



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2021 30 stp.

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning

Sammenligning av klima- og miljøpåvirkninger fra behandlingsløsninger for park- og hageavfall i et livsløpsperspektiv. En analyse av kompostering og pyrolyse som behandlingsalternativer hos Vesar

Comparison of Climate- and Environmental Impacts from Different Treatment Solutions of Green Waste in a Life Cycle Perspective. An Analysis of Composting and Pyrolysis as Treatment Alternatives at Vesar

Lin April Løstegård

Fornybar energi

Forord

Denne 30 poengs masteroppgaven markerer avslutningen på mine fem år som student innen fornybar energi ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet (NMBU). Oppgaven er skrevet som en del av spesialiseringen i forvaltning og utnyttelse av avfallsressurser, og i samarbeid med Vesar.

Jeg ønsker spesielt å rette en takk til masterveilederen min, Ole Jørgen Hanssen, for god og konstruktiv veiledning gjennom hele prosessen. Kontaktperson fra Vesar, Terje Kirkeng, har også vært en stor hjelp. Han har bidratt med valg av oppgave, data og gjennomlesninger underveis. Jeg er også veldig takknemlig for alle informantene som har gitt av sin tid og innsikt. Av venner ønsker jeg å trekke frem Kaia Berg, Kristina Kjøningsen og Sara Kristine Skogly som alle har hjulpet med å korrekturlese oppgaven. Jeg ønsker også å takke Solveig Johannessen Gilleberg og Helena Seland Myhre for gode samtaler, hjelp og motivasjon. Collegium Alfa har vært nøkkelen til suksess når det kommer til sosial trivsel ved NMBU, og dermed for at jeg har fullført graden min her. Og sist, men ikke minst, tusen takk til Ingrid Staveland Reppe for å være min bedre halvdel gjennom alle våre fem år her ved NMBU.

Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet

Ås, 30.juni 2021

Lin April Løstegård

Sammendrag

Mengdene organisk avfall som blir sent til biologisk behandling har økt kraftig de siste ti årene. Park- og hageavfall går i hovedsak til kompostering i dag. Kompostering er en aerob prosess der avfallet blir brutt ned av naturlig mikrobiell liv. Sluttresultatet er kompost som er et veletablert jordforbedringsmiddel. En annen behandlingsmetode som kan benyttes for å håndtere park- og hageavfallet er. Til forskjell fra kompostering er pyrolyse en anaerob prosess som foregår ved hjelp av høy varme. Substratet blir omgjort til produktene: biokull, syngass og kondensat. Vesar ønsker å utforske mulighetene for å bytte behandlingsmetode for park- og hageavfall fra kompostering til pyrolyse. Oppgaven tar for seg ressursen park- og hageavfall og diskuterer prosessenes klima- og miljøpåvirkninger i et livsløpsperspektiv. Temaene som blir sett på er material- og energibalanse for pyrolyseprosessen, klimagassutslipp, transport av avfallet og øvrige påvirkninger på miljøet fra bruk av kompost og biokull som jordforbedringsmidler.

Resultatene viser at pyrolyseprosessen har lavere klimagassutslipp enn komposteringsprosessen under oppgavens beskrevne forutsetninger. Transport av hageavfallet fra gjenvinningsstasjonene til behandlingssted har generelt lite å si for de totale utslippene, men utslippen er lavere for systemet med pyrolyse enn kompostering. Når det kommer til miljøpåvirkningene, er det mange aspekter som må vurderes og vektes opp mot hverandre. Blant disse er faren for spredning av fremmede arter, miljøgifter, plantesykdom og ivaretagelsen av organismer som er viktige for jorda. Farlige organismer og gifter blir kraftig redusert eller destruert under pyrolyseringen, og derfor er spredningsfaren størst fra komposteringsprosessen. Når det gjelder tungmetaller, viser resultatene at innholdet er høyere i kompost enn i biokull. Verdiene av tungmetaller presentert er lave, og miljørisikoen tilknyttet tungmetaller anses dermed som liten.

Konklusjonen er at pyrolyse fremstår som den mest gunstige løsningen dersom klimaregnskapet er det viktigste. Pyrolyse er også foretrukket med tanke på spredningsfare av fremmede arter, plantesykdom og miljøgifter. Derimot er kompost et mer veletablert produkt med svært gode jordforbedringsegenskaper. Derfor kommer den beste løsningen for behandling av park- og hageavfall kommer derfor i stor grad an på ønsket bruk og resultat.

Abstract

The amount of organic waste that is sent to biological treatment has increased sharply in the last decade. Today, green waste mainly goes to composting. Composting is an aerobic process in which natural micro-organisms break down the waste. The result is compost, which is a widely used soil improver. Another treatment method that can be used to handle green waste is pyrolysis. Unlike composting, pyrolysis is an anaerobic process that requires high heat. The substrate is converted to the products: biochar, syngas, and condensate. Vesar wants to explore at the possibilities of changing their chosen treatment method for park and garden waste from composting to pyrolysis. The thesis deals with the resource green waste and looks at both climate and environmental impacts through a life cycle perspective. Topics covered are material and energy flow for the pyrolysis process, greenhouse gas emissions, transport of green waste and impacts on the environment from the use of compost and biochar as soil improvers.

The results show that the pyrolysis process has lower greenhouse gas emissions than the composting process. Transporting garden waste from the recycling stations to the treatment site generally has little impact on the total emissions. The emissions from transportation are halved in the system with pyrolysis. When it comes to environmental impacts, there are many aspects that must be assessed and considered according to the desired result. Because alien species, environmental toxins, and plant diseases are all destroyed during the pyrolysis, the risk of spreading is greatest from the compost. However, the risk of spreading is small from compost and the process will maintain organisms that are important for good soil health. In the case of heavy metals, the results show that the values are higher in compost than in biochar. The values presented are low and the risk associated with heavy metals is, thus, considered small.

The conclusion is that pyrolysis is the most favorable solution if the climate impacts are the most important. Pyrolysis is also preferred regarding the risk of spreading. On the other hand, compost is a more well-established product with great soil improvement properties. Therefore, the best solution for the treatment of park and garden waste, therefore, largely depends on the desired use and result.

Innholdsfortegnelse

Forord	II
Sammendrag	III
Abstract.....	IV
Figurliste	VIII
Tabelliste.....	IX
Ordliste	X
1. Introduksjon	1
1.1 Bærekraftig utvikling.....	1
1.2 Avfall og sirkulær økonomi.....	2
1.3 Behandling av organisk avfall	4
1.4 Avfallsbehandling i Vestfold og Telemark	5
1.5 Bakgrunn for oppgaven.....	5
1.6 Oppgavens oppbygning.....	6
2. Mål og problemstilling.....	7
2.1 Mål med oppgaven.....	7
2.2 Problemstilling.....	7
2.3 Forskningsspørsmålene som er definert ut fra problemstillingen er:.....	7
2.4 Omfang og avgrensninger.....	8
3. Kunnskapsgrunnlag	9
3.1 Innledning.....	9
3.2 Kompostering	9
3.2.1 Komposteringsprosessen	9
3.2.2 Kompost til jordforbedring.....	11
3.2.3 Spredning av arter fra fremmedartslista	12
3.2.4 Plantesykdommer, tungmetaller og fremmedlegemer	13
3.3 Pyrolyse	14
3.3.1 Pyrolyseringsprosessen	14
3.3.2 Teknologier.....	16
3.3.3 Produktene fra pyrolyse.....	17
3.3.4 Massebalanse ved pyrolyse.....	21
3.3.5 Energibalanse ved pyrolyse	22
3.4 Miljøvurderinger.....	23
3.4.1 Miljøvurderinger.....	23
3.4.2 Biogent karbon	23
3.4.3 Miljøvurdering kompostering.....	24
3.4.4 Miljøvurdering pyrolyse.....	25
3.4.5 Sammenligning av miljøvurderingene	26
4. Metodikk og datagrunnlag.....	28

4.1	Valg av metode	28
4.2	Litteraturstudie.....	28
4.3	Material- og energibalanse	29
4.4	Transportanalyser	30
4.5	Livsløpsanalyse.....	31
4.5.1	Introduksjon livsløpsanalyse.....	31
4.5.2	Hensikt og omfang for det analyserte systemet.....	33
4.5.3	Funksjonell enhet og referansestrøm.....	33
4.5.4	Systemgrenser	33
4.5.5	Allokering.....	34
4.5.6	Cut-off.....	35
4.5.7	Valg av dataverktøy	35
4.6	Intervjuer.....	35
5.	Studieobjekt	39
5.1	Vesar	39
5.1.1	Introduksjon av Vesar	39
5.1.2	Kretsløpet hos Vesar.....	39
5.1.3	Hageavfallet hos Vesar	41
5.1.4	Transport av hageavfallet	42
5.1.5	Synergieffekter hos Vesar.....	44
5.2	Systemene	45
6.	Resultater.....	46
6.1	Material- og energiflyt	46
6.1.1	Massestrøm	46
6.1.2	Energiflyt	47
6.1.3	Karbonbalanse.....	48
6.2	Transport.....	50
6.2.1	Årlig transportavstand	50
6.2.2	Utslippsestimater for transport av park- og hageavfallet	52
6.3	Livsløpsanalyse.....	54
6.3.1	Utslipp fra kompostering.....	54
6.3.2	Utslipp fra pyrolyse.....	55
6.3.3	Sammenligning av utslippene.....	57
6.3.4	Sensitivitetsanalyse	58
6.3.5	Substitusjon	60
6.4	Miljøpåvirkninger	61
6.4.1	Innhold av tungmetaller	61
6.4.2	Innledning kvalitative data	63
6.4.3	Første spørsmål	63
6.4.4	Kvalitet på innsamlet park- og hageavfall.....	63
6.4.5	Barrierer	64
6.4.6	Spredning av fremmede arter	65
6.4.7	Utslipp av klimagasser	66
6.4.8	Positive egenskaper ved kompost	67
6.4.9	Biokull	68
6.4.10	Oppsummering	69
7.	Diskusjon.....	70
7.1	Hovedmomenter i oppgaven	70

7.1.1	Park- og hageavfall som en ressurs	70
7.1.2	Nye funn	71
7.1.3	Resultater som underbygges av kunnskapsgrunnlaget	72
7.1.4	Pyrolyse og kompostering som komplementære prosesser	75
7.2	<i>Sammenlignbarhet av resultatene</i>	77
7.2.1	Systemene	77
7.2.2	Data validitet og mulige feilkilder.....	78
7.3	<i>Bruk av resultatene</i>	79
7.3.1	Relevans for Vesar	79
7.3.2	Bruk av resultatene utenfor Vesar	80
7.3.3	Momenter for utvikling	80
7.4	<i>Videre arbeid</i>	81
8.	Konklusjon	83
9.	Referanser	84
10.	Vedlegg	90
10.1	<i>Intervjuguide</i>	90
10.2	<i>Adresseoversikt for transportanalyse og transportavstand 2021</i>	91

Figurliste

FIGUR 1 RELEVANTE BÆREKRAFTS MÅL FOR ORGANISK AVFALL (FN, 2020)	2
FIGUR 2 ILLUSTRASJON AV LINEÆR ØKONOMI (ØVERST) OG SIRKULÆR ØKONOMI (NEDERST) (MILJØDIREKTORATET, 2020)	2
FIGUR 3 AVFALLSHIERARKIET (LOOP -STIFTELSEN FOR KILDESORTERING OG GJENVINNING, 2018)	3
FIGUR 4 ILLUSTRASJON AV RANKEKOMPOSTERINGSPROSESSEN	10
FIGUR 5 ILLUSTRASJON AV MADRASSKOMPOSTERING	11
FIGUR 6 ILLUSTRASJON AV PYROLYSEPROSESSEN	15
FIGUR 7 MASSEBALANSE FOR TØRT, ASKEFRITT HAGEAVFALL (RAMBØLL NORGE AS, 2020)	21
FIGUR 8 KARBONKRETSLØPET MED OG UTEN PYROLYSE, HENTET FRA (THOMASSEN, ET AL., 2017)	23
FIGUR 9 DE FIRE HOVEDFASENE I EN LIVSLØPSVURDERING	32
FIGUR 10 LIVSLØPSFASER FOR DE ANALYSERTE SYSTEMENE HENTET FRA (EPD NORGE, U.D.)	34
FIGUR 11 DAGENS KRETSLØP, DEN MAGISKE FABRIKKEN	40
FIGUR 12 FREMTIDIGE MULIGHETER FOR ET KRETSLØP, DEN MAGISKE FABRIKKEN	41
FIGUR 13 OVERSIKT TRANSPORT FRA GJENVINNINGSSSTASJONENE TIL BEHANDLING PER 2020	43
FIGUR 14 OVERSIKT OVER TRANSPORT FRA GJENVINNINGSSSTASJONENE FOR ET SYSTEM MED PYROLYSE	43
FIGUR 15 REFERANSESYSTEM OG NYTT SYSTEM MED	45
FIGUR 16 MASSEBALANSE VED PYROLYSE	47
FIGUR 17 ENERGIBALANSE VED PYROLYSE	48
FIGUR 18 KARBONBALANSEN VED PYROLYSE	48
FIGUR 19 MASSESTRØM OG OMREGNING FOR UTSLIPP	54
FIGUR 20 SAMMENLIGNING AV RESULTATENE FRA LIVSLØPSANALYSENE AV KOMPOSTERING OG PYROLYSE	57

Tabelliste

TABELL 1 MAKSIMUMSGRENSER FOR TILLATT INNHOLD TUNGMETALLER (LOVDATA, 2021)	13
TABELL 2 RELEVANTE RESULTATER FRA PYROLYSEFORSØK UTFØRT AV WAI (DANIELSEN & XIN, 2019)	21
TABELL 3 ENERGIBALANSE FOR PYROLYSE (DANIELSEN & XIN, 2019)	22
TABELL 4 OVERSIKT OVER UTSLIPPSTYPER FRA KOMPOST OG MULIGE UTSLIPP FRA PYROLYSE	27
TABELL 5 UTVALG AV SØKEORD TIL LITTERATURSTUDIE	29
TABELL 6 INKLUDERTE OG IKKE INKLUDERTE PROSESSER I SYSTEMGRENSENE	34
TABELL 7 OVERSIKT OVER INFORMANTER	36
TABELL 8 TEMAENE VALGT FOR TEMATISK ANALYSE AV INTERVJUENE	38
TABELL 9 INNSAMLET HAGEAVFALL PÅ DE ULIKE MILJØSTASJONENE, OG ANTALL TØMMINGER I 2020	50
TABELL 10 BEREGNET KJØREAVSTAND FOR 2020 MED BEHANDLINGSLØSNING KOMPOSTERING	51
TABELL 11 BEREGNET KJØREAVSTAND FOR ET NYTT SYSTEM MED PYROLYSE PÅ EGET OMRÅDE	51
TABELL 12 UTSLIPPSDATA FOR TYPER TRANSPORT	52
TABELL 13 UTSLIPP FOR TRANSPORT VED DE ULIKE ALTERNATIVE TRANSPORT ALTERNATIVENE	52
TABELL 14 RESULTATER MILJØANALYSE KOMPOSTERING	55
TABELL 15 RESULTATER MILJØANALYSE PYROLYSE	56
TABELL 16 SENSITIVITET KOMPOSTERING	58
TABELL 17 INNHOLD I FERDIG KOMPOST AV PARK-OG HAGEAVFALL FRA VESAR	61
TABELL 18 INNHOLD I BOKULL FRA FLIS	62

Ordliste

Begrep	Forklaring
Aerob	Med tilgang på oksygen.
Anaerob	Uten tilgang på oksygen.
Avfall	Kasserte eller overflødige gjenstander eller stoffer. Avfall kan deles inn i kategorier som blandet avfall, EE-avfall, farlig avfall, matavfall, plastavfall, radioaktivt avfall, treavfall, mm.
Biomasse	Materiale dannet av eller fra levende organismer, eksempelvis fra trær, gressvekster, tang, mais, avføring fra dyr eller hogstavfall.
CCS	Fra det engelske «Carbon Capture and Storage». Brukes om prosessen der karbon tas ut av atmosfæren ved å «fanges», for så å bli lagret.
CO ₂ -ekvivalenter	Benyttet som felles enhet for å kunne sammenligne ulike klimagasser. Omregningsfaktoren er globalt oppvarmingspotensial (GWP) og den sammenligner gassenes samlede oppvarmingseffekt over en gitt tidsperiode, vanligvis 100år. Skrives også som CO ₂ -ekv eller CO ₂ e.
Dyrkingsmedium	Naturlig eller kunstig grunnsustans, med eller uten tilsatt næring, som benyttes til dyrking av planter.
Fraksjon	En ensartet type avfall.
Gjenvinningsstasjon	Betjente plasser hvor kommunens abonnenter kan levere avfall fordelt i fraksjoner.
Jordforbedringsmiddel	Produkt som bare eller vesentlig har positive virkninger på jordas og dyrkingsmediets kjemiske, fysiske og biologiske tilstand.
Livsløpsvurdering	Analysemetode for å se på utslipp knyttet til hele livsløpet til et produkt eller produktsystem. Forkortes ofte til LCA.
Miljøvurdering	Se livsløpsvurdering.
Sikting	Fordeling av avfall etter partikkelstørrelse.
Sortering	Fordeling av avfall etter materiale.

1. Introduksjon

1.1 Bærekraftig utvikling

Bærekraftig utvikling er et mye benyttet begrep i dag, spesielt i tilknytning til ressursbruk. Begrepet «bærekraft» ble først tatt i bruk i rapporten *Vår felles fremtid* fra 1987. Rapporten ble utarbeidet av Verdenskommisjonen for miljø og utvikling, også kjent som Brundtland-kommisjonen. I rapporten blir begrepet definert som utvikling som tilfredsstiller dagens behov uten å ødelegge for fremtidige generasjoner. Begrepet omfatter økonomi, sosiale forhold, og klima og miljø (FN, 2019).

I takt med et økende søkelys på klimaendringene og det faktum at konsekvensene allerede har begynt å vise seg, har det kommet flere tiltak for å håndtere utfordringene. Et eksempel på et slikt tiltak er Paris-avtalen, som er en internasjonal avtale med hovedfokus på å få verdens land til å begrense klimaendringene. Paris-avtalen trådte i kraft i november 2016 (FN-sambandet, 2020). Gjennom den har Norge forpliktet seg til å redusere klimagassutslippene sine. Frem til 2020 hadde Norge et mål om å redusere utslippene med 40 %. I 2021 forsterket Norge målene sine, som tredje land i verden. Nå skal Norge redusere utslippene med minst 50 % og opp mot 55 % innen 2030, sammenlignet med 1990-nivå. Norge var tredje land i verden til å forsterke målene sine. For å nå dette målet må utslipp kuttes i flere sektorer (Klima- og Miljødepartementet, 2020).

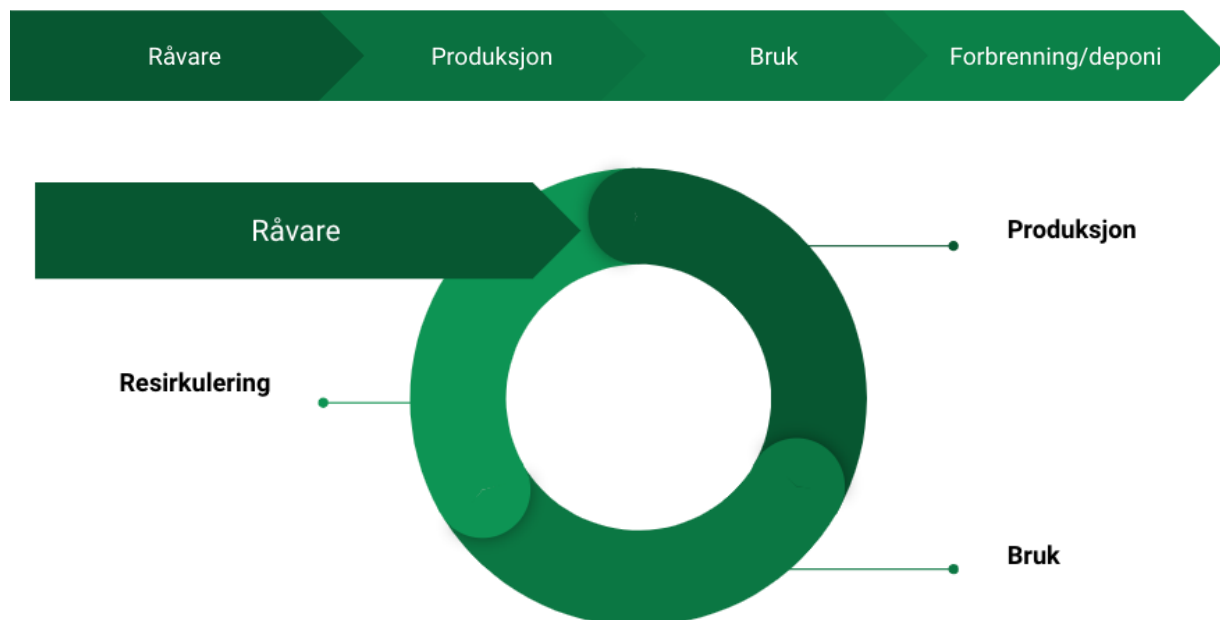
FN har utarbeidet det de kaller «bærekraftsmålene». Målene er en del av strategien for å løse det FN anser som verdens største utfordringer. Disse ble iverksatt i januar 2017, for å gi ulike nasjoner et felles mål å arbeide mot, inn mot 2030 (FN, 2020). Blant de 17 målene er det spesielt tre mål som er relevante for avfallssektoren og ressursutnyttelse av organisk avfall, noe som kommer frem av delmålene for hvert enkelt mål. De relevante målene er nr. 11 som er bærekraftige byer og lokalsamfunn, nr. 12 som omhandler ansvarlig forbruk og produksjon og nr. 15 som er livet på land (Utenriksdepartementet, 2020).



Figur 1 Relevante bærekrafts mål for organisk avfall (FN, 2020)

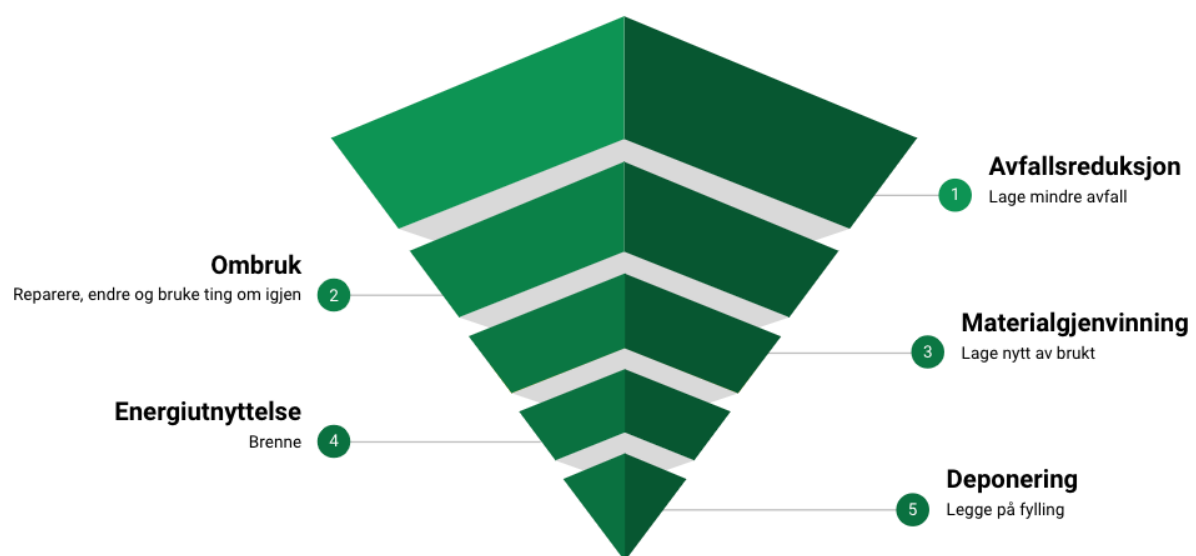
1.2 Avfall og sirkulær økonomi

For å få til en mer bærekraftig utvikling er det viktig med god ressursutnyttelse. Et naturlig steg for å oppnå dette er å optimalisere utnyttelsen av avfallsressursene. Sentralt i en slik utvikling er en overgang til en mer sirkulær økonomi der det er fokus på at ressurser utnyttes effektivt og så lenge som mulig, med minst mulig svinn (Miljødirektoratet, 2020). Det alternative systemet er lineær økonomi. Dette systemet er basert på utvinning, produksjon og bruk, og forbrenning eller deponering av avfallet. En lineær økonomi krever utvinning av jomfruelige ressurser, noe som på sikt ikke vil være bærekraftig da verdens naturressurser er under økt press (Miljødirektoratet, 2020). Figur 2 illustrerer de ulike systemene.



Figur 2 Illustrasjon av lineær økonomi (øverst) og sirkulær økonomi (nederst) (Miljødirektoratet, 2020)

Fra 1.juli 2009 ble det innført forbud mot å deponere nedbrytbart avfall i Norge. I denne kategorien inngår blant annet restavfall, papir, kartong, trevirke og hageavfall. (LOOP - Stiftelsen for Kildesortering og Gjenvinning, 2018) Deponering har i lengre tid vært den minst ønskede behandlingsmetoden basert på avfallshierarkiet, fremstilt i Figur 3. Hovedgrunnen til dette er at deponering ikke benytter noe av produktets gjenværende verdi. Avfallshierarkiet, eller avfallspyramiden, er en figur som illustrerer prioriteringene i norsk politikk og EUs rammedirektiv for avfallshåndtering. Pyramiden viser de mest ønskelige løsningene øverst, med minst mulig avfall til deponier.



Figur 3 Avfallshierarkiet (LOOP -Stiftelsen for Kildesortering og Gjenvinning, 2018)

Øverst i pyramiden står avfallsreduksjon som den mest ønskelige løsningen. Dette oppnår man med å generere mindre avfall. Trinn to i avfallspyramiden er ombruk, som vil si at man finner nye måter å beholde verdien til materialet på. Ombruk gjøres ved blant annet reparasjon, endring eller finne nye måter å fortsette å bruke materialet på. Materialgjenvinning er neste trinn og omfatter at materialet blir brutt ned og benyttet som råvare i nye produkter. Nest nederst er energiutnyttelse som er at materialet brennes så gjenværende energi kan bli brukt til for eksempel fjernvarme. Helt nederst og forbudt er deponering. Ved deponering blir materialet ikke utnyttet videre. Deponering inngår ikke i en sirkulær økonomi (Boye, 2019).

1.3 Behandling av organisk avfall

Organisk avfall inneholder verdifulle næringsstoffer som nitrogen, fosfor og andre mineraler, samt organisk materiale som har positive effekter på jordkvalitet (Brod, 2021). Organisk avfall omfatter blant annet matavfall, våtorganisk avfall, organisk slam og park- og hageavfall (Nordisk avfallspool, u.d.). Ifølge Miljøstatus (2021) har mengdene avfall som går til biologisk behandling økt kraftig de siste ti årene. Den biologiske behandlingen foregår i hovedsak i biogassanlegg eller i komposteringsanlegg.

Statistisk Sentralbyrå (SSB) registrerte i 2019 at det ble levert 605 000 tonn biologisk avfall til behandling i Norge. Av disse gikk 166 000 tonn til kompostering. Av dette var 73 000 tonn park- og hageavfall (Miljøstatus, 2021). Park- og hageavfall er en verdifull ressurs med egenskaper det er svært gunstig å beholde i kretsløpet (Avfall Norge, 2016). Fraksjonen omfatter alt organisk materiale fra hage og uteområder, eksempelvis trær, kvister, løv, busker, plenklipp, ugress, fruktrester og andre planter.

I Norge har park- og hageavfall i stor grad blitt benyttet til å produsere kompost. Ifølge Harald Aanes er kompostering et forebyggende tiltak mot dumping av ymse planter og biologisk avfall i naturen, samt mot bråtebranner. Park- og hageavfall gir kompost med høyt næringsinnhold (Grønn vekst, u.d.). Kompostering er en aerob biologisk prosess som krever tilførsel av oksygen (Store Norske Leksikon, 2018). Det organiske avfallet brytes ned ved hjelp av mikrobielliv, som skaper et godt vekstmedium og jordforbedringsmiddel. Kompostering er en velutprøvd og kostnadseffektiv behandlingsmetode. I Norge var det i 2019 registrert om lag 150 komposteringsanlegg i Miljødirektoratets database (Miljøstatus, 2021).

En annen behandlingsmetode for park- og hageavfall er pyrolyse. Prosessen er termokjemisk og omdanner et substrat til nye produkter som kalles biokull, syngass og kondensat (Ung Energi, 2021). Behandlingsmetode mottar mer oppmerksomhet grunnet nye miljøkrav og behov for mer sirkulær ressursåndtering. Prosessen er til forskjell fra kompostering anaerob, og har historisk vært sentral for å utvinne trekull. Med dagens søkelys på bærekraftige sirkulære systemer, er pyrolyse et godt alternativ. Teknologien er ikke like utprøvd som for kompostering, men vil kunne omgjøre ulike avfallsfraksjoner til nye produkter.

Produktene fra pyrolyseringen kan benyttes til ulike formål, blant annet som energiressurs, som jordforbedringsmiddel eller i synergi med andre systemer for økt effekt. Biokullet produsert fra pyrolyse er vurdert som et bidrag til CCS. I norsk landbrukssektor kan biokull potensielt bidra med 40 % reduksjon av klimagassutslipp innen 2030 (Thomassen, et al., 2017). Dette utgjør landbrukssektorens utslippsreduksjon i henhold til Paris-avtalen før målene ble forsterket i 2020 (Utenriksdepartementet, 2020).

1.4 Avfallsbehandling i Vestfold og Telemark

Vestfold og Telemark fylkeskommune har et mål om å redusere klimagassutslippene sine med 60 % innen 2030, og være et lavutslippssamfunn innen 2050. For å nå disse målene er det viktig å samle samfunnsaktører fra alle sektorer, inkludert avfallssektoren (Vestfold og Telemark fylkeskommune, u.d.). Vestfold Avfall og Ressurs AS (Vesar) er et interkommunalt selskap som er eid av kommunene Horten, Holmestrand, Larvik, Færder, Sandefjord og Tønsberg (Vesar, u.d.). De er ansvarlig for innsamling og behandling av husholdningsavfallet til nevnte kommuner. Vesar spiller da en rolle i å nå Vestfold og Telemarks fylkeskommunes klimamål.

Vesar og nettverket deres på Sem er innovative og ønsker å utvikle og teste nye løsninger, noe de har vist ved Den Magiske Fabrikken som produserer biogass og biogjødsel fra matavfall, og klimatomatene de produserer med CO₂-fangst. Nå ønsker de å se nærmere på klimautbyttet ved å endre behandlingsmetoden sin av park- og hageavfallet de får inn. Ved pyrolyse vil komposten bli byttet ut med syngass, kondensat og biokull. Av disse produktene har Vesar og deres samarbeidspartnere spesielt interesse for biokullet, som et jordforbedringsmiddel og medium for karbonlagring.

1.5 Bakgrunn for oppgaven

Oppgaven er skrevet i samarbeid med Vesar. Vesar ser på muligheten rundt det å endre behandlingsmetode fra kompostering til pyrolyse. Valget om å skrive en oppgave innen dette temaet ble derfor naturlig. Problemstillingen ble valgt på bakgrunn av egen interesse og relevans til mastergraden i fornybar energi, samt deres ønske om videre undersøkelser innenfor temaet.

1.6 Oppgavens oppbygning

Oppbyggingen til oppgaven er slik at kapittel 2 tar for seg problemstillingen som er grunnlaget for analysene. I kapittel 3 blir kunnskapsgrunnlaget presentert. Kapittel 4 gjør rede for metodikk og datagrunnlag, mens kapittel 5 tar for seg studieobjekt og de analyserte systemene. Resultatene blir presentert i kapittel 6 og diskutert i kapittel 7. Oppgaven avsluttes med en konklusjon i kapittel 8. Videre følger referanselisten og vedleggene.

2. Mål og problemstilling

2.1 Mål med oppgaven

Vestfold Avfall og Ressurs AS (Vesar) ønsker å få vurdert hva som gir best klima- og miljønytte av dagens løsning med utsetting av behandling av park- og hageavfall til kompostering og en eventuell ny løsning med pyrolyse i egen regi. Målet med oppgaven er derfor å vurdere hvilken behandlingsløsning for park- og hageavfall som er mest klima- og miljøvennlig for Vesar, sett i et livsløpsperspektiv og gjennom bruk av eksisterende kunnskap og litteratur på området.

Oppgaven vil være en del av beslutningsgrunnlaget for fremtidig valgt behandlingsmetode av park- og hageavfall hos Vesar. Oppgaven vil også være relevant for alle som er interessert i fordeler og ulemper for behandling av park- og hageavfall mellom de to systemene eller som skal velge løsning for behandling av fraksjonen.

2.2 Problemstilling

Oppgavens hovedproblemstilling dekker flere problemstillinger og aspekter rundt pyrolyse og kompostering som behandlingsalternativer for park- og hageavfall. For å konkretisere oppgaven er det definert fire forskningsspørsmål. Problemstillingen som skal undersøkes er:

Hva blir netto klima- og miljøpåvirkning for behandling av park- og hageavfall med pyrolyse sammenlignet med kompostering sett ut ifra et livsløpsperspektiv? Hvilke fordeler og ulemper har de ulike systemene med tanke på behandling av organisk avfall?

2.3 Forskningsspørsmålene som er definert ut fra problemstillingen er:

- Hvordan er material- og energibalansen for behandling av park- og hageavfall med pyrolyse?
- Hvordan bidrar klimagassutslipp fra transport i totalregnskapet, og hvordan vil valg av en løsning med pyrolyse eventuelt påvirke dette?
- I hvilken grad vil pyrolyse bidra til reduserte klimagassutslipp knyttet til håndtering av park- og hageavfallet hos Vesar, sett opp mot dagens løsning med kompostering?
- Hvordan vil en løsning med pyrolyse påvirke risiko for spredning av fremmede arter, plantesykdom, miljøgifter, tungmetaller og fremmedelementer fra behandlingen og utnyttelsen av park- og hageavfallet?

2.4 Omfang og avgrensninger

Oppgaven er avgrenset til fraksjonen park- og hageavfall, og tar for seg to hovedsystemer. Dagens system består av kompostering som behandlingsløsning mens et mulig fremtidig system som ønskes vurdert er basert på pyrolyse som behandlingsløsning. Kapittel 5, Studieobjekt, gir en mer utfyllende beskrivelse av systemene som danner grunnlaget for analysen. Oppgaven er geografisk avgrenset til Vesar sine kommuner.

Studiet tar for seg klima- og miljøpåvirkninger. Med klima- og miljøpåvirkninger menes det i denne oppgaven utslipp til luft som er omfattet av påvirkningsindikatoren global oppvarming, samt mer lokale påvirkningsfaktorer som spredning av fremmede arter, miljøgifter og tungmetaller. I oppgaven omtales park- og hageavfall som går inn i pyrolyseprosessen for substrat, mens produkter er det som kommer ut av behandlingen.

Oppgavens tidsperspektiv er omtrent seks måneder (4. januar – 1. juli 2021). Tidsperspektivet har vært med på å legge føringen for omfanget av oppgaven, og har hatt innvirkning spesielt på antall intervjuer og dybden av miljøanalysen. Sistnevnte har i tillegg blitt påvirket av mangel på data grunnet forsinkelse i pilotprosjektet som skulle ha dannet grunnlaget for oppgavens analyse. Blant annet har forsinkelsene medført endringer som utsettelse av leveringsdato og endringer i oppgaven, samt påvirket datakvalitet og tilgjengelige data for analysen.

3. Kunnskapsgrunnlag

3.1 Innledning

Kunnskapsgrunnlaget presenterer dagens kunnskapsstatus innen relevante tema for oppgaven. Først blir kompostering og pyrolyse presentert. Disse to prosessene danner hovedgrunnlaget for oppgaven. Fokuset i kapittelet videre er å belyse kunnskapsgrunnlaget basert på tilgjengelig litteratur knyttet til problemstillingen og forskningsspørsmålene valgt for oppgaven. Kunnskapsgrunnlaget tar dermed for seg masse- og energibalansen til pyrolyse, klima- og miljøutslipp fra både pyrolyse og kompostering, samt fordeler og ulemper ved produktene fra de to behandlingsmetodene.

3.2 Kompostering

3.2.1 Komposteringsprosessen

Kompostering er en biologisk aerob prosess, som vil si at den krever tilførsel av oksygen (Store Norske Leksikon, 2018). Det finnes ulike metoder for kompostering. De to vanligste er rankekompostering og madrasskompostering, som begge er former for varmkompostering. Forskjellen mellom dem er at komposten legges i flere mindre hauger eller ranker ved rankekompostering, mens det ved madrasskompostering blir tilført til en større masse eller madrass. Prosessen tar omkring 1,5 år fra start til slutt, krever store arealer og kontinuerlig oppsyn og bearbeiding (Blytt, 2016). Ifølge Harald Aanes¹ i Oslokompost vil 1 tonn park- og hageavfall gi 250kg kompost, og volumreduksjonen er på om lag 90% og vektreduksjon på 40 %.

For begge alternativene blir park- og hageavfallet først kvernet eller knust til mindre biter og blandet til en mer homogen masse. Knust park- og hageavfall tar opp om lag 1/6 av plassen som ubehandlet park- og hageavfall tar opp. Partikkelstørrelsen på kompostmaterialet er opp til 200 mm. Blandingen av små og store partikler tillater at luft kommer lettere inn mellom lagene under komposteringsprosessen. Luften sørger for at det blir en komposteringsprosess og ikke forråtnelsesprosess, som igjen fører til mindre utslipp av blant annet metan (CH_4). Etter kverningen blir materialet lagt på egne områder i ranker eller tilført en madrass der prosessen går sin naturlige gang (Avfall Norge, 2016).

¹ Personlig kommunikasjon 16.03.21

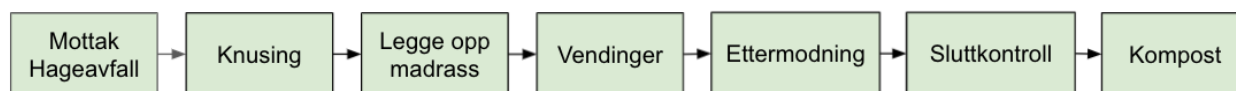
Nedbrytningsprosessen er drevet av et naturlig mikrobieliv som danner varme. Mattilsynet har satt minste lovlig temperaturverdi til 55°C for kommersiell kompostering, men temperaturene kan under gunstige forhold øke til 75°C eller mer (Blytt, 2016). I mange tilfeller er 55°C nok til at uønskede organismer ikke kan formere seg videre, men noen arter er mer standhaftige enn andre. Dette gjelder spesielt for enkelte hardføre fremmede arter. (Avfall Norge, 2016) Prosessen der varmen utnyttes til å uskadeliggjøre smittestoffer og annet uønsket i komposten kalles for hygienisering (Store Norske Leksikon, 2018). Ettersom prosessen produserer varme, er det viktig å holde komposten under oppsyn så det ikke tar fyr. Rankene må vendes med jevne mellomrom for å gi tilgang til luft og for å holde temperaturen under kontroll. Ifølge Harald Aanes vil det ved hyppig vending også bli mindre utslipp fra komposteringsprosessen. Ifølge Mattilsynet må komposten vendes minimum 3 ganger i løpet av prosessen for å være lovlig produsert. Selvantemming er et problem dersom rankene ikke vendes ofte nok.

Når komposteringsprosessen nærmer seg slutten, samles materialet fra rankene til en haug og legges til ettermodning. Her er det viktig at massen ikke blir for fuktig, og den skal derfor ligge på et tørt område under tak (Store Norske Leksikon, 2018). For madrasskompostering flyttes den ferdige massen til et nytt område. Figur 4 og Figur 5 under illustrerer prosessen for de ulike komposteringsmetodene.

Før komposten kan selges kommersielt må den gjennom en sluttkontroll. Forskriften om et internkontrollsystem stiller krav om å følge opp produktets kvalitet. Viktige punkter for internkontrollsystemet er forskriften om gjødselvarer mv. av organisk opphav (Lovdata, 2021), forskriften om planter og tiltak mot planteskadegjørere (Lovdata, 2019), forskriften om floghavre (Lovdata, 2020), norsk standard om dyrkingsmedier, jordforbedringsmidler og jorddekkingsmidler, varedeklarasjon, pakking og merking (NS 2890:2003), og naturmangfoldloven (Lovdata, 2021). I tillegg kreves det utslippstillatelse fra statsforvalteren. Ferdig kompost kan benyttes til jordforbedring, jorddekking, plenjord, plantejord og erosjonskontroll.



Figur 4 Illustrasjon av rankekomposteringsprosessen



Figur 5 Illustrasjon av madrasskompostering

Det er flere variabler som er viktige når det kommer til utslipp fra gjennomføring av komposteringsprosessen. Blant disse er antall vendinger, tilgang på luft, fuktighet i materiale som kommer inn og underveis i prosessen, avrenning, temperaturen og type maskiner som benyttes (Tellnes, et al., 2017). For at prosessen skal ha minst mulig utslipp er det viktig med nok luft. Dette er for å forhindre forråtnelse. For å passe på oksygentilgangen er det vanlig å benytte en blanding mellom grovt og fint park- og hageavfall, slik at det blir mulig for luft å komme inn i avfallet. Plassering av komposthaugen på et sted med vind eller å vende avfallet nok ganger vil også redusere utslipp. I tillegg bør fuktigheten balanseres for å få en gunstig prosess. Avrenning kan skape problemer på grunn av næringsrikt vann som bør renses før det slippes ut i naturen. Videre er temperaturen under prosessen er med på å destruere skadelige arter og andre negative organismer. Maskinene som benyttes har utslipp i form av drivstoffforbruk, og utbytting av deler som må produseres og fraktes (Blytt, 2016).

3.2.2 Kompost til jordforbedring

Blant jordforbedringsproduktene av de organiske materialene er kompost det som varierer mest mellom hver leveranse og mellom anleggene. Variabiliteten gjelder spesielt tetthet, luftkapasitet, vannholdningsevne, pH-verdi, næringsstoffinnhold, tungmetallinnhold og biologisk stabilitet. Variablene påvirker kvaliteten til jordblandingen (Brod & Haraldsen, 2017).

Det er generelt lite organisk materiale i kompost fra park- og grunnet silt- og sandpartikler som følger med planterøttene. I tillegg bidrar komposteringsprosessens langsomme oppvarming og avkjøling til det lave innholdet av organisk materiale. Ferdig produkt er ofte relativt tett og tungt, og kan medføre håndteringsproblemer av produktet. Under komposteringen kan den tette strukturen danne anaerobe soner der metan (CH_4) og hydrogensulfid (H_2S) blir produsert. pH-verdien til kompost er vanligvis høy, og ligger på 7-8 med en betydelig bufferevne. Park- og hageavfalls kompost inneholder alltid noe fritt CaCO_3 , som kan bidra til en ytterligere økning i pH verdien som er uønsket (Brod & Haraldsen, 2017).

Kompost produsert av park- og hageavfall vil redusere luftkapasiteten (35-40 vol.%) og øke vannlagringsevnen i jordblandingene (45-55 vol.%). Derfor bør vanning foregå ved hyppigere intervaller med lite vann om gangen. Strukturen til komposten er relativt stabil, men volumet vil reduseres noe da produktet nedbrytes videre. Ferdig produkt inneholder mesteparten av næringsstoffene til plantematerialet komposten er produsert fra. Til tross for dette vil store deler av nitrogenet gå tapt som ammoniakk og andre gasser under prosessen. De lett nedbrytbare karbonforbindelsene omdannes under prosessen, noe som fører til at lite nitrogen vil mineralisere fra sluttproduktet. C/N forholdet i materialet er viktig for kvaliteten på produktet ettersom de tilfører forskjellig næring og egenskaper (Brod & Haraldsen, 2017).

3.2.3 Spredning av arter fra fremmedartslista

Planter på fremmedartslista, tidligere Norsk svarteliste, omfatter ulike arter som truer de norske artene og biologisk mangfold. Disse er kategorisert i fem trinn som går fra svært høy risiko til ingen kjent risiko (Artsdatabanken, 2018). Fremmedartene sprer seg lett og raskt, er dyktige til å overleve i ulike miljøer og kan derfor utkonkurrere lokale arter. Dette fører til at områder med stor biodiversitet kan ende opp som monogame områder med kun denne ene fremmedarten. Blant disse er det enkelte som er mer alvorlige enn andre, slik som floghavre som i ekstreme situasjoner kan true deler av norsk jordbruk. På bakgrunn av dette skal ikke ferdig produkt inneholde spiredyktige frø av floghavre. Derfor kan forurensning med ugressfrø være en betydelig utfordring i kompost som kan bringe alvorlige konsekvenser (Brod & Haraldsen, 2017).

I Vesar sine områder skal fremmede arter behandles som restavfall gjennom forbrenning, men ikke alle avfallsbesittere har en oversikt over hvilke typer plantemateriale de leverer til behandling. Fremmede arter kan da bli med i hageavfallet til kompostering og kan spres videre derfra. Derfor er det viktig å ta hensyn til disse artene når hageavfallet blir behandlet, slik at spredning forhindres. Dette gjelder spesielt planter som er importert fra utlandet og ikke hører hjemme i det norske naturmangfoldet (Mattilsynet, 2017).

3.2.4 Plantesykdommer, tungmetaller og fremmedlegemer

Ferdig kompost fra park- og hageavfall skal registreres hos Mattilsynet. Fraksjonen kan inneholde plantesykdommer og andre skadegjørere. Disse kan smitte videre til andre planter, eller kan medføre skade på helse eller miljø ved bruk. Mattilsynet ønsker derfor å få inn informasjon om produktet, og hvordan det produseres med tanke på hygieniserings- og stabiliseringsmetode. Kravet om registrering er til for å forhindre produkter som kan være til skade for personer eller det biologiske mangfoldet.

Tungmetallinnholdet i komposten må registreres. Ved høye verdier av tungmetall skal produktet ikke benyttes til matdyrking da det kan være helseskadelig. Tungmetallene som skal legges ved analyserapporten er kadmium (Cd), bly (Pb), kvikksølv (Hg), nikkel (Ni), sink (Zn), kobber (Cu) og krom (Cr). §10 i forskriften om gjødselvarer mv. av organisk opphav tar for seg kvalitetskrav. Der blir lovlige verdier for nevnte tungmetaller oppgitt. Verdiene er presentert i Tabell 1. For å se på næringsinnholdet i ferdig produkt, gjennomfører Mattilsynet jevnlig kontroller, de tar også prøver for spiretest. Park- og hageavfallskompost er omfattet av forskriften om organisk gjødsel, og hjemmelen for registrering av ferdig produkt står i §11 (Mattilsynet, 2017).

Tabell 1 Maksimumsgrenser for tillatt innhold tungmetaller (Lovdata, 2021)

Kvalitetsklasser:	0	I	II	III
	mg/kg tørrstoff			
Kadmium (Cd)	0,4	0,8	2	5
Bly (Pb)	40	60	80	200
Kvikksølv (Hg)	0,2	0,6	3	5
Nikkel (Ni)	20	30	50	80
Sink (Zn)	150	400	800	1500
Kobber (Cu)	50	150	650	1000
Krom (Cr)	50	60	100	150

I 2020 ble det gjennomført et forsøk med bygg i pottes (Joner, et al., 2020). Forsøket benyttet tre ulike pottes - en uten og to med biokull, for å se hvordan det ville påvirke opptaket i plantene fra jorden. Resultatene viste at ved å tilsette biokull til plantejorden ville pH-verdien øke, men tilgjengeligheten av kobber (Cu), sink (Zn), bly (Pb) og kadmium (Cd) ble redusert.

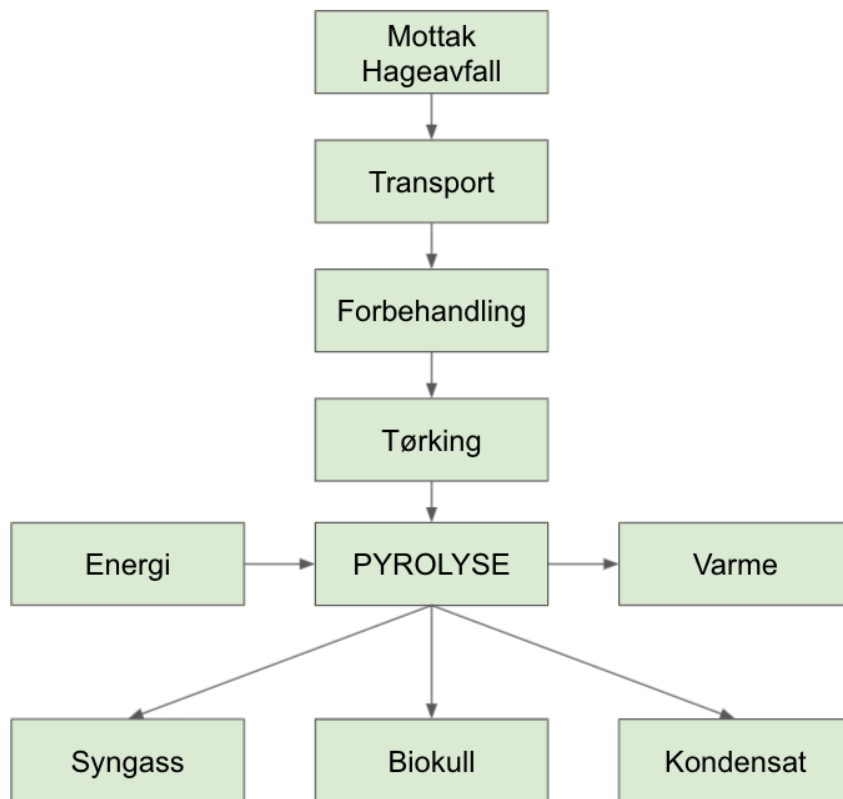
Når det kommer til fremmedlegemer i kompost er plast, glass og metallbiter de vanligste. Ifølge lovverket skal fremmedlegemer med partikkelstørrelse større en 4mm ikke utgjøre mer enn 0,5 vektprosent av totalt tørrstoff. Disse verdiene er gitt i § 10.6 i forskriften om gjødselvarer mv. av organisk opphav (Lovdata, 2021). Det er vanligvis lite fremmedlegemer i kompost av fraksjonen park- og hageavfall (Brod & Haraldsen, 2017).

3.3 Pyrolyse

3.3.1 Pyrolyseringsprosessen

Ordet pyrolyse betyr spalting (lyse) ved varme (pyro) (Eggen, et al., 2020). Pyrolyse er en termokjemisk og anaerob prosess. Termokjemi omfatter temperaturenergiendringer i en kjemisk prosess. Pyrolyse er en eksoterm reaksjon, som vil si at prosessen avgir varme (Pedersen, 2014). Det at prosessen er anaerob betyr at den foregår uten tilførsel på oksygen. Under pyrolyseprosessen gjennomgår substratet, her biologisk masse, endringer på et molekylært nivå (Brod & Haraldsen, 2017). Pyrolyse foregår med en kontrollert mengde fuktighet i substratet, normalt 20-25 %. I forkant av pyrolyseprosessen tørkes substratet for å få ned fuktinnholdet. Dette gjøres for at væskeinnholdet ikke vil påvirke pyrolyseprosessen, og for å minske mengden kondensat ut.

For å holde prosessbetingelsene anaerobe benyttes det i de fleste tilfeller nitrogen-gass. Gassen blir ført inn i reaksjonskammeret og er med i pyrolyseringsprosessen. Under prosessen blir materialet tilført energi som varmer opp substratet. For at varmen skal nå inn til kjernen må startproduktet være malt opp i mindre partikler. Pyrolyseprosessen er illustrert i Figur 6 på neste side.



Figur 6 Illustrasjon av pyrolyseprosessen

Pyrolyse kan deles inn i to typer, rask pyrolyse og treg pyrolyse, avheng av temperaturen og derav tiden det tar før partiklene er varmet til kjernen. Treg pyrolyse holder temperaturer mellom 350°C til 650° C og kan ta fra minutter til flere timer, mens rask pyrolyse foregår over få sekunder på 650° C eller mer. Hvor mye som blir produsert av hvert restprodukt - syngass, kondensat og biokull - kommer an på valgt pyrolyseprosess (Rambøll Norge AS, 2020; Thomassen, et al., 2017).

Prosessen kan foregå enten batch-vis eller kontinuerlig. De fleste teknologier på markedet i dag benytter en kontinuerlig prosess ettersom den potensielt har høyere kapasitet. Substratet blir kontinuerlig matet inn i reaksjonskammeret og kan dermed tas ut fortløpende. En utfordring ved pyrolyse er å holde reaksjonskammeret rent. Rengjørelse kan medføre driftsoppholdelse (Eggen, et al., 2020).

Substrat, partikkelstørrelse, temperatur, tid og nedkjølingsprosessen har mye å si for egenskapene til sluttproduktene og mengden produsert ved pyrolyse. Vesar ønsker å maksimere mengden biokull ut av prosessen. Biokullet er ønsket til produksjon av et jordforbedringsmiddel, og har derfor den største økonomiske verdien i dette tilfellet. Ved rask pyrolyse dannes det mest kondensat og syngass, mens det i treg pyrolyse dannes omtrent $\frac{1}{3}$ av hvert produkt (Rambøll Norge AS, 2020). Høyere temperaturer reduserer mengden produsert biokull, men hvilken temperatur som er optimal er forskjellig avhengig av substratet. Ifølge Soka og Oyekola (2020) og Thomassen et al. (2017) er treg pyrolyse på 450° C optimalt for dannelsen av biokull.

Hastigheten på oppvarmingen og nedkjølingen har også mye å si for prosessen og egenskapene til produktene (Danielsen & Xin, 2019). Rask oppvarming øker utbyttet av kondensat fra prosessen. Nedkjølingen er viktig for hvor mye biokull som genereres gjennom pyrolysen. Pyrolyseprosessen foregår uten tilgang på oksygen, men slutfasen og nedkjøling benytter seg av oksygen for å få ned temperaturen. Pyrolyseprosessen skjer ved høye temperaturer, og tilførselen av oksygen kan medføre at biokullet tar fyr og danner en askerest. Det er dermed viktig at temperaturen senkes under de anaerobe forholdene for å begrense askedannelse i slutfasen (Soka & Oyekola, 2020).

Med bakgrunn i tilgjengelig litteratur vil treg pyrolyse på rundt 450°C, moderat hurtig oppvarming og rask nedkjøling være mest aktuell for Vesar da disse forholdene gir størst utbytte i form av stabilt biokull som kan benyttes i landbruket.

3.3.2 Teknologier

Det finnes flere ulike teknologier som benyttes til pyrolysering. Noen av disse egner seg best til småskala pyrolyse og laboratorier, mens andre fungerer til mer kommersielle prosesser. I dette tilfellet er det de teknologiene som kan prosessere større mengder som er aktuelle. Dette er med tanke på mengde avfall som skal behandles for at det skal bli lønnsomt, samt hva som er lettest å operere under produksjon.

En av teknologiene benytter seg av mikrobølgebasert elektrolyse, kjent som mikrobølgeassistert pyrolyse (MAP). Lindum i Drammen gjennomfører per 2021 en pilot med et MAP-anlegg. En av fordelene ved teknologien er at den er relativt kompakt og kan dermed benyttes der det er mindre områder til rådighet, slik som på skip. Den Norske oppstartbedriften Scanship satser på MAP-teknologi. En ulempe ved denne teknologien er at den krever mer forbehandling for å forberede hageavfallet til pyrolyseprosessen. Pilotanlegget til Lindum og Scanship tester flere forskjellige typer substrat. MAP-teknologien deres krever substrat i mindre partikler, så de omformer substratet til pellets.

En annen mye brukt teknologi er basert på varmeovnteknologi, også kjent som konvensjonell pyrolyse (CP). Fordelen med denne teknologien er at produsert kondensat eller syngass kan føres tilbake til varmeovnen slik at anlegget driver seg selv. Det er viktig å ha tilstrekkelig med renseteknologi så utslippene er små og kontrollerte, og dermed påvirker det lokale og globale klimaet minimalt. I Sandnes kommune har de et slikt anlegg til produksjon av biokull. Etter oppstart kan anlegget drive seg selv ved å utnytte kondensatet og syngassen fra pyrolysen. Dermed er det eneste produktet de tar ut fra prosessen biokull. Ifølge prosjektleder Arne Jørgensen er teknologien de benytter fra Biomacan, et tysk selskap. Biomacan har også levert teknologi til Opplandske bioenergi, men i en større skala enn det Sandnes benytter. Varmen produsert under prosessen benyttes til å varme opp bygget og tørkeanlegget via vann som sirkulerer mellom områdene. Dette vil si at anlegget kan forsyne seg selv med varme. Ved korrekt forbrenning er det kun CO₂ som slippes ut av prosessen.

3.3.3 Produktene fra pyrolyse

Produktene fra pyrolyse er som nevnt biokull, kondensat og syngass. Pyrolyse av hageavfall består av det samme som hageavfallet, men i nye sammensetninger. Hageavfallet er i hovedsak satt sammen av karbon (C), hydrogen (H), oksygen (O), nitrogen (N) og svovel (S).

Alt park- og hageavfall kan pyrolyseres, men mengden av de ulike sluttproduktene som produseres samt kvaliteten på disse varierer avhengig av hva startproduktet inneholder. Hageavfallet inneholder cellulose, hemicellulose og lignin. Disse tre stoffene har ulike temperaturer de reagerer på, samt at de blir til ulike sluttprodukter.

Cellulose reagerer på 150-350°C og blir i stor grad til en kondenserbar damp (tjære), hemicellulose reagerer på 275-350°C og blir til gass, mens lignin reagerer på 250-500°C og danner biokull samt flytende restprodukt (El-Sayed, 2018). Mengdefordeling av disse produktene er avhengig av temperatur og trykk, og tilstedeværelse av en mineralkatalysator.

Biokull er et heterogent materiale som ligner trekull (Brod & Haraldsen, 2017). Positive egenskaper med biokull er at det er svært stabilt og brytes svært langsomt ned. Pyrolyseprosessen gjør at biokullet er fritt for patogener og frø fra fremmede arter. Biokullet har en høy pH-verdi på 9. Den høye pH-verdien påvirker plantene og mikroorganismene negativt (Brod & Haraldsen, 2017).

Biokull er et forholdsvis nytt produkt og det er foreløpig relativt lite forskning gjort på jordforbedringspotensialet. I en studie gjennomført i 2014 med solsikke ble resultatet at ved 75 % innblandet biokull med torv fikk det negativ virkning på planteveksten og antall planter (Steinar & Harttung, 2014). Fascella (2015) referer til et forsøk med biokull produsert fra bartrær. Biokullet ble blandet i ulike forhold med torv for å dyrke frem potteplanten *Euphorbia x lomi*. Resultatet ble at ved innblanding til opp mot 60 % biokull var plantene fortsatt av god salgbar kvalitet (Mckinnon, 2017). Biokull innblandet i jord har ingen negativ effekt på organismene som lever der, men det tilfører heller ingen næring til dem (Thomassen, et al., 2017).

Karbonlagring er en betegnelse på en prosess der karbondioksid (CO₂) blir hentet ut fra atmosfæren og lagres over kort eller lang tid. De største naturlige karbonlagrene finnes i hav, myr og skog. Andre eksempler på naturlig karbonlagring er i omdannet dødt organisk materiale som kull, olje og gass (Myhre, 2018). Med bakgrunn i at biokullet binder mellom 30-50 % av karbonet fra substratet og at det er hardført mot biologisk nedbrytning kan det anses som en form for karbonlagring (Thomassen, et al., 2017; Norsk Biokullnettverk, u.d.). I følge O'Toole (2012) brytes biokull i jord ned mindre enn 0,6 % over to år, mens Hammond et al. (2010) antar at biokullet brytes ned med 32 % over 100år (Tellnes, et al., 2017). Denne antagelsen baserer seg på at det er 75 % karbon i biokullet.

Tellnes et al. (2017) konkluderte med at mengden karbon lagret i biokullet etter 100 år vil være omtrent den samme som utslippene fra pyrolyseprosessen. Det vil si at de unngåtte utslippene er like store som utslippene fra produksjonen. Denne konklusjonen baserte seg på data fra en annen rapport publisert i 2017, og det er usikkert hvor representativ den er for norsk teknologi i dag.

I tillegg til at biokullet fanger opp og lagrer karbon, har den en positiv effekt for norsk landbruk. Biokullet holder godt på vann og næring, og fungerer som et oppholdssted for gunstige jordorganismer. Videre øker biokullet porøsiteten i jorda og gir en kalkningseffekt som flere typer norsk jord trenger. Disse egenskapene avhenger av humusinnholdet i jorda (Thomassen, et al., 2017).

Biokull produsert ved høye temperaturer brytes saktere ned enn biokull produsert ved lave temperaturer (Hale, et al., 2012). Dersom temperaturene overstiger en gitt temperatur, vil produksjonen av biokull gå ned. Etter at pyrolyseprosessen er ferdig, er det mulig å øke temperaturen ytterligere og sprøyte inn vann. Sammen med karbondioksid allerede frigjort i reaktoren reagerer vannet med biokullet (Hartnik, 2017). Overflatearealet til biokullet vil da øke kraftig. Prosessen kalles å aktivere kullet. Kull behandlet på denne måten fungerer bedre som jordforbedring. Derfor vil det være hensiktsmessig for Vesar at kullet blir aktivert. Aktivierungsprosessen skjer i en egen del av anlegget etter at pyrolyseprosessen er ferdig, før nedkjølingen. Aktivert biokull har stor overflate og er porøs, noe som gjør det spesielt godt egnet til å holde på vann, samt at det binder miljøgifter og næringsstoffer. Det kan dermed benyttes for å holde på miljøgifter på deponier, til å rense landområder eller for å holde på næringsstoffer som planter kan benytte seg av. I tillegg kan biokullet erstatte fossilt kull til energiproduksjon eller for eksempel under produksjon av silisium.

Gassfraksjonen som kommer ut fra pyrolyseprosessen kalles for syntesegass, eller syngass som er benyttet i denne oppgaven. Syngass inneholder ulike kombinasjoner av karbon, hydrogen og oksygen som CO_2 , H_2O , CO , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_6H_6 , CH_4 , H_2 , samt tungmetaller som bly (Pb), sink (Zn), kobber (Cu), kvikksølv (Hg) og lignende i gassfase. Ettersom nitrogen ofte blir benyttet for å holde prosessen anaerob vil denne også reagere i prosessen og det vil dannes blant annet NO_x -gass.

Syngassen kan benyttes til oppvarming, i biogassproduksjonen eller til hydrogenproduksjon. Dersom syngassen benyttes til oppvarming vil den brennes, og da er det viktig å ha rensesanlegg som renser for skadelige stoffer og gasser. Sandnes sitt anlegg brenner syngassen til drift av anlegget, og ifølge IVAR er det eneste betydelige utslippet karbondioksid ved riktig forbrenning. Det er gjort enkle forsøk av bedriften Wai med å føre inn syngassen i biogassproduksjonen, noe som har gitt gode resultater med økt mengde biogass produsert. I tillegg kan syngassen spaltes for å produsere hydrogengass som kan selges kommersielt. Syngassen har flere bruksområder, og hva som er den beste bruken kommer an på hvilke egenskaper produsenten har størst behov for.

Ved å kjøle ned eller kondensere gassen fra pyrolyseprosessen dannes det en flytende fraksjon kalt kondensat eller bioolje. Navnet kondensat kommer av at den består av kondensert syngass. Kondensatet inneholder hydrokarboner på lik linje med olje, men også en del oksygen som binder seg og danner vandige forbindelser. I tillegg inneholder kondensatet en form for tyktflytende tjære. Kondensatet har en pH-verdi på rundt 2,5 og er brennbar. Kondensatet kan benyttes som jordforbedringsmiddel og plantevern (Hartnik, 2017). Den kan også raffineres videre til drivstoff, eller brennes for energi og varme. Ikke alle anlegg velger å kondensere syngassen.

Ved pyrolyse dannes det også aske og varme, som ved andre lignende forbrenningsprosesser. Alt som går inn i pyrolyseprosessen blir en del av produktene som kommer ut. Asken inneholder derfor også sand og småstein, i tillegg til karbon, hydrogen og oksygen. Pyrolyseprosessen er eksoterm og produserer varme. Det er gunstig å benytte varmen videre til for eksempel å tørke substratet eller som fjernvarme.

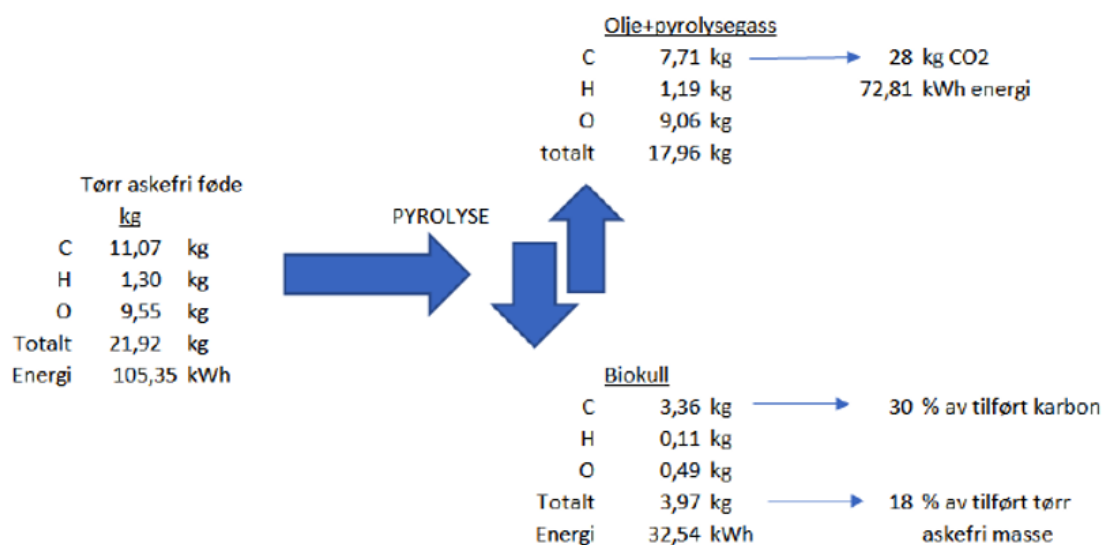
3.3.4 Massebalanse ved pyrolyse

Mellom 20-35 % av massen som går inn i pyrolysen blir omdannet til biokull. De resterende massene går til syngass og kondensat, mens en liten del blir til aske. Opp mot 50 % av karbonet går til biokullet, og resten til de andre produktene (Thomassen, et al., 2017; Norsk Biokullnettverk, u.d.). Usikkerheten rundt prosentandelene kommer av at det er mange variabler som spiller inn, herunder temperatur, hastighet på prosessen og sammensetningen av materiale som går inn. Tabell 2 viser at i forsøket til Wai ble om lag 32 % av hageavfallet omgjort til biokull. I dette forsøket ble 18 % omgjort til kondensat og 50 % omgjort til syngass.

Tabell 2 Relevante resultater fra pyrolyseforsøk utført av WAI (Danielsen & Xin, 2019)

Hva	Inn	Biokull		Kondensat		Syngass	
Mengde	kg	kg	%	kg	%	kg	%
Hageavfall	29,3	9,3	32	5,3	18	14,7	50
Reject fra Matavfall	14,9	3,7	25	5,1	34	6,1	41

Park- og hageavfall er en samlebetegnelse for flere ulike typer treverk. Derfor er det vanskelig å si spesifikt hva den kjemiske sammensetningen for avfallet er. Basert på ulike typer treverk kan en benytte $C_{17}H_{24}O_{11}$ som den kjemiske sammensetningen for samlebetegnelsen hageavfall. Figur 7 viser hvordan fordelingen av grunnstoffer kan være ved pyrolyse av hageavfall.



Figur 7 Massebalanse for tørt, askefritt hageavfall (Rambøll Norge AS, 2020)

Tabell 2 og Figur 7 viser til ulike tall til tross for at de begge har sett på pyrolyse av hageavfall. Dette gjenspeiler igjen forskjellene ved behandling og sammensetningen av materialet. For å innhente bedre sammenlignbare data for massebalansen til et anlegg hos Vesar bør et substrat av park- og hageavfall testes ved pyrolysing på ulike anlegg.

3.3.5 Energibalanse ved pyrolyse

Mesteparten av energien i materialet som går inn i prosessen fordeles til produktene, mens den resterende delen blir en del av prosessen. Rundt 30 % av energien går til biokullet. Dette betyr at pyrolyseprosessen danner et overskudd av varme. Derfor vil det være hensiktsmessig å se på utnyttelse av overskuddsvarmen til andre systemer på industriområdet (Danielsen & Xin, 2019).

Tabell 3 Energibalanse for pyrolyse (Danielsen & Xin, 2019)

	Inn (GWh/år)	Ut (GWh/år)
Hageavfall	69	-
Energi	4,3	20
Syngass	-	12,7
Kondensat	-	20,7
Biokull	-	9,2
Total:	73,3	62,6

Som Tabell 3 viser, er det beregnet at mer energi går inn i prosessen enn ut av den. Deler av energitapet kan forklares ved at den teoretiske energien til biomassen er regnet ut ifra vekten. Småstein vil ikke bli omdannet til noe og vann krever energi til fordamping. Altså vil de teoretiske energimengdene være høyere enn de faktiske energimengdene i substratet. I tillegg kan varmetap i løpet av prosessen forklare noe av svinnet. Pyrolyse er en eksoterm reaksjon som slipper ut store mengder varme, og det er ikke alt som blir fanget opp og kan brukes videre.

Scanship satser på MAP, og ifølge selskapet trengs 250 - 450 kWh elektrisk energi for å pyrolysere et tonn avfall. Det vil si at det trengs omkring 3,7 – 9,0 GWh elektrisk energi for å behandle Vesar sine 15 000 – 20 000 tonn hageavfall. Pyrolyse gjennomført med bruk av CP krever mer energi enn MAP for å oppnå høye nok temperaturer ettersom teknologien konverterer energien til varme fremfor å benytte mikrobølger som er en mer effektiv konvertering (Zaman, et al., 2017). Basert på energiforbruk bør Vesar satse på MAP-teknologi.

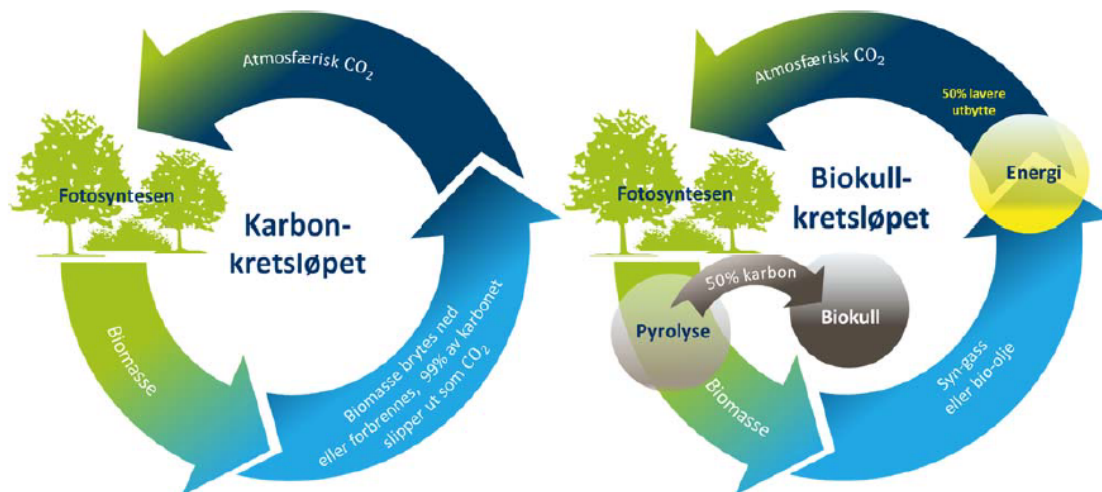
3.4 Miljøvurderinger

3.4.1 Miljøvurderinger

Ved å se på miljøvurderinger for kompostering og pyrolyse kan utslippene sammenlignes. Et problem ved eksisterende litteratur er at målingene ikke er gjort med samme grunnlag. Noen analyser ser på mengde råmateriale inn til prosessen, andre gjør beregninger for mengde produkt ut av prosessen. I tillegg kan systemgrensene for utslippsberegningene være forskjellige. Oppgaven vil likevel prøve å vurdere eksisterende litteratur for å finne beste løsning for Vesar.

3.4.2 Biogent karbon

Ettersom substratet i begge systemene er biologisk avfall, starter diskusjonen om hvorvidt utslippene skal være med i klimaregnskapet eller ikke. Bakgrunnen for dette er at biologisk materiale over tid vil brytes ned, noe som fører til klimagassutslipp. Hovedforskjellen mellom systemene er at utslippene ved behandling kommer raskere og mer samlet. I tillegg vil det kunne oppstå noen nye forbindelser under pyrolyseprosessen som kan føre til andre utslipp. Forringingstiden er vanligvis rundt 100 år, men det kommer an på det biologiske materiale.



Figur 8 Karbonkretsløpet med og uten pyrolyse, hentet fra (Thomassen, et al., 2017)

Figur 8 viser kretsløpet til karbon og biokull. I det vanlige kretsløpet omdanner planter karbondioksid i atmosfæren til egen energi og oksygen via fotosyntesen. Når planten hogges, klippes eller kuttet stopper denne prosessen og det opplagrede karbonet slippes ut igjen etter hvert som planten brytes ned. Nye planter vokser til og omdanner mer karbondioksid fra atmosfæren, og kretsløpet er sluttet. Dette kretsløpet gjelder også ved kompostering av biomassen. Tar man med pyrolyse og produksjon av biokullet i regnskapet vil opp til 50 % av karbonet bli hentet ut fra biomassen og lagret i lengre tid i biokullet fordi biokullet er motstandsdyktig mot biologisk nedbrytning. Resterende karbon fra pyrolyseprosessen er fordelt i kondensatet og biokullet. Ved utnyttelse av disse får man energi i tillegg til utslippene. Fordelen er mindre utslipp ettersom store deler av karbonet er lagret, og man fjerner dermed karbon mer permanent fra atmosfæren.

3.4.3 Miljøvurdering kompostering

Direkte utslipp fra kompostering av park- og hageavfall er karbondioksid (CO_2), metan (CH_4) og lystgass (N_2O). Fordi karbonutslippet regnes som biogent, anses det ikke for å ha en klimateffekt ved vanlig livsløpsmetodikk. Ved høy fuktighetsgrad i komposittmaterialet, nitrogenrikt materiale, få vendinger under prosessen og lagring som fører til for lite luft, blir det dannet økte mengder av metan og lystgass. Utslippene fra komposteringen avhenger derfor i stor grad på kompostmateriale, mengder tilført strukturmateriale, størrelsen på knust hageavfall og hvordan anlegget driftes.

Ferdig kompost vil ut fra komposteringen ha et fotavtrykk på 87 kg CO_2e per m^3 . Innenfor systemgrensene for dette estimatet er direkteutslipp av klimagasser. Mer spesifikt slippes det ut 415 kg CO_2 , 3,08 kg CH_4 , 0,007 kg N_2O i prosessen for hver m^3 produsert kompost (Tellnes, et al., 2017). Mesteparten av disse utslippene er kontinuerlige og går rett ut til luften uten noen form for rensing. Andre utslippsformer som miljøgifter, plantevernmidler, plast og tungmetaller vil bli i komposten og dermed kunne komme ut i naturen igjen ved bruk. Det blir tatt tester av ferdig produkt for å sjekke verdiene. I tillegg blir om lag 14 % av karbonet, som hageavfallet originalt inneholdt, bundet i jorden (Bouldrin, et al., 2010).

3.4.4 Miljøvurdering pyrolyse

Utslippene fra pyrolyse avhenger av flere ulike faktorer. Blant annet har anleggstypen, temperaturen i prosessen, type materiale som tas inn, type renseanlegg og hva som skjer med restproduktene stor betydning for de totale utslippene. Massestrømmen inn vil være lik massestrømmen ut, men sammensetningen vil være annerledes. Fordelen med pyrolyse er at det er en lukket prosess, så utslippene fra biomassen kommer i form av produktene. Spesielt ved forbrenning av kondensatet og syngassen vil det være utslipp av både partikler og karbondioksid (CO₂). Fra rapporten skrevet av Tellnes, et al. (2017) kommer det frem at de største utslippene i tilknytning til produksjon av biokull ved pyrolyse er selve pyrolyseprosessen.

En positiv effekt av pyrolysen er at plast, organiske miljøgifter og smittestoffer blir destruert under prosessen. Dette kommer av at temperaturen blir høy nok til at molekylene mister strukturen. Dessverre er disse temperaturene også så høye at enkelte tungmetaller går over til gassform for så å kunne bli med syngassen videre eller kondensere inn i kondensatet. Noen av tungmetallene blir også igjen i biokullet og i asken. Mengden tungmetaller i biokull produsert fra park- og hageavfall vil være lave da substratet inneholder lite (Thomassen, et al., 2017).

Polysykliske aromatiske hydrokarboner (PAH) blir også dannet under pyrolyseprosessen. PAH har kreftfremkallende og muterende egenskaper. Det dannes mest PAH før temperaturen når 350°C. Etter dette vil de forsvinne igjen grunnet den høye temperaturen. Biokull produsert ved over 350°C representerer derfor ingen risiko (Thomassen, et al., 2017). Mengdene PAH i biokull er generelt svært lavt og kun en liten del er antatt biotilgjengelig. Et forsøk utført med flere typer biokull viser at verdiene PAH i ferdig biokull er lavere enn for rapporterte rene urbane sedimenter (Hale, et al., 2012).

Under pyrolyseprosessen blir karbonet i substratet bundet til biokullet som er et stabilt produkt. Dette gjør at biokull er en form for CCS. I følge NIBIO sin rapport fra 2019 om karbonbinding i jordbruksjord vil det ved produksjon av 1 tonn biokull bli bundet opptil 3,6 tonn CO₂e (Rasse, et al., 2019). Ved å tilføre biokull til jord vil det naturlige utslippet av lystgass (N₂O-gass) reduseres. Dette er med på ytterligere styrke det klimareduserende bidraget fra biokull (Thomassen, et al., 2017).

3.4.5 Sammenligning av miljøvurderingene

Tabell 4 under viser at utslippene fra kompost og pyrolyse er relativt forskjellige. Utslippene fra komposten kan deles inn i klimagassutslipp i form av karbondioksid, metan og lystgass, samt at tungmetaller, miljøgifter og plast vil være igjen i komposten. Fra pyrolyseprosessen er utslippene lavere siden prosessen er lukket. Utslippene kommer dermed fra bruk av produktene. Ved forbrenning av biokull, syngass eller kondensatet vil det bli sluppet ut karbondioksid. Biokull benyttet som en del av jordforbedringsprodukter vil beholde karbonet lagret over lengre tid, og fungerer dermed som CCS.

Tabell 4 viser en oversikt over hvilke større utslipp som kommer med kompostering og pyrolyse. Noe å merke seg er at det vil være en større mengde av CO₂-utslipp ved kompostering enn pyrolyse ettersom biokullet lagrer mer karbon. Karbonmengden lagret av biokullet er på mellom 30-50 %, mens mengden lagret karbon i kompost bare er på 14 % (Boldrin et.al, 2010).

Tabell 4 Oversikt over utslippstyper fra kompost og mulige utslipp fra pyrolyse

Utslippstype	Kompost		Pyrolyse		
	I komposten	Utslipp til luft	Fast	Flytende	Gass
CO ₂		X			X
CH ₄		X			X
N ₂ O		X			
NO _x					X
SO _x					X
H ₂					X
H ₂ S		X			
Miljøgifter	X				
Tungmetaller	X		X	X	
Plast	X				

Owsianiak et al. (2021) ser på den økonomiske og miljømessige effekten av å benytte biologisk avfall for biokull-produksjon til landbruket i Etiopia, Indonesia, Kenya, Peru, Vietnam og Kina. To typer teknologi ble benyttet til pyrolysingen, *flame curtain kiln* og forgasser. Førstnevnte ble benyttet i rurale områder, mens sistnevnte ble benyttet i mer urbane strøk. Resultatene ble sammenlignet med kompostering, henholdsvis hjemmekompostering og rankekompostering. Resultatet var at pyrolysen kom best ut miljømessig i alle tilfellene, sammenlignet med komposteringen. Forgasseren viste de beste resultatene med tanke på miljøeffekten. Artikkelen konkluderer med at begge formene for pyrolysing av hageavfallet er mer miljøvennlig i alle seks utviklingslandene (Owsianiak, et al., 2021).

Artikkelen til Owsianiak et al. (2021) er basert på nyere data og er i så måte representativ for dagens situasjon. Studien er gjennomført i tropiske områder og med et tropisk substrat som kan ha påvirkning på prosessen og dermed på resultatet. Til tross for dette viser artikkelen at pyrolyse er mer klimavennlig enn kompost i alle tilfellene undersøkt, som antyder at pyrolyse som behandlingsalternativ er mer klimavennlig enn kompostering.

4. Metodikk og datagrunnlag

4.1 Valg av metode

Dette kapittelet gjør rede for de ulike metodiske valgene gjort i oppgaven. Metodevalget er gjort på bakgrunn av problemstillingen og forskningsspørsmålene, og det blir derfor naturlig å benytte både kvantitativ og kvalitativ metode for å besvare de ulike forskningsspørsmålene. Det meste av oppgaven er bygd opp på sekundærdata (Wolf, 2016).

Fordi de tre første forskningsspørsmålene omhandler masse og energibalanse, utslipp knyttet til transport og klimapotensiale, er det relevante å besvare disse ved bruk av kvantitative data. Datagrunnlaget for klimagassberegningene for pyrolyse kommer fra Lindum og Scanship ved Thomas Hartnik, Pål Jahre Nielsen og Nataliia Kasan. Siden Vesar allerede er i kontakt med Scanship, benyttes data fra deres MAP-anlegg fordi dataene er relevant for Vesar og fordi det har gjort datainnsamlingen enklere. Fra det samme anlegget er det også innhentet data til material- og energibalansen, samt verdier av interessante forbindelser i ferdig biokull. Data til transportanalysen er hentet fra Vesar sine egne rapporter.

Det siste forskningsspørsmålet omhandler spredning av fremmede arter, plantesykdom, miljøgifter og fremmedelementer fra behandlingen og utnyttelse. For å besvare dette blir det benyttet kvalitative data i form av både en litteraturstudie og intervjuer. Førstnevnte inngår i kunnskapsgrunnlaget. Det er valgt å samle inn mer data ved bruk av semistrukturerte intervjuer. Dette er gjort både for å få oversikt over omfanget av disse utfordringene i Norge per 2021, samt for mer innsikt rundt temaet.

4.2 Litteraturstudie

Kunnskapsgrunnlaget for oppgaven og deler av datagrunnlaget til analysene er basert på en litteraturstudie. Studien undersøkte tidligere livsløpsanalyser, rapporter og andre relevante artikler og vurderinger rundt kompost og pyrolyse. Litteraturstudiet ble gjennomført for å undersøke status på dagens kunnskapsnivå og for å få en mer helhetlig forståelse rundt temaet. Studiet ble gjennomført både i forkant av prosjektets tidsperiode og underveis.

Databasene Web of Science, Oria og Google Scholar ble i hovedsak benyttet for å finne relevant data og litteratur. Et utvalg av de mest brukte søkeordene er vist i Tabell 5. Søkeordene ble brukt både alene og i ulike kombinasjoner for å finne relevant litteratur. I starten var søkene brede for å skaffe en grunnleggende forståelse. Da dette var oppnådd ble det relevant med mer dypdykk innen mindre tema. Science Direct og Elsevier er også benyttet til å finne relevante artikler. De har i tillegg en funksjon der man kan få varsel hver gang en artikkel innen et bestemt tema blir utgitt. Denne funksjonen gjør det enklere å holde seg oppdatert på nytt materiale.

Tabell 5 Utvalg av søkeord til litteraturstudie

Søkeord		
Norsk	Engelsk	
Pyrolyse	Pyrolysis	LCA
Kompostering	MAP	Organic waste
LCA	CP	Green waste
Park- og hageavfall	Biochar	Garden waste
Organisk avfall	Compost	MFA

I tillegg til kunnskapen innhentet fra informantene i løpet av intervjuene, har også enkelte ettersendt relevante artikler og videoer innen temaet. Kildehenvisninger i valgt litteratur er også benyttet for å finne kilden til enkelte utsagn.

4.3 Material- og energibalanse

Materials flow analysis (MFA) er en kvantitativ prosedyre for å bestemme flyten av materiale og energi gjennom et system. Det er spesielt benyttet innenfor miljøsystemanalyser og som et miljøledelsesverktøy. MFA analyserer inngående og utgående materialstrømmer og ser på bevegelsen, lagringen og transformasjonen av materialer innenfor et system og med dets omgivelser (Rochat, et al., 2013). I denne oppgaven er det relevant å se på flyten av energi inn og ut av systemene, fordeling av park- og hageavfallet til ferdige produkter, og karbonet.

Datagrunnlaget for å besvare dette forskningsspørsmålet kommer fra Scanship og målinger de har gjort på sine egne pyrolyseanlegg. Data er derfor representativt for MAP-anlegg av den typen de benytter. For å kunne ha et sammenligningsgrunnlag mot kompost er det valgt å snakke med Harald Aanes som er daglig leder av Oslokompost for data fra hans anlegg, samt å benytte eksisterende litteratur.

4.4 Transportanalyser

Park- og hageavfall er en lett og voluminøs fraksjon, og det er derfor interessant å se hvor stor del av utslippene fra behandling av fraksjonen som stammer fra transport. Data benyttet for å gjøre beregningene kommer fra 2020 og er derfor representative for perioden oppgaven dekker. Det er verdt å merke seg at Vesar har signert nye kontrakter for behandling av park- og hageavfallet de får inn. Hvor avfallet fra de ulike gjenvinningsstasjonene sendes for behandling er dermed litt annerledes fremover enn det var i 2020. Dette vil ikke påvirke mengdene samlet inn per gjenvinningsstasjon, kun transportavstand for deler av mengden.

Det ble gjort to ulike beregninger. Det første er basert på systemet slik det fungerte i 2020, mens det andre er basert på hvordan det vil fungere dersom Vesar behandler park- og hageavfallet selv på eget område med pyrolyse. Det er lite forskjell i total distanse mellom transportløsningen i 2020 og slik logistikken vil bli etter at den nye kontrakten trer i kraft 1.mars 2021. Årlig avstand for transport i 2021 er presentert i vedlegget, kapittel 10.2. Det er valgt å ikke gjøre videre estimerer spesifikt for dette alternativet. Transport til oppsamlingspunkt og fra behandlingsområdet er heller ikke tatt med.

Datagrunnlaget består av tall fra de ulike gjenvinningsstasjonene måned for måned gjennom hele 2020. Rapportene for de ulike gjenvinningsstasjonene er av god kvalitet med klart markerte datoer, mengder og type avfall. Data fra Grinda miljøstasjon er mangelfull og de har ikke rapportert på innsamlet mengde park- og hageavfall. Dette gjør at data fra Grinda ikke blir tatt med videre i beregningene. I tillegg til mengdene fra gjenvinningsstasjonene får Vesar også inn parkavfall direkte fra parker som er i kommunal regi. Dette er heller ikke tatt med i beregningene av transport grunnet mangel på gode data.

Microsoft Excel er benyttet for å lage en oversikt over innsamlede mengder for hver gjenvinningsstasjon, samt antall tømminger registrert. Videre er veibeskrivelsesfunksjonen i Google Maps benyttet for å finne avstanden mellom gjenvinningsstasjon og behandlingssted. Antall km årlig tilbakelagt er beregnet ut ifra antall tømminger som er registrert fra hver gjenvinningsstasjon multiplisert med avstanden mellom gjenvinningsstasjonen og behandlingssted. Utslippene er beregnet ved å multiplisere den årlige distansen med utslipp per km for valgt transportmiddel. Utslippsdata er hentet fra Ecoinvent 3.6 Cut-off gjennom Sima Pro, med metode IPCC 2013 GWP 100a 1.3.

4.5 Livsløpsanalyse

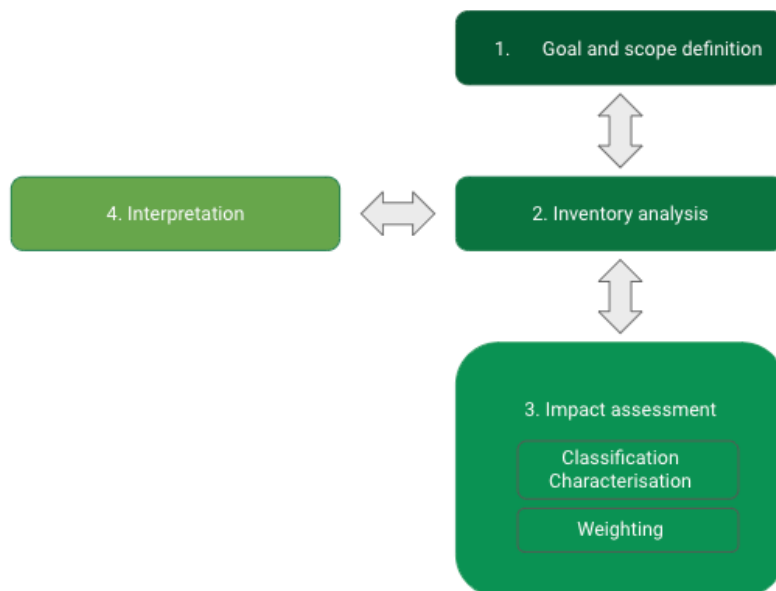
4.5.1 Introduksjon livsløpsanalyse

En livsløpsanalyse eller Life Cycle Assessment (LCA) er en systematisk analyse for å evaluere miljømessige konsekvenser knyttet til et produkt, produksystem eller en aktivitet. LCA tar for seg hele livsløpet, fra utvinning av råvarer via transport, produksjon og bruk til avfallshåndtering. Formålet med en LCA er å skape et enhetlig beslutningsgrunnlag basert på sammenlignbare forutsetninger og datagrunnlag. Miljøbelastning og utslipp er basis for analysene (Nestaas & Grønmo, 2020). Metoden er i stor grad benyttet for å skape et helhetlig bilde på ulike prosesser som blant annet avfallshåndtering (Christensen, et al., 2020). LCA-metodikken er internasjonalt standardisert gjennom ISO 14040-14044-standardene. Ifølge ISO 14040-standarden skal en LCA inneholde en fastsettelse av hensikt og omfang, livsløpsregnskap, effektvurdering og tolkning. En oversikt over de fire fasene er presentert i Figur 9. I den første fasen spesifiseres forventet bruksområde, hvorfor analysen utføres og målgruppen. I tillegg skal den inneholde funksjonell enhet, systemgrenser, allokeringsprosedyrer, forutsetninger og begrensninger (Stiftelsen Østfoldforskning, 2002).

Den andre fasen inneholder en kvantifisering av energibruk, råmaterialer, utslipp og avfall til de ulike fasene i livssyklusen. Datakvalitet er et viktig punkt med tanke på troverdighet og bruk av analysen. Data blir delt inn i to hovedgrupper: forgrunns- og bakgrunnsdata. Forgrunnsdata kommer direkte fra det analyserte systemet eller fra nærmeste ledd oppstrøms. Bakgrunnsdata er data som finnes i andre databaser og i statistikk. Denne typen data kan ha ulik kvalitet og relevans for det analyserte systemet. Derfor er det viktig å vurdere dataenes representativitet når det kommer til tid, geografi og teknologi (Golsteijn, 2020).

Den tredje fasen, effektvurdering, tar for seg betydningen av mulige miljøpåvirkninger. Mer spesifikt skal denne fasen karakterisere utslippene og velge påvirkningskategorier for analysen. Valgte påvirkningskategorier har betydning for resultatet og velges på bakgrunn av formålet med LCAen. I tillegg vil tidshorisonten ha betydning for hvilke utslipp man inkluderer og vekting av disse, basert på oppholdstid i atmosfæren (Miljøstyrelsen, 2005).

Siste fase, tolkning, går ut på å tolke resultat, trekke konklusjoner, forklare begrensningene og å gi anbefalinger. Robustheten i resultatene kan testes ved å gjennomføre en følsomhetsanalyse eller en statistisk simulering. I tillegg bør den praktiske betydningen av resultatene komme frem (Stiftelsen Østfoldforskning, 2002).



Figur 9 De fire hovedfasene i en livsløpsvurdering

Det er vanlig å skille mellom regnskapsmodellering (attributional) og konsekvensmodellering (consequential) i en LCA. Regnskapsmodellering benytter et gjennomsnittlig produktsystem basert på observasjoner og historisk data, mens en konsekvensmodellering setter søkelys på å beskrive hvordan endringer påvirker systemet. Endringene har ofte bakgrunn i politiske avgjørelser. Analysen gjøres dermed på antagelser om hvordan systemet vil se ut i fremtiden (Weidema, 2018). I denne oppgaven er det valgt å benytte regnskapsmodellering, til tross for at oppgaven tar for seg et fremtidig system det ikke finnes et regnskap for. Datagrunnlaget blir dermed satt sammen fra eksisterende og representative anlegg.

4.5.2 Hensikt og omfang for det analyserte systemet

Formålet med analysen er å skape et beslutningsgrunnlag basert på klimautslipp knyttet til systemet med pyrolyse som behandlingsmetode for park- og hageavfallet til Vesar. Fra en vurdering av resultatene skal det være mulig å trekke en konklusjon av om pyrolyse kan være mer klima- og miljøvennlig enn kompostering.

Som nevnt i kapittel 2, mål og problemstilling, vil analysen se på hvor mye transport av fraksjonen fra miljøstasjonene til behandlingsområdet har å si for de totale utslippene, hvilke behandlingsalternativ som har de laveste utslippene og om det er andre faktorer som vil kunne påvirke valget.

4.5.3 Funksjonell enhet og referansestrøm

Funksjonell enhet er en felles enhet som legger grunnlaget for gjennomføringen av en sammenlignbar analyse. Enheten er en kvantifiserbar størrelse (LCA, 2015). Den funksjonelle enheter for denne oppgaven blir dermed:

Behandling av 1 tonn park- og hageavfall innsamlet hos Vesar.

Bakgrunnen for valgt funksjonell enhet er basert på hva som er hensiktsmessig å se på med tanke på problemstillingen. Fokus i oppgaven er håndtering av park- og hageavfall, og dette blir reflektert i den funksjonelle enheten. I annen litteratur er det ofte valgt en annen funksjonell enhet som i større grad reflekterer artikkelens mål. Et eksempel på dette kan være å se på utslipp fra 1m³ anvendt dyrkingsmedium eller per kg biokull/kompost produsert.

4.5.4 Systemgrenser

Systemet starter når avfallet kommer inn på gjenvinningsstasjonene til Vesar. Dermed inkluderer systemet ikke transport til gjenvinningsstasjonene gjort av avfallsbesitter, men transport fra disse og til behandlingssted i regi av Vesar. Nødvendig forbehandling før kompostering og pyrolysen kan gjennomføres, og selve prosessen er inkludert. Transport av produktene etter behandlingen, oppgradering og pakking er satt utenfor systemgrensene for analysen. Produksjon og transport av pyrolysemaskinen og andre større maskiner er ikke inkludert i analysen. Tabell 6 viser en oversikt over hva som er inkludert og ikke inkludert innenfor systemgrensene.

Tabell 6 Inkluderte og ikke inkluderte prosesser i systemgrensene

Inkludert	Ikke inkludert
+ Transport fra gjenvinningsstasjon til behandling	– Produksjon av avfallet
+ Forbehandling av avfallet	– Transport til gjenvinningsstasjon
+ Utslipp fra behandlingsprosessen	– Produksjon av pyrolyseanlegg
+ Utslipp fra produktene ved bruk	– Infrastruktur
	– Oppgradering av produkt

Behandling av park- og hageavfall kan sees på som avfallshåndtering eller sekundære råmaterialer. I denne oppgaven er det mest naturlig å følge materialet, park- og hageavfall, og å se på behandlingen som avfallshåndtering. Livsløpsfasene inkludert i analysen er transport av avfallet fra gjenvinningsstasjonene til behandlingssted (C2) og avfallsbehandlingen (C3) som vist i Figur 10 (LCA.no, 2020).

Produktfase			Konstr/ install.fase		Bruksfase					Slutfase			
Råmaterialer	Transport	Tilvirking	Transport	Konstruksjons og Installasjon	Bruk	Vedlikehold	Reparasjon	Utskifting	Renovering	Demontering	Transport	Avfallsbehandling	Avfall til sluttbehandling
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4

Figur 10 Livsløpsfaser for de analyserte systemene hentet fra (EPD Norge, u.d.)

4.5.5 Allokering

Standarden EN 15804 omhandler allokeringsprosedyrer. Slike prosedyrer forekommer ved prosesser som har flere input- og outputverdier, såkalte multifunksjonalitetsproblemer. I utgangspunktet er slike situasjoner ikke gunstig og unngås så langt det lar seg gjøre. ISO 14040 og 14044 omtaler dette punktet. Å unngå multifunksjonalitet kan ofte være utfordrende, og systemutvidelse er ofte brukt for å styre unna problemstillingen. Oppsplitting av prosessen er også en mulighet (Curran, 2015). Allokering kan foregå med hensyn på masse, volum eller økonomi.

Oppstrøms produksjon av materialer som drivstoff og energi til varme eller strøm er inkludert i «krybbe til grav»-tankegangen (Dong, et al., 2018). Fordelen ved disse nødvendige bi-produktene blir allokert ved hjelp av systemutvidelse. Data for både drivstoff og strøm benyttet i prosessen kommer fra Ecoinvent 3.6 Cut-off i Sima Pro. Den valgte metoden og karakteriseringsfaktoren er IPCC 2013 100a, som ser på GWP i et 100-års perspektiv.

4.5.6 Cut-off

Denne analysen inkluderer alle relevante prosesser innenfor systemgrensene, med noen forenklinger og antagelser. Normalt settes det en cut-off-grense til 1%, og prosesser med lavere bidrag enn dette neglisjeres. Dette kan være basert på økonomisk bidrag eller massebidrag. Cut-off-kriteriet gjelder ikke for farlig materiale og stoffer da små mengder kan ha store konsekvenser (LCA.no, 2020).

4.5.7 Valg av dataverktøy

Analysen er gjennomført i Microsoft Excel ettersom dette er mest hensiktsmessig med tanke på eksterne data og fremstilling av ulike tabeller og figurer. Sima Pro, som er et av de ledende verktøyene på markedet innenfor LCA, er benyttet for å hente data for enkelte prosesser som transport og energibruk. Sima Pro er. Programmet er koblet opp mot ulike databaser som gir tilgang til mye data og en rekke prosesser fra ulike produksjoner og produsenter (Curran, 2015, p. 115).

4.6 Intervjuer

For å besvare det siste forskningsspørsmålet ble det naturlig å samle inn kvalitative data ved intervjuer. Intervju er betegnelsen på en samtale der en part innhenter informasjon fra en annen part (Orgeret, 2018). Intervjuene som ble gjennomført var semistrukturerte. Denne intervjumetoden gir informantene mulighet til å utdype og forklare svarene sine, samt at samtalen kan komme inn på andre relevante tema enn det som originalt var tiltenkt (Maguire & Delahunt, 2017).

Informantene ble valgt basert på deres kunnskap innen fagfeltet. Se Tabell 7 for oversikt over informantene. Det ble valgt å intervju 1-2 personer innen hvert hovedområde: biologi, regulering og kompostering, samt andre spesialister på relevante tema for å få en bredere forståelse rundt tematikken. Enkelte av informantene ble anbefalt av hovedveileder Ole Jørgen Hanssen og Terje Kirkeng. Andre er funnet gjennom relevant litteratur og artikler, og noen har blitt anbefalt av informantene etter at deres intervju var gjennomført.

Tabell 7 Oversikt over informanter

Navn	Firma	Tittel
Linnea Wang	Mattilsynet	Seniorinspektør (plantehelsetilsyn), avd. Vestfold
Jens Måge	Avfall Norge	Fagrådgiver bioavfall, tekstiler og biologisk behandling
Zeben Putnam	Lindum	Prosess og oppfølgingsansvarlig
Einar Stuve	Oplandske bioenergi	Daglig leder
Kristina Mørk Jacobsen	Vesar	Prosjekt- og leverandøransvarlig
Harald Aanes	Oslokompost	Daglig leder
Micael Wendell	Vitenskapskomiteen for mat og miljø	Prosjektleder faggruppen for plantehelsetilsyn
Siv Mari Aurdal	NMBU	Stipendiat
Erik J. Joner	Nibio	Seniorforsker, divisjon for miljø og naturressurser

I forkant av intervjuene fikk informantene tilsendt et samtykkeskjema. Skjemaet inneholdt informasjon om formålet med prosjektet, prosessen og deres rettigheter, samt forespørsel om lov til å lagre opptak av intervjuet frem til prosjektets slutt. Ved å signere samtykkeskjemaet tillater informantene også at de blir henvist til i teksten ved navn. Siste punkt med forutsetning om at de selv kan få en sitatsjekk av det som tillegges dem av både direkte sitater og kunnskap. Dette er en viktig del når det kommer til det etiske ved forskningsmetoden. Før intervjuene kunne starte ble det meldt inn til Norsk senter for forskningsdata (NSD) og ble godkjent av dem etter gjeldene regelverk. NSD vurderte personvernulempen i denne studien til å være lav.

Intervjuguiden som ble benyttet ble ikke blitt sendt ut til informantene i forkant for å få best mulig svar på det åpne spørsmålet om de ser noen problemer rundt kompost. Fordelen med å starte med et åpent spørsmål er at informantene ikke vil være påvirket av intervjuers egne tanker og ideer. Dermed sier svarer i seg selv mye om hva som faktisk er problematisk og hva som ikke er det. Ved å stille et slikt spørsmål kan man få avklart i hvilken grad informantene er bevisst mulige problemer rundt dagens behandlingsløsning. Derfor er det valgt å starte intervjuet med et åpent spørsmål rundt kompost.

Videre i intervjuet blir spørsmålene mer spesifikke på mulige problemer, etterfulgt av overordnede spørsmål rundt rammesetting, marked og ansvar. Informantene med kunnskap om pyrolyse og biokull ble også spurt om dette. For full intervjuguide, se vedlegg 10.1. Det er viktig å presisere at ingen intervjuer ble like da informantene har ulik bakgrunn og sitter på kunnskap knyttet til ulike deler av tematikken. Intervjuguiden fungerte dermed i hovedsak som en retningslinje for å dekke ønskede temaer. Ved behov ble det også stilt oppfølgingsspørsmål basert på svarene.

Samtlige intervjuer ble gjennomført over plattformen MS Teams. Valget om å benytte en nettplattform ble gjort fordi man ikke kunne møtes fysisk grunnet Covid-19. Fordelen med digitale møter er også at de er mindre tidkrevende og gjør det lettere å intervjuere personer fra et stort geografisk område. MS Teams ble valgt fordi det er lett å lage et møter, ta opptak av intervjuene og følge personvern ved lagringsmetoden.

Transkriberingen ble gjennomført fortløpende etter intervjuet. Opptaket av intervjuene forenklet transkriberingsprosessen og gjorde intervjuene flytende da det ikke var behov for å ta detaljerte notater underveis. Intervjuene ble transkribert ordrett og kun småsnakk utenfor tema og meningsløse fyllord er utelatt.

En forenklet variant av tematisk analyse ble benyttet for å bearbeide dataene. Tematisk analyse av kvalitative data er gjort for å identifisere mønstre og temaer (Maguire & Delahunt, 2017). Prosessen tok utgangspunkt i Braun og Clarke (2006) sin 6-trinns guide for tematisk analyse. De seks trinnene starter med å bli kjent med dataene før koder blir tatt i bruk for å identifisere temaene i teksten. Siste steg er å produsere en rapport (Braun & Clarke, 2006). Etter transkriberingen ble det valgt åtte ulike temaer som viste seg gjennomgående i flere av intervjuene. De valgte temaene er vist i Tabell 8. Det ble så valgt en farge for hvert tema for lettere å få oversikt over hvor informasjonen befinner seg i teksten. I tillegg til forenkler fargekodingen prosessen med å se hvem som har svart på hvilke hovedpunkter.

Tabell 8 Temaene valgt for tematisk analyse av intervjuene

Barrierer	Fremmede arter
Forbrukeransvar	Miljøgifter, tungmetaller, sykdom
Jordforbedring	Fremmede legemer
Utslipp	Biokull

Kvaliteten på dataene kan være påvirket av intervjuets formål, formulering av spørsmålene og valgte temaer. For å minimere denne usikkerheten er det valgt å benytte en stor grad av åpne spørsmål der informanten selv kan lede samtalen, samt at intervjuet avsluttes med spørsmålet om det er noe mer de ønsker å få frem. Et annet moment som kan påvirke kvaliteten negativt er at informantene er valgt ut fra intervjuers ståsted med tanke på lest litteratur og anbefalinger fra veileder og andre informanter. Dette kan påvirke hvem som er valgt og hvem som ikke er valgt.

5. Studieobjekt

5.1 Vesar

5.1.1 Introduksjon av Vesar

Vestfold Avfall og Ressurs AS (Vesar) er et interkommunalt selskap eid av kommunene Horten, Holmestrand, Larvik, Færder, Sandefjord og Tønsberg. Hovedoppgaven deres er tjenester knyttet til husholdningsrenovasjon på vegne av eierkommunene. De er ansvarlige for innsamling og behandling av avfallet, i tillegg til å drifte fem gjenvinningsstasjoner og over 20 miljøstasjoner. Vesar drives etter selvkostprinsippet. De er et såkalt bestillerselskap, som vil si at de har alle tjenester ute på anbud. Dette er for å sikre best mulig tjenester. I særlig fokus er kvalitet, miljøløsninger og pris (Vesar, u.d.).

Hovedkontoret til Vesar er på Sem, der blant annet Greve biogass, Lindum, BBBLS, ReKlima, Norsk Gjenvinning, Franzefoss og Ragn-Sells holder til. Området er for flere mest kjent for biogass- og biogjødselproduksjonen på Den Magiske Fabrikken.

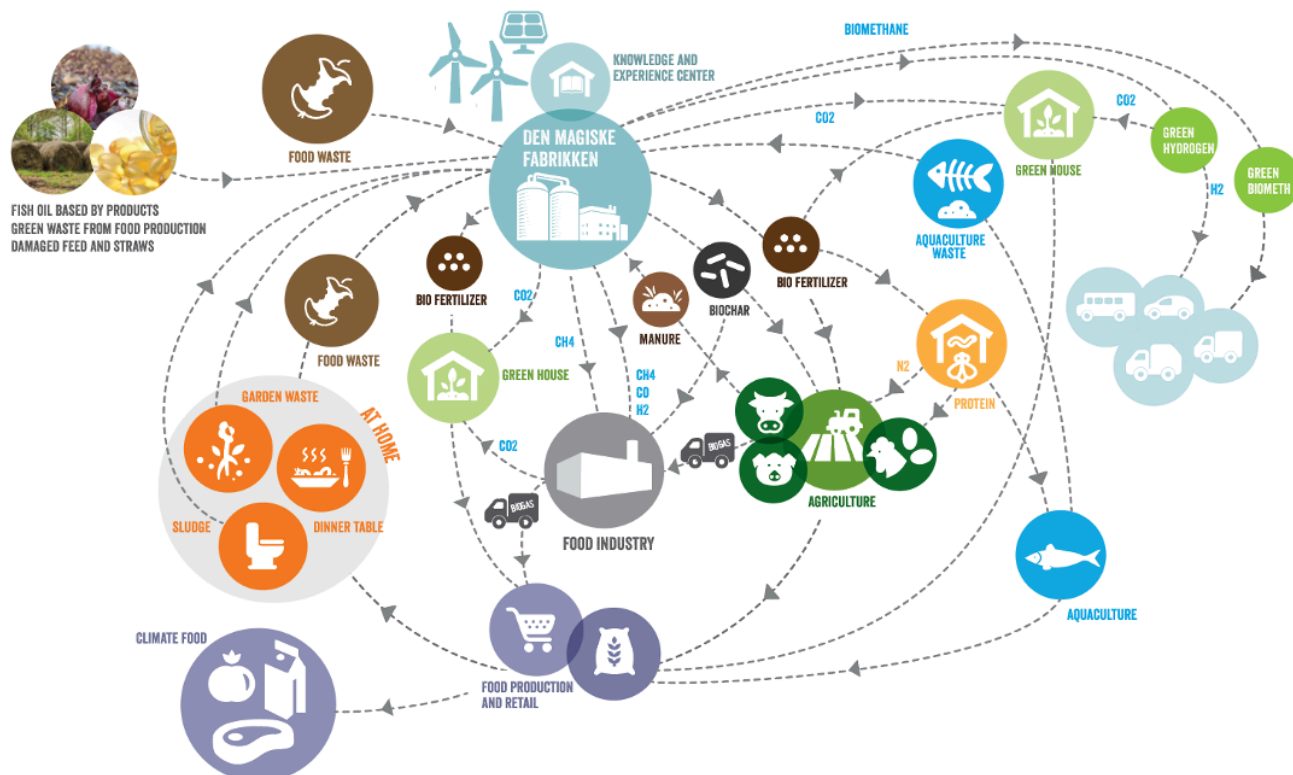
5.1.2 Kretsløpet hos Vesar

Kretsløpet for biologisk avfall hos Vesar består per 2021 av biogass- og biogjødsel-produksjon fra matavfall og husdyrgjødsel. Dette skjer på Den Magiske Fabrikken. I tillegg produserer ReKlima i samarbeid med BBBLS såkalte klimatomater som dyrkes i et pilot-drivhus med gjødsel fra Den Magiske Fabrikken. Tomatene selges kommersielt for å fullføre sirkelen mellom forbruker og Den Magiske Fabrikken. I tillegg får bøndene igjen ferdig biogjødsel mot innlevering av husdyrgjødsel. Dette gjør at utslippene fra nedbrytelsesprosessen går til biogass fremfor å bli sluppet direkte ut i luften. Biogassen som produseres blir brukt på kjøretøyene som samler inn avfallet.

Dagens kretsløp er presentert i Figur 11 og viser hvordan matavfall fra forbrukeren og husdyrgjødsel fra landbruket går til Den Magiske Fabrikken og blir til biogass, biogjødsel og karbondioksid. Busser og annen transport benytter biogassen, mens biogjødselen går tilbake til bøndene. Biogjødselen blir da brukt til å dyrke ny mat til forbrukerne. I tillegg benyttes biogjødselen til dyrking av klimatomatene. Karbondioksidet som blir hentet ut går også til drivhuset hvor den blir benyttet i tomatdyrkingen.



40



Figur 12 Fremtidige muligheter for et kretsløp, Den Magiske Fabrikken

5.1.3 Hageavfallet hos Vesar

Fraksjonen park- og hageavfall samles inn i vekstperioden mars til oktober. Per 2020 får Vesar i hovedsak inn hageavfall fra husstander via gjenvinningsstasjonene. I tillegg får Vesar inn hageavfall via hjemhenting hos beboerne på Nøtterøy to ganger i året. Det meste av hageavfallet blir levert uten emballasje, men det er også mulig å samle sammen hageavfallet og legge det i utleverte papirposer. I disse posene er det mest hageavfall, men fordi posene ikke er gjennomsiktige hender det også at de blir benyttet til annet avfall. Det vil være viktig å ha en forbehandlingsprosess som sorterer ut metall og annet som ikke hører hjemme i denne fraksjonen. Det er også viktig at avfallet ikke inneholder fremmede arter. Basert på data fra de siste årene kommer det inn mellom 15 000-20 000 tonn park- og hageavfall hvert år. En mulig løsning for dimensjonering av et fremtidig anlegg er mottak av park- og hageavfall fra andre kommuner i tillegg til de nåværende.

For å utnytte hageavfallet på best mulig måte med tanke på maksimal produksjon av biokull vil det være gunstig å sortere hageavfallet i to fraksjoner. En fraksjon til pyrolyse som inneholder større cellulose- og ligninholdige deler som greiner, stubbe og røtter, og en fraksjon til kompostering med mindre kvister, løv, barnåler, fruktrester og annet smått. Gitt at det meste som havner i papirsekkene er av mindre størrelse, vil det være naturlig at dette går direkte til kompostering, selv om både innholdet og papirposen i seg selv fint kan pyrolyseres. Oppgaven tar ikke høyde for dette tredje alternativet i analysene grunnet tidsomfanget av prosjektet.

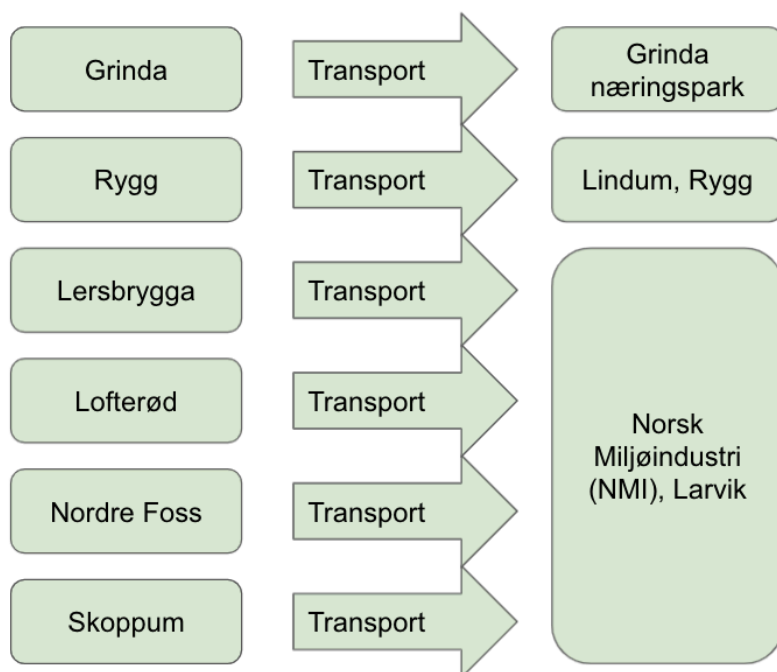
I dag er det ulike bedrifter som komposterer park- og hageavfallet Vesar samler inn i løpet av året. Komposten produsert hos Norsk Miljø Industri (NMI) i Larvik ble i 2020 klassifisert som klasse 0, noe som tilsier at det er god kvalitet (Gemidan NMI, 2020). Volumvekten ved leveranse er 0,5 tonn/m³. Kvaliteten på komposten fra de andre behandlingsstedene er uvisst grunnet mangel på tilgjengelig data. NMI håndterer det meste av park- og hageavfallet til Vesar per gjeldene kontrakt.

5.1.4 Transport av hageavfallet

Driftsleverandørene Ragn-Sells og Norsk Gjenvinning som har ansvaret for transport av avfall hos Vesar. Når de ikke transporterer i egen regi har de ansvaret for å leie inn underleverandører. Begge driftsselskapene har gjennom anbud forpliktet seg til å bruke biogass som drivstoff i bilene som benyttes. Må de på grunn av kapasitetsproblemer eller uforutsette hendelser bruke annen transport, er det et avvik og Vesar må varsles om dette på forhånd.

Vesar har tidligere hatt en eksklusiv avtale med Ragn-Sells for håndtering av hageavfallet, men fra 1. mars 2021 er i tillegg Norsk Gjenvinning avtalepart på tre av seks gjenvinningsstasjoner. Tidligere har hageavfallet som er blitt mottatt på Rygg gjenvinningsstasjon blitt behandlet av Lindum som er på samme område. Park- og hageavfallet samlet inn på Nordre Foss gjenvinningsstasjon, Skoppum gjenvinningsstasjon, Lersbrygga gjenvinningsstasjon og Lofterød gjenvinningsstasjon har blitt fraktet til Larvik der NMI har ansvaret. Hageavfallet samlet opp på Grinda gjenvinningsstasjon har gått til Grinda næringspark.

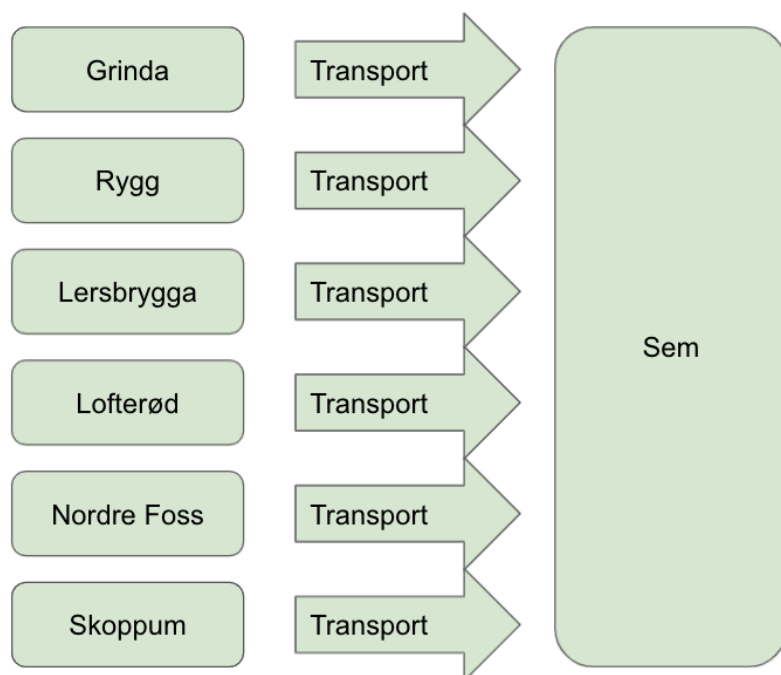
Med den nye kontrakten vil også Nordre Foss gjenvinningsstasjon, Skoppum gjenvinningsstasjon og Lersbrygga gjenvinningsstasjon bli fraktet til Grinda næringspark i regi av Norsk Gjenvinning. Figur 13 viser en oversikt over hvor det innsamlede park- og hageavfallet fra hver gjenvinningsstasjon fraktes til per 2020.



Figur 13 Oversikt transport fra gjenvinningsstasjonene til behandling per 2020

Dersom pyrolyse blir valgt som løsning vil alt hageavfallet bli fraktet til området på Sem.

Figur 14 illustrerer dette.



Figur 14 Oversikt over transport fra gjenvinningsstasjonene for et system med pyrolyse

5.1.5 Synergieffekter hos Vesar

I dag blir hageavfallet levert til andre anlegg for behandling. Vesar selger ferdig produkt fra disse anleggene på gjenvinningsstasjonene sine for å vise forbrukerne hva avfallet de leverer benyttes til. Ved pyrolyse vil behandlingen foregå på eget område og mest sannsynlig i regi av Vesar. Dette gjør at de lett kan benytte produktene ut fra pyrolysering til eget bruk. Biokullet er i dag planlagt å gå til jordforbedringsmiddel. ReKlima kommer til å jobbe videre med dette, både med tanke på eget bruk og formidling til landbruket. De er i dag ansvarlige for drift av pilotdrivhuset som dyrker tomater. Inn i dette systemet går karbondioksid (CO_2) fra biogassproduksjonen ved Den Magiske fabrikken, samt biogjødsel som også er produsert der. Ved pyrolyse vil de også benytte seg av biokull i tomatdyrkingen, i tillegg til at de kan drive produktutvikling og selge de nye biogjødselproduktene til bønder de allerede har en relasjon til.

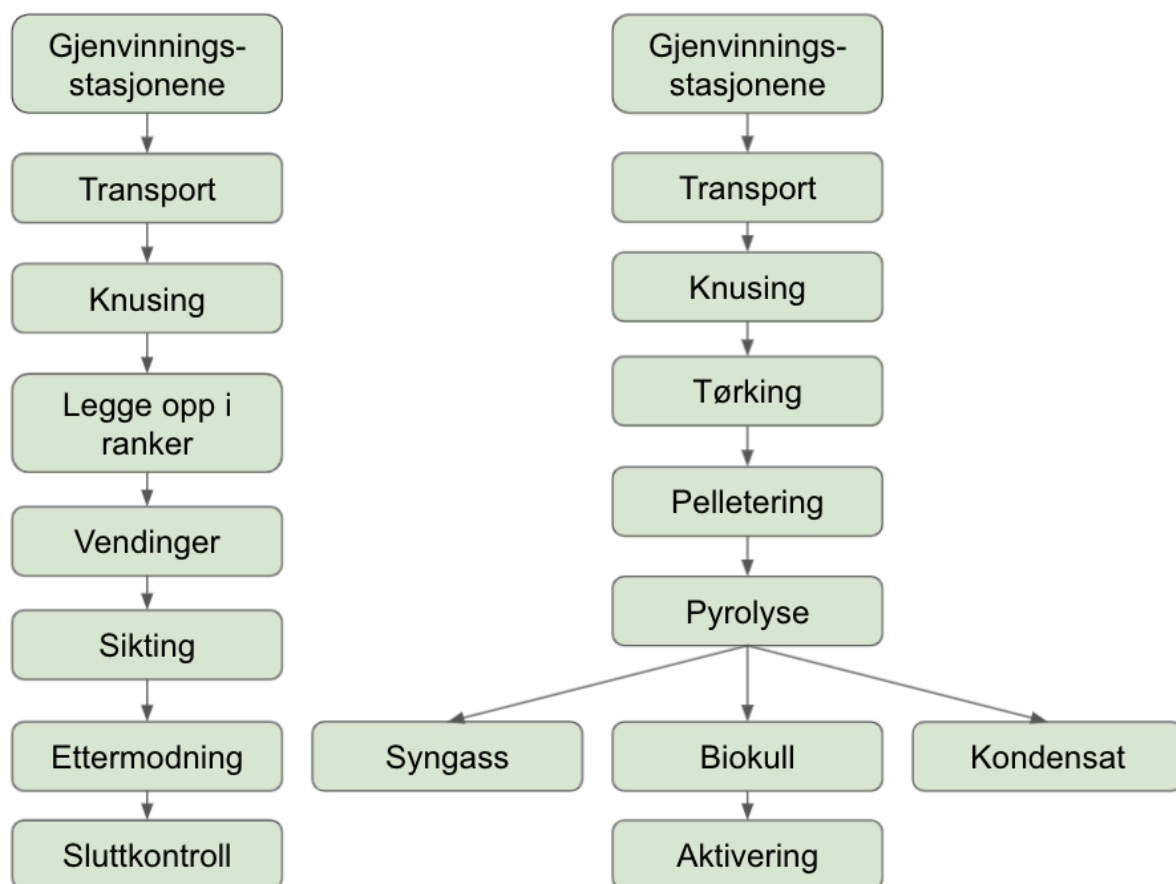
Syngassen er planlagt brukt inn i biogassproduksjonen ved Den Magiske Fabrikken fordi det har vist seg å ha positiv effekt på mengden biogass produsert. Andre bruksområder for syngassen er å spalte den for å skille metan (CH_4) fra karbondioksid (CO_2) og hydrogengass (H_2). Disse gassene kan selges kommersielt eller benyttes internt på anlegget til Greve. Syngassen kan også brennes i en motor for å produsere energi eller i en fordampner for å produsere varme. Elektrisiteten kan selges til strømmettet eller benyttes til å for eksempel drifte MAP-anlegget. Skal syngassen benyttes i en motor må den renses. En vanlig motor har en virkningsgrad på 35-40 %. Dermed kan restvarmen benyttes til å tørke råmaterialet, drifte et CP-anlegg, eller som fjernvarme på blant annet anleggsområdet. Fordeler ved å føre syngassen direkte over på en dampkjel er at varmen produsert under pyrolyseprosessen ikke vil gå tapt. Syngassen blir dermed ikke avkjølt og utbyttet fra prosessen blir da kun biokull og syngass.

Dersom man velger å kondensere syngassen kan kondensatet fortsatt forbrennes for varme på lik linje som syngassen. Ved forbrenning vil det i hovedsak være utslipp av karbondioksid (CO_2), men også noe karbonmonoksid (CO) og NO_x -gasser. Kondensatet kan også raffineres videre til bruk som bioolje. Biooljen vil da inneholde de samme egenskapene som vanlig bioolje.

Varmen som produseres under pyrolysingen kan benyttes til å tørke park- og hageavfallet før pyrolyseringsprosessen. Da vil prosessen kreve mindre tilført energi og ikke trenge tilført varme. Varmen kan også bli en del av et fjernvarmesystem og benyttes til oppvarming av kontorbyggene i området.

5.2 Systemene

Oppgaven går ut på å gjøre en analyse av to ulike systemer: referansesystemet og et mulig system med pyrolyse. Referansesystemet er dagens løsning med kompostering, og er vist til venstre i Figur 15. Her benyttes det i hovedsak data fra tilgjengelig litteratur som grunnlag for analysen. For systemet med pyrolyse benyttes både data fra tilgjengelig litteratur og data mottatt fra Scanship sine pyrolyseanlegg. En oversikt over systemet med pyrolyse er vist til høyre i Figur 15 under. Grunnet oppgavens omfang ser den kun på alternativer der alt park- og hageavfallet går til enten kompostering eller pyrolyse. De to øverste boksene i begge figurene symboliserer innsamling på hver av de seks forskjellige gjenvinningsstasjonene og transport fra hver av disse til behandling.



Figur 15 referansesystem og nytt system med

6. Resultater

6.1 Material- og energiflyt

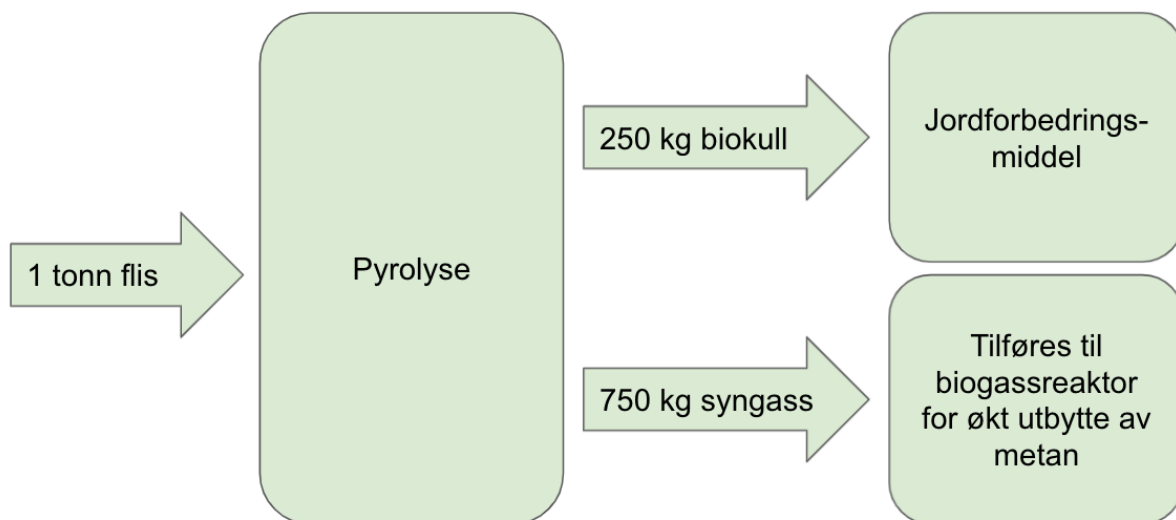
6.1.1 Massestrøm

Forskningsspørsmålet som resultatene i dette kapittelet skal svare på er: Hvordan er material- og energibalansen for behandling av park- og hageavfall med pyrolyse? Det er valgt å se på massestrømmen, energiflyten og karbonbalansen mellom substrat og produkt. Datagrunnlaget kommer fra et anlegg som benytter flis som substrat. Både flis og park- og hageavfall er organisk materiale med relativt lik struktur. Anlegget som datagrunnlaget baserer seg på benytter MAP-teknologi, og velger å ikke kondensere syngassen til kondensat.

Under prosessen vil ca. 25 % av substratet bli omdannet til biokull. De resterende 75 % blir omdannet til syngass og kondensat. 1 tonn tørr flis vil produsere 250 kg biokull. Figur 16 illustrerer massefordelingen under pyrolyse. Maskinen til Scanship kan behandle 1 tonn flis per time. Ved 24-timers drift hele året tilsvarer dette en total mengde på 8 760 tonn flis per år, gitt at maskinen kan driftes uten større pauser for vedlikehold. Ut av dette vil det årlig bli produsert om lag 2 190 tonn biokull. Dette er et teoretisk estimat som viser anleggets maksimale produksjon.

Realistisk vil for eksempel et anlegg kunne driftes med to skift fra kl. 07-22. Da vil den håndterte årlige mengden ligge på nesten 5 500 tonn. Dette tilsvarer en årlig biogassproduksjon på 1 375 tonn. For Vesar vil dette si at en pyrolysemaskin av samme størrelse som Scanship har i dag ikke har kapasitet til å håndtere alt park- og hageavfallet de får inn på en årlig basis.

Gitt at om lag 40 % av park- og hageavfallet egner seg spesielt godt til å pyrolysere, tilsvarer dette en total årlig mengde på 6 000 - 8 000 tonn. Dersom Vesar velger å pyrolysere alt avfallet, tilsvarer det en produksjon på mellom 3 750 – 5 000 tonn biokull årlig.



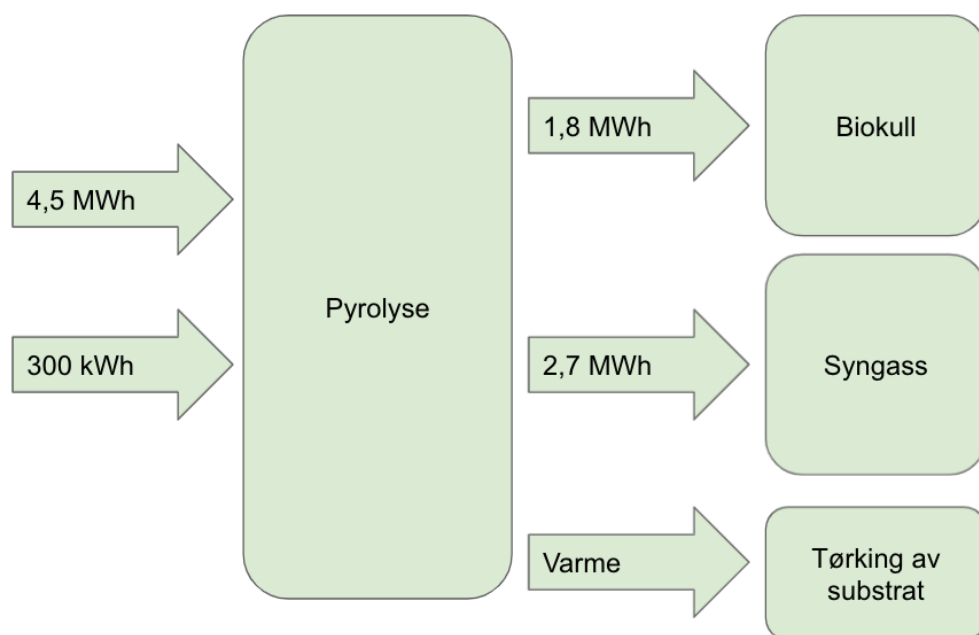
Figur 16 Massebalanse ved pyrolyse

6.1.2 Energiflyt

Gitt at substratet som tas inn i pyrolyseanlegget inneholder mindre enn 10 % fuktighet, vil det ved MAP-teknologi kreve i størrelsesorden 300 kWh å pyrolysere 1 tonn flis til 600°C. Ved høyere fuktinnhold vil mengden nødvendig energi økes for å fordampe vannet i substratet. MAP-teknologien benytter høyverdig energi i form av strøm i prosessen.

Flisen har en brennverdi på 4,5 MWh per 1 tonn. Av energien fra substratet vil 40 % av energi bindes opp i biokullet, mens de resterende 60 % ender opp i syngassen og kondensatet. Omgjort til MWh tilsier dette at av 1 tonn flis vil 1,8 MWh energi være bundet i biokullet, mens 2,7 MWh er bundet i syngassen og kondensatet. Denne energien er i form av potensiell energi, som ved behov kan bli omdannet til varme. Verdt å merke seg er at energien inn er høyverdig elektrisitet, mens energien som skapes er lavverdig varme.

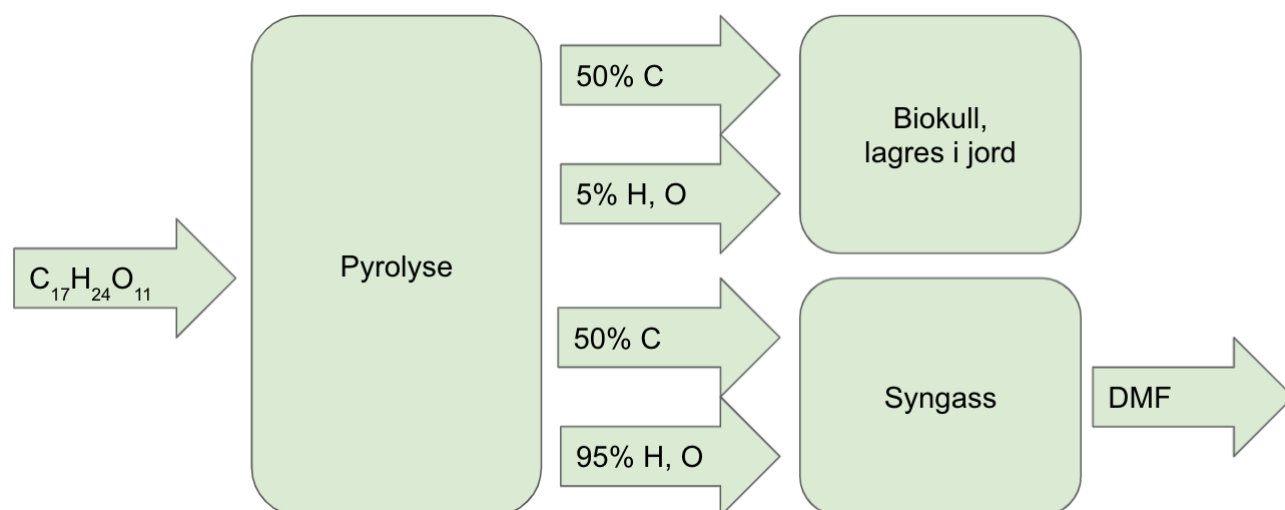
Figur 17 illustrerer energiflyten under pyrolyseprosessen. Tallene er basert på behandling av 1 tonn flis ved MAP teknologi som varmer opp substratet til 600°C. Substratet ved start inneholder <10 % fukt, og prosessen tar én time.



Figur 17 Energibalanse ved pyrolyse

6.1.3 Karbonbalanse

Karbonet fra flisen vil fordeles slik at 50 % blir bundet i biokullet, og de resterende 50 % ender opp i syngassen. Biokullet er bygd opp av 90 % karbon. Figur 18 illustrerer karbonbalansen. Siden biokullet fungerer som CCS, er det med på å hindre utslipp av karbondioksid. Park- og hageavfallet som blir tatt inn har en antatt kjemisk formel $C_{17}H_{24}O_{11}$. Formelen er basert på et gjennomsnitt av ulike plantemateriale og er presentert i kunnskapsgrunnlaget i figur 7 kapittel 3.3.4.



Figur 18 Karbonbalansen ved pyrolyse

Forholdet mellom karbon og karbondioksid er på 3,67 som tilsier at 1 tonn karbon er det samme som 3,67 tonn CO₂e. For biokull som består av 90 % karbon vil dette si at per tonn biokull som blir brukt til jordforbedring, så vil 3,3 tonn CO₂e være unngått tilført til atmosfæren sammenlignet med naturlig nedbryting av plantematerialet. Siden det blir produsert 250 kg biokull per 1 tonn flis inn, vil det kreve 4 tonn flis for å produsere 1 tonn biokull. Ved å pyrolysere Vesar sine 15 000 – 20 000 tonn park- og hageavfall tilsvarer dette 3 750 – 5 000 tonn biokull. Omregnet tilsvarer dette et unngått årlig CO₂ utslipp på 12 375 – 16 500 tonn CO₂e. Gitt at 1 tonn park- og hageavfall blir til 250 kg biokull, vil de teoretisk unngåtte utslippene fra 1 tonn park- og hageavfall være 825 kg CO₂e.

6.2 Transport

6.2.1 Årlig transportavstand

Resultatene presentert i dette kapittelet tar for seg utslipp tilknyttet transport av avfallet fra gjenvinningsstasjonene og til valgt behandlingssted. Forskningsspørsmålet som blir besvart er: *Hva er bidraget til klimagassutslipp fra transport i totalregnskapet, og hvordan vil valg av løsning med pyrolyse eventuelt påvirke dette?*

Tabell 9 viser mengdene hageavfall som ble samlet inn på de ulike gjenvinningsstasjonene til Vesar i 2020. Data for Grinda gjenvinningsstasjon er utelatt grunnet mangel på data. Tabellen viser også antall tømminger registrert. Hvert lass fraktet ut fra området blir registrert som en tømming og blir veid. Vekten varierer mellom 5 tonn og 28 tonn per last. Vektforskjellen kommer i stor grad av hva slags park- og hageavfall som har blitt levert, og hvor kompakt det kan transporteres. Gress, blader og fruktrester er for eksempel mer kompakt enn grener og juletrær, samt at de inneholder mer fuktighet som gir en økning i vannvekten.

Tabell 9 Innsamlet hageavfall på de ulike miljøstasjonene, og antall tømminger i 2020

Gjenvinningsstasjon	Tonn pr. år	Antall tømminger pr. år
Grinda	-	-
Rygg	3 077,22	314
Lersbrygga	530	49
Lofterød	3 806,18	224
Nordre Foss	1 012,2	68
Skoppum	2 615,34	148
Sum	11 040,94	803

Den årlige transportdistansen er estimert i forhold til avstand mellom oppsamlingspunkt og behandling, multiplisert med antall tømminger som er presentert i Tabell 9. Tabell 10 tar for seg referansesystemet fra 2020, som også er det året dataen er hentet fra. Tabell 11 viser reiseavstandene dersom Vesar velger å gå for pyrolyse på eget område. Adressene som er benyttet for å finne avstandene er gitt i vedlegg 10.2.

Tabell 10 Beregnet kjøreavstand for 2020 med behandlingsløsning kompostering

Gjenvinningsstasjon	Behandlingssted	Reisevei (km)	Total årlig distanse (km)
Grinda	Grinda næringspark	0,85	-
Rygg	Lindum, Rygg	0,1	31,4
Lersbrygga	Norsk Miljø Industri, Larvik	75,5	3 699,5
Lofterød	Norsk Miljø Industri, Larvik	51,5	11 536
Nordre Foss	Norsk Miljø Industri, Larvik	64,6	4 392,8
Skoppum	Norsk Miljø Industri, Larvik	50	7 400
Sum			27 059,7

Tabell 11 Beregnet kjøreavstand for et nytt system med pyrolyse på eget område

Gjenvinningsstasjon	Behandlingssted	Reisevei (km)	Total årlig distanse (km)
Grinda	Sem	34,3	-
Rygg	Sem	0,15	47,1
Lersbrygga	Sem	44,7	2 190,3
Lofterød	Sem	21,2	4 748,8
Nordre Foss	Sem	28	1 904
Skoppum	Sem	19	2 812
Sum			11 702,2

Beregningene viser den totale årlige distansen med transport av park- og hageavfallet fra gjenvinningsstasjon til behandlingssted. Den årlige distansen tar ikke høyde for mengde per frakt, og uttrykker dermed ikke uttrykker transportarbeid (tonnkm) som ofte benyttes i lignende analyser. Derimot tar analysen høyde for antall tømminger per gjenvinningsstasjon og distansen fra hver enkelt til behandlingssted.

6.2.2 Utslippsestimater for transport av park- og hageavfallet

Fyllingsgraden vil ha mye å si for transportrelaterte utslipp. En lastebil vil trolig aldri få utnyttet sin fulle kapasitet fordi egenvekten av avfallet er såpass lav i forhold til volumet den tar opp. I rapportene fra Vesar er det spesifisert mengde transportert avfall per tømming. For analysene er det derimot kun tatt hensyn til antall tømminger og avstand, og er dermed en forenklet analyse. Til tross for at analysen ikke tar hensyn til fyllingsgraden og vekten av materialet som fraktes, vil utslippene fra distansen fortsatt kunne si mye om utslippene tilknyttet transporten.

Tabell 12 viser utslippene for valgte transporttyper per tkm, samt hvor disse tallene er hentet fra. Transporten foregår med en lastebil type krokobil og drivstoffet er biogass LBG. Det er valgt å benytte data *for transport, freight, lorry 3,5-7,5 metric ton, EURO 5* fra Sima Pro. Dette valget er basert på at de fleste tømmingene er innenfor dette vektintervallet. I disse tallene er også utslipp tilknyttet produksjon av drivstoff og kjøretøy. I Tabell 13 blir distansene, gitt i Tabell 10 og Tabell 11, multiplisert med utslippene i Tabell 12. Tabell 13 viser utslippene produsert ved transport av park- og hageavfall til behandlingsstedene for de tre ulike systemene. Kolonnen «2020» viser utslipp for transporten i 2020 og «pyrolyse» viser utslippene dersom alt park- og hageavfallet fraktes til pyrolyse på Sem.

Tabell 12 Utslippsdata for typer transport

Transporttype	CO ₂ e	Data er hentet fra
Lastebil med biogass som drivstoff	0,509 kg	Ecoinvent 3.6 Cut-off, Sima Pro

Tabell 13 Utslipp for transport ved de ulike alternative transport alternativene

CO ₂ e 2020	CO ₂ e Pyrolyse
13 773,4 kg	5 956,4 kg

Som en kan se av Tabell 13 er forskjellen til pyrolyse stor. Dette kommer av den store endringen i distanse tilbakelagt. På årlig basis vil endringen i utslipp reduseres med 7 817 kg CO₂e dersom Vesar velger å bytte behandlingsmetode til pyrolyse. Dette tilsvarer en reduksjon på 57 %. Allokert på antall tonn fraktet årlig vil utslippene per tonn ligge på 1,25 kg CO₂e for 2020 og 0,54 kg CO₂e for systemet med pyrolyse.

Avstanden tilbakelagt for alternativet med hjemhenting på Nøtterøy er ikke tatt med i disse beregningene. Parkavfall er heller ikke inkludert i transportberegningene videre da det kommer inn via en annen løsning. Dette gjør at beregningene kun gjelder for transport av 11 040,94 tonn hageavfall. Gitt at Vesar får inn totalt mellom 15 000-20 000 tonn, mangler det transport data for mellom 3 959-8 959 tonn. Beregningene viser derfor kun utslipp for transporter av mellom 55-73 % av park- og hageavfallet.

Beregningene tar ikke høyde for hvor de største strømmene kommer fra. Årlig samles det inn mest avfall på Lofterød gjenvinningsstasjon, etterfulgt av Rygg. Førstnevnte med nærmere 4 000 tonn og sistnevnte med litt i overkant av 3 000 tonn. Videre følger Skoppum med i overkant 2 500 tonn, Nordre foss med 1 000 tonn og til sist Lersbrygga med rett over 500 tonn.

For systemet med kompostering, er det Lersbrygga som har den lengste distansen per tur. Lersbrygga er gjenvinningsstasjonen med kortest distanse fra innsamlingsplass til behandling. Nordre Foss er innsamlingspunktet med nest minst innsamlet og nest lengst reisedistanse. Lofterød og Skoppum gjenvinningsstasjon har nesten samme distanse å frakte avfallet. Lofterød er innsamlingsstedet med mest avfall, mens Skoppum er plassert i midten. Rygg har den desidert korteste avstanden og nest mest avfall.

For det nye systemet med pyrolyse skal alt fraktes inn til Sem. Reiseveien fra innsamling til behandling er i dette tilfellet halvert for fire av gjenvinningsstasjonene, sammenlignet med systemet for kompostering. De to eneste unntakene er Rygg og Grinda gjenvinningspark. Distansen fra Rygg gjenvinningspark til Sem er relativ lik. Reiseveien for Grinda øker derimot betraktelig, men grunnet mangler i rapportene er det vanskelig å si noe om hvor stor påvirkning dette vil ha for totalutslippene av klimagasser fra transport. Oppsummert vil utslipp tilknyttet transport av park- og hageavfallet være mindre for et system med pyrolyse enn et system med kompostering, gitt at avstandene for samtlige transportdistanser er halvert.

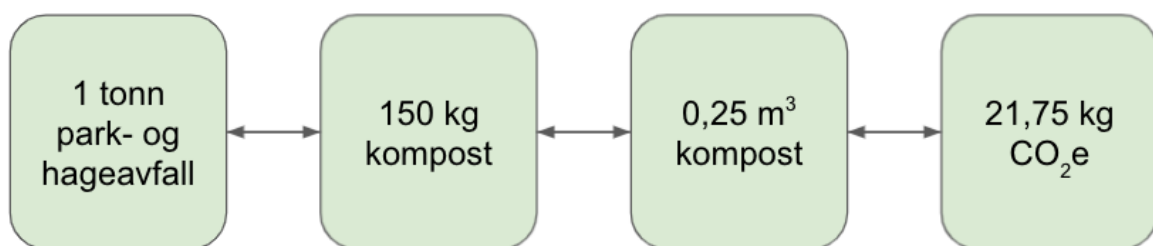
6.3 Livsløpsanalyse

6.3.1 Utslipp fra kompostering

Resultatene i dette kapitlet skal svare på forskningsspørsmålet: *I hvilken grad vil pyrolyse bidra til reduserte klimagassutslipp knyttet til håndtering av park- og hageavfallet hos Vesar, sett opp mot dagens løsning med kompostering?*

For kompostering er det i hovedsak tre ulike maskiner som bidrar under behandlingens prosesser: knuser, vender og sikter. Først knuses park- og hageavfallet til mindre partikler, før det legges opp i ranker eller tilføres en madrass. Deretter er det vanlig å benytte en hjullaster med høyt tippende skuff til å vende materialet. Mattilsynet har satt den nedre grensen på tre vendinger. I Oslo vender de normalt 10 ganger som et tiltak mot anaerob nedbryting og klimagassutslipp fra substratet. Antall vendinger er med på å påvirke mengden utslipp både fra biomassen som komposteres og fra maskinene som krever energi for å fungere. Siste steg i behandlingen er å sikte materialet. Til dette er det vanlig å benytte en trommelsorterer eller stjernesikt. Det kommer an på anlegget om disse maskinene går på diesel, HVO-diesel eller elektrisitet. Analysene her forutsetter at maskinene går på elektrisitet og vanlig diesel.

Ifølge Tellnes et al (2017) er utslippene fra park- og hageavfallet som komposteres på 87 kg CO₂e per m³ ferdig kompost ut. Dette estimatet er gitt at det per kg inn blir dannet 0,15 kg kompost, og at komposten har en tetthet på 600 kg/m³. Omregnet til utslipp per tonn park- og hageavfall inn gir dette utslipp på 21,75 kg CO₂e.



Figur 19 Massestrøm og omregning for utslipp

Andersen et al. (2010) oppgir at komposteringsprosessen bruker 0,0002 kWh og 0,003L diesel per kg park- og hageavfall inn i anlegget. Omgjort tilsvarer dette 0,2kWh og 3L diesel per tonn park og hageavfall inn. Tellnes et al. (2017) estimerer at basert på disse verdiene, vil utslippet være på 10 kg CO₂e per m³ kompost ut. Omregnet basert på de samme forutsetningene som for utslippene fra park- og hageavfallet, tilsier dette 2,5 kg CO₂e per tonn inn. Det er valgt å benytte dette som grunnlag for videre utregninger grunnet mangel på nyere data.

Tabell 14 og er oppgitt i CO₂e per tonn behandlet park- og hageavfall inn. De største utslippene for komposteringen kommer fra park- og hageavfallet, etterfulgt av dieselbruk og elektrisitet.

Tabell 14 Resultater miljøanalyse kompostering

	Utslipp i CO ₂ e
Park- og hageavfallet	21,75 kg
Behandling	2,5 kg
Sum	24,25 kg

Utslippene fra park- og hageavfallet er de største for komposteringsprosessen, og den delen med størst usikkerhet. Det er få målinger gjennomført som kan validere dataene analysen er basert på. Det er heller ikke funnet nye estimater tilgjengelig for bruk av elektrisitet og diesel under komposteringsprosessen. I tillegg er omgjøringene mellom kompost ut og park- og hageavfall inn gjort basert på estimater for tetthet og produsert mengde.

6.3.2 Utslipp fra pyrolyse

Pyrolyseprosessen starter med at park- og hageavfallet kommer inn på området. Derfra er første steg at det kvernes og siktes. Hos Scanship er det grovdelen, som er på om lag 40 %, som går så til pyrolyse. Resten går til kompostering. I beregningene videre er det forutsatt at alt går til pyrolyse. Kverningen og siktingen bruker om lag én time på 30-50 tonn park- og hageavfall. Partikkelstørrelsen i etterkant er på 30 mm. Maskinen benyttet er en IQR-kvern som går på strøm, 5 kWh per tonn. Massen blir så lagt til tørk for å komme ned i <10 % fuktighet. Beregningene her antar at tørkeprosessen bruker overskuddsvarme fra pyrolyseanlegget og ikke krever annen tilført energi.

For å pelletere avfallet benytter Lindum en ballpressemaskin som er ment for pelletering av biomasse. Maskinen kan ta for seg 300 kg per time, og partikkelstørrelsen etter er på 8-12 mm. Maskinen heter Kahl og går på elektrisitet, 15-30 kW. Omregnet til 1 tonn behandlet kreves det 50-100 kWh for å pelletere park- og hageavfallet. For videre beregninger det valgt å benytte det høyeste estimatet. Data for pyrolysingen kommer i dette tilfellet fra Scanship, som benytter MAP-teknologi. Maskinen benytter 300 kWh elektrisitet for å pyrolysere 1 tonn pellets.

ReKlima planlegger å benytte biokullet som en del av et jordforbedringsmiddel, det er derfor hensiktsmessig å aktivere biokullet. Aktiveringen skjer etter pyrolysingen og hos Scanship foregår prosessen med tilførsel av luft. Prosessen krever også tilført energi. Grunnet mangel på data blir det ikke tatt med i disse beregningene.

Resultatene fra miljøanalysen for pyrolyse er vist i Tabell 15 og er oppgitt i kg CO₂e per tonn behandlet park- og hageavfall.

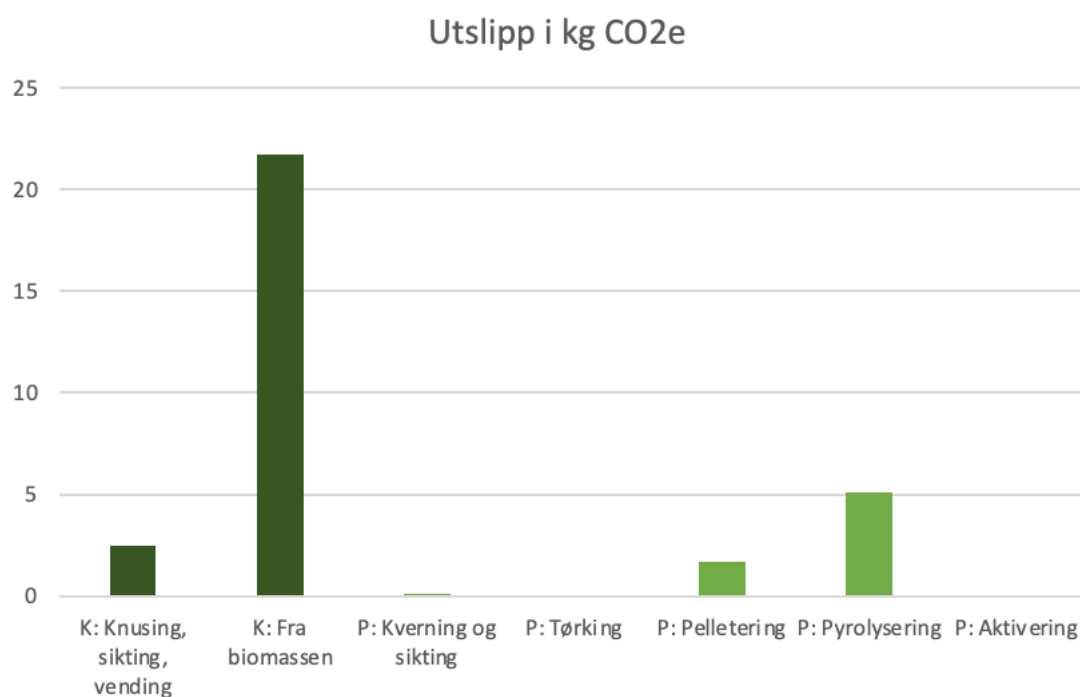
Tabell 15 Resultater miljøanalyse pyrolyse

	Utslipp i CO ₂ e
Kverning og sikting	0,085 kg
Tørking	-
Pelletering	1,699 kg
Pyrolyse	5,099 kg
Aktivering	-
Sum	6,883 kg

Fra tabellen ser man at det er selve pyrolysingen som bidrar med det største klimagassutslippet fra prosessen, mens steget med kverning og sikting har de minste utslippene. Dette henger sammen med strømforbruket i de ulike delene av prosessen. Fotavtrykket for pyrolyseprosessen vil påvirkes i stor grad av hvordan prosessen driftes. Utslippene vil være høyere dersom anlegget må starte og stoppe ofte fremfor kontinuerlig drift som drar nytte av allerede produsert varme. Beregningene er gjort med forutsetningen om at det ikke er helt kontinuerlig drift.

6.3.3 Sammenligning av utslippene

Analysene som er gjort i kapittel 6.3.1 og 6.3.2 viser at klimagassutslippene som oppstår ved kompostering er høyere enn for pyrolyse. Forskjellen mellom alternativene er på 17,4 kg CO₂e per tonn park- og hageavfall behandlet. For transport har også løsningen med pyrolyse de laveste utslippene, noe som gjør at forskjellen mellom disse to alternativene blir enda større. For begge systemene utgjør transport en veldig liten del av det totale utslippet per tonn park- og hageavfall behandlet. Figur 20 viser utslippene fra kompostering (mørk grønn) og pyrolyse (lys grønn). For enkelt å skille de to prosessene er utslippene fra komposteringen markert med «K» og utslippene fra pyrolyseringen markert med «P»



Figur 20 Sammenligning av resultatene fra livsløpsanalysene av kompostering og pyrolyse

Resultatene viser at pyrolyse har lavere utslipp av klimagasser fra transport og behandling enn hva tilfellet for kompostering er. Blant utslippene fra pyrolyse er oppvarmingen den største bidragsyteren. Dette henger sammen med nødvendig bruk av elektrisk energi inn i prosessen, der pyrolyseringer krever desidert mest. Pyrolyseringen har høyere utslipp av klimagasser enn behandlingen under komposteringsprosessen. Komposteringsprosessen har de totalt høyeste utslippene, både fra transport og behandlingen. For komposteringen kommer de høyeste utslippene fra nedbrytelsesprosessen av park- og hageavfallet. Utslipp i tilknytning til knusing, vending og sikting tilsvarer kun litt i overkant av 10 % av de totale utslippene fra prosessen.

Utslippene tilknyttet behandling av 1 tonn park- og hageavfall ved kompostering er på totalt 24,25 kg CO₂e. Med transport vil utslippene per tonn for behandling med kompostering ligge på 25,5 kg CO₂e. Uten transport er utslippene fra løsningen med pyrolyse på 6,883 kg, mens de med transport er på 7,423 kg CO₂e. De allokerte transportutslippene står for 4 % av utslippene om alt avfallet går til kompostering, og 8 % av de totale utslippene ved pyrolyse som alternativ.

6.3.4 Sensitivitetsanalyse

Sensitivitetsanalysen tar for seg de fasene med størst usikkerhet for å kunne vurdere i hvilken grad usikkerhet i datagrunnlaget påvirker resultatene. Det er dermed valgt å se på endring i behandlingsprosessen.

I denne studien, er utslippene fra biomassen som komposteres de høyeste fra komposteringsprosessen. Disse er også høyere enn hele pyrolyseprosessen sammenlagt. Derfor er det mest hensiktsmessig å se på reduksjon i utslipp fra komposteringsprosessen og hvor mye utslippene fra pyrolyseprosessen kan økes før de to alternativene er likestilt. Siden det er relativt stor forskjell mellom de to alternativene, er det valgt å se på opp til en 100 % reduksjon for komposteringen. Tabell 16 viser resultatene.

Tabell 16 Sensitivitet kompostering

	forbehandling	Utslipp biomasse
Utgangspunkt	2,50 kg CO ₂ e	21,75 kg CO ₂ e
10 % lavere	2,25 kg CO ₂ e	19,57 kg CO ₂ e
20 % lavere	2,00 kg CO ₂ e	17,40 kg CO ₂ e
30 % lavere	1,75 kg CO ₂ e	15,22 kg CO ₂ e
40 % lavere	1,50 kg CO ₂ e	13,05 kg CO ₂ e
50 % lavere	1,25 kg CO ₂ e	10,87 kg CO ₂ e
60 % lavere	1,00 kg CO ₂ e	8,70 kg CO ₂ e
70 % lavere	0,75 kg CO ₂ e	6,52 kg CO ₂ e
80 % lavere	0,50 kg CO ₂ e	4,35 kg CO ₂ e
90 % lavere	0,25 kg CO ₂ e	2,17 kg CO ₂ e
100 % lavere	0,025 kg CO ₂ e	0,21 kg CO ₂ e

Som det kommer frem av Tabell 16 må utslippene fra kompostering av biomassen reduseres med 70-80% for at totalen med behandling skal være tilnærmet lik totalen for pyrolyse. Dataene benyttet har en stor usikkerhet, men en så stor reduksjon i utslipp er lite realistisk. Utslippene fra knusing, vending og sikting er i utgangspunktet relativt lave, sett i sammenheng med utslippene fra biomassen som brytes ned. Siden det er lite som realistisk kan gjøres med de sistnevnte utslippene er det mer interessant å se på hvor mye utslippene fra pyrolyseprosessen kan øke før utslippene fra de to behandlingsalternativene er like.

Dersom utslippene fra pyrolyse skal være like utslippene fra kompostering er det pyrolyseprosessen som har de lettest påvirkelige utslippsdataene. Totalt er utslippene fra pyrolyseprosessen $\frac{1}{4}$ av utslippene fra komposteringsprosessen.

Dersom alle stegene i pyrolyseprosessen blir multiplisert med fire tilsvarer dette at det kreves 20 kWh å kverne, 400 kWh å pelletere og 1 200 kWh å pyrolysere 1 tonn park- og hageavfall. Sammenlignet med tall oppgitt i kunnskapsgrunnlaget er disse tallene urealistisk høye.

Alternativet er at kun en av prosessene øker tilført mengde energi. Både kverningen og pelleteringen benytter lave mengder elektrisk energi per tonn behandlet. Ved å endre kun en av variablene må kverningen øke med 20 500 %, eller pelleteringen må økes 1 100 %. Ingen av alternativene er realistiske. Dersom kun selve pyrolysingen skal øke må denne øke med 400 %. Av de oppgitte variablene er dette den som er mest sannsynlig. Til tross for dette er en firedobling av nødvendig energi ikke realistisk.

Analysene tar ikke høyde for tilført energi til tørking av substratet eller aktivering av biokullet i behandlingen med pyrolyse. Førstnevnte er utelatt fordi datagrunnlaget fra Scanship tilsier at det ikke kreves tilført energi i denne prosessen. Aktiveringen er utelatt grunnet mangel på data. Sannsynligheten for at disse vil påvirke det totale utslippet for behandling med pyrolyse i den grad at totalen vil overgå utslippene fra kompostering er liten. Temaet er videre diskutert i kapittel 7.1.3.

6.3.5 Substitusjon

Et viktig moment å ta med når man ser på utslipp fra pyrolyse og kompost er hva det erstatter. Ved en fullstendig livsløpsanalyse er dette et viktig moment å inkludere. Det er valgt å ikke gjøre beregninger på unngåtte utslipp i denne oppgaven grunnet tidsomfanget og mangel på data. Produktene fra pyrolyse har flere alternative substitusjonseffekter, kun de mest aktuelle er valgt å gå nærmere inn på

Uttak av torv fører til utslipp av metan, samt at det påvirker nærmiljøet på en negativ måte. Om biokullet blir benyttet som jordforbedringsmiddel kan unngåtte utslipp ved uttak av torv anses som relativt like for de to systemene. Kunstgjødsel, eller mineralgjødsel, er et annet produkt disse kan erstatte, kompost i større grad en biokull. Kunstgjødsel er kjemisk fremstilt plantenæring. De unngåtte utslippene er energi til produksjonen av kunstgjødsel, samt problemstillingene rundt avrenning.

Et moment som er forskjellig mellom komposten og biokullet er biokullets egenskap som CCS. I tillegg kan biokull anses som CCS, noe som også sparer utslipp. Kompost vil brytes raskere ned, og karbonet som ved nytt produkt er lagret vil derfor raskt bli sluppet ut. Rett ut fra produksjon inneholder biokullet rundt 50 % av karbonet fra substratet, mens komposten bare inneholder rundt 14 %. Dette gjør at pyrolyse kommer bedre ut enn kompostering basert på at det vil være mindre utslipp av karbondioksid fra biomassen. I tillegg vil det ved tilførsel av biokull til jord redusere de naturlige utslippene av lystgass fra jorda. Totalt vil de unngåtte utslippene fra bruk av biokull som jordforbedringsmiddel være større enn for komposten.

Biokullet kan også substituere vanlig kull. Tidligere ble pyrolyse brukt til å utvinne trekull til industriell bruk. Brukt til å erstatte fossilt kull har de unngåtte utslippene et potensiale for å være relativt store, Tellnes et al. 2017 indikerer at dette kan være bruksområdet med de største unngåtte utslippene for biokull.

Syngass og kondensat kan raffineres til biogass eller andre mer høyverdige produkter, eventuelt kan de brennes i enten motor eller dampkjel for elektrisitet eller varmeproduksjon. Raffineringen vil øke utslippene fra prosessen. Dette må derfor vurderes opp mot den alternative energikilden, om det er biomasse eller fossilt.

6.4 Miljøpåvirkninger

6.4.1 Innhold av tungmetaller

Resultatene presentert i dette kapittelet er med på å besvare forskningsspørsmålet: *Hvordan vil en løsning med pyrolyse påvirke risiko for spredning av fremmede arter, plantesykdom, miljøgifter og fremmedelementer fra behandlingen og utnyttelsen av park- og hageavfallet?* Først vil det bli presentert kvantitative data som går på innholdet i kompost og biokull, før kvalitative data blir presentert.

Komposten produsert på NMI i Larvik ble i 2020 kategorisert i kvalitetsklasse 0 som tilsier lave verdier av tungmetaller. Tabell 17 viser verdiene for kompost produsert på Vesar sitt park- og hageavfall i 2020 hos NMI. Data kommer fra en intern rapport levert av AnalyTech Miljølaboratorium A/S i Danmark. Som tabellen viser er alle tungmetallverdiene innenfor klasse 0. Verdien til sink (Zn) er på 150 mg/kg, noe som er grenseverdien i henhold til kvalitetsklassefordelingen. Kadmium (Cd) er også relativt nær grenseverdien som er på 0,4 mg/kg. I rapportene fra 2018 og 2019 er det disse to stoffene som har for høye verdier og gjør at komposten havner i kvalitetsklasse I. pH-verdien er svakt basisk.

Tabell 17 Innhold i ferdig kompost av park-og hageavfall fra Vesar

Hva	Mengde	Benevning
pH	8,3	pH
PAH	-	mg/kg
Bly (Pb)	24	mg/kg
Sink (Zn)	150	mg/kg
Krom (Cr)	9,6	mg/kg
Nikkel (Ni)	7,1	mg/kg
Kobber (Cu)	25	mg/kg
Kvikksølv (Hg)	0,1	mg/kg
Kadmium (Cd)	0,38	mg/kg
Nitrogen	5360	mg/kg
Fosfor	38,7	mg/L

Biokull kan benyttes som et jordforbedringsmiddel på lik linje med kompost. Derfor er det interessant å se på innholdet av tungmetaller i biokullet. Utenom karbon inneholder biokullet også andre elementer, blant disse er PAH, tungmetaller, nitrogen og fosfor. Verdiene i Tabell 18 stammer fra tester gjort av biokull fra flis hos Scanship. Mengden tungmetall i biokull er innenfor grensene som tilsvarer kvalitetsklasse 0 for kompost. PAH verdien er lav.

Tabell 18 Innhold i biokull fra flis

Hva	Mengde	Benevning
Energi	33200	kJ/kg (net caloric value)
Karbon innhold (C)	90-95	%
PAH	2-3	mg/kg
Bly (Pb)	<2	mg/kg
Sink (Zn)	64	mg/kg
Krom (Cr)	11	mg/kg
Nikkel (Ni)	8	mg/kg
Kobber (Cu)	3	mg/kg
Kvikksølv (Hg)	<0,07	mg/kg
Kadmium (Cd)	<0,2	mg/kg
Nitrogen	2,2	g/kg
Fosfor	0,3	g/kg

Alle tungmetallverdiene er lavere i biokullet enn i komposten. Den største variasjonen mellom de er innholdet av sink (Zn). En årsak kan være at biokullet og komposten stammer fra forskjellig råmateriale. Komposten er produsert fra Vesar sitt park- og hageavfall mens biokullet stammer fra pyrolysert flis, som kan være et renere substrat. Temperaturen under pyrolyseprosessen er høy nok til at flere tungmetaller blir flyktige. Dermed kan tungmetallinnholdet i substratet fordeles mellom biokullet og syngassen.

I kunnskapsgrunnlaget er det oppgitt en pH-verdi for biokull på om lag 9. pH-verdien i komposten er på 8,3. Dette gjør at begge produktene er basiske, biokullet mer en komposten.

6.4.2 Innledning kvalitative data

De kvalitative dataene stammer fra totalt ni intervjuer med personer i bransjen. Noen jobber med oppfølging, noen forsker og andre driver eget anlegg. Fokusområdet for intervjuene er kompost, både prosessen og ferdig produkt. Det er også valgt å snakke med relevante informanter som har kunnskap om pyrolyse og biokull, da det er av interesse som sammenligningsgrunnlag i oppgaven. Kun de viktigste funnene fra intervjuene er presentert, ettersom denne delen ikke er oppgavens hovedfokus.

6.4.3 Første spørsmål

Første spørsmål som alle informantene ble stilt, var hvorvidt de hadde kjennskap til noen problemer ved komposteringsprosessen eller ved videre bruk av komposten produsert fra park- og hageavfall. Alle svarene bar preg av informantenes stilling og fagbakgrunn. De som til daglig jobber med å produsere kompost svarte at dersom komposten blir laget korrekt er det ingen nevneverdige problemer. Dette svarte også de som bidrar med retningslinjene for hvordan kompostere. Biologene nevnte med en gang problemer som spredningsfare, mens informantene med kunnskap innen bruk av kompost som vekstmedia hadde fokus på egenskapene knyttet til jordkvalitet og plantevekst.

6.4.4 Kvalitet på innsamlet park- og hageavfall

Alle informantene nevnte at et av de største problemene med kompostering er kvaliteten på park- og hageavfallet som kommer inn. Dersom utgangspunktet er en uren fraksjon, vil resultatet bli av dårlig kvalitet. Dette gjelder både potensialet for spredning av fremmede arter, plantesykdommer, miljøgifter, plast, metall og glass. I tillegg vil kvaliteten og type materiale påvirke avrenningen, lukt og utslipp av klimagasser under prosessen. Linnea Wang fra Mattilsynet la det frem som at «*har du en ren råvare får du også en ren kompost ut i den andre enden*». Hovedårsaken til denne problematikken er at avfallsbesitterne ikke er flinke nok til å sortere eller har god nok forståelse av hva fraksjonen skal og ikke skal inneholde. Eksempelvis nevnte informantene potteplanter med potten på og juletrær med pynt. Noe av feilsorteringen kommer også av kunnskapsmangel. Dette viser seg spesielt i feilsorteringen av plantemateriale som inneholder fremmede arter og importerte planter. Fremmede arter skal i restavfallet grunnet spredningsfare. Det samme gjelder importerte arter som kan inneholde plantesykdommer og plantevernmidler vi ikke har i Norge.

Flere av informantene nevnte at det derfor er viktig med god mottakskontroll for å forhindre disse feilene før de blir et problem. Jens Måge fra Avfall Norge mener at *«avfallsbransjen tar imot det en får, men må også kunne stille krav til hva som tas imot»*. For å få til dette kreves ressurser i form av arbeidskraft til mottakskontroll med god oppfølging og kontroll på hva som blir levert.

Et annet tiltak er å øke kunnskapsnivået i befolkningen, men det krever egen interesse hos forbrukeren. Det finnes allerede mange brosjyrer og mye informasjon på internett om hvor de ulike plantetyper skal, men forbruker må selv sette seg inn i det. To av informantene som driver med utsalg av kompost nevnte at det er viktig å selge ferdig produkt på samme område som hageavfallet blir samlet inn. Forbrukeren kan da få en forståelse om hva avfallet de leverer går til, og samtidig utvikle en interesse for at produktet skal bli av bedre kvalitet.

6.4.5 Barrierer

Tre av informantene nevnte at en av barrierene som skaper disse utfordringene er at det er kommunene som har ansvaret for innsamlingen og behandlingen av fraksjonen. Ikke alle kommunene er økonomisk i stand til å kunne drive ordentlig med kompostering. I tillegg vil mengdene som mindre kommuner får inn vil være for små til at det er hensiktsmessig å sette av midler til å skaffe maskiner til drift. Kommunen må derfor se på mengden organisk avfall og den økonomiske situasjonen for å avgjøre hvordan hageavfallet skal behandles. Etter at det i 2009 ble forbud mot deponering av organisk avfall måtte mange kommuner finne løsninger for å håndtere avfallet de nå ikke kunne deponere og fortsatt var pliktige til å samle inn.

Fire av informantene nevnte at det ikke er noen norsk standard for kompost, og dermed at kvaliteten på produktet varierer. Denne forskjellen skyldes i stor grad at type avfall som kommer inn varierer mellom de ulike årstidene: fra gressklipp om sommeren, blader og fruktrester på høsten, til juletrær om vinteren. De fleste forbrukere ser på prisen når de velger produkt. Dermed har ikke kommunene og anleggene et ytre insentiv for å forbedre kvaliteten på produktet deres. Mattilsynet har retningslinjer for hvordan kompost skal markeres, men dette gjelder i hovedsak innhold av tungmetaller og materiale.

At flere forbrukere velger produkt ut ifra pris fremfor kvalitet, kan senke motivasjonen for å produsere kompost av god kvalitet hos den enkelte kommunen. I tillegg er det lett for selger å ilegge avfallet skylden for en dårlig produksjonsrunde, eller å si at prosessen er noe endret.

Erik J. Joner fra Nibio nevnte under sitt intervju at *«kunnskapen om jord, om kompost, om gjødsel er generelt veldig lav. Folk skiller ofte bare på pris og på ideologiske preferanser»*. En slik ideologisk preferanse er innhold av torv i produktet. Flere informanter nevnte torv, da det er et produkt med mange gode egenskaper for jordhelse, plantehelse og vekst. Torv er også det produktet som kompost erstatter, så spesielt de med biologi og jordfag som bakgrunn nevnte dette.

En annen barriere som ble trukket frem var kunnskapsmangel hos produsent, som kan føre til dårlige rutiner og internkontroll, som igjen gir et dårligere sluttprodukt. Sammen med kunnskapsmangel hos avfallsbesitter med tanke på hva som skal leveres hvor, kan dette føre til spredning av fremmede arter, plantesykdommer og fremmedlegemer. For å løse dette er det viktig med økt kunnskap i bransjen, samt muligheten til noe etterutdanning ved behov.

6.4.6 Spredning av fremmede arter

Over halvparten av informantene avkreftet at fremmede arter er et problem, gitt at anlegget som komposterer følger retningslinjene satt av Mattilsynet. Avfall Norge har blant annet laget en guide med «best praksis» for kompostering. Problemet med spredning av fremmede arter oppstår dersom komposthaugen ikke produserer høy nok temperatur over nok dager, eller om produsenten ikke klarer å skille substratet fra ferdig produkt godt nok, slik at det forekommer utveksling mellom dem.

Ifølge Zeven Putnam er *«spørsmålet om spredning av fremmede arter er et problem er langt på vei et kompetansespørsmål hos de som drifter»*. Alle anlegg skal ifølge Mattilsynet ha en uren sone for innkommende avfall og en ren sone for ferdig produkt. Dersom dette ikke blir godt nok etterfulgt, kan det forekomme spredning fra uren til ren sone, spesielt i form av springfrø. Dette er i størst grad synlig på områder som ikke primært driver med kompostering, men som benytter småskala anlegg for å håndtere fraksjonen hos seg selv.

Ifølge lovverket skal ferdig kompost testes før det kan selges kommersielt. I tillegg gjennomfører Mattilsynet kontroll med jevne mellomrom. Anleggets fysiske oppbygning vil også påvirke spredning av negative organismer med tanke på avrenning, vindspredning og overføring av smitte mellom anlegget og nærområdet. Avrenning ble kun nevnt som et problem av to av informantene, og da i forbindelse med spredning av soppsporer og næring. Soppsporene kan skape negative konsekvenser, avhengig av type og spredningsomfanget. Næringen kan gi en oppblomstring av ugunstige arter. Det skal i forkant søkes om utslippstillatelse fra statsforvalteren.

Informantene var til dels uenige i omfanget av problemet med spredning av fremmede arter. De som produserer kompost eller er med på å sette og følge opp retningslinjene, oppfatter problemet som lite. Få av dem nevnte spredning av fremmede arter før de ble spurt direkte. Informantene med jobb innen oppfølging av biologisk mangfold mente derimot at det til tider skaper større problemer. Disse problemene oppstår grunnet utilstrekkelig hygienisering av produktet og for få kontroller underveis i prosessen.

Tre av informantene nevnte at spredningsfaren er størst under transporteringen til gjenvinningsstasjonene. Et eksempel er gullris, som er spesielt synlig langs høyhastighetsveier og i skarpe svinger i nærheten av avleveringsplasser.

6.4.7 Utslipp av klimagasser

Når det gjelder klimagassutslipp fra prosessen kunne ingen av informantene komme med konkrete tall, rapporter eller data. De som jobber med kompostering og behandling av biologisk materiale nevnte at utslippene i utgangspunktet er minimale dersom prosessen er korrekt gjennomført. Variablene som påvirker utslippene er antall vendinger, tilgang til luft under prosessen og fuktighet i materiale. Ifølge Harald Aanes som har jobbet med kompost i over 30 år, er disse problemene mindre ved anlegg som spesialiserer seg på kompostering sammenlignet med mindre anlegg som må leie inn utstyr og ikke driver utelukkende med kompostering. Forskjellen henger i stor grad sammen med at sistnevnte ikke kan drive kontinuerlig med kompostering. Lagring over lengre tid av park- og hageavfallet kan også øke risikoen for spredning av fremmede arter.

Biologene og kompostprodusentene stilte alle spørsmålet «hva er alternativet?». Videre kunne de utdype at kompostering er et forebyggende tiltak mot dumping i fri mark, bråtebrann og utvinning av torv til jordforbedringsprodukter. Tidligere ble torv benyttet som et jordforbedringsmiddel, noe som ikke er klimapositivt. Torv kan anses som fossilt og det å utvinne torv fra myr vil ifølge informantene ha større negative konsekvenser både for nærmiljø og det globale klimaet enn komposteringsprosessen – nesten uansett. Til tross for det negative rundt klimapåvirkningene ved bruk av torv, så er det blant det beste når det kommer til kvalitet som jordforbedringsmiddel. Ifølge Jens Måge i Avfall Norge ble det gjennomført et prosjekt ved Nibio som så på forholdet mellom kompost og torv for noen år siden. Resultatet var at 1 kg kompost kunne erstatte 1 kg torv. Klimagevinstene fra å bruke kompost må derfor regnes på i forhold til unngått torvuttak.

6.4.8 Positive egenskaper ved kompost

I naturen vil døde trær, blader og annet organisk avfall bli omdannet til jord gitt tid. Ved å kompostere fraksjonen fremfor å brenne den, vil jorden fortsette å få igjen næringsstoffer og andre positive egenskaper. Samtlige informanter fordelen med at næringen fra dødt organisk plantemateriale kommer tilbake til naturen og jorda. Spesielt fosfor ble nevnt som et viktig næringsstoff. Fosfor er en begrenset ressurs, og det er derfor spesielt viktig å beholde fosfor i kretsløpet. Flere nevnte også humus som en viktig faktor for god jordkvalitet og plantehelse.

I intervjuet med stipendiat Siv Marie Aurdal var produktets evne som medium for plantevekst i urbant landbruk et sentralt tema. Viktige faktorer hun trakk frem var tetthet i materialet, evnen til å holde på og fordele vann, plantetilgjengelig næring, fordeling av partikkelstørrelse og plantenes vekst i valgt medium. Ren kompost av park- og hageavfall kan ikke sammenlignes med torv på noen av disse punktene, men må blandes med andre materialer for å kunne oppnå lignende effekter som det torv har.

Særlig biologene trakk frem hvor viktig det er med liv i kompostjorden. En god jord inneholder mikroorganismer som gir næring til meitemark. VKM utvikler en rapport som tar for seg om komposteringsprosessen er tilstrekkelig for å destruere de negative organismene og fortsatt beholde de gode. Dette argumentet viser til utfordringen knyttet til at produktet skal være uten skadelige fremmede organismer, men at det samtidig helst ikke skal være helt sterilt.

6.4.9 Biokull

Fire av informantene hadde kjennskap til og erfaringer med biokull som jordforbedringsmiddel. De nevnt at en av forskjellene mellom kompost og biokull ligger i hvor levende produktet er. Kompost inneholder mat og næring for gode bakterier, sopp og meitemark, mens biokull er i større grad et sterilt og dødt produkt. Meitemark er viktige for å vende jorda for å opprettholde kvalitetene som gjør jorda god å plante i, samt at avføringen fra marken inneholder næring som er lett plantetilgjengelig. I pyrolyse blir biomassen sterilisert som fører til at fremmede arter, ugressfrø og mange miljøgifter blir destruert. Dette er i seg selv svært positivt, men i prosessen blir også de gode mikroorganismene og næringsstoffene borte.

Både Erik J. Joner fra Nibio og Michael Wendell i VKM trekker frem *«jord er et levende produkt»*. Selv om biokullet har gode egenskaper og fungerer godt agronomisk, er det ikke et levende produkt. Derfor bør det brukes i kombinasjon med for eksempel kompost. Ifølge to av informantene vil et blandingsprodukt av biokull og kompost, eventuelt biogjødsel fra et biogassanlegg, kunne ha egenskaper som kan erstatte torv. Som dets evne til å holde på vann og næring. Siv Marie Aune kommenterte også at de negative fysiske egenskapene til kompost som plantemedium, er forsterket i biokullet.

Pyrolyse er en relativt lite utprøvd teknologi i Norge. Dermed er kjennskapen til biokull som et produkt lav. Daglig leder av Oplandske Bioenergi, Einar Stuve, nevnte at *«markedet for biokull er ikke helt der i dag, det er for nytt»*. Det er få som vet hva biokull kan brukes til, og prisen i dag er for høy til at folk velger dette fremfor fossilt kull i de fleste tilfeller.

Einar nevnte også at *«lov og regelverk henger ikke med i utviklingen»*. Biokull er foreløpig ikke regulert av EU, men er pekt ut som et mulig gjødselprodukt med et foreslått regelverk. Linnea Wang fra Mattilsynet utdyper at biokull ble tatt inn på «positivitetslista» etter at EU godkjente bruken i sin økologiforordning i februar 2021. Det betyr at biokull kan brukes som innsatsvare i økologisk landbruk i Norge. Her er det dermed et marked som vil være interessert i biokull. Når det gjelder regulering av biokull, forventes det at Norge vil se til EU-regelverket når det er vedtatt.

6.4.10 Oppsummering

Informantene nevnte at spredninger av fremmede arter i stor grad kommer fra kompetanse- og kunnskapsmangel hos avfallsbesitter og produsent. Ved pyrolyse vil denne faren forsvinne helt da alt levende blir destruert, men til gjengjeld er det endelige produktet «dødt». Derfor må kvalitetene i den levende komposten veies opp mot den relativt lave spredningsfaren. Dette gjelder også for miljøgiftene, men siden ingen av informantene tok opp dette som et tema, kan dette anses for å være et svært lite problem. Fremmedelementer i kompost er i dag ikke et stort problem. Disse er relativt enkle å sortere ut tidlig i prosessen, og produsent har initiativ til å håndtere dette gjennom salg av produktet.

Når det kommer til de totale miljøpåvirkningene fra hver av metodene, bærer valget preg av fokusområdet. Det kommer frem i intervjuene at kompost er et velegnet plantemedium med mange gode egenskaper, men pyrolyse som behandlingsalternativ destruerer de fleste uønskede negative utfordringene som spredningsfare, plantegifter og plantesykdom. Dersom spredningsfare er det viktigste, vil pyrolyse være det bedre alternativet. Kompostering vil derimot være det beste dersom hovedfokuset er jordhelse.

7. Diskusjon

7.1 Hovedmomenter i oppgaven

7.1.1 Park- og hageavfall som en ressurs

Oppgaven tar for seg en mer helhetlig tilnærming av de to systemene enn det eksisterende litteratur, artikler og rapporter gjør. Annen relevant litteratur om temaet tar for seg smalere og mer spesifikke problemstillinger. Eksempelvis enten klimaregnskap, bruk av biokull eller kompost som erstatning for torv, eller egenskaper som jordforbedringsmiddel og dyrkingsmedium. Det meste av litteraturen tar også bare for seg én av prosessene om gangen. I motsetning til eksisterende litteratur, er fokuset for denne oppgaven å ta vare på ressursen som park- og hageavfall kan utgjøre for samfunnet. Derfor dekker oppgaven flere temaer for å skaffe et helhetlig bilde av situasjonen. Hvilke av systemene som totalt sett har lavest klima- og miljøpåvirkninger er vanskelig å si sikkert med basis i datagrunnlag for analysene, i tillegg til at det er et komplekst system der ikke alle effektene er kjent.

De to systemene har hver sine fordeler og ulemper, og må sees på i henhold til ønsket effekt og resultat. Kompostering er en velprøvd teknologi som gir et godt jordforbedringsmiddel mange har kjennskap til. Systemet for regulering er på plass, samt at det er lett for mindre kommuner å behandle park- og hageavfallet sitt på denne måten. Kompost er et nødvendig produkt med tanke på fôr til mikrobielivet i jorda. Derimot krever pyrolyse mer kompetanse. Pyrolyse er en relativt lite utprøvd metode i Norge og har en større investeringskostnad. Miljøgifter, plast og plantesykdom blir destruert under prosessen, og spredningsfare av uønskede arter er tilnærmet lik null. I tillegg, må biokullet i større grad å blandes med andre produkter for å fungere som et plantemedium. Den største fordelen med biokull er evnen til å lagre karbon i jorda. Pyrolyse og kompostering er begge gode alternativer for behandling av park- og hageavfall, men de tilfører forskjellige positive egenskaper, og har hver sine utfordringer.

7.1.2 Nye funn

Blant nye funn er informasjon om konsentrasjonene av tungmetaller i ferdig produkt. I litteraturen kommer det frem at tungmetallinnholdet i biokull burde vært likt eller høyere enn konsentrasjonen i kompost. Sammenlignet med litteraturen viser dataene fra Scanship mindre tungmetallkonsentrasjoner i biokullet enn i komposten. Spesielt sink-innholdet er nesten halvert. En mulig forklaring er at tungmetallinnholdet i substratet blir fordelt på flere produkter under pyrolyseringen, mens komposten inneholder den samme mengden som råmaterialet. Temperaturen oppnådd under pyrolyseringen er høy nok til at mange av tungmetallene blir flyktige. En annen årsak og feilkilde i resultatene for denne oppgaven er at substratet i utgangspunktet var forskjellig. Komposten er laget på park- og hageavfall mens biokullet er produsert på flis. Begge substratene kommer fra relativt likt biologisk materiale, og det er derfor antatt at disse to substratene kan sammenlignes. For å kunne si noe sikkert om forskjell i tungmetaller mellom kompost og pyrolyse burde det gjennomføres målinger på kompost og biokull produsert på samme materiale.

Under intervjuene kom det også frem momenter som ikke er nevnt i eksisterende litteratur. Et av disse punktene er problemstillingen rundt spredning av fremmede arter. Spredningen er først og fremst et problem som er knyttet til kompetansemangel hos komposterer eller kunnskapsmangel hos avfallsbesitter. Fra komposterer sin side gjelder dette dårlig skille mellom ren og uren sone på anlegget, for lav temperatur i komposteringsprosessen eller for kort prosessetid med høy nok temperatur. Kunnskapsmangel hos avfallsbesitter skyldes i stor grad manglende kunnskap og informasjon. Konsekvensene kan være spredning fra åpen transport av fremmede arter, samt at disse havner sammen med resten av park- og hageavfallet. Ved utilstrekkelig mottakskontroll vil ikke dette bli fanget opp og arten kan spre frø eller plantesykdom videre.

7.1.3 Resultater som underbygges av kunnskapsgrunnlaget

Resultatene fra klimaregnskapet samsvarer med funn i litteraturen. Kunnskapsgrunnlaget redegjør for at pyrolyse som behandlingsprosess har lavere utslipp enn kompostering. Beregningene i denne analysen indikerer at utslippene fra pyrolyse er lavere enn for kompostering. Om pyrolyse blir valgt fremfor kompostering, blir utslippene redusert med nesten 75 %. Resultatene bærer preg av en usikkerhet, men forskjellen er så stor at de allikevel kan anses som gyldige.

Momenter som ikke er med i analysen er energibruk til tørking og aktivering av biokullet. Tørking av substratet krever en del energi. Analysene i denne oppgaven legger til grunn at tørkingen foregår kun ved tilførsel av overskuddsvarmen fra pyrolyseprosessen. Det er usikkert om dette vil være tilstrekkelig med energi for å tørke massene eller ikke fordi det er krevende å fordampe vann fra biomassen. Vannverdiene skal ned til >10 %. Er det ikke tilstrekkelig med varme fra pyrolyseprosessen, må det tilføres mer varme. Varmen kan bli produsert fra enten elektrisitet eller et annet drivstoff. Tilførselen av mer energi vil gi økte utslipp for prosessen. For å aktivere biokullet er det nødvendig å tilføre mer energi, som vil gi økte utslipp. Pyrolyseprosessen har ifølge analysene gjort i kapittel 6.3 om lag 75 % mindre utslipp enn komposteringen. Forskjellen tilsier at den elektriske tilførselen til prosessen kan firedobles. Tørking er en energikrevende prosess, men deler av behovet for varme blir dekket av overskuddsvarmen fra pyrolyseprosessen. Det lite sannsynlig at prosessen vil kreve fire ganger det selve pyrolyseringen gjør. Driftes prosessen på elektrisk energi er det derfor lite sannsynlig at tørkeprosessen vil påvirke det endelige resultatet så mye at pyrolyse ikke lenger er det behandlingsalternativet med minst klimagassutslipp. Det samme gjelder for aktiveringen av biokullet.

For at pyrolyseprosessen skal ende på samme utslippsnivå som kompostering er det mer realistisk at utslippet per kWh øker. Denne faktoren påvirker pyrolyse med MAP-teknologi i stor grad, mens komposteringsprosessen nesten ikke blir påvirket.

Som kunnskapsgrunnlaget konkluderer med, kan pyrolysert biokull fra park- og hageavfall anses som CCS. Gitt kunnskapsgrunnlaget vil biokullet inneholde 50 % av karbonet fra substratet. Datagrunnlaget for analysene gjort i kapittel 6.1.3 legger til grunn at 90 % av biokullet er karbon. Basert på dette estimatet vil de unngåtte utslippene per pyrolysert tonn park- og hageavfall være på 825 kg CO₂e. Estimatet viser et betydelig høyere unngått utslipp enn utslippene fra prosessen. To av kildene i kunnskapsgrunnlaget underbygger funnet om at de unngåtte utslippene fra bruk av biokullet som jordforbedringsmiddel er større enn utslippene fra hele behandlingsprosessen.

Utfordringer knyttet til bruk av kompost og biokull som jordforbedringsmiddel støtter også opp under eksisterende litteratur. Datagrunnlaget for denne delen belager seg i stor grad på intervjuene og den kvalitative dataen. Spesielt ble det nevnt i intervjuene at kompost er et levende produkt, mens biokull ikke er det. Jorden er levende, derfor burde et godt jordforbedringsmiddel også være levende. Vitenskapskomiteen for Mat og Miljø gjennomfører et forskningsprosjekt som ser på hva som er de mest skadelige fremmede organismene i kompost fra park- og hageavfall, og om komposteringsprosessen er nok til å håndtere dem. Etter planen vil rapporten utgis senere i 2021. Rapporten kan belyse i hvor stor grad spredning av skadelige fremmede organismer fra kompost er et problem, eller ikke.

Bruk av biokull i jord har ulike fordeler. En av disse er at jorda blir mindre kompakt. Biokullet tilfører en stabil og porøs struktur som gir et økt volum til jorden, og økt tilgang til luft. Biokullet holder også godt på vann og næring som er tilført. I tillegg til at biokullet kan binde til seg miljøgifter og forurensende stoffer. Selv om deler av nitrogenet og fosfor blir destruert under pyrolyseprosessen, vil biokullet kunne motvirke utvanning av disse fra jord. Den store og porøse overflaten fungerer også som nisje for mikroorganismer som sopp og bakterier. Ved bruk av biokull blir det også mindre fare for plantesykdommer. I kombinasjon med andre produkter som biogjødsel, er biokull et bra tilskudd til jorden. Dette gjør at biokullet fungerer godt som et jordforbedringsmiddel, til tross for at produktet i seg selv er «dødt».

Litteraturen nevner spesifikk at den høye pH-verdien i biokullet er problematisk for plantelivet dersom det blir for høye konsentrasjoner av biokull. Av resultatene kommer det frem at komposten har en pH på 8,3, mens biokullet har en antatt pH på 9. Produktene er basiske.

Forskjellen mellom verdiene kan ha en relativt stor påvirkning på plantemediets kvalitet, spesielt dersom produktet benyttes på mindre områder som har en lav bufferkapasitet. En informant nevnte at pH-verdien er problematisk med tanke på urbant landbruk. Hun nevnte også at pH-problematikken er relativt lik for de to produktene, men at biokullet er noe høyere og dermed er et litt større problem. Gitt at pH-verdiene ikke blir nevnt i flere rapporter eller av flere av informantene kan det anses for å være en mindre utfordring. Denne konklusjonen kan være påvirket av at begge produktene blandes med andre materialer, og at pH verdien dermed delvis nøytraliseres i henhold til blandingsforholdet. Den høye pH-verdien er positiv i områder som sliter med et surt miljø i jorden. Ved bruk av spesielt biokull kan behovet for kalking reduseres.

Resultatene fra material- og energianalysen samsvarer med eksisterende litteratur. I litteraturen kommer det frem at massebalansen vil fordeles så mellom 20-35 % av substratet blir til biokull. Oppgavens data tilsier 25 %, noe som er innenfor dette spekteret. For energien tilsier litteraturen at om lag 30 % går til biokullet, mens oppgavens datagrunnlag benytter 40 %. Estimater for oppgaven er dermed noe høyere enn i litteraturen. Det er usikkerhet knyttet til validiteten av datagrunnlaget benyttet. Forskjellen kan være et resultat av avrunding av %-andelen som går til hva, eller forskjell i substrat eller pyrolyseringsmetode. Karbonbalansen presentert i kapittel 6.1.3 viser at om lag 50 % av karbonet går til biokullet og blir lagret. Det er i kunnskapsgrunnlaget funnet to ulike kilder som begge viser til at opp mot 50 % av karbonet går til biokullet.

I tillegg legger oppgaven til grunn at mer av energien blir bevart under pyrolyseprosessen enn det kunnskapsgrunnlaget gjør. De noe høyere dataene rundt energibalansen kan være preget av at informantene som har bidratt med datagrunnlaget ønsker å fremstille sitt anlegg bedre enn det er. MFAen har en høy grad av usikkerhet. Derfor er det valgt å se på både material- og energibalansen som at de bygger opp under eksisterende litteratur presentert i kunnskapsgrunnlaget.

7.1.4 Pyrolyse og kompostering som komplementære prosesser

Oppgavens kunnskapsgrunnlag, studieobjekt og intervjuene nevner så vidt spørsmålet om pyrolyse og kompostering er komplementære behandlingsalternativer fremfor konkurrerende. Grunnet tidsomfanget av oppgaven er det ikke blitt gjennomført analyser på et alternativ med både kompostering og pyrolyse. En aktuell analyse ville vært å lage et alternativ til for både transport og livsløpsvurderingen. I tillegg hadde det da vært naturlig å se på løsninger for fordeling av innsamlet park- og hageavfall. Denne delen av diskusjonen tar for seg enkelte argumenter for og imot et slikt alternativ.

Et argument for å velge et alternativ med begge behandlingsalternativene, er at ikke alt park- og hageavfall egner seg til pyrolyse. De større delene med mye lignin blir til biokull av god kvalitet, mens de mindre delene bare blir til aske under pyrolyseprosessen. De mindre delene inneholder ofte mye nitrogen (N) og er derfor godt egnet til kompostering. Derfor kan man si at for å utnytte park- og hageavfallet på en best mulig måte, bør det fordeles mellom de to behandlingsalternativene.

Fordeler ved å sende alt park- og hageavfallet til pyrolyse er at fremmede arter, miljøgifter og plantesykdommer blir destruert. En annen fordel ved å kun velge en av behandlingsalternativene er at man slipper å sortere avfallet, en prosess som krever arbeidskraft og dermed økonomiske midler. Derimot vil ressursen hageavfallet utgjør bli bedre bevart ved å pyrolysere de større delene, og å kompostere resten. Ved å benytte både pyrolyse og kompostering, vil komposten og dens fordeler heller ikke bli borte. Systemet for kompostering eksisterer allerede i dag.

Et alternativ til kompost, er å benytte biogjødsel fra biogassproduksjonen. Biogjødselen har også gode egenskaper og næring som jorden kan dra nytte av. På Den Magiske Fabrikken benytter de i hovedsak matavfall og husdyrgjødsel som substrat. Biogjødselen produsert på dette er godt egnet til jordbruk.

Sorteringen kan foregå enten ved at avfallsbesitteren selv fordeler avfallet i to hauger eller ved at mottakskontrollen gjør det. Fordelen med at avfallsbesitteren sorterer er at det ikke vil være en utgift for Vesar. Ulempen er at avfallsbesitterne kan sortere feil og bli demotivert fordi de nå må kaste avfallet på to steder. To avfallshauger vil også ta opp et større areal på området. Ved å ta sorteringen som en del av forhandlingen for behandlingsalternativene vet man at det kommer riktig sted, men det vil fortsatt kreve nye arealer og arbeidskraft som koster penger. Hos anlegget i Sandnes, går lukeavfall, gress og annet materiale fra urter og busker går til kompostering mens de mer lignin holdige delene som greiner og stammer går til pyrolyse.

Et problem ved å sortere avfallet, er at komposten vil bli mer kompakt. De større partiklene som ofte er utgjort av grovknuste røtter, greiner og trestammer gjør det lettere for luft å komme inn i komposthaugen. Prosessen gjennomføres da mer gunstig både med tanke på den biologiske nedbrytelsesprosessen og på produksjon av klimagassutslipp. Det finnes ulike metoder for å motvirke aerob nedbryting av materiale, men samtlige krever tilførsel av energi eller drivstoff, som igjen fører til utslipp. En mulig løsning til denne utfordringen, er å sikte ut de grovere delene etter komposteringsprosessen for så å sende de til pyrolyse. Ved denne løsningen vil man ende opp med klimagassutslipp fra både komposteringsprosessen og pyrolyseprosessen.

For å avgjøre om det er hensiktsmessig å fordele avfallet etter komposteringsprosessen burde det gjøres forskning på hvor mye utslippene fra biomassen under komposteringsprosessen blir redusert med å beholde de større delene under prosessen opp mot at de blir tatt ut før komposteringen begynner.

Fordeles park- og hageavfallet etter et grovt estimat fra Lindum, vil 40 % egne seg til pyrolyse mens de resterende 60 % egner seg for kompostering. Fordeles alt park- og hageavfallet til Vesar på denne måten vil 6 000-8 000 tonn gå til pyrolyse og 9 000-12 000 tonn gå til kompostering. Dette tilsvarer et totalt klimagassutslipp på om lag 17,3 kg CO₂e per tonn park- og hageavfall behandlet. Dette alternativet har høyere utslipp per tonn avfall behandlet sammenlignet med kun pyrolyse, men har et lavere utslipp sammenlignet med kompostering.

Forskjellen fra pyrolyse er en økning på nesten 60 %, mens klimagassreduksjonen sammenlignet med kompostering er på nest 30 % bare. Alternativet med både kompostering og pyrolyse vil derfor være bedre med tanke på klimaregnskapet sammenlignet med kompostering, men betraktelig større sammenlignet med kun pyrolyse.

Et valg som må tas er hvor i løpet park- og hageavfallet skal sorteres. Skal det gjøres på gjenvinningsstasjonen eller ved behandlingsområdet. Begge løsningene vil føre til en økning av utslipp fra transporteringen. Det første alternativet krever at det fordelte park- og hageavfallet hentes av hver sin lastebil for å bli fraktet til hvert sitt behandlingssted. Park- og hageavfall er en voluminøs fraksjon og effektiviteten ved frakt er lav. Velges det å sortere avfallet på et av behandlingsområdene eller etter komposteringen er gjennomført må de større ligninholdige delene fraktes fra et anlegg til et annet, som vil gi en ekstra distanse. Det anbefales å sette opp ulike modeller med de ulike sorteringsalternativene for å sammenligne hvilken løsning som vil ha det laveste klimafotavtrykket for behandling av fraksjonen.

7.2 Sammenlignbarhet av resultatene

7.2.1 Systemene

Sett ut ifra at både kompostering og pyrolyse er behandlingsmetoder for fraksjonen park- og hageavfall, kan miljø- og ressursbelastningene for disse to systemene sammenlignes. Derfor blir en livsløpsanalyse der disse blir sammenlignet hensiktsmessig. Ser man derimot på produktene ut fra prosessene, kompost, biokull, syngass og kondensat, er ikke systemene like sammenlignbare. Produktene syngass og kondensat er helt forskjellige fra kompost, og har ikke et felles sammenligningsgrunnlag.

Produktene kompost og biokull er begge faste fraksjoner og kan benyttes som jordforbedringsmiddel. Med dette sagt, kan komposten i større grad kunne opptre alene, mens biokullet må blandes med andre komponenter for å oppnå gode effekter. Det vil si at de ikke har samme funksjon og at man må ty til systemutvidelse og multifunksjonalitet ved en sammenligning. I tillegg har disse to produktene forskjellige kvaliteter. Kompost tilfører næring mens biokullet fungerer bedre som oppbevaringsplass for næring og væske. Oppgaven tar ikke for seg klimagassutslipp tilknyttet videre bruk av produktene eller oppgradering av pyrolyseproduktene.

7.2.2 Data validitet og mulige feilkilder

Validitet handler om i hvilken grad resultater og tolkning av disse vil være gyldige eller ikke. For å sikre at arbeidet vil ha relevans videre er det viktig med relabilitet, som måler grad av etterprøvbarehet i analysen.

De kvantitative analysene er gjort med basis i en blanding av generelle tall funnet i litteratur og i Sima Pro, og mer spesifikke tall som foreligger fra eksisterende pyrolyseanlegg. Derfor vil ikke resultatene nødvendigvis være representative for alle anlegg og mulige løsninger. Kompostering og pyrolyse er begge prosesser med mange variabler som påvirker utslipp. I tillegg er det andre forutsetninger som også varierer mellom anlegg i ulike områder. Eksempelvis vil elektrisk strøm produsert i Norge fra fornybare energikilder ha et lavere fotavtrykk enn elektrisk strøm fra kull. Det samme gjelder drivstoff, der man både kan variere mellom produksjonssted og type drivstoff: diesel, HVO-diesel, biogass, bensin etc.

En annen feilkilde for de kvantitative resultatene, er at analysene baserer seg på flis som substrat. Flis består kun av de lignin og celluloseholdige delene av park- og hageavfallet. De nitrat-holdige delene fra park- og hageavfallet er dermed ikke inkludert. Det samme gjelder sand og småstein som ofte følger med røtter. Forskjellene har påvirkning på material- og energibalansen, samt at det vil påvirke nødvendig energi for å pyrolysere avfallet. Innholdet i biokullet vil også være påvirket. Til tross for dette er flis sammenlignbart med park- og hageavfall.

Resultatene fra de kvalitative dataene og litteraturgrunnlaget bærer begge preg av at det er lite forskning på enkelte områder. Tallene og informasjonen i oppgaven står ikke like sterkt fordi det er få studier å sammenligne dem med. Til tross for dette, er det valgt å benytte det som er dagens kunnskapsstatus til å gjøre analysene, og som sammenligningsgrunnlag mellom de to systemene.

Resultatene fra de kvalitative dataene bærer preg av å være innhentet gjennom åpne intervjuer, både i valgte spørsmål og hvordan disse er formulert og lagt fram. I tillegg vil svarene være farget av informantens bakgrunn og bransje. Intervjuene er forsøkt gjennomført med minimal innblanding fra intervjuer for å redusere mulighetene for påvirkning på svarene som så vil få innvirkning på resultatene. Informantene kan også ha unnlatt å nevne enkelte tema eller svart med kun deler av kunnskapen de sitter med som en form for partiskhet. Mange av informantene intervjuet i denne studien kjente til hverandre, noe som er naturlig gitt et såpass snevert fagområde. Det er forsøkt å ikke utelate personer eller grupper med mulig avvikende synspunkter. Informantene er plukket ut av intervjuer basert på egne tanker om relevante kandidater.

7.3 Bruk av resultatene

7.3.1 Relevans for Vesar

Analysene i oppgaven baserer seg på mengdene av park- og hageavfall som Vesar årlig får inn, samt alternativene Vesar har vurdert for videre bruk av produktene. Basert på dette vil resultatene være relevante for Vesar. For transport oppsummerer oppgaven også antall tømminger og mengder fra hver av de seks stasjonene, og er dermed et sammendrag av deres 72 månedsrapporter for 2020.

På bakgrunn av at Vesar ønsker å se hvilken løsning som har de laveste klimagassutslippene er en anbefaling å satse videre på pyrolyse. Det er verdt å merke seg at oppgaven ikke tar med de totale utslippene fra videre bruk av produktene, og at det derfor burde bli gjennomført mer omfattende analyser før et endelig valg blir tatt.

Gitt oppgavens omfang og datagrunnlag har løsningen med pyrolyse de laveste utslippene fra både behandlingen og transportereringen. Den årlige transportavstanden blir halvert i systemet med pyrolyse sammenlignet med systemet der kompostering er valgt behandlingsalternativ. Selv om utslippene fra transportereringen per tonn behandlet park- og hageavfall er lav sammenlignet med behandlingen, vil en mulig halvering av reisedistanse være positiv med tanke på klimagassregnskapet til Vesar.

Det er svært få bedrifter i Norge som har storskala pyrolyseanlegg, og det anbefales derfor å gjennomføre flere forsøk med pilotanlegg for å se hvordan disse fungerer over tid. Å snakke med andre større anlegg i Norge og i utlandet er også lurt. Driftstid og tilgjengelige ressurser må også vurderes. Selv om teknologien er den samme vil et større anlegg ha større utslipp av klimagasser. Årsaken til dette er at anlegget kan ta en større mengde materiale, men krever samtidig mer energi for å gjennomføre prosessen. Økningen av nødvendig energi vil ikke nødvendigvis være den samme som økningen i anleggsstørrelsen. Energien som er nødvendig for å pyrolysere substratet vil også være påvirket av virkningsgraden og fordeling av substratet i maskinen, samt faktorer som fukt og partikkelstørrelse. Ved en økning i anleggsstørrelse vil det også bli en økning i utslipp, men det er også et potensiale for at utslippene per tonn behandlet blir redusert fordi mer substrat kan behandles per enhet tilført energi.

7.3.2 Bruk av resultatene utenfor Vesar

Data hentet inn i forbindelse med kompostering kommer fra litteraturen og er generiske data fra flere anlegg. Beregningene rundt pyrolyse belager seg på data fra et bestemt anlegg, og er dermed ikke like generaliserbare. Siden datagrunnlaget baserer seg på MAP-teknologi, vil det være av interesse for andre med samme teknologi. Som helhet vil oppgaven gi en generell forståelse av det totale bildet og alle faktorene som har innvirkning på klimafotavtrykket av valgt metode. I tillegg vil oppgaven gi en indikator på hvilken løsning som har de største påvirkningene på miljøet og det biologiske mangfoldet.

7.3.3 Momenter for utvikling

Temaet biokull som et klimatiltak i landbruket er komplekst. Problemstillingen strekker seg over flere fagområder. Eksempelvis agronomi, bioteknologi, energi, kjemi, klima og miljø, politikk, samfunnsfag og økonomi. Interessen for biokull har økt, noe som har ført til økt bevissthet rundt bruk av produktet, både i teori og praksis. Biokull har et stort potensial for å bidra til et klimanøytralt landbruk. For å nå målene i Paris-avtalen innen 2030, er det viktig å videreutvikle de områdene som har potensiale for store utslippskutt. Et slikt område for landbrukssektoren er produksjon og bruk av biokull. Politiske virkemidler og økonomisk støtte er spesielt viktig for å stimulere til utvikling.

Det norske lovverket knyttet til bruk av biokull som jordforbedringsmiddel er også et moment som trenger utvikling. Biokull er et relativt nytt produkt som må implementeres i ulike relevante forskrifter, som blant annet gjødselsforskriften mv. organisk oppgav. Etter hvert som EU jobber med eget reglement og at det kommer flere pilotprosjekter med pyrolyse i Norge, vil det Norske lov- og regelverket følge etter.

Innhold og biotilgjengelighet av PAH, tungmetaller og miljøgifter i biokull burde også undersøkes nærmere. Det er lite litteratur som tar opp disse temaene til tross for konsekvensene de kan ha for nærmiljøet og helsen til dyr og mennesker. PAH er nevnt som et skadelig element i biokull. Nyere tall fra VOW-prosjektet viser til at verdiene av PAH i biokullet er lave, men at det varierer mellom de ulike pyrolyseprosessene. Det er gjennomført enkle undersøkelser for tungmetaller, men de fleste er relativt gamle.

7.4 Videre arbeid

Av videre arbeid er det enkelte punkter som spesielt kan være av interesse for Vesar, men også for andre interessenter i tematikken. Blant punktene er at det ville vært nyttig med grundigere studier av økonomiske aspekter rundt investering i pyrolyseanlegg, mer omfattende LCA-undersøkelser av pyrolyse sammenlignet med andre behandlingsløsninger, optimalisering av transport, markedsmulighetene, synergieffekter, og lovverket og myndighetens rolle. Disse er nærmere presentert i punktene under.

Et punkt som oppgaven ikke har gjort analyser for er det økonomiske. Det er ikke gjort beregninger for kostnader knyttet til investering og drift for de ulike systemene. For mange, er det økonomiske aspektet er for mange det viktigste når det kommer til å ta en avgjørelse. Derfor er det anbefalt å se nærmere på dette punktet før en endelig avgjørelse blir tatt.

Som nevnt flere steder i oppgaven er det mange variabler som påvirker utslippene tilknyttet systemene. Derfor vil det være hensiktsmessig å gjennomføre analyser på flere ulike anlegg og metoder for å se hva som er den mest gunstige. Det bør også bli gjennomført en LCA som tar med produksjon av pyrolyseanlegget.

Et moment oppgaven er innom, men ikke gjør estimerer for, er et alternativ med både kompostering og pyrolyse. Videre arbeid på dette punktet omfatter hvordan og når i prosessen park- og hageavfallet bør sorteres eller siktes, hvordan logistikken rundt transport blir, hvor store mengder som faktisk går til hver prosess og om dette er en løsning som totalt sett har lavere utslipp enn å satse på enten eller.

Transport og logistikk for håndtering av avfallet vil ha påvirkning på klimagassutslippene. Dersom man ønsker å forbedre driften på dette punktet, er det et viktig moment å se på. Gitt at Vesar har ansvaret for flere andre fraksjoner i tillegg til park- og hageavfallet, vil det være gunstig å se på muligheter for optimalisering av transport for mer enn bare denne avfallstypen. Oppgaven tar ikke høyde for utslipp tilknyttet frakt av avfallet fra avfallsbesitter til gjenvinningsstasjonen. Dette momentet vil i større grad være relevant å utforske ved planlegging av nye gjenvinningsstasjoner og antall boliger i området med deres reisevei til gjenvinningsstasjonene.

Oppgaven ser ikke på barrierer tilknyttet myndigheter og lovverk. Før en avgjørelse skal tas er det lurt å skaffe seg en oversikt over mulige problemer tilknyttet dette. En annen barriere som ikke er sett på, er kunnskapsmangel og kompetanse hos forbruker i forbindelse med salg og bruk av biokull.

Det er i samarbeid med ReKlima planlagt kommersialisering av biokullet som blir produsert i pyrolyseprosessen. ReKlima har allerede startet arbeide med å se på markedsmulighetene for biokull, samt å benytte deler til egen klimatomatproduksjon. I begge alternativene blir biokullet blandet med andre materialer for å danne et jordforbedringsmiddel. Selv om arbeidet er i gang, er det viktig å gjøre en god kartlegging av mulighetene og kjøpsviljen til målgruppen.

Til slutt, vil en anbefaling være å fortsette med å finne synergier mellom produktene fra pyrolyse og resten av det sirkulære systemet på Sem. I tillegg er det anbefalt å se på muligheten til å benytte andre råmaterialer som substrat fordi Vesar sin mengde park- og hageavfall er mindre enn kapasiteten til en pyrolysemaskin.

8. Konklusjon

Oppgaven ser på utnyttelse av ressursen park- og hageavfall. Hovedproblemstilling som skal besvares er: *Hva blir netto klima- og miljøpåvirkning av en løsning for behandling av park- og hageavfall med pyrolyse sammenlignet med kompostering sett ut ifra et livsløpsperspektiv. Hvilke fordeler og ulemper har de ulike systemene med tanke på behandling av organisk avfall?*

Gitt en funksjonell enhet som ser på utslipp tilknyttet 1 tonn park- og hageavfall behandlet, indikerer studien at utslippene for et system med pyrolyse er betydelig lavere enn et system med kompostering. Utslippene fra pyrolyseprosessen er en firedel av utslippene fra komposteringsprosessen. Dette er medberegnet transport fra gjenvinningsstasjon til behandlingsområde, og med både indirekte og direkte utslipp fra behandlingen. I tillegg fungerer biokull fra pyrolyse som CCS og hindrer dermed utslipp av klimagassen karbondioksid til atmosfæren.

Miljøpåvirkningene fra de forskjellige systemene varierer. Ser man på spredningsfare av negative fremmede organismer vil pyrolyse være mer gunstig enn kompostering da pyrolyseprosessen destruerer det meste. Ser man derimot på bevaring av næring og den begrensede ressursen fosfor vil kompostering komme bedre ut. Som plantemedium er kompost å foretrekke ved bruk alene. Komposten har gode egenskaper tilknyttet kompetanse om bruk av produktet, en mer gunstig pH- verdi og materialets tetthet. Biokullet må i større grad kombineres med andre produkter for å fungere bra som jordforbedringsmiddel. Til gjengjeld har biokull i kombinasjon med for eksempel biogjødsel svært gode agronomiske egenskaper. Positive egenskaper ved å benytte biokull i jordforbedringsmidler er mindre kompakt jord, bedre drenering og økt pH i sur jord. Fremmede legemer er også et mindre problem ved pyrolyse enn ved kompostering, selv om det generelt ikke er et stort problem.

Vesar ønsker å se på hvilken løsning som har det laveste fotavtrykket. De bør dermed satse videre på et system med pyrolyse som valgt behandlingsløsning for park- og hageavfallet deres.

9. Referanser

Andersen, J., Boldrin, A., Christensen, T. & Scheutz, C., 2010. Mass balances and life-cycle inventory for a garden waste windrow composting plant. *Waste Management & Research*, 28(11), pp. 1010-1020.

Artsdatabanken, 2018. *Fremmede arter*. [Internett]
Available at: <https://www.artsdatabanken.no/fremmedearter>
[Funnet 8 juni 2021].

Avfall Norge, 2016. *Beste praksis for kompostering av hageavfall - veileder 2016*. [Internett]
Available at: <https://avfallnorge.no/fagomraader-og-faggrupper/rapporter/beste-praksis-for-kompostering-av-hageavfall-veileder-2016>
[Funnet 10 juli 2020].

Blytt, L. D., 2016. *Beste praksis for kompostering av hageavfall*, s.l.: Avfall Norge.

Bouldrin, A., Hartling, K. R., Laugen, M. & Christensen, T. H., 2010. Environmental inventory modelling of the use of compost and peat in growth media preparation.. *Resources, Conservation and Recycling*, Oktober, pp. 1250-1260.

Boye, E., 2019. *Sirkulær framtid - om skiftet fra lineær til sirkulær økonomi*, s.l.: Framtiden i våre hender.

Braun, V. & Clarke, V., 2006. Using thematic analysis in psycholog.. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), pp. 77-101.

Brod, E., 2021. *Organisk avfall som gjødsel: Nibio*. [Internett]
Available at: <https://www.nibio.no/tema/jord/organisk-avfall-som-gjodsel>
[Funnet 13 mars 2021].

Brod, E. & Haraldsen, T. K., 2017. *Miljøvennlige jordblandinger - klima, resirkulering og bruksområder*, s.l.: NIBIO.

Christensen, T. et al., 2020. Application of LCA modelling in integrated waste management. *Waste Management*, September, pp. 313-322.

Curran, M. A., 2015. *Life Cycle Assessment Student Handbook*. s.l.: John Wiley & Sons Inc.

Danielsen, S. & Xin, G., 2019. *Pyrolysis Treatment of Garden Waste, Sludge Digestate, Food Waste Reject and Biofertilizer - a Pilot-Scale Study*, s.l.: s.n.

Dong, J. et al., 2018. Life cycle assessment of pyrolysis, gasification and incineration waste-to-energy technologies: theoretical analysis and case study of commercial plants. *Science of The Total Environment*, 1 juni, pp. 744-753.

Eggen, S., Kopstad, B. & Lystad, H., 2020. *Mulighet for pyrolyse av blandet plast*, s.l.: Norwaste.

El-Sayed, S., 2018. *Re: What is the Major Difference Between Pyrolysis and Torrefecation of Biomass? What Method is More Efficient and productive?*. [Internett]
Available at: [https://www.researchgate.net/post/What is the major difference between Pyrolysis and torrefaction of biomass Which method is more efficient and productive](https://www.researchgate.net/post/What_is_the_major_difference_between_Pyrolysis_and_torrefaction_of_biomass_Which_method_is_more_efficient_and_productive)
[Funnet 15 juli 2020].

EPD Norge, u.d. *Bruksanvisning for hvordan tolke EPD'er*, Oslo: epd-norge.no.

FN, 2019. *Bærekraftig utvikling*. [Internett]
Available at: <https://www.fn.no/tema/fattigdom/baerekraftig-utvikling>
[Funnet 20 februar 2021].

FN, 2020. *FNs Bærekraftsmål*. [Internett]
Available at: <https://www.fn.no/tema/fattigdom/baerekraftig-utvikling>
[Funnet 15 mars 2021].

FN-sambandet, 2020. *Parisavtalen*. [Internett]
Available at: <https://www.fn.no/om-fn/avtaler/miljoe-og-klima/parisavtalen>
[Funnet 8 juni 2021].

Golsteijn, L., 2020. *Life Cycle Assessment (LCA) explained*. [Internett]
Available at: <https://pre-sustainability.com/articles/life-cycle-assessment-lca-basics/>
[Funnet 15 April 2021].

Grønn vekst, u.d. *Hageavfall*. [Internett]
Available at: <https://www.gronnvekst.no/hageavfall>
[Funnet 15 februar 2021].

Hale, S. et al., 2012. Quantifying the total and bioavailable polycyclic aromatic hydrocarbons and dioxin in biochars.. *Environmental Science & Technology*, 9 februar, pp. 2830-2838.

Hartnik, T., 2017. *Biokull og avfallsbehandling*. s.l.:Lindum.

Joner, E., Medynska-Juraszek, A., Rasse, D. & Rivier, P.-A., 2020. Biochar Affects Heavy Metal Uptake in Plants through Interactions in the Rhizosphere. *MDPI*, 24 juli.10(15).

Klima- og Miljødepartementet, 2020. *Norges klimamål under Parisavtalen*. [Internett]
Available at: <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/klima/innsiktsartikler-klima/norges-klimamal-under-parisavtalen/id2784617/>
[Funnet 8 juni 2021].

LCA.no, 2020. *4.2.1 Module figure (modulfigur) (A1-D)*. [Internett]
Available at: <https://lca45.zendesk.com/hc/no/articles/360022489674-4-2-1-Module-figure-Modulfigur-A1-D->
[Funnet 10 april 2021].

LCA.no, 2020. *4.2.26 Cut-off criteria (cut-off kriterier)*. [Internett]
Available at: <https://lca45.zendesk.com/hc/no/articles/360022491394-4-2-26-Cut-off-criteria-cut-off-kriterier->
[Funnet 10 april 2021].

LCA, 2015. *Defining the functional unit*. [Internett]
Available at: <https://consequential-lca.org/clca/the-functional-unit/define-the-functional-unit/>
[Funnet 15 Mai 2021].

LOOP -Stiftelsen for Kildesortering og Gjenvinning, 2018. *Avfallshierarki: Store Norske Leksikon*. [Internett]
Available at: <https://snl.no/avfallshierarki>
[Funnet 15 mars 2020].

Lovdata, 2019. *Forskrift om planter og tiltak mot planteskadegjørere*. [Internett]
Available at: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2000-12-01-1333>
[Funnet 8 juni 2021].

Lovdata, 2020. *Forskrift om floghavre*. [Internett]
Available at: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2015-06-22-752>
[Funnet 8 juni 2021].

Lovdata, 2021. *Forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphavs*. [Internett]
Available at: https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2003-07-04-951#KAPITTEL_2
[Funnet 29 mai 2021].

Lovdata, 2021. *Lov om forvaltning av naturens mangfold (naturmangfoldloven)*. [Internett]
Available at: <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2009-06-19-100>
[Funnet 8 juni 2021].

Maguire, M. & Delahunt, B., 2017. *Doing a Thematic Analysis: A Practical, Step-by-Step Guide for Learning and Teaching Scholars*. *AISHE-J*, Høst.

Mattilsynet, 2017. *Faktaartikkel: Kompost av hage- og parkavfall skal registreres hos mattilsynet*. [Internett]
Available at:
https://www.mattilsynet.no/planter_og_dyrking/gjodsel_jord_og_dyrkingsmedier/organisk_gjodsel_jordforbedringsmidler_og_dyrkningsmedier/kompost_av_hage_og_parkavfall_skal_registreres_hos_mattilsynet.27854
[Funnet 23 mai 2021].

Mckinnon, K., 2017. *Alternativer til torv som substart i oppalsjord*, Tingvoll: Norsøk.

Miljødirektoratet, 2020. *Sirkulær økonomi*. [Internett]
Available at: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/avfall/sirkular-okonomi/>
[Funnet 15 mars 2021].

Miljøstatus, 2021. *Biologisk behandling av avfall*. [Internett]
Available at: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/avfall/avfallshandtering/biologisk-behandling-av-avfall/>
[Funnet 9 juni 2021].

Miljøstyrelsen, 2005. *Påvirkningskategorier, normalisering og vægting i LCA*. [Internett]
Available at: <https://www2.mst.dk/udgiv/publikationer/2005/87-7614-572-7/html/kap02.htm>
[Funnet 15 mai 2021].

Myhre, T., 2018. *Karbonlager*. [Internett]
Available at: <https://snl.no/karbonlager>
[Funnet 25 mai 2021].

Nestaas, I. & Grønmo, S., 2020. *Livsløpsanalyse: Store Norske Leksikon*. [Internett]
Available at: <https://snl.no/livsl%C3%B8psanalyse>
[Funnet 13 Mai 2021].

Nordisk avfallspool, u.d. *Organisk materiale*. [Internett]
Available at: <https://www.nordiskavfallspool.no/index.php/tjenester-avfallshandtering/avfallstyper/organisk-avfall>
[Funnet 15 mars 2021].

Norsk Biokullnettverk, u.d. *Klimaeffekt av biokull*. [Internett]
Available at: <https://www.biokull.info/klimaeffekt>
[Funnet 23 juni 2021].

Orgeret, K. S., 2018. *Store Norge Leksikon: Intervju*. [Internett]
Available at: <https://snl.no/intervju>
[Funnet 17 april 2021].

O'Toole, A., 2012. Hva skjer når biokull tilføres til norsk jord?. *Bioforsk Fokus*, 8(2), pp. 76-77.

Owsianiak, M. et al., 2021. Environmental and economic impacts of biochar production and agricultural use in six developing and middle-income countries. *Science of The Total Environment*, 10 februar.

Pedersen, B., 2014. *Termokjemi: Store Norske Leksikon*. [Internett]
Available at: <https://snl.no/termokjemi>
[Funnet 21 juli 2020].

Rambøll Norge AS, 2020. *Utreddelse - Sirkulær Utnyttelse av Avfall og Energi i Tre Næringsområder i Midtre Vestfold*, s.l.: s.n.

Rasse, D. et al., 2019. *Muligheter og utfordringer for økt karbonbinding i jordbruksjord*, s.l.: NIBIO .

Rochat, D., Binder, C., Diaz, J. & Jolliet, O., 2013. *Combining Material Flow Analysis, Life Cycle Assessment, and Multiattribute Utility Theory*. [Internett]

Available at:

https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.12025?casa_token=yW8PpiZudZIAAAA%3A0Od2lksEK6s4PGxH2gY_J9Tmhbfvww_KmJfmfdK043xJ3_ucRTLpUvyjyRE5Ns1mAQJPK3XiA1z-QQM

[Funnet 9 juni 2021].

Soka, O. & Oyekola, O., 2020. A Feasibility Assessment of the Production of Char Using the Slow Pyrolysis Process.. *Heliyon*, 23 juli.

Steinar, C. & Harttung, T., 2014. Biochar as a growing media additive and peat substitute. *Solid Earth*, 5, 22 september, pp. 995-999.

Stiftelsen Østfoldforskning, 2002. *LCA-kurs -en innføring i livssyklusvurderinger*. [Internett]

Available at: <http://www.sto-projects.com/lcakurs/index.asp>

[Funnet 15 Mai 2021].

Store Norske Leksikon, 2018. *Kompost*. [Internett]

Available at: <https://snl.no/kompost>

[Funnet 15 februar 2021].

Tellnes, L. G. et al., 2017. *Erstatningsmateriale for torv - kartlegging av klima- og miljøeffekter*, s.l.: Østfoldforskning.

Thomassen, M. K. et al., 2017. *Utvikling og implementering av biokull som klimatiltak i Norge*, Trondheim: Sintef.

Ung Energi, 2021. *Pyrolyse*. [Internett]

Available at: <https://ungenergi.no/energikilder/bioenergi/pyrolyse/>

[Funnet 5 april 2021].

Utenriksdepartementet, 2020. *FNs bærekraftsmål*. [Internett]

Available at:

https://www.regjeringen.no/no/tema/utenrikssaker/utviklingssamarbeid/sdg_oversikt/id2505654/

[Funnet 8 juni 2021].

Vesar, u.d. *Vesar -avfallsselskapet i vestfold*. [Internett]

Available at: <https://vesar.no/om-vesar/hva-er-vesar/>

[Funnet 6 mai 2021].

Vestfold og Telemark fylkeskommune, u.d. *Klima og miljø*. [Internett]

Available at: <https://www.vtfk.no/meny/tjenester/klima/>

[Funnet 6 mai 2021].

Weidema, B., 2018. *Attributional and consequential interpretations of the ISO 14044*, s.l.: s.n.

Wolf, A., 2016. *Primary Data vs. Secondary Data: Market Research Methods*. [Internett]
Available at: <https://blog.marketresearch.com/not-all-market-research-data-is-equal>
[Funnet 3 April 2021].

Zaman, C. Z. et al., 2017. *Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste..*
[Internett]
Available at: <https://www.intechopen.com/books/pyrolysis/pyrolysis-a-sustainable-way-to-generate-energy-from-waste>
[Funnet 03 august 2020].

10. Vedlegg

10.1 Intervjuguide

Navn:

Bedrift:

Stilling/rolle:

GENERELT:

Er det noen «problemer» knyttet til kompostering i dag?

Hva oppfatter du som de tre viktigste problemene?

Kan du utdype dette?

SPESIFIKT (om ikke nevnt før):

Hvordan er det med spredning av:

Fremmede arter?

Brunsnegler?

Sykdom?

Mikroplast?

Andre elementer?

Avrenningsproblematikk

Lukt

Arealbruk

Hvor store er disse problemene?

Hvordan håndterer man det (best praksis)?

Kompost lages fra forskjellige kilder, hvilke problemer er spesifikt knyttet til hageavfall? Og vil kompost produsert kun på hageavfall være et bra produkt?

OVERORDNET:

Hvem setter rammene som skaper problemet? (hvilke aktører gjør at dette er et problem?

Evt egen forståelse av problemstillingen)

På hvilken måte er dette/kan dette være bygrensene for markedet? Oppfatter du at det påvirker pris, begrenser salg?

Hvordan vil du si at det er med ansvar og risiko tilknyttet salg av kompost mtp problemene nevnt over?

Klimavurderingene rundt kompostering? Hvorfor kompostering? Er det et gjennomtenkt valg? Vurdert noe annet?

Dersom kunnskap om biokull:

Hva er fordeler/ulempes ved bruk av biokull fremfor kompost?

Kan disse produktene sammenlignes?

Noe mer du tenker det er relevant for meg å vite?

TAKK!

10.2 Adresseoversikt for transportanalyse og transportavstand 2021

Adresseoversikt:		
Grinda gjenvinningsstasjon	Lågendalsveien 83	3270 Larvik
Rygg gjenvinningsstasjon	Taranrødveien 93 A	3171 Sem
Lersbrygga gjenvinningsstasjon	Lersbrygga 12	3070 Sande
Lofterød gjenvinningsstasjon	Møllerveien 30	3140 Nøtterøy
Nordre Foss gjenvinningsstasjon	Hvittingfossveien 182	3082 Holmestrand
Skoppum gjenvinningsstasjon	Adalsveien 22	3185 Skoppum
Grinda næringspark	Lågendalsveien 89	3270 Larvik
NMI Larvik	Vassvikveien	3268 Larvik
Sem	Taranrødveien 95 B	3171 Sem

Avstander og total transportdistanse for systemet fra 1.mars 2021

Gjenvinningsstasjon	Behandlingssted	Reisevei (km)	Total årlig distanse (km)
Grinda	Grinda næringspark	0,85	-
Rygg	Lindum, Rygg	0,1	31,4
Lersbrygga	Grinda næringspark	82,8	4 057,2
Lofterød	Norsk Miljø Industri, Larvik	51,5	11 536
Nordre Foss	Grinda næringspark	71	4 828
Skoppum	Grinda næringspark	45,8	6 778,4
Sum			27 231



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway