



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Slambearbejdning med mikrobølge- teknologi

Verifikation og kvantificering

MUDP Rapport

August 2022

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Jens Henrik Haahr

Organic Fuel Technology A/S med COWI A/S

ISBN: 978-87-7038-439-1

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse

Indhold

Abstract in English	6
Resumé	7
1. Indledning	8
2. Formål	10
3. Teknologibeskrivelser	11
3.1 Forbehandling af slammet	11
3.2 Mikrobølgebehandling	12
3.3 HTL	14
3.4 Langsom pyrolyse	15
4. Masse- og energibalancer	17
4.1 Mikrobølgebehandling	17
4.1.1 Datagrundlag og forudsætninger	17
4.1.2 Resultater	19
4.2 HTL	20
4.2.1 Datagrundlag og forudsætninger	20
4.3 Langsom pyrolyse	21
4.3.1 Datagrundlag og forudsætninger	21
4.3.2 Resultater	22
5. Produktkvalitet og anvendelsesmuligheder	24
5.1 Biokul	24
5.1.1 Anvendelsesmuligheder	24
5.1.2 Sammenligning af biokul-sammensætning	25
5.1.3 Krav til indholdsstoffer	26
5.2 Bioolie	29
5.3 Gas	30
6. Klimavurdering	32
6.1 Forudsætningerne for livscyklusanalysen	32
6.1.1 Formål og afgrænsning	33
6.1.2 Anvendte data	35
6.2 Samlet klimapåvirkning	39
7. Kommercialisering af OFT's mikrobølgeteknologi	42
7.1 Praktiske foranstaltninger	42
7.1.1 OFT8 anlægsdesign og konstruktion	42
7.1.2 Tørringsanlæg	43
7.1.3 Bygningsareal og infrastruktur	44
7.1.4 Myndighedsgodkendelser og -tilladelser	45
7.1.5 Samarbejdspartnere, kunder og investorer	49

8.	Konklusion	50
9.	Referencer	51
	Bilag 1.Energibalance baseret på 100 MJ input	53
	Bilag 2.Testrapport, kørsel 114	55
	Bilag 3.Samlet analyse slam, kørsel 114	64
	Bilag 4.Samlet analyse af kul, kørsel 114	72
	Bilag 5.Analyse af OFT bioolie	81
	Bilag 6.Analyse af OFT biogas	82
	Bilag 7.Oversigt over lokalplanprocessen	83

Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram

Projektet, som er beskrevet i denne rapport, er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram, MUDP, som er et program under Miljøministeriet, der støtter udvikling, test og demonstration af miljøteknologi.

MUDP investerer i udvikling af fremtidens miljøteknologi til gavn for klima og miljø i Danmark og globalt, samtidig med at dansk vækst og beskæftigelse styrkes. Programmet understøtter dels den bredere miljødagsorden, herunder rent vand, ren luft og sikker kemi, men understøtter også regeringens målsætninger inden for klima, biodiversitet og cirkulær økonomi.

Det er MUDP's bestyrelse, som beslutter, hvilke projekter der skal modtage tilskud. Bestyrelsen betjenes af MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen.

MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5, 5000 Odense | Tlf. +45 72 54 40 00

Mail: ecoinnovation@mst.dk

Web: www.ecoinnovation.dk

Denne slutrapport er godkendt af MUDP, men det er alene rapportens forfatter/projektlederen, som er ansvarlige for indholdet. Rapporten må citeres med kildeangivelse.

Abstract in English

Organic Fuel Technology A / S has developed and patented a technology for processing organic material with microwaves, thereby forming bio-fuels and biochar with carbon capture. The primary focus is currently on the conversion of dried sewage sludge to bio-oil, biogas and biochar.

The technology's use for the treatment of dried sewage sludge has been verified at pilot plants and is now facing its full-scale demonstration and subsequent commercialization.

Against this background, the purpose of this report is to further investigate and validate the potential of microwave technology within the utilization of wastewater sludge. The report thus describes OFT's technology for microwave cracking of organic material and compares it with two alternative technologies: HTL and pyrolysis. The mass and energy balances and the overall climate impact are compared across the three technologies, as far as possible on the basis of comparable data.

With data from test runs with dried, degassed sewage sludge, the products that Organic Fuel Technology's technology produces when applied to dried sewage sludge are also analyzed and evaluated.

It is concluded that the establishment of an OFT8 full-scale microwave plant for the treatment of sewage sludge has a number of advantages. In addition to reduced costs for transport, storage and disposal of sludge, the technology can generate revenue in connection with sale of district heating, bio-oil, biochar and possibly gas. Both the mass balance and the assessment of product qualities show that commercialization of the technology has considerable potential and can contribute to a reduction in greenhouse gases.

The analysis has also pointed to several areas where the technology can be optimized further, including optimizing energy consumption in connection with drying the sludge and improving product qualities (coal and oil) by upgrading these and by optimizing feed materials. In this connection, the potential of processing non-degassed sludge has thus not yet been investigated and may be significant.

Organic Fuel Technology has provided data for the analysis from test runs with super-dry degassed sewage sludge. COWI has carried out the independent analysis of data and has prepared a comprehensive report with technology comparisons, product analyzes, overall conclusion, etc. On this basis, Organic Fuel Technology has prepared this overall report, which constitutes the final reporting of MUDP Pre-Project 2021-20115.

Resumé

Organic Fuel Technology A/S har udviklet og patenteret en teknologi til bearbejdning af organisk materiale med mikrobølger hvorved der dannes biobrændstoffer og biokul med carbon capture. Det primære fokus er pt. på omdannelse af tørret spildevandsslam til bioolie, biogas og biokul.

Teknologiens anvendelse til behandling af tørret spildevandsslam er verificeret på pilotanlæg og står nu for overfor sin demonstration i fuld skala og efterfølgende kommerialisering.

Formålet med denne rapport er på den baggrund at nærmere at undersøge og validere mikrobølgeteknologiens potentiale indenfor udnyttelse af spildevandsslam. Rapporten beskriver således OFTs teknologi til mikrobølge-cracking af organisk materiale og sammenligner den med to alternative teknologier: HTL og pyrolyse. Masse- og energibalancerne og den samlede klimapåvirkning på tværs af de tre teknologier, så vidt muligt på baggrund af sammenlignelige data.

Med data fra testkørsler med tørret, afgasset spildevandsslam analyseres og evalueres derudover de produkter, som Organic Fuel Technology's teknologi frembringer ved anvendelse på tørret spildevandsslam.

Det konkluderes, at etableringen af et OFT8 fuldskala mikrobølgeanlæg til behandling af spildevandsslam har en række fordele. Ud over reducerede udgifter til transport, opmagasiner og afskaffelse af slam kan teknologien generere indtægter ifm. salg af fjernvarme, bioolie, biokul og eventuelt gas. Både massebalancen og vurdering af produktkvaliteter og klimaaftryk viser, at kommerialisering af teknologien har et stort potentiale og kan bidrage til en reduktion drivhusgasser.

Analysen har ligeledes vist, på hvilke områder, teknologien kan optimeres yderligere, herunder optimering af energiforbrug i forbindelse med tørring af slammet samt forbedring af produktkvaliteter (kul og olie) ved opgradering af disse og ved optimering af fødematerialet. I den forbindelse er potentialet ved at kunne bearbejde ikke-afgasset slam således endnu ikke undersøgt, og kan være betydeligt.

Organic Fuel Technology har leveret data til analysen fra testkørsler med supertørt afgasset spildevandsslam. COWI har foretaget den uvildige analyse af data og har udarbejdet en samlet rapport med teknologisammenligninger, produktanalyser, samlet konklusion mv. Organic Fuel Technology har på denne baggrund udarbejdet nærværende samlede rapport, hvor der er tilføjet forskellige bilag samt foretaget enkelte tilføjelser. Rapporten udgør slutrapporteringen af MUDP Forprojekt 2021-20115.

1. Indledning

Spildevandsslam er en global ressource og alene i Danmark produceres der ca. 140.000 ton slam TS/år. I dag udnyttes en stor del af energipotentialt i slam fra renseanlæg oftest til produktion af el og varme ved udrådning i biogasanlæg. Efterfølgende spredes udrådnets slam på landbrugsjord, således at også næringsstofferne i slammet nyttiggøres.

Udbringning på landbrugsjord må dog ikke finde sted hele året, hvorfor slammet i de mellem-liggende perioder opbevares i slamlagertanke, hvilket fører til emissioner af drivhusgasser som CO₂, metan og lattergas. Samtidig indeholder slammet også en række uønskede stoffer, som ved udbringning på landbrugsjord kan udgøre en trussel mod miljøet.

Afbrænding af udrådnets slam sikrer en yderligere energiudnyttelse af slammet samtidig med, at de miljøfremmede stoffer ikke ender i jord- og vandmiljø. Men desværre går næringsstofferne tabt i processen eller bliver utilgængelige for planteoptagelse.

Ovenstående problematikker har i de seneste år ført til en stigende efterspørgsel på alternative behandlings- og anvendelsesmuligheder af slammet, der både tilgodeser miljøet og i endnu højere grad udnytter energipotentialt i slammet.

Mikrobølge-teknologien er blandt forskere anerkendt som en effektiv teknologi til biomassebe-
arbejdning, da den kan omdanne polære molekyler, som f.eks. molekylerne i gummi og andre typer biomasse, til olie, gas og kul. Teknologien minder derfor, som proces, om mere kendte teknologier, såsom pyrolyse og Hydro Thermal Liquefaction (HTL).

Mikrobølge-teknologien har teoretisk en række fordele i forhold til pyrolyse og HTL, herunder berøringsfri opvarmning, energioverførsel snarere end varmeoverførsel, højere opvarmnings-hastighed, materialeselektiv opvarmning, volumetrisk opvarmning, opvarmning inde fra materialet samt hurtig opstart og stop (Hang, Chiueh, & Lo, 2016). Alt dette sikrer hurtig og effektiv bearbejdning, der teoretisk medfører højere olieudbytte (Bridgwater, Czernik, & Piskorz, 2001).

Organic Fuel Technology A/S (OFT) har udviklet en mikrobølge-reaktor (pilotanlæg), som kan anvendes til at gennemføre forsøg med forskellige kulstofkilder og procesindstillinger, samt generere olie-, gas- og kulprøver til analyse. Anlægget kan også bruges til at udarbejde gode estimater på endelige masse- og energibalancer.

OFT har siden 2016 kørt over 100 testkørsler med anlægget, og løbende foretaget procesjusteringer, der har resulteret i et anlæg, som nu performer stabilt og effektivt ved behandlingen af mange forskellige kulstofkilder.

Det lykkedes for OFT at optimere teknologien ved at udnytte og optimere feltstyrken i reaktoren, der dermed kan cracke de polære materialer. Dette betyder, at bearbejdningen kan ske ved 350 grader i stedet for 650 grader, som er den nødvendige temperatur ved konventionel pyrolyse. Den lavere temperatur sikrer teoretisk højere olieudbytte, bedre olie kvalitet, lavere energiforbrug og ingen dannelse PAH og dioxiner, som dannes ved 550 grader.

OFT har i samarbejde med Aarhus Vand og Aalborg Forsyning med succes foretaget en række indledende forsøg og analyser med henblik på at undersøge mulighederne for at gøre brug af teknologien til bedre udnyttelse af spildevandsslam.

Med udgangspunkt i de opnåede erfaringer og resultater arbejdes der i dette projekt videre med at evaluere teknologiens fordele og ulemper, samt afdække muligheder for at opskalere teknologien til fuldskalaanlæg.

Organic Fuel Technology A/S har til projektets gennemførelse forestået gennemførelse af 4 dedikerede testkørsler (kørsel 112 til 115) med afgasset, tørret slam, og har opsamlet og rapporteret målinger fra disse kørsler til COWI.

COWI har assisteret OFT med sparring i forbindelse med forsøgsdesign, samt udarbejdet masse- og energibalancer for OFT's mikrobølgeteknologi og sammenlignet med HTL og pyrolyse af slam i den udstrækning data foreligger fra andre sammenlignelige analyser. COWI har ligeledes forestået evalueringen af produktkvaliteter af hhv. kul, gas og olie, og sammenholdt disse med tilsvarende for HTL og pyrolyse. Endvidere har COWI sammenlignet klimaaftryk samt anlægs- og driftsudgifter for de tre teknologier.

Organic Fuel Technology A/S har forestået udarbejdelsen af den endelige slutrapportering til MUDP. COWI's bidrag til det samlede projekt foreligger som en selvstændig delrapport.

2. Formål

Formålet med denne rapport har været at give Organic Fuel Technology A/S og virksomhedens interessenter (investorer, kunder, leverandører mv.) vigtigt input ift. at verificere og kvantificere mikrobølgeteknologien indenfor udnyttelse af spildevandsslam.

Baseret på de opnåede resultater fra testkørsler med OFTs pilotanlæg sammenlignes teknologien således med HTL og pyrolyse, som aktuelt er de mest relevante konkurrerende teknologier på markedet, på nogle vigtige parametre. Teknologisammenligningen præsenteret i denne rapport omfatter følgende områder:

- Processernes masse- og energibalancer
- Produktkvaliteter og anvendelsesmuligheder af hhv. olie, kul og gas
- Teknologiernes klimapåvirkning.

På baggrund af disse sammenligninger og en gennemgang af mikrobølgeteknologien, som den er udviklet og patenteret af Organic Fuel Technology A/S giver rapporten derudover en overordnet vurdering af mikrobølgeteknologiens samlede kommercialiseringspotentiale.

MUDP-projektet skal munde ud i en fyldestgørende dokumentation af mikrobølgeteknologiens potentialer ift. at udnytte ressourcerne i udrådnets spildevandsslam. Samtidig skal MUDP-projektet undersøge mulighederne for at udvikle og etablere et fuldskala-demonstrationsanlæg.

3. Teknologibeskrivelser

Både mikrobølgebehandling, HTL og pyrolyse kan anvendes til at udnytte organiske restprodukter med henblik på at nyttiggøre lagret energi i restproduktet, eksempelvis spildevandsslam. I processen dannes tre fraktioner på hhv. fast, flydende og gas form.

Ved sammenligningen af de tre teknologier tages der udgangspunkt i udnyttelsen af afgasset slam fra biogasanlæg. Behandling af andre typer biomasse er muligt for alle tre teknologier, men undersøges ikke nærmere i dette projekt. Spildevandsslammet behandles først via anaerob omsætning i biogasanlæg, hvorefter den våde afgassede slam bliver afvandet ved centrifugering. Det resterende organiske materiale i slammet, der ikke kan forgasses på biogasanlægget, kan i stedet omdannes til bioolie, gas og biokul. Teknologisammenligningen af mikrobølgebehandling, HTL og langsom pyrolyse tager således udgangspunkt i behandlingen af udrådnet afvandet slam.

Alle tre teknologier har en biokul og en gasfraktion som output, mens HTL og mikrobølgebehandling ligeledes producerer en oliefraktion. Bioolien kan groft sagt behandles på samme måde som traditionelle fossile olieprodukter, et såkaldt drop-in brændsel, mens gasfraktionen fra de tre teknologier kan anvendes til en række forskellige formål, men typisk udnyttes den til intern procesvarme. Det producerede biokul kan bl.a. anvendes til jordforbedringsmiddel, brændsel og CO₂-lagring. Produktkvaliteter og anvendelsesmuligheder er yderligere beskrevet i kapitel 5.

3.1 Forbehandling af slammet

De tre teknologier stiller forskellige krav til graden af tørstof (TS) i slammet. Både mikrobølgebehandling og pyrolyse af slammet er såkaldte tørre processer, som derfor kræver at slammet afvandes og tørres til omkring 95-100 % TS inden behandling. Vandindholdet i slammet reduceres typisk ved at kombinere den mekaniske afvanding ved centrifugering med termisk tørring.

Modsat mikrobølgebehandling og pyrolyse er HTL en våd proces, der derfor ikke kræver ekstra tørring af slammet efter centrifugering. Derimod skal slammet gøres pumpbart før HTL-processen, hvilket typisk gøres ved at fortynde slammet ved tilføjelse af en delstrøm af procesvandet, som herved recirkuleres i processen.

I forhold til termisk tørring af slam er den mest udbredte teknologi i Danmark varmlufttørring. Her udnytter man, at varm luft vil optage vand fra massen, indtil luften mættes ved 100 % relativ luftfugtighed. Ved efterfølgende nedkøling af luften, vil vandet fortætte og kondensere ud af luften. Luften kan dernæst varmes op igen, hvorved luftens relative luftfugtighed falder markant og den dernæst genbruges til at optage mere vand fra slam-massen. Ulemperne med denne teknologi er en lav effektivitet og ringe varmegenvinding. Den store energimængde brugt til at varme luften op er svær at genvinde som proces- eller fjernvarme. Derudover kan teknologien ikke fjerne meget svært bundet vand, hvorfor der typisk kan opnås en maksimal grad af TS på 95 %.

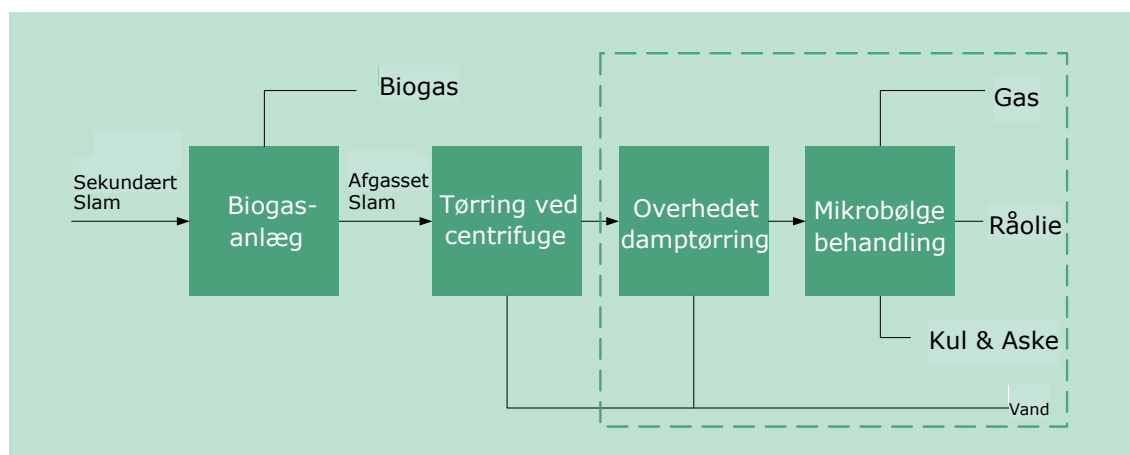
Et alternativ til lufttørring er overhedet damp-tørring. Teknologien anvender overhedet damp ved 130-200 °C til at fordampe vandet fra slammet. Dampen bliver dernæst delvist recirkuleret

og kondenseret. Til at generere dampen anvendes der en el-varmer, hvor op til 85 % af den anvendte energi kan genvindes som proces- eller fjernvarme. Da energiniveauet i damp er højere end varmluft, er det også muligt at tørre alt vandet ud og opnå 100 % tørt slam. Det totale energiforbrug ved inkludering af fjernvarmeudnyttelse overstiger ikke varmlufttørring, men det kræver mere volumenkapacitet i tørringsanlægget, da processen tager længere tid.

Til denne teknologisammenligning antages det, at det afvandede slam tørres ved overheded damptørring til hhv. 99.8 % TS før behandling med i mikrobølgeanlægget og 95 % TS før behandling med pyrolyse. Til HTL anvendes der afvandet slam direkte fra centrifugen dvs. afvandet til 30 % TS.¹

3.2 Mikrobølgebehandling

Den måde, hvorpå OFT udnytter mikrobølgeteknologien, er en patenteret anvendelse af mikrobølger til at "cracke", dvs. nedbryde, lange organiske molekyler, som fx træmasse (lignin), cellulose, gummi (latex) og fedt (lipider) til mindre organiske molekyler som i olie, gas og kul. Når det organiske materiale (her udrådnet slam) udsættes for mikrobølgebehandling, konverteres de organiske molekyler til gas, olie, og biokul ved 350 °C. Af Figur 3.1 fremgår det samlede procesdiagram for hele slambehandlingen.



FIGUR 3.1. Procesdiagram for hele slambehandlingen: anaerob omsætning i biogasanlæg, afvanding, tørring og mikrobølgebehandling. Den stiplede kasse viser hvad der er scopet for teknologisammenligningen med HTL og langsom pyrolyse.

OFT har udviklet en reaktor, der effektivt og kontrolleret gør brug af mikrobølger til at danne et homogent (singlemode) og meget hurtigt skiftende magnetfelt i reaktoren. Reaktoren er igennem simuleringer og verifikation optimeret til at arbejde med høj elektromagnetisk feltstyrke.

Processen er patenteret af OFT, og der er indsendt patentansøgninger på centrale komponenter.

FIGUR 3.2 illustrerer, hvordan mikrobølge-cracking principielt kan anvendes på mange forskellige organiske materialer, og OFT har med succes testet teknologien på en række alternativer og dokumenteret, at processen kan forløbe effektivt. Mest veldokumenteret er processens effektivitet på gummiaffald, men også bio-materiale som halm og shea-skaller er blevet behandlet. Organic Fuel Technology A/S fokuserer dog i øjeblikket primært på processing af

¹ Antagelsen om 30% TS er til sammenligningsformål. HTL-teknologien kan gennemføres med en lavere tørstofprocent og altså et større vandindhold i slammet.

tørret spildevandsslam, da der er en række forhold som indikerer, at dette materiale anviser den hurtigste vej til en kommercialisering af OFT's teknologi.



FIGUR 3.2. Illustration af OFT-teknologiens potentielle anvendelsesmuligheder. Processen resulterer i olie, gas og kul/aske. Kvaliteterne og det indbyrdes forhold imellem disse produkter varierer alt efter, hvilket fødemateriale (feedstock) der anvendes.

OFTs teknologi er unik, fordi den i modsætning til andre teknologier ikke anvender varme eller tryk som den primære energi til at omdanne lange organiske molekyler til kortere. I stedet skaber OFT's mikrobølgereaktor et stærkt og meget hurtigt vekslende elektromagnetisk felt, som rykker molekylerne fra hinanden i kraft af at molekylerne er polære, dvs. har en negativ og en positiv pol. Processen er derfor afhængig af molekylernes polaritet for at mikrobølgerne kan interagere med materialet i reaktoren.

Data fra OFT's testkørsler viser, at reaktionerne sker optimalt ved 300-350 °C og ved et tryk på 1,02 bar. I konkurrerende teknologier sker reaktionerne ved langt højere temperaturer (ca. 650 °C) eller ved samme temperatur og markant højere tryk (100-250 bar).

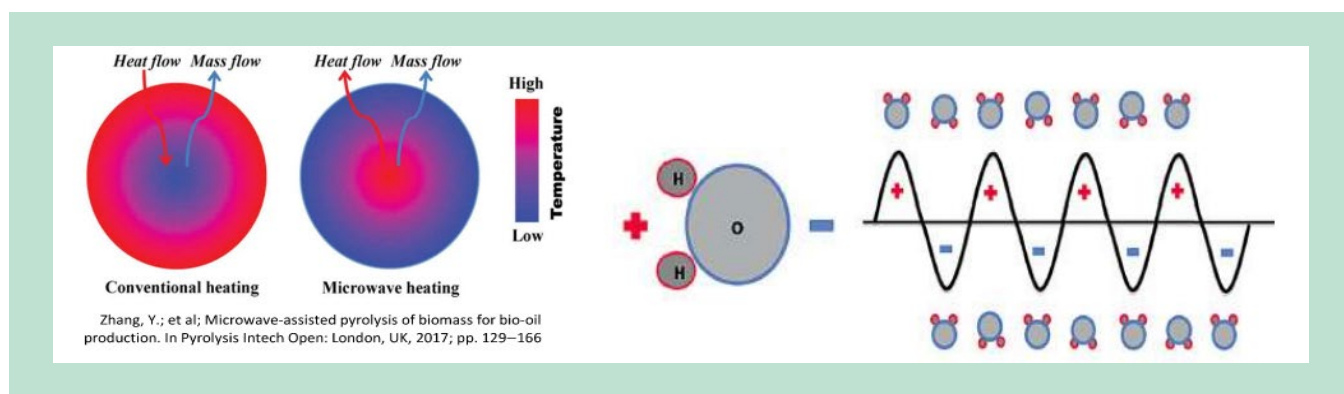
Mikrobølgebehandlingen kan simplificeret ses som to separate mekanismer, jf. FIGUR 3.3:

1. Det forvarmede materiale opvarmes yderligere indtil optimal procestemperatur opnås. Dette sker ved en dipol-opvarmningsmetode, der minder om den teknologi, man kender

fra husholdnings mikrobølgeovne. Dette giver en effektiv og hurtig måde at opvarme materialer på og giver derfor hurtig processering ved lav temperatur af materialet. Desuden fordamper evt. rester af vand i det tilførte materiale, da vand især bliver påvirket af mikrobølger ved den anvendte frekvens.

2. "Cracking" af materialet i kraft af det elektromagnetiske felt. Traditionel industriel anvendelse af mikrobølger spreder energien tilfældigt og ukontrolleret. Her adskiller OFT-teknologien sig markant i og med at OFT har udviklet en reaktor som danner "single mode" mikrobølgefelt i reaktoren. Derved skabes der et ensartet elektromagnetisk felt. Dermed kan OFT-teknologien behandle lignin, cellulose og fedt ved 350 ° C og ikke ca. 650 ° C, der anvendes i konkurrerende teknologier.

Feltstyrken i OFT mikrobølgereaktor er beregnet til ca. 100 V/m. Vigtigere for processen er efter alt at dømme svingningsfrekvensen i feltet, som er ca. 5 mia. gange i sekundet.



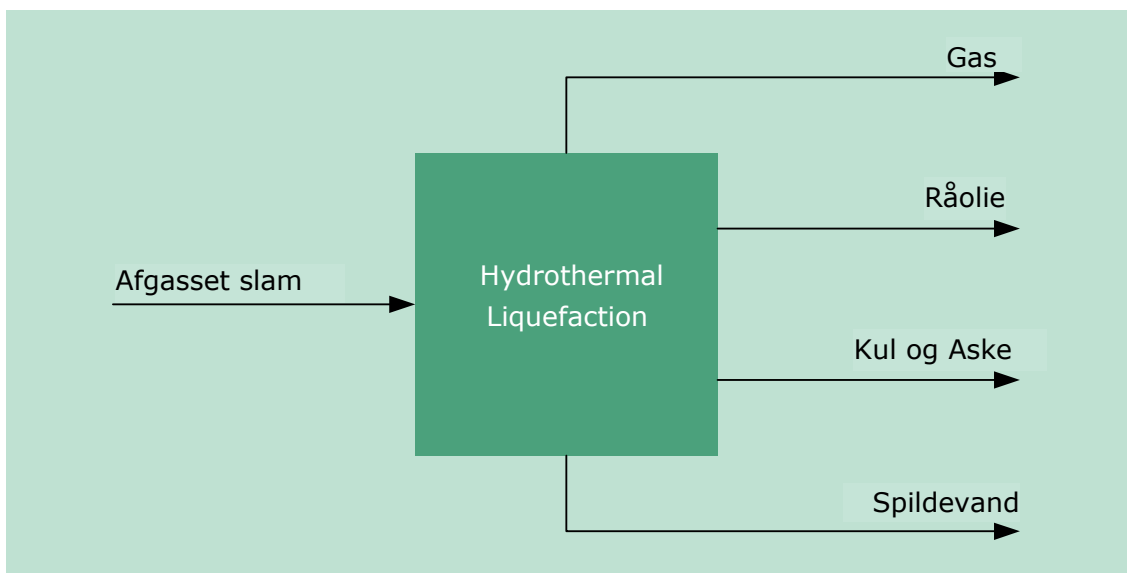
FIGUR 3.3. Grundlæggende principper i mikrobølgeteknologien. Venstre billede viser fase 1: effektiv opvarmning. Højre billede viser fase 2: elektromagnetismes indvirkning på polære molekyler, her illustreret med et vandmolekyle.

Organic Fuel Technology's teknologi er blevet udviklet igennem en længere periode, hvor teoretiske hypoteser er blevet afprøvet både igennem simuleringer ved anvendelse af avanceret simuleringssoftware og igennem etablering af forsøgs- og pilotanlæg, som løbende er blevet optimeret. Dette pilotanlæg er nærmere beskrevet i afsnit 4.1

Organic Fuel Technologys teknologi vurderes at være på Technology Readiness Level (TRL) 6, hvor selve kerne-teknologiens funktionalitet er valideret og demonstreret i et relevant miljø. Næste skridt for teknologien er demonstration af teknologien i fuld skala i en integreret systemkonfiguration med kontinuert drift i industriel skala. Herved vil teknologien kunne nå TRL 8.

3.3 HTL

Hydrothermal Liquefaction (HTL) er en alternativ teknologi til behandling af slam og andre biomasseresourcer. HTL bruger vand som procesmedie i reaktoren, og det afgasset slam kræver derfor ikke tørring. Herved fjernes et energikrævende tørringstrin sammenlignet med mikrobølgebehandling og pyrolyse, men i stedet behandles store vandmængder, der sammenlignet med de to andre teknologier kræver et stort procesvolumen og dermed et større anlæg. Et overordnet procesdiagram er vist i Figur 3.4.



FIGUR 3.4. Procesdiagram for slambehandling ved HTL

I processen bliver det organiske materiale fra slammet omdannet til olie, gas, kul. Kulfraktionen er mindre end for mikrobølgebehandling og pyrolyse.

Herudover produceres der en vandfase indeholdende en del opløst organisk materiale. Vandfasen fra HTL-processen kræver filtrering/rensning før det sendes tilbage til spildevandsanlægget, og herved introduceres et energitab. Der forsøges også at kunne nyttiggøre denne fraktion.

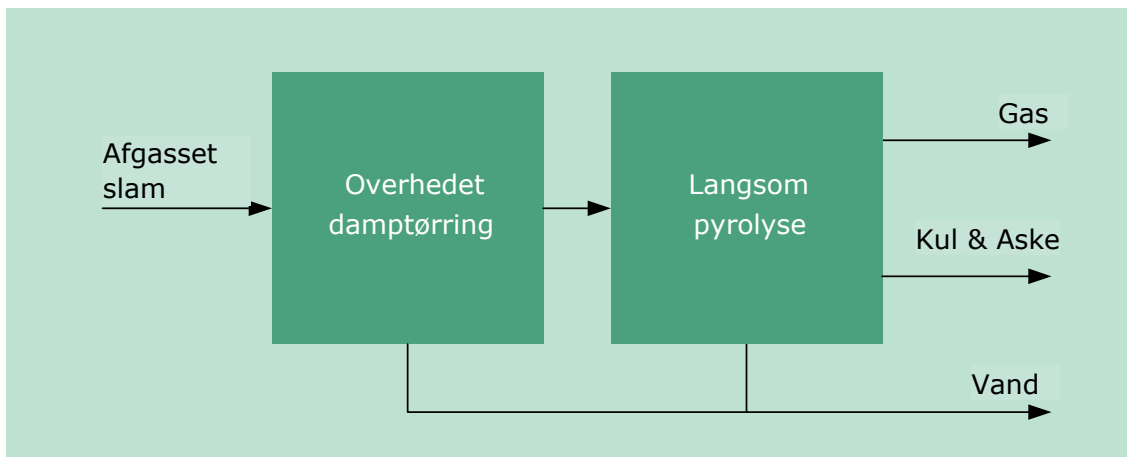
HTL-processen foregår ved høje temperaturer, 250-450 °C, og højt tryk, 100-350 bar. Temperaturen er sammenlignelig med mikrobølgebehandling, men trykket er væsentligt højere. De høje temperaturer og tryk kan give udfordringer hvis anlægget skal køres i delast.

Steeper Energy, der er udvikler af HTL-processen, er sammen med Silva Green Fuel i gang med at validere processen på kommerciel skala i Norge. Dette skal danne grundlag for fuldskala projekter i fremtiden. På nuværende tidspunkt er teknologien betragtet som TRL 6-7 (Technology Readiness Level). Dette anlæg anvender dog resttræ, hvilket er væsentlig anderledes end slam, som er udgangspunktet for denne sammenligning.

Erfaringen med spildevandsslam i stedet for træ er nede på TRL 5-6. Udfordringen ved at anvende spildevandsslam vil blandt andet være det høje indhold af aske i slammet og dets lave energiindhold.

3.4 Langsom pyrolyse

Ved langsom pyrolyse behandles slammet ved høje temperaturer, typisk 500-700 °C, og uden tilstedeværelse af ilt. Slammet bliver herved omdannet til gas, olie, en fast fraktion, bestående af biokul og aske, samt procesvand og vandet fra slammet, som vist i Figur 3.5.



FIGUR 3.5. Procesdiagram for slambehandling ved langsom pyrolyse

Gassen bliver anvendt direkte i processen i form af procesvarme, hvilket gør selve pyrolyseprocessen meget energieffektivt. Omkring halvdelen af den organiske fraktion i slammet ender som biokul sammen med asken i den faste fraktion. Dette kan anses som kulstoflagring (CO₂ lagring) og kan samtidig medvirke til jordforbedring for landbrugsjord. (Energistyrelsen, 2022)

Langsom pyrolyse anses for at være en moden teknologi, men der er stadig udfordringer med at opskalere processen til kommercielt niveau. Processen er fleksibel ned til lave driftspunkter så længe pumper og kompressorer kan håndtere det. Dette bringer teknologien på TRL 6-7. Udfordringerne inkluderer tjære-formation, materialekorrosion og håndtering af den producerede gas. (Energistyrelsen, 2022)

Stiesdal SkyClean er udvikler af langsom pyrolyse og forsøger at opskalere teknologier til kommercielt niveau. Fokus har primært været på pyrolyse af halm, som i processen omdannes til biokul, gas og olie (Ea Energianalyse, 2020). Et andet selskab, der arbejder med at tilvejebringe langsom pyrolyse, er AquaGreen, som fokuserer på slambehandling. Masse- og energibalancer præsenteret i denne rapport er derfor baseret på deres teknologi. Ifølge AquaGreen producerer denne type anlæg ingen olie, og udbyttet består derfor kun af biokul, gas og procesvand.

4. Masse- og energibalancer

Ved sammenligningen af de tre teknologier tages der udgangspunkt i udnyttelsen af afgasset slam fra biogasanlæg. Masse- og energiberegningerne tager således udgangspunkt i, at der er anvendt udrådnet spildevandsslam, som efter afvanding i centrifuge er klar til den videre behandling. Udnyttelsen af dette let tørrede slam danner således udgangspunktet for teknologi-sammenligningen af mikrobølgebehandling, HTL og langsom pyrolyse.

Der regnes på behandling af 100 kg tørt slam (tørstof). Dette svarer til 1 ton vådt afgasset slam fra biogasanlægget eller 333,3 kg let tørret slam efter centrifugen. Energiindholdet i slammet er bestemt ud fra analyser fra OFT til 14,69 MJ/kg tørstof, hvilket anvendes for alle teknologier. Det er desuden antaget, at aske udgør 45% af tørstoffractionen i det afvandede slam for alle tre processer.

Data vedr. procesudbytte, brændværdier, procesvarme og ekstern elektricitet/varme er fundet i tilgængelig litteratur og indsamlet til beregning af de masse- og energibalancer, der præsenteres i dette kapitel. De specifikke referencer og antagelser er opgivet under de enkelte afsnit.

Som supplement til data præsenteret i dette kapitel, er energibalancen for hver af de tre teknologier baseret på 100 MJ input vedlagt som Bilag 1.

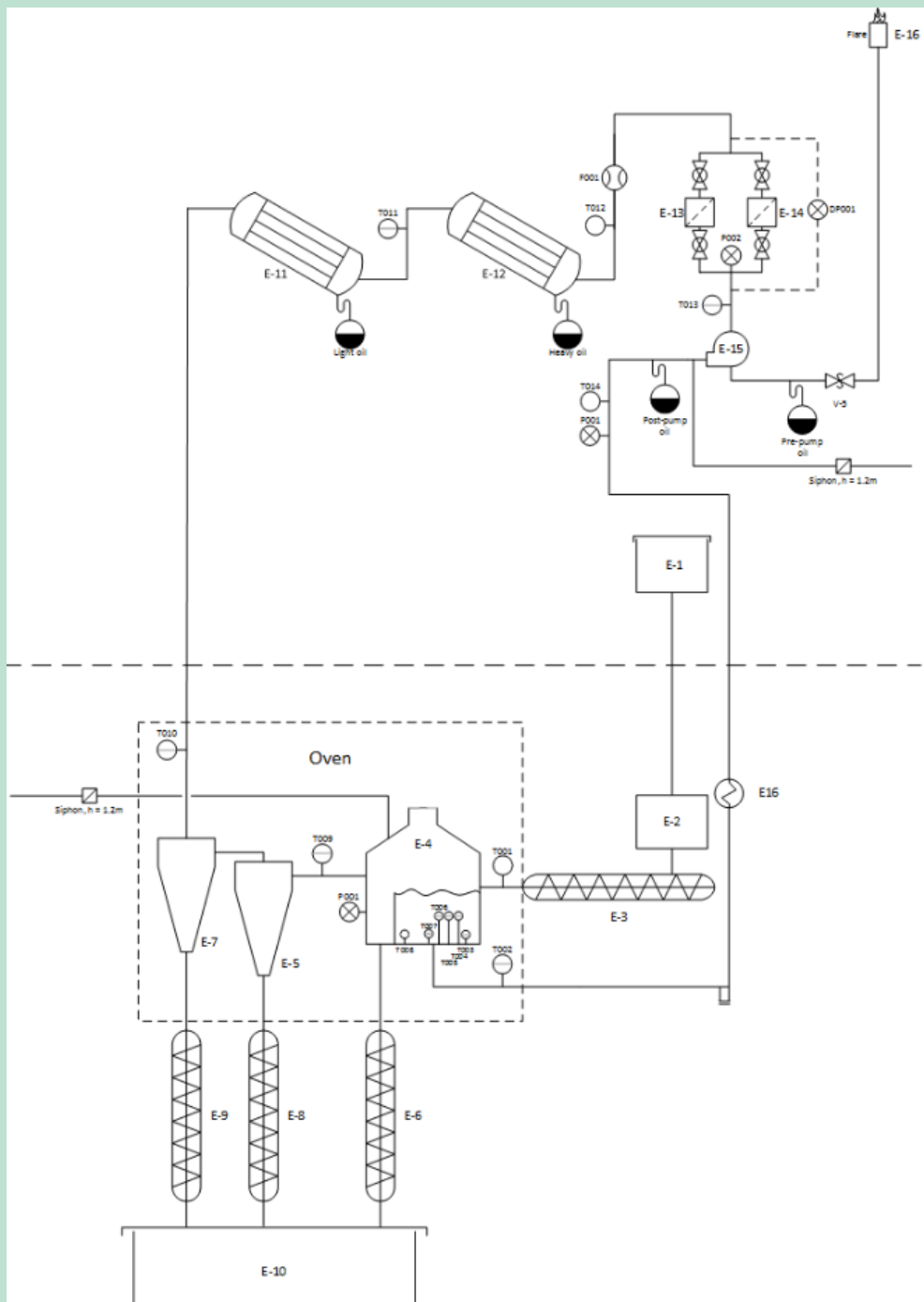
4.1 Mikrobølgebehandling

4.1.1 Datagrundlag og forudsætninger

Input data for mikrobølgebehandling er baseret på testkørsler med OFT's pilotanlæg, hvor der er anvendt udrådnet, afvandet og tørret spildevandsslam som fødemateriale.

OFTs pilotanlæg i Ødum nord for Aarhus har igennem de sidste ca. 3 år været fuldt funktionsdygtigt med semikontinuer (batch-baseret) drift, hvor den eneste årsag til at afbryde processeringen af materiale har været behovet for at tømme opsamlingsstanken til kul. Pilotanlæggets opbygning er vist i procesdiagrammer herunder (FIGUR 4.1).

Pilotanlægget består af et 10 kW mikrobølge reaktor system, indfødningsystem, to kondensatorer til at udtage olie, en gasbrænder samt en beholder til opsamling af kul. Anlægget kan køre kontinuerligt med omkring 45 kg/time indfødnings. På nuværende tidspunkt er begrænsningen på driftstiden selve beholderen til opsamling af kul, der kun kan indeholde en mængde produceret kul svarende til omkring 10 timers kontinuerlig drift.



FIGUR 4.1. Opbygning af OFT pilotanlæg: E1+E2 er indfødningsbeholdere, E4 er singlemode reaktor, E5 og E7 er cykloner, E11 og E12 er kondensatorer, E13 og E14 er partikelfiltre (har vist sig unødvendige), E15 er blæser for recirkulation af procesgas, V5 er ventil som bestemmer tryk i systemet og E-16 er flare for afbrænding af overskydende procesgas. Materiale føres ind og ud med snegle E3, E6, E8 og E9. E10 er kulbeholder.

For at undgå oxygen (ilt) og dermed risiko for brand/eksplosion i systemet bliver der tilført nitrogen, så der skabes et mindre overtryk, der forhindrer oxygen i at komme ind i systemet. Hele designet er lavet i henhold til gældende standarder, der sikrer kravet om tæthed i forhold til risikoen for mikrobølgelækage og gasudslip. Ved en evt. tilstopning, som kan resultere i et øget tryk, vil anlægget automatisk lukke ned.

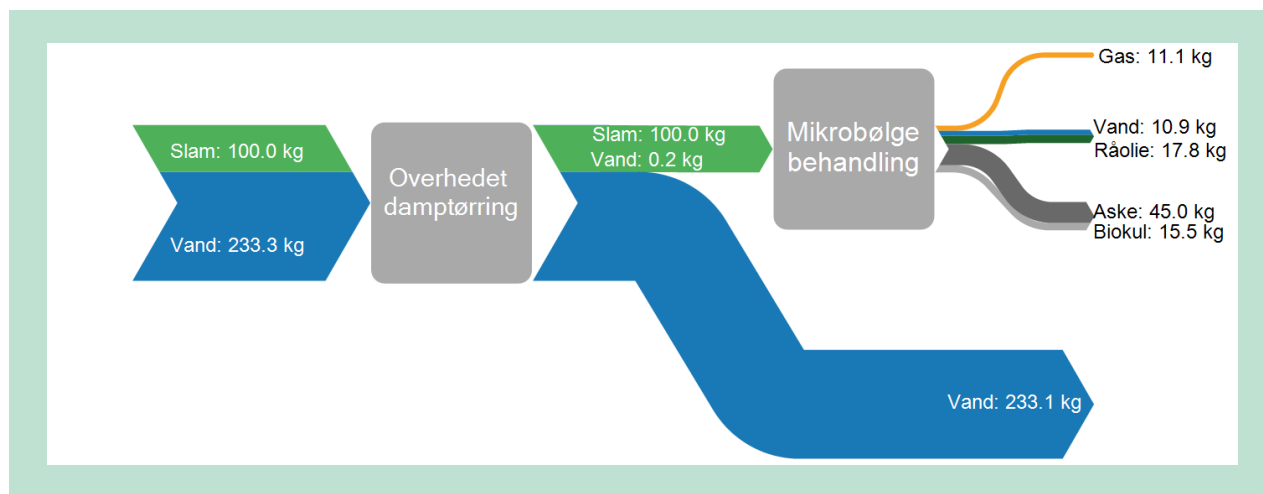
OFT har kørt over 100 testkørsler under forskellige betingelser og med forskellige typer inputs. Både masse- og energibalancerne er udarbejdet på baggrund af resultaterne fra testkørsel 114 på OFT's pilotanlæg foretaget den 21. oktober 2021.² Testrapporten for kørsel 114 er vedlagt som Bilag 2.

Under kørslen blev i alt 365 kg slam-granulat (afgasset slam tørret til 99,8 % TS) behandlet ved en indfødningsrate på 44,2 kg/time. Testen kørte meget stabilt og gav gode resultater sammenlignet med lignende kørsler med slam med en lavere TS %.

Til masse- og energibalancerne antages det at det afvandede slam tørres ved overhedet damptørring til 99,8 % TS før mikrobølgebehandlingen.

4.1.2 Resultater

Massebalancen, som er vist i Figur 4-2, inkluderer både overhedet damptørring og selve mikrobølgebehandlingen, hvor det tørre slam omdannes til gas, råolie og en fast fraktion bestående af biokul og aske.

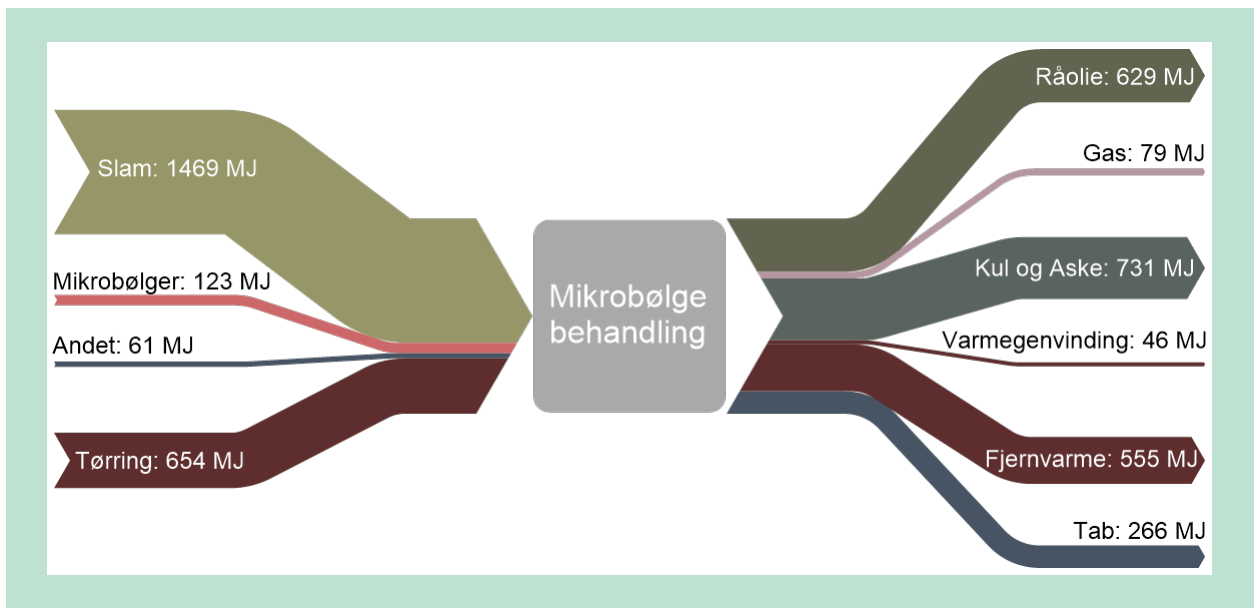


FIGUR 4.2. Massebalance for slambehandling i biogasanlæg samt mikrobølgebehandling. Data fra kørsel 114.

Figur 4.3 viser energibalancen for behandling af 100 kg tørt slam. Op mod 85 % af den energimængde, der tilføres systemet i tørringsprocessen, bliver genanvendt til fjernvarme. De primære energioutputs fra processen er råolie og biokul.

De tre produkter råolie, kul/aske og gas udgør en energimængde der er tilsvarende henholdsvis 42,8 %, 49,8 % og 5,4 % af den tilførte energi fra slammet. Processen kræver dog ekstern energi, primært i form af mikrobølger og el der bruges ved damptørring, som delvist kan blive genanvendt som fjernvarme. Der er potentiale for 46 MJ varmegenvinding fra processen og 79 MJ gas. Disse kan varmeintegreres som procesvarme i systemet og dermed nedbringe behovet for eksternt energiinput. Biokullet kan også anvendes til intern procesvarme, men det vil frigive den CO₂, der ellers ville blive lagret i kullet.

² Data fra kørsel 114 er valgt som de mest relevante og repræsentative. Der blev gennemført i alt 4 kørsler med tørt slam ifm. nærværende projekt. I de to første var vandindholdet i det tørrede slam højere, da der ikke blev anvendt overhedet damptørring til fjernelse af vandet, og i den tredje blev der forsøgsvist anvendt en anden type katalysator.



FIGUR 4.3. Energibalancen for slambehandling i biogasanlæg samt mikrobølgebehandling. Data fra kørsel 114 på OFT's pilotanlæg.

Der synes at være en oplagt mulighed for at forbedre energibalancen yderligere med varmegenvinding til tørring i stedet for produktion af fjernvarme. For nærværende er dette dog ikke undersøgt nærmere.

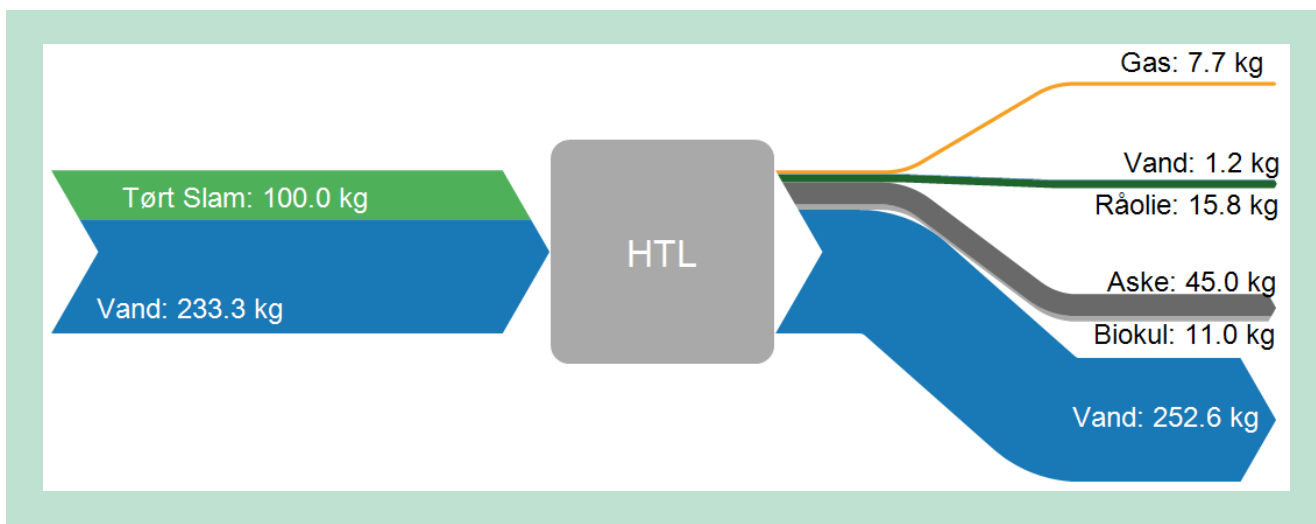
4.2 HTL

4.2.1 Datagrundlag og forudsætninger

De efterfølgende masse og energi balancer er baseret på data fra demonstrations forsøg af HTL-behandling af afgasset slam fra *Pacific Northwest National Laboratory* (PNNL) (Pacific Northwest National Laboratory, 2021) (Marrone, et al., 2018). Dette medfører usikkerheder i forhold til om resultaterne er realistiske i kommerciel skala. Ydermere gælder det, at elforbrug og varmegenvinding er baseret på procesberegninger regnet i Aspen Plus og de beregnede værdier reflekterer derved ikke data fra demonstrationsforsøg (Lozano, Løkke, Rosendahl, & Pedersen, 2022).

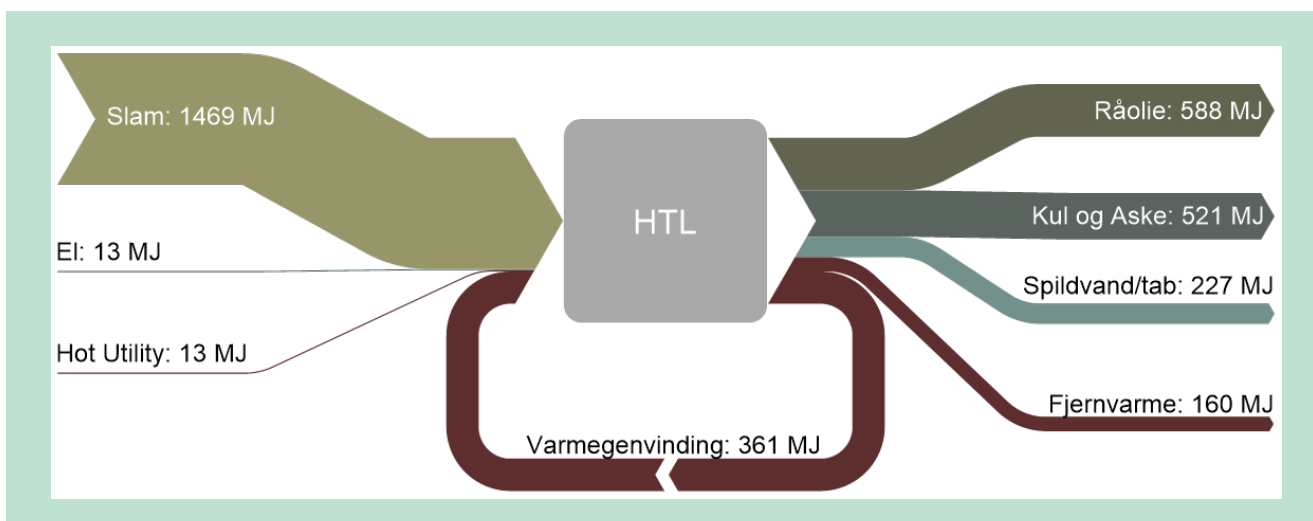
FIGUR 4.4 viser massebalancen for behandling af let tørret slam efter centrifugen med 30 % TS og aske indholdet svarer til 45 % af tørstoffet. Under processen bliver den organiske del af slammet omdannet til råolie (31 %), gas (14 %), kul/aske (20 %) og proces vand (35 %). Den store vandmængde tilført til systemet i form af det våde slam kommer ud som spildevand sammen med procesvandet. Indholdsstofferne i denne store vandfraktion bevirker at vandet skal sendes retur til renseanlægget og behandles, før det kan udledes.

FIGUR 4.5 viser energibalancen for behandling af det våde slam (30 % TS). 40 % af energiindholdet i slammet ender i råolien mens hhv. 35 % og 11% ender som kul/aske og i spildevandet. Den producerede gas afbrændes og anvendes til procesvarme, illustreret i FIGUR 4.5 som varmegenvinding, hvilket gør, at processen er næsten selvforsynende med varme. Der antages kun et mindre behov på 13 MJ for ekstern procesdamp til processen. Afbrænding af gasfraktionen medfører også mulighed for at producere 160 MJ fjernvarme.



FIGUR 4.4. Massebalance for slambehandling i HTL-processen

Energiindholdet i olien og den faste fraktion er baseret på estimerede brændværdier. Det er antaget at brændværdien for biokuldelen er den samme som ved mikrobølgebehandling.



FIGUR 4.5. Energibalance for slambehandling i HTL-processen

4.3 Langsom pyrolyse

4.3.1 Datagrundlag og forudsætninger

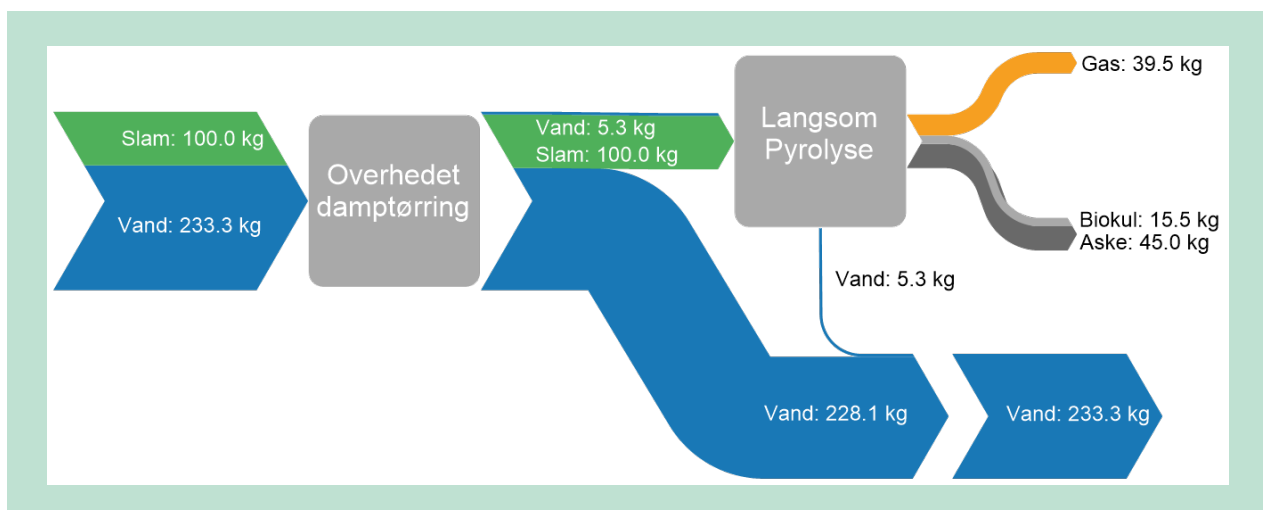
Pyrolyse er ligesom mikrobølgebehandling en tør proces og det kræves derfor at slammet tørres inden behandling. Typiske værdier er omkring 95 % TS. Konventionel lufttørring kan anvendes til dette formål, men for teknologisammenligningen antages det, at der anvendes overhedet damptørring ligesom for mikrobølgebehandling. Slammet tørres ned til 95 % TS og 85 % af energien kan genvindes som fjernvarme.

Data for langsom pyrolyse er baseret på AquaGreen's pyrolyse teknologi da denne virksomhed også arbejder med spildevandsslam. Grundet mangler i den tilgængelige information har det været nødvendigt at supplere med data fra Stiesdal Skyclean (Ea Energianalyse, 2020), som fokuserer mere på pyrolyse af halm og Energistyrelsens Energikatalog (Energistyrelsen,

2022), som beskriver langsom pyrolyse af afgasset slam fra gylle. Disse datamangler medfører, at der er usikkerhed omkring de beregnede resultater.

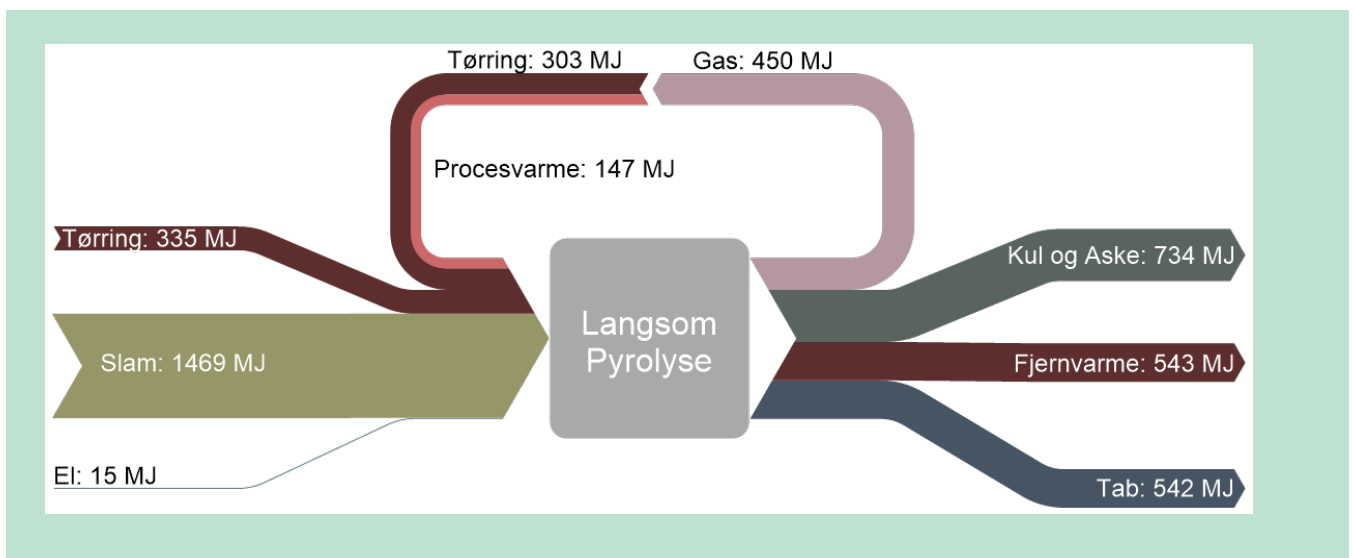
4.3.2 Resultater

Massebalance for behandling af afgasset slam ved langsom pyrolyse er vist i FIGUR 4.6. Askeindholdet i den tørre del af slammet er 45 % hvilket antages at ende i den faste fraktion efter pyrolyseprocessen sammen med biokullet. Mængden af biokul er antaget tilsvarende mikrobølgebehandling, hvilket stemmer overens med kulfraktionen angivet af Energistyrelsen (Energistyrelsen, 2022). Udover biokul bliver der produceret gas som bruges til at generere procesvarme og gøre pyrolyseprocessen energineutral.



FIGUR 4.6. Massebalance for slambehandling ved langsom pyrolyse

I FIGUR 4.7 er energibalancen vist for behandling af 100 kg tørt afgasset slam. Over energien fra slammet kræver processen energi til tørring. Slammet skal tørres til ~95 % TS hvilket opnås ved overhedet damptørring. Af energien til tørringsprocessen kan 85 % genanvendes til fjernvarme.



FIGUR 4.7. Energibalance for slambehandling af 100 kg tørt slam ved langsom pyrolyse

Den producerede gas anvendes til både intern procesvarme og tørring af slammet før pyrolysen. Det vil sige, at gasproduktet anvendes internt i processen. Da biokullet er det eneste produkt fra pyrolyseprocessen, er energitabet i FIGUR 4.7 relativt stort sammenlignet med mikrobølgebehandling og HTL.

5. Produktkvalitet og anvendelsesmuligheder

5.1 Biokul

En sammenligning af forskellige tilgængelige kilder viser, at kompositionen og egenskaberne for biokul produceret ved hhv. HTL og pyrolyse varierer. Dette gælder både indholdet af aske, total carbon, hydrogen, nitrogen, svovl og oxygen. Kvaliteten af biokullet afhænger dels af procesforholdene, men i høj grad også af kvaliteten af det fødemateriale, der anvendes.

5.1.1 Anvendelsesmuligheder

Biokul som jordforbedringsmiddel

Såfremt indholdsstofferne i biokullet kan overholde gældende lovgivning, må den primære anvendelsesmulighed for biokul anses at være udlægning på landbrugsarealer, idet biokullet har adskillige fordelagtige egenskaber ift. at bruge produktet som jordforbedringsmiddel: Biokullet kan bl.a. tilføre jorden en stabil kulstofpulje, øge jordens pH gennem kalkningsvirkning, øge vandbinding og dræning, nedsætte lattergasemission fra jorden samt nedsætte udvaskning af næringsstoffer og pesticider.

Biokullet kan som udgangspunkt anvendes som gødning direkte, eller det kan kombineres med andre jordforbedringsprodukter såsom gylle og kompost.

Ift. gødningsværdien ved brug af biokul, er der behov for dokumentation af effekterne under danske markforhold. Bl.a. kan fosforloftet på 30 kg P pr. ha begrænse mængden af slam-biokul som kan udbringes pr. ha. Studier har vist at biokullet har øget biotilgængelighed for fosfor, bl.a. ved at fremme rodvæksten hos planter (Schmidt, et al., 2021), men biokullets gødningsværdi og indhold af miljøfremmede stoffer afhænger meget af fødematerialet og procesforholdene, hvorved biokullet dannes. Vidensgrundlaget omkring biokullets gødningsværdi samt miljøkonsekvenserne forbundet med anvendelsen af biokul under danske dyrkningsforhold på både kort og langt sigt er på nuværende tidspunkt meget begrænset, og der er således behov for flere og mere omfattende studier på dette område (Lemming, 2022).

Biokul til jordoprensning

Ydermere kan biokullet ligesom aktivt kul adsorbere en række uønskede stoffer - heriblandt forskellige miljøfremmede stoffer, såsom PFAS-forbindelser - og dermed bidrage til oprensning af jorden (Winding, 2022). Dette kræver dog, at kullet først gennemgår en behandling, som aktiverer de adsorberende egenskaber. Herved pålægges endnu en udgift til den samlede slambehandling, som skal sammenholdes med produktets endelige værdi. Studier viser dog, at aktiveret biokul er mindre effektivt sammenlignet med konventionelt aktivt kul, når det gælder adsorption af kontaminanter. Samtidig varierer egenskaberne i biokullet afhængigt af procesforhold og det anvendte fødemateriale (Sørmo, et al., 2021).

Biokul til CO₂-lagring

For biokul gælder det, at der kan være en betydelig gevinst at hente ift. CO₂ lagring, her kan den økonomiske gevinst baseret på carbon removal credits måske komme til at blive helt central. Lige nu prissættes carbon removal credits til ca. 125-195 € pr. ton CO₂ ækvivalent (se CRC Supplier Listing (puro.earth)).

Man har fra en simulering af et pyrolyseanlæg sammenlignet CO₂-besparelsen ved anvendelse af halm i 4 forskellige scenarier. Direkte forbrænding, nedsmulding over 20 år, biogas og ved omdannelse af halm til biokul. I studiet er regnet med 35.000 tons halmpiller, som ved forbrænding vil omdanne alt kulstof og udlede ca. 54.000 tons CO₂.

Ved nedsmulding vil kulstoffet i halmen omdannes til CO₂, men vil være bundet længere tid i jorden. Studiet viser, at 17% af kulstoffet forventeligt stadig vil være bundet i jorden efter 20 år. Ved anvendelse til biogas, produceres også CO₂ direkte i reaktoren eller ved tilbageførsel af digestatet til marken. Studiet viser, at der efter 20 år fortsat vil være ca. 13% af kulstoffet tilbage i jorden efter tilbageførsel af bio-digestatet til jorden.

Ved omdannelse af halmen til biokul, estimerer man at ca. 42% af kulstoffet bindes i biokullet. Dette antages ikke at udlede CO₂, hvorfor man opnår en markant større CO₂-besparelse ved at anvende halmen til produktion af biokul, sammenlignet med de 3 andre scenarier (Ea Energianalyse, 2020).

Selvom studiet bygger på biokul baseret på halmpiller, vurderes resultaterne at være relevante ift. andre fødematerialer herunder spildevandsslam.

Biokul som brændsel

Ved at erstatte fossil varme med biobaseret varme kan der ligeledes opnås en CO₂-besparelse. I de tilfælde hvor fjernvarme er baseret på biobrændsler som halm, træpiller m.m. vil substitution af fjernvarme produceret vha. eksempelvis mikrobølgebehandling af spildevandsslam dog ikke kunne medregnes som en CO₂-besparelse.

Et studie som omhandler langsom pyrolyse af udrådnet slam har vist højere brændværdier (HHV) på 11-12 MJ/kg (Petrovic, et al., 2021). Til sammenligning har trækul en HHV på 29,6MJ/kg og metan har en værdi på 55,5 MJ/kg (ToolBox, 2003). Biokullet frigiver således mindre energi ved afbrænding end andre traditionelle brændstoffer.

Ligeledes kan biokullet også volde andre problemer ved afbrænding. Ved afbrænding af biomasse kan der opstå to fænomener kendt som slagging og fouling. Begge fænomener indbefatter aflejringer på ovnvæggene eller konvektionsoverfladerne, hvilket både vil medføre reduktion i effektivitet, samt uønsket stigninger i procesomkostninger.

Fænomenerne har oftest vist sig ved afbrænding af biomasse med højt indhold af alkalimetaller og nærmere bestemt kalium. Alkalimetallerne sænker effektivt askens smeltepunkt, som giver anledning til øget fouling og slagging (Melissari, 2014). Ved anvendelse af biokul til forbrænding fra HTL, langsom pyrolyse eller mikrobølgebehandling, vil alkalimetaller også forekomme i kullet.

Det skal derfor overvejes om energien fra biokullet, samt den mulige fouling og slagging er hensigtsmæssigt for brug til forbrænding, eller om biokullet bedst tjener som jordforbedringsmiddel.

5.1.2 Sammenligning af biokul-sammensætning

Sammenligningen af biokul baseret på behandling af udrådnet spildevandsslam produceret ved hhv. pyrolyse, HTL og mikrobølgebehandling fremgår af tabel 5.1.

TABEL 5.1. Elementær analyse af biokullet fra hhv. Langsom pyrolyse, HTL samt mikrobølgebehandling med udrådnat spildevandsslam som fødemateriale.

	Enhed	Langsom pyrolyse (Pet-rovic et al., 2021)	HTL (Marrone et al., 2018)	Mikrobølgebehandling (pilottest, kørsel 114)
Askeindhold (550 °C)	% (w/w)	24,33	73,3	65,4
TOC ³	% (w/w)	0,18	20,3	27,1
Hydrogen	% (w/w)	1,39	2,54	2,3
TN	% (w/w)	0,92	1,14	3,37
Svovl	% (w/w)	2,98	1,70	0,74
Oxygen	% (w/w)	24,33	15,4	2,70

Note: Data for så vidt angår pyrolyse og HTL er hentet fra den videnskabelige litteratur. Data for så vidt angår mikrobølgebehandling er frembragt fra laboratorieanalyser.

Som det fremgår af elementæranalyserne, er sammensætningen af biokul produceret ved de tre teknologierne nogenlunde ens, dog med undtagelse af oxygen- og hydrogenindholdet i kullet ved de tre teknologier. Forskellen skyldes procesforholdene ved teknologierne, hvor bl.a. pyrolyse har begrænset eller ingen ilt til stede.

Ved undersøgelse af fosforindholdet i biokullet fra mikrobølgebehandling og langsom pyrolyse, indeholder kullet hhv. 6,0 % (w/w) og 2,11% (w/w). Her kan det bemærkes, at mikrobølgebehandling resulterer i kul med et større indhold af fosfor end langsom pyrolyse. Fosfor er et essentielt næringsstof ved anvendelse af biokullet som jordforbedringsmiddel.

5.1.3 Krav til indholdsstoffer

På nuværende tidspunkt er der ingen specifik bekendtgørelse for anvendelse af biokul som jordforbedringsmiddel eller ved direkte udlæg på landbrugsjord. Dog forventes det i juli 2022, at der indføres et EU-regulativ for anvendelse af biokul i gødningsprodukter (Kommissionen, 2021). For nuværende anvendelse af biokul som gødningsprodukt, er *Bekendtgørelsen om anvendelse af affald til jordbrugsformål* derfor det bedste bud på fastsættelse af grænseværdier for udvalgte stoffer i biokullet.

Tungmetaller

Af Tabel 5.2 fremgår de aktuelle grænseværdier for tungmetaller i slam der udlægges på landbrugsarealer jf. *Bekendtgørelsen om anvendelse af affald til jordbrugsformål* samt grænseværdier for tungmetaller i bioaske til jordbrugsformål jf. *Bekendtgørelse om anvendelse af bioaske til jordbrugsformål*.

TABEL 5.2. Grænseværdier for tungmetaller beskrevet i *Bekendtgørelsen om anvendelse af affald til jordbrugsformål* samt *Bekendtgørelse om anvendelse af bioaske til jordbrugsformål*.

Metaller	Enhed	Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål (Miljøministeriet, Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål, 2018)	Bekendtgørelse om anvendelse af bioaske til jordbrugsformål (Miljøministeriet, Bekendtgørelse om anvendelse af bioaske til jordbrugsformål, 2019)
----------	-------	---	---

³ Total Organic Carbon.

Bly (Pb)	mg/kg TS	120	120 250 træske i skovbrug
Cadmium (Cd)	mg/kg TS	0,8	5 halmaske 20 træske 5 blandet halm og træske
Krom (Cr)	mg/kg TS	100	100
Kobber (Cu)	mg/kg TS	1000	
Nikkel (Ni)	mg/kg TS	30	60
Kviksølv (Hg)	mg/kg TS	0,8	0,8
Zink (Zn)	mg/kg TS	4000	

TABEL 5.3. Koncentrationer af tungmetaller i hhv. fødemateriale (tørret udrådnet spildevandsslam) og produkt (biokul) baseret på kørsel 114 samt beregnede maksimale koncentrationer i fødematerialet, såfremt det producerede biokul skal kunne overholde grænseværdierne for tungmetaller ift. udbringning på landbrugsjord.

Metaller	Enhed	Produceret biokul (output ved pilottest, kørsel 114)	Fødemateriale, udrådnet spildevandsslam (input ved pilottest kørsel 114)	Maximale koncentrationer i fødemateriale (beregnet ud fra kørsel 114 data)
Bly (Pb)	mg/kg TS	50	31	73
Cadmium (Cd)	mg/kg TS	1,7	1,1	0,5
Krom (Cr)	mg/kg TS	105	70	61
Kobber (Cu)	mg/kg TS	390	272	606
Nikkel (Ni)	mg/kg TS	62	43	18
Kviksølv (Hg)	mg/kg TS	0,38	0,63	Ingen data
Zink (Zn)	mg/kg TS	1700	1148	2459

Til sammenligning ses i Tabel 5.3 koncentrationer af tungmetaller fundet i hhv. fødemateriale og produceret biokul fra pilottest kørsel 114 samt beregnede maksimale koncentrationer af tungmetaller i fødematerialet (spildevandsslam), såfremt det producerede biokul skal kunne overholde grænseværdierne.⁴

Som det fremgår af Tabel 5.2 og 5.3 overholder OFT's biokul produceret under testkørsel 114 de fleste af grænseværdierne for tungmetallerne i både *Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål* og *Bekendtgørelse om anvendelse af bioaske til jordbrugsformål*. Dog overstiger indholdet af cadmium, krom og nikkel de fastsatte grænseværdier og samlet set overholdes kravene ift. udbringning på landbrugsjord dermed ikke.

I *Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål* fastsættes der dog for visse tungmetaller også et alternativt sæt grænseværdier, nemlig i forhold til mg pr. kg totalfosfor. Bekendtgørelsen fastsætter, at det enten er grænseværdierne per kg tørstof eller per kg totalfosfor, som skal overholdes. Grænseværdierne i forhold til kg totalfosfor fremgår af tabel 5.4 nedenfor, hvor resultaterne for output fra kørsel 114 også er beregnet. Det fremgår, at OFT's biokul pga. den relativt høje andel fosfor i kullet (6% (w/w)) overholder alle grænseværdierne.

⁴ Den samlede laboratorieanalyse af indfødningsmateriale for kørsel 114 og af OFT's biokul fra kørsel 114 er vedlagt som Bilag 3 og Bilag 4.

TABEL 5.4. Grænseværdier for visse tungmetaller ift. fosforandel beskrevet i Bekendtgørelsen om anvendelse af affald til jordbrugsformål og beregnet for kørsel 114.

Metaller	Enhed	Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål (Miljøministeriet, Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål, 2018)	Beregnet tungmetal-indhold ift. målt total-fosfor (output fra kørsel 114)
Bly (Pb)	mg/kg totalfosfor	10.000	1.377
Cadmium (Cd)	mg/kg totalfosfor	100	47
Nikkel (Ni)	mg/kg totalfosfor	2.500	1.708
Kviksølv (Hg)	mg/kg totalfosfor	200	10

Note: Beregninger for output fra kørsel 114 foretaget af OFT A/S.

Samlet er det derfor kun ift. tungmetallet krom, at OFT's biokul fra kørsel 114 overskrider grænseværdierne i bekendtgørelsen.

Kvaliteten af fødematerialet er afgørende for kvaliteten af det producerede biokul, dette gælder både for biokul produceret ved HTL, ved pyrolyse og igennem mikrobølgebehandling. En løsning ift. de udfordringer med tungmetalkoncentrationer, som måtte være, kunne derfor være at stille krav til kvaliteten af fødematerialet. I det omfang lovgivningen tillader det, kan det herunder overvejes at opblende fødematerialet med biomasse, der ikke indeholder tungmetaller, som fx slam fra fiskeopdræt, kyllingefarme eller svinefarme, eller tage højde for grænseværdierne ved eksempelvis at blande biokul baseret på spildevandsslam med andre typer jordforbedringsmateriale før det anvendes på landbrugsjord.⁵

Miljøfremmede stoffer

Udover de krav, som stilles til indholdet af tungmetallerne, er der på det seneste også kommet mere og mere fokus på indholdet af miljøfremmede stoffer i slam der udlægges på landbrugsjord (Miljøstyrelsen, 2021). Der stilles på nuværende tidspunkt krav til 5 miljøfremmede stoffer i slam, der skal udsprede på landbrugsarealer: LAS, summen af Polycykliske Aromatiske Hydrocarbon (PAH), Nonylphenol (+ethoxylater) (NPE), di(2-ethylhexyl)phthalat (DEHP) og summen af Polyklorerede biphenyler (PCB7). Tilsvarende grænseværdier vil med stor sandsynlighed også komme til at gælde for biokul, hvis dette skal anvendes på landbrugsjorden som jordforbedringsmiddel.

I forbindelse med testkørsel 114 har OFT fået målt for adskillige PCB'er, og analyseresultaterne indikerer at disse nedbrydes i processen eller ender i en anden fraktion end biokullet. Der er bl.a. målt for summen af PCB7, her viser den øvre grænse af analysen, at PCB7 forekommer i kullet i en højere koncentration end tilladt i *Bekendtgørelsen om anvendelse af affald til jordbrugsformål*. Med udgangspunkt i denne bekendtgørelse, vil biokullet således alt andet lige skulle behandles yderligere for reduktion af summen PCB7, førend det kan anvendes til

⁵ Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål fastsætter dog her i §9 at "[v]ed sammenblanding af flere affaldsproducenters affald, herunder spildevandsslam fra forskellige anlæg, samt ved sammenblanding af affald med produkter, skal de enkelte affaldstyper inden sammenblanding prøvetages med henblik på analyse af, om grænseværdierne [...] overholdes".

jordbrugsformål. Alternativt vil det skulle sikres, at det anvendte slam har et tilstrækkeligt lavt indhold af PCB, før det undergår mikrobølgebehandling.

OFT har ligeledes fået målt på flere af de gængse miljøfremmede stoffer såsom PFAS-forbindelser og medicinrester i både fødemateriale (udrådnet slam) og produceret biokul. Af de PFAS-forbindelser, som fødematerialet er analyseret for, er det kun været PFOS, som har været målbart. De resterende stoffer har været under detektionsgrænsen, hvorfor det ikke kan konkluderes om de har været til stede i slammet fra start. Analyserne viser, at PFOS ikke kan detekteres i biokullet, hvilket kan skyldes destruktion i processen, eller at PFOS i stedet skal findes i en af de andre outputs fra behandlingen.

Ift. medicinrester har kun små koncentrationer været til stede i indfødningslammet, men alle målte parametre er reduceret til under detektionsgrænsen i det producerede biokul. Tilsvarende ses i biokul produceret ved både HTL og pyrolyse. Det skal her nævnes, at mikrobølgebestråling er en udbredt teknologi i medicinalindustrien og sundhedsvæsenet til at nedbryde medicinrester.

5.2 Bioolie

For både mikrobølgebehandling og HTL er bioolie blandt de primære outputs, mens langsom pyrolyse ikke producerer en oliefraktion.

Udbyttet af olie ved behandling af afgasset slam er sammenligneligt mellem de to processer som vist i de beregnede massebalancer. Det samme gælder for kvaliteten, hvor man ved begge processer får dannet en stabil olie. Kompositionen af olieprodukterne er vist i Tabel 5.4. En uddybende oversigt over indholdet af øvrige komponenter i olien er indeholdt i Bilag 5.

Baseret på de tilgængelige data fremstår det, at indholdet af vand og aske er højere i bioolie produceret ved mikrobølgebehandling end igennem HTL, hvilket ligeledes gælder koncentrationerne af oxygen og nitrogen. Det lavere vandindhold i olie produceret ved HTL medfører en højere brændværdi for den våde olie. Dog skal det her tilføjes, at kvaliteten af selve fødematerialet kan have stor betydning for kvaliteten af den bioolie der produceres, hvorfor denne direkte sammenligning af data fra uafhængige forsøg bør tages med forbehold.

TABEL 5.4. Komposition og egenskaber af bioolie produceret ved hhv. mikrobølge- og HTL-behandling af udrådnet slam

	Egenskaber, våd olie			Komposition, tør basis				
	Brændværdi	Vand	Aske	C	H	O	N	S
	MJ/kg	%		wt%				
Mikrobølger (pilot-test, kørsel 114)	30,6	13,2	3,2	70,9	8,8	7,8	7,9	1,2
HTL [5]	34,7	7,3	1,0	76,3	9,4	6,3	5,1	1,8

Note: Data for så vidt angår HTL er hentet fra den videnskabelige litteratur. Data for så vidt angår mikrobølgebehandling er frembragt fra laboratorieanalyser, gennemført af Aarhus Universitet.

OFT forventer, at askeandelen i et kommende fuldskala-anlæg vil kunne reduceres til under 1% ved at optimere cyklonerne til at fjerne asken ved lavere flow.

Bioolien kan potentielt anvendes som brændsel som den er, men kvaliteten og brændværdien er lavere end for fossile alternativer. Dette skyldes delvist vandindholdet i olien, men også indholdet af oxygen, nitrogen og svovl kan nedsætte brændværdien af olien, og samtidig resultere i skadelige biprodukter såsom NO_x og SO_x-forbindelser ved afbrænding af olien.

Oliens kvalitet kan opgraderes ved at fjerne de uønskede komponenter ved hydrotreating, hvor hydrogen tilføjes under højt tryk. Typisk kræver det 2-3 % hydrogen på vægt basis til at fjerne 10 % oxygen fra olien.

Derudover forventes det, at vandindholdet i olien fra både HTL og mikrobølge-behandling vil kunne sænkes. Dette kan formentlig ske igennem anvendelse af én eller flere forskellige teknologier, herunder centrifugering, opvarmning af olien, vakuum dehydrering eller kombinationer heraf. Den optimale teknologiske løsning til sænkning af oliens vandindhold afhænger af, i hvilken grad vandet i olien er bundet til olien hhv. emulgeret. Dette forhold er ikke blevet analyseret i nærværende rapport, men det er COWI's vurdering, at de nødvendige teknologier er til stede.

På nuværende tidspunkt er opgradering og raffineringen af bioolie begrænset til et lavt iblandingsforhold med fossile brændsler på grund af vanskeligheder med at håndtere de urenheder, der er i bioolien. Men det forventes at kravene til iblandingsforholdet af bioolie på eksisterende raffinaderier vil stige i fremtiden.

Når den mest effektive løsning til at sænke vandindholdet i olien er fundet, kan der åbne sig bedre muligheder for at opgradere olien til andre anvendelsesformål igennem raffinering.

5.3 Gas

Ved alle tre processer bliver der produceret gas, som kan anvendes til intern procesvarme. I Tabel 5.5 sammenlignes kompositionen af gas produceret ved de tre processer. Det er vigtigt at pointere at der kan være forskelle på det slam der er testet ved de tre teknologier. Kompositionerne for gassen præsenteret her er derfor kun indikative da det afhænger meget af kvaliteten af fødematerialet dvs. udrådnet afvandet slam.

TABEL 5.5. Sammensætning af gasfraktionen produceret ved hhv. mikrobølgebehandling, HTL og langsom pyrolyse

	Komposition, tør basis								
	Brændværdi	H ₂	N ₂	CO ₂	CO	CH ₄	C ₂₊	H ₂ S	
	MJ/kg								
				mol-%					
Mikrobølger (pilottest, kørsel 114)	6,57	2,3	15,7	58	8,4	5,1	6,4	3,7	
HTL (Lozano, Løkke, Rosendahl, & Pedersen, 2022)	4,8	1	0,5	90	1	2,7	4,2	-	
Pyrolyse (Energistyrelsen, 2022)	~10,7	4-14	0-12	35-50	15-30	8-15	-	-	

Note: Data for så vidt angår pyrolyse og HTL er hentet fra den videnskabelige litteratur. Data for så vidt angår mikrobølgebehandling er frembragt fra laboratorieanalyser gennemført af DGC og bearbejdet af COWI. Den detaljerede gasanalyse fra DGC er vedlagt i Bilag 6.

Som det fremgår af tabellen, varierer sammensætningen af gassen meget processerne imellem, men primært består gassen af følgende komponenter: kuldioxid (CO₂), kulilte (CO), hydrogen (H₂), metan (CH₄), nitrogen (N₂) samt en række kulbrinter.

Indholdet af svovlbrinte (H₂S) i gas produceret ved mikrobølgebehandling skyldes svovlindholdet i fødematerialet, som rapporteres til ~2 %. Dette er ikke rapporteret ved pyrolyse og HTL, hvilket indikerer at disse data stammer fra tests, hvor der som input materiale er anvendt slam uden indhold af svovl. Det forventes dog at hvis slammet indeholder svovl, vil en del af det, også i HTL og pyrolyse, ende i gassen.

Sammenlignes den lave brændværdi for alle 3 gasser, ses der her en betydelig højere værdi for pyrolyse gas, hvilket skyldes det højere indhold af hydrogen og metan. Ved afbrænding kan pyrolysegassen genereres der derved en større mængde varme sammenlignet med de andre teknologier.

For mikrobølgebehandling og HTL er gasudbyttet lavere end udbyttet af olie og kul. For langsom pyrolyse er gasudbyttet væsentligt højere, men da processen kræver meget varme for at opretholde de høje temperaturer, bruges en stor del af energien til intern procesvarme. I denne teknologisammenligningen antages det at gassen afbrændes i alle tre teknologier og energien bruges til procesvarme, tørring eller fjernvarme.

I det tilfælde at gasproduktionen overstiger behovet til intern procesvarme, eller hvis der er bedre alternativer til intern procesvarme, kan gassen anvendes til en række andre formål. I denne rapport antages det, at gassen anvendes til at producere fjernvarme, men den kan også anvendes som brændsel eller til at generere damp i industrien. Gassen kan også anvendes i specialdesignede gasturbiner eller motorer. Alternativt kan gassen anvendes som syntesegas i andre kemiske processer. Syntesegas består primært af CO og hydrogen med mindre dele CO₂ og CH₄, det kan derfor kræve rensning før at gassen fra processerne kan anvendes. Det høje indhold af kuldioxid (CO₂) i HTL-produceret gas bevirker dog, at denne type gas ikke er velegnet som syntesegas. Derimod kan kuldioxid fra gassen anvendes til power-to-X formål ved at producere f.eks. metanol.

Fælles for alle de nævnte anvendelsesmuligheder for gassen er, at det typisk vil kræve et stort anlæg for at være rentabelt, hvilket typisk ikke er tilfældet ifm. slambehandling på et traditionelt renselanlæg.

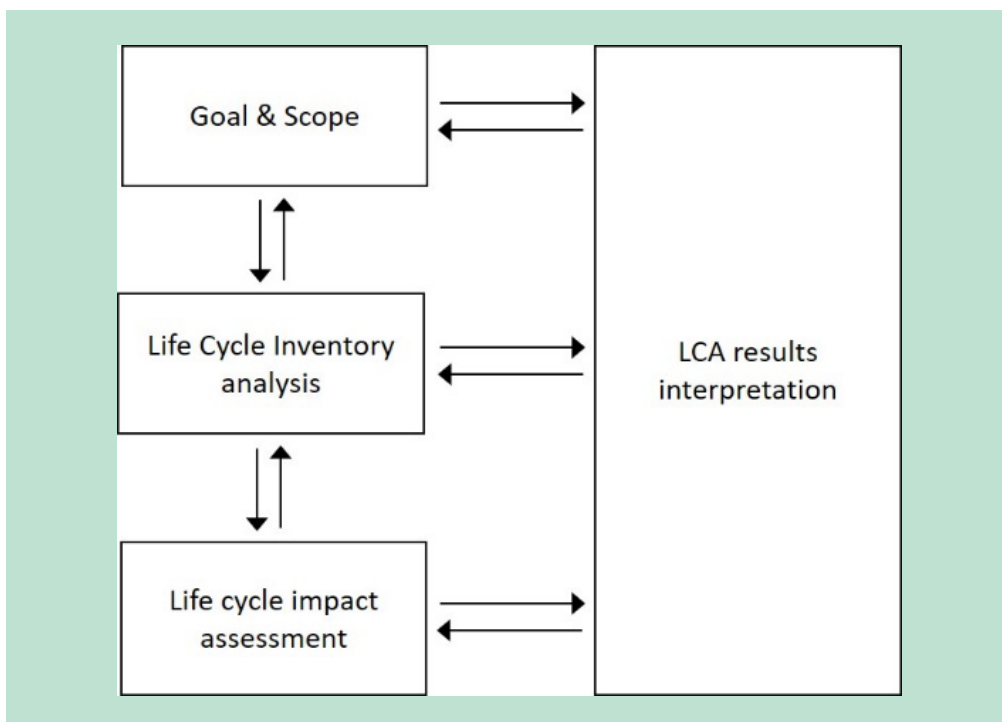
6. Klimavurdering

I dette kapitel estimeres og sammenlignes klimapåvirkningerne fra behandling af spildevandsslam ved hhv. mikrobølger, HTL og pyrolyse baseret på en livscyklusvurdering af hver af processerne.

6.1 Forudsætningerne for livscyklusanalysen

De klimatiske faktorer er beregnet som en livscyklusvurdering (LCA) på basis af de generelle principper i LCA-standarden ISO 14040 og ISO 14044 (2006). Der er ikke foretaget tredjepartsverificering af beregningerne.

I overensstemmelse med standarderne kvantificerer livscyklusvurderinger de potentielle miljøeffekter ved et produkt eller en proces ved at gennemgå følgende faser – se FIGUR: a) formål og afgrænsning (goal and scope), b) beskrivelse af anvendte data (Life Cycle Inventory, LCI), c) kvantificering af de potentielle miljøpåvirkninger, hvor LCI-data konverteres til påvirkningskategorier (f.eks. klimapåvirkninger) og d) fortolkning af resultater ift. formålet med det konkrete studie.



FIGUR 6.1. Fire faser i en LCA i overensstemmelse med LCA-standarden (ISO, 2006). Pilene indikerer, at afgrænsningen af studiet, dataindsamling, LCA-modellering og fortolkning af resultater er en iterativ proces.

Der findes to overordnede modelmæssige tilgange til LCA, defineret som hhv. konsekvens-LCA og tilskrivnings-LCA. Konsekvens-LCA anvendes ofte til vurdering af en fremtidig ændring, imens tilskrivnings-LCA ofte anvendes til opgørelse af "regnskaber" for eksisterende systemer. I konsekvens-LCA anvendes marginale data som basis for beregningerne, og der anvendes systemudvidelse ved produktion af biprodukter. I tilskrivnings-LCA baseres beregnin-

gerne på historiske data, og der anvendes allokering for at fordele de miljømæssige påvirkninger ved produktion af biprodukter. Det er også muligt i nogen grad at kombinere de to metoder og anvende gennemsnitlige data kombineret med systemudvidelse.

Nærværende LCA er overordnet set modelleret som en tilskrivning-LCA, da resultaterne skal anvendes til vurdering af klimaeffekterne af det nærværende mikrobølgeanlæg. Formålet med LCA'en er at sammenligne hhv. mikrobølgebehandling, HTL og langsom pyrolyse til behandling af udrådnet afvandet spildevandsslam.

6.1.1 Formål og afgrænsning

Formålet med denne LCA er at vurdere klimapåvirkningen fra behandling af spildevandsslam med mikrobølgebehandling sammenlignet med HTL og pyrolyse.

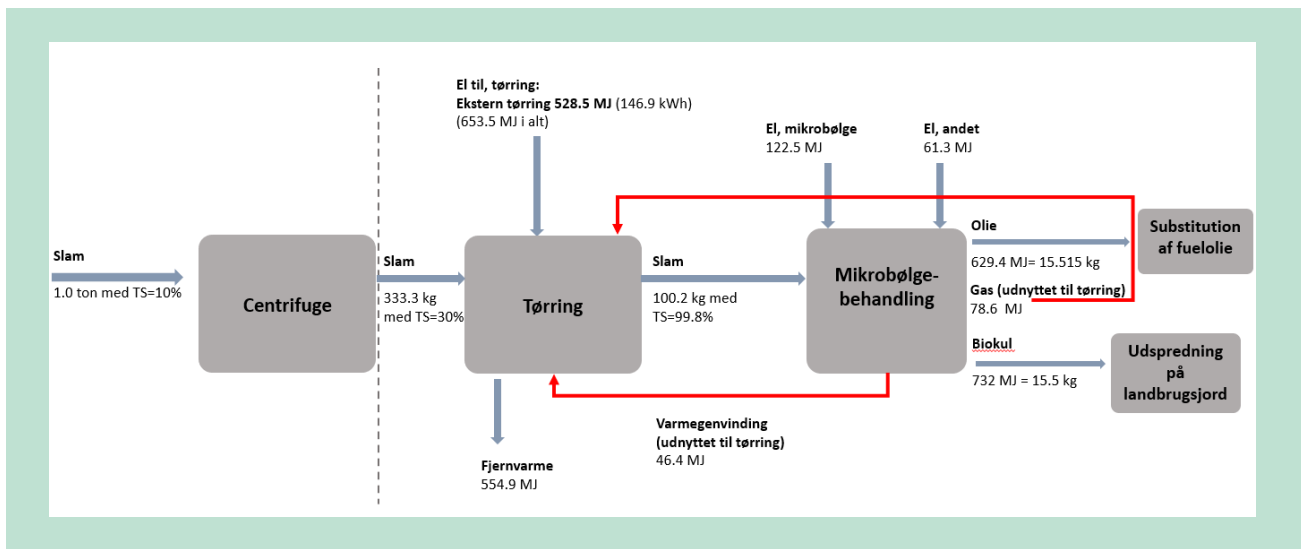
Det antages, at alt gassen produceret fra de 3 forskellige teknologier erstatter input-energi til termisk tørring af slammet. Desuden bliver der brugt elektricitet til at producere den resterende mængde af damp til tørring af slam. Den producerede mængde biokul bliver anvendt på landbrugsjord og fungerer som kulstoflagring. Biokul nedbrydes meget langsomt, og CO₂ fanget i kullet bliver derfor ikke frigivet til atmosfæren indenfor den tidsramme, som LCA-beregningerne omfatter (100 år).

Den funktionelle enhed (FE) for livscyklusvurderingen er defineret som "*behandling af 333,3 kg afvandet slam (30% tørstofindhold)*". Alle data for inputs og outputs skaleres til denne funktionelle enhed.

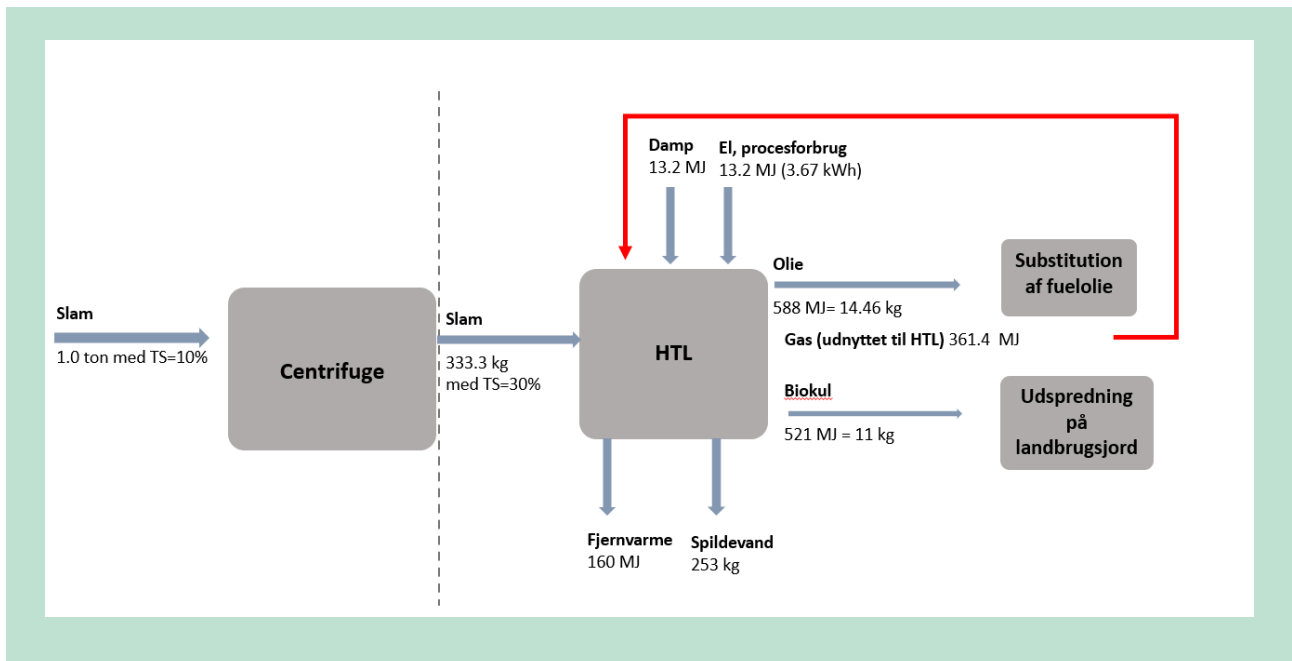
Livscyklusvurderingen bliver udført som "cradle-to-grave". Det betyder, at produktionen af råmaterialer og energi til produktionen inkluderes i beregningerne som opstrøms processer. Ligeledes medregnes relevante nedstrøms effekter, som udnyttelse af overskudsvarme i fjernvarmenettet og derigennem substitution af andre fjernvarmekilder. Disse nedstrøms effekter indregnes i den samlede påvirkning fra den proces, som de tilhører, dvs. afvanding eller den specifikke teknologi.

Desuden medregnes brugsfasen af biokul, gas og olie (output-produkter fra de tre forskellige teknologier) i livscyklusvurderingen.

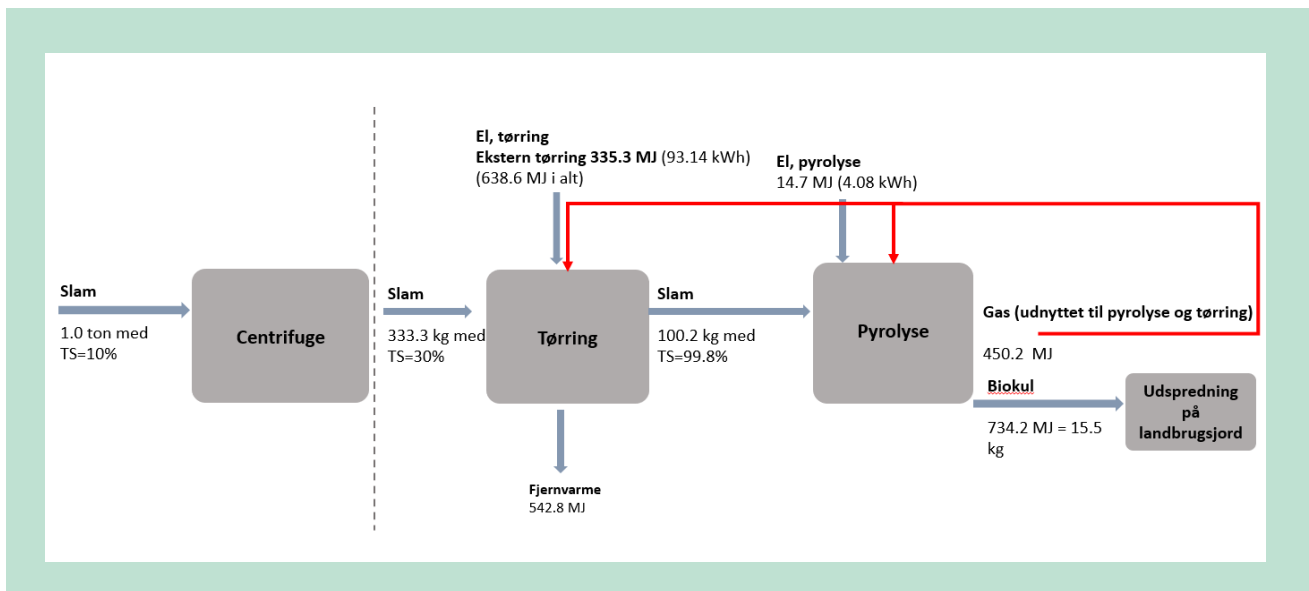
Den funktionelle enhed er valgt for at kunne sammenligne de tre teknologier på lige fod. Alle tre teknologier kræver, at slammet bliver afvandet mekanisk til 30% TS, inden det kommer ind i systemet. Dette trin er fælles for alle tre teknologier og er derfor ikke inkluderet i vurderingen. De 3 teknologier og de relative inputs og outputs er illustreret i de følgende flowdiagrammer (FIGUR 6.FIGUR 6.).



FIGUR 6.2. Flowdiagram af mikrobølgeprocessen. Den stiplede linje repræsenterer systemafgrænsning for denne LCA. De røde pile indikerer, at der bliver brugt varmegenvinding og udnyttelse af gas til tørring. Disse interne inputs er trukket fra den samlede input til tørring.



FIGUR 6.3. Flowdiagram af HTL-processen. Den stiplede linje repræsenterer systemafgrænsning for denne LCA. De røde pile indikerer, at der bliver udnyttet gas til procesvarme. Disse interne inputs er trukket fra den samlede input til HTL.



FIGUR 6.4: Flowdiagram af Pyrolyseprocessen. Den stiplede linje repræsenterer systemafgrænsning for denne LCA. De røde pile indikerer, at der bliver udnyttet gas til tørring. Disse interne inputs er trukket fra den samlede input til tørring.

I beregningerne er der anvendt gennemsnitsdata for el-sammensætning i det danske elnet (2021) og det lokale varmemiks fra Aarhus området (2021).

Den geografiske afgrænsning er Danmark. Den tidsmæssige afgrænsning er den nuværende situation og nær fremtid (2021-2025).

Denne livscyklusvurdering inkluderer kun én påvirkningskategori, som er klimapåvirkninger. Klimapåvirkningene beregnes ift. den karakteriseringsmetode, der anbefales af IPCC for et tidsperspektiv på 100 år. Der ses bort fra andre miljøpåvirkninger i denne LCA.

Beregningerne er foretaget i LCA-værktøjet EASETECH, der er udviklet af Danmarks Tekniske Universitet (DTU Miljø).

6.1.2 Anvendte data

Dette afsnit beskriver inputs og outputs fra behandling af slam ved mikrobølger, HTL og pyrolyse. Nedenstående tabeller viser de antagelser om energiforbrug, som LCA-beregningerne er baseret på. Data er opgjort for den funktionelle enhed, som er behandling af 333,3 kg afvandet slam (TS 30 %).

Det antages, at elforbrug til tørring og procesvarme bliver produceret ved varmegenvinding af gas produceret fra de respektive teknologier. Det producerede biokul udbringes på landbrugsjord. Denne anvendelse af biokul vil medføre kulstofbinding, fordi det kun nedbrydes meget langsomt på landbrugsjord. Derfor beregnes udspredding af biokul på landbrugsjord som en CO₂ besparelse.

TABEL 6.1. Data (inputs og outputs) anvendt i LCA'en for behandling af 333,3 kg afvandet slam (funktionelle enhed, FE) med mikrobølgebehandling

Inputs for behandling af 333,3 kg afvandet slam (FE)			
Unit proces	Proces	Mængde	Enhed

Tørring	El tørring	146,8	kWh/FE
Mikrobølgebehandling	El mikrobølger	34,0	kWh/FE
	El-andet	17,0	kWh/FE
Outputs for behandling af 333,3 kg afvandet slam (FE)			
Unit process	Proces	Mængde	Enhed
Tørring	Fjernvarme	-554,9	MJ/FE
Mikrobølgebehandling	Olie ⁶	-15,5	kg/FE
	Biokul	-15,5	kg/FE
	Gas	0,0	kWh/FE

CO₂ besparelsen ved udspreddning af biokul på landbrugsjord er beregnet ud fra mængden kulstof i biokullet. Efterfølgende omregnes mængden af kulstof til CO₂, som vises i Tabel 6.2.

TABEL 6.2. Beregning af carbon capture fra anvendelse af produceret biokul for de 3 forskellige teknologier.

	Mikrobølger	HTL	Pyrolyse	Enhed
Mængde biokul	15,47	11,00	15,51	kg biokul/FE
Tørstofindhold⁷	90%	90%	90%	% TS i biokullet
C indhold i tørstof⁸	85%	85%	85%	% C i TS
C mængde	11,84	8,42	11,87	kg C
CO₂ mængde besparet	43,40	30,86	43,51	kg CO ₂

Den substituerede mængde af bioolie er beregnet ved brug af brændværdi af bioolie og fossil fuelolie (Energistyrelsen, 2022). Tabel 6.3 viser sammenligning mellem mængden af produceret bioolie fra mikrobølge og HTL med den tilsvarende mængde substitueret fuelolie.

⁶ Substitution af olie beregnes som både undgået produktion og forbrænding af fossil olie.

⁷ COWI antagelse baseret på erfaringen fra lignende projekter.

⁸ COWI antagelse baseret på erfaringen fra lignende projekter.

TABEL 6.3. Beregning af mængden af produceret bioolie og tilsvarende mængde fossil fuelolie for mikrobølgebehandling og HTL. Pyrolyse producerer kun gas og biokul og fremgår ikke af sammenligningen

	Mikrobølger		HTL		Enhed
	Bioolie	Fuelolie	Bioolie	Fuelolie	
Mængde	17,8	15,5	15,8	14,5	kg/ton afvandet slam
Brændværdi	35,5	40,7	37,2	40,7	MJ/kg
Energiindhold	630,7	630,7	588,0	588,0	MJ

TABEL 6.4. Data (inputs og outputs) anvendt i LCA'en for behandling af Data (inputs og outputs) anvendt i LCA'en for behandling af 333,3 kg afvandet slam med HTL

Inputs for behandling af 333,3 kg slam (FE)			
Unit proces	Proces	Mængde	Enhed
HTL	El	3,7	kWh/FE
	Damp	13,2	MJ/FE
	Procesvarme	0	MJ/FE
Outputs for behandling af 333,3 kg slam (FE)			
Unit proces	Proces	Mængde	Enhed
HTL	Olie	-588,0	MJ/FE
	Fjernvarme	-160,1	MJ/FE
	Gas til procesvarme	0	MJ/FE
	Biokul	-11,0	kg/FE
	Spildevand til spildevandsbehandling	0,25	m ³ /FE

I modsætning til mikrobølgebehandling og pyrolyse kræver HTL behandling af spildevand. Dette skyldes, at HTL-teknologien kan håndtere slam med et højere vandindhold end de andre teknologier, fordi den bruger vand som procesmiddel. Til gengæld kræver processen ikke termisk tørring.

Inputs og outputs fra pyrolyse fremgår af Tabel 6.5. I pyrolysen er der kun gas og biokul som biprodukter. De anvendte data for det danske elnet, CO₂-faktorer for de enkelte brændsler/teknologier samt tilhørende kilder fremgår af Tabel 6.6.

TABEL 6.5. Data (inputs og outputs) anvendt i LCA'en for behandling af 333,3 kg afvandet slam med pyrolyse.

Inputs for behandling af 333,3 kg slam (FE)			
Unit proces	Proces	Mængde	Enhed
Tørring	El tørring ⁹	93,1	kWh/FE
Pyrolyse	Procesvarme 10	0,0	kWh/FE
	El pyrolyser	4,1	kWh/FE
Outputs for behandling af 333,3 kg slam (FE)			
Unit proces	Proces	Mængde	Enhed
Tørring	Fjernvarme	-542,8	MJ/FE
Pyrolyse	Kul og Aske	-15,5	kg/FE
	Gas	0,0	MJ/FE

TABEL 6.6 Antagelser omkring sammensætningen af el i det danske elnet (2021) samt CO₂ faktorer for de enkelte brændsler/teknologier

Brændsel/ teknologi	DK 2021 Elnet (%) (Energinet, 2022)	CO ₂ -faktor (kg CO ₂ / kWh)	Kilde, CO ₂ faktor
Havvind	21%	0,003163	Ecoinvent: Electricity production, wind, 1-3MW turbine, offshore – DK 2021
Landvind	21%	0,003377	Ecoinvent: Electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore – DK 2021
Sol	4%	0,003887	Ecoinvent: electricity, low voltage, electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si, DE 2021
Biomasse (træ)	18%	0,007612	Ecoinvent: electricity production, wood, future, GLO 2030 2021
Vandkraft	12%	0,010934	Ecoinvent: electricity, high voltage, electricity production, hydro, pumped storage, SE 2021
Kul	11%	0,115656	Ecoinvent: electricity production, hard coal, DE 2021
Naturgas	5%	0,021162	Ecoinvent: electricity production, natural gas, combined cycle power plant, DE 2021
Olie	1%	0,012015	Ecoinvent: electricity production, oil, DK 2021
Affald	5%	0,034518	Ecoinvent: electricity, medium voltage, electricity, from municipal waste incineration to generic market for electricity, medium voltage, DK 2021
Atomkraft	2%	0,000127	Ecoinvent: electricity production, nuclear, boiling water reactor, DE 2021
TOTAL	100%	0,21245	

Klimapåvirkningen fra eksterne processer er primært modelleret ud fra data fra ecoinvent-databasen. Tabel 6.7 viser, hvilke data der er anvendt.

⁹ Eksternt elinput.

¹⁰ Udnyttelse af gas internt i systemet.

TABEL 6.7. Overblik over data processer anvendt i LCA modelleringen af behandling af slam

Proces	Ecoinvent processer - Database 3.8 APOS 2021
Olie	light fuel oil production, petroleum refinery operation, Europe without Switzerland
Spildevand	treatment of wastewater, average, capacity 1E9l/year, Europe without Switzerland
Damp	Heat, from steam, in chemical industry, steam production, as energy carrier, in chemical industry, Europe without Switzerland

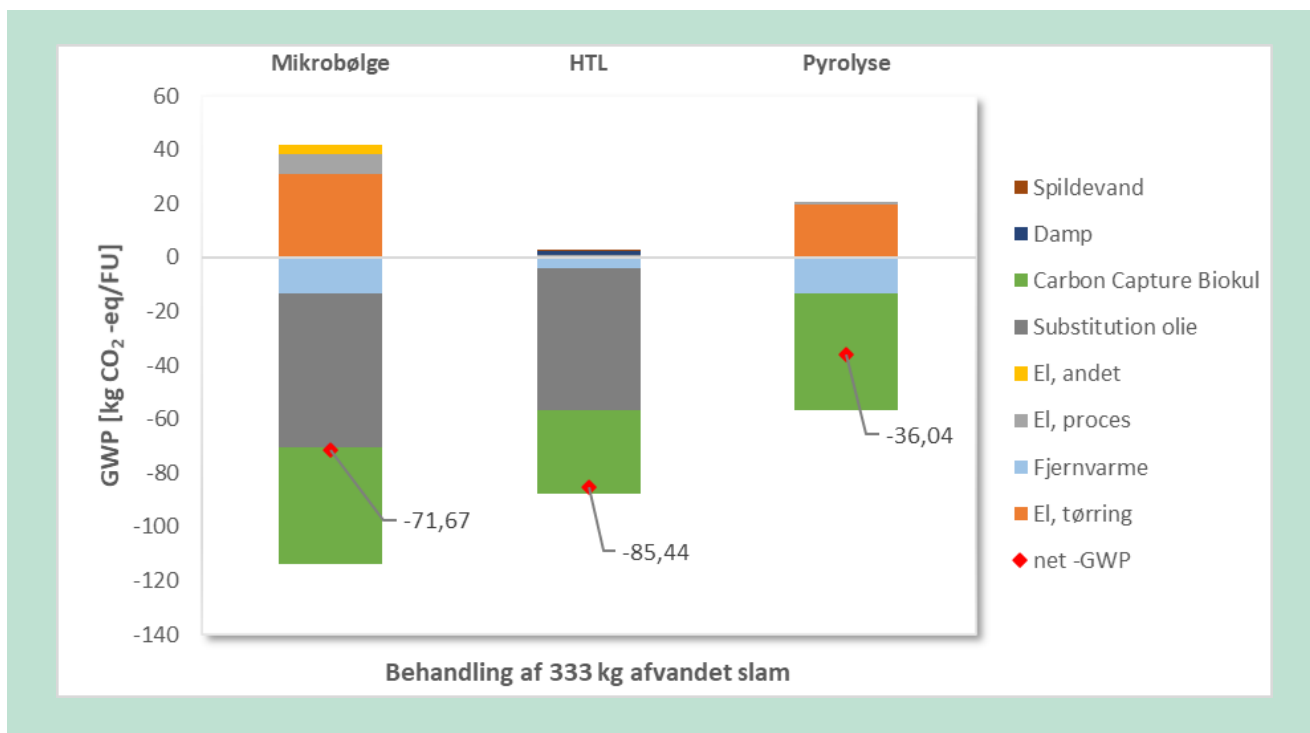
TABEL 6.8. Antagelser omkring sammensætningen af varme i det lokale fjernvarmenet (2021) samt CO₂ faktorer for de enkelte brændsler/teknologier

Brændsel / teknologi	Aarhus 2021 fjernvarme (%) (Kredsløb, 2021)	CO ₂ -faktor (kg CO ₂ /MJ)	Kilde, CO ₂ faktor
Træpiller	41%	0,004718104	Ecoinvent: heat production, wood pellet, at furnace 300kW, state-of-the-art 2014 - CH 2021
Affald	25%	0,006388566	Ecoinvent: heat, from municipal waste incineration to generic market for heat district or industrial, other than natural gas - DK 2021
Halm	21%	0,002502689	Ecoinvent: heat, district or industrial, other than natural gas heat production, straw, at furnace 300kW, RER 2021
EI	7%	0,004249008	Ecoinvent: heat, district or industrial, other than natural gas, heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW, Europe without Switzerland 2021
Kul	4%	0,00541571	Ecoinvent: heat, district or industrial, other than natural gas, heat production, wood chips from industry, at furnace 1000kW, CH 2021
Træflis	1%	0,0000873	Ecoinvent: heat, district or industrial, other than natural gas, heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW, Europe without Switzerland 2021
Olie	1%	0,000931022	
TOTAL	100%	0,024292405	

6.2 Samlet klimapåvirkning

F viser de beregnede klimapåvirkninger fra behandling af spildevandsslam med de tre teknologier. Positive værdier viser netto-emissioner af klimagasser, imens negative værdier illustrerer netto-besparelser i forhold til emissioner af klimagasser.

Resultaterne viser, at behandling af slam med mikrobølger har en samlet CO₂-besparelse på ca. 72 kg CO₂ eq/afvandet slam (333,3 kg våd vægt). Den største del af denne besparelse skyldes substitution af fossil fuelolie. Substitution af fuelolie inkluderer både produktion og forbrænding af fuelolie, hvor forbrænding udgør 88% af den samlede besparelse fra substitution af fuelolie. Besparelsen fra forbrænding skyldes, at der undgås udledning af CO₂ ved forbrænding af bioolie sammenlignet med fossil fuelolie, fordi CO₂ udledning fra bioolie betragtes som CO₂ neutral. For alle 3 teknologier skyldes en stor del af den samlede besparelse CO₂-lagring fra biokul. Fjernvarme bidrager også til CO₂ besparelsen.



FIGUR 6.5: Klimapåvirkninger fra behandling af 333,3 kg afvandet slam. Summen af alle bidrag opgøres som Global Warming Potential (GWP).

De største klimamæssige belastninger ved brug af mikrobølgebehandling skyldes elforbrug, især el til tørring og proces-el til mikrobølgeanlæg. De øvrige teknologier viser samlet set en mindre klimamæssige belastning fra energiforbrug. Elfbruget til tørring er mindre for pyrolyse end for mikrobølgebehandling, fordi den producerede mængde gas fra processen er større ved pyrolyse end ved mikrobølgebehandling. Den producerede gas bliver udnyttet til tørring og reducerer dermed det eksterne elinput i systemet. Energiinput til HTL er mindre end både mikrobølger og pyrolyse, og består af industriel damp (ecoinvent databasen), som beskrevet i Tabel 6.7. Det skal dog her igen bemærkes, at data vedr. HTL stammer fra forsøg i lille skala, hvorfor data er behæftet med betydelig usikkerhed.

Mikrobølgebehandling af spildevandsslam viser en større brutto-klimabesparelse end HTL opgjort per FE (333,3 kg afvandet slam). Dette skyldes primært en højere CO₂-lagring som følge af anvendelse af biokul på landbrugsjord, idet der ved mikrobølgebehandling produceres en større mængde biokul sammenlignet med HTL. Til gengæld er den samlede netto-klimamæssige besparelse for mikrobølgebehandling mindre end for HTL, hvilket skyldes en relativt større klimabelastning fra energiinput for mikrobølgeanlægget sammenlignet med HTL.

Mikrobølgebehandling udviser en større klimamæssige besparelse end pyrolyse, hvilket skyldes, at der ved mikrobølgebehandling af spildevandsslammet substitueres fossil olie, mens der ved pyrolyse kun produceres gas og biokul.

Samlet set viser mikrobølgebehandling en netto CO₂ besparelse, men energiforbruget ved teknologien udgør stadig en væsentlig klimabelastning. I det omfang CO₂-indholdet i sammensætningen af el i elnettet nedbringes i fremtiden, fx ved en øget andel af el fra vind- og solkraft, vil klimabelastningen af dette energiforbrug mindskes. I det omfang der kan optimeres

på det samlede energiforbrug i mikrobølge-teknologien, fx i det øjeblik højtemperatur-varmepumper bliver tilgængelige i industriel skala, vil det også styrke teknologiens potentiale til at bidrage med negative CO₂ yderligere.

7. Kommercialisering af OFT's mikrobølge-teknologi

Etableringen af et mikrobølgeanlæg til ressourceudnyttelse af udrådnede spildevandsslam vil have mange økonomiske såvel som miljømæssige fordele, hvis det etableres i umiddelbar nærhed af et eksisterende rensningsanlæg.

Transport, opmagasinering og afskaffelse af slam beløber sig i dag til flere hundrede kr. pr. tons slam. For langt de fleste forsyningsvirksomheder udgør dette en betydelig udgift på årsbasis. Hertil kommer at ressourcerne i slammet ikke udnyttes optimalt, hvilket gør, at forsyningsvirksomheden potentielt går glip af en indtægt.

Der er dog mange aspekter, som skal tænkes ind, inden etableringen af et fuldskala-demonstrationsanlæg med OFT's mikrobølge-teknologi kan blive en realitet og ydermere opnå den til tænkte succes som en økonomisk og miljømæssig god investering for forsyningsvirksomheden eller andre investorer. I dette kapitel er nogle af disse aspekter belyst.

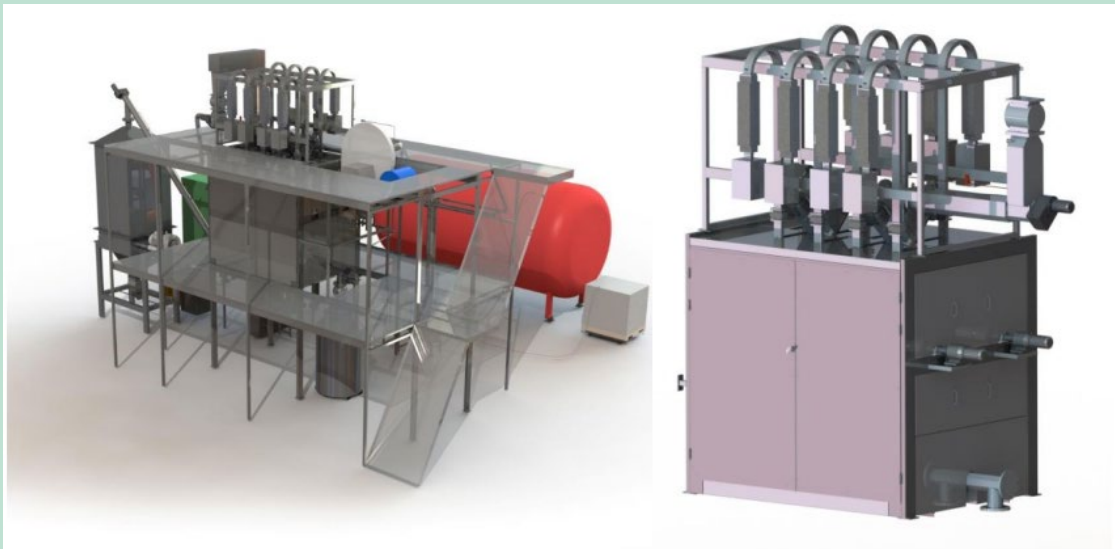
7.1 Praktiske foranstaltninger

7.1.1 OFT8 anlægsdesign og konstruktion

På baggrund af det omfattende arbejde med udvikling og test af pilotskalaanlægget, har OFT designet et fuldskalaanlægget OFT8 til behandling af forskellige rest- og affaldsprodukter, herunder spildevandsslam. Reaktordesignet er optimeret i en sådan grad, at processen kan opskaleres 1:2, forstået på den måde, at en fordobling af processen kan ske ved at tilføje ekstra moduler eller fordoble densiteten af energien, der skal anvendes.

Design, testresultater, erfaringer og viden fra pilotanlægget er blevet direkte anvendt til designet af et kommercielt fuldskalaanlæg. Det nye anlæg, illustreret i FIGUR 7.1, er baseret på et 8-reaktor modulsystem, som kan implementeres direkte eksempelvis i forbindelse med et eksisterende rensningsanlæg.

Til sammenligning består OFT pilotanlægget af en enkelt reaktor af samme størrelse og design, som dem der vil blive anvendt i et OFT8 fuldskalaanlæg.



FIGUR 7.1. OFT8 – OFT's første kommercielle fuldskalaanlæg. Til højre ses selve OFT 8 modulet vist, som måler 4,1m(H) 2,45m (L) og 1,95m (B). Til venstre hele procesanlægget.

Selve OFT8 består af følgende processystemer og -enheder:

- 8 reaktor moduler
- Hvert modul er udstyret med et mikrobølge indfødningssystem
- Automatisk kontinuerlig indfødningssystem
- Automatisk kontinuerlig olie køling og ekstraktion
- Automatisk kontinuerlig gaskøling og ekstraktion
- Automatisk kontinuerlig kulkøling og ekstraktion
- Filtreringssystem for øget olie kvalitet
- Energi fra kølingen bliver anvendt som energi input til at øge proceskapaciteten
- Automatisk dataopsamling, procesovervågning og -optimering vha. sensorer og SRO-system.

Hertil kommer etableringen af et tørringssystem, som er beskrevet i det følgende.

7.1.2 Tørringsanlæg

Etableringen af et fuldskala-mikrobølgeanlæg til slambehandling kræver, at der samtidig etableres et tørringsanlæg, som kan levere tørret slam med den rette TS % til mikrobølgeanlægget.

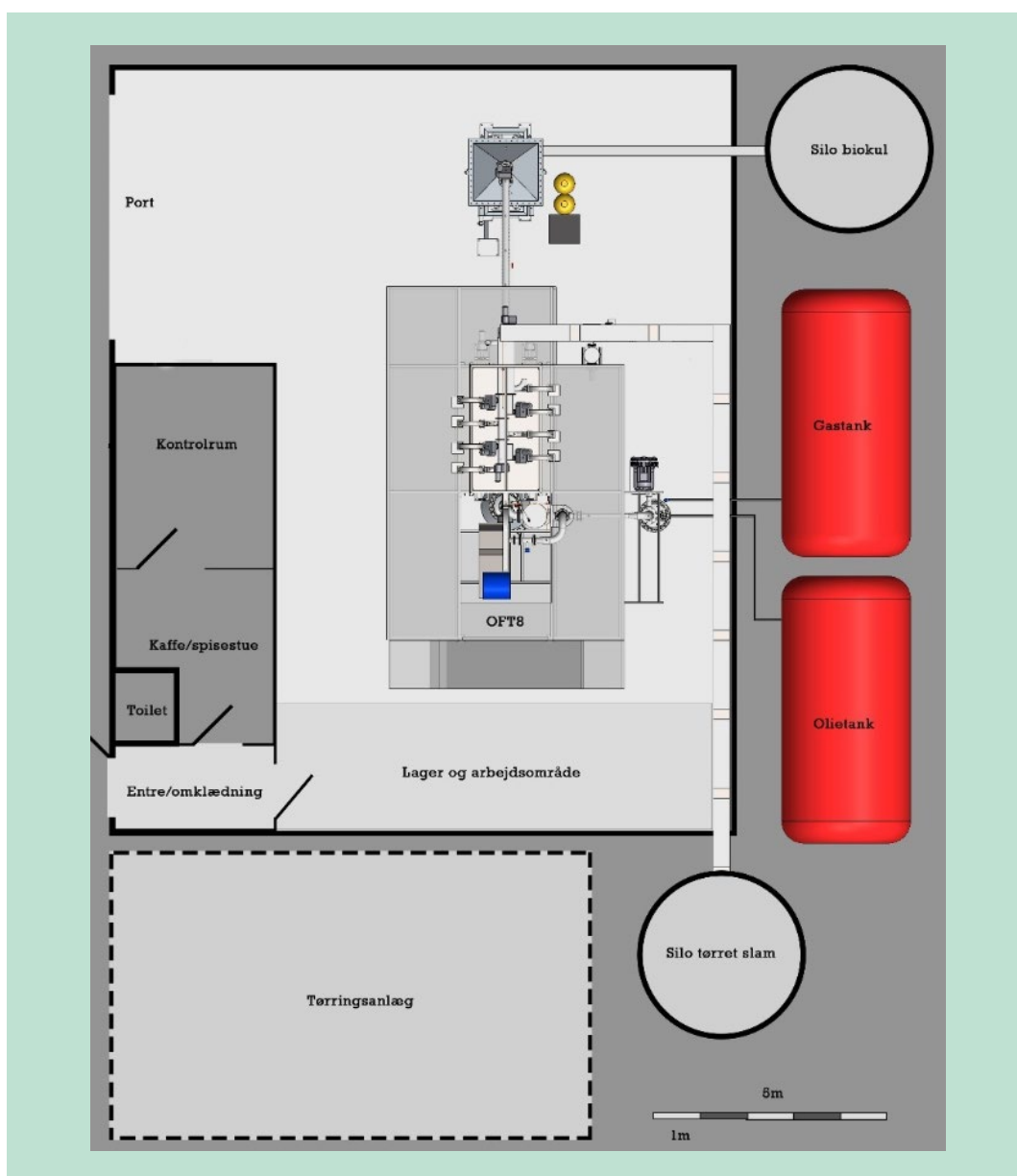
I projekterings- og etableringsfasen er det således planen, at OFT indgår i et tæt samarbejde med den foretrukne leverandør af tørringsløsninger (der er pt. identificeret 3 forskellige leverandører). Dette skyldes, at OFT8 leverer både varme og gas til tørringsanlægget, hvorfor dette skal indtænkes i anlægsdesign og infrastruktur. Herudover skal det tørrede slam kunne føres direkte fra tørringsanlægget og ind i mikrobølgeanlægget.

På langt sigt skal OFT beslutte, om man vil satse på at levere én samlet løsning, som også inkluderer et tørringsanlæg, til virksomhedens kunder. En samlet pakkeløsning har den klare for-

del, at der fra start kan sikres et optimalt sammenspil mellem tørringsprocessen og mikrobølgeanlægget, ligesom risikoprofilen for kunderne kan optimeres. Flere firmaer, der står bag de konkurrerende teknologier til slambehandling, har gjort netop dette.

7.1.3 Bygningsareal og infrastruktur

Hvis forsyningsvirksomheden skal kunne drage den fulde fordel af at etablere et fuldskala-mikrobølgeanlæg til behandling af spildevandsslam, skal det kunne placeres tæt på selve slamafvandingen eller en slamsilo til afvandet slam. Dette med henblik på at etablere en direkte forsyningslinje til tørringsanlægget og videre til selve mikrobølgereaktorerne. Det er således afgørende, at der er den nødvendige plads til etableringen af et fuldskalaanlæg og tilsvarende skal der være plads til infrastruktur herunder rørledninger, transportsnegle, opbevaringstanke m.m.



FIGUR 7.2. Footprint af fuldskala OFT8 anlæg.

Det samlede footprint, som inkluderer et tørringsanlæg, OFT8 anlægget samt opbevarings-tanke (se FIGUR 7.2) forventes at være ca. 20*25 meter (dvs. 500 m²) inkl. gangarealer og slamsilo. Slamsiloen forventes at indgå som en del af det eksisterende rensningsanlæg.

7.1.4 Myndighedsgodkendelser og -tilladelser

I forbindelse med etablering af et OFT8 fuldskala demonstrationsanlæg, skal der indhentes en række myndighedsgodkendelser og -tilladelser. Visse godkendelser og tilladelser kan være direkte afhængig af hinanden, og visse vil være grundlæggende for meddelelsen af andre godkendelser såsom byggetilladelse. Derudover gives visse godkendelser og tilladelser på vilkår, der skal efterleves ved drift af anlægget. Disse vil dermed være grundlag for opfølgning, tilsyn og evt. indskærpelser eller lovliggørelse af forhold, der er godkendt på vilkår.

Myndighedsgodkendelser har derfor afgørende indflydelse på gennemførelsen af projektet.

Lokalplan

Lokalplaners formål er at sikre en sammenhængende planlægning, der forener de samfundsmæssige interesser i arealanvendelsen, medvirker til at værne om natur og miljø og skaber gode rammer for vækst og udvikling.

Erhvervsstyrelsen er ansvarlig for en overordnet sammenfattende fysisk landsplanlægning, men udarbejdelsen og håndhævelsen af lokalplaner tilfalder kommunen. Hvorvidt et projekt er omfattet af *lokalplanspligt*, og skal have udarbejdet en lokalplan for dets påtænkte areal, afgøres alene af den pågældende kommune. Kommunen vurderer også hvorvidt projektet er i overensstemmelse med kommuneplanen, der regulerer hvilke arealer i kommunen der benyttes til hvad – f.eks. benyttes til beboelse, rekreativt område eller erhvervsområde.

Kommunen foretager en konkret vurdering af projektets bygnings-, anvendelses-, miljø- og naturpåvirkning i forhold til de omkringliggende arealer, evt. eksisterende lokalplan og kommuneplanens rammer. Hvis kommunen vurderer at der skal udarbejdes ny lokalplan, vil de påbegynde denne proces. Hvis det projekt placeres i forlængelse af eksisterende

Forholdet til kommuneplanen kan mere enkelt afklares, da der her er tale om områdeinddeling i kategorier. Hvis ikke området er udlagt til erhverv, skal der udarbejdes et tillæg til kommuneplanen, hvor området udlægges og registreres som erhvervsområde. Når der igen laves ny overordnet kommuneplan, vil tillægget indgå heri som en opdatering af kommuneplanens områdeinddelinger.

Hvis det antages, at anlægget placeres i forlængelse af eksisterende rensningsanlæg og biogasanlæg, vil der højst sandsynligt være lokalplan i forvejen. Praksis er generelt, at biogasanlæg udløser lokalplanspligt i sig selv, da de ofte etableres i det åbne land, hvor der ikke i forvejen er lokalplanlagt. I så fald vil området også være udlagt til erhvervsområde i kommuneplanen, selvom et tillæg kan gøre sig gældende, hvis anlægget skal placeres i forlængelse af eksisterende aktiviteter på matrikel, der ikke er udlagt til erhvervsområde. Hvis anlægget kan fysisk placeres inden for eksisterende lokal- og kommuneplanlægning, kan kommunen dog stadig vurdere, at der skal udarbejdes et tillæg til lokalplanen, hvis dennes bestemmelser ikke kan efterkommes ved etableringen af anlægget. Det er standard i lokalplaners formuleringer, at der kan dispenseres for visse forhold, men at der ved større fravigelser fra lokalplanen skal udarbejdes ny.

Kommunen kan vurdere, at der kan udarbejdes et tillæg til eksisterende kommuneplan. Dog er det i praksis ofte lige så enkelt at udarbejde ny lokalplan.

Lokalplanen regulerer bl.a. afstandskrav, bevoksning, vejadgang og bygningsmæssige omfang og helhedsindtryk. Byggetilladelser kan derfor kun gives ved overensstemmelse med lokalplan. Derudover regulerer lokalplanen også planlægningen af de omkringliggende områder. Dette kan i erhvervstilfælde være ift. kategorisering af den lokalplanlagt virksomhedsaktivitet, hvor en miljøklasse er gældende for afstandskrav til bl.a. forureningsfølsom anvendelse – f.eks. institution, rekreativt område eller boliger.

Miljøklassifikationen i lokalplanen vil kun kunne lade sig gøre, hvis der ikke i forvejen er mindre end de planlægningsmæssige afstande til forureningsfølsom anvendelse af de omkringliggende arealer. Miljøklassen af den pågældende aktivitet er en konkret vurdering. Hvis anlægget sidestilles med et pyrolyseanlæg, vil der være tale om miljøklasse 6 eller 7, hvilket er tilfældet for de lokalplanlagt pyrolyseanlæg i Skive, Esbjerg, Nyborg og Frederiksværk. Det er generel praksis at klassificere Biogasanlæg som miljøklasse 7, hvorfor anlægget vurderes at kunne placeres inden for samme afstande til forureningsfølsom anvendelse.

En ny lokalplan skal miljøvurderes efter reglerne i Miljøvurderingsloven. Der miljøvurderes her på selve planlægningen af arealet, hvilket indgår i den endelige lokalplan eller lokalplanstillæg.

I forbindelse med erhvervsvenligheden kan en virksomhed ofte få lov til at lave selve udkastet til lokalplan for at lette på sagsbehandlingstiden. Kommunen vil i så fald være ansvarlig for kommentering og endelig udarbejdelse af den forslaget til lokalplan, ligesom de vil stå for høringsprocessen. Høring skal jf. Planloven varer mindst 2 uger. Derefter skal lokalplanen vedtages politisk i relevante udvalg.

Planprocessen tager samlet set ofte omkring 12 måneder. En oversigt over hele lokalplanprocessen fremgår af Bilag 7.

De tidskritiske dele af lokalplansprocessen er der, hvor der inddrages kommentarer og holdninger udefra, altså i høring, evt. borgermøde eller under den politiske behandling. Disse er ligeledes de mest kritiske ift. vedtagelsen af lokalplanen. Der bør derfor for så vidt muligt søges at indpasse projektet under de gældende lokalplanforhold. Hvis dette ikke er muligt, kan lokalplansprocessen foregå parallelt med evt. miljøvurdering og miljøgodkendelse.

Miljøvurdering (VVM)

Miljøvurderingsloven sikrer et højt miljøbeskyttelsesniveau og bidrager til integrationen af miljøhensyn under udarbejdelsen af planer og programmer såsom lokalplan og kommuneplanstillæg og konkrete projekter. Hvorvidt der er pligt til at et projekt gennemgår en fuldstændig miljøkonsekvensrapport (VVM-pligt) eller i første omgang skal søge om afgørelse herom, afhænger af projektets indplacering på Miljøvurderingslovens bilag 1 eller 2.

Umiddelbart vil projektet ikke være optaget på bilag 1 over projekter, der automatisk udløser VVM-pligt. Projektet kan derimod være optaget på et eller flere af punkterne på bilag 2. Dette afhænger af projektets konkrete forhold og kapaciteter.

Projektet kan være omfattet af følgende punkter:

Pkt. 11 b) Anlæg til bortskaffelse af affald (projekter, som ikke er omfattet af bilag 1)

Punktet er gældende, hvis der behandles ikkefarligt affald med en kapacitet under 100 tons/dag.

Pkt. 11 d) Områder til oplagring af slam fra rensningsanlæg.

Punktet er gældende, hvis der skal oplagres slam fra rensningsanlæg forud for processen, der begynder med forbehandling af slammet, eller imellem procestrinene. Hvis slam opbevares på rensningsanlægget og uden decideret oplag på anlægget, er dette punkt ikke gældende.

På baggrund af en § 16-ansøgning om VVM-pligt screener myndigheden projektet i et dertilhørende og udfyldt skema. Ud fra en række kriterier vurderer myndigheden, om der kan gives enten § 21-afgørelse om VVM-pligt eller om der skal udarbejdes miljøkonsekvensrapport for projektet. En evt. miljøkonsekvensrapport er en omfattende rapport, hvor projektet detaljeret beskrives og vurderes. Miljøkonsekvensrapporten er dernæst grundlag for en VVM-tilladelse.

Når enten § 21-afgørelse om ikke VVM-pligt eller VVM-tilladelse på baggrund af miljøkonsekvensrapport foreligger, kan der gives miljøgodkendelse og byggetilladelse.

Den konkrete ansøgning om miljøgodkendelse omhandler oplysningen af en række punkter givet efter Godkendelsesbekendtgørelsen. Der skal oplyses om forskellige forhold relateret til emissioner til luft, vand eller jord, energianlæg, bygnings- og anlægsplaceringer, sikring mod spild og emissioner mv. Derudover skal der i ansøgningen indgå en såkaldt miljøteknisk beskrivelse af virksomhedens processer og deres forhold til miljøemner.

Miljøgodkendelse

Miljøbeskyttelsesloven medvirker til at værne om natur og miljø så samfundsudviklingen kan ske med respekt for bl.a. menneskets livsvilkår. Godkendelsespligt efter Miljøbeskyttelseslovens kapitel 5 afgøres i stil med VVM-afgørelse eller -pligt efter en liste over miljøbelastende virksomhedsaktiviteter – oversigt over såkaldt listevirksomheder i Godkendelsesbekendtgørelsen. Inden etablering af en listevirksomhed, eller godkendelsespligtig aktivitet i forbindelse med en listevirksomhed eller udvidelse heraf, skal der ansøges om miljøgodkendelse hos miljømyndigheden.

Det vurderes at følgende såkaldte listepunkter vil være relevant for godkendelse af anlægget efter Godkendelsesbekendtgørelsens bilag 2:

Pkt. K 205: Anlæg, der nyttiggør ikke-farligt affald, bortset fra anlæg under listepunkt 5.3 i bilag 1, autoophugning, skibsofhugning, biogasfremstilling, kompostering og forbrænding.

Punktet omhandler bl.a. slam-mineraliseringsanlæg og tørring af slam. Hvis slam fra rensningsanlæg først skal forbehandles ved tørring, vil dette punkt være gældende. Hvorvidt anlægget i stedet er underlagt listepunkt 5.3 i bilag 1, afgøres af om kapaciteten er større end 75 tons/dag, hvis der samtidig er tale om biologisk behandling, forbehandling med henblik på forbrænding eller medforbrænding, behandling af slagge og aske eller behandling i shreddere af metalaffald og køretøjer.

Punkt K 212: Anlæg for midlertidig oplagring af ikke-farligt affald forud for nyttiggørelse med en kapacitet for tilførsel af affald på 30 tons/dag eller derover.

Punktet er relevant, hvis slam skal opbevares på anlægget inden nyttiggørelse. Opbevaringskapaciteten beskriver den mængde der *kan* tilføres og opbevares på anlægget og ikke nødvendigvis den reelle tilførte mængde til mellemoplagring inden nyttiggørelse. Der er standardvilkår for listepunktet og aktiviteten for midlertidig oplagring.

Pkt. K 215: Anlæg, der forbrænder ikke-farligt affald med en kapacitet på mindre end eller lig med 3 tons/h.

Det er uvist hvorvidt kommunen vil vurdere at anlægget *forbrænder* slammet i anlægget. Dette vil i givet fald afhænge af, om fortrængningsgas fra processen skal afbrændes som spildprodukt (affald) eller opsamles som biprodukt.

Pkt. D 201: Virksomheder, der ved fysiske processer fremstiller organiske eller uorganiske kemiske stoffer, produkter eller mellemprodukter, hvor fremstillingen kan give anledning til væsentlig forurening.

Punktet er relevant for produktionen af fortrængningsgas/pyrolysegas, olie og kul, og omhandler også oplaget af disse efter fremstilling, hvis processen og oplaget *kan* give anledning til væsentlig forurening efter kommunens vurdering.

Opsummerende må det vurderes, at aktiviteten er godkendelsespligtig, hvorfor der forud for etablering skal ansøges om miljøgodkendelse efter de nævnte mulige relevante listepunkter. Miljøgodkendelse er en godkendelse af anlægget på vilkår, der skal overholdes i forbindelse med driften. Disse vilkår fås fra standardvilkår relateret til aktiviteten jf. Standardvilkårsbekendtgørelsen og suppleres af bestemmelser fra Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen, Slam-bekendtgørelsen, Luftvejledningen samt kommunale bestemmelser og regulativer.

Pyrolyse er en proces, der som udgangspunkt er omfattet af Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen. Pyrolyse er dog ikke omfattet af bekendtgørelsen, jf. § 3, stk. 1. punkt 5), hvis gasserne fra anlægget renses i en sådan grad, at de ikke længere udgør affald forud for forbrænding, og de ikke kan medføre større emissioner end dem, der skyldes fyring med naturgas. Virksomheder omfattet af Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen er bl.a. omfattet af strenge krav om f.eks. AMS-kontrol af luftemissioner. Der skal i så fald argumenteres for kvaliteten af den producerede bi-/spildgas fra processen, når der ansøges om miljøgodkendelse, således der evt. kan undgås strenge krav efter Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen.

Det skal i anlæggets miljøgodkendelse fremgå, hvorvidt asken kan defineres som bioaske efter Slambekendtgørelsen og dermed benyttes til jordbrugsformål uden skadelig virkning på miljøet. Der vil blive stillet krav om analyser herefter til sikring af, at der vil være tale om produktion af bioaske og ikke affald med f.eks. et højt indhold af tungmetaller.

Olietanke i forbindelse med listevirksomhed reguleres af Olietanksbekendtgørelsen. Olietankens størrelse er afgørende for, hvilke krav der stilles. Dette sker ved anmeldelse af tanken til kommunen, der også står for at registrere olietanke i BBR. Kravene i bekendtgørelsen vil blive stillet i Miljøgodkendelsen.

MCP-anmeldelse

Hvis dele af processen drives af et mellemstort fyringsanlæg på mellem 1 og 5 MW indfyret effekt jf. MCP-bekendtgørelsen, skal fyringsanlægget anmeldes herefter. Anmeldelsen sker til

kommunen, og fyringsanlægget må ikke etableres inden en kvittering om registrering. Når fyringsanlægget er registreret, skal det blot følge kravene i MCP-bekendtgørelsen. Disse krav omhandler emissionsgrænseværdier, kontrolkrav mv. i lighed med en miljøgodkendelse.

I tilfælde af etablering af mellemstort fyringsanlæg skal der ligeledes VVM-ansøges om VVM-pligt eller ej.

Byggetilladelse

Opførelse af byggeri skal godkendes af kommunen. Ansøgningen herom skal indeholde en række beskrivelser, tegninger og beregninger relateret til permanente bygningsværkerne, der ønskes etableret i forbindelse med anlægget. Et bygningsværk er permanent, hvis det står fast samme sted i mere end 6 uger. Ansøgning skal som minimum indeholde: detaljeret situationsplan, matrikelkort, afløbsplan, plantegning og indretning, facadetegning fra fire verdenshjørner, tværsnit med højder og dimensioner, detailtegninger af specielle konstruktioner, isoleringer mv., samt overordnede oplysninger om konstruktioner, materialer og installationer.

Byggetilladelsen kan først gives, når kommunen har sikret sig, at projektet har draget omsorg over for andre relevante godkendelser og tilladelser såsom VVM-afgørelse, miljøgodkendelse mv.

7.1.5 Samarbejdspartnere, kunder og investorer

Ift. at etablere et fuldskala-demonstrationsanlæg i Danmark bør OFT fokusere på de store danske forsyningsvirksomheder, for hvem det økonomiske incitament er størst. Samtidig råder de store renselanlæg i Danmark også over flere kompetencer og ressourcer, som kan allokeres til at tage del i etableringen og procesimplementeringen af et OFT8 fuldskaalanlæg.

Idet etableringen af et nyt anlæg kræver en del plads, er det oplagt at fokusere på rensningsanlæg med det fornødne areal til rådighed. Ydermere kan placeringen af rensningsanlægget spille ind ift. hvilken miljøklasse OFT8 anlægget opnår, og hvilke krav der således stilles ift. afstand til boligområder m.m.

Flere af de mellemstore og store rensningsanlæg står i de kommende år overfor gennemgribende renoveringer, moderniseringer og endda udskiftning til nyt. I den forbindelse vil løsninger til optimal ressourceudnyttelse af spildevand og -slam samt miljø- og klimavenlige løsninger stå øverst på dagsordenen, og det er således oplagt for OFT at have fokus på disse rensningsanlæg.

En relevant investeringspartner for OFT kunne være Copenhagen Infrastructure Partners (CIP, cipartners.dk), som specialiserer sig i investeringer i energinfrastruktur med fokus på bæredygtighed, samfunds-, miljø- og klimagevinster. Investeringsprofilen passer således fint ift. OFTs vision om at være en væsentlig spiller i hele den grønne omstilling.

8. Konklusion

Etableringen af et OFT8 mikrobølgeanlæg til behandling af spildevandsslam for yderligere ressourceudnyttelse af slammet kan ud over reducerede udgifter til transport, opmagasinering og afskaffelse af slam generere indtægter ifm. salg af fjernvarme, bioolie, biokul og eventuelt gas.

Baseret på sammenligningen af de tre teknologier præsenteret i denne rapport, vurderes OFTs mikrobølgeteknologi at være særdeles konkurrencedygtig. Både massebalancen og vurderingen af produktkvaliteter og klimaaftryk, at kommercialisering af teknologien har et spændende potentiale.

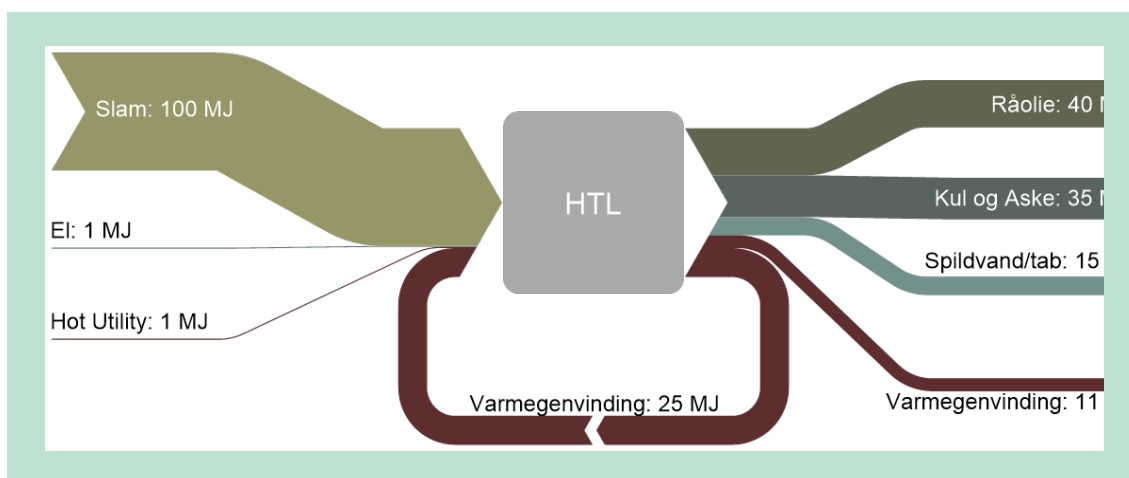
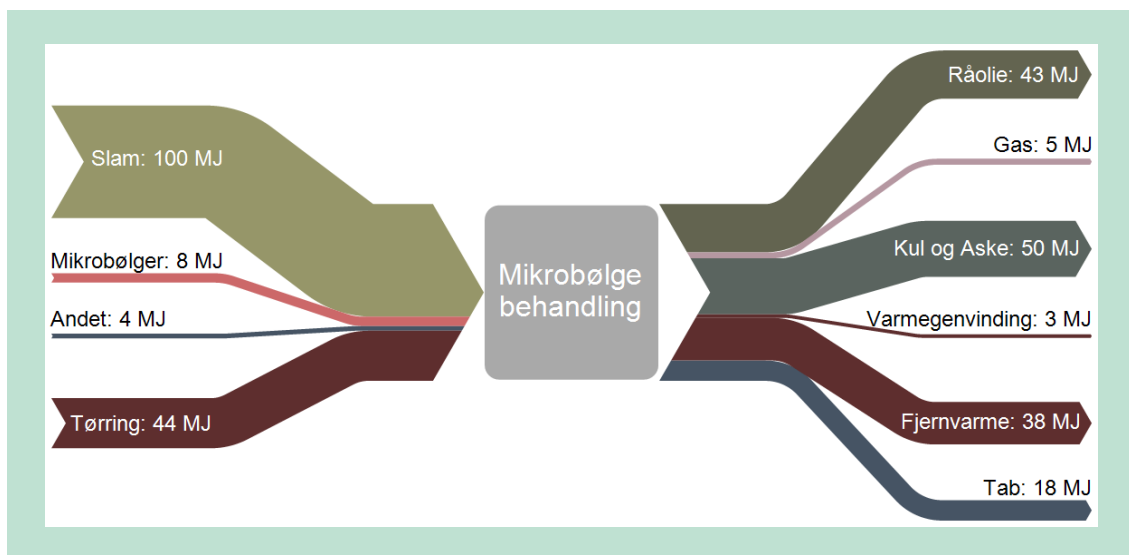
Sammenligningen har ligeledes vist, på hvilke områder, der kan optimeres for at gøre teknologien endnu mere konkurrencedygtig, herunder optimering af energiforbrug i forbindelse med tørring af slammet samt forbedring af produktkvaliteter (kul og olie) ved opgradering af disse og ved optimering af fødematerialet. I den forbindelse er potentialet ved at kunne bearbejde ikke-afgasset slam således endnu ikke undersøgt, og kan være betydeligt.

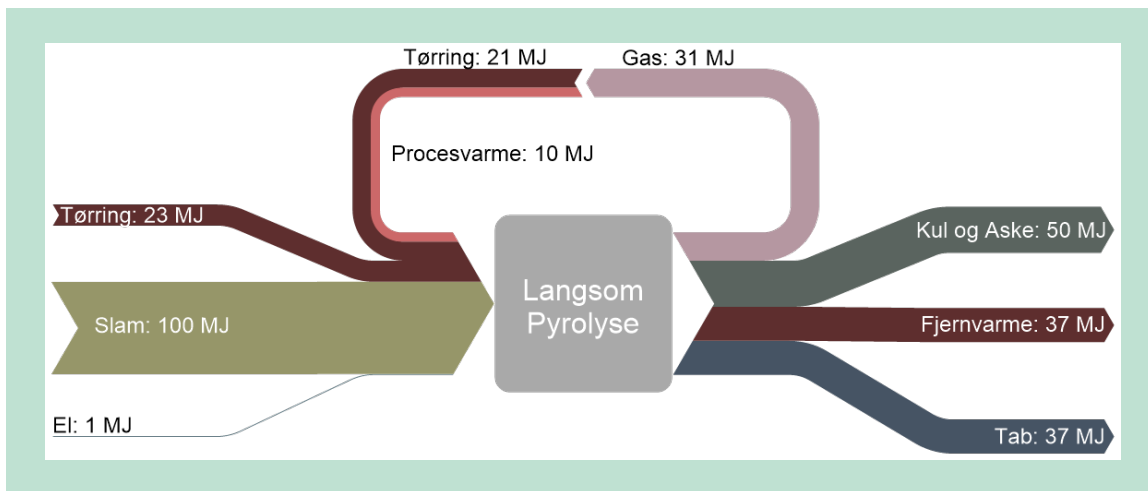
9. Referencer

- Bridgwater, A., Czernik, S., & Piskorz, J. (2001). An Overview of Fast Pyrolysis. *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*, 2, 977-997.
- Ea Energianalyse. (2020). *SkyClean*. København.
- Energianalyse, E. (2020). *SkeClean - Pyrolyse af halm og nedsmulding af biokul som klimavirkemiddel*. København: Ea Energianalyse.
- Energinet. (2022). Foreløbig miljødeklarering af 1 kWh el, 2021.
- Energistyrelsen. (2022). Standardfaktorer for brændværdier og CO₂-emissionsfaktorer til brug for rapporteringsåret 2021 (revideret 25-01-2022). Hentet fra https://ens.dk/sites/ens.dk/files/CO2/energistyrelsens_standardfaktorer_for_2021-25-01-2022.pdf
- Energistyrelsen. (2022). *Technology Data - Renewable fuels*. Danish Energy Agency.
- Hang, Y., Chiueh, P., & Lo, S. (2016). A review on microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Sustainable Environment Research*, 26, 103-109.
- ISO. (2006). *Environmental management - Life Cycle Assessment - Requirements and guidelines (ISO Standard No. 14044:2006)*. International Organization for Standardization.
- Kommissionen, E. (7. 7 2021). *Gødningsprodukter — pyrolyse- og forgasningsmaterialer*. (Europa Kommissionen) Hentet 5. 5 2022 fra https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12136-G%C3%B8dningsprodukter-pyrolyse-og-forgasningsmaterialer_da
- Kredsløb. (2021). Fjernvarmedeklaration fra fjernvarmeleverandør i Aarhus Kommune. Hentet fra <https://www.kredsløb.dk/professionel/produkter-og-services/fjernvarme/miljødeklaration-emissionsdata>
- Lemming, C. (2022). *Perspektiver for landbruget på nye teknologier til slamhåndtering*.
- Lozano, E., Løkke, S., Rosendahl, L., & Pedersen, T. (2022). Production of marine biofuels from hydrothermal liquefaction of sewage sludge. Preliminary techno-economic analysis and life-cycle GHG emissions. *Energy Conversion and Management: X*.
- Marrone, P., Elliott, D., Billing, J., Hallen, R., Hart, T., Kadota, P., . . . Schmidt, A. (2018). Bench-Scale Evaluation of hydrothermal processing technology for conversion of wastewater solids to fuels. *WATER ENVIRONMENT RESEARCH*.
- Melissari, B. (2014). Ash Related Problems With High Alkali Biomass and its Mitigation - Experimental Evaluation. *ResearchGate*.
- Miljøministeriet. (27. 06 2018). *Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål*. (Retsinformation) Hentet 11. 05 2022 fra <https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2018/1001>
- Miljøministeriet. (09. 07 2019). *Bekendtgørelse om anvendelse af bioaske til jordbrugsformål*. (Retsinformation) Hentet 05. 11 2022 fra <https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2019/732>
- Miljøstyrelsen. (18. 10 2021). *Miljøstyrelsen anbefaler loft over PFAS i spildevandsslam*. Hentet fra Miljøstyrelsen: <https://mst.dk/service/nyheder/nyhedsarkiv/2021/okt/miljoestyrelsen-anbefaler-loft-over-pfas-i-spildevandsslam/>
- Pacific Northwest National Laboratory. (2021). *Wet waste hydrothermal liquefaction and biocrude upgrading to hydrocarbon fuels: 2020 state of technology*. Richland, Washington: PNNL.
- Petrovic, A., Vohl, S., Cencic Predikaka, T., Bedoic, R., Simonic, M., Ban, I., & Cucek, L. (2021). Pyrolysis of Solid Digestate from Sewage Sludge and Lignocellulosic

- Biomass: Kinetic and Thermodynamic Analysis, Characterization of Biochar. *Sustainability*, 13(17), 1-34.
- Schmidt, H.-P., Kammann, C., Hagemann, N., Leifeld, J., D. Bucheli, T., Angel Sánchez Monedero, M., & Luz Cayuela, M. (2021). Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta-analyses. *CCB - Bioenergy*, 13(11), 1708-1730.
- Sørmo, E., Silvani, L., Bjerkli, N., Hagemann, N., R. Zimmerman, A., E. Hale, S., . . . Cornelissen, G. (2021). Stabilization of PFAS-contaminated soil with activated biochar. *Science Of The Total Environment*, 763, Article 144034.
- ToolBox, E. (2003). *Fuels - Higher and Lower Calorific Values*. (Engineering ToolBox) Hentet 10. 05 2022 fra https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html
- Winding, A. (2022). *Miljøkonsekvenser ved landbrugets anvendelse af biokul fra pyrolyse af spildevandsslam*.

Bilag 1. Energibalace baseret på 100 MJ input





Bilag 2. Testrapport, kørsel 114

Dato: 21 oktober 2021

Vejr: Kølgt. Luftfugtighed høj

Personer: Søren, Alice, Anders, Frederik

Besøg: Ingrid Verpe fra Dansk Biofiber og Gødning

Formål:

Kørsel med slam granulat der, gennem en overhededt damp tørring, har det lavest mulige vandindhold og se på hvordan dette påvirker kørslen.

Om kørslen:

Efter en succesfuld kørsel 112 med 9,5% vand der bekræftede hypoteserne om at lavere vandindhold giver større gennemstrømning af materiale, skal kørsel med tørret slam testes med et endnu lavere vandindhold. Derfor er det tørrede slam granulat kørt til Grainas' overhede damp tørreri, hvor det har gennemgået en sekundær højtemperatur tørring. Tørringen medførte, at vandindholdet blev bragt ned på mellem 0,09% og 0,3% vand med et gennemsnit på 0,2%. Dette tal er senere bekræftet af Aarhus Vand. Slammet er blevet opbevaret i et opvarmet skur natten over inden kørslen, men har ikke optaget vand.

Målet er at processere over 300 kg tørret slam, men det vides ikke hvor lang tid dette vil tage. Målet er at opnå cirka 40kg indfødnings i timen, men hele systemet styres stadig således at cyklon-inlet har en temperatur på 350 grader.

Der køres med zeolit F9 som katalysator.

Log af kørsel:

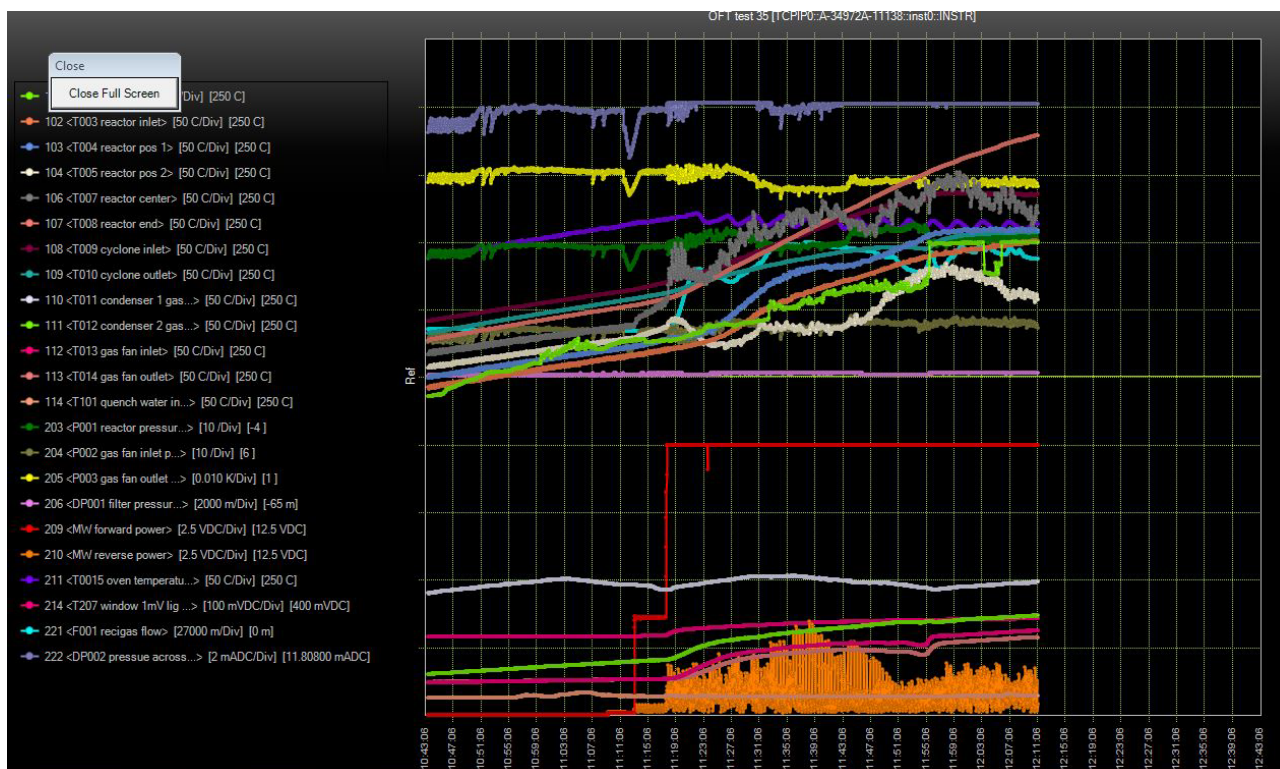
Koldtest:

<u>Tidspunkt</u>	<u>Event</u>
07:35	Opstart følges
07:35	Logger startes
07:40	Nitrogen startes 16l/min
07:41	Reciblæser startes
07:53	Gennemgangstest påbegyndes
08:00	Gennemgang godkendt (Udtagen K1 udtag)
08:00	Reciblæser slukkes
08:05	Nitrogen slukkes

Kørsel

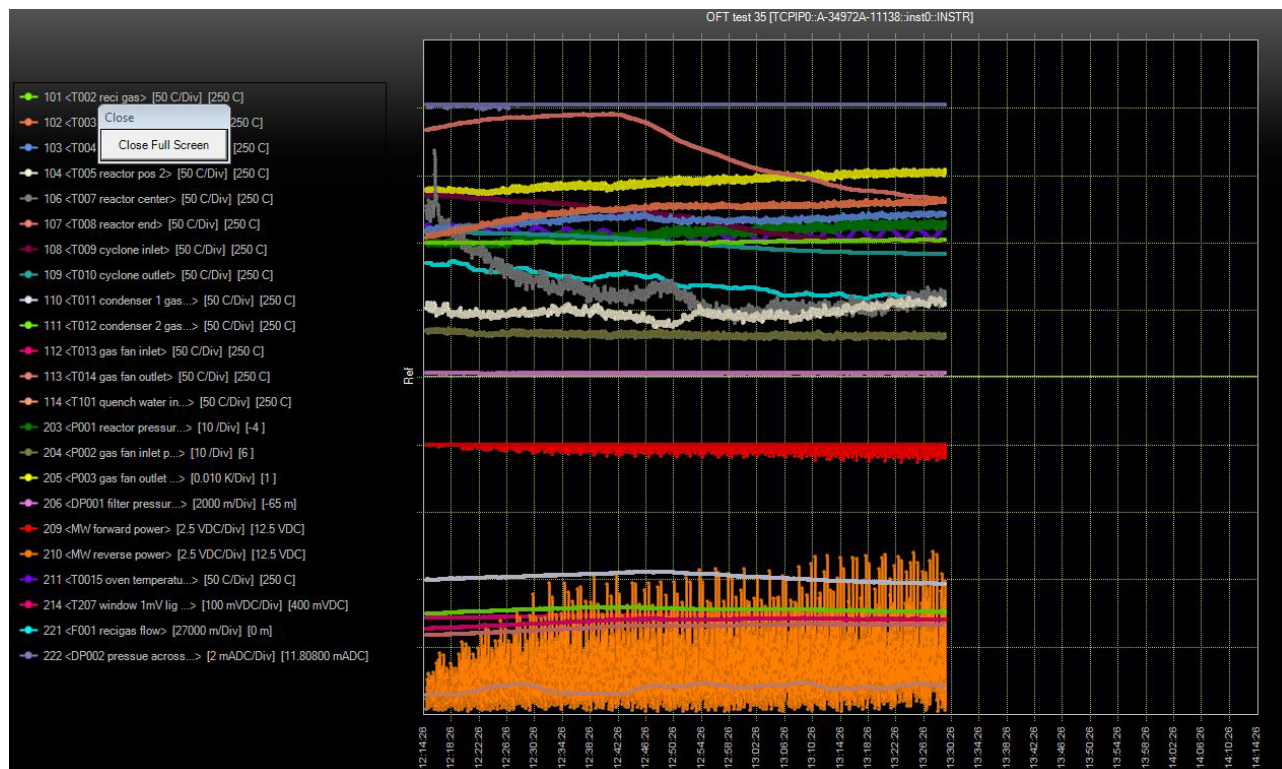
<u>Tidspunkt</u>	<u>Event</u>
------------------	--------------

- 08:05 Generator tændes (17 diesel cm målt)
- 08:10 Nitrogen tændes 10l/min
- 08:15 Ovn tændes
- 08:14 Der udføres sæbetest på hele anlægget for en sikkerhedsskyld
- 08:24 Sæbetest gennemført uden fund af lækager
- 08:30 Omrører startes
- 08:35 Reciblæser og reciheater tændes
- 08:40 Gennemgangstest af K1 udtag godkendes



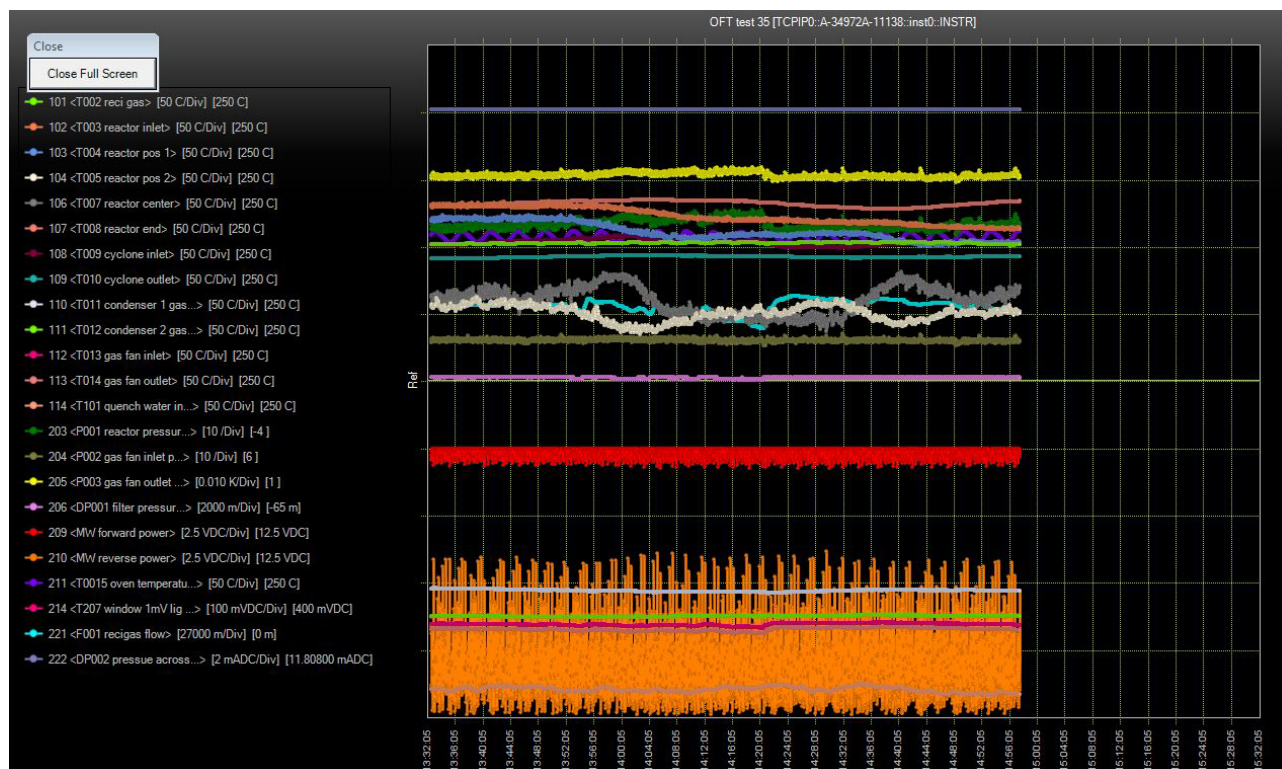
- 11:07 Spjæld halv åbnet til kondensator
- 11:07 Kondensator1: 2Hz
- 11:13 45 kg slam (Batch 1)**
- 11:13 Starter Indfødnng 10Hz
- 11:14 2kW mikrobølger
- 11:15 Mikrobølge lækagetest ok
- 11:18 10kW mikrobølger
- 11:25 Indfødnng: 9Hz
- 11:30 Kondensator1: 5kW
- 11:35 Indfødnng: 9,2Hz
- 11:37 Kondensator1: 8Hz
- 11:39 Indfødnng: 9,5Hz
- 11:43 Indfødnng: 10Hz

11:48 Indfødning: 10,5Hz
 11:53 Indfødning: 11,5Hz
 11:57 Indfødning: 12,5Hz
 12:03 Indfødning: 13Hz
 12:07 Indfødning 13,5Hz

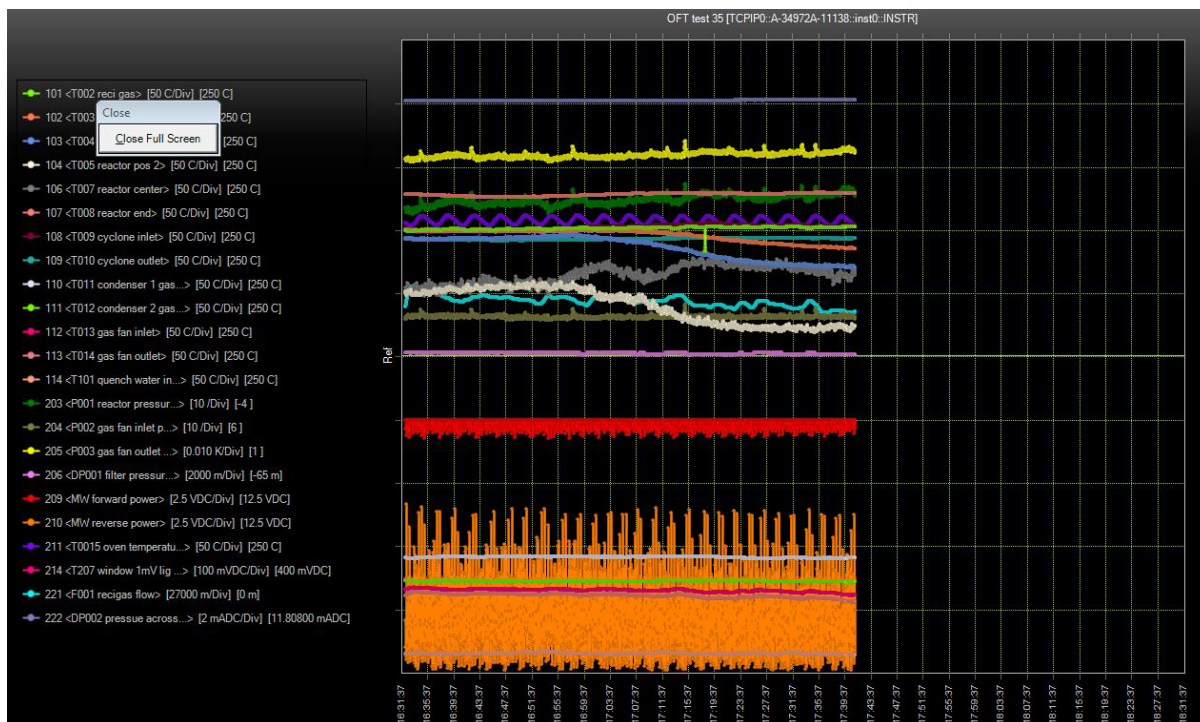


12:14 Hjælpegas slukkes
 12:16 Indfødning: 14Hz
 12:16 Kondensator1: 8,5Hz
 12:22 Indfødning: 14,5Hz
 12:24 Kondensator: 10Hz
 12:27 Kondensator2: 1,5Hz
 12:29 Indfødning: 15Hz
 12:30 Kondensator2: 11,5Hz
 12:35 Indfødning: 15,5Hz
 12:38 Kondensator1: 13Hz
 12:38 Kondensator1: 4Hz
12:40 Tilført 45kg slam (Batch 2) opsummeret mængde: 90kg
 12:45 Kondensator1: 14,5Hz
 12:45 Kondensator2: 6,5Hz
 12:47 Indfødning: 16Hz
 12:50 Kondensator1: 16Hz

- 12:50 Kondensator2: 8Hz
- 12:53 Indføding: 16,5Hz
- 12:56 Kondensator1: 20Hz
- 13:05 Kondensator1: 23Hz, Kondensator2: 10Hz
- 13:18 Kondensator1: 23,5Hz, Kondensator2: 10,5Hz
- 13:25 Kondensator1: 24Hz



- 13:47 **Tilført 45kg slam (Batch 3) opsummeret mængde: 135kg**
- 13:58 Indføding: 17Hz
- 14:32 Gasprøve taget
- 14:47 **Tilført 45kg materiale (Batch 4) opsummeret mængde: 180kg**
- 14:56 5x250ml olieprøver
- 15:16 Efter bedste skøn: Middelværdi Reverse Power 400W
- 15:25 Indføding: 17,1Hz
- 15:34 Indføding: 17,2Hz
- 15:52 **Tilført 45kg materiale (Batch 5) opsummeret mængde: 225kg**
- 16:14 Indføding: 17,4Hz
- 16:22 Indføding: 17,6Hz
- 16:33 3 min. olieblending prøve



16:53 Tilført 45kg materiale (Batch 6) opsummeret mængde: 270kg

17:05 5x500ml olie prøver

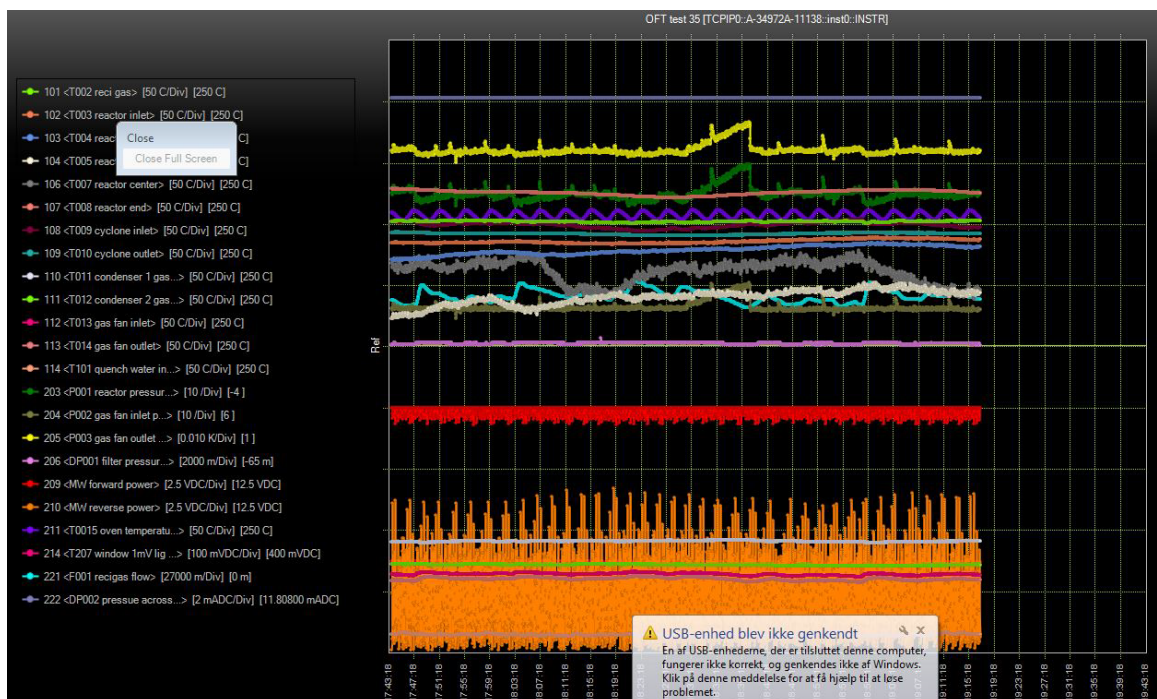
17:12 Indfødning: 17,8Hz

17:18 Indfødning: 18Hz

17:20 Hver gang indfødningen øges falder cyclone inlet-temperaturen kortvarig hvorefter den lige så langsom begynder at stige igen, derfor den konstante ændring af indfødning.

17:26 Konstateret at kondensator 1 og 2 temperaturerne falder ved øget indfødning.

17:30 Indfødning: 18,2Hz



17:53 Tilført 45kg materiale

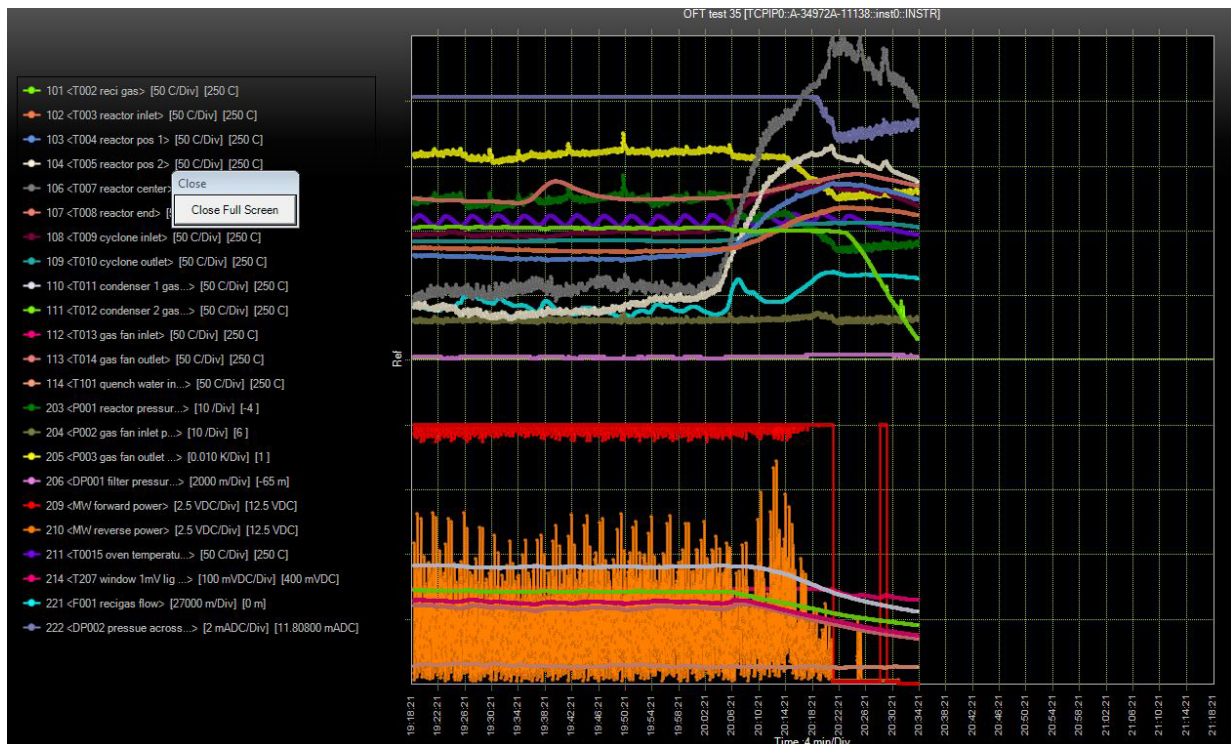
18:19 Indfødnig: 18Hz

18:22 Indfødnig: 17,8Hz

18:39 Haner før og efter blæser var lukket, derfor øget tryk. Klap ventil skal nok renses.

18:52 Tilført 49,7kg materiale

19:15 3 min. Olieblanding



20:00 Sidste materiale kørt ind.

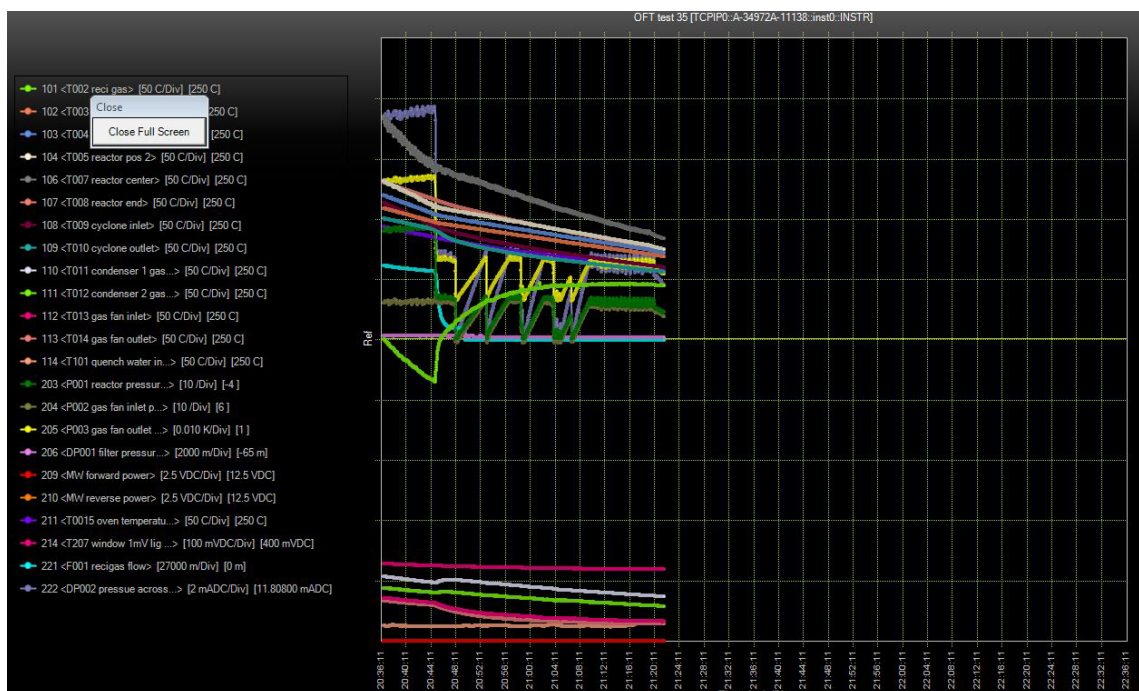
20:00 Nedlukning påbegyndes

20:22 Mikrobølger slukkes

20:23 Slukket for Recivarme og ovn

20:26 Målt forward power til: 10,64 og Reverse power til: 250 – 300W

20:30 Diesel generator slukkes (7cm afmålt)

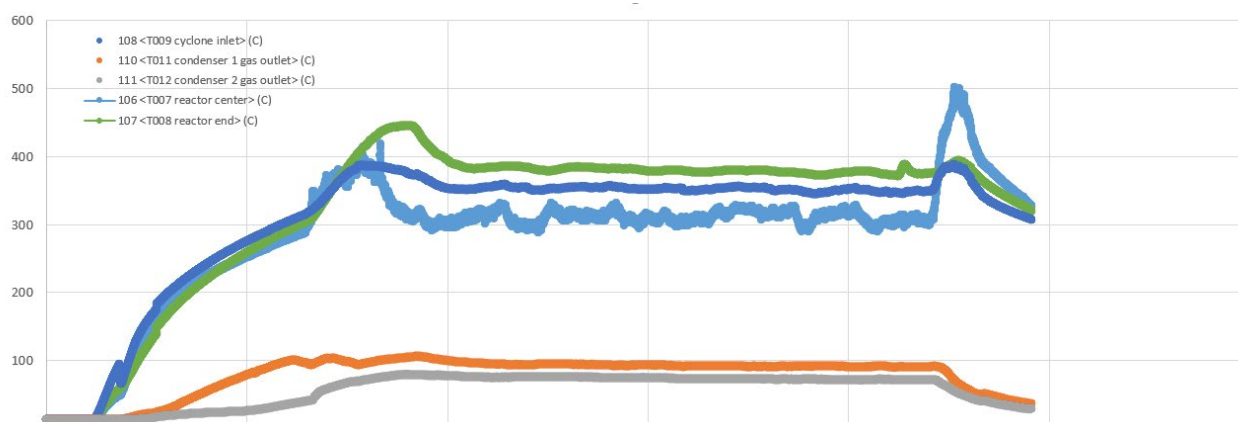


- 20:50 Sluk reciblæser (cyclone inlet-temperatur: 351 grader)
- 20:50 Tømme vandlåse
- 21:12 Vandlås + slutafvejning
- 21:20 Cyclone inlet-temperatur: 311 grader
- 21.24 Alt slukket

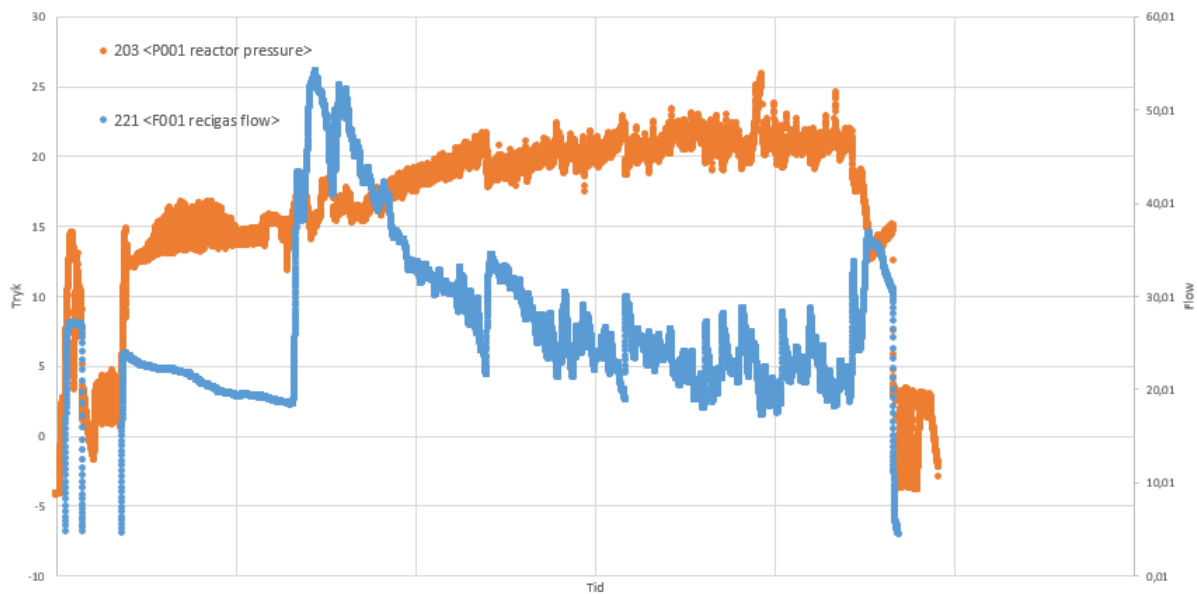
Kørselsopsummering

En meget velfungerende kørsel som demonstrerede et meget stabilt og højt materialeflow. Det blev desuden observeret at mikrobølgerne bliver godt optaget af det supertørre slam og dermed understøttes observationen om en sammenhæng imellem indfødingsmaterialets vandindhold og gennemstrømseffektiviteten yderligere.

Temperatur



Tryk og flow



Opmåling:

Tid	Påfyldning			Indfødnig		Kul produktion	
	Event	Kg	Tid	min	kg/time	Kg	procent
Del 1,	Påfyldning	45	1113	87			
		45	1240	67			
	Del 1 i alt	90		154	35,1		
Del 2,	Påfyldning	45	1347	60			
		45		60			
	Del 2 i alt	45		60	45,0		
Del 3,	Påfyldning	45	1447	65			
		45		65			
	Del 3 i alt	45		65	41,5		
Del 4	Påfyldning	45	1552	61			
		45		61			
	Del 4 i alt	45		61	44,3		
Del 5	Påfyldning	45	1653	60			
		45		60			
	Del 5 i alt	45		60	45,0		
Del 6	Påfyldning	45	1753	60			
		45		60			
	Del 6 i alt	45		60	45,0		
Del 7	Påfyldning	49,7	1852	68			
		49,7		68			
	Del 7 i alt	49,7		68	43,9		
Slut	Rest i alt		2000				
Total kørsel, tid / processet mængde materiale				528,00	8t48min		
	Udtaget slam til prøve	1,64	kg				
Total for kørsel	Total Slam (minus zeolite)			528,00 minutter	44,2 kg/time		
		363,06 Kg		8,80 timer	41,26 kg/time	222,3	61,23%

Kondensat							
Kond 1	kond 2	filter	Før Blæser	Efter blæser	Olieprøver	I alt, kg	Procent ift indfødning
4,07	2,81	0,69	1,83	3,17		12,57	14%
4,87	3,31	1,32	2,84	1,62		13,96	31%
5,33	3,41	1,26	1,79	1,44		13,23	29%
5,24	3,3	1,07	1,58	1,12	0,6257	12,9357	29%
5,93	3,33	1,11	1,66	1,04		13,07	29%
5,2	3,4	1,09	2,19	1,09		12,97	29%
6,03	3,61	2,23	1,58	1,12	0,6647	15,2347	31%
3,14	2,79	0,93	2,31	1,64		10,81	
39,81	25,96	9,7	15,78	12,24	1,2904	104,8	28,86%

Opsummering:

Kørsel med meget lavt vandindhold (0,2%) fungerer rigtig godt og meget tyder derfor på at overhedet damptørring er en relevant teknologi til at levere slam til anlægget. Indfødning under kørsel var 44,2kg/time og dermed 10% højere end forventet. Der laves nye aftaler med Grai-nas angående levering af slam til test 115 og der skal sigtes efter at de fleste fremtidige kørsler gennemføres med meget tørt slam.

Bilag 3. Samlet analyse slam, kørsel 114

Eurofins Umwelt Ost GmbH - Lindenstraße 11 - Gewerbegebiet Freiberg Ost - D-09627 Bobritzsch-Hilbersdorf

ORGANIC FUEL TECHNOLOGY
Kantorparken 35
8240 Risskov
DENMARK

This report replaces the previous report AR-22-FR-006983-01 from 2022-02-25 because of changes to Batch and/or Sample descriptions.

Title : **Analytical Report for Order 12150751**
Test report number : **AR-22-FR-006983-02**
Project name : **Sludge and Biochar analysis for research project**

Number of samples : **1**
Sample type: **sewage sludge**
Sample Taker: **delivered by client**

Sample reception date : **2021-12-23**
Sample processing time : **2021-12-23 - 2022-01-10**

The test results refer solely to the analysed test specimen. Unless the sampling was done by our laboratory or in our sub-order the responsibility for the correctness of the sampling is disclaimed. This analytical report is only valid with signature and may only be further published completely and unchanged. Extracts or changes require the authorisation of the EUROFINS UMWELT in each individual case.

Our General Terms & Conditions of Sale (GTCS) are applicable, as far as no specific agreements do exist. The GTCS are available on <http://www.eurofins.de/umwelt/avb.aspx>.

Accredited test laboratory according to DIN EN ISO/IEC 17025:2018 DAkkS notification under the DAkkS German Accreditation System for Testing. The laboratory is according (D-PL-14081-01-00) accredited.

Attachments

12150751_121178826_annex1

William Homilius
Sales Team Member
Phone +49 37312076516

Digitally signed 2/28/2022
William Homilius
Prüfleitung



Eurofins Umwelt Ost GmbH
Löbstedter Strasse 78
D-07749 Jena

Phone
+49 3641 4649 0
Fax +49 3641 4649 19
info_jena@eurofins.de www.eurofins.de/umwelt

GF: Dr. Benno Schneider
Axel Ulbricht, Daniel Schreier
Amtsgericht Jena HRB 202596
USt-ID.Nr. DE 151 28 1997

Bankverbindung: UniCredit Bank AG
BLZ 207 300 17
Kto 7000000550
IBAN DE07 2073 0017 7000 0005 50
BIC/SWIFT HYVEDEMME17

				Description		Korsel 114 slam indfodning slam OFT
				Sample number		121178826
Parameter	Lab	Accr.	Method	LOQ	Unit	

Physico-chemical parameters from the original substance

Moisture	FR	RE000 FY	DIN EN 12880 (S2a): 2001-02	0.1	Ma.-% Raw Product	0.8
----------	----	-------------	--------------------------------	-----	----------------------	-----

Inorganic sum parameters from the original substance

Ash content (815°C)	FR	RE000 FY	DIN 51719: 1997-07	0.1	Ma.-% Raw Product	40.6
Ash content (815°C)	FR	RE000 FY	DIN 51719: 1997-07	0.1	% (w/w) dm	40.9

Elements from the original substance

Carbon	FR	RE000 FY	DIN 51732: 2014-07	0.2	Ma.-% Raw Product	32
Carbon	FR	RE000 FY	DIN 51732: 2014-07	0.2	% (w/w) dm	32
Hydrogen	FR	RE000 FY	DIN 51732: 2014-07	0.1	Ma.-% Raw Product	4.3
Hydrogen	FR	RE000 FY	DIN 51732: 2014-07	0.1	% (w/w) dm	4.4
Total nitrogen	FR	RE000 FY	DIN 51732: 2014-07	0.05	Ma.-% Raw Product	4.24
Total nitrogen	FR	RE000 FY	DIN 51732: 2014-07	0.05	% (w/w) dm	4.28
Sulphur (S), total	FR	RE000 FY	DIN 51724-3: 2012-07	0.03	Ma.-% Raw Product	1.17
Sulphur (S), total	FR	RE000 FY	DIN 51724-3: 2012-07	0.03	% (w/w) dm	1.18
Oxygen	FR	RE000 FY	DIN 51733: 2016-04		Ma.-% Raw Product	17.4
Oxygen	FR	RE000 FY	DIN 51733: 2016-04		% (w/w) dm	17.5

Elements from the micro wave pressure digestion acc. to DIN EN 16174: 2012-11

Lead (Pb)	FR	RE000 FY	DIN EN 16171 (S32): 2017-01	2	mg/kg dw	31
Cadmium (Cd)	FR	RE000 FY	DIN EN 16171 (S32): 2017-01	0.2	mg/kg dw	1.1
Chromium (Cr)	FR	RE000 FY	DIN EN 16171 (S32): 2017-01	1	mg/kg dw	70
Potassium (K)	FR	RE000 FY	DIN EN 16171 (S32): 2017-01	5	mg/kg dw	3500
Copper (Cu)	FR	RE000 FY	DIN EN 16171 (S32): 2017-01	1	mg/kg dw	273
Nickel (Ni)	FR	RE000 FY	DIN EN 16171 (S32): 2017-01	1	mg/kg dw	43
Phosphorus	FR	RE000 FY	DIN EN 16171 (S32): 2017-01	10	mg/kg dw	35000
Mercury (Hg)	FR	RE000 FY	DIN EN 16175-1: 2016-12	0.07	mg/kg dw	0.63
Zinc (Zn)	FR	RE000 FY	DIN EN 16171 (S32): 2017-01	1	mg/kg dw	1150

				Description		Korsel 114 slam indfodning slam OFT
				Sample number		121178826
Parameter	Lab	Accr.	Method	LOQ	Unit	

PAH from the lyophilized sample

Naphthalene	FR	RE000 FY	DIN CEN/TS 16181 (DIN SPEC 91243); 2013-12	0.10	mg/kg dw	< 0.10
Acenaphthylene	FR	RE000 FY	DIN CEN/TS 16181 (DIN SPEC 91243); 2013-12	0.10	mg/kg dw	< 0.10
Acenaphthene	FR	RE000 FY	DIN CEN/TS 16181 (DIN SPEC 91243); 2013-12	0.10	mg/kg dw	< 0.10
Fluorene	FR	RE000 FY	DIN CEN/TS 16181 (DIN SPEC 91243); 2013-12	0.10	mg/kg dw	< 0.10
Phenanthrene	FR	RE000 FY	DIN CEN/TS 16181 (DIN SPEC 91243); 2013-12	0.10	mg/kg dw	0.11
Anthracene	FR	RE000 FY	DIN CEN/TS 16181 (DIN SPEC 91243); 2013-12	0.10	mg/kg dw	< 0.10
Fluoranthene	FR	RE000 FY	DIN CEN/TS 16181 (DIN SPEC 91243); 2013-12	0.10	mg/kg dw	0.23
Pyrene	FR	RE000 FY	DIN CEN/TS 16181 (DIN SPEC 91243); 2013-12	0.10	mg/kg dw	0.25
Benz(a)anthracene	FR	RE000 FY	DIN CEN/TS 16181 (DIN SPEC 91243); 2013-12	0.10	mg/kg dw	< 0.10
Chrysene	FR	RE000 FY	DIN CEN/TS 16181 (DIN SPEC 91243); 2013-12	0.10	mg/kg dw	< 0.10
Benzo(b)fluoranthene	FR	RE000 FY	DIN CEN/TS 16181 (DIN SPEC 91243); 2013-12	0.10	mg/kg dw	0.17
Benzo(k)fluoranthene	FR	RE000 FY	DIN CEN/TS 16181 (DIN SPEC 91243); 2013-12	0.10	mg/kg dw	< 0.10
Benzo(a)pyrene	FR	RE000 FY	DIN CEN/TS 16181 (DIN SPEC 91243); 2013-12	0.10	mg/kg dw	< 0.10
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	FR	RE000 FY	DIN CEN/TS 16181 (DIN SPEC 91243); 2013-12	0.10	mg/kg dw	< 0.10
Dibenz(a,h)anthracene	FR	RE000 FY	DIN CEN/TS 16181 (DIN SPEC 91243); 2013-12	0.10	mg/kg dw	< 0.10
Benzo(g,h,i)perylene	FR	RE000 FY	DIN CEN/TS 16181 (DIN SPEC 91243); 2013-12	0.10	mg/kg dw	< 0.10
Total 16 EPA-PAH excl. LOQ	FR	RE000 FY	DIN CEN/TS 16181 (DIN SPEC 91243); 2013-12		mg/kg dw	0.76

Explanations

LOQ - Limit of quantification

Lab - Abbreviation of the performing laboratory

Accr. - Abbreviation of the accreditation of the performing laboratory

The parameters identified by FR have been performed by the laboratory Eurofins Umwelt Ost GmbH (Lindenstraße 11, Gewerbegebiet Freiberg Ost, Bobritzsch-Hilbersdorf). The accreditation code RE000FY identifies the parameters accredited according to DIN EN ISO/IEC 17025:2018 DAkkS D-PL-14081-01-00.

Parameter	Lab	Accr.	Method	Description		Korsel 114 slam indfodning slam OFT
				LOQ	Unit	121178826

PFAS (11) from the original substance

Perfluorooctane sulfonate (PFOS)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg dw	5.3
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg dw	< 2.50
total PFOS / PFOA excl. LOQ	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg dw	5.30
total PFOS / PFOA incl. LOQ	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg dw	7.80
Perfluorohexane sulfonate (PFHxS)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg dw	< 2.50
Perfluorononanoic acid (PFNA)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg dw	< 2.50
Sum PFOS / PFOA / PFNA / PFHxS excl. LOQ	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg dw	5.30
Sum PFOS / PFOA / PFNA / PFHxS incl. LOQ	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg dw	12.8
Perfluorbutansulfonate (PFBS)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg dw	< 2.50
Perfluorohexanoic acid (PFHxA)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg dw	< 2.50
Perfluorheptanoic acid (PFHpA)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg dw	< 2.50
Perfluorooctane-sulfonamide (PFOSA)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg dw	< 2.50
Perfluorodecane sulphonate (PFDS)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg dw	< 2.50
Perfluorodecanoic acid (PFDA)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg dw	< 2.50
Perfluorododecane acid (PFDoA)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg dw	< 2.50
total PFAS (11) excl. LOQ	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg dw	5.30
total PFAS (11) incl. LOQ	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg dw	30.3

Polychlorinated dibenzodioxins/-furans (17 PCDD/F) by GC-HRMS

2,3,7,8-TetraCDD	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	< 0.272
1,2,3,7,8-PentaCDD	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	0.637
1,2,3,4,7,8-HexaCDD	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	0.873
1,2,3,6,7,8-HexaCDD	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	4.25
1,2,3,7,8,9-HexaCDD	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	2.36
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDD	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	121
OctaCDD	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	946
2,3,7,8-TetraCDF	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	1.78
1,2,3,7,8-PentaCDF	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	1.10
2,3,4,7,8-PentaCDF	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	1.63
1,2,3,4,7,8-HexaCDF	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	1.83
1,2,3,6,7,8-HexaCDF	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	1.65
1,2,3,7,8,9-HexaCDF	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	< 0.604

Parameter	Lab	Accr.	Method	Description		Korsel 114 slam indfodning slam OFT
				Sample number	LOQ	Unit

2,3,4,6,7,8-HexaCDF	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	1.71
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDF	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	35.5
1,2,3,4,7,8,9-HeptaCDF	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	1.42
OctaCDF	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	36.5
WHO(2005)-PCDD/F TEQ (lower-bound)	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	4.47
WHO(2005)-PCDD/F TEQ (upper-bound)	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	4.81
I-TEQ (NATO/CCMS) (lower-bound)	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	5.19
I-TEQ (NATO/CCMS) (upper-bound)	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	5.52

Polychlorinated biphenyl (12 WHO PCB) by GC-HRMS

PCB 77	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	142
PCB 81	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	1.93
PCB 105	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	551
PCB 114	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	28.9
PCB 118	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	1500
PCB 123	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	33.3
PCB 126	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	12.4
PCB 156	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	372
PCB 157	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	67.9
PCB 167	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	155
PCB 169	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	< 3.63
PCB 189	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	54.7
WHO(2005)-PCB TEQ (lower-bound)	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	1.34
WHO(2005)-PCB TEQ (upper-bound)	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		ng/kg dw	1.45

Polychlorinated biphenyl (7 PCB) by GC-HRMS

PCB 28	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		µg/kg dw	0.899
PCB 52	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		µg/kg dw	2.81

PCB 101	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		µg/kg dw	2.34
PCB 118	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		µg/kg dw	1.50
PCB 138	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		µg/kg dw	3.22
PCB 153	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		µg/kg dw	3.67
PCB 180	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		µg/kg dw	2.63
Total 6 ndl-PCB (lower-bound)	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		µg/kg dw	15.6
Total 6 ndl-PCB (upper-bound)	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		µg/kg dw	15.6
Total 7 ndl-PCB (lower-bound)	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		µg/kg dw	17.1
Total 7 ndl-PCB (upper-bound)	GF/o	RE000F1	internal, GLS DF 130:2019-01-18		µg/kg dw	17.1

				Description		Korsel 114 slam indfodning slam OFT
				Sample number		121178826
Parameter	Lab	Accr.	Method	LOQ	Unit	

Selected other parameters

Nonylphenol (NP)	SCT9/o	B016	DIN CEN/TS 16182 (2012-05)		mg/kg Raw Product	0.87
Nonylphenoethoxylat (NPE)	SCT9/o	B016	DIN CEN/TS 16182 (2012-05)		mg/kg Raw Product	< 1
Linear alkyl benzene sulfonates (LAS)	SCT9/o	B016	HPLC-UV+FLD		mg/kg Raw Product	1200
Bis-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP)	SCT9/o	B016	DIN 19742 (2014-08)		mg/kg Raw Product	8.5
Triclosan	SCT9/o		GC-MS/MS after hot-extraction		mg/kg Raw Product	1.5
Bezafibrate	SCT9/o	B016	PA JB-316; HPLC-MS/MS		mg/kg Raw Product	< 0.01
Carbamazepin	SCT9/o	B016	PA JB-316; HPLC-MS/MS		mg/kg Raw Product	0.038
Ciprofloxacin	SCT9/o	B016	PA JB-316; HPLC-MS/MS		mg/kg Raw Product	0.053
Clarithromycin	SCT9/o	B016	PA JB-316; HPLC-MS/MS		mg/kg Raw Product	0.020
Diclofenac	SCT9/o	B016	PA JB-316; HPLC-MS/MS		mg/kg Raw Product	0.037
Ibuprofen	SCT9/o	B016	PA JB-316; HPLC-MS/MS		mg/kg Raw Product	< 0.01
Metoprolol	SCT9/o	B016	PA JB-316; HPLC-MS/MS		mg/kg Raw Product	0.079
Phenazon	SCT9/o	B016	PA JB-316; HPLC-MS/MS		mg/kg Raw Product	< 0.01
Sulfamethoxazol	SCT9/o	B016	PA JB-316; HPLC-MS/MS		mg/kg Raw Product	< 0.01

Explanations

LOQ: Limit of quantification dw - dry weight

Lab: Abbreviation of the performing laboratory

Accr.: Abbreviation of the accreditation of the performing laboratory

The parameters identified by GF have been performed by the laboratory Eurofins GfA Lab Service GmbH (Neuländer Kamp 1a, Hamburg).

The accreditation code RE000F1 identifies the parameters accredited according to DIN EN ISO/IEC 17025:2018 Dakks D-PL-14629-01-00.

The parameters identified by SCT9 have been performed by the laboratory Jena Bios GmbH (Löbstedter Str. 80, Jena).

The accreditation code B016 identifies the parameters accredited according to DIN EN ISO/IEC 17025:2005 D-PL-19614-01-00.

/o - The analysis has been outsourced.

Bilag 4. Samlet analyse af kul, kørsel 114

Eurofins Umwelt Ost GmbH - Lindenstraße 11 - Gewerbegebiet Freiberg Ost - D-09627 Bobritzsch-Hilbersdorf

ORGANIC FUEL TECHNOLOGY**Kantorparken 35****8240 Risskov****ENMARK**

Title : **Analytical Report for Order 12150740**
Test report number : **AR-22-FR-006991-01**
Project name : **Sludge and Biochar analysis for research project**

Number of samples : **1**
Sample type: **biochar**
Sample Taker: **delivered by client**

Sample reception date : **2021-12-23**
Sample processing time : **2021-12-23 - 2022-02-25**

The test results refer solely to the analysed test specimen. Unless the sampling was done by our laboratory or in our sub-order the responsibility for the correctness of the sampling is disclaimed. This analytical report is only valid with signature and may only be further published completely and unchanged. Extracts or changes require the authorisation of the EUROFINS UMWELT in each individual case.

Our General Terms & Conditions of Sale (GTCS) are applicable, as far as no specific agreements do exist. The GTCS are available on <http://www.eurofins.de/umwelt/avb.aspx>.

Accredited test laboratory according to DIN EN ISO/IEC 17025:2018 DAkkS notification under the DAkkS German Accreditation System for Testing. The laboratory is according (D-PL-14081-01-00) accredited.

Attachments

12150740_121178800_annex

William Homilius
Sales Team Member
Phone +49 37312076516

Digitally signed 2/25/2022
William Homilius
Prüfleitung



Eurofins Umwelt Ost GmbH
Löbstedter Strasse 78
D-07749 Jena

Phone+49 3641 4649 0
Fax+49 3641 4649 19
info_jena@eurofins.de www.eurofins.de/umwelt

GF: Dr. Benno Schneider
Axel Ulbricht, Daniel Schreier
Amtsgericht Jena HRB202596
USt.-ID.Nr. DE 151 28 1997

Bankverbindung: UniCredit Bank AG
BLZ 207 300 17
Kto 7000000550

Parameter	Lab	Accr.	Method	Description		Korsel 114 kul-udtag slam OFT	
				LOQ	Unit	ar	db
				Sample number		121178800	

Physico-chemical parameters from the original substance

Moisture	FR	RE000 FY	DIN 51718: 2002-06	0.1	% (w/w)	< 0.1	-
----------	----	-------------	--------------------	-----	---------	-------	---

Inorganic sum parameters from the original substance

Ash content (550°C)	FR	RE000 FY	DIN 51719: 1997-07	0.1	% (w/w)	65.4	65.4
Ash content (815°C)	FR	RE000 FY	DIN 51719: 1997-07	0.1	% (w/w)	63.9	63.8

Elements from the original substance

Total carbon	FR	RE000 FY	DIN 51732: 2014-07	0.2	% (w/w)	27.1	27.1
Hydrogen	FR	RE000 FY	DIN 51732: 2014-07	0.1	% (w/w)	2.3	2.3
Total nitrogen	FR	RE000 FY	DIN 51732: 2014-07	0.05	% (w/w)	3.37	3.37
Sulphur (S), total	FR	RE000 FY	DIN 51724-3: 2012-07	0.03	% (w/w)	0.74	0.74
Oxygen	FR	RE000 FY	DIN 51733: 2016-04		% (w/w)	2.7	2.7

Elements from the micro wave pressure digestion acc. to DIN 22022-1: 2014-07

Lead (Pb)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29): 2017-01	2	mg/kg	-	50
Cadmium (Cd)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29): 2017-01	0.2	mg/kg	-	1.7
Chromium (Cr)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29): 2017-01	1	mg/kg	-	105
Copper (Cu)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29): 2017-01	1	mg/kg	-	390
Nickel (Ni)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29): 2017-01	1	mg/kg	-	62
Mercury (Hg)	FR	RE000 FY	DIN 22022-4: 2001-02	0.07	mg/kg	-	0.38
Zinc (Zn)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29): 2017-01	1	mg/kg	-	1700

Elements fr. the borate dig. of ash 550°C acc. to DIN 51729-11: 1998-11 rel. ash

Potassium as K ₂ O	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	% (w/w)	-	1.7
Phosphorus as P ₂ O ₅	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	% (w/w)	-	20.9

Elements fr. the borate digestion of ash 550°C acc. to DIN 51729-11:1998-11 (OS)

Potassium (K)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	% (w/w)	-	0.9
Phosphorus	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	% (w/w)	-	6.0

Parameter	Lab	Accr.	Method	Description		Korsel 114 kul-udtag slam OFT	
				LOQ	Unit	ar	db
						121178800	

PAH from the original substance after toluene extraction

Naphthalene	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	1.7
Acenaphthylene	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1
Acenaphthene	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1
Fluorene	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	0.2
Phenanthrene	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	0.2
Anthracene	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1
Fluoranthene	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1
Pyrene	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	0.2
Benz(a)anthracene	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	0.2
Chrysene	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	0.3
Benzo(b)fluoranthene	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	0.2
Benzo(k)fluoranthene	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1
Benzo(a)pyrene	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	0.3
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	0.2
Dibenz(a,h)anthracene	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1
Benzo(g,h,i)perylene	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	0.2
Total 16 EPA-PAH excl. LOQ	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08		mg/kg	-	3.7

				Description		Korsel 114 kul-udtag slam OFT	
				Sample number		121178800	
Parameter	Lab	Accr.	Method	LOQ	Unit	ar	db

PCB from the original substance

PCB 28	GF/o	RE000 F1	Internal	0.0820	µg/kg dw	-	< 0.0825
PCB 52	GF/o	RE000 F1	Internal	0.0610	µg/kg dw	-	< 0.0613
PCB 101	GF/o	RE000 F1	Internal	0.0980	µg/kg dw	-	< 0.0986
PCB 118	GF/o	RE000 F1	Internal	0.0280	µg/kg dw	-	< 0.0282
PCB 118	GF/o	RE000 F1	Internal	28.0	ng/kg dw	-	< 28.2
PCB 138	GF/o	RE000 F1	Internal	0.0720	µg/kg dw	-	< 0.0724
PCB 153	GF/o	RE000 F1	Internal	0.116	µg/kg dw	-	< 0.117
PCB 180	GF/o	RE000 F1	Internal	0.0300	µg/kg dw	-	< 0.0302
Total 6 ndl-PCB (lower-bound)	GF/o	RE000 F1	Internal		µg/kg dw	-	ND
Total 6 ndl-PCB (upper-bound)	GF/o	RE000 F1	Internal		µg/kg dw	-	0.462
Total 7 Indicator PCB (lower-bound)	GF/o	RE000 F1	Internal		µg/kg dw	-	ND
Total 7 Indicator PCB (upper-bound)	GF/o	RE000 F1	Internal		µg/kg dw	-	0.490
PCB 77	GF/o	RE000 F1	Internal	3.60	ng/kg dw	-	< 3.62
PCB 81	GF/o	RE000 F1	Internal	0.780	ng/kg dw	-	< 0.784
PCB 105	GF/o	RE000 F1	Internal	7.80	ng/kg dw	-	< 7.84
PCB 114	GF/o	RE000 F1	Internal	0.940	ng/kg dw	-	< 0.945
PCB 123	GF/o	RE000 F1	Internal	0.800	ng/kg dw	-	< 0.805
PCB 126	GF/o	RE000 F1	Internal	1.02	ng/kg dw	-	< 1.03
PCB 156	GF/o	RE000 F1	Internal	4.40	ng/kg dw	-	< 4.43
PCB 157	GF/o	RE000 F1	Internal	0.900	ng/kg dw	-	< 0.905
PCB 167	GF/o	RE000 F1	Internal	2.20	ng/kg dw	-	< 2.21
PCB 169	GF/o	RE000 F1	Internal	2.40	ng/kg dw	-	< 2.41
PCB 189	GF/o	RE000 F1	Internal	0.800	ng/kg dw	-	< 0.805
WHO(2005)-PCB TEQ (lower-bound)	GF/o	RE000 F1	Internal		ng/kg dw	-	ND
WHO(2005)-PCB TEQ (upper-bound)	GF/o	RE000 F1	Internal		ng/kg dw	-	0.177

Parameter	Lab	Accr.	Method	Description		Korsel 114 kul-udtag slam OFT	
				LOQ	Unit	ar	db
				Sample number		121178800	

Dioxins and furans from the original substance

2,3,7,8-TetraCDD	GF/o	RE000 F1	Internal	0.180	ng/kg dw	-	< 0.181
1,2,3,7,8-PentaCDD	GF/o	RE000 F1	Internal	0.240	ng/kg dw	-	< 0.241
1,2,3,4,7,8-HexaCDD	GF/o	RE000 F1	Internal	0.480	ng/kg dw	-	< 0.483
1,2,3,6,7,8-HexaCDD	GF/o	RE000 F1	Internal	0.480	ng/kg dw	-	< 0.483
1,2,3,7,8,9-HexaCDD	GF/o	RE000 F1	Internal	0.480	ng/kg dw	-	< 0.483
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDD	GF/o	RE000 F1	Internal	0.540	ng/kg dw	-	< 0.543
OctaCDD	GF/o	RE000 F1	Internal	2.20	ng/kg dw	-	< 2.21
2,3,7,8-TetraCDF	GF/o	RE000 F1	Internal	0.320	ng/kg dw	-	< 0.322
1,2,3,7,8-PentaCDF	GF/o	RE000 F1	Internal	0.440	ng/kg dw	-	< 0.443
2,3,4,7,8-PentaCDF	GF/o	RE000 F1	Internal	0.440	ng/kg dw	-	< 0.443
1,2,3,4,7,8-HexaCDF	GF/o	RE000 F1	Internal	0.400	ng/kg dw	-	< 0.402
1,2,3,6,7,8-HexaCDF	GF/o	RE000 F1	Internal	0.400	ng/kg dw	-	< 0.402
1,2,3,7,8,9-HexaCDF	GF/o	RE000 F1	Internal	0.400	ng/kg dw	-	< 0.402
2,3,4,6,7,8-HexaCDF	GF/o	RE000 F1	Internal	0.400	ng/kg dw	-	< 0.402
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDF	GF/o	RE000 F1	Internal	0.520	ng/kg dw	-	< 0.523
1,2,3,4,7,8,9-HeptaCDF	GF/o	RE000 F1	Internal	0.380	ng/kg dw	-	< 0.382
OctaCDF	GF/o	RE000 F1	Internal	3.20	ng/kg dw	-	< 3.22
WHO(2005)-PCDD/F TEQ (lower-bound)	GF/o	RE000 F1	Internal		ng/kg dw	-	ND
WHO(2005)-PCDD/F TEQ (upper-bound)	GF/o	RE000 F1	Internal		ng/kg dw	-	0.982
I-TEQ (NATO/CCMS) (lower-bound)	GF/o	RE000 F1	Internal		ng/kg dw	-	ND
I-TEQ (NATO/CCMS) (up- per-bound)	GF/o	RE000 F1	Internal		ng/kg dw	-	0.903

Other parameters

WHO(2005)-PCDD/F+PCB TEQ (lower-bound)	GF/o	RE000 F1	Internal		pg/g	-	-
WHO(2005)-PCDD/F+PCB TEQ (upper-bound)	GF/o	RE000 F1	Internal		pg/g	-	1.16

Explanations

LOQ – Limit of quantification ar - as received db - dry basis

Lab - Abbreviation of the performing laboratory

Accr. - Abbreviation of the accreditation of the performing laboratory

ND - not calculable, as only values > LOQ are used for the sum

The parameters identified by FR have been performed by the laboratory Eurofins Umwelt Ost GmbH (Lindenstraße 11, Gewerbegebiet Freiberg Ost, Bobritzsch-Hilbersdorf). The accreditation code RE000FY identifies the parameters accredited according to DIN EN ISO/IEC 17025:2018 DAkkS D-PL-14081-01-00 .

The parameters identified by GF have been performed by the laboratory Eurofins GfA Lab Service GmbH (Neuländer Kamp 1a, Hamburg). The accreditation code RE000F1 identifies the parameters accredited according to DIN EN ISO/IEC 17025:2018 Dakks D-PL-14629-01-00 .

/o - The analysis has been outsourced.

Attachment to report AR-22-FR-006991-01 : 12150740_121178800_annex

Parameter	Lab	Accr.	Method	Description		Korsel 114 kul-ud- tag slam OFT
				Sample number	LOQ	Unit

PFAS (11) from the original substance

Perfluorooctane sulfonate (PFOS)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg	-	< 2.09
Perfluorooctanoic acid (PFOA)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg	-	< 2.09
total PFOS / PFOA excl. LOQ	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg	-	(n.c.*)
total PFOS / PFOA incl. LOQ	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg	-	4.19
Perfluorohexane sulfonate (PFHxS)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg	-	< 2.09
Perfluorononanoic acid (PFNA)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg	-	< 2.09
Sum PFOS / PFOA / PFNA / PFHxS excl. LOQ	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg	-	(n.c.*)
Sum PFOS / PFOA / PFNA / PFHxS incl. LOQ	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg	-	8.37
Perfluorobutansulfonate (PFBS)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg	-	< 2.09
Perfluorohexanoic acid (PFHxA)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg	-	< 2.09
Perfluorheptanoic acid (PFHpA)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg	-	< 2.09
Perfluorooctane-sulfonamide (PFOSA)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg	-	< 2.09
Perfluorodecane sulphonate (PFDS)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg	-	< 2.09
Perfluorodecanoic acid (PFDA)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg	-	< 2.09
Perfluorododecane acid (PFDoA)	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg	-	< 2.09
total PFAS (11) excl. LOQ	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg	-	(n.c.*)
total PFAS (11) incl. LOQ	GF/o	RE000F1	internal, GLS OC 400:2019-01-18		µg/kg	-	23.0

selected other parameters

Nonylphenol (NP)	SCT9/o	B016	DIN CEN/TS 16182 (2012-05)		mg/kg	< 0.5	-
Nonylphenoethoxylat (NPE)	SCT9/o	B016	DIN CEN/TS 16182 (2012-05)		mg/kg	< 1	-
Linear alkyl benzene sulfonates (LAS)	SCT9/o	B016	HPLC-UV+FLD		mg/kg	220	-
Bis-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP)	SCT9/o	B016	DIN 19742 (2014-08)		mg/kg	< 0.1	-
Triclosan	SCT9/o		GC-MS/MS after hot-extraction		mg/kg	< 0.1	-
Bezafibrate	SCT9/o	B016	PA JB-316; HPLC-MS/MS		mg/kg	< 0.01	-
Carbamazepin	SCT9/o	B016	PA JB-316; HPLC-MS/MS		mg/kg	< 0.01	-
Ciprofloxacin	SCT9/o	B016	PA JB-316; HPLC-MS/MS		mg/kg	< 0.01	-
Clarithromycin	SCT9/o	B016	PA JB-316; HPLC-MS/MS		mg/kg	< 0.01	-

				Description		Korsel 114 kul-ud-tag slam OFT	
				Sample number		121178800	
Parameter	Lab	Accr.	Method	LOQ	Unit		
Diclofenac	SCT9/o	B016	PA JB-316; HPLC-MS/MS		mg/kg	< 0.01	-
Ibuprofen	SCT9/o	B016	PA JB-316; HPLC-MS/MS		mg/kg	< 0.01	-
Metoprolol	SCT9/o	B016	PA JB-316; HPLC-MS/MS		mg/kg	< 0.01	-
Phenazon	SCT9/o	B016	PA JB-316; HPLC-MS/MS		mg/kg	< 0.01	-
Sulfamethoxazol	SCT9/o	B016	PA JB-316; HPLC-MS/MS		mg/kg	< 0.01	-

Explanations

LOQ: Limit of quantification ar - as received db - dry basis

Lab: Abbreviation of the performing laboratory

Accr.: Abbreviation of the accreditation of the performing laboratory

Annotation:

(n. c.*): not calculable, as only values > LOQ are used for the sum

The parameters identified by GF have been performed by the laboratory Eurofins GfA Lab Service GmbH (Neuländer Kamp 1a, Hamburg).

The accreditation code RE000F1 identifies the parameters accredited according to DIN EN ISO/IEC 17025:2018 Dakks D-PL-14629-01-00.

The parameters identified by SCT9 have been performed by the laboratory Jena Bios GmbH (Löbstedter Str. 80, Jena).

The accreditation code B016 identifies the parameters accredited according to DIN EN ISO/IEC 17025:2005 D-PL-19614-01-00.

/o - The analysis has been outsourced.

Bilag 5. Analyse af OFT bioolie

Analyseret på baggrund af data fra kørsel 114

Komponentanalyse

Egenskaber, våd olie			Komposition, tør basis				
Brændværdi	Vand	Aske	C	H	O	N	S
MJ/kg	%		wt%				
30,6	13,2	3,2	70,9	8,8	7,8	7,9	1,2

Analyse af udvalgte øvrige komponenter

Mg per kg	
Fe	491,6
Mn	2,988
Zn	217,4
Cu	6,371
Cd	<0,0025
Cr	1,185
Ni	1,033
Al	1734,2
Pb	2,266
Ca	5004
Na	15455
K	2016
Mg	1068
P	7610
S	24140
Ti	2,552
Co	<0,0025
Mo	0,655
Li	<0,0025
Si	659

Bilag 6. Analyse af OFT biogas



Gasanalyse

Målerapport: 749.54/21.390-392
Rekvirent: Organic Fuel Technology
Att. Søren Midtgaard Nielsen
Kantorparken 35
8240 Risskov
Beskrivelse: Gasprøver udtaget af rekvirent, modtaget d. 29.10.21. Analyseret d. 29.10.21.

Hovedkomponenter [#]	#112	#113	#114
metan	11.13 mol-%	8.17 mol-%	5.09 mol-%
kuldioxid	25.77	34.73	57.96
nitrogen	26.59	21.20	15.70
ilt/argon	3.26	0.270	0.505
H ₂ S	0.98	3.49	3.69
Hydrogen	15.86	13.36	2.33
CO	10.47	11.02	8.38
ethylen	0.74	0.86	0.54
ethan	1.65	1.95	1.21
C3	1.31	1.73	1.48
C4	0.94	1.23	1.17
C5	0.08	0.14	0.09
C6+	1.15	1.76	1.85

Beregnete værdier	#112	#113	#114
øvre brændværdi	14.45 MJ/Nm ³	15.99 MJ/Nm ³	12.12 MJ/Nm ³
nedre brændværdi	13.19 MJ/Nm ³	14.67 MJ/Nm ³	11.21 MJ/Nm ³
Wobbe indeks	14.66 MJ/Nm ³	15.40 MJ/Nm ³	10.55 MJ/Nm ³
densitet	1.256 kg/Nm ³	1.393 kg/Nm ³	1.706 kg/Nm ³

[#] gassammensætning på tør basis

Hørsholm, 04.11.21

Betina Jørgensen

Elektronisk udstedt rapport. Kun gyldig med OCES digital signatur for Betina Jørgensen, Dansk Gasteknisk Center.

Dansk Gasteknisk Center a/s • Dr. Neergaards Vej 5B • 2970 Hørsholm
CVR-nr. 12105045 • tlf. 2016 9600 • www.dgc.dk • dgc@dgc.dk

Bilag 7. Oversigt over lokalplanprocessen



Slambearbejdning med mikrobølge-teknologi - Verifikation og kvantifikation

Rapporten undersøger og validerer potentialet ved mikrobølge-cracking af tørret spildevandsslam. Mikrobølge-teknologien er udviklet af Organic Fuel Technology A/S, og sammenlignes med to alternative teknologier, hydrothermal liquefaction (HTL) og pyrolyse.

Med data fra testkørsler med tørret, afgasset spildevandsslam analyseres og evalueres de produkter, som mikrobølge-teknologien frembringer (bioolie, biokul og biogas).

Det konkluderes, at mikrobølgebehandling af spildevandsslam har en række fordele. Ud over reducerede udgifter til transport, opmagasinering og afskaffelse af slam kan teknologien generere indtægter ifm. salg af fjernvarme, bioolie, biokul og eventuelt gas. Baseret på sammenligningen af de tre teknologier vurderes mikrobølge-teknologien at være særdeles konkurrencedygtig. Både masse- og energibalancen, vurdering af produktkvaliteter og klimaaftryk samt business casen viser, at kommercialisering af teknologien har et stort potentiale og kan bidrage til en reduktion drivhusgasser.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk