

Pyrolyse i avløpshåndtering og utvinning av biokull



INGRID MARIE SKAUG LINDQVIST

VEILEDERE

Intern: Helge Liltved, UiA

Ekstern: Eirik E. Hagtvedt, Horten kommune

Universitetet i Agder, 2023

Fakultet for Teknologi og Realfag

Institutt for ingeniørvitenskap

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring

Den enkelte student er selv ansvarlig for å sette seg inn i hva som er lovlige hjelpemidler, retningslinjer for bruk av disse og regler om kildebruk. Erklæringen skal bevisstgjøre studentene på deres ansvar og hvilke konsekvenser fusk kan medføre. Manglende erklæring fritar ikke studentene fra sitt ansvar.

1.	Jeg/vi erklærer herved at min/vår besvarelse er mitt/vårt eget arbeid, og at jeg/vi ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen.	<input checked="" type="checkbox"/>
2.	Jeg/vi erklærer videre at denne besvarelsen: <ul style="list-style-type: none"> ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands. ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt. ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt. har alle referansene oppgitt i litteraturlisten. ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse. 	<input checked="" type="checkbox"/>
3.	Jeg/vi er kjent med at brudd på ovennevnte er å betrakte som fusk og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høgskoler i Norge, jf. Universitets- og høgskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31.	<input checked="" type="checkbox"/>
4.	Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert.	<input checked="" type="checkbox"/>
5.	Jeg/vi er kjent med at Universitetet i Agder vil behandle alle saker hvor det forligger mistanke om fusk etter høgskolens retningslinjer for behandling av saker om fusk.	<input checked="" type="checkbox"/>
6.	Jeg/vi har satt oss inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider.	<input checked="" type="checkbox"/>

Publiseringsavtale

Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

Forfatter(ne) har opphavsrett til oppgaven. Det betyr blant annet enerett til å gjøre verket tilgjengelig for allmennheten (Åndsverkloven. §2).

Alle oppgaver som fyller kriteriene vil bli registrert og publisert i Brage Aura og på UiA sine nettsider med forfatter(ne)s godkjenning.

Oppgaver som er unntatt offentlighet eller taushetsbelagt/konfidensiell vil ikke bli publisert.

Jeg/vi gir herved Universitetet i Agder en vederlagsfri rett til å gjøre oppgaven tilgjengelig for elektronisk publisering:

JA NEI

Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)?
(Båndleggingsavtale må fylles ut)

JA NEI

- Hvis ja:

Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over?

JA NEI

Er oppgaven unntatt offentlighet?

JA NEI

(inneholder taushetsbelagt informasjon. Jfr. Offl. §13/Fvl. §13)

Forord

Denne masteroppgaven er det avsluttende leddet i masterprogrammet for Bygg, sivilingeniør ved Universitetet i Agder. Oppgaven er utarbeidet ved Institutt for Ingeniørvitenskap i emnet BYG508. Masteroppgaven er skrevet i samarbeid med Horten kommune, Kommunalteknisk Planavdeling VA.

I denne masteroppgaven har jeg undersøkt om det er bærekraftig for Horten kommune å benytte seg av pyrolyseteknologi i slambehandling, samt hvilke bruksområder biokull utvunnet fra avløpsslam fra Horten kommune kan ha. Jeg har utvunnet eget biokull ved å pyrolysere avløpsslam tilsendt fra Horten kommune og utført ulike laboratorieforsøk med kullet. Arbeidet med masteroppgaven har vært veldig lærerikt og spennende, men også krevende og utfordrende. Det har vært interessant å knytte temaet til masteroppgaven sammen med bærekraft, og sette bærekraft på agendaen.

Jeg ønsker å takke flere nøkkelpersoner som har veiledet og hjulpet meg i arbeidet med masteroppgaven. Først og fremst ønsker jeg å takke min veileder ved Universitetet i Agder, Helge Liltved, for all oppfølging og faglig innsikt. Jeg ønsker også å takke Henrik Kofoed Nilsen ved UiA for god innføring i pyrolyseteknologi og besvart spørsmålene tilknyttet dette. Videre må jeg utrette en stor takk til senioringeniør og laboratorieansvarlig for energilaboratoriene ved Universitetet i Agder, Odin Kvam, for all veiledning, oppfølging og faglig innsikt ved laboratorieforsøkene i masteroppgaven. Jeg må også takke min gode venninne og medstudent, Kristine Lehrmann Solvang, for å steppe inn som min laboratorieassistent ved behov, spesielt når jeg skulle ta ut biokullet av en ovn som holdt 900 °C.

Videre ønsker jeg også å takke Normann Christensen, Driftsleder renseanlegg og pumpestasjoner i Horten kommune, som har bistått med uvurderlig kunnskap. Til slutt må jeg også utrette en stor takk til min eksterne veileder, Eirik E. Hagtvedt, i Horten kommune for all oppfølging, engasjement, veiledning og faglig innsikt.

Grimstad, mai 2023

Summary

This thesis has investigated if pyrolysis is a sustainable solution for the treatment of sewage sludge for Horten Municipality. Separate laboratory experiments and literature research was executed to answer the research question. Sewage sludge extracted from Horten Municipality's treatment plant has been pyrolyzed at 500°C, 700°C and 800°C. Various tests have been carried out on the biochar extracted from the pyrolysis to find out which biochar is most suited for different areas of use. The results shows that biochar extracted from sewage sludge contain important plant-available nutrients, stores and binds carbon, and binds heavy metals. These properties give the possibility that the biochar can be used in agriculture as an absorbent in ditches and green areas and as an additive in asphalt. Furthermore, the results from the laboratory study found that the biochar produced at 500°C is most suited to be used as a soil conditioner and fertilizer in agriculture or as an absorbent in ditches and green areas. UN's sustainability goals were compared with the findings from the study. Pyrolysis of sewage sludge and biochar helps to achieve other sustainability goals that fit well under the dimensions of sustainable development. In the light of the findings, it was concluded that pyrolysis technology is a sustainable solution for treatment of sludge.

Innholdsfortegnelse

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring.....	i
Publiseringsavtale.....	ii
Forord.....	iii
Summary	iv
Figurliste	vii
Tabbeliste	viii
1 Innledning	1
2 Samfunnsperspektiv.....	2
3 Kunnskapsbakgrunn	5
3.1 Avløpsslam.....	5
3.2 Pyrolyse	6
3.3 Biokull	6
3.4 Bærekraft.....	8
4 Forskerspørsmål.....	9
4.1 Avgrensinger.....	9
5 Case/Materialer	10
6 Metode.....	12
6.1 Eksperimentell metode	12
6.1.1 Pyrolysing	12
6.1.2 Vanninnhold	14
6.1.3 Askeinnhold	15
6.1.4 Innhold av flyktige gasser	16
6.1.5 Brennverdi	17
6.1.6 Fiksert karbon.....	19
6.1.7 Elementanalyse CHN (Carbon, Hydrogen og Nitrogen)	19
6.2 Litteraturstudie.....	20
7 Resultat	23
7.1 Laboratorieforsøk.....	23
7.2 Resultater fra litteraturstudium	27
7.2.1 Moško et al. sin studie.....	27
7.2.2 Guo et al. sin studie.....	29

7.2.3	Tian et al. sin studie.....	30
7.2.4	Karimi et al. sin studie	32
7.2.5	Kehrein et al. sin studie	33
7.2.6	Bien et al. sin studie	33
7.2.7	Wu et al. sin studie	34
8	Diskusjon	35
8.1	Laboratorieforsøk versus forskning.....	35
8.2	Bruksområder.....	38
8.3	Bærekraftig utvikling	41
8.4	Svakheter og begrensinger.....	44
8	Konklusjon.....	45
9	Anbefalinger	48
10	Kildeliste	49
11	Vedlegg.....	55

Figurliste

Figur 1: Bærekraftsmålene utdypet i dette kapitlet [19].	2
Figur 2: Pyrolysing av avløpsslam [43].	6
Figur 3: De tre dimensjonene i bærekraftig utvikling [54].	8
Figur 4: Eksisterende slambehandling i Horten Kommune [43, p. 4].	10
Figur 5: Kittec SQ 11 Elektrisk ovn benyttet til pyrolysing.	13
Figur 6: Reaktor som benyttes til pyrolysing.	13
Figur 7: Vakuumdesikator med silicagele.....	14
Figur 8: Bombekalorimeteret må kallibreres med Benzoic-acid-tabletter.	17
Figur 9: Utstyr prøvemassen antennes i.....	17
Figur 10: Det er viktig at bommulstråden er i kontakt med prøven slik at den blir antent.	18
Figur 11: Nedbrytingskammeret på vei ned i kalorimeteret.....	18
Figur 12: Utvalgsmetoden for litteratursøket.	20
Figur 13: Tabell 3 fra Moško et al. sin studie [68, p. 3].	27
Figur 14: Tabell 2 i Guo et al. sin studie [69, p. 57].	29
Figur 15: Tabell 1 fra Tian et al. sin studie [71, p. 3].	30

Tabbeliste

Tabell 1: Oversikt over pyrolysetemperatur og oppholdstid.	13
Tabell 2: Oversikt over kullutbytte til de ulike biokullene.	23
Tabell 3: Vanninnhold avløpspellets 23	23
Tabell 4: Vanninnhold, biokull 24	24
Tabell 5: Askeinnhold, biokull..... 24	24
Tabell 6: Innhold av flyktige gasser, biokull..... 25	25
Tabell 7: Brennverdi, biokull..... 25	25
Tabell 8: Mengde fiksert karbon i biokullet 26	26
Tabell 9: Samlet resultater fra hvert laboratorieforsøk. 26	26
Tabell 10: Resultater fra Moško et al. sin studie. 27	27
Tabell 11: Resultater i tekstform fra Guo et al. sin studie..... 29	29
Tabell 12: Resultater i tekstform fra Tian et al. sin studie. 30	30
Tabell 13: Tabell 1 fra Karimi et al. sin studie som viser biokullets egenskaper [72, p. 2827]..... 32	32
Tabell 14: Resultater i tekstform fra Karimi et al. sin studie..... 32	32
Tabell 15: Resultater i tekstform fra Kehrein et al. sin studie..... 33	33
Tabell 16: Resultater fra Bien et al. sin studie i tekstform. 33	33
Tabell 17: Resultatet i tekstform fra Wu et al. sin studie..... 34	34
Tabell 18: Resultater fra laboratorieforsøk..... 45	45

1 Innledning

Vann- og avløpsbransjen i Norge har i oppgave å forsyne befolkningen med rent drikkevann, gode sanitærforhold og rensing og utnytte ressursene fra avløpsvannet [1]. I dag klarer vi å forsyne befolkningen med rent drikkevann og gode sanitærforhold. Avløpet blir imidlertid ikke godt nok utnyttet som en ressurs i dagens avløpshåndtering [2]. Avløpshåndteringen slik den er i dag ble bygget med det formål om å frakte alt avløpsvann tilbake til resipientene¹. Dagens avløpshåndtering fører til karbonutslipp, økte kostnader og utslipp av uønskede stoffer til fjorder og vassdrag [3].

Det finnes ny teknologi og innovasjoner som sørger for at 100 % av ressursene fra avløpsvannet blir gjenvunnet [3]. Akkurat nå brukes det store summer på å fornye det kommunale vann- og avløpsnett over hele Norge. Kostnaden til dette er beregnet til å være rundt 280 mrd. kr frem til 2040 [1]. Det er ikke bærekraftig å fornye hele landets ledningsnett uten å bruke fremtidsrettete løsninger som benytter avløpet som en ressurs [3]. Petter Jenssen, professor ved NMBU, uttalte til VAnytt at:

«Her må vi heve ambisjonene og ikke bare vente på at EU skal komme med direktiver som vi skal kopiere av. Vi må sette oss egne ambisiøse mål. Den grønne omstillingen banker på døra til vann og avløp, og all erfaring viser at dersom myndighetene legger til rette for grønn teknologi, så vil de kommersielle kreftene respondere og komme opp med løsninger.» [3].

I løpet av de siste årene har miljøfokus i samfunnet økt, og det stiller nye krav til VA-bransjen [4]. Det er helt nødvendig med miljøvennlige tiltak i norsk vann- og avløp for å oppnå en bærekraftig utvikling [1]. Utfordringen er at det ikke eksisterer en felles bærekraftstrategi i norsk VA-bransje. I dag styres bærekraftige tiltak i VA-bransjen lokalt av politikere. Mens oppgaver og fokusområder i VA-sektoren for det meste styres av økonomi [5, p. 25]. For at bærekraft i sterkere grad skal bli satt på agendaen i hele den norske VA-sektoren er det viktig med en felles strategi for bærekraftig utvikling [5, p. 25]. Det finnes nye innovasjoner som kan bidra til en mer bærekraftig VA-bransje. I denne masteroppgaven blir det sett nærmere på en av disse innovasjonene, bruk av pyrolyse ved håndtering av avløpslam.

¹ Resipient defineres som: «Vannforekomst (for eksempel, bekk, elv eller vassdrag) som mottar forurensninger fra avløpsanlegg» [86].

2 Samfunnsperspektiv

I dette kapitlet settes masteroppgaven inn i en større samfunnsmessig sammenheng. Det er flere av FNs bærekraftsmål med delmål som er relevante for oppgavens tema. Temaet som er håndtering av avløpsvann er viktig både i lokal, nasjonal og internasjonal sammenheng. Temaet berører flere av FNs bærekraftsmål. I dette kapitlet utdyper jeg hvordan bærekraftsmål nr. 3, 6, 12 og 14 (se figur 1) berører temaet direkte. I tillegg innvirker temaet også på flere andre bærekraftsmål som jeg ikke utdyper her. Disse er nr. 1: Utrydde fattigdom [6], nr. 2: Utrydde sult [7], nr. 3: God helse og livskvalitet [8], nr. 6: Rent vann og gode sanitærforhold [9], nr. 7: Ren energi til alle [10], nr. 8: Anstendig arbeid og økonomisk vekst [11], nr. 9: Industri, innovasjon og infrastruktur [12], nr.11: Bærekraftige byer og lokalsamfunn [13], nr.12: Ansvarlig forbruk og produksjon [14], nr.13: Stoppe klimaendringene [15], nr. 14: Livet i havet [16], nr. 15: Livet på land [17] og nr. 17: Samarbeide for å nå målene [18]. Jeg trekker med meg disse bærekraftsmålene videre i diskusjonskapitlet.



Figur 1: Bærekraftsmålene utdypet i dette kapitlet [19].

Bærekraftsmål 3: Sikre god helse og fremme livskvalitet for alle, uansett alder [8].

Delmål 3.9: Innen 2030 betydelig redusere antall dødsfall og sykdomstilfeller forårsaket av farlige kjemikalier og forurenset luft, vann og jord [8].

Vann er en av verdens viktigste ressurser [20, p. 3]. Forbruket har økt med 600 % i løpet av 100 år [2]. En av de største truslene mot menneskeheten er forurenset drikkevann [21] og mangel på bærekraftige sanitæranlegg [22]. I verden er det over 2 milliarder mennesker som ikke har tilgang på

rent drikkevann [22]. Disse tallene forteller at det internasjonalt er store utfordringer med å forsyne verdensbefolkningen med rent drikkevann. Rent drikkevann er en av de viktigste forutsetningene for god helse [3]. Forurenset drikkevann fører til 80% av all sykdom, og 30% av alle dødsfall globalt [21].

Bærekraftsmål 6: Sikre bærekraftig vannforvaltning, tilgang til vann og gode sanitærforhold for alle [23].

Delmål 6.3: Innen 2030 sørge for bedre vannkvalitet ved å redusere forurensning, avskaffe avfallsdumping og mest mulig begrense utslipp av farlige kjemikalier og materialer, halvere andelen ubehandlet spillvann og i vesentlig grad øke gjenvinning og trygg ombruk på verdensbasis [23].

Delmål 6.a: Innen 2030 utvide det internasjonale samarbeidet og støtten til å bygge opp kapasitet i utviklingsland innenfor virksomhet og programmer knyttet til vann- og sanitærforhold, blant annet teknologi for vannoppsamling, avsalting, effektiv bruk av vannressurser, behandling av avløpsvann, gjenvinning og ombruk [23].

46 % av verdensbefolkningen mangler tilgang på sanitæranlegg [3]. Dårlig håndtering og rensing av avløpsvann fører også til det forurensede drikkevannet [22]. I utviklingsland slippes 90 % av avløpet og 70 % av industriavfallet rett ut i elver, innsjøer og sjø [21]. Faren for spredning av smittsomme sykdommer øker med tiden. Det er derfor viktig å anlegge gode sanitæranlegg, og oppgradering av avløpsnett nasjonalt og internasjonalt for å minske spredningen av miljøgifter og farlige sykdommer. [24].

Bærekraftsmål 12: Sikre bærekraftig forbruks- og produksjonsmønstre.

Delmål 12.4: Innen 2020 oppnå en mer miljøvennlig forvaltning av kjemikalier og alle former for avfall gjennom hele livssyklusen, i samsvar med internasjonalt vedtatte rammeverk, og betydelig redusere utslipp av kjemikalier og avfall til luft, vann og jord for mest mulig å begrense skadevirkningene for folkehelsen og for miljøet [14].

Norsk kommunalt avløpsvann består av næringsalter som fosfor og nitrogen, organisk stoff, bakterier, virus og miljøgifter [25]. Miljøgiftene i kommunalt avløpsvann kommer fra overvannet, vaskemidler, industrien og andre forbrukerprodukter. Mesteparten av miljøgiftene klarer man å rense fra avløpsvannet, og havner i avløpsslammet. Avløpsslam benyttes i dag til gjødsel, og miljøgiftene havner dermed i omgivelsene.

Bærekraftsmål 14: Bevare og bruke havet og de marine ressursene på en måte som fremmer bærekraftig utvikling [16]. Delmål 14.1: Innen 2025 forhindre og i betydelig grad redusere alle former for havforurensning, særlig fra landbasert virksomhet, inkludert marin forsøpling og utslipp av næringsalter [16].

I Norge er utfordringen mangelfull oppdatering av avløpsnett og anleggene som fører til at avløpsvann lekker ut til innsjø, elver og sjø. 35% av innsjøene og elvene i Norge er forurenset, eller skadet som følge av lekket avløpsvann [2]. Dette kommer av at klimaendringene har ført til økt nedbørsmengde over korte perioder som utfordrer kapasiteten til det nåværende avløpsnett [20, p. 13].

Norge har god kvalitet på drikkevannet. I tillegg er avløpshåndteringen bedre enn de fleste andre land i verden [24]. Som nevnt over finnes det utfordringer ved vann- og avløpet i Norge, og det

gjenstår mye arbeid for å løse dagens utfordringer. FN har uttalt at verden er langt unna å nå bærekraftsmålet. Det må tas i bruk nye teknologier og innovasjoner for å nå målet. Nasjonalstatene må samarbeide og bli enige om politiske bestemmelser for å nå bærekraftsmålene [2].

Pyrolysing av avløpsslam er en innovasjon som kan bidra i arbeidet med bærekraftsmålene [26]. I neste kapittel skal jeg gå nærmere inn på pyrolyse som en metode for håndtering av avløpsslam og økt ressursutnyttelse.

3 Kunnskapsbakgrunn

I dette kapitlet presenteres kunnskapsbakgrunnen til masteroppgaven. I 3.1 tar jeg for meg avløpsslam og miljøgifter, i 3.2 forklarer jeg pyrolyse og hvordan det kan brukes til slambehandling, og i 3.3 tar jeg for meg restproduktet, biokull, etter pyrolysering. Til slutt i 3.4 definerer jeg begrepet bærekraft.

3.1 Avløpsslam

Avløpsslam er det faste produktet som er igjen etter at avløpsvann er rensset og sendes ut i resipientene igjen [27]. Etter at avløpslammet har blitt behandlet og fyller kravene til gjødselvereforskriften benyttes det i jordbruket som gjødsel og jordforbedringsmiddel [28]. Tall fra 2019 viser at mer enn 95 % av avløpsslammet i Vestfold ble benyttet i jordbruket. Dette fordi avløpsslam inneholder en rekke viktige næringsstoffer og organisk materiale som jordbruket kan nyte godt av. Avløpsslam inneholder mellom 20-40 kg nitrogen og mellom 7-35 kg fosfor per tonn fosfor. Slammet er derfor en stor ressurs for å tilbakeføre næringsstoffer til landbruket [27].

Avløpsslam er en viktig ressurs som kan gjenbrukes, men etter rensing av avløpsvann havner miljøgiftene og tungmetaller i avløpsslammet [29]. I teksten nedenfor beskrives noen av miljøgiftene som havner i avløpsslammet.

Miljøgifter

Et uønsket stoff i vann er mikroplast. Det finnes store mengder mikroplast i avløpsvann. Mesteparten av mikroplasten i avløpsvannet renses fra vannet og havner i avløpsslammet [30]. Ved gjødsling med avløpsslam kan mikroplast havne i landbruksjorden. I Norge brukes 2/3 av avløpsslammet som gjødsel, og det finnes lite kunnskap om hvilken betydning dette har for jordbruket [31]. Studier har vist at det er spor av mikroplast i planterøtter, samt at mikroplast i gjødslet har negative konsekvenser for meitemarken [30].

Store Norske Leksikon definerer tungmetaller som: «metaller som veier mer enn 5 gram per kubikkcentimeter (cm³)» [32]. Det finnes opptil 60 tungmetaller [33], og de aller fleste av dem har viktige funksjoner [34]. I høyere konsentrasjoner er tungmetaller giftige og virker forurensende for både mennesker, dyr og natur [33]. Tungmetaller kan forurense jord og vann som har negativ påvirkning på landbruket og menneskelig helse [34].

PFAS-er står for perfluorerte stoffer [35] som vil si at de inneholder et høyt nivå av fluor [36]. Disse stoffene er veldig stabile [35], og en av miljøgiftene man bekymrer seg mest over [36]. Norge, Sverige, Danmark, Nederland og Tyskland har levert et forslag til EU om et totalforbud mot PFAS [37]. PFAS finnes i tekstiler, emballasje, kjøkkenutstyr, kosmetikk, skismøring, brannskum osv. [36]. Vannprøver tatt over hele landet viser spor av PFAS [35]. Det finnes derfor også konsentrasjoner av PFAS i avløpsvann som havner i avløpsslammet [38, p. 3].

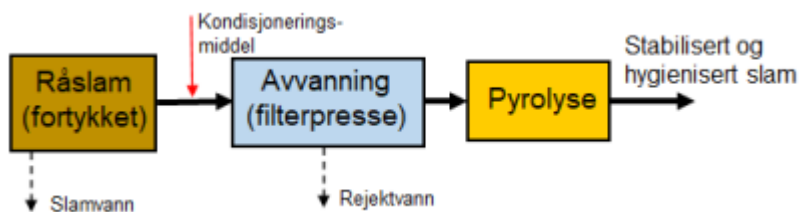
I dag måles ikke mengde eller type miljøgifter i avløpsslam. Det er derfor utfordrende å få miljøgiftene fjernet fra avløpsslammet [29].

3.2 Pyrolyse

Pyrolyse er en termisk omdanning der bioavfall utsettes for høy temperatur uten tilgang på oksygen [39], og bryter de lange kjemiske karbonbindingene [40]. Dette gjør at pyrolyse skiller seg fra andre forbrenningsprosesser som varmebehandling, forbrenning og gassifisering hvor oksygen er til stede [40]. Etter endt pyrolysing av biomasse står man igjen med biokull, biogass og bioolje. Det resterende produktet som produseres består primært av metan og andre flyktige hydrokarboner, karbonmonoksid, karbondioksid og reduserte nitrogen- og svovelforbindelser [40]. Ved pyrolysing er det ideelt at biomassen har et vanninnhold mellom 5-20% [41, p. 4]. Pyrolysetemperaturen er den maksimale temperaturen som nås under pyrolysingen [39], mens oppholdstiden er tiden pyrolysetemperaturen blir holdt.

Pyrolysing av avløpsslam

Pyrolysing av avløpsslam kan bidra nedbrytning av miljøgifter [29]. Kungsbacka kommune er en av fire kommuner i Sverige som har startet opp et pilotprosjekt hvor kommunalt avløpsslam pyrolyseres til biokull. Målet er at biokullet kan benyttes i jordbruket, og fosfor og karbon kan tilbakeføres til jorden. Ifølge prosjektleder for pilotprosjektet, Maurice Bourne, inneholdt biokullet viktige næringsstoffer og uønskede stoffer ble rensert bort ved pyrolysing av avløpsslammet [42].



Figur 2: Pyrolysing av avløpsslam [43].

Figur 2 viser bruk av pyrolyse i slambehandling. Avløpsslammet må avvannes og tørkes før pyrolysing [42] for å oppnå ideelt vanninnhold på 5-20% [41, p. 4].

3.3 Biokull

European Biochar Certificate definerer biokull som «...et porøst, karbonrikt og stabilt materiale, produsert ved pyrolysing av plantebasert biomasse og anvendt slik at karboninnholdet kan lagres over lange tidsperioder (eks. i jord), eller anvendt som erstatning for fossilt karbon i industrien» [44]. Biokull er et av produktene som fremstilles etter pyrolysing av biomasse [45], og sammenlignes ofte med trekull [46]. Når biomasse pyrolyseres skjer det forandringer i karbonet på et molekylært nivå, og kullet blir resistent mot biologisk nedbrytning [46]. Biokull kan lagres i jorden i flere hundre år [46].

I løpet av de siste 50 årene har karboninnholdet i jorden minsket, mens den i atmosfæren har økt. For å minske innhold av karbon i atmosfæren kan det hjelpe å øke karboninnholdet i jorden. Mye av gjødslet og den vanligste typen organisk materiale som brukes i jordbruket brytes ned bare på noen få år [47]. Biokull kan bidra til å fjerne karbon fra atmosfæren. Dette fordi ved pyrolysing av

biomasse blir ca. 50 % karbonet bundet i biokullet, samtidig som det utvinnes fornybar energi [48]. Globalt kan biokull være med på å redusere karbonutslipp med 0,7 gigatonn CO₂-ekvivalenter hvert år [46].

Bruksområder

Biokull kan benyttes til mange ulike formål. Det vanligste bruksområde til biokull er i jordbruket som jordforbedrende middel. Det er en del kvaliteter biokull har som gjør at det egner seg godt for jordbruket, det absorberer vann, overflaten holder godt på næringsstoffer, samt at biokull består av uendelig antall hulrom som gir et habitat for mikroskopiske jordorganismer. Disse egenskapene gjør at biokull egner seg ekstra godt som tilførsel i næringsfattig jord [47]. Biokull har ofte et høyt askeinnhold som fører til en kalkningseffekt [46]. Dette på grunn av at biokullets askeinnhold fører til et basisk kull med en pH-verdi mellom 9-10 som gir en syrenøytraliserende effekt til jorden [49].

Bruk av biokull i jordbruket er blitt forsket på ved NMBU i Ås. Denne forskningen viser at biokull benyttet i jordbruket ikke førte til økte avlinger. Biokullet som ble brukt i denne studien er utvunnet fra elefantgras som inneholder lite plantetilgjengelige næringsstoffer. Karbonet i biokullet ble lagret stabilt i jorden [47].

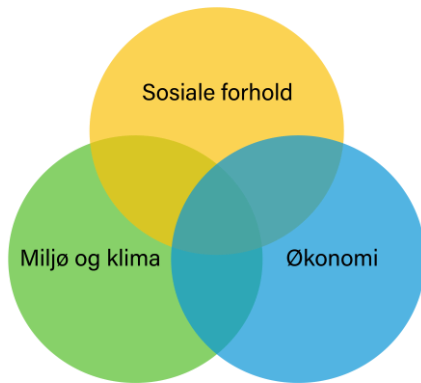
Mange av egenskapene som gjør biokull godt egnet til jordbruket gjør også kullet er godt egnet til andre bruksområder. Forskning fra Stockholm viser at biokull kan benyttes som en absorbent i grøfter og grøntområder. Biokull ble benyttet i jordstrukturen i grøfter og grøntområder i Stockholm. Innledningsvis ble det trodd at dette bare ville bedre oksygen- og vanntilgangen til plantene, men forskerne fant at biokull også var med på å redusere mengden overvann i gatene. Samtidig fant man at biokullet fungerte som et filter for overvannet, og rensset ut miljøgifter og tungmetaller [50].

Biokull er blitt benyttet som et bio-modifieringsprodukt i asfaltblandinger. Det er funnet at asfaltblandinger med biokull har redusert faren for sprekkdannelser og deformasjoner, samt gitt veier høyere fleksibilitet. Det er blitt benyttet biokull utvunnet fra tømmer, switchgrass og frø fra *Mesua ferrea* som tilsetning i asfaltblandinger [51].

Biokull kan erstatte fossilt brensel i den metallurgiske prosessindustrien. Metallurgisk prosessindustri bruker ca. 1 tonn fossile karbonkilder hvert år som fører til utslipp av klimagasser. Det blir forsket på hvordan biokull kan benyttes som en erstatning for alle fossile karbonkilder benyttet i den metallurgiske prosessindustrien [52].

3.4 Bærekraft

Begrepet bærekraft er komplekst og betyr «holdbar over tid». Over tid har bærekraft blitt synonymt med miljøvennlig [53]. Brundtland-kommisjonen definerte bærekraftig utvikling som «En utvikling som imøtekommer dagens behov uten å ødelegge mulighetene for at kommende generasjoner skal få dekket sine behov.» [54]. Dette betyr at verden har begrensede ressurser og at det er i alles interesse å ta vare på den. Figur 3 viser de tre dimensjonene i bærekraftig utvikling: Miljø og klima, Sosiale forhold og økonomi [54].



Figur 3: De tre dimensjonene i bærekraftig utvikling [54].

FNs bærekraftsmål er et viktig verktøy for å oppnå en bærekraftig utvikling. Bærekraftsmålene viser den viktige sammenhengen mellom miljø og klima, økonomi og sosiale forhold. For å oppnå bærekraftig utvikling må det etableres løsninger som balanserer ressursene mellom de tre dimensjonene [54].

Forskning fra Sverige viser at biokull produsert ved pyrolysing av avløpsslam har en rekke positive bruksområder [50] som virker positivt for bærekraftig utvikling. I tillegg kan pyrolyse av avløpsslam rense ut miljøgifter fra slammet [42]. Med dette som grunnlag vil jeg i neste kapittel presentere forskerspørsmålet for denne masteroppgaven.

4 Forskerspørsmål

I dette kapitlet presenterer jeg forskerspørsmålet til masteroppgaven. Hensikten med oppgaven er å undersøke om pyrolysing av avløpsslam kan være en løsning for behandling av slam i Horten kommune. Målet er å se om pyrolysert avløpsslam fra Falkenstein Renseanlegg kan benyttes som en ressurs. Forskerspørsmålet er derfor følgende:

Hovedspørsmål

Hvordan kan bruk av pyrolyse være en bærekraftig løsning for behandling av slam i Horten kommune?

Underspørsmål

1. Hvilke bruksområder kan biokull utvunnet fra avløpslam ha?
2. Hvilke pyrolysetemperaturer gir biokullet flest egnede egenskaper for ulike bruksområder?
3. Hvordan er pyrolysing en klimavennlig metode for behandling av slam?

4.1 Avgrensinger

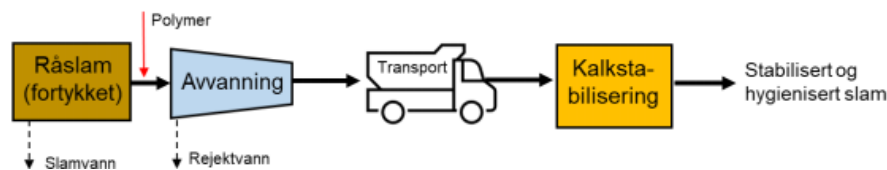
I denne masteroppgaven vil jeg primært fokusere på de tre underspørsmålene for å svare på forskerspørsmålet. Jeg har valgt disse underspørsmålene for å begrense omfanget til masteroppgaven.

- Jeg tar kun for meg det faste produktet, biokull, som utvinnes etter pyrolysing.
- Jeg vil ikke ta for meg den økonomiske dimensjonen i bærekraftig utvikling. Det innebærer at det ikke blir foretatt energi- og kostnadsanalyser i oppgaven.
- Jeg tar utgangspunkt i bruksområder Horten kommune har pekt på i prosjektplanen sin. Disse bruksområdene er jordforbedringsmiddel eller gjødsel i jordbruket, absorbent i grøft og grøntområder og tilsetning i betong og asfalt.

5 Case/Materialer

I dette kapitlet presenterer jeg bakgrunnen og caset for masteroppgaven. Denne masteroppgaven er utført i samarbeid med Horten kommune. Bakgrunnen er at Horten kommune i 2022 startet et forprosjekt for å løse slamproblematikken. Avløpslam fra kommunens egne renseanlegg vil bli en utfordring i fremtiden [43, p. 3]. Dette er det flere grunner til. Blant annet setter statsforvalteren nye krav til nitrogenrensing. Nitrogenrensekravene kommer fordi det er for mye nitrogen i Ytre Oslofjord. Disse kravene er satt fordi nitrogen i havet fører til gjengroing og overgjødsling av fjorden. Nitrogenet i vannet i Oslofjorden kommer hovedsakelig fra kommunalt avløpsvann, og landbruk. I mai 2022 ble det sendt brev til statsforvalteren i Vestfold og Telemark fra miljødirektoratet som opplyser om at det arbeides med nye føringer for nitrogenfjerning for avløpsanlegg, som har utslipp i Oslofjorden. [55]. Når disse kravene blir iverksatt vil mengden avløpslam øke og gi økte kostnader for kommunen [43, p. 3]. Det betyr at økonomi vil være en utfordring hvis kommunen fortsetter med dagens slambehandling. For å holde kostnadene nede må slambehandlingen moderniseres.

I dag avvanner kommunen selv slam før det blir sendt videre til Lindums anlegg i Holmestrand. På anlegget blir slammet tilsatt brent kalk som stabiliserer og hygeniserer slammet. Denne metoden for slambehandling er kalt Orsa-metoden [43, p. 4]. Se figur 4 under.



Figur 4: Eksisterende slambehandling i Horten Kommune [43, p. 4].

Etter at slammet er ferdig behandlet blir det brukt som jordforedlingsmiddel og råstoff for biogassproduksjon [56, p. 3]. Dette er kostbart for kommunen med en anslått total kostnad på 5,6 millioner kroner per år [57].

For å modernisere slambehandling å redusere kostnadene utreder Horten kommune muligheten for bruk av pyrolyse i slambehandlingen. Formålet med prosjektet er å finne ut av om det lønner seg for Horten kommune å pyrolysere slammet lokalt, eller ikke. I prosjektet ser kommunen nærmere på om det er mulig å etablere et pyrolyseanlegg. Det er en målsetting at pyrolyseanlegget skal bli en ressurs for kommunen og være en bærekraftig løsning for behandling av slammet. Biokullet som produseres skal kunne benyttes i landbruket som jordforbedringsmiddel, eller til andre formål kommunen ser på som hensiktsmessig [43, p. 5]. Annen hensiktsmessig bruk kan være som tilsetning i asfalt og/el. betong, eller som absorbent i grøfter og grøntområder. Biokullet som produseres må derfor overholde kravene satt i *Forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphav* og *Lov om vern mot forurensninger og om avfall (forurensningsloven)* [43, p. 4].

I prosjektet har Horten kommune valgt å ta utgangspunkt i Falkenstein Renseanlegg. Dette renseanlegget ble kommunen pålagt å utbedre av statsforvalteren i Vestfold og Telemark innen 2027. Tanken er at et pyrolyseanlegg skal etableres sammen med et nytt renseanlegg [43, p. 5].

Falkensten renseanlegg produserer ca. 3000 tonn slam i året og har en kapasitet på 25.000 pe [56, p. 4]. Avløpsvannet består primært av avløpsvann fra vanlige husholdninger og avløpsvann fra industrien som gjør det ekstra sårbart for miljøgifter.

I denne masteroppgaven skal jeg undersøke bruk av pyrolysering som metode i slambehandling. Jeg skal vurdere om avløpsslammet fra Falkensten Renseanlegg kan benyttes som en ressurs for Horten kommune etter pyrolysering. Lindum tørket og pelleterte avløpsslam fra Falkensten Renseanlegg som hadde et vanninnhold på 11,8 % [58]. Jeg fikk tilsendt avløpspellets til Universitetet i Agder som jeg pyrolyserte ved laboratoriet og produserte biokull. Jeg utførte ulike prøvetakninger av biokullet og vurderte om det kan benyttes til bruksområdene det er pekt på i forprosjektet til kommunen. Dette utstyret brukes til å utføre prøvetakingene:

Termaks 4225 Tørkeovn er en tørkeovn som står på 105 °C konstant. Den har en effekt på 1,2 kW og brukes blant annet til forbehandling og lagring av prøver, samt. måling av vanninnhold [59].

Kittec SQ 11 Elektrisk Ovn er en elektrisk ovn med flere programmer som har en kapasitet på opptil 1350 °C. Den brukes til pyrolyse- og andre varmebehandlingsforsøk, og rommer ca. 11 liter [59].

Nabertherm LT 40/11 Muffeovn er en elektrisk muffeovn som rommer opptil 40 liter, og brukes til varmebehandlingsforsøk. Denne ovnen har en kapasitet på 1100 °C [59].

IKA C 6000 adiabatisk bombekalorimeter benyttes til å måle energiutviklingen i en forbrenningsprosess. Dette skjer ved at et kalibrert kammer måler temperaturforandringer, og ut ifra dette beregnes mengden tilført energi [60].

PerkinElmer 2400 CHN Elemental Analyzer anvendes til å utføre en elementanalyse på/i organiske forbindelser, og mengden karbon, hydrogen og nitrogen kan fastslås [60].

6 Metode

I dette kapitlet vil jeg beskrive metoden som er brukt for å svare på forskerspørsmålet. I kapittel 6.1 Eksperimentell metode beskrives laboratorieforskene jeg utførte. I kapittel 6.1 Litteraturstudium presenteres metoden jeg benyttet for å finne eksisterende litteratur relevant for min masteroppgave.

6.1 Eksperimentell metode

I dette avsnittet vil jeg beskrive metoden for laboratorieforskene som utføres for å svare på forskerspørsmålet. Jeg har benyttet eksperimentell metode. I boken Introduksjon til samfunnsvitenskapelig metode beskrives et eksperiment som «undersøkelse av et spesielt tiltak» [61, p. 269]. Et eksperiment kan defineres som «en tilnærming til forskning som innebærer at forskeren manipulerer betingelser for å undersøke virkningen av dette. Hensikten er å påvise hvordan noe påvirker noe annet.» [62]. I mine forsøk har jeg benyttet biokull produsert fra pyrolysert avløpsslam. Biokullet ble utsatt for ulike eksperimenter for å se endring i vanninnholdet, askeinnholdet, innhold av flyktige gasser, biokullets brenn- og fiksert karbonverdi, samt CHN elementanalyse.

Jeg har beregnet standardavvik for de utførte eksperimentene. Standardavviket viser «hvor mye variasjon det er rundt gjennomsnittet» [61, p. 311]. Standardavvik har jeg regnet ut ved hjelp av formelen $s = \sqrt{\frac{\sum(x-M)^2}{N}}$ [63, p. 198] i Excel. Denne formelen er funksjonen STADV.P i Excel. Standardavviket er et mål på normalspredning.

Før oppstart av laboratorieforskene utarbeidet jeg Sikker Jobb Analyse (SJA). SJA er en systematisk risikoanalyse knyttet til bestemte arbeidsoppgaver og aktiviteter [64]. Mine eksperimenter ble gjennomført ved svært høye temperaturer og over lang tid. Det var derfor viktig å identifisere risikofaktorene ved arbeidet. I vedlegg 1 og 2 beskriver jeg uønskede hendelser som kan oppstå og hva som gjøres for å redusere risiko og uheldige konsekvenser av forsøkene.

I avsnittene under beskriver jeg de ulike laboratorieforskene.

6.1.1 Pyrolysering

Avløpsslammet ble pyrolysert for å produsere biokull og beregne kullutbytte. Ved pyrolysering av avløpsslammet ble det benyttet Kittec SQ 11 Elektrisk ovn og reaktor med lokk, se figur 5 og 6. Det ble utført tre pyrolysinger ved forskjellige temperaturer, 500 °C, 700 °C og 800°C, med lik oppholdstid på 40 minutter. Disse prøvene er navngitt: S-500-40, S-700-40 og S-800-40. Viser til tabell 1 under.

Tabell 1: Oversikt over pyrolysetemperatur og oppholdstid.

Prøve	Temperatur [°C]	Oppholdstid [min]	Mengde [L]
S-500-40	500	40	1
S-700-40	700	40	1
S-800-40	800	40	1



Figur 5: Kittec SQ 11 Elektrisk ovn benyttet til pyrolysing.



Figur 6: Reaktor som benyttes til pyrolysing.

Det første som ble utført var å veie reaktoren. Deretter ble avløpspellets fylt i reaktoren og veid. Differansen mellom disse to veiingene gir massevekt før pyrolysing. Reaktor med lokk ble plassert i den elektriske ovnen. Ovnene ble varmet opp til ønsket temperatur med en hastighet på 200 °C/h. Deretter ble ønsket temperatur holdt i 40 min før ovnen ble kjølt ned til romtemperatur med en hastighet på 200 °C/h. Hele pyrolyseprosessen tok ca. 24 timer. Etter endt pyrolysing ble reaktoren tatt ut av ovnen og veid. Biokullet i reaktoren ble helt over i en lufttett beholder. Reaktoren ble veid igjen og massevekten etter pyrolysing utregnet. Deretter ble kullutbyttet k regnet ved formel 1.

m_1 : vekt reaktor [g]
 m_2 : vekt reaktor med avløpsspellets [g]
 m_3 : vekt reaktor med biokull [g]
 k : kullutbytte [wt %]

$$k = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100 \quad (1)$$

6.1.2 Vanninnhold

For å bestemme vanninnhold i avløpsspelletsene og biokullet ble standarden NS-EN ISO 18134-2:2017 Fast biobrensel Bestemmelse av fuktinnhold benyttet. Jeg beregner vanninnholdet både i avløpsspellets og i biokull med samme fremgangsmåte som beskrevet i avsnittet nedenfor. I teksten under bruker jeg begrepet prøvemasse både om avløpsspellets og biokull. Metoden som ble utført i denne studien avviker noe fra standarden. Tilgjengelig utstyr ved laboratoriet til Universitetet i Agder avviker fra utstyret beskrevet i standarden. I tillegg valgte jeg å avkjøle prøvemassen til romtemperatur i en vakuundesikator slik at massen ikke absorberte fuktighet fra omgivelsene før veiing.

Jeg utførte tre forsøk av biokull produsert ved ulike temperaturer og regnet ut standardavviket. Først ble diglene veid uten prøvemasse. Deretter ble prøvemasse tilført diglene og veid på nytt. Differansen mellom veiingene ga massevekten før tørking. Diglene ble satt i Termaks 4225 Tørkeovn som konstant holder 105 °C. Her stod diglene med prøvemasse i 24 timer før de ble tatt ut og satt i en vakuundesikator for avkjøling. Se figur 7. Ved romtemperatur ble diglene veid på nytt for å finne vekt etter tørking. Deretter ble vanninnholdet regnet ut ved hjelp av formel 2.



Figur 7: Vakuundesikator med silicagele

m_1 : vekt digel [g]
 m_2 : vekt digel med prøve før tørking [g]
 m_3 : vekt digel med prøve etter tørking [g]
 M_r : Vanninnhold [%]

$$M_{ar} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \quad (2)$$

6.1.3 Askeinnhold

NS-EN ISO 18122: 2015 er en standard for beregning av askeinnhold i biomasse. I denne studien er standarden benyttet som en veileder for å finne askeinnholdet til det pyrolyserte biokullet. Fremgangsmåten for å finne askeinnholdet avviker noe fra standarden grunnet forskjellige type tilgjengelig utstyr og praksis ved laboratoriet på Universitetet i Agder.

Det ble utført tre forsøk av biokullet produsert ved ulike temperaturer. Diglene uten prøvemasse ble veid. Deretter ble diglene tilført prøvemasse og veid på nytt. Diglene ble plassert i Nabertherm LT 40/11 Muffeovn. Muffeovnen ble oppvarmet til 250 °C i løpet av 30 minutter. Denne temperaturen ble holdt i 60 min. Deretter ble temperaturen økt til 550°C i løpet av 30 minutter. Temperaturen på 550 °C holdes konstant. Ifølge NS-EN ISO 18122: 2015 skal diglene undersøkes etter 4 timer om prøvemassen er blitt til aske. Hvis kullet ikke er blitt til aske skal diglene undersøkes hver 30 min.

Ved gjennomføring av forsøket ble det observert at kullet måtte stå lenger i muffeovnen enn oppgitt i standarden. Derfor valgte jeg å følge standard praksis ved laboratoriet og prøvene ble stående i ovnen på 550 °C i 24 timer. Etter 24 timer ble diglene tatt ut av ovnen og plassert i vakuundesikatoren for å kjøles ned til romtemperatur. Diglene ble veid på nytt. Askeinnholdet fastsettes ved formel 3. Merk at vanninnholdet er med i formelen. Her ble gjennomsnitt av vanninnholdet benyttet.

m_1 : vekt digel [g]
 m_2 : vekt digel med prøve [g]
 m_3 : vekt digel med prøve etter ovn [g]
 M_{ad} : vanninnhold av prøve [%]

$$A_d = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \cdot \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (3)$$

6.1.4 Innhold av flyktige gasser

NS-EN ISO 18123:2015 er en standard for beregning av mengden flyktig gasser i biomasse. I denne masteroppgaven er standarden benyttet som en veileder for å finne mengden flyktige gasser i biokullet produsert ved forskjellige temperaturer.

I dette forsøket ble Nabertherm LT 40/11 Muffeovn benyttet. Først ble biokull hamret opp til pulverform. Det ble benyttet glasskeramiske digler med lokk som er varmebestandig opp til 900 °C. Muffeovnen ble varmet opp til 900 °C med en hastighet på 250 °C/h. Max temperatur på 900 °C ble holdt i 2 timer. Diglene med lokk uten prøvemasse stod i ovnen i 7 min. Deretter ble de plassert i vakuundesikatoren for å kjøles ned til romtemperatur. Diglene med lokk ble veid ved romtemperatur. Diglene ble tilført prøvemasse, veid på nytt og stod i ovnen i 7 min. Deretter ble diglene plassert i vakuundesikatoren for nedkjøling. Diglene ble veid igjen, før innholdet av flyktige gasser ble bestemt med formel 4. Også her er vanninnholdet av kullet inkludert i formelen, og det ble benyttet gjennomsnittet av vanninnholdet.

m_1 : vekt digel etter oppvarming [g]

m_2 : vekt digel med prøve [g]

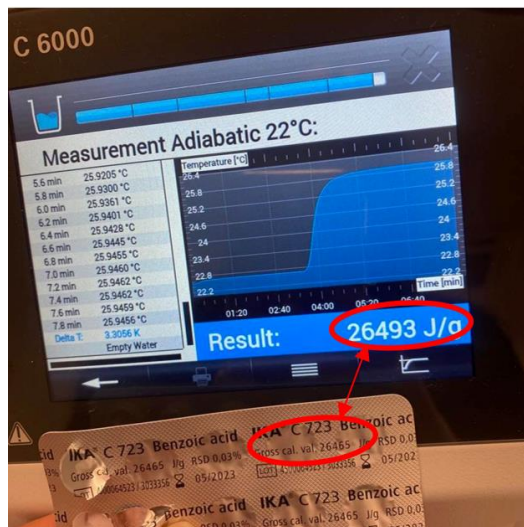
m_3 : vekt digel med prøve etter oppvarming [g]

M_{ad} : vanninnhold av prøve [%]

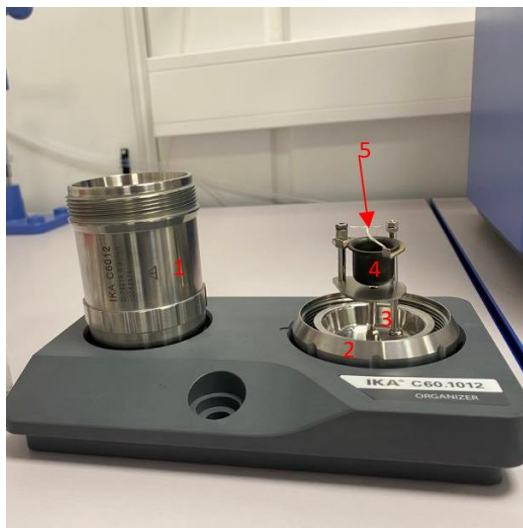
$$V_d = \left[\frac{100(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} - M_{ad} \right] \cdot \left(\frac{100}{100 - M_{ad}} \right) \quad (4)$$

6.1.5 Brennverdi

For å finne brennverdien ble det benyttet et bombekalorimeter. Først ble biokullet hamret til pulverform. Maskinen som ble brukt i dette forsøket er IKA C 6000 adiabatisk bombekalorimeter. Maskinen krever en prøvemasse på 1,0 g +/- 0,1 g. Før selve forsøket settes i gang må bombekalorimeteret kalibreres. Dette ble utført med samme fremgangsmåte som resten av forsøket, men det ble benyttet to Benzoic-acid-tabletter i stedet for biokull. For at forsøket kan gjennomføres må brennverdien som maskinen produserte tilsvare brennverdien oppført på Benzoic-acid-pakken, se figur 8.



Figur 8: Bombekalorimeteret må kalibreres med Benzoic-acid-tabletter.

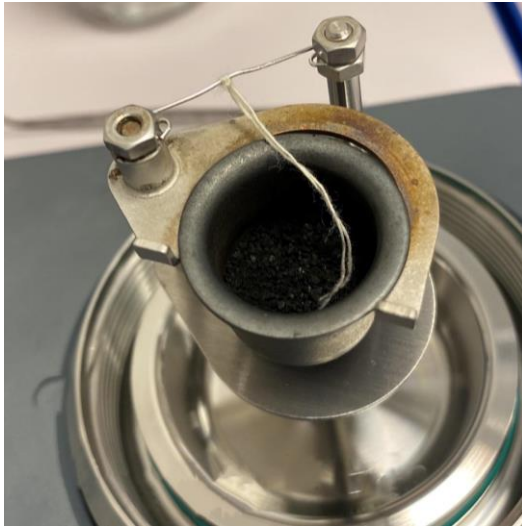


Figur 9: Utstyr prøvemassen antennes i.

I tillegg til kalorimeteret har man utstyr som prøven skal antennes i, se figur 9:

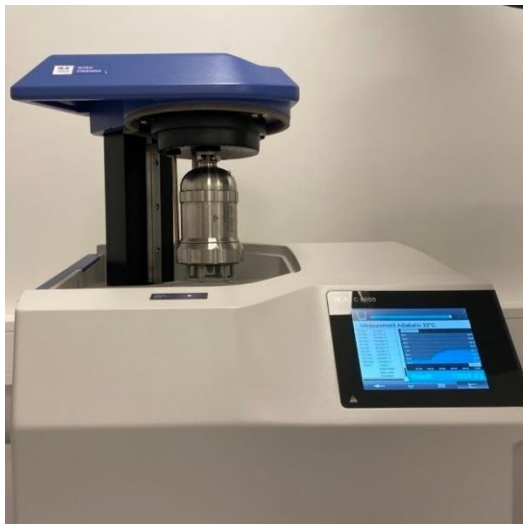
1. Nedbrytningskammer, øvre del
2. Nedbrytningskammer, nedre del
3. Smeltedigelholder
4. Forbrenningsdigel
5. Tenningsledning

Smeltedigelholderen (3) plasseres i nedre del av nedbrytningskammeret (1). Deretter veier man inn 1,0 g prøvemasse i forbrenningsdigelen (4), og prøvemassen plottes inn i kalorimeteret. Forbrenningsdigelen (4) plasseres så i smeltedigelholderen (3). Bomullstråden plukkes ut av posen med en pinsett, og knytes fast til tenningsledningen (5). Det er viktig å påse at tråden kommer i tilstrekkelig kontakt med prøven som vist i figur 10.



Figur 10: Det er viktig at bomullstråden er i kontakt med prøven slik at den blir antent.

Bunnen av smeltedigelholderen (3) fylles med 5 ml destillert vann. Deretter skrues øvre del av nedbrytningskammeret (2) på den nedre delen (1). Nedbrytningskammeret scannes på RFID-leseren. Nedbrytningskammeret plasseres i kalorimeteret og forsøket startes.



Figur 11: Nedbrytningskammeret på vei ned i kalorimeteret.

Kalorimeteret klargjøres ved å fylles med oksygen, og lokket lukkes. Se figur 11. Deretter fylles systemet med vann og temperaturen stabiliseres før prøven antennes. Temperaturen stiger når prøven blir brent. Når forsøket er ferdig vil brennverdien avleses på skjermen.

6.1.6 Fiksert karbon

Fiksert karbon gir en indikasjon på hvor mye av biokullet som inneholder karbon. Innholdet av fiksert karbon i biokullet består av karbon, men kan også bestå av andre stoffer som ikke ble fjernet med de andre flyktige gassene [65]. Fiksert karbon beregnes ved formel 5. Askeinnholdet og innhold av flyktige gasser er hentet fra resultatene fra forsøkene beskrevet i 6.1.3 og 6.1.4.

A_d : Askeinnhold
 V_d : Innhold av flyktige gasser
 C_{fix} =Fiksert karbon

$$C_{fix} = 100 - A_d - V_d \quad (5)$$

6.1.7 Elementanalyse CHN (Carbon, Hydrogen og Nitrogen)

For å finne innholdet av karbon, hydrogen og nitrogen i biokullet skulle PerkinElmer 2400 CHN Elemental Analyzer benyttes. Grunnet omstendigheter ved laboratoriet utenfor min kontroll kunne ikke elementanalysen gjennomføres. Jeg valgte derfor å benytte resultater fra artikler funnet i litteraturstudiet mitt som en erstatning for eget forsøk.

6.2 Litteraturstudie

I dette delkapitlet vil jeg beskrive metoden for litteraturstudiet som utføres for å svare på forskerspørsmålet. En litteraturstudie kan defineres som «en planlagt studie for å finne frem til den forskningen som allerede finnes på området, og til hvilke metoder som er benyttet på feltet» [61, p. 249]. Resultatet fra en litteraturstudie er forskningsartikler funnet ved søk utført i databaser [61, p. 249], og det finnes ingen spesifikke regler for hvordan en litteraturstudie må gjennomføres [61, p. 250]. Det finnes imidlertid krav om en definert problemstilling og formål, systematiske søk, gjennomgang og analyse av materialet, samt diskusjon av materialet [61, pp. 250-251]. Litteraturstudien utført i denne masteroppgaven er et systematisk litteratursøk som betyr at forskningsspørsmålet er tydelig definert [66, p. 11], og kjennetegnes ved at det utføres omfattende søk med grundig utvalgte søkeord for å finne litteratur som besvarer forskerspørsmålet [67].

Formålet med litteraturstudien var å finne forskningsartikler som belyser masteroppgavens forskningsspørsmål: Hvordan kan bruk av pyrolyse være en bærekraftig løsning for behandling av slam? Med følgende underspørsmål: Hvilke bruksområder kan biokull utvunnet fra avløpslam ha? Hvilke pyrolysetemperaturer gir biokullet flest egnede egenskaper for ulike bruksområder? Hvordan er pyrolysing en klimavennlig metode for behandling av slam? Søkemotorene Science Direct, Google Scholar og Universitetet i Agders digitale bibliotek, Oria.no, ble vurdert. Etter flere testforsøk ble det funnet at Google Scholar var mest hensiktsmessig å benytte seg av i denne masteroppgaven.

For å svare på forskerspørsmålet ble det satt et mål om at litteratursøket skulle gi maksimalt 50 treff på relevante forskningsartikler. Figur 12 viser utvalgsmetoden for litteratursøket med kriterier for inklusjon og eksklusjon av søkeord.

Søkemotor: Google Scholar

Avansert søk

Med alle ordene: municipal sewage sludge derived biochar pyrolysis ash moisture volatiles calorific value carbon hydrogen nitrogen biochar char usages

Med den eksakte setningen: sewage sludge pyrolysis

Uten ordene: wood "co pyrolysis" "microwave assisted pyrolysis" cow "food waste"

Tidsperiode: 2019-2023

Resultater: 33 artikler

Søk utført: 06.04.2023

Figur 12: Utvalgsmetoden for litteratursøket.

Litteratursøket ga 33 søketreff. For å finne frem til forskningsartiklene som er relevante for min studie foretok jeg en inklusjons- og eksklusjonsprosess. Hver artikkels overskrift ble lest, og relevansen vurdert. For de artiklene som virket relevant ble abstraktet lest, og relevansen vurdert på nytt. De artiklene som virket relevante ble lest i sin helhet. Etter siste eksklusjonsgjennomgang stod jeg igjen med 8 forskningsartikler. I avsnittene under presenterer jeg de 8 forskningsartiklene funnet i litteraturstudien.

Structural and chemical changes of sludge derived pyrolysis char prepared under different process temperatures

Moško et al. undersøkte hvordan pyrolysetemperaturen påvirket egenskapene til biokullet når avløpsslam ble pyrolysert ved forskjellige temperaturer fra 400 °C- 800 °C. Det ble utført forskjellige analyser for å se nærmere på teksturendring, porøsitet, organisk materiale og andre elementer i biokullet. Et funn var at høyere pyrolysetempertur førte til høyere konsentrasjon av hydrokarboner og fosfater, men en reduksjon i konsternasjoner av sulfater og sulfitter. Det ble konkludert med at funnene kan gi bedre forståelse for hvordan man kan bruke biokull i jordbruket og plantenes opptak av næringsstoffer fra biokullet [68].

Effects of sludge pyrolysis temperature and atmosphere on characteristics of biochar and gaseous products

Guo et al. undersøkte hvordan pyrolyse av avløpsslam ved forskjellige temperaturer påvirket det faste restproduktet og gasser som oppsto underveis i pyrolyseringsprosessen. Her ble det funnet at utslipp av forurensende gasser økte ved høyere pyrolysetemperaturer. Guo et al. fant også at når CO₂ ble inkludert i pyrolyseprosessen økte overflatearealet til biokullet ved temperaturer opp til 500 °C. Ved høyere temperaturer enn 500 °C var CO₂ hovedgrunnen til reduksjon av overflatearealet. Større overflateareal i kullet fører til at kullet har bedre absorberende egenskaper. I tillegg til dette ble det funnet at pyrolysering fjerner vesentlige mengder svovel og nitrogen fra slammet, og reduserer utslipp av farlige gasser. Studien konkluderer med at pyrolysering er en effektiv metode med positive egenskaper for å håndtere avløpsslam [69].

Self-recycling of sewage sludge as a coagulant and mechanism in sewage sludge dewatering

Wu et al. undersøkte om biokull utvunnet ved pyrolysering av avløpsslam kan gjenbrukes i avvanning av avløpsslam. Det ble undersøkt hvor godt egnet biokull er som en koagulent ved forskjellige pyrolysetemperaturer. Wu et al fant at avløpsslam tilsatt biokull hadde høyere sedimenteringshastighet og redusert avtettningvolum. Biokullet hadde flere egnede egenskaper når det kommer til kappilærsuging enn andre materialer. Det ble også funnet at biokull i avløpsslam reduserte fuktighetsinnholdet. Wu et al. konkluderte med at biokull kan være effektivt å bruke i avvanning av avløpsslam [70].

The Sewage Sludge Biochar at Low Pyrolysis Temperature Had Better Improvement in Urban Soil and Turf Grass

Tian et al. forsket på om biokull utvunnet fra pyrolysert avløpsslam ville ha en gunstig effekt på jorden i urbane områder. Det pyrolyserte biokullet ble tilført gjødsel som ble brukt til å gjødsle gress. Funnene viste at biokullet tilførte jorden økt innhold av karbon, nitrogen, fosfor og kalium. Det ble også funnet redusert innhold av tungmetaller i gresset. Dette førte til et bedre næringsinnhold for

gresset, samt økt gressvekst. Tian et al. konkluderte med at biokull kan være kostnadseffektivt og ha en gunstig effekt på jorden, avhengig av pyrolysetemperatur og prosess [71].

Using Industrial Sewage Sludge-Derived Biochar to Immobilize Selected Heavy Metals in a Contaminated Calcareous Soil

Karimi et al. undersøkte om biokull ville ha en positiv effekt på jord med stor konsentrasjon av tungmetaller og kalk. Biokullet er utvunnet ved pyrolysing av industrielt avløpsslam ved 300 °C og 600 °C. Karimi et al. fant at biokull pyrolysert ved 600 °C hadde høyere innhold av karbon enn biokull pyrolysert ved 300 °C. Det ble også funnet at biokull pyrolysert ved 600 °C er mer porøs enn biokullet produsert ved 300 °C. Det fører til at biokullet produsert ved 600 °C har et redusert innhold av tungmetaller omgivelsene kan ta opp [72].

Pyrolysis of Municipal Sewage Sludge within a circular economy vision: Production of sustainable Biofuels and Economic Biofertilizers

Trabelsi et al. undersøkte om pyrolysing av kommunalt avløpsslam kan brukes til å produsere biogjødsel og biodrivstoff. Trabelsi et al. fant at pyrolysetemperatur på 600 °C ga biodrivstoffet egenskaper tilsvarende andre fossile brensler. Gassen utvunnet ved pyrolysing hadde en høy brennverdi og kunne gjenvinnes som energikilde. I tillegg ble det funnet at biokullet egner seg godt som gjødsel i jordbruk [73].

Sludge Thermal Utilization, and the Circular Economy

Bien et al. utførte denne studien på grunnlag av at EU i 2015 vedtok CEAP- Circular Economy Action Plan, en handlingsplan for sirkulær økonomi. Bien et al. skriver i sin rapport at pyrolysing av avløpsslam er en metode som har høyt potensiale til å løse utfordringene med dagens slambehandling. De fant at ved pyrolysing kan uønskede og farlige stoffer fjernes, energien fra prosessen gjenvinnes og restproduktene brukes til nyttige formål [74].

A critical review of resource recovery from municipal wastewater treatment plants – market supply potentials, technologies and bottlenecks

Kehrein et al. undersøkte ulike teknologiske og bærekraftige løsninger for behandling av avløpsvann. Kehrein et al. tok for seg 11 ulike ressurser og deres begrensinger og muligheter relatert til faktorer som økonomi, miljø, og samfunn. Det blir til slutt konkludert med at tidlig i planleggings- og prosjekteringsfasene burde markedspotensialet, teknologisk innovasjon og potensielle begrensinger vurderes slik at behandling av avløpsvann blir mer sirkulær [75].

I neste kapittel vil jeg presentere resultatene fra eget laboratorieforsøk og litteraturstudiet.

7 Resultat

7.1 Laboratorieforsøk

I dette kapitlet presenteres resultatene fra laboratorieforsøkene.

Kullutbytte

Tabell 2 viser en oversikt over mengde biokull produsert. S-500-40 er biokullet som ble produsert ved 500 °C. Det fikk et kullutbytte på 39,4 wt%. S-700-40 er biokullet pyrolysert ved 700 °C som fikk et kullutbytte på 36,71 wt%. Og S-800-40 er biokullet produsert ved pyrolysetemperatur på 800 °C. Her ble kullutbyttet 35,88 wt%. Resultatene viser at kullutbyttet øker med pyrolysing ved høyere temperaturer.

Tabell 2: Oversikt over kullutbytte til de ulike biokullene.

	S-500-40	S-700-40	S-800-40
m ₁ : Vekt reaktor [g]	478,09	478,34	478,30
m ₂ : Vekt reaktor med prøvemasse [g]	877,62	889,14	873,67
m ₃ : Vekt reaktor med biokull [g]	635,54	629,16	620,19
k: Kullutbytte [wt %]	39,40	36,71	35,88

Vanninnhold

Tabell 3 viser vanninnholdet i de tørkede avløpspelletsene som ble benyttet til pyrolysingen. Vanninnholdet i avløpspelletsene er 15,16 +/- 0,18 %.

Tabell 3: Vanninnhold avløpspellets

	AV1	AV2	AV3	AV4
m ₁ [g]	61,03	64,09	58,96	57,50
m ₂ [g]	127,58	124,99	124,47	121,98
m ₃ [g]	117,54	115,58	114,56	112,33
M _{ar} [wt%]	15,08	15,46	15,14	14,96
Standardavvik	0,184			
Gjennomsnitt	15,16			
Resultat [wt%]	15,16 +/- 0,18			

Tabell 4 viser vanninnholdet i biokullet pyrolysert ved 500 °C, 700 °C og 800 °C. Vanninnholdet til biokullet kalt S-500-40 er -0,29 +/- 0,71 wt%. S-700-40 består av 0,03 +/- 0,58 % vann, og biokull S-800-40 har et vanninnhold på 0,08 +/- 0,28 %. Resultatet viser at vanninnholdet er tilnærmet 0 % ved biokullet produsert ved ulike pyrolysetemperaturer.

Tabell 4: Vanninnhold, biokull

	S-500-40			S-700-40			S-800-40		
m ₁ [g]	60,99	11,11	11,27	57,50	10,70	10,68	61,04	10,99	10,91
m ₂ [g]	92,30	13,15	13,23	97,32	12,84	12,68	100,49	12,92	13,06
m ₃ [g]	92,69	13,14	13,22	97,63	12,83	12,67	100,60	12,91	13,06
M _{ar} [%]	-1,28	0,04	0,37	-0,79	0,35	0,53	-0,26	0,43	0,08
Standardavvik [wt%]	0,713			0,584			0,280		
Gjennomsnitt [wt%]	-0,287			0,030			0,080		
Resultat [wt%]	-0,29 +/- 0,71			0,03 +/- 0,59			0,08 +/- 0,28		

Askeinnhold

Tabell 5 viser askeinnholdet til biokull S-500-40, S-700-40 og S-800-40. S-500-40 har et askeinnhold på 60,90 +/- 0,57 wt%. Askeinnholdet til biokull S-700-40 er 64,03 +/- 1,58 wt%, og S-800-40 har 67,25 +/- 0,27 wt% askeinnhold. Resultatet viser at askeinnholdet i biokullet øker ved høyere pyrolysetemperaturer.

Tabell 5: Askeinnhold, biokull

	S-500-40			S-700-40			S-800-40		
m ₁ [g]	69,72	11,04	10,56	64,09	10,85	10,99	47,89	33,27	33,63
m ₂ [g]	92,96	13,57	12,72	93,79	13,22	12,83	69,94	35,25	35,25
m ₃ [g]	84,10	12,57	11,87	82,44	12,40	12,18	62,79	34,59	34,72
M _{ad} [wt%]	-0,29	-0,29	-0,29	0,03	0,03	0,03	0,08	0,08	0,08
A _d [wt%]	61,70	60,48	60,51	61,80	65,26	65,03	67,63	66,99	67,13
Standardavvik [wt%]	0,567			1,577			0,274		
Gjennomsnittlig [wt%]	60,897			64,030			67,248		
Resultat [wt%]	60,90 +/- 0,57			64,03 +/- 1,58			67,25 +/- 0,27		

Innhold av flyktige gasser

Tabell 6 viser mengden flyktige gasser i biokullet. Biokullet pyrolysert ved 500 °C består av 13,84 +/- 0,0025 wt% flyktige gasser, mens kullet produsert ved 700 °C har 6,41 +/- 0,08 wt% innhold av flyktige gasser og biokullet kalt S-800-40 inneholder 2,90 +/- 0,025 wt% flyktige gasser. Resultatet viser at innholdet av flyktige gasser i biokullet reduseres ved høyere temperaturer.

Tabell 6: Innhold av flyktige gasser, biokull

	S-500-40		S-700-40		S-800-40	
m ₁ [g]	14,56	13,70	13,72	14,26	14,30	14,05
m ₂ [g]	15,62	14,73	14,88	15,28	15,45	15,07
m ₃ [g]	15,48	14,59	14,80	15,21	15,42	15,04
M _{ad} [wt%]	-0,29	-0,29	0,03	0,03	0,08	0,08
V _d [wt%]	13,84	13,84	6,49	6,33	2,93	2,88
Standardavvik [wt%]	0,002		0,080		0,025	
Gjennomsnitt [wt%]	13,838		6,414		2,902	
Resultat [wt%]	13,34 +/- 0,0025		6,41 +/- 0,080		2,90 +/- 0,025	

Brennverdi

Tabell 7 viser brennverdien til biokullet. S-500-40 har en brennverdi på 10 971 +/- 254,85 J/g. S-700-40 har en brennverdi på 10 637,67 +/- 370,65 J/g, mens S-800-40 en brennverdi på 10 437,00 +/- 338,99 J/g. Resultatet viser at brennverdien reduseres ved høyere pyrolysetemperaturer.

Tabell 7: Brennverdi, biokull

	Brennverdi [J/g]	Standardavvik [J/g]	Gjennomsnitt [J/g]	Resultater [J/g]
S-500-40	10828	255	10971	10971 +/- 255
	10756			
	11329			
S-700-40	10122	371	10638	10638 +/- 371
	10814			
	10977			
S-800-40	10401	339	10437	10437 +/- 339
	10869			
	10041			

Fiksert karbon

Tabell 8 viser mengden fiksert karbon i biokullet. I S-500-40 er det 25,26 % Fiksert karbon, mens S-700-40 består av 29,56 % fiksert karbon og S-800-40 har 29,84 % fiksert karbon. Resultatet viser et tilnærmet likt innhold av fiksert karbon i biokullet produsert ved 700 °C og 800 °C. Ved 500 °C er innholdet av fiksert karbon lavere.

Tabell 8: Mengde fiksert karbon i biokullet

	S-500-40	S-700-40	S-800-40
Askeinnhold [wt%]	60,90	64,03	67,25
Innhold av flyktige gasser [wt%]	13,84	6,41	2,90
Fiksert karbon [wt%]	25,26	29,56	29,85

Oppsummering

Tabell 9 viser en samlet oversikt over alle prøvetakinger tatt av biokullet i laboratorieforsøkene.

Tabell 9: Samlet resultater fra hvert laboratorieforsk.

	Kullutbytte [wt %]	Vanninnhold [%]	Askeinnhold [wt %]	Innhold av flyktige gasser [wt%]	Brennverdi [J/g]	Fiksert karbon [wt%]
S-500-40	39,4	-0,29 +/- 0,71	60,90 +/- 0,57	13,34 +/- 0,0025	10971 +/- 255	25,26
S-700-40	36,71	0,03 +/- 0,58	64,03 +/- 1,58	6,41 +/- 0,08	10638 +/- 371	29,56
S-800-40	35,88	0,08 +/- 0,28	67,25 +/- 0,27	2,90 +/- 0,025	10437 +/- 339	29,85

7.2 Resultater fra litteraturstudium

Her presenteres funnene fra forskningsartiklene funnet i litteraturstudiet. Jeg fremstiller forskernes relevante resultater og funn for min studie hver for seg.

7.2.1 Moško et al. sin studie

Figur 13 viser oversikten over biokullet produsert ved ulike temperaturer og dets egenskaper fra Moško et al. sin studie. Fra figur 13 er askeinnholdet (A^d), innholdet av flyktige gasser (V^d), innhold av fiksert karbon (FC^d), karboninnholdet (C^d), nitrogeninnholdet (N^d) og brennverdien (HHV d) benyttet som resultat i denne oppgaven.

Table 3
Sludge-char properties depending on the pyrolysis temperature.

Property	A^d	V^d	FC^d	C^d	H^d	N^d	S^d_{total}	$O^d +$	H/C^d	HHV d
Unit	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	mol/mol	MJ/kg
SC 400/He	67.9 ± 0.747	21.5 ± 0.421	10.6 ± 0.857	23.1 ± 0.185	1.62 ± 0.048	3.04 ± 0.077	0.761 ± 0.012	3.56 ± 0.775	0.839	9.49 ± 0.038
SC 500/He	72.7 ± 0.799	15.9 ± 0.311	11.4 ± 0.858	21.4 ± 0.171	1.04 ± 0.031	2.66 ± 0.068	0.810 ± 0.013	1.36 ± 0.821	0.576	8.23 ± 0.033
SC 600/He	75.8 ± 0.839	11.7 ± 0.229	12.5 ± 0.870	20.5 ± 0.164	0.716 ± 0.021	2.26 ± 0.057	0.773 ± 0.012	-0.052 ± 0.857	0.419	8.04 ± 0.032
SC 700/He	77.8 ± 0.874	5.93 ± 0.116	16.3 ± 0.882	19.3 ± 0.154	0.497 ± 0.015	1.55 ± 0.039	0.851 ± 0.014	-0.014 ± 0.888	0.309	8.01 ± 0.032
SC 800/He	80.8 ± 0.925	0.922 ± 0.018	18.3 ± 0.925	17.2 ± 0.137	0.310 ± 0.009	0.939 ± 0.024	0.842 ± 0.013	-0.050 ± 0.935	0.217	8.10 ± 0.032

Figur 13: Tabell 3 fra Moško et al. sin studie [68, p. 3].

Tabell 10 viser en oversikt av resultater fra Moško et al. sin studie i tekstform som benyttes i denne masteroppgaven. Jeg benytter og forklarer resultatene nærmere i diskusjonskapittelet.

Tabell 10: Resultater fra Moško et al. sin studie.

Resultater	Kildehenvisning
The sludge- char yields were 61.7, 52.9, 50.8, 48.6, and 46.3 wt% decreasing from SC 400/He to SC 800/He.	[68, p. 4]
The moisture content (W) of the sludge was determined according to the Czech/European standard ČSN EN 15414-3 whereas, due to high temperatures and the long residence time of pyrolysis, the moisture content of the sludge-chars is considered zero.	[68, p. 2]
Additionally, an advantage of the thermal treatment of the sludge is the volatilization of volatile heavy metals and the destruction of organic pollutants [10] and microplastics [11] present in the sewage sludge.	[68, p. 2]
However, in the case of sewage sludge, the high ash content dilutes the carbon content significantly, resulting in a decrease in the carbon content of the sludge-chars at higher pyrolysis temperatures.	[68, p. 5]
The positive correlation between the ash content and pyrolysis temperature suggests that the majority of the mineral fraction of the sludge is incorporated into sludge-char rather than evolved to pyrolysis gas during volatilization, including the incorporation and increase in the phosphorus content of the sludge-chars.	[68, p. 4]
Since the H and N contents of sewage sludge are mostly attributed to the organic volatile fraction of the sludge, their total contents of sludgechar decreased with increasing pyrolysis temperature as well.	[68, p. 4]
Carbon is the main element responsible for the energy content of chars. However, the trend of its content depending on pyrolysis temperature did not	[68, p. 5]

<p>explicitly refer to the trend in heating value. We observed an initial decline in the heating value of sludge-chars when the pyrolysis temperature increased from 400 to 600 °C; however, a further increase in the temperature had no significant influence on the heating value of the chars. Such a trend is contradictory to most of the literature where either low-temperature interval was studied and/or continuous reactors with moving ash/sludge-char particles were used.</p>	
<p>Compared to biochars prepared from woody and agricultural biomass [47], the porosity of sludge-chars is significantly lower which is the result of the lower carbon content and a significantly higher ash content of sludge-chars, as the ash from the complete burning of the sludge is practically non-porous [59].</p>	<p>[68, p. 6]</p>
<p>Since there is obvious lack of a plant-available nitrogen species in sludge-chars and the total nitrogen content is low, we suggest that the use of sludge-chars as N fertilizers is doubtful and its use on soils should be in connection with other possible advantages.</p>	<p>[68, p. 6]</p>
<p>The influence of both the rising pyrolysis temperature and depth of the chars on S speciation significantly increased the portion of the sulfide-S form in contrast to the decrease in sulfate, sulfite, pyrite, and organic-S, especially at temperatures higher than 600 °C. Sulfide-S can be bound to metal elements, including heavy metals, resulting in their immobilization due to low solubility. We hypothesize that the increased content of sulfide-S can then proportionally immobilize heavy metals in sludge-char, resulting in the lower bioavailability of heavy metals (and other elements) from chars prepared at higher temperatures.</p>	<p>[68, p. 6]</p>

7.2.2 Guo et al. sin studie

Figur 14 viser tabell 2 fra Guo et al. sin studie som er en oversikt over egenskapene til biokull utvunnet ved forskjellige pyrolysetemperaturer. Fra tabellen er karbonutbytte (Biochar yield), karboninnhold (C_{db}), nitrogeninnholdet (N_{db}) og brennverdien (HHV) benyttet som resultat i oppgaven.

Table 2. Elemental compositions, HHVs, and yields of the biochar samples produced under different conditions (BC- x - y), where x and y denote the pyrolysis temperature ($^{\circ}$ C) and CO_2 content (%), respectively)

Sample	Biochar yield (%)	C_{db} %	H_{db} %	N_{db} %	S_{db} %	HHV (kJ/kg)
BC-300-0	77.35±0.42	15.14	1.69	2.06	0.34	5,820.32
BC-400-0	70.15±0.68	11.47	1.03	1.54	0.36	4,000.87
BC-500-0	68.13±0.45	10.35	0.71	1.27	0.35	3,825.43
BC-600-0	66.13±0.34	9.99	0.46	1.10	0.36	3,260.46
BC-700-0	64.59±0.40	9.33	0.26	0.82	0.37	3,152.72
BC-300-10	78.12±0.21	15.32	1.74	2.12	0.38	5,029.91
BC-400-10	71.05±0.65	11.96	1.15	1.63	0.36	4,502.85
BC-500-10	69.2±0.40	10.91	0.76	1.33	0.33	3,525.47
BC-600-10	66.91±0.09	10.29	0.44	1.12	0.33	3,371.07
BC-700-10	64.96±0.27	8.16	0.20	0.72	0.34	2,019.82
BC-300-100	78.45±0.16	15.65	1.74	2.21	0.39	6,395.69
BC-400-100	70.99±0.70	12.41	1.19	1.66	0.36	3,892.80
BC-500-100	69.35±0.58	11.08	0.71	1.33	0.30	3,824.00
BC-600-100	67.48±0.44	9.98	0.42	1.10	0.27	2,469.48
BC-700-100	62.57±0.29	5.97	0.17	0.66	0.25	1,064.19

Figur 14: Tabell 2 i Guo et al. sin studie [69, p. 57].

Tabell 11 viser en oversikt over resultater fra Guo et al. sin studie i tekstform. Jeg benytter og forklarer resultatene nærmere i diskusjonskapittelet.

Tabell 11: Resultater i tekstform fra Guo et al. sin studie.

Resultater	Kildehenvisning
A high HHV is related to a lower ash content and higher carbon content	[69, p. 59]
In addition, the change in carbon content, which affects the biochar HHV, was most pronounced in the same temperature range, and the CO_2 content was also found to affect the HHV, i.e., an increase in the HHV upon increasing the CO_2 content between 300 and 500 oC. Moreover, the biochar produced below 600oC in CO_2 presented a higher HHV than that produced in N_2 at the same temperature, which was ascribed to the different effects of these gases on sludge cracking and volatilization [32]. These results are consistent with those reported by Zhu et al., who believe that CO_2 will inhibit the decomposition of carbon-containing structures at 600 oC and will retain a higher carbon content than in a N_2 atmosphere [17]. However, the reverse was observed at 700 oC, possibly because at this temperature CO_2 reacts with carbon to reduce the carbon content of the biochar and thereby decrease its calorific value [31].	[69, p. 59]

7.2.3 Tian et al. sin studie

Figur 15 viser tabell 1 fra Tian et al. sin studie med oversikt over biokullet produsert ved ulike pyrolysetemperaturer og dets egenskaper. Fra tabellen er kullutbytte (Yield), karboninnholdet (C), nitrogeninnholdet (N) og askeinnholdet (ash) benyttet som resultat i masteroppgaven.

Samples	Yield (%)	pH	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	C	H	O	N	Ash
				%				
Feedstock	0.00	7.29b	421.30e	17.61b	2.74e	9.05d	2.42c	68.18a
B200	92.19c	6.54a	347.00d	17.09b	2.09d	10.01e	2.19c	68.62a
B300	81.66b	7.20b	114.77c	19.72c	1.79c	5.76c	2.59cd	70.14b
B500	67.80a	8.70c	73.77a	15.26b	0.73b	3.28b	1.73b	79.00a
B700	65.12a	11.15d	96.20b	11.33a	0.31a	1.90a	0.71a	85.75c

Each column with the same lowercase letter is not significantly different at the 5% level among the feeds

Figur 15: Tabell 1 fra Tian et al. sin studie [71, p. 3].

Tabell 12 viser en oversikt over resultater i tekstform fra Tian et al. sin studie som benyttes i denne masteroppgaven. Jeg benytter og forklarer resultatene nærmere i diskusjonskapittelet.

Tabell 12: Resultater i tekstform fra Tian et al. sin studie.

Resultater	Kildehenvisning
Considering the more volatile loss and bioavailability reduction of mineral nutrients at high pyrolysis temperatures, it may be thus recommended that municipal sewage sludge be converted into biochar at low temperature, e.g., 200 °C, and then used as a nutrient supplement for urban soil.	[71, p. 8]
The biochar produced at lower temperature (e.g., B200) had much better improvement in turf grass for its higher available minerals, such as N, P, and K. The better growth of turf grass in the biochar-added urban soil might be largely attributed to the improvement in mineral nutrition. Similar results were reported by other researchers when they used high ash biochars rather than those with low ash [9].	[71, p. 9]
The ash in biochar can result in significant liming effect and reduction of soil acidity and toxicities of Mn^{2+} , Al^{3+} , and some other heavy metals.	[71, p. 2]
The urban soils amended with the biochars had much higher values of organic C, N, P, and K compared with the control.	[71, p. 10]
The biochar-amended soil had much higher total heavy metals than the control because of the input of biochar. However, the grass grown in biochar-amended soil accumulated less heavy metal than that in control, which might imply biochar amendment effectively reduced the bioavailability of heavy metals.	[71, p. 10]
Municipal sewage sludge often contains a significant amount of heavy metals, which restricts its agricultural utilization [40]. Slow pyrolysis could completely remove mercury through volatilization and greatly reduce the bioavailability of	[71, p. 9]

<p>other heavy metals, although their concentrations could significantly increase [10].</p>	
<p>The microbial decomposition of biochar may decrease oxidable heavy metals and valence alteration of some heavy metals, for example, Cu, Cr, Mn, and As. More work is obviously required to understand how biochar drives changes in the bioavailability of heavy metal fractions and the impacts on the environment.</p>	<p>[71, p. 9]</p>

7.2.4 Karimi et al. sin studie

Tabell 13 viser tabell 1 fra Karimi et al. sin studie som er en oversikt over egenskapene til avløpsslam og biokull produsert ved ulike pyrolysetemperaturer. Fra tabellen benyttes askeinnholdet (ash) som resultat i masteroppgaven.

Tabell 13: Tabell 1 fra Karimi et al. sin studie som viser biokullets egenskaper [72, p. 2827].

Characteristics									
Textural class	Clay Loam								
	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	CEC (Cmol(+) Kg ⁻¹)	pH	Organic matter (%)	EC (dS m ⁻¹)	Pb (mg kg ⁻¹)	Cd (mg kg ⁻¹)
Soil	33,20	36,00	30,80	29,30	8,20	0,82	0,23	7937,00	9,92
	pH	EC (dS m ⁻¹)	CEC (Cmol(+) kg ⁻¹)	Organic matter (%)	Ash (%)	Na (%)	K (%)	Ca (%)	
BC300	7,60	3,17	26,40	32,00	45,80	0,23	0,56	0,80	-
BC600	8,50	4,15	31,60	38,00	58,20	0,38	0,70	0,93	-

Tabell 14 viser en oversikt over resultater fra Karimi et al. sin studie i tekstform. Jeg benytter og forklarer resultatene nærmere i diskusjonspittelet.

Tabell 14: Resultater i tekstform fra Karimi et al. sin studie.

Resultater	Kildehenvisning
The results of the elemental analysis showed with increasing pyrolysis temperature, the biochar's levels of N, H and O decreased, while its amount of C increased significantly. Consequently, the biochar's proportion of hydrogen and oxygen over carbon also reduced gradually	[72, p. 2828]
As biochar is an organic carbonaceous material, the treatment of polluted land with biochar will inherently increase the organic carbon content of the soil. As such, the greater the biochar dosage rate, the greater would be the increase in organic carbon.	[72, p. 2830]

7.2.5 Kehrein et al. sin studie

Tabell 15 viser en oversikt over resultater fra Kehrein et al. sin studie. Jeg benytter og forklarer resultatene nærmere i diskusjonskapittelet.

Tabell 15: Resultater i tekstform fra Kehrein et al. sin studie.

Resultater	Kildehenvisning
Since P could be recovered from sludge incineration ash with efficiencies of about 90%, ³⁴ this recovery pathway would lead to a realistic supply potential of 11% of Flemish fertiliser demand or 6% of Flemish industrial P ore imports.	[75, p. 881]
Biochar is obtained from sludge pyrolysis, which is the process of thermally cracking organic matter via an external heat source and without the supply of air. As well as carbon sequestration, biochar's potential addition to soils is associated with a wide range of other possible secondary benefits, such as the liming of acidic soils, reducing plant aluminium availability, increasing cation-exchange capacities, reducing nutrient leaching, remediating sites contaminated by heavy metals and chemicals, increasing agrochemical sorption and reducing net GHG emissions from soil.	[75, p. 892]

7.2.6 Bien et al. sin studie

Tabell 16 viser en oversikt over resultater fra Bien et al. sin studie i tekstform. Jeg benytter og forklarer resultatene nærmere i diskusjonskapittelet.

Tabell 16: Resultater fra Bien et al. sin studie i tekstform.

Resultater	Kildehenvisning
Cieslik et al. stated that phosphorus recovery from ash could be 5-10 times higher in comparison to that achieved from sludge directly.	[74, p. 161]
In result sludge can contain many pollutants such as heavy metals, pathogenic organisms, toxic organic substances, but also considerable amounts of valuable ingredients such as nitrogen, phosphorus, macroelements.	[74, p. 160]
Recent study indicates pyrolysis can strongly immobilize heavy metals into the biochar matrix, then heavy metals can hardly be leaching out reducing the potential risk to soil and living organisms.	[74, p. 168]
In addition, heavy metals content in sludge ash also hampers its direct use as a phosphorus source.	[74, p. 168]
Yuan et al found as the pyrolysis temperature was increasing, the nitrogen content of the resulting sewage sludge biochar decreased, phosphorus content increased. The positive information is that there is a quite big difference between the sewage sludge biochar and the biochar derived from other biomass. Biochar from sewage sludge is rich in nutrients, and the nutrients may be released easily in soil incubation and leaching experiment.	[74, p. 161]

7.2.7 Wu et al. sin studie

Tabell 17 viser en oversikt over resultater fra Wu et al. sin studie. Jeg benytter og forklarer resultatene nærmere i diskusjonskapittelet.

Tabell 17: Resultatet i tekstform fra Wu et al. sin studie.

Resultater	Kildehenvisning
Carbon, hydrogen, nitrogen, and sulfur showed the same trends; with increasing pyrolysis temperature, the contents decreased steadily.	[70, p. 1871]

I neste kapittel skal resultatene diskuteres. Resultatene fra eget laboratorieforsøk og litteraturstudium skal settes opp mot hverandre, sammenlignes og brukes til å besvare forskerspørsmålet.

8 Diskusjon

I dette kapitlet diskuteres funnene fra samfunnsperspektivet, kunnskapsgrunnlaget, caset, mitt eget laboratorieforsøk og litteraturstudiet. I 8.1 diskuterer jeg resultater fra eget laboratorieeksperiment opp mot tidligere forskning. I 8.2 diskuteres hvilke egenskaper ved biokullet som er nødvendig for ulike bruksområder. Deretter diskuterer jeg hvordan biokull bidrar til en bærekraftig utvikling i 8.3. Til slutt diskuterer jeg i 8.4 svakhetene og begrensingene ved masteroppgaven.

8.1 Laboratorieforsøk versus forskning

Kullutbytte

Jeg pyrolyserte avløpsspellets ved tre forskjellige temperaturer. Resultatene fra egen studie viser at kullutbyttet øker ved lavere pyrolysetemperaturer, og reduseres ved høye temperaturer. I min studie ble avløpsslam pyrolysert ved 500 °C, 700 °C og 800 °C. Kullutbyttet var 39,4 wt%, 36,71 wt% og 35,88 wt%. Flere andre studier viser tilsvarende resultater. Moško et al. sin studie viser at kullutbyttet ble redusert ved økende temperaturer fra 400-800 °C. Kullutbyttet var 61,7 wt%, 52,9 wt%, 50,8 wt%, 48,6 wt% og 46,3 wt% [68, p. 4]. Et annet studie utført av Guo et al. viser også at kullutbyttet reduseres ved økende temperaturer. De pyrolyserte fra 300-700 °C. Resultatene i studien var mellom 77,35 +/- 0,42 wt% ved 300 °C og 62,57 +/- 0,29 wt% ved 700 °C [69, p. 57]. Dette viser at egne funn stemmer godt med andre studier som er utført. Det er en tydelig sammenheng mellom temperatur og kullutbytte. For å oppnå økt kullutbytte må det pyrolyseres ved lave temperaturer.

Vanninnhold avløpsspellets

Min prøvetaking av vanninnhold i avløpsspelletsene viser et resultat som varierer mellom 14,96-15,46 %. Hvis jeg ser på standardavviket er resultatet 15,16 +/- 0,18 %. Når jeg ser på vanninnholdet i avløpsspelletsene produsert av Lindum så varierer resultatene noe. De fikk et vanninnhold på 11,8 % [58]. Mine resultater viser et høyere innhold av fuktighet enn Lindums resultater. Variasjonen kan skyldes at avløpsspelletsene ble sendt i transport fra Østlandet til Sørlandet, og kan ha absorbert fuktighet fra omgivelsene. Anand et al. viser i sin studie at normalvariasjonen er mellom 5-20 % ved pyrolysing av biomasse [76, p. 4]. Resultatet mitt på 15,16 +/- 0,18 % er innenfor denne normalvariasjonen.

Vanninnhold biokull

Resultatet fra min studie viser at biokullet har et vanninnhold på ca. 0 %. Biokullet som er produsert ved 500 °C består av -0,29 +/- 0,71 % vann. Den negative verdien kan komme av at den første prøven veide mer etter tørking. Feilkilden kan være at diglen ikke ble satt i vakuundesikatoren for avkjøling før veiing. Derfor kan prøvemassen ha tatt opp noe fuktighet i mellomtiden. Ved 700 °C har biokullet et vanninnhold på 0,03 +/- 0,58 %. Ved økning til 800 °C blir resultatet et vanninnhold på 0,08 +/- 0,28 %. I Moško et al. sin studie har de tatt utgangspunkt i standarden CSN EN 15414-3 der det er oppgitt at vanninnhold i biokull anses til å være 0 % [68, p. 2]. Mine resultater stemmer godt overens med denne standarden. Biokullet i min studie inneholder heller ikke fuktighet.

Askeinnhold

I min studie viser prøvetaking av askeinnhold i biokullet et høyt innhold av aske. Kullet er produsert ved 500 °C, 700 °C og 800 °C og har et askeinnhold på henholdsvis 60,90 +/- 0,57 wt%, 64,03 +/- 1,58 wt% og 67,25 +/- 0,27 wt%. Resultatet fra min studie viser at askeinnholdet i biokullet øker jo høyere pyrolysetemperaturen er. Resultatet mitt stemmer godt med forskning på feltet. Moško et al. pyrolyserte avløpsslam ved temperaturer mellom 400-800 °C og finner et askeinnhold som strekker seg fra 67,9 +/- 0,747 wt% ved 400 °C til 80,8 +/- 0,925 wt% ved 800 °C [68, p. 3]. Studien til Moško et al. viser at askeinnholdet øker ved høyere temperaturer. Det viser også studien til Tian et al. der avløpsslam ble pyrolysert fra 200 °C til 700 °C og askeinnholdet er 68,18 wt% ved 200 °C og 85,75 wt% ved 700°C [71, p. 3]. Studien til Karimi et al. viser at innholdet av aske i biokull økes ved høyere temperaturer. Karimi et al. pyrolyserte avløpsslam ved to forskjellige temperaturer, 300 °C og 600 °C. Biokullet produsert ved 300 °C har et askeinnhold på 45,8 wt%, mens biokullet produsert ved 600 °C har et askeinnhold på 58,2 wt% [72, p. 2827]. Sammenlignet med annen forskning stemmer mitt resultat overens med deres resultater. Det er en sammenheng mellom pyrolysetemperatur og askeinnhold. Høyere pyrolysetemperatur gir et høyere askeinnhold i biokullet.

Innhold av flyktige gasser

Studiet mitt viser variasjon i innholdet av flyktige gasser i biokullet. Biokullet produsert ved 500 °C inneholder 13,84 +/- 0,002 % flyktige gasser, biokullet produsert ved 700 °C består av 6,41 +/- 0,08 % flyktige gasser og kullet produsert ved 800 °C har et innhold på 2,90 +/- 0,025 % flyktige gasser. Resultatet mitt forteller at innholdet av flyktige gasser i biokull økes ved lave temperaturer og reduseres ved høye temperaturer. Mitt resultat stemmer godt overens med annen forskning på feltet. I Moško et al sin studie er innholdet av flyktige gasser i biokull produsert ved 500 °C 15,9 +/- 0,311 wt%, og 0,922 +/- 0,018 wt% for biokullet produsert ved 800 °C [68, p. 3]. Det er også her konkludert med at innhold av flyktige gasser i biokull reduseres jo høyere pyrolysetemperaturen er. I Tian et al. sin studie ble det også funnet at høyere pyrolysetemperaturer fører til redusert innhold av flyktige gasser i biokullet [71, p. 8]. Funn fra begge disse studiene stemmer godt overens med mitt eget resultat. For å oppnå redusert innhold av flyktige gasser i biokull må det benyttes pyrolysetemperaturer over 700 °C.

Brennverdi

I studiet mitt ble det utført prøvetaking av brennverdien til biokullet. Resultatet mitt viser liten variasjon i brennverdien til de ulike kullene. Ved 500 °C har biokullet en brennverdi på 10 971 +/- 254,85 J/g, mens kullet pyrolysert ved 700 °C har en brennverdi på 10 637,67 +/- 370,65 J/g og biokullet produsert ved 800 °C har en brennverdi på 10 437,00 +/- 338,99 J/g. Mitt resultat tyder på at biokull produsert ved lavere temperaturer har høyere brennverdi, og brenner dermed bedre. Dette viser også resultater fra Guo et al. sin studie. Guo et al. produserte biokull ved 300 °C som har en brennverdi på 6395,69 J/g, mens biokullet produsert ved 700 °C har en brennverdi på 1064,19 J/g [69, p. 57]. I Moško et al. sin studie har biokullet en brennverdi på 9 490 +/- 39 J/g ved 400 °C og 8 100 +/- 32 J/g ved 800 °C [68, p. 3]. Resultatet mitt stemmer godt overens med resultatet fra Moško et al. og Guo et al. sine studier. Det er en sammenheng mellom pyrolysetemperatur og brennverdi. For å produsere biokull med høyere brennverdi må lavere pyrolysetemperaturer brukes.

Fiksert karbon

Innholdet av fiksert karbon gir indikator på karboninnholdet i kullet, men det er ikke en sikker kilde da det kan bestå av andre stoffer som ikke forsvant med resten av de flyktige gassene [65]. Mine beregninger viser at biokullet produsert ved 500 °C har et fiksert karbon innhold på 25,26 wt%. Biokullet produsert ved 700°C og 800°C har nesten likt innhold av fiksert karbon som er henholdsvis

29,55 wt% og 29,85 wt%. Resultater fra egen studie viser at innholdet av fiksert karbon i biokull øker ved høyere temperaturer. Dette stemmer overens med resultater fra litteraturstudiet. I Moske et al. sin studie ble funnet et fiksert karbon innhold 11,4 +/- 0,858 wt% i biokullet ved 500°C og 18,3 +/- 0,925 wt% ved 800°C. Ut ifra dette kan det tyde på at det er et større karboninnhold i biokull utvunnet ved høyere pyrolysetemperaturer. Det må tas forbehold om at det er stor sannsynlighet for at innholdet av fiksert karbon i biokullet består av andre stoffer enn bare karbon.

Elementanalyse CHN

Grunnet omstendigheter ved laboratoriet utenfor min kontroll ble det ikke mulig å gjennomføre en CHN Elementanalyse på biokullet. Men jeg ønsker likevel å trekke frem funn fra litteraturstudien angående hvordan pyrolysetemperatur påvirker nitrogen- og karboninnholdet i biokull utvunnet ved forskjellige temperaturer.

Resultatene fra litteraturstudiet mitt viser at karboninnholdet i biokull er høyest i biokull utvunnet ved lave temperaturer. I Moško et al. sin studie ble det funnet at biokull pyrolysert ved 500°C inneholdt 23,1 +/- 0,185 wt% karbon, biokullet utvunnet ved 700°C hadde 19,3 +/- 0,154 wt% karbon, mens kullet pyrolysert med en pyrolysetemperatur på 800 °C inneholdt 17,2 +/- 0,137 wt% [68, p. 3]. I Guo et al. sin var karboninnholdet i biokullet 15,65 wt% ved 500°C og 5,97 wt% ved 700°C [69, p. 57]. Tian et al. sin studie fant også at karboninnholdet i biokullet øker ved lavere pyrolysetemperaturer. Der ble det funnet et karboninnhold på 15,26 wt% i biokullet produsert ved 500 °C og 11,33 wt% i biokullet utvunnet ved 700°C [71, p. 3]. Dette viser at det er sammenheng mellom høyt karboninnhold i biokull henger sammen med lavere pyrolysetemperaturer.

Forskningsartikler funnet i litteraturstudiet mitt viser at nitrogeninnholdet i biokull øker ved lavere temperaturer. I Moško et al. sin studie ble det funnet at biokullet produsert ved 500°C har et nitrogeninnhold på 3,04 +/- 0,077 wt%, biokullet utvunnet ved 700°C inneholdt 1,55 +/- 0,39 wt% og kullet produsert ved 800°C har et nitrogeninnhold på 0,939 +/- 0,024 wt% [68, p. 3]. Guo et al. sin fant at biokullet utvunnet ved 500°C har et nitrogeninnhold på 1,33 wt%, og kullet produsert ved 700 °C har et nitrogeninnhold på 0,66 wt% [69, p. 57]. I Tian et al. sin studie ble det funnet et nitrogeninnhold på 1,73 wt% i biokullet produsert ved 500°C og 0,71 wt% i biokullet utvunnet ved 700°C [71, p. 3]. Disse studiene viser at det er en sammenheng mellom lave pyrolysetemperaturer og høyt nitrogeninnhold i biokullet.

Sammenligning

Biokullet produsert ved 500 °C er har størst kullutbytte, og et høyere innhold av flyktige gasser og høyest brennverdi. Men askeinnholdet og innholdet av fiksert karbon er noe lavere enn ved de andre kulltypene. Biokullet utvunnet ved 700 °C har mindre kullutbytte enn biokullet produsert ved 500 °C, men en redusert brennverdi og innhold av flyktige gasser. Dette biokullet har større askeinnhold og innhold av fiksert karbon. Biokullet produsert ved høyest temperatur, 800 °C, i denne studien har minst kullutbytte. Kullet har også lavest innhold av flyktige gasser og lavest brennverdi. Men sammenlignet med de to andre biokullene har dette kullet størst askeinnhold og innhold av fiksert karbon. Resultater fra litteraturstudiet viser at biokull produsert ved 500 °C inneholder mer karbon og nitrogen enn biokull utvunnet ved 700°C og 800°C. Disse resultatene stemmer overens med Guo et al. sin studie som viser at en høy brennverdi henger sammen et lavt askeinnhold og høyere karboninnhold [69, p. 59].

8.2 Bruksområder

I dette avsnittet diskuterer jeg hvilke bruksområder biokullet kan benyttes til ut ifra egen forskning og eksisterende forskning på feltet. Jeg har i kapittel 4 avgrenset vurdering av bruksområder oppdragsgiver Horten kommune har pekt på i prosjektplanen sin. Disse bruksområdene er jordforbedringsmiddel eller gjødsel i jordbruket, absorbent i grøft og grøntområder og tilsetning i betong og asfalt.

Tradisjonelt benyttes biokull i jordbruket [47]. Det er mange faktorer det er viktig å vurdere når biokullet skal benyttes i jordbruket. Biokull utvunnet ved ulike pyrolysetemperaturer har forskjellige egenskaper som kan påvirke nytteverdien til biokullet. I teksten nedenfor diskuteres de ulike egenskapene og hvordan de påvirker bruksområdene.

Askeinnhold

Økt askeinnhold i biokullet har en positiv kalkningseffekt [46]. Dette fordi askeinnholdet i biokullet gjør kullet basisk med en pH-verdi mellom 9-10 og har dermed en syrenøytraliserende effekt [49]. Studien til Tian et al. viser at biokull med høyt askeinnhold har en positiv effekt på jorden og veksten. Dette fordi plantene fikk mer næring fra biokullet med høyere askeverdier [41, p. 9]. I følge Moško et al. sin studie beholder biokull med høyt askeinnhold mer næringsstoffer fra avløpsslammet og fosfor innholdet øker [68, p. 4]. Moško et al. fant også at høyt askeinnhold førte til et betydelig redusert karboninnhold [68, p. 5]. I studien Tian et al. kom det frem at askeinnholdet i biokull fører til redusert innhold av tungmetaller i jorden, og jordsurhet [71, p. 2]. Askeinnholdet påvirker også biokullets evne til å gjenvinne fosfor. Resultater fra Kehrein et al. sin studie viser at asken i biokullet kan gjenvinne 90 % av fosforen fra avløpsslammet [75, p. 881]. Dette fant også Bien et al. i sin studie der det ble funnet at det var 5-10 ganger mer effektiv å gjenvinne fosfor fra asken i biokullet enn å gjenvinne det gjennom avløpsslammet.

Karboninnhold

Biokull kan også være med på å øke karboninnholdet i jorden. Dette er positivt på flere måter. Ved pyrolysing vil ca. 50 % av karbonet fra biomassen binde seg stabilt i biokullet, samt at det energien som utvinnes erstatter fossile brensler som fører til mer utslipp av karbon (CO₂) enn det som naturlig [48]. Biokull er så motstandsdyktig mot biologisk nedbrytning at det i praksis kan ligge i jorden i flere hundre år [46]. Det ble funnet i studien til Karimi et al. at biokull i forurenset jord øker det organiske karboninnholdet i jorden [72, p. 2830]. Tian et al. fant i sin studie at tilførsel av biokull i jorden fører til økt innhold av viktige næringsstoffer som karbon i jorden [71, p. 10]. I studien til Moško et al. skrives det at karboninnholdet i biokullet er hovedkilden til energien i kullet. Moško et al. fant ikke en tydelig sammenheng mellom brennverdien og karboninnholdet i kullet [68, p. 5]. Studien til Guo et al. fant at brennverdien til biokullet påvirkes av karboninnholdet. Dvs. at økt konsentrasjon av karbon i biokullet gir høyere brennverdi [69, p. 59]. Moško et al. fant i sin studie at porøsiteten til avløpsslam biokull er betydelig lavere enn biokull utvunnet fra tre. Dette kommer av at det i biokull utvunnet fra avløpsslam er et lavere karboninnhold og et høyere askeinnhold [68, p. 6]. Karimi et al. sin studie viste at ved økende pyrolysetemperatur ble innholdet av Nitrogen og Hydrogen i kullet redusert, mens karboninnholdet økte betydelig [72, p. 2828].

Nitrogeninnhold

I studien til Bien et al. fant de at avløpsslam inneholder mye nitrogen [74, p. 160]. I dag klarer ikke avløpsanleggene å rense ut nok nitrogen fra avløpsvannet. Nitrogenet renner ut til resipientene, som fører til overgjødning og gjengroing av elver, innsjø og sjøer. Jordbruket er helt avhengig av nitrogen, men nitrogen er en lagerressurs vi ikke har nok av på jordkloden [55]. Som nevnt tidligere i denne masteroppgaven vil det komme nye krav til rensing og gjenvinning av nitrogen for å føre dette tilbake

til jordbruket. Biokull kan være med på å føre nitrogenet tilbake til jorden. Det kom frem i studien til Bien et al. at sammenlignet med biokull utvunnet fra andre biomasser inneholder biokull utvunnet fra avløpsslam betydelig større mengde næringsstoffer som nitrogen. Bien et al fant også at nitrogenet i biokullet lett frigjøres til jorden og plantene [74, p. 161]. Både i Wu et al. sin studie og Karimi et al. sin studie ble det funnet av økende pyrolysetemperaturer minsket innholdet av nitrogen og hydrogen betydelig [70, p. 1871] [72, p. 2828]. Tian et al. fant at bruk av biokull i jordbruk førte til jord med høyere verdi av nitrogen enn vanlig jord [71, p. 10]. Ifølge studien til Moško et al. vil totalinnholdet av nitrogen og hydrogen i biokullet avhenge av dets innhold av flyktige gasser. Dette fordi nitrogen og hydrogen er en del av den organiske konstruksjonen i avløpsslammet [68, p. 4]. Moško et al. fant også at biokull utvunnet fra avløpsslam hadde et økt innhold av nitrogen jord og planter ikke klarer å ta opp [68, p. 6].

Tungmetaller

Avløpsslam inneholder store konsentrasjoner av tungmetaller. Hvis biokull utvunnet fra avløpsslam skal benyttes i jordbruket er det nødvendig at tungmetallinnholdet reduseres eller bindes i kullet slik at det ikke kan opptas fra omgivelsene. Bien et al. fant at tungmetallinnhold i biokull er hemmende for plantenes og jordens opptak av fosforet fra kullet [74, p. 168]. Moško et al. viser i sin studie at innholdet av tungmetaller fra avløpsslammet reduseres ved pyrolysering [68, p. 2]. Studien til Moško et al. fant også ved pyrolysering over 600 ° C vil svovelet i kullet binde tungmetallet. Det bundne tungmetallet i biokullet vil ikke kunne frigjøres til omgivelsene [68, p. 6]. Keihrein et al. fant i sin studie at pyrolysering av avløpsslam fører til redusert innhold av tungmetaller i kullet [75, p. 892]. I Tian et al. sin studie ble det funnet at pyrolysering av avløpsslam fjerner kvikksølv fullstendig og binder store deler av tungmetallinnholdet slik at omgivelsene ikke kan oppta det [71, p. 9]. Bien et al. har funnet at biokull inneholder bundet tungmetall som ikke kan tas opp av omgivelsene [74, p. 168]. Tian et al. mener det er nødvendig med mer forskning på det bundne tungmetallinnholdet i biokull, og hvordan det påvirker omgivelsene [71, p. 9].

For at biokull skal kunne benyttes i jordbruket må kullet innfri kravene satt i gjødselvereforskriften. Den viktigste faktoren for at biokull kan benyttes i jordbruket er tungmetallinnholdet [77]. Det er i denne masteroppgaven ikke blitt undersøkt hvor mye tungmetaller biokullet inneholder. Men forskningen utført på pyrolysering av avløpsslam viser at biokull utvunnet fra avløpsslam har mindre tungmetaller enn avløpsslammet før pyrolysering. Og store deler av tungmetallinnholdet i kullet er bundet som betyr at omgivelsene ikke tar opp tungmetallet. Gjødselvereforskriften skiller ikke mellom bundet tungmetall og ubundet tungmetall. Som Tian et al. kom frem til i sin studie anser jeg det også nødvendig å forske mer på det bundne tungmetallet i biokull, og hvor stor påvirkning det har på omgivelsene [71, p. 9].

I gjødselvereforskriften står det også at innholdet av plast, glass eller metallbiter med en partikkelstørrelse på over 4 mm ikke skal være enn 0,5 wt% av det totale tørrstoffet [77]. Ved pyrolysering av avløpsslam vil all plastinnholdet, inkludert mikroplasten, smelte bort.

Sammenligning

Som nevnt tidligere har biokull med høyt askeinnhold positive effekter for jord og planter. I min egen studie fant jeg at biokull utvunnet ved 500 °C har både størst kullutbytte og et høyt askeinnhold. Dette biokullet har høyest brennverdi som fører til et økt karboninnhold i kullet. Resultatet fra litteraturstudiet viste at biokullet utvunnet ved 500°C har større mengde nitrogen og karbon enn biokull utvunnet ved høyere temperaturer. Tidligere forskningen viser tydelige fordeler ved et høyt karbon- og nitrogeninnhold i kullet. Når det kommer til tungmetallinnholdet i biokull viser tidligere forskning at tungmetallet reduseres og bindes i biokullet ved 600 °C eller høyere. Dermed kan biokull utvunnet ved 600 °C eller høyere egne seg bedre som jordforbedringsmiddel.

Alternative bruksområder

Om biokullet som produseres fra avløpsslam ikke kan benyttes i jordbruket finnes det alternative bruksområder til biokullet. Det kan benyttes som absorbent i grøfter eller grøntområder. Som nevnt i kunnskapsbakgrunnen ble biokull i Stockholm benyttet i grøntområder for å bedre oksygen- og vannopptaket til plantene. Det ble samtidig funnet at biokullet absorberte overvann, og reduserte mengden overvann i gatene. Det ble i tillegg oppdaget at overvannet hadde et redusert innhold av tungmetaller og andre miljøgifter [50]. Biokull kan også benyttes som tilsetning asfalt. Forskning fant at biokull i asfalt fører til en vei med større motstandsdyktighet mot spordannelser og økt temperaturløselighet som reduserer risikoen for sprekke-dannelser og deformasjoner [51]. I tillegg til dette vil biokull benyttet i asfalt føre til reduksjon i CO₂-utslipp. Det finnes flere bruksområder for biokull. For eksempel kan biokull også benyttes i metallurgisk prosessindustri [52] eller som et filtreringsmedium for å fjerne uønskede stoffer fra vannmasser [26]. Når disse bruksområdene er blitt forsket på er det ikke benyttet biokull utvunnet fra avløpsslam. Biokull utvunnet fra avløpsslam er lite forsket på i Norge ². Det gjør at mine laboratorieforsøk er ekstra spennende.

² Det er et pågående pilotprosjekt i Sverige som forsker på pyrolyse i slambehandling. Resultatene er ikke klare enda. Foreløpige resultater viser at pyrolysen fjerner uønskede stoffer fra avløpslammet [42].

8.3 Bærekraftig utvikling

Det finnes mange bruksområder biokull kan benyttes til som diskutert i avsnitt 8.2. I denne masteroppgaven undersøker jeg om biokull utvunnet fra avløpsslam er en bærekraftig behandling av slam. Bærekraft er et komplekst begrep. Jeg har derfor valgt å ta utgangspunkt i to dimensjoner ved bærekraftig utvikling, sosiale forhold og klima og miljø. Bærekraftsmålene nevnt i dette avsnittet går under disse dimensjonene.

Rent drikkevann er den viktigste forutsetningen for god helse [3]. Det er over 2 milliarder mennesker verden over som ikke har tilgang på rent drikkevann. Dårlig eller ingen håndtering av avløpsvannet fører til at avløpsvann som inneholder miljøgifter havner i drikkevannskilder. Dette fører til forurenset drikkevann [22]. I Norge klarer vi å forsyne hele befolkningen med rent drikkevann, og gode sanitærforhold [2]. Utfordringen nasjonalt er mangelfull håndtering av avløpsnett [2] og økte nedbørsmengder som fører til forurensete innsjøer, elver og sjø [20, p. 13]. Det er derfor helt nødvendig at samfunnet benytter seg av nye innovasjoner for å kunne nå bærekraftsmålene. Biokull utvunnet fra avløpsslam er en ressurs som kan bidra til oppnåelse for nesten alle bærekraftsmålene.

For **bærekraftsmål nr. 1**: Utrydde alle former for fattigdom i hele verden [6] kan biokull benyttes som et jordforbedremiddel i næringsfattig og sur jord. En rekke forskningsartikler fra mitt litteraturstudium støtter opp under dette. Tian et al. viste i sin studie at biokull i jord reduserer jordsurhet [71, p. 2]. Det kom også frem i studien til Tian et al. at tilførsel av biokull i jorden fører til en næringsrikere jord [71, p. 10]. Både Bien et al. [74, p. 161] og Kehrein et al. [75, p. 881] sine studier viser at asken i biokull hjelper jorden og plantene med å ta opp fosfor og nitrogen. Biokull som jordforbedringsmiddel kan derfor hjelpe bønder økonomisk ved at de ikke trenger å kjøpe mineralgjødsel, og at inntekten øker grunnet økte avlinger [26]. Dette gjelder også **bærekraftsmål 2**: Utrydde sult, oppnå matsikkerhet og bedre ernæring, og fremme bærekraftig landbruk [7] hvor biokull som jordforbedringsmiddel bedrer jordhelsen- og fruktbarheten. Dette fører til økt avlinger og økt kvalitet på avlingene [26].

For **bærekraftsmål nr. 3**: Sikre god helse og fremme livskvalitet for alle [8] kan biokull i jord også hjelpe ved at kvaliteten på avlingene økes. Biokull binder tungmetaller og andre miljøgifter som forhindrer plantenes opptak av uønskede stoffer. I studien til Moško et al. ble det funnet at biokull utvunnet fra avløpsslam har et redusert innhold av tungmetaller, og at dette er bundet [68, p. 2]. Dette fant også Tian et al. og Kehrein et al. i sine studier. En av de viktigste forutsetningene for god helse er rent drikkevann. Biokull kan bidra til å rense forurenset vann ved at det benyttes som et filtreringsmedium som kan redusere smittefaren for vannbårne sykdommer [26].

Benyttelse av biokull kan bidra til oppnåelse av **bærekraftsmål nr. 6**: Sikre bærekraftig vannforvaltning, tilgang til vann og gode sanitærforhold for alle [23], og delmål 6.3 og 6.a. Ved å pyrolysere avløpsslam løses dagens slamproblematikk parallelt med at biokull utvinnes. Biokull kan benyttes som en absorbent i grøfter og grøntområder. Forskerne fra Stockholm fant at dette ikke bare bedret oksygen- og vannopptaket til plantene og omgivelsene rundt, men ga andre uforutsette utfall. Det førte til mindre overflatevann i gatene og reduserte mengden miljøgifter og tungmetaller i

overvannet [50]. Tian et al. sin studie fant at jord tilført biokull inneholdt mer tungmetaller enn jord uten biokull. Men plantene og omgivelsene inneholdt mindre tungmetaller enn de plantene som vokste i jord uten biokull [71, p. 10]. Dette viser at biokull også kan benyttes som et filter for å fjerne miljøgifter fra overflatevannet samtidig som det øker jordens vannutnyttelse [78].

For å oppnå **Bærekraftsmål 8**: Fremme varig, inkluderende og bærekraftig økonomisk vekst, full sysselsetting og anstendig arbeid for alle [11] kan biokull utvunnet fra avløpslam bidra. Avløpslam er en ressurs som i dag ikke blir utnyttet tilstrekkelig, og som verden ikke vil bli tomme for. Pyrolysing av avløpslam utvinner biogass, biokull og bioolje. Dette er verdifulle ressurser som er med på å videreføre den sirkulære bioøkonomien ved å skape nye arbeidsplasser, verdikjeder og verdiskapning [78].

Biokull kan benyttes i alt fra betong og asfalt til absorbent og filtreringsmedium i urbane bymiljøer og det kan erstatte det fossile karbonet i prosessindustrien [26]. Biokulls mange bruksområder kan bidra til oppnåelse av **Bærekraftsmål 9**: Bygge solid infrastruktur og fremme inkluderende og bærekraftig industrialisering og innovasjon [12]. Bærekraftsmål 9 henger sammen med **bærekraftsmål 11**: Gjøre byer og lokalsamfunn inkluderende, trygge, robuste og bærekraftige [13] ved at biokull har bruksområder som bidrar til attraktive og klimarobuste bymiljøer [78]. Benyttelse av biokull i grøfter og grøntområder fører til mindre overvann i gatene, økt plantevekst og renere vann.

Biokull kan benyttes som en erstatning for fossilt karbon i prosessindustrien. Biokullet bidrar til renere energi og redusert utslipp av miljøfiendtlige stoffer. Dette resulterer i at bruk av biokull også kan bidra til å nå FN's **bærekraftsmål 7**: Sikre tilgang til pålitelig, bærekraftig og moderne energi til en overkommelig pris [10]. Pyrolysing av avløpslam kan også bidra til oppnåelse av bærekraftsmål 7 ved at det produseres bioolje og biogass som kan utvinnes til varmeenergi eller elektrisitet [78].

For oppnåelse av **bærekraftsmål 12**: Sikre bærekraftig forbrukt- og produksjonsmønstre med delmål 12.4 [14] kan biokull bidra som en ressurs. Store deler av miljøgiftene som renses ut av avløpsvannet havner i avløpslammet. Ved å pyrolysere avløpslammet renses miljøgiftene bort og det produseres biokull. På denne måten løses dagens slamproblematikk samtidig som det produseres et produkt med mange bruksområder. Å benytte biokull i jorden som jordforbedremiddel, filtermedium eller absorbent eller som tilsetning i asfalt eller betong vil både bedre produktkvaliteten og føre til karbonlagring. Biokull er så motstandsdyktig at det kan ligge i jorden opp til flere hundre år og lagre og binde karbonet [46]. Dette betyr at ved pyrolysing av avløpslam vil karbonet bindes og lagres i biokullet som produseres i stedet for at det blir frigjort når plantene brytes ned [26]. Biokull kan derfor benyttes til oppnåelse av **bærekraftsmål 13**: Handle umiddelbart for å bekjempe klimaendringene og konsekvensene av dem [15].

Flere steder i Oslofjorden ser man tegn til gjengroing og overgjødsling fordi det er for mye av næringsstoffene nitrogen og fosfor i fjorden. Dette kommer av at kommunalt avløpsvann ikke er tilstrekkelig renses for nitrogen og fosfor, samt at det er stor avrenning fra landbruket [55]. Biokull i jordbruket kan forhindre forurensing av Oslofjorden ved absorpsjon av jordbruksvann og nitrogenbinding i kullet [78]. Dette stemmer overens med resultatet fra Moško et al. fant i sin studie at biokull har økt innhold av bundet nitrogen [68, p. 6]. Det forhindrer omgivelsene å absorbere nitrogenet, og er med på å forhindre at havet blir forurenset av nitrogenet. Dette gjør at biokull kan

benyttes som en ressurs for å nå **bærekraftsmål 14**: Bevare og bruke havet og de marine ressursene på en måte som fremmer bærekraftig utvikling [16].

For å nå bærekraftsmål 15: Beskytte, gjenopprette og fremme bærekraftig bruk av økosystemer, sikre bærekraftig skogforvaltning, bekjempe ørkenspredning, stanse og reversere landforringelse samt stanse tap av arts mangfold [17] kan bruk av biokull hjelpe. Biokull kan bidra til et sunnere jordbruk ved å bedre næringsinnholdet i jorden, og rense forurenset jord [78]. Studien til Tian et al. fant at biokull i jorden reduserer innholdet av miljøgifter og tungmetaller og bedrer jordsurheten [71, p. 2]. Karimi et al. fant at biokull i forurenset jord er med på å rense jorden og øke innholdet av viktige næringsstoffer til jorden [72, p. 2830]. Biokull kan absorbere og lagre vann slik at i perioder med tørke over lenger tid kan kullet forsyne planter og avlinger med vann [50].

Som diskusjonen over viser er biokull en ressurs med en rekke gode egenskaper og flere bruksområder. Det er en viktig ressurs som kan bidra til en mer klimavennlig hverdag. Sammen med andre innovasjoner og ressurser kan verden bli mer bærekraftig. For å oppnå bærekraftig utvikling er det nødvendig med internasjonalt samarbeid. Innad i Norge er det viktig med samarbeid mellom stat, kommunen, fylkeskommunen og næringsliv [78]. Dette tas opp i **bærekraftsmål 17**: Styrke virkemidlene som trengs for å gjennomføre arbeidet, og fornye globale partnerskap for bærekraftig utvikling [18].

8.4 Svakheter og begrensinger

I dette avsnittet vil jeg peke på noen svakheter og begrensinger ved min egen studie. Jeg utførte både et litteraturstudium og eget laboratorieforsøk for å kunne svare på forskerspørsmålet.

Laboratorieforsøk

Det ble i denne oppgaven utført egne laboratorieforsøk for å produsere biokull og finne egenskapene til kullet. Jeg har bare utført forsøk på biokull, og ikke utført forsøk på avløpsspellene. Jeg har da ikke fått undersøkt om avløpsslammet egner seg bedre eller dårligere som jordforbedremiddel enn biokullet utvunnet fra avløpsslammet. I tillegg til dette utførte jeg tre pyrolysinger ved forskjellige temperaturer, men samme oppholdstid. Det hadde vært interessant å se nærmere på forandringer i egenskaper for biokull med ulike oppholdstider, samt et større spenn i temperaturene. Da kunne man ha funnet hvilken temperatur og oppholdstid ved pyrolysing av avløpsslam som gir det beste biokullet til forskjellige bruksområder. Jeg benyttet en pyrolyseteknologi for å produsere biokull. Her hadde det vært spennende å se nærmere på hva slags egenskaper biokull utvunnet fra andre teknologier har.

Det var planlagt å foreta en CHN elementanalyse på biokullet for å finne riktig karbon- og nitrogeninnhold. Det ble ikke mulig å gjennomføre grunnet omstendigheter på laboratoriet utenfor min egen kontroll. Det hadde vært interessant å se nærmere på eksakt karbon- og nitrogeninnhold i biokullet for å finne ut av hvilket biokull som egner seg best til de ulike bruksområdene.

Litteraturstudium

Etter å ha gjennomført litteraturstudiet fant jeg at det er nødvendig med mer forskning på pyrolysing av avløpsslam og restproduktene som pyrolyseres. Dette kommer også frem i studien til Tian et al. Tian et al. mener at det er nødvendig med mer forskning på feltet for å forstå hvordan biokull binder tungmetall og andre miljøgifter, og hvordan det påvirker miljøet [71, p. 9]. Det som kan stoppe biokull utvunnet fra avløpsslam å bli benyttet i jordbruket er tungmetallnivået. Biokullet må tilfredsstille kravene fra gjødselvereforskriften og tar ikke hensyn til det bundne tungmetallet. Det finnes utallige bruksområder for biokull. Det burde forskes mer på hvilke bruksområder som egner seg for kull utvunnet fra avløpsslam. Det kunne tilført oppgaven et bredere perspektiv.

Bærekraft

En annen svakhet ved denne oppgaven kan være begrepet bærekraft. Bærekraft består av tre aspekter: Klima og miljø, Sosiale Forhold og Økonomi. I denne masteroppgaven har jeg primært sett på to av dimensjonene til bærekraft: Klima og miljø og sosiale forhold. Den siste dimensjonen økonomi har jeg valgt å se bort ifra da jeg ikke har en måte å anslå kostnad i et slikt prosjekt. Jeg har heller ikke sett på hvor mye energi pyrolysing av avløpsslam krever. Kostnader kan bli anslått ut ifra energibruk. Pyrolysing kan være kostbart grunnet stort energibruk, og det antas at det er høye driftskostnader. Med bærekraftige energiløsninger vil sannsynligvis kostnadene reduseres, men det er utenfor rammene til denne oppgaven å svare på. En slik undersøkelse ville tilført oppgaven et bredere perspektiv.

8 Konklusjon

I denne masteroppgaven har jeg undersøkt følgende forskerspørsmål:

Hvordan kan bruk av pyrolyse være en bærekraftig løsning for behandling av slam i Horten kommune?

1. *Hvilke bruksområder kan biokull utvunnet fra avløpslam ha?*
2. *Hvilke pyrolysetemperaturer gir biokullet flest egnede egenskaper for ulike bruksområder?*
3. *Hvordan er pyrolysing en klimavennlig metode for behandling av slam?*

Jeg har utført egne laboratorieforsøk og et litteraturstudium for å svare på forskerspørsmålet. Tidligere forskning er sammenlignet med resultatene fra laboratorieforsøkene.

Jeg har pyrolysert avløpsslam ved 500 °C, 700 °C og 800 °C, og produsert tre forskjellige biokull. Det ble utført ulike laboratorieforsøk for å finne biokullets egenskaper og egnede bruksområder. Resultatene fra laboratorieforsøkene viser biokullenes kullutbytte, vanninnhold, askeinnhold, innhold av flyktige gasser, brennverdi og innhold av fiksert karbon, se tabell 18.

Tabell 18: Resultater fra laboratorieforsøk.

	Kullutbytte [wt %]	Vanninnhold [%]	Askeinnhold [wt %]	Innhold av flyktige gasser [wt%]	Brennverdi [J/g]	Fiksert karbon [wt%]
S- 500- 40	39,4	-0,29 +/- 0,71	60,90 +/- 0,57	13,34 +/- 0,0025	10971 +/- 255	25,26
S- 700- 40	36,71	0,03 +/- 0,58	64,03 +/- 1,58	6,41 +/- 0,08	10638 +/- 371	29,56
S- 800- 40	35,88	0,08 +/- 0,28	67,25 +/- 0,27	2,90 +/- 0,025	10437 +/- 339	29,85

Som jeg redegjorde for i diskusjonskapittelet viser resultatene fra laboratorieforsøket at biokullet får ulike egenskaper avhengig av pyrolysetemperatur.

- Ved 500 °C har biokullet størst kullutbytte, et høyere innhold av flyktige gasser og høyest brennverdi. Askeinnholdet og innholdet av fiksert karbon er lavere enn ved biokullet utvunnet ved 700 °C og 800 °C.
- Ved 700 °C har biokullet mindre kullutbytte enn biokullet produsert ved 500 °C, og en redusert brennverdi og innhold av flyktige gasser. Biokullet har større askeinnhold og innhold av fiksert karbon.
- Ved 800 °C har biokullet minst kullutbytte, lavest innhold av flyktige gasser og brennverdi. Sammenlignet med biokullet utvunnet ved 500 °C og 700 °C har dette kullet størst askeinnhold og innhold av fiksert karbon.

Dette viser at ulike egenskaper ved biokullet avhenger av pyrolysetemperatur. Lav pyrolysetemperaturer gir økt kullutbytte, lavere askeinnhold, økt innhold av flyktige gasser, høy brennverdi og lavere innhold av fiksert karbon. Høy pyrolysetemperatur gir lavere kullutbytte, høyere askeinnhold, redusert innhold av flyktige gasser, lavere brennverdi og høyere innhold av fiksert karbon. Resultatet fra eget laboratorieforsøk stemmer godt overens med resultater fra litteraturstudien.

I avsnittene under vil jeg først svare på underspørsmålene og deretter svare på hovedspørsmålet.

1. Hvilke bruksområder kan biokull utvunnet fra avløpslam ha?

Det faste sluttproduktet etter pyrolysering er biokull og har mange gode egenskaper som gjør det ideelt for flere bruksområder. Biokull inneholder mange viktige næringsstoffer og det binner tungmetaller og andre miljøgifter. Det lagrer karbon og er motstandsdyktig slik at det kan ligge i jorden i flere hundre år. Disse egenskapene gjør at biokull passer godt til følgende bruksområder:

- Jordforbedringsmiddel og/eller gjødsel i jordbruket
- Absorbent i grøfter og grøntområder
- Tilsetning i asfalt
- Erstatte fossile brensler i metallurgisk prosessindustri

2. Hvilke pyrolysetemperaturer gir biokullet flest egnede egenskaper for ulike bruksområder?

Resultater fra laboratorieforsøket viser at biokull utvunnet ved 500°C har størst kullutbytte og et høyt askeinnhold. Dette biokullet har høyest brennverdi som ifølge resultater fra litteraturstudiet fører til økt innhold av lagret karbon i kullet. Resultater fra litteraturstudiet viser at biokull utvunnet ved 500 °C inneholder mer plantetilgjengelig nitrogen og karbon enn biokull utvunnet ved høyere pyrolysetemperaturer. Resultater fra litteraturstudiet viser at biokull produsert ved 600 °C eller høyere har lavere innhold av tungmetaller, og inneholdt tungmetall som ikke var tilgjengelig for omgivelsene. Det kan derfor antas at biokull utvunnet ved 600 °C eller høyere egner seg bedre til jordbruket enn biokull produsert ved lavere temperaturer. Resultater fra eget laboratorieforsøk og litteraturstudium viser imidlertid at biokull utvunnet ved 500 °C har flere viktige egenskaper, som høyere innhold av plantetilgjengelige næringsstoffer og innhold av lagret karbon, for jordbruket enn biokull utvunnet ved 700 °C og 800 °C. Dermed vil jeg konkludere med at biokullet produsert ved 500°C egner seg best til å bli benyttet i jorden. Enten i jordbruket som jordforbedringsmiddel eller gjødsel, eller som absorbent i grøfter og grøntområder.

3. Hvordan er pyrolysering en klimavennlig metode for behandling av slam?

Det er mange faktorer å ta hensyn til når det skal konkluderes om pyrolysering er en klimavennlig metode for slambehandling. Bærekraftig utvikling er et komplekst og vidt begrep. Derfor valgte jeg å fokusere på sosiale forhold og klima og miljø, to av de tre dimensjonene ved bærekraftig utvikling. Jeg satte bærekraftsmålene opp mot resultatene fra laboratorieforsøkene og litteraturstudiet. Mine funn tyder på at pyrolysering er med på løse slamproblematikken og fjerne miljøgifter i form av avgassing. Samtidig produseres det biokull

som kan føre viktige næringsstoffer tilbake til jorden og har et stort karbonlagringspotensial. Dette gjør at pyrolysing av avløpsslam og biokull bidrar til oppnåelse av flere bærekraftsmål. Gitt masteroppgavens rammer og avgrensinger, hvor energi- og kostnader ikke blir vurdert, konkluderer jeg med at pyrolysing er en klimavennlig metode for behandling av slam.

Hvordan kan bruk av pyrolyse være en bærekraftig løsning for behandling av slam i Horten kommune?

Resultater fra eget laboratorieforsøk viser at biokull utvunnet fra avløpsslam hentet fra Falkenstein Renseanlegg i Horten har ideelle egenskaper for flere bruksområder. Biokullet var spesielt egnet for bruk i jordbruket, eller som en absorbent i grøfter eller grøntområder. Resultater fra laboratorieforskene og litteraturstudiet viser at biokull utvunnet ved 500 °C egner seg best, og bidrar til oppnåelse av flere bærekraftsmål. Bærekraftsmålene dette gjelder passer godt under to av dimensjonene i bærekraftig utvikling, sosiale forhold og klima og miljø. På grunnlag av dette konkluderer jeg med at pyrolysing av avløpsslam er en bærekraftig løsning for behandling av slam i Horten kommune.

9 Anbefalinger

I arbeidet med denne masteroppgaven har jeg tilegnet meg mye kunnskap om temaet, pyrolysing av avløpslam. Det hadde vært interessant å undersøke funnene fra masteroppgaven nærmere og utvide forskerspørsmålet. Om flere ressurser hadde vært tilgjengelig kunne forskerspørsmålet blitt besvart ved å utføre flere omfattende laboratorieforsøk. Det hadde det vært interessant å utføre flere pyrolysinger ved ulike pyrolyseteknologier og utprøve biokull til ulike bruksområder. Videre hadde det vært interessant å se nærmere på de andre restproduktene etter pyrolysing, bioolje og biogass, og ta for seg den økonomiske dimensjonen i bærekraftig utvikling. I teksten nedenfor presenterer jeg hvilke områder jeg anbefaler oppdragsgiver å undersøke nærmere.

Bioolje og biogass

Ved pyrolysing av biomasse utvinnes biokull, bioolje og biogass. I denne masteroppgaven har jeg bare tatt for meg biokull. Det hadde vært interessant å undersøke hvilke bruksområder bioolje og biogass har, og hvordan de kan benyttes som ressurser i for eksempel pyrolyseprosessen.

Kostnadsanalyse

Pyrolyseteknologi krever mye energi og det kan antas at denne type teknologi er dyr i drift. Økonomi-dimensjon i bærekraftig utvikling ble det sett bort i fra denne oppgaven. Det hadde derfor viktig å utføre en energi- og kostnadsanalyse. Økonomi spiller en viktig rolle i bærekraftig utvikling, og i avgjørelsen om å ta i bruk pyrolyse i slambehandling.

Pyrolyse

Jeg utførte tre pyrolysinger ved forskjellige pyrolysetemperaturer med samme ovn. Jeg anbefaler oppdragsgiver å utføre flere pyrolysinger med større spenn i pyrolysetemperatur og oppholdstid. I tillegg anbefales det å benytte seg av flere pyrolyseteknologier som mikrobølge pyrolyse, katalysatorpyrolyse, co-pyrolyse osv. Da kan man finne den ideelle pyrolyseteknologien, pyrolysetemperaturen og oppholdstiden for egen biomasse.

Biokull og bruksområder

I denne masteroppgaven tok jeg utgangspunkt i resultater fra laboratorieforskene og litteraturstudiet når egnethet til bruksområder skulle bestemmes. Jeg anbefaler oppdragsgiver å utføre forsøk der biokull aktivt testes til de ulike bruksområdene. På denne måten kan man finne det mest ideelle bruksområdet for biokullet.

Miljøgifter

Avløpslam inneholder flere miljøgifter som det er vanskelig å rense ut. Selv om pyrolysing kan bidra til rensing av noen av miljøgiftene er det usikkert hvor stor konsentrasjon av miljøgifter biokullet inneholder. Jeg anser det derfor helt nødvendig med mer forskning på innhold av miljøgifter i biokull og hvordan de påvirker omgivelsene.

10 Kildeliste

- [1] Norsk Vann, «Arbeid med bærekraft i vannbransjen må prioriteres,» Norsk Vann, [Internett]. Available: <https://norsk vann.no/interessepolitikk/baerekraft-ma-prioriteres/>. [Funnet 9 Mai 2023].
- [2] FN, «Rent vann og gode sanitærforhold,» Forente Nasjoner, 3 Februar 2023. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/rent-vann-og-gode-sanitaerforhold>. [Funnet 5 Februar 2023].
- [3] T. Olsen, «På tide med et grønt skifte i vann og avløp,» VAnytt, 11 April 2022. [Internett]. Available: <https://www.vanytt.no/?p=20793>. [Funnet 5 Februar 2023].
- [4] T. Rise og H. Kvitsand, «Bærekraft og beredskap på Norges største VA-arrangement,» Sintef, 22 Oktober 2022. [Internett]. Available: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2022/barekraft-og-beredskap-pa-norges-storste-va-arrangement/>. [Funnet 9 Mai 2023].
- [5] L. Enander, K. Fjeldhus og A. Gyllenhammar, «Bærekraftig forvaltning av VA-tjenestene,» Norsk Vann, Hamar, 2014.
- [6] FN, «Utrydde fattigdom,» FN, 3 Februar 2023. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/utrydde-fattigdom>. [Funnet 5 Mai 2023].
- [7] FN, «Utrydde sult,» FN, 3 Februar 2023. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/utrydde-sult>. [Funnet 5 Mai 2023].
- [8] FN, «God helse og livskvalitet,» FN, 31 Januar 2023. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/god-helse-og-livskvalitet>. [Funnet 1 Februar 2023].
- [9] FN, «Rent vann og gode sanitærforhold,» FN, 31 Oktober 2022. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/rent-vann-og-gode-sanitaerforhold>. [Funnet 02 November 2022].
- [10] FN, «Ren energi til alle,» FN, 3 Februar 2023. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/ren-energi-til-alle>. [Funnet 5 Mai 2023].
- [11] FN, «Anstendig arbeid og økonomisk vekt,» FN, 3 Februar 2023. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/anstendig-arbeid-og-oekonomisk-vekst>. [Funnet 5 Mai 2023].
- [12] FN, «Industri, Innovasjon og Infrastruktur,» FN, 31 Januar 2023. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/industri-innovasjon-og-infrastruktur>. [Funnet 5 Mai 2023].
- [13] FN, «Bærekraftige byer og lokalsamfunn,» FN, Februar 1 2023. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/baerekraftige-byer-og-lokalsamfunn>. [Funnet 5 Mai 2023].
- [14] FN, «Ansvarlig forbruk og produksjon,» FN, 31 Oktober 2022. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/ansvarlig-forbruk-og-produksjon>. [Funnet 02 November 2022].

- [15] FN, «Stoppe klimaendringene,» FN, 2 Februar 2023. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/stoppe-klimaendringene>. [Funnet 5 Mai 2023].
- [16] FN, «Livet i havet,» FN, 2 Februar 2023. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/livet-i-havet>. [Funnet 30 April 2023].
- [17] FN, «Livet på land,» FN, 2 Februar 2023. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/livet-paa-land>. [Funnet 5 Mai 2023].
- [18] FN, «Samarbeide for å nå målene,» FN, 2 Februar 2023. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/samarbeid-for-aa-naa-maalene>. [Funnet 31 April 2023].
- [19] FN, «FNs bærekraftsmål,» FN, 4 April 2023. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal>. [Funnet 7 Mai 2023].
- [20] Norsk Vann; Vannklyngen; Smart Water Cluster; IWA Norge, «VANN: Verdens viktigste ressurs,» Nedre Romerike Vann- og Avløpsselskap IKS, Nedre Romerike.
- [21] Vannkunnskap, «KAPITTEL 7: VANN I VERDEN,» Vannkunnskap, [Internett]. Available: <https://vannkunnskap.no/pedleder/8-kapitler-om-vann/kapittel-7-vann-i-verden/>. [Funnet 20 Mars 2023].
- [22] S. Krishnamurthy, «Avløpsvann – en verdifull ressurs,» Sintef, 30 April 2021. [Internett]. Available: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2021/avlopsvann-en-verdifull-ressurs/>. [Funnet 13 Februar 2023].
- [23] FN, «Rent vann og gode sanitærforhold,» FN, 31 Januar 2023. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/rent-vann-og-gode-sanitaerforhold>. [Funnet 1 Februar 2023].
- [24] Regjeringen, «6. Reint vatn og gode sanitærforhold,» Regjeringen, 5 April 2022. [Internett]. Available: <https://www.regjeringen.no/no/tema/fns-baerekraftsmaal/6.-rent-vann-og-gode-sanitaerforhold/id2590181/?expand=factbox2596960>. [Funnet 21 Mars 2023].
- [25] Miljødirektoratet, «Kommunalt avløpsvann,» Miljøstatus, 19 September 2022. [Internett]. Available: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/forurensning/kommunalt-avlopsvann/>. [Funnet 5 Februar 2023].
- [26] Norsk Biokullnettverk, «Biokull i sammenheng med FN's bærekraftsmål,» Norsk Biokullnettverk, 11 November 2020. [Internett]. Available: <https://www.biokull.info/nyheter/hvordan-biokull-bygger-opp-under-fns-baerekraftsmaal>. [Funnet 30 April 2023].
- [27] A. F. Øgaard og E. J. Joner, «Avløpsslam,» NIBIO, 23 Oktober 2017. [Internett]. Available: <https://www.nibio.no/tema/jord/organisk-avfall-som-gjodsel/avlopsvann>. [Funnet 6 Mai 2023].
- [28] Norsk Vann, «Utnyttelse av ressursene i avløpsslam,» Norsk Vann, [Internett]. Available: <https://norskvann.no/interessepolitikk/ressursutnyttelse-i-avlopsvann/>. [Funnet 6 Mai 2023].
- [29] A.-L. Aakervik, «Jakten på giftstoffene: Vil gjenbruke slam,» Teknisk Ukeblad, 14 Mai 2022. [Internett]. Available: <https://www.tu.no/artikler/jakten-pa-giftstoffene-vil-gjenbruke-slam/519425>. [Funnet 6 Mai 2023].
- [30] Norsk Vann, «Mikroplast og vannbransjen,» Norsk Vann, [Internett]. Available: <https://norskvann.no/interessepolitikk/mikroplast-og-vannbransjen/>. [Funnet 6 Februar 2023].

- [31] P. A. Risnes, «Vi gjødsler jorder med mikroplast,» *Forskning.no*, 15 Juli 2023. [Internett]. Available: <https://forskning.no/forurensning-landbruk-norges-forskningsrad/vi-gjodslers-jorder-med-mikroplast/1357119>. [Funnet 9 Februar 2023].
- [32] A. Hauge, «Tungmetaller,» *Store Medisinske Leksikon*, 16 August 2018. [Internett]. Available: <https://sml.snl.no/tungmetaller>. [Funnet 10 Februar 2023].
- [33] H. Fjellvåg, «Tungmetaller,» *Store Norske Leksikon*, 5 Desember 2020. [Internett]. Available: <https://snl.no/tungmetaller>. [Funnet 10 Februar 2023].
- [34] Institutt for biovitenskap, «Tungmetaller,» *UiO*, 26 Februar 2022. [Internett]. Available: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/t/tungmetaller.html>. [Funnet 10 Februar 2023].
- [35] Miljødirektoratet, «Perfluorerte stoffer (PFOS, PFOA og andre PFAS-er),» *Miljøstatus*, 4 Januar 2023. [Internett]. Available: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/miljogifter/prioriterte-miljogifter/perfluorerte-stoffer-pfos-pfoa-og-andre-pfas-er/>. [Funnet 9 Februar 2023].
- [36] Miljødirektoratet, «Forbud mot PFAS,» *Miljødirektoratet*, 16 Januar 2023. [Internett]. Available: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/kjemikalier/reach/restriksjoner-under-reach/forbud-mot-pfas/>. [Funnet 9 Februar 2023].
- [37] Klima- og miljødepartementet, «Norge foreslår forbud av miljøgiften PFAS,» *Regjeringen*, 7 Februar 2023. [Internett]. Available: <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/norge-foreslar-forbud-av-miljogiften-pfas/id2962234/>. [Funnet 4 April 2023].
- [38] E. Sørmo, G. Castro, K. Krahn, A. Asimakopoulou, H. P. H. Arp, S. Ritter og G. Cornelissen, *Valorisering av organisk avfall: Avfallsbehandling og sorbentproduksjon*, Sola: Årsmøte Norsk Biokullnettverk, 2023.
- [39] Ung Energi, «Pyrolyse,» *Ung Energi*, 4 August 2022. [Internett]. Available: <https://ungenergi.no/energikilder/bioenergi/pyrolyse/>. [Funnet 8 Februar 2023].
- [40] Institutt for Biovitenskap, «Pyrolyse,» *Universitetet i Oslo*, 4 Januar 2023. [Internett]. Available: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/p/pyrolyse.html>. [Funnet 8 Februar 2023].
- [41] A. Anand, V. Kumar og P. Kaushal, «Biochar and its twin benefits: Crop residue management and climate change mitigation in India,» i *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, New Delhi, Elsevier, 2022.
- [42] VAnytt, «Vurdere å bruke energi fra pyrolysen til tørking av avløpsslam,» *VAnytt*, 24 November 2021. [Internett]. Available: <https://www.vanytt.no/?p=19713>. [Funnet 6 Mai 2023].
- [43] E. E. Hagtvæd, «Prosjektplan: Pyrolyse i Horten kommune,» *Horten Kommune*, Horten, 2022.
- [44] Norsk Biokullnettverk, «Hva er biokull?,» *Norsk Biokullnettverk*, [Internett]. Available: <https://www.biokull.info/hva-er-biokull>. [Funnet 5 Mai 2023].
- [45] K. Weber, «Biokull,» *Sintef*, [Internett]. Available: <https://www.sintef.no/fagomrader/bioenergi/biokull/>. [Funnet 16 Februar 2023].
- [46] E. J. Jøner, D. Rasse, A. Budai og A. O'Toole, «Biokull,» *Nibio*, 23 Oktober 2017. [Internett]. Available: <https://www.nibio.no/tema/jord/organisk-avfall-som-gjodsel/biokull>. [Funnet 16 Februar 2023].

- [47] R. Pommeresche, D. Rasse og E. Joner, «Biokull - status for forskning og utprøving i Norge,» Agropub, 24 Mars 2021. [Internett]. Available: <https://www.agropub.no/fagartikler/biokull-status-for-forskning-og-utproving-i-norge>. [Funnet 7 Mars 2023].
- [48] Norsk Biokullnettverk, «Klimaeffekt av biokull,» Norsk Biokullnettverk, [Internett]. Available: <https://www.biokull.info/klimaeffekt>. [Funnet 2 Mai 2023].
- [49] Norsk Biokullnettverk, «Hvordan bruke biokull i landbruket?,» Norsk Biokullnettverk, [Internett]. Available: <https://www.biokull.info/biokull-landbruket>. [Funnet 2 Mai 2023].
- [50] Norsk Biokullnettverk, «3. Biokull i bymiljø,» Norsk Biokullnettverk, 12 August 2023. [Internett]. Available: <https://www.biokull.info/ulike-bruksomrder-for-biokull-1/3-biokull-i-urbane-milj>. [Funnet 3 Mai 2023].
- [51] Norsk Biokullnettverk, «2. Biokull i asfalt,» Norsk Biokullnettverk, 11 Juni 2023. [Internett]. Available: <https://www.biokull.info/ulike-bruksomrder-for-biokull-1/2-biokull-i-asfalt>. [Funnet 3 Mai 2023].
- [52] Norsk Biokullnettverk, «1. Biokarbon i metallurgisk prosessindustri,» Norsk Biokullnettverk, 10 Juni 2020. [Internett]. Available: <https://www.biokull.info/ulike-bruksomrder-for-biokull-1/1-biokarbon-i-metallurgisk-prosessindustri>. [Funnet 5 Mai 2023].
- [53] Institutt for biovitenskap, «Bærekraftig,» Universitetet i Oslo, 8 Mars 2023. [Internett]. Available: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/b/berekraftig.html>. [Funnet 7 Mai 2023].
- [54] FN, «Bærekraftig utvikling,» FN, 28 Oktober 2021. [Internett]. Available: <https://www.fn.no/tema/fattigdom/baerekraftig-utvikling>. [Funnet 7 Mai 2023].
- [55] Miljødirektoratet, «Miljødirektoratet opprettholder nitrogenfjerningskrav,» Miljødirektoratet, 20 Juni 2022. [Internett]. Available: <https://www.miljodirektoratet.no/aktuelt/nyheter/2022/juni-2022/miljodirektoratet-oppretholder-nitrogenfjerningskrav/>. [Funnet 28 April 2023].
- [56] Horten Kommune, «Falkensten Renseanlegg,» Horten Kommune, [Internett]. Available: https://www.horten.kommune.no/_f/p1/i0e2ce4dc-2713-40f0-ac61-5391c5292c04/falkensten-ra-presentasjon.pdf. [Funnet 28 April 2023].
- [57] E. E. Hagtvedt, *Personlig kommunikasjon*, Horten, 2023.
- [58] Lindum, *Status pyrolyse av avløpsslam fra Horten Kommune*, Horten: Lindum, 2023.
- [59] H. K. Nielsen og O. Kvam, «Brænderiet,» 22 Mars 2023. [Internett]. Available: <https://www.uia.no/om-uia/fakultet/fakultet-for-teknologi-og-realfag/institutter2/institutt-for-ingenioervitenskap/laboratorier/ingenioervitenskap/braenderiet>.
- [60] O. Kvam, «Termisk analyse-lab,» Universitetet i Agder, [Internett]. Available: <https://www.uia.no/om-uia/fakultet/fakultet-for-teknologi-og-realfag/institutter2/institutt-for-ingenioervitenskap/laboratorier/ingenioervitenskap/termisk-analyse>. [Funnet 24 April 2023].
- [61] A. Johannessen, P. A. Tufte og L. Christoffersen, *Introduksjon til Samfunnsvitenskapelig Metode*, Oslo: Abstrakt - Forlag, 2021.
- [62] F. Svartdal, «eksperiment,» Store Norske Leksikon, 25 Januar 2023. [Internett]. Available: <https://snl.no/eksperiment>. [Funnet 29 April 2023].

- [63] O. Hellevik, *Forskningsmetode i sosiologi og statsvitenskap*, Oslo: Universitetsforlaget, 1991.
- [64] EG Landax, «Sikker jobbanalyse,» EG Landax, [Internett]. Available: <https://landax.no/moduler/sikker-jobbanalyse/>. [Funnet 29 April 2023].
- [65] Science Direct, «Fixed Carbon,» Science Direct, [Internett]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fixed-carbon>. [Funnet 7 Mai 2023].
- [66] Folkehelseinstituttet, «Slik oppsummerer vi forskning. Håndbok for Folkehelseinstituttet.,» Folkehelseinstituttet, Oslo, 2018.
- [67] S. Solhaug, «Trenger du hjelp med et systematisk litteratursøk? Vi hjelper deg,» NTNU, 27 Juni 2017. [Internett]. Available: <https://www.ntnu.no/blogger/ub-samfunn/2017/06/27/trenger-du-hjelp-med-et-systematisk-litteratursok-vi-hjelper-deg/>. [Funnet 13 April 2023].
- [68] J. Mosko, M. Pohorelý, S. Skoblia, R. Fajgar, P. Straka, K. Soukup, Z. Beňo, J. Farták, O. Bičáková, M. Jeremiáš, M. Šyc og E. Meers, «Structural and chemical changes of sludge derived pyrolysis char prepared under different process temperatures,» i *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Praha, ELSEVIER, 2021.
- [69] S. Guo, X. Xiong, D. Che, H. Liu og B. Sun, «Effects of sludge pyrolysis temperature and atmosphere on characteristics of biochar and gaseous products,» i *Korean Journal of Chemical Engineering*, Jilin, The Korean Institute of Chemical Engineers, 2021, p. 55–63.
- [70] J. Wu, T. Lu, G. Yang, W. Meng, H. Yuan og Y. Chen, «Self-recycling of sewage sludge as a coagulant and mechanism in sewage sludge dewatering,» i *Journal of Material Cycles and Waste Managemen*, Japan, Springer, 2020, p. 1867–1876.
- [71] Y. Tian, L. Cui, Q. Lin, G. Li og X. Zhao, «The Sewage Sludge Biochar at Low Pyrolysis Temperature Had Better Improvement in Urban Soil and Turf Grass,» i *Agronomy*, Beijing, MDPI, 2019.
- [72] F. Karimi, G. Rahimi, Z. Kolahchi og A. K. J. Nezhad, «Using Industrial Sewage Sludge-Derived Biochar to Immobilize Selected Heavy Metals in a Contaminated Calcareous Soil,» i *Waste and Biomass Valorization*, Springer, 2020, p. 2825–2836.
- [73] A. B. H. Trabelsi, A. Friaa, S. Abidi, S. Naoui og F. Jamaaoui, «Pyrolysis of Municipal Sewage Sludge within a circular economy vision: Production of sustainable Biofuels and Economic Biofertilizers,» i *Environmental Science and Engineering*, Hammam-Lif, Springer, 2019, p. 2271–2277.
- [74] J. D. Bień og B. Bień, «Sludge Thermal Utilization, and the Circular Economy,» i *Civil and Environmental Engineering Reports*, Częstochowa, Sciendo, 2019, pp. 157 - 175.
- [75] P. Kehrein, M. v. Loosdrecht, P. Osseweijer, M. Garfi, Dewulf og J. Posada, «A critical review of resource recovery from municipal wastewater treatment plants – market supply potentials, technologies and bottlenecks,» i *Environmental Science: Water Research & Technology*, The Royal Society of Chemistry, 2020, pp. 877-910.
- [76] A. Anand, V. Kumar og P. Kaushal, «Biochar and its twin benefits: Crop residue management and climate change mitigation in India,» i *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, New Delhi, Elsevier, 2022.
- [77] Helse- og omsorgsdepartementet; Klima- og miljødepartementet; Landbruks- og matdepartementet, «Forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphav,» Lovdata, 20 Juli 2003.

- [Internett]. Available: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2003-07-04-951>. [Funnet 4 Mai 2023].
- [78] Norsk Biokullnettverk, «Biokull i sammenheng med FNs bærekraftsmål,» Norsk Biokullnettverk, 11 November 2020. [Internett]. Available: <https://www.biokull.info/nyheter/hvordan-biokull-bygger-opp-under-fns-brekraftsmal>. [Funnet 30 April 2023].
- [79] Norsk Vann, «Vannbransjen i Norge,» Norsk Vann, [Internett]. Available: <https://norskvann.no/fakta-om-vannbransjen/>. [Funnet 9 Februar 2023].
- [80] Norsk Vann, «EurEau vil ha forbud mot PFAS,» Norsk Vann, 17 Januar 2022. [Internett]. Available: <https://norskvann.no/eureau-vil-ha-forbud-mot-pfas/>. [Funnet 10 Februar 2023].
- [81] S. Krishnamurthy, «Avløpsvann – en verdifull ressurs,» Sintef, 30 April 2021. [Internett]. Available: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2021/avlopsvann-en-verdifull-ressurs/>. [Funnet 13 Februar 2023].
- [82] K. Bøhle, «Måleusikkerhet, feilkilder og variabler,» NDLA, 12 April 2022. [Internett]. Available: <https://ndla.no/subject:1:83ce68bc-19c9-4f2b-8dba-caf401428f21/topic:1:a1c825c5-d01f-4aec-a50d-c548df537642/topic:1:497931e0-bb20-4da3-aa44-823b748c8ae7/resource:1:196456>. [Funnet 15 Februar 2023].
- [83] A. F. Øgaard og E. J. Jøner, «Avløps slam,» NIBIO, 23 Oktober 2017. [Internett]. Available: <https://www.nibio.no/tema/jord/organisk-avfall-som-gjodsel/avlopslam>. [Funnet 25 April 2023].
- [84] E. Hagtvedt, «Prosjekt plan-Horten Kommune-revidert,» Horten Kommune, Horten, 2023.
- [85] T. Olsen, «På tide med et grønt skifte i vann og avløp,» VAnytt, 11 April 2022. [Internett]. Available: <https://www.vanytt.no/?p=20793>. [Funnet 9 Mai 2023].
- [86] Indre Østfold Kommune, «VA-ordbok,» Indre Østfold Kommune, 8 Juli 2023. [Internett]. Available: <https://www.io.kommune.no/tjenester/vann-avlop-vei-og-renovasjon/vann-og-avlop/va-ordbok/>. [Funnet 13 Mai 2023].

11 Vedlegg

Vedleggliste

Vedlegg 1: SJA-Analyse Pyrolyse av avløpslam

Vedlegg 2: SJA-Analyse Innhold av flyktige gasser

Vedlegg 3: A3-poster