



CIP fonden

## Mulige miljøeffekter af biokul

Baggrundsnotat nr. 3  
Januar 2024

# Baggrundsnotat om mulige miljøeffekter af biokul

## Indholdsfortegnelse

1. Sammenfattende pointer om biokul, biodiversitet og jordens sundhed.....	2
2. Hvorfor er biodiversitet vigtigt i forhold til biokul og CO <sub>2</sub> e fangst? .....	4
3. Biokuls effekter på jordens <i>fysiske</i> egenskaber .....	7
3.1. Jordens kulstofindhold.....	7
3.2. Jordens kompakthed .....	8
3.3. Jordens aggregater .....	9
3.4. Tilbageholdelse af vand i jord.....	9
3.5. Jordens næringsstoffer.....	10
4. Biokuls effekter på jordens <i>kemiske</i> egenskaber .....	10
4.1. Jordens pH-værdi .....	11
4.2. Jordens kationbyttekapacitet (CEC).....	11
4.3. Jordens saltindhold.....	11
5. Biokuls effekter på jordens biodiversitet .....	12
5.1. Biokuls effekter på jordens fauna .....	12
5.2. Regnorme .....	13
5.3. Andre mikro-leddyr .....	13
5.4. Jordens mikroorganismer .....	13
5.5. Risiko ift. tungmetaller og problematiske stoffer .....	14
6. Skader brugen af biokul på andre måder biodiversiteten?.....	16
7. Øvrige miljø- og bæredygtighedseffekter for landbruget af biokul .....	16
7.1. Reduceret kvælstofudledning til vandmiljøet ved brug af biokul .....	17
7.2. Biokul som fodertilsætning .....	17
7.3. Andre eksempler på miljøeffekter af biokul .....	18
8. anbefalinger til fortsat videnopbygning .....	18
9. Kilder.....	20
Bilag: Grundlag for vurdering i Videnssynthesen om biokul .....	22

Dette baggrundsnotat sammenfatter forskellige kilder med viden om biokuls mulige miljøeffekter og påvirkning af jordens frugtbarhed og så vidt muligt også effekter på biodiversitet. Notatet bygger i overvejende grad på konklusioner fra videnssynthesen om biokul udgivet af Aarhus Universitet i 2022 (DCA-rapport nr. 208) og oplæg fra de forskere, der medvirkede hertil, men er suppleret med en række øvrige forskningsresultater, hvoraf flere er kommet til siden videnssynthesens tilblivelse.

Biokul har, ud over at kunne lagre kulstof, en række positive sidegevinster, men kan også have negative sideeffekter, som især knytter sig til miljøeffekterne. Selv om det ikke er et velbelyst område, er det afgørende i forhold til overvejelser om markedsføring af biokul og anvendelse i landbruget.

Baggrundsnotatet har været drøftet med CIP Fondens Advisory Board og udvalgte gæster, og der takkes for de mange gode bemærkninger og forslag.

Notatet er bygget op, så det først præsenterer hovedpointer og dernæst motivationen for at se på konsekvenser for biodiversitet mv. Konklusionerne er inddelt efter biokuls mulige påvirkning af jordens fysiske og kemiske egenskaber og dernæst en opsamling i forhold til biodiversitet og mulige skadelige virkninger samt andre typer af miljøeffekter. Der samles op med anbefalinger i forhold til fortsat videnopbygning.

---

#### Disclaimer

Informationen i denne rapport er af generel karakter og 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 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.

## 1. Sammenfattende pointer om biokul, biodiversitet og jordens sundhed

Biokul har store klimamæssige potentialer gennem CO<sub>2</sub>-fangst og -lagring og gennem produktion af grøn energi. Men processen og produktet skal også være bæredygtigt på andre planer, herunder miljømæssigt og i forhold til potentiel påvirkning af biodiversiteten.

Bæredygtighed dækker over en række forskellige forhold, herunder klimaeffekter, men i rapporteringen heraf er der kommet et øget fokus på miljømæssige effekter og biodiversitet. Når store virksomheder, herunder finansielle institutioner, i højere grad skal foretage rapportering heraf, stiller det også krav til underleverandører og kunder, eksempelvis landmænd og pyrolyseanlæg, om at kunne redegøre for deres påvirkning af klima og eksempelvis biodiversitet. Klimacertifikater kan også indeholde krav om beskrivelse af bæredygtighedskonsekvenser ud over klimaeffekter.

For landmændene er det væsentligt at kunne vurdere konsekvenserne for landbrugsjorden og dens egenskaber, når de leverer restbiomasse til produktion af biokul og evt. også modtager det igen i form af biokul på markerne.

Når det handler om biomasse som input til produktion af biokul, vil det som udgangspunkt ikke påvirke biodiversiteten og inddrage yderligere arealer. Det skyldes, at biokul baseres på en kaskadeanvendelse af rester og sidestrømme, som har haft et andet, oprindeligt formål, hvorfor biomasse til biokul i sig selv ikke lægger beslag på arealer. Men når restbiomasser fjernes fra marken, fx halmrester og andre strårester, afhænger nettoeffekten for biodiversiteten på den konkrete mark af, hvad der sættes i stedet, herunder brug af gødning og biokul.

Biokul kan påvirke biodiversiteten gennem dets effekter på landbrugsjorden, primært med positive effekter, men også med mulige negative effekter, især ved høje doser. Dertil kommer en uafklaret viden om de langsigtede virkninger. Dette fremhæves ofte som et af kritikpunkterne af biokul.

Opsamling på positive miljø- og bæredygtighedsmæssige sideeffekter af biokul:

- Internationale studier viser en gennemsnitligt positiv og signifikant effekt af biokul på jordens *dyrkningsegenskaber* og udbytter, især i tropiske egne. Der kan dog ikke påvises tydelige, positive effekter på afgrødeudbytte på tempererede jorde, og der findes ikke studier med signifikante udbyttetigninger ved brug af biokul under danske markforhold. Det skal ses i lyset af, at kvaliteten af danske jorde er relativt optimeret.
- Brug af biokul kan påvirke jordens *evne til at tilbageholde vand*, især jord med grov tekstur (sandede jorde). På sandede jorde, som er det mest udbredte i Vestdanmark, er der således potentiale for bedre vandoptag og -bevaring ved brug af biokul, hvilket undersøges aktuelt. Biokul kan reducere vandingsbehovet og øge tørkeresistensen.
- Biokuls vandholdende og jordforbedrende evne kan også *reducere udvaskningen af kvælstoffer* til vådområder.
- Brug af biokul på landbrugsjorde kan *reducere jordens udledning af lattergas*, idet biokullet påvirker de mikrobielle processer i jorden.
- Manglen på kulstof i jorden (dvs. om der er tilstrækkeligt kulstof) vurderes sammen med jordpakning (fx fra færdsel med tung trafik) og erosion at være de væsentligste udfordringer i forhold til jordkvalitet i Danmark. Biokul kan *øge den samlede mængde af kulstof i jorden*, som ellers er aftagende i Danmark, især i lerede jorde.
- Biokul kan gøre jorden *mindre kompakt* med bedre porerum til mikroorganismene, som fremmer den biologiske aktivitet, og skaber bedre opbevaring og fordeling af luft og vand i jorden.
- Biokul *forbedrer jordens struktur* (styrket "krummestruktur" eller aggregatstabilitet), så jorden bedre kan fastholde vand og næringssalte, udveksle ilt og kuldioxid og skabe adgang for rødder og jordbundsdyr til gavn for plantevæksten.

- Biokul kan (alt efter anvendt biomasse) *øge jordens pH-værdi* og i et vist omfang *erstatte kalkning* af jorden. Danske jorde oplever ellers et løbende fald i pH-værdien og har behov for tilførsel af kalk.
- Biokullenes form og fosforindhold tillader en *geografisk omfordeling af fosfor* mellem jorde i Danmark fra vest mod øst og begrænser behovet for import af fosfor, der er en knap ressource i verden.
- Brug af biokul kan *absorbere problematiske organiske forbindelser og tungmetaller* i jorden, og der er eksempler på, at biokul er blevet brugt til jordsanering, altså oprensning af forurenet jord.
- Biokul har generelt en *positiv indvirkning på jordens mikroorganismer* gennem en øget mængde mikrobiel biomasse, og større diversitet og aktivitet ifølge videnssynthesen om biokul fra Aarhus Universitet, men forståelsen bag samspillet er stadig begrænset, og der er også rapporteret eksempler på negative effekter.

Effekterne er ikke lige store for al biokul. "Biokul er ikke bare biokul, og jord er ikke bare jord". Effekten af biokul på jordens fysiske egenskaber afhænger af jordtypen, klimaet og det tilsatte biokul (typen af biomasse, pyrolyseproces og biokullets form og overfladestruktur).

Opsamling på negative miljø- og bæredygtighedsmæssige sideeffekter af biokul:

- Biokul baseret på fx halmrester kan i store mængder potentielt skabe *saltproblemer* i jordene. Dette gælder ikke, hvis udbringningen af halmbaseret biokul fx overholder fosforloftet, og udbringningen sker i mere realistiske mængder.
- Hvis biokul *indeholder tungmetaller og andre problematiske stoffer* (som kan stamme fra de anvendte biomasser og fra suboptimal procesbehandling), kan det forurene jorden, hvorfor biokullenes indhold og procesbehandlingen bør leve op til bestemte grænseværdier og standarder for kullenes egenskaber.
- Biokuls evne til at absorbere organiske stoffer gælder også for *organiske landbrugskemikalier* (fx pesticider), hvor biokul kan være med til at *reducere effekten* af disse ved at mindske deres biologiske tilgængelighed.
- Biokul kan også *reducere effekten af nitrifikationshæmmere*, som ellers bruges for at reducere jordens udledning af potente drivhusgasser (lattergas).

Uafklarede sideeffekter af biokul:

- Der er behov for en bedre *forståelse af dynamikken og balancerne* i at fraføre organisk materiale fra forskellige dyrkningsområder og så recirkulere næringsstofferne i form af biokul, vådfractioner mv. alt efter hvilken biomasse, der er tale om. Den forståelse kan understøttes af praksisnære og langsigtede forsøg under danske forhold og med en tydelig opdeling efter jordtype og anvendt biomasse.
- Internationale studier viser, at biokul både kan have positive og negative effekter på *regnorme* og dermed på jordens mikrobiologi, mens et tilsvarende dansk studie viser, at regnormens forekomst i jorden var upåvirket af brugen af biokul. Regnorme er sammen med andre mikroorganismer vigtige for at omdanne planterester til næringsstoffer til nye planter, samt til at "skubbe" jorden rundt og ilte og dræne den, når de graver gange.
- Biokul begrænser udvaskningen af næringsstoffer til vandmiljøer, men der er samtidig en (teoretisk) risiko for udvaskning af selve biokul til vandmiljøer (via dræn og overfladevand), som kan påvirke de vandlevende organismer på en u hensigtsmæssig måde, og som kræver nærmere undersøgelse.

Landbrugsstyrelsen (2023) har i forbindelse med tilladelse af udbringning af visse typer biokul på landbrugsjord vurderet, at brugen af biokul som gødningsprodukt overholder vandrammedirektivet og ikke vil påvirke Natura 2000-områderne. Biokul som gødningsprodukt vurderes i den forbindelse af Landbrugsstyrelsen ikke at have en negativ effekt på menneskers sundhed eller miljøet.

Fortsat videnbehov og mulige anbefalinger om biokul i lyset af effekten på biodiversitet og andre økotjenester:

Forskningsmæssigt er der stor interesse for biokul, og der kommer løbende nye, vigtige resultater til. Fx om stabiliteten af biokuls evne til at lagre kulstof over tid, som har betydning for, hvordan det kan indregnes som klimavirkemiddel.

Der har været fremstillet biokul i mange hundrede år i bl.a. Amazonas, og effekterne på jorden har været undersøgt. I sagens natur er der ikke så mange feltstudier af de langsigtede effekter af at bruge biokul produceret af nutidens biomasser og med nutidens teknologi, hvor man i stedet læner sig op ad laboratorieforsøg og fremskrivninger. I takt med øget brug af biokul bør der etableres et forskningsprogram til at følge anvendelsen og effekterne, som så kan føde tilbage til fortsat udvikling af guidelines omkring den optimale brug.

Det er generelt vanskeligt at isolere effekten af biokul på landbrugsjorden, da andre forhold som jordtype mv. også har stor betydning, ligesom der kan være forskelligrettede interaktioner og forhold, der kan forstærke hinandens effekter. Det kræver derfor en holistisk tilgang til analyserne, og en tydelig dokumentation af, hvad der har været grundlaget for de forskellige forskningsresultater.

- Generelt er der behov for flere langvarige og praksisnære markstudier under danske forhold af effekterne på jorden, hvor der skelnes mellem forskellige typer af biokul (efter biomasse og behandlingsproces), anvendte mængder og forskellige kombinationer af jordtyper.
- Der er samtidig behov for mere viden om biokuls effekter i forhold til vådområder, herunder eventuel udvaskning direkte af kullene og konsekvenser for vådområdet, men også kullenes evne til at hindre udvaskning af kvælstoffer fra jorden. Der mangler eksempelvis en forståelse af, hvor store mængder biokul der skal tilføres jorden for at opnå en målbar effekt på udvaskningen af nitrat til vådområder, og hvordan det hænger sammen med andre effekter, hvis biokul også skal kunne fungere som vandmiljøvirkemiddel.
- Der er behov for at undersøge og dokumentere effekten og levetiden af den kalkningseffekt, som biokul kan medføre, og i hvor høj grad det kan aflaste anden jordkalkning.
- Der er behov for at undersøge i hvilken grad biokul kan stabilisere forskellige problematiske stoffer, der allerede måtte være i jorden og forurene den, og hvad det kræver af biokul, hvis biokullet også skal anvendes i Danmark til jordoprensning, som det fx sker i andre lande.
- På grund af de forskelligartede effekter af biokul alt efter biomasse, pyrolyseproces, jordtype osv. og på grund af de forskelligartede krav fra hhv. regulering og klimacertifikater kan der være behov for at udarbejde og udbrede en fælles minimumsstandard for produktionsforhold for biokul, herunder minimumsstandarder for det producerede biokul, og grænseværdier for dets indhold, som forudsætning for tilførsel på jord.

## 2. Hvorfor er biodiversitet vigtigt i forhold til biokul og CO<sub>2</sub>e fangst?

Biokul kan lagre kulstof og har stor opmærksomhed som klimavirkemiddel. Brugen af biokul har samtidig en række andre effekter ved anvendelse på jordområder, herunder miljømæssigt og i forhold til jordens frugtbarhed og den tilhørende biodiversitet, som kan spille ind på lysten til at bruge biokul på landbrugsjord.

Dertil kommer, at rapportering om bæredygtighedskonsekvenser af ens forretningsområde og tilhørende værdikæde bliver stadig mere aktuel i takt med, at nye krav til den finansielle sektor og de store virksomheder implementeres. Er man kunde eller leverandør, spiller disse krav også over på ens virksomhed og kan få betydning for, hvem man kan indgå kontrakter med, og på hvilke vilkår man kan opnå finansiering.

Endelig indgår øvrige bæredygtighedskonsekvenser, herunder på miljø og biodiversitet, også i stigende i grad i udarbejdelsen af klimacertifikater, der verificerer klimaeffekten af biokul. Klimacertifikater er grundlaget for, at man kan handle klimakreditter og opnå en betaling for sin CO<sub>2</sub>e-fangst.

Klimamæssigt har biokul en form for "dobbelteffekt" ved både at understøtte CO<sub>2</sub>-lagring og samtidig styrke jordens kvalitet, så den bedre modstår konsekvenserne af klimaforandringer. Klimaforandringerne er med stigende temperaturer en trussel mod landbrugsjordens kvalitet på sigt, idet jordens organiske indhold mineraliseres hurtigere ved højere temperaturer<sup>1</sup>. Når mængden af organisk indhold i jorden alt andet lige falder, vil det påvirke dyrkningen negativt. Modsat trækker en øget vækstsæson i takt med stigende temperaturer i visse egne, herunder i Danmark.

De positive sidegevinster ved brug af biokul på landbrugsjord går lige fra jordforbedringseffekter, hvor jorden bliver mindre kompakt og "luftes" (via biokullenes porerum), til påvirkning af jordens kalk- og fosforniveau og øget vandholdende evne af jorden, som fremmer en form for buffer mod tørkestress og kan reducere jordens udledning af næringsstoffer til nærtliggende vådområder. Biokul vil samtidig øge kulstofreserven i jorden, som ellers er aftagende på danske jorde, og skabe bedre plads til mikroorganismernes trivsel til gavn for biodiversiteten i jordbunden.

Samtidig er der nogle steder skepsis i forhold til at anvende biokul på landbrugsjord pga. usikkerhed om de langsigtede effekter af at bruge biokul, mulige negative effekter, og uklarhed om det optimale anvendelsesomfang.

Udfordringen er, at biokul ikke bare er biokul, men dets egenskaber afhænger af, hvilken biomasse det er produceret af, samt pyrolyseprocessen, den er skabt af ift. temperatur og varighed. Dertil spiller selve jordens kvalitet ind på samspillet med biokullet. Der ses derfor nogle gange modsatrettede forskningsresultater for brugen af biokul på visse områder, og det kan være vanskeligt at nå generelle konklusioner.

De forskelligartede resultater kan være med til at skabe bekymring om biokul og biokuls effekt på landbrugsjorden og biodiversiteten, hvor dette notat søger at samle op på den tilgængelige viden herom. Jordbunden huser mere end 25 pct. af al biodiversitet på planeten og er grundlaget for de fødekæder, der nærer mennesker og biodiversiteten over jordoverfladen<sup>2</sup>. Biokullenes effekt på jorden er derfor væsentlige at få afdækket.

Biodiversiteten påvirkes som udgangspunkt ikke ved, at der laves biokul af biomasse i form af rester eller sidestrømme. Der lægges således ikke beslag på yderligere areal til dyrkning af biomasse specifikt til biokul, når udgangspunktet er kaskadeanvendelse af biomasser, der inden da har været brugt til andre formål højere oppe i værdikæden. I det omfang restbiomassen alternativt ville være blevet udbragt på landbrugsjord, fx i form af halmrester der pløjes ned, afhænger nettoeffekten af, hvad der i stedet tilføres jorden. 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.

### **Boks 1: Hvad er sammenhængen mellem sund jord, biodiversitet og brug af biokul?**

Sund jord betyder, at jordene er i en god kemisk, fysisk og biologisk tilstand og kan levere en bred vifte af økosystemtjenester. En sund jord understøtter dermed god plantevækst, har høj biodiversitet og et relativt højt indhold af organisk kulstof (fx 2 pct. på tørvægtsbasis).

Jordbunden og de mange organismer, der lever i jorden, forsyner os med fødevarer, biomasse, fibre og råmaterialer, og regulerer vand-, kulstof- og næringsstofkredsløbet og gør livet på land muligt. Det tager tusindvis af år at producere nogle få centimeter jord. De levende organismer i jorden er ansvarlige for mineralisering af organisk stof og genanvendelse af næringsstoffer som kvælstof (N), fosfor (P) og kalium (K) til plantevækst. Biodiversiteten i jorden har derfor betydning for dyrkningsmulighederne.

Jordbunden forventes at skulle levere og filtrere drikkevand, der er egnet til forbrug, til en verdensbefolkning på næsten 10 mia. mennesker inden 2050. Sund jordbund er også den største jordbaserede kulstofpulje på jorden. Dertil kommer jordbundskvalitetens betydning for at kunne afbøde og tilpasse sig til klimaforandringer med tilhørende risiko for oversvømmelser og tørke.

EU har ikke alene rettet fokus mod klimaændringer, men også mod værdien af sund jord og genoprettelse af forringet jordkvalitet. Over 60 pct. af den europæiske jord er allerede i en forringet tilstand, og påvirkes yderligere på grund af ikke-bæredygtig forvaltning af jorden, forsegling (ødelæggelse eller tildækning af jorden med et uigennemtrængeligt materiale), forurening og overudnyttelse, kombineret med klimaændringer og ekstreme vejrbegivenheder.

<sup>1</sup> Jf. Vidensyntese om klimatilpasning og landbrug udarbejdet af Andersen et al (2023), DCA rapport, Aarhus Universitet.

<sup>2</sup> EU Kommissionen (2021) baseret på FAO (2020).

Jordforsegling påvirker ofte frugtbar landbrugsjord, bringer biodiversiteten i fare, øger risikoen for oversvømmelser og vandknaphed og bidrager til global opvarmning. Siden midten af 1950'erne er det samlede areal af byer i EU steget med 78 pct., hvilket i høj grad bidrager til jordforsegling og dens negative virkninger.

EU offentliggjorde i 2021 en jordbundsstrategi for 2030, hvor den efterfølgende forordning om naturgenopretning og udmøntning indebærer, at mindst 20 pct. af EU's land- og havområder senest i 2030 skal være naturgenoprettet og Kommissionen udsendte 5. juli 2023 forslag til et direktiv for jordsundhed (Soil Monitoring Law). Direktivet udgør en juridisk ramme, der skal indføre en solid og sammenhængende overvågningsramme for alle jorde i hele EU, så medlemsstaterne kan træffe foranstaltninger til at regenerere forringet jord og gøre bæredygtig jordforvaltning til normen i EU. Medlemsstaterne skal definere, hvilken praksis, der skal implementeres af jordforvaltere, og hvilke der skal forbydes, fordi de forårsager jordforringelse.

Brugen af biokul til jordforbedring kan spille en rolle i den kommende jordbundsstrategi, ud over at udgøre et væsentligt klimavirkemiddel. Det kræver et solidt vidensgrundlag om konsekvenser af tilførte mængder af biokul på landbrugsjorden. Beskyttelse og vedligeholdelse af jordbundens biologi er af høj relevans for at opretholde en sund jord med høj landbrugsværdi.

Kilder: EU Kommissionen (2021), EU Kommissionen (2023a), Altinget (2023), og Videnssynthesen om biokul, afsnit 9.7 og kapitel 7 af Sørensen og Abalos i Elsgaard et al (2022), DCA-rapport nr. 208.

Biodiversitet spiller også en stigende rolle i forhold til, hvad virksomheder forventes at afrapportere bæredygtighedsmæssigt.

## Boks 2: Rapportering af bæredygtighed med øget fokus på biodiversitet

Biodiversitet er rykket højt op på bæredygtighedsdagsordenen, hvorfor det i fremtiden kan udgøre en central parameter i ESG-sammenhæng og i forhold til afrapporteringen af konsekvenserne af en virksomheds aktiviteter.

Det forventes, at rapportering af konsekvenser for biodiversiteten fremover kan blive obligatorisk, som klimapåvirkninger er ved at blive det. Der kræver dog udvikling af datakrav og opgørelsesmetoder. Indtil da er rapporteringen startet op med frivillige indberetninger samt få, obligatoriske standardoplysninger.

Fra 2024 øger EU-Kommissionen kravene til bæredygtighedsrapportering gennem Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD), der blev offentliggjort i 2022 som del af EU's "Green Deal". De nye krav betyder, at flere virksomheder vil blive indbefattet af rapporteringskravene, og på sigt vil flere indirekte udledninger fra virksomhedens værdikæde, både i forhold til leverandører, forretningsforbindelser og virksomhedens ydelser, blive inkluderet i rapporteringskravene.

De nye krav bliver gradvist indfaset. I 2024 vil virksomheder af interesse for offentligheden (hovedsageligt børsnoterede selskaber, banker og forsikringsselskaber) med over 500 medarbejdere blive omfattet. Fra 2025 vil store virksomheder med mere end 250 medarbejdere blive omfattet. I 2026 vil børsnoterede små og mellemstore virksomheder blive omfattet<sup>1</sup>. Indirekte vil mindre virksomheder blive omfattet hurtigere, idet de som leverandører eller kunder til større virksomheder kan blive omfattet af deres scope 3-rapportering.

For virksomheder, der er omfattet af CSRD, vil det være obligatorisk at rapportere i henhold til de fælles europæiske standarder, European Sustainability Reporting Standards (ESRS)<sup>1</sup>. Derudover indeholder ESRS øvrige standarder, som virksomheder kun skal indberette, hvis det er væsentligt for deres forretningsmodel, herunder en standard for biodiversitet. Rapportering på biodiversitet er ikke obligatorisk. Det er op til virksomheden selv at vurdere, om de vil rapportere, og valget skal begrundes.

Nogle danske virksomheder har allerede frivilligt forpligtet sig til at rapportere om biodiversitet. Danske Bank, Nordea Asset Management, PensionDanmark, PKA og Velliv har underskrevet Finance for Biodiversity Pledge, hvor de forpligter sig til at rapportere offentligt om biodiversitet i deres aktiviteter inden 2025. Det kan betyde, at finansielle institutioner i fremtiden beder deres kunder (virksomheder og landmænd) om at dokumentere deres indsatser allerede inden 2025.

Også af den grund er det væsentligt at få overblik over implikationerne for biodiversiteten ved produktion og anvendelse af biokul.

Kilder: CSR (2023), Kromann Reuter, EU Kommissionen (2023b-d) og Dansk Industri

### 3. Biokuls effekter på jordens fysiske egenskaber

Biokul bliver ofte nævnt som havende jordforbedrende egenskaber, når det anvendes på landbrugsjord. Dermed påvirker biokullet jordens fysiske egenskaber. De jordfysiske egenskaber handler om samspillet mellem faste partikler, væske og gas i jorden. Det er et samspil, der har stor indflydelse på, hvor godt jorden f.eks. kan understøtte plantevækst. Jordens fysiske egenskaber vedrører bl.a. jordens tekstur (om jorden er sandet, leret eller noget imellem), dens porøsitet (hvor meget plads er der mellem jordpartiklerne), og dens evne til at holde på vand og lade vand flyde gennem det.

Biokul vil bl.a. kunne påvirke jordens kulstofindhold, jordpartiklernes overfladeareal, evne til at tilbageholde vand, pH-værdien, saltholdighed, risikoen for jorderosion, og tilgængeligheden af næringsstoffer. Anvendelse af biokul på landbrugsjord kan også reducere jordens udledning af potente klimagasser (lattergas (N<sub>2</sub>O) og metan (CH<sub>4</sub>)), idet biokul påvirker de mikrobielle processer i jorden<sup>3</sup>. Se også afsnit 5.4.

Hvis biomassen fra start indeholder problematiske organiske forbindelser og tungmetaller, og pyrolyseprocessen har været inoptimal, vil biokul kunne frigive disse til jorden, når de spredes ud. Biokul kan imidlertid også adsorbere problematiske stoffer fra jorden. Sidstnævnte har ført til brug af biokul til jord-sanering, og i landbrugsjord kan absorptionsprocesserne også omfatte adsorption af organiske landbrugskemikalier, såsom pesticider.

Effekten af biokul på jordens fysiske egenskaber er bl.a. vurderet i Aarhus Universitets vidensyntese om biokul, hvis baggrund er nærmere udfoldet i bilag.

#### 3.1. Jordens kulstofindhold

Vidensyntesen om klimatilpasning og landbrug beskriver, at mængden af kulstof i jorden (dvs. tilstrækkeligt kulstof i jord) sammen med jordpakning og erosion er de væsentligste udfordringer i forhold til jordkvaliteten i Danmark<sup>4</sup>.

Klimaændringerne er en trussel mod jordens kvalitet på lang sigt, fordi mineraliseringen af organisk materiale fremmes af stigende temperaturer. Et lavere indhold af organisk stof i jorden vil påvirke dyrkningen negativt.

I Danmark har dyrkningsjordens kulstofindhold generelt set været faldende på de lerede jorde og ligget på et stabilt niveau for de sandede jorde over de seneste 4 årtier<sup>4</sup>. Tabet af kulstof på de østdanske lerjorde forklares med ændringer i dyrkningspraksis i form af mindre andel af græs i sædskiftet, fjernelse af halm og mindre husdyrgødning.

Klimaforandringerne påvirker i betydelig grad både kulstofftilførsel og -fraførsel. Øget temperatur og udvidet vækstsæson vil alt andet lige give bedre betingelser for plantevæksten for både hoved- og især efterafgrøde (dvs. øget biomasseproduktion) og dermed øge kulstofftilførslen til jorden. Dette vil blive modvirket af øget kulstofomsætning (mineralisering af organisk materiale) og dermed kulstoffraførsel.

Om klimaforandringerne resulterer i et faldende kulstofindhold, vil således afhænge af, om de forbedrede vækstbetingelser i et varmere klima – særligt for plantevækst i vinterhalvåret – udnyttes fuldt ud til at øge biomasseproduktionen. Et klimabetinget fald i kulstofindholdet forventes under danske forhold at have størst effekt for jordkvaliteten på de lerede jorde, som allerede har et lavt og faldende kulstofindhold.

Her forventes i så fald, at kulstofftabet forårsager øgede problemer med dårlig strukturstabilitet og evne til at smuldre og danne et godt såbed (se afsnit 3.3 om jordaggregater). Dårligere strukturstabilitet øger risikoen for erosion og tilslemning (så rødderne ikke kan få ilt), som har afledte problemer for både planteproduktion og miljø. Endvidere forventes et faldende kulstofindhold at reducere jordens vandholdende evne og vandinfiltrationsevne.

Et lavere indhold af organisk stof i jorden kan modvirkes af en øget planteproduktion med f.eks. flerårige afgrøder og flere efterafgrøder, der kan tilføre kulstof til jorden. Når dyrkningssystemet tilpasses f.eks. med flere flerårige afgrøder, vil det ikke kun have en positiv påvirkning på jordens kvalitet, det vil også have en positiv indvirkning på jordbundens fauna.

De vigtigste virkemidler til at forøge dyrkningsjordens indhold af kulstof under danske forhold indbefatter:

<sup>3</sup> Longlong et al (2023) baseret på livscyklusanalyse udført af Aarhus Universitet.

<sup>4</sup> Andersen et al (2023), DCA Rapport, Aarhus Universitet, afsnit 3.1.2.



- øget dyrkning af efterafgrøder og græs samt
- øget efterladelse af halm

Selvom potentialet i forhold til kulstoflagring med disse virkemidler er vurderet til at være forholdsvis begrænset, kan virkemidlerne være vigtige i forhold til at gøre jorden mere klimarobust.

Dertil kommer biokul, som også er et vigtigt virkemiddel til at øge kulstoflagringen i den dyrkede jord, og til at forbedre særligt de jordfysiske egenskaber. Biokul vil dog i en række tilfælde blive produceret på basis af halm og/eller husdyrgødning, som ellers kunne være brugt direkte på markerne med en gødningseffekt og en kortvarig kulstoflagring, så her skal ses på nettovirkningen.

Øget kulstofindhold, porøsitet og stabilitet øger tidsvinduet, hvor vandindholdet er optimalt i forhold til jordbearbejdning. Det giver flere arbejdsdage med optimal jordbearbejdning og dermed mindsket risiko for et såbed med hårde knolde, og deraf følgende negative effekter på afgrødeetablering og tidlig vækst.

### 3.2. Jordens kompakthed

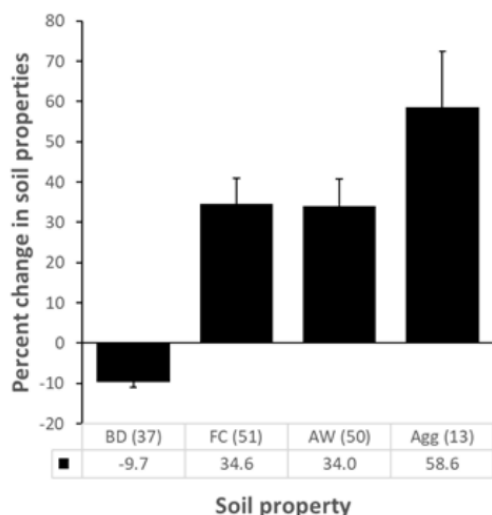
Jordens tæthed, altså hvor kompakt den er, har betydning for dens dyrkningsegenskaber<sup>5</sup>. Høj kompakthed er forbundet med en stærk, kompakt eller tæt struktur, og lav kompakthed er forbundet med en svag eller løs struktur. En god jordstruktur er moderat kompakt, hvilket giver støtte til plantevækst samt opbevaring og fordeling af luft og vand. Omvendt er en kompakt jord med en meget høj tæthed skadelig for afgrødevækst, da frøene hæmmes i at spire, med deraf følgende begrænset rodvækst og risiko for vandmangel.

I gennemsnit falder jordens kompakthed med knap 10 pct. efter tilførsel af biokul, jf. figur 1 nedenfor. Faldet var størst for mellemtekstureret jord (-13,5 pct.) sammenlignet med fintekstureret ler (-5,3 pct.) eller groft sand (-6,7 pct.)<sup>6</sup>.

Reduktionen i jordens kompakthed efter tilførsel af biokul kan tilskrives:

- lavere massefylde (<0,6 g) og højere porøsitet i biokul sammenlignet med jordpartikler, og
- fremme af biologisk aktivitet og aggregering samt øget makroporøsitet

**Figur 1.** Gennemsnitlig, procentvis ændring i jordens fysiske egenskaber efter tilførsel af biokul



*Figure 4.1. Average percent changes in soil physical properties after addition of biochar. BD: bulk density, FC: soil water content at field capacity or water holding capacity, AW: plant available water content, Agg: soil aggregation indicator. The number of studies for each soil property is indicated in parentheses. Error bars represent standard errors.*

Kilde: Videnssynthesen om biokul, kapitel 4 af Arthur og Andersen, Elsgaard et al (2022), DCA rapport nr. 208

<sup>5</sup> Jordens kompakthed (bulk density) er et nøgleparameter for den pågældende jords struktur, herunder komprimering, vand- og luftindhold.

<sup>6</sup> Videnssynthesen om biokul, afsnit 4.1.2. af Arthur og Andersen, Elsgaard et al (2022), DCA rapport nr. 208.

Brugen af biokul kan således gøre jorden mindre kompakt med bedre porerum til mikroorganismene og beskyttelse af dem. Videnssynthesen om biokul fra Aarhus Universitet taler i den forbindelse om mulighederne for at styrke mikroorganismene gennem brug af optimeret og specialdesignet biokul, men at der også mangler viden på området<sup>7</sup>.

### 3.3. Jordens aggregater

Når jordens indhold af organisk kulstof øges som følge af tilført biokul, fører det til dannelse af nye aggregater<sup>8</sup> og øget stabilitet af eksisterende aggregater<sup>9</sup>. Aggregater er afgørende for jordens funktioner, herunder stabilisering og nedbrydning af organisk stof, vandtilbageholdelse samt luftstrøm – som alle er nødvendige for plantevækst, og beskriver, hvordan faste jordpartikler (ler, silt, sand og partikler af organisk stof) er kombineret og interagerer med hinanden.

Dårligt aggregeret jord nedbrydes let, når det udsættes for vand (eroderer), og har dårlig vandtilbageholdende evne sammenlignet med godt aggregeret jord, der er modstandsdygtig over for nedbrydning og kan bekæmpe klimaændringer på lang sigt gennem kulstof-lagring. Biokullet er således med til at gøre jorden mere modstandsdygtig over for klimaforandringer.

Jf. Videnssynthesen om biokul fører tilsætning af biokul til en gennemsnitlig stigning på 58,6 pct. i stabiliteten af aggregater<sup>9</sup>, men baseret på relativt få undersøgelser. Stigningen i aggregatstabiliteten efter biokul er derfor usikker i størrelsen, men kan tilskrives en øget mængde organisk kulstof og øget mikrobiel aktivitet, som begge er nødvendige for at binde aggregaterne.

Jordtypen betyder også noget for biokullenes effekt på stabiliteten af aggregater. Undersøgelser viser f.eks., at tilsætning af biokul (baseret på elefantgræs) reducerede stabiliteten af aggregater med 7 pct. i muldjord, mens det øgede sammenhobningen af aggregater med 19 pct. i sandet muldjord<sup>9</sup>.

### 3.4. Tilbageholdelse af vand i jord

Jordens vandholdende evne afspejler, hvor store eller små jordporerne er, og hvordan de er fordelt i jorden.

Vandretentionen (vandholdende evne) defineres af:

- markkapacitet (FC), som definerer det vand, der forbliver i jorden, efter overskydende vand er drænet af tyngdekraften, og
- plantetilgængeligt vand (AW), som er det vand, planter kan få adgang til på et givet tidspunkt.

Jordens vandtilgængelighed bliver således kun forbedret, hvis FC- og AW-indholdet øges på samme tid.

Tilføring af biokul til jorden fører til en stigning på cirka 35 pct. i både markkapaciteten og i plantetilgængeligt vand<sup>9</sup>. Biokuls effekt på jordens vandtilbageholdelse og -tilgængelighed er afhængig af jordtypen og tilførringsraten. Når jordens indhold af organisk kulstof øges som følge af tilført biokul, fører det til dannelse af nye aggregater og øget stabilitet af eksisterende aggregater. Det øger jordens mulige evne til at holde på vand<sup>9</sup>.

Effekten af biokul på vandretentionsevnen afhænger i høj grad af jordtypen jf. tabel 1. Her bliver vandtilbageholdelsesevnen som følge af biokul bedre i jord med grov struktur end i finere strukturer.

<sup>7</sup> Videnssynthesen om biokul, kapitel 5 af Winding og Elsgaard, Elsgaard et al (2022), DCA rapport nr. 208

<sup>8</sup> Aggregater er jf. Landsforeningen Praktisk Økologi små ærtelignende strukturer, som man møder i uspolerede jorder. De er det synlige resultat af jordens økologiske kredsløb af bakterier, svampe, encellede og flercellede, orme, leddyr, bløddyr og hvirveldyr i aktion. Aggregater binder og nærmest limer jordpartikler sammen, stabiliserer dem og beskytter jorden mod erosion, forbedrer jordens evne til både at dræne og holde på vand, og sikrer at næringsstoffer kan recirkulere i de øvre jord- og plantelag, fremfor at udvaske til lavere jordlag og grundvand. Aggregaterne og den biologiske aktivitet er direkte medvirkende til, at mineraler og næringsstoffer bliver tilgængelige for planterødder.

<sup>9</sup> Videnssynthesen om biokul, kapitel 4 af Arthur og Andersen, Elsgaard et al (2022), DCA rapport nr. 208.

**Tabel 1.** Biokuls effekt på jordens vandindhold for forskellige jordtyper

Soil type <sup>a</sup>	BC <sub>ad</sub> (%) <sup>b</sup>	ΔFC (%) <sup>c</sup>	ΔAW (%) <sup>d</sup>
Sandy	1.3	69.7	56.2
Loamy	1.2	17.0	19.1
Clayey	2.8	2.9	23.3

<sup>a</sup> Sandy = sand + loamy sand; Loamy = loam, sandy loam, sandy clay loam, and silt loam; Clayey = clay + clay loam

<sup>b</sup> BC<sub>ad</sub> = added biochar carbon

<sup>c</sup> ΔFC = change in water content at field capacity

<sup>d</sup> ΔAW = change in plant available water content.

Kilde: Videnssynthesen om biokul, afsnit 4.1.3. af Arthur og Andersen, Elsgaard et al (2022), DCA rapport nr. 208.

Andre egenskaber ved biokul, der er relevante for vandtilbageholdelsesevnen, er biokuls overfladeareal og overfladekemi. Pyrolyseforhold, der producerer biokul med stort overfladeareal, iltede, funktionelle grupper med lav PH-værdi og vandopløselige molekyler er optimale til forbedringer af vandtilbageholdelsesevnen.

Når jorden først er mættet af vand, er samspillet mere kompliceret. Den *mættede hydrauliske ledningsevne* (K<sub>s</sub>) angiver, hvordan en jord leder vand under vandmættede forhold. Den mættede hydrauliske ledningsevne er essentiel for jordbundsfunktioner som infiltration, grundvandsgenopfyldning og næringsstoftransport. Tilførsel af biokul til jord kan potentielt både øge eller mindske den mættede hydrauliske ledningsevne afhængigt af biokullenes egenskaber eller udgangspunktet for den mættede hydrauliske ledningsevne<sup>10</sup>.

### 3.5. Jordens næringsstoffer

Biokul har som nævnt potentiale til at forbedre landbrugsjordens dyrkningsegenskaber, bl.a. ved at forbedre jordens evne til at holde på vand og forbedre stabiliteten af aggregater, men også ved at øge tilgængelighed af næringsstoffer. Det er dog svært at generalisere effekterne, fordi biokuls egenskaber afhænger af både den oprindelige biomasse og pyrolyseforholdene. Effekten er derudover også afhængig af blandt andet jordtype, klimaforhold og jordens næringsstofstatus.

Selvom internationale studier viser en gennemsnitligt signifikant positiv effekt af biokul på jordens dyrkningsegenskaber og udbytter, så har man ikke kunnet påvise tydelige positive effekter på afgrødeudbytte på tempererede jorde, som vi fx har i Danmark. Dansk landbrugsjord er ofte behandlet med kalk og har et højt indhold af næringsstoffer. Udbytterne er derfor allerede optimerede, og den videnskabelige litteratur finder indtil videre ingen signifikante udbyttetigninger ved brug af biokul under danske markforhold<sup>11</sup>. Da biokul også er med til at øge jordens pH-værdi, jf. afsnit 4.1, er det dog muligt, at biokul kan erstatte noget af kalktilførslen og dermed bidrage til at opretholde de gode dyrkningsegenskaber ved jorden.

På meget sandede jorder, som bl.a. findes i Vestjylland, kan der muligvis være et potentiale for bedre vandhusholdning og rodvækst, og dette vil potentielt kunne styrke udbytterne, hvilket aktuelt undersøges i flere forskningsprojekter<sup>11</sup>.

## 4. Biokuls effekter på jordens *kemiske* egenskaber

Brug af biokul på landbrugsjord spiller også ind på jordens kemiske sammensætning. Interaktionen mellem biokul og jordens kemiske egenskaber handler om jordens pH-værdi, kationbyttekapacitet (CEC) og elektrisk ledningsevne (EC), som et mål for jordens saltindhold, og gennemgås i det følgende.

<sup>10</sup> Videnssynthesen om biokul, kapitel 4 af Arthur og Andersen, Elsgaard et al (2022), DCA rapport nr. 208. Her fremgår det bl.a., at undersøgelser på udenlandske jordbundsforhold har forskelligrettede resultater. Fx steg den mættede hydrauliske ledningsevne med 40 og 140 pct., når 1 pct. biokul lavet på rishalm og pyrolyseret ved henholdsvis 350 og 550°C blev tilsat til siltjord (sjældent i Danmark). Omvendt, for sandet lerjord, viser undersøgelser ca. 14-17 pct. reduktion i den mættede hydrauliske ledningsevne 80 dage efter tilførsel af 2 pct. af rishalmbiokul. I andre tilfælde havde tilførsel af biokul lavet af hvedehalm til lerholdig sandjord ingen signifikant effekt på den mættede hydrauliske ledningsevne, uanset pyrolysetemperatur eller påføringshastigheder. Det samme var tilfældet for biokul lavet på husdyrgødning tilført en lerjord.

<sup>11</sup> Videnssynthesen om biokul, afsnit 9.7 og kapitel 7 af Sørensen og Abalos i Elsgaard et al (2022), DCA-rapport nr. 208. Aarhus Universitet (2022)

#### 4.1. Jordens pH-værdi

Under danske forhold fører overskudsnedbør og tilførsel af gødning til marker til et kontinuerligt fald i jordens pH, som normalt korrigeres ved påføring af kalk. Pyrolysetemperatur øger generelt dannelsen af karbonater og dermed biokullenes evne til at øge jordens pH. Potentielt er der mulighed for, at biokul kan erstatte behovet for kalktilførsel til markerne.

Biokul fra især halm har en evne til at øge jordens pH. Det har ikke kun en økonomisk værdi, men også en klimaeffekt via undgået CO<sub>2</sub>-udledning fra tilsat kalk<sup>12</sup>.

Lav jord-pH (<6) kan begrænse optagelsen af nogle næringsstoffer, f.eks. fosfor.

Både sammensætningen af det råmateriale, der anvendes til biokul-produktion samt pyrolyse forhold, især temperatur<sup>13</sup>, påvirker biokulens alkalinitet (evne til at neutralisere syre) og dermed dets indvirkning på jordens pH.

Pyrolysetemperatur øger generelt dannelsen af karbonater (som bl.a. indgår i kalk) og dermed biokulens evne til at øge jordens pH-værdi. Samtidig tyder det på, at biokul baseret på afgrøderester generelt har højere karbonatindhold og alkalinitet end biokul med træ som biomasseinput. Undersøgelser, der sammenlignede halm- og træbaseret biokul, fandt, at kalkkoncentrationen i den halmbaserede biokul var 3,5 gange højere, selvom pH-værdien af jorden i udgangspunktet var ens<sup>12</sup>.

Generelt vil ændringer i jordens pH-værdi ved brug af biokul være forudsigelige og baseret på jordens egenskaber og biokullets alkalinitet.

- Der er behov for at undersøge og dokumentere levetiden af den kalkning, som biokul kan medføre, dvs. hvor mange år afbødningen af jordforsuring vil vare ved som følge af en udbringning af biokul.

#### 4.2. Jordens kationbyttekapacitet (CEC)

Biokul bidrager til jordens kationbyttekapacitet eller ionbytteforhold, CEC, der er en indikator for jordens frugtbarhed. Jo højere CEC, jo bedre er jordens tilgængelighed af næringsstoffer, især calcium, magnesium og kalium, jordens pH og jordens reaktion på tilført gødning. Jordens CEC er en afgørende egenskab, som påvirker jordens evne til at tilbageholde (positivt ladede) næringsstoffer og andre kationer<sup>12</sup>.

Ifølge videnssynthesen om biokul vil tilførsel af 5 pct. biokul baseret på halm på en dansk sandjord resultere i en stigning på 30 pct. i CEC<sup>12</sup>. Tilsvarende øgede en tilførsel af 1 pct. biokul baseret på risskaller til sand og sandet muldjord CEC med henholdsvis 21 og 14 pct. Markforsøgene viste, at biokul påvirker jordens CEC, men i forskellig grad alt efter biokullets råmateriale samt pyrolysetemperatur.

Det ser således ud til, at biokul kan ændre jordens CEC, især ved relativt høje udbringningsmængder og til sandede jorde. Der er løbende forskning i, hvordan man kan øge CEC med biokul ved oxidation eller andre efterproduktionsbehandlinger. Det vil ifølge Videnssynthesen om biokul åbne op for designer-biokul med skræddersyede egenskaber optimeret til specifikke anvendelser og specifikke jorde.

#### 4.3. Jordens saltindhold

Saltindholdet af jorden har betydning for planternes vandoptagelse, og et forhøjet niveau kan fremkalde saltstress, der kan begrænse produktiviteten af afgrøder. Saltkoncentrationer i jordvand højere end 5-10 dS/m vil reducere udbyttet af de fleste afgrøder<sup>12</sup>.

Der er naturligt forekommende saltioner (fx kalium, K) i biokul baseret på halm, gødningsfibre eller slam, og det skal der tages højde for. Hvis der tilføres meget store mængder biokul, fx 100 t/ha, til en typisk dansk grov sandjord med begrænset CEC, vil afgrødevækstens tærskelværdier for salt blive overskredet med faktor på 2-10<sup>12</sup>. Det er imidlertid urealistisk store udbringningsmængder af biokul.

Når fosforloftet på 30 kg P/ha overholdes ift. tilladte mængder tilført biokul til landbrugsjorde, vil det ifølge videnssynthesen om biokul generelt forhindre negative salteffekter, også i tilfælde af halmbaseret biokul<sup>12</sup>.

<sup>12</sup> Videnssynthesen om biokul, kapitel 4 af Arthur og Andersen, Elsgaard et al (2022), DCA rapport nr. 208.

<sup>13</sup> Høj temperatur under pyrolyse øger biokullenes pH og alkalinitet, men reducerer sædvanligvis plantetilgængeligheden af jordens P-indhold (fosfor).

## 5. Biokuls effekter på jordens biodiversitet

Biokul kan påvirke jordens biologi og dermed biodiversiteten i jorden forskelligt og på både negative og positive måder. Biokullets kemiske og fysiske egenskaber er af stor betydning, men også mængden og partikelstørrelsen af det tilsatte biokul.

Virkninger af biokul på jordens biologi er i sig selv vanskelige at adskille fra virkningerne på jordens kemiske og fysiske parametre, og ofte skal effekterne ses under ét, holistisk.

Biokul ser generelt ud til at påvirke jordorganismer positivt og medføre højere mikrobiel biomasse, mikrobiel diversitet og aktivitet, men det er et område, hvor forståelsen af samspillet er begrænset. Når det gælder regnorme, er den internationale litteratur ikke konklusiv, mens et tilsvarende dansk studie viser, at regnormens forekomst i jorden var upåvirket af biokul.

En sund jord har en høj biodiversitet. De levende organismer i jorden, herunder bakterier og svampe, er ansvarlige for mineralisering af organisk stof og genanvendelse af næringsstoffer til plantevækst<sup>14</sup> og kan også danne symbioser med planterødderne, hvilket sikrer direkte forsyning af næringsstoffer til plantevækst. Større hvirvelløse dyr, såsom regnorme, lever af mikroorganismer, mikro-hvirvelløse dyr samt af organisk materiale i jorden. Regnormenes indtag og omsætning af føde samt graveaktiviteter er vigtige til inkorporering af organisk stof i jord og til jord-luftning og bidrager til jordens vandinfiltrationskapacitet.

Biokul kan generelt have positive effekter på jordens biologi på grund af makro- og mikronæringsstoffer, tilgængelige kulstoffraktioner, kalkningseffekt, øget vandholdende kapacitet og beboelige porerum i biokullets partikler.

Der er dog også undersøgelser, der har vist negative effekter<sup>14</sup>, fx hvis biokullene har indeholdt problematiske stoffer. Biokul kan – alt efter biomassetypen og brug af en suboptimal pyrolyseproces - indeholde problematiske stoffer som olie- og tjærestoffer (PAH), tungmetaller og flygtige organiske kulstofforbindelser (VOC'er). Dette vil dog kunne opfanges i de test af biokuls indhold, som gennemføres efter endt produktion. Der bør derfor etableres fornuftige grænseværdier for biokullets indhold.

Der er samtidig tegn på, at pyrolyseprocessen kan være med til at fjerne PFAS, som måtte være i den oprindelige biomasse<sup>15</sup>. Dog er der aktuelt ikke grænseværdier for indholdet af PFAS i biokul, hverken fra national lovgivning eller fra EU, når det gælder gødningsprodukter eller i forhold til at opnå klimacertifikater.

Pyrolyseprocessen kan imidlertid også fjerne nogle tungmetaller og organiske stoffer, som medicinrester, pesticider og mikroplastik, der fx findes i spildevandsslam, og dermed være med til at hygiejniser biomassen, inden den anvendes på landbrugsjord.

Videnssynthesen for biokul fra Aarhus Universitet lægger op til, at der - før anvendelse af biokul i dansk landbrug bliver udbredt - bør være sikkerhed for, at problematiske stoffer ikke giver anledning til ophobning i jorden<sup>16</sup>. Dette kan fx understøttes af dokumenteret overholdelse af grænseværdier i biokullene, som eksempelvis udføres af producenterne og er et krav, såfremt biokullet skal klimacertificeres. Samtidig kan biokul også være med til at binde problematiske stoffer, der findes i jorden, og nedsætte deres biologiske tilgængelighed.

- Det fremhæver behovet for at udbrede en standardiseret karakterisering af produktionsforhold for biokul, herunder minimumsstandarder for det producerede biokul og grænseværdier for dets indhold, som forudsætning for tilførsel på jord.

### 5.1. Biokuls effekter på jordens fauna

Biokuls effekt på jordens dyreliv eller fauna kan skyldes direkte fysisk interaktion eller indirekte påvirkning af fødegrundlaget. Omvendt kan faunaen også påvirke biokulspredningen og transporten i jorden. Regnorme er blandt de væsentligste organismer til at påvirke jordmiljøet gennem deres graveaktiviteter. Herved kan

<sup>14</sup> Videnssynthesen om biokul, kapitel 5 af Winding og Elsgaard, Elsgaard et al (2022), DCA rapport nr. 208

<sup>15</sup> Pyrolyse > 500 grader fjerner PFAS, jf. Buss (2021). AquaGreen har med pyrolyse af spildevandsslam gennem flere tests vist, at processen fjerner indholdet af PFAS'er fra den oprindelige biomasse, så det er under detektionsgrænsen. De etablerede test-sæt for PFAS kan kun opfange en vis mængde af de mange mulige PFAS-typer. Se evt. også NIRAS (2023) om biomassers betydning for biokullets indhold.

<sup>16</sup> Videnssynthesen om biokul, afsnit 8.1, Elsgaard et al (2022), DCA rapport nr. 208

regnorme bidrage til vertikal blanding af biokul i jorden, så den når en dybde, der hjælper med at forbedre jordens kvalitet.

Generelt er effekter af biokul på jordens fauna mindre undersøgt end virkningerne på mikroorganismer og planter. Skadelige virkninger på jordens fauna, fx på regnorme og mikro-invertebrater (hvirvelløse dyr), er af stor betydning, da disse organismer er essentielle for mange økosystemtjenester (f.eks. vandinfiltration, jordluftning, findeling og nedbrydning af planterester og organisk stof i jorden). Desuden vil påvirkning af jordens fauna føre til ændringer i mikrobiomets<sup>17</sup> diversitet og aktivitet.

## 5.2. Regnorme

De fleste undersøgelser af hvirvelløse dyr i jorden har fokuseret på regnorme. Biokul kan påvirke regnorme direkte eller indirekte gennem ændringer i jordens fysiske-kemiske egenskaber, som jordens fugtindhold og pH. Det kan påvirke forskellige stadier af regnormens liv fra overlevelse til vækst og reproduktion. Der kan også være synergistiske effekter mellem biokul og regnorme, hvilket kan føre til forbedret jordstruktur, mikrobiel vækst og aktivitet.

Virkningerne af biokul på regnorme er modsatrettede. Internationale studier viser, at biokul både har positive og negative<sup>18</sup> effekter på regnorme, mens et dansk feltforsøg viser, at regnormens forekomst i jorden var upåvirket af biokul<sup>19</sup>.

Bivirkningerne omfattede lavere reproduktion og aktivitet, genotoksicitet<sup>20</sup>, langsommere vækst og nedsat vægt. Der er dog også rapporteret om øget eller upåvirket reproduktion samt øget enzymaktivitet i regnormenes fordøjelse. Nogle af de negative virkninger er blevet tilskrevet den fysiske effekt af biokulpartikler, der klæber sig til regnormeoverfladerne, samt at regnorme undgår at spise biokul. Et dansk treårigt markforsøg med halmbaseret biokul tilført i en samlet mængde på enten 3 t/ha eller 16 t/ha viste, at regnormemængden var upåvirket, uanset om der var tale om jord, der var tilført halmbaseret biokul og kontrolbehandlingen af jord uden halmbaseret biokul tilførsel<sup>21</sup>.

## 5.3. Andre mikro-leddyr

Det er ikke kun regnorme, men også andre mikroleddyr, der er vigtige for at omdanne planterester til næringsstoffer til brug for nye planter og vedligeholde jordens struktur.

Springhaler er mikroleddyr, der lever i luftfyldte porer i relativ fugtig jord, og deres ekskrementer er, ligesom regnormens, med til at danne ny jord. Undersøgelser med biokul baseret på fire forskellige biomasse-input har vist negative effekter på springhalen *Folsomia candida* ved høje biokulkoncentrationer. Den kortsigtede toksiske effekt blev tilskrevet pH-effekten, mens biokul-tilsætninger ved mere realistiske markforhold ikke påvirkede springhalerne, jf. Vidensyntesen om biokul fra Aarhus Universitet.

Effekten kan kædes til biokul-koncentrationen, hvor en koncentration på 1-5 pct. har vist positive effekter, mens negative effekter blev set ved 10 pct. koncentration<sup>21</sup>. Den lave biokuldosis adsorberede giftige forbindelser, mens effekten ved højere biokulkoncentrationer blev overgået af de negative virkninger. Det skal bemærkes, at 10 pct. biokul i jord er urealistisk høj under normale markforhold. Thomsen (2022) omtaler høje tilførselsrater som over 50 ton/hektar, hvor der ses negative effekter.

## 5.4. Jordens mikroorganismer

En række studier har vist, at virkningerne af biokul på jordorganismer er positive og medfører højere mikrobiel biomasse, mikrobiel diversitet og aktivitet. Nogle få undersøgelser viser dog også modstridende virkninger på den mikrobielle samfundsdiversitet og funktioner. På den baggrund har en række forskere ved RWTH Aachen University i Tyskland konkluderet, at forståelsen af virkningerne af biokul på jordens mikrobielle samfund stadig er begrænset<sup>21</sup>.

- Det taler for at gennemføre flere markforsøg og studere effekter af biokul på flere parametre i samme type forsøg.

<sup>17</sup> Et mikrobiom er betegnelsen for den sammensætning af mikroorganismer, fx bakterier, som findes i jorden.

<sup>18</sup> Godlewska et al (2021) og Brtnicky et al (2021).

<sup>19</sup> Vidensyntesen om biokul, afsnit 9.5 baseret på kapitel 5 af Winding og Elsgaard, Elsgaard et al (2022), DCA rapport nr. 208.

<sup>20</sup> Når et stof er i stand til at beskadige DNA'et i cellerne på en organisme.

<sup>21</sup> Vidensyntesen om biokul, kapitel 5 af Winding og Elsgaard, Elsgaard et al (2022), DCA rapport nr. 208.

For tempererede jorde kan biokul som nævnt reducere tabet af vand fra jorden (vandholdende evne) og på samme tid reducere de negative effekter af tør jord på den mikrobielle aktivitet.<sup>22</sup>

Forøgelsen i pH, som medfølger af alkaliske biokul, vil resultere i ændringer i det mikrobielle samfund, da pH påvirker størstedelen af biogeokemiske processer i jordens økosystem. Disse ændringer kan til en vis grad ligne virkningerne fra kalkning, som er almindelig praksis i danske landbrugsjorde for at mindske jordens surhedsgrad og øge høstudbytter.

Forståelsen af virkningerne af biokul på jordens mikrobielle samfund er stadig begrænset, på trods af mange undersøgelser af biokul-effekter på jordens mikrobielle samfund, næringsstofkredsløbet og jordens egenskaber. Dette kan til dels skyldes det tætte samspil mellem tilgængelighed af næringsstoffer og mikroorganismer og det faktum, at biokul påvirker mikroorganismer direkte og indirekte på samme tid.

Virkningerne af biokul på jordmikrobiomet bør opdeles i kortsigtede og langsigtede effekter. De kortsigtede effekter er ofte mere udtalte end de langsigtede. Kortsigtede effekter, der stimulerer mikrobiomet, kan skyldes faktorer såsom (i) en pulje af let nedbrydeligt organisk materiale frigivet fra biokul umiddelbart efter tilførsel til jorden, (ii) forbedring af sur jords pH eller (iii) forbedrede betingelser for mikrobiel aktivitet i jorden på grund af bedre udluftning. Yderligere kan stimulerende virkninger forekomme på længere sigt, hvis jordens mikroorganismer koloniserer biokul-overfladerne og etablerer et aktivt samfund der. Negative effekter på kort sigt kan ifølge videnssynthesen om biokul skyldes potentielt giftige elementer (PTE'er) frigivet fra biokul, såsom tjærestoffer (PAH'er), tungmetaller eller flygtige organiske forbindelser (VOC'er)<sup>23</sup>.

Langsigtede negative effekter kan være forårsaget af PAH'er eller tungmetaller, som er kendte potentielle forurenende stoffer i biokul, hvor tungmetaller stammer fra råmaterialet, hvorimod PAH'er stammer fra genkondensering af pyrolysevæsker og gasser (suboptimal pyrolyseproces).

### 5.5. Risiko ift. tungmetaller og problematiske stoffer

Hvis der er tungmetaller i den oprindelige biomasse, kan de blive opkoncentreret i det producerede biokul, hvilket kan være et problem, hvis man fx bruger spildevandsslam og husholdningsaffald som råbiomasse for biokul til udbringning på marker. Stigende pyrolysetemperatur øger tungmetalkoncentrationen på grund af nedbrydningen af organisk stof, hvilket taler for grænseværdier for biokullets indhold. Derimod vil visse tungmetaller såsom kviksølv (Hg) og cadmium (Cd) gå ind i en flygtig form, og forudsat optimale pyrolysebetingelser (inklusive afkøling) kan tungmetallet opfanges og deponeres.

Generelt vil uhensigtsmæssigt valg af biomasser med indhold af problematiske stoffer sammen med en suboptimal pyrolyseproces kunne resultere i biokul med indhold af tungmetaller, tjærestoffer o.l., som kan forurene jorden (Ling et al, 2021).

Der udstedes frivillige standarder, såsom European Biochar Certificate (EBC 2022), med fokus på grænseværdier for problematiske forbindelser i biokul til brug på landbrugsmarker. Her findes en positivliste for biomasser, der ventes at overholde grænseværdierne, fx biokul baseret på halmrester. For andre typer biokul, fx baseret på restfibre fra biogasanlæg, skal andelen af animalske kildematerialer til biogasanlægget på nuværende tidspunkt være mindre end 40 procent. Biokul fremstillet fra f.eks. nedbrudt gødning fra grise kan potentielt indeholde relativt store mængder kobber (Cu) og zink (Zn), og sådanne biokul har vist sig at øge tungmetaller i landbrugsjord med 55 pct. for Cu og 70 pct. for Zn, når de blev tilført ved en rate på 15 t/ha biokul<sup>23</sup>.

- Der bør være generelle standarder for indholdet af biokul, herunder grænseværdier for problematiske stoffer. I øjeblikket varetages denne opgave af det frivillige marked, når der skal udstedes klimacertifikater.

### **Problematiske forbindelser (herunder PAH'ere, tjærestoffer)**

Under pyrolyse vil temperaturen nedbryde mange af de problematiske forbindelser i råmaterialerne såsom mikroplast, organiske landbrugskemikalier og lægemidler, herunder antibiotika. Men der er risiko for, at andre organiske forbindelser såsom PAH'er (tjærestoffer), dioxiner, PFAS/PFOS og VOC'er (Volatile Organic Compounds, flygtige organiske forbindelser) kan produceres afhængig af pyrolysebetingelserne<sup>24</sup>.

<sup>22</sup> Fuss et al (2018).

<sup>23</sup> Videnssynthesen om biokul, kapitel 5 af Winding og Elsgaard, Elsgaard et al (2022), DCA rapport nr. 208.

<sup>24</sup> Videnssynthesen om biokul, kapitel 5 af Winding og Elsgaard, Elsgaard et al (2022), DCA rapport nr. 208 samt Ling et al (2021).

Hurtig pyrolyse og forgasning af biokul udviste højere total PAH-koncentration end langsom pyrolyse. Fordampning ved høje temperaturer resulterer i, at en stor del af PAH'erne ender i gasfasen og ikke sætter sig i biokullet. Selve pyrolyseprocessen og kontrol heraf er derfor vigtig<sup>25</sup>.

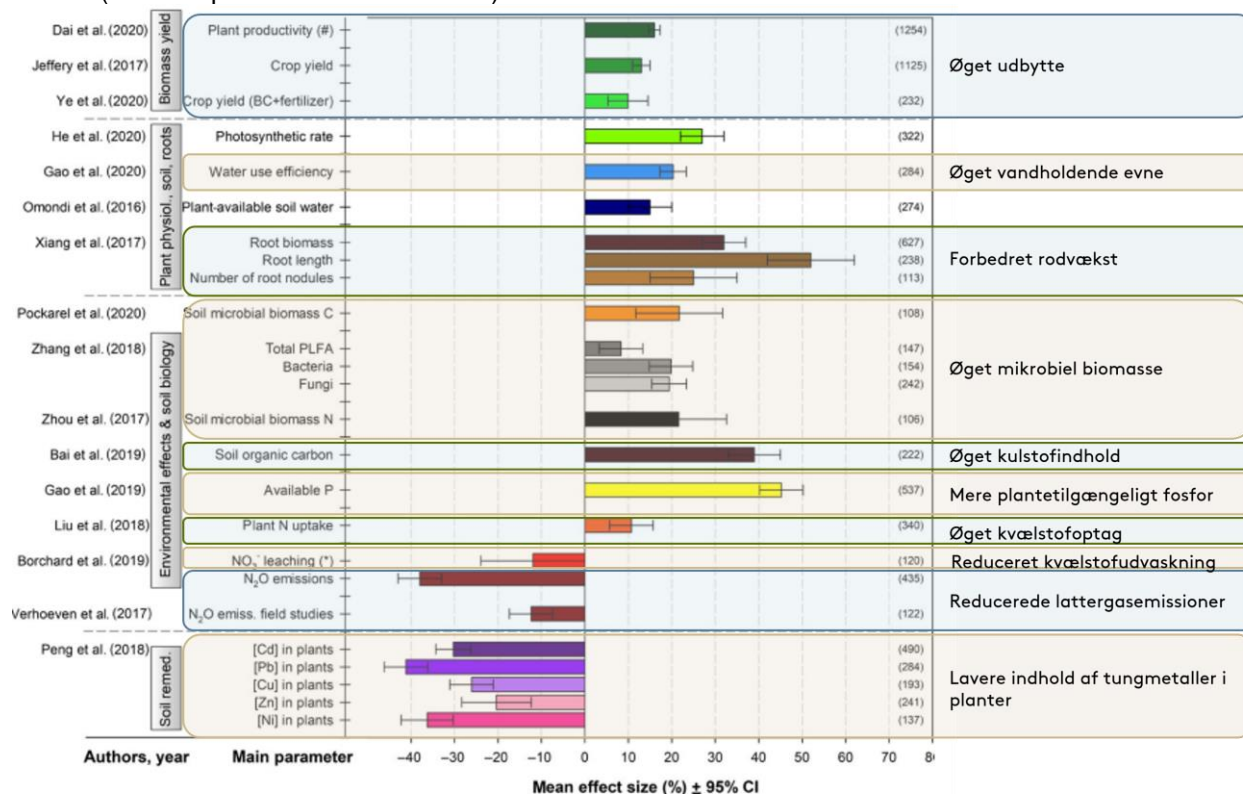
Der er krav om, at biokulproducenter skal overholde PAH-grænseværdier for at beskytte jordens biologiske processer, hvis biokullet ønskes markedsført som CE-mærket biokul (European Commission, 2021).

Biokul kan imidlertid også absorbere forurenende, organiske forbindelser, der allerede er i jorden, herunder PAH'er (fra andre kilder end biokullet) og organiske landbrugskemikalier og er ifølge videnssynthesen om biokul også blevet brugt til oprensning af forurenede jord<sup>26</sup>.

Det omfatter også agrokemikalier (f.eks. pesticider, herbicider og nitrifikationshæmmere), hvor biokul kan reducere deres effektivitet i landbruget. I tilfælde af interaktion mellem biokul og nitrifikationshæmmere (som i stigende grad bruges til at afbøde N<sub>2</sub>O-emissioner fra landbrugsjord) viste et forsøg, at effekten af den almindelige nitrifikationshæmmer DMPP blev signifikant reduceret, når den blev kombineret med brugen af biokul, sandsynligvis pga. adsorption på biokullets overflader<sup>26</sup>. Tilingen af brug af biokul i forhold til øvrig marktilførsel skal derfor overvejes for at få de ønskede effekter (Thomsen, 2022).

Der er lavet en række studier af, hvad biokul indeholder under forskellige former for pyrolyse og procesdesign og baseret på forskellige former for biomasse. Schmidt et al (2021) har lavet et omfattende review af forskellige analyser, og som det fremgår af figur 2 nedenfor, vil pyrolisering af biomasse til biokul og anvendelse på landbrugsjord generelt have en række positive effekter på fx afgrøder, jordkvalitet, vandholdende evne og fosfortilgængelighed.

**Figur 2.** Gennemsnitlig procentvis ændring af forskellige parametre ved påførsel af biokul i 26 forskellige studier (samt 95 pct. konfidensintervaller)



Kilde: Schmidt et al (2021), Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta- analyses samt inspiration til inddeling fra SEGES Innovation kategorisering anvendt på seminar om biokul d. 14. december 2023.

<sup>25</sup> Videnssynthesen om biokul, kapitel 5 af Winding og Elsgaard, Elsgaard et al (2022), DCA rapport nr. 208 samt Thomsen (2022).

<sup>26</sup> Videnssynthesen om biokul, kapitel 5 af Winding og Elsgaard, Elsgaard et al (2022), DCA rapport nr. 208.



Figuren skal læses som den gennemsnitlige effekt af at påføre biokul i forhold til ikke at gøre det på en række forskellige parametre baseret på 26 forskellige studier. På alle de parametre, hvor det vil være ønskværdigt med en større effekt, er brug af biokul associeret med en større effekt, og fortegnet er robust (95 pct. konfidensinterval).

Omvendt ser det også ud til, at man med biokulpåførsel får mindre af det, man ikke er så interesseret i. Fx ses det, at mængden af tungmetaller i planterne efter brug af biokul er væsentligt lavere sammenlignet med alternativet, hvor biomassen havde været brugt som gødning uden pyrolysning, fx cadmium (Cd), kviksølv (Hg), zink (Zn) og bly (Pb). Nogle af disse tungmetaller ender i stedet i pyrolysegassen. På samme vis er lattergasemissionerne fra jorden også reduceret i forsøg med påførsel af biokul. Igen er fortegnet også robust (ved 95 pct. konfidensinterval).

## 6. Skader brugen af biokul på andre måder biodiversiteten?

Brug af biomasse som fx træflis og skovfældning til energiproduktion kan have bæredygtighedsmæssige udfordringer, når biomassen brændes hurtigere af, end ny biomasse kan nå at vokse op og optage tilsvarende mængder CO<sub>2</sub>. Hvis man fx fælder gammel, etableret skov med høj biodiversitet, vil det tage årtier eller århundreder at opbygge en tilsvarende biodiversitet igen andre steder eller ved genbeplantning.

Landbrugets afgrøder er ofte et-årige, så der sker kompensation allerede året efter, når der plantes nye afgrøder med en ny vækstsæson. Det sker eksempelvis ikke ved skovhugst, som i Amazonas, hvor genbeplantning kræver væsentligt længere opbygningstid – både i forhold til at genopbygge CO<sub>2</sub>-lagringen, men også i forhold til at reetablere biodiversiteten. Fremover forventes en større brug af efterafgrøder i landbruget, som også kan gavne biodiversiteten, og hvorfra stråresterne også kan være relevant for pyrolysning og biokul.

Ved at bruge restbiomasser til biokul, optager biokul i sig selv ikke arealer, og der dyrkes ikke biomasse med det specifikke formål at lave biokul. Det kommer som en sidegevinst. Sidestrømmene er rester fra biomasser, der under alle omstændigheder var dyrket eller frembragt til anvendelse højere oppe i kaskadeudnyttelsen, f.eks. til fødevarer, medicin eller foder. Når der ikke er øvrige, værdiskabende anvendelsesområder tilbage, er resterne relevante for pyrolyse.

Plads og uforstyrrelse er vigtig for arternes spredning og regenerative økosystemer. Derfor er arealanvendelse, biodiversitet og bæredygtige økosystemer helt centrale faktorer at inddrage i dyrkningen af biomasser. Det er udfordringer, der er tæt forbundne. Faldende kulstofindhold i danske jorde over tid bidrager til lavere habitatkvalitet i jordbunden til skade for biodiversiteten i jorden. Dette kan modvirkes gennem ændrede dyrkningssystemer og ved brug af biokul. Der er brug for biomasse som kulstofressource og til CO<sub>2</sub>-fangst og -lagring, men samtidig skal der genskabes store, sammenhængende områder, hvor der er mere plads til natur og biodiversitet. Velfungerende økosystemer og en mangfoldig biodiversitet er forudsætningen for et stabilt klima og en stabil landbrugsproduktion.

## 7. Øvrige miljø- og bæredygtighedseffekter for landbruget af biokul

Landbrugsstyrelsen vurderer i en miljørapport for den nye Gødskningsbekendtgørelse, at brugen af biokul som gødningsprodukt efter gældende regler (baseret på husdyrgødning/planterester) overholder vandrammedirektivet, der fastlægger rammerne for beskyttelse af vandløb, søer, overgangsvande, kystvande og grundvand. Biokul vil som ny gødningstype ikke få miljømæssige konsekvenser relateret til kvælstof og fosfor, da der overordnet ikke sker en ændring i tilførslen af de samlede mængder af kvælstof og fosfor i forhold til kvoter og lofter. Biokul skal overholde de samme regler for harmonikrav og fosforlofter som anden gødning.

Landbrugsstyrelsen vurderer samtidig, at brugen af biokul ikke vil påvirke Natura 2000-områderne, og at implementeringen af biokul som gødningsprodukt ikke vil have en negativ effekt på menneskers sundhed eller miljøet<sup>27</sup>.

<sup>27</sup> Landbrugsstyrelsen (2023).

### 7.1. Reduceret kvælstofudledning til vandmiljøet ved brug af biokul

Vandmiljøet påvirkes negativt, når der udvaskes store mængder kvælstof, i form af øget algevækst, iltsvind og færre fisk mv. Nitrat fra kvælstofferne kan desuden sive ned til grundvandet, hvor det kan få sundhedskonsekvenser. Kvælstoftilførslen fra land til vandområder er reduceret væsentligt siden 1990, men har overordnet været på samme niveau det seneste årti. Kvælstofudledningen kommer primært fra landbruget (70 pct.), fra spildevandsanlæg og fra industrielle anlæg, jf. Dansk Naturfredningsforening.

Landbrugsaftalen fra 2021 tilsiger en reduktion i udledningen af kvælstof til vandmiljøet på 10.800 t/år i 2027. Og Vandrammedirektivet tilsiger en reduktion af kvælstofudledningen på 13.100 t/år i 2027. Der er altså behov for markante reduktioner.

Der er imidlertid relativt få virkemidler til at forbedre vandmiljøet ift. nitratudledning fra landbruget. Måltrettet kvælstofregulering kan fx fremmes frivilligt gennem tilskud til efterafgrøder eller ved krav herom i kystnære omgivelser. Kollektive virkemidler omfatter udtagning af landbrugsjord til fx minivådområder, kvælstofvådområder og privat skovrejsning, herunder i form af udtagning af lavbundslande. De kollektive virkemidler vil reducere landbrugsproduktionen.

Jf. videnssynthesen om biokul er det i nogle undersøgelser dokumenteret, at brug af biokul på landbrugslande forsinket udvaskningen af nitrat (kvælstof) fra rodzonen, formentlig fordi biokullet fastholder nitraten i sine porer. Det samme er senest dokumenteret i en livscyklusanalyse af biokul i kinesisk landbrug (Longlong et al, 2023), der bl.a. havde deltagelse af Klaus Butterbach-Bahl, der leder LandCRAFT centeret under Aarhus Universitet. Studiet er interessant, fordi kinesisk landbrug har store udfordringer med kvælstofudledning til vandmiljøet.

En sådan tilbageholdelse af kvælstoffer i rodzonen indebærer mere gødning til kommende plantevækst og reducerer behovet for kunstgødning. Da store dele af landbrugsjorden i Danmark ligger nær vandområder, enten indenlandske vådområder eller nær kyster, kan brug af biokul potentielt blive et virkemiddel i indsatsen mod kvælstofudledning til vandmiljøet.

- Det er behov for mere viden om, hvor store mængder biokul der skal tilføres for at opnå en målbar effekt på udvaskningen, hvor stabil effekten er, på hvilken måde biokullet bedst påføres og på hvilke tidspunkter af året, samt om mængderne kan holdes inden for fosforlofterne, der ellers sætter en begrænsning på udbringningen af biokul på landbrugslande.

#### **Risiko i forhold til akvatiske organismer gennem udvaskning**

Videnssynthesen om biokul fra Aarhus Universitet har - på grund af den teoretiske risiko for udvaskning af biokul til vandmiljøer (f.eks. via dræn og overfladevand) – også set på laboratorietest af biokuls virkninger på vandlevende organismer, hvor fx Xiang et al (2021) så flere skadelige virkninger på fisk, krebsdyr, planteplankton og planter (ålegræs), *Vallisneria spiralis*<sup>28</sup>, men hvor interaktionen er vanskelig at kortlægge.

Den potentielle udvaskning er vanskelig at generalisere, da den afhænger af biokullets råmaterialer, pyrolyseforhold, biokulpartikelstørrelse, påføringsmængder samt jordens tekstur og indhold af organisk stof. Udvasning af forurenende stoffer kan således ikke udelukkes, men skal også ses i lyset af, at biokul i sig selv adsorberer både tungmetaller og organiske forurenende stoffer efter påføring på jord, ligesom biokul begrænser udvaskningen af kvælstoffer til vandmiljøer.

- På grund af de positive sidegevinster, men også risiko for potentiel negativ påvirkning, er biokuls påvirkning af vandområderne derfor et væsentligt område at styrke den forskningsbaserede viden på.

### 7.2. Biokul som fodertilsætning

Biokul (eller karboniseret biomasse) har været brugt i flere århundreder som medicinsk behandling af dyrehold, jf. Schmidt et al. (2019) for at styrke dyrenes helbred, øge deres optagelse af næringsstoffer fra foderet og derved styrke produktionen af husdyr. Når biokul tilsættes dyrefoder, er det for at styrke fordøjelsen og tarmflora, idet biokul absorberer giftstoffer og andre problematiske stoffer, så de kan passere gennem fordøjelsessystemet.

Metastudiet om brug af biokul til fodertilsætning fra Schmidt et al (2019) rapporterer også om forbedrede blodværdier, øget kødkvalitet og lavere udledning af klimagasser fra husdyrene. Der var dog også sjældne

<sup>28</sup> Videnssynthesen om biokul, kapitel 5 af Winding og Elsgaard, Elsgaard et al (2022), DCA rapport nr. 208.

tilfælde i forhold til lavere optag af vitamin E, som kan få betydning for, hvor længe man kan tilsætte biokul til dyrefoderet. I andre lande har biokul især været anvendt i landbrug og som fodertilsætning, jf. baggrundsnotat om hvad andre lande gør i forhold til biokul (CIP Fonden, 2024e).

### 7.3. Andre eksempler på miljøeffekter af biokul

Shunxi et al. (2022) og Sanchez-Monedero et al (2018) rapporterer om positive effekter af at tilsætte biokul til kompost i form af øget mikrobiel vækst og reducerede økologiske risici.

Der er også eksempler på, at biokul kan styrke den naturlige vegetations evne til at holde invasive arter ude, hvor fx Sujeeun and Thomas (2022) beskriver, hvordan den tropiske vegetation på Mauritius med tilhørende biodiversitets hotspot med tilførsel af lokalt produceret biokul i højere grad kunne holde invasive arter ude.

Der er mange eksempler i litteraturen på partielle effekter af at anvende biokul i forhold til mulige miljøeffekter, men der er generelt behov for studier med en mere holistisk tilgang, der tager flere typer effekter i betragtning og kan være med til at afdække de samlede virkninger<sup>29</sup> og potentielle trade-offs, der kan være mellem positive og negative effekter.

Generelt er mange forskningsresultater for biokul i virkeligheden partielle resultater for biokul baseret på bestemte biomasser, bestemte behandlingsmetoder og anvendt på bestemte typer af jord, hvor effekterne kan forventes at variere, hvis der i stedet anvendes en anden biomasse, en anden jordtype mv.

- Pga. den potentielle variation er der behov for en kategorisering af de mange forskningsresultater efter deres robusthed (evidens) og efter, hvad der er målt på (fx anvendt biomasse, pyrolyseproces, jordtyper, biokullets partikelstørrelse og overfladeform mv.).

## 8. anbefalinger til fortsat videnopbygning

Selv om biodiversitet og mulige miljøeffekter er kommet højere op på bæredygtighedsdagsordenen, er det et område med et fortsat stort behov for viden- og metodeudvikling. CIP Fondens analyse peger på:

- Generelt er der behov for et *forskningsprogram*, der følger udviklingen og brugen af biokul som et nyt område ved anvendelse på landbrugsjord både fra praksisnær opfølgning og ved en løbende gennemgang og systematisering af de forskningsresultater, der opstår nationalt og internationalt.
- For at minimere risici for eventuelle negative effekter bør der etableres *grænseværdier* for biokullenes indhold af forskellige, problematiske stoffer, som skal indarbejdes i tests før brug på landbrugsjord. En forsigtighedstilgang vil tilsige brug af de mest restriktive nuværende mindstegrænser på tværs af regulering af gødningsprodukter og anvendelse af rester på landbrugsjord. Der kan også søges inspiration i grænseværdier anvendt af forskellige standarder for klimacertifikater samt fra EU's regler for CE-mærket biokul som gødningsprodukt.
- På grund af de mange udfaldsrum alt efter forskningsforsøgenes design og set-up bag de anvendte biokul er der behov for en *kategorisering* af resultaterne og en bedømmelse af, hvor stærk evidensen er for de forskellige konklusioner om mulige miljøeffekter af brug af biokul. Formålet er at understøtte *guidelines* for den fortsatte brug af biokul, så der kan opnås kulstoflagring med biokul i landbruget samtidig med, at uønskede effekter undgås. Forskningsresultaterne skal ud at leve i praksisanvendelsen.
- Der bør gennemføres *flere langvarige markstudier* under danske forhold i form af storskala forsøg under realistiske forhold, herunder undersøgelser med biokul fra gylle og spildevandsslam, som p.t. er fåtallige. Der er aktuelt også kun få feltforsøg af de langsigtede virkninger på jordlevende organismer efter udbringning af biokul under danske forhold.
- Forsøg, der undersøger potentielle *udbyttefordele* ved biokul gennem forbedringer i jordens vandholdende evne, rodudvikling og tilgængelighed af næringsstoffer, såsom fosfor. Dette kan også understøtte en bedre forståelse for, under hvilke jordbundsforhold og klimatiske forhold tilførsel af biokul fx kan øge afgrødeproduktionen, herunder viden om forskellige afgrøders respons.

<sup>29</sup> Fx Brtnicky et al (2021).

- Styrket forståelse af sammenhængen mellem brug af biokul og *mindre udvaskning af kvælstoffer til vandmiljøet*, herunder i forhold til mængder, varighed mv. Hvis biokul har potentiale som et egentligt vandmiljøvirkemiddel, er der også behov for en styrket forståelse af samspillet mellem brug af biokul og den potentielle *udvaskning* af biokul og indholdsstoffer fra biokul til akvatiske økosystemer for at undgå eventuelle negative effekter.

Det er naturligt, at man gerne vil undersøge flest mulige forhold før øget udbredelse af et nyt område – i dette tilfælde biokul anvendt på landbrugsjord som et gødningsprodukt. Som det også kendes fra andre områder, udvikles forskning og viden ofte i takt med praksis og anvendelse under forskellige forhold. Biokul er ikke et helt ukendt produkt, det har været anvendt gennem længere tid, og forskningen på området er vokset markant de seneste årtier.

Da biokul kan fungere som et stabilt kulstoflager og har positive klimaeffekter med et væsentligt potentiale på samfundsniveau, og da der indtil videre er ”fravær af negative effekter” ved anvendelse under danske forhold, taler det for at udvikle område i takt med, at der også opnås øget forskningsbaseret viden og ikke holde udviklingen tilbage, indtil der fx er opnået viden fra flere, uafhængige langsigtede forsøg, som kan tage flere årtier.

Øget anvendelse af biokul og forskning og praksisnær videnudvikling skal gå hånd i hånd og ikke kun guide den fortsatte brug, men også guide den fortsatte udvikling af reguleringen på området.

## 9. Kilder

- Andersen M.N. (red.), Olesen J.E., Holst N., Skovgaard H., Kudsk P., Jørgensen L.N., Børgesen C.D., Munkholm L.J., Iversen B.V., Gregersen P.L., Holme I., Brinch-Pedersen H., Kongsted A.G., Børsting C.F., Sørensen J.T., Henriksen B., Callesen H., Woyengo T., Ejrnæs R., Fløjgaard C., Krogn P.H., Willumsen T.M., Adamsen A.P., Rasmussen M.D., Guldborg L.B., Rong L. (2023): *Vidensyntese om klimatilpasning og landbrug*. 123 sider. Rådgivningsrapport fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet, august 2023, [Vidensyntese om klimatilpasning og landbrug 23.08.2023.pdf \(au.dk\)](#)
- Altinget (2023): EU-lande blev med nød og næppe enige om naturgenopretning, 21. juni 2023, [EU-lande blev med nød og næppe enige om naturgenopretning - Altinget: Miljø](#)
- Brtnicky et al (2021), *A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment*, Science of the Total Environment, vol. 796, 20. november 2021, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721038286>
- Buss, W. (2021): Pyrolysis solves the issue of organic contaminants in sewage sludge while retaining carbon – making the case for sewage sludge treatment via pyrolysis, ACS Sustainable Chemistry & Engineering 9: 10048-10053. doi: 10.1021/acssuschemeng.1c0365, [Pyrolysis Solves the Issue of Organic Contaminants in Sewage Sludge while Retaining Carbon—Making the Case for Sewage Sludge Treatment via Pyrolysis \(jumbo-group.de\)](#)
- CSR (2023): PensionDanmark er branchens firstmover i arbejdet med biodiversitet, 17. marts 2023, [PensionDanmark er branchens firstmover i arbejdet med biodiversitet | CSR.dk](#)
- Dansk Industri: Bæredygtighedsrapportering (ikke-finansiell rapportering), [National lovgivning om ikke-finansiell rapportering - DI \(danskindustri.dk\)](#)
- EBC (2022): *Positive list of permissible biomasses for the production of biochar*, [positivlist\\_en\\_2022\\_1\\_V10\\_1 \(european-biochar.org\)](#)
- 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*, Rådgivningsrapport fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet, september 2022, [DCArapport208.pdf \(au.dk\)](#)
- EU Kommissionen (2023a): Forslag til direktiv om jordsundhed ("Soil Monitoring Law"), 5. Juli 2023 [Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on Soil Monitoring and Resilience COM 2023 416 final.pdf \(europa.eu\)](#)
- EU Kommissionen (2023b): The Commission adopts the European Sustainability Reporting Standards, [The Commission adopts the European Sustainability Reporting Standards \(europa.eu\)](#)
- EU Kommissionen (2023c): Questions and Answers on the Adoption of European Sustainability Reporting Standards, 31. Juli 2023, [Q&A adoption of European Sustainability Reporting Standards \(europa.eu\)](#)
- EU Kommissionen (2023d): Annex to the Commission Delegated Regulation supplementing Directive 2013/34/EU of the European Parliament and of the Council as regards sustainability reporting standards, 31. Juli 2023, [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13765-European-sustainability-reporting-standards-first-set\\_en](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13765-European-sustainability-reporting-standards-first-set_en) (Annex – C(2023)5303)
- 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 \(europa.eu\)](#)

- FAO (2020): *State of Knowledge of Soil Biodiversity – Status, challenges and potentials*, [State of knowledge of soil biodiversity - Status, challenges and potentialities, Full Report \(fao.org\)](#)
- Fuss et al (2018): *Negative emissions – part 2: Potentials and Side Effects*, Environmental Research Letters 13, no. 8, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabf9f/meta>
- Godlewska et al (2021): *THE DARK SIDE OF BLACK GOLD: Ecotoxicological aspects of biochar and biochar amended soils*, Journal of Hazardous Materials, vol. 403, 5. februar 2021, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389420318227>
- Kromann Reumert (2023): ESG-rapportering, opdateret 15. juli 2023, [ESG-rapportering: Sådan skal din virksomhed gribe det an | Kromann Reumert](#)
- Københavns Universitet: *Beskrivelse af jord*. Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, KU: [Beskrivelse af jord – Københavns Universitet \(ku.dk\)](#)
- Landbrugsstyrelsen (2023): *Miljørapport over forslag til ændring af gødskningsbekendtgørelsen 2023/2024*, juni 2023, <https://prodstoragehoeringspo.blob.core.windows.net/848190b7-5590-46b5-89b8-fac8e2c14463/Bilag%203.3.%20Milj%C3%B8rapport%20af%20g%C3%B8dskningsbekendtg%C3%B8relsen%2023-24.pdf>
- Ling et al (2021): *Potential hazards of biochar: The negative environmental impacts of biochar applications*, Journal of Hazardous Materials, vol. 420, oktober 2021, [Potential hazards of biochar: The negative environmental impacts of biochar applications - ScienceDirect](#)
- Longlong et al (2023): *Integrated biochar solutions can achieve carbon-neutral staple crop production*, Nature Food, vol. 4, p. 236-246, februar 2023 <https://www.nature.com/articles/s43016-023-00694-0>
- 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 \(au.dk\)](#)
- Sanchez-Monedero et al (2018): *Role of biochar as an additive in organic waste composting*, Biosource Technology, vol. 247, jan. 2018, s. 1155-1164 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852417317698>
- Schmidt et al (2021): *Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta- analyses*, [Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta-analyses \(wiley.com\)](#)
- Schmidt H, Hagemann N, Draper K, Kammann C. (2019). *The use of biochar in animal feeding*. PeerJ 7:e 7373, [The use of biochar in animal feeding \[PeerJ\]](#)
- Shunzi et al (2022): *Biochar – an effective additive for improving quality and reducing ecological risk of compost: a global meta-analysis*, Science of The Total Environment, vol. 806, #4, 1. februar 2022, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721065177>
- Sujeeun, L. and S.C. Thomas (2022): *Biochar rescues native trees in the biodiversity hotspot of Mauritius*, Forests 2022, 13 (2), section on Forest Biodiversity <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/2/277>
- Thomsen, T.P. (2022): *Introduction to the Production and Use of Biochar 2022 – working towards a more circular and bio-based Danish Economy*, Roskilde Universitet [Introduction to Production and Use of Biochar 2022: working towards a more circular and bio-based Danish economy — Roskilde University Research Portal \(ruc.dk\)](#)

## Bilag: Grundlag for vurdering i Videnssynthesen om biokul

### Tabel A. Grundlag for vurdering af biokuls effekter på jordens fysiske egenskaber i Videnssynthesen om biokul

Konsekvenserne af at bruge biokul på landbrugsjord i forhold til jordens fysiske egenskaber er vurderet ved en meta-analyse af 31 relevante artikler. Artiklerne rapporterer om 67 parrede sammenligninger, der var inkluderet i metaanalysen. De fleste forsøg blev udført i laboratoriet eller i væksthuse (84 pct., mens 16 pct. af dem repræsenterede felteksperimenter). Analyserne tog kun hensyn til topjorden eller pløjelaget<sup>30</sup>.

Jorden omfattede alle jordtyper: groft-tekstureret- (sand og lerholdigt sand), medium-tekstureret- (sandholdigt ler) og fin-tekstureret (ler) jord. De tre kategorier repræsenterede henholdsvis 34, 55 og 10 pct. af undersøgelserne. Det organiske kulstofindhold i jorden varierede fra 0,08 pct. til 10,8 pct. (gennemsnit på 1,90 pct.). Biomasse-input omfattede (i) halm fra majs, hvede, elefantgræs, præriehirse og ris, (ii) husdyrgødning og (iii) spildevandsslam. Andelen af hver biokultype i undersøgelserne er vist i tabel 4.1 nedenfor.

*Table 4.1 Median values of the pyrolysis temperature and carbon contents of the applied biochar<sup>a</sup>. Numbers in square brackets represent the minimum and maximum values of the variable.*

Biochar type	Pyrolysis Temperature (°C)	Total carbon (%)	Biochar added carbon (%)
Straw (86.4%) <sup>b</sup>	512 [300 – 750]	63.3 [20.5 – 85.8]	1.16 [0.09 – 7.17]
Manure (9.1%) <sup>b</sup>	450 [300 – 750]	47.2 [19.0 – 74.9]	1.12 [0.37 – 1.97]
Sludge (4.5%) <sup>b</sup>	600 [550 – 650]	26.2 [22.3 – 47.7]	0.95 [0.07 – 1.00]

<sup>a</sup>Included references are: Abel et al. (2013); Herath et al. (2013); Lei & Zhang (2013); Alburquerque et al. (2014); Hansen et al. (2015); Mollinedo et al. (2015); Ojeda et al. (2015); Burrell et al. (2016); Esmæelnejad et al. (2016); Gamage et al. (2016); Glab et al. (2016); Hansen et al. (2016a,b); Jin et al. (2016); Liu et al. (2016); Ma et al. (2016); Petersen et al. (2016); Aller et al. (2017); Arthur & Ahmed (2017); Hansen et al. (2017); Kelly et al. (2017); Moragues-Saitua et al. (2017); Bornø et al. (2018a,b); Gunal et al. (2018); Mohan et al. (2018); Zong et al. (2018); Fu et al. (2019); Thers et al. (2020); Fu et al. (2021); Wang et al. (2021); Kassaye et al. (2022).

<sup>b</sup>Fraction of studies that included the feedstock.

Kilde: Elsgaard et al (2022): Knowledge Synthesis on biochar in Danish agriculture, Rådgivningsrapport fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet, september 2022, s. 51

Kulstofindholdet i biokul og tilførselsraten (added biochar carbon (BCad)) er relevante forhold for at opgøre effekter på jordens fysiske egenskaber. Tilførselsraten opgøres i tilført biokul tørvægt i forhold til jordens tørvægt (pct.)<sup>31</sup>. Tilførselsraten varierede mellem 0,25-10 pct. med et gennemsnit på 2,5 pct.<sup>32</sup>.

<sup>30</sup> Topjord er det øverste jordlag, som normal er rig på organisk materiale og næringsstoffer. Pløjelaget er et dybere lag, der kommer under topjorden. Det er normalt løsnet og vendt om ved pløjning. Hovedparten af jordens biodiversitet findes i de øverste 5 cm af jordlaget.

<sup>31</sup> Jordens tørvægt er den vægt der er tilbage efter al vand, er fjernet fra den. Tørvægten kan bruges til at bestemme jordens tæthed og dens evne til at bevare vand og næringsstoffer.

<sup>32</sup> Videnssynthesen om biokul, kapitel 4 af Arthur og Andersen, Elsgaard et al (2022), DCA rapport nr. 208.