

SCREENING AF KULSTOFFLAGRING OG ENERGIPOTENTIALE FRA PYROLYSE AF KOMMUNALE BIOMASSER

- Metodetest og indledende forsøg

Af Tobias Pape Thomsen og
Andreas Dyreborg Martin

September 2022



SCREENING AF KULSTOFLAGRING
OG ENERGIPOTENTIALE FRA
PYROLYSE AF KOMMUNALE BIOMASSER
- Metoder og indledende forsøg

Af Tobias Pape Thomsen og
Andreas Dyreborg Martin

September 2022

Roskilde Universitet
Institut for Mennesker og Teknologi
Universitetsvej 1, 4000 Roskilde
Bygning 02

Kontakt: tpapet@ruc.dk

Forfatterne har copyright til alle billeder og figurer.

Arbejdet er udført i udviklingsprojektet Greater Bio
og støttet af Interreg ØKS.

Tak til projektets mange partnere, og i særdeleshed
til NSR, Lejre Kommune, Sustainable Business Hub,
Gate 21, Trelleborg kommun og BOFA for hjælp med
identifikation og indsamling af biomasse.

Indhold

Formål og tilgang	2
Indsamling og forberedelse af biomasser	4
Tilpasning og opsætning af pyrolyseproces	7
Pyrolyseforsøg og resultater	9
Analyse af kulstofindhold og brændværdi	11
Energi-, masse- og kulstofbalancer og vurdering af PyCCS-potentialer og mulige produktion af bio-energi. 13	
Førstehåndskonklusioner og anbefalinger til videre arbejde.....	16
Litteratur.....	18

Formål og tilgang

I denne rapport undersøges udvalgte aspekter af mulig værdiskabelse ved indsamling og pyrolyse af kommunale biomasser i Danmark og Sverige. Pyrolyse er en termokemisk proces hvor organisk materiale nedbrydes under opvarmning til temperaturer over 350 °C i en atmosfære med lidt eller ingen ilt se. For mere information se fx Basu, 2013; Jahirul et al., 2012 eller Lehmann & Joseph, 2012. Pyrolyseprocesser sker også under forbrænding, men ved kontrollerede pyrolyseprocesser sker forbrændingsprocesserne til gengæld ikke og der produceres biokul og pyrolysegas/pyrolyseolie, mens der ved forbrænding produceres aske, varme og røggas. En illustration af hvad der sker under opvarmning af biomasse i en pyrolysereaktor med kun lidt eller ingen ilt til stede er bibragt i Figur 1.



Figur 1: Illustration af effekten af at opvarme biomasse/organisk materiale i en atmosfære uden ilt. Egen tilvirkning.

Pyrolyse og den medfølgende produktion af biokul har fået stadig mere opmærksomhed over de sidste 10 år og der er i dag eksponentiel vækst i både antallet af videnskabelige publikation om emnet og den årlige produktion af biokul i EU¹. Moderne anlæg til pyrolyse af biomasse har i langt de fleste tilfælde et massivt energioverskud og teknologien er i fokus i forhold til at producere varme, bio-olie og gas baseret på biomasse og organisk affald. Desuden har biokul-produktet ofte et meget højt indhold af kulstof som oprinder fra atmosfærisk CO₂, der er optaget via fotosyntese og stabiliseret i biokullet under pyrolysen. Under pyrolysen omdannes de kemiske bindinger i biomassen og kulstoffet der er tilbage i biokullet er langt sværere at nedbryde for mikroorganismer end kulstoffet i biomassen. Undgår man at brænde eller forgasse biokullet vil det kunne fastholde indholdet af kulstof i hundreder eller tusinder af år. Det er en effekt der betegnes PyCCS – Pyrogenic Carbon Capture and Storage. Der kan læses mere om både pyrolyse, biokul og PyCCS i [EBI Whitepaper 2020: Biochar-based Carbon Sinks to Mitigate Climate Change](#) eller nogen af de

¹ Se mere om udvikling i produktion og anvendelse af biokul i fx [EBI Market Report 2021-2022](#)

mange videnskabelige publikationer fx Cha et al., 2016; Joseph et al., 2021; Lehmann et al., 2021; Leng et al., 2019; Matuščík et al., 2020 eller Tan et al., 2017.

Arbejdet i nærværende rapport fokuserer på udvalgte aspekter omkring indsamling og pyrolyse af kommunale biomasser i Greater Bio-projektet. Det bør betragtes som et indledende studie der har to primære formål:

- Arbejdet skal give indikationer på hvor niveauet for mulig værdiskabelse fra pyrolyse af forskellige kommunale biomasser kan forventes at ligge mht energiproduktion og PyCCS (Pyrogenic Carbon Capture and Storage), samt hvordan denne værdiskabelse varierer med typen af biomasse
- Arbejdet skal bruges til at undersøge og udvikle metoder og procesmæssige/eksperimentelle opsætninger og føre frem til anbefalinger for hvordan en mere fuldstændig screening og analyse af værdiskabelse fra pyrolyse af kommunale biomasser bør designes og udføres

I dette studie dækker ordet værdiskabelse primært over effekter der bidrager til at modvirke klimakrisen samt øge produktionen af ikke-fossil energi baseret på lokale og regionale biomasser der ikke i dag er i værdioptimeret anvendelse.

Arbejdet er gennemført som et indledende, sammenhængende studie baseret på erfaring fra tidligere projekter med screening af biomasse til energianvendelse (Thomsen et al., 2015). Proces og resultater er efterfølgende blevet evalueret og erfaringer og anbefalinger ekstraheret. Arbejdet er baseret på følgende aktiviteter:

- Kontakt og sparring med samarbejdspartnere om interesse for pyrolyse af udvalgte biomasser
- Indsamling og forberedelse af biomasse til pyrolyseforsøg
- Fotodokumentation af biomassernes beskaffenhed efter tørring
- Opsætning, test og udvikling af udstyr til laboratorie-skala pyrolyse
- Pyrolyseforsøg i laboratorieskala og bestemmelse af biokul-udbytte
- Fotodokumentation af det producerede biokul efter pyrolyse
- Neddeling af tør biomasse og biokul til analyse
- Bestemmelse af kulstofindhold og brændværdi i biomasse og biokul
- Beregning af energi-, masse og kulstofbalancer samt estimering af PyCCS-potentialer
- Evaluering og anbefalinger til forbedringer og udbygning.

Det er forventningen i projektkonsortiet i Greater Bio at der skal følges op på nærværende arbejde i et eller flere efterfølgende samarbejdsprojekter med fortsat fokus på kommunalt orienteret biomasseanvendelse og afledt værdiskabelse i et system- og samfundsperspektiv.

Indsamling og forberedelse af biomasser

Der er indsamlet 10 kommunale biomasser fra samarbejdspartnere i Greater Bio projektet til pyrolyseforsøg. En liste over biomasser med nummer, type, indsamlingssted, indsamlingstidspunkt og relevant samarbejdspartner er inkluderet i Tabel 1.

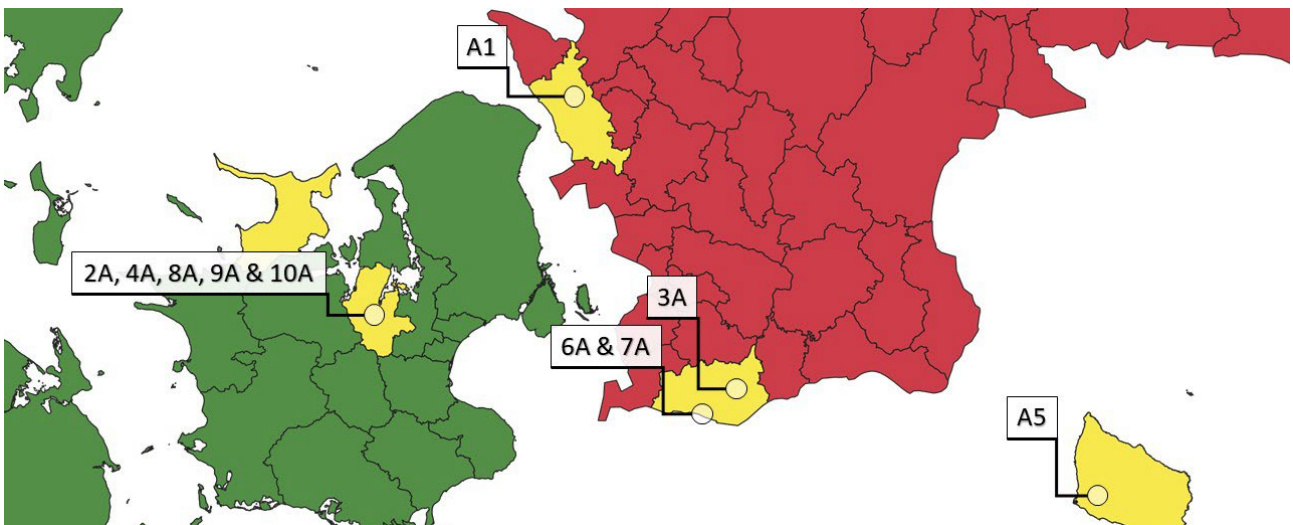
Tabel 1: Oversigt over de Greater Bio biomasser der er inkluderet i pyrolyseforsøg

#	Type	Indsamlingssted	Indsamlingstidspunkt	Samarbejdspartner
1A	Flis fra Have-park affald	Leveret af NSR	Maj, 2021	Nordvästra Skånes Renhållnings AB (NSR)
2A	Vejgræs	Vejkant	Maj, 2021	Lejre Kommune
3A	Vejgræs	Vejkant	Juni, 2021	Sustainable Business Hub
4A	Græs bæredygtige arealer	Offentligt græsområde	November, 2020	Lejre Kommune
5A	Madaffald	Restaurant	Juni, 2022	BOFA
6A	Tang	Indsamlet tørt fra stranden	Juni, 2022	Trelleborgs kommun
7A	Tang	Indsamlet vådt fra vandkanten	Juni, 2022	Trelleborgs kommun
8A	Grødeskær	Vandløb	Juni, 2021	Lejre Kommune
9A	Grødeskær	Vandløb	November, 2020	Lejre Kommune
10A	Sediment fra gadekær	Gadekær	Oktober, 2020	Lejre Kommune

Der er indsamlet imellem 20 og 60 liter af de forskellige biomasser. Billeder fra nogen af indsamlingsaktiviteterne er samlet i en kollage i Figur 2. Biomasserne er indsamlet forskellige steder i Danmark og Sverige. Et kort over indsamlingsstederne er inkluderet i Figur 3.



Figur 2: Billeder fra klipning og indsamling af nogen af de kommunale biomasser i Greater Bio projektet. 1 & 2: Græs fra bæredygtige arealer/ grønne arealer i Lejre. 3: Vejgræs i Sverige. 4 & 5: Grødeskær i Lejre. 6 & 7: Vejgræs i Lejre. 8 & 9: Sediment fra gadekær i Lejre.



Figur 3: Kort over indsamlingssteder, 10 kommunale biomasser. Navnekoder kan ses i Tabel 1.

Det indsamlede biomasse er blevet tørret ved 104 C i mindst 24 timer for at stabilisere materialet og gøre det egnet til pyrolyse og neddeling. Det indsamlede madaffald er desuden blevet blendet grundigt for at forbedre muligheden for at kunne udtage repræsentative del-prøver. Nedenfor i Figur 4 er vist billeder af de indsamlede biomasser efter tørring.

1A: Flis fra Have-park affald



2A: Vejgræs



3A: Vejgræs



4A: Græs, bæredygtige arealer



5A: Madaffald



6A: Tang, stranden



7A: Tang, vandkant



8A: Gødeskær



9A: Grødeskær



10A: Sediment fra gadekær

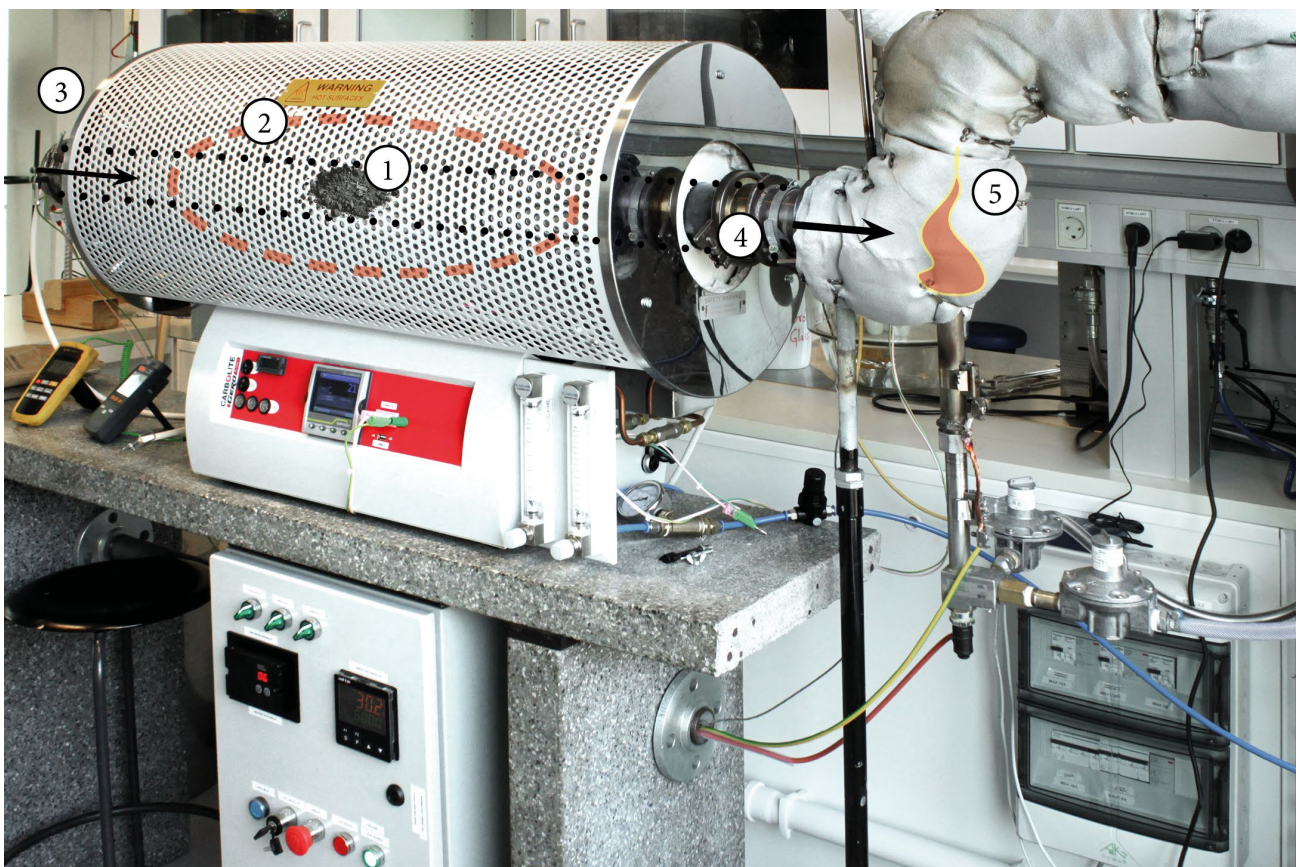


Figur 4: Billeder af de 10 indsamlede kommunale biomasser efter tørring

Tilpasning og opsætning af pyrolyseproces

Til studiet er RUC IMT's pyrolyseovn blevet anvendt. Ovnens er en CarboliteGero gha 12/750 rør-ovn med en kvarts-rør reaktor og en effekt på 4.7 kW. Ovnens er tilsluttet en eurotherm regulator, N₂, trykluft og en propangasbrænder til afbrænding af pyrolysegassen. Biokul er det eneste produkt fra processen.

På illustrationen i Figur 5 er ovnen vist. Biomassen placeres inde i kvartsrør-reaktoren der går igennem ovnen (1). Den varme zone spænder over næsten 1 m rør (2). I den kolde ende tilsluttes N₂ for at fjerne ilt fra prøven og reaktoren og senere for at skubbe pyrolysegas ud af reaktoren ("sweep gas", 3). I den varme ende er der gasafgang (4) til en propangasbrænder (5) som fører til en skorsten med et elektrisk sug der sikrer et jævnt træk og flow igennem systemet og desuden er med til at begrænse lugtgener og sikre effektiv afbrænding af røggas. Den varme ende (4) pakkes under drift i isolering og holdes varm (ca 450°C) med ekstern varmekilde for at undgå tjærekondensering. Der er i opstartsfasen arbejdet rigtig meget med at sikre effektiv og konstant afbrænding af pyrolysegas, undgå lugtgener i laboratoriet og undgå at tjære kondenserer ud i sektionen imellem pyrolysereaktoren og gasafbrænding.



Figur 5: Billede af RUC IMT's pyrolyseovn, CarboliteGero gha 12/750 installeret i RUC INM's laboratorier

I dette projekt blev ovnen efter en række indledende forsøg indstillet til en opvarmingshastighed på 10 °C/minut fra stuetemperatur til en maksimumtemperatur på 600 °C. Der blev konstateret et mindre

overshoot under opvarmningen i alle forsøg som gjorde at temperaturen inde i reaktoren typisk nåede 610-615 °C i en kortere periode inden den blev stabil omkring 600 °C ± 5 °C. Temperaturer over 600 °C blev holdt i 30 minutter inden oven blev slukket med efterfølgende passiv afkøling over et par timer.

Under pyrolyseprocessen blev der konstant tilført 5 L N₂/min i den kolde ende af rør-reaktoren. Inden opvarmningen blev påbegyndt blev systemet også skyllet med 5 L N₂/min i 30 minutter. Dette blev gjort efter at prøverne var placeret i reaktoren og systemet lukket således at det meste ilt var fjernet inden opvarmningen begyndte.

Mængden af biomasse der blev behandlet varierede med bulk-densitet. Græs, grøde og tør tang har en meget lav bulk-densitet og der kunne således ikke pakkes mere end ca 100 g tør prøve. Madaffald, sediment, hav-park affald og våd tang havde en højere bulk-densitet og der kunne således opereres med mere masse i ét forsøg. Prøverne blev pakket i aluminiumsbåde hvilket er almindelig praksis for pyrolyse ved temperaturer op til ca 620 °C. Der er kun kørt én repetition på hver biomasse.

Pyrolyseforsøg og resultater

I Figur 6 er indsat billeder af de biokulprodukter der blev produceret ved pyrolyse af 10 forskellige kommunale biomasser i Greater Bio projektet. Ingen af prøverne gav anledning til bekymring ift sintring/sammenklistring eller tegn på heftig kogning i reaktoren.



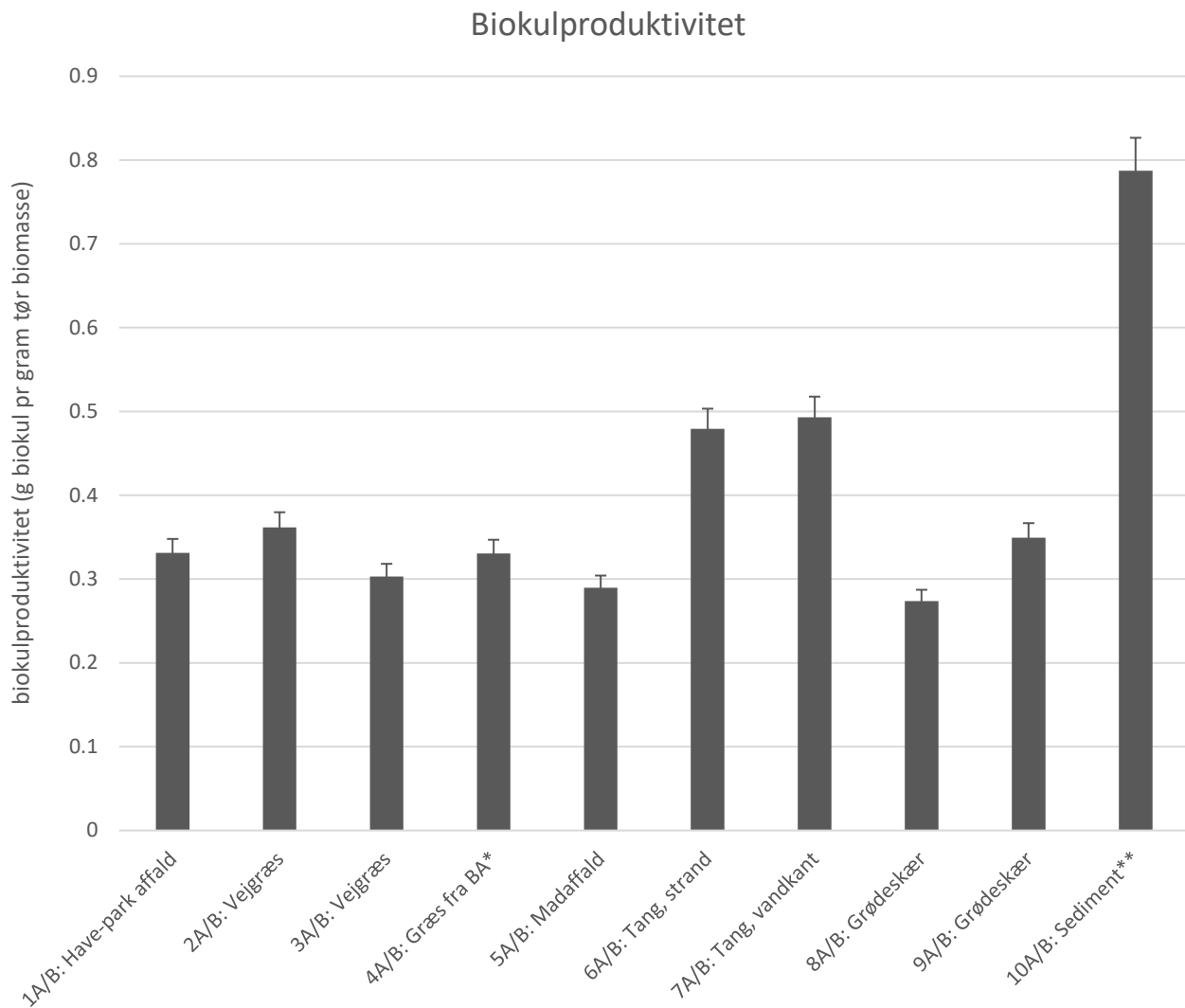
Figur 6: Billeder af biokulprodukter fra pyrolyse af 10 forskellige kommunale biomasser

På baggrund af vægten af biomasse inden pyrolysen og vægten af biokul efter pyrolysen bestemmes biokulproduktiviteten som *gram biokul per gram tør biomasse (g/g)*. Resultaterne er gengivet i Figur 7.

Der er ikke nogen afgørende forskel i biokul-udbyttet fra pyrolyse af have-park affald, græs-biomasser og grøde. Til gengæld er markant højere for tangprøverne, der begge indeholdt både sand, stykker af skaller og mindre sten hvilket er med til at øge vægten af biokul-produktet.

Sedimentet har et meget stort indhold af sand og andet uorganisk materiale hvilket medførte et meget begrænset vægttab i pyrolysen. Udbyttet af biokul bruges sammen med analyser af kulstofindhold til at

give et overslag på PyCCS-effekten mens udbyttet bruges sammen med analyser af brændværdi af biomasse og biokul til at vurdere energiindholdet i pyrolysegas-produktet.



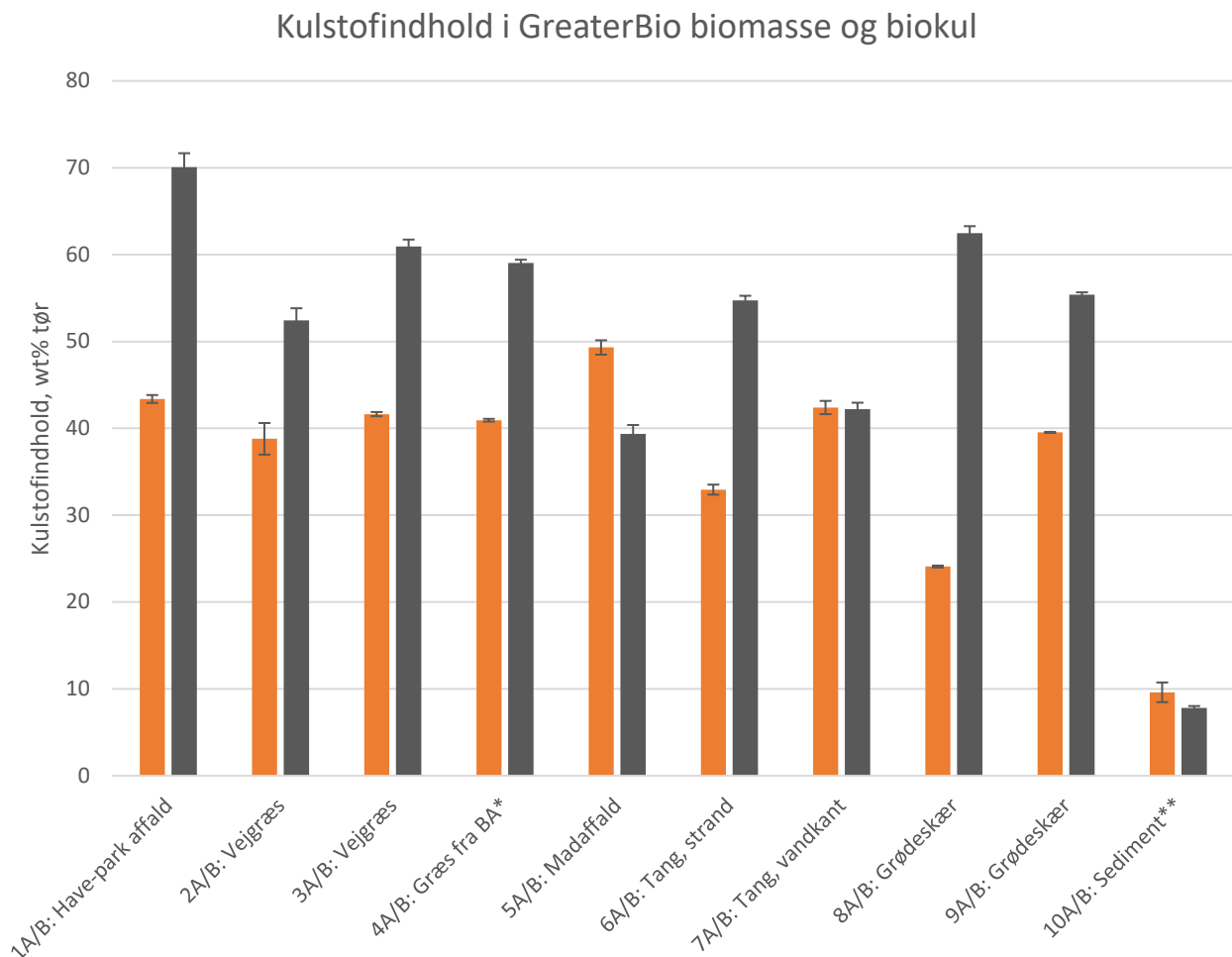
Figur 7: Biokulproduktivitet fra GreaterBio biomasser ved 600 C pyrolyse, 10 C/min opvarmingshastighed og 30 min opholdstid. N₂ sweep er 5 L/min. Der er kun lavet én repetition på hver biomasse, og det vurderes på baggrund af biomassernes beskaffenhed og de relativt små prøver at usikkerhederne i resultaterne er forholdsvis store. Resultaterne er angivet med en formodet usikkerhed på +/- 5%, men det bør undersøges med en række yderligere repetitioner på de samme biomasser. *Græs fra Bæredygtige arealer. **sediment fra oprensning af gadekær.

Analyse af kulstofindhold og brændværdi

Der er blevet bestemt kulstofindhold i alle biomasser og biokulprøver samt brændværdi i alle prøver bortset fra sediment (A10) og biokul herfra (B10). Energiindholdet i sedimentet og det afledte kul var for lavt til analysemetoden hvilket samtidig gør det mindre relevant at undersøge videre ift mulig anvendelse til energiproduktion. Resultater fra analyse af kulstofindhold og brændværdi vises i Figur 8 og Figur 9.

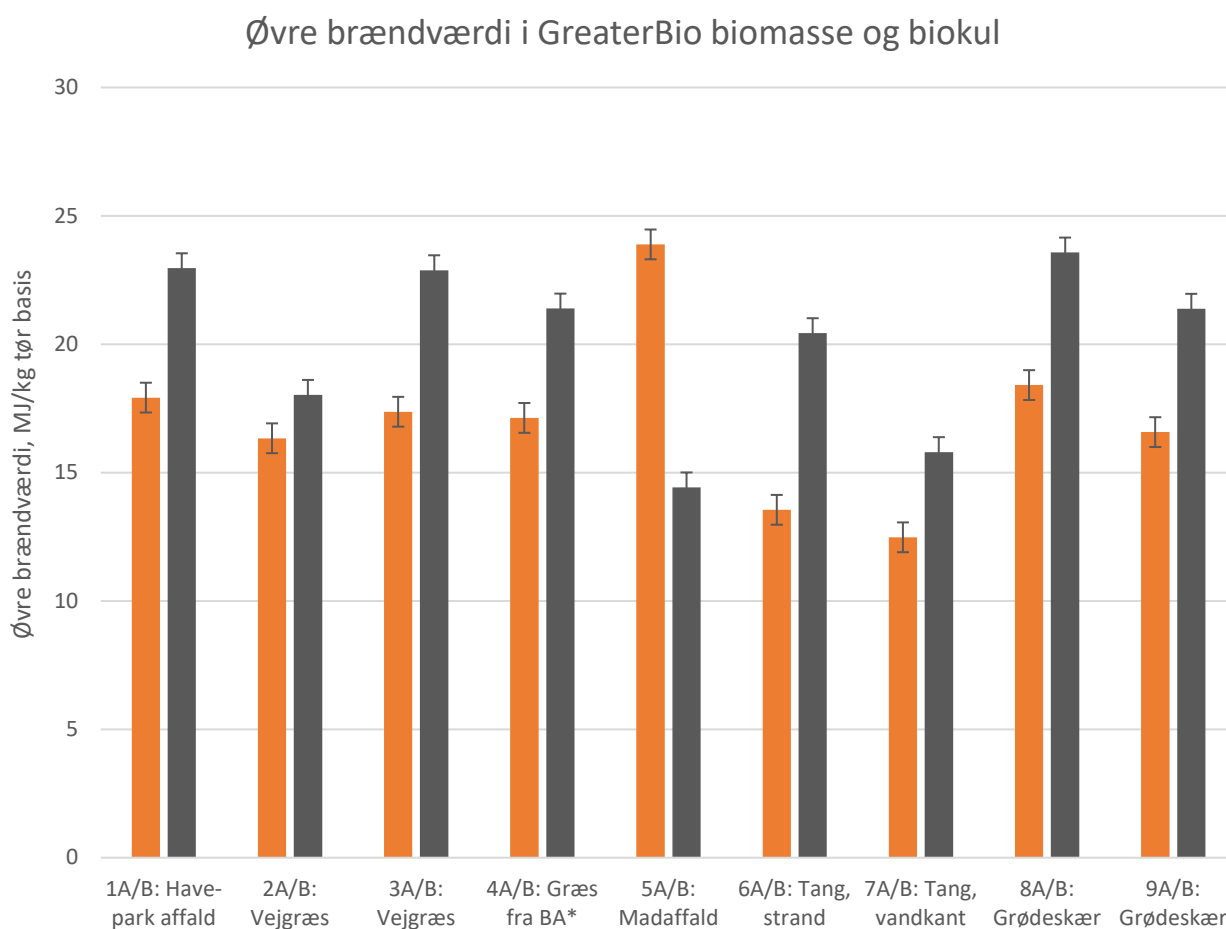
Både biomasser og biokulprøver blev neddelte inden videre analyse. Biomasseprøver blev neddelte i en lille slagmølle og biokulprøver blev knust i en morter.

Kulstofindhold af biomasser og biokulprøver blev bestemt på en Eltra - Carbon/Sulfur Analyzer - CS-580 ejet af RUC INM. Analysen blev lavet i triplikater. I denne analyse brændes prøven ved høje temperaturer over 1300 °C og der anvendes relativt store prøvemasser op til 0.2 g hvilket giver robuste resultater selv med relativt heterogene prøver.



Figur 8: Kulstofindhold (angivet i procent af tør masse) i GreaterBio biomasser (orange) og biokul (grå) fra pyrolyse heraf.

Brændværdi (øvre) blev bestemt på et Parr 6300 Bomb Calorimeter ved afbrænding i ren ilt ved ca 35 bar. Relativt store prøver på 0.5-1 g blev anvendt ved analysen. Der er kun lavet én bestemmelse på hver prøve bortset fra B1 hvor der er lavet 3 bestemmelser. Variationen i B1-analyserne bruges til at estimere usikkerheden i de andre prøver. Da B1 er væsentlig mere homogen end visse andre prøver vurderes det at der er risiko for at denne tilgang at undervurderer usikkerhed i nogen af de andre resultater.



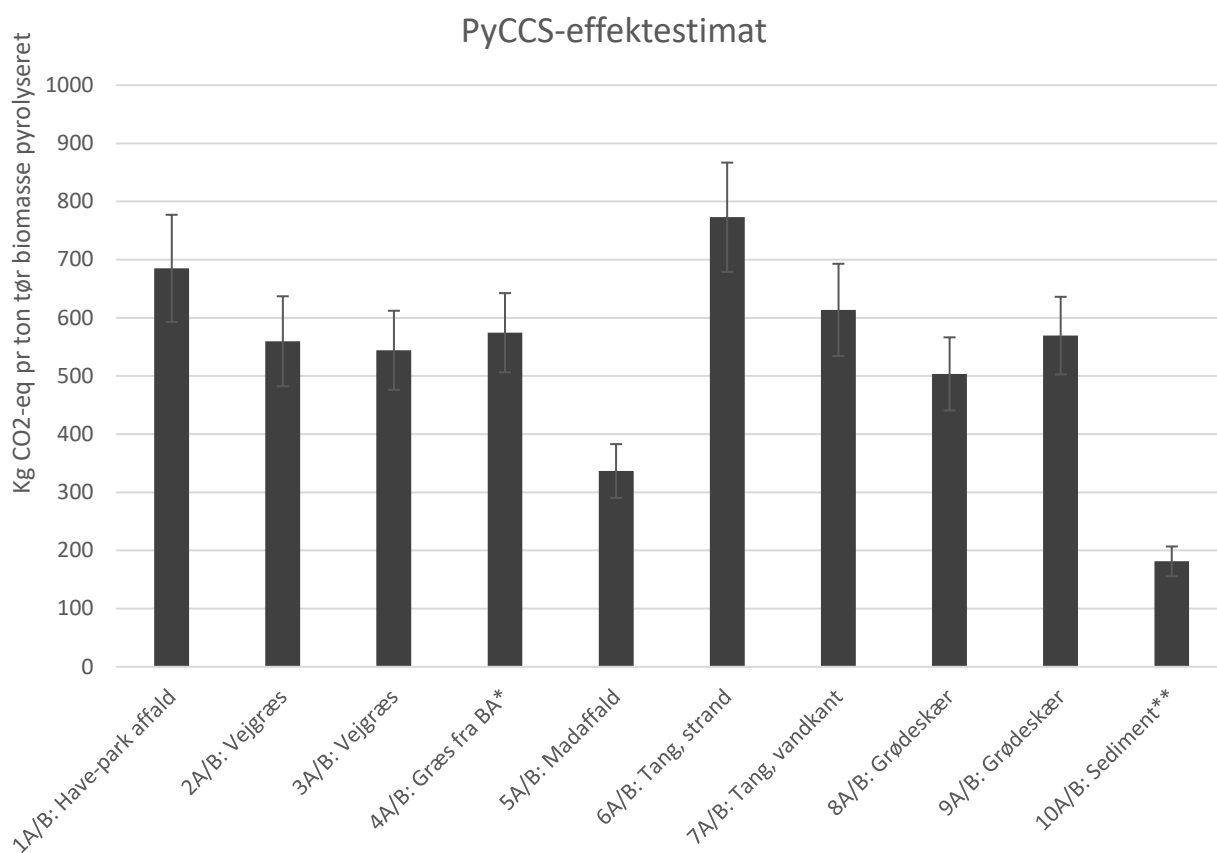
Figur 9: Øvre brændværdi (angivet i MJ pr kg tør masse) i 9 ud af 10 GreaterBio biomasser (orange) og biokul (grå) produceret heraf.

Madaffald-prøven skiller sig ud fra resten med et omvendt forhold imellem det specifikke energiindhold i ét kg biomasse over for det specifikke energiindhold i ét kg biokul produceret heraf. Hvor det typiske billede er at energitætheden i biokullet er højere end i biomassen så er det omvendte tilfældet for madaffald hvilket typisk indikerer et højt indhold af let omsætteligt materiale med høj brændværdi fx fedt, olie og/eller plast som PE, PP osv. I det pågældende tilfælde er det madaffaldets høje indhold af fedt og olier der – kombineret med et udtalt uorganisk indhold/aske, giver en højere brændværdi af madaffald før pyrolyse sammenlignet med det producerede biokul.

Energi-, masse- og kulstofbalancer og vurdering af PyCCS-potentialer og mulige produktion af bio-energi

Baseret på analyser af biokulproduktion, kulstofindhold og brændværdi kan der udledes nogen simple energi-, masse- og kulstofbalancer henover pyrolysen. Disse kan efterfølgende bruges til at estimere hvor stort et potentiale der vil være for henholdsvis produktion af bio-energi og sekvestrering af atmosfærisk kulstof i biokullet (PyCCS) ved pyrolyse af de forskellige biomasser og efterfølgende tilførsel af det producerede kul til jord (landbrugsjord, by-træer, skovbrug, haver etc.). Resultater af disse to beregninger er gengivet i Figur 10 og Figur 11.

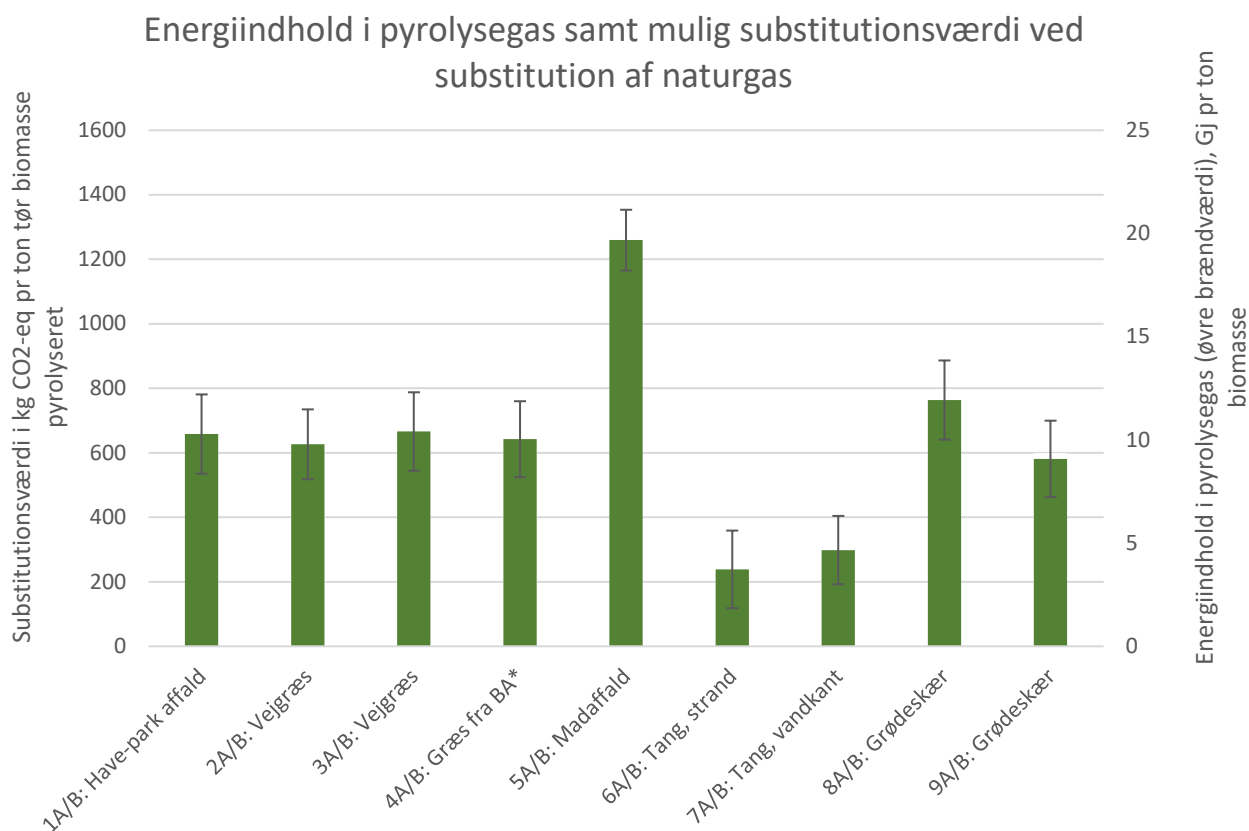
Der er ikke bestemt brint-indhold i biokul-produkterne pga manglende adgang til analyseudstyr. Brint-analyser bruges typisk sammen med kulstofindhold og gennemsnitstemperatur i jorden til at vurdere PyCCS-potentialet ved at modellere hvor meget kulstof der vil være tilbage i biokullet efter 100 år se fx (Woolf et al., 2021). Pga de manglende brint-bestemmelser er der i nærværende estimat brugt et spæn fra 75 til 85% kulstof-stabilitet over 100 år hvilket i en dansk/svensk kontekst (med relativt lave jordtemperaturer) vil være realistisk for mange moderne og stabilitets-optimerede pyrolyseprocesser. Spændet i forventet kulstofstabilitet er brugt sammen med usikkerheder for kulstofbestemmelse og biokulproduktivitet til at fastlægge de angive usikkerhedsbarer.



Figur 10: Estimat af PyCCS-potentiale ved pyrolyse af Greater Bio biomasser. Potentialet er angivet i kg CO₂e pr ton tør biomasse der pyrolyseres.

På baggrund af disse resultater vurderes der at være et væsentligt potentiale for at indfange og binde atmosfærisk kulstof via pyrolyse af de fleste af de undersøgte danske og svenske kommunale biomasser og efterfølgende tilførsel af det producerede biokul til jord. Ved pyrolyse af 1 ton tørt, forbehandlet flis fra have-park affald eller 1 ton tør tang fra stranden vurderes det at der kan bindes 700 - 800 kg CO₂ i en 100 års horisont. Det skal nævnes at den indsamlede, tørre tangprøve ved pyrolysen havde et meget lavt sandindhold pga den måde prøven er opbevaret, tørret og flyttet rundt på i laboratoriet. Derfor forventes PyCCS-potentialet for tang typisk at være lavere pr ton tørstof med mindre der gøres tiltag til at reducere sandindhold. I den lave ende af spektret ligger madaffald og sediment fra gadekær. Madaffald indeholder en stor andel af let omsætteligt kulstof og det vurderes at kun kulstof svarende til omkring 300 kg CO₂e kan sekvestreres ved pyrolyse af 1 ton tør madaffald. Sediment fra gadekær indeholder rigtig meget sand og andet uorganisk materiale og meget lidt kulstof. Det vurderes dog stadig at der kan bindes en kulstofmængde svarende til 150-200 kg CO₂ over 100 år ved pyrolyse af 1 ton tørt sediment.

Nedenfor ses en vurdering af energiindhold i pyrolysegas, regnet på basis af energi- og masse-balancer ud fra en antagelse om at det energi der ikke forefindes som brændværdi i biokullet kan forefindes som enten varme eller kemisk brændværdi i pyrolysegassen. Desuden vises en hypotetisk substitutionsværdi der viser klimaeffekten hvis den komplette energimængde i pyrolysegassen erstatter naturgas 1:1 med en klimaintensitet på naturgas på 66 kg CO₂e pr GJ (Netherlands Enterprise Agency, 2021).



Figur 11: Estimat af potentiel energi-produktion fra pyrolyse af tørre, kommunale biomasser og substitutionsværdien heraf under antagelse af at energien bruges til at substituere naturgas.

Ovenstående viser energiindhold og dertilhørende substitutionsværdi i pyrolysegassen fra pyrolyse af en tør biomasse. Substitutionsværdien er meget markant, særligt for pyrolyse af tørt madaffald. I mange systemer vil der imidlertid være et mindre energioverskud end vist her da en mindre del af energi går til at drive pyrolysen (varme biomasse, endoterme reaktioner) og tab til omgivelser fra den høje temperatur af biokullet. Desuden vil der i mange tilfælde være behov for at bruge en del af denne energi til tørring eller alternativt trække et input af el eller varme ind udefra. Det vil også være tilfældet for madaffald der typisk indeholder store mængder vand. Bruges varme fra pyrolysen til tørring så vil meget vand i biomassen som tommelfingerregel betyde at det meste energi der produceres vil være i form af varme ved relativt lave temperaturer og det vil kun i sjældne tilfælde have samme høje substitutionsværdi som den varme der kan trækkes ud fra en pyrolyse af tørre biomasser. Der er dog også systemer som kører med for-tørret biomasse i el-opvarmede pyrolyseanlæg. I sådanne tilfælde vil der være behov for et væsentligt input af elektricitet udefra evt i kombination med varme fra eksterne forbrændingsprocesser.

Der er meget markante forskelle på vurderingen af energipotentialer i pyrolysegassen og den tilhørende substitutionsværdi. Noget af forskellen kan forklares af typiske forskelle imellem biomasserne. For eksempel giver det høje indhold af let omsætteligt organisk materiale i madaffald – herunder meget fedt og olie, et højt energiindhold i biomassen og et lavt energiindhold i biokullet. Det medfører en stor mængde energi i pyrolysegassen og en høj potentiel substitutionsværdi. Et så væsentligt indhold af olie og fedt findes ikke i nogen andre af de undersøgte prøver, og forskellene imellem madaffald og de andre prøver i denne sammenhæng, udtrykkes også i Figur 9 hvor forholdet imellem energi i biomasse >< biokul er omvendt for madaffald ift alle andre prøver.

Selvom der i dette afsnit regnes på potentielle PyCCS effekter og klimagevinst ved pyrolysebaseret energiproduktion så kan resultaterne ikke lægges sammen til en samlet vurdering af den potentielle klimaeffekt ved pyrolyse af de indsamlede biomasser. Der er kun undersøgt to ud af en lang række datapunkter der vil være nødvendige for at lave sådan en vurdering. Der vil være emissioner forbundet med indsamling, forbehandling (tørring, neddeling), transport og anvendelse. Der er behov for strøm, vand og diverse til pyrolyseprocessen. Der skal tages højde for behandling af evt vand fra afvanding og tørring, påvirkning af gødningsværdi og meget andet. Desuden skal sådan en vurdering altid holdes op imod den nuværende anvendelse/behandling af de forskellige biomasser og klimapåvirkning heraf. Det er væsentligt mere omfattende at vurdere den samlede klimaeffekt af biomassepyrolyse end dette arbejde kan imødekomme. Men de producerede data vil med fordel kunne bruges i udviklingen af et mere komplet studie af denne art.

Førstehåndskonklusioner og anbefalinger til videre arbejde

Der er i Greater Bio projektet foretaget indsamling, forarbejdning, pyrolyse og analyse af 10 kommunale biomasser og lavet estimater af mulig (klimaorienteret) værdiskabelse forbundet med kulstoflagring (PyCCS) og energiproduktion. Arbejdet har vist nogen meget markante potentialer, men der er også blevet identificeret nogen barrierer – både i denne og andre arbejdsplaner.

Lav densitet og koncentration af biomasserne kan være meget fordyrende både ift indsamling og ift bearbejdning og pyrolyse. En biomasse med lav densitet vil øge transportbehov og reducere kapacitet i tørrings- og pyrolyseanlæg da disse typisk er volumenbegrænsede. I græsfasen i projektet blev det desuden konkluderet at indsamling og transport af græs fra vejkanter med de nuværende teknologier, priser og strukturer er en massiv ekstra udgift ift ren afklipning. Densitet vil i nogen tilfælde kunne afhjælpes med komprimering i form af presning til baller eller piller.

I arbejdet med forbehandling og komprimering kan det også blive nødvendigt med neddeling af biomasser med meget lange eller store partikler. Det kan være relevant ifm græs, tang og grøde ligesom en pulpning eller shreddning af madaffald i visse tilfælde vil være nødvendigt.

Sand - og i særdeleshed sten, vil i nogen systemer være en showstopper. Det kan være tilfældet for tang, sediment, have-park affald og græs hvis systemerne ikke indrettes til at undgå dette. Der er dog meget forskel på hvor følsomme forskellige termiske processer er overfor sand mens større sten i de fleste tilfælde må forventes at skulle fjernes fuldstændig.

Affald i biomassen kan ligeledes tænkes at udgøre et problem både for tang, græs fra vejkanter, sediment og have-park affald. Det bør undersøges om plast, papir/pap og tekstil i biomassen påvirker biokulproduktet negativt, for såfremt dette ikke er tilfældet så kan disse elementer sandsynligvis omsættes i pyrolysen og fokus kan i stedet rettes udelukkende imod glas, metal, svært nedbrydelige kompositter etc.

Vandindhold i biomassen kan i mange tilfælde være afgørende for kvaliteten af varmereproduktet, strøm/varmeforbrug til indledende tørring eller en kombination heraf. Kombinationen af biomassens beskaffenhed og pyrolyse-systemets design er afgørende i denne sammenhæng. Der findes mange forskellige system-designs og det er væsentligt at have et overblik over fordele og ulemper når der skal foretages et match imellem en biomasse og en pyrolyseteknologi. Eksempler på forskellige tilgange til tørring er:

- AquaGreen der tørrer med overhødet damp ved atmosfærisk tryk og kan levere meget høj effektivitet på selv meget både biomasser ved samtidig produktion af fjernvarme omkring 90 °C
- Drying matter der tørrer med luft ved lave temperaturer i et varmepumpe-system med et meget lille el-forbrug pr kg vand
- Stiesdal SkyClean som i deres nye anlæg vil tørre med tryksat damp og derved kunne afsætte den anvendte varme fra tørringen med høj effektivitet og ved relativt høje temperaturer op til 150 °C.

Der er i dette studie kun blevet kigget meget indledende på kvalitet og mulig anvendelse af biokullet, og denne del af analysen rummer meget store muligheder for yderligere arbejde og afdækning af endnu højere potentialer for værdiskabelse. De høje hastigheder der lige nu ses og erfares indenfor udvikling af biomassepyrolyse og anvendelse af biokul, medfører at der hele tiden er nye analyser der vil være relevante hvis der skal dækkes meget bredt af indenfor mulig værdiskabelse fra pyrolyse af kommunale

biomasser. Man kan få et indtryk over anvendelsesmuligheder for biokul i EBI's markedsrapport² eller Hans-Peter Schmidts artikel "55 uses of biochar"³. Der er dog også en række mere gennemgående tiltag der kan gøres og som vil kunne bruges til at kvalificere de mere generelle betragtninger herom. Disse inkluderer fx:

- Dokumentere indhold af uønskede bestanddele mere grundigt ved indsamling og efterbehandling, herunder vand/fugt, metal, glas, plast, sand, sten osv.
- Lave pyrolyseforsøg ved flere forskellige opvarmingshastigheder, maksimum-temperaturer og opholdstider (ie forskellige temperaturprofiler)
- Foretage udglødningsforsøg til bestemmelse af askeindhold i biomasser og biokul.
- Bestemme H-indhold i biokul-produkter for at forbedre estimat af PyCCS-potentialer.
- Lave ICP-analyser af biomasser og biokul til at bestemme indhold og eventuelle tab af ikke-fornybare næringsstoffer (fx P, K, Mg osv) og tungmetaller (fx Hg, Cd, Ar osv).
- Lave BET analyser til bestemmelse af biokullets overflade-volumen forhold hvilket kan bidrage til en vurdering af materialets værdi i en række anvendelser fx som erstatning for aktivkul
- Bestemme indhold af PAH'er, dioxin osv som sammen med ICP-analyse af tungmetalindhold kan bruges til at vurdere biokullets mulige toksicitet og anvendelighed i forskellige sammenhænge ud fra lovgivning og grænseværdier på området.
- Sammenskrivning med analyser af fx
 - o Økonomisk feasibility (generelt >> situeret, kontekstafhængigt)
 - o Potentiale- og ressourceanalyser
 - o Analyse af alternative anvendelsesmuligheder - nuværende og fremtidig, både af biomasse, biokul, pyrolysegas osv.
 - o Analyse af værdiskabelse fra pyrolyse af biomasser i kaskadesystemer fx efter at ålegræs har været brugt indledningsvis som isoleringsmateriale eller til emballage.
 - o Analyse af reguleringsmæssige og planlægningsmæssige barrierer og muligheder - lokale/regionale/nationale/EU
 - o Analyse af interessenter og incitament-strukturer
 - o Kvantitativ analyser af klima- og miljøeffekter
- Indsamle bioolie og gas fra pyrolysen til mængde- og kvalitetsanalyse
- Lave forsøg med sammenblanding af biomasser og/eller biomasse og biokul evt som piller inden pyrolysen for at undersøge synergieffekter og katalytiske effekter af kullet
- Storskalaforsøg i kommercielle anlæg fx hos NSR (Biogrene pyrolyse), Odsherred forsyning (AquaGreen pyrolyse), GreenLab Skive (Stiesdal SkyClean pyrolyse) eller Skånefrø (PyREG pyrolyse).
- ...

² [EBI Market Report 2021-2022](#)

³ https://www.researchgate.net/publication/257939693_55_Uses_of_Biochar

Litteratur

- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefraction* (Second Edition). Elsevier Inc. <https://www.sciencedirect.com/book/9780123964885/biomass-gasification-pyrolysis-and-torrefaction>
- Cha, J. S., Park, S. H., Jung, S. C., Ryu, C., Jeon, J. K., Shin, M. C., & Park, Y. K. (2016). Production and utilization of biochar: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *40*, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002>
- Jahirul, M. I., Rasul, M. G., Chowdhury, A. A., & Ashwath, N. (2012). Biofuels production through biomass pyrolysis- A technological review. *Energies*, *5*(12), 4952–5001. <https://doi.org/10.3390/en5124952>
- Joseph, S., Cowie, A. L., van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., Cayuela, M. L., Graber, E. R., Ippolito, J. A., Kuzyakov, Y., Luo, Y., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Shepherd, J., Stephens, S., Weng, Z., & Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, *13*(11), 1731–1764. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12885>
- Lehmann, J., Cowie, A., Masiello, C. A., Kammann, C., Woolf, D., Amonette, J. E., Cayuela, M. L., Camps-Arbestain, M., & Whitman, T. (2021). Biochar in climate change mitigation. *Nature Geoscience*, *14*(12), 883–892. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00852-8>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2012). Biochar for Environmental Management. In *Biochar for Environmental Management*. <https://doi.org/10.4324/9781849770552>
- Leng, L., Huang, H., Li, H., Li, J., & Zhou, W. (2019). Biochar stability assessment methods: A review. *Science of the Total Environment*, *647*, 210–222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.402>
- Matušík, J., Hnátková, T., & Kočí, V. (2020). Life cycle assessment of biochar-to-soil systems: A review. *Journal of Cleaner Production*, *259*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120998>
- Netherlands Enterprise Agency. (2021). *BioGrace II Standard Values*. RVO & EU. https://www.biograce.net/biograce2/content/ghgcalculationtool_electricityheatingcooling/overview
- Tan, Z., Lin, C. S. K., Ji, X., & Rainey, T. J. (2017). Returning biochar to fields: A review. *Applied Soil Ecology*, *116*(March), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.03.017>
- Thomsen, T. P., Ravenni, G., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., Hauggaard-Nielsen, H., & Henriksen, U. B. (2015). Screening of various low-grade biomass materials for low temperature gasification: Method development and application. *Biomass and Bioenergy*, *79*, 128–144. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.12.019>
- Woolf, D., Lehmann, J., Ogle, S., Kishimoto-Mo, A. W., McConkey, B., & Baldock, J. (2021). Greenhouse Gas Inventory Model for Biochar Additions to Soil. *Environmental Science and Technology*, *55*(21), 14795–14805. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02425>