

Prosjektnotat

Utvikling og implementering av biokull som klimatiltak i Norge

CAPTURE+: Forslag til tiltak og løsninger

VERSJON

1.0

DATO

2017-08-31

FORFATTER(E)

Maria Kollberg Thomassen, Adam O'Toole, Erik Joner, Roman Tschentscher, Pia Otte, Jostein Vik, Jostein Brobakk, Svein Horn, Lars Vik, Trond Halvorsen

OPPDRAAGSGIVER(E)

Norges forskningsråd

OPPDRAAGSGIVERS REF.

238850/E50

PROSJEKTNR

102007172

ANTALL SIDER:

24

SAMMENDRAG

For å møte klimamålene er det behov for å binde karbon for å redusere konsentrasjonen av klimagasser i atmosfæren. Biokull er en teknologi for karbonfangst og -lagring som innebærer at biomasse, gjerne restprodukter fra jord- og skogbruk, omvandles til stabilt karbon som kan blandes i jord. Biokullteknologi gjør det mulig å utnytte fotosyntesen til å fange betydelige mengder CO₂ fra atmosfæren og lagre det på en varig måte i jord på en skala som kan bidra til å bremse global oppvarming. Forskningsprosjektet CAPTURE+ har som mål å bidra til utviklingen av biokullsystemer for et nullutslippssamfunn. Prosjektet foreslår tiltak for videre utvikling og implementering av biokull i norsk landbruk innenfor fire områder; fremstilling av biokull, agronomiske effekter, økonomiske vurderinger og aksept blant bønder. Muligheter for potensielle brukere og andre interessenter pekes ut for å bidra til videre utvikling og innføring av biokull i norsk landbruk.

UTARBEIDET AV

Maria Thomassen

SIGNATUR**GODKJENT AV**

Tore Nilssen

SIGNATUR**PROSJEKTNOTAT NR**

1

GRADERING

Åpen

Innhold

1	Innledning	3
1.1	Biokull som klimatiltak	3
1.2	Forskning for bærekraftig biokull i norsk landbruk.....	4
2	Fremstilling av biokull	6
2.1	Biomasse til biokullproduksjon	6
2.2	Pyrolyse.....	6
2.3	Forbehandling av biomasse	7
2.4	Integrering av bio- og nano-teknologi	8
2.5	Energifordeling under pyrolyse.....	8
3	Agronomiske effekter av biokull.....	9
3.1	Råstoff og egenskaper	9
3.2	Effekter av biokull i jord i Norge og internasjonalt.....	10
3.3	Anbefalinger til bønder	12
3.4	Andre klimagasseffekter enn karbonlagring.....	12
4	Økonomisk vurdering og samfunnsøkonomisk lønnsomhet.....	14
4.1	Kostnadsbildet for biokull	14
4.2	Fordeler og gevinster	16
4.3	Samfunnsøkonomisk lønnsomhet	16
4.4	Oppsummering av økonomiske forhold	18
5	Aksept for biokull blant norske bønder.....	18
5.1	Bondens rolle for biokullproduksjon på ulik skala	18
5.2	Viktige faktorer for biokullimplementering	19
6	Avsluttende refleksjoner	21
7	Referanser.....	23

1 Innledning

1.1 Biokull som klimatiltak

Det grønne skiftet handler dels om å redusere utslipp av klimagasser ved å benytte fornybare kilder til energi og materialer, men også om binding av karbon for å redusere konsentrasjonen av klimagasser i atmosfæren. På global basis bindes hvert år 55 milliarder tonn karbon gjennom fotosyntesen. Denne bindingen står i balanse med nedbryting av dødt plantemateriale der karbonet frigjøres som CO₂. For å øke bindingen av karbon i jord eller stående skog kreves betydelige endringer i praksis innenfor jordbruk og skogbruk.

En jordbrukspraksis som kan bidra til at dette regnskapet går i retning av mer langtidsbundet karbon i jord går på omdanning av biomasse til biokull. Biokull er trekull produsert fra biomasse (Figur 1), og er en effektiv måte å binde karbon på som utnytter restprodukter i jord- og skogbruk. Produksjon av biokull ved hjelp av pyrolyse omdanner biomasse til stabilt karbon som mikroorganismer i jord i svært liten grad klarer å bryte ned. Biokullet som blandes i matjord blir derfor værende i jorden i flere hundre år. Biokullteknologi gjør det mulig å fange betydelige mengder CO₂ fra atmosfæren og å lagre karbonet stabilt, noe som kan bidra til å bremse global oppvarming.



Figur 1 Biokull

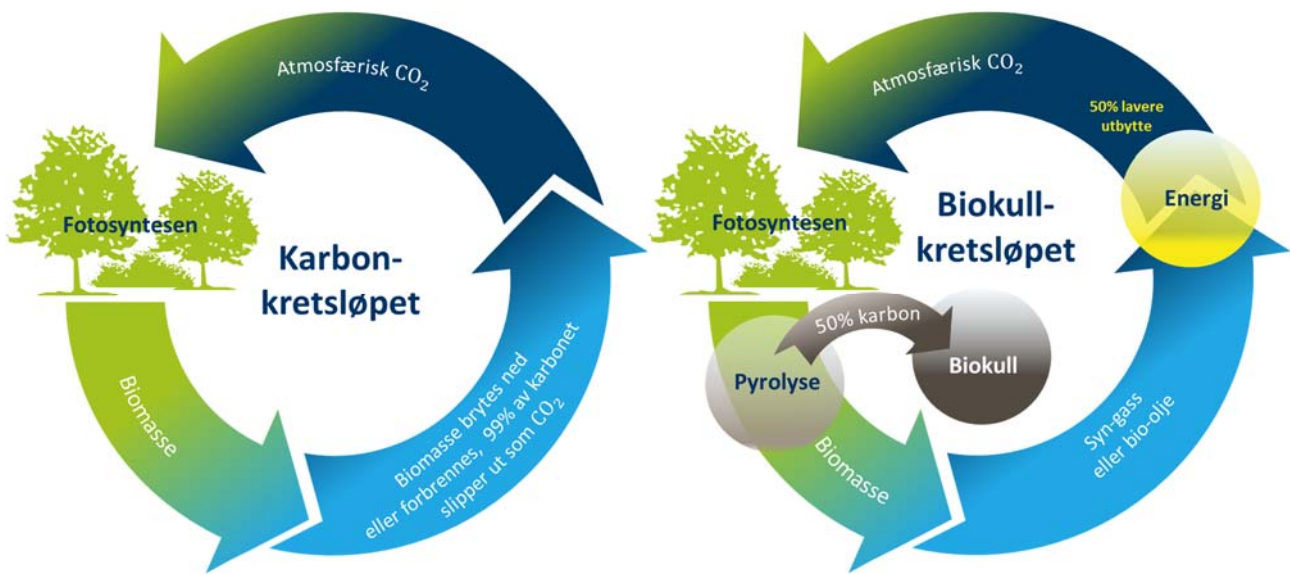
Biokull er vurdert som et konkurransedyktig tiltak for karbonfangst- og lagring både globalt¹ og i Norge². I teorien vil biokull kunne bidra til en global reduksjon på 1 800 millioner tonn (Mt) CO₂ per år, noe som tilsvarer 12 % av dagens menneskeskapt utslipp³. I den norske landbrukssektoren kan biokull potensielt redusere klimagassutslippet med 40 % innen 2030. Ved å omdanne 1 million m³ jordbruksavfall, som halm og andre planterester, og 1 million m³ skogsavfall til biokull og pløye dette ned i jorda kan man oppnå en langvarig binding av mer enn 2 Mt CO₂. Til sammenligning er det totale klimagassutslippet fra norsk landbruk på 4,5 Mt CO₂ per år.⁴ 2 Mt utgjør mer enn hele utslippsreduksjonen på 40 % som det norske landbruket må å kutte for å overholde Norges del av Paris-avtalen som også inngår som en del av EUs klimapolitikk.

¹ Smith, 2016

² Klima og forurensningsdirektoratet, 2010

³ Woolf, et al., 2010

⁴ SSB, 2017. (<https://www.ssb.no/klimagassn/>). Endelige tall for 2015.



Figur 2 Kretsløpet til karbon og biokull⁵

I tillegg til å fange og lagre karbon, har biokull positive effekter på jord som burde gjøre dette til en attraktiv teknologi for norske bønder. God jord skal ha evne til å holde på vann og næring, og den skal være et godt sted for planterøtter og gunstige jordorganismer. Disse egenskapene ved jord er sterkt avhengig av jordas humusinnhold. Biokull virker på samme måte som humus; det øker jordas evne til å holde på vann og næringsstoffer, det gjør jorda mer porøs og det øker aktiviteten og mengden av gunstige jordorganismer. I tillegg inneholder biokullet en del plantenæringsstoffer og det gir en kalkningseffekt som de fleste typer norsk jord kunne ha godt av.

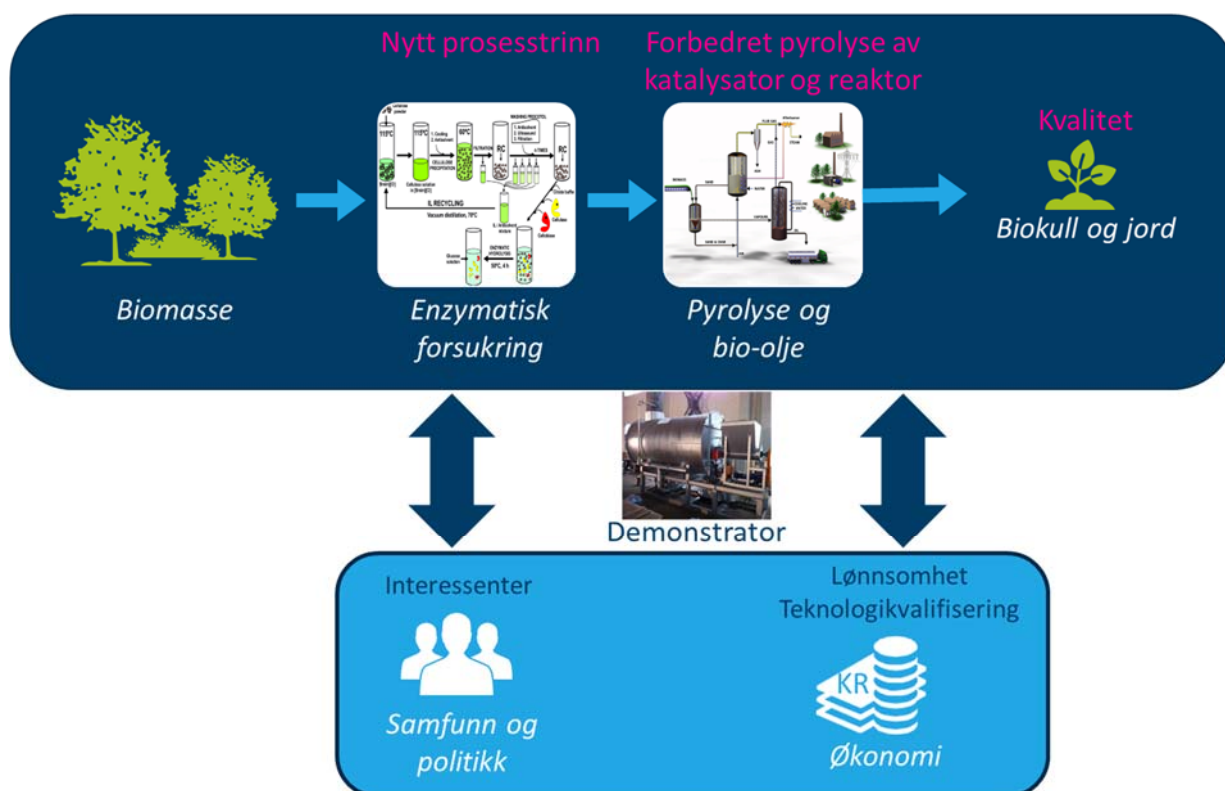
1.2 Forskning for bærekraftig biokull i norsk landbruk

Internasjonal forskning på biokull har eksplodert de siste ti år, og det finnes en stor mengde publiserte studier. Tradisjonelt har hovedfokus vært på jordforbedrende egenskaper ved biokull. Med økende fokus på klima har forskningen på biokull som klimatiltak blitt mer aktuell. Flere Europeiske forskningsprosjekter er satt i gang de senere år, og i Norge er også forskning på biokull i vekst. De første feltforsøkene med biokull i Norge startet i 2010 i regi av Bioforsk (nå Nibio).

Selv om både fordelene med og teknologien for å fremstille og bruke biokull er kjent, har biokull ennå ikke blitt tatt i bruk i større skala i Norge. Noe av forklaringen på dette er at eksisterende teknologi er umoderne eller umoden, at biokull ikke er lønnsomt på kort sikt, at bønder har lite kunnskap om hvordan de kan bruke biokull, og at gjødslings- og jordforbedringseffekten på vanlige norske jordtyper er liten sammenlignet med næringsfattige jordtyper med lite humus, slik man finner det lengre sør.

I det tverrfaglige forskningsprosjektet CAPTURE+ er målet å utvikle systemer for biokull som bidrag til nullutslippssamfunnet (Figur 3). Prosjektet skal utvikle prosesser for å fremstille biokull. Bruk av bioteknologi og nanoteknologi kan bidra til å øke verdien på biokull og andre biprodukter. Forskingen handler også om vurderinger knyttet til jordkvalitet, økonomi, og sosiale og politiske faktorer som er avgjørende for implementering av biokullsystemer i norsk landbruk. Et demonstrasjonsanlegg vil bidra til økt bevisstgjøring og engasjement blant interessenter og potensielle brukere, noe som er sentralt for videre spredning av biokullteknologi.

⁵ Basert på McLaughlin and Pyle (2016)



Figur 3 Forskningsområder i CAPTURE+

Mer spesifikt tar forskningsprosjektet for seg:

- **Teknologiutvikling og systemdesign for fremstilling av biokull og andre biprodukter**
 - Forbehandling av biomasse. Hvordan kan enzymatisk forsukring av biomasse bidra til økt utnyttelse av biomasse for andre høyverdi produkter samtidig som man produserer biokull?
 - Katalysator. Hvordan kan ulike materialer brukes for å forbedre pyrolyseprosessen?
 - Biokullkvalitet. Egenskaper som sikrer karbonstabilitet i norsk jord. Effekter på jordkvalitet (jordfysiske egenskaper, næringsstoffer, jordbiologi).
- **Bærekraftig implementering av biokull i norsk landbruk**
 - Økonomiske vurderinger og lønnsomhet, inkl. vurdering av miljø- og klimaeffekter.
 - Sosiale aspekter knyttet til brukeraksept, utnyttelse av teknologi og praksis.
 - Politiske insentiver og virkemidler som kan bidra til økt spredning.
- **Demonstrasjon av produksjon og bruk av biokull for å bidra til læring, bevisstgjøring og kunnskapsspredning.**

En viktig del av prosjektet er å formidle kunnskap om biokull til et bredt publikum, fra brukere til politikere. Hensikten er å presentere hovedfunn fra forskningen i CAPTURE+, med spesiell vekt på løsningsforslag for norsk landbruk. Forslaget presenterer ulike scenarier for innføring i stort omfang der anleggene som benyttes kan operere på liten, medium eller stor skala. For norsk landbruk vil det trolig være gunstig å etablere lavterskelsystemer i mindre skala først, for å gjøre teknologien mer kjent og øke tilgjengeligheten. Ved større produksjonsvolum vil investering i storskala infrastruktur være nødvendig, gjerne med synergieffekter fra eksisterende anlegg for bioenergi produksjon og andre stordriftsfordeler.

Prosjektet foreslår tiltak og løsninger for videre utvikling og implementering av biokull i norsk landbruk. Forslagene presenteres innenfor fire områder; fremstilling av biokull, agronomiske effekter, økonomiske vurdering og aksept blant bønder. Målet er å peke ut noen viktige muligheter for biokull i Norge for potensielle brukere og andre interessenter, som kan bidra til videre utvikling og innføring i norsk landbruk.

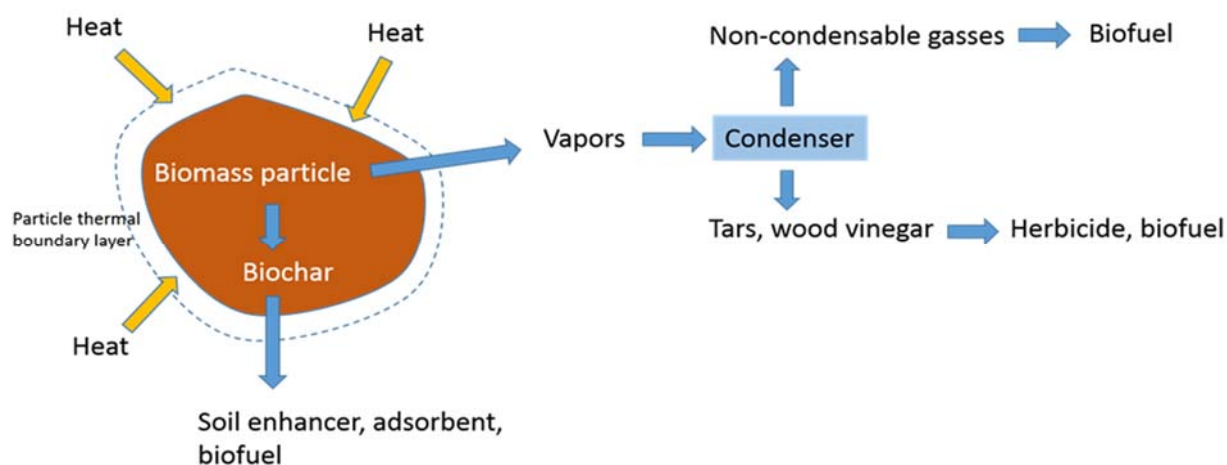
2 Fremstilling av biokull

2.1 Biomasse til biokullproduksjon

I prinsippet kan alle typer biomasse omdannes til biokull. For noen anvendelser, som f.eks. brensel og reduksjonsmiddel i metallindustrien, må man benytte biokull med lavt askeinnhold. Til dette velger man gjerne rene former for biomasse, typisk stammeved som til og med vaskes. For andre anvendelser kan man bruke biomasse av lavere kvalitet som også vil være langt billigere. Kommunalt avfall, skogsavfall og landbruksavfall er hovedkildene til biomasse for biokullproduksjon da disse finnes i store mengder, og da systemer for innsamling og sortering allerede finnes. Produksjon av biokull kan derfor komme til å konkurrere med andre kommersielle former for avfallsutnyttelse, så som kompostering, biogass, forbrenning til energi. De foretrukne formene for biomasse til biokullproduksjon finnes derfor blant dårlig utnyttete avfallsfraksjoner fra jord- og skogbruk, så som halm, flis, bark, grener og topper, tynningsvirke, osv.

2.2 Pyrolyse

Pyrolyse er en termokjemisk metode for omdannelse av biomasse og andre karbonrike materialer (Figur 4). Produktene er gass, væsker (blant annet olje) og kull. Temperaturen kan ligge mellom 450 °C og 650 °C. Ved høyere temperaturer får man hovedsakelig brennbare gasser som produkt, og prosessen kalles gassifisering. Ved lavere temperaturer (under 400 °C) dannes hovedsakelig torrefisert kull, samt biprodukter i form av lite viskøse væsker (wood vinegar) og brennbare gasser.



Figur 4 Pyrolysemekanismer på partikkelnivå

Under pyrolyse inntreffer en kompleks rekke av reaksjoner, for eksempel dehydrering og dekarboksylering som fører til dannelse av H₂O og CO₂. Såkalt cracking og repolymerisering skjer og danner en blanding av molekyler som blir mer kompleks jo lengre oppholdstid og jo høyere temperatur massen utsettes for. Pyrolyse skjer ved ikke-oksiderende betingelser, i fravær av oksygen. Dette krever mulighet for eksternt oppvarming. Både kull og gass kan brukes til slik oppvarming, sammen med en begrenset tilførsel av oksygen, men dette vil gi dårlig kontroll med temperatur og kan gi mer komplekse reaksjoner og produkter. Tabell 1 viser ulike termokjemiske omdannelser av biomasse, sammen med prosessbetingelser og utbytte av ulike fraksjoner.

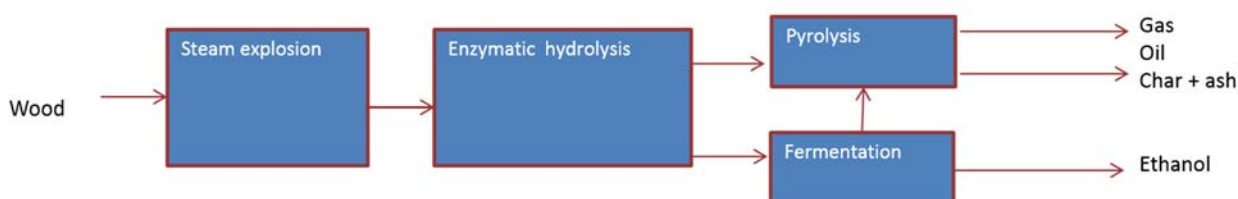
Tabell 1 Typer termokjemisk omdannelse av biomasse

Type	Betingelser	Kull	Væske	Gass
Langsom pyrolyse (karbonisering)	Lav temperatur, ca. 350-500 °C, oppholdstid flere minutter til få timer	45	35	20
Intermediær pyrolyse	Moderat temp., ca. 500-600 °C, oppholdstid 10-20 sek	20	50	30
Rask pyrolyse	Moderat temp., 500-700 °C, kort oppholdstid 1-2 sek	10	75	15
Gassifisering	Høy temperatur, over 800 °C, lang oppholdstid	10	5	85

Generelt fører lang oppholdstid og lavere temperaturer til høyere utbytte av kull, mens høyere temperaturer fører til cracking og gassifisering av det som dannes av olje og kull. Rask pyrolyse med oppholdstid på under 2 sekunder er teknologisk kompleks. «Fast bed»-materialsirkulasjonshastighet og fjerning av kull ved oksidativ regenerering betinger storskala kommersiell skala på 30 000 tonn per år. Slike operasjoner gir høyt utbytte og høy kvalitet på bio-olje. Et enklere småskala system uten «bed material», er f.eks. skruereaktorer og «bubbling bed»-reaktorer. De gir høyere utbytte av kull på bekostning av olje pga. lengre oppholdstid (sekunder til minutter) noe som gir repolymersering til tjærelignende stoffer og til slutt kull.

Ulike prosesser og teknologier har blitt utviklet for pyrolyse av biomasse. Eksempler er damppyrolyse, hydrolyse med ulik oppholdstid (rask, intermediær og langsom pyrolyse). Reaktortyper inkluderer skruereaktor («auger reactor»; til langsom pyrolyse), «bubbling bed»-reaktor (intermediær til rask pyrolyse), roterende kon trommel (rask pyrolyse), sirkulerende «fluidized bed»-reaktor (rask pyrolyse).

Integrering med andre former for biomasseutnyttelse er også mulig, f.eks. pyrolyse av avvannet biogassrest, hydrolyserester som lignin og andre rester fra biokjemiske utnyttelse av biomasse. Væskefraksjoner som har høyt innhold av lett nedbrytbare forbindelser bør derimot fortrinnsvis benyttes til biogassproduksjon. En forenklet kombinert utnyttelse basert på forbehandling av tremasse, enzymatisk hydrolyse og pyrolyse av restfraksjonen er vist i Figur 5.



Figur 5 Integrert utnyttelse av biomasse

Denne prosessen kan videre kombineres med andre separasjonsmetoder, så som uttak av verdifulle komponenter i biomassen før pyrolyse, separering og raffinering av oljefraksjonen, omdanning av etanol til produkter med høyere salgsverdi, eller produksjon av biogass fra væskefasen. Gassen som produseres blir oftest brent på stedet slik at varmen som produseres kan utnyttes til å drive prosessen, til fortørking av biomasse eller til fjernvarme.

2.3 Forbehandling av biomasse

Biomasse som inneholder fibre av lignocellulose er utfordrende å bryte ned biologisk. Dette skyldes den kompakte fiberstrukturen av cellulose, hemicellulose og lignin som det er vanskelig for enzymer å trenge inn i. Man bruker derfor ofte en eller annen form for kjemisk/mekanisk/fysisk forbehandling for å gjøre biomassen mer tilgjengelig for enzymer. Dampekspløsjon er en slik form for forbehandling hvor man behandler oppmalt

biomasse med høytrykksdamp. Typiske betingelser vil være fra 180-230 °C for 5-20 minutter, hvor behandlingen avsluttes med et raskt trykkfall (eksplosjon). Effekten av dette er at fibrene rives fra hverandre og åpner opp biomassestrukturen. Dermed kan enzymer trenge inn i materialet og bryte ned karbohydratene til fermenterbare sukkerarter. Kombinasjonen av dampekspløsjon og enzymhydrolyse vil gjøre store deler av karbohydratene løselige, og de kan separeres fra den uløselige lignin-resten ved sentrifugering eller filtrering. Karbohydratfraksjonen kan så fermenteres til etanol eller et annet produkt, mens lignin-resten kan gå til pyrolyse.

2.4 Integrasjon av bio- og nano-teknologi

Pyrolyse av biomasse er av naturlige årsaker karakterisert av prosesser på molekyl-nivå og nano-skala. Dette inkluderer smelteprosesser, mekaniske skjærkrefter i partikler, dråpedannelse og fordamping. Biomasse inneholder ulike typer og mengder av uorganiske stoffer som fungerer som katalysatorer. Organiske syrer som eddiksyre, samt damp ved høy temperatur, katalyserer dehydrering og andre reaksjoner ytterligere. Prosessen kan styres ved å tilsette egnede materialer til reaktoren, enten sammen med biomassen (in-situ) eller etter pyrolyse (ex-situ).

In-situ katalyse benytter katalytisk aktive materialer som zeolitter til å forbedre cracking- og dehydreringsreaksjoner. Resultatet er bio-olje med redusert oksygeninnhold og lav viskositet. Direkte kontakt mellom katalysator og biomasse fører derimot til rask avsetning av koks og aske på katalysatoroverflatene. Dette krever kontinuerlig regenerering av katalysatoren og utbytting av katalysator.

Ex-situ pyrolyse skiller pyrolysen og den katalytiske omdannelsen. Katalysatoren plasseres etter pyrolyse i reaktoren slik at deponering av aske unngås og slik at regenerering kan optimaliseres ved lavere temperatur enn under selve pyrolysen. Dette gir vesentlig bedre kvalitet på produsert olje, samtidig som produksjonen av større molekyler og kull blir høyere enn ved in-situ pyrolyse.

Pyrolyseprosessen krever mekanisk stabile katalysatorer som kan regenereres hyppig ved å brenne av koks og fjerne aske mekanisk. Katalysatorer er også selektive for visse reaksjoner. Zeolitter og beslektete sure materialer katalyserer for eksempel dehydrering og spaltningreaksjoner (lysis reactions). Det er derfor viktig å fraksjonere biomassen før pyrolyse. Ett eksempel som blir studert i dette prosjektet er å separere ut en sukkerfraksjon og så pyrolysere det ligninrike restproduktet. Fjerning av ikke-termotabile sukkerer resulterer i en fenolrik bio-olje. Kullet som dannes har et høyt innhold av C6-ringer som er typiske stabile strukturer. Ligninrikt utgangsmateriale, slik som rester etter enzymatisk hydrolyse, gir dessuten opphav til bio-olje med lavt innhold av organiske syrer og ustabile stoffer som furfuraler. Dette gjør oljen relativt stabil selv uten bruk av katalysatorer.⁶

2.5 Energifordeling under pyrolyse

Anslagsvis 460 småskala (350 kW) biokullanlegg trengs for å produsere biokull i et omfang som binder 1 million tonn CO₂ (hvis småskala anlegg kun brukes i vinterhalvåret må man doble antall biokullanlegg for å oppnå dette målet), men man kan også se for seg større anlegg som vil være mer effektive mht. energiproduksjon og utnyttelse av andre biprodukter (f. eks. bio-olje). Store anlegg vil også gjøre at man utnytter synergier med skogbruksnæringen som i flere tiår har etterlyst en større satsning på uttak av utnyttet virke i norske skoger der tilveksten i dag er minst 15 millioner kubikkmeter større enn uttaket. Dette fører både til redusert avkastning og at bundet CO₂ i stor grad går tilbake til atmosfæren. Man trenger ikke gå lengre enn til Sverige for å finne modeller for man blir mer effektive på å ta ut denne tilveksten, og med tre regionale bioenergi/biokullanlegg (300 MW) vil man kunne binde like mye CO₂ som med 460 småskalaanlegg. Et alternativ kan også være mellomskala biokullanlegg (10 MW) som kan installeres i forbindelse med kommunal

⁶ Kalyani et al., 2017

infrastruktur eller varmesentraler for større statlige bygningskomplekser (universitetet på Ås har en varmesentral på 10 MW).

3 Agronomiske effekter av biokull

Agronomiske fordeler ved bruk av biokull er forbedret jordkvalitet og medfølgende økninger i plantevekst og avlinger. Nedenfor svarer vi på vanlige spørsmål som bønder og myndigheter er opptatt av når det gjelder agronomiske effekter av biokull, og som gir en god oversikt over status på forskningsfronten i Norge og i utlandet.

3.1 Råstoff og egenskaper

3.1.1 Organiske materialer

Biokull kan lages fra mange forskjellige råstoff av organiske opphav. Noen eksempler av mulige råstoffer i Norge som er aktuelt inkluderer:

- halm
- skogsflis (grener og topper fra hogst)
- fortørket avløpsslam
- fortørket husdyrgjødsel
- fortørket biogassrest
- returvirke (uten metaller)
- grønt avfall fra urbane hager og parker
- virke fra rydding av kulturlandskapet, veikanter og under høyspentlinjer

Næringsinnholdet i biokull er avhengig av hva det er laget av. For eksempel vil biokull laget av hønsemøkk ha et høyt fosforinnhold, mens biokull laget av halm vil ha et høyt kaliuminnhold. Nitrogenrikt råstoff som husdyrgjødsel og avløpsslam kan brukes til å lage biokull, men en betydelig andel av nitrogenet vil gå tapt som gass i pyrolysen. Viktigere enn næringsinnholdet i biokullet er dets evne til å fange næringsstoffer når det blandes med annet næringsrikt materiale. Studier har vist gunstige synergier ved å blande biokull med kompost, biogassrest eller blautgjødsel.

3.1.2 Egenskaper til biokull

Selv om mye av det som kalles biokull ser likt ut (dvs. svart pulver) vil de fysiske og kjemiske egenskapene til biokull variere avhengig av råstoffet det er laget av og pyrolysebetingelsene som ble brukt ved produksjon. Derfor er det vanskelig å gi et fasitsvar på hva man kan forvente av agronomiske egenskaper fra ulike materialer som kan kalles biokull. Man kan imidlertid beskrive det som ofte er felles for de fleste typer biokull produsert med teknologi som er aktuell for bruk i Norge.

Hvor godt biokull egner seg som jordforbedringsmiddel avhenger av dets fysiske og kjemiske egenskaper. Biokull består hovedsakelig av aromatiske karbonforbindelser som gjør det egnet for karbonbinding i jord. Porer og strukturen av overflater på molekylnivå er avgjørende for egenskaper som stabilitet av det organiske karbonet, vannløselige næringsstoffer, pH, elektrisk ledningsevne og energiinnhold. Egenskapene til biokull bestemmes i stor grad av opphavsmaterialet og betingelser ved pyrolysen (temperatur, tid). Generelt kan biokull produsert ved under 350 °C ha ulik sammensetning som skyldes opphavsmaterialet. Ved temperaturer over 350 °C er egenskapene mindre avhengig av opphavsmaterialet og hovedsakelig avhengig av temperaturen:

- **Karbonets stabilitet** mot fysisk og mikrobiell nedbryting fører til en effektiv sekvestrering. Med økende pyrolysetemperatur øker både karboninnholdet og askeinnholdet. Videre omdannes amorfe

karbonstrukturer til aromatiske ringstrukturer som er svært stabile. H/C-forholdet, som er en indikasjon på graden av aromatisk kondensasjon, avtar med økende temperatur. Størst økning i stabilitet får man ved temperaturer mellom 250-450 °C der mengden stabilt karbon øker til over 90 %.

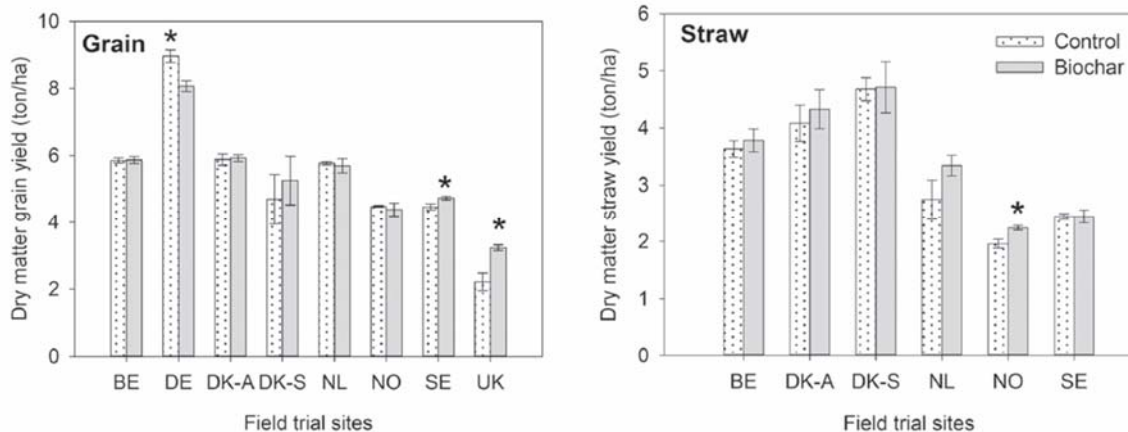
- **pH** hos biokull ligger i området fra svakt alkalisk til alkalisk. Med økende pyrolysetemperatur øker pH på grunn av utskillelse av alkaliske salter fra det organiske materialet. Hvor alkalisk biokull blir avhenger også av egenskaper ved biomassen som brukes, så som askeinnhold. Biokull fra hønsegjødsel og halm har høy pH.
- **Elektrisk ledningsevne** varierer på samme måte med råmaterialer og pyrolysetemperatur. Ledningsevne sier noe om saltinnhold og gjenspeiler til dels gjødslingsverdien. Høy ledningsevne kan være ugunstig for planter da det kan gi opphav til saltstress og ubalanse i næringstilførselen med påfølgende sviskader på planterøtter (gjelder f.eks. vekstmedier med stor andel biokull). Lav ledningsevne gir derimot lav gjødselverdi. Verdier på 0.5-1.5 dS m⁻¹ er regnet som moderate.
- **Kationbyttekapasitet** indikerer evnen biokull har til å adsorbere næringskationer og hindre utvasking av næringsstoffer. Kationbyttekapasiteten avhenger i stor grad av råmaterialer og pyrolysebetingelser som igjen bestemmer typen og mengden funksjonelle grupper som sitter på kulllets overflate. Dette kan være karboksylgrupper, laktongrupper og fenolgrupper. Generelt vil økende pyrolysetemperatur redusere kationbyttekapasiteten fordi slike grupper fjernes. Motsatt virker høyere askeinnhold i retning av høyere kationbyttekapasitet.
- **Vannløselige ioner** som ammonium, fosfat, kalium, kalsium, magnesium og sulfat er essensielle plantenæringsstoffer, mens natrium gjerne har en negativ effekt på jord ved å øke saltinnholdet. Ekstraherbare kationer i biokull kan, i tillegg til å være plantenæring, virke positivt for å redusere tilgjengeligheten av tungmetaller i forurenset jord. Med økende pyrolysetemperatur øker mengden lettøselig K ved at salter frigjøres fra det organiske materialet ved høy temperatur. Motsatt reduseres mengden N i ammonium og nitrat ved at disse i økende grad tapes i gassform ved høyere temperatur.
- **Det spesifikke overflateareal** er summen av de ytre overflatene og indre overflater i porer. Spesifikk overflate gir en indikasjon på i hvilken grad biokull vil reagere med ioner og vann, samt hvor høy tetthet biokullet har. Verdier på 30-300 m²/g er vanlige. For industrielle anvendelser som absorbenter kan porevolumet og den spesifikke overflaten økes med behandling med syrer eller damp slik at man kan oppnå en spesifikk overflate opp mot 2500 m²/g.

3.2 Effekter av biokull i jord i Norge og internasjonalt

3.2.1 Norske erfaringer

Flere lab- og feltforsøk som har blitt utført i Norge siden 2009. Et feltforsøk (2011-2014) ble utført i Ås og resultatene inngår i doktorgradsarbeidet til Adam O'Toole, som er under utarbeidelse. I denne studien ble 1 og 3 tonn /daa biokull laget av miscanthus halm tilført til en lettleire. Kornavlinger over 4 år i biokullbehandlet jord var ikke statistisk forskjellig fra kontrollbehandlingen uten biokull. Behandling med 3 tonn biokull pr daa ga økt total porøsitet i jorda og redusert jordtetthet. Dette førte til at mer vann per volum jord ble målt i biokullbehandlingen enn i kontrollbehandlingen. Men selv om biokull kan øke vannretensjon var tilgjengeligheten av vann i jorda tilstrekkelig for plantenes behov. Dette skyldes høyt leirinnhold (27 %) i jorda, noe som i seg selv gir god vannlagringsevne.

Et annet feltforsøk utført i Ås benyttede en annen type biokull laget av tre. Denne studien var et ringforsøk hvor flere land deltok (INTERREG IV) og gjennomførte identiske forsøk i de respektive land. Her var også konklusjon at tilførsel av rent biokull (dvs. ikke blandet med noe annet først) ikke hadde noen effekt på kornavlinger sammenlignet med kontrolleddene. Figur 6 viser avling fra de 7 landene som var med i studien.



Figur 6 Kornavlinger fra ringforsøk med bruk av rent biokull i landbruksjord⁷

Et potteforsøk i veksthus utført i 2009 benyttet biokull av hvete-halm (1.7 og 5.4 tonn/daa) som ble blandet inn i en siltig sandjord fra Rygge. Studien målte vekst av raigras, N og P-opptak i bladmasse, pH i jord, og effekter på jordfuktighet⁸.

Hovedkonklusjonen fra disse studiene er at selv om biokull kan virke positivt på en rekke agronomiske parametere (f.eks. større vannretensjon i jord, kalkingseffekt), så ser man ikke store endringer i korn- eller grasavlinger. Så langt vi har testet kan vi ikke forvente at en jordforbedringseffekt skal dekke kostnadene ved biokullproduksjon og spredning gjennom økte avlinger.

3.2.2 Effekter i internasjonale studier

Flere internasjonale studier har påvist positive agronomiske effekter ved tilsetning av biokull til landbruksjord. Positive effekter av biokull handler ofte om å fjerne en vekstbegrensende tilstand i en enkel jordtype, for eksempel for lav pH, lav vannholdningsevne eller dårlig jordstruktur. En meta-analyse av internasjonal forskning viste at biokulltilførsel til jord økte pH, moldinnhold, nitrogen (N) og fosfor (P); og økte konsentrasjoner av kalium (K) i bladmassen⁹. En annen meta-studie fra 2011 rapporterte en gjennomsnittlig økning i avling på 10 %, med særlig økning i surt og/eller sandholdig jordsmonn. I svært dårlig jord, som får lite eller ingen gjødsel, bidrar innblanding av biokull direkte til økt næringstilgang, særlig gjennom næringsinnholdet i asken.

3.2.3 Sammenligning av norske og internasjonale forhold

Den avlingsøkning man har sett i en del studier fra land lengre sør skyldes ofte bedre tilgang på P, da biokull gjør tilført P mer plantetilgjengelig og dermed øker utnyttelsen av P i gjødsel. I Norge har en stor del av jorda et høyt til svært høyt P-nivå, slik at P sjelden er begrensende for plantevekst. Vi har også lite problemer med tørke og flom, to faktorer som i større grad reduserer avlinger i land lengre sør, og som biokull kan avhjelpe ved at jord tilsatt biokull holder på mer plantetilgjengelig vann (gjør jorda mer tørkesterk), samtidig som slik jord også lettere drenerer ut overskuddsvann i svært våte perioder. Flomutsatte områder og områder med forsummertørke der man ikke har mulighet til å vanne vil trolig ha god nytte av tilførsler av biokull i vanskelige år. Det vil også områder med sandrik jord i år med kraftig regn om våren etter såing, da nitrogen i slik jord lett

⁷ Ruyschaert, et al., 2016

⁸ O'Toole et al., 2013

⁹ Biederman and Harpole, 2013

vaskes ut og fører til redusert vekst. Tilfører man biokull til slik jord vil nitrogenet i større grad bevares i jorda ved at det bindes til biokullet på en måte som likevel tillater at det frigis til planterøtter.

3.3 Anbefalinger til bønder

3.3.1 Generelt

For å oppnå en god agronomisk effekt ved bruk av biokull må man først identifisere hvilke forbedringspotensial man har for jord eller plantevekst. På lik linje med gjødsling der man tilpasser type og mengde gjødsel som brukes ut fra jorda og plantens behov, kan en bonde som har et stykke jord som er utsatt for tørke tilføre biokull for å øke mengden plantetilgjengelig vann, og da tilføre store nok mengder til at det gjør utslag på denne jordegenskapen.

Et generelt råd er at det er best å først blande biokull med en næringsrik flytende gjødsel f.eks. blautgjødsel, flytende biogassrest, eller lann (urin fra husdyr) før man tilsetter det til jord. På den måten kan man unngå at biokull (med sin porøse struktur og store overflate) konkurrerer med plantens røtter for tilgang til næringsstoffer. Man kan også tilsette biokull til kompost der det kan ha flere fordeler for komposteringsprosessen, f.eks. høyere N-innhold¹⁰ og redusert tap av ammoniakk som gass under komposteringsprosessen¹¹.

3.3.2 Skadelige eller giftige stoffer

Hvis man lager biokull av rene materialer som skogsavfall eller halm vil innholdet av tungmetaller være lavt. Noen typer avfall kan også godt brukes som råstoff for biokullproduksjon, men dersom det er tvil om innholdet av tungmetaller må man kontrollere dette i forkant. Organiske miljøgifter og smittestoffer destrueres under pyrolysen pga høy temperatur (>400 °C), så på denne måten representerer pyrolyse en god løsning for råmaterialer som inneholder små mengder slike stoffer. Selv om PAH (polysykliske aromatiske hydrokarboner) dannes i pyrolyseprosessen forsvinner de igjen når temperaturen overstiger 350 °C, og restene etter dem inngår som uskadelige bestanddeler av biokullet. Biokull som er laget ved over 350 °C representerer derfor ingen risiko mht PAH¹².

3.3.3 Meitemark og andre organismer

Forsøk både i Norge og i utlandet viser at biokull stimulerer livet i jorda, og at verken meitemark eller andre jordorganismer reagerer negativt på tilførsel av normale mengder biokull.

3.4 Andre klimagasseffekter enn karbonlagring

3.4.1 Effekt på CO₂-utslipp fra jord

Et av de sentrale spørsmålene for biokullforskningen de siste årene er om tilførsel av biokull til jord bidrar til en akselerert nedbrytning («positive priming») eller opphopning («negative priming») av organisk karbon som allerede finnes i jorda («native soil carbon»). Det har blitt observert både positive og negative priming-effekter i studier av dette temaet. Forskning pågår for å finne ut hvilke parametere som resulterer i hhv. positive eller negative priming-effekter på karbon i jord. De fleste studier viser at positive priming-effekter av biokull er kortvarige (1-2 år)¹³. Det betyr likevel at man er sikker på at karbonlagringsgevinsten med biokull ikke vil reduseres av en stimulering av nedbrytning av det øvrige organiske materialet i jord. Beviser fra arkeologiske

¹⁰ Kammann, et al., 2015

¹¹ Steiner, et al., 2010

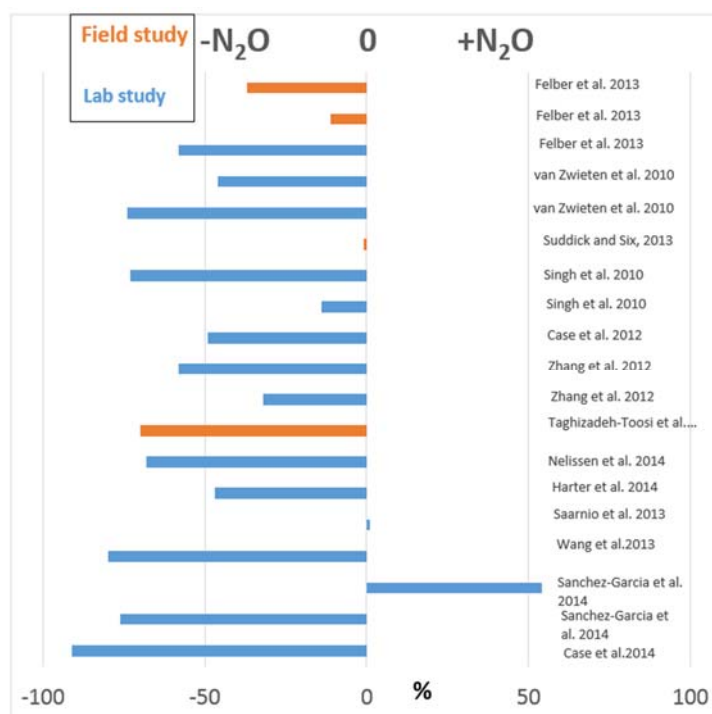
¹² Hale, et al., 2012

¹³ Budai, et al., 2016

undersøkelser av felt hvor man finner store mengder biokull bekrefter også at biokull på lang sikt vil bidra til en akkumulering av organisk karbon, samt økt fruktbarhet og økte avlinger.

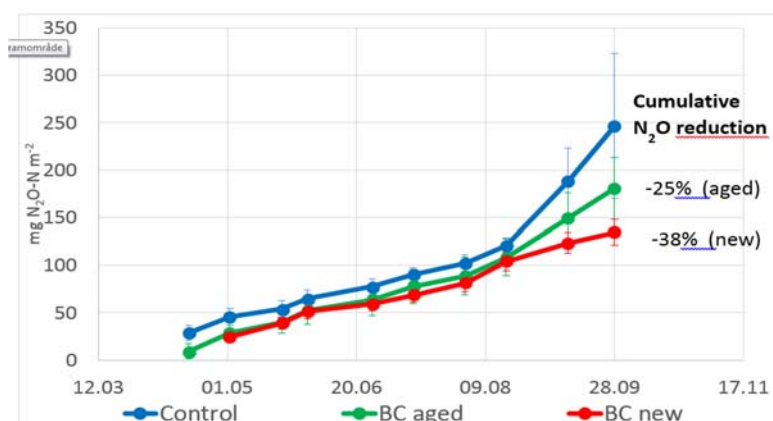
3.4.2 Effekt på lystgassutslipp fra jord

Tilsetning av biokull til jord har i de fleste internasjonale studier vist en moderat til sterk reduksjon av N₂O-utslipp fra jord, noe som ytterligere styrker det klimareducerende bidraget fra biokull (Figur 7).



Figur 7 Prosentvis endring i lystgassutslipp pga. biokull sammenlignet med kontroll-ledd (fra internasjonale studier)

I Norge har flere laboratorieforsøk og ett feltforsøk blitt utført for å dokumentere disse effektene og avklare mulige mekanismer. Vi målte N₂O-gass fra jord på et forsøksfelt på NMBU campus Ås i 2012 og 2014. I 2012 var akkumulert N₂O hhv. 25 % og 38 % lavere i biokull-leddene sammenlignet med kontroll-leddet. Men på grunn av høy variabilitet innenfor hvert ledd var disse forskjellene ikke statistisk signifikante og bør dermed betraktes som generelle trender heller enn effekter.



Figur 8 Kumulativt N₂O-utslipp fra jord fra forsøksfelt i Ås (Control = feltledd uten biokull, BC aged = Ledd med biokull nedpløyd i 2010, BC new = Ledd med biokull nedpløyd i 2014)

I våte perioder hvor denitrifikasjon og høyt N₂O-utslipp ofte finner sted, observerte vi at nylig tilført biokull hadde en sterkere reduserende effekt på N₂O enn biokull som hadde vært i jorda siden 2010 (se siste perioden i Figur 8). Forsøk i Norge viser så langt at biokulltilsetning i hvert fall ikke gir høyere N₂O-utslipp fra jord, men trolig lavere. Dette forsterker de klimareducerende egenskapene til biokull ytterligere, og gir større sikkerhet for biokulls totale bidrag til et klimaregnskap i livsløpsperspektiv.

4 Økonomisk vurdering og samfunnsøkonomisk lønnsomhet

Dette kapittelet tar for seg de økonomiske aspektene knyttet til produksjon og bruk av biokull i Norge. I første del oppsummeres eksisterende anslag for hva det koster å binde karbon tilsvarende 1 tonn CO₂-ekvivalenter med bruk av biokull. I den neste delen sammenlignes biokull med andre klimatiltak innen jordbruket, og alternativer for lagring av CO₂ (CCS). Hensikten er å vurdere om biokull er samfunnsøkonomisk lønnsomt.

4.1 Kostnadsbildet for biokull

Produksjonskostnadene for biokull er avhengig av en rekke faktorer. De viktigste valgene en produsent må forholde seg til er:

1. Hvilken biomasse skal brukes som råstoff?
2. Hvilken produksjonsteknologi bør man velge?
3. Hvilke sluttprodukter ønsker man?

Når det gjelder råstoff er det i hovedsak halm fra kornproduksjon og flis fra skogsdrift og kantrydding (også kalt GROT – GReener Og Topper) som er vurdert i litteraturen. Resultater fra en tidligere studie viser at halm gir størst klimagevinst¹⁴. Grot er et aktuelt alternativ i områder hvor råstofftilgangen er stor. Metode for høsting, pakking og lagring av råstoffet vil også ha betydning for kostnadsnivået, blant annet gjennom transportkostnader, svinn og arealbruk. I dag sendes mye av råstoffet til produksjon av pellets, eller direkte til varmegjenvinningsanlegg. Dermed er det i hovedsak energimarkedet som bestemmer alternativverdien for råstoffet.

Ved å variere tid, temperatur, trykk og oksygentilførsel, vil en pyrolyseprosess resultere i ulike andeler kull, olje, syntesegass (også kalt syngas; typisk CO, CO₂ og CH₄) og varme (damp). Faktorene vil også påvirke hvor stabilt biokullet som produseres er. Med andre ord, hvor stor del latent karbon biokullet har som vil sige tilbake

¹⁴ Sørensen, 2011

i kretsløpet over tid. Andre teknologiske valg inkluderer om anlegget skal være stasjonært (slik at råstoff må fraktes til anlegget) eller mobilt (slik at anlegget kan fraktes til råstoffet). Ved kontinuerlig drift vil man kunne øke utnyttelsesgraden fordi anlegget ikke trenger å varmes opp, kjøles ned og rengjøres like ofte. På tilsvarende måte vil grad av automatisering påvirke forholdet mellom investeringskostnader og driftskostnader knyttet til arbeid.

Sluttproduktet vil bestå av både biokull, og ulike energiprodukter. Bruk av større flis vil typisk gi høyere andel biokull enn mindre flis. Produksjon av energivarer som biprodukt kan være med på å finansiere produksjonen av biokull, og dermed bidra til økt lønnsomhet for anleggseieren. Det er imidlertid ingen som har identifisert en lønnsom måte å produsere biokull på i Norge, selv medregnet biinntekter fra energiprodukter. Klimagevinsten fra at karbonet bindes i jorden gis det ikke betaling for. Det skyldes i hovedsak svakheter ved de internasjonale systemene for kjøp og salg av klimakvoter. Forskere ved SSB¹⁵ har beregnet at verdien av å binde ett tonn CO₂-ekvivalenter i ikke-kvotepiktig sektor vil være mellom 1000 og 2000 kroner.

Produksjonskostnader som er beregnet i en tidligere studie¹⁶ går opp til 1290 kroner per tonn bundet CO₂ for halm og 576 kroner for skogsavfall. Når beregnet verdi av pyrolyseolja (400 kroner per fat råolje) er trukket fra, blir nettokostnadene 890 kroner og 397 kroner respektive for halm og skogsavfall. Produksjonskostnadene er her en kombinasjon av kapital- og driftskostnader. Utgifter til lagring av biokullet i jordbruksjord, verdi som jordforbedringsmiddel og alternativkostnader for biomassen er ikke medregnet. Omregnet til 2016-priser er nettokostnadene 12,5% høyere¹⁷, altså henholdsvis 1001 kroner og 447 kroner.

I en vurdering av tiltaket "biokull fra restavling" i Klimakur er kostnaden pr tonn redusert utslipp anslått til 900 kroner for konvertering av 75% av all halm i 2020.¹⁸ Denne kostnaden ble senere justert ned til 463 kr per tonn CO₂ for halm og 250 kr per tonn CO₂ for skogsavfall.¹⁹ Kostnaden karakteriseres som "høy" for konvertering av 30% av all norsk halm i 2050²⁰ respektive 1 millioner tonn halm²¹.

Produksjonskostnader for 10 ulike anleggsmodeller for produksjon av biokull på Østlandet er kalkulert i en tidligere studie²². Anleggene varierer med tanke på råstoff (flis og halm), mobilitet (stasjonær, mobil), størrelse (stort, lite), reaktor type (rotasjonsreaktor, fri fall-reaktor, mikrobølge, flytende seng, skruedrevet), teknologi (sakte og hurtig pyrolyse, gassifisering) og leverandør (seks ulike leverandører). De to store anleggene kan håndtere ca. 70 tonn biomasse per dag, mens de små anleggene har kapasitet for 3 til 25 tonn biomasse per dag (0% fukt). Den laveste kostnaden de fant var 271 kr/tonn CO₂ med et stort stasjonært anlegg og halm som råstoff, og 384 kr/tonn CO₂ ved tilsvarende anlegg og bruk av flis.

Blant de små anleggene var det flis som fremsto som rimeligste alternativ i et stasjonært anlegg med tiltakskostnad lik 714 kr/tonn CO₂. Uttrykt i 2016-priser blir kostnaden kr 793 kr/tonn CO₂.²³ Dette var et anlegg med hurtig pyrolyse, flytende seng og kapasitet på 10 tonn råstoff per dag. Inntekter fra salg av bioolje og biokull er inkludert i regnestykket. Mens det lille anlegget kun lagrer karbon tilsvarende ca. 10% av råvarevekta (målt ved 0% fukt), binder de store anleggene ca. 22% av råstoffet.

¹⁵ Aune et al., 2016

¹⁶ Grønlund og Harstad, 2014

¹⁷ Basert på utviklingen i konsumprisindeksen. Kilde: www.SSB.no.

¹⁸ Klima og forurensningsdirektoratet, 2010

¹⁹ Sørensen, 2011

²⁰ Grønlund og Harstad, 2014

²¹ Miljødirektoratet, 2014

²² Sørensen, 2011

²³ Prisstigningen fra 2011 til 2016 var 11%. Kilde: www.SSB.no.

4.2 Fordeler og gevinster

Biokull har en rekke fordeler for landbruk som ikke er direkte knyttet til klimaeffekten. Noen av de viktigste er:

1. Mindre kompakt jord gir bedre struktur for planterøtter.
2. Bedrer drenering og holder på mer plantetilgjengelig vann.
3. Reduserer utvasking av næringsstoffer fra jord (f.eks. nitrogen og fosfor).
4. pH-nivået i bakken øker. Mindre behov for kalking.
5. Langvarig gunstig effekt på jord sammenliknet med andre jordforbedringsmidler.
6. Avfall fra gartneri og drivhus kan forkalles og utnyttes fremfor å kastes.
7. Stor overflate som nisje for mikroorganismer som sopp og bakterier.
8. Mindre sykdom i plantene.

Disse fordelene vil variere betydelig med tanke på opprinnelig jordsmonn og avlingstype. I en tidligere studie²⁴ anslås at ved å tilsette 5 tonn biokull per ha per 10 år i sandholdig jord, vil man oppnå en økt avkastning for havre og bygg som tilsvarer ca. 1,00 kr per kg biokull. Dette er et svært usikkert estimat, og baseres i hovedsak på antakelser om økte avlinger og redusert behov for gjødsling og kalking. Det eksisterer imidlertid ikke noe markert eller utbredt tradisjon for bruk av biokull i dag. Dermed er mulighetene for å tjene penger på biokullproduksjon for salg begrenset.

4.3 Samfunnsøkonomisk lønnsomhet

For å vurdere samfunnsøkonomisk lønnsomhet må man spørre seg om hvorvidt biokull bidrar til å nå definerte samfunns mål på en kostnadseffektiv måte. I hovedsak knytter disse målene seg til å begrense konsentrasjonen av atmosfærisk CO₂ til maksimalt 450 ppm CO₂-ekvivalenter, som ansees forenelig med det såkalte 2-gradersmålet for global oppvarming. Rensing, transport og lagring av atmosfærisk CO₂ (CCS) kan bidra til at de mest kostnadsdrivende utslippskuttene ikke blir nødvendige.

Det er gjennomført konseptvalgutredning (KVU) av fullskala verdikjede for CO₂-fangst, -transport og -lagring, hvor tre utslippspunkter vurderes som aktuelle kandidater for CO₂-fangst. Disse er sementfabrikken i Brevik, ammoniakfabrikken på Herøya og energigjenvinningsanlegget på Klementsrud. Planleggings- og investeringskostnadene for etablering av verdikjeden er anslått til mellom 7,2 og 12,6 milliarder kr (eks. mva.), og driftskostnadene er estimert til mellom 350 og 890 millioner kroner per år²⁵.

I kvalitetssikringsrapporten (KS1)²⁶ konkluderes det med at fullskala demonstrasjonsanlegg for CO₂-håndtering i Norge ikke er samfunnsøkonomisk lønnsomt, og det anbefales at tiltaket ikke gjennomføres. En del av grunnen er at både sement- og ammoniakfabrikken inngår i kvotepliktig sektor, og at den fremtidige verdien av klimakvotene er for lav til at tiltaket gir lønnsomhet. Tiltaksalternativet som gir størst effekt per krone er fangst ved alle tre kilder. Det gir en samlet tiltakskostnad på 1400 kroner per tonn CO₂, og et omfang tilsvarende 1,4 millioner tonn CO₂-ekvivalenter i året.

Å binde karbon til jorden i form av biokull har en rekke fordeler fremfor å lagre CO₂ i gass eller væskeform (geo-CCS). Kort fortalt kreves det mer avansert teknologi og beholdere for å lagre CO₂ enn biokull. Det er også mer teknologikrevende å overvåke CO₂-reservoaret enn det er å konstatere at karbon bindes i jorden.

Som et ledd i å nå 2-gradersmålet, har Norge forpliktet seg til omfattende utslippskutt. Jordbrukssektoren er Norges fjerde største kilde til utslipp av klimagasser (Meld. St. 13, 2014-2015). I 2015 sto jordbruksnæringen

²⁴ Sørensen, 2011

²⁵ Olje og energidepartementet, 2016

²⁶ Oslo Economics og Atkins, 2016

for ca. 8 prosent av utslippene av klimagasser fra norsk territorium.²⁷ Det tilsvarer ca. 4,5 millioner tonn CO₂-ekvivalenter, og er stort sett uendret fra 2005. I 2030 skal utslippsnivået være redusert med 1,8 millioner tonn, og det er foreslått en lang rekke tiltak som kan bidra til å innfri dette målet.

Klimakur 2020-rapporten²⁸ identifiserte tre klimagassreduserende tiltak for jordbruket i tillegg til lagring av biokull: Mer effektiv utnyttelse av gjødsel, stans i nydyrking av myr og produksjon av biogass fra husdyrgjødsel. Miljødirektoratet (2014)²⁹ inneholder en oppdatert analyse av disse tiltakene og har også utredet tiltaket "redusert tap av mat". Tabell 2 gir en oppsummering av vurderingene med henblikk på gjennomsnittlig kostnad per tonn reduksjon i CO₂-ekvivalenter og potensiale for reduksjon av utslipp. Lagring av biokull i jordbruksjord er ikke utredet som tiltak i denne rapporten.

Tabell 2 Klimagassreduserende tiltak i jordbruket

Tiltak	Gjennomsnittskostnad, kr/tonn CO ₂ -ekv.	Potensial, tonn CO ₂ -ekv. ³	Merknad
Effektiv gjødsling ¹	540	113 000	Kombinasjon av fem deltiltak.
Redusert tap av mat ¹	Ikke beregnet	30 000	Matavfall fra animalske produkter reduseres med ¼.
Halvering av matsvinn ²	-21 730	93 000	Sparte kostnader fra innkjøp av mat.
Stans i nydyrking av myr ¹	145	78 000	Fire deltiltak. Halve potensialet kan oppnås uten store omkostninger.
Stans av nydyrking av myr ²	151	93 000 (200 000 i 2050)	
Biogass fra husdyrgjødsel ¹	Ikke beregnet	50 000 – 150 000	Oppsamling av opp til 30% husdyrgjødsel.
Biogass fra gjødsel (50% utnyttelse i 2050) ²	1700	160 000	Høyere kostnader for gårdsanlegg.
Fra storfe til fisk og vegetabiler ²	-9000	520 000 (1 million i 2050)	Helsegevinster fra bedre kosthold.
Fra storfe til svin ²	Null	490 000 i snitt	Ingen helseeffekt.

1) Miljødirektoratet (2014)

2) Pettersen mfl. (2017)

3) Potensialet i Pettersen mfl. (2017) er oppgitt som årstonn reduksjon i snitt over perioden 2017-2050.

På oppdrag fra Miljødepartementet har Pettersen mfl. (2017)³⁰ vurdert samfunnskostnadene knyttet til klimatiltakene utnyttelse av husdyrgjødsel til produksjon av biogass, redusert produksjon og konsum av storfekjøtt, redusert matsvinn og stans i nydyrking av myr. Resultatene deres er oppsummert i Tabell 2. Analysen viste at tiltakene varierer i estimert netto samfunnskostnad fra kr 1700 til -9000 pr tonn årsreduksjon av CO₂-ekvivalenter (negativt tall indikerer en samfunnsmessig besparelse for å innføre tiltaket). Kostnadsestimatene er gjennomsnittstall. Noen steder vil tiltakene være mer lønnsomme enn andre. I tillegg antas det skalafordeler som gjør at tiltakene bli mer lønnsomme over tid, i takt med at volumet øker og man får bedre teknologi. Kostnader knyttet til virkemiddelbruken inngår ikke i beregningene.

Totalt potensial for utslippskutt fra tiltakene i Pettersen mfl. (2017) er knappe 900 000 tonn CO₂-ekvivalenter (halve forbruket av storfekjøtt erstattes med enten svinekjøtt, eller fisk og vegetabiler). Det betyr at selv om

²⁷ SSB, 2017. (<https://www.ssb.no/klimagassn/>). Endelige tall for 2015.

²⁸ Klima og forurensningsdirektoratet, 2010

²⁹ Miljødirektoratet, 2014

³⁰ Pettersen, et al. 2017

de fleste av tiltakene er rimeligere å innføre enn gårdsanlegg for biokull, så er de langt fra tilstrekkelig for å nå klimamålene.

4.4 Oppsummering av økonomiske forhold

Kostnaden for å binde karbon gjennom småskala produksjon av biokull er tidligere anslått til kr 793 kr/tonn CO₂-evk.³¹ (2016-priser). Det er lavere enn SSBs forventede fremtidige verdi av klimatiltak i ikke-kvotepliktig sektor, som ligger mellom 1000 og 2000 kroner. Det er også rimeligere enn andre aktuelle klimatiltak i jordbruket, som for eksempel produksjon av biogass fra husdyrgjødsel.

Gjennom økt kjennskap til produksjonsteknologien og biokullets jordforbedrende egenskaper, vil gårdsanlegg kunne berede markedet for etablering av større biokull-anlegg. Det antas at middels store anlegg kan etableres i Norge med en tiltakskostnad på ca. 300-400 kr per tonn CO₂, for bruk av henholdsvis halm eller flis som råstoff.³² På dette nivået vil biokull være så rimelig priset at det dekkes av verdiestimatet til grønn skattekommisjon, som er 420 kr/ tonn CO₂.³³

Biokull fremstår som en betydelig rimeligere metode for å binde CO₂ enn storskala CCS. Teknologisk er det også et mye enklere tiltak. Distribusjonsnettet for omsetning er i stor grad på plass i de eksisterende salgskanalene i landbruket.

FNs klimapanel³⁴ anslår at biokull i jord kan gi 2-3 ganger så mye karbonbinding globalt som planting av skog. I tillegg anslås at kostnaden ved å nå togradersmålet vil øke med 138 prosent dersom CO₂-håndtering ikke inkluderes blant tiltakene. Til tross for dette er mangel på internasjonale standarder, og muligheter for å regne om tiltak i sektoren for arealbruk, arealbruksendringer og skogbruk (LULUCF) mot utslippskutt i ikke-kvotepliktig sektor, blant de største hindrene for tiltaket.

Analysen viser at gårdsanlegg for biokull er et klimatiltak som bør få en betydelig større oppmerksomhet og spredning enn det gjør i dag. Spesielt fordi tiltaket vil kunne medvirke til at Norge innfrir sine forpliktelser om utslippsreduksjon i ikke-kvotepliktig sektor.

5 Aksept for biokull blant norske bønder³⁵

5.1 Bondens rolle for biokullproduksjon på ulik skala

Som nevnt kan produksjon av biokull skje i ulik skala, fra småskala der bonden selv har et produksjonsapparat på gården og bruker egne råvarer, til storskala der man ser for seg en fabrikk der brukere av biokull er ordinære kunder i et marked. For å implementere biokull på forskjellig skala er man avhengig av at bønder som skal ta imot biokull og bruke det på egen jord syns dette er trygt og nyttig. Det blir viktig å undersøke relevante sosiale, kulturelle og politiske faktorer for implementering av biokull i norsk sammenheng. Bondens grad av involvering reduseres når man går fra småskala til storskala produksjon (Figur 9). I et storskalasystem er produksjonen industriell og bonden hovedsakelig en forbruker som kjøper biokull fra en større bedrift og må pløye det inn i jorda. Bonden kan imidlertid levere overskudd av biomasse til et sentralt sted for biokullproduksjon. En slik ordning vil innebære mindre jobb for bonden når det gjelder selve produksjonen, men innebærer samtidig at det etableres ordninger med inn-transport av biomasse. Skal dette være interessant

³¹ Sørensen, 2011

³² Sørensen, 2011

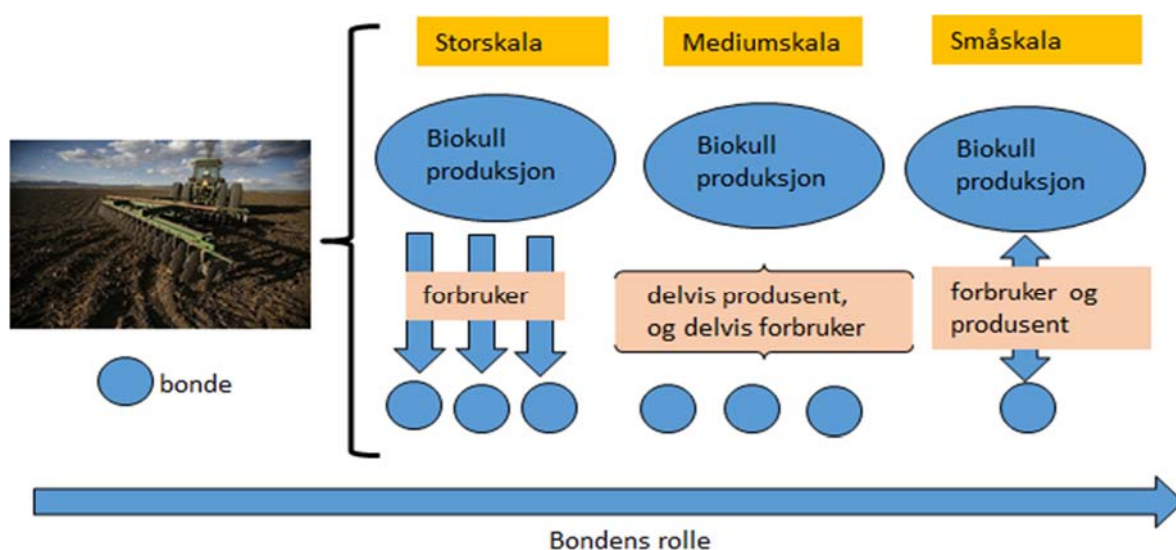
³³ NOU 2015:15

³⁴ IPCC, 2014

³⁵ Kapitlet er basert på Otte og Vik (2017).

for bonden må inn-transporten ikke være altfor kostnadsdrivende og avstanden ikke alt for stor. Et storskalaanlegg må etableres der brukstettheten er høy, for å sikre nok tilgang til biomasse.

I dag finnes det et biogassanlegg i Vestfold (Greve biogass) som tar imot husdyrgjødsel fra omkringliggende bruk. Skal biokull produseres av gjødsel i et storskalaanlegg kreves det i tillegg at de lokale bøndene har gjødseloverskudd, det vil si masse de ikke har bruk for til gjødsling av eget jordbruksareal. På Skogn etablerer Biokraft AS et anlegg for produksjon av flytende biogass (LBG), der skogavfall er en av kildene til gassproduksjon. Dette er eksempler på storskalaanlegg som ligger i jordbruksområder der omkringliggende landbruksaktivitet bidrar, eller har muligheten til å bidra med biorest inn i produksjonen. Med tanke på produksjon av biokull i stor skala er dette prosjekter det kan være nyttig å se nærmere på.



Figur 9 Bondens rolle i biokullsystemer på ulik skala

Under følger en oversikt over relevante faktorer som man må ta hensyn til dersom man vil implementere biokull. Oversikten er basert på en spørreundersøkelse gjennomført i CAPTURE+, supplert med noen dybdeintervjuer. Formålet har vært å kartlegge viktige samfunnsvitenskapelige faktorer for biokullimplementering og deres relevans. Hovedfokuset er småskalaproduksjon siden dette i sterkest grad involverer bonden i hele prosessen, men vurdering av produksjon i større skala er også foretatt.

5.2 Viktige faktorer for biokullimplementering

5.2.1 Teknologi

Småskala gårdsbasert biokullanlegg krever relativt enkel teknologi som er lett å vedlikeholde og ikke fordrer høy prosesskompetanse³⁶. For *småskala* er den beste utgangssituasjonen at man tar utgangspunkt i allerede eksisterende teknologier tilgjengelige på gården. Gårdsbaserte halm- og flisfyringsanlegg er relevante. Det er viktig at biokullproduksjonen foregår reneest mulig. Her vil produksjonsmåten være avgjørende for nivået av lokal forurensning. Dette peker i retning av lukkede systemer med kontinuerlig produksjon, heller enn såkalt batch-produksjon og åpne bålpanner/ovner. På *storskalanivå* kan man tilsvarende utnytte anlegg og kompetanse knyttet til forbrenningsanlegg, oljeraffinerier og/eller kjemisk industri.

³⁶ Rogers, 2003

5.2.2 Økonomisk gevinst

Gårdsbasert biokullproduksjon må føre til en økonomisk gevinst for målgruppen³⁷. Investeringskostnader og driftskostnader spiller en viktig rolle her. På stor skala kan det produseres bioolje og kjemikalier med høy markedsverdi som kan gjøre produksjonen lønnsom. Nøkkelen er å 1) identifisere anvendelser med høyest mulig markedsverdi, og 2) utnytte varmeproduksjonen maksimalt. I småskala, slik som på Skjærgearden Gartneri, er biokull hovedproduktet. Når hovedhensikten er å produsere biokull med høyt næringsinnhold er markeder som økologisk jord og jordforbedringsmidler til hobbybruk trolig tilstrekkelig stort og betalingsvillig til å gi lønnsomhet ved salg. Flytende og gassformige biprodukter vil hovedsakelig bli forbrent og brukt som bioenergi til oppvarming av drivhus og driftsbygninger, samt fortørking av biomasse. En liten andel vil også bli tatt ut som en flytende fraksjon for utprøving til eget bruk og utforskning av markedsmuligheter mht. framtidig salg.

En mulighet er å koble biokull til *klimakvoter* eller reverserte CO₂-avgifter i Norge. Dette kan bli en utvidelse av det allerede eksisterende norske kvotesystemet som først og fremst retter seg mot bedrifter. I dag er fastlandsindustrien, olje- og gassvirksomheten og luftfarten med i EUs kvotesystem, og det finnes planer for å inkludere andre sektorer som også inkluderer landbruket.³⁸ Systemet gir mulighet for andre bedrifter og privatpersoner å kjøpe frivillige kvoter. Spørreskjemaundersøkelsen viste at norske bønder foretrekker en *fast kompensasjon* fra staten pga usikkerhet med karbonprisen i markedet. Norske bønder er ikke vant til å være markedsaktør innen dette området, noe som også bidrar til usikkerhet knyttet til et kvotesystem på bruksnivå.

5.2.3 Kunnskap

Bønder prøver å unngå risiko³⁹. Derfor er det viktig at de får nok kunnskap om biokull og dens lagring i jorda, jordforbedringseffekter (for eksempel blandet med kompost, biorest eller mineralgjødning) og bruk av biprodukter. På storskala kan det også bli relevant for gartnerier.

I intervjuene uttrykte flere bønder behov for å kunne «oppleve, lukte og ta på» biokull. Det betyr at det ikke er nok med en virtuell, teoretisk *framvisning av biokull*, men at interessen og videre suksess er antatt å være høyere om bøndene kan oppleve biokullproduksjon. Det spiller også en rolle hvem som har dette anlegget installert og viser det fram. Det er trolig ideelt å ha en lokal bonde i et område som implementerer et biokullanlegg slik at andre kan se på det. Det er antatt at en tilnærming som dette ville skape stor nysgjerrighet blant folk i området. Tidligere undersøkelser viser at norske bønder i stor grad benytter seg av *rådgivningstjenester*, som Norsk landbruksrådgivning. Dette er et godt utbygd system, som sammen med fagtidsskrifter og organiserte fagtreff utgjør viktige arenaer for kunnskapsformidling og faglig oppdatering⁴⁰. I den grad man ønsker å spre både kunnskap om og tillit til biokull som klimatiltak og jordforbedrer, er dette viktige kanaler å benytte. Etablering av ett eller flere demonstrasjonsanlegg ventes også å øke både kunnskap om og interesse for produksjon og anvendelse av biokull.

5.2.4 Tillit

Biokullsystem på bruksnivå medfører i mange henseende endringer i driften. Skal bøndene foreta driftsendringer fordrer det tillit til at produksjon og anvendelse av biokull holder det det lover, for eksempel gjennom jordforbedring og at man ikke går i økonomisk tap. Igjen vil demonstrasjonsanlegg og foregangs bønder kunne bidra sterkt til å øke slik tillit.

³⁷ Adams, et al., 2011; Rochecouste, et al., 2015.

³⁸ Regjeringen, 2016

³⁹ Cullen, et al. 2013

⁴⁰ Stråte, 2014

5.2.5 Tilgang og kvalitet på biomasse

Biokullproduksjon er avhengig av tilgang på biomasse. Hvis biokull produseres på småskalanivå er det viktig at gården har tilgang til tilstrekkelig mengde biomasse. Det samme gjelder for mer sentralisert storskalaproduksjon. Jo lengre avstand man må transportere biomassen, jo mindre blir klimagevinsten. På storskala kreves det også tilgang til god infrastruktur (transport).

Kvalitet omfatter to aspekter. For det første er det viktig at biomassen er ren, det vil hovedsakelig si fri for tungmetaller. For det andre må biokullet ha en dokumentert eller opplevd effekt som jordforbedringsmiddel. Når en bonde lager sitt eget biokull har han/hun en god oversikt over kvaliteten for begge disse aspektene. For innkjøpt biokull trengs en form for dokumentasjon av kvalitet for at en kjøper/bruker skal ha tillit til kvaliteten.

5.2.6 Synergier

I intervjuene med to bønder som har eksperimentert med biokull ble det klart at motivasjonen ikke bare var knyttet til biokull som produkt, men at biokull kan brukes når avfallshåndtering og ressurs håndtering blir en utfordring. Bønder som fokuserer på bærekraft kan være en god målgruppe for implementering i en første fase, siden de i sterkere grad enn andre ser på synergier og kretsløp rundt gården. Et intervju med en bonde som lager sin egen kompost og er interessert i å blande inn biokull, ble det klart at biokullets mange egenskaper var viktig. Kullets potensial for å forbedre vann- og næringshusholdning, øke jordas mikroliv og øke avlingene ble vektlagt.

6 Avsluttende refleksjoner

Biokull som klimatiltak i landbruket er et tema med høy kompleksitet som krever god forståelse for problemstillinger som strekker seg over en rekke ulike fagområder som kjemi, bioteknologi, agronomi, økonomi, logistikk, miljø, energi, politikk og samfunnsfag. Mulighetene ved biokull er mange og det kan produseres og brukes på mange ulike måter; biokull kan fremstilles fra mange ulike typer biomasse, og med ulike teknologier og metoder, det går å blande biokull med ulike typer jord og andre materialer og også mikses med ulike tilsatser. En vellykket satsning vil være avhengig av mange faktorer, både eksterne rammebetingelser og spesifikke forhold i ulike situasjoner.

Det er et stort behov for å øke bevisstheten og kunnskapen om biokull, både i teori og praksis. For raskere utvikling og kunnskapsspredning er det sentralt å vise hvordan biokull kan fungere i praksis. Interessen for biokull øker stadig og det finnes flere aktuelle aktører som kan bidra til å øke spredningen av biokull i norsk landbruk. På kort sikt vil lavterskelsystemer for produksjon av biokull i mindre skala ha en viktig rolle, for å gjøre teknologien mer kjent og øke tilgjengeligheten. Det pågår også flere spennende initiativer i andre land, blant annet i Sverige der Stockholm Stad siden våren 2017 har egen produksjon av biokull basert på hageavfall. De har også brukt biokull i jord for beplantning i byen i flere år.

Å få på plass en fysisk demonstrator har vært et sentralt mål i CAPTURE+. I 2017 har prosjektet samarbeidet med Skjærgaarden Gartneri for å få på plass en fysisk enhet for biokullproduksjon på gården i Vestfold. Demonstratoren viser hvordan man kan både produsere og bruke biokull på en gård. Anlegget er tilpasset for at bønder skal kunne produsere større mengder biokull i en kontinuerlig prosess med lav arbeidsinnsats og lave driftskostnader.

Omstillingen til et klimanøytralt landbruk kan forventes å være en omfattende prosess og ta mange år. En viktig nøkkel for å ta i bruk biokull i denne sammenhengen er politiske satsninger. Biokull har potensial for å bidra til betydelige klimakutt i landbruket, og gjennom politiske beslutninger vil det være mulig å stimulere til en raskere implementering av dette som klimatiltak. For at bønder og andre aktører skal satse på biokull trengs flere målrettede insentiver, for eksempel kompensasjon for karbonbinding, støtte for utvikling av pyrolyseanlegg tilpasset bruk i Norge og investeringsstøtte for innkjøp av biokullanlegg. Dersom disse forutsetningene er til stede vil biokull kunne bidra vesentlig til å redusere utslippet av klimagasser fra de norske

landbruket. Aksept for biokull som klimatiltak og implementering av dette kan være nøkkelen for å nå målet om 40 % reduksjon av landbrukets klimagassutslipp innen 2030, slik Norge har forpliktet seg til gjennom Paris-avtalen. Her har Norge nå muligheten for å bli en pådriver og et foregangsland i Europa.

7 Referanser

- Adams, P.W., Hammond, G.P., McManus, M.C., Mezzullo, W.G (2011). Barriers to and drivers for UK bioenergy development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1217–1227.
- Aune, F.R. og Fæhn, T. (2016) *Makroøkonomisk analyse for Norge av klimapolitikken i EU og Norge mot 2030*. Rapport 2016/25, Statistisk Sentralbyrå.
- Biederman, L., and Harpole, S.W. (2013) Biochar and Its Effects on Plant Productivity and Nutrient Cycling: A Meta-Analysis. *GCB Bioenergy* 5: 202–14.
- Budai, A., Rasse, D. P., Lagomarsino, A., Lerch, T. Z., & Paruch, L. (2016) Biochar persistence, priming and microbial responses to pyrolysis temperature series. *Biology and Fertility of Soils*, 52(6), 749-761.
- Cullen, R., Forbes, S.L., Grout, R. (2013) Non-adoption of environmental innovations in wine growing, *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 41:1, 41-48.
- FOE and International Rivers. (2015) *Trading in Fake Carbon Credits: Problems with the Clean Development Mechanism (CDM)*. https://www.internationalrivers.org/files/attached-files/foe_ir_cdm_fact_sheet_final3_10-08.pdf.
- Grønlund, A, og O.M. Harstad. (2014) *Klimagasser fra jordbruket. Kunnskapsstatus om utslippskilder og tiltak for å redusere utslippene*. Bioforsk Rapport Vol. 9 Nr. 11, 2014.
- Gustafsson, M. (2013) *Pyrolysis for heat production: Biochar – the primary byproduct*. Masters thesis. Available online at: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:655188/FULLTEXT02.pdf>
- Hale, S. E., Lehmann, J., Rutherford, D., Zimmerman, A. R., Bachmann, R. T., Shitumbanuma, V., ... & Cornelissen, G. (2012). Quantifying the total and bioavailable polycyclic aromatic hydrocarbons and dioxins in biochars. *Environmental science & technology*, 46(5), 2830-2838.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- International Biochar Initiative. (2013) *State of the Biochar Industry: A Survey of Commercial Activity in the Biochar Field*. Available online at: http://www.biochar-international.org/sites/default/files/State_of_the_Biochar_Industry_2013.pdf
- Kalyani, D. C., Fakin, T., Horn, S. J., og Tschentscher, R. (2017). Valorisation of woody biomass by combining enzymatic saccharification and pyrolysis. *Green Chemistry*, 19, 3302-3312.
- Kammann, C. I., Schmidt, H. P., Messerschmidt, N., Linsel, S., Steffens, D., Müller, C., ... & Joseph, S. (2015) Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. *Scientific reports*, 5, srep11080.
- Klima og forurensingsdirektoratet. (2010) *Klimakur2020. Tiltak og virkemidler for å nå norske klimamål mot 2020*. Klima og forurensingstilsynet, Norges Vassdrag- og energidirektoratet, Oljedirektoratet, Statistisk sentralbyrå og Statens vegvesen. TA2590, 2010.
- Lehmann, J., Joseph, S. (2009) Biochar systems, in: Johannes Lehmann og Stephen Joseph (eds.) *Biochar for environmental management Science and Technology*, Earthscan, New York.
- McLaughlin, H. and Pyle, K. (2016) Practical Applications of Biochar in the Landscape, Ecological landscape alliance. Tilgjengelig: <http://www.ecolandscaping.org/04/biochar/practical-applications-of-biochar-in-the-landscape>
- Miljødirektoratet. (2014) *Faglig grunnlag for videreutvikling av den nasjonale og internasjonale klimapolitikken. Klimatiltak mot 2020 og plan for videre arbeid*. Rapport M-133/2014.
- NOU 2015:15 *Sett pris på miljøet. Rapport fra Grønn skattekommisjon*. Tilgjengelig: <https://www.regjeringen.no/contentassets/38978c0304534ce6bd703c7c4cf32fc1/no/pdfs/nou201520150015000dd.pdf>
- Olje og energidepartementet. (2016) *Mulighetsstudier av fullskala CO2-håndtering i Norge*. Utarbeidet av Gassco, Gassnova og Oljedirektoratet.

- Oslo Economics og Atkins. (2016) *Kvalitetssikring (KS1) av KVVU om demonstrasjon av fullskal fangst, transport og lagring av CO2*. Rapportnummer D014a. Utarbeidet for Olje- og energidepartementet og Finansdepartementet.
- O'Toole, A., Knoth de Zarruk, K., Steffens, M., & Rasse, D. P. (2013) Characterization, stability, and plant effects of kiln-produced wheat straw biochar. *Journal of environmental quality*, 42(2), 429-436.
- Otte, P, og Vik, J. (2017) Biochar systems: Developing a socio-technical system framework for biochar production in Norway. *Technology and Society*, Volume 51, November 2017, Pages 34-45.
- Pettersen, I., Gønlund, A, Stengsgård, A.E. og Walland, F. (2017) *Klimatiltak i norsk jordbruk og matsektor: Kostnadsanalyse av fem tiltak*. NIBIO-rapport 3(2) Norsk Institutt for Bioøkonomi.
- Regjeringen. (2016) The EU proposes climate targets for Norway. 2016-07-20. Tilgjengelig online: <https://www.regjeringen.no/en/aktuelt/the-eu-proposes-climate-targets-for-norway/id2508071/>
- Rocheouste, J.F., Dargusch, P., Cameron, D., Smith, C. (2015) An analysis of the socio-economic factors influencing the adoption of conservation agriculture as a climate change mitigation activity in Australian dryland grain production, *Agricultural Systems*, 135, 20–30.
- Rogers, E.M. (2003) *Diffusion of Innovations*, Free Press, New York.
- Ruysschaert, G., Nelissen, V., Postma, R., Bruun, E., O'Toole, A., Hammond, J., ... Shackley, S. (2016) Field applications of pure biochar in the North Sea region and across Europe. In S. Shackley, G. Ruysschaert, K. Zwart, & B. Glaser (Eds.), *Biochar in European Soils and Agriculture: Science and Practice*. (pp. 99-135). Routledge.
- Smith, P. (2016) Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Glob Change Biol*, 22: 1315–1324.
- Statistisk sentralbyrå, SSB. (2017) Utslipp av klimagasser. Tilgjengelig: <https://www.ssb.no/klimagassn/>
- Steiner, C. KC Das, N Melear, and D Lakly. (2010) Reducing Nitrogen Loss during Poultry Litter Composting Using Biochar. *Journal of Environmental Quality*, 39 (4).
- Stræte, Egil Petter. (2014) *Rådgivning til bonden – et innspill om behov og utfordringer*. Bygdeforskning rapport, 10/2014.
- Sørensen (red.). (2011) *Forprosjekt Biokull Solør-Odal: Samfunnsnytte, dannning og stabilisering, binding av plantevernmidlerrester og endring i klimagassutslipp. Litteratur og regional analyse*. Del 2. Prosjektrapport nr 1/2011 fra New Energy Systems AS.
- Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J. & Joseph, S. (2010) Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature communications*, 1, 56.



Teknologi for et bedre samfunn

www.sintef.no