid: behovet for grøn energi, for klimaeffekter og for miljøforbedringer.

Biokul kan lagre CO_{2e} meget langvarigt og stabilt. Bruger man det fx som gødningsprodukt, kan det samtidig have en række positive sideeffekter. Og så kommer der grøn energi ud af processen med at lave det.

Biokul er ikke som det fossile baserede kul, som stadig bruges som brændselskilde for mange kraftværker og virksomheder rundt omkring i verden. Biokul er lavet af plantester, der har opsuget CO_{2e} fra luften, og hvor pyrolyseprocessen er med til at overføre kulstoffet fra biomassen til biokullet.

RESTPRODUKT LAGRER KULSTOF

Biokul er det restprodukt, der er tilbage, når biomasserester som fx halm, slam, husdyrgødning eller træflis bliver behandlet ved høj temperatur (uden ilt) i et pyrolyseanlæg. Ud

af processen kommer også grøn energi i form af pyrolysegas og bioolie (alt efter proces og energi i biomassen). Pyrolyseprocessen producerer mere energi af restbiomassen, end den selv bruger til tørring og opvarmning, og der vil også være overskudsvarme til overs, som fx kan bruges til at tørre biomasseresterne med og afsættes til fjernvarme. Se illustration i figur 1.1 af processen.

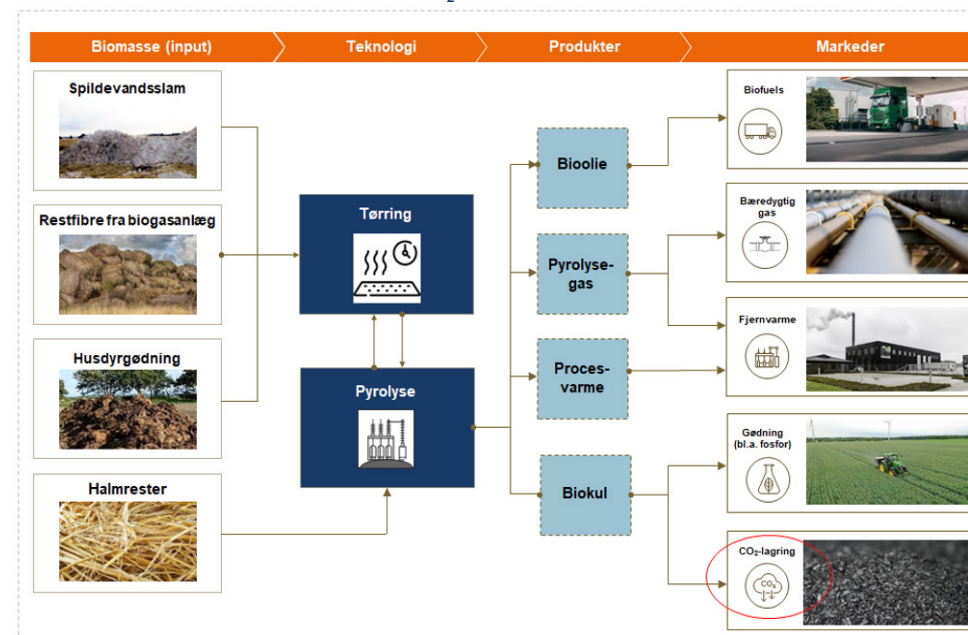
Omkring halvdelen af det kulstof, der er i biomassen fra start, ender i biokullet. Den anden halvdel ender i den pyrolysegas og bioolie, som kommer ud af processen.

Ved at lagre den indfangede CO_{2e} fra biomasse langvarigt og stabilt over tid, kan biokul bidrage til at reducere mængden af CO₂ i atmosfæren og hjælpe med at bremse klimaforandringerne. Dette gør biokul til et værdifuldt klimavirkemiddel. Både til at rydde op efter tidligere tiders emissioner, men også for områder, der har svært ved at bringe sine emissioner mod nul. Fx CO_{2e}-udledninger fra husdyr og landbrugsjord.

FØDEVAREPRODUKTIONS UDLEDNINGER KAN NEUTRALISERES MED CO₂-LAGRING

Landbruget står bag en stor del af drivhusgasemissionerne. Op mod 30 pct. i Danmark i 2022 (inkl. gartnerier)¹ og omkring 35 pct. globalt². Modsat andre erhverv er landbrugets udledninger i høj grad knyttet til naturlige processer. Og med en stigende befolkning på kloden er der fortsat brug for en stor fødevarerproduktion. Selv om den lægges

Figur 1.1: Process bag biokul og CO₂-lagring i landbrugsjord



Kilde: CIP Fondens egen tilvirkning

om og bliver mere klimavenlig, vil der fortsat være emissioner forbundet med at fremstille fødevarer.

Der skal mange løsninger i brug. Emissionerne skal nedbringes. Og der skal fanges og lagres CO₂. Biokul er ikke den eneste løsning. Men det har stort potentiale.

Markedet for biokul er i dets begyndelse, og der arbejdes med teknologien på stort set alle kontinenter. I Kina, USA og flere steder i Europa, bl.a. Tyskland og Sverige.

Danmark er kommet lidt senere i gang, men vurderes relativt hurtigt at kunne udbygge en god position. Der er dog betydelige barrierer for biokul i en dansk kontekst. At identificere og forstå disse barrierer er afgørende for at udvikle effektive strategier til at overvinde dem.

CIP Fonden vil med denne rapport afdække mulighederne for at markedsføre produktion af biokul og CO₂-lagring i Danmark med henblik på anvendelse i landbruget og potentielt også andre steder.

¹ Danmarks Statistik, DRIVHUS, for året 2022 for sektoren Landbrug og Gartnerier.

² Videnskab.dk (2021)

Rapporten sætter fokus på relevante biomasser for biokul, anvendelsesområder, mulige sidegevinster, rentabiliteten i produktionen, muligheder for at få betaling for CO₂-lagringen, regulatoriske udfordringer, relevante værdikæder og de samfundsmæssige effekter og samfundsøkonomien bag biokul sammenlignet med andre klimavirkemidler.

1.2. Biokul er metode til CO₂-fangst og -lagring (CCS)

Biokul holder meget langvarigt og stabilt på kulstoffet, fordi dets form er bundet, så det ikke så let kan nedbrydes af jordens organismer og udlede CO₂ igen. Omkring 3/4 af kulstofindholdet er tilbage efter 1.000 år. Denne permanens svarer til, når der lagres CO_{2e} f.eks. i Nordsøen, hvor den mineraliseres. Se mere i kapitel 3.

Hvis biomassen ikke blev omdannet til biokul gennem pyrolyseprocessen, ville CO_{2e}-indholdet blive frigivet tilbage til atmosfæren, når biomassen f.eks. nedmuldes på markerne. Derfor kan biokul være med til at trække CO₂ ud af atmosfæren, som ellers var blevet frigivet.

BIOKUL ER SIDSTE LED I CIRKULÆR ANVENDELSE AF BIOMASSEN

Brugen af biomasse til biokul er cirkulær, når processen udnytter rester og sidestrømme fra landbruget og andre industrier, som ikke har anden anvendelse, og når biokullet returneres til landbrugsjorden til at understøtte ny biomasse. Ved at bruge rester optager produktionen af biokul ikke arealer, der ellers havde haft andre formål. Det kræver heller ikke dyrkning af biomasse med det specifikke formål at producere biokul. Det kommer som en sidegevinst af andre processer.

BIOKUL BRUGES ISÆR I LANDBRUGET, MEN HAR OGSÅ ANDRE ANVENDELSER

Biokul benyttes især til gødningsprodukter i landbrugsjorden og til kompostering. Biokul har også andre potentielle anvendelser i en række andre sektorer. Nyere anvendelse er, at det kan benyttes i byggebranchen og i en række forskellige materialer.

Se figur 1.2. for eksempler på anvendelse af biokul.

1.3. Biokul kan blive central i den grønne omstilling

Processen bag biokul leverer både CCS og grøn energi. Anvendelsen af den grønne energi kan både give undgåede emissioner og fortrængning af emissioner, når overskudsvarmen og biooilen benyttes i stedet for fossile alternativer. Derudover har biokul en række

Figur 1.2: Eksempler på anvendelse af biokul



Kilde: CIP Fondens egen tilvirkning

sidegevinster, som samfundet kan få gavn af: Forbedring af jordkvalitet, forbedret vandholdsevne og mindsket behov for kunstgødning og pesticider. Læs mere i kapitel 3.

Biokul repræsenterer derfor en bro mellem bæredygtig fødevareproduktion og jordbeskyttelse. Pyrolyseteknologien til produktionen af biokul har potentiale til at understøtte, at landbruget kan blive nettooptager af CO_{2e}, og dermed skifte status fra at være en af de største udledere af CO_{2e} til at afhjælpe klimaudfordringerne. Det er en gevinst for landbruget, men også på samfundsniveau.

STOR POLITISK INTERESSE FOR BIOKUL

Politisk er det store potentiale, som pyrolyseteknologien og biokul udgør i den grønne omstilling, blevet bemærket, og der er taget flere politiske skridt for at fremme markedet.

Folketinget har med Landbrugsaftalen fra oktober 2021 sat en målsætning om, at pyrolyseteknologien årligt skal bidrage til at optage 2 mio. ton CO_{2e} i landbrugssektoren fra 2030. Derudover blev der afsat midler til støtte af teknologier, der kan fremme omstillingen i dansk landbrug, frem mod 2024. Læs mere i kapitel 4.

Regeringen er på vej med en strategi for pyrolyse i starten af 2024. I forbindelse med strategien bliver målsætningerne revideret og de tiltag, der er nødvendige, vil genforhandles.

Der findes mange forskellige klimavirkemidler, der kan hjælpe Danmark i mål med sine klimamål. Selvom biokul ser ud til at lagre relativt billigt, får man brug for alle klimaværktøjer. Biokul kan ikke stå alene. Læs mere i kapitel 5.



1 ton biokul ~ 2 ton CO_{2e}

Hvad svarer et ton biokul til klimamæssigt?

- Fremstilling af et bilbatteri til Tesla Model 3
- 33 køreture i bil tur/retur fra Aarhus til København
- Knap 2 flyture tur/retur fra København til Rom
- 13 kg oksemørbrad

Hver danskers forbrug udleder, hvad der svarer til i gennemsnit til 13 ton CO_{2e}. Det er, hvad ca. 6 ton biokul kan lagre af kulstof.

Kilder: [Se hvor stort dit CO2-udslip er, når du rejser | Green-Match](#), CONCITO (2023) og egne beregninger.

1.4. Marked under opbygning

Sammenlignet med mere etablerede industrier som traditionel biomasseenergi fra biogas eller vedvarende energi, er biokulindustrien i sin spæde opstart. Udbuddet er relativt begrænset, og produktionskapaciteten er stadig under udvikling.

Det første større kommercielle pyrolyseanlæg til biokul i Danmark indvies i starten af 2024. På europæisk plan er biokul mere udbredt. Omkring en tredjedel af den europæiske produktionskapacitet var i 2022 placeret i Tyskland, mens en fjerdedel var i Norden og den resterende kapacitet var i Østrig, Schweiz mv. (EBI 2023).

Biokul blev i 2022 primært brugt som jordforbedringsmiddel og gødning. Det benyttes også i mindre grad til fodertilsætning og elproduktion (EBI 2023).

MANGELFULD REGULERING

Reguleringen af biokul er kompleks og strækker sig over flere ressortområder i Danmark. Biokul er endnu så nyt, at det kun optræder sporadisk i den danske regulering. I stedet sker reguleringen indirekte gennem fortolkning af andre reguleringer med andre formål.

EU anerkendte i sommeren 2022 biokul baseret på planterester og husdyrgødning som et gødningsprodukt i Gødningsforordningen. Og dansk regulering er fulgt efter med regler for, hvordan man kan bruge biokul som gødningsprodukt, mens hjemlen til rent faktisk at bruge det stadig er usikker. I dag er det som udgangspunkt ikke tilladt at udbringe biokul af landbrugsrester på dansk jord, men det kan ske med en særlig tilladelse efter kommunal vurdering.

1.5. Hvad venter vi på?

Biokul repræsenterer en bæredygtig vej fremad med mere grøn energi og samtidig reduktion af vores CO₂-udledning. Så hvad venter vi på? Til trods for biokul og pyrolysens lovende potentialer er der flere udfordringer, der skal håndteres.

Når en ny teknologi skal skaleres og kommercialiseres, kan der være en række udfordringer lige fra teknologiudvikling til regulatoriske barrierer, usikkerhed omkring rentabilitet og risiko og manglende viden og kendskab hos potentielle investorer.

Aktuelt er der ingen forudsigelig belønning for at fange og lagre CO₂ i landbruget. Der er relativt sikre, men høje produktionsomkostninger ved teknologien og samtidig usikre indtægtsstrømme. Reguleringen tillader som udgangspunkt ikke brug af biokul på dansk landbrugsjord baseret på landbrugets sidestrømme. Så selv om teknologien er klar, er det svært at sikre sig aftageraftaler, før man skal investere.

Der er generelt også mangel på viden om de langsigtede konsekvenser af brugen af biokul på landbrugsjorde, når den er baseret på nutidens biomasser og teknologi. I nogle tilfælde kan biomasserne indeholde problematiske stoffer, som fx tungmetaller og PFAS, ligesom der er risiko for, at der opstår tjærestoffer i forbindelse med selve pyrolyseprocessen, hvis der ikke er styr på produktionsstandarden. Selv om pyrolysen fjerner mange af de problematiske stoffer fra biomassen, kan risikoen for, at uønskede stoffer skulle ende i biokullet, håndteres gennem strikse grænseværdier og faste teststandarde for biokullets indhold.

CIP Fonden vil med denne rapport og de tilhørende, bagvedliggende analyser øge vidensgrundlaget om biokul og dets klimamæssige muligheder, og hvad der skal til for, at det kan markedsføres i et omfang, hvor det bliver en gevinst for Danmark. Og på sigt også for andre lande.

Biokul er ikke svaret på alle klimaudfordringer. Vi skal stadig reducere vores CO₂-emissioner og nedbringe dem, hvor det er muligt. Men vi skal også lagre CO₂. Mange forskellige klimavirkemidler skal i brug for at komme i mål. Biokul er én af dem. Med store potentialer og flere sidegevinster til følge.



Konkurrerer CO₂-lagring med biokul med andre metoder som fx BECCS og DACCS?

Det er forskellige metoder til at fange og lagre CO₂ (CCS) med hver dets egenskaber, men som alle kan lagre CO₂ meget langvarigt og irreversibelt.

Biokul er mest relevant for landbruget, der oftest står for både biomasse og slutlagringen. BECCS er derimod mere relevant for fx store kraftværker, der afbrænder biomasse, dvs. energisektoren. DACCS er brancheafhængig og kan placeres overalt nær gode lagringsmuligheder i geologiske formationer. Både biokul og BECCS er afhængige af tilstrækkelige mængder af biomasserester og er lokalt bundet op på biomassens placering. DACCS er mere fleksibel, men til gengæld dyrere.

For at kunne leve op til Parisaftalen og holde temperaturstigningerne nede skal alle relevante teknologier sandsynligvis i spil. CCS skal supplere reducerede udledninger for at gøre noget ved tidligere tiders udledninger samt de udledninger, der ikke kan undgås. De tre teknologier komplementerer hinanden i klimaindsatsen.

Hvor meget de enkelte teknologier hver især skal bruges, afhænger af betalingsvilligheden fra hhv. stater (i form af CCS-støtte) og fra markedet (fra salg af klimakreditter eller højere produktpriser).

Hvad er udfordringerne for biokul?

Kapitel 2

Der er flere forhold, der skal spille, for at biokul er klar til markedsføring i større skala. De største barrierer er på de regulatoriske rammer og omkring viden og kendskab, mens der er større sikkerhed omkring teknologi, business case og den samfundsøkonomiske værdi af biokul og de tilhørende klimaeffekter.

HVORFOR ER BOKUL IKKE ALLEREDE UDBREDT?

Hvis det er så god en idé at lave CO₂-lagring med biokul i landbruget, spørger man sig selv, hvorfor det så ikke allerede sker i stor stil?

Der er forskellige grunde til at biokul ikke er udbredt. Når et nyt marked skal etableres og fungere, er der en række "tandhjul", der skal kunne køre rundt og spille sammen. Det er CIP Fondens vurdering, at alle "tandhjul" bag CO₂-lagring med biokul som sådan fungerer eller kan komme til det, men nogle er mere træge end andre. Det er der løsninger for.

2.1. Teknologien er klar, men skal bevise sig ved yderligere skalering

Teknologien bag fremstilling af biokul er relativt moden, og der findes flere producenter af pyrolyseanlæg i Danmark og i udlandet, hvor man gennem flere år har arbejdet med at udvikle pyrolyseanlæg. Tyske PYREG har fx stået bag mere end 50 forskellige anlæg gennem

tiden og skalerer produktionsmulighederne ved at serieforbinde flere standardanlæg. Andre laver mere stedspecifikke løsninger.

Indtil videre har fokus i Danmark primært været på pilotprojekter samt test og demonstrationsanlæg (TRL 5-6), og hvor der med Pyrolysepuljen i 2022 blev givet tilskud til opskalering af anlæg med fokus på demonstration af produktion i kommercielt omfang.

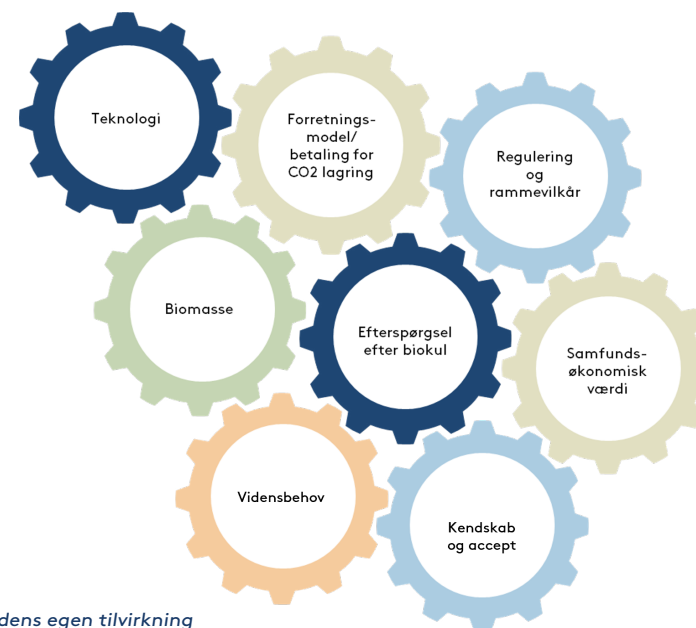
Technology Readiness Level (TRL)

- TRL 1: Grundforskning
- TRL 2: Formulering af teknologisk koncept
- TRL 3: Eksperimentel eftervisning af koncept
- TRL 4: Teknologi er testet og valideret i et laboratoriemiljø
- TRL 5: Teknologi er testet og valideret i et relevant miljø
- TRL 6: Teknologi er demonstreret i et relevant miljø
- TRL 7: Prototype er demonstreret i et drifts/produktionsmiljø
- TRL 8: Teknologien/systemet er komplet og færdigudviklet på et kommercielt niveau
- TRL 9: Teknologien/systemet er klar til produktion/drift på fuld skala

Kilde: Innovationsfonden og Landbrugsstyrelsens GUDP guide

Et nyt, storskala produktionsanlæg (TRL 8) er for nyligt etableret i Danmark og aktuelt i en testfase. Når det kommer i fuld produktion, vil det være blandt de største i verden og kunne producere over 10 pct. af, hvad der i alt kan produceres af biokul i Europa i øjeblikket.

Figur 2.1: Flere typer af udfordringer for markedet for biokul



Kilde: CIP Fondens egen tilvirkning

Næste fase er fortsat skalering af dansk pyrolysekapacitet og påvisning af stabil drift. Skal markedet udbygges, skal teknologien kunne reproducere på standardiseret vis. Der skal kunne bygges flere anlæg, der ikke hver for sig er unikke. Ellers bliver investeringen for dyr.

Over tid vil teknologien løbende blive forbedret, og der vil kunne laves større og mere effektive anlæg, som kan håndtere større mængder restbiomasser og producere mere biokul og større CO₂-lagring. Prisen vil falde,

og omkostningerne ved at lagre CO₂ reduceres.

Det "teknologiske tandhjul" er derfor godt på vej til en markedsudrulning.

2.2. Restbiomasser som input

Et anden afgørende "tandhjul" for markedet er, om der er nok relevante og rentable inputfaktorer – for biokul i form af restbiomasser.

Og om biomassen befinder sig nogenlunde i nærheden af mulige lokationer for pyrolyse-anlæg og kan håndteres logistisk.

Biokul kan produceres af en lang række forskellige slags biomasser med udgangspunkt i rester, der ikke har anden væsentlig økonomisk anvendelse, og som har nået enden af en cirkulær anvendelse. Altså rester nederst i en kaskadeanvendelse af biomasserne, som fx restfibre fra biogasanlæg, rester fra grøn bioraffinering, fra fødevarerproduktion, halmrester og strårester fra efterafgrøder, husdyrgødning, haveaffald og såmænd også spildevandsslam.

Det er næsten kun fantasien, der sætter grænsen for, hvilke restbiomasser, der indeholder kulstof og kan pyrolyseres.

Den konkrete biomasse, pris, omfang, mulighed for stabil leverance over tid samt logistikken omkring har betydning for, hvor anlæg til produktion af biokul bedst placeres og dimensioneres. De mest oplagte restbiomasser for pyrolyse er lokalbestemte af transporthensyn og er samtidig afgørende for, hvor store anlæg der etableres.

Der er konkurrence om biomasserne, også sidestrømmene, og de fremtidige udviklingsmuligheder afhænger bl.a. af det fremtidige landbrugsareal, hvad der dyrkes, og hvilke formål arealerne tildeles.

NIRAS (2023) har kortlagt udvalgte biomasser af relevans for pyrolyse og finder bl.a., at der aktuelt er restbiomasser nok til at producere 2 mio. ton CO₂-lagring med biokul årligt. Det Nationale Bioøkonomiske Panel (2022) har samtidig analyseret en række biomassescenarier og finder mulighed for at øge mængden af biomasser med relativt enkle greb med op til 10 mio. ton tørstof yderligere i 2030.

For så mange forskellige sidestrømme af biomasser kan bruges til biokul, og fordi der er forskellige vækstmuligheder for biomassen, også selvom den samlede landbrugsproduktion reduceres, er udgangspunktet for CO₂-lagring i Danmark baseret på biokul godt og fleksibelt. Den enkelte business case for biokulproduktion vil dog være afhængig af det lokale udbud af restbiomasser og mulighederne for at sikre sig en stabil forsyning

”Tandhjulet” for input til biokulproduktion er derfor nogenlunde velsmurt, men kan have lokale variationer.

Se kapitel 3, #2 for nærmere beskrivelse af relevante biomasser og NIRAS (2023) for uddybet analyse af relevante biomasser til CO₂-lagring med biokul.

2.3. Aflønning for CO₂-lagring

Når man skal lave CO₂-fangst og -lagring baseret på restbiomasser, er det forbundet med omkostninger, men også nogle mulige indtægter, især fra salg af grøn energi, som produceres i samme omgang. Som vist i kapitel 4, er det imidlertid ikke nok til at dække omkostningerne i den samlede proces for CO₂-lagring.

Forretningsmodellen forudsætter, at der er en form for økonomisk belønning for CO₂-lagringen. Fx fra salg af klimacertifikater, hvor købere betaler for CO₂-lagringen for at bruge klimaeffekten i deres eget klimaregnskab. Det kan også være gennem højere betalingsvillighed hos forbrugerne for klimavenlige produkter fra de landmænd, der har stået for CO₂-lagringen. Eller det kan ske gennem støtte til CO₂-fangst og -lagring, som det kendes fra andre CCS-teknologier.

Et markedsdrevet ”tandhjul” vil afhænge af, at det frivillige marked for klimakreditter i tilstrækkeligt omfang kan aflønne omkostningerne ved CO₂-lagring.

Se nærmere beskrivelse af klimakreditter i kapitel 3, #5 og i SEGES Innovation (2023).

2.4. Er der efterspørgsel efter biokul?

Selvom der kan være villighed til at betale for CO₂-lagring med biokullet, skal det også have et brugsformål, hvor man kan garantere lagringen.

Biokullet skal altså anvendes til noget, hvor man kender slutdestinationen, og hvor lagringen opretholdes på troværdig vis. Fx ved at blive spredt ud på jorden, hvor det ikke kan indsamles igen, eller ved at blive iblandet materialer som cement, kompositmaterialer og asfalt.

Den, der efterspørger CO₂-lagring, køber det fx via et klimacertifikat svarende til fangst og lagring af 1 ton CO₂. Det er ikke nødvendigvis den samme, som også efterspørger biokullet som fysisk produkt.

Klimacertifikatet eller -beviset for CO₂-lagringen er interessant for virksomheder, der vil medregne det i deres klimaaftryk eller deres produkters klimaaftryk. Altså til markedsføring.

De, der efterspørger biokullet for dets brugsværdi, kan fx gøre det for dets gødningsværdi og jordforbedrende egenskaber. Eller for dets evne til at opsuge og fastholde problematiske stoffer (jordrensning eller filtrering). I andre lande har brugen af biokul, især i landbruget og som have/park-gødning, været i fokus i

starten. Markedet udvides i takt med anvendelses-områderne og med troværdig CO₂-lagring.



Hvad nu, hvis der dannes nogle giftige stoffer under selve pyrolyseprocessen?

Der er som udgangspunkt ikke noget i biokullet, som ikke også var i den oprindelige biomasse – bare i en anden koncentration. Tværtimod er der færre problematiske stoffer, idet pyrolysen brænder mikroplast, medicinrester, pesticider mv. af.

Under pyrolysebehandlingen er der risiko for, at der kan dannes tjærestoffer (PAH'ere), men det kan styres med standardiserede produktionsmetoder for temperatur og opholdstid. Desuden testes hver mængde produceret biokul for indhold i forhold til grænseværdier, herunder også for tungmetaller. Det er derfor muligt med fornuftige grænseværdier at styre det tilladte indhold.

Det samlede marked for biokul er stadig relativt begrænset, og en øget markedsføring vil derfor også kræve et blik for, hvor biokullet kan anvendes, og hvad brugsværdien er. Det kræver viden om effekterne ved brug og kendskab til biokul som produkt. Dette tandhjul er så småt begyndt at dreje.

Efterspørgslen efter biokul afhænger af, at der både er nogle, der efterspørger klimaeffekten, og af nogle, der skal bruge biokullet til noget bestemt. Og selvfølgelig af, hvad det koster at producere.

Her spiller de regulatoriske rammer ind. Det skal være klart, hvad man må bruge biokul til. Afsætning af biokul er en nødvendig forudsætning for, at nogle giver sig til at producere det.

Se mere om rentabiliteten bag biokul i kapitel 4, den mulige markedsføring af biokul i SEGES Innovation (2023), og hvad andre lande gør i kapitel 8 og i CIP Fonden (2024e).

2.5. Regulering og rammer skal være klar

Mulighederne for et nyt marked afhænger også af de rammevilkår, markedet skal opføre sig under, og den type regulering, der råder. Biokul blev i sommeren 2022 anerkendt af EU som et gødningsmiddel i landbruget, der kan sælges inden for EU, når det lever op til en bestemt mærkningsordning. Nationale regler kan dog begrænse mulighederne.

Aktuelt er en af de største udfordringer for brug af biokul i landbruget i Danmark, at der ikke er hjemmel til at bruge det, når det er lavet af landbrugets sidestrømme – kun hvis det er lavet af affald. Dansk regulering af biokul sker i stedet indirekte gennem lokal stillingtagen til de valgte restbiomasser og gennem brug af midlertidige, stedspecifikke miljøtilladelser. Det er ikke transparent. Og det er ikke befordrende for et marked, hvor de politiske ambitioner er hurtig skalering.

Også i etableringsfasen af pyrolyseanlæg er der forskellige former for "tidsrøvere" fra rammevilkårene, som skyldes, at der i reguleringen ikke er taget stilling til biokul og pyrolyseanlæg. Så bliver det op til lokal fortolkning, hvad man må og ikke må. Det er tidskrævende. Det stiller store krav til kompetencer og administrative ressourcer i kommunerne. Det regulatoriske "tandhjul" er blandt de mere træge for markedsgørelsen.

Se nærmere beskrivelse i kapitel 6 og i CIP Fondens baggrundsnotat om regulering og rammevilkår (CIP Fonden, 2024a).

2.6. Samfundsværdi

Klimavirkemidler sammenlignes ofte på tværs

af deres samfundsøkonomiske "skyggepris", som siger noget om, hvad det netto koster for samfundet at fjerne 1 ton CO₂ med et konkret virkemiddel, når man også tager højde for andre konsekvenser af brugen (sideeffekter).

Her er biokul som lagringsteknologi samfundsøkonomisk konkurrencedygtig med CCS i form af Direct Air Capture (DAC) og fangst af biogen CO₂ ved skorstenen med efterfølgende lagring i undergrunden. Business casen bag biokul for private aktører er meget afhængig af, hvad man kan få i belønning for sin CO₂-fangst og dermed af markedet for salg af klimakreditter. Og af energipriserne.

Når der samfundsmæssigt også tages højde for mulige sideeffekter (gevinster såvel som tab), vil især biokul baseret på restfibre fra biogas være en gevinst, fordi processen også driver en række undgåede emissioner. For biokul af planterester, som kan producere mere grøn energi, vil fortrængning af fossil baseret energi være gevinst, især i global kontekst.

En gunstig samfundsøkonomisk pris kan også få betydning for den politiske interesse for at fremme virkemidlet og etablere relevante rammevilkår.

Se nærmere i kapitel 5 og i EA Energianalyse (2024).

2.7. Fortsat vidensbehov

Der forskes intensivt i biokul og dets effekter, og mængden af litteratur om emnet vokser nærmest eksponentielt. Det vidensbaserede "tandhjul" snurrer og producerer indsigter.

Alligevel er der stadig meget, man ikke ved. Selv om man fx i Amazonas har brugt biokul

som jordforbedrende middel i flere hundrede år, er der behov for at vide mere om brug af biokul på længere sigt.

Derfor er det vigtigt, at der sideløbende med igangsættelse af opstart af et marked også sættes relevante forsøg i gang og samles op på den viden, der genereres.

Hvor meget biokul er optimalt at bruge af gangen? Hvor hyppigt? Hvordan virker det i forhold til udvaskning af nitrat fra jorden? Hvad er der af potentielle risici, og hvordan hænger de sammen med de anvendte biomasser, jordtype osv.?

Mange spørgsmål melder sig, og svarene bør samles op og sorteres alt efter graden af evidens, hvilke biomasser der bruges, produktionsmetode og hvilken type jord biokullet bruges på. Så man bedre kan manøvrere mellem de ønskede effekter, og hvad man skal undgå.

Det er vigtigt, at den forskningsmæssige viden kategoriseres og omsættes til brugsguider. For biokul er ikke bare biokul. Mange af sideeffekterne afhænger af, hvilken biomasse der er brugt, hvilken metode de er fremstillet af, og den jord, som biokul bruges på.

I takt med at ny viden genereres, kan reguleringen også tilpasses. Så det forskningsmæssige- og vidensbaserede "tandhjul" kører, men har brug for fortsat at være velsmurt.

2.8. Kendskab og accept

En ting er forskningsbaseret viden. Noget andet er det almene kendskab og udvikling af erfaring og praksiskendskab.

Biokul og mulighederne for CO₂-lagring er ikke så kendte. Hverken i befolkningen, hos potentielle investorer, potentielle brugere af biokul eller aftagere af grøn energi og klimakreditter. Det er nødvendigt at udbrede kendskabet til denne form for CO₂-lagring og samtidig skabe basis for forståelse og accept. Når noget er nyt, er der samtidig grobund for misforståelser og mytedannelser.

Rundt om i denne rapport tages der fat i nogle af myterne, ligesom kapitel 3 leverer fakta til en række almindelige spørgsmål om biokul. Kendskabet udbredes gennem politisk fokus og kommunikation, videndeling, netværk, udvikling af guides og nye måder at bringe viden i spil. Gennem tydeliggørelse af muligheder, men også af klart lys på udfordringerne, så de kan håndteres.

Samling af viden som fx med Videnssynthesen om biokul fra Aarhus Universitet er et godt eksempel på et opslagsværk, og med den hast, der genereres forskning på dette område, er der også løbende brug for reviews og populærformidling af den viden, der opnås. Der er brug for udvikling af guidelines, erfaringsudveksling og praksisnær innovation. Og for kompetenceudvikling.

Der skal være kvalitet og dokumentation bag kommunikationen, hvis den skal skabe troværdighed og grobund for accept. Det tværdisciplinære forskningsprojekt SIMPLY³ handler fx om at etablere et road-map for at guide udbredelsen af biokul gennem øget kendskab.

Der skal være troværdighed omkring CO₂-lagringen. Ikke noget dobbelttælling eller greenwashing. CO₂-lagring er ikke aflad for egne udledninger, men nogle har måske den holdning, at det er moralsk forkert at handle med klimaeffekter?

Det sker dog hver dag i EU's kvotesystem for industrivirksomheder og er en anerkendt metode til at opnå de mest omkostningseffektive løsninger.

CO₂-lagring handler ikke om, at andre så kan undgå at gøre noget for at nedbringe deres udledninger. Det skal de fortsat gøre. Men ikke alle emissioner kan helt fjernes. Og ikke alt kan ske lige hurtigt. Og der er et oprydningsarbejde for mange tidligere års udledninger. Så CO₂-fangst og -lagring er en nødvendig, men ikke tilstrækkelig del af klimaløsningerne – den skal gå hånd i hånd med lavere emissioner.

Der skal være tillid til de potentielle miljøeffekter og til den mulige påvirkning af biodiversiteten. Bæredygtighed er mere end gode klimaeffekter.

Mytedannelse og uklarhed omkring potentielle risici kan sænke farten på markedets udvikling og hæmme dette "tandhjul".



Hvorfor skal man sprede (bio)kul ud på jorden i Danmark, hvis man andre steder graver kul op af jorden? Og er det ikke bedre at brænde biokullene af med de høje energipriser end at bruge dem til lagring?

Biokul er baseret på biogene kilder, mens traditionelt kul er fossilt baseret. Biokul handler om CO₂-fangst og -lagring, mulighed for at recirkulere næringsstoffer fra biomassen, og om grøn energi fra processen, mens klassiske kul handler om en fossil energikilde. De to ting har ikke umiddelbart noget med hinanden at gøre, bortset fra, at behovet for CO₂-lagring med biokul kun vokser, så længe andre kan finde på at brænde fossil baserede kul af.

Processen med at lave biokul af biomasser skaber grøn energi, som kan sælges. Og CO₂-lagringen i biokullene repræsenterer også en værdi. Dertil kommer, at biokullene i sig selv kan have værdi alt efter, hvad de anvendes til. Biokul repræsenterer en langsigtet bæredygtighed. Hvis man kun ønsker energi ud af biomassen, kan den brændes af, som det sker i dag i varmeværker. Biokul kan laves af biomasser, der har været brugt flere gange, fx rester fra biogasanlæg.



Korte svar om biokul

Kapitel 3

Hvad er biokul, og hvordan bidrager det til at reducere klimaudfordringen?

Biokul er de forkullede rester af planter og andet organisk materiale, der har været varmebehandlet. Biokul er ikke noget nyt. Det har været brugt til jordforbedring i flere hundrede år. Men det er nyt at se biokul som en af løsninger på klimaudfordringen. Det virker, fordi den CO₂, som planterne har optaget fra luften gennem hele vækstsæsonen, bliver lagret stabilt mange hundrede år i biokullet. Hvis man producerer biokul i stor skala, kan det derfor bidrage til at trække CO₂ ud af atmosfæren.

Kapitel 3 er bygget op som en serie af spørgsmål og svar og uddyber bl.a. hvad biokul er, hvordan det produceres, hvordan det ved hjælp af pyrolyseteknologi kan bruges som virkemiddel til CO₂-fangst, samt hvilke positive og negative påvirkninger der kan være ved at bruge biokul på landbrugsjord.

1. Hvad er biokul, og hvad kan man bruge biokul til?
2. Hvad kan man lave biokul af?
3. Hvad er klimateffekterne af at lave biokul?
4. Hvor længe kan kulstoffet lagres?
5. Hvor meget biokul kan man lave?
6. Hvad er et klimacertifikat?
7. Hvordan kan biokul hjælpe landbruget?
8. Hvad betyder biokul for biodiversiteten?



#1 Hvad er biokul, og hvad bruger man det til?

Biokul er det faste produkt, der kommer ud af at behandle forskellige typer biomasserester i et pyrolyseanlæg. Processen indebærer, at biomasserester fra landbruget (for eksempel halmrester eller gylle), industrien eller slam fra rensningsanlæg opvarmes ved høje temperaturer på flere hundrede grader, fx 500-600 grader, uden der er ilt til stede.

Pyrolyseprocessen omdanner biomassen til biokul, som er de forkullede biomasserester, og til grønne gasser, som enten kan anvendes til varme eller ved yderligere forarbejdning omdannes til olie og med tilsætning af brint til fx biobrændstoffer.

Biomasseresterne fra f.eks. overskudshalm indeholder planterester, der i vækstsæsonen har optaget CO₂e fra atmosfæren gennem fotosyntese og omdannet det til kulstof. Omtrent halvdelen af kulstoffet fra biomassen lagres med hjælp af pyrolyseprocessen stabilt i biokullet, mens den anden halvdel ender i de grønne gasser.

Biokul binder kulstoffet meget langvarigt og kan samtidig anvendes til gødning og jordforbedring, der er med til at fastholde næringsstoffer i jorden og bremse udvaskning af kvælstoffer til gavn for vandmil-

jøet. Biokullets gødningsværdi ligger i, at de indeholder forskellige næringsstoffer som fx fosfor og kalium, som recirkuleres til jorden fra de oprindelige biomasser.

Hvis biomassen ikke blev omdannet til biokul, ville CO₂-indholdet blive frigivet tilbage til atmosfæren, når biomassen fx nedmuldes på markerne. Derfor kan biokul være med til at trække CO₂e ud af atmosfæren, som lagres gennem hundredevis af år i kullene, også hvis de pløjes ned i markerne.

Biokul bruges i dag primært som et gødningsprodukt til jordbedring i landbruget og til have/park-anlæg. I andre lande bruges biokul fx også som fodertilsætning. Biokul kan også bruges i byggematerialer (asfalt, beton, paneler mv.)

Biokul kan også bruges til andre nicheprægede formål, såsom varmeisolering i tøj, helseprodukter og til beskyttelse mod elektromagnetisk stråling i fx mikrobølgeovne, TV, strømforsyninger osv.

Læs mere om dette i:

- Videnssynthesen om biokul i dansk landbrug fra Aarhus Universitet →

- Tobias Pape Thomsen, RUC-IMT (2022) udarbejdet for Food & Bio Cluster Denmark: "Introduction to Production and Use of Biochar 2022" →





#2 Hvad kan man lave biokul af?

Biokul laves af biomasserester fra landbruget, fra industrien, fra husholdninger mv.

Biokul er sidste led i en cirkulær anvendelse af biomasser og tager udgangspunkt i rester, der typisk ikke har nævneværdig anden markedsført værdi nederst i en kaskadeanvendelse af biomasserne. Se også figur 3.1.

Biomasserester kan eksempelvis komme fra uafhængt halm og reststrå fra andre afgrøder, spildevandsslam, digestat fra biogasanlæg, græsrester, mask fra bryggerier, trærester, afskær fra skove og tømmerproduktion, madspild, rester fra havet og have-/parkaffald.

Biokullets egenskaber afhænger af, hvilken slags biomasse man putter ind i et pyrolyse-

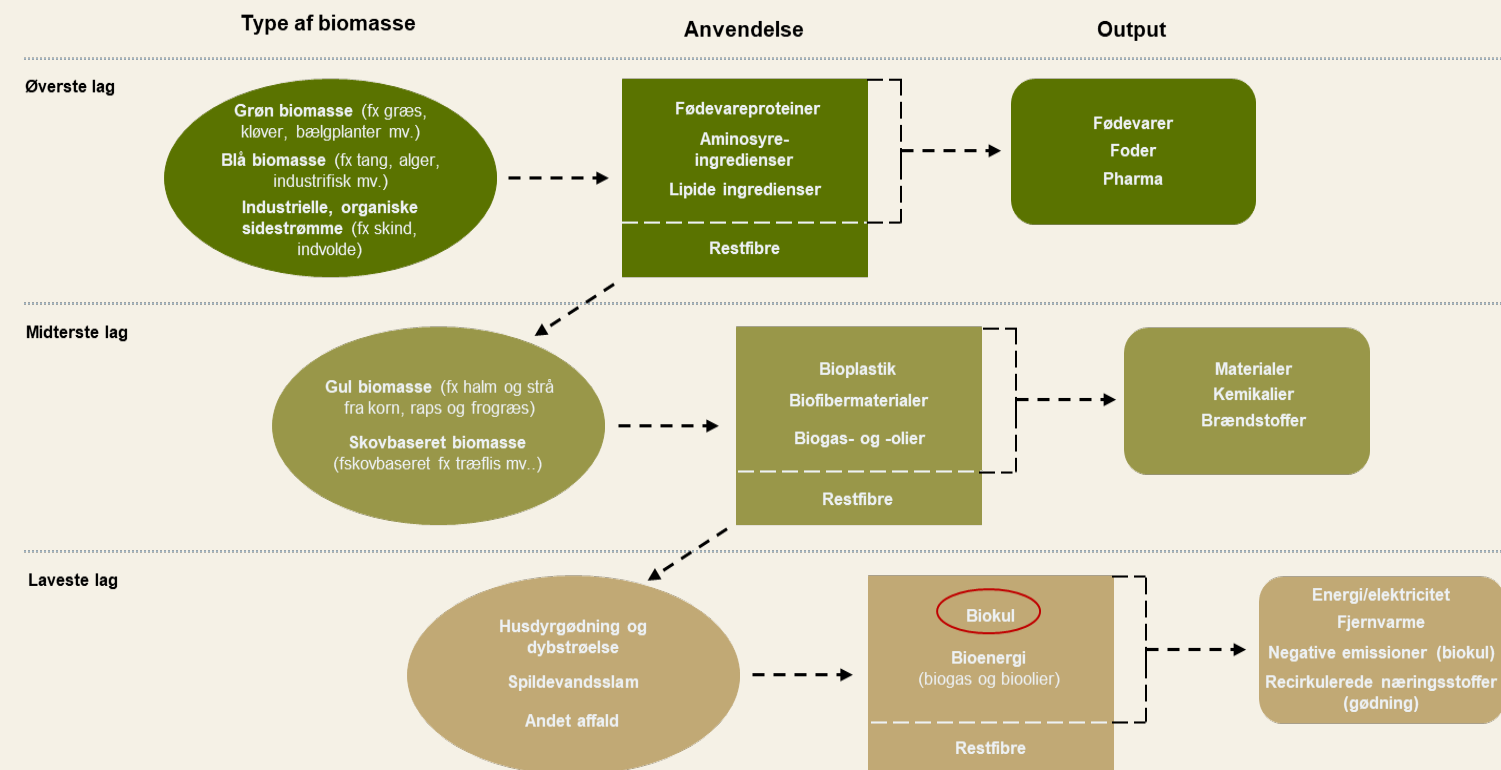
anlæg, og hvor højt der skrues op for varmen. Biomassen, der benyttes til fremstillingen af biokul, er afgørende for, hvilken regulering der kommer i spil, når biokullet spredes på jorden.

Hvis biomasseresterne ikke omdannes til biokul eller bioenergi, bliver CO₂e-indholdet frigivet tilbage til atmosfæren, når de opmagasineres og f.eks. nedmuldes på markerne. Når restbiomasserne laves til biokul, får de

ny værdi, fordi de i pyrolyseprocessen dels omdannes til grøn energi, dels omdannes til biokul, der kan lagre kulstoffet stabilt med tilhørende betaling.

Anvendelsen af biomasserester i pyrolyseprocessen giver incitament til mere indsamling af biomasse end ellers (og dermed mere biogent CO₂e end ellers).

Figur 3.1: Kaskadeanvendelse af biomasser efter formål og cirkulær anvendelse



RELEVANTE BIOMASSER I DANMARK (EKSEMPLER)

- Halmrester
- Græs (herunder vejgræs, rester fra bioraffinering af græs mv.)
- Andre afgrøderrester
- Grødeskær
- Husdyrgødning (fx fra kvæg, grise og kyllinger)
- Dybstrøelse
- Digestat (restfibre fra biogas)
- Have- og parkaffald
- Træaffald og skovrester
- Tang og andre rester fra havet
- Slagteriaffald
- Mask fra bryggerier
- Madaffald
- Sediment fra gadekær
- Spildevandsslam
- Rester fra andre processer, jf. kaskadeanvendelsen

Kilde: CIP Fondens egen tilvirkning på baggrund af Det Nationale Bioøkonomiske panel (2022) [bioøkonomisk panels rapport](#)



#3 Hvad er klimaeffekterne af biokul?

Der er overordnet tre typer af klimaeffekter relateret til biokul og dets sideeffekter:

- 1. CO₂-lagring via biokullet
- 2. Undgåede emissioner
- 3. Fortrængningseffekter

Hvor store klimaeffekterne er, afhænger af hvilken slags biomasse, biokullet er lavet af, og hvad der alternativt ville være sket med biomassen.

CO₂-lagring via biokullet: Omkring halvdelen af biomassens kulstofindhold indfanget og omdannet CO₂e) ender umiddelbart i biokullet, hvor det lagres stabilt over tid.

Undgåede emissioner: Når man behandler biomassen, i stedet for fx at have op-

bevaret den, undgår man en del emissioner, som biomassen ellers ville have udledt til atmosfæren. Forebyggelse af især metanudledninger har stor klimaeffekt.

Fortrængningseffekter: Når man laver biokul, bliver der også produceret energi i form af overskudsvarme fra opvarmningen samt pyrolysegas og -olier. Gassen kan fx bruges til opvarmning, mens olierne kan videreforarbejdes til grønne brændstoffer. Hvis den grønne energi erstatter fossilbaseret energi, er der en fortrængningseffekt klimamæssigt som følge af biokulproduktionen.

Samlet set giver fremstilling af biokul klimaeffekter, men kun CO₂-lagringen kan videresælges i en klimakredit.

Figur 3.2: Klimaeffekter af dansk fremstillet biokul (100-års perspektiv)

Biomasse (1 ton tørstof)	CO ₂ e-lagring i biokullet	Undgåede emissioner	Fortrængningsgevinst ved energioverskud	Sum af de tre klima-effekter
	Kg CO ₂ e pr. ton tørstof			
Halm	+610	0	+710	Ca. 1.300
Spildevandsslam	+430	+600	+70	Ca. 1.100
Restfibre fra biogas	+620	+260	+680	Ca. 1.550

Kilde: CIP Fonden på baggrund af [Thomsen et al \(2023\)](#)



#4 Hvor længe kan man lagre kulstoffet i biokul?

Biokul holder meget langvarigt og stabilt på kulstoffet, fordi dets form ikke så let kan nedbrydes af jordens organismer. Biomasserne, som bruges til biokul, ville ellers i deres rå form blive nedbrudt i løbet af nogle år og dermed frigive kulstoffet.

Forskere er på tværs af studier og forsøg blevet enige om, at omkring 80 pct. af kulstofindholdet stadig findes i biokullet efter 100 år. Permanensen af kulstoflagringen er bl.a. beskrevet af en række forskere i en Joint Statement, som blev udgivet på Biochar Summit 2023 i Helsingborg. Læs deres Joint Statement [her](#).

Men biokullet kan højst sandsynlig holde stabilt på kulstoffet markant længere.

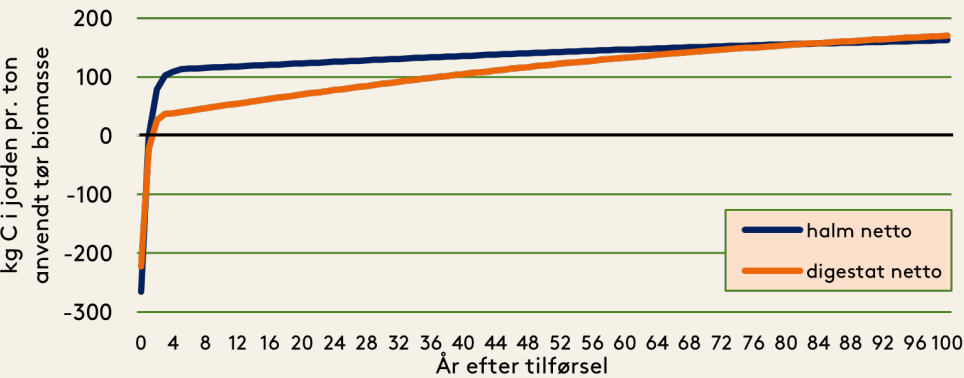
Efter 1.000 år er der stadig omkring 75 pct. af kulstofindholdet tilbage i biokullet, jf. Schmidt et al (2022).

Nyere geologiske studier peger på en meget høj permanens af den tilbageværende biokul, bl.a. Sanei et al (2024), som nærmest får karakter af "inertinit".

En sådan stabilitet eller permanens svarer næsten til, når der lagres CO₂ i undergrunden, hvor den mineraliseres. Så biokul lagrer en stor del af kulstoffet meget langvarigt.

Figur 3.4 viser nettolagringen af at nedmulde biokul af 1 ton biomasse sammenlignet med direkte nedmuldning af biomassen. I starten lagrer den rå biomasse mere kulstof end biokullet, fordi der også overgår kulstof til pyrolysegassen ved behandling. Men allerede efter et par år "overhaler" biokullet den oprindelige biomasse som kulstoflager og når relativt hurtigt op på den langsigtede lagringseffekt.

Figur 3.3 Biokul lagrer mere kulstof end alternativet allerede inden 2 år



Anm.: Figuren viser nettolagring af biokul fratrukket referencesituationen for den konkrete biomasse. Kilde: CIP Fonden på baggrund af [Thomsen et al \(2023\)](#)



#5 Hvor meget biokul kan man lave?

Den potentielle produktion af biokul og den deraf følgende CO₂-lagring afhænger af produktionskapaciteten og af den tilgængelige restbiomasse.

NIRAS (2023) har for CIP Fonden undersøgt eksempler på relevante restbiomasser, deres omfang, potentiale for CO₂-lagring og deres geografiske placering i Danmark. Figur 3.5 viser på den baggrund en opgørelse over udvalgte, ubrugte restbiomasser i Danmark i forhold til deres omfang og kulstofindhold.

Nogle restbiomasser er mere våde end andre, hvorfor der er væsentligt mindre mængder tørstof til rådighed, når man fx bruger digestat og spildevandsslam. Tørre biomasser kan lettere transporteres og over længere afstande.

Hvis biomasseresterne ikke omdannes til biokul eller bioenergi, bliver CO₂e-indholdet frigivet tilbage til atmosfæren, når de opmagasineres og f.eks. nedmuldes på markerne. Når restbiomasserne laves til biokul, får de ny værdi, fordi de i pyrolyseprocessen dels omdannes til grøn energi, dels omdannes til biokul, der kan lagre kulstoffet stabilt med tilhørende betaling.

Kulstofindholdet fra biomassen fordeler sig ligeligt mellem biokul og energiprodukter. De nævnte mængder er tilstrækkelige som grundlag for lagring af 2 mio. ton kulstof, jf. figur 3.6. Det svarer til den politiske målsætning for biokul i Landbrugsaftalen fra 2021.

Dertil kommer potentialet fra andre rester og mulighederne for at øge mængden af restbiomasser.

Det Nationale Bioøkonomiske Panel (2022) har vurderet forskellige scenarier for den fremtidige biomasse i Danmark og dens anvendelsesmuligheder.

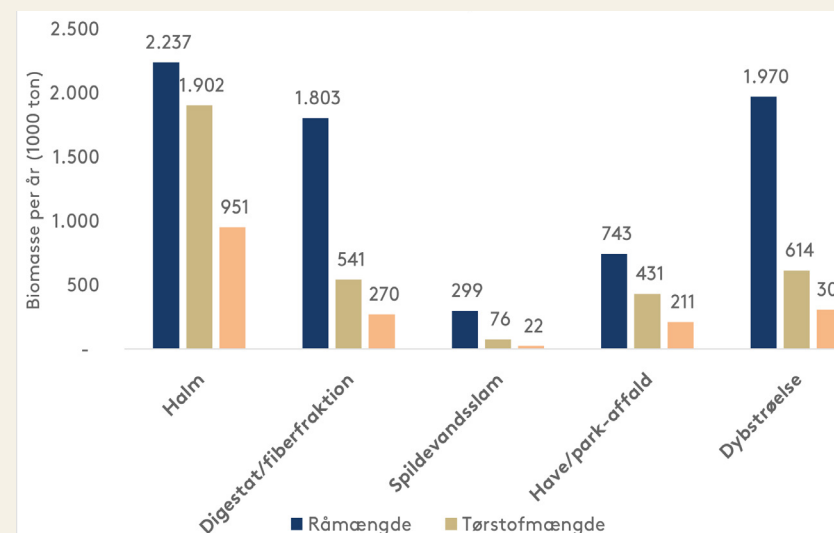
Alt efter, hvordan man fx prioriterer arealanvendelsen og omfanget af dyrehold i Danmark, kan det få betydning for, hvor meget der dyrkes og dermed, hvor meget der efterfølgende vil være af restbiomasser.

Panelet finder, at der er potentiale for at øge mængden af biomasser frem mod 2030 i et omfang svarende til 10 mio. ton tørstof. Primært i form af flere halm- og strårester. Det kan fx være som følge af flere efterafgrøder, ligesom der arbejdes med længere strå og flere avner, som også vil øge omfanget af restbiomasser.

En del af potentialet for at øge biomasserne vil være relevant for pyrolyse. Som en grov tommelfingerregel vil et ton tørstof biomasse kunne give anledning til et ton biokul og potentielt 2 ton kulstoflagring.

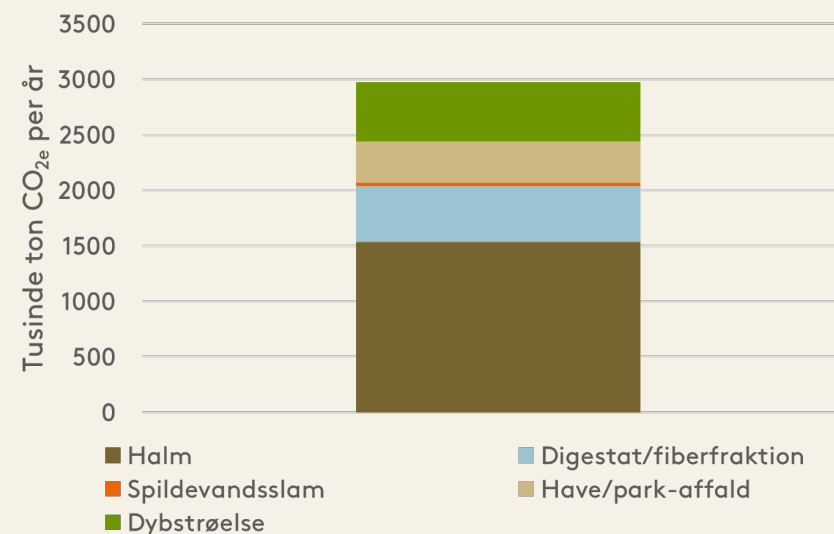
Selv om biomasserne kan ændre sig over tid, er der flere relevante restbiomasser for pyrolyse, end hvad der umiddelbart indgår i de viste analyser, ligesom der er mulighed for at øge omfanget af restbiomasser over tid. Det vurderes derfor, at der også fremover vil være restbiomasser nok i Danmark til at understøtte kulstoflagring svarende til den politiske målsætning.

Figur 3.4: Mænder af udvalgte, relevante restbiomasser til biokul



Kilde: NIRAS (2023)

Figur 3.5: Hvor meget kulstoflagring kan biomassen understøtte?



Anm.: Kulstofindholdet er opgjøret efter 100 år. Den umiddelbare kulstoflagring er højere. nm..

Kilde: NIRAS (2023)



#6 Hvad er et klimacertifikat og en klimakredit?

Et klimacertifikat er et løfte om eller bevis på en reduktion af udledning af klimagasser eller langtidslagring af kulstof et konkret sted i verden. Et klimacertifikat svarer typisk til lagring af 1 ton CO₂. Sælges klimacertifikatet videre til andre, der fx ønsker at kompensere for deres egne udledninger, kaldes det en klimakredit.

Klimakreditter sælges på et frivilligt marked, og gælder kun nye og additionelle tiltag. Alt efter hvilken platform klimakreditte sælges fra, kan der være forskellige opgørelsesmetoder og standarder.

Ved produktion af biokul kan pyrolyseværket udstede klimacertifikater, der sælges som klimakreditter. På denne måde finansieres en del af pyrolyseprocessen og den efterfølgende CO₂-lagring gennem

salg af klimakreditter.

Det frivillige marked for klimakreditter er i markant udvikling og drives af stigende efterspørgsel efter produkter og services med reduceret klimaaftryk og af virksomhedernes klimamålsætninger.

EU-Kommissionen har i november 2022 igangsat et arbejde for en fælles certificeringsramme for kulstoffjernelse, bl.a. ved lagring af kulstof i jord eller skove. En fælles certificeringsramme vil kunne øge troværdigheden af europæiske klimakreditter og gøre dem mere attraktive for købere.

Læs mere om markedet for klimakreditter i en analyse fra SEGES Innovation udarbejdet for CIP Fonden [her](#).

Figur 3.6: Produktion af biokul kan finansieres gennem salg af klimakreditter



Kilde: CIP Fondens egen tilvirkning



#7 Hvordan hjælper biokul landbruget?

Landbrugs- og fødevarereproduktionen står for en stor del af drivhusgasemissionerne i Danmark. Modsat andre erhverv er landbrugets klimaemissioner i høj grad baseret på naturlige processer, som kræver nye løsninger.

I dag ender flere restbiomasser i landbruget med at blive nedmuldet i jorden, fx overskudshalm, husdyrgødning og dybstrøelse. I takt med, at restbiomassen forrådner i jorden, udledes CO₂e-indholdet i biomassen til atmosfæren. Hvis man i stedet behandler restbiomassen fra landbruget ved pyrolyse, vil store dele af kulstoffindholdet i biomassen bindes i biokullet. Herved når CO₂e-udledningen ikke ud i atmosfæren, og klimabelastningen, der følger af landbrugets restbiomasser, reduceres. Gennem brug af biokul bindes kulstoffet istedet til jorden.

Pyrolyseteknologien og biokul har alt andet lige potentiale til, at landbruget bliver nettooptager af kulstof. Dermed skifter landbruget status fra at være en af de største udledere af CO₂e til at afhjælpe klimaudfordringerne ikke kun for erhvervet selv, men også på samfundsniveau.

CO₂-lagring med biokul repræsenterer en mulig vej til nye indtægtsstrømme for de enkelte bedrifter, som f.eks. kan investeres i andre klimatiltag og/eller betale en ny CO₂-afgift. De nye indtægter opstår, når der med biokulproduktionen sker en indsamling og aflønning af restbiomasser, der måske ellers ikke havde nogen

nævneværdig økonomisk værdi, og fordi der sker en medvirken til CO₂-lagring ved at udbringe biokul på markerne.

Indtægtsstrømmen afhænger af, at der frasælges en klimakredit eller på anden måde opnås en aflønning for CO₂-lagringen, fx via et subsidie.

Udover CO₂-fangst og nye indtægtsmuligheder er der med biokul også mulighed for sidegevinster i form af jordforbedring og oprensning af miljøfremmede stoffer.

Enhver CO₂-lagring foretaget i landbruget vil desuden gavne landbruget under ét, da det reducerer det samlede krav til nedbringelse af landbrugets emissioner. Så samlet set kan det være en fordel for den enkelte bedrift at deltage i værdikæden omkring biokul.

Læs mere om dette i:

- Videnssynthesen om biokul i dansk landbrug fra Aarhus Universitet [➔](#)
- CIP Fondens baggrundsnotat om mulige miljøeffekter (2024c) [➔](#)
- CIP Fondens baggrundsnotat om værdikæder (2024d) [➔](#) og kapitel 7
- CIP Fondens baggrundsnotat om CO₂ afgifter i landbruget (2024b) [➔](#)



#8 Hvad betyder biokul for biodiversiteten?

DER SES PRIMÆRT POSITIVE EFFEKTER PÅ BIODIVERSITETEN

1/4 af jordens biodiversitet huses i jordbunden⁴. Når biokul bruges på landbrugsjord, er det derfor vigtigt at forholde sig til, hvad biokul betyder for biodiversiteten.

Brugen af biomasser til biokul er ikke i sig selv et problem, når der bruges rester, der er lavet til andre formål. Det betyder, at der ikke lægges beslag på nye dyrkningsarealer for at producere biomasse til biokul, og at der således ikke inddrages områder, som ellers kunne have været til gavn for biodiversiteten. Pyrolyse og biokul tager "et sidste vred" på restbiomasser, som har været dyrket til andre formål.

BIOMASSER, DER TAGES FRA JORDEN

En særlig overvejelse gælder for restbiomasser, som ellers kunne have været brugt i landbrugsjord. Fx halmrester, som i dag ikke alle indsamles, men ofte nedmuldes i jorden i stedet. Her har de uafhængede halmrester måske ikke så stor økonomisk værdi uden for bedriften, men de har en effekt på jorden ved nedmulding. Indsamling af halmresterne vil betyde, at jorden fratages organisk materiale. Nettoeffekten afhænger af, hvad der så sker istedet.

Hvis halmresterne fx sælges til varme- og elektricitetsproduktion og brændes af, sker der ingen recirkulation af næringsstoffer til jorden. Heller ikke af vigtige næringsstoffer for planterne som fx fosfor. Så har jorden

måske brug for anden gødning.

Hvis halmresterne sælges til biokulproduktion, kan en del af næringsstofferne returneres til jorden med biokullene og evt. suppleres af anden gødning. Dog med en vis forsinkelse. Se fx EA Energianalyse (2024) for en kvantificering af denne sideeffekt på jordens frugtbarhed.

En fremtidig brug af halmrester til biokul bør tage udgangspunkt i, at der fortsat vil være en vis del til nedmulding på jordene. Men der er flere uafhængede halmrester, end der umiddelbart er brug for. Se fx NIRAS (2023). Og i takt med, at der dyrkes flere efterafgrøder, vil den samme mark også kunne producere flere strårester, hvoraf nogle fx vil være relevant for biokulproduktion, grøn energi og mere varig kulstoflagring end nedmulding.

JORDFORBEDRING OG STØRRE AKTIVITET HOS MIKROORGANISMERNE

De positive sidegevinster ved brug af biokul på landbrugsjord handler om jordforbedring, hvor biokul fx kan påvirke jordens vandholdende evne, hvilket kan være en fordel for sandede jorde og for jorde, der udsættes for tørkeperioder.

Biokul kan samtidig være med til at reducere udvaskningen af kvælstof til nærtliggende vådområder.

Via sin porøse struktur vil biokul også skabe bedre plads i jorden til mikroorganismernes aktivitet og til vækst af planternes rodnet til gavn for biodiversiteten i jordbunden.

Biokul vil samtidig øge kulstofreserven i jorden, som ellers er aftagende på danske jorde.

Overordnet set har biokul en positiv indvirkning på jordens mikroorganismer gennem en øget mængde mikrobiel biomasse, større diversitet og aktivitet jf. videnssynthesen om biokul fra Aarhus Universitet. Men forståelsen bag samspillet mellem biokul, jordtypen og responsen er stadig begrænset, og der er brug for mere forskning på området.

Når biokul påføres landbrugsjorden, kan det, alt efter hvor meget der udbringes, typen af biokul og landbrugsjordens kvaliteter, påvirke biodiversiteten direkte og gennem påvirkning af jorden.

Biokul kan dermed påvirke biodiversiteten gennem dets effekter på landbrugsjorden, primært med positive effekter, men potentielt også med negative effekter, især ved meget høje doser.

Læs mere om dette i:

- Videnssynthesen om biokul i dansk landbrug fra Aarhus Universitet ➔
- CIP Fondens baggrundsnotat om mulige miljøeffekter af biokul (2024c) ➔

Er du nysgerrig på mere om biokul?

Læs mere på CIP Fondens hjemmeside [her](https://cipfonden.dk).

På CIP Fondens hjemmeside kan du læse mere om biokulprojektet og bl.a. finde relevante analyser fra fx NIRAS, Aarhus Universitet, EA Energianalyse, SEGES Innovation m.m.

Du kan også finde svar på forskellige spørgsmål med CIP Fondens Q&A om biokul.

Og så er der information om CIP Fondens Advisory Board, som er tilknyttet biokulprojektet og rådgiver omkring de faglige analyser til projektet.

The screenshot shows the CIP Fonden website. The main heading is "CO₂-lagring i landbruget med biokul". Below this is a "Projektbeskrivelse" section with a detailed text about the project's goals and the process of using biochar for CO₂ storage in agriculture. To the right, there is a "Download analyser" section listing several reports for download, including "Kortlægning af biomasse til biokul og CO₂-potentiale", "Særligt grundlag for vurdering af klimaeffekter ved produktion af biokul", "Analyse af mulighederne for at forstærke CO₂-lagring i biokul", "Få mere viden om, hvordan vi kan bruge biokul i dansk landbrug (by.dk)", and "Arbejdsplan om biomasse og CO₂-lagring (by.dk)".

⁴ EU Kommissionen (2021) baseret på FAO (2020)

Hvordan ser økonomien ud bag biokul?

Kapitel 4

Det er rentabelt for private aktører at lave biokul af fx digestat og halmrester og lagre kulstof med det, hvis der også er bidrag fra fx salg af klimacertifikater, fra CCS-støtte eller fra højere forbrugerpriser for mere klimavenlige produkter.

4.1. Hvad betyder noget for prisen på at lagre CO₂?

De samlede omkostninger ved at fange CO₂ og lagre det med biokul går lige fra at skaffe de første restbiomasser til behandling i pyrolyseanlæg og til efterfølgende lagring og udbringning. Processen involverer flere forskellige aktører lige fra eksempelvis landbrug, der kan levere restbiomasser til industriel pro-

Hvad betyder især noget for prisen for at lave biokul?

- **Biomassen** (fx pris, logistik, behov for forbehandling samt energi- og kulstofindhold)
- **Pyrolyseteknologien** (anlægs- og driftsomkostninger, kapacitet, effektivitet og energibalance)
- **Energipriser** (afsætning af grøn energi i forskellige former)
- **Placering af anlæg** (nærhed til biomasser, afsætning af grøn energi og mulighed for symbioselokaliserings)
- **Klimacertifikat** (omkostninger til certificering og pris for klimakredit)

duktion af energi og biokul og efterfølgende afsætning til energimarkeder og til lagring af CO₂, fx via udbringning af biokul på marker.

Værdikæden er nærmere beskrevet i kapitel 7.

Der er også indtægter til den samlede værdikæde, der står bag CO₂-fangst og -lagringen. For pyrolyseprocessen genererer også overskudsvarme og grønne energiprodukter - enten i form af pyrolysegas, der fx kan bruges til at producere varme, og bioolie, der kan videreforarbejdes til grønne brændstoffer.

MEGET FORSKELLIGE RESTBIOMASSER MED FORSKELLIGE PRISER OG INDHOLD

Alt efter hvilke restbiomasser, der bruges til at lave biokul af, kan nogle af dem koste noget, hvis der er alternativ økonomisk anvendelse, fx resthalm der også kan gå til afbrænding. Andre er omtrent gratis, hvis et pyrolyseanlæg fx placerer sig i nærheden og de facto hjælper nogen af med en rest, de ellers selv skulle håndtere, fx restfibre fra biogasanlæg. Og så er der biomasser, som pyrolyseanlægget kan få penge for at modtage som fx spildevandsslam.

Se kapitel 3, spørgsmål # 2 om relevante biomasser for produktion af biokul.

De meget forskellige restbiomasser, der kan komme i spil, har forskellig sammensætning og derfor også forskellige egenskaber, når de bliver til biokul. Nogle biomasser indeholder relativt meget kulstof, som ved en effek-

Tabel 4.1: Varierende indhold af kulstof og fosfor alt efter valg af biomasse.

Biomasse	Kulstof (C)	Kvælstof (N)	Fosfor (P)
Halm/græs	Høj	Lav	Lav
Spildevandsslam	Lav	Mellem	Mellem
Restfibre fra biogas (husdyrgødning)	Mellem	Mellem/høj	Høj

Kilde: Videnssynthese om biokul fra Aarhus Universitet. Elsgaard et al (sept 2022)

tiv konvertering spiller ind på den mulige indtægt for CO₂-lagring, og andre indeholder relativt meget fosfor, hvilket kan spille ind på gødningsværdien af biokullet. Se tabel 4.1 for biomassernes indhold. Biomasserne har også forskelligt energiindhold, som påvirker, hvilket set-up der kan betale sig.

MERE EFFEKTIVE ANLÆG OVER TID

Rentabiliteten i den samlede business case afhænger af pyrolyseanlæggets økonomiske data, kapacitet og effektive udnyttelse af energien. Pyrolyseanlæggene kan have en relativ høj anlægsomkostning, som skal ses i forhold til afkastmuligheder og tilbagebetalingstid. Anlæggene antages at have en teknisk levetid på ca. 20 år, men kan i praksis opgraderes og levetidsforlænges. Businesscasen skal også tage højde for de løbende drifts- og vedligeholdelsesomkostninger.

Over tid må det forventes, at teknologien vil blive mere effektiv, og at anlæggene kan reproducere og opskaleres på en måde, hvor omkostningerne pr. enhed produceret biokul vil aftage.

Hvordan biomassen veksles til hhv. energi (gas, varme og bioolie) og biokul, kan til en vis grad justeres med pyrolyseteknologien (temperatur og varighed), og derfor er afsætningsmulighederne for hhv. energi og biokul afgørende.

For energiprodukterne handler det om, hvorvidt pyrolysegas og overskudsvarme kan afsættes til fjernvarmenettet eller andre nærtliggende virksomheder. Og for bioolien om mulighederne for videreraffinerings til grønne brændsler og/eller direkte brug.

HØJE ENERGIPRISER STYRKER BUSINESSCASEN

Energipriserne har været stigende som følge af geopolitisk uro i verden og vil for de fossile energiprodukter også fortsat stige strukturelt som følge af klimamål og stigende CO₂-kvotepriser.

Grøn energi fra pyrolyse og restbiomasser kan være med til at styrke Danmarks energiforsyning og udgør et grønt alternativ, der ikke afhænger af, om vinden blæser, eller solen skinner. Det spiller derfor godt sammen med fremtidens energimiks.

Især ved brug af tørre restbiomasser er der en god case for at producere grøn energi på en effektiv måde, og jo mere energi restbiomassen indeholder, og der kan konverteres, jo større er mulighederne også for at byde ind på højværdi-energi som fx bioolie og grønne brændstoffer.

Men det er ikke kun energipriserne, der afgør business casen. Det er også vigtigt, at biokulproduktionen foregår, hvor den effektivt kan komme af med sine energiprodukter.

MULIGHED FOR SYMBIOSEØKONOMI

Pyrolyse skal ses som en stop-end teknologi, der kan placeres som et sidste led på anden biomassebehandling. Mulighederne for samlokalisering og synergieffekter styrker business casen bag biokul. Se også mere i kapitel 7.

Pyrolyse kan fx placeres sammen med et biogasanlæg, hvis restfibre (digestat) udgør et relevant input til biokulproduktion. Logistikken for biomassen er allerede på plads, og restfibre har kun marginal økonomisk værdi. Inputtet er altså mere eller mindre gratis. Det er samtidig en fordel, at der i forbindelse med pyrolyseprocessen foretages en forudgående separering og tørring af digestatet, som dels vil begrænse den emission af metan, som ellers ville have fundet sted, når restfibre blev opbevaret (undgåede emissioner), dels gør den våde restfraktion bedre som gødningssprodukt på markerne⁵.

Endelig kan biogasanlægget med fordel modtage pyrolysegas og overskudsvarme fra pyrolyseanlægget, når de ligger lige ved siden af hinanden. Her kan pyrolysegassen tilføres biogasanlæggets opgradering.

Pyrolysegas er som udgangspunkt ikke lige så rent som naturgas og kan ikke uden videre

sendes ind i naturgasnettet. Men varmeeffekten fra pyrolysegassen vil være relevant for fx industrivirksomheder i umiddelbar nærhed, ligesom de potentielt har nogle restbiomasser, der kan indgå i fremstillingen af biokul.

Den form for samplacering, hvor forskellige enheder og virksomheder udnytter hinandens rester eller overskudsenergi cirkulært kendes fra industri- og energiparker som fx GreenLab Skive. Pyrolyse er også oplagt at tænke ind i de kommende energiparker, som der 12. december 2023 blev indgået politisk aftale om.

BEHOV FOR INDTÆGT FOR CO₂-LAGRING

Det er afgørende for business casen, at der er en form for aflønning eller indtægt knyttet til selve kulstoflagringen. Det kan komme fra salg af klimacertifikater, fra en højere betalingsvillighed for forbrugere og fra CCS-støtte i en periode.

Ud over at bidrage til pyrolyseprocessen er der omkostninger forbundet med at oplagre og udbringe biokullet, ligesom dokumentation af klimaeffekten (via klimacertifikater) er forbundet med omkostninger. Se fx SEGES Innovation (2023) for nærmere beskrivelse af omkostningerne forbundet med at få et klimacertifikat.

4.2. Hvorfor er biokul interessant for det enkelte landbrug?

Landbruget er en vigtig del af værdikæden bag CO₂-lagring med biokul, fordi de enkelte bedrifter både kan levere relevante restbiomasser, men også modtage biokul til udbringning på landbrugsjorden med forskellige egenskaber ud over kulstoflagring. Landbruget er så at sige centralt i begge ender af værdikæden.

For den enkelte bedrift kan følgende fra processen med biokul og CO₂-lagring få direkte økonomisk betydning:

- Økonomisk indtægt fra sidestrømme som fx halmrester, andre strårester, græs og husdyrgødning
- Biokul er som gødningssprodukt rigt på fosfor og har lav pH-værdi og kan til en vis grad erstatte kunstgødning med fosfor, kalium og kalk
- Bedre returprodukt til gødning fra biogasanlæg efter separering og tørring som følge af pyrolyseproces
- Andel af gevinst ved CO₂-lagring

Biokul kan, modsat andre gødningssprodukter, bringes ud hele året rundt og har dermed en vis fleksibilitet.

Vælger den enkelte bedrift at levere sidestrømme til et pyrolyseværk, kan det for begge parter være interessant med en langvarig leverandærkontrakt, som samtidig afspejler en grøn præmie for klimaeffekten.

Der er også andre positive sidegevinster for landbruget ved biokul på landbrugsjord af jordforbedrende karakter, som kan være vanskelige at værdisætte for den enkelte bedrift, men som har betydning på samfundsniveau. Som hovedregel er dansk landbrugsjord allerede relativ frugtbar. Hvad angår biokuls evne til at øge udbyttet fra jorden, er den bedst på sandede jorde, og hvor høstværdien pr. hektar er høj (Amonette et al, 2021).

Se kapitel 5 for nærmere beskrivelse af potentielle samfundsgevinster af biokul i form af sideeffekter.

RISICI OG BEGRÆNSNINGER FOR BEDRIFTEN

Når man bruger biokul som et gødningssprodukt, skal den enkelte bedrift stadig overholde det årlige fosforloft for udbringning



Fosforloftet indebærer, at der maksimalt kan udbringes 30 kg. fosfor pr. hektar pr. år. Det svarer omtrent til følgende mængder biokul årligt alt efter den biomasse, biokullet er lavet af:

- ½ t/ha (digestat)
- 0,8 t/ha (spildevandsslam)
- 7-9 t/ha (halmrester)

Kilde: NIRAS (2023)

på landbrugsjord. Er biokullet rigt på fosfor, fx fordi det er baseret på husdyrgødning, er det grænser for, hvor meget biokul der kan bringes ud på markerne.

Fordi biokul "binder" forskellige stoffer til sig, kan det være med til at hæmme virkningen af pesticider og andre agro-kemikalier. Derfor skal udbringningen ske koordineret hermed. For at sikre landbrugsjord mod eventuel forureningsfare fra problematiske stoffer er det afgørende, at biokullets indhold testes og overholder relevante grænseværdier som med øvrige produkter, der tilføres landbrugsjord.

Da biokul af landbrugsrester aktuelt ikke har hjemmel til brug på landbrugsjord i Danmark, er det afgørende, at der indføres grænseværdier, fx med udgangspunkt i de mest restriktive der kendes af forsigtighedshensyn. Se også kapitel 6 om reguleringsmæssige barrierer.

4.3. Business cases for biokul

CIP Fonden har analyseret business casen for biokul baseret på tre forskellige former for biomasser og i to forskellige set-up, hvor der i den simple version alene produceres pyrolysegas/overskudsvarme og biokul, mens der i det udvidede set-up også produceres bio olie. Dvs. seks forskellige cases.

⁵ Vådfraktion med plantetilgængelige næringsstoffer frem for restfibre fra biogasproduktion, der er sværere at omsætte på marken.

Beregningerne er baseret på producentoplysninger fra hhv. AquaGreen (for spildevandsslam) og fra Stiesdal (for digestat og halmrester). Se boks 4.1 for beskrivelse af processerne bag samt energibalancerne, samt bilag B for beskrivelse af antagelser bag de viste business cases og de anlæg, der ligger til grund herfor.

Tilgangen er valgt for at illustrere, hvor meget det betyder at anvende biomasser til forskellige inputpriser. Og hvad det betyder at behandle hhv. relativt tørre biomasser vs. biomasser, som kræver forudgående og energikrævende tørring.

Tilgangen viser også noget om energibalancen i den samlede proces, hvor der ikke i alle tilfælde er energi "nok" tilbage til også at kunne producere bioolie, som har mere karakter af et højværdiprodukt end pyrolysegassen, der typisk anvendes til varme.

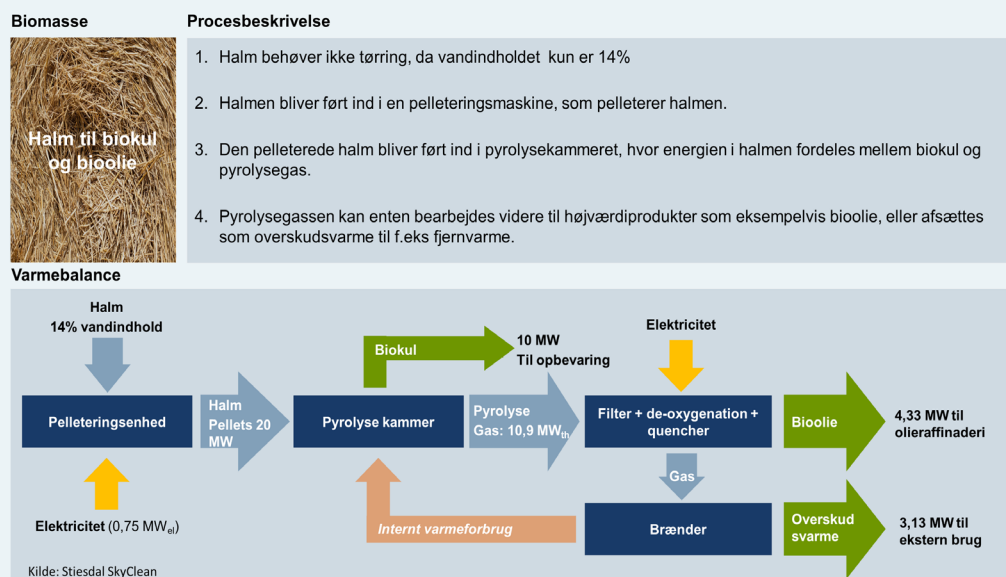
Formålet er at se, om de samlede omkostninger for hele værdikæden inkl. logistik, udbringning og lagring kan dækkes af mulige, markedsbestemte indtægter.

Konkret er der set på, om omkostningerne i seks cases kan afholdes af de mulige indtægter fra salg af energiprodukter, inkl. frasalg af en klimakredit til ca. 100 euro eller 750 kr.

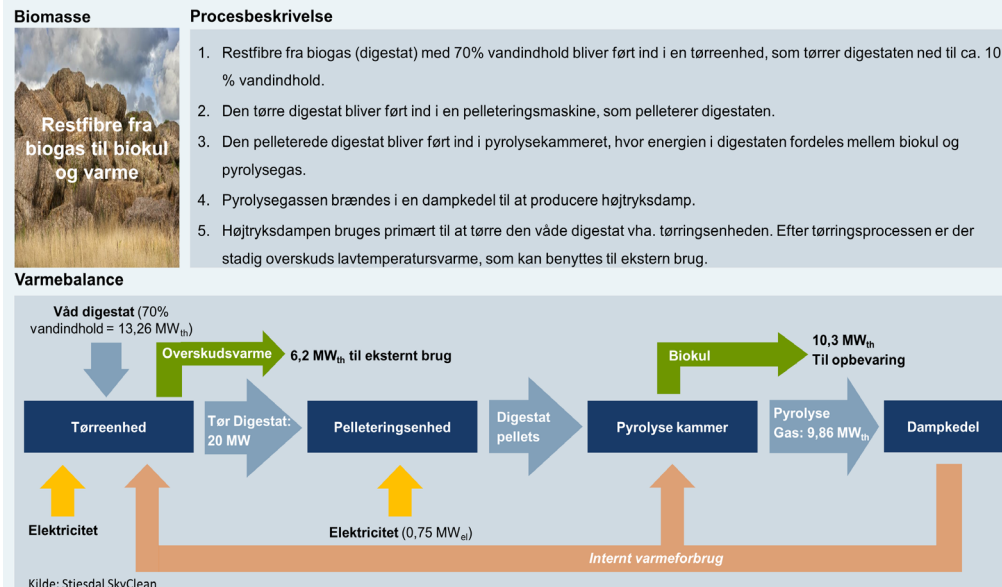
Alt efter biomasse vil forskellige konfigurationer være relevante. Som udgangspunkt er brug af halmrester eller lignende tørre restbiomasser det mest relevante i forhold til en udvidet energiproduktion (med bioolie), mens brug af våde restbiomasser som hhv. digestat og spildevandsslam forudsætter en energikrævende tørringsproces.

Boks 4.1: Tre eksempler på biokulcases baseret på forskellige restbiomasser

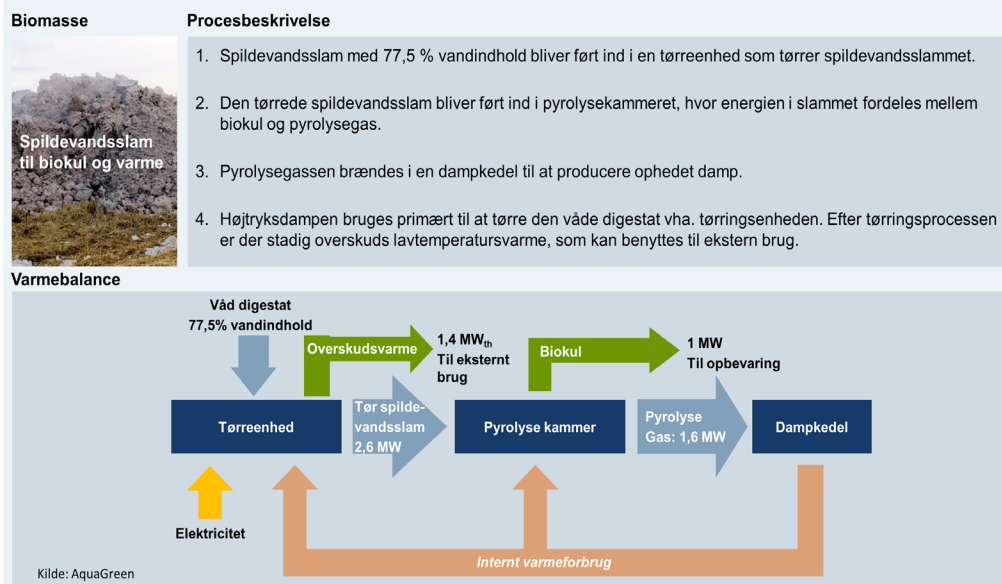
Case: Biokul af halmrester i udvidet set-up med bioolie



Case: Biokul af restfibre fra biogas i simpelt set-up med pyrolysegas og overskudsvarme



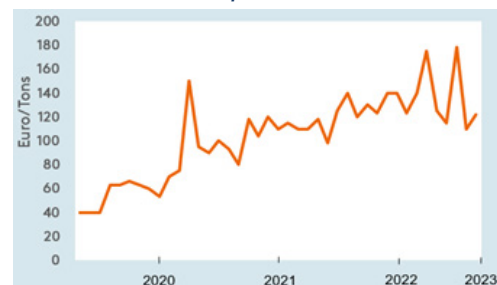
Case: Biokul af spildevandsslam i simpelt set-up



GRØN ENERGI OG KLIMAKREDITTER SOM INDTÆGT

De vigtigste indtægter i processen er fra salg af den grønne energi, der kommer som konsekvens af pyrolysen. Dvs. pyrolysegas/over-skudsvarme og i nogle set-ups også bioolie. Det er dermed især den grønne energi, der betaler for omkostningerne ved at lave biokul, som så fungerer som kulstoflager. Her kan ske en værdisættelse via det frivillige marked for klimakreditter. Prisen på klimakreditter for biokul, der har en langvarig lagring, har været stigende over tid, jf. figur 4.1.

Figur 4.1. Stigende priser på klimakreditter baseret på biokul



Kilde: Carbon Removal Marketplace, del af CORCCHAR index. Nasdaq.

Business casene tager udgangspunkt i, om kulstoflagringen kan dækkes af en klimakredit til en pris på 100 euro pr. ton CO₂e. Da klimakreditter for biokul sælges ultimo 2023 til omkring 130 euro pr. ton CO₂e, ser antagelsen om en pris på 100 euro derfor umiddelbar plausibel ud. Men priserne på klimakreditter med 100 års lagringseffekt er baseret på et stadigt gryende marked med et begrænset udbud og en indtil videre tilstrækkelig efterspørgsel.

Der er ekstraordinær stor usikkerhed knyttet til, hvordan markedet for køb og salg af klimacertifikater vil udvikle sig fremover. En usikkerhed, som investorer skal værdisætte i

business casen, hvor indtægterne fra klimakreditterne fylder relativt meget.

Se kapitel 3, #3 for en nærmere beskrivelse af klimacertifikater og SEGES (2023) for en analyse af markedet for klimakreditter.

CASE: BOKUL AF RESTFIBRE FRA BIOGAS

Hvis man ser på business casen for at producere biokul baseret på digestat og forudsætter en placering af pyrolyseanlægget ved siden af et biogasanlæg, er inputsiden håndteret i forhold til logistik og anskaffelsespris.

Biomassen har dog brug for en energikrævende forbehandling med separering af restfibre fra den våde fraktion og efterfølgende tørring. En del af energien fra processen skal derfor afsættes til denne forbehandling.

Der tages udgangspunkt i en anskaffelsespris på 150 mio. kr. for et samlet pyrolyseanlæg på 20 MW til behandling af restfibre for biogas. Se bilag B for en fordeling af indtægter og udgifter i business casen.

For biokul baseret på digestat er det rentabelt at producere i et simpelt set-up med pyrolysegas (case 1), forstødet på den måde, at alle omkostninger, inkl. en forrentning⁶, kan dækkes med en supplerende indtægt på op til 100 euro fra en klimakredit. Casen er robust, idet produktionsprisen pr. ton lagret CO₂e er nede omkring 430 kr., som skal dækkes via fx klimakreditter.

For case 2 med et udvidet set-up, hvor der også laves bioolie, er produktionen derimod ikke rentabel, da der ikke er energi nok til at allokere til et biooliespor. Dels fordi produktionsprocessen allerede har lagt beslag på en del af den grønne energi til forbehandling i form af tørring, dels fordi biomassen allerede har "afgivet" energi en gang før i biogasprocessen.

CASE: BOKUL AF HALMRESTER

Halmrester kan anvendes direkte i en pyrolyseproces, men vil være forbundet med en omkostning af at indsamle, transportere og købe, fordi biomasseresten har konkurrerende formål – til afbrænding på varmeværker, til iblanding i biogasanlæg og til nedmuldning på markerne.

Selvom halmrester har et relativt højt energindhold, er det pga. indkøbsprisen for halm ikke rentabelt, så længe der kun produceres grøn energi i form af pyrolysegas/varme til relativt lave priser som i case 3.

Halmcasen skal baseres på, at der også produceres bioolie – et højværdiprodukt (case 4), selv om det også er forbundet med visse omkostninger. Her er det afgørende, hvilken pris der kan opnås for bioolien. Ved en biooliepris på ca. 600 kr. pr. ton er der behov for indtægter til dækning af omkostningen på ca. 680 kr. pr. ton CO₂ via klimakreditter. Da det er under 100 euro pr. ton CO₂e, er case 4 også rentabel.

Hvis bioolien antages afsat relativ uforarbejdet til et raffinaderi til viderebehandling til fx avancerede brændstoffer, kan det være en relativt høj pris sammenlignet med nutidens fossile alternativer.

Bioolien indeholder altså en grøn præmie. Bioolien kan uden væsentlige opgraderinger anvendes til iblanding for eksisterende motorer, fx som følge af nye EU-krav til søfartens brændsler, er den konkurrencedygtig med dyrere, bæredygtige e-brændsler og kræver ikke udskiftning af motorer.

Se bilag B for en fordeling af indtægter og udgifter.

CASE: BOKUL AF SPILDEVANDSSLAM

I dag betaler rensningsanlæg landbrug for at

udbringe spildevandsslam på deres marker. Dvs. man får en betaling for at tage imod slammet. Ved at placere et pyrolyseanlæg ved siden af et spildevandsanlæg starter business casen derfor positivt ud.

Biomassen forudsætter imidlertid væsentlig forudgående tørring, som lægger beslag på en forholdsvis stor del af energibalancen.

Der kan derfor kun forventes tilstrækkeligt energi til at producere pyrolysegas/varme (case 5), men ikke også bioolie (case 6).

Når det gælder spildevandsslam, er kulstofindholdet ikke så højt efter tørring, at der vil være meget tilbage i biokullet. Salg af klimakreditter er derfor ikke så afgørende for denne business case.

Det er til gengæld betalingsvilligheden for at komme af med spildevandsslammet og få det oprenset via pyrolyseprocessen. I dag betaler spildevandsanlæg omkring 300-400 kr. pr. ton slam til landbrug, der anvender det direkte ud på markerne for at genanvende næringsstoffer og fx fosfor fra biomassen. Som udgangspunkt får man altså penge for at modtage denne biomasse. Og jo flere krav, der stilles til behandling af slam i forhold til oprensning af problematiske stoffer, jo større vil betalingsvilligheden til at få det pyrolyseret være.

Udgangspunktet er tre 2,6 MW pyrolyseanlæg til 25 mio. kr. pr. stk. med en samlet investering til pyrolyse- og tørringsanlæg på ca. 100 mio. kr. for effektmæssigt at lave sammenlignelige cases.

Case 5 med spildevandsslam er rentabel ved en betalingsvillighed på omkring 570 pr. ton spildevandsslam og et frasalg af klimacertifikater til omkring 100 euro pr. ton CO₂e. Denne case handler mere om miljøbehandling af

⁶ Ved en antagelse om 8 pct. afkast.

slam inden eventuelt brug på marker af biokul (eller andetsteds), end den handler om kulstoflagring, som kun står for omkring 1/10 af indtægterne i denne case. Se bilag B for en fordeling af indtægter og udgifter i business casen.

De samlede resultater af business casene er vist i tabel 4.2 med korte forklaringer på resultaterne.

OPRENSNING AF PFAS I SPILDEVANDSSLAM

AquaGreen, der bl.a. producerer pyrolyseanlæg til håndtering af spildevandsslam, har fået testet pyrolysens evne til at nedbryde PFAS i processen⁷. Selv om spildevandsslammet som udgangspunkt indeholdt en række forskellige PFAS'er, var resultatet, at de ikke kunne spores i efterfølgende tests⁸.

Der findes mange forskellige PFAS'er, og hvis processen kan nedbryde PFAS (ud over de testede typer og uden at producere nye hybrider), er der tale om en stor teknologisk og miljømæssig landvinding. Der er eksempler på danske spildevandsan-

læg, som allerede har pyrolyseanlæg tilknyttet eller er ved at få det (se bilag A med dansk produktion af biokul).

Business casen med spildevandsslam viser alsidigheden i, hvad pyrolyse kan bruges til. Jo flere relevante måder at bruge det på, jo flere potentielle udviklere, og jo mere konkurrence, innovation og teknologiudvikling.

BIOKUL HAR FLERE RELEVANTE BUSINESS CASES I DAG

De mange typer af relevant biomasse og forskellige set-ups for, hvad der kan produceres og sælges af energiprodukter, åbner flere relevante business cases.

Den mest oplagte kommercielle case i dag, der samtidig er direkte implementerbar med dagens teknologi og infrastruktur, er biokulproduktion knyttet til biogasanlæg og baseret på digestat.

Altså hvor biomassen til biokul (restfibre fra biogasanlægget, typisk baseret på husdyrgødning) allerede er til stede, og hvor synergier i input og output umiddelbart kan

udnyttes. En nødvendig betingelse for rentabiliteten er dog en indtægt for CO₂-lagringen med biokul, fx i form af salg af klimacertifikater.

Biokul lavet af strårester fra landbruget, fx halmrester og andre afgrøderester, er relevant i et lidt mere avanceret set-up, hvor der også laves bioolie, som afsættes til mere højværdiformål. Alt efter krav til biooliens kvalitet kan der være behov for mere udvikling, før lønsomheden er klar til kommerciel brug. Men perspektiverne er til gengæld store, når de kan bydes ind på markedet for grønne brændstoffer.

På sigt og i takt med teknologisk udvikling og udbygning af PtX, vil raffinering frem til avancerede grønne brændstoffer til brug for fx fly også kunne blive relevante.

Biokul baseret på spildevandsslam er teknologisk muligt i dag, men processen er energikrævende, og her hviler forretningsmodellen primært på et ønske om oprensning af biomassen og betalingsvilligheden for denne miljøeffekt. Regulatoriske krav til behandling

af spildevandsslam kan skubbe på efterspørgslen efter pyrolysning af biomassen.

4.4. Hvor meget kapacitet skal man bygge?

En opbygning af et fremtidigt marked for pyrolyse og CO₂-lagring via biokul kræver både, at der er en markeds-mæssig rentabilitet i projektet, som vist i dette kapitel, og at det samfundsmæssigt er en god investering med positive effekter. Dertil skal der etableres relevante rammer og regulering af den nye teknologi. Markedsudvikling og rammer går hånd i hånd.

De private aktører går ikke i gang med at opbygge væsentlig kapacitet, før de har afklaring på en række reguleringsmæssige forhold (se også kapitel 6), hvor rammevilkår er forudsigelige og transparente, ligesom potentielle investorer også skal sikre sig langsigtede og stabile leverancer af såvel input (restbiomasser) og output (lagring via biokul).

Hvor meget kapacitet der er markeds-mæssig interesse for at opbygge, vil afhænge af de rammer under hvilke det kan ske, af den tilgængelige mængde restbiomasse, og af lokale kontekster, som har betydning for, hvor og hvilke samplaceringsmuligheder der fx kan etableres.

Hvis man fx skal nå den politiske målsætning for landbruget om 2 mio. ton CO₂-lagring årlig via biokul, vil det – lidt efter hvilke anlæg og hvilken biomasse der lægges til grund – kunne kræve mellem 70-90 stk. a 20 MW anlæg med udgangspunkt i dagens teknologi fra Stiesdal. Det vil alt andet lige kræve anlægsinvesteringer i størrelsesordenen 10-13 mia. kr., hvis de skulle opføres i dag.

Tabel 4.2. Kan CO₂e-lagring med biokul produceres billigere end 750 kr. pr. ton? Seks forskellige business cases

	Forbehandling	Pris på biomasse	Simpel værdikæde (pyrolysegas, biokul og overskudsvarme)	Udvidet værdikæde m/bioolie	Bemærkninger
Restfibre fra biogas	Kræver separering og tørring	Gratis	1	2	Biomassen er "gratis", og processen indeholder en god energibalance. Da man bruger pyrolysegassen til tørring og overskudsvarmen til biogas opgradering, er der under aktuelle forhold ikke basis for at udvide værdikæden til også at lave bioolie. Vil i så fald kræve brug af anden energikilde (grøn strøm) til tørring.
Halm	Klar til brug	Omkostning	3	4	Biomassen kræver betaling som input med stigende priser over tid., da halm har andre anvendelsesområder. Men halm indeholder meget energi og kulstof og kræver ikke forudgående tørring. Pyrolysegassen kan dermed danne grundlag for en udvidet værdikæde med bioolie – casen afhænger af afsætningsprisen på bioolie
Spildevandsslam	Kræver tørring	Indtægt	5	6	Biomassen indebærer en betaling ved modtagelsen ("gate fee"), men processen benytter pyrolysegassen til tørring, hvortil der alene er videresalg af overskudsvarme. Kræver en betalingsvillighed for at komme af med spildevandsslammet. Indeholder ikke nok energi til også at lave bioolie under nuværende forhold.

Anm.: Når business casens positive resultat er i parentes, er det udtryk for, at casen ikke er robust over for +/- 10 pct. udsving i energipriserne (indtægter).

Kilde: CIP Fonden på baggrund af virksomhedsdata fra hhv. Stiesdal og AquaGreen

⁷ PFAS'er er såkaldte "evighedskemikalier", som man typisk har brugt til at gøre noget vandtæt, slidstærkt, varmefast og/eller være fedt- eller smudsafvisende, jf. Miljøstyrelsen.

⁸ AquaGreen

Skaleringen kan også tage udgangspunkt i mindre anlæg, og der er mulighed for på samme site at placere flere anlæg. Se også kapitel 7 for værdikæder, udbygning og forretningsmodeller.

Over tid vil teknologien blive forbedret, arbejdsgange og processer blive optimeret, og der vil være forskellige innovationer, som fremmer produktivitetmulighederne. Set over en længere årrække kan kapacitetsbehovet derfor være lavere og udbygningsomkostningerne potentielt lavere, som det også er set, når andre teknologier skaleres og når en større markedsmodning.

Internationalt er det skønnet, at der kan være behov for helt op til 380.000 biokul-anlæg globalt set for at bidrage til målsætningen om at holde temperaturstigningerne på 2 grader i 2050 (Schmidt and Hageman, 2021). CIP Fonden dykker i næste fase af temaet med biokul nærmere ned i mulighederne globalt set.

Det internationale potentiale har også betydning for det mere langsigtede perspektiv ved at investere i opbygningen af et marked i Danmark, hvor fx opbygning af erfaring og kompetencer, demonstration af stabile leverancer med dokumenterede effekter, skalering af produktion, erfaringer med markedsafsløining af CO₂-lagring og andre typer af learning-effekter er værdifulde i forhold til det kommende eksportpotentiale.

4.5. Hvad betyder en CO₂-afgift for markedet for biokul?

De forskellige business cases er gennemført under gældende regler for private aktører i

værdikæden. Men hvordan ser det ud, hvis der indføres en CO₂-afgift for landbruget? Hvordan vil det påvirke det gryende marked for biokul?

Den danske regering vil indføre en CO₂-afgift på landbrugets emissioner med udgangspunktet i et udspil fra Ekspertgruppen for Grøn Skattereform. I praksis må flere politiske redskaber ud over en CO₂-afgift forventes i brug, fordi man politisk vil forfølge flere mål samtidigt. Lavere CO₂-emissioner skal fx kombineres med, at produktionen ikke flytter til udlandet, eller at det går ud over beskæftigelsen.

Landbrugets emissioner er ikke så enkle at opgøre eller måle, og det er derfor sandsynligt, at der fra start lægges op til et relativt simpelt afgiftssystem med udgangspunkt i allerede eksisterende dokumentation, fx bedriftsregnskaberne, som er enkelt at administrere og har relativt få fradragsmuligheder.

Biokul som klimavirkemiddel gennem nettolagring af CO₂ findes ikke som gængs dokumentation på bedriftsniveau og vil kræve et udviklingsarbejde, hvis det skal ses som et skatteredskab (fradrag). Og det er måske heller ikke så oplagt. Biokul bør bruges på de marker, hvor der er størst agromæssigt behov, og hvor de positive sideeffekter udnyttes bedst muligt, og ikke hvor der er størst skattemæssigt behov. CO₂-afgiften vil dog stadig have betydning for markedet for biokul.

Set fra landmandens side vil en CO₂-afgift umiddelbart fordyre produktion, der er forbundet med CO₂e-emissioner og presse på for investeringer i klimavirkemidler og omlægning af produktionen. Det kræver kapital. Her repræsenterer biokul en vej til nye indtægter (salg af sidestrømme og/eller lagring af bio-

kul). Det gælder uanset, om der kommer en afgift eller ej. Men en afgift skubber på behovet for nye indtægtskilder for bedrifterne, og dermed også på behovet for biokulproduktion og CO₂-lagring.

BIOKUL REDUCERER KRAVET TIL LANDBRUGET

For landbruget under ét vil al den biokul, som lagres på landbrugsjord, nedbringe det samlede reduktionskrav til landbruget tilsvarende. Selv om der fx frasælges klimakreditter, vil den fysiske nettolagring i Danmark stadig tælle med i de nationale og sektorbaserede emissions-opgørelser. Den kollektive gevinst i form af lavere nettoudledninger fra landbruget er derfor et tilsvarende lavere behov for en CO₂-afgift eller andre krav.

Introduktionen af en CO₂-afgift i landbruget vil både individuelt og under ét trække i retning af større efterspørgsel efter biokul som klimavirkemiddel og fremme markedet for biokul og CO₂e-fangst og -lagring.

Hvordan og hvor meget afhænger af den konkrete udformning af en kommende CO₂-afgift og brugen af øvrige redskaber til at reducere emissionerne.

Se fx CIP Fondens baggrundsnotat om "CO₂-afgift og markedet for biokul" (2024b) for nærmere beskrivelse.



Hvad får samfundet ud af det?

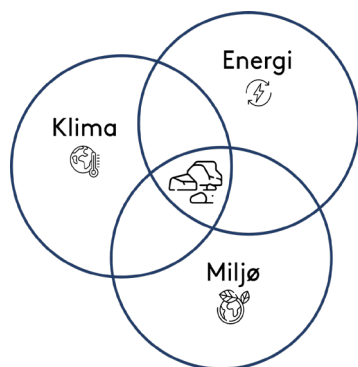
Kapitel 5

Biokul er konkurrencedygtig sammenlignet med andre CCS-metoder i forhold til pris og langvarig lagring, men har derudover også andre væsentlige klimaeffekter og positive sideeffekter.

5.1. Biokul bidrager til klima, grøn energi og miljø

Produktion og brug af biokul har en række positive effekter på samfundsniveau lige fra klimaeffekter til produktion af grøn energi og gunstige miljøeffekter.

Figur 5.1: Biokul leverer på flere fronter



Kilde: CIP Fondens egen tilvirkning

KLIMAEFFEKTER MED STORT POTENTIALE

FNs Klimapanel IPCC anerkendte i 2018 pyrolyse og biokul som en Net Zero Emission Technology (NET) for LULUCF-sektoren, som landbruget er del af. Det er samtidig en klimateknologi, som FN forventer sig meget af med et globalt potentiale til at fjerne 2,6

mia. ton CO₂e årligt⁹ med væsentlige, positive sideeffekter.

I Danmark har man med Landbrugsaftalen fra 2021 vurderet et teknisk potentiale for biokul på 2 mio. ton CO₂e-lagring i 2030 og årligt derefter. Dette mål kan evt. blive revideret i forbindelse med regeringens kommende pyrolysestrategi primo 2024.

Et af formålene med CIP Fondens arbejde i denne rapport er netop at undersøge dette potentiale og kortlægge, hvad der skal til for at få potentialet i spil via konkret handling.

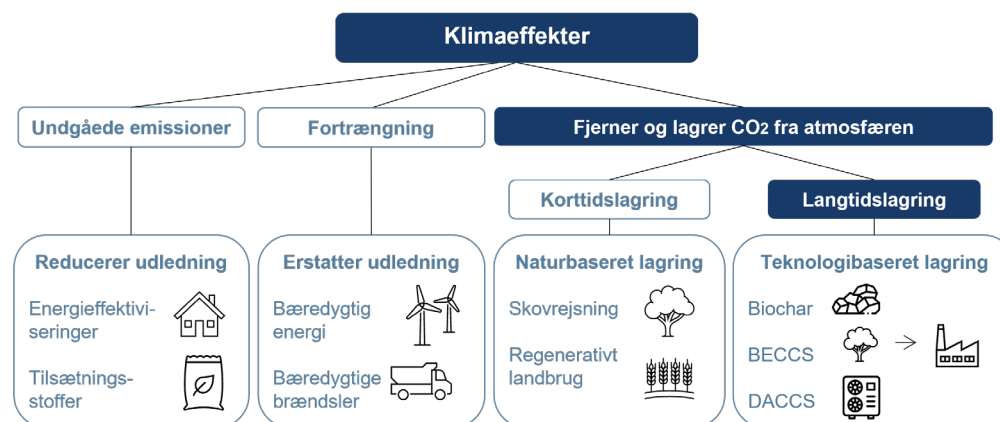
KLIMAEFFEKTER UD OVER CO₂-LAGRING

Den klimamæssige motivation for biokul har længe været den CO₂-lagring, som biokulene indebærer. Altså at pyrolyse af biomasser til biokul udgør en CCS-teknologi (carbon capture and storage) med fangst og lagring af biogen CO₂e. Andre teknologier med langvarig CO₂-lagring er fx Direct Air Capture (DACCS) eller fangst ved punktkilder som fx en skorsten af enten fossil CO₂ eller biogen CO₂ (BECCS) med efterfølgende lagring i undergrunden.

Biokul er med til at fremme efterspørgslen efter biomasserester og nyttiggøre sidestrømme, der ellers ville have ingen eller begrænset økonomisk betydning.

Som beskrevet i kapitel 3, #2, medfører processen bag biokul imidlertid også tilsvarende høje effekter i form af undgåede emissioner,

Figur 5.2: Som CCS-teknologi leverer biokul langsigtet og stabil lagring



Kilde: CIP Fondens tilvirkning

Hvorfor skal man lagre den biogene CO₂ i dag, når vi får brug for den i fremtiden til PtX og grønne brændstoffer?

Når man laver biokul af biomasser, ender den ene halvdel af kulstoffet fra biomassen i energisporret (pyrolysegassen og bioolien), mens den anden ender i biokullet. Det er altså kun halvdelen, som går til lagring, hvorfra den ikke kan indsamles igen og bruges på ny.

Den anden halvdel er derimod tilgængelig for brug via energien. Og den halvdel ville ikke have været til rådighed, hvis der ikke var blevet samlet restbiomasser ind til pyrolyse og biokul. Så det at lave biokul medfører, at der kommer mere biogent kulstof til nytte, end der ellers ville have været. Man kan videreforarbejde pyrolysegassen (og bioolien) til grønne brændstoffer til brug for fly og tung transport via Power-to-X. Det kræver normalt tilførsel af grøn brint og CO₂ (kulstof), der kan komme fra fossile kilder. Med pyrolyse får man altså bæredygtigt kulstof til nye brændsler samtidig med, at man får fjernet og lagret noget CO₂ fra atmosfæren, og får recirkuleret vigtige næringsstoffer fra biomasserne ved brug af biokul på landbrugsjord.

Pyrolysens fordel er, at den både giver mulighed for lagring og for nye kulstofkilder til Power-to-X, som også er bæredygtige på den lange bane.

⁹ IPCC (2022): Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. IPCC Sixth Assessment Cycle (AR6), IPCC Working Group III.

Boks 5.1: Miljømæssige sideeffekter af biokul på landbrugsjord

De væsentligste samfundsgevinster ved biokul kommer fra klimaeffekterne, der kommer fra at lagre kulstof langvarigt i jorden, fra undgåede emissioner som følge af processens håndtering af biomassen, og fra pyrolyseprocessens grønne energi, der kan fortrænge fossile brændsler. Det private marked er med til at betale for CO₂-lagringen i form af klimakreditter, mens det kræver en betalingsvillighed eller "grøn præmie" for grønne brændstoffer at internalisere den effekt. De undgåede emissioner har aktuelt heller ikke nogen markedsmæssig aflønning.

Men biokul har også andre sideeffekter, der knytter sig til brugen af biokullet, fx på landbrugsjord. Effekterne påvirker ikke kun den enkelte bedrift, men har bredere implikationer og karakter af eksternaliteter. Den markedsmæssige betalingsvillighed til at tage højde for disse er derfor heller ikke så klar. Dertil kommer, at litteraturen og forskningsresultaterne ikke altid er entydige i konklusionerne om effekterne og heller ikke om størrelsesordenen. De er derfor ekstraordinært usikre at værdisætte.

Eksempler på positive effekter af biokul på landbrugsjord:

- Middel til jordforbedring og potentiale til at styrke jordens dyrkningsegenskaber
- Middel til geografisk omfordeling af fosfor og kalium fra restbiomasserne
- Pyrolyseprocessen fjerner mikroplast, medicinrester, pesticider og forskellige tungmetaller fra den oprindelige biomasse, der ellers bruges som gødning
- Øger jordens evne til at tilbageholde vand til planterne (større tørkeresistens)
- Reducerer udvaskningen af næringsstoffer (kvælstof) til vådområder
- Skaber bedre porerum i jorden til biodiversitet og øget mikrobiel aktivitet
- Binder problematiske stoffer, der er i jorden, og nedsætter deres biologiske tilgængelighed

Eksempler på negative effekter af biokul på landbrugsjord:

- Kan øge saltindholdet ved påførsel i meget store mængder (ud over det tilladte jf. fosforloftet)
- Risiko for PAH'ere (tjærestoffer) og andre problematiske stoffer i biokullet fra den oprindelige biomasse, hvis der ikke anvendes standardprocesser for pyrolysen og biokullet ikke testes i forhold til grænseværdier for biokullets indhold.

Selv om der i nogle internationale studier er fundet indikation af negative effekter, har danske forsøg med biokul og landbrugsjord indtil videre konkluderet et "fravær af negative effekter". Der er også studier, hvor effekterne ser ud til at kunne gå i begge retninger, og hvor der ikke kan konkluderes om effekten. Eller hvor effekten ikke er undersøgt. Det gælder fx risikoen for udvaskning af selve biokullet til vandmiljøer og den potentielle effekt på de vandlevende organismer. Endelig er der også brug for en bedre forståelse af, hvor meget biokul der skal til for at opnå de forskellige effekter. Der er derfor fortsat brug for forskning og forsøg og for at styrke forståelsen af spillet mellem biokul, og hvor den anvendes.

Kilder: Videnssynthesen om biokul, DCA rapport nr. 208 fra Aarhus Universitet, 2022, og CIP Fondens baggrundsnotat om mulige miljøeffekter af biokul (2024c)

når især våde biomasser viderebehandles i stedet for opbevaring med emissioner til følge.

Der er også en væsentlig klimaeffekt, når den grønne energi fra pyrolyseprocessen fortrænger fossil energi. Disse effekter har også værdi for samfundet og for klimaet.

I takt med, at Danmark bliver elektrificeret og i højere grad også bruger grønne brændstoffer, vil fortrængningseffekten aftage i en national opgørelse af klimaemissioner. Men for det globale klima vil produktionen af grøn energi fra pyrolyseprocessen fortsat bidrage til fortrængning af fossile alternativer.

Ud over klimaeffekter er der også en række øvrige sideeffekter knyttet til biokul, nogle positive, og andre potentielt negative, hvis man ikke tager de rette forholdsregler. Se fx boks 5.1.

5.2. Mulige miljøeffekter af biokul på landbrugsjorden

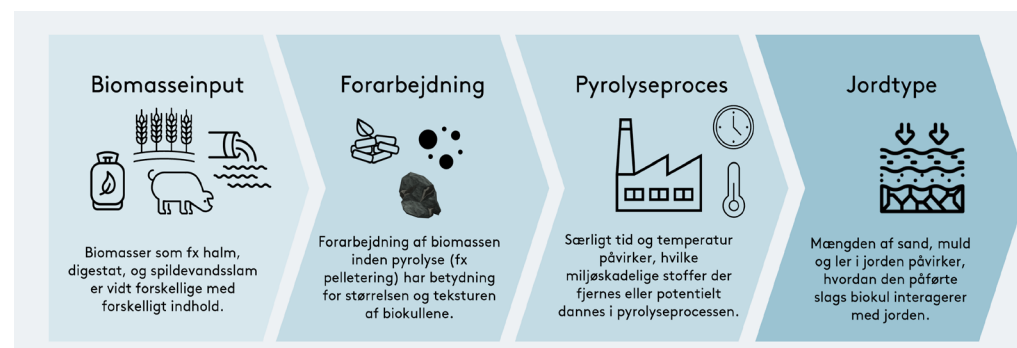
Mange af sideeffekterne handler om konsekvenser ved brug af biokul på landbrugsjorden og er forskellige former for miljøeffekter.

I en række andre lande og især i tropiske klimaer har biokul en veldokumenteret effekt på jordens dyrkningsegenskaber i form af øget høstudbytte. Resultaterne er sværere at genfinde i tempererede zoner og på dansk landbrugsjord, der allerede er relativt frugtbar.

Biokul har jordforandrende egenskaber, fordi det med dets struktur er med til at "lufte" jorden mere, skabe større porerum og bedre plads til at holde på vand. Det kan være en fordel for vækst af rodnettet og for tørre sandjorde og jorde, hvor klimapåvirkningerne fører til længere perioder med tørke.

Der er til samtidig bred dokumentation for, at pyrolyseprocessen "renser" biomassen for en række problematiske stoffer som fx mikropplast, medicinrester, sygdomsfremkaldende organismer (patogener), pesticidrester o.l.

Figur 5.3: Effekterne af biokul på landbrugsjord afhænger af flere faktorer



Kilde: CIP Fondens egen tilvirkning baseret på beskrivelser i bl.a. Videnssynthesen om biokul, Aarhus Universitet, DCA rapport nr. 208, 2022.

Pyrolyse er græsk og betyder opløsning eller spaltning ved ild og er en form for hygiejnisering af biomassen.

Det er dog ikke alle problematiske stoffer, som pyrolyse kan fjerne fra den oprindelige biomasse, så det er nødvendigt at opstille grænseværdier for biokullets indhold af forskellige stoffer før brug, som efterleves via standardiserede test.

HVORFOR ER MILJØEFFEKTERNE SÅ SVÆRE AT OPGØRE?

Selv om forskningslitteraturen om biokul allerede er omfattende og fortsat vokser, er det svært at opnå entydige resultater for effekterne af biokul.

Det skyldes, at biokul ikke bare er biokul. Men snarere er en samlebetegnelse for produkter af forskellige slags biomasser med forskellige typer af forarbejdning og struktur, som har gennemgået processer med forskelle på temperatur og opholdstid i pyrolysen, jf. figur 5.3. Miljøeffekterne afhænger også af, hvilken slags jord biokullene anvendes på. Jord er heller ikke bare jord.

BEHOV FOR SYSTEMATISERING AF FORSKNINGRESULTATER

Der er derfor behov for, at der i forskningslitteraturen sker en kategorisering af effekterne alt efter typen af biomasse, bearbejdning og pyrolyseproces samt anvendelsesområde. Tværgående reviews kan på tværs af analyser bruges til at tage stilling til, hvilke effekter der eksempelvis er god evidens for, middel og svag evidens. Dette vil gøre de forskningsmæssige resultater anvendelsesorienterede og guidende for brugen af biokul. Så man mere målrettet kan gå efter de positive effekter og gardere sig mod potentielt negative konsekvenser alt efter kontekst.

¹⁰ Der er i samfundsøkonomiske beregninger ikke indregnet afkast til de private parter i værdikæden.

5.3. Samfundsøkonomisk godt klimavirkemiddel?

Det at lave biokul er altså et klimavirkemiddel, der både kan foretage CCS, skabe undgåede emissioner og fortrænge fossilbaseret energi. Men er det også et samfundsøkonomisk godt klimavirkemiddel? Eller er der andre måder, som man bedre og billigere kan fortrænge CO₂ på, og som samfundet hellere skulle investere i?

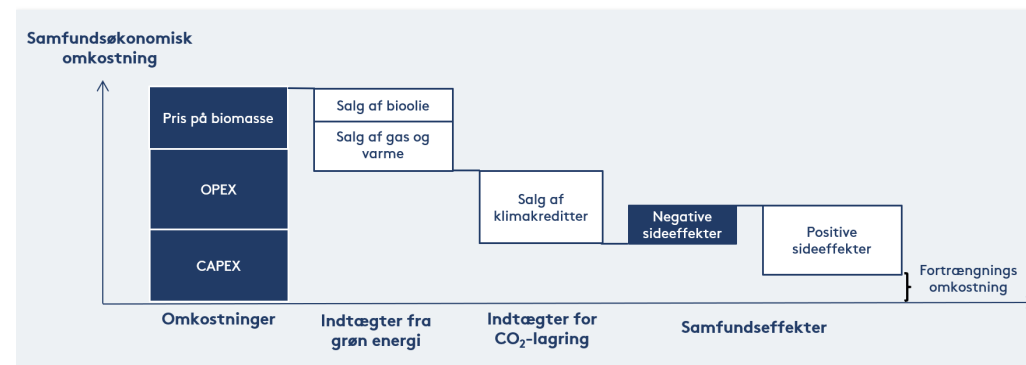
EA Energianalyse (2024) har for CIP Fonden udarbejdet en analyse af den samfundsøkonomiske pris for at fortrænge et ton CO₂ med biokul lavet af hhv. halm og digestat (restfibre fra biogasproduktion). Denne fortrængningsomkostning eller skyggepris er så sammenlignet med alternative metoder til CCS i form af BECCS og DACCS (se tabel 5.2 for en sammenligning af de forskellige CCS-metoder). Beregningerne tager udgangspunkt i en 20-årig teknisk horisont for etablerede anlæg med udgangspunkt i et 20 MW pyrolyseanlæg, et 84 MW anlæg til BECCS (tilføjet til halmfyret kraftvarmeværk).

Samfundets fortrængningsomkostning for et ton CO₂ tager udgangspunkt i værdiansættelse af følgende:

- Omkostninger¹⁰ (værdikædens udgifter til anlægsinvesteringer og reinvesteringer (CAPEX), drift, vedligehold, udgifter til klimacertificering og til lagring og udbringning af biokul (OPEX) samt køb af biomasse, der også er en variabel omk.)
- Indtægter (fra salg af energi i form af bioolie og pyrolysegas/overskudsvarme)
- Salg af klimakreditter (mere usikre private økonomiske indtægter)
- Sideeffekter (positive og negative klima- og miljøeffekter uden typisk markedsafsløning)

¹¹ Nedmuldning af halmrester eller udbringning af restfibre fra biogasproduktion på landbrugsjord.

Figur 5.4: Illustration af samfundsøkonomisk skyggepris for CO₂-lagring med biokul



Kilde: CIP Fondens egen tilvirkning på baggrund af metode hos EA Energianalyse (2024)

Se illustration af metoden i figur 5.4. Beregningerne er i sagens natur behæftet med stor usikkerhed.

Ved at inddrage sideeffekter og mulig betalingsvillighed for CO₂-lagring holdt op mod mere traditionelle omkostninger og indtægter afholdt af private parter fås et indtryk af, hvad den anvendte metode betyder på samfundsplan, og hvad nettoprisen for at fortrænge et ton CO₂ med disse metoder er sammenlignet med andre klimavirkemidler. Og om det af den grund bør anbefales at bruge den konkrete løsning.

Skyggeprisen kan fx også sammenlignes med CO₂-kvoteprisen, der er udtryk for den marginale pris for at udlede et ton CO₂ i kvotesektorerne i EU.

HVILKE KLIMA- OG MILJØMÆSSIGE SIEDEFFEKTER MEDREGNES?

Som tidligere beskrevet er der en række potentielle sideeffekter af at bruge biokul, men ikke alle har entydige resultater, ligesom det også kan være vanskeligt at estimere gennemslaget og de mulige omkostninger eller

gevinster forbundet hermed. EA Energianalyse tager højde for følgende sideeffekter:

- Den mulige udnyttelse af næringsstoffer fra biomassen (kvælstof, fosfor, kalium) ved biokul brugt på landbrugsjord sammenlignet med referencesituationen¹¹
- Mulig kalkningseffekt pga. biokullets pH-værdi, som reducerer behovet for kalktilførsel
- Mulig partikelforurening knyttet til produktionen
- Undgåede emissioner (lattergas, metan og ammoniak) ved at viderebehandle biomassen og pyrolysere den sammenlignet med referencesituationen

Der er i følsomhedsanalyser set på variation i antagelser og effekters størrelse samt den mulige miljøeffekt, der kan være ved, at biokul kan hæmme udvaskning af nitrat til fx vådområder. Denne effekt er potentielt værdifuld, da der ikke er så mange virkemidler i forhold til landbrugets kvælstofpåvirkning af vandmiljøet. Men man ved endnu ikke så meget om effektens størrelse, og hvor meget biokul det fx kræver at opnå effekten.

FORTRÆNGNINGSEFFEKTER ER IKKE INDREGNET

Der er i analysen fra EA Energianalyse ikke indregnet en mulig klimamæssig fortrængningsgevinst ved, at der produceres grøn energi, der kan fortrænge fossile alternativer, uanset om drejer sig om varmeproduktion eller brændstof. På sigt vil fossil energi forsvinde fra det danske system, hvorfor der ikke vil være fortrængning i en dansk kontekst og i forhold til danske målsætninger om fx klimaneutralitet. Ses klimagevinsten i et mere globalt perspektiv og fx med udgangspunkt i de grønne brændstoffer, som noget af energien kan anvendes til, ville det være relevant at indregne.

STOR GEVINST VED UDGÅET METANUDLEDNING FRA BEHANDLING AF DIGESTAT TIL BIOKUL

Analysen viser, at sideeffekterne er positive for samfundet af at bruge biokul baseret på digestat, primært som følge af store undgåede emissioner af metan, der er en meget potent drivhusgas i forhold til atmosfæren. Effekten kommer primært en hurtig behandling af restbiomassen ved at tørre, separere og presse digestaten før pyrolysen, så den deles i en våd og en fast fraktion. Dermed udledes mindre metan, end hvis digestaten var oplagret og efterfølgende bragt ud på markerne. Det er forbundet med omkostninger at forbehandle digestatet til pyrolyse, men omkostningerne kan afholdes af de samlede indtægter fra business casen. Det kan de ikke så tit ud fra biogasproduktionen alene, hvorfor det ikke allerede er udbredt som gængs behandlingsform.

OMTRENT NEUTRALE SIDEEFFEKTER FOR BIOKUL BASERET PÅ HALM

For halmbaseret biokul er de indregnede sideeffekter omtrent neutrale, selv om der også

Tabel 5.1: Samfundsøkonomiske skyggepriser for forskellige metoder til CCS

	Biokul (digestat)	Biokul (halm)	BECCS (halm)	DACCS
Pris pr. ton lagret CO ₂ e (kr.) ved 100-års effekt af kulstoflagringen				
Fortrængningspris/skyggepris ekskl. sideeffekter og klimakreditter	-689	-248	-1.456	-1.500
Fortrængningspris inkl. sideeffekter og ekskl. klimakreditter	-455	-269	-1.531	-
Skyggepris inkl. sideeffekter og klimakreditter	43	229	-887	-

Anm.: Minus angiver omkostning og plus angiver gevinst. Privatøkonomiske data for biokul er baseret på 20 MW anlæg, mens BECCS er baseret på tilbygning på eksisterende 84 MW halmfyret kraftvarmeanlæg. Begge ud fra en 20-årig levetid. DACCS er alene vurderet uden klimakreditter og sideeffekter. Tallene er behæftet med usikkerhed. Kilde: Baseret på EA Energianalyse (2024)

tages højde for næringstab på markerne ved alternativt at have nedmuldet halmresterne.

BECCS HAR NEGATIVE SIDEEFFEKTER

For BECCS (afbrænding af halm i varmeværk med opsamling af CO₂ ved skorstenen) udgør sideeffekterne derimod en samfundsmæssig omkostning, primært som følge af, at biomassens næringsstoffer ikke recirkuleres og udnyttes på markerne som i referencesituationen.

AFSÆTNING AF GRØN ENERGI ER AFGØRENDE

Hovedscenariet i EA Energianalyses opgørelse medtager sideeffekter samt salg af klimakreditter.

For biokul baseret på digestat er det antaget, at den grønne energi (pyrolysegassen) anvendes til tørring af biomassen og drift af

pyrolysen, mens resterende overskudsvarme (procesvarme) afsættes til det nærliggende biogasanlæg til opgradering og evt. til fjernvarmenettet. For biokul baseret på halm er det antaget, at der kan afsættes pyrolysegas til fjernvarme, og at den producerede bioolie kan anvendes som iblanding til skibes brændstoffer, dvs. som et relativt højværdiprodukt. Denne antagelse er afgørende.

For BECCS er det antaget, at der kan afsættes varme til fjernvarmenettet og til produktion af grøn strøm. Uden salg af energiprodukter ville der ikke være en business case knyttet til kulstoflagringen, uanset metode.

HALMPRIS, FREMTIDIG PRIS FOR BIOOLIE OG VÆRDI AF KLIMAKREDITTER HAR STOR BETYDNING

Beregningerne er følsomme over for antagelser om halmprisens udvikling, idet halmen udgør et væsentligt biomasseindkøb i to af

tilfældene, og da EA Energianalyse antager værdien af varmesalg til fjernvarmenettet baseret på en halmkedel som reference.

En anden usikker pris fremadrettet er, hvad bioolie kan afsættes til. Det afhænger også af anvendelsen. I analysen er den antaget som iblanding til brændstoffer, hvor alternativet ville være fx e-methanol. Bliver bioolien i stedet solgt som råolie til forskellige former for videreforarbejdning, ventes prisen lavere.

Endelig er de mulige, fremtidige indtægter fra klimakreditter i sagens natur også ekstraordinært usikre, da det er et marked under opbygning, jf. bl.a. kapitel 3, #5. Det er en markedsaflønning af kulstoflagring som en service, på linje med salg af energiprodukter. Prisen er ikke nul, men dens langsigtede bidrag er usikkert¹². De mulige fortrængningsomkostninger eller skyggepriser for 1 ton CO₂ er derfor vist både med og uden klimakreditter.

SAMFUNDSØKONOMISK CCS PRIS

Tabel 5.1 viser den samfundsøkonomiske pris for at lagre et ton CO₂e med forskellige metoder for CCS. Det er en skyggepris for, hvad det koster at fortrænge et ton CO₂e, hvor man kan sammenligne forskellige klimavirkemidler.

Tabellen viser, at alle de viste klimavirkemidler som udgangspunkt er forbundet med en vis samfundsøkonomisk omkostning, men at de forskellige biokul metoder er de billigste i sammenligningen. Dette gælder også, hvis der var foretaget beregninger for CCS baseret på fossile kilder, jf. EA Energianalyse.

Biokul som metode til kulstoffangst og lagring er dermed en attraktiv metode for samfundet.

⁴ For biokul antages det, at der kan opnås en betalingsvillighed for CO₂-lagring via salg af klimakreditter på 40 pct. af kvoteprisen. For BECCS antages en lidt højere betalingsvillighed pga. sikkerhed for lagring ud over 1.000 år svarende til 50 pct. af kvoteprisen.

Tager man højde for de indregnede sideeffekter, får det især betydning for prisen pr. ton CO₂e tilvejebragt via biokul af digestat, som har relativt høje, positive sideeffekter. For biokul af halm er prisen omtrent uændret under hensyntagen til usikkerhed, mens casen forværres en smule for BECCS.

BIOKUL ER EN GOD SAMFUNDSMÆSSIG INVESTERING

Tager man også højde for mulige indtægter fra klimakreditter, ender biokulløsningerne med at være en lille gevinst, mens CCS med BECCS fortsat er forbundet med en samfundsøkonomisk omkostning. Det betyder, at biokul på sigt har potentiale til at blive et neutralt klimavirkemiddel for samfundsøkonomien. Det sker sjældent. Det er samtidig et af de få klimavirkemidler i den størrelsesorden for landbrugssektoren.

BECCS (baseret på halmaffbrænding) indebærer derimod en højere samfundsøkonomisk omkostning pr. ton CO₂, primært som følge af de relativt høje privatøkonomiske omkostninger.

Det er som udgangspunkt forbundet med en vis samfundsøkonomisk omkostning på knap 700 kr. at lagre et ton CO₂ baseret på biokul fra restfibre fra biogas. Tager man højde for sideeffekter, falder prisen til omkring 450 kr. pr. ton. Og indregnes også mulig aflønning via klimakreditter, er der ikke længere omkostninger for statskassen forbundet med dette klimavirkemiddel. Det er omtrent neutralt med en lille gevinst omkring 40 kr. pr. ton CO₂, der lagres.

CCS via halmbaseret biokul er som udgangspunkt forbundet med en relativ lav omkost-

ning for samfundet på omkring 250 kr. pr. ton lagret CO₂. Tager man højde for de potentielle sideeffekter, flytter det sig ikke væsentligt. Tager man samtidig højde for mulig aflønning af CO₂-lagringen via klimakreditter, ændrer billedet sig til en lille gevinst for samfundet på omkring 230 kr. pr. ton, der lagres.

Og endelig er skyggeprisen for CCS med BECCS som udgangspunkt en omkostning på ca. 1.450 kr. pr. ton CO₂. Inddrages mulige sideeffekter, stiger prisen for BECCS lidt. Indregner man også mulige indtægter fra klimakreditter, ender prisen for CCS med BECCS for statskassen med en omkostning på knap 900 kr. pr. ton lagret CO₂.

HVAD SIGER ANDRE SKØN FOR CCS?

Internationale studier af fortrængningsomkostninger (typisk uden sideeffekter og klima-

kreditter) peger også på, at biokul er konkurrencedygtig med CCS-teknologi som BECCS og DACCS, jf. tabel 5.2.

Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet (2022) har tidligere opgjort en skyggepris for biokul ud fra teknologistøtten via Pyrolysepuljen til omkring 1-000-2.000 kr. pr. ton CO₂ ekskl. sideeffekter mv.

Klimarådet (2022) skønner, at omkostningerne forbundet med biokul på længere sigt vil falde til omkring 280-780 kr. pr. ton reduceret CO₂.

Skønnene fra EA Energianalyse er væsentligt lavere, når der tages højde for klimaeffekter og mulige sideeffekter. Uden dem er fortrængningsomkostningerne sammenlignelige med fx Klimarådets skøn.

Tabel 5.2: Forskellige metoder til at lagre CO₂ langvarigt – hvad er fordele og ulemper?

Hvad?	Hvordan?	Lagringsmetode	CO ₂ kilde	Fordele	Ulemper	Særlig sektorrelevans	Samfundsøkonomisk skyggepris pr. ton CO ₂
Biokul	Pyrolyse af biomasse, der bliver til hhv. biokul og grøn energi med nogenlunde ligelig fordeling af kulstoffet	Biokul anvendt fx som gødning på jord, i materialer mv., hvoraf hovedparten af kulstoffet lagres stabilt i flere århundreder	Biogen	• Producerer grøn energi (pyrolysegas, bioolie og overskudsvarme) • Kan håndtere meget forskelligartede biomasserester (fleksibelt input) • Mulighed for samlokalisering og synergi med andre enheder • Kan relativt let transporteres	• Logistik omkring biomasse og biokul (kan kræve indsamling og udbringning via forskellige lokationer) • Kapacitetsgrænse afhænger af biomassens tilgængelighed og mulighederne for at komme af med energiprodukterne	Landbruget samt energiparker og andre steder med mulighed for samplacering	Lav-mellem IPCC (2022): 10-345 USD pr. ton (TRL 6-7) EA Energianalyse: 20-100 USD pr. ton (2040 pris)
BECCS	Affbrænding af biomasse på kraftværk eller stor virksomhed, hvor CO ₂ indfanges ved punktkilden	Indfanget CO ₂ tryksættes og lagres permanent i undergrunden (geologisk lagring)	Biogen	• Producerer grøn energi (varme, der omdannes til strøm) • Storskala CCS ved store punktkildeudledere • Kan indfange hovedparten af CO₂ en fra biomassen ved punktkildeudledninger	• Logistik omkring biomasse • Behov for infrastruktur for flydende CO₂ til undergrundslagring • Behov for infrastruktur for flydende CO₂ til undergrundslagring	Energisektor samt ved større industrianlæg	Lav-Mellem IPCC (2022): 15-400 USD pr. ton (TRL 5-6) EA Energianalyse: 100-200 USD pr. ton (2040 pris)
DACCS	Luftfiltrering vha. kemikalier, der binder sig til luften for at fjerne CO ₂ . (CO ₂ udgør 0,04 pct. af atmosfæren)	Indfanget CO ₂ tryksættes og lagres permanent i undergrunden (geologisk lagring)	Fossil/ biogen	• Ikke arealkrævende (til dyrkning af biomasse) • Fleksibel placering og størrelse	• Teknologi ikke så udviklet endnu • Relativ dyr • Energikrævende (skal filtrere meget luft for at fange relativt få CO₂ molekyler) • Behov for infrastruktur for flydende CO₂ til undergrundslagring	Uafhængig placering	Mellem IPCC: 100-300 USD pr. ton (TRL 6) EA Energianalyse: 200-400 USD pr. ton (2040 pris)

Kilde: : IEA (<https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture>), IEA (<https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/bioenergy-with-carbon-capture-and-storage>) , IPCC (2022b), EA Energianalyse (2024)

CCS ER RELEVANT IFT. ANDRE KLIMAVIRKEMIDLER

På tværs af teknologier synes der at være konsensus om, at det generelt koster samfundet omkring 1.500 kr. for fortrænge et ton CO₂ (fx Klimarådet 2023, IEA 2022, IPCC 2022 samt EEA 2021).

Til sammenligning koster det i dag knap 700 kr. at udlede et ton CO₂ inden for EU's kvotesystem, og fremadrettet ventes kvoteprisen at stige til 1.100 kr. pr. ton frem mod 2035 (Energistyrelsen, 2023). Afledt heraf regner Energistyrelsen med marginale reduktionsomkostninger for klimatilpasning omkring 738 kr. pr. ton CO₂ i 2030, jf. Samfundsøkonomiske Beregningsforudsætninger (2022).

Analysen fra EA Energianalyse sammenholdt med øvrige skøn understøtter altså, at prisen for at bruge biokul til at lagre kulstof er konkurrencedygtig som et samfundsmæssigt klimavirkemiddel.

BIOKUL ER SAMFUNDØKONOMISK FORNUFTIGT

Der er mange priser i spil som signal for, hvad det kan og bør koste at lave klimaindsatser. De kan bruges til at informere valget, og her er CO₂-fangst og -lagring med biokul et godt og samfundsøkonomisk fornuftigt valg.

Teknologiens strukturelle gevinster er den effektive udnyttelse af restbiomasser, som processen indebærer, hvor der både kan opnås klimateffekter, grøn energi og potentielle miljøgevinster.

Risici ved brug af biokul knytter sig især til, om der skulle være nogle i dag ukendte effekter ved den langsigtede brug. Der bør en markedsudrulning suppleres af et forsknings- og praksisviden program, der følger brugen og gennem langvarige forsøg løbende

kan supplere den viden, der er udgangspunkt for dagens brug af fx tolerancetærskler over for indhold af gødningsprodukter, og guide anvendelsen.

5.4. Andre samfundseffekter af biokul

Produktionen af biokul baseret på restbiomasser finder typisk sted i områder uden for de største byer relativt tæt på biomasserne. Det er med andre ord en ny energi- og industriproduktion med tilhørende afledt aktivitet hos leverandører og aftagere. Den nye og afledte aktivitet og tilhørende beskæftigelse kan ofte forventes placeret i landområder.

Se figur 5.5 for en geografisk fordeling af nogle af de største restbiomasser i Danmark efter deres kulstofindhold. De er typisk koncentreret i områder med relativ lav økonomisk aktivitet, hvorfor en ny industri baseret herpå vil påvirke de lokale vækst- og beskæftigelsesmuligheder.

LOKALE BESKÆFTIGELSESEFFEKTER

Beskæftigelsesmæssigt vil etablering af en pyrolyseindustri i Danmark med en produktion og lagring svarende til den politiske målsætning på 2 mio. ton CO₂e medføre lokale arbejdspladser i etableringsfasen til opbygning af 70-90 stk. 20 MW anlæg, hvoraf nogle vil samles på samme lokation.

Der vil også være lokal beskæftigelse knyttet til drift og vedligehold, samt i følgeindustrien af biomasseleverancer og biokulaftag.

Ud over beskæftigelse og afledt aktivitet indebærer biokulproduktionen også nye indtægter fra sidestrømme, som bl.a. tilfalder de områder, der hhv. leverer biomassen og lagrer biokullene.

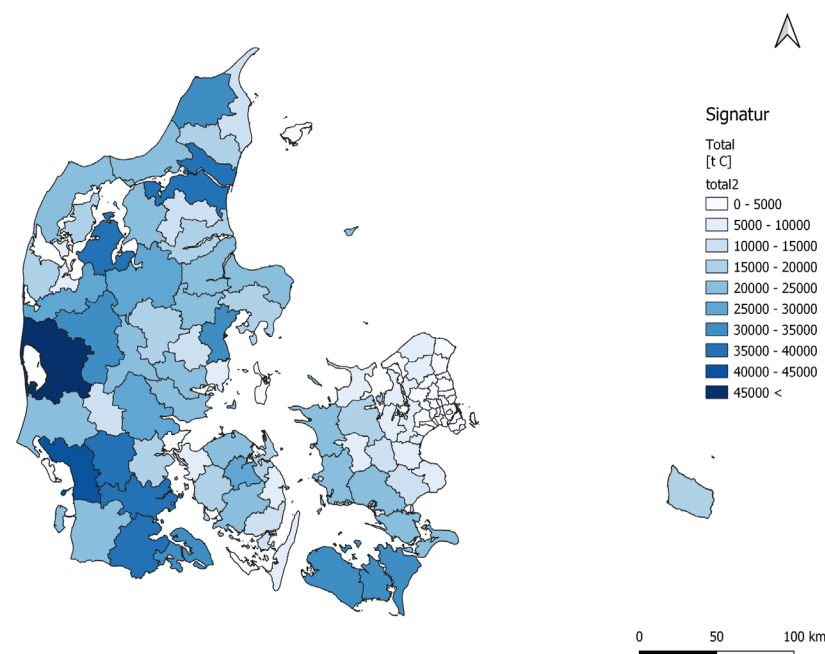
SYNERGI I ERHVERVSSTRUKTUR

Skaleringen af dansk pyrolysekapacitet kan ventes at ske spredt ud over landet med en vis tilknytning til biomassens placering og med forskellige størrelser af anlæggene, også jf. kapitel 7.

En ny pyrolyseindustri vil, ligesom eksempelvis opbygningen af biogasbranchen, påvirke den lokale erhvervsstruktur. Placeringen af nye anlæg kan med fordel ske i forhold til, hvor der allerede er etableret biomasselogistik, fx via spildevandsanlæg, biogasanlæg og øvrige virksomheder med relevante rester, og hvor der er energiaftag, jf. kapitel 7. Altså placering efter mulige synergieffekter ved samlokalisering.

En ny industri af pyrolyseanlæg kan derfor også ventes at skubbe på en erhvervsudvikling med etablering af lokale energiparker og virksomhedsklynger, der mere cirkulært benytter hinandens restprodukter og energioverskud, og hvor pyrolyseanlæggene er sidste led i værdikæden.

Figur 5.5: Placering af restbiomasser i Danmark efter kulstofindhold i halmrester, digestat og spildevandsslam



Kilde: NIRAS (2023)

Hvad siger reguleringen om biokul?

Kapitel 6

Udrulning af markedet og brug af biokul på landbrugsjord besværliggøres i Danmark af inkonsistent regulering og af manglende stillingtagen til, hvad biokul og pyrolyse er. Flere processer kan forenkles baseret på lignende erfaringer, men der bør være et forsigtighedsprincip i forhold til biokullets indhold.

6.1. International tilgang til biokul

Fremstilling af biokul via pyrolyse er ikke noget nyt. Men biokul er et relativt nyt fænomen i regulerings-mæssig sammenhæng. Også i Danmark. Signalerne fra international side er dog klare.

FN SER BOKUL SOM "REMOVAL" TEKNOLOGI
FNs klimaorgan IPCC har siden 2018 anerkendt biokul som en Negative Emission Technology (NET) og som en af de teknologier, der skal i brug, hvis man skal overholde Parismålsætningen for maksimal temperaturstigning. Potentialet er skønnet til 2½ mia. ton CO₂-lagring globalt (IPCC 2022).

EU ANERKENDER BOKUL SOM GØDNING
Også i EU har man forholdt sig til biokul. I sommeren 2022 kom en revideret Gødningsforordning, hvor biokul for første gang indgår som et anerkendt gødnings-produkt for landbruget, når det er baseret på landbrugets sidestrømme i form af planterester og husdyrgødning. EU fremlagde samtidig regler for at

opnå en CE-mærkning af biokul, så det kan markedsføres og sælges på tværs af landegrænser inden for EU.



En **forordning** fra EU er umiddelbart gældende i medlemslandene, hvilket betyder, at forordningen uden forudgående national indarbejdelse bliver en del af medlemsstaternes retsorden. Forordninger er bindende og indfører dermed rettigheder og pligter på lige fod med national lovgivning.

Kilde: Folketingets EU-oplysning

CE-mærkning af biokul som gødningsprodukt kræver en godkendelse fra et "overensstemmelsesvurderings-organ", som der pt. ikke findes noget af i Danmark¹³. CE-mærkningen indebærer, at biokul skal leve op til en række krav i forhold til dets indhold. En CE-mærkning af biokul er dog ikke det samme som en hjemmel til at bruge biokul på landbrugsjord i de enkelte lande, hvor national lovgivning kan spille ind med særlige miljøregler.

OGSÅ TILLADT FOR ØKOLOGISKE BRUG HVIS PLANTEBASERET

Med en revision i 2021 af Økologiforordningens positivliste over tilladte gødningsstoffer mv. i økologiske brug blev naturligt forekomne produkter som biokul, muslingeaffald, æggeskaller mv. optaget på listen. Dog kun biokul baseret på vegetabiliske biomasser og under bestemte forhold. Se CIP Fondens bag-

grundsnotat om regulering (2024) for nærmere beskrivelse.

EU STANDARDDRAMME FOR CARBON REMOVALS

EU har samtidig påbegyndt udvikling af en standardramme (MRV, monitoring, reporting and verification)¹⁴ for klimacertifikater for CO₂-lagring for at fremme transparens og mere ensartede markedsmuligheder for aflønning af kulstoflagring på tværs af en række CCS-teknologier, herunder biokul. Arbejdet forventes færdigt i 2028.

Som led i arbejdet med en standard for opgørelse af klimacertifikater skal der i EU-regi også tages stilling til varigheden af kulstoflagringen med forskellige metoder lige fra forskellige dyrkningsmetoder med regenerativt landbrug til skovrejsning og over mod mere tekniske kulstoflagringer via fx biokul og BECCS og DACCS.

Der pågår i øjeblikket trilog-forhandlinger mellem EU-Kommissionen, Parlamentet og Ministerrådet, som forventes afsluttet i starten af 2024. Der kommer ikke nødvendigvis en endelig afklaring her omkring biokuls status. Det kan potentielt blive kategoriseret med "mellemlang" lagringshorisont sammenlignet med fx CO₂-fangst til geologisk lagring i undergrunden, hvor horisonten snarere er permanent. Arbejdet vil herefter fortsætte i ekspertudvalg. Kategoriseringen kan sende et signal til markedet for klimakreditter i forhold til værdisætningen af klimacertifikaterne.

Jo længere lagring, jo højere pris. Men prisen afhænger også af de konkrete projekter, dokumentationen og troværdighed.

Se fx kapitel 3, #4 for fakta om varigheden af biokuls CO₂-lagring og #5 for fakta om klimacertifikater.

6.2. Biokul i dansk regulering

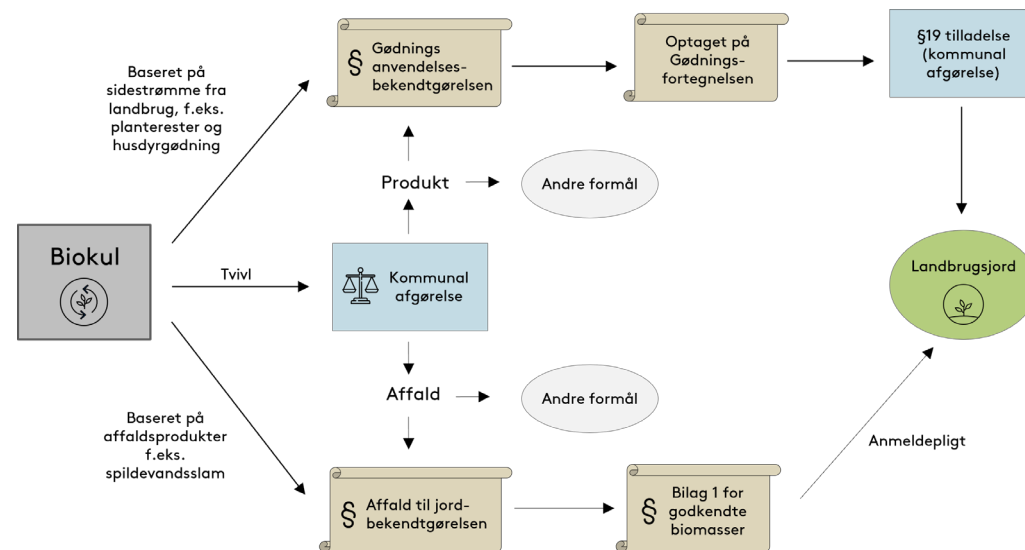
Biokul har hidtil været reguleret indirekte i dansk lovgivning, typisk gennem regler for anvendelse af den bagvedliggende biomasse. I sommeren 2023 optræder biokul for første gang i dansk regulering i hhv. den nye Gødningsanvendelsesbekendtgørelse og Gødningsbekendtgørelse fra Landbrugsstyrelsen.

De indeholder regler for, hvordan man skal bruge biokul i landbruget, altså hvilke metoder man kan bruge til udbringning af biokul, hvornår man må udbringe biokul mv. og hvordan man skal dokumentere brugen af biokul i sit gødningsregnskab.

GENERELT IKKE TILLADT AT BRUGE BOKUL I LANDBRUGET I DANMARK

De nye bekendtgørelser er ikke en hjemmel til at bruge biokul, der som udgangspunkt ikke er tilladt for biokul lavet af landbrugets sidestrømme som planterester og husdyrgødning. Heller ikke selv om biokul er godkendt til salg som gødningsprodukt og fx er optaget på Gødningsfortegnelsen.

¹³ Et overensstemmelsesvurderingsorgan er jf. Landbrugsstyrelsen en uafhængig tredjepart (fx en virksomhed), der mod betaling kan vurdere og bedømme, at gødningsprodukter opfylder de gældende krav i EU's gødningsforordning. Overensstemmelsesvurderingsorganer skal kunne tilbyde laboratorieanalyser af gødningsprodukter eller certificering af gødningsprodukter m.v. Der er omkring 14 godkendte overensstemmelsesvurderingsorganer i EU, herunder 3 i Holland, jf. Update on Fertilising Product Regulation (EU) no. 2019/1009 (FPR) (staphyt.com). Man kan søge CE-godkendelsen i andre lande. ¹⁴ U Horizon project C-Sink

Figur 6.1: Forskellige krav til biokul på landbrugsjord – lettest hvis baseret på slam


Kilde: CIP Fondens egen tilvirkning

Udbringning af biokul på landbrugsjorde kræver en særskilt tilladelse, en §19 godkendelse, fra kommunen.

Tilladelsen er en mulighed i Miljøbeskyttelsesloven for at bringe noget ud på jorden, hvor der er risiko for forurening, og har et bredt anvendelsesområde. For biokul baseret på landbrugets sidestrømme er opsamlingsmuligheden i fravær af anden regulering.

Figur 6.1. viser den juridiske vej for biokul og frem til brug på dansk landbrugsjord alt efter biomassen. For biokul baseret på landbrugets sidestrømme som planterester og husdyrgødning vil brug på andbrugsjord kræve en særlig §19 godkendelse – en midlertidig godkendelse udstedt af kommunen til at anvende en specifik mængde biokul af en specifik biomasse på konkrete jorde, som godkendelsen er knyttet til.

§19 godkendelser anvendes, når der ønskes

udbringning af stoffer eller produkter med "risiko for at forurene jorden", som der ikke er taget stilling til i anden regulering. Se faktaboks for en nærmere beskrivelse af §19 godkendelsen og dens betydning for udrulning af biokul i større skala som et klimavirkemiddel.

TILLADT AT BRUGE BIOKUL AF SPILDEVANDSSLAM

Er biokullet derimod lavet af affaldsprodukter som fx spildevandsslam, er der med hjemmel i Affald-til-jord-bekendtgørelsen og de biomasser, der er opført på bilag 1, mulighed for biokul på landbrugsjorden. Det skyldes, at biokul og pyrolyseprocessen opfattes som en forarbejdning af biomassen.

Det kan synes paradoksalt, at dansk regulering tillader brug af biokul på landbrugsjord, når det er baseret på affaldsprodukter, som er i risiko for at indeholde en lang række problematiske stoffer, mens biokul baseret på renere biomasser som fx halm eller græsrester

Boks 6.1: §19 tilladelse ("Risiko for forurennet jord")

Når et anlæg eller virksomhed benytter produkter, der kommer i kontakt med jord og grundvand, og som ikke er hjemlet andetsteds, eller når ren eller forurennet jord genanvendes, skal der søges om en §19-tilladelse efter miljøbeskyttelsesloven.

Miljøbeskyttelsesloven §19 angiver, at forurennet jord eller andre produkter, der kan påvirke grundvand, jord og undergrund negativt, ikke må benyttes uden tilladelse.

Tilladelsen gives af kommunalbestyrelsen. Det kan forventes, at det tager 8-12 uger at opnå tilladelsen. Processen indebærer dertil en høringsperiode på op til fire uger, hvor bl.a. Styrelsen for Patientsikkerhed skal høres.

Tilladelser meddelt efter §19 kan til enhver tid og uden erstatning ændres eller tilbagekaldes af hensyn til fare for forurening af vandforsyning, gennemførelse af spildevandsafledning eller miljøbeskyttelsen i øvrigt. Tilladelsen er tidsbegrænset. Tidsperioden bestemmes som udgangspunkt af den kommunale myndighed og kan variere.

§19 godkendelsen er udfordrende for etablering af et egentligt marked for biokul, fordi den er:

- Midlertidig
- Afgrænset til bestemte jordlodder
- Kan trækkes tilbage
- Forudsætter administration hos såvel kommune som ansøger og er tidskrævende
- Indebærer risiko for lokal variation i sagsbehandlingen
- Signalerer, at man har med risiko for forurening af jord at gøre, hvilket uden nærmere viden kan opfattes negativt af samarbejdspartnere for den enkelte bedrift, fx banker, realkreditinstitutioner samt fødevarer- og grovvarereproducenter.

Kilder: Miljøbeskyttelsesloven §19 ([danskelove.dk](https://loven.danskelove.dk))

kun kan bruges med en særlig miljøgodkendelse.

Er man i tvivl om, hvorvidt den anvendte biomasse til biokullet skal karakteriseres som affald eller ej, og dermed hvilken regulering man skal følge, er det op til en kommunal vurdering. Den aktuelle regulering, inkl. §19 godkendelserne, stiller altså store krav til viden og kompetencer i de enkelte kommuner om, hvad biokul er, og hvad forskellige biomasser evt. kan indebære.

INKONSEKVENT REGULERING

Når mulighederne for at bruge biokul i land-

bruget er så forskellige alt efter den anvendte biomasse, og i så høj grad er op til lokal stillingtagen, er det sandsynligvis et resultat af historikken indtil videre. Man har i Danmark haft et ønske om at recirkulere næringsstoffer på markerne og derfor tilladt fx spildevandsslam som gødningsprodukt med hjemmel i Affald-til-jord bekendtgørelsen ("slambekendtgørelsen"). Andre sidestrømme er imidlertid også relevante at recirkulere.

HJEMMEL BØR SUPPLERES AF GRÆNSEVÆRDIER

Nu mangler man så blot at tage konsekvensen heraf og tage stilling til det nye gødnings-

produkt, som biokul udgør, og dets muligheder for at recirkulere fx fosfor, der er et vigtigt næringsstof for landbrugsjorden. Dvs. tage stilling til en hjemmel for at bruge biokul på landbrugsjord. Da biokul kan produceres af en række forskellige restbiomasser, bør hjemlen som udgangspunkt være uafhængig heraf – ellers vil der fortsat være en række forskellige reguleringer, der også kan være relevante. Ikke alle restbiomasser, og slet ikke blandede, har specifik regulering i dag.

Der bør i samme omgang tages stilling til grænseværdier for biokullets indhold, som kan indbygges i de test af producerede batches af biokul, som producenterne allerede udfører. Her bør et forsigtighedsprincip spille ind, så man – uanset den anvendte biomasse – starter med de mest restriktive, eksisterende grænseværdier for gødningsprodukter. Indtil videre er der ”fravær af negative effekter” ved brug af biokul på dansk landbrugsjord, men der er fortsat behov for forsøg og videnopbygning om eksempelvis langvarige effekter. I takt med, at der opnås ny viden, kan reguleringen så strammes eller lempes. Den form for rammeregulering, som tilpasses over tid, kendes også fra andre nye markeder, hvor der ikke er så stor eller langvarig erfaring med brug af nye produkter. Det er også EU’s tilgang til reguleringen af de nye Power-to-X markeder.

INSPIRATION FRA EKSISTERENDE GRÆNSEVÆRDIER

Der findes allerede en række grænseværdier, som kan være relevante for biokul. Fx fra affald-til-jord bekendtgørelsen, fra EU’s CE-mærkning af biokul, fra andre gødningsprodukter og fra udstedelsen af klimacertifikater for biokul, som også stiller krav til biokullets indhold for at forebygge potentielt negative miljø- og bæredygtighedseffekter.



Fosforloftet tillader maksimalt 30 kg. fosfor pr. hektar som gns. for bedriftens jorde. Biokuls indhold af fosfor varierer som tidligere beskrevet med den anvendte biomasse.

Fosforrige biomasser, som fx stammer fra husdyrgødning eller slam, indeholder mere fosfor end planterester som fx halm og græs, som samtidig opkoncentreres ved tørring og pyrolysning.

Gødningsanvendelsesbekendtgørelsen opfatter fosforfrigivelsen fra biokul som umiddelbar, dvs. med effekt det første år fra udbringning, men hvis den plantetilgængelige frigivelse sker lidt langsommere og over flere år, kan det overvejes at revidere reglerne for at undgå undergødning med fosfor det første år og potentiel ophobning ved flere års tilførsel.

Kilder: Vidensyntesen om biokul (DCA rapport nr. 208 fra Aarhus Universitet, 2022), Landbrugsstyrelsen samt CIP Fondens baggrundsnotat om regulering (2024a).

I lande som fx Finland og Tyskland tager man udgangspunkt i EU-reguleringen med Gødningsforordningen som pejlemærke for biokul som gødningsprodukt på landbrugsjord. Den finske lovgivning suppleres med, at spildevandsslam og industriaffald tillades i biokul på bestemte betingelser med krav til pyrolyseprocessen og biokullets indhold¹⁵.

HVOR MEGET BIOKUL MÅ MAN BRUGE PÅ MARKER?

Har man fået en §19-godkendelse eller har hjemmel til anvendelse via Affald-til-jord-bekendtgørelsen, udestår stadig direkte regulering af, hvor meget biokul man må bruge på landbrugsjorden. Det er i stedet indirekte reguleret via fosforloftet for de enkelte landbrugsbedrifters gødning af jorden. Dvs. af

¹⁵ Jf. Vidensyntese om fosfor, Poulsen et al (2019), Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø & Energi.



EKSEMPEL: Biokul i byggematerialer

Biokul kan bruges i byggematerialer, da det har egenskaber, der gør det velegnet til at forbedre andre materialer, og samtidigt skabe et kulstoflager, der gør nytte i det byggede miljø.

Biokul kan erstatte knappe og virgine ressourcer, såsom sand, grus og fossilt aktivt kul, og fx indgå i beton, asfalt, regnvandshåndtering og byggeblokke.

Biokul har også en varme- og fugtkontrollerende effekt, hvorfor det hos fx Saint-Gobain Danmark er under udvikling som en patenteret komponent i isolering af etageadskillelser og især terrændæk, hvor jordkontakten stiller særlige krav, som det stabile biokul kan efterkomme.

I de seneste år er der årligt færdiggjort omkring 6 mio. etage-m² beboelses- og erhvervsbygninger i Danmark, udover øvrige bygninger, jf. Danmarks Statistik.

Regneeksempel: Hvis der fx indgår 10 cm biokul i 75% af etagearealet, vil dette kræve omkring 180.000 ton biokul årligt, hvilket svarer til en lagring af knap ½ mio. ton CO₂. Det svarer til den årlige produktion fra omkring 18 pyrolyseanlæg i 20MW-klassen, som samtidigt kan producere varme, gas og olie til andre industrier udenfor byggesektoren.

Kilder: Saint Gobain Denmark, Stiesdal SkyClean og CIP Fonden

hvor meget fosfor biokullet indeholder.

GEOGRAFISK OMFORDDELING AF FOSFOR

Da visse typer af biokul indeholder relativt meget fosfor, og da biokul samtidig er forholdsvis lette at transportere, giver det mulighed for en geografisk omfordeling af

¹⁷ Nielsen, O.K. (2022).

fosforreserven i Danmark fra øst til vest. Fosfor er en knap ressource globalt, men samtidig også meget afgørende i landbruget og et nødvendigt næringsstof for alle levende organismer¹⁶. Det samme gælder for kalium, der også overgår fra restbiomassen til biokulene. Fosfor kan tilføres via importeret kunstgødning, og der er ønske om så vidt muligt at recirkulere ressourcen.

BRUG AF BIOKUL I BYGGERIET?

Hvis man ikke ønsker at bruge biokul på landbrugsjord for at drage nytte af de positive sideeffekter, har biokul også andre anvendelsesområder. Se fx kapitel 3, #1.

En oplagt sektor er byggeriet, hvor biokul i byggematerialer kan være med til at sænke klimaafttrykket og gøre materialerne mere bæredygtige.

Alt efter hvilket byggemateriale biokul anvendes til, kan Bygningsreglementet komme i spil. Her fastsættes lovpligtige krav til dansk byggeri for fx udvendige materialer, tagbelægning, facader og i bærende konstruktioner, etageadskillelser mv. Her forholder man sig til krav til materialernes styrke, brandsikkerhed og påvirkning af sundheden, jf. Videnscentret Bolius, og byggematerialer omfattet af Bygningsreglementet skal godkendes af Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen.

Materialekravene understøttes af Dansk Standard (DS), der udgiver standarder og normer for byggematerialer, der lægger sig tæt op ad reglerne i Bygningsreglementet, og fungerer som en konkretisering af reglerne på bestemte områder, fx konstruktioner og installationer, jf. Videnscentret Bolius.

Bruges biokul i brancher uden for landbruget, kan det aktuelt ikke tælle med i de nationale emissionsopgørelser, da der ikke findes

¹⁵ European Sustainable Phosphorus Platform – ESPP eNews no. 81 – December 2023

andre kategorier¹⁷ at placere biokullet i (andet end LULUCF) i IPCCs regler for nationale emissionsopgørelser. En øget brug af biokul kan øge de nationale eksperters opmærksomhed på disse klassifikationsregler.

6.3. Hvor må man bygge pyrolyseanlæg?

Et pyrolyseanlæg er som udgangspunkt at betragte som et industrianlæg, hvor der også produceres grøn energi. I planlovmæssig forstand skal industrianlæg placeres i erhvervsområder (byzoner udlagt til erhverv), som typisk befinder sig i udkanten af byområder og ikke i landzonen.

Pyrolyseanlæg til biokul baseret på landbrugets sidestrømme vil dog i en række tilfælde

være oplagte at placere nær biomasserne, dvs. i landzonen. Det er muligt, men kræver tilladelse via en tilpasning i områdets lokalplan med begrundelse i behovet for placering i det åbne land. Den tilpassede lokalplan må ikke være i modstrid med kommuneplanen, og ændringerne indebærer en høringspligt.

Det er i den forbindelse oplagt at trække på erfaringerne fra etablering af biogasanlæg. De var i sin tid i samme situation, men er siden blevet optaget på en liste over mulige undtagelser for placering i erhvervsområder. Det samme bør overvejes for pyrolyseanlæg. Især fordi de oplagt placeres sammen med biogasanlæg, hvis biokullene laves af restfibre fra biogasproduktionen. Se også figur 6.2 for en nærmere illustration af godkendelsesprocesser for etablering af et pyrolyseværk.

Boks 6.2: Godkendelsesprocesser for etablering af pyrolyseanlæg

Ligesom når der skal etableres andre industri- og energianlæg, er der en række godkendelser knyttet til at etablere et pyrolyseværk. Placeringsmulighederne i forhold til Planloven er beskrevet i afsnit 6.3. Og mulighederne for at anvende outputtet, altså biokullet, er beskrevet i afsnit 6.2, herunder i forhold til de særlige §19 godkendelser, som vil skulle søges løbende.

Under projektplanlægningen er der også andre godkendelser, som kræver specifik stillingtagen til pyrolyseværker som tekniske anlæg. Fx skal pyrolyseværket wmiljøklassificeres, og alt efter vurderingen er der forskellige krav til forudgående miljøvurdering (VVM-undersøgelse). Her tager man udgangspunkt i, om den konkrete installation skal fortolkes som tilhørende bilag 1 eller bilag 2 i Miljøministeriets Godkendelsesbekendtgørelse, hvor virksomheder på bilag 2 skal gennem et forenklet godkendelsessystem med reducerede oplysningskrav, jf. Miljøstyrelsen.

Der er aktuelt ikke taget stilling til, hvordan man kan opfatte pyrolyseværker som tekniske anlæg i vejledninger mv. Det er op til den enkelte kommune at afgøre, bl.a. med udgangspunkt i pyrolyseværkernes størrelse, den anvendte biomasse, og hvad "hovedproduktet" fra værket er (pyrolysegas, bioolie eller biokul). Det vil kunne afkorte den tid, der skal bruges på at planlægning og etablering, hvis der fra centralt hold blev taget stilling til standardeksempler for, hvordan man miljømæssigt skal opfatte pyrolyseanlæg. Dernæst bør der arbejdes for, at det sker ensartet på tværs af EU gennem IE-direktivet.

Godkendelsesprocesserne påvirker, hvor lang tid det samlet set tager at etablere produktion af biokul, og dermed hvornår klimaeffekterne kan indfinde sig.

Kilde: Se bl.a. CIP Fonden baggrundsnotat om regulering (2024a).



NECCS-pulje til støtte af CO₂-lagring

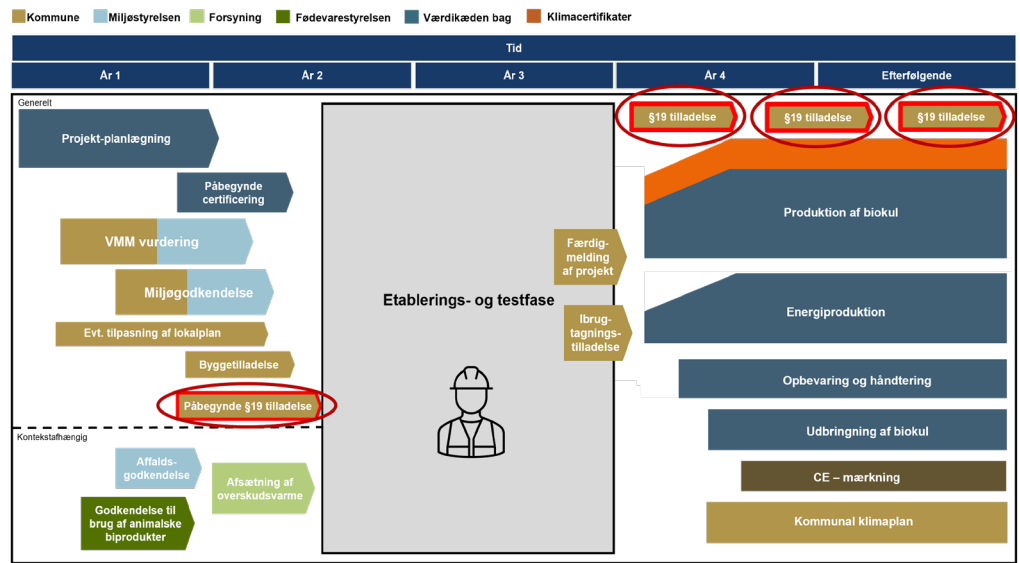
Som del af finansloven for 2022 blev der afsat 2½ mia. kr. til NECCS-puljen (negative emissioner med CCS). Puljen er målrettet støtte til etablering af en værdikæde for negative emissioner, hvor formålet er at sikre fangst og lagring, der realiserer en reduktion på 0,5 mio. tons CO₂ om året fra og med 2025. Puljen opererer med en støtteperiode på op til 8 år. Støtten udbetales som et fast subsidium pr. ton geologisk lagret CO₂.

Støtten skal dække omkostninger til opsamling, transport og permanent geologisk lagring af biogent eller atmosfærisk CO₂. Med biogen CO₂ refereres der til CO₂ dannet gennem forbrænding, fermentering, nedbrydning eller forarbejdning af ikke-fossile brændstoffer eller biomasser. Ved atmosfærisk CO₂ refereres der til CO₂ fra den omgivende luft, ikke CO₂ fra energi- og industrianlæg. Energistyrelsen offentliggjorde udbudsmaterialet d. 10. november 2023, og budsfristen er d. 15. januar 2024.

NECCS-puljen vil ikke give tilskud til fangst og permanent lagring af CO₂ fra forbrænding eller forarbejdning af fossilt baseret brændsel eller biomasse (som har sin egen CCS-pulje). Negative emissioner baseret på ikke-geologisk CO₂-lagring, såsom biokul skabt gennem pyrolyse af biomasse, såvel som ikke-teknologiske midler såsom skovrejsning, vil heller ikke kunne opnå økonomisk støtte gennem NECCS-puljen.

Kilder: Energistyrelsen 2023.

Figur 6.2: Etablering af biokulproduktion og eksempler på processer



Kilde: CIP Fondens egen tilvirkning



Muligheder for at fremme udbygning af biokulkapaciteten

Fremme investeringsbeslutning gennem større sikkerhed for indtægter og udgifter

- Etabler hjemmel til brug for biokul af landbrugets rester – så det er muligt at indgå aftager aftaler inden etablering af anlæg
- Etabler en midlertidig CCS støtte, der kan lægge en bund under udgifterne til CO₂-lagring og fjerne noget af usikkerheden omkring indtægter fra klimakreditter, mens markedet er under opbygning
- Etabler grænseværdier for biokullets indhold (som indarbejdes i standardtest), hvilket kan give større sikkerhed for anvendelsen af de producerede biokul

Afkorte tidshorisont for godkendelsesprocesser

- Tag stilling til, hvordan forskellige typer af pyrolyseanlæg skal opfattes miljømæssigt (bilag 1 eller bilag 2 virksomhed), som afgør hvilke miljøgodkendelsesprocesser man skal igennem og understøt den kommunale sagsbehandling med standardeksempler.

Udnyt synergi ved placering ved eksisterende biogasanlæg og i energiparker

- Sidestil pyrolyseanlæg med biogasanlæg i Planloven for mulig placering i landzoner, så man ikke skal gennem ændring af lokalplaner for mulig samplacering
- Inddrag muligheden for at placere pyrolyseanlæg sammen med de områder, der overvejes udpeget sammen med kommunerne til kommende placering af nye energiparker og nye biogasanlæg

6.4. Økonomisk støtte til biokul

Biokul og pyrolyse er gennem tiden blevet støttet gennem forskningsmidler og puljer til test og demonstration. Fx har Landbrugsstyrelsen støttet en række biokul projekter med midler fra Grønt Udviklings- og Demonstrations Program (GUDP) baseret på input lige fra svinegylle til hønsemøg, græspulp og spildevandsslam. Andre forskningsprojekter vedrører udvikling af værdikæden bag biokul, hvor Innovationsfondens INNO-CCUS-mission bl.a. støtter forskellige projekter til biogen fangst-, lagring og brug af CO₂ og betydningen på systemniveau og for samfundet.

Med Landbrugsaftalen fra 2021 blev der afsat

midler til at udvikle de teknologiske potentialer, hvoraf pyrolysepuljen fra 2022 på 194 mio. kr. er blevet udmøntet til etablering og skalering af produktionsanlæg.

Fonden for Retfærdig Omstilling med fokus på regional- og egnsudvikling er ved at udmønte 196 mio. kr. til videreudvikling af pyrolyse i Nordjylland og/eller Sydjylland, men har vanskeligere ved at afsætte midlerne, hvilket bl.a. kan ses i lyset af puljens kriterier.

Der var oprindeligt også mulighed for produktionsstøtte til kulstoflagring med biokul via NECCS-puljen (negative emissioner fra CCS), der var tænkt som en konkurrencebaseret pulje, hvor de billigste reduktioner kunne få støtte, uanset om de kom fra pyrolyseanlæg, biogasopgraderingsanlæg eller CO₂-fangst

direkte fra atmosfæren. Puljen var et supplement til den store CCS-pulje for fangst og lagring fra store punktkildeudledere.

Bag midlerne var et politisk ønske om dokumenterbare effekter i forhold til målsætningerne for 2025 og 2030. Det vurderes ikke muligt at udbygge CCS med biokul i noget væsentligt omfang før 2025. Det er samtidig ikke muligt at dokumentere nettovirkningerne af kulstoflagringen med biokul i forhold til de politiske målsætninger på nuværende tidspunkt, jf. afsnit 6.5.

I forbindelse med markedsdialogen i sommeren 2023 blev CCS med biokul fjernet som mulig teknologi for puljen, bl.a. med henvisning til, at biokul ikke medfører permanent lagring, jf. Energistyrelsen (2023b). Kriterierne blev efterfølgende tilpasset til at gælde CCS-baseret på geologisk lagring. Biokul lagres som udgangspunkt ikke i undergrunden, men på jordoverfladen ud fra et ønske om at recirkulere næringsstoffer fra biomassen.

Hvis man ønsker at fremme udbygningen af biokulkapaciteten i Danmark, fx for at nå politiske CO₂-målsætninger på bestemte tidspunkter, er der i reglerne og godkendelsesprocesserne mulighed for at spare tid ved at tage stilling fra centralt hold til nogle standardprocesser, som kommunerne kan tage udgangspunkt i og derigennem etablere fast-track muligheder i forhold til de gældende regler, hvor meget er udlagt til lokal fortolkning, vurdering og behandling før godkendelse. Dette kan være en særlig udfordring, når det gælder nye teknologier, som der ikke er megen praksis eller vejledningsmateriale om.

En hurtig opskalering baseret på eksisterende regler og godkendelsesprocesser vil lægge et ekstraordinært stort pres på kapaciteten i kommunerne.

6.5. Biokuls klimaeffekt i nationale emissionsopgørelser

Selv om biokul er udpeget i 2021 som en af metoderne med stort teknologisk potentiale, er der aktuelt ikke en godkendt metode for indregning af den klimamæssige nettoeffekt af biokul i de nationale emissionsopgørelser.

Hidtidige skøn over potentialet har været baseret på foreløbige vurderinger, og Energistyrelsen har tidligere beskrevet behovet for metodeudvikling. Der pågår aktuelt et udviklingsarbejde i regi af Aarhus Universitet herom med forventet afrapportering i 2026.

Så længe der ikke findes en færdig og godkendt metode til indregning af den klimamæssige nettoeffekt af biokul (i forhold til referencescenariet for de anvendte biomasser), kan brugen af biokul i praksis ikke blive tillagt en værdi i de nationale emissionsopgørelser og dermed i opgørelser af, hvor langt man er kommet i forhold til at opfylde 70 pct. målsætningen for 2030 (med delmål i 2025) samt sektorspecifikke mål for landbruget.

Metodeudviklingsarbejdet bør dog ikke i sig selv stå i vejen for et ellers relevant klimavirkemiddel. Heller ikke selv om der er stort politisk fokus på målopfyldelsen på kort sigt.

HVORDAN KAN MAN FREMME HURTIGERE UDBYGNING AF BIOKULKAPACITETEN?

Hvis der er et politisk ønske om at udbygge kapaciteten til at fremstille og lagre CO₂ med biokul i Danmark, vil det kræve en understøttelse af teknologiens skalering, ligesom der vil være behov for at nedbringe risici og usikkerhed i projekterne, fx i forhold til kommende indtægtsstrømme og udgiftsprofiler og i forhold til sagsbehandlingstid i godkendelsesprocesser.

Hvordan markedsfører man biokul?

Kapitel 7

Fangst og lagring af CO₂ via biokul i landbruget kræver et samarbejde på tværs af brancher og aktører, som ikke nødvendigvis arbejder sammen normalt. En økonomisk bæredygtig model kræver, at alle har en gevinst eller et incitament til at deltage. Og samtidig forudsætter pyrolyseværket i sig selv en stor investering i etablering og industrividen ift. drift og skalering, som stiller krav til eventuelle ejere og investorer.

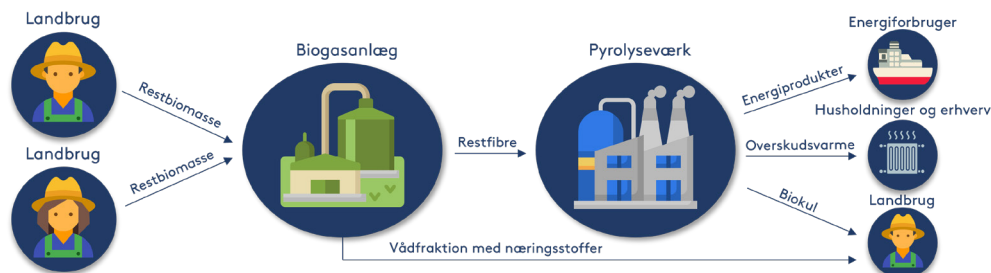
7.1. Relevante aktører

Biokul kan produceres med flere forskellige inputs, og der er derfor flere mulige scenarier for, hvordan værdikæden kan tage sig ud, ligesom flere forskellige aktører kan indgå i værdikæden.

Forenklet set vil værdikæden typisk bestå af:

- en biomasseleverandør, såsom landbrug, slagteri eller spildevandsanlæg
- et pyrolyseværk, hvor biomassen omdannes til bl.a. biokul

Figur 7.1: Eksempel på værdikæde med biogasanlæg



Kilde: CIP Fondens tilvirkning

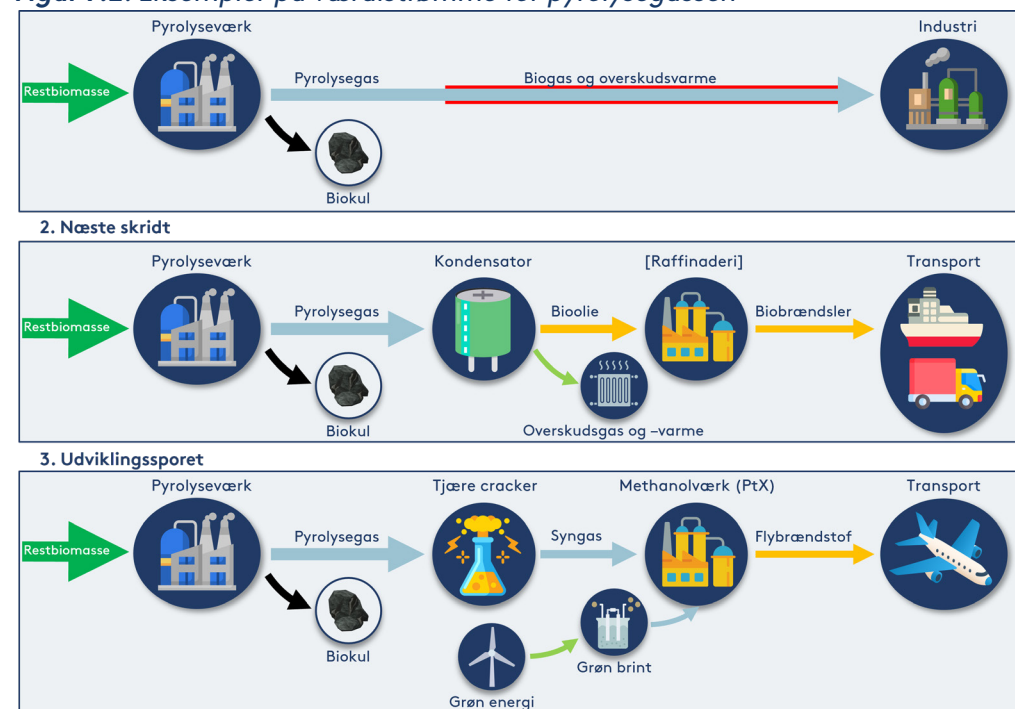
- aftagere af energiprodukterne fra pyrolyseværket i form af fx energisektoren
- aftagere af biokul i form af fx landbruget
- aftagere af overskudsvarme fra pyrolyseværket, fx industrien eller husholdninger i form af fjernvarme.

I praksis vil værdikæden formentlig være en del længere og mere kompliceret. For ved at processerne bliver så cirkulære som mulige, og at biomassen bruges i flere led, inden det ender i pyrolyseværket, kan der potentielt høstes yderligere økonomiske og klimamæssige gevinster.

Dermed har pyrolyseværket den store fordel, at det kan sættes ind som sidste stop for biomasseresterne i en eksisterende biomasseværdikæde, hvor man ellers står med et biomasseprodukt, der i dag ikke udnyttes på andre måder.

Et eksempel kan være at indtænke pyrolyseværkerne i samspil med eksisterende biogas-

Figur 7.2: Eksempler på værdistrømme for pyrolysegassen



Kilde: CIP Fondens tilvirkning

anlæg. Her vil landbruget levere restbiomasse til et biogasanlæg, som efter afgasning separerer den tilbageværende biomasse i en væskefraktion og en fiberfraktion. Væskefraktionen er relevant som gødningsprodukt i landbruget, mens fiberfraktionen er relevant for pyrolyseværkerne, som kan producere biokul og energi på basis af fiberfraktionen.

Ligesom værdikæden inden pyrolyseværket kan udvides, så kan det også ske i den efterfølgende proces.

Pyrolysegasserne, som skabes i pyrolyseværket sammen med biokullet, kan bruges til mange forskellige formål – særligt i takt med den teknologiske udvikling. Og det kan på sigt forbedre den økonomiske case, hvis der kan produceres højværdienergiprodukter.

I dag kan pyrolysegassen bedst anvendes til varme og fx benyttes i nærliggende biogasanlæg til opgradering af biogassen eller anden nærliggende industri med et opvarmningsbe-

hov. Overskudsvarmen kan også bruges til opvarmning via eksempelvis fjernvarmenettet.

I takt med den teknologiske udvikling vil der opstå nye udnyttelsesmuligheder. Et af de næste skridt bliver at kondensere gassen til bioolier, der kan videreforarbejdes til bio-brændsler, mens overskudsgas og -varmen kan bruges til opvarmning som i dag.

På længere sigt opstår endnu flere muligheder, og gassen kan fx forarbejdes til syngas, der kan viderebearbejdes med brint til methanol (PtX) og flybrændstoffer. Det kræver dog, at der findes grøn brint og ptx-anlæg.

Produktionen af biokul kan derfor både etableres fra ny i sin egen ret, men kan i høj grad også retrofittes som tillæg til eksisterende produktions-setup, hvor der er restbiomasser, fx biogasanlæg og fødevarerproduktion. Mulighederne afhænger derfor af den lokale kontekst, men er også meget fleksible og med store, globale perspektiver for udnyttelse af teknologien.

I selve sammensætningen af værdikæden er det derfor vigtigt både at have øje for biomasseleverandøren og den efterfølgende aftager af energiproduktet, så man sikrer den bedst mulige udnyttelse og værdiskabelse. Det afhænger af de teknologiske muligheder, omkostningerne og lokaliseringen, som vi kommer ind på senere.

7.2. Bæredygtig værdikæde

For at biokulproduktion og lagring i landbruget skal kunne betale sig, skal der skabes en merindtjening, der både kan aflønne landbruget, som leverer biomassen, pyrolyseværket, der producerer biokullet, og landbruget, der aftager biokullet.

Helt simpelt kan der skabes indtjening ved salg af energiprodukterne fra pyrolyseprocessen, da de har værdi i sig selv. Men for at skabe en fungerende model, hvor fx landbruget vil levere biomasse til processen, kræver det, at landbruget bliver betalt for at levere biomassen og dermed får del i indtjeningen. I visse tilfælde kan der dog være tale om leverandører, der vil betale pyrolyseværket for at slippe af med biomassen, fx spildevandsslam, som kan være med til at forbedre den økonomiske case. Men det er undtagelsen frem for reglen.

Det er i midlertidig ikke nok til at skabe en bæredygtig værdikæde for lagring af CO₂ med biokul i landbruget og dermed en fuld udnyttelse af klima- og miljøpotentialerne. For at det kan ske, skal der være en gevinst ved at sprede biokullet på markerne for landbruget. Nogen skal med andre ord betale for biokullets positive klimaeffekt.

En sådan reel markedsbetaling for den positive klimaeffekt forudsætter dokumentation i form af fx klimacertifikater.

7.3. Klimakredit som økonomisk virkemiddel

Ved at indføre salg af klimakreditter i værdikæden vil pyrolyseværket kunne opnå en indtjening fra produktionen af biokul og den efterfølgende spredning, der kan gøre processen økonomisk bæredygtig.

Simpelt skitseret vil fx landbrug levere restbiomasse til pyrolyseværket, som ved hjælp af pyrolyse vil producere hhv. et energiprodukt, overskudsvarme og biokul.

Biokullet betyder, at der nu kan udstedes en klimakredit, som kan frasælges til fx en industri- eller transportvirksomhed, der har brug

Figur 7.3: Værdikæde med salg af klimakredit



Kilde: CIP Fondens tilvirkning

for at kunne reducere klimaaftrykket på egne produkter. Og dermed vil pyrolyseværket opnå en indtjening for biokullet.

Men for at biokullet efterfølgende spredes på fx marker, kræver det, at landbruget også har en gevinst ved at gøre det. Det kan fx ske i form af en betaling fra pyrolyseværket, og/eller at en del af klimakrediten tilfalder landbruget, som enten selv kan bruge den eller sælge den. Altså en form for overskudsdeling.

Til forskel fra scenariet uden klimakreditter vil udbyttet, som landbruget sælger til en fødevarer virksomhed, ikke have et lavere klimaaftryk, hvis hele klimakrediten sælges fra, men vil derimod have et klimaaftryk, som svarer til, at der ikke er benyttet biokul, fordi klimaeffekten af biokul er solgt fra som klimakredit. Biokullagringen vil dog stadig kunne tælles med i selve bedriftsregnskabet.

Ved at udbyde klimacertifikater på en handelsplatform sikrer man den højeste markedspris for klimatiltaget.

Det betyder samtidig, at landbruget også har mulighed for at beholde klimacertifikatet og dermed klimagevinsten i dets produktkæde, hvis deres betalingsvillighed er størst.

Hvis ikke, der kan opnås passende betaling til landbruget for at lagre biokullet, så er det stadig muligt at udnytte CO₂-lagringspotentialet ved at lagre biokullet på andre måder, fx ved at indarbejde det i byggematerialer.

Her går landbruget dog glip af de miljømæssige gevinster ved at sprede biokullet på landbrugsjorden, fx at jorden holder bedre på vandet, og der sker mindre udledning af nitrat til de omkringliggende vandløb.

Et alternativ eller supplement til salg af klimakreditter er, at der politisk gives støtte til CO₂-lagring med biokul, fx i en opstartsperiode for at skabe et marked for biokul.

7.4. Gevinster ved samlokalisering

Pyrolyseværkernes placering spiller en vigtig rolle og kan potentielt skabe samlokaliseringsevinster, der kan forbedre forretningsgrundlaget og værkernes økonomi.

Gevinsterne opstår, hvis der kan høstes en økonomisk gevinst eller skabes en øget effektivitet ved en særlig placering af pyrolyseværket, fx i nærheden af en inputleverandør, outputaftager eller infrastruktur.

Fordelene kan omfatte logistik som følge af lavere transportomkostninger og synergieffekter, da et samlokaliseret værk kan udnytte biprodukter, restprodukter eller overskudsvarme, hvilket kan øge den samlede effektivitet og energiudnyttelse.

me, hvilket kan øge den samlede effektivitet og energiudnyttelse.

En væsentlig faktor for placering af pyrolyseværkerne er, at det er begrænset, hvor langt biomassen rentabelt kan transporteres.

For våde biomasser vil en stor del af den transporterede mængde være vand, som er dyrt at transportere, mens tørstofmængden, der benyttes til pyrolyseprocessen, er relativt lille. Det vil derfor være fordelagtigt at placere pyrolyseværket tæt på biomassekilden af hensyn til logistik og transportomkostninger. Alternativt skal biomassen tørres nær dens oprindelse og fx pelleteres for lettere transport.

Modsat vil der nemlig også kunne opstå gevinster ved at placere pyrolyseværket tæt på afsætningsmulighederne for både biokullet og sidestrømmene fra processen i form af fx overskudsvarme og bioolie. Det kan være ved at sikre en placering tæt på fjernvarmenettet,

hvorved overskudsvarmen let kan udnyttes. Det vil dog ikke altid være muligt at samlokalisere pyrolyseprocessen med både afsætningsmulighederne og biomassekilden. I sidste ende vil der derfor være tale om en afvejning, hvor størrelsen af de respektive samlokaliseringsevinster vil være afgørende for den optimale placering.

I praksis vil det ofte være et spørgsmål om, hvad der er sværest og dyrest at transportere. Her vil biokullet i sig selv ikke spille den store rolle, da det er relativt let at transportere.

Derimod vil beslutningen afhænge af energiprodukterne, der produceres, og særligt biomassen, der bruges. Og sidstnævnte vil typisk være udslagsgivende, da biomassen i mange tilfælde ikke rentabelt kan transporteres over længere afstande. For at minimere transportafstandene mellem biomassekilden og pyrolyseværket kan det, derfor være en fordel med flere små værker.

Pyrolyseværkerne er dog teknisk krævende værker, og for at sikre både professionel styring af værkerne, skalafordele og for at holde driftsudgifterne nede, så kræver det, at værkerne får en vis volumen.

Se mere i CIP Fondens baggrundsnotat om "Forretningsmodeller og værdikæder bag biokul", (2024d).

7.5. Ejerskabsformer og investorer

Pyrolyse og produktionen af biokul er stadig i opstartsfasen i Danmark, og det står enhver frit for at investere i et anlæg.

Der er dog to væsentlige forhold, som er afgørende for at sikre det mest optimale ejerskab. Først og fremmest koster et pyrolyseværk,

som producerer biokul, typisk mere end 100 mio. kr. Der er dermed tale om en stor initial investering, som kræver de nødvendige økonomiske muskler at kunne løfte.

Dernæst er pyrolyseværkerne industrianlæg, som kræver stor industriel knowhow og en industriel tilgang for at kunne standardisere og opskalere, og det kan kræve en industrialiseret part at løfte produktionen og logistikken succesfuldt på tværs af værdikæder.

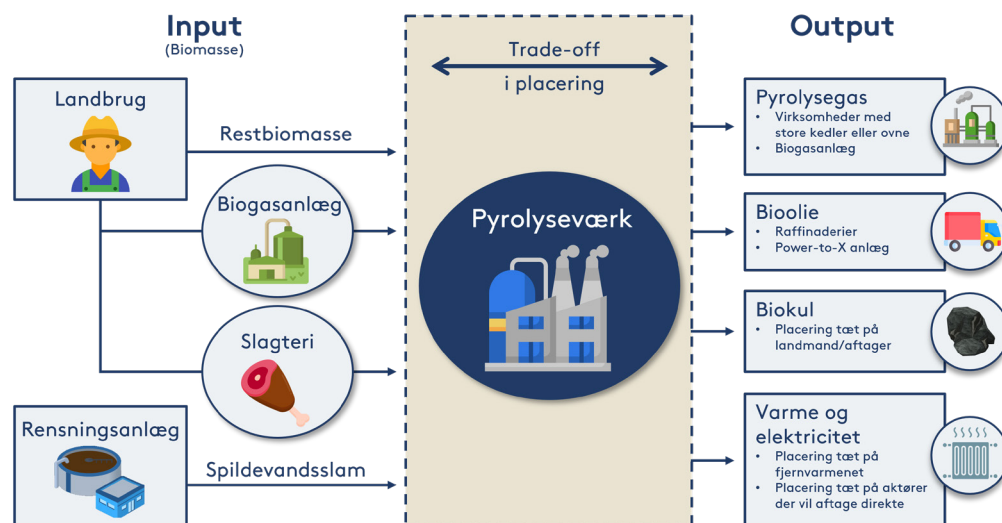
Udover de to krav til ejeren indebærer lagring af CO₂ med biokul i landbruget et samarbejde på tværs af brancher og leverandører, som ikke nødvendigvis arbejder sammen i andre sammenhænge, og som kan have modsatrettede incitamenter og interesser. Det er derfor helt oplagt at se på, hvorvidt ejerskabet kan skabe ensrettede incitamenter.

På mange måder minder det om de samme udfordringer og overvejelser, som biogasbranchen tidligere har stået med, og det er derfor nærliggende at bygge videre på deres erfaringer.

Biogasbranchen har været igennem en industrialiseringsproces, hvor ejerskabet er blevet mere professionaliseret, og hvor det i stedet for at være det enkelte landbrug, der investerede i et biogasanlæg og drev det, i stedet er blevet egentlige selskaber med stor grad af industrividen, som ejer og driver værket. Ejerskabet består typisk af en majoritetsejer i form af et energiselskab og en minoritetsejerkreds i form af landbruget, som dermed får del i eventuel upside i selskabet.

Det har ført til betydelige skalafordele på anlæggene, og det har samtidig åbnet op for, at eksterne investorer, såsom pensionselskaber og investeringsfonde er begyndt at investere i selskaberne og dermed stille kapital til rådighed.

Figur 7.4: Eksempel på trade-off i forhold til samlokaliseringsevinster



Kilde: CIP Fondens tilvirkning

Fordelen ved at lade fx et energiselskab eller en investeringsfond blive en stærk hovedejer af pyrolyseværkerne er dels, at landbruget ikke behøver at foretage investeringen selv, dels at der kommer en aktør ind med stor indsigt og industrividen, som lettere kan løfte opskaleringen og standardiseringen.

Det sikrer også, at værkernes evne til at skabe

vækst ikke begrænses, hvis der fx ikke er nok kapital til at foretage nye investeringer i nye vækstskabende initiativer hen ad vejen, såsom et fjernvarmerør til anlægget, CO₂-fangst eller elektrolyse. De eksterne investeringer kan samtidig være afgørende for at sikre den nødvendige udbygning af pyrolyseværker, hvis vi skal i mål med de politiske ambitioner.

Der kan dog stadig være en idé i at tænke landbruget ind i ejerskabet som minoritets-ejere i en form for andel 2,0. Her får landbruget medejerskab, hvis de garanterer de langsigtede biomasseleverancer. Dermed får de del i upsiden – det kan både være i forhold til energiprisen og klimagevinsten. Og sam-



Pyrolyse-as-a-service

En såkaldt pay-per-use-model eller en pyrolyse-as-a-service-ordning kan være en anden relevant forretningsmodel i forhold til at tillade fx landbrug eller spildevandsanlæg, der ikke selv kan eller vil investere ind i værkerne, at få større del i selve processen.

I modellen lejer en industriaktør anlægget ud til fx et landbrug eller spildevandsanlæg, der leverer en mængde biomasse til pyrolyseværket og får en mængde biokul retur.

På den måde slipper fx spildevandsanlæggene for at skulle bortskaffe spildevandsslammet, som blandt andet sker i dag ved, at landbruget betales for at sprede slammet på markerne.

For landbruget har modellen den fordel, at de slipper for selv at skulle foretage investeringen i et værk. Og denne model tillader ligeledes, at en specialiseret industriaktør kan stå for ejerskabet.



Biogasbranchens rejse

Omkring 1975 blev Danmarks første landbrugsbiogasanlæg bygget af en landmand på Fyn. Og i de efterfølgende år fulgte omkring 15 andre trop med deres egne biogasanlæg.

Udviklingen fortsatte op gennem 80'erne og 90'erne, hvor der blev etableret en række række større landmandsejede biogasfællesanlæg. Før etableringen af større biogasanlæg gik næsten i stå i 00'erne.

Det er først med en ny Energifaite i 2012, at biogasproduktionen kom op i gear igen. Aftalen gjorde det muligt at få støtte til anvendelse af biogas til bl.a. elproduktion og levering til naturgasnettet, og samtidig blev anlægsstøtten øget fra 20 til 30 pct.

Mens økonomien i anlæggene sammen med tekniske problemer hidtil havde lagt en dæmper på interessen, så meldte flere og flere investorer sig nu på banen fra slutningen af 10'erne, og det førte til, at der generelt kom en større grad af professionalisering og industrialisering ind i biogasbranchen. Blandt andet ved at majoritetsejeren typisk blev et energiselskab eller grovvarerelskab, mens landbrugene fik en mindre ejerandel og en leverandøraftale med selskabet. I takt med mulige CO₂-gevinster som indtægt er dette også til forhandling i leverandøraftalerne.

tidig sikrer pyrolyseværket sig det nødvendige input. Dermed skabes der ensrettede incitamenter for alle, og pyrolyseværket får mindsket risikoen.

Selve leverancen kan fx ske ved hjælp af leverandørforeninger. Det gør det lettere for pyrolyseværket at sikre sig dets input, og samtidig kan det øge landbrugenens forhandlingsposition.

Som nævnt står det dog alle frit for at investere i værkerne, og vi vil formentlig se flere forskellige ejerskabsformer med forskellige forretningsmodeller og størrelser på værkerne.

7.6. Hvordan bliver biokul produktionen udbygget?

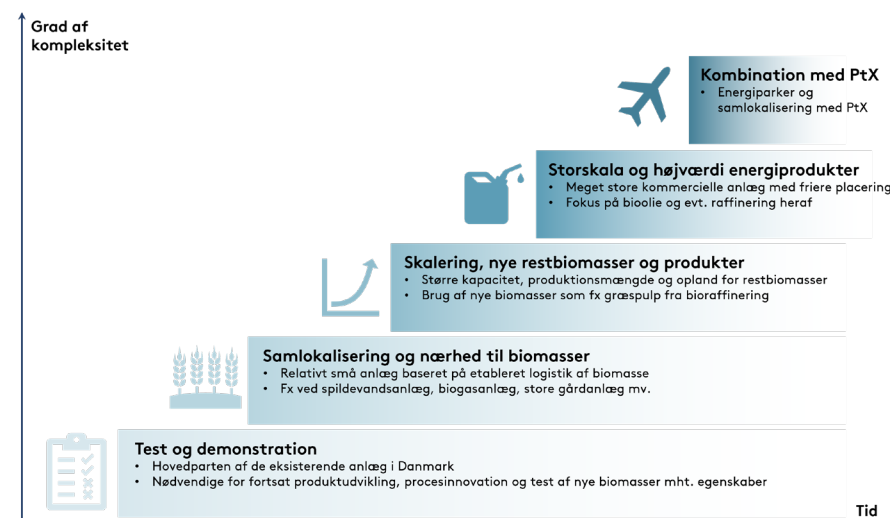
Som det fremgik af kapitel 4, er det rentabelt at investere i biokulproduktion, når det fx sker baseret på digestat fra et biogasanlæg (samlokalisering), eller når der laves biokul

af halmrester og produceres bioolie. Afsætning af den grønne energi bærer hovedparten af casen, men det kræver også afsætning af klimakreditter. Spildevandsslam er også rentabelt, men afhænger også af betalingsvilligheden for at komme af med slammet. Skaleringsmæssigt er man gået fra test- og demonstrationsanlæg til at være klar til kommerciel produktion og har dermed bevæget som nogle trin op ad den potentielle udvikling, jf. figur 7.5.

Fra mindre anlæg, der fx kan håndtere få tusinde ton tørstof årligt, op mod større produktionsenheder på 40.000 ton tørstof og potentielt helt op mod 100.000 ton over tid – fortsat afgrænset af den tilgængelige restbiomasse, der kan sources til produktionen.

Fra stand-alone anlæg til samlokalisering med i første omgang biomasseleverandører og potentielt også energifættagerne i egentlige klynger eller energiparker.

Figur 7.5: Hvordan kan teknologien udvikle sig?



Kilde: CIP Fondens tilvirkning

Erfaringer fra andre lande

Kapitel 8

Det globale marked for biokul udvikler sig hurtigt, og flere andre lande laver allerede biokul. I andre lande bruger man især biokullet til gødning og kompostering, men biokul bliver også brugt til meget andet. De mange anvendelsesmuligheder kombineret med CCS muligheden understøtter den potentielle efterspørgsel på biokul.

8.1. Voksende globalt biokulmarked

MANGE LANDE ER FORAN DANMARK

Markedet for produktion og afsætning af biokul er i hastig udvikling i udlandet, mens det i Danmark blot er i sin vorden.

De største aktører på biokulmarkedet er USA og Kina, efterfulgt af det nordvestlige Europa, hvor Tyskland er den største aktør. Der ses også eksempler på andre lande, som er i fuld gang med produktionen af biokul, såsom Australien, Kenya og Indien.

I andre lande er biokul primært blevet brugt til gødningsværdien, men man er begyndt at få øjnene op for CO₂-lagringsværdien.

Danmark er således ikke et foregangsland på biokulmarkedet globalt set, og brugen af biokul er langt fra nogen ny opfindelse. Til gengæld har Danmark potentiale for relativt hurtigt at få en fremtrædende rolle på biokulmarkedet. Jf. European Biochar Initiative forventes den samlede europæiske

produktionskapacitet til lige knap 100.000 ton biokul ved udgangen af 2023, hvilket ikke er mere end hvad 7 af Stiesdal's 20 MW anlæg kan klare.

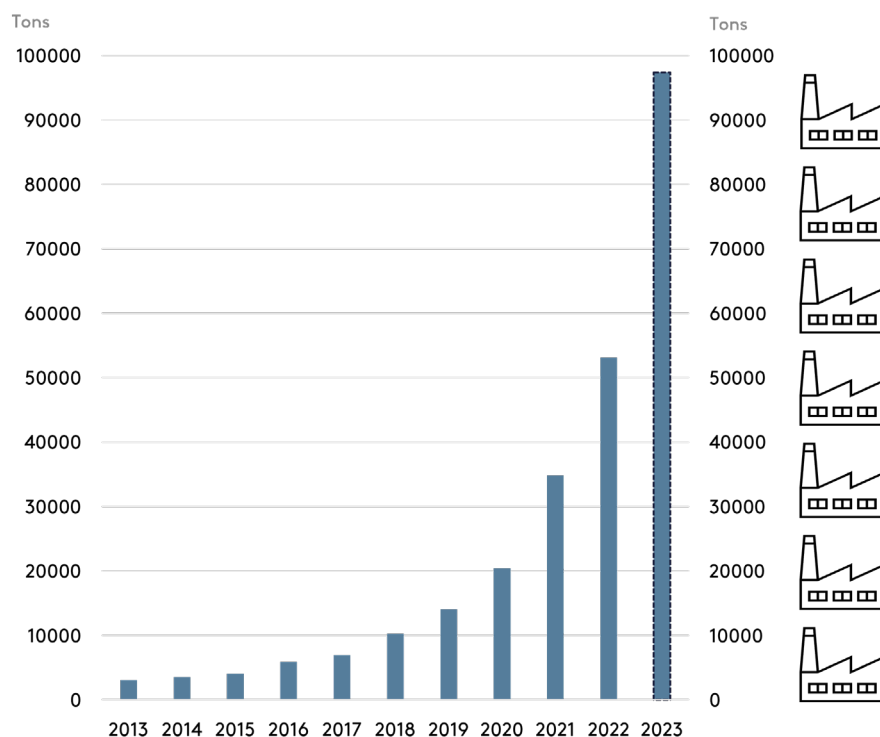
EUROPÆISK KAPACITET PÅ Knap 100.000 TON BIOKUL

I 2022 var den samlede produktionskapacitet i Europa på ca. 53.000 ton biokul, hvilket svarer til ca. fire 20 MW anlæg.

For 2023 ventes kapaciteten i Europa at stige til knap 100.000 ton biokul eller omkring 7-8 stk. 20 MW anlæg. Til sammenligning skønnes den danske produktionskapacitet at være på vej til omkring 30.000 ton biokul årligt med en kulstoflagring på godt 45.000 ton årligt, jf. bilag A.

De anlæg, der er under etablering i Danmark, vil derfor relativt hurtigt kunne bringe

Figur 8.1: Stigende biokulproduktion i EU, der i 2023 svarer til 7-8 stk. 20 MW anlæg



Anm (figur 1): Biokulproduktionen fra 2013-2022 samt forventning til produktionskapaciteten i 2023, Europa.
Kilde: EBI (2023), "European Biochar Market Report 2022-2023"

dansk biokulproduktion op blandt de største i Europa.

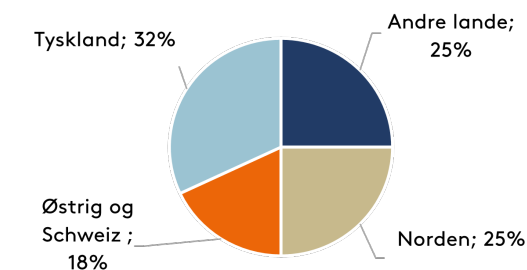
Den stigende tendens for biokulproduktionen i Europa ses også globalt. I 2022 vurderede en række analysebureauer det samlede biokulmarked til en værdi på omkring \$ 200 mio., hvilket forventes at stige markant på sigt.

HVOR MANGE BIOKULPRODUCENTER ER DER I EUROPA, OG HVOR PLACERER DE SIG?

Ifølge European Biochar Initiative var der i 2022 omkring 130 biokulproducerende faciliteter i Europa. Hovedparten af den europæiske biokulproduktion foregår i Tyskland¹⁸.

Den tyske produktion svarer til ca. 1/3 af den samlede produktion i Europa, efterfulgt af de nordiske lande, som tilsammen står for ¼ af den samlede biokulproduktion i Europa, hvoraf Sverige er den største producent. Herefter følger Schweiz og Østrig.

Figur 8.2: Tyskland står for størstedelen af biokulproduktionen i Europa, ultimo 2022



Kilde: EBI (2023), "European Biochar Market Report 2022-2023"

8.2. Biokul har mange anvendelsesmuligheder

BIOKUL SOM JORDFORBEDRINGSMIDDEL ER IKKE NOGET NYT FÆNOMEN

I udlandet har biokul længe været brugt som et naturligt middel til at forædle sandede jorde til fertile og dyrkbare jorde¹⁹.

For mere end 2.500 år siden begyndte man at bruge biokul til jordforbedring i Amazonas. Den hyppigste jordtype i regnskove, såsom i Amazonas, er sandet, tør og ufrugtbar. Ved tilføjelse af biokul i den sandbaserede jord er det muligt at omdanne jorden til en mørk, næringsrig og frugtbar jord.

I Europa skønnes hovedparten af biokullet at blive brugt på landbrugsbedrifter (Schmidt et al, 2021), og i USA er den primære anvendelse af biokul ligeledes til jordforbedring, efterfulgt af biokul som gødningsmiddel til parker, anlæg, gartnerier og private haver (Thengane et al, 2021).

Udover at være et jordforbedringsmiddel og gødningsprodukt, har biokul også mange andre anvendelsesmuligheder. Det bruges bl.a. som fodertilsætning, i byggematerialer, til metallurgi og i nogle få helseprodukter.

BIOKUL SOM CO₂-LAGRINGSMETODE KAN VÆRE VEJEN FREM FOR VIRKSOMHEDER

Den centrale drivkraft for den forventede vækst på biokulmarkedet kan til dels tilskrives, at man har fået øjnene op for CO₂-lagringsværdien, som biokul tilbyder.

Den relativt nyopståede betalingsvillighed for langvarig og dokumenterbar CO₂-lagring i det frivillige marked for klimakreditter kan afhjælpe virksomheder med deres CO₂-udledning. Som svar på en øget politisk bevidsthed om klimaforandringernes konsekvenser, er der

opstået en betalingsvillighed for CO₂-kom-penseret forbrug. Denne udvikling har skabt grundlaget for, at industri- og transportvirksomheder køber klimakreditter for at kunne kompensere for sin andel af CO₂-emissioner.

Denne globale tendens har øget rentabiliteten af biokulproduktionen, så længe biokullet pløjes ned i landbrugsjorden og herved medfører langvarig og stabil CO₂-lagring, hvortil der kan sælges en klimakredit. European Biochar Initiative vurderer, at omkring 70 pct. af biokulproduktionen i Europa er certificeret og dermed potentielt til salg via klimakreditter.

Der kan således være forskel på den bagvedliggende motivation for at implementere brugen af biokul, hvis man kigger på tværs af lande. Den danske motivation for at implementere biokul er i højere grad drevet af CO₂-lagringsværdien, end hvad der har været tilfældet i udlandet.

DER ANVENDES MANGE FORSKELLIGE FORMER FOR RESTBIOMASSER TIL PYROLYSE

Udover at skulle skelne mellem hvilke effekter, man kan opnå ved biokul, er der også forskel på hvilken restbiomasse, der bruges til pyrolysen til biokul. Dette afhænger nemlig af hvilke biomasser, der er til rådighed i de respektive lande.

I USA, Vesteuropa og i Australien laves biokul især af biomasser bestående af træflis og trærester, husdyrgødning, halmrester m.m. I Asien og andre udviklingslande består restbiomasserne primært af risstrå og risskaller, nøddeskaller, fx fra kokosplanter, palmeblade og bambus.

Der er som udgangspunkt ikke knaphed i verden på relevante restbiomasser til brug for pyrolyse. Det essentielle ved de anvendte

restbiomasser er, at de på forskellig måde har karakter af rester, der ikke har anden økonomisk værdi, men med pyrolysen og biokul kan finde nye anvendelser.

8.3. Hvad kan vi lære af andre lande?

BIOKULPRODUKTER ER IKKE ET UKENDT PRODUKT I MANGE ANDRE LANDE

Der findes en række eksempler på virksomheder, som beskæftiger sig med biokul på forskellige måder, hvor biokullene har forskellige anvendelsesmuligheder.

Det ser ud til, at biokul ikke er så ukendt som produkt i udlandet. Det sælges fx som havegødningsprodukt til forbrugere i USA og i Kina. I USA sælges biokul fx i byggemarkeds-kæden The Home Depot. Og i Kina kan man købe havegødningsprodukter, hele pyrolyse-anlæg m.m. på Alibaba.



Gratis biokul til indbyggerne i Stockholm

I Stockholm indsamler man bl.a. have- og parkaffald og omdanner det til biokul. Borgerne kan herefter hente gratis biokul på genbrugspladser til brug i deres haver. Samtidig sælges der biokul til lokale myndigheder til offentlige parker og haver.

Kilde: Stockholm Biochar Project | Nordregio

I Sverige har man lavet en ordning, som hjælper borgerne til at bruge biokul på en nem og tilgængelig måde, jf. eksempel nedenfor. Andre steder i Sverige har virksomheder set et potentiale for selv at etablere pyrolyse omkring sine restprodukter og selv bruge overskudsenergien, fx ved papirmøller eller som eksemplet nedenfor viser.



Svensk frøvirksomhed står for hele værdikæden selv

Et eksempel herpå er den svenske frøvirksomhed Hjelmsäters Egendom, som bruger tysk pyrolyseteknologi til at omdanne rester fra bl.a. frøproduktionen til biokul med formålet om at skabe jordforbedrende gødning, som kan bruges til frøproduktionen.

Kilde: Biochar in Sweden, Hjelmsäters Egendom | Puro.earth

Der findes også andre eksempler på anvendelse af biokul i fx byggeriet. I Sverige sælger virksomheden Biokolprodukter Global AB cement- og betonprodukter tilsat biokul for at reducere klimaaftrykket af beton, som ellers har et højt klimaaftryk. Derudover er der andre positive gevinster knyttet hertil, såsom højere trykstyrke samt forbedret bøjningsstyrke og trækstyrke.

Et andet eksempel er den amerikanske virksomhed Solid Carbon, som også producerer betonblandinger tilsat biokul. I juni 2022 tilføjede virksomheden en 5.000 kvadratmeter kulstofnegativ betonplade til jorden i den nordamerikanske stat Oregon, hvilket bidrog med en fortrængning på over 5,1 ton CO₂.

Derudover bruger den norske virksomhed Vow Green Metals fx biokul til metallurgi. Biokul minder om kul og koks, som anvendes til opvarmning i stålindustrien til at fremme legeringen af jern. Ved at bruge biokul til opvarmning i stedet for fossile brændsler, kan man sænke klimaaftrykket ved opvarmningen. Dette fører ikke til kulstoflagring, men sænker i stedet klimaaftrykket ved at reducere behovet for fossile brændsler.

ONLINEPLATFORM I USA KAN GUIDE BRUGERE PÅ RETTE VEJ MED BIOKUL

Det kan være et uoverskueligt projekt at komme i gang med at producere og afsætte biokul, hvis man er helt grøn på området.

Derfor har man i USA oprettet en onlineplatform, som kan guide brugere på rette vej, når de overvejer at anvende biokul.



Cost-benefit-analyse i USA

Da det kan være svært at finde rundt i hvilken biokul man skal anvende til sin specifikke jord, og hvilke effekter man kan opnå ved anvendelse af biokul, har man i USA lavet en guide hertil. Guiden kan findes på onlineplatformen Pacific Northwest Biochar Atlas. Platformen tilbyder bl.a. en cost-benefit-analyse af brugen af biokul.

Kilde: Biochar Cost-Benefit Analysis Tool

LOVGIVNING MED UDGANGSPUNKT I KLIMACERTIFIKAT

Danmark kan også blive inspireret af, hvad man bl.a. har gjort i Schweiz for at komme i gang med lovgivningen og retningslinjerne indenfor biokulproduktion på en simpel og tilgængelig måde.

I Schweiz har man taget den frivillige standard og gjort den til lovgivning. Biokullet skal være certificeret efter retningslinjerne hos EBC (European Biochar Certificate), der bl.a. er baseret på forskningsresultater fra Ithaka Institute for Carbon Strategies.

EKSEMPLER PÅ STØTTE TIL UDVIKLING AF BIOKUL I UDLANDET

Der findes som udgangspunkt ikke en direkte

støtteordning målrettet biokul og pyrolyse i EU. Alligevel er der flere eksempler på støtte til biokulprojekter gennem EU, da det er muligt at opnå støtte igennem andre ordninger, der er klima-, forskning- og udviklingsrelaterede.

Tierpark Berlin modtog fx støtte fra EU i 2017-2020 i forbindelse med projektet CarboTIP. Her blev biomassen fra zoo'en indsamlet og omdannet til biokul. Biokullet blev testet for gødningsmæssige fordele, CO₂-indhold og meget mere. Støtten blev givet som del af EU's European Regional Development Fund²⁰ gennem "Berlin" Operational Programme³.

Derudover opnåede den finske virksomhed, Carbo Culture, støtte i 2022 fra The European Innovation Council (EIC) på 2,16 mio. euro²². Støtten blev givet i forbindelse med EU Horizon Europe programmet og gives til udviklingen af Carbo Cultures nye anlæg.

Hvis man kigger udenfor EU, så har Storbritannien bl.a. fået offentlig støtte til udvikling af en digital B2B-plattform, Black Bull Biochar (BBB), som i juli 2022 blev tildelt en statskontrakt på 3 mio. GBP. Platformen forener landbrugs-, industri- og forskningspartnere, hvor formålet er at skalere brugen af biokul. USA har også en støtteordning til biokulproducenter, "Soil Carbon Amendment 336", finansieret af "The USDA Natural Resources Conversation Service (NRCS)".

Ifølge US Biochar Initiative (USBI) er det ca. 75 pct. af de gennemsnitlige omkostninger, som tilbagebetales gennem støtteordningen²².

Samlet ser det ud til, at der er en række andre lande, som er længere i udviklingen af biokulmarkedet end Danmark. Det betyder dog ikke, at Danmark ikke har en chance på

biokulmarkedet. Vi kan relativt hurtigt få øget vores markedsandel, hvis vi får etableret flere kommercielle anlæg svarende til dem, som fx Stiesdal producerer, eller de andre danske pyrolyseproducenter såsom AquaGreen eller MASH Makes.

CIP FONDEN AFSØGER EKSPORTMULIGHEDERNE FOR DANSK BIOKUL

Gennem en analyse med forventet udgivelse i starten af 2024 vil CIP Fonden afsøge eksportmulighederne for dansk biokul.



²⁰ EU COMMISSION (2019)

²¹ EU COMMISSION (2022)

²² Smith, B., Loll-Webster, J., Gray, M., Seman-Varner, R. (2023)

Hvordan kommer vi videre?

Kapitel 9

Markedsgørelse af CO₂-lagring via biokul kræver udvikling af reguleringen, etablering af nye værdikæder og samarbejder, og om-sætning af forskning og viden til praksisnær guidance.

9.1. Status for biokul i Danmark

Med denne overblikssrapport, de bagvedliggende analyser og dokumentationsrapporter, og gennem seminarer og aktørinddragelse har CIP Fonden undersøgt mulighederne for at markedsføre og bruge CO₂-lagring med biokul som et væsentligt klimavirkemiddel for Danmark og for landbruget.

Med "tandhjulene" for øje fra kapitel 2 kan der nu gøres status for biokuls markedsmuligheder i Danmark.

De teknologiske løsninger bag biokul er ved at være klar til kommerciel udrulning og skalering (TRL 8), hvorefter der skal forventes en periode med læringseffekter, fortsat innovation, finetuning og simplificering af processer, og en mere standardiseret fremstilling af pyrolyseanlæg, hvor anlægsomkostningerne kan nedbringes. I den proces er en stigende produktion til faldende enhedsomkostninger.

Restbiomasserne er der. Biokul skal produceres af, hvad der er af tilgængelige rester i det nærmeste område, men er til gengæld fleksibel i forhold til typen lige fra planterester til husdyrgødning og dybstrøelse, rester

fra forskellige produktionsprocesser, havets restbiomasser, have- og parkaffald og spildevandsslam.

Business casen er der. Markedsaktørerne skal finde sammen på tværs af værdikæden og etablere fornuftige leverandøraftaler og aftageraftaler på tværs, hvor der tages højde for, at omkostningerne til CO₂-lagringen dækkes.

Samfundsøkonomisk er biokul og CO₂-lagring også en god investering med en meget lav fortrængningsomkostning alt efter, hvor meget man medregner af sideeffekter og potentielle indtægter fra klimakreditter.

Efterspørgslen efter biokul, altså hvad biokul skal bruges til som produkt, er mest åbenlys i landbruget som gødningsprodukt, men biokul er også relevant til at reducere klimaaftrykket i andre produkter, fx byggematerialer. Selv om biokul måske især efterspørges pga. dets evne til CO₂-lagring, skal der først etableres et produkt og en anvendelse, før der kan dokumenteres en klimaeffekt via et klimacertifikat.

Her spænder de regulative rammer dog ben for anvendelsen pga. manglende hjemmel til at bruge biokul af landbrugets sidestrømme. Og reglerne er også med til at trække placeringen af pyrolyseanlæg nær biomasserne i langdrag. Lovgivningen mangler på flere punkter at tage stilling til, hvad biokul er og skal medføre af godkendelsesprocesser.

Der er stor vækst i den forskningsbaserede viden, og den skal fortsat udvikles i takt med teknologien og markedsførelsen. Forsknings-

mæssig viden, udvikling af regulering og udvikling af markedet skal gå hånd-i-hånd. Den ene skal ikke vente på den anden. Som med andre nye markeder vil man blive klogere over tid og være agil til at tage nye konklusioner

9.2. Kan man nå 2 mio. ton CO₂-lagring med biokul i 2030?

Med udgangspunkt i CIP Fondens analyser er det også muligt at vurdere mulighederne for at nå Landbrugsaftalens målsætning om, at biokul skal kunne lagre 2 mio. ton CO₂ i landbruget i Danmark i 2030.

På en række parametre ser det ud til at kunne lade sig gøre. På andre under visse restriktioner. Og på atter andre parametre kan det ikke lade sig gøre, som situationen er i dag. Her er der brug for handling!

Se tabel 9.1 for et nærmere overblik.

REGULERING OG ETABLERINGSTID BREMSER DEN POLITISKE MÅLSÆTNING FOR BOKUL

De største udfordringer eller restriktioner for målsætningen kommer fra hhv. reguleringen og tidsfaktoren for, hvor hurtigt man reelt kan nå at udbygge produktionskapacitet. De to ting hænger også sammen.

Så længe der ikke er hjemmel til at bruge biokul baseret på landbrugets sidestrømme, men kun på fx spildevandsslam, jf. kapitel 6, vil der

ikke blive investeret i en større udbygning af anlæg baseret på disse biomasser. Der skal for markedsaktørerne være sikkerhed for, at biokullene kan afsættes og lagringen realiseres, før der træffes beslutning om at investere i de relativt kapitaltunge pyrolyseanlæg.

Selv om der kan opnås midlertidige og markspecifikke tilladelser (§19 godkendelse), vil det udgøre så stor en risiko for den fremadrettede afsætning, at en udbygning i det omfang, den politiske målsætning forudsætter, er usandsynlig.

INVESTERINGSBESLUTNINGER KRÆVER KLARE RAMMER

For de, der vil investere i pyrolyse og biokul med CO₂-lagring, er der en række forhold, aftageraftaler og godkendelser, som skal sikres, før der træffes endelig investeringsbeslutning. Usikre forhold sætter sig direkte i højere omkostninger til risikoafdækning, som kan være afgørende for, om det er rentabelt eller ej.

Flere af de processer er unødigt tidskrævende med den nuværende regulering. Primært fordi den ikke har forholdt sig til biokul og pyrolyse, og man derfor skal en omvej via anden regulering eller lokal stillingtagen. Se nærmere i kapitel 6.

Derfor påvirker reguleringen også etableringstiden og dermed den mulige udbygningstakt. Der er behov for, at reglerne gøres tydelige for biokul og processerne optimeres tidsmæssigt, hvis den samlede etableringstid skal nedbringes.

Tabel 9.1: Kan man nå den politiske målsætning om 2 mio. ton CO₂-lagring i 2030 med biokul?

Spørgsmål	Uddybning	Spørgsmål	Uddybning
Er der restbiomasser nok?	✓ Med de kortlagte og tilgængelige biomasser i dag (NIRAS, 2023) er der netto nok til at nå den politiske målsætning på 2 mio. ton CO ₂ lagring årligt. Bioøkonomisk Panel peger på et udviklingspotentiale på + 8 mio. ton tørstof frem mod 2030 af kendte biomasser. Hertil kommer restbiomasser fra fx havet, fra skovrester og fra andre produktionsprocesser, fx græspulp fra bioraffinering.	Er lovgivningen klar?	— Fravær af <i>hjemmel</i> til at bruge biokul i landbruget af landbrugets sidestrømme og fravær af <i>grænseværdier</i> for indholdet af biokul som dansk gødningsprodukt. Manglende stillingtagen til <i>miljøklassifikation af pyrolyseanlæg</i> (teknisk anlæg) og til <i>placeringsmuligheder</i> i landzone gør udbygningen mere langsommelig. Der træffes ikke større investeringsbeslutninger for markedsudrulning, når rammerne er uklare og med lokal variation, og når der ikke på forhånd kan etableres aftageraftaler.
Er det rentabelt at lave og bruge biokul?	(✓) Business casen bag produktion og anvendelse af biokul er rentabel, men afhænger af betaling for CO ₂ lagringen – fx via en klimakredit, via betaling for modtagelse af biomassen, når det gælder spildevandsslam) eller via tilskud til CO ₂ lagring.	Hvor mange anlæg vil det kræve? Og kan det nås inden 2030?	— Baseret på 20 MW anlæg vil 2 mio. ton CO ₂ nettolagring årligt kræve produktion fra 70-90 anlæg med dagens teknologi. Det første driftsanlæg af den størrelse indvies primo 2024. Målet kræver en uforholdsmæssig stor udbygning af anlæg på få år (6 år) og kan ikke nås frem til 2030. Over tid bliver teknologi, processer og anlæg mere effektive, hvilket reducerer udbygningsbehovet. Målet kan nås over lidt længere tid, og teknologien har mere langsigtet relevans end 2030.
Er der nok efterspørgsel efter klimakreditter?	(✓) Der blev internationalt solgt klimakreditter baseret på biokul svarende til 0,3 mio. ton CO ₂ lagring i 2022. Markedet skal derfor opskaleres væsentligt, hvis biokul fra Danmark alene tegner sig for 2 mio. ton CO ₂ i 2030. Men en række virksomheder med klimamålsætninger har behov for langsigtet og troværdig CO ₂ lagring til at modregne egne udledninger. Og atmosfæren/Parismålsætningen har behov for, at der netto bliver trukket CO ₂ ud i en meget lang periode. I en opstartsperiode kan der være behov for at supplere markedet for klimakreditter som medfinansiering af CO ₂ lagringen.	Er der landbrugsjord nok?	(—) Det nuværende fosforloft for udbringning af gødningsprodukter sætter grænser for udbringningen af biokul baseret på fosforrige biomasser som især digestat, husdyrgødning o.l. Med den kortlagte mængde biomasse (NIRAS, 2023) vil målsætningen kræve udbringning på ca. 1/3 af al dansk landbrugsjord årligt. Fosforloftet er restriktivt i lyset af, at biokul frigiver fosfor over tid og ikke umiddelbart efter udbringning.
Samfundsøkonomisk god investering?	✓ Biokul er samfundsøkonomisk en god investering, og fortrængningsprisen pr. ton CO ₂ er meget konkurrencedygtig med andre CCS-metoder.		
Er der regler for, hvordan man kan bruge biokul?	✓ Regler for <i>udbringning</i> af biokul på landbrugsjord som gødningsprodukt (metoder, tidspunkter m.v.) og for <i>dokumentation</i> heraf i gødningsregnskabet er klar. Bygningsreglementet indeholder krav til en række byggematerialer, som er understøttet af standarder og vejledninger fra Dansk Standard og Statens Byggeforskningsinstitut.		

Med dagens teknologi ville 2 mio. målsætningen kræve omkring 70-90 stk. 20 MW anlæg, der er de største aktuelle anlæg. Over tid vil teknologien forbedres og blive billigere. Men selv hvis der kun skal etableres 40-50 af den type anlæg, der fx er serieforbundne på en lokation med store mængder biomasser i lokalområdet, er det teknisk og tidsmæssigt svært at nå udbygningen og samtidig teste og opskalere produktionen til fuld kapacitet i 2030.

Endelig er der også spørgsmålet, om der så er landbrugsjord nok at bringe biokullet ud på, hvis alt andet bliver klar. Biokul indeholder en koncentreret form af de næringsstoffer, som oprindeligt var i biomassen. Med de nuværende fosforlofter kan biokul af fosforrige biomasser kun bruges i begrænset omfang. Men biokul frigiver ikke fosforen lige så hurtigt som fx gødningsrester udbragt på landbrugsjord. Så her kan reglerne også udgøre en bremse. Der kan være behov for et specifikt fosforloft for biokul.

Netop muligheden for omfordeling af fosforreserven med biokul er også en af samfundsgevinsterne ved at bruge det som gødningsprodukt frem for at importere fosfor, der er en knap ressource globalt set.

HANDLING OG JUSTERING AF MÅLSÆTNING

Der er mange ting, der kører for biokul. Men den politiske målsætning for biokul i 2030 er ikke realistisk under nuværende betingelser. Der er behov for handling. Og for en justeret tidsplan med en lidt mindre forceret udbygning. Biokul er også relevant efter 2030

og frem mod kommende målsætninger om neutralitet i 2045 og netto-negativ udledning for Danmark under ét i 2050.

9.3. Hvad skubber på markedsdannelsen, og hvad holder udviklingen tilbage?

Markedet for biokul og CO₂-lagring fremmes af såvel politisk pres som af behovene i den grønne omstilling for at finde omkostningseffektive klimavirkemidler og øget produktion

Hvad tynger fremdriften?

- Fravær af hjemmel i Danmark til brug af biokul i landbruget
- Behov for produktionsstandard og grænseværdier for biokullets indhold
- Begrænsede erfaringer med skalering og masseproduktion af pyrolyseanlæg
- Manglende kendskab til biokul blandt investorer og landmænd, der skal bruge biokul
- Behov for mere forskningsbaseret viden og bedre kategorisering af mulige effekter



Hvad skaber fremdriften?

- Globalt behov for CCS til omkostningseffektive priser
- Behov for grøn energi, der kan supplere den mere volatile vedvarende energi
- Ambitiøse klimamål i EU og i Danmark, herunder for landbrugets emissioner
- EU regulering af biokul som gødningsprodukt og udvikling af standard for klimacertifikater.
- Nyttiggørelse af restbiomasser (sidestrømme)
- CO₂-beskatning af emissioner

af grøn energi uden samtidig at gøre skade på miljøet eller inddrage nye arealer.

BEHOV FOR GRØN ENERGI, FORSYNINGS-SIKKERHED OG SUPPLEMENT TIL VOLATILE KILDER AF VEDVARENDE ENERGI

Pyrolyse af restbiomasser er en multi-purpose teknologi, som i en og samme proces producerer forskellige produkter og miljøservices:

- Grøn energi i form af pyrolysegas, bioolie og overskudsvarme
- Klimaeffekter i form af CO₂-lagring, undgåede emissioner og fortrængning af fossile alternativer
- Miljøeffekter alt efter anvendelse i form af fx jordforbedring, omfordeling af fosforreserven, forbedret kompostering, øget modstandskraft i jorden over for klimaforandringer mv.

Det taler også til biokuls fordel, at udgangspunktet er biomasserester, som har været gennem en kaskadeanvendelse/cirkulær proces, og som typisk ikke har anden væsentlig økonomisk anvendelse.

Processen nyttiggør end-of-waste biomasser

og nicheressourcer og giver resterne ny værdi og skaber nye indtægtskilder.

Biomasser bliver fremover en mere knap ressource, og den fremtidige energiproduktion skal ske uden større arealkrav. Her kan processen bag biokul fungere på rester og levere grøn energi til at supplere mere volatile, vedvarende kilder. På sigt vil pyrolysen også være relevant at knytte til PtX-produktion, fordi der opfanges biogent CO₂, som med grøn brint kan videreforarbejdes. Teknologien peger altså også fremad som bindeled til det fremtidige energisystem med energiparker for forskellige led.

INTERNATIONALE PUSH-FAKTORER

Parismålsætningen om at holde temperaturstigningerne nede kræver brug af mange forskellige klimavirkemidler, og FN's klimaanstaltning IPCC har anerkendt CO₂-lagring med biokul som en af de lagringsteknologier, der skal i spil, med et globalt potentiale. Omkostningseffektive klimavirkemidler, der kan sættes ind globalt, er afgørende.

EU skubber også på brugen ved at have sat ambitiøse klimamålsætninger, herunder også

for landbrugets emissioner. Målsætningerne er guidende for en stor del af politikudviklingen og de forskellige programmer.

Mere specifikt har EU som de første anerkendt biokul i lovgivningen som et gødningsprodukt, når det er baseret på landbrugets sidestrømme. Og oprettet en CE-mærkningsordning for biokul som gødning, så det kan handles på tværs af EU. Danmark skal rette sig efter EU-forordningen, med mindre særlige hensyn i den nationale regulering, fx miljøbeskyttelse, tilsiger en strammere regulering.

EU har også sat sig i spidsen for at udvikle en certificeringsramme for Carbon Removals, som vil guide markedet for køb og salg af klimacertifikater fremad. Her har det voksende, globale marked for klimakreditter netop biokul som den mest solgte form for CO₂-lagring.

INTERNATIONALE PULL-FAKTORER

Der er også internationale tendenser, der kan hæmme markedet for biokul.

EU skal fx snart tage stilling til varigheden af forskellige CO₂-lagringsmetoder, og her skal biokul enten kategoriseres blandt naturbase-

rede teknologier, som har relativ kort lagringshorisont, eller blandt mere teknologiske lagringsmetoder som fx BECCS og DACCS med meget langvarig lagring. Arbejdet inddrager forskningsresultater, men er præget af lobbyisme fra mange sider. Beslutningen kan blive normgivende for, hvordan det private marked for klimakreditter vurderer de forskellige lagringsmetoder fremadrettet og dermed for teknologiernes finansieringsmuligheder.

På forskningssiden er der mange publikationer om biokul og dets potentielle sideeffekter ved brug, men de kan være vanskelige at bruge som guide for anvendelsen. Kendskabet til CO₂-lagring med biokul er samtidig ikke så udbredt, herunder heller ikke blandt potentielle investorer.

Endelig er man verden over i gang med at effektivisere, opgradere og skalere teknologien, men der er fortsat begrænsede erfaringer med masseproduktion af anlæg.

DANSKE FORHOLD, DER FREMMER MARKEDET

Danmark har ligesom EU politisk fastsatte klimamålsætninger, og for landbruget er reduktions-målet endda indskrevet i Klimaloven. Her vil 70 pct. målet for 2030, net-zero i 2045 og negativ emission i 2050 kræve væsentlige emissionsreduktioner, men også nødvendiggøre CO₂-lagring.

De danske politikere har vist, at de har viljen til at bruge teknologiske løsninger på klimaudfordringerne og fremme markedet med store puljer til CO₂-fangst ved store punktudledere og lagring under Nordsøen i udtjente olie- og gasfelter.

Man har også regulatorisk forberedt markedet for biokul i Danmark i forhold til, *hvordan* man må bruge biokul som gødningsprodukt,

når det gælder udbringningsmetoder, tidspunkter og dokumentationskrav. Der er gjort klar i startblokken. Så mangler blot hjemlen til at bruge biokullet.

Det danske marked for biokul er præget af, at der er forskellige producenter af pyrolyse, som har lidt forskellig teknologisk tilgang, og som samtidig spreder sig ud over forskellige restbiomasser som input. Der er altså et relativt bredt erfaringsfelt, selv om markedet er i dets opstart, hvor virksomheder er små og mellemstore. Der er også etablerede teknologiudbydere i andre lande med en længere historik. Det skaber grobund for fortsat innovation og konkurrence i teknologi-udviklingen og skaleringsmulighederne.

Der er i dansk sammenhæng allerede erfaringer at trække på fra opbygningen af biogasbranchen, hvor landbrug og energiproduktion allerede arbejder sammen. Ikke fordi der er behov for samme støttesystem eller for den samme form for aftageraftaler, som mange oprindeligt havde, men fordi der er erfaringer fra opbygning af kapacitet og skalering, fra finansieringsmodeller, og fra udvikling af reguleringen, så man fx nu kan placere energianlæg af den slags i landzonen.

Endelig vil en særlig dansk CO₂-beskatning af landbruget indirekte fremme CO₂-lagring med biokul, fordi den generelt vil fremme efterspørgslen efter klimavirkemidler, og fordi biokul i den forbindelse giver landbruget mulighed for en ekstra indtægt, der kan investeres i grøn omstilling.

DANSKE FORHOLD, DER HÆMMER MARKEDET

Som nævnt udstår stillingtagen i de danske regler til biokul, herunder hjemmel til at bruge biokul fremstillet af landbrugets rester. Af miljøbeskyttelseshensyn bør hjemlen supple-

res af grænseværdier for biokullets indhold. Der er samtidig flere godkendelsesprocesser, som ikke er tænkt i forhold til biokul og pyrolyse, og derfor aktuelt kræver individuel stillingtagen i hvert tilfælde lokalt. Det er tidskrævende, viden- og ressourcekrævende i de enkelte kommuner, og skaber risiko for lokal variation i udmøntningen.

9.4. Anbefalinger

En markedsføring af CO₂-lagring med biokul, der også kan levere til de politiske målsætninger for klimaet, kræver en indsats fra flere sider. Fra politisk hold i forhold til regulering og rammevilkår, fra markedsaktørerne i forhold til at fremskynde og etablere samarbejder, for producenterne i at opskalere produktionsmuligheder og effektivisere processerne, og fra forskerne i forhold til at etablere mere sikker viden og guide anvendelsen af biokul på forskellige områder.

VISION FOR MARKEDET FOR BOKUL

Danmark har potentiale til at blive en effektiv og cirkulær anvender af sine restbiomasser, som til slut nyttiggøres til grøn energi og CO₂-lagring i et omfang, hvor de naturlige emissioner fra landbruget og andre med uundgåelige udledninger kan kompenseres.

Samarbejdsformerne i værdikæden bag skal sættes i system, teknologien skal effektiviseres og skaleres, og flere anvendelsesområder for biokullene skal i spil.

TRE HOVEDANBEFALINGER

Markedet for biokul skal drives frem af en kombination af regulatorisk pres og muligheder, markeds-kabt finansiering af CO₂-lagring og mere sikker viden om effekterne.

For det første skal der være en klar hjemmel til at bruge biokul. Skal det være en løsning

for landbruget, skal biokullet kunne baseres på landbrugets rester og anvendes i landbruget. Hjemlen skal suppleres af grænseværdier for biokullets indhold, som indarbejdes i standardtests for produktionen. Her er flere eksisterende muligheder at trække på, hvor udgangspunktet af forsigtighedshensyn kunne være de mest strikse på tværs af gældende regler nationalt og internationalt.

For det andet er der behov for i markedets opstart at skabe en vis sikkerhed for, at udgifterne til CO₂-lagring kan dækkes. Selv om markedet for køb og salg af klimacertifikater er i vækst og på sigt kan være finansieringskilden, bør der ved hurtig opskalering i en periode være mulighed for CCS-støtte i stil med andre teknologier. Særligt når CO₂-lagringen med biokul er så god en samfundsøkonomisk investering, uden at alle gevinsterne når de aktører, der betaler for processen.

Og for det tredje bør teknologiudviklingen og brugen af biokul følges af forskere, så videngrundlaget samtidig styrkes over tid og løbende kan være guidende for den indledende rammeregulering. Videngrundlaget skal samtidig systematiseres og kategoriseres, så det kan danne grundlag for guidelines for brug af biokullet.

Se tabel 9.2 for overblik over, hvad der kan understøtte et marked for CO₂-lagring med biokul i Danmark.

HVEM SKAL INVESTERE I BOKUL?

Der er flere relevante investorer, når det drejer sig om den samlede pakke af energiproduktion, klimaeffekter og mulige miljøeffekter med en vis anlægsinvestering, som biokul udgør. Det kan være pensionskasser med en bæredygtig profil og lang horisont for udbygning af energisystem og -infrastruktur til klimaeffekter. Det kan være energiselskaber med blik

for mulige samlokalisering, virksomheder med væsentlige mængder af restbiomasser, fødevareproducenter og brændselsproducenter, som ønsker at bruge klimaaftrykket videre i deres produkter, landbruget selv, kommunale spildevandsanlæg og mange flere.

DE NÆSTE SKRIDT

Landbrugsaftalen fra 2021 stillede en strategi for udmøntning af det teknologiske potentiale i sigte, altså en pyrolysestrategi med opdaterede skøn for CO₂-potentialitet og med anvisning af konkrete veje til at udfolde det.

Strategien skulle være kommet i efteråret 2022, men blev bl.a. forsinket på grund af valget og ventes nu primo 2024. Desuden afventes forslag fra Ekspertgruppen for Grøn Skattereform ("Svarer-udvalget") til en model for CO₂-beskatning af landbruget. De klimamæssige incitamenter for landbruget skal ses på tværs af de to udspil, der efterfølgende skal forhandles politisk, og som vil sætte de afgørende rammer for markedet i Danmark og udviklingsmulighederne for CO₂-lagring med biokul.

CIP Fonden følger udviklingen og vil tage markedsmulighederne op på ny herefter i næste fase af fondens arbejde med biokul.

CIP FONDEN SER PÅ EKSPORTMULIGHEDER

CO₂-fangst og -lagring med biokul er ikke kun en teknologi for Danmark, for danske virksomheder og med muligheder for dansk landbrug. Det er også en teknologi, der er meget relevant for andre lande. CIP Fonden vil derfor i løbet af 2024 se nærmere på eksportmulighederne for dansk teknologi bag biokul og forretningsmodellerne til CO₂-lagring. Det er vigtigt, at Danmark er et foregangsland i Europa på markedsudvikling af grønne løsninger, der er rentable, implementerbare og skalerbare alt efter de enkelte landes ressourcer.

Tabel 9.2: Vejen til en mere effektiv CO₂-lagring med biokul

	Regulator 	Markedsaktører 	Forskere og videnspersoner 
Centrale anbefalinger	Etabler hjemmel for biokul af landbrugets sidestrømme Understøt opstart med CCS-støtte, der afløses af markedet for klimakreditter Etabler guidelines for brug af biokul i landbruget		
Generelle anbefalinger	- Start med rammeregulering og grænseværdier for biokullets indhold baseret på de mest strikse, nuværende grænser på tværs af forskellige reguleringer af forsigtighedshensyn, som så i takt med ny viden kan strammes eller lempes Tværministeriel task-force med fokus på hjemler og procesforenkling for hurtigere etablering af biokulproduktion - Udvikl metode til at opføre CO₂-lagringen netto med biokul i de nationale emissionsopgørelser, så lagringen også kan anerkendes og indregnes i forhold til politiske målsætninger - Inddrag udpegnig af relevante områder til pyrolyseanlæg i kombination med kommunernes nuværende opgave med at udpege egnede områder til biogasproduktion og energiparker for hurtigere etablering	- Udbred kendskabet blandt potentielle investorer til teknologien for at accelerere interessen - Etabler logistikkæder med mulighed for langvarige aftageraftaler (PPA'er) for biomasse og biokul - Accelerer skalering og læringsproces for at udvikle pyrolyseteknologien til storskala - Påbegynd udvikling af energiprodukter til højværdianvendelse og forbered mulig opgradering, metanisering og fremtidig koordination med PtX	Kategoriser forskningsresultater efter evidens, biomasse, pyrolyseproces og anvendelsesområde for at gøre indsigterne mere anvendelsesorienterede. - Igangsæt langvarige markforsøg og få overblik over langsigtede miljø- og agronomiske effekter af brug på landbrugsjord - Udvikl praksisviden for optimal brug af biokul og foretag erfaringsudveksling - Udvikl kompetenceudvikling, undervisningsaktiviteter og læringsredskaber til de mennesker, der skal udbygge, drive og myndighedsbehandle mv. processer omkring biokul
Specifikke anbefalinger	Sidestil pyrolyseanlæg med biogasanlæg i Planloven for at understøtte mulig placering i nærhed til restbiomasser - Understøt hurtigere miljøklassifikation af pyrolyseanlæg og dermed processen for miljøvurderinger med udgangspunkt i standardeksempler - Tilpas fosforlofterne ift. biokuls frigivelse over tid - Arbejd for at få CO₂-lagring med biokul i andre sektorer, fx byggebranchen, anerkendt i nationale emissionsopgørelser (via IPCC) - Lav standardproces for kommunale vurderinger og §19-godkendelser, indtil central regulering er klar - Etabler et "overensstemmelsesvurderingsorgan" til at godkende biokul med CE-mærkning som gødningsprodukt	- Udvikl metoder til markhåndtering af biokul (landbruget og materialeleverandører) - Udvikl kombination af biokul og andre gødningsprodukter for at opnå de bedste effekter	- Undersøg biokuls effekt på udvaskning af kvælstoffer fra jord til vandmiljø - Undersøg samspeilet bedre mellem biokul, jordtype og effekten på forskellige former for levende organismer i jorden under danske forhold

Kilder

Amonette et al (2021): *Biomass to Biochar – Maximizing the Carbon Value*, Report by Center for Sustaining Agriculture and Natural Resources, Washington State University, Pullman WA. Biomass to Biochar: Maximizing the Carbon Value | CSANR | Washington State University (wsu.edu) [Biomass to Biochar: Maximizing the Carbon Value | CSANR | Washington State University \(wsu.edu\)](#)

Azzi et al (2023): *On the durability of biochar carbon storage – a clarification statement from researchers*, Joint Statement præsenteret på Biochar Summit 2023 i Helsingborg, [On the durability of biochar carbon storage](#)

CIP Fonden (2024a): *Regulering mv. af biokul*, Baggrundsnotat nr. 1, januar 2024, [Regulering-mv-af-biokul-Baggrundsnotat-nr-1-CIP-Fonden-januar-2024.pdk \(cipfonden.dk\)](#)

CIP Fonden (2024b): *Hvad betyder en CO₂-afgift for landbruget for et kommende marked for CO₂ lagring med biokul?* Baggrundsnotat nr. 2, januar 2024, [Hvad-betyder-en-CO2-afgift-for-landbruget-for-et-kommende-marked-for-CO2-lagring-med-biokul-Baggrundsnotat-nr-2-CIP-Fonden-januar-2024.pdk \(cipfonden.dk\)](#)

CIP Fonden (2024c): *Mulige miljøeffekter af biokul*, Baggrundsnotat nr. 3, januar 2024, [Mulige-miljøeffekter-af-biokul-Baggrundsnotat-nr-3-CIP-Fonden-januar-2024.pdk \(cipfonden.dk\)](#)

CIP Fonden (2024d): *Forretningsmodeller og værdikæder bag biokul*, Baggrundsnotat nr. 4, januar 2024, [Forretningsmodeller-og-værdikæder-bag-biokul-Baggrundsnotat-nr-4-CIP-Fonden-januar-2024.pdk \(cipfonden.dk\)](#)

CIP Fonden (2024e): *Hvad gør andre lande ift. biokul?* Baggrundsnotat nr. 5, januar 2024, [Hvad-gør-andre-lande-ift-biokul-Baggrundsnotat-nr-5-CIP-Fonden-januar-2024.pdk \(cipfonden.dk\)](#)

CONCITO (2023): *Danmarks globale forbrugsudledninger*, rapport august 2023 støttet af VELUX Fonden, [Danmarks globale forbrugsudledninger.pdf \(concito.dk\)](#)

Danmarks Naturfredningsforening: *CO₂-afgift på landbruget, CO₂-afgift - hvad skal vi med det? - Danmarks Naturfredningsforening*

Det Nationale Bioøkonomipanel (2022): *Anbefalinger - Bioressourcer til grøn omstilling*, 28. september 2022, [Microsoft Word - Anbefalinger om bioressourcer til grøn omstilling_28092022_MASTER.docx \(fvm.dk\)](#)

EA Energianalyse (2024): *Analyse af samfundsøkonomiske effekter ved biokul*, analyse udarbejdet for CIP Fonden, januar 2024, [EA Energianalyse for CIP Fonden](#)

EBI (2023): *European Biochar Market Report 2022-2023*, European Biochar Industry, marts 2023, [European Biochar Market Report 2022/2023 \(biochar-industry.com\)](#)

EEA (2021): *Costs of air pollution from European industrial facilities 2008–2017*, European Environmental Agency, ETC/ATNI, juli 2021, [Counting the costs of industrial pollution – European Environment Agency \(europa.eu\)](#)

Elsgaard L., Adamsen S. A. P., Henrik B. Møller B. H., Winding A., Jørgensen U., Mortensen Ø. E., Arthur E., Abalos D., Andersen N. M., Thers H., Sørensen P., Dilnessa A. A. & Elofsson K. (2022): *Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture*, DCA rapport nr. 208, september 2022 (Vidensyntese om anvendelse af biokul i dansk landbrug), [Få mere viden om, hvordan vi kan bruge biokul i dansk landbrug \(au.dk\)](#)

Energistyrelsen (2023): *Klimastatus- og fremskrivning 2023*, Sektorforudsætningsnotat: Priser og vækst, [Klimastatus og -fremskrivning 2023 | Energistyrelsen \(ens.dk\)](#)

ESPP (2023): *European Sustainable Phosphorus Platform - ESPP eNews no.81*, december 2023, [ESPP eNews \(phosphorusplatform.eu\)](#)

EU COMMISSION (2022): *CARBONCAPS - Efficient and verifiable carbon removal with ecosystem co-benefits*, [CARBONCAPS - Efficient and verifiable carbon removal with ecosystem co-benefits. | CARBONCAPS | Project | Fact sheet | HORIZON | CORDIS | European Commission \(europa.eu\)](#)

EU Kommissionen (2021): *EU's jordbundsstrategi for 2030. Udnyttelse af fordelene ved en sund jordbund for mennesker, fødevarer, natur og klima*, [COM_2021_699_1_EN_ACT_part1_VERSION FRIDAY EVENING LUCAS \(europa.eu\)](#)

EU COMMISSION (2019): *Germany's Tierpark Berlin uses biochar to reduce waste and carbon emissions*, [Info regio - Germany's Tierpark Berlin uses biochar to reduce waste and carbon emissions \(europa.eu\)](#)

FAO (2020): *State of Knowledge of Soil Biodiversity - Status, challenges and potentials*, [State of knowledge of soil biodiversity - Status, challenges and potentialities, Full Report \(fao.org\)](#)

Greenmatch (2023): Så meget bruger du i CO₂, når du rejser, [Se hvor stort dit CO₂-udslip er, når du rejser | GreenMatch](#)

IEA (2022): World Energy Outlook 2022, [World Energy Outlook 2022 – Analysis - IEA](#)

IPCC (2022): Climate Change 2022 – Mitigation of Climate Change, Summary for Policy Makers, [Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change \(ipcc.ch\)](#)

IPCC (2022b): Climate Change 2022 – Mitigation of Climate Change, Technical Questions, [Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change \(ipcc.ch\)](#)

IPCC (2022c): Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. IPCC Sixth Assessment Cycle (AR6), IPCC Working Group III, [AR6 Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change – IPCC](#)

Klima-, energi- og forsyningsministeriet (2022): Klimaprogram 2022, [Klimaprogram 2022.pdf \(kefm.dk\)](#)

Klima-, energi- og forsyningsministeriet (2022b): Virkemiddelkatalog til Klimaprogram 2022, [Cover \(kefm.dk\)](#)

Klimarådet (2023): CO₂-pris i offentlige projekter konsistent med 70 pct. målet, [CO₂-pris i offentlige projekter konsistent med 70-procentsmålet | Klimarådet \(klimaraadet.dk\)](#)

Klimarådet (2022): Statusrapport 2022, [statusrapport_2022_webpdf_final.pdf \(klimaraadet.dk\)](#)

Miljøbeskyttelsesloven (paragraph 19), [Miljøbeskyttelsesloven § 19 \(danskelove.dk\)](#)

Nasdaq: Carbon Removal Marketplace, del af CORCCHAR index

Nielsen, O.K. (2022): Indregning af Carbon Capture and Storage, Carbon Capture and Use og biokul i de nationale emissionsopgørelser, Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, Notat nr. 2022|15, [Indregning af Carbon Capture and Storage. Carbon Capture and Use og biokul i de nationale emissionsopgørelser \(au.dk\)](#)

NIRAS (2023): Kortlægning af biomasser til biokul og CO₂-potentialer, Analyse udarbejdet for CIP Fonden, 1. juni 2023, [NIRAS-biomasse-rapport-til-udgivelse.pdf \(cipfonden.dk\)](#)

Nordregio (2018): Stockholm Biochar Projekt, [Stockholm Biochar Project | Nordregio](#)

Pacific Northwest Biochar Atlas: Cost Benefit Analysis, [Biochar Cost-Benefit Analysis Tool](#)

Poulsen et al (2019): Fosfor i dansk landbrug – resource og miljøudfordring. En fosforvidensyntese, Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø & Energi, juni 2019, [Fosfor_folder.pdf \(au.dk\)](#)

Precedence Research (2022): Biochar Market – Global Industry Analysis, 2022, <https://www.precedenceresearch.com/biochar-market>

Puro.earth: Hjelsäters Egendom, [Stockholm Biochar Project | Nordregio](#)

Sanei et al (2024): Assessing biochar's performance: An inertinite benchmark, International Journal of Coal Geology, vol. 281, januar 2024, [Assessing biochar's permanence: an inertinite benchmark – GEUS' publikationer](#)

Schmidt et al (2022): Permanence of soil applied biochar, the Biochar Journal 2022, December 2022, [tBJ:Permanence of soil applied biochar \(biochar-journal.org\)](#)

Schmidt et al (2021): 55 uses of biochar, [tBJ:The 55 uses of biochar \(biochar-journal.org\)](#)

Scmidt, H.P. and N. Hagemann (2021): 400.000 Pyrolysis Plants to Save the Climate, the Biochar Journal 2021, Arbaz, Switzerland, [tBJ:400.000 Pyrolysis Plants to Save the Climate \(biochar-journal.org\)](#)

Smith, B., Loll-Webster, J., Gray, M., Seman-Varner, R. 2023. NRCS Biochar Funding for US Producers –A Quick Guide. United States Biochar Initiative, [NRCS Biochar Funding for US Producers A Quick Guide_Final_JFINAL_V1docx \(biochar-us.org\)](#)

SEGES Innovation (2023): Analyse af mulighederne for at forretningsgøre CO₂-lagring i biokul, Analyse udarbejdet for CIP Fonden, november 2023, [Analyse-af-mulighederne-for-at-forretningsgøre-CO2-lagring-i-biokul-SEGES.pdf \(cipfonden.dk\)](#)

Stiesdal SkyClean: SkyClean biokul, Hvidbog november 2023, [SkyClean biokul \(stiesdal.com\)](#)

Thomsen et al. (2023): Styrket grundlag for vurdering af klimaeffekter ved pyrolyse af tre forskellige typer af biomasse til biokul, Analyse udarbejdet af RUC-IMT for CIP Fonden, Maj 2023, [PowerPoint Presentation \(cipfonden.dk\)](#)

Thomsen, T. (2022). Introduction to Production and Use of Biochar 2022: working towards a more circular and bio-based Danish economy. Roskilde Universitet, [TP Thomsen \(2022\) Production and Use of Biochar DK 2022](#)

USBI: Biochar then & now, [Biochar Then & Now | US Biochar Initiative \(biochar-us.org\)](#)

Videnskab.dk (2020): 7 måder, vi kan trække CO₂ ud af atmosfæren på, [7 måder, vi kan trække CO₂ ud af atmosfæren på \(videnskab.dk\)](#)

Videnskab.dk (2021): Verdensomspændende studie: Landbruget står for 35 procent af al vores udledning af drivhusgasser, [Verdensomspændende studie: Landbruget står for 35 procent af al vores udledning af drivhusgasser \(videnskab.dk\)](#)

Bilag A. Dansk biokulproduktion

A.1. Oversigt over pyrolyseanlæg i Danmark

Der er aktuelt omkring 12 pyrolyseanlæg (eller tilsvarende) i Danmark., som enten er etableret eller under opførelse, og som kan producere biokul. Det giver en forventet, samlet produktionskapacitet på lidt under 50 MW. Anlæggene vurderes efter indkøring at have kapacitet til at kunne producere biokul svarende til en nettolagring på lidt over 45.000 ton CO₂. Oplysningerne er baseret på information fra producenterne samt de viste kilder. Det bemærkes, at kapaciteten hos test- og demonstrationsanlæg ikke nødvendigvis udnyttes fuldt ud, ligesom ikke alle forskningsbaserede og test- og demonstrationsanlæg fremgår af listen.

Biomasse	Hvor/ producent	MW	Biokul (ton pr. år)	CO ₂ -lagring i biokul (ton pr. år)	Beskrivelse	Kilder
Halm	Brædstrup (SkyClean)	0,2	145	280	Fulldautomatisk pyrolyse-testanlæg på 200 KW, der kan behandle 500 ton landbrugsaffald og producere biokul med en CO ₂ -reduktion på knap 600 ton årligt.	Stiesdal SkyClean Pressemeddelelse-Stiesdal-indvier-nyt-Sky-Clean-anlaeg-18.08.21.pdf
Halm (og gylle)	Skive (SkyClean)	2	1.400	3.000	Demonstrationsanlæg på 2 MW for pyrolyse (maj 2022) støttet af EUDP.	Stiesdal SkyClean Laboratoriet for fremtidens grønne løsninger Green Power Denmark
Hønsemøg og halm	Horsens (Springkilde Bio/ Frichs Pyrolysis)	3	900	3.000	Flash-pyrolyse (hurtig opvarmning til 800 grader) med henblik på især udvinding af gas, men også biokul. Forventet kapacitet på 15 ton biomasse i døgnet. Projektet omfatter også en biokulnedfælder. Forventet drift medio 2024.	Frichs Pyrolysis Stiesdal, Dall Energy og Frichs Pyrolysis får knap 200 millioner klimakroner til udvikling (energy-supply.dk)
Gylle og afgassede restfibre fra biogasanlæg	Vrå (SkyClean)	20	14.000	26.000	Planlagt produktionsapparat for pyrolyse på 20 MW primo 2024, der kan behandle 400.000 ton restfibre fra biogasanlæg om året og producere 14.000 ton biokul, hvor produktionen kan understøtte en årlig CO ₂ -reduktion på min. 40.000 ton i såvel lagring som undgåede emissioner. Innovationsprojekt som del af Energy Cluster Denmark og med støtte fra pyrolysepuljen, bl.a. for at blive klogere på skaleringen.	Stiesdal SkyClean Stiesdal-pressemeddelelse-om-tildeling-af-midler-fra-Pyrolysepuljen-28.06.22.pdf
Spildevandsslam	Fårevejle (AquaGreen)	0,7	400	500	Odsherred Forsyning har etableret et tørrings- og pyrolyseanlæg med en kapacitet på 3.850 ton spildevandsslam årligt, (850 ton tørstof) som resulterer i ca. 400 ton biokul med CO ₂ e-lagringsevne på 490 ton og med CO ₂ e emissioner reduceret med 2.400 ton pr. år. Pyrolyse omkring 650 grader.	AquaGreen https://e-magasin.stf.dk/shared/spread/spildevand-2022-10-21-p60-61/jlfdalGB

Spildevandsslam	Søndersø (AquaClean og VandCenterSyd)	0,7	400	500	Rensnings- og produktionsanlæg (oktober 2021) med en kapacitet på 4.300 ton biomasse årligt (lidt mere end den samlede mængde biogødning fra nordfynske anlæg).	AquaGreen Pyrolyse forvandler slam til bæredygtig gødning Slam bliver til bæredygtig gødning – når vi snart sætter strøm til et nyt anlæg på Søndersø renseanlæg. Projektlederne Per og Niels præsenterer det... By VandCenter Syd Facebook
Spildevandsslam (Mikrobølge-assisteret pyrolyse, MAP)	Skive (Organic Fuel Technology)	2	1.200	1.500	Demonstrationsanlæg, der med anvendelse af en patenteret mikro-bølgeteknologi bearbejder 10.000 tons spildevandsslam årligt / 400 kg tørstof fra spildevandsslam i timen. Produkterne er bioolie og biokul. Anlægget er under etablering i GreenLab Skive med forventet idriftsættelse Q3-Q4 2025.	Organic Fuel Technology https://www.organicfueltechnology.com/oft-construct-plant-at-greenlab/ https://www.greenlab.dk/knowledge/new-partner-to-produce-green-fuel-in-green-lab-with-new-technology/
Spildevandsslam	Harbøre Forgasseren	0,1	1	1	Varmeværk i Harbøre, som har produceret i flere år. Værket er ejet af B&W Vølund.	Harbøre Varmeværk A.m.b.A. (harvarme.dk) Træbjævre og gas holder Harbøre varm - Skovdyrkerne
Spildevandsslam	Lemvig (Lemvig Vand og AquaGreen)	0,7	400	500	Anlægget er under produktion og skal opføres af AquaGreen på Harbøre Renseanlæg i starten af 2024.	AquaGreen AquaGreen-anlæg i Lemvig - Nyheder - Automatik & Proces - Dit tekniske fagblad inden for automation og processteknik
Spildevandsslam	Tårnby (Tårnby Forsyning og AquaGreen)	1,4	800	1.000	Første spadestik blev taget i oktober 2023. Forventes klar til brug fra 2025. Anlægget bliver det første HECLA 1.500 i Danmark og det fjerde damptørings- og pyrolyseanlæg fra AquaGreen i Danmark.	AquaGreen Pyrolyseanlæg (taarnby.dk)
Restfibre fra biogasanlæg	Vrejlev (Vrejlev Biogas/ Frichs Pyrolysis)	6	2.400	6.000	Pyrolyseanlæg integreret med Vrejlev Biogas ApS med forventet drift fra 2. kvartal 2024 med daglig produktion af 8 ton biokul baseret på 30 ton tørrede gyllefibre. Støttes af GUDP-midler på 14½ mio. kr. til etablering. Projektet omfatter også optimering af opholdstid i biogasreaktor inden udtag til pyrolyse.	Frichs Pyrolysis Hjørring - Etablering af pyrolyseanlæg på Vrejlev Bioenergi - Hjørring Kommune (niras.dk)
Forskellige biomasserester	Esbjerg (DIN Forsyning, Dall Energy)	12	8.000	4.000	Storskalapyrolyseanlæg. Anlægget vil få en kapacitet på op til 65.000 ton slam og landbrugsprodukter om året. Anlæg forventes færdigt i 2026 med en samlet klimaefekt på 16.500 ton CO ₂ e, inkl. lagring, fortrængning og undgåede emissioner. Har modtaget støtte fra pyrolysepuljen på 51,4 mio. kr. Virksomheden producerer også andre biomasseanlæg til fjernvarme med særlig patentret for gasningsteknologi, men uden biokul produktion.	Dall Energy Ny teknologi til gavn for klima og miljø: Dall Energy går forrest med levering af nyt, innovativt pyrolyseanlæg (danskervherv.dk) https://dallenergy.com/en_gb/bio-mass-projects/

Bilag B. Antagelser bag business cases

B.1. Oversigt over markeds antagelser - Antagelser brugt på tværs af analyserne

Parameter	Antagelse	Kilde	Kommentar
El priser	• Forbrugsvægtede el priser	• Energistyrelsens Klimastatus og – fremskrivning 2022	• 2% inflation – real 2021
Varme-priser	• 375 DKK/MWh	• Skøn baseret på input fra bl.a. Stiesdal	• Prisen på varme eksport vil variere fra projekt til projekt. Samme pris også antaget for overskudsgas i case 4
Biolie priser	• 600 DKK/MWh	• Baseret på dialog med potentielle brugere om afsætning til minimum 600 DKK/MWh	• Baseret på forventede bio-crude oil priser (tillagt forventet prisudvikling jf. Energistyrelsen for alm. råolie)
Biokul afsætnings pris	• 0 kr / ton • [1.000 kr. / ton som alternativ]	• Skøn baseret på input fra bl.a. AquaGreen	• Det antages som udgangspunkt, at biokullet ikke sælges som produkt, men at kulstofindholdet kan sælges via en klimakredit
Halm input-pris	• 550 kr. / ton	• Energistyrelsens Klimastatus og – fremskrivning 2022	• Markedsudviklingen kan indebære stigende priser på halm over tid, da halmrester er efterspurgt og har konkurrerende formål
Spildevandsslam - "gate fee"	• 350 kr. / ton • Højere skøn baseret på casen	• Miljøstyrelsen	• Pt. betaler spildevandsanlæg landmænd for at aftage spildevandsslam til udbringning på markerne. Betalingsvilligheden kan stige, såfremt processen stabilt kan fjerne PFAS fra slammet.
Restfibre fra biogas input-pris	• 0 kr. / ton	• Skøn baseret på input fra bl.a. Stiesdal	• Pga. samlokalisering med biogasanlæg antages restfibre at kunne aftages uden beregning.
Inflation	• 2%	• Nationalbanken	• Baseret på langsigtet væksts-køn
Skattesats	• 20%	• Skattestyrelsen	
Biokuls udbringnings pris	• 50 DKK/t biokul	• Skøn baseret på input fra bl.a. Stiesdal	• Transportomkostninger fra anlægget til marken/videre distribution
Certificerings omkostning	• 160 DKK/t biokul	• Skøn baseret på input fra bl.a. Stiesdal	• Omkostning for certificering af, at biokullets indhold og placering lever op til klimakreditens standarder
Biokul oplagring	• 22 DKK/t biokul	• Skøn baseret på input fra bl.a. Stiesdal	

B.2. Stiesdal SkyClean Introduktion

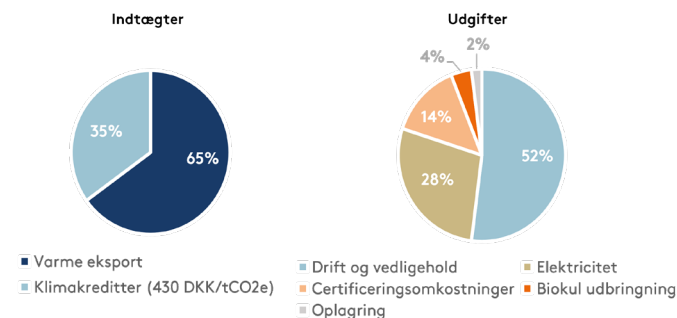
Teknologien	- Stiesdal har udviklet en pyrolyse teknologi kaldet SkyClean, hvor de har til hensigt at omdanne landbrugsaffald til biokul og pyrolysegas. - Det første kommercielle 20 MW anlæg er ved at blive bygget i Vrå, Danmark.
Teknologien	- Biokullet, som bliver dannet ved pyrolyse af biomassen, binder en mængde kulstof, og dermed undgår man at frigive denne kulstof til atmosfæren som CO₂. Da brændslet er anset som CO₂ neutralt vil et SkyClean anlæg anses som at have negativ CO₂-udledning. - Pyrolysegassen kan bruges til flere formål fx som varmekilde til tørring eller yderligere bearbejdning til f.eks. bioolie eller biogas.
Produktion	- Et 20 MW indfyret SkyClean anlæg vil årligt producere¹⁾ - Ca. 14 kt biokul svarende til ca. 26 kt CO₂e (100 års effekt) - Ca. 68 GWh pyrolysegas - Ca. 40 kt CO₂e samlet klimateffekt
Biomasse	SkyClean-teknologien kan bruge en række forskellige brændsler inklusiv biogas digestat, landbrugsaffald og træaffald.
Økonomiske fordele	- Da et SkyClean anlæg anses for at have negativ CO₂ udledning vil den mængde CO₂ der er lagret i biokullet kunne sælges som CO₂ kreditter på et frivilligt CO₂ kredit marked²⁾ - Stiesdal arbejder på at bearbejde pyrolysegasen således, at den i fremtiden kan bruges til at producere forskellige brændstofprodukter som fx bioolie, biobrændstof til transport og SAF. - Overskudsvarmen produceret i processen kan sælges til nærliggende industri eller fjernvarmenet.

1) Produktionstal er afhængig af indfyret brændsel 2) Kulstof lagret i biokul kan sælges på det frivillige CO₂-kredit marked.

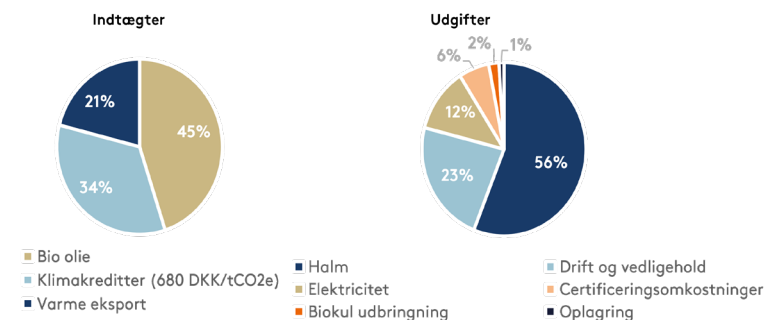


Kilde: Stiesdal.com

Business case: Restfibre fra biogas (Digestat)



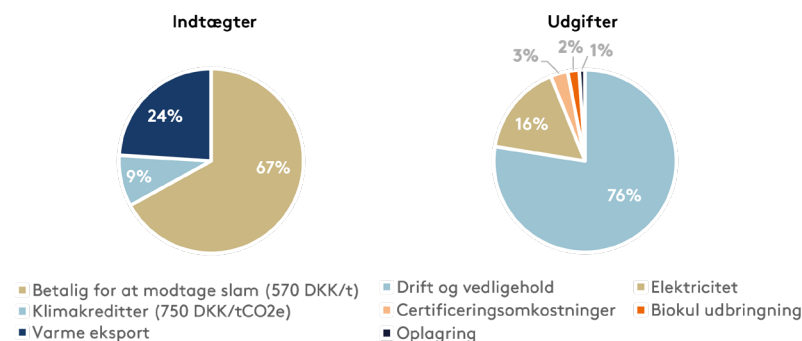
Business case: Halmrester



B.3. AquaGreen HECLA Setores Introduktion

Teknologien	- AquaGreen har udviklet en pyrolyse teknologi kaldet HECLA Setores, som de har specialiseret til at omdanne spildevandsslam til pyrolysegas til eget forbrug og biokul. - Deres første kommercielle anlæg er et HECLA Setores 1000 (ca 0,7 MW) som er i drift i Fårevejle.	
Teknologien	- Biokullet, som bliver dannet ved pyrolyse, binder en mængde kulstof og dermed undgår man at frigive denne kulstof til atmosfæren som CO₂. Da brændslet er anset som CO₂ neutralt, vil et HECLA Setores anlæg have negativ CO₂-udledning. - Pyrolysegasen bruges som varmekilde til intern tørring af spildevandsbrændslet.	
Produktion	- Et 2.6 MWth HECLA Setores indfyret anlæg vil årligt kunne producere ca.¹⁾ – 1.764 t biokul svarende til 2.375 t CO₂e – 8.800 MWh Varme	
Brændsel	HECLA Setores teknologien kan bruges til en række forskellige typer slam, men har bl.a. fået certificeret at det kan fjerne PFAS indholdet i spildevandsslam.	
Økonomiske Fordele	- Da et HECLA Setores anlæg anses for at have negativ CO₂-udledning, vil den mængde CO₂, der er lagret i biokullet, kunne sælges som CO₂ kreditter på et frivilligt CO₂-kredit marked²⁾ - Der er på nuværende tidspunkt tilknyttet en "tipping-fee" for spildevandsslam, som betyder, at rensningsanlæg betaler firmaer for at tage imod deres spildevandsslam. En større premium er gældende for PFAS-holdigt slam. - Overskudsvarmen produceret i processen kan sælges til nærliggende industri eller fjernvarmenet.	

Business case: Spildevandsslam



1) Produktionstal er afhængig af indfyret brændsel 2) Kulstof lagret i biokul kan sælges på det frivillige CO₂-kredit marked.