

SkyClean biokul

HVIDBOG



Download PDF-version:

www.stiesdal.com/handouts

Stiesdal[®]
SkyClean

Revideringsoversigt

Rev.	Dato	Beskrivelse af revidering
1	05-09-23	<ul style="list-style-type: none">• Original version
2	14-11-23	<ul style="list-style-type: none">• Ny version af tabel 1• Gennemgående sproglige justeringer og præciseringer
3	04-02-2024	<ul style="list-style-type: none">• Sproglig forenkling i hele dokumentet• Ny kapitelrækkefølge
4	02-09-2024	<ul style="list-style-type: none">• Indsat visuelt forbedret version af figur 3

Redaktør

Kristian Strøbech

Anerkendelser

En stor tak fra Stiesdal SkyClean-teamet til hvidbogens eksterne, faglige bedømmere for deres tid, ekspertise og grundige gennemlæsning.

Indholdsfortegnelse

1	Introduktion.....	4
1.1	Baggrund.....	4
2	Oversigt over hvidbogens kapitler.....	5
2.1	Hvidbogens omfang.....	5
2.2	Hvidbogens afsnit.....	5
2.3	Andre anvendelsesformer af biokul.....	6
3	Biomassen.....	7
3.1	SkyClean kan omdanne en bred vifte af materialer til biokul og brændstof.....	7
3.2	Kulstofoptag.....	8
4	Biokullet vej fra SkyClean-anlægget til lagring på mark.....	10
4.1	Håndtering af biokul.....	10
4.2	Næringsstoffer.....	11
4.3	Udbringning af biokul.....	11
5	Biokullets egenskaber i jorden.....	12
5.1	Grundlæggende egenskaber.....	12
5.2	Værdiansættelse af anvendelsen af biokul i landbruget.....	12
5.3	Kalkningseffekt.....	13
5.4	Jordens struktur og vandholdningsevne med biokul.....	13
5.5	Næringsstofbidrag fra biokul.....	14
5.6	Jordens kulstofbalance med biokul.....	16
5.7	Forholdsregler ved anvendelse af biokul.....	16
6	Biokul og miljøsikkerhed.....	17
6.1	Generelt.....	17
6.2	Polycykliske aromatiske kulbrinter (PAH).....	17
6.3	Dioxiner, furaner og dioxinlignende PCB.....	18
6.4	Tungmetaller.....	18
6.5	PFAS.....	19
7	Stabilitet og klimaeffekt.....	20
7.1	Stabilitet af biokul.....	20
7.2	Ny viden om stabiliteten af biokul.....	23
8	Lovgivning om biokul i Danmark og EU.....	25
8.1	National lovgivning.....	25
8.2	Biokul i økologi.....	25
8.3	EU-regler – CE-mærkning.....	25
8.4	EU REACH.....	26
9	EBC-certificering af biokul.....	27
10	Biokul og CO ₂ e kreditter.....	28
10.1	Kulstofregnskab.....	28
10.2	CO ₂ e kredit.....	28
10.3	Eksempel på C-sink certifikat fra 20 MW anlæg baseret på biogasrestfibre.....	29
10.4	Salg af CO ₂ e kreditter.....	30
11	Andre anvendelser af biokul.....	32
12	Referencer.....	33

1 Introduktion

1.1 Baggrund

Formålet med denne hvidbog er at give et overblik over en række forskellige forhold ved biokul fra Stiesdal SkyClean pyrolyseanlæg.

Biokul er betegnelsen for kulstoffbaserede materialer, der er produceret ved varmebehandling af organisk materiale ved høje temperaturer under iltfattige forhold. Selve processen betegnes som pyrolyse.

Tørt plantemateriale indeholder typisk ca. 50% kulstof, som planterne har optaget fra atmosfæren i form af CO₂. Alt kulstoffet i restprodukter fra land- og skovbrug kommer dermed også fra atmosfæren. Det gælder, uanset om restprodukterne er rent plantebaseret, eller om det er restprodukter fra husdyrhold eller fødevarerindustrien.

I pyrolyseprocessen omdannes rundt regnet halvdelen af kulstoffet i restproduktet til biokul, mens den anden halvdel ender som pyrolysegas.

Biokul er et stabilt materiale, som kun nedbrydes meget langsomt, og den halvdel af kulstoffet, der bliver til biokul, er dermed effektivt fjernet fra atmosfæren.

Den halvdel af kulstoffet, der ikke bliver til biokul, kommer ud af pyrolyseprocessen som gas og olie. Gassen kan bruges som brændsel i varmforsyningen og i industrien, og olien kan raffineres til brændstof til transportsektoren.

SkyCleans pyrolyseproces er baseret på mange års forskning i pyrolyse på Danmarks Tekniske Universitet (DTU), hvor målet har været at frembringe biokul af en standard, som tillader, at biokullet kan anvendes på dyrkede markjorder.



Figur 1: SkyClean biokul spredt på etableret majsmark med henblik på fotografering. I praksis vil man tilstræbe spredning inden såning, hvor biokullet bliver nedpløjet eller -harvet.

2 Oversigt over hvidbogens kapitler

2.1 Hvidbogens omfang

Hvidbogen beskriver biokul og biokulproduktion ved hjælp af SkyClean-teknologien, herunder biokullets egenskaber og hvordan det kan indgå i landbrugspraksis og lagres. Desuden beskriver hvidbogen relevant lovgivning, certificering, miljøsikkerhed og CO₂e-kreditter.

Hvidbogen dækker ikke selve teknologien i SkyClean pyrolyseprocessen eller SkyClean energiproduktion.

Så vidt muligt kan de enkelte kapitler læses hver for sig. Det indebærer, at visse informationer gentages i flere kapitler.

Den danske pyrolysesektor er under hastig udvikling. Derfor er denne hvidbog et dynamisk dokument, som vil blive opdateret og genudgivet med jævne mellemrum, så den nyeste viden om lovgivning, standarder og effekter kan blive inkluderet.

2.2 Hvidbogens afsnit

Afsnit 3 handler om, hvilken biomasse der kan bruges i SkyClean-processen, og hvordan denne biomasse påvirker produktionen og kvaliteten af biokul. Typen og kvaliteten af biomassen spiller en vigtig rolle både i forberedelsen og under selve pyrolyseprocessen. Disse forhold har også indflydelse på, hvor meget kulstof og næringsstoffer biokullet indeholder, hvilket igen påvirker de mulige anvendelser for biokullet.

Afsnit 4 beskriver, hvordan biokul fra SkyClean-anlægget bliver transporteret og udbredt på markerne. Vi ser på forskellige måder at opbevare biokul på, som f.eks. i markstakke, og på, hvordan biokullet skal tildækkes. Vi beskriver også, hvordan biokul kan håndteres, bl.a. ved brug af almindeligt landbrugsudstyr og spredningsmaskiner. Det er vigtigt at vide, at biokul ikke skal betragtes som farligt gods, når det transporteres. Vi beskriver også, hvordan biokul kan bruges til at omfordele fosfor i jorden. Derudover ser vi på, hvor meget biokul der skal bruges, hvordan det kan blandes med gylle, og hvad vi observerer ved tests af forskellige spredningsteknikker.

Afsnit 5 handler om, hvordan de positive effekter af biokul kan udnyttes i landbruget. Biokul hjælper med at holde en god balance i jordens pH-værdi, vandindhold og næringsstoffer, og det kan også forbedre jordens struktur. Disse egenskaber gør biokul nyttigt til at begrænse skaderne ved tørke og forbedre vandforsyningen i landbrugsområder, hvilket kan have en stor indflydelse på landbrugsproduktion og afgrødeudbytter. Vi ser også på biokullets rolle i forhold til fosfor og kalium, og hvordan det bidrager til at stabilisere kulstof i jorden.

Afsnit 6 beskriver de miljømæssige forhold ved biokul. De standarder, man bruger som reference, medvirker til at sikre, at alle regler for miljøfremmede stoffer overholdes. Dette inkluderer stoffer som polycykliske aromatiske kulbrinter (PAH), dioxiner, furaner, dioxinlignende PCB'er og tungmetaller.

Afsnit 7 beskriver stabiliteten og klimaeffekten af biokul. Stabiliteten af biokul bliver påvirket af flere faktorer, herunder typen og kvaliteten af den biomasse, der bruges, pyrolysetemperaturen, og hvor lang tid biomassen er i anlægget. Pyrolysetemperaturen er især vigtig, fordi højere temperaturer gør kulstoffet i biokullet mere stabilt. Årsagen er, at den højere temperatur hjælper med at danne kulstofringe, som kun nedbrydes meget langsomt af naturens processer.

Afsnit 8 beskriver lovgivningen i Danmark og EU med relevans for biokul. I Danmark er der stadig nogle usikkerheder omkring reglerne for brugen af biokul. Stiesdal SkyClean arbejder sammen med myndighederne og forskellige organisationer for at få de gældende regler tilpasset til en fremtid, hvor biokul indgår i normal landbrugsproduktion. I EU er reglerne mere veldefinerede.

Afsnit 9 beskriver certificering af biokul i henhold til et regelsæt udarbejdet af EBC (European Biochar Council). EBC-certificering er en valgfri europæisk standard, der gælder for produktion af stabilt biokul. Den omfatter også et 'C-sink' certifikat, som viser klimapåvirkningen fra både produktionen og transporten af biomassen. For at opnå denne certificering skal virksomheder gennemgå tekniske revisioner, lave prøveanalyser og være åbne for årlige inspektioner.

Afsnit 10 beskriver systemet med klimakreditter i forhold til biokul. Biokul består hovedsageligt af stabilt kulstof, som er et effektivt redskab for kulstoflagring. Biokul bliver anset for at være et kulstof-negativt klimainstrument, fordi processen med at producere biokul via pyrolyse fjerner mere CO₂ fra atmosfæren, end der udledes under produktionen og transporten af biokullet. Dette gælder også, når man tager hensyn til CO₂-udledningen fra forbrændingen af pyrolysegassen eller de brændstoffer, som fremstilles ud fra pyrolysegassen.

2.3 Andre anvendelsesformer af biokul

Denne hvidbog fokuserer på brugen af biokul i landbruget. Årsagen er, at de typer af biomasse, der er tilgængelige i Danmark, indeholder vigtige næringsstoffer, som det er fordelagtigt at føre tilbage til jorden. Dertil kommer, at det indtil videre kun er ved udbringning på landbrugsjord, at biokullets nettolagring af CO₂ kan indgå i det nationale regnskab.

I situationer, hvor det ikke er en høj prioritet at genanvende næringsstoffer, og hvor det nationale regnskab ikke er i fokus, kan biokul også bruges i andre sektorer, f.eks. som tilsatsmateriale i beton eller som råvare til produktion af industriprodukter.

3 Biomassen

3.1 SkyClean kan omdanne en bred vifte af materialer til biokul og brændstof

SkyClean kan bruge næsten enhver type organisk materiale, se figur 2. Listen over egnede typer af biomasse omfatter alle restprodukter fra land- og skovbrug, affald fra fødevareproduktion og by-områder, alger osv. Teknologiens alsidighed muliggør anvendelsen af SkyClean også udenfor Danmark.



Figur 2: Eksempler på biomasse som er egnet til pyrolyse med SkyClean-teknologien.

Træflis, nøddeskaller og andre hårde typer biomasse kan typisk pyrolyseres uden forbehandling. Halm, gødning og andre typer biomasse fra landbruget vil normalt kræve pelletering før pyrolyse med SkyClean-teknologien. Ved pelletering presses materialet sammen til hårde piller på størrelse med ærter. Hvis ikke man pelleterer biomassen, bliver en stor del af materialet til støv under processen. Det betyder ikke noget for klimaeffekten, men det gør det besværligt at håndtere biokullet efterfølgende.

Biogasfibre og andre typer biomasse med højt vandindhold kræver både tørring og pelletering før brug. Forskellige tørringsteknologier kan anvendes, alt efter hvilken type biomasse der er tale om.

Når man anvender biomasse fra landbruget til produktion af biokul, bliver de fleste næringsstoffer bevaret ved at hæfte sig til biokullet. På den måde bliver næringsstofferne recirkuleret, når biokullet bliver udbredt på markerne. Her er særligt stoffet fosfor vigtig, da de globale forekomster af fosfor er knappe. Biomassens indhold af fosfor ender i biokullet, og det samme gælder kalium og magnesium. Kvælstof og i mindre grad svovl vil i pyrolyseprocessen havne i pyrolysegassen og føres derfor ikke tilbage til marken. Det specifikke indhold af de enkelte typer næringsstoffer i biokullet afhænger af, hvilke næringsstoffer der er i den biomasse, som pyrolyseres.

I dag er der en stor, uudnyttet ressource af biomasse i Danmark, især indenfor landbruget, og det er muligt at forøge mængden væsentligt. Forskere fra Aarhus Universitet vurderer i *Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture* (Elsgaard et al., 2022), at der i 2030 vil være et potentielt på 6.6 millioner ton tørstof, hvis den nuværende landbrugspraksis fastholdes. Heraf forventes 2 millioner ton tørstof anvendt til produktion af bioenergi. Videnssynthesen inkluderer scenarier med biomassepotentialer i 2030 på 9.5 - 14.6 millioner tons tørstof. Selv med andre anvendelser af biomasse er der altså et meget stort potentiale for pyrolyse af biomasse.

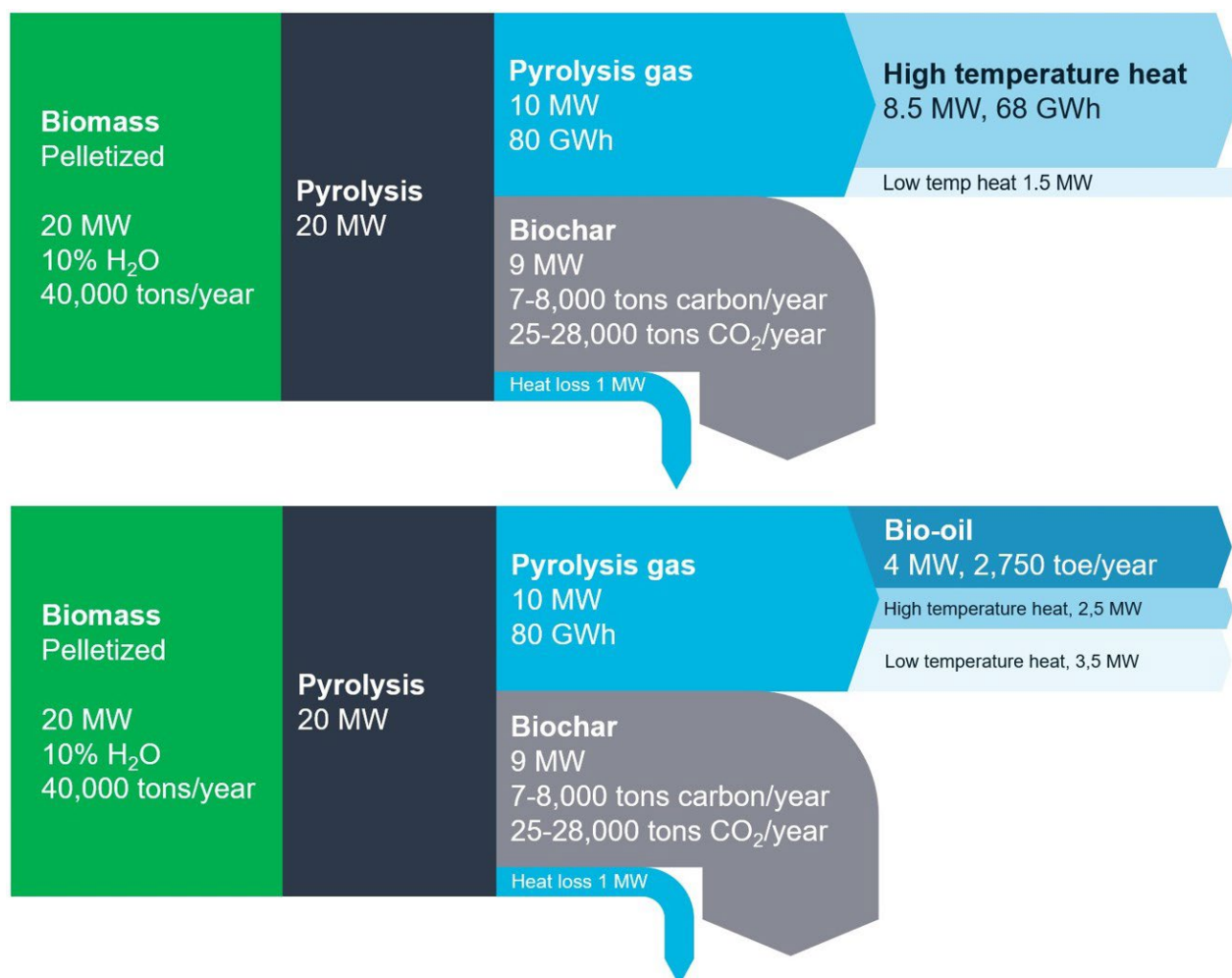
3.2 Kulstofoptag

Typen af biomasse, som anvendes til pyrolyse, har en vis betydning for mængden af kulstof, som lagres i biokullet, og for energiproduktionen. Uanset typen af biomasse ender fordelingen af klima-effekten dog med stort set at være den samme. I runde tal opstår to tredjedele af klimaeffekten ved lagring af biokul, mens den sidste tredjedel opstår ved fortrængning af fossile brændsler. Denne fordeling er i runde tal den samme, uanset om der anvendes halm eller biogasrestfibre, jfr. tabel 1.

Produktion per ton biomasse indført	Halm	Biogasfibre
Biomasse [ton tørstof]	1,00	1,00
Biokulproduktion [ton CO ₂ e]	0,70	0,75
Fortrængning af fossilt brændstof [ton CO ₂ e]	0,45	0,30
Undgået metan-emission [ton CO ₂ e]	-	0,10
Lagret og fortrængt CO₂e [ton CO₂e]	1,15	1,15

Tabel 1: Gennemsnitlige energistrømme i SkyClean-scenarie med halm og biogasrestfibre.

SkyClean-processen omdanner rundt regnet halvdelen af biomassens kulstof til biokul. Resten bliver til pyrolysegas, der kan bruges til højtemperaturvarme og/eller udkondenseres til bioolie. Energifordelingen for et 20 MW SkyClean anlæg ses i diagrammet i figur 3.



Figur 3: Sankey-diagram med energifordeling med og uden kondensering af bioolie for et 20 MW SkyClean anlæg.

Pyrolyseprocessen i et SkyClean-anlæg har en høj energieffektivitet. Det koster kun ca. 5% af energiindholdet i den anvendte biomasse at drive processen, jfr. figur 3. Resten af energiindholdet i biomassen bevares i biokullet og pyrolysegassen.

Den overordnede energibalace vil variere afhængigt af fugtindholdet i den oprindelige biomasse. Ved arbejde med våd biomasse bruges en del af overskudsvarmen til at tørre biomassen i en tryk-sat damptørrer. En betydelig del af den varme, der anvendes til tørring, genindvindes og kan ofte bruges som erstatning for fossil energi, f.eks. naturgas.

4 Biokullet vej fra SkyClean-anlægget til lagring på mark

4.1 Håndtering af biokul

Et SkyClean anlæg, der anvender biogasrestfibre som biomasse, producerer årligt omkring 19.000 ton biokul med 30% vandindhold. Denne mængde fylder cirka 25.000 kubikmeter. Derfor er det nødvendigt, at biokullet løbende fragtes væk fra anlægget til andre oplagspladser, helst tæt på de områder, hvor biokullet skal udbringes.

Biokullet betragtes som forarbejdet husdyrgødning, og derfor kan det opbevares i en markstak. Markstakken skal dækkes med et vandtæt materiale, hvis den henligger i mere end en uge.

Det kan også være aktuelt at have et midlertidigt lager på selve landbrugsbedriften eller f.eks. hos en grovvarerforretning, men det ville være hensigtsmæssigt ikke at skulle flytte biokullet mere end én gang.

Biokullet kan også opbevares i storsække. Dette vil dog medføre en ekstraudgift på omkring 50-100 kr. pr. ton.

Løst biokul kan normalt håndteres på landbrugsbedriften med de sædvanlige læssemaskiner som minilæsser, rendegraver eller gummiged.

Biokul kan spredes med almindelige spredere som kalkspreder, gødningsspreder, gyllevogn eller møgspreder. Når biokullet opbevares i en markstak, skal det fyldes i maskinen med forsigtighed for at undgå, at jord og sten kommer med i sprederen.

Biokullet kræver ikke yderligere forholdsregler ved transport, da det ikke er klassificeret som farligt gods.

Mængden, der spredes, vil variere fra 500 kg til 10 ton pr. hektar, afhængigt af formålet og næringsstofindholdet.



Figur 4: Biokullets vej fra SkyClean-anlægget til lagring på mark.

4.2 Næringsstoffer

Biokul indeholder næringsstoffer som fosfor og kalium. Fosfor er et vigtigt næringsstof for afgrøderne, og biokul gør det muligt at flytte fosfor fra steder i Vestdanmark, hvor der er overskud af fosfor, til områder i Østdanmark, hvor der er underskud af fosfor.

Stiesdal har beregnet, hvor dyrt det er at flytte biokul fra Vrå i Vendsyssel til Østdanmark. For at det skal være økonomisk at transportere biokul over lange afstande, skal fosforindholdet i biokullet være over 4%. Dette tager højde for, at ikke al fosfor i biokullet er umiddelbart tilgængeligt for planterne. Biokul fra biogasrestfibre indeholder normalt 2-4% fosfor, så transport fra Vendsyssel til Østdanmark er på grænsen til at være rentabel. Regnskabet vil se bedre ud, hvis biogasanlægget er placeret længere sydpå i Jylland.

Hvis fosforindholdet i biokullet er mindre end 4%, kan det stadig betale sig at transportere biokul fra Vest- til Østdanmark, hvis markedsprisen på fosfor er høj. For eksempel kræver transport af biokul med 2% fosfor en markedsværdi på 16 kr./kg fosfor for at dække transportomkostningerne. Hvis indholdet af kalium i biokullet tages med i beregningen, kan det være økonomisk at transportere biokul med 3% fosfor, selv ved en lav markedspris på 7 kr./kg.

4.3 Udbringning af biokul

Biokul i pilleform er velegnet til at blive spredt på marker ved hjælp af de sædvanlige maskiner, som landmænd benytter, såsom kalkspredere, gødningsspredere, møgspredere og gyllespredere. For at undgå, at pillerne går i stykker, når de håndteres, skal de være stærke nok til at modstå et vist tryk. Stærke piller sikrer også, at spredningen bliver jævn og ikke i sig selv skaber for meget støv. Vandindholdet i biokullet hjælper med at holde støvniveauet lavt.

Der er blevet udført indledende tests med kalkspredere og gødningsspredere. Resultatet er, at biokul kan spredes over en bredde på op til 24 meter med en variation på 6-8%. Denne variation er tilfredsstillende for almindelig brug i landbruget.

Selvom knuste piller sandsynligvis stadig kan spredes med en kalkspreader, vil det medføre mere variation i spredningsmønstret og øge risikoen for støv, medmindre en speciel spreader med snegleudlæggerbom bruges.

Med en almindelig gødningsspreder vil den maksimale mængde, der spredes pr. hektar, være omkring 1 ton. Hvis der skal spredes større mængder, kræver det flere kørsler eller muligvis to spreadere, en foran og en bagpå traktoren.

Der er også udført tests med en almindelig møgspreader, hvor spredningen kunne varieres med 15% på op til 8 meters bredde. Det er acceptabelt for den pågældende spredertype, men Samson Agro A/S har udviklet en mere avanceret centrifugal spreader, som angiveligt kan sprede på større bredder med mindre variation. Denne spreader vil blive testet fra vinteren 2023-24.

Spredning sammen med gylle er også blevet testet. Blandingsforholdet bør ikke være mere end 1:15 i vægtforhold for at undgå belastning af fordelingspumpen og for at sikre, at tørstofindholdet i gyllen ikke øges for meget med dette blandingsforhold.

Der er også udført et par tests med biokul som placeret gødning i en luftsåmaskine. Her skabte vandindholdet og smuld/støv i biokullet udfordringer, og det ser ikke ud til, at denne metode vil være relevant med biokul i det nuværende format. Udbringning under såning vil have lille betydning for udbringningen af biokul i større mængder.

5 Biokullets egenskaber i jorden

5.1 Grundlæggende egenskaber

Biokul er et basisk og porøst materiale med masser af små porer, der skaber en stor indre overflade. Dette gør, at biokul kan hjælpe med at opretholde jordens surhedsgrad (pH-niveau) og samtidig forbedre jordens evne til at holde på vand og lade vand passere igennem (jordens hydrauliske ledningsevne). Biokul styrker også jordens evne til at tiltrække og holde på positive ladede ioner (kationadsorptionskapacitet), og det fungerer også som et vækstmedium for mikroorganismer som svampe og bakterier. Endelig tilfører biokul som beskrevet ovenfor næringsstoffer til jorden.

For en landmand kan biokul give flere fordele, som vi opsummerer her og uddyber senere:

- Mindre behov for kalk, hvilket reducerer udledningen af CO₂ forbundet med kalkning.
- Forbedret jordstruktur og mere tilgængeligt vand for planter i jorden.
- Større modstandsevne mod tørke
- Forbedret mikrobiom og rodudvikling.
- Reduceret udvaskning af nitrogen og udslip af N₂O i miljøet.
- Depot af næringsstoffer med langsom frigivelse.
- Generelt forbedre vækstbetingelser med potentiale for øget udbytte.

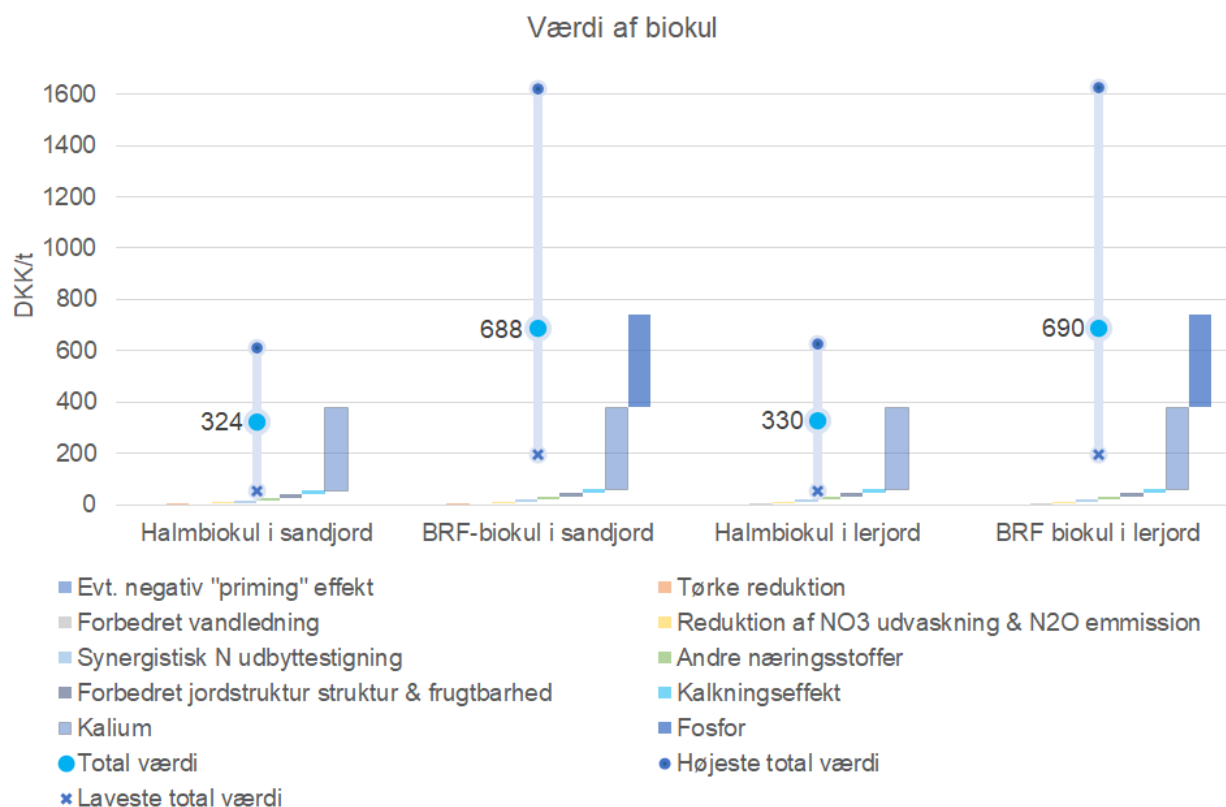
Der er i øjeblikket gang i mange forsknings- og udviklingsprojekter, der arbejder på at belyse biokuls virkning i jorden bedre og afdække dets værdi.

5.2 Værdiansættelse af anvendelsen af biokul i landbruget

Biokul har forskellige egenskaber og fordele, som afhænger af, hvilken slags biomasse biokullet er produceret med, og hvilken type jord det bruges på.

Stiesdal har lavet en række scenarier for at vurdere den direkte værdi af biokul som gødning og til at forbedre jorden.

Som det ses på figur 5 nedenfor, er gødningsværdien den mest fremtrædende fordel ved anvendelse af biokul i landbruget. Effekterne på jorden, der normalt opbygges over flere år, forventes at have mindre værdi i dansk landbrug, hvor jorden allerede er af høj kvalitet og giver gode udbytter. Biokul kan værdisættes til omkring 500 kr. pr. ton baseret på relevante faktorer. Dog kan værdien variere betydeligt, især afhængig af biokullets oprindelige egenskaber fra biomassen og dets næringsstofindhold.



Figur 5: Oversigt over, hvor meget værdi biokul fra halm eller biogasrestfiber (BRF) kan tilføre på forskellige typer jord. Målpunktet til højre for beløbsangivelsen viser værdien for basisscenariet, mens søjlerne omkring repræsenterer resultaterne for forskellige scenarier. Disse scenarier inkluderer forskellige niveauer af næringsstofværdi og tilgængelighed af næringsstoffer for planterne. Trappediagrammet viser de grundlæggende værdielementer og deres individuelle vurdering for hver jord- og biokultype i det grundlæggende scenarie.

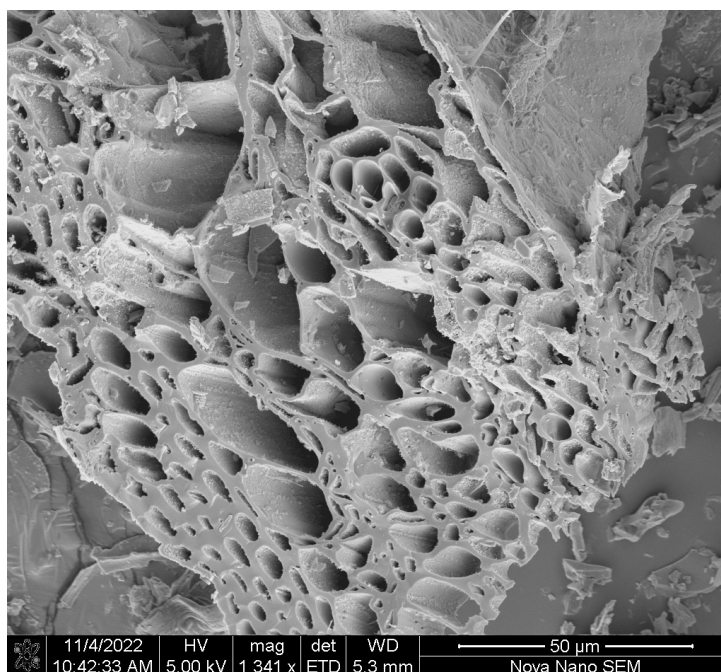
5.3 Kalkningseffekt

Biokul er basisk, og når det er fremstillet af halm eller biogasrestfibre, har det en pH-værdi omkring 10. Den nøjagtige værdi afhænger af den type biomasse, der bruges. Det er dog vigtigt at vide, at biokullets basiske virkning er svag, og biokullet kan ikke erstatte almindelig kalk i landbrugsjorden. Biokul kan derimod hjælpe med at bevare jordens naturlige pH-værdi.

I en undersøgelse med forskellige typer biokul (Nissen et al. 2021) skulle der tilføres fra 4 til 33 ton biokul pr. hektar for at øge jordens pH med 0,1 enhed. En tommelfingerregel er, at det normalt kræver mellem 0,5 og 1,0 ton kalk for at hæve jordens pH med 0,1 enhed. Med biokul er den nødvendige mængde, der skal tilføres for at opnå samme effekt, altså langt højere.

5.4 Jordens struktur og vandholdningsevne med biokul

På grund af biokullets porøsitet har det en stor evne til at optage vand, og det kan holde mere vand end egenvægten, i nogle tilfælde endda flere gange egenvægten. Dette skyldes, at plantematerialets strukturelle opbygning med bl.a. kapillærer og kanaler bevares i biokullet. Figur 6 viser et elektronmikroskopisk billede af halmbiokul.



Figur 6: Elektronmikroskopisk billede af findelt halmbaseret biokul der viser, at porestrukturen fra plantematerialet bibeholdes i biokullet. Denne struktur er med til at give en høj vandholdningsevne. © Charlotte Skjold Qvist Christensen, AU.

Biokul kan forbedre mængden af plantetilgængeligt vand i jorden med ca. 5% i sandjord og 2% i lerjord, når der tildeles biokul svarende til 1% af jordmængden. Pløjelaget på ca. 20 cm indeholder ca. 3000 tons jord/ha og 1% biokul svarer således til 30 tons/ha.

Hvis biokullet bliver findelt til en kornstørrelse på under 0.1 mm og derpå fordelt mellem partiklerne i sandjord, kan mængden af grove porer reduceres, fordi biokullet udfylder porerne. Det medfører, at kapillareffekten og dermed den vandholdende evne bliver forøget. I et forsøg udført af Københavns Universitet på grovsandede jorde blev jordens vandindhold i slutningen af april øget fra ca. 14% til 19% ved tilførsel af 4% biokul, og denne øgede vandkapacitet blev opretholdt indtil juni måned. Der kræves dog tilførsel af ret store mængder biokul for at nå til en andel på 4%.

Øget vandkapacitet vil kunne bidrage til, at nitrat i højere grad tilbageholdes i jorden i stedet for at blive udvasket.

Biokul kan også forbedre jordens vandledningsevne og herigennem forbedre afdræningen til gavn for vandlidende jorder. Vandledningsevnen er også gavnlig i forhold til jordens luftskifte og iltindhold. Det kan give en positiv effekt på emissionen af den vigtige drivhusgas N_2O (lattergas), da N_2O primært dannes under anaerobe (iltfri) forhold. En god vandtransport indebærer, at der også tilføres ilt, som er indeholdt i vandet, og dermed kan de anaerobe forhold, som giver anledning til dannelse af N_2O , begrænses. Udenlandske undersøgelser har vist en reduktion af udledning af N_2O på op til 38% ved tilførsel af biokul. En øget vandledningsevne kan desuden gavne rodudviklingen og jordens mikrobiom, inkl. Mykorrhiza svampe.

5.5 Næringsstofbidrag fra biokul

Biokul afgiver normalt næringsstoffer til jorden og kan også påvirke de eksisterende næringsstoffer ved, at disse binder sig til overfladen af biokullet.

Biokul har en negativ ladning på samme måde som lerpartikler. Dette gør, at positivt ladede næringsstof ioner kan binde sig til biokullet og blive frigivet i jorden, når planterne har brug for dem.

Biokul indeholder primært fosfor, kalium og mindre mængder af magnesium, svovl og mikronæringsstoffer. Biokul fra biogasrestfibre har typisk 2–4% fosfor og 3–5% kalium, mens biokul fra halm indeholder mindre end 1% fosfor, men omkring det samme niveau af kalium som biokul fra biogasrestfibre. Andre næringsstoffer i biokul forekommer i mindre mængder, ofte mindre end 1%.

Biokul indeholder også 1–2% kvælstof, som er hårdt bundet og ikke umiddelbart frigives.

Danske undersøgelser har vist, at tørstofudbyttet i lupin- og hvedeforsøg gødet med biokul var sammenligneligt med traditionel gødning (Kristensen, 2020). En anden undersøgelse viste en udvindingsrate af fosfor fra biokul på 34 til 49% over 16 uger, næsten på niveau med fosforudvindingen fra traditionel gødning på 52% (Li et al 2017).

5-25% af det tilførte fosfor i gødning blev genfundet i afgrøderne samme år i en engelsk undersøgelse (Poulton & Johnston. 2019). Disse resultater understøtter, at andelen af direkte plantetilgængelig fosfor i gødning ikke er afgørende.

Generelt er opfattelsen, at direkte plantetilgængelig fosfor bør maksimeres i gødning, hvilket også er relevant i forhold til fosforloftet for den enkelte bedrift. Tilgængeligheden af fosfor i biokul kan forbedres ved at behandle det med syre i konventionelt landbrug. Det samme resultat kan opnås ved at fermentere biokul sammen med kompost i økologisk landbrug.

Stiesdal har udført et potteforsøg med biokul baseret på biogasrestfibre for at demonstrere gødningseffekten. Resultaterne ses i figur 7.



Figur 7 Demonstrationsforsøg udført af Stiesdal SkyClean i 2023 med vårbyg dyrket i vermiculite.

1. Uden gødning
2. Gødet med N & P i mineralsk gødning
3. Gødet med N & K i mineralsk gødning
4. Gødet med N i mineralsk gødning & biokul
5. Gødet med N i mineralsk gødning & biokul behandlet med 10% svovlsyre
6. Gødet med N, P & K i mineralsk gødning.

Gødningsmængderne er afstemt med afgrødens behov på 150 kg N/ha, 20 kg P/ha & 50 kg K/ha. Alle seks pletter er desuden tilført en blanding af mikronæringsstoffer. Pletterne var i drivhus de første 4 uger, og billedet er taget 8 uger efter såning.

5.6 Jordens kulstofbalance med biokul

Biokul består hovedsageligt af kulstof, mens resten er aske. Biokul, der er lavet af biogasrestfibre, indeholder omkring 60-65% kulstof, mens halmbaseret biokul indeholder 75-80% kulstof. Kulstoffet i biokul er meget stabilt. Derfor kan biokul hæve jordens kulstofindhold ud over, hvad der er muligt med organisk stof og, set i en klimakontekst, binde mere kulstof fra luftens CO₂ i meget længere tid.

Biokul kan ikke fuldt ud erstatte nedmuldning af biomasse, da det nedmuldede organiske materiale er vigtigt som næring for de organismer i jorden, der er afgørende for jordens frugtbarhed. Derfor skal dyrkningssystemerne tilpasses, så en del af afgrøderesterne nedmuldes, mens den anden del gennemgår pyrolyse og vender tilbage til marken som biokul. Rodnet, stængler, tab i marken og eventuelle efterafgrøder bidrager alle til at opretholde en let nedbrydelig mængde organisk materiale og kulstof i jorden.

Internationale undersøgelser har vist op til 15% forbedring i udbyttet ved brug af biokul. Dette skyldes sandsynligvis generelle forbedringer af vækstbetingelserne for afgrøderne. En lignende effekt er endnu ikke blevet observeret i danske undersøgelser, hvor vi dog ikke har målinger af langvarige virkninger. Danske jorder er generelt i god gødnings- og kulturtilstand med normale pH-niveauer, hvilket sandsynligvis reducerer de overordnede forbedringer i afgrødernes vækstbetingelser i Danmark.

5.7 Forholdsregler ved anvendelse af biokul

Ved tildeling af meget store mængder biokul kan der opstå en negativ effekt, hvor biokullet adsorberer en u hensigtsmæssig stor mængde næringsstoffer. Det kan medføre et tab af organisk stof i jorden og dermed give anledning til udledning af CO₂. Der er dog lavet forsøg med tilførsel af op til 50 tons/ha uden skadelige effekter. Det må indtil videre tilrådes ikke at udbringe mere end 5 – 10 tons/ha, indtil der er indhentet flere erfaringer.

Fosforindholdet kan sætte begrænsninger for udbringningsmængderne, fordi der skal tages hensyn til fosforloftet. Dette loft er typisk af størrelsesordenen 30 kg P/ha, hvilket svarer til 0,5 – 10 tons biokul/ha, afhængigt af biokullets fosforindhold. Dog er fosforloftet gældende på bedriftsniveau, og der er således mulighed for at fordele mængderne mellem markerne på den måde, som er mest gunstig for udbyttet.

Med biokul er det muligt at tilføre jorden en større mængde kulstof, end det er muligt med biomasse fra andre kilder. Ved flerårig nedmuldning af biomasse som f.eks. halm, afgrøderester, husdyrgødning og afgasset biomasse vil der på et tidspunkt indtræde en ligevægt, som definerer en øvre grænse for mængden af organisk stof og dermed kulstof i jorden. Tilførslen af biokul kan derimod i princippet forsætte, og jordens kulstofindhold kan øges ud over den øvre grænse for organisk bundet kulstof.

6 Biokul og miljøsikkerhed

6.1 Generelt

Pyrolyseprocessen i et SkyClean-anlæg er baseret på en pyrolyseteknologi, som er udviklet gennem mere end to årtiers forskning på DTU, hvor forskerne har haft fokus på sikker brug af pyrolyseteknologien i landbruget og på biokullets potentiale som klimavirkemiddel. Den løbende overvågning af biokullet for uønskede stoffer sikres via certificering.

6.2 Polycykliske aromatiske kulbrinter (PAH)

PAH-forbindelser er tjærestoffer, som dannes ved afbrænding og også ved pyrolyse. Biomassens karakter, opvarmningshastigheden, opholdstiden i reaktoren og temperaturen indvirker på dannelsen af PAH-forbindelser.

PAH-dannelse kan ikke undgås, men det er muligt at undgå, at de dannede PAH'er findes på biokullet. Dette gøres ved at undgå kondensering af pyrolysegas på biokullet. Den pyrolyseproces, som er udviklet af DTU, sigter netop på at lave PAH-frit biokul.

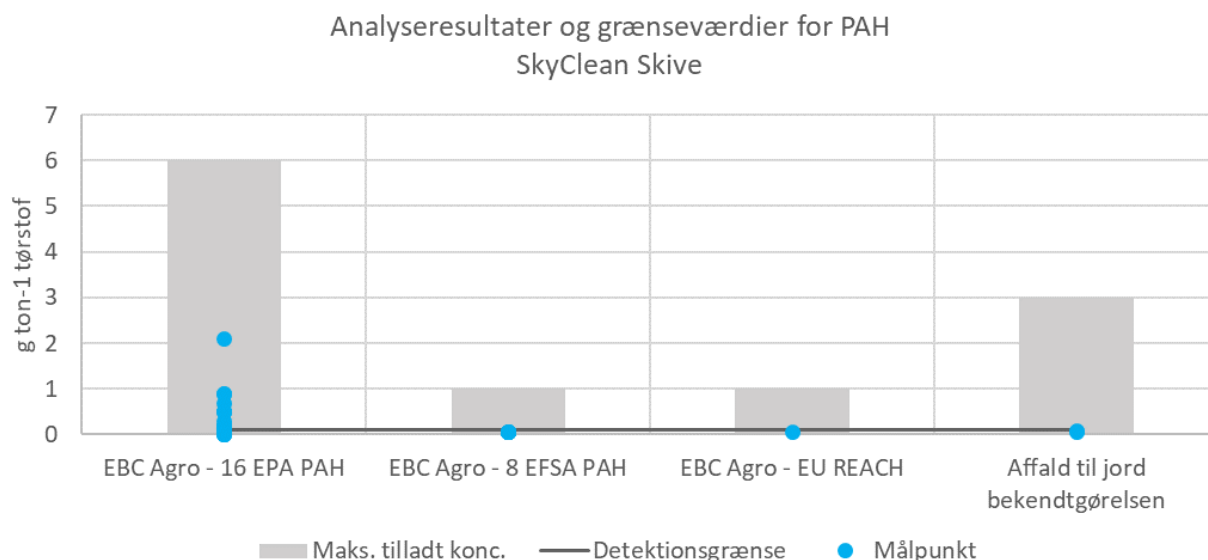
I SkyClean processen er der indbygget sikkerhedsforanstaltninger, som reducerer risikoen for kondensering af tjærestoffer på biokullets overflade. De vigtigste elementer er sikring af tilstrækkelig høj temperatur af biokullet, hvor det er i kontakt med pyrolysegassen, så der ikke sker kondensering af PAH-forbindelser på biokullet, og et system til gasskylning, inden biokullet trækkes ud af systemet.

PAH-forbindelser kan være sundhedsskadelige og reguleres derfor både på EU og nationalt niveau. De gældende grænseværdier er opgivet i tabel 2.

	Grænseværdi	Grænseværdi oprindelse
16 EPA PAH	< 6 µg/g TS	EBC Agro baseret på EU gødningsforordning
8 EFSA PAH	< 1 µg/g TS	EBC Agro baseret på EU EFSA
Benzo[e]pyrene Benzo[j]fluoranthene	< 1 µg/g TS pr. stof	EBC Agro baseret på EU REACH
11 PAH-forbindelser	< 3 µg/g TS	Affald til jord bekendtgørelsen

Tabel 2: Grænseværdier og oprindelse af grænseværdier for PAH-forbindelser i biokul indenfor EBC Agro-kategorien

Analyser på biokul fra SkyClean i Skive viser, at alle grænseværdier er overholdt, se figur 8.



Figur 8: Analyseresultater fra biokul lavet på SkyClean-anlægget i Skive, grænseværdierne for EBC Agro, EU REACH og Affald til jord bekendtgørelsen

6.3 Dioxiner, furaner og dioxinlignende PCB

Dioxiner og furaner dannes ved forbrænding af organisk materiale. Dioxiner dannes dog kun, hvis der er klor til stede ved forbrændingen.

Dioxinlignende PCB-stoffer har tidligere været anvendt specielt i byggematerialer, men er udfaset. Nogle PCB-forbindelser kan have samme effekt som dioxin, og derfor medtages disse i gruppen for dioxin.

Stofferne anses som værende sundhedsskadelige og er derfor i Danmark reguleret i fødevarer. For anvendelse af biokul i landbruget er der i en dansk kontekst ingen regulering af dioxiner, furaner og dioxinlignende.

Den frivillige EBC-certificering har angivet grænser for begge grupper af forbindelser baseret på tysk og schweizisk miljøbeskyttelseslovgivning. SkyClean biokul overholder nemt disse grænseværdier, se tabel 3.

	EBC Agro grænseværdi	SkyClean halm biokul	SkyClean BRF biokul
Dioxiner og furaner I-TEQ (NATO/CCMS) upper-bound ng/kg TS	20	0,892	0,944
PCB Total 6 ndl-PCB (upper-bound) µg/kg TS	200	0,828	0,428

Tabel 3: Grænseværdier fra EBC for dioxiner og furaner og tilhørende analyseværdier for biokul fra SkyClean Skive.

6.4 Tungmetaller

Planter optager tungmetaller og indbygger dem i biomassen, når de gror. De fleste tungmetaller bliver i biomassen ved pyrolyse. Der kan derfor forekomme tungmetaller i biokul, hvis der er tungmetaller i det materiale, der pyrolyseres. Tungmetallerne kan stamme fra vegetabilsk materiale anvendt i foder til husdyr, men kan også stamme fra legeringer i de systemer, som behandler biomassen, herunder staldinventar (Kofoed & Kjellerup, 1984).

Der kan ikke dannes nye tungmetaller ved pyrolyse, men der kan ske en opkoncentrering af de eksisterende tungmetaller i biomassen, fordi en del af den forsvinder som gas.

Tungmetaller er en meget forskelligartet gruppe, hvor nogle er forbundet med sundhedsrisici, mens andre fungerer som sporstoffer, som er nødvendige i lave koncentrationer for optimal vækst hos planter og dyr.

Tungmetallernes indhold reguleres både nationalt og på EU-niveau. EBC-grænseværdierne stemmer overens med EU's gødningsforordning.

Under den danske miljøbeskyttelseslovgivning, som tages i anvendelse ved spredning af biokul, er grænseværdierne angivet i affald til jord-bekendtgørelsen, som nyttiggør næringsrige affaldsfraktioner til jordbrugsformål uden skadelige virkninger på miljøet, mennesker, planter og dyr.

Affald til jord-bekendtgørelsen opgør tungmetaller enten pr. tørstof enhed eller pr. fosforenhed. De to sæt grænseværdier skyldes, at man ønsker muligheden for at genanvende næringsstoffer som fosfor. Derfor vil grænseværdien per tørstofenhed være relevant at bruge for halmbaserede biokul, hvorimod biokul baseret på biogasrestfibre vil være en fosforgødning og derfor vil grænseværdierne være baseret på fosforenheder jf. vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 9473.

Begge typer biokul overholder de opsatte grænseværdier i EBC Agro-kategorien og Affald til jord-bekendtgørelsen, se tabel 4.

Tungmetaller		EBC Agro grænseværdi	Affald til jord bekendtgør.	SkyClean halm biokul	SkyClean BRF biokul
Arsenik	mg/kg TS	13	-	*	1,8
Bly	mg/kg TS	120	120	*	
Pb/P	mg/kg TP	-	10000		96
Cadmium	mg/kg TS	1,5	0,8	*	
Cd/P	mg/kg TP	-	100		*
Kobber	mg/kg TS	100	1000	6	70
Nikkel	mg/kg TS	50	30	*	
Ni/P	mg/kg TP	-	2500		2150
Kviksølv	mg/kg TS	1	0,8	*	
Hg/P	mg/kg TP	-	200		*
Zink	mg/kg TS	400	4000	49	260
Krom	mg/kg TS	90	100	2	16

Tabel 4: Grænseværdier for tungmetaller og analyseresultater for biokul fra SkyClean Skive. * angiver, at analysen eller en delanalyse til beregning af forholdet er under detektionsgrænsen. Grå markerede zoner angiver, at grænseværdien ikke er relevant for det pågældende biokul, se teksten for uddybelse.

6.5 PFAS

PFAS er en stor gruppe af forskellige fluorholdige stoffer, som har vist sig at have forskellige sundhedsrisici. Stofferne har været anvendt i vid udstrækning over de sidste årtier i f.eks. brandslukningsudstyr, imprægneringsmidler og fødevareemballage. Der er fokus på PFAS, fordi omfanget af PFAS-fund i naturen er stigende, og grænseværdierne er reduceret i forhold til tidligere.

De biomassetyper, som anvendes til pyrolyse, kan have et indhold af PFAS alt efter oprindelse. Det er forventeligt, at jo mere menneskenært biomassen har oprindelse, jo højere er risikoen for, at der kan være indhold af PFAS. Flere studier har vist, at PFAS-stoffer nedbrydes under den høje pyrolysetemperatur. Stiesdal har dog endnu ikke selv udført forsøg med PFAS.

Der er i øjeblikket ingen krav i certificering eller reguleringerne omkring PFAS, som sætter grænseværdier for indholdet af PFAS-stoffer i biokul.

7 Stabilitet og klimaeffekt

7.1 Stabilitet af biokul

Biokul er en måde at fange og lagre CO₂ på, fordi pyrolyseprocessen omdanner en del af biomassens organiske kulstof til stabile kulstofforbindelser. Dette fører til en nettoreduktion af CO₂ i atmosfæren, da det kulstof, der er bundet i biokullet, fjernes fra kulstofkredsløbet i en lang periode.

Modelleringsstudier viser, at hvis halm og biogasrestfibre pyrolyseres i stedet for at blive nedpløjet, vil andelen af kulstof, der forbliver lagret efter 100 år, stige fra henholdsvis ca. 5% og 10% til ca. 85% (Jensen et al., 2022). Der skal dog i en direkte sammenligning mellem pyrolyse og nedpløjning tages højde for, at kun halvdelen af kulstoffet i den pyrolyserede biomasse genfindes i biokullet, mens den resterende del frigives som klimaneutral pyrolysegas. Ved nedpløjning tilføres der imod den samlede kulstofmasse direkte til jorden.

Nylig forskning i biokullets stabilitet sidestiller kulstoflagringspotentialet i biokul med såkaldte geologiske lagringsteknologier som for eksempel DACCS (Direct Air Carbon Capture and Storage), BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) og forstærket forvitring, hvor man ved at fremskynde naturlige geologiske processer opnår, at mineraler reagerer med CO₂ og omdanner det til stabilt kulstof.

Biokullets stabilitet er påvirket af flere faktorer:

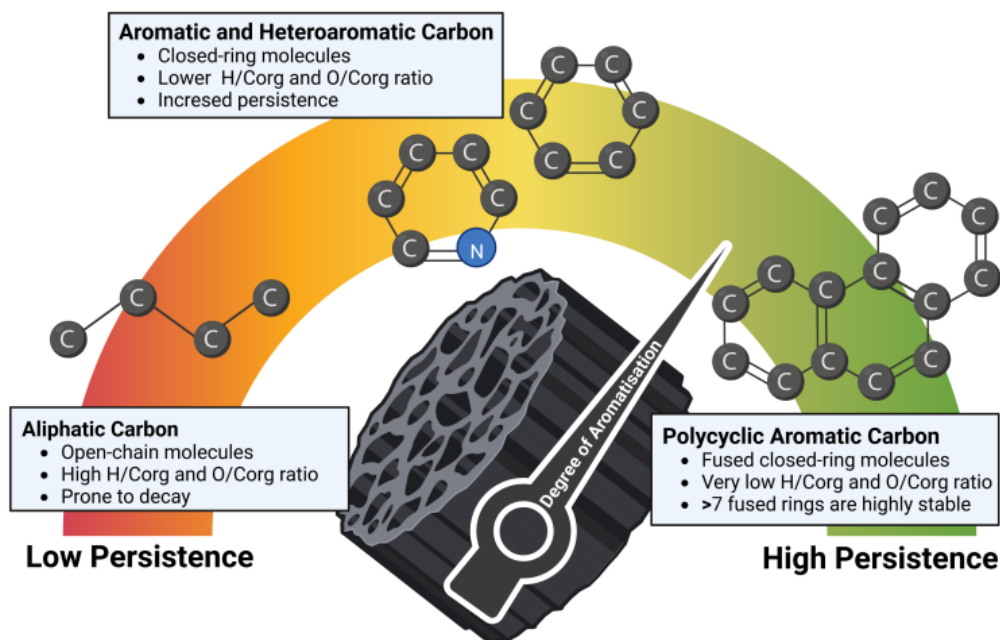
- Pyrolysetemperaturen og opholdstiden: Graden af termisk behandling, som en biomasse opnår under pyrolyse, bestemmes primært af pyrolysetemperaturen, opholdstiden i processen og biomassekarakteristika som fugtindhold og partikelstørrelse. Til sammen har disse parametre stor betydning for, hvor effektivt kulstoffet i biomassen bindes i den resulterende biokul.
- H:C_{org}-ratio: Dette refererer til forholdet mellem hydrogen (H) og organisk kulstof (C_{org}) i biokullets struktur. En lav H:C_{org}-ratio (udtales "H til C ratio") indikerer en højere grad af kulstofomstrukturering under pyrolyseprocessen, hvilket giver et mere kulstof-stabilt biokul. En lav H:C_{org}-ratio opnås, hvis biokullet har gennemgået en omfattende termisk omdannelse, hvor hydrogen er frigivet som vanddamp. På den anden side vil en høj H:C_{org}-ratio indikere en lavere grad af omstrukturering og en mulig tilstedeværelse af mere flygtige forbindelser i biokullets struktur. Dette resulterer i en mindre stabil form for biokul, der er mere tilbøjelig til omsætning eller nedbrydning over tid. Generelt set er biokul med en lav H:C_{org}-ratio mere eftertragtet som en stabil og langsigtet kulstoflagringsløsning, da det har større potentiale for at holde kulstoffet bundet i længere tid.
- Jordtemperaturen: Omsætningen af biokul er styret af mikroorganismer. Omsætningen påvirkes derfor af jordtemperaturen, som har betydning for mikroorganismernes aktivitet og den hastighed, hvormed de nedbryder den tilgængelige del af biokullet.

Biokullets indhold af kulstof stammer fra atmosfæren, idet planten har optaget CO₂ under vækst. Det optagede CO₂ genfindes i planten som mange forskelligartede organiske forbindelser, fra simple sukkerstoffer til store strukturskabende kulstofforbindelser. Ved pyrolysering vil ca. halvdelen af kulstoffet blive afgivet som pyrolysegas, mens den resterende mængde vil genfindes i biokullet.

Biokullet vil bestå af en lang række forskellige kulstofforbindelser, hvor total kulstofniveauet vil være bestemt af, hvilket materiale som er brugt som indgangsbiomasse. Hvis indgangsbiomassen er halm, vil ca. 3/4 af biokullet være kulstof, hvor det for biogasrestfibre vil være ca. 2/3.

Når biomassen bliver pyrolyseret, sker der en omstrukturering af kulstoffet, som bliver mere stabilt. Dette fører til, at biokullet indeholder mere stabilt kulstof end det oprindelige organiske materiale. Den øgede stabilitet skyldes, at størstedelen af kulstoffet omdannes til former, som er sværere at

omsætte mikrobiologisk. Der er reelt tale om, at den naturlige nedbrydningscyklus for organisk materiale sættes ud af spil, hvilket resulterer i en langvarig lagring af kulstoffet. En del af kulstoffet i biokullet vil dog bestå af kulbrinter, som er mere biologisk nedbrydelige. Denne del af kulstoffet vil have en gennemsnitlig opholdstid i jorden på omkring 50 år (Schmidt et al., 2022). Se illustration i figur 9.



Figur 9: Kulstofstabiliteten i biokul og sammenhængen med omstruktureringen af kulstofpuljerne. Jo højere temperatur, som anvendes i pyrolyseenheden, jo højere er dannelsen af polycyklisk aromatisk kulstof. Figuren er fra Schmidt et al 2022.

I faglitteraturen bruges pyrolysetemperatur og H:C_{org} ratio ofte som primære indikatorer for biokulstabilitet:

- Temperatur: Biokullet opvarmes under pyrolysning, og ved at sikre en tilpas overvågning af processen og en tilstrækkelig opholdstid i reaktoren kan temperaturen af biokullet estimeres ret præcist.
- H:C_{org} ratio: I forbindelse med opvarmningen og stabiliseringen af kulstofpuljen afgives en stor andel af hydrogen fra det organiske materiale. Indholdet af både hydrogen og den organiske kulstofandel kan forholdsvis let bestemmes ved analyse, og ratio kan derefter beregnes. Ratioen bruges som et indirekte mål for den biologiske omsættelighed af kulstoffet i biokul.

Stabiliteten anvendes til at bestemme den forventede andel af kulstoffet, som er lagret over en tidsramme på 100 år efter retningslinjer fra UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). FN's klimapanel, IPCC, definerer dette som en 'permanence factor' eller F_{perm} , der beskriver, hvor meget af kulstoffet, der kan genfindes efter 100 år (som procent eller fraktion af den mængde kulstof, der blev udbragt som biokul på jorden).

Stabiliteten af SkyClean biokul ved gennemsnitlig dansk jordtemperatur:

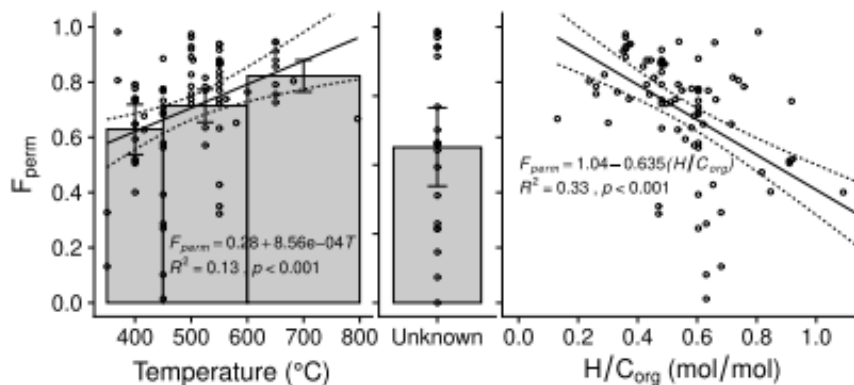
I Danmark har vi en gennemsnitlig jordtemperatur fordelt over et år i 10 cm dybe på 9,8°C (AU Videnssynthesen). Fra analyser ved vi, at H:C_{org} ratio er 0,3. F_{perm} beregnes ud fra konstanterne givet af Woolf et al (2021) ved 10°C:

$$F_{\text{perm}} = 1,10 - 0,59 * 0,3 = 0,92.$$

Dermed estimeres, at ved lagring af SkyClean biokul i dansk jord vil 92% af kulstoffet være bundet i 100 år.

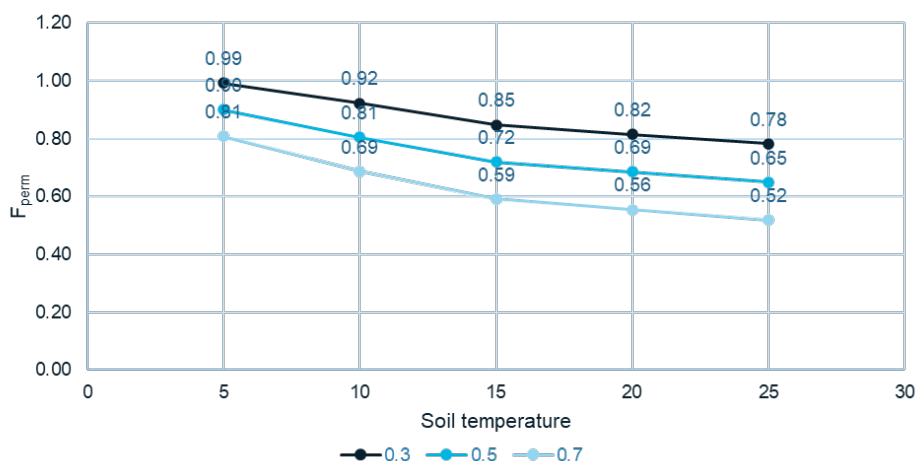
F_{perm} bestemmelsen, som anvendes af IPCC, er bestemt ved et metastudie baseret på data for omsætningsraten af biokullet i jord. Der er kun medtaget de forsøg, hvor pyrolysetemperaturen og H:C_{org} ratio er kendt. Da forsøgene er udført ved forskellige jordtemperaturer, og temperaturen er en vigtig parameter for mikrobiel omsætningshastighed, er alle resultater normaliseret til at være gældende ved 14,9°C, som er gennemsnitstemperaturen globalt for landbrugsjord (IPCC 2019; Woolf et al 2021). IPCC (2019) anvender en tilsvarende kurve som dog er gældende for en jordtemperatur på 20°C.

Metastudiet viser, at der er en signifikant korrelation til F_{perm} både for pyrolysetemperaturen og H:C_{org} ratio, se figur 10. Dog findes der en del spredning i måldata, som kan skyldes forskelle i anvendt biomasse, opholdstid, jordtype mm.



Figur 10: Sammenhæng mellem kulstoflagringseffektiviteten bestemt som F_{perm} baseret på pyrolysetemperatur og H:C_{org} ratio. Figuren er fra Woolf et al (2021), en tilsvarende sammenhæng anvendes af IPCC (2019).

En del af biokullet formodes at blive omsat af bakterier i jorden. Bakteriernes aktivitet er nøje linket til temperaturen, og man anvender ofte den tommelfingerregel, at bakteriernes omsætningsrate fordobles for hver 10°C temperaturstigning. Sammenhængene fra Woolf et al (2021) medtager denne effekt og angiver omsætningshastigheder ved forskellige jordtemperaturer, se figur 11.

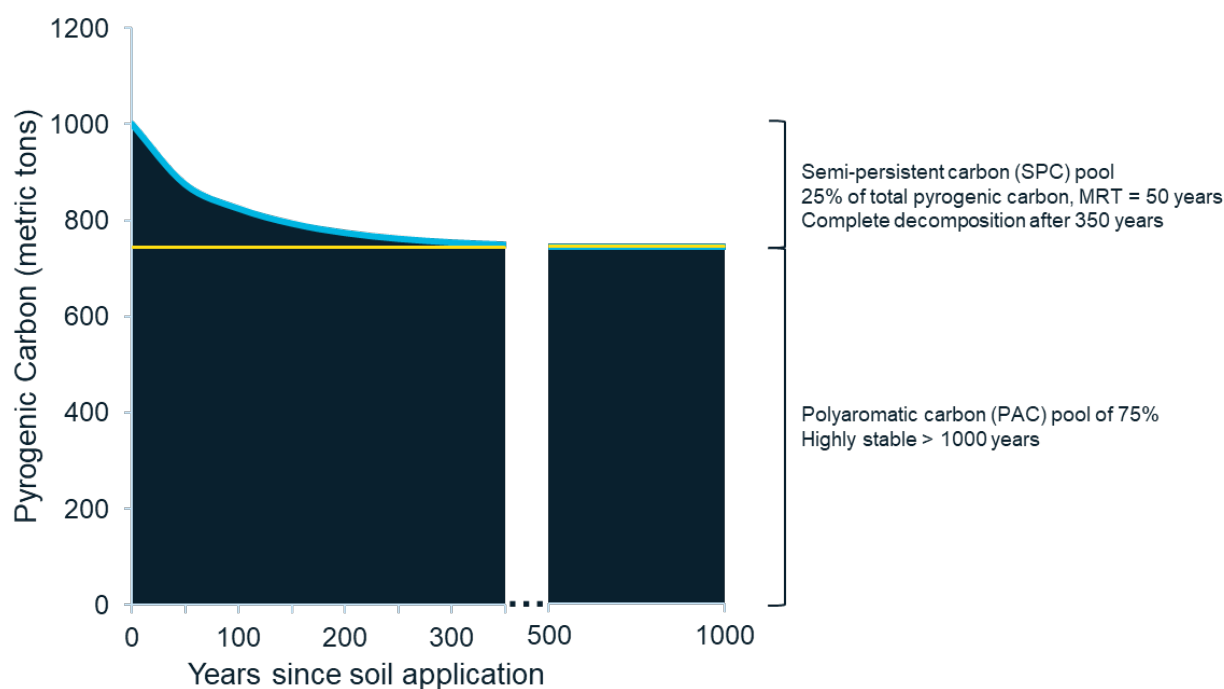


Figur 11: Illustration af effekten af $H:C_{org}$ ratio og temperatur på biokullets stabilitet, F_{perm} . Hver af kurverne i grafen repræsenterer et $H:C_{org}$ ratio (hvh. 0,3, 0,5 og 0,7). Det ses, at jo højere jordtemperatur (x-aksen), jo mindre biokul estimeres at findes i jorden efter 100 år. Desuden ses det, at jo lavere $H:C_{org}$ ratio, jo mere stabilt biokul. Figuren er lavet på baggrund af data i Woolf et al (2021); tabel 3.

7.2 Ny viden om stabiliteten af biokul

Der er forskellige kulstofpuljer og kulstofforbindelser i biokullet. Nogle vil være hurtigt omsat, andre er næsten ikke-omsættelige. I det inkubationsforsøg oftest har en kort varighed, vil en stor del af det opnåede resultat være baseret på de hurtigt omsatte forbindelser i biokullet, hvilket vil holde omsætningshastigheden kunstigt oppe i resultaterne.

Den seneste forskning giver et mere detaljeret indblik i biokullets kulstofstabilitet. Biokul med en $H:C_{org}$ ratio under 0,4 deles op i to puljer, hvor 25% af kulstofpuljen antages at have en stabilitet på 50-100 år i jorden, hvorimod de resterende 75% bevarer stabiliteten i mere end 1000 år, se figur 12 (Schmidt et al 2022).



Figur 12: Kulstofstabiliteten som beskrevet af Schmidt et al 2022, hvor puljen opdeles i en omsættelig fraktion og en meget stabil pulje. Figuren stammer fra artiklen.

Geologiske analysemetoder af kulstofsammensætningen er nyligt blevet anvendt til at studere stabiliteten af kulstofpuljen i biokul (Petersen et al., 2023; Sanei et al., 2024). I overensstemmelse med F_{perm} -analyserne observeres det, at jo højere temperatur men også opholdstid, der anvendes under pyrolysning, desto mere aromatisering finder sted i kulstofpuljen, hvilket resulterer i øget stabilitet. Aromatisering refererer til processen med dannelse af såkaldt aromatiske kulstofforbindelser, der er mere resistente over for nedbrydning.

Petersen et al. (2023) konkluderer, at for biokul produceret af træ, planter og frugtbaserede restprodukter fra landbrugssektoren kan over 97% af kulstofpuljen betragtes som geokemisk ikke-omsætteligt for jordens mikroorganismer. Det vil ifølge forfatterne kræve forbrænding ved høje temperaturer mellem 300 og 850 grader Celsius i et miljø med ilt for at nedbryde eller omsætte denne type kulstof.

8 Lovgivning om biokul i Danmark og EU

8.1 National lovgivning

Der er stadig usikkerhed om, hvordan brugen af biokul i Danmark skal reguleres. I øjeblikket kræver det tilladelse efter Miljøbeskyttelseslovens §19 for at sprede biokul.

Stiesdal arbejder for, at biokul skal betragtes på to måder:

- Som et jordforbedringsmiddel, hvis det har lavt indhold af fosfor og andre næringsstoffer.
- Som en organisk gødning, hvis indholdet af fosfor og andre næringsstoffer er højere.

Biokul adskiller sig dog fra almindelig organisk gødning, såsom husdyrgødning, så nogle regler skal tilpasses. Ifølge Vejledning om gødsknings- og harmoniregler for perioden 1. august 2023 til 31. juli 2024 vil biokul reguleres efter reglerne for forarbejdet husdyrgødning eller forarbejdet anden organisk gødning, afhængigt af indgangsmaterialet til biokullet. Hvis der bruges husdyrgødning i biogasanlægget, vil biokul fremstillet ved pyrolyse af biogasrestfibre sandsynligvis også blive betragtet som forarbejdet husdyrgødning og dermed være underlagt husdyrbekendtgørelsen (Bekendtgørelse om miljøregulering af dyrehold og om opbevaring af gødning).

Ifølge husdyrgødningsbekendtgørelsen §14 kan forarbejdet husdyrgødning med et tørstofindhold på 26% eller derover opbevares i markstakke. Ifølge §15 skal forarbejdet husdyrgødning overdækkes med et tætsluttende og vandtæt materiale straks efter udlægning. Overdækningen er primært for at forhindre ammoniakemission, men da biokul kun indeholder en meget lille mængde kvælstof, er der minimal risiko for ammoniakemission (Elsgaard et al. 2022).

Landbrugsstyrelsen har ændret reglerne for udbringning af biokul i den nye gødningsanvendelsesbekendtgørelse (Bekendtgørelse om anvendelse af gødning), der trådte i kraft den 1. august 2023. Biokul er nu undtaget fra lukkeperioder og regler for nedbringning. Dette betyder, at biokul kan spredes året rundt, så længe det tager hensyn til markens og afgrødernes forhold og støvgener. Desuden har Landbrugsstyrelsen fastsat effekten af kvælstof i biokul til 0% i gødningsregnskabet i den nye gødskningsbekendtgørelse (Bekendtgørelse om jordbrugets anvendelse af gødning i planperioden 2023/2024), der også trådte i kraft den 1. august 2023.

8.2 Biokul i økologi

Biokul til økologi kan udelukkende fremstilles af plantematerialer som halm og træ, der er uforarbejdede eller kun forarbejdet med produkter, som er godkendt af lovgivningen omkring økologi. Økologer må altså ikke bruge biokul, der er fremstillet af gyllefibre.

Biokul kan anvendes i økologisk jordbrugsproduktion, selvom biokullet ikke er produceret med økologisk biomasse. Dog skal anvendelsen indgå i gødningsregnskabet og begrundelsen for anvendelsen af biokul skal noteres, jf. Vejledning om økologisk jordbrugsproduktion. Der er i vejledningen ingen specifikation for indholdet af en sådan begrundelse, men anvendelsen kan f.eks. begrundes med biokullets jordforbedrende egenskaber og kalkvirkning.

8.3 EU-regler – CE-mærkning

Biokul fremstillet ved pyrolyse af afgrøderester kan i dag CE mærkes som et gødningsprodukt i komponentmaterialekategori 14 efter den gældende EU Gødningsforordning (Europa-Parlamentets og Rådets forordning (EU) 2019/1009 af 5. juni 2019).

En nylig opdatering af gødningsordningen har ændret biogasrestfibre fra at være betegnet som af-fald til et organisk gødningsprodukt. Det betyder, at biokul fremstillet ved pyrolyse af biogasrestfibre kan CE-mærkes som organisk gødningsprodukt.

Biokul skal i EU's gødningsforordning ikke godkendes som gødnings- og jordforbedringsprodukt som sådan, men skal anmeldes og er underlagt kvalitetskontrol iht. Modul D1 i forordningen. Det betinges, at biokul-produktionen skal følges af et ISO9001-baseret kvalitetskontrollsystem, der skal auditeres af en tredjepart, et "overensstemmelsesvurderingsorgan", som også udtager stikprøver til kontrol. Drøftelser med et eksternt auditerings- og akkrediteringsorgan om at indtræde i rollen som "overensstemmelsesvurderingsorgan" er i gang.

Ulemperne ved en CE-mærkning er følgende:

- Snævre tolerancer for indholdet af næringsstoffer, som skal overholdes.
- N-indhold skal deklareres
- Nationale krav er fortsat gældende, f.eks. vil en CE-mærkning af biokul ikke fjerne behovet for en godkendelse til spredning under den danske miljøbeskyttelseslovgivning §19.

Biokul kan indtil videre også anmeldes som gødnings- og jordforbedringsprodukt under den nationale lovgivning i Danmark og reguleres under Gødningsbekendtgørelsen. Her er tolerancerne mindre krævende, men biokul, der ikke er CE mærket, kan ikke handles over landegrænserne.

8.4 EU REACH

REACH, der står for Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemical substances, er navnet på en forordning fra Europa-Kommissionen, der har til formål at sikre, at de 100.000 forskellige typer kemikalier, der bruges i EU, er dokumenteret med hensyn til sikkerhed for mennesker og miljø.

REACH kræver registrering af kemiske stoffer fremstillet i EU i mængder over 1 ton/år. REACH registreringen kan opnås som en underregistrering til den eksisterende registrering af trækul med en LoA (letter of access), dvs. adgang til at referere til det tekniske dossier for REACH registreringen af trækul. Kompensation for dataadgangen til dossieret for trækul er indtil videre 25.700 €. Gebyr for behandlingen af ansøgningen er 25.000 €.

Registreringen er gyldig for én juridisk enhed, så en virksomhed med flere SkyClean-anlæg kan dækkes af én REACH registrering.

9 EBC-certificering af biokul

EBC (European Biochar Certificate) er en valgfri standard for biokul-producenter. Formålet er at fremme bæredygtig og sikker produktion af biokul, og at kvalitetssikre biokul. EBC tilbyder også et C-sink certifikat, der inkluderer klimaaftrykket ved selve produktionen af biokullet, indtil det forlader pyrolyseanlægget. Certificeringen kontrolleres af tredjepart.

EBC-standarderne rummer en række forskellige klasser alt efter, hvad biokullet bruges til. Anvendes biokul som gødning eller jordforbedringsmiddel til det konventionelle landbrug, vil det i EBC-sammenhæng blive certificeret som EBC-Agro.

EBC-Agro opfylder alle krav i EU-gødningsforordningen (EU 2019/1009) og grænseværdierne i EU REACH-forordningen for indhold af miljøfremmede stoffer. Desuden kan der findes yderligere national lovgivning, som i visse tilfælde er inkluderet i EBC i form af et lande-annex.

EBC C-sink certifikatet evaluerer klimaaftrykket ved at medtage:

- biokullets kulstofindhold
- transport af biomassen til pyrolyseanlægget
- energiforbruget og drivhusgasudledninger under produktionen.

For at få klimakredit for lagringen af biokul i landbrugsjord skal man også fratække klimaaftrykket fra transport og spredning.

10 Biokul og CO₂e kreditter

10.1 Kulstofregnskab

Biokul indeholder en stor andel af meget stabilt kulstof og er derfor et effektivt kulstoflager. Biokul er tilmed et kulstof-negativt klimavirkemiddel, hvilket betyder, at man samlet set fjerner mere CO₂ fra atmosfæren, end der udledes i produktions- og transportprocessen.

Kulstofregnskabet for biokul afgør mængden af lagret kulstof og tager hensyn til udledninger fra produktion, transport og anvendelse. Der er tre væsentlige tal i kulstofregnskabet:

- Bruttokulstoflagringspotentialet
- Samlede CO₂e-udledninger ved produktionen
- Nettokulstoflagringspotentiale pr. ton biokul.

CO₂e

Ved produktion, transport og udførelse af varer og tjenester dannes forskellige drivhusgasser. Det handler fortrinsvis om kuldioxid (CO₂), metan (CH₄), og lattergas (N₂O). Disse gasser har forskellige grader af klimaeffekt: CO₂ < CH₄ < N₂O.

En vares eller tjenestes udledning i CO₂-ækvivalenter (CO₂e) beregnes som summen af de enkelte gassers bidrag omregnet til CO₂ per enhed (kg, ton, km osv.).

Kulstofregnskabet bestemmer andelen af kulstof, der betragtes som lagret. Kulstofregnskabet er baseret på mængden af kulstof i biokullet, fratrukket de udledninger af CO₂e, som er forbundet med produktionen af biomasse, selve biokullet og udledninger fra transport og udbringning.

Mængden af kulstof i biokullet er baseret på analyseværdier og medtager desuden et tab fra omsætningen af biokullet i jorden grundet mikrobiel aktivitet. Niveauerne bestemmes at den metode, der anvendes til udstedelse af et såkaldt C-sink certifikatet, se kapitel 7 om certificering.

Et C-sink certifikat dokumenterer kulstofregnskabet for lagret biokul og indeholder tre vigtige tal:

- Brutto kulstoflagringspotentialet i ton CO₂e
- Total CO₂e udledningen i ton CO₂e ved produktionen af biokul, hvor udledninger fra biomasse-håndteringen er medtaget
- Netto kulstoflagringspotentialet i ton CO₂e pr. ton biokul.

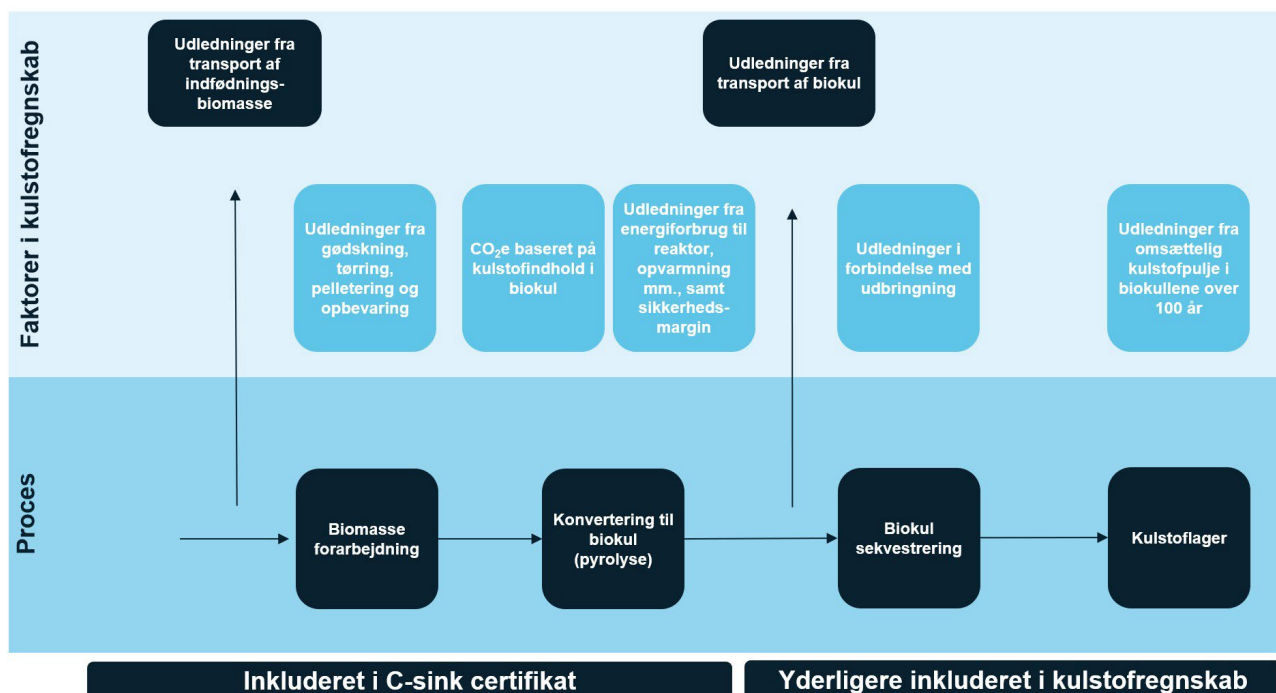
Derudover vil det samlede kulstofregnskab, som ligger til grund for antallet af omsættelige CO₂e kreditter, også medtage udledninger, som dækker, hvad der sker, fra biokullet forlader pyrolyseanlægget, til hvad der estimeres at kunne genfindes i jorden om 100 år.

10.2 CO₂e kredit

Ud fra kulstofregnskabet kan man beregne en CO₂e kreditværdi. Den samlede CO₂e kreditværdi kan opsummeres således:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2\text{e kredit} = & \quad \Sigma \text{CO}_2\text{e potentialet i biokullet} \\ & - \Sigma \text{CO}_2\text{e for biomasserelaterede udledninger f.eks. dyrkning, høst, efterbehandling} \\ & - \Sigma \text{CO}_2\text{e ved pyrolysen} \\ & - \Sigma \text{CO}_2\text{e i sikkerhedsmargin udgørende 10\% af totaludledningen} \\ & - \Sigma \text{CO}_2\text{e udledninger til biokul-transport} \\ & - \Sigma \text{CO}_2\text{e udledninger ved udbringning} \\ & - \Sigma \text{CO}_2\text{e udledninger fra omsættelig kulstofpulje i biokullet.} \end{aligned}$$

Figur 13 viser en skematisk opsamling.



Figur 13: Oversigt over kulstofregnskab og tilhørende processer og de faktorer som medtages i C-sink certifikatet og i det endelige kulstofregnskab.

10.3 Eksempel på C-sink certifikat fra 20 MW anlæg baseret på biogasrestfibre

Hvis SkyClean placeres i direkte samspil med et biogasanlæg, hvor det anvender biogasrestfibre som indgangsbiomasse, vil det have en brutto kulstoffjernelse på knap 32.000 ton CO₂e per år. Når der tages højde for reduktionen til udledninger og omsætning i jorden på 27% vil netto kulstoffjernelsen være 23.386 ton CO₂e om året, se tabel 5 og figur 14.

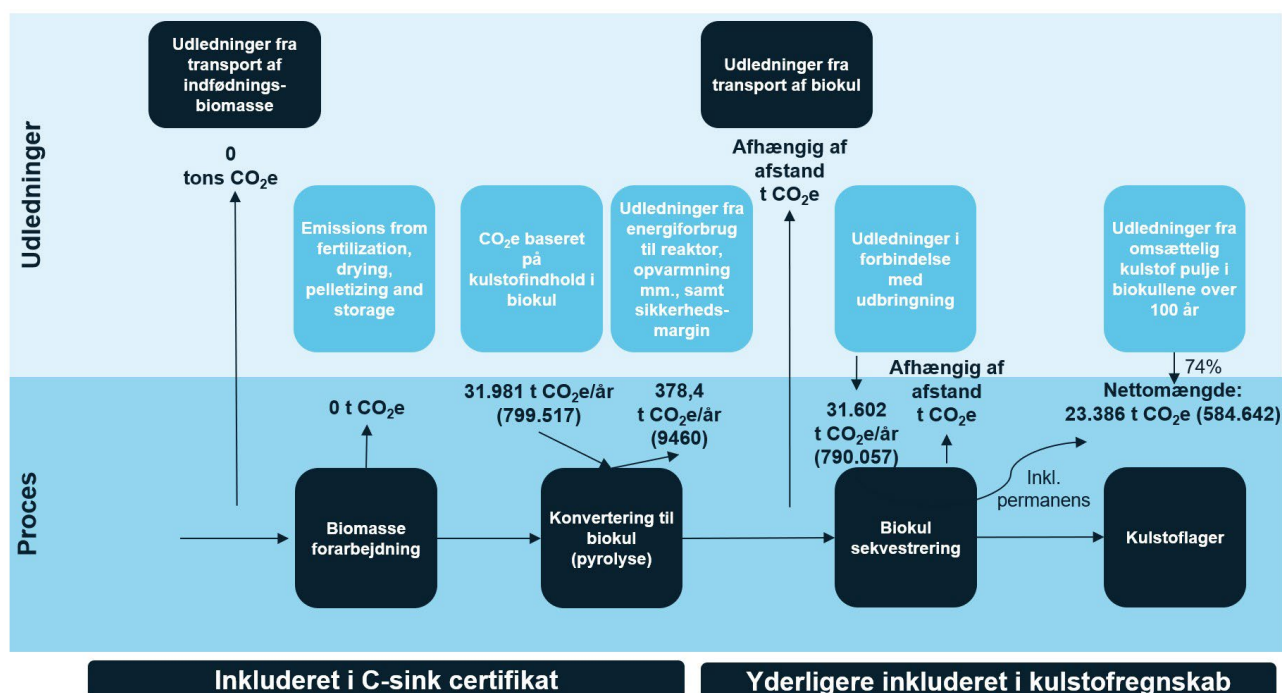
Kulstofregnskab	Mængde [t CO ₂ e]
Brutto kulstoffjernelse per år	31.981
Brutto projekt udledninger inkl. reduktion til permanens per år	8.595
Udledning:kulstoffjernelses ratio	0,269
Netto kulstoffjernelse per år	23.386
Netto kulstoffjernelse i projektets levetid (25 år)	584.642

Tabel 5: Kulstofregnskab for 20 MW SkyClean anlæg ved biogasanlæg

Ved anvendelse af biogasrestfibre som biomasse (se figur 14) antager EBC-certificeringsstandarden, at dette er et restprodukt og derfor ikke er behæftet med CO₂e udledninger. Da SkyClean-anlægget er placeret ved selve biogas-produktionsanlægget, er der ikke udledninger til transport af biomassen. Tørring af biomassen sker med klimaneutral energi, idet man udnytter overskudsvarme fra pyrolyseprocessen. Energien til pelletering er vedvarende energi og dermed klimaneutral.

Omsætningsraten i jorden i dette eksempel er baseret på certificeringsmetodikken anvendt af EBC. Der antages en fast årlig nedbrydningsrate på 0,3%/år i 100 år. Dermed reduceres kulstofmængden, som kan omsættes til CO₂e kreditter, med sammenlagt 26%, når nedbrydningsraten medregnes. Ny forskning viser dog, at den omsættelige kulstofpulje udgør en mindre del af biokullet, og at den resterende del af kulstofpuljen i biokul kan anses for at være meget stabil, se afsnit 9.1.

Schmidt et al 2022 anslår, at 25% af kulstoffet i biokul findes i en omsættelige form, som vil være fuldt omsat efter 350 år, og at de resterende 75% af kulstoffet vil være stabilt i >1000 år. Det er forventeligt, at denne nye viden inkluderes i EBC metodikken for CO₂e kreditstørrelsen i nærmeste fremtid.



Figur 14: Oversigt over kulstofregnskabet for et 20 MW SkyClean anlæg i samspil med et biogasanlæg med angivelse af leddenes bidrag per år og for projektets levetid på 25 år angivet i parentes.

Med et levetidsestimat på 25 år har et SkyClean-anlæg potentiale til at fjerne netto knap 600.000 ton CO₂e fra atmosfæren. Det skal dog bemærkes, at denne beregning ikke tager hensyn til transport fra SkyClean-sitet til den endelige lokation for biokullet.

Netto kulstoffjernelsen svarer til mængden af kulstof, der kan omsættes til CO₂e -kreditter. Det skal understreges, at dette ikke afspejler den fuldstændige klimaeffekt af et SkyClean-anlæg gennem dets livscyklus. En betydelig del af klimaeffekten fra biomassepyrolyse opnås gennem anlæggets energiproduktion. Her er tale om klimaneutral energi, som kan erstatte fossil energi. Derudover giver stabiliseringen af biologisk aktivt materiale i landmandens tanke en yderligere fordel ved at reducere udledningen af metan. Disse klimapositive aspekter er ikke medregnet i ovenstående opgørelse.

Desuden er der flere faktorer, som ikke er medtaget. Dette inkluderer sekundære jordefeffekter, tab af kvælstof og klimapåvirkninger relateret til produktion, idriftsættelse og vedligehold af anlægget.

I indledende studier af klimaeffekterne fra dansk biomassepyrolyse vurderes det, at niveauet i gennemsnit ligger omkring 1 ton CO₂e pr. ton tørstof. Afslutningsvis er det værd at nævne, at der i øjeblikket udvikles nye metoder og modeller, som fokuserer på en dybdegående vurdering af klima- og miljøeffekter fra dansk biomassepyrolyse. Resultaterne forventes at blive publiceret i de kommende år.

10.4 Salg af CO₂e kreditter

CO₂e kreditter, også kaldet CORC (CO₂ Removal Certificate), sælges via handelsplatforme og måles i ton CO₂e, som fjernes fra atmosfæren. Platformene fungerer som mægler mellem sælger af certifikater og købere. Sælgere af certifikater er organisationer, som producerer et klimavirke-

middel som f.eks. biokul og som verificerer, at kullene er blevet spredt, og at CO₂-indholdet dermed er permanent fjernet fra kredsløbet. Køberen er en organisation, som for nuværende har et ønske om at modregne organisationens klimaaftryk med en fjernelse af samme mængde CO₂e, som forbruges eller udledes.

Er et certifikat baseret på kulstoflagring med biokul, kræver handelsplatformene certificering, som kan være EBC eller tilsvarende, dels for at sikre fuld sporbarhed i processen, og dels for at sikre biokullets kvalitet, herunder overholdelse af grænseværdier.

Mængden af CO₂e, som sættes til salg, er bestemt ved det fulde kulstofregnskab beskrevet i figur 13 og eksemplet givet i figur 14, hvor også transporten til endeligt lagringssted er medtaget omregnet til CO₂e. Ansvarlig for lagring kvitterer for, at udspredningen er foretaget, og at dette kan påvises med markplaner eller §19 godkendelser. På sigt kan dette led automatiseres.

CORC kan sælges, når kulstoflagring er foretaget eller som Pre-CORC. Sidstnævnte rejser kapital til et kulstof-negativt initiativ, og køberen sikrer sig en fremtidig negativ udledning med henblik på at realisere et ønske om kulstof neutralitet. Platformen udsteder en offentlig tilgængelig kupon, der bekræfter mængden af kulstof, som er sekvesteret.

11 Andre anvendelser af biokul

Denne hvidbog fokuserer udelukkende på anvendelsen af biokul i landbrugssektoren. Dette skyldes, at de biomasse-typer, som er mest udbredte i Danmark, indeholder væsentlige næringsstoffer, som ønskes tilbageført til jorden. I tilfælde hvor næringsstofcirkulariteten ikke er højt på prioriteringslisten, kan biokul finde anvendelse i andre sektorer.

Biokul har egenskaber, der minder om aktivt kul, omend i mindre grad. Der kræves ingen ekstra forarbejdning, for at biokul kan bruges på samme måde som aktivt kul, f.eks. til filtrering og som tilsætningsstof i foder.

I bygnings- og materialeindustrierne kan biokul anvendes som fyldstof, for eksempel i beton. Det har også egenskaber, der gør det velegnet som isoleringsmateriale på grund af sin høje porøsitet og evne til at regulere fugtigheden. I kompositprodukter kan biokul forbedre modstanden mod UV-stråler og dermed forlænge produktets levetid.

Afhængigt af hvordan biokullet anvendes, kan det i varierende grad fungere som kulstoflager. Det er dog vigtigt at bemærke, at lagerets levetid bestemmes af brugen og hvordan materialet håndteres efter anvendelse. Derudover kan visse anvendelser forhindre mikrobiel nedbrydning af biokul, hvilket betyder, at nedbrydningshastigheden ikke tages med i kulstofregnskabet.

Schmidt & Wilson (2014) opsummerer anvendelsesformer i deres artikel og *The European Biochar Industry Consortium* (EBI) opsummeres anvendelsesområderne som angivet i figur 15.



Figur 15: Anvendelsesområder som angivet af EBI. Figuren stammer fra <https://www.biochar-industry.com/biochar/>.

12 Referencer

Elsgaard L, Adamsen APS, Møller HB, Winding A, Jørgensen U, Mortensen EØ, Arthur E, Abalos D, Andersen MN, Thers H, Sørensen P, Dilnessa AA & Elofsson K. Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture. Advisory report from DCA – Danish Centre for Food and Agriculture. 2022.

IPCC; 2019. Appendix 4 Method for estimating the change in mineral soil organic carbon stocks from biochar amendments: Basis for future methodological development. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch02_Ap4_Biochar.pdf

Jensen JL, Thers H, Elsgaard L. 2022. Afklaring om videns- og ressourcebehov ved at integrere biokul i C-TOOL modellen til brug for emissionsopgørelser. 10 sider. Rådgivningsnotat fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet, leveret: 17.05.2022.

Kofoed A.A. & Kjellerup V. Tidsskriftet for Planteavl 88, 349-352. [Tungmetalindhold i husdyrgødning](#), 1984.

Kristensen L.H.S. Plant availability of phosphorous in biochar produced from biogas fibers. Bachelor project, Copenhagen University, Department of plant environmental science, June 2020.

Li X, Rubæk GH, Müller-Stöver DS, Thomsen TP, Ahrenfeldt J, Sørensen P. Plant availability of Phosphorus in Five gasification Biochars. Sustainable Food Systems, 1:2 2017

Mortensen EØ, Jørgensen U, 2022. Danish agricultural biomass production and utilization in 2030. Advisory memorandum from DCA – Danish Centre for Food and Agriculture, Aarhus University.

Nissen R, Khanal G & Elsgaard L. Microbial Ecotoxicity of Biochars in Agricultural Soil and Interactions with Linear Alkylbenzene Sulfonates. Agronomy, April 2021.

Petersen H.I., Lassen L., Rudra A., Nguyen L.X., Do P.T.M. & Sanei H. Carbon stability and morphotype composition of biochars from feedstocks in the Mekong Delta Vietnam. International Journal of Coal Geology 271 104233, 2023

Poultou P. R. and Johnston, A. E. Phosphorus in agriculture: a review of results from 175 years research at Rothamsted, UK. Journal of Environmental Quality. 48 (5), 1133-1144. 2019

Sanei H., Rudra A., Przystwit Z.M.M., Kouste S., Sindlev M.B., Zheng X., Nielsen S.B., Petersen H.I. A assessin biochar's permanence: An inertinite benchmark. International Journal of Coal Geology 281 104409. 2024

Schmidt HP & Wilson K. 55 uses of biochar. The biochar journal. ISSN 2297-1114. 2014

Schmidt HP, Abiven S, Hagemann N, Meyer zu Drewer J: Permanence of soil-applied biochar. The Biochar Journal. www.biochar-journal.org/en/ct/109 2022

Woolf D., Lehmann J., Ogle S., Kishimoto-Mo A.W., McConkey B. & Baldock J. Greenhouse gas inventory model for biochar addition to soil. Environmental Science Technology, 55, 14795-14805, 2021

SkyClean er en del af Stiesdal, en klimateknologivirksomhed med aktiviteter inden for flydende offshore vindenergi, energilagring, Power-to-X brintproduktion - og SkyClean som udfører fangst og lagring af CO₂ kombineret med produktion af grønt brændstof.

Stiesdal[®]
SkyClean