

Om at anskaffe og anvende biokul

Udarbejdet af Roskilde Universitet i samarbejde med partnere i Power Bio



Om at anskaffe og anvende

BIOKUL

Erfaringer fra Danmark og Sverige lavet i Interregprojektet PowerBio

Januar 2026

Tobias Pape Thomsen, Andreas Dyreborg Martin, June Thomsen, Per Lysholm Kjærebye, Jenny Bengtsson, Camilla Raagaard Ernst, Gunilla Andersson, Ellen Boije af Gennäs Erre, Eva Stål & Kent Davidsson

Forord

Pyrolyse er ikke en ny proces – hverken naturligt eller teknologisk. Mennesket har brugt pyrolyseprocesser i tusindvis af år til at lave trækul, træbjælker, træspit og – ja, biokul. Alligevel så er moderne pyrolyse at betragte som et ret nyt - og meget bredt, udviklingsområde både når vi taler om visse dele af den teknologiske modenhedsskala men i særdeleshed når vi taler om den samfundsmæssige accept og integration. Det handler ikke længere bare om at lave trækul, men om hele tiden at udvikle ny viden og nye byggesten og teknologier til bæredygtig omstilling og innovativ forretningsudvikling. Man kan stille en myriade af modenhedsskalaer op for enhver ny kombination af biomassetype og pyrolyseteknologi samt for enhver ny kombination af biokul og anvendelse. Der vil være meget stor forskel på hvor meget viden der allerede findes om de forskellige kombinationer – og også på hvor god og robust den viden er! Derfor er det vigtigt at være opmærksom på at store dele af arbejdet med at producere og bruge biokul er nyt land, og der er få garanterede effekter da kombinationsmulighederne er uendelige og kontekstafhængigheden ofte er stor. Det kan være frustrerende at det varierer så meget hvor robuste forskellige effekter er, men det er også utroligt spændende at arbejde sig ud på nyt land og afdække nye muligheder og nye effekter.

For at flytte grænserne for vores forståelse og muligheder arbejdes på højtryk hos både praktikere, virksomheder, vidensinstitutioner og mange andre organisationer for at producere ny, relevant viden indenfor produktion og anvendelse af biokul. Der er mange forskellige typer viden der skal i spil, og det er afgørende vigtigt at der også ude i praksis bliver lavet test, analyser og vurderinger. Det er forhåbningen at denne rapport kan være med til at understøtte processer med at planlægge og gennemføre succesfulde praksisforsøg med brug af biokul i forskellige sammenhænge. Arbejdet bygger videre på mange gode erfaringer og vigtig viden fra andre projekter, herunder forløberen for PowerBio kaldet GreaterBio samt det fremragende – og omfattende, arbejde lavet i projektet Räst til Bäst¹. Fokus i rapporten – og i PowerBio projektets biokul-aktiviteter generelt, er på andre anvendelser end som jordforbedring- og gødningsmiddel i landbruget, da brug af biokul i landbrugsjord er et område som allerede har stor bevågenhed og hvor der kan findes rigtig meget hjælp og relevant viden allerede.

Indholdsfortegnelse

Kort om pyrolyse, biokul og værdiskabelse	4
<i>Hvad er biokul</i>	4
<i>Om værdiskabelse fra produktion og anvendelse af biokul generelt.....</i>	6
Overvejelser i forbindelse med anskaffelse af biokul	8
<i>Biokul er ikke bare biokul.....</i>	8
<i>Nye pyrolyseforsøg og biokul-data fra Power Bio projektet</i>	9
<i>Anskaffelse af biokul kan rejse mange spørgsmål</i>	12
Erfaringer med anskaffelse og brug af biokul i PowerBio	16
<i>Forsøg med biokul i staudebede i Vallensbæk Kommune</i>	16
<i>Dyrkningsforsøg med grøntsager på to lokationer i Malmø Kommune</i>	18
<i>Biokul i kompostering i Lunds Kommune sammen med SLU Alnarp.....</i>	20
<i>Forsøg med biokul i plantering af bytræer i Tomelilla Kommune</i>	22
Mange mulige anvendelser af biokul - langt fra alt er afprøvet.....	24
<i>Anaerob nedbrydning.....</i>	24
<i>Jordforbedring</i>	25
<i>Rensning af gas og væske</i>	26
<i>Biokul til jord-remediering</i>	27
<i>Elektroder</i>	28
Perspektiver.....	29
Kilder.....	30

Kort om pyrolyse, biokul og værdiskabelse

Hvad er biokul

Biokul er en bred kategori af materialer og kan derfor være svær at presse sammen i en kort definition. Ithaka Insituttet har i forbindelse med det Europæiske Biochar Certifikat defineret biokul som følger:

Biochar is a porous, carbonaceous material that is produced by pyrolysis of biomass and is applied in such a way that the contained carbon remains stored as a long-term C sink or replaces fossil carbon in industrial manufacturing. It is not made to be burnt for energy generationⁱⁱ.

Lidt groft kan dette koges ned til "kul fremstillet bevidst af biomasse med et andet formål end forbrænding" men ikke helt ned til blot "kul fremstillet bevidst af biomasse". I begge tilfælde er biokul det faste produkt, der fremkommer efter pyrolyse af biomasse, men et velkendt produkt som trækul til at grille på er f.eks. ikke biokul da det er produceret med det formål at blive brændt af. Hvis man ønsker at lave biokul af træ vil processen langt hen af vejen ligne processen til produktion af almindeligt trækul til grillen, men der vil være en lang række ekstra krav til kvaliteten af biokul som der ikke er tilsvarende til kvaliteten af trækul.

Biokul er som nævnt produceret ved pyrolyse. Pyrolyse er en fællesbetegnelse for en række termokemiske processer der sker når nedbrydeligt materiale opvarmes til høje temperaturer. I processen skilles materialet groft sagt ad i løse bestanddele der går til gas- og olieprodukter, og faste bestanddele der går til biokulprodukter. Sker pyrolysen i en iltrig og varm atmosfære så vil alle de producerede produkter blive oxideret/brændt og efterlade røggas, aske og varme. Sker processerne derimod i en atmosfære med kun lidt eller ingen ilt så vil de vedblive at være olie, kul og gas. Der er mange kilder der beskriver pyrolyseprocesserne i flere detaljer, og der sker stor udvikling med teknologien. Se fx denne introduktionsrapport for en let tilgængelig vej indⁱⁱⁱ.

Biokul er ikke ét veldefineret materiale, men et resultat af kombinationen af mange forskellige processer og forudsætninger, f.eks.:

- Sammensætningen, partikelstørrelsesfordelingen og morfologien af den oprindelige biomasse
- Proces-temperaturprofilen (opvarmningshastighed, maksimale temperatur, opholdstid, afkøling)
- Design af processen, dvs. om kul f.eks. knuses under processen, om kul og gas har kort eller lang kontakt, om der er katalysatorer eller andet materiale (fx sand til transport) i reaktoren, om kul oxideres/dampforgasses, om kul udtages varmt via en rist, cyklon, filter osv.

Desuden kan der ske forskellige ændringer af det producerede biokul umiddelbart efter pyrolyseprocessen som også påvirker det endelige produkt f.eks. hvilken atmosfære kullet køles ned i, om kullet nedkøles hurtigt med vand (quenching), om kullet imprægneres, lades, vaskes, ældes/ stabiliseres osv. Billeder af en række forskellige typer biokul fra GreaterBio projektet – en forløber til PowerBio, vises i Figur 1.

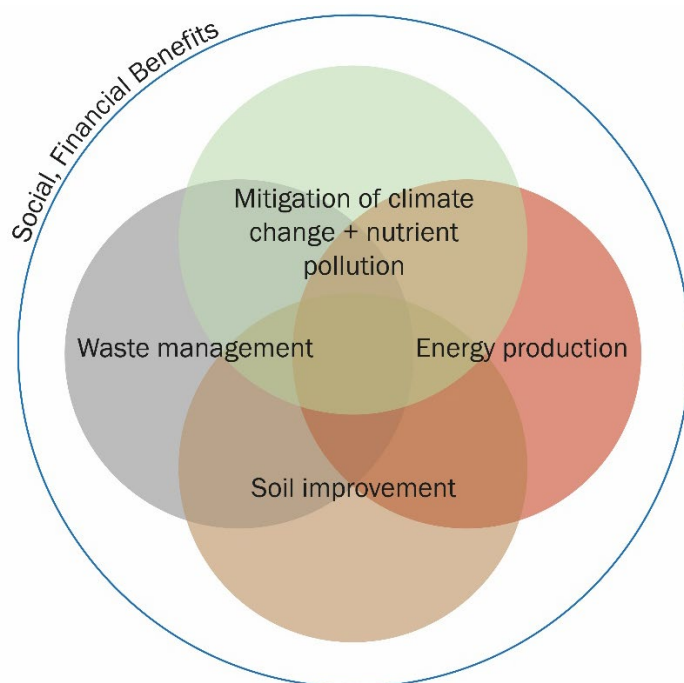


Figur 1 Billeder af biokul produceret fra forskellige marginale biomassetyper indsamlet i danmark og sverige^{iv}

De betydelige forskelle de nævnte forudsætninger medfører, at biokulprodukterne varierer meget i deres nøgleegenskaber – og derfor også i den effekt/ værdiskabelse de kan have i deres anvendelse. Dette kommer vi tilbage til flere gange i løbet af rapporten, men først vil vi løfte blikket helt op og kigge på nogen af de generelle perspektiver der er for at producere og bruge biokul som en del af udviklingen af en mere cirkulære og mere biobaseret økonomi samt generelle typer af værdiskabelse der kan være relateret hertil.

Om værdiskabelse fra produktion og anvendelse af biokul generelt

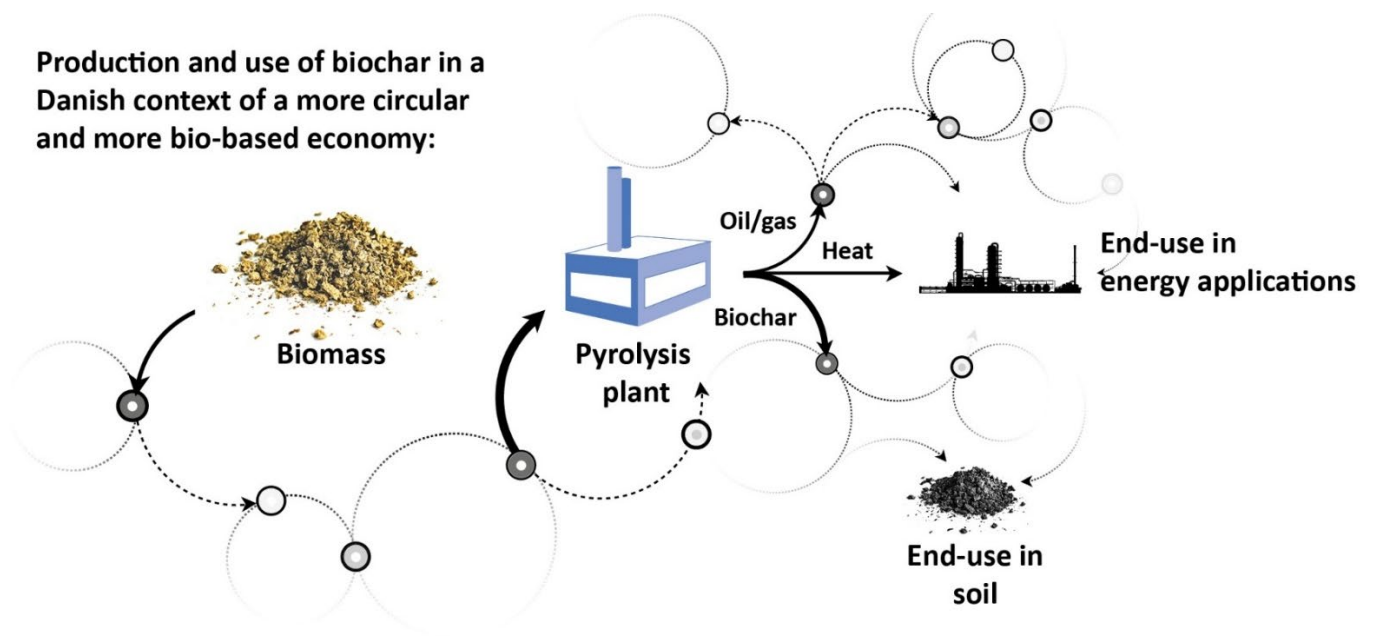
Som allerede nævnt så udgør den store variation af biokulprodukters egenskaber en udfordring ift at sige noget meget generelt. Dette gælder også for værdiskabelsen fra produktion og brug af biokul da denne ligeledes ofte er afhængig af den specifikke kombination af biokullets egenskaber og anvendelseskontekst samt pyrolyseprocessens effekter i en bredere systembetragtning. Desuden sker værdiskabelse fra produktion og anvendelse af biokul ofte på tværs af forskellige sektorer fx energisektoren, affaldssektoren, landbrugssektoren, byggesektoren mv, hvilket øger kompleksiteten. Naturligvis kan man alligevel forsøge sige noget om de typiske kategorier af værdiskabelse – og man kan diskutere hvor robuste de er hver især. Nedenstående Figur 2 søger netop at beskrive mulig værdiskabelse fra produktion og anvendelse af biokul helt overordnet.



Figur 2: Lehmann og Josephs ramme til forståelse af værdiskabelse fra produktion og brug af biokul i et moderne samfund⁹.

Figuren er baseret på arbejde tilbage fra 2009 da biokul stadig var en relativt ny term. De forskellige dele af værdiskabelsen er siden foldet mere ud. Det drejer sig for eksempel om værdien af at bruge pyrolyseprocesser til at sikre kritiske ressourcer ved blandt andet at fjerne organiske miljøfremmede stoffer mv fra spildevandsslam, biogasrestfiber osv således at fosfor, magnesium og andre vigtige næringsstoffer kan recirkuleres med reduceret risiko. Udover at folde de eksisterende dele af værdiskabelsen ud, så har de seneste års udvikling også tilføjet et nyt stort ben – eller en ekstra cirkel uden om hele figuren. Det handler om at bidrage med nye materialer, byggesten og produkter til at facilitere udvikling af mere cirkulære og mere biobaserede værdikæder. Det er stadig et dominerende fokus for brugen af biokul at det skal ende i jorden for at sikre recirkulering af næringsstoffer, kulstoflagring og jordforbedrende egenskaber. Men på vejen dertil er der rig mulighed for at levere

andre services fx som filtermateriale, kompositelement, farvestof, procesmedie mv. Så længe disse yderligere anvendelser ikke ødelægger kvaliteten af biokullet til brug i jord. Endelig så har både olie, gas og vandige væskefraktioner fra pyrolysen også nogen spændende potentialer for at bidrage til denne overordnede transformation. Udviklingen er forsøg illustreret på nedenstående



Figur 3: Illustration af hvordan pyrolyse og brug af biokul og andre produkter herfra kan tænkes ind i en cirkulær og biobaseret økonomi med høj biomasseanvendelseseffektivitet^{vi}.

Overvejelser i forbindelse med anskaffelse af biokul

I dette kapitel vender vi nogen af de indledende overvejelser der skal til i forbindelse med planlægning af aktiviteter hvor der skal anskaffes og bruges biokul. Kapitlet handler om hvor man kan købe biokul og hvad det koster, hvilke produkttegenskaber man skal være opmærksom på samt lidt om certificering, klimakreditter og lovgivning. Kapitlet handler ikke om at producere biokul, men der er alligevel en del information om produktionsprocessen (pyrolyse) da det er væsentligt at have viden om.

Biokul er ikke bare biokul

Biokul er som nævnt en kategori af uendeligt mange forskellige materialer der hver har både fællestræk og helt unikke egenskaber og karakteristika. Forskelligheden opstår som en kombination af biomassekarakteristika og den specifikke pyrolyseproces – og evt efterbehandling, som biokullet produceres ved.

Biokul er ikke bare biokul. Alle biokul-typer er forskellige på den ene eller anden måde, selvom der kan være mange fælles træk. Desuden kan delprøver fra samme biokulprodukt der bruges i forskellige sammenhænge også give forskellige resultater. Dette gælder også for samme kategori af anvendelse fx nedmuldning i jorden som gødningsmiddel eller jordforbedringsmiddel. Dette er forsøgt illustreret i Figur 4.



Figur 4: Illustration – biokul er ikke bare biokul

Variation i biokul opstår som en kombination af variation i den behandlede biomasse kombineret med den specifikke pyrolyseproces samt eventuel efterbehandling. Nogen af de væsentlige parametre i denne sammenhæng er oplistet her nedenfor.

Biomassens parametrar

- Fugtindhold, askeindhold, askesammensætning
- Renhed, homogenitet, partikelstørrelsesfordeling
- Indhold af kulstof, miljøfremmede stoffer, korrosive elementer osv.

Procesparametre

- Forbehandling – tørring, partikelstørrelses-management evt presning til piller eller briketter
- Pyrolysens temperaturprofil – opvarmningshastighed, maksimum temperatur, opholdstid, nedkølingshastighed
- Reaktionsatmosfæren i pyrolysen og efterfølgende
- Eventuelle tilsatzstoffer (bedmateriale/ katalysatorer mv) i processen
- Inaktivering evt med vand
- Eventuel efterbehandling

I ovenstående er taget udgangspunkt i en ”klassisk” pyrolyse. Der findes også en række andre væsentlige termokemiske processer der kan producere biokul inkl termisk forgasning og MAP (micro wave assisted pyrolysis) og hydrotermiske processer. I næste afsnit præsenteres en række nye analyser af biomasse og biokul lavet heraf som led i PowerBio-projektet.

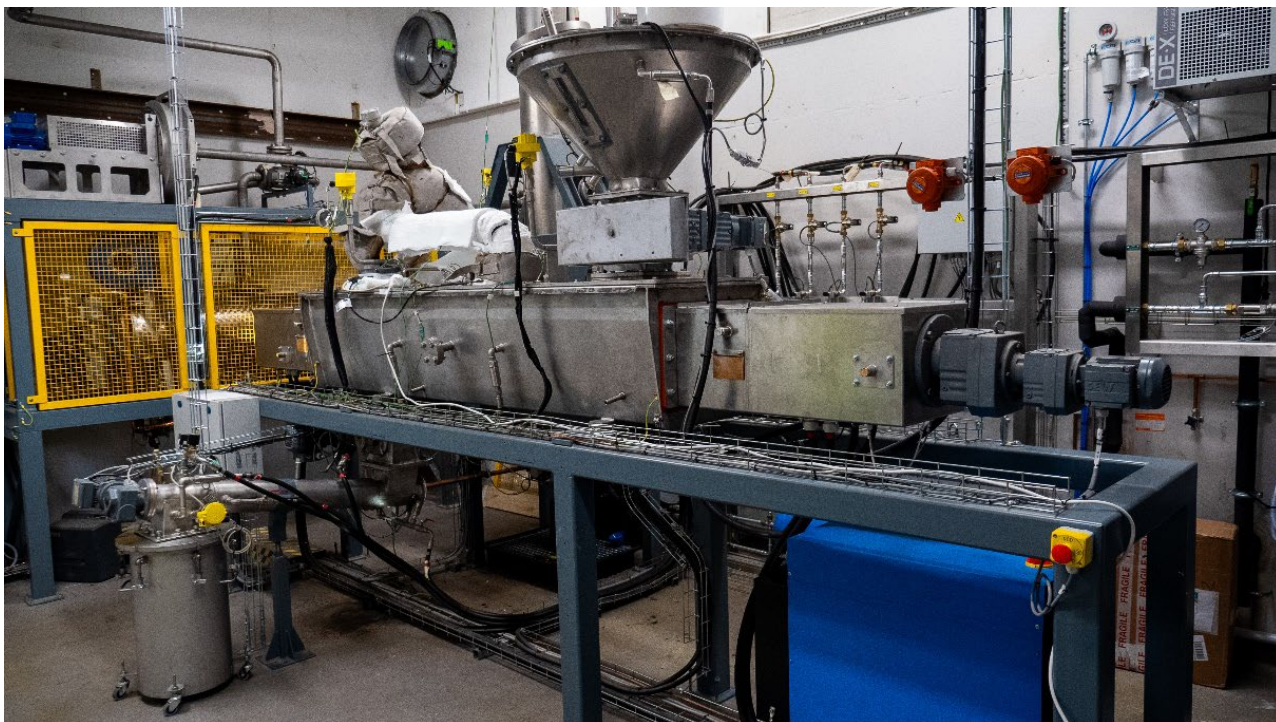
Nye pyrolyseforsøg og biokul-data fra Power Bio projektet

I PowerBio er der udført forsøg med at fremstille biokul gennem pyrolyse af materiale fra biobaserede reststrømme. Forsøgene er lavet på test-anlægget hos NSR i Helsingborg (se Figur 5). For at kunne fødes ind i anlægget skal materialet neddeles til stykker der er ca. 20 mm i diameter. Mange biomassetyper er derfor nødt til at blive knust og evt pelleteret, før det kan pyrolyseres i anlægget. Erfaringen har vist, at det er vanskeligt at pelletere i den pillepresse der findes on-site, og derfor er upelleteret materiale også blevet pyrolyseret i nogle tilfælde. Det kan godt lade sig gøre at anvende upelleteret materiale, men produktionen bliver betydeligt langsommere, og der er risiko for stop i anlægget.

Følgende materialer er blevet anvendt:

- Julegran fra Tommelilla Kommune
- Tagrør fra Vallensbæk Kommune
- Ålegræs fra Søuld
- Græs fra Malmø Kommune

Alle forsøg blev gennemført ved 550 °C och 30 minutters oppehålstid. Udover biokul blev der også produceret bioolie ved forsøgene. Olien produceres ved at køle pyrolysegassen således at de store kulbrinter kondenserer ud og kan samles op som en tykflydende væske.



Figur 5: Test-anlæg til biomassepyrolyse hos NSR

Gran materialet kom fra Tommelilla Kommune i form af kommunens offentlige juletræ fra 2024 og blev modtaget i to fraktioner: granstammefflis og granfflis (et gennemsnit af alle plantens overjordiske dele). Det blev vurderet, at fraktionen granfflis var for våd til at kunne anvendes, mens granstammefflis sandsynligvis kunne fungere. Desværre kunne granstammefflis ikke pelleteres på tilfredsstillende vis i NSR's pillepresse, og fraktionen blev derfor pyrolyseret upelleteret. Resultatet blev biokul af god kvalitet.

Tagrør blev modtaget fra Vallensbæk Kommune i én fraktion. Det kunne ikke pelleteres i NSR's pillepresse og blev derfor pyrolyseret upelleteret. Resultatet blev biokul af god kvalitet.

Ålegræs blev modtaget fra Søuld i flere fraktioner. Fraktionen fra rystebord blev pyrolyseret, men viste sig at forårsage en prop af klistret materiale i anlægget, hvilket afbrød forsøget. Vurderingen er, at ålegræs ikke kan pyrolyseres i NSR's anlæg.

Endelig er der gennemført forsøg med græs fra Malmø kommune. Det lykkedes at få lavet udmærket biokul af græsset, men det var en meget begrænset mængde der blev pyrolyseret og pelletering vil sandsynligvis være nødvendigt for at kunne behandle det på lignende anlæg.

I Tabel 1 er udbyttet af biokul og olie sammenfattet. Udbyttet af biokul inkluderer aske, hvilket betyder, at råvarer med højt askeindhold får et højere biokuludbytte, da asken hovedsageligt ender i biokullet. Det er forventet, at granstamme indeholder betydeligt mindre aske end de øvrige råvarer. Granstamme giver et biokuludbytte, der er betydeligt lavere end for ålegræs, hvilket er forventeligt. Udbyttet af olie fra gran er også meget lavt, hvilket betyder at der dannes meget permanent gas i pyrolyse af gran sammenlignet med de andre biomasse-typer.

Tabel 1: Udbytte af biokul og olie fra pyrolyseforsøg hos NSR. Manko til 100% er permanente gasser i pyrolysegassen.

	Udbytte, biokul	Udbytte, olie
	% af total masse ind	
Ålegræs	38	15
Gran	27	14
Tagrør	28	32
Græs	30	28

I Tabel 2 angives de kemiske egenskaber for de testede materialer og deres biokul. Askeindholdet er særdeles højt i biokul fra ålegræs og lavt i biokul fra granstamme, som derfor har et højt kulstofindhold. Stofmængdeforholdet H/C er lavere end den grænseværdi der er sat af EBC på 0.7, hvilket betyder at der er potentiale for at certificere det producerede biokul med et europæisk EBC biokul-certifikat.

Tabel 2: Kemisk analyse af biomasse og biokul. TS = tørstof.

Material	Aske	Kulstof (C)	Brint (H)	Nitrogen (N)	H/C	pH
	% TS	% TS	% TS	% TS	mol/mol	-
Ålegræs	19,72	41,6	5,3	1,85	^a	^a
Ålegræs-biokul	40,26	51,28	2,3	2,92	0,53	9,8
Gran	0,70	51,6	5,8	0,17	^a	^a
Gran-biokul	3,6	84,3	3,4	0,47	0,48	9,7
Tagrør	5,67	49,0	6,2	0,49	^a	^a
Tagrør-biokul	20,83	70,9	2,9	1,3	0,49	9,4
Græs	7,29	47,5	5,6	1,2	^a	^a
Græs-biokul	21,9	68,1	2,8	1,95	0,49	10,3

^a ikke analyseret

I Tabel 3 angives indholdet af nogle metaller og andre grundstoffer. Disse følger i nogen udstrækning askeindholdet, men der er ikke nogen generelle, lineære sammenhænge. Øverst er 3 vigtige makronæringsstoffer – fosfor, kalium og magnesium. Herunder følger en række mikronæringsstoffer og metaller der ikke er reguleret i EBC, og nederst følger en række metaller der er reguleret i EBC regi og hvor for høje koncentrationer gør at det pågældende biokul ikke vil kunne certificeres i denne sammenhæng. Grænseværdierne for EBC-Agro (European Biochar Certificate, klasse Agro) ses i kolonnen til højre.

Biokul af ålegræs indeholder høje niveauer af de vigtige næringsstoffer og mikroinæringsstoffer - herunder fosfor, magnesium, kalium, calcium, natrium, silicium. Biokul fra ålegræs indeholder dog også det højeste niveau af alle målte tungmetaller og indhold af cadmium er lige på grænsen til at være for høj til EBC agro certificering. Formentlig påvirkes ålegræsset af havvandets sammensætning, og vil variere fra sted til sted.

Biokul af gran har et lavt askeindhold, men alligevel et forholdsvis højt kaliumindhold. Biokul af tagrør har et meget højt indhold af silicium; sandsynligvis på grund af de siliciumholdige strukturer, der gør tagrørene stive. Biokul af græs indeholder calcium, kalium og silicium i høje koncentrationer. Jorden i Malmø er kalkrig, hvilket kan være en forklaring. Silicium har formentlig samme funktion som i tagrør.

Bortset fra cadmium-indhold i biokul fra ålegræs er der ingen målinger på kant med kravene i EBC agro certificeringen.

Tabel 3: Indhold (mg/kg tørstof) af udvalgte metaller og andre grundstoffer i de testede materialer og deres biokul (tal i parentes) samt grænseværdier ifølge EBC-Agro.

	Ålegræs	Gran-stamme	Tagrør	Græs	EBC ^a
Fosfor	5700 (38000)	130 (570)	1800	2100 (6800)	-
Kalium	8400 (17000)	2000 (7700)	4700	10000 (33000)	-
Magnesium	8000 (19000)	97 (400)	1200	1500 (4900)	-
Calcium	18000 (39000)	840 (3100)	5400	10000 (35000)	-
Mangan	550 (1200)	24 (91)	100	63 (210)	-
Jern	2600 (3800)	61 (510)	830	190 (1200)	-
Natrium	8300 (23000)	66 (260)	1200	230 (840)	-
Aluminium	3300 (4400)	55 (2200)	950	230 (1700)	-
Silicium	30000 (34000)	550 (3300)	69000	8200 (30000)	-
Titanium	210 (270)	<50 (<50)	<50	>50 (99)	-
Kviksølv	<0,080 (<0,080)	<0,080 (<0,080)	<0,080	<0,080 (<0,080)	1
Cadmium	0,89 (1,5)	0,22 (<0,040)	0,052	0,055 (0,083)	1,5
Arsen	1,9 (1,9)	<0,20 (0,6)	0,32	<0,20 (0,22)	13
Bly	3,1 (4,8)	0,14 (1,1)	1,3	0,45 (1,8)	120
Kobber	6,7 (13)	1,7 (6,6)	9,0	4,1 (15)	100
Krom	21 (18)	<1,0 (10)	12	4,9 (47)	90
Nikkel	11(11)	<1,0 (6,8)	4,8 (5,9)	3,1 (25)	50
Zink	57 (96)	6,2 (25)	140	39 (100)	400

Anskaffelse af biokul kan rejse mange spørgsmål

Der kan være mange væsentlige overvejelser når man skal i gang med at planlægge et projekt med biokul. Hvor og hvordan køber man biokul? Hvad er det produceret af og hvad kan det? Er det ladet med næringsstoffer? Kan >< skal biokul være certificeret? Hvem ejer kulstof-lagringseffekten? Kan kulstoflagringseffekten indgå i mit klimaregnskab? Hvad med regulering? Der er desuden ofte centrale forskelle fra projekt til projekt som kan gøre det svært at overføre viden og læring én til én. I dette afsnit giver vi en kort, overordnet introduktion til nogen af de mange spørgsmål der kan opstå når man skal til at købe biokul ift analyser, certificering, klimakreditter og lovgivning.

Er produktion og brug af biokul reguleret eller kvalitetssikret på anden vis?

Der er i slutningen af 2024 gennemført et indledende survey studie af status for regulering af produktion og anvendelse af biokul med et fokus på anvendelse af biokul i landbruget^{vii}. Resultaterne af undersøgelsen viser at regulering er under udvikling og/eller implementering i mange lande. I nogle

få tilfælde er der allerede fastsat regulering med specifikke rammer omkring disse aktiviteter. Overordnet set kan tre forskellige typer situationer groft generaliseres til følgende:

- Der findes lande, hvor produktion og anvendelse af biokul ikke er adresseret specifikt og derfor generelt er forbudt, medmindre der opnås særlige tilladelser. Disse tilladelser kan både være kontekstuel afhængige og midlertidige.
- Der findes lande, hvor produktion og anvendelse af biokul ikke er adresseret specifikt og derfor generelt er tilladt, medmindre eksisterende love overtrædes som følge af de relaterede aktiviteter.
- Der findes lande, hvor produktion og/eller anvendelse af biokul er adresseret specifikt og derfor tilladt under et sæt målrettede krav og betingelser.

Både Danmark og Sverige hører til den første kategori, og det kræver indtil der er etableret specifik lovgivning typisk en tilladelse af bruge biokul i landbrugsjord. Det vil være forskelligt hvor svært >< let det er at anskaffe sådan en tilladelse, og der er mange typer anvendelse udenfor landbruget som ikke kræver tilladelse men hvor anvendelsen er reguleret i sektor-specifik regulering.

Ud over de reguleringer, der er under udvikling, er der etableret flere frivillige standarder. Både i EU og USA har disse standarder vist sig at give indsigt og inspiration til udviklingen af juridisk bindende reguleringsrammer. Standarderne fastsætter en række kvalitetskriterier for certificering af biokullets kvalitet i forhold til forskellige anvendelser. Den mest udbredte certificering i Europa lige nu er European Biochar Certificate (EBC)^{viii}. EBC dækker i øjeblikket 7 forskellige produktkategorier og tilhørende sæt af kvalitetskriterier. Certificering af biokul er meget udbredt i Europa og langt det meste biokul der sælges har et EBC-certifikat. Det er altid en god idé at sikre kvaliteten af biokul uanset anvendelsen, og et certifikat kan hjælpe med at koble en given anvendelse til de relevante analyser og kvalitetskriterier.

I Danmark er specifik regulering for produktion og anvendelse under udarbejdning og forventes at være klar i løbet af 2027^{ix}. I Sverige er der heller ikke specifik lovgivning, men der er landespecifikke grænseværdier for flere EBC-kategorier. Desuden er produktionen reguleret forskelligt afhængig af anvendelse af overskudsenergi fra pyrolyseprocessen^x

EU's gødningsforordning og biokul

EU's gødningsforordning regulerer CE-mærkede gødningsprodukter og jordforbedringsmidler på det indre marked for at sikre åben handel med produkter, der opfylder krav til næringsindhold, sikkerhed og miljøpåvirkning. Siden juni 2022 omfatter forordningen også struvit, biokul og aske, hvilket gør det muligt at producere CE-mærket biokul til brug som gødning og jordforbedring i EU^{xi}.

Forordningen stiller omfattende krav til biokulprodukter, herunder:

- **Tilladte biomassetyper:** En positivliste med rene vegetabilsk biomasser og visse biogene restprodukter. Materialer som husholdningsaffald, spildevandsslam og animalske biprodukter er udelukket, men der er arbejde i gang fra flere sider i forhold til at åbne for spildevandsslam på sigt^{xii}.

- **Produktkrav** (CMC 14 – pyrolyse/gasificeringsmaterialer):
 - Produktionsforhold
 - H/C-org forhold $< 0,7$
 - PAH ≤ 6 mg/kg tørstof; PCDD/F ≤ 20 ng WHO-TE/kg tørstof
 - Cl-indhold ≤ 30 g/kg tørstof, hvis >5 % biokul i produktet

Derudover gælder generelle kvalitetskrav afhængigt af produktkategori (fx organisk gødning, organo-mineral gødning, jordforbedringsmiddel) med grænser for tungmetaller, næringsstoffer og patogener.

Økologisk landbrug

Biokul fremstillet af rene plantematerialer kan anvendes i EU-certificeret økologisk produktion, hvis det opfylder kravene i forordning (EU) 2019/1009 samt i DK-certificeret økologisk produktion hvis det desuden kan opnå en EBC-Organic certificering eller tilsvarende^{xiii} og i SE-certificeret økologisk produktion hvis det udover EU-kravene overholder specifikke grænseværdier for udvalgte tungmetaller^{xiv}.

Skal kulstofsekvestrerings-effekten certificeres - og hvem får den?

Udover kvalitet og værdi af selve biokulproduktet, så er klimakreditten forbundet med at biokul indeholder meget svært nedbrydeligt kulstof ofte en stor del af motivation til at købe og bruge biokul. Alt biokul der er EBC-certificeret har kvalitet til også at få en certificeret kulstofsekvestreringseffekt. Klimaeffekten kan certificeres separat af biokul-kvaliteten igennem for eksempel EBC's eget C-sink certificeringsprogram^{xv} eller den ordning der er udviklet af Puro.earth – som i øvrigt også er en af flere markedsplatforme hvor man kan købe og sælge klimakreditter i form af blandt andet kulstofsekvestrering i biokul^{xvi}.

Når man køber biokul til et projekt er det vigtigt at overveje om man vil købe klimakreditten med da denne kan være en stor del af den samlede omkostning. Afhængig af hvordan det indkøbte biokul skal bruges kan der være nogen begrænsninger for kvaliteten og prisen/værdien af kreditten. Hvis det indkøbte biokul skal bruges i en sammenhæng hvor der er risiko for at det indenfor kort tid kan oxideres – for eksempel gennem afbrænding, så er det ikke muligt at sælge den tilhørende kulstofsekvestrering igennem kreditter da dette kræver en sikkerhed for at kulstoffet ikke ender i atmosfæren. På den måde bliver det en stor potentiel omkostning for et projekt med biokul hvis biokullet bruges på en måde hvor der er risiko for hurtig tab af kulstoffet i biokullet. Bruges biokullet i anvendelser med sikkerhed for mellemlang eller lang lagring af kullet uden risiko for oxidering så kan man sælge kreditten – og prisen afhænger af hvor lang tid lagringen er sikret.

Hvordan køber man biokul?

Priser på biokul er svære at sætte på formel da de afhænger af mange parametre herunder proces, biomasse, produktionskontekst mv. Biokul købes enten direkte fra producenter eller hos forhandlere.

Biokul kan også købes som forarbejdede substrater – enten laddet med næringsstoffer eller blandet op i jord af forskellig slags. Det anbefales at købe biokul så lokalt som muligt for at undgå unødvendig transport. Derudover anbefales det at købe certificeret biokul hvor både kvaliteten og produktionsprocessen er certificeret. Det øger chancen for bæredygtig produktion og gavnlig anvendelse. Endelig er det relevant at overveje om der skal følge en klimakredit med det biokul man køber. Biokulproduktet kan i praksis godt sælges separat for klimakreditten fra kulstoflagringseffekten, men for at kunne sælge og realisere klimakreditten så skal det dokumenteres at biokulproduktet anvendes på en måde der sikrer den solgte klimaeffekt. Hvis det pågældende projekt kun bliver små mængder biokul så er det en relevant overvejelse at glemme klimakreditten da denne vil medføre behov for ekstra dokumentation og administration. Se mere om køb og anvendelse af biokul i case-studierne i næste afsnit.

Erfaringer med anskaffelse og brug af biokul i PowerBio

Forsøg med biokul i staudebede i Vallensbæk Kommune

Baggrund og formål

Vallensbæk Kommune har igangsat et forsøg med biokul i urbane staudebede for at teste effekter på drift, vækst og klima. Biokul blev valgt da det kan binde næringsstoffer og vand, hvilket gør jorden mere robust og mindre plejekrævende. Forhåbningen er at bedene skal have mindre tilsyn og vedligehold – og holder sig bedre og længere, end bede uden biokul. Billeder kan ses i Figur 5.



Figur 6: Billeder fra Vallensbæk Kommune med etablering af staudebede i blandinger med biokul

Projektets opbygning

- 24 staudebåde fordelt på to veje med ens forhold.
- 12 kontrolbåde med 100 % filtermuld.
- 12 testbåde med 25 % biokul og 75 % af enten skærver, vasket grus eller fibermuld.
- Ca. 17 forskellige stauder pr. bed.
- Tidsramme: Endelige resultater efter ca. 3 år.

Økonomi og indkøb

- 25 m³ EBC-certificeret biokul af træflis købt hos Larkom ApS.
- Pris: ca. 88.000 kr.
- Klimaeffekten (CO₂-binding) fulgte ikke med i købet.

Erfaringer fra etablering

- Levering i bigbags, opbevaret koldt og tørt i hal.
- Blandingen med vækstmateriale gav støvproblemer, løst med vandtilsætning.
- Bedene blev først gødet i foråret 2025 – burde være gjort før iblanding.
- Udstyr: teleskoplæsser til blanding, lastbil med grab til transport.

Foreløbige observationer

Bedene med biokul og vasket grus har vist flot vækst, lang blomstringsperiode og mindre vandings- og lugningsbehov. Bedene med skærver og fibermuld har klaret sig mindre godt. Kontrolbedene vokser også fint, men kræver umiddelbart mere pleje.

Barrierer og læring

Der er lige nu begrænset viden og erfaring i Danmark som man kan trække på, og det kan være en barriere både i forhold til inspiration og hjælp til planlægning og gennemførsel af nye tiltag og test med biokul. Det kræver også noget baggrundsviden at kunne lave de relevante miljømæssige overvejelser ved valg af biokultype, og der kan være stor forskel på hvilke typer biokul der er relevante til et givent projekt.

Kommunikation om nye tiltag hvor det brede kendskab er vigtigt. I vores tilfælde har kommunikationsindsatsen givet positive reaktioner, men projektet er lille og lokalt og spreder sig ikke så langt.

Perspektiver

Biokul kan potentielt anvendes i regnvandsafledninger og vejrabatter, som man ser i Sverige og Tyskland. Projektet skal munde ud i en business case med beregninger af anlægspris, CO₂-effekt og driftsomkostninger.

Dyrkningsforsøg med grøntsager på to lokationer i Malmø Kommune

Baggrund og formål

Malmø Kommune har gennemført to parallelle forsøg med brug af biokul i dyrkning af grøntsager (gulerod, kålrabbi og squash) i forskellige dyrkningsmiljøer: på Botildenborg og Årtholmens koloniområde. Formålet var at teste biokul som jordforbedringsmiddel i bynære dyrkningsprojekter og undersøge effekter på jordstruktur, vandholdning, næringstofbalance og planters vækst. Hypotesen var, at biokul kan:

- Øge modstandsdygtighed mod tørke.
- Reducere vandingsbehov.
- Forbedre afgrøders vækst og udbytte.
- Projektet havde også et formidlingssigte med workshops for at skabe interesse for biokul blandt borgere og kolonihaveejere.

Billede af resultatet ses i Figur 6.



Figur 7: Forsøg med biokul i grøntsagsdyrkning i Botildenborg

Projekternes opbygning

Botildenborg:

- 12 plantekasser (1,2 m²) med jordblandinger indeholdende 0 %, 1 %, 5 % og 10 % biokul. Se Figur 5.
- Biokul fra Skånefrø aktiveret med økologisk gødning og vand i 48 timer før brug.
- Systematisk vanding og jordtest (NPK, pH) før og efter dyrkning.
- Dokumentation med fotos og målinger.

Ärtholmen:

- Dyrkning i pallerammer med jord fra Sysav, biokul fra Skånefrø og økologisk hønsegødning.
- Biokul ladet med gødning i ca. en uge.
- Vanding: intensiv i juni, minimal i juli–august (kun 3 gange i august).
- Jordprøver taget ved start og slut (pH, N, P, K).

Økonomi og indkøb

Botildenborg:

- 100 liter EBC-certificeret biokul fra Skånefrø AB (2 sække à 50 liter).
- Ca. 2300 liter kompost, 10 liter økologisk gødning (DCM ECOR 1), frø fra Impecta.
- Udstyr: beholdere til aktivering, jordtestkit (Rapitest), plantekasser.

Ärtholmen:

- 1000 liter EBC-certificeret biokul (doneret af Skånefrø).
- Økologisk hønsegødning, jord fra Sysav, pallkrager.

Erfaringer fra etablering

Biokul var tørt ved levering og nemt at håndtere, men krævede aktivering med gødning og vand. På Botildenborg var aktiveringsprocessen manuel og krævede store beholdere. På Ärtholmen opstod støvproblemer ved ompakning fra BigBag til mindre sække. Ellers var der ingen større logistiske udfordringer, men praktiske detaljer (fx beholdere til aktivering) skal planlægges på forhånd.

Foreløbige observationer

Botildenborg:

- Squash: Højeste udbytte ved 10 % biokul (3,25 kg pr. kasse).
- Kålrabbi: Bedst ved 5 % biokul (største blade og totalvægt).
- Gulerødder: Bedst ved 1 % biokul (højeste udbytte og største størrelse).
- Jord med højere biokulindhold holdt bedre på fugt og havde højere fosfor og kalium efter høst, mens kvælstof blev hurtigt opbrugt.
- Skadedyr (fugle, snegle, larver) og sygdomme påvirkede alle niveauer.

Ärtholmen:

- Squash gav størst udbytte i kasser uden biokul (87 kg mod 40 kg ved 10 % biokul).
- Gulerødder trivedes bedst uden biokul (beregnet total 15–20 kg mod 6–8 kg ved 10 % biokul).
- Kålrabbi blev hæmmet af skygge fra squash og angreb af skadedyr.
- Jordprøver viste fald i kvælstof i alle kasser, svag stigning i pH og fosfor, kalium faldt lidt.

Barrierer og læring

Effekten af biokul er både kontekst- og afgrødespecifik og kræver indgående test og undersøgelse før storskala anvendelse. Resultaterne fra de to forsøg var ikke enstemmige, men biokullet blev også behandlet forskelligt og der var forskellige jordtyper og vandingsforhold. Desuden blev grøntsagerne i det ene forsøg dyrket hver for sig og i det andet dyrket sammen hvilket gav skyggeeffekter.

Aktivering af biokul er afgørende for at undgå næringsmangel. Skadedyr og bymiljøforhold kan forstyrre resultater og gøre det svært at drage konklusioner. Effekter ses ofte først efter flere sæsoner – langtids-test anbefales. Budget bør inkludere professionelle jordtests (kan koste op til 50.000 kr) da de anvendte jordtestkit var dyre men ikke helt pålidelige.

Ved begge forsøg blev der afholdt workshops der skabte stor interesse og læring blandt borgere.

Perspektiver

Det blev bekræftet at biokul kan bruges til at justere jordens vandholdningsevne, pH og næringsstofbalance, men optimal dosering er svær at identificere og afhænger af afgrødetype og kontekst. Det vurderes at biokul kan bidrage til at styrke bynær fødevareproduktion og klimatilpasning.

Anbefaling: Start med små testprojekter, brug certificeret biokul, og lad det op med gødning før brug

Biokul i kompostering i Lunds Kommune sammen med SLU Alnarp

Baggrund og formål

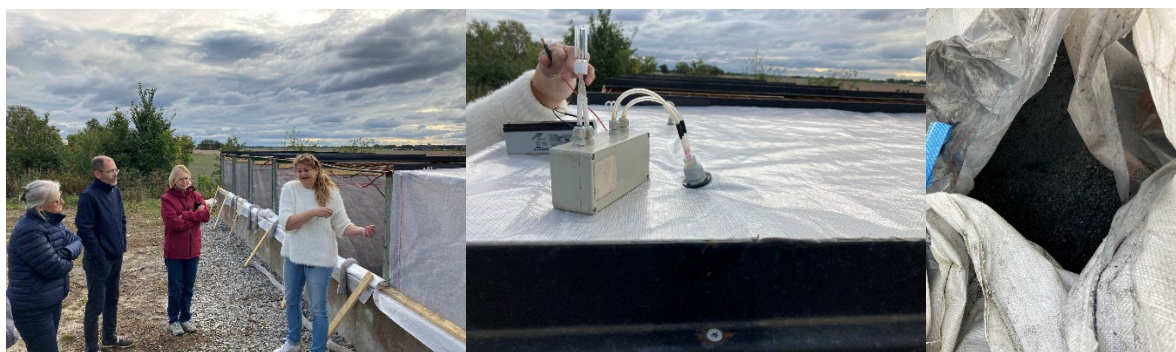
Lunds Kommune har en lang tradition for at kompostere have- parkaffald i store, aflange komposter-kuler, som normalt ligger i to år. Denne metode kan medføre udledning af drivhusgasser som metan (CH_4) og lattergas (N_2O). Projektets formål var at undersøge, om tilsætning af biokul til komposteringsprocessen kan:

- Reducere udledningen af drivhusgasser.
- Fremskynde komposteringsprocessen.
- Skabe en kompost-biokul-blanding, der kan bruges som jordforbedring i byens grønne områder og kolonihaver – og samtidig fungere som en kulsænke.

Projektets opbygning og proces

- Testanlæg: 6 kompostbåse á 6 m^3 , se Figur 5.
- Design: 3 båse med biokul (20 % af volumen og 3 båse uden biokul (kontrol).

- Biokul stammer fra NSRs pyrolyseanlæg i Helsingborg og er produceret af have-parkaffald.
- Målinger:
 - Metan og lattergas (ugentligt fra september 2024 til september 2025).
 - Temperatur i kompostbunkerne samt udvaskningstest.
- Komposten blev vendt én gang i maj 2025.
- Båse blev dækket med dug under målinger for at opsamle gas.



Figur 8: Venstre: Komposteringsbåse til komposteringsforsøg med testvolumen på 6 kubikmeter pr båse. Midt: Udstyr til gasanalyse. Højre: Biokul fra NSR lavet af have-parkaffald. Fotos Jenny Bengtsson SBH

Økonomi og indkøb

- Biokul leveret fra NSRs testkørsler uden omkostninger.
- Udgifter til investering i kompostbåse og måleudstyr.
- Ekstra omkostninger til gasmålinger og analyser.

Erfaringer fra etablering

Det var en udfordring at blande biokul jævnt med grønt kompostmateriale. Komposteringsprocessen krævede desuden udvikling af nye processer og rutiner (fx dækning med dug og opsamling af gas). Der var ingen større tekniske barrierer, men der er et behov for praktisk knowhow.

Foreløbige observationer

De første målinger indikerer forskelle i metanudslip mellem båse med og uden biokul – især i starten af komposteringsprocessen. Forsøgene er dog ikke endeligt afsluttet endnu, og de endelige konklusioner kan først drages i begyndelsen af 2026. Hvis hypotesen og de midlertidige resultater bekræftes, kan metoden formentlige bruges til at reducere klimabelastningen fra kompostering.

Barrierer og læring

Udover de praktiske udfordringer med at blande biokul i kompostmaterialet, så kan anskaffelse af specialudstyr til gasmåling og analyse være en barriere. Resultaterne er foreløbige og kræver længere tids data for sikker konklusion, men for nuværende ser det rigtig lovende ud. Metoden er mest relevant for kommuner og affaldsselskaber med storskala kompostering.

Perspektiver

Det er ikke nogen dyr eller besværlig proces og den kan hurtigt implementeres i stor skala hos kommuner og virksomheder der komposterer have-parkaffald. Den potentielle klimaeffekt ved reduktion af metan og lattergas kan være betydelig da det er to kraftige drivhusgasser. Slutproduktet er desuden et jordforbedringsmiddel med blanding af biokul og kompost der blandt andet kan bruges i byens grønne områder.

Den fremtidige udvikling bør have fokus på 1) Bedre blandingsmetoder, 2) Standardisering af målinger og 3) Økonomisk analyse af storskala implementering.

Forsøg med biokul i plantning af bytræer i Tomelilla Kommune

Baggrund og formål

Tomelilla Kommune har gennemført forsøg med biokul i forbindelse med nyplantning af træer på Spjutstorp Torv. Formålet er at undersøge, om biokul kan forbedre træers etablering, gøre dem mere robuste mod tørke og reducere behovet for vedligehold. Projektet skal give svar på, om biokul som jordforbedring kan øge træers modstandsdygtighed og dermed retfærdiggøre en større budgetramme til jordforbedring.

Projektets opbygning

Fire nyplantede naverløn på torvet på en lige linje, alle med cirka samme vækstforhold. Hver træ fik forskellig behandling:

- Langtidsvirkende biokolbaseret gødning, ladet med tangekstrakt.
- Traditionel NPK-gødning.
- Egenproduceret biokul (fra gran), ladet med tangekstrakt.
- Ingen behandling (kontrol).

Effekter måles både kortsigtet (bladudvikling) og langsigtet (tilvækst, vinteroverlevelse, nye skud).

Økonomi og indkøb

2 typer biokul blev brugt: Biokol baseret på tang købt fra DLF Seeds and Science og biokul lavet af julegran leveret fra NSR i projektet.

Biokul fra DLF var EBC-certificeret, men der var ikke nogen certificering på granbiokul. Der er dog lavet en række analyser som er beskrevet tidligere i rapporten. Klimaeffekt fra kulstofbindingen blev der ikke fulgt op på.

Biokul fra DLF Seeds and Science blev leveret i 20 kg sække, og der blev ved den ene beplantning tilført ca. 1 liter ladet biokul ved træets plantning svarende til en andel af biokul i blandingsmix på 0,2 % af volumen.

I den anden beplantning blev der brugt biokul fra NSR, i en mængde svarende til ca. 4 liter pr træ hvilket svarer til ca. 0,8 % af volumen i det færdige blandingsmix. Dette biokul blev ladet med tangekstrakt inden anvendelse ved, at det lå i tangekstrakt i ca. 2–4 uger, før det blev tilført jorden.

Erfaringer fra etablering

NSR-biokol blev leveret i plastbeholdere efter at julegranen var blevet lavet til træflis og pyrolyseret på NSR's anlæg i Helsingborg.

Begge typer biokul var tørt og støvede meget under håndtering.

Begge typer biokul blev ladet med tangekstrakt før brug for at sikre et væsentligt indhold af næringsstoffer.

Ingen større problemer med opbevaring, men støv krævede opmærksomhed.

Foreløbige observationer

Efter første vækstsæson er det observeret at træet med indkøbt biokol + tangekstrakt havde mørkere blade end øvrige mens kontroltræet havde mest bladmasse, men farven var mellemgrøn. Det er dog for tidligt at drage konklusioner, og effekter af behandlingerne forventes først tydelige om 3–5 år.

Barrierer og læring

Begrænset viden og erfaring med biokul i kommunale projekter er en barriere i forhold til planlægning og udførelse. Det var udfordrende at finde et egnet substrat til pyrolyse, og det var oprindeligt planlagt at bruge hestegødning men af praktiske og procesmæssige grunde måtte dette erstattes af gran.

Der er støvproblemer ved håndtering af tørt biokul, og det kan være relevant at fugte det op.

Klimaeffekten af projektet er ikke dokumenteret, men det er noget som kan tænkes ind i fremtidige projekter.

Perspektiver

Det er stadig forventningen at behandling med biokul potentielt kan reducere vedligehold og øge træers robusthed i udsatte bymiljøer. Der er nogen erfaringer fra blandt andet Stockholm som viser at dette er muligt. Der er en mulighed for lokal produktion og cirkulær ressourceanvendelse som det blev vist med indhentning af et udtjent juletræ der blev lavet til biokul, hvorefter noget af kullet blev leveret tilbage til træproducenten. Det er en god ide at lade biokul med næringsstoffer (fx tangekstrakt) for bedre effekt hvis det skal bruges som vækstmedie.

Mange mulige anvendelser af biokul - langt fra alt er afprøvet

Frembringelsen af biokul kan som beskrevet tidligere ske på mange måder. Dette resulterer også i at biokuls karakteristika også varierer markant i den måde kulstofstrukturen er bygget op, samt hvilke andre atomer der indgår og hvorledes disse danner molekyler, som ændrer på biokullets egenskaber.

Der findes allerede rigtig mange bud på nye anvendelser af forskellige typer af biokul. Dette afsnit vil gennemgå nogle af de egenskaber biokullet har og give eksempler på hvilke anvendelser det kan understøtte. Overordnet set har biokul en række effekter bl.a.:

- **Katalyse:** Kan indgå i reaktioner for at øge effektiviteten af processer både i relation til udbytte og reaktionshastighed.
- **Adsorption:** Kan adsorbere stoffer fra væske og gas.
- **Lagring:** Dele af kulstoffet i biokul har en høj permanens som fortrænger CO₂-udledning.
- **Overfladestruktur:** Biokuls overfladestruktur kan anvendes til at skabe materialer med bestemte egenskaber.
- **Elektronbro, -modtager eller -donor:** Biokul kan agere både som en elektronbro og kan donere eller acceptere elektroner.

I følgende gennemgås udvalgte eksempler anvendelser indenfor de nævnte effektkategorier. Relevansen vurderes ud fra, hvor højt anvendelsens ligger på teknologiske parathedstrin (TRL). At vurdere paratheden og ikke mindst potentialet kan være meget svært, fordi biokul er ekstremt heterogent. Dette betyder, at flere effekter ofte er i spil på samme tid eller en effekt kan have både negative og positive indvirkninger. Der findes mange tilgængelige kilder med yderligere eksempler og mere inspiration til andre typer af anvendelser af biokul, og i noterne er givet 3 forslag^{xvii}.

Anaerob nedbrydning

Biokuls effekt på anaerob nedbrydning er meget kompleks, da mange effekter indgår og er meget svære at skelne fra hinanden. Overordnet set har biokul fire positive effekter på anaerob nedbrydning^{xviii}:

- Øge processtabiliteten ved at agere buffer eller adsorbere og derved mindske inhibering fra ammoniakstress.
- Donere, acceptere eller videregive elektroner for at øge effektivitet og overkomme reaktionshastighedsbegrænsninger i methanogenesen.
- Anvendes som vært for mikrobielle konsortier, som øger beskyttelsen mod inhiberende stoffer og øger mellemartslig samarbejde.
- Kan adsorbere eller omdanne inhiberende stoffer som derfor undergår passivering, bionedbrydning eller ændring i speciering.

Flere af de ovenstående effekter kan også have en negativ effekt på systemer. Ved at tilføre biokul til et vandigt anaerobt miljø, ændres miljøet og det kan være svært at vurdere, om disse har en negativ

effekt. Eksempelvis kan tilgængeligheden af tungmetaller både fremme og hæmme mikroorganismers aktivitet afhængig af koncentration og speciering^{xix}.

Derudover er det også dokumenteret, at biokul kan anvendes som co-substrat, hvis det er pyrolyseret ved lave temperaturer^{xx}. Således kan biokul være med til at øge metanproduktionen ved at donere kulstof, hvorved der også undgås en CO₂-udledning ved lagring i landbrugsjord.

Globalt er der ikke mange tilfælde, hvor man kommercielt i stor-skala anvender biokul som supplement til våd anaerob nedbrydning. Det mest veldokumenteret er dens bufferkapacitet, hvilket især kan være relevant i miljøer med et højt kvælstof-indhold^{xxi}. Udover dette er effekterne ikke tilstrækkeligt veldokumenteret. Årsagen er heterogeniteten både i biomasseressourcen og biokul, som betyder usikkerheder i resultater. For at overkomme dette, skal der underbygges med standardiseringer, som kan sikre at resultaterne ikke fluktuerer, når specifikke typer biokul anvendes.

En dokumenteret stabil forøgelse af metanproduktion fra biokul udebliver fortsat, som er afgørende for, at det kan anvendes fuldskala i anaerob nedbrydning. Hvis det kan vise sig at man kan lave en standardisering, er der gode udsigter for implementering. På nuværende tidspunkt, er der målsætninger for anvendelsen af biokul til kulstoflagring. At biokul først anvendes til anaerob nedbrydning hindrer ikke en efterfølgende lagring. Det kan ovenikøbet være en fordel, da biokullet derfor spredes med den afgasset biomasse, hvormed der ikke kræves yderligere udspretningsmateriel.

Vurderet TRL

Effekten er ikke blevet vurderet i en stabiliseret tilstand, som sikrer konsistente resultater. Dog er synergier med eksisterende målsætninger og applikationer meget stærke. Så hvis standardiseringer lykkedes anses biokulsunderstøttet anaerob nedbrydning for særdeles implementerbar.

TRL 3-4 med mulighed for at leap-frogge til fuldskala (TRL 7-8).

Jordforbedring

Biokuls effekt på jordforbedring, er en af de mest undersøgte biokul-applikationer, men der er generelt en mangel på markforsøg eller lignende storskalaforsøg^{xxii}. Der er meget forskel på landbrugsjord og dermed også biokullets effekt, hvor pottforsøg og andre isolerede labforsøg, ikke medtager alle de miljøfaktorer som er i marken. Som regel kigger man på udbytte og de parametre, der relaterer sig til dette, når man ser på om biokul, har en jordforbedrende effekt.

Biokuls effekt på jorden af flersidet og dækker blandt andet over:

- **Jordens pH** – ved at det meste biokul er alkalisk hæves pH. Derudover har det en bufferkapacitet, som sikrer stabile forhold.
- **Jordens struktur** – biokuls porositet, samt aggregerende effekt fremmer forskellige vækstbetingelser for planten.
- **Mikrobiomet** – Generelt ændrer biokul på de levevilkår der er for mikroorganismer på rigtig mange måder.

- **Stoftilbageholdelse** – På grund af biokuls fysiske og kemiske adsorptionseffekter tilbageholdes en række stoffer, herunder plantenæring, vand, ioner osv.

Biokul produceret ved lave temperaturer har den bedste effekt på jorde^{xxiii}. Generelt øger biokul jordens fysiske egenskaber og især sandede jorde responderer positivt på biokultilførsel^{xxiv}. En metaanalyse om jordaggregeringen peger på at tilførsel af biokul øger jordstrukturen på alle slags jorde for alle slags biokul^{xxv}.

Biokul har en vand- og næringsholdende kapacitet, hvilket styrker afgrødens modstandsdygtighed overfor miljøfluktuationer såsom tørke og temporal høj. Biokul er også med til at tilføre næringsstoffer. Koncentrationen af næringsstoffer øges med temperaturen, bortset fra kvælstof^{xxvi}.

Hvorvidt biokul har en positiv effekt på plantevæksten er i sidste ende, hvorvidt den afgrøde, der dyrkes, får gavn af den jordforbedrende effekt. Langt de fleste dyrkede danske og svenske jorde er af meget høj kvalitet, hvorved biokuls positive indvirkning udebliver.

Vurderet TRL

Den jordforbedrende effekt af biokul er veldokumenteret, selvom flere, især længerevarende, fuldskala forsøg mangler. TRL globalt ligger højt (TRL 5-6) på grund af potentialet biokul har på dårlig landbrugsjord. I Danmark og Sverige giver det ikke på samme måde mening at snakke om TRL, da den samme kritiske efterspørgsel på jordforbedring, ikke er tilstede.

Rensning af gas og væske

Aromatiseret kulstof bliver i dag kommercielt brugt til at fjerne et utal af stoffer fra gas og vand. Biokuls potentiale er stort på grund af dets lave pris ift. andre adsorbenter^{xxvii}.

Der er overordnet set to måder biokul anvendes på, som er fundamentalt anderledes fra hinanden.

Den ene måde er at man imprægnerer biokullet med et kemisk reagens. På den måde leverer biokul alene porøsitet. Porevolume og overfladeareal er i dette tilfælde de mest relevante karakteristika ved biokullet. Dette betyder, at man som oftest efterbehandler biokullet i en kemisk eller fysisk aktivering for at øge porøsiteten og dermed dets effektivitet til at adsorbere reagenten.

Den anden måde biokullet anvendes på, er at biokullet i sig selv adsorberer de uønskede stoffer. I dette tilfælde kan biokuls fysiske og kemiske adsorption begge spille en stor rolle for adsorptionskapaciteten.

De biokultyper der i dag bruges til adsorption kommer generelt fra biomasse med meget aromatiseret kulstofstrukturer, såsom skaller fra kokos- og pecannødder og hårdt træ. Andre bioressourcer som ikke har samme aromatisering har været anset for ikke at skabe høj kvalitet og bruges ikke kommercielt. Men studier peger ofte på at mange af de bioressourcer vi har tilgængelige i rigelige mængder kan opnå samme adsorptionskapacitet som aktiveret kulstof^{xxviii}. I lab skala er biokuls anvendelse som adsorptionsmateriale for mange stoffer underbygget. Dette gælder også for bioressourcer, der er tilgængelige i Danmark og Sverige, såsom kommunalt spildevand, halm og træaffald.

Adsorptionskapaciteter og hvilke parametre der har en effekt på disse, afhænger i stor grad af, hvilket stof, der skal adsorberes. Dog kan det diskuteres at biokuls heterogenitet gør at de fleste kravspekifikke karakteristika vil kunne dækkes.

For at nye biokultyper med mere lokale bioressourcer fra Danmark og Sverige bliver brugt, skal de tunes til de specifikke stoffer og ikke mindst afprøves i pilot- og fuldskala, hvor andre vigtige faktorer end adsorptionskapacitet og gennembrudstiden også spiller ind. I eksisterende gas-systemer kræves, at adsorptionsmaterialet har en lav sprødhed og derved modstandsdygtigt overfor vibrationer og klumpdannelser^{xxix}. Alternativt skal nye adsorptionskolonner udvikles, hvilket komplicerer implementerbarheden. I våde systemer er klumpdannelser også en vigtig faktor.

Vurderet TRL

Biokul har en meget lav pris i relation til eksisterende adsorptionsmaterialer. Derudover er biokuls egenskaber som rensningsmedie vedunderbygget på laboratorieskala. Dette er endnu ikke kommercielt udbredt, undtaget biokul produceret med specifikke højværdi-bioressourcer. Dermed vurderes TRL at være omkring 6-7, da pilotskala og fuldskalaforsøg skal indgå i den videre udvikling. Det skal siges at for nogle specifikke stoffer er TRL væsentlig lavere.

Biokul til jord-remediering

Jordsanering innebär att biokolet binder ämnen som är oönskade i jorden. Genom sin stora specifika yta, många typer av funktionella grupper på ytan och innehållet av mineraler och oorganiska föreningar kan biokol binda metaller i jonform^{xxx}. Biokol av restprodukter från olika grödor har visat sig binda bly, kadmium, zink och koppar varvid lakbara halter reducerats med 5-97 % (ibid.)

Biokolets viktigste egenskaper inkluderer:

- Funktionella grupper: Funktionella grupper i biokolet kan bilda komplex med metalljoner, binda genom elektrostatisk attraktion eller genom katjonbyte (ibid.). Biokol framställt vid låg temperatur är särskilt rikt på funktionella grupper. Funktionalisering kan ske genom viss termisk behandling, oxidering, reducering och syra/bas-behandling samt biologisk behandling med mikroorganismer^{xxxi}.
- Mineralinnehåll och oorganiskt innehåll: Biokolets innehåll av mineraler och oorganiska ämnen kan bilda olösliga föreningar med metalljoner, varvid dess binds^{xxxii}.
- pH: Biokolet kan förändra pH i jorden – oftast höjs det – och därmed tendensen till att metalljoner binds (ibid.).

Det finns flera exempel på att biokol av restprodukter från jordbruk använts för jordsanering. Strå från ris, soja, bambu och sädeslag har använts för att minska koncentrationerna av spårelement som Cd, Pb, Zn and Cu, och typiskt har då 5-10 vikt-% eller 20-40 ton/ha tillsatts (ibid.). Mekanismen som minskat koncentrationerna är då oftast någon av dem angivna ovan.

Vurderet TRL

TRL for brug af biokul til jordsanering vurderes at være høj, omkring 5-6. Der er set positive effekter i mange forskellige sammenhænge på tværs af biokultyper, jordtyper og forureningstyper. Kommerciel anvendelse mangler stadig, og en optimering af proces og planlægning kan stadig gavne af både mere viden fra kontrollerede forsøg og praksisviden.

Elektroder

Kulstof-baserede elektroder bruges i mange applikationer på grund af deres høje stabilitet, porøsitet og elektriske konduktivitet^{xxxiii}. Elektrodematerialer er vigtige i mange applikationer såsom brændselsceller, batterier og superkondensator, fordi de driver reaktioner på grund af deres høje konduktivitet^{xxxiv}. Elektroders hovedfunktion er at få elektroner til at løbe ”frit” igennem materialet. På samme tid skal de også være stabile og resistente overfor oxidations- og reduktionsreaktioner. Derudover er deres porøsitet vigtig især i superkondensatorer og brændselsceller, hvor overfladereaktionerne for ionerne sker på elektroderne.

Biokul har samme karakteristika som elektroder af fossilt aktiveret kul og grafit, selvom man i dag ikke har opnået samme effektivitet^{xxxv}. Dette betyder også, at biokul skal aktiveres eller dopes for at være konkurrencedygtige^{xxxvi}. Effektiviteten af biokul-baseret elektroder afhænger i høj grad af den anvendte bioressource og produktionen af biokulet. Urenheder fra biomassen kan både øge og mindske effektiviteten, herunder ændre aromatiseringen samt de funktionelle grupper.

Vurderet TRL

I dag er alle tre applikationer ikke kommercialiseret med biokul som elektrodemateriale og i lab skala mangler der fortsat undersøgelser relateret til effektivitet. Dog er de nuværende anvendte materialer ikke bæredygtige, hvorved deres konkurrencefordele fremtidigt vil mindskes, som kan bane vej for biokulbaserede elektroder. På nuværende tidspunkt vurderes biokul som elektrodemateriale at være omkring TRL3-4. Konceptet fungerer, men ikke i sådan grad, at forsøg i stor grad rykkes fra lab skala til pilotskala. Dog er der visse ting, såsom stabilitet og cyklusser, som godt kunne afprøves med indledende pilotskala forsøg.

Perspektiver

Udviklingen inden for produktion og anvendelse af biokul er præget af stor dynamik og stigende interesse. Teknologien er ikke længere kun et nicheområde, men anerkendes bredt som en central brik i den grønne omstilling – både som kulstoflager og som værdiskabende produkt i blandt andet landbrug, industri og energi. Biokul kan anvendes bredt og udvikling indenfor for eksempel jordforbedring, vandrensning, fodertilskud, byggematerialer og som råvare i cirkulære processer er i fuld gang. Den store diversitet åbner for en bred vifte af økonomiske og miljømæssige gevinster. I forbindelse med PowerBio projektet er der lavet en række forsøg med pyrolyse af nye biomassetyper og produktion og anvendelse af nye typer biokul. Der er gennemført flere forsøg med praktisk anvendelse af biokul i nye sammenhænge og en lang række relevante aktører er blevet inddraget i udvikling, planlægning og test.

Perspektiverne for den kommende periode er meget spændende, og det forventes at nogen anvendelser og værdikæder vil modne og finde fodfæste mens andre vil kræve længere tid eller blive overflødiggjort af anden udvikling. Biokul kan ikke kun bidrage til negative CO₂-emissioner, men også styrke jordens frugtbarhed, reducere næringsstofudvaskning og skabe nye forretningsmodeller baseret på ressourceeffektivitet. Samtidig accelererer udviklingen globalt med nye pyrolyseteknologier, standarder og markedsplatforme, hvilket gør området til et hotspot for innovation og investering.

For at sikre den fortsatte udvikling frem imod en mere robust platform til etablering af en mere cirkulær og biobaseret økonomi kræves yderligere modning – både teknologisk og i forhold til anvendelse i praksis, yderligere skalering og standardisering – etablering af robuste produktionskapaciteter og fælles kvalitetsstandarder, yderligere arbejde med at sikre gennemsigtighed, troværdighed, dokumentation og relevant certificering – troværdige data om klimaeffekt og produktkvalitet for at sikre markedsaccept, yderligere arbejde med tværsektorielt samarbejde – kobling mellem landbrug, energi, affaldshåndtering og industri for at realisere den fulde værdikæde, og yderligere idé- og produktudvikling.

Med sådanne tiltag samt nysgerrighed, vilje til omstilling og de lange briller på i beslutningsprocesser, kan biokul gå fra lovende teknologi til en integreret del af fremtidens bæredygtige økonomi.

Kilder

- ⁱ Samling af resultats-rapporter fra Råst til Bäst projektet <https://biokol.org/rapporter>
- ⁱⁱ Fra EBC guidelines til certificering, version 10.4 E fra december 2024 <https://www.european-biochar.org/en/ct/2-EBC-and-WBC-guidelines-documents>
- ⁱⁱⁱ Introduktions- og statusrapport omkring produktion og anvendelse af biokul fra et dansk perspektiv i 2022, kapitel 1 <https://forskning.ruc.dk/da/publications/introduction-to-production-and-use-of-biochar-2022-working-toward>
- ^{iv} Rapport fra Greater Bio projektet der screener udvalgte kommunale, marginale biomasser for mulig værdiskabelse (klimafokus) ved pyrolyse <https://forskning.ruc.dk/da/publications/screening-af-kulstoflagring-og-energi-potentiale-fra-pyrolyse-af-k>
- ^v ii) Et remake præsenteret første gang i <https://forskning.ruc.dk/da/publications/introduction-to-production-and-use-of-biochar-2022-working-toward> baseret på arbejde fra cornel University (n.d.) *Biochar soil management*, fundet på <https://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/research/biochar/biocharmain.html>
- ^{vi} Introduktions- og statusrapport omkring produktion og anvendelse af biokul fra et dansk perspektiv i 2022, kapitel 5: <https://forskning.ruc.dk/da/publications/introduction-to-production-and-use-of-biochar-2022-working-toward>
- ^{vii} <https://forskning.ruc.dk/da/publications/short-survey-political-regulation-of-biochar-production-and-use-i/>
- ^{viii} <https://www.european-biochar.org/en/>
- ^{ix} <https://www.kefm.dk/Media/638638923282563772/Strategi%20og%20arbejdsprogram%20for%20pyrolyse.pdf>
- ^x <https://www.naturvardsverket.se/vagledning-och-stod/branscher-och-verksamheter/forbranningsanlaggningar/> og <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/regler-om-byggande-boverkets-byggregler/forbranningsgaser/>
- ^{xi} <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02019R1009-20240703> (2024 update)
- ^{xii} <https://www.biochareurope.eu/resources/sewage-sludge-as-feedstock-for-pyrolysis-and-gasification-materials>
- ^{xiii} <https://icoel.dk/klima/biokul-godkendt-som-goedning-der-kan-udbringes-hele-aaret/>
- ^{xiv} <https://regler.krav.se/unit/krav-regulation/98188670-afc6-4672-86e7-7e8dcdbd48b8;jsessionid=988A7046AABB6D0303A09B9A46F646A4>
- ^{xv} <https://www.european-biochar.org/en/c-sink>
- ^{xvi} <https://puro.earth/certify-your-carbon-removal>
- ^{xvii} Publikationer fra det store, svenske biokul-projekt Rest til Bäst: <https://biokol.org/publikationer>, artiklen ”The 55 uses of biochar” af Hans-Peter Schmidt & Kelpie Wilson: <https://www.biochar-journal.org/en/ct/2>, IBI & USBI’s Global Biochar Market Report 2023: <https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2024/06/Global-Biochar-Market-Report-2023-%E2%80%93-Public.pdf>
- ^{xviii} Martin, A., 2025. Utilization of local biomass resources in integrated an-aerobic digestion-pyrolysis biorefineries in a circular bioeconomy context. Roskilde Universitet, Trekroner.
- ^{xix} Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), 2024. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation, 3rd ed. Routledge, London. <https://doi.org/10.4324/9781003297673>
- ^{xx} Vayena, G., Ghofrani-Isfahani, P., Ziomas, A., Grimalt-Alemany, A., Lin, M.K.T.H., Ravenni, G., Angelidaki, I., 2024. Impact of biochar on anaerobic digestion process and microbiome composition; focusing on pyrolysis conditions for biochar formation. Renewable Energy 237, 121569. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121569>
- ^{xxi} Giwa, A.S., Zhang, X., Xu, H., Vakili, M., Yuan, J., Wang, K., 2020. Pyrolyzed waste stream and biochar performance evaluation in food waste anaerobic digestion. Clean Techn Environ Policy 22, 1199–1211. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01862-7>
- ^{xxii} Blanco-Canqui, H., 2017. Biochar and Soil Physical Properties. Soil Science Society of America Journal 81, 687–711. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>
- ^{xxiii} Singh Yadav, S.P., Bhandari, S., Bhatta, D., Poudel, A., Bhattarai, S., Yadav, P., Ghimire, N., Paudel, Prava, Paudel, Pragya, Shrestha, J., Oli, B., 2023. Biochar application: A sustainable approach to improve soil health. Journal of Agriculture and Food Research 11, 100498. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100498>
- ^{xxiv} Blanco-Canqui, H., 2017. Biochar and Soil Physical Properties. Soil Science Society of America Journal 81, 687–711. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>

-
- ^{xxv} Islam, M.U., Jiang, F., Guo, Z., Peng, X., 2021. Does biochar application improve soil aggregation? A meta-analysis. *Soil and Tillage Research* 209, 104926. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104926>
- ^{xxvi} Hossain, M.Z., Bahar, M.M., Sarkar, B., Donne, S.W., Ok, Y.S., Palansooriya, K.N., Kirkham, M.B., Chowdhury, S., Bolan, N., 2020. Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. *Biochar* 2, 379–420. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00065-z>
- Kumar, A., Bhattacharya, T., Mukherjee, S., Sarkar, B., 2022. A perspective on biochar for repairing damages in the soil–plant system caused by climate change-driven extreme weather events. *Biochar* 4, 22. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00148-z>
- Kumar, A., Bhattacharya, T., Shaikh, W.A., Roy, A., 2024. Sustainable soil management under drought stress through biochar application: Immobilizing arsenic, ameliorating soil quality, and augmenting plant growth. *Environmental Research* 259, 119531. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119531>
- ^{xxvii} Jagadeesh, N., Sundaram, B., 2023. Adsorption of Pollutants from Wastewater by Biochar: A Review. *Journal of Hazardous Materials Advances* 9, 100226. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100226>
- Martin, A.D., Ravenni, G., Thomsen, T.P., 2025. Low-cost hydrogen sulfide removal with biochar and activated biochar. *Next Research* 2, 100286. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100286>
- ^{xxviii} Bamdad, H., Hawboldt, K., MacQuarrie, S., 2018. A review on common adsorbents for acid gases removal: Focus on biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, 1705–1720. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.261>
- Jagadeesh, N., Sundaram, B., 2023. Adsorption of Pollutants from Wastewater by Biochar: A Review. *Journal of Hazardous Materials Advances* 9, 100226. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100226>
- Martin, A.D., Ravenni, G., Thomsen, T.P., 2025. Low-cost hydrogen sulfide removal with biochar and activated biochar. *Next Research* 2, 100286. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100286>
- Mei, Y., Zhuang, S., Wang, J., 2025. Adsorption of heavy metals by biochar in aqueous solution: A review. *Science of The Total Environment* 968, 178898. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178898>
- ^{xxix} Martin, A.D., Ravenni, G., Thomsen, T.P., 2025. Low-cost hydrogen sulfide removal with biochar and activated biochar. *Next Research* 2, 100286. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100286>
- ^{xxx} Crop-residues derived biochar: Synthesis, properties, characterization and application for the removal of trace elements in soils of Muhammad Haris, Yasir Hamid, Muhammad Usman, Lei Wang, Atif Saleem, Fang Su, JunKang Guo and Yongtao Li. *Journal of Hazardous Materials* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126212>
- ^{xxxi} Functional Biochar and Its Balanced Design of Peng Zhang, Wenyan Duan, Hongbo Peng, Bo Pan and Baoshan Xing. *ACS Environmental* 2021. <https://doi.org/10.1021/acsenvironau.1c00032>
- ^{xxxi} Crop-residues derived biochar: Synthesis, properties, characterization and application for the removal of trace elements in soils of Muhammad Haris, Yasir Hamid, Muhammad Usman, Lei Wang, Atif Saleem, Fang Su, JunKang Guo and Yongtao Li. *Journal of Hazardous Materials* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126212>
- ^{xxxi} Sun, J., Jayakumar, A., Díaz-Maroto, C.G., Moreno, I., Feroso, J., Mašek, O., 2024. The role of feedstock and activation process on supercapacitor performance of lignocellulosic biochar. *Biomass and Bioenergy* 184, 107180. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107180>
- ^{xxxi} Prabakar, P., Mustafa Mert, K., Muruganandam, L., Sivagami, K., 2024. A comprehensive review on biochar for electrochemical energy storage applications: an emerging sustainable technology. *Front. Energy Res.* 12. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1448520>
- Shyam, S., Daimary, M., Narayan, M., Sarma, H., 2025. Biochar-based electroanalytical materials: Towards sustainable, high-performance electrocatalysts and sensors. *Next Materials* 8, 100873. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.100873>
- ^{xxxi} Prabakar, P., Mustafa Mert, K., Muruganandam, L., Sivagami, K., 2024. A comprehensive review on biochar for electrochemical energy storage applications: an emerging sustainable technology. *Front. Energy Res.* 12. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1448520>
- ^{xxxi} Hristea, G., Iordoc, M., Lungulescu, E.-M., Bejenari, I., Volf, I., 2024. A sustainable bio-based char as emerging electrode material for energy storage applications. *Sci Rep* 14, 1095. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51350-x>