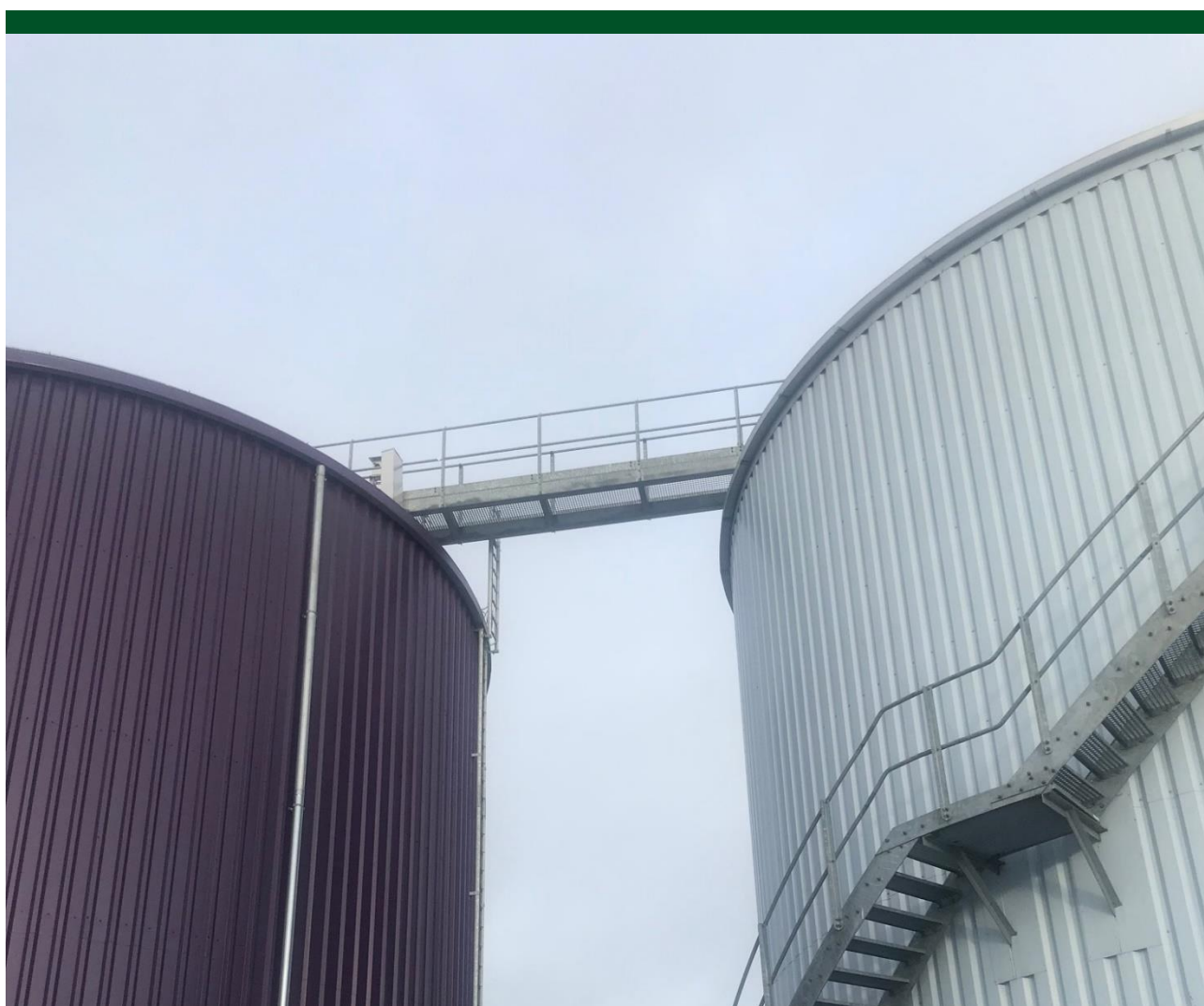


Mulighetsrommet for produksjon av biogass i Norge

Potensialstudie av aktuelle råstoff, nye teknologier og klimanytte



FORFATTERE

KARI-ANNE LYNG OG INA CHARLOTTE
BERNTSEN

RAPPORTNUMMER

OR 06.23

ÅRSTALL

2023

ISBN NR.
978-82-7520-911-3

ISSN NR.
2703-8610

RAPPORTTYPE
Oppdragsrapport

TILGJENGELIGHET
Åpen



PROSJEKTNUMMER

3367

PROSJEKTNAMN

Potensialstudie for biogass

OPPDRAKSGIVER

Energigass Norge, Biogass Oslofjord, Norsk Vann, Norges Bondelag, Avfall Norge

REFERANSE

Tore Woll

KVALITETSSIKRER

Hanne Lerche Raadal

ANTALL SIDER

31

EMNEORD

Biogass, anaerob utråtning, fornybar energi, potensial

BILDE FORSIDE

Kari-Anne Lyng

Forfatterne av rapporten ønsker å rette en takk til eksperter som har bidratt med sin kompetanse: Linn Solli, John Morken, Joshua Cabell, Jon Hovland, Carlos Dinamarca, Long Lin og Gang Xin.

Sammendrag

Denne rapporten er skrevet av NORSUS på oppdrag for Energigass Norge, Avfall Norge, Norges Bondelag, Biogass Oslofjord og Norsk Vann. Hensikten med arbeidet har vært å gi et bilde av mulighetsrommet for produksjon av biogass i Norge med tanke på aktuelle råstoff, teknologiutvikling og klimanytte.

Rapporten er delt inn i tre hoveddeler: teoretisk biogasspotensial fra nåværende og fremtidig råstoffbase med utgangspunkt i dagens teknologi, teoretisk biogasspotensial knyttet til mulig fremtidig teknologiutvikling og klimanytte knyttet til en høyere utnyttelse av biogasspotensialet enn i dag.

I denne rapporten er biogass definert som gasser av biogent opphav som inneholder metan. Energipotensialet fra metan betegnes dermed som biogasspotensial, uavhengig av produksjonsteknologi. Videre er det lagt som en forutsetning at råstoff som skal brukes til biogassproduksjon er organiske avfalls- og sidestrømmer. Energivekster er dermed ikke inkludert.

Teoretisk biogasspotensial for nåværende og fremtidig råstoffbase med utgangspunkt i dagens teknologi

Det teoretiske biogasspotensialet er estimert ved å kvantifisere mengden av hvert råstoff som generes årlig, multiplisert med metanutbyttet til det spesifikke råstoffet. I beregningen av teoretisk potensial er det ikke tatt hensyn til tekniske eller økonomiske begrensninger, eller begrensninger knyttet til rammevilkår. Hensikten med dette er å vise frem hele mulighetsrommet, både for å gi innspill til strategiutvikling for bransjen og for utforming av virkemidler.

Det teoretiske biogasspotensialet for ***nåværende råstoffbase med utgangspunkt i dagens teknologi*** er estimert til å være 5,5 TWh. Resultatene viser at det er størst potensial for økt biogassproduksjon fra husdyrgjødsel og halm fra landbruket, fiskeslam fra havbruksnæringen og matavfall fra husholdning og næring.

Mulig fremtidig råstoffbase med utgangspunkt i dagens teknologi er beregnet ved å se på ambisjoner og utviklingstrekk til de bransjene der avfallet genereres. For de fleste råstoffene er mengdene antatt å holde seg relativt konstant. Det er forutsatt at mengden matavfall vil kunne reduseres på grunn av ambisjoner om å redusere matsvinnet med 50%. Dersom havbruksnæringen oppnår sine vekstambisjoner, vil råstoffgrunnlaget fra denne næringen øke betydelig. I sum er det estimert at mulig fremtidig råstoffbase kan gi et teoretisk biogasspotensial på 11,3 TWh.

Det teoretiske potensialet for fangst av av biogent CO₂ fra oppgradering av biogass er estimert til å være ca 298 000 tonn CO₂ og ca 611 000 tonn CO₂ med henholdsvis nåværende og mulig fremtidig råstoffbase. Sistnevnte er betydelig høyere enn mengden CO₂ som omsettes i dag. Dersom CO₂ flytendegjøres kan det eksporteres til andre land eller brukes inn i nye teknologier. Et alternativ er også å lagre fanget biogent CO₂, noe som kan bidra til negative utslipp.

Teoretisk biogasspotensial knyttet til mulig fremtidig teknologiutvikling

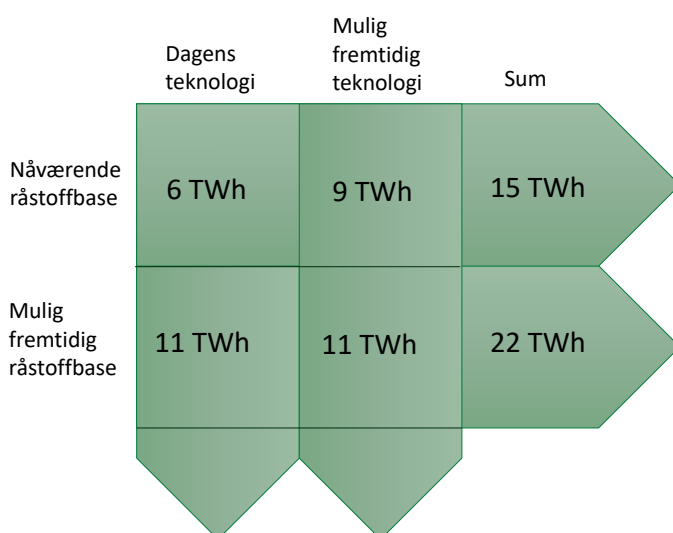
Ved å kombinere eller supplere tradisjonell teknologi for biogassproduksjon (anaerob utråtning) med andre teknologier, kan det oppnås en enda bedre utnyttelse av de organiske restråstoffene og en økning i det teoretiske biogasspotensialet. Synergier knyttet til fremtidig teknologiutvikling er utforsket gjennom samtaler med ulike eksperter, supplert med en forenklet litteraturstudie. Resultatene viser at mulig fremtidig teknologiutvikling kan øke det teoretiske biogasspotensialet på to ulike måter:

- Produsere biogass fra råstoffer som ikke er egnet til anaerob utråtning gjennom pyrolyse eller gassifisering: Ved å inkludere potensialet ved å behandle rivningstrevirke, treavfall, hageavfall, og uttak av noe GROT, stubber og røtter gjennom gassifisering, kan det oppnås et teoretisk potensial på 7,6 TWh.
- Øke produksjonen av biogass gjennom å omdanne CO₂ i biogass til metan (biometanering): Dette utgjør et biogasspotensial på 1,4 TWh når det tas utgangspunkt i nåværende råstoffbase, og 2,9 TWh med utgangspunkt i mulig fremtidig råstoffbase.

Ytterligere teoretisk biogasspotensial knyttet til mulig teknologiutvikling er dermed 9,0 TWh og 10,5 TWh for henholdsvis for nåværende og mulig fremtidig råstoffbase. Det gjenstår en del forskings- og utviklingsaktiviteter før potensialet eventuelt kan realiseres.

Oppsummering av teoretisk biogasspotensial

Det teoretiske biogasspotensialet for nåværende og mulig fremtidig råstoffbase og for dagens og mulig fremtidig teknologi er oppsummert i figuren nedenfor.



Til tross for at det aldri vil være mulig å oppnå 100% av et teoretisk potensial, viser resultatene at det er gode muligheter for å produsere betydelig mer biogass i Norge enn det som gjøres i dag. Dersom en større andel av det teoretiske biogasspotensialet utnyttes, vil biogass kunne utgjøre en viktig komponent i fremtidens energi- og drivstoffmiks. Råstoffene som er kartlagt i denne rapporten representerer dessuten avfallsressurser, som vil kunne kan skape miljøutfordringer dersom de ikke håndteres på en forsvarlig måte. Biogassproduksjon er *både* en hensiktsmessig behandlingsteknologi *og* en produksjonsprosess for fornybar energi, og det vil derfor være gunstig i et miljø- og ressursperspektiv å utnytte en større andel av det teoretiske potensialet enn det som gjøres i dag.

Klimanytte

Klimanytten som kan oppnås fra biogassproduksjon er avhengig av både hvor stor andel av det teoretiske potensialet som utnyttes, i hvilken grad biogass og CO₂ erstatter fossile alternativer, samt alternative håndteringsmåter for de relevante organiske avfalls- og sidestrømmene.

Studien har sett på klimanytte for tre ulike deler av biogassens verdikjede:

1. Nytten ved at biogass erstatter fossile energibærere

Potensiell årlig klimanytte ved at biogass erstatter naturgass eller diesel er analysert for ulike mengder biogass: 50% og 70% av teoretisk biogasspotensial med henholdsvis nåværende og mulig fremtidig råstoffbase for dagens teknologi og for summen av dagens teknologi og mulig fremtidig teknologi.

Produksjon av 2,8 TWh biogass (tilsvarer 50% av det teoretiske biogasspotensialet for nåværende råstoffbase med dagens teknologi), kan potensielt gi en utslippsreduksjon på ca 552 000 tonn CO₂-ekvivalenter per år dersom all biogassen erstatter naturgass og 716 000 tonn dersom all biogassen erstatter diesel. Dette utgjør mellom 6 og 8% av de nasjonale utslippene fra veitransport. Analysene viser tydelig at jo mer biogass man produserer, jo større blir klimagevinsten.

2. Nytten ved at CO₂ fra oppgradering av biogass erstatter fossil CO₂

Utnyttelse av 50% av CO₂ fra det teoretiske biogasspotensialet av nåværende råstoffbase kan medføre en utslippsreduksjon på mellom 183 000 og 273 000 tonn CO₂-ekvivalenter per år. Øker utnyttelsesgraden til 70%, øker potensialet for utslippsreduksjon til mellom 256 000 og 382 000 tonn CO₂-ekvivalenter.

3. Nytten ved at husdyrgjødsel går til biogassproduksjon fremfor tradisjonell håndtering – effekt av redusert lagringstid

Når husdyrgjødsel går til biogassproduksjon reduseres utslipp fra lagring. I Klimakur 2030 ble utslippsreduksjonspotensial for husdyrgjødsel til biogassproduksjon beregnet til å være 253 000 tonn CO₂-ekvivalenter akkumulert i perioden 2021-2030 dersom andelen økes fra dagens nivå på 1% til 25 %.

Ut ifra et miljø- og ressursperspektiv er det viktig å understreke at det alltid er mest gunstig å unngå at avfall oppstår, og at produksjon av energi/drivstoff fra et råstoff kun bør gjennomføres hvis det ikke finnes en mer høyverdig utnyttelse av råstoffet. Dette bør likevel ikke stå i veien for å lage gode biogass-verdikjeder for de organiske avfallsressursene som oppstår.

Innholdsfortegnelse

Sammendrag.....	i
1 Innledning.....	2
2 Metodikk og forutsetninger	3
2.1 Teoretisk potensial for biogassproduksjon og uttak av CO ₂ ved oppgradering	3
2.1.1 Definisjon av «det teoretiske biogasspotensialet».....	3
2.1.2 Biogasspotensial fra ulike råstoff.....	4
2.1.3 Beregning av potensial for uttak av CO ₂ ved oppgradering av biogass.....	4
2.2 Biogasspotensial knyttet til fremtidig teknologiutvikling.....	4
2.3 Analyse av klimanytte.....	4
3 Biogasspotensial for ulike råstoff til konvensjonell biogassproduksjon	5
3.1 Matavfall fra husholdning og næring	5
3.2 Organisk industriavfall som ikke er matavfall	6
3.3 Husdyrgjødsel	7
3.4 Reststrømmer fra landbruket.....	8
3.5 Avløpsslam	9
3.6 Fiskeensilasje	9
3.7 Fiskeslam	10
3.8 Deponigass.....	11
3.9 Oppsummering av biogasspotensial knyttet til råstoff	12
3.10 Teoretisk potensial for produksjon av CO ₂	14
3.11 Utnyttelse av biorest	15
4 Kartlegging av metanpotensial knyttet til fremtidig teknologiutvikling	16
4.1 Tradisjonell biogassproduksjon	16
4.2 Metanproduksjon gjennom gassifisering	16
4.3 Gassifisering i kombinasjon med anaerob utråtning.....	18
4.4 Pyrolyse i kombinasjon med anaerob utråtning	19
4.5 Power to gas og biometanering	20
4.6 Algeproduksjon i kombinasjon med anaerob utråtning.....	21
5 Oppsummering av teoretisk biogasspotensial.....	22
6 Klimanytte ved økt biogassproduksjon	23
6.1 Nytten ved at biogass erstatter fossile energibærere.....	23
6.2 Nytten ved at CO ₂ fra oppgradering av biogass erstatter fossil CO ₂	25
6.3 Nytten ved redusert utslipp fra lagring når husdyrgjødsel går til biogassproduksjon	26
7 Konklusjon.....	28
8 Referanser	29

1 Innledning

Biogass har fått en forsterket rolle i Europa de siste årene og ansees som en viktig innsatsfaktor for å redusere avhengigheten av naturgass fra Russland. I 2022 satte EU som målsetning å øke biogassproduksjonen til 342 TWh innen 2030 (Biogass Norge, 2022; European Commission, 2022). I Norge ble det produsert rundt 0,7 TWh i 2021 (SSB, 2022e). Den norske biogassbransjen har en ambisjon om å øke produksjonen til over 10 TWh.

Målet med denne rapporten er å vise mulighetsrommet for biogass i Norge, som innspill til strategiutvikling for bransjen og som bruk til kommunikasjon til myndigheter og andre aktører. Rapporten er skrevet av NORSUS på oppdrag fra Energigass Norge, Biogass Oslofjord, Norsk Vann, Norges Bondelag og Avfall Norge, som alle også har deltatt i prosjektets styringsgruppe.

Rapporten belyser fire ulike aspekter:

- **Det teoretiske potensialet for biogassproduksjon og uttak av CO₂ for aktuelle råstoff.** Kartleggingen fokuserer kun på avfallsressurser og sidestrømmer, og energivækster er derfor ikke inkludert. Kartleggingen er gjort både for nåværende råstoffbase og mulig fremtidig råstoffbase. Potensialet er beregnet ved å kombinere kunnskap fra tidligere rapporter med egne, oppdaterte beregninger. Potensialet for uttak av CO₂ ved oppgradering av biogass er også inkludert.
- **Teoretisk biogasspotensial ved mulig teknologiutvikling.** Ved å kombinere tradisjonell teknologi for biogassproduksjon med andre teknologier er det mulig å øke biogassproduksjonen. Rapporten beskriver ulike teknologier som kan gi en positiv synergi.
- **Klimanytten i verdikjeden for biogass.** Rapporten estimerer potensielle klimagassreduksjoner for ulike scenarier for økt utnyttelse av det nasjonale biogasspotensialet: bruk av biogass, utnyttelse av biogent CO₂ fra oppgradering av biogass og utslippsreduksjoner knyttet til bruk av husdyrgjødsel til biogassproduksjon.

Det er viktig å være klar over at potensialet som beskrives i denne rapporten er et *teoretisk potensial*. Hensikten med dette er å vise frem hele mulighetsbildet som grunnlag for valg av retning, og i realiteten vil det ikke er mulig å oppnå hele det teoretiske potensialet.

I denne rapporten er det ikke tatt stilling til begrensninger knyttet til fremtidige rammevilkår, utvikling av markeder, tilgjengelighet og tekno-økonomiske begrensninger. Energipriser, krig i Europa og utvikling av gassmarkedet som følge av dette, har vist at det kan skje store endringer på kort tid, både i marked og rammevilkår i ulike land. Det er derfor opptil leseren av rapporten å gjøre sine egne antakelser relatert til dette.

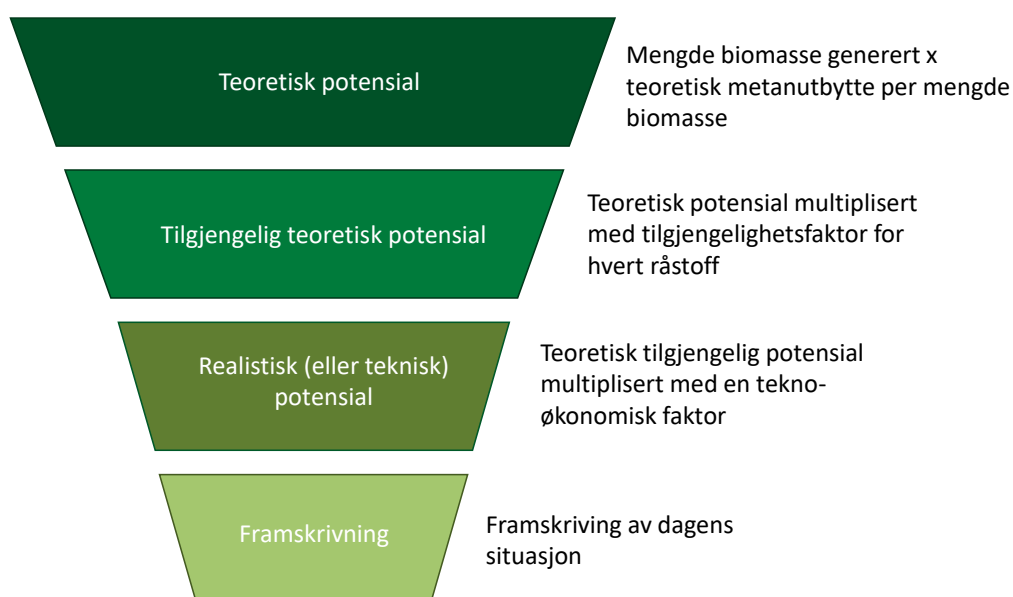
Økning i biogassproduksjon vil også øke produksjon av biorest. Kvantifisering av potensielle mengder biorest, gjødselverdi og klimanytte knyttet til bruk av biorest har ikke vært innenfor rammene av dette prosjektet. Biorest er likevel diskutert overordnet med tanke på tilgjengelig spredeareal i ulike fylker. Det foreslås at det gjøres et grundigere arbeid knyttet til biorestpotensial og mulige anvendelsesområder i et oppfølgingsprosjekt.

2 Metodikk og forutsetninger

2.1 Teoretisk potensial for biogassproduksjon og uttak av CO₂ ved oppgradering

2.1.1 Definisjon av «det teoretiske biogasspotensialet»

En potensialstudie kan gjennomføres på ulike nivåer, avhengig av hva som er formålet med studien. Dette er illustrert i Figur 2-1. En kartlegging av det *teoretiske potensialet* baserer seg på mengde biomasse generert multiplisert med det teoretiske metanutbyttet per mengde biomasse. Dette viser hele mulighetsrommet uten å ta hensyn til tilgjengelighet, markeder, teknologi og effektivitet. Dersom en ønsker å justere for tilgjengeligheten til råstoffet, som for eksempel påvirkes av stor geografisk spredning, begrensninger i rammevilkår eller konkurranse om råstoffet, kan dette justeres med en tilgjengelighetsfaktor for hvert råstoff. Dette representerer det *tilgjengelige teoretiske potensialet*. Dersom det er ønskelig å estimere et realistisk (eller teknisk) potensial, kan det tilgjengelige teoretiske potensialet multipliseres med en tekno-økonomisk faktor som tar hensyn til virkningsgrader i dagens teknologi. Selv om dette representerer et mer realistisk bilde enn det teoretiske potensialet, introduseres det samtidig en rekke antakelser om fremtiden som det er knyttet store usikkerheter til. En annen fremgangsmåte er å framskrive dagens situasjon for å forutse hvordan biogassproduksjonen kan se ut i fremtiden.



Figur 2-1 Ulike nivåer for beregning av biogasspotensial

De siste årene har vist at rammevilkår, marked og teknologiutvikling endrer seg i en hurtig takt og i retninger det ikke alltid er enkelt å forutse. I dette prosjektet har det derfor vært ønskelig å fokusere på det teoretiske potensialet fordi dette synliggjør hele mulighetsrommet til den norske biogassindustrien uten å trekke inn antakelser om fremtidige rammevilkår. Kartleggingen er gjort både med tanke på den nåværende råstoffbasen og mulig fremtidig råstoffbase. Det er viktig å understreke at det ikke vil være mulig å oppnå hele det teoretiske potensialet.

2.1.2 Biogasspotensial fra ulike råstoff

Biogasspotensialet fra råstoffene er estimert basert på dagens mengder generert råstoff multiplisert med det teoretiske metanutbyttet for hvert råstoff. Mengde metan multipliseres med nedre brennverdi for å få energipotensialet. For noen råstoff har biogassutbyttet blitt kartlagt relativt nylig i andre studier, og da har disse tallene blitt benyttet. Der dette ikke var mulig å få tilgjengelige tall og der det var behov for nyere tall, ble egne beregninger utført.

Råstoffene som er kartlagt omfatter kun avfalls- eller reststrømmer som skal benyttes til biogassproduksjon. Energivækster og råstoff som kan brukes direkte som mat eller fôr er ikke inkludert i denne rapporten. Det er viktig å være oppmerksom på at beregningene må ansees som estimater, da det alltid vil være usikkerheter knyttet både til den genererte mengden av hvert råstoff per år og biogassutbyttet per mengde.

2.1.3 Beregning av potensial for uttak av CO₂ ved oppgradering av biogass

Den teoretiske mengden CO₂ som kan tas ut ved oppgradering vil avhenge av metaninnholdet i råbiogass, som normalt ligger mellom 60 og 65%. For enkelhets skyld er det antatt at den gjennomsnittlige metanandelen er 62%, det vil si at omtrent 38% av biogassvolumet er CO₂.

2.2 Biogasspotensial knyttet til fremtidig teknologiutvikling

Kombinasjon av anaerob utråtning med andre teknologier kan gi bedre utnyttelse av avfallsråstoffene og økt metanutbytte. Ulike aktuelle teknologier ble kartlagt ved å gjennomføre diskusjonsmøter med relevante eksperter innenfor biogass og andre teknologier (NIBIO, NMBU, USN, Sintef, Wai). I etterkant av møtene ble det gjort noe informasjonshenting i forskningslitteraturen. Basert på dette, ble energipotensialet ved økt metanproduksjon estimert.

Produksjon av metan fra andre teknologier som gassifisering og pyrolyse betegnes ofte som syngass. Syngass har en annen sammensetning enn konvensjonell biogass, men begge inneholder metan. I denne rapporten definerer vi biogass som gasser med biogent opphav som inneholder metan. Metanpotensialet fra andre teknologier betegnes dermed som biogasspotensial.

2.3 Analyse av klimanytte

Analyse av klimanytte knyttet til økt produksjon og bruk av biogass er basert på metodikk som benyttes i det nasjonale utslippsregnskapet (Norwegian Environment Agency, 2021).

For utslippsreduksjoner knyttet til bruk av CO₂ fra oppgradert biogass er det benyttet data fra en studie av utnyttelse av CO₂ fra Den Magiske Fabrikken (Lyng, 2020) som benytter livsløpsmetodikk (LCA). Disse dataene er supplert med data fra utslippsdatabasen ecoinvent for å estimere klimabelastning knyttet til flytendegjøring. Data fra ecoinvent ble også benyttet for produksjon av europeisk og global markedsmik for fossil CO₂.

Utslippsreduksjoner som følge av bruk av husdyrgjødsel til biogassproduksjon er beskrevet ved hjelp av resultater fra tidligere studier (Bardalen et al., 2019; Miljødirektoratet, 2020; Pettersen, Grønlund, Stensgård & Walland, 2017).

3 Biogasspotensial for ulike råstoff til konvensjonell biogassproduksjon

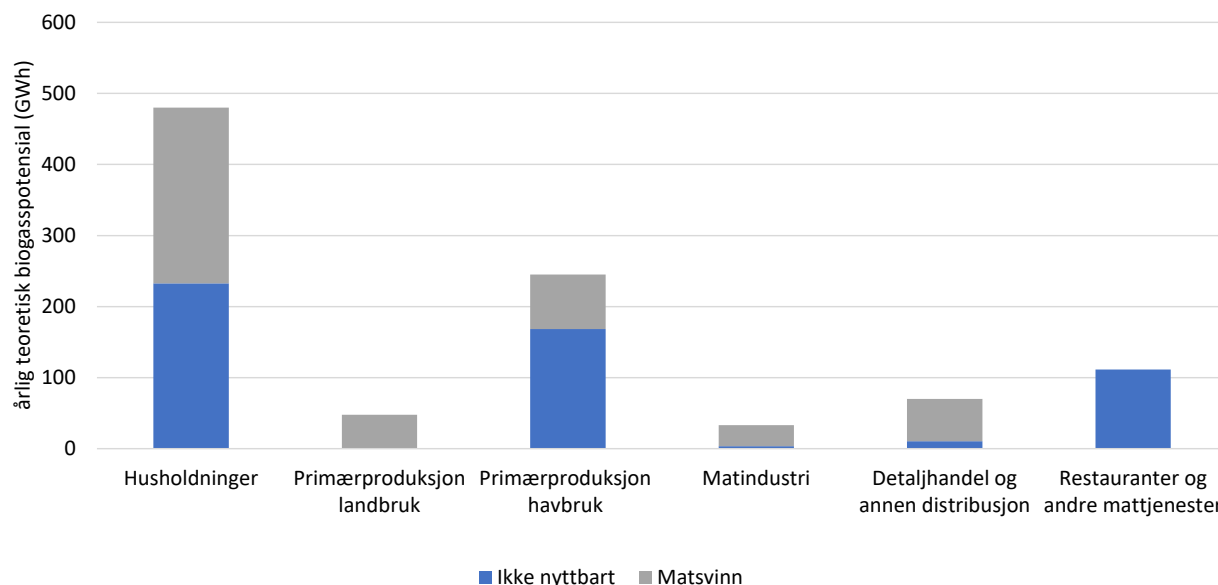
I dette kapitlet beskrives det teoretiske potensialet for hvert råstoff, datagrunnlag og metode for beregninger.

3.1 Matavfall fra husholdning og næring

Beregninger av biogasspotensialet fra matavfall fra husholdning og næring er basert på Norges rapportering av matavfallsmengder til EU i 2020 (Danielsen, Stensgård, Myhre & Carvaja, 2021). Rapporteringen inkluderer alt matavfall som genereres, både det som per i dag blir utsortert og det som går til energiutnyttelse sammen med restavfall. Definisjonen av «matavfall» omfatter kun avfall som har vært egnet til menneskelig konsum og inkluderer ikke avfall som oppstår før det har blitt til mat. Dette betyr at denne kategorien ikke inkluderer sidestrømmer fra matproduksjon som ikke er spiselige og avfall som er kassert fordi det ikke kan konsumeres på grunn av forurensning eller medisinforgiftning. Rapporteringen til EU inneholder også matavfall kastet i avløp, men det ble ikke inkludert i denne studien, for å unngå overlapp med biogasspotensial fra avløps slam (se kapittel 3.5).

Det teoretiske potensialet omfatter alt matavfall som genereres, uten å justere for en forventet utsorteringsgrad. Biogassutbyttet til matavfall vil være avhengig av sammensetningen til matavfallet, og det er sannsynlig at avfall fra de ulike leddene vil ha ulik sammensetning og biogassutbytte. Det har likevel vært nødvendig å gjøre en forenkling og anta at matavfall fra alle leddene har likt utbytte som matavfall fra husholdninger, basert på tallgrunnlag beskrevet av Modahl et al. (2016). Unntaket er matavfall fra primærproduksjon havbruk, der det er antatt at avfallet har samme biogassutbytte som fiskeensilasje (se kapittel 3.6).

I tabellen nedenfor vises teoretisk biogasspotensial per verdikjedeledd. Matavfallet består både av *matsvinn* og *ikke nyttbart matavfall*. *Matsvinn* er den andelen av matavfallet som kunne vært spist hvis det hadde vært oppbevart riktig eller konsumert i tide, slik som et råttent eple eller et muggent brød. Det *ikke nyttbare* er matavfall som ikke kan unngås slik som skall, beinrester og kjerner. Figur 3-1 viser fordelingen av det teoretiske biogasspotensialet på hvert verdikjedeledd.



Figur 3-1 Teoretisk biogasspotensial for matavfall

Det totale biogasspotensialet fra matavfall utgjør 988 GWh, hvorav 529 representerer ikke-nyttbart matavfall. Potensialet for matsvinn på 459 GWh vil halveres dersom en oppnår målet i bransjeavtalen om å halvere matsvinn innen 2030. Biogasspotensialet fra matavfallet vil dermed reduseres til 758 GWh.

Merk at det for restauranter og andre mattjenester ikke finnes tilgjengelig informasjon om hvor stor andel av det genererte matavfallet som er matsvinn, og at hele mengden derfor er oppgitt som ikke nyttbart.

Tallene er ikke justert for økning i folketall frem mot 2050. Dette er fordi det er knyttet usikkerheter til hvordan avfallsmengdene per person per år kommer til å utvikle seg fremover. Avfallsgenerering kan påvirkes av mange ulike faktorer slik som økonomisk utvikling og endringer i kostholdet.

3.2 Organisk industriavfall som ikke er matavfall

Organisk industriavfall som ikke er matavfall inkluderer used cooking oil (UCO), avfall fra papir- og skogsindustri, fett og animalske biprodukter (slakteriavfall). Tallgrunnlaget for de to første er basert på tidligere rapporter, mens det for de to andre kategoriene er gjort egne beregninger.

Carbon Limits potensialstudie har estimert det teoretiske biogasspotensialet fra Used cooking oil (UCO) til å være 70 GWh (Isakova, Voss, Vandenbussche & Morken, 2019). Dette er beregnet ut ifra Helsedirektoratets estimat for mengde matolje brukt per innbygger i Norge, og resultatene er ansett å være relativt usikre. Fett og fettutskillere sendt til biologisk behandling i 2021 var 16 000 tonn (SSB, 2022b). Basert på biogassutbytte fra Carlsson og Uldal (2009), utgjør dette et teoretisk potensial på 4 GWh.

Videre har Isakova et al. (2019) estimert potensialet for organisk industriavfall fra papir- og skogsproduktindustri til å være 140 GWh, basert på mengden produsert papir, papirmasse og avanserte produkter.

Mengden animalske biprodukter (slakteavfall) generert i 2019 var 12 000 tonn, hvorav 9 000 gikk til biogassproduksjon (SSB, 2022b). Basert på data for biogassutbytte fra Carlsson og Uldal (2009) ble det estimert at det årlige biogasspotensialet knyttet til slakteavfall er 6 GWh.

Til sammen utgjør biogasspotensialet fra organisk industriavfall basert på ovennevnte datagrunnlag 220 GWh per år. Fremtidig utvikling av biogasspotensialet for denne kategorien vil avhenge av utviklingen til den norske matindustrien og den biobaserte industrien.

3.3 Husdyrgjødsel

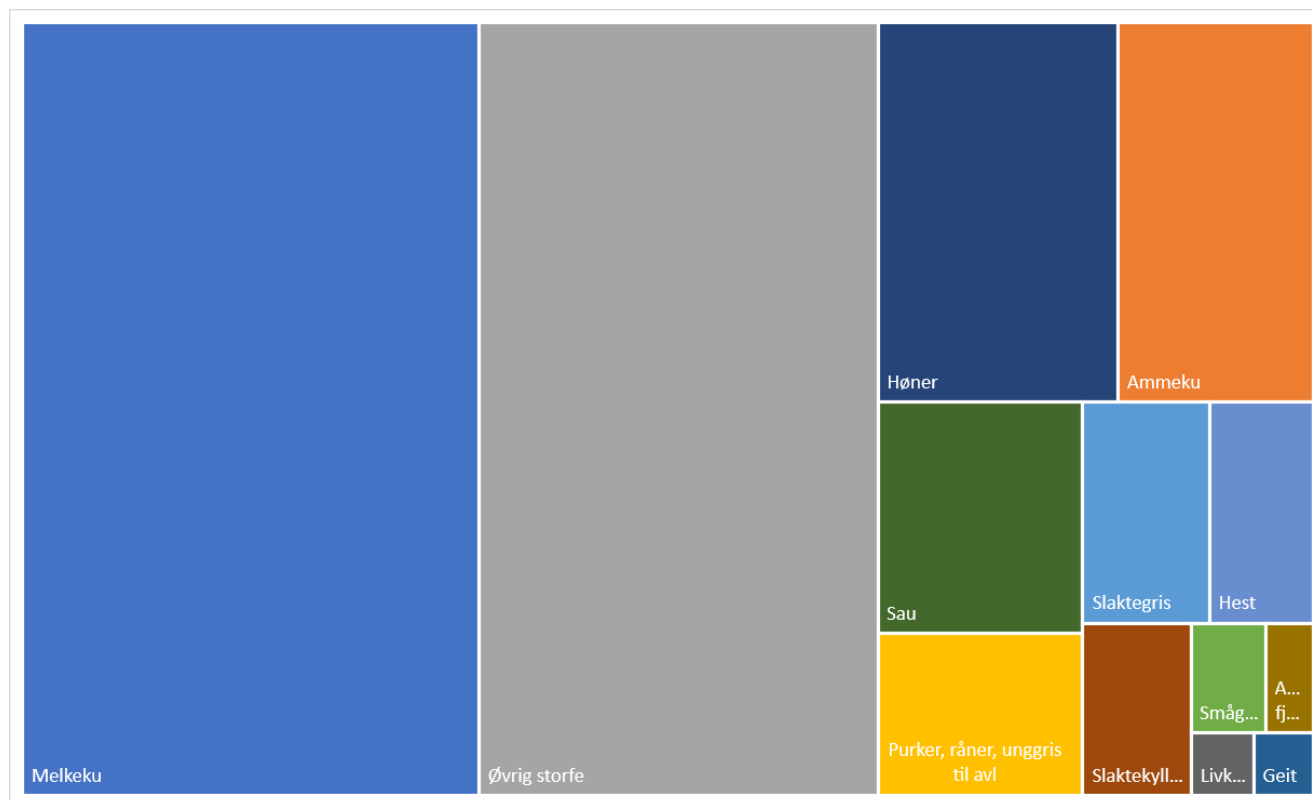
Husdyrgjødsel til biogassproduksjon har økt fra ca 3 000 tonn i 2014 til 94 000 i 2021 (Landbruksdirektoratet, 2022). Til tross for en stor prosentvis økning, er det bare rundt 1% av gjødselressursene som per i dag går til biogass (Lyng, Callewaert & Prestrud, 2019b). Mange av biogassanleggene som er under planlegging og etablering skal behandle husdyrgjødsel, og en kan derfor forvente en økning også i årene fremover.

Carbon Limits rapport estimerte det realistiske biogasspotensialet fra husdyrgjødsel til å være 796 GWh i 2030, mens det teoretiske potensialet ble anslått til å være 1 967 GWh (Isakova et al., 2019). Dette er basert på data om antall dyr per gård (fra søknader om Produksjons- og avløsertilskudd til jordbruksforetak), antatt mengde husdyrgjødsel per dyr og biogasspotensial per gjødselmengde, fratrukket den andelen gjødsel som oppstår på beite og en ekstrapoleringsfaktor på 13% i gjennomsnitt som skal reflektere forventet utvikling. Gjødseltypene som er inkludert er storfe, svin, fjørfe, geit, sau og hest.

Raadal, Schakenda og Morken (2008) estimerte det teoretiske energipotensialet fra husdyrgjødsel til å være 2 480 GWh/år. Dette inkluderte storfe, svin, høns, geit, sau (og lam) og hest. Differansen mellom potensialberegninger i 2008 og 2019 kan både skyldes endringer i antall dyr og økt kunnskap om gjødselmengdene per dyr, og om egenskapene og biogasspotensialet til husdyrgjødsel.

Lyng, Callewaert og Prestrud (2019a) inkluderte kun gjødsel fra storfe og svin, da disse gjødseltypene antas å være de enklest tilgjengelige gjødseltypene. Dette potensialet utgjorde 1 142 GWh i 2018.

I denne rapporten er potensialet fra husdyrgjødsel beregnet til å være 1 640 GWh, basert på antall dyr per fylke i Landbruksdirektoratets tilskuddsdata (Landbruksdirektoratet, 2019b) og gjødselmengder og beitetid oppgitt i Isakova et al. (2019). Det er ikke gjort noen ekstrapolering for forventet utvikling fremover. Fordelingen mellom husdyrslag er vist i Figur 3-2.



Figur 3-2 Biogasspotensial fra husdyrgjødsel fordelt på dyreslag (totalt 1 640 GWh per år)

3.4 Reststrømmer fra landbruket

Aktuelle reststrømmer fra landbruket utgjør halm og kornavrens. Kornavrens, som er rester fra rensing av korn, er vurdert av Carbon Limits til å ha et teoretisk biogasspotensial på 30 GWh (Isakova et al., 2019).

Halm har et betydelig biogassutbytte, men er ikke lett nedbrytbart og krever derfor forbehandling. Halm inneholder næringsstoffer og karbon, og uttak av en stor andel halm som per i dag pløyes tilbake i jorda vil derfor ha en negativ påvirkning på næringsinnholdet i jorda og jordkvaliteten. Scarlat, Fahl, Lugato, Monforti-Ferrario og Dallemand (2019) har estimert andelen det er bærekraftig å høste for en rekke europeiske land, og for Norge utgjør den estimerte bærekraftige andelen 41% av den teoretiske mengden. Halm er et av de biogassråstoffene med hurtigst vekst i enkelte land. I Danmark utgjorde halm en betydelig andel av råstoff til biogassproduksjon i 2022. Ved å tilbakeføre biorest der det tas ut halmressurser vil en redusere de næringsinnholdsmessige ulempene ved uttak av halm.

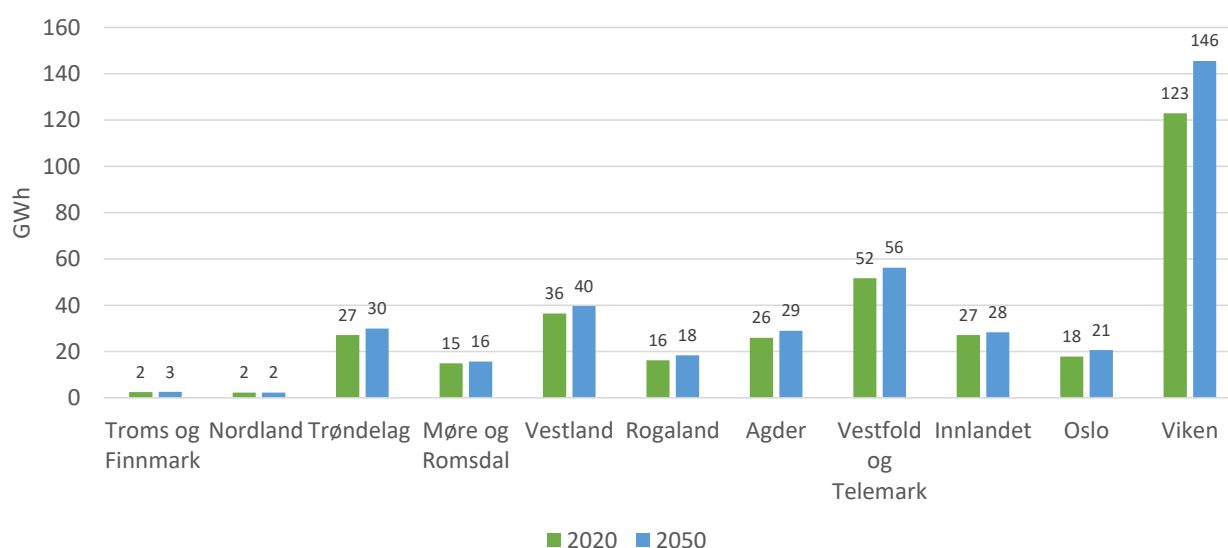
Siden halm er strå og blader fra avlingen av korn, vil det årlige biogasspotensialet fra halm avhenge av produksjonen av disse. I beregningene av det teoretiske biogasspotensialet er det tatt utgangspunkt i avlinger i 2021 (SSB, 2022d), og en faktor beregnet av Scarlat et al. (2019) som oppgir forholdet mellom avling og jordbruksrester for Norge. Det er benyttet biogasspotensial fra Carlsson og Uldal (2009), og det er kun den bærekraftige andelen som er inkludert (41%). Dette gir et potensial på 647 GWh/år. Dette er midt mellom det teoretiske (1124 GWh) og det realistiske (337 GWh) potensialet beregnet av Carbon Limits (Isakova et al., 2019).

I noen andre land fokuseres det i økende grad på «sequential cropping» og i Italia har «Biogasdoneright-konseptet, som kombinerer matproduksjon, produksjon av fornybar energi og karbonlagring, fått økt

oppmerksomhet. Det hevdes at denne løsningen kan bidra til klimanytte dersom det gjennomføres korrekt (Magnolo et al., 2021). Potensialet knyttet til dette er likevel ikke inkludert i denne rapporten fordi det er uvisst om klimatiske forhold i Norge vil muliggjøre dette, og fordi det er en betydelig risiko at dette kan medføre produksjon av energivekster på arealer der det kunne ha vært produsert mat.

3.5 Avløpslam

Til beregning av biogasspotensialet for avløpslam er det mottatt data fra Norsk Vann om mengder avløpslam tilgjengelig frem mot 2050. Metanutbyttet er antatt å være 0,2 m³/tonn tørrstoff basert på Guidehouse (2022). Det teoretiske potensialet per fylke vises i figuren nedenfor.



Figur 3-3 Teoretisk biogasspotensial fra avløpslam per fylke

Totalt utgjør dette 345 GWh i 2020 og 388 GWh i 2050, og de største potensialene kommer fra de befolkningstette områdene. Økningen fra 2020 og 2050 skyldes forventet befolkningsutvikling. Tallene er i samme størrelsesorden som det teoretiske biogasspotensialet på 337 GWh beregnet av Carbon Limits (Isakova et al., 2019).

3.6 Fiskeensilasje

Fiskeensilasje består av fisk, hel eller i deler, som er konservert ved bruk av syre. Veileder om animalske biprodukter definerer 3 kategorier (Mattilsynet, 2014). For fiskeavfall kan de beskrives som følgende:

Kategori 1 Høyrisikomateriale som må forbrennes.

Kategori 2: Materiale fra fisk som i hovedsak er selvdød, eller klinisk syk uten ytre tegn på sykdom.

Kategori 3: Fisk som er godkjent til konsum, men som av kommersielle grunner ikke skal benyttes og dermed kan brukes til produksjon av dyrefôr.

Til produksjon av biogass fra fiskeensilasje vil man utelukkende kunne ta i bruk Kategori 2, ettersom kategori 1 ikke er tillatt å bruke og kategori 3 blir ansett som et høyverdig produkt der det finnes bedre anvendelsesområder.

Biogasspotensialet fra fiskeensilasje kan beregnes på ulike måter. Mengdene fiskeensilasje som er tilgjengelig for biogassproduksjon vil være avhengig av fiskedødeligheten i produksjonsanleggene. I 2021 døde i overkant av 50 millioner laks, regnbueørret og ørret. De siste 5 årene har død fisk utgjort 14-15 % av det totale antallet fisk og 6-9 % av den totale vekten (BarentsWatch, 2022). I dag er problematikken med lakselus og økt håndtering i forbindelse med fjerningen av disse en av hovedgrunnene til at fisk dør i sjøfasen (fiskeridepartementet, 2021). I 2022 ble det rapportert inn 55 687 930 individer dødfisk (Fiskeridirektoratet, 2022). I følge Misund (2022) har gjennomsnittsvekten på dødfisk økt fra 1 kg i 2010 til over 2 kilo. Dermed kan årlig mengde fiskeensilasje estimeres til ca 111 821 tonn. Havbruksnæringen jobber kontinuerlig for at antallet dødfisk skal reduseres.

I tillegg til at mengdene tilgjengelig fiskeensilasje kan være usikre, er det utfordrende å finne gode data på det teoretiske biogassutbyttet til fiskeensilasje. På grunn av et høyt fettinnhold vil anaerob utråtning av fiskeensilasje alene gi en ubalanse i prosessen, noe som kan føre til at utråtningsprosessen stopper opp (Morken, Briseid, Hovland, Lyng & Kvande, 2017). De fleste labskalaforsøk av biogassproduksjon fra fiskeensilasje er derfor utført med en blanding av fiskeensilasje og andre råstoff, og flere studier viser at sambehandling av husdyrgjødsel og fiskeensilasje er gunstig (Fjørtoft, Morken, Hanssen & Briseid, 2014; Solli, Bergersen, Sørheim & Briseid, 2014). Dette gjør at tilgjengelige data ikke viser utbyttet per mengde fiskeensilasje, men for en kombinasjon av substrater. Ved et norsk gårdsanlegg ble det for eksempel målt biogassproduksjon på 79 kWh per kubikkmeter storfejødsel, mens sambehandling av husdyrgjødsel og fiskeensilasje medførte en produksjon på 1 623 kWh per kubikkmeter råstoff (Fjørtoft et al., 2014). Solli et al. (2014) oppnådde en produksjon på 0,4 L CH₄/g VS fra en blanding av 16% fiskeensilasje og 84% storfejødsel, mens storfejødsel alene ga en produksjon på 0,2 L CH₄/g VS. Basert på dette kan det estimeres at bidraget fra fiskeensilasje alene er på 2 MWh/tonn våtvekt fiskeensilasje.

Det årlige teoretiske biogasspotensialet fra fiskeensilasje er estimert til å være 224 GWh. Dette er noe høyere enn Carbon Limits estimat, som var på 188 GWh i 2030 (Isakova et al., 2019), noe som skyldes at det i denne studien er antatt et høyere biogassutbytte. Kristiansen og Hetland (2021) har benyttet en betydelig høyere verdi for metanutbyttet til fiskeensilasje og har estimert at biogasspotensialet kan ligge mellom 323 og 698 GWh i 2030 og mellom 365 og 1832 GWh i 2050. Dette viser at det er store usikkerheter knyttet til tallene og at potensialet kan være betydelig høyere enn tidligere estimater.

Norsk Industri har et uttalt mål om å øke eksporten fra havbruksnæringen med 5 ganger innen 2050 (NorskIndustri, 2017). En femdobling av produksjon av oppdrettsfisk uten at fiskedødeligheten reduseres kan øke biogasspotensialet til 1,1 TWh. I et bærekraftsperspektiv er det likevel mye viktigere å redusere fiskedødeligheten enn å øke biogassproduksjonen fra fiskeensilasje.

3.7 Fiskeslam

Fiskeslam består av avføring og fôrspill, og kalles også bunnfall. En rekke landbaserte oppdrettsanlegg er under planlegging, og for disse anleggene samles fiskeslammet opp og må sendes til behandling. For konvensjonelle oppdrettsanlegg til havs er det per i dag ikke et krav å samle opp fiskeslammet, men en stor konsentrasjon av fiskeslam kan gi miljøutfordringer i form av overgjødning. I 2020 ble det sluppet ut ca 12 000 tonn fosfor og 67 000 tonn nitrogen fra akvakultur (Miljøstatus, 2022). Det er derfor ikke usannsynlig at det kan komme strengere krav fra myndighetene i fremtiden.

Isakova et al. (2019) estimerte det teoretiske biogasspotensialet til fiskeslam til å være 92 GWh i 2030, men dette inkluderte kun potensialet fra fiskeslam fra landbaserte settefiskanlegg. I denne rapporten er derimot hele den årlige mengden fiskeslam estimert, uavhengig av om den oppstår på land eller i sjøen.

På grunn av høyt nitrogeninnhold kan det være utfordrende å behandle fiskeslam alene. I et labforsøk produserte fiskeslam alene (15 % TS) 60,5 Nm³ metangass/tonn i en kort periode før prosessen stoppet opp. Mens husdyrgjødsel alene produserte 4,6 Nm³/tonn, ga en blanding av 20 % fiskeslam og 80 % husdyrgjødsel 16,5 Nm³/tonn substrat. Dette utgjorde, en tredobling av utbyttet i forhold til husdyrgjødsel alene, og prosessen var stabil over tid (Cabell, Solli, Linjordet & Eggen, 2022).

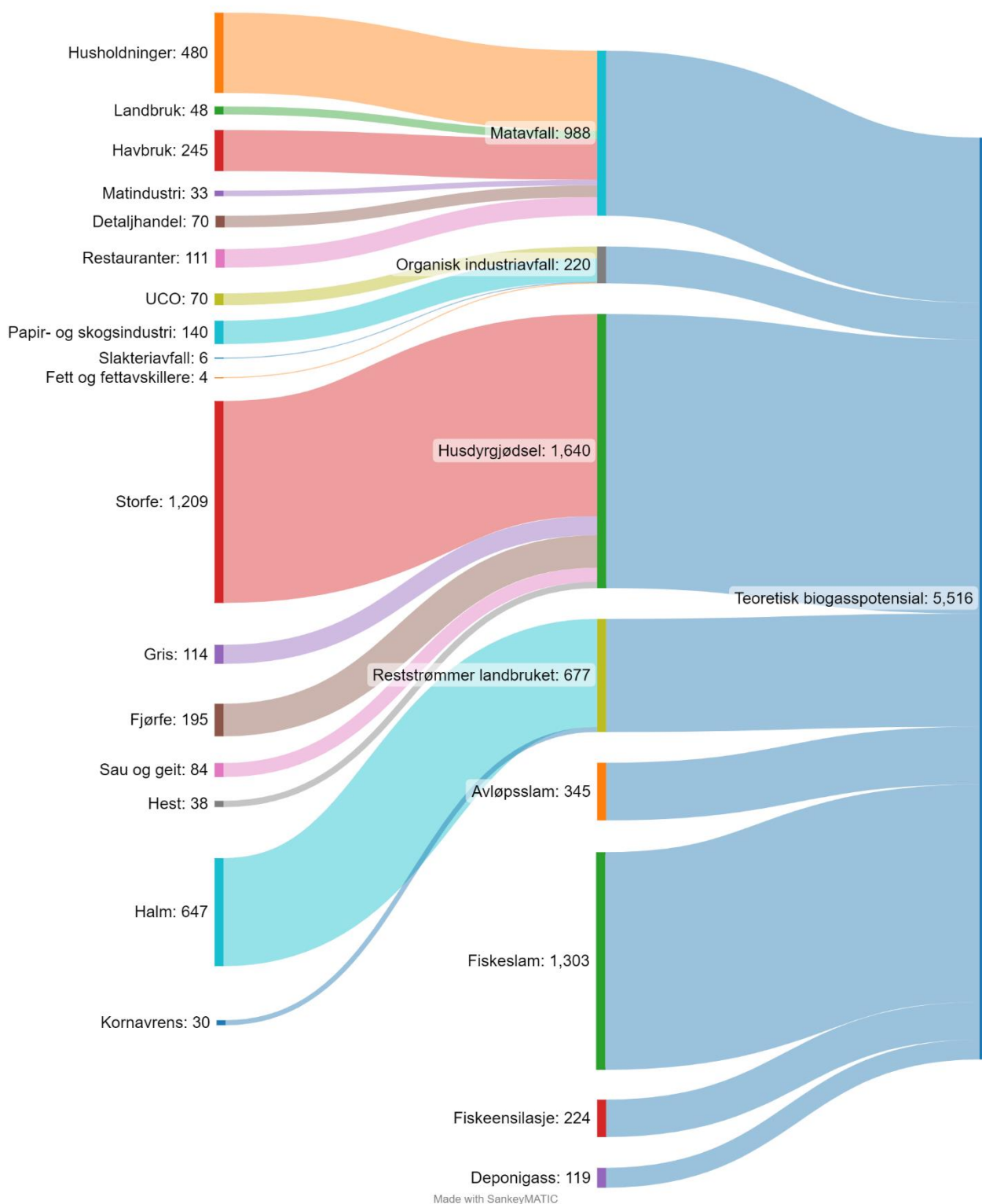
Tallene som benyttes i denne rapporten er hentet fra (Cabell, 2019) som har beregnet det totale potensialet fra fiskeslam til 1 303 GWh. Dersom oppdrettsnæringen skal femdoble sin produksjon, vil dette utgjøre et årlig biogasspotensial på 6,5 TWh per år. Kristiansen og Hetland (2021) har estimert at biogasspotensialet til fiskeslam kan ligge mellom 26 til 246 GWh i 2030 og fra 30 til 1 952 GWh i 2050. De store variasjonene skyldes usikkerhet knyttet både til mengde fiskeslam, andel forspill i fiskeslammet og biogassutbyttet.

3.8 Deponigass

På gamle deponier som inneholder organisk avfall genereres det metan som kan samles opp og utnyttes. Ettersom det nå er forbud mot deponering av organisk avfall vil det ikke være deponigass fra nye deponier, og over tid vil potensialet reduseres. Deponi fra norske deponier ble estimert til å være 119 GWh i 2019 (Gustafsson, Ammenberg & Murphy, 2020).

3.9 Oppsummering av biogasspotensial knyttet til råstoff

Figur 3-4 illustrerer biogasspotensialet fra den nåværende råstoffbasen som er kartlagt i denne rapporten.



Figur 3-4 Biogasspotensial fra den nåværende råstoffbasen

I tabellen nedenfor oppsummeres de estimerte teoretiske potensialene for den nåværende råstoffbasen. Videre gis en kortfattet oversikt over utviklingstrekk, ambisjoner og målsetninger og tilhørende mulige fremtidig potensial basert på dette, samt begrensninger og usikkerhetsfaktorer.

Tabell 3-1 Oppsummering av årlig teoretisk potensial i dagens situasjon og mulig fremtidig potensial

Råstoff	Nåværende råstoffbase (GWh)	Utviklingstrekk, ambisjoner og målsetninger	Mulig fremtidig råstoffbase (GWh)	Begrensninger og usikkerhetsfaktorer
Matavfall	998	50% av matsvinn skal reduseres innen 2030. Ikke nyttbar andel vil vokse med en økende befolkning	758	Utsorteringsgrad og renhet (feilsorteringer)
Organisk industriavfall (ikke matavfall)	220	Avhenger av utviklingen av biobaserte næringer	220	Konkurranse med andre teknologier
Husdyrgjødsel	1 640	Avhenger av kjøttproduksjon, antas å holde seg relativt stabilt	1 640	Spredt beliggenhet over mange gårder
Halm	647	Avhenger av produksjon av korn, antas å holde seg relativt stabilt	647	Må forbehandles. Uttak av halm uten tilbakeføring av bioest kan gi dårligere jordkvalitet
Kornavrens	30	Avhenger av produksjon av korn, antas å holde seg relativt stabilt	30	
Avløpslam	345	Potensialet vil vokse med en økende befolkning	388	Råstoffvolumet er lite i rurale områder
Fiskeensilasje	224	Havbruksnæringen har ambisjoner om å femdoble produksjonen innen 2050.	1 120	Avhenger av utvikling av fiskedødelighet
Fiskeslam	1 304	Havbruksnæringen har ambisjoner om å femdoble produksjonen innen 2050. Vekst i landbaserte oppdrettsanlegg vil øke tilgjengelighet	6 515	Saltinnhold Det meste oppstår per i dag i havet og hentes ikke ut, men det kan komme myndighetskrav
Deponigass	119	Vil reduseres på grunn av deponiforbud for organisk avfall	0	Må samles opp for å kunne utnyttes
Totalt	5 516		11 318	

Resultatene viser at det teoretiske biogasspotensialet med utgangspunkt i dagens råstoffbase er i 5,5 TWh. Dette er i overensstemmelse med studien som ble gjennomført i 2008 (Raadal et al., 2008). Carbon Limits estimerte det realistiske potensialet til å være 2,5 TWh, mens det teoretiske potensialet ble estimert til å være 4,6 GWh (Isakova et al., 2019). Den største forskjellen skyldes at rapporten kun inkluderte biogasspotensial fra landbasert fiskeoppdrett, og ikke fiskeslam som oppstår i havet.

Biogasspotensialet til Norge er også kartlagt i enkelte internasjonale rapporter. For eksempel estimerte Guidehouse (2022) produksjonspotensialet til biogass fra anaerob utråtning i Norge til å være 2915 GWh i 2030 og 4567 GWh i 2050. De internasjonale studiene har som regel ikke med marine restråstoffer som en del av potensialet, og dette skyldes nok at tilgangen på disse ressursene er ganske unikt for Norge.

Resultatene fra denne studien viser at det teoretiske biogasspotensialet fra noen råstoff vil kunne reduseres i fremtiden, mens for andre er det sannsynlig at det øker. Dersom norsk havbruksnæring når sine ambisiøse målsetninger, kan potensialet bli så høyt som 11 TWh. Det er viktig å understreke at det uansett ikke vil være realistisk å nå hele potensialet, og at det kan være et stort spenn mellom teoretisk og realistisk potensial. Basert på de kartlagte råstoffene vil det utvilsomt være mulig å øke produksjonen betydelig. I 2021 ble det produsert 753 GWh biogass i Norge (SSB, 2022e), og dette utgjør 14% av det teoretiske potensialet med utgangspunkt i dagens situasjon, og bare 7% av det mulig fremtidige potensialet.

I 2021 ble det brukt i underkant av 39 TWh drivstoff til veitransport Norge (fossilt drivstoff, biodrivstoff, biogass og strøm) (SSB, 2022c). Strømforbruket i el- og ladbare hybridbiler utgjorde ca 1,5 TWh. I følge Miljødirektoratet (2022a) vil det være behov for 32 TWh mer kraft til elektrifisering og ytterligere 28 TWh til produksjon av alternative drivstoff i 2050 hvis transportveksten fortsetter som i dag. Utnyttelse av potensialet til å produsere biogass fra avfalls- og sidestrømmer kan derfor gi et viktig bidrag til den fremtidige energimiksen.

3.10 Teoretisk potensial for produksjon av CO₂

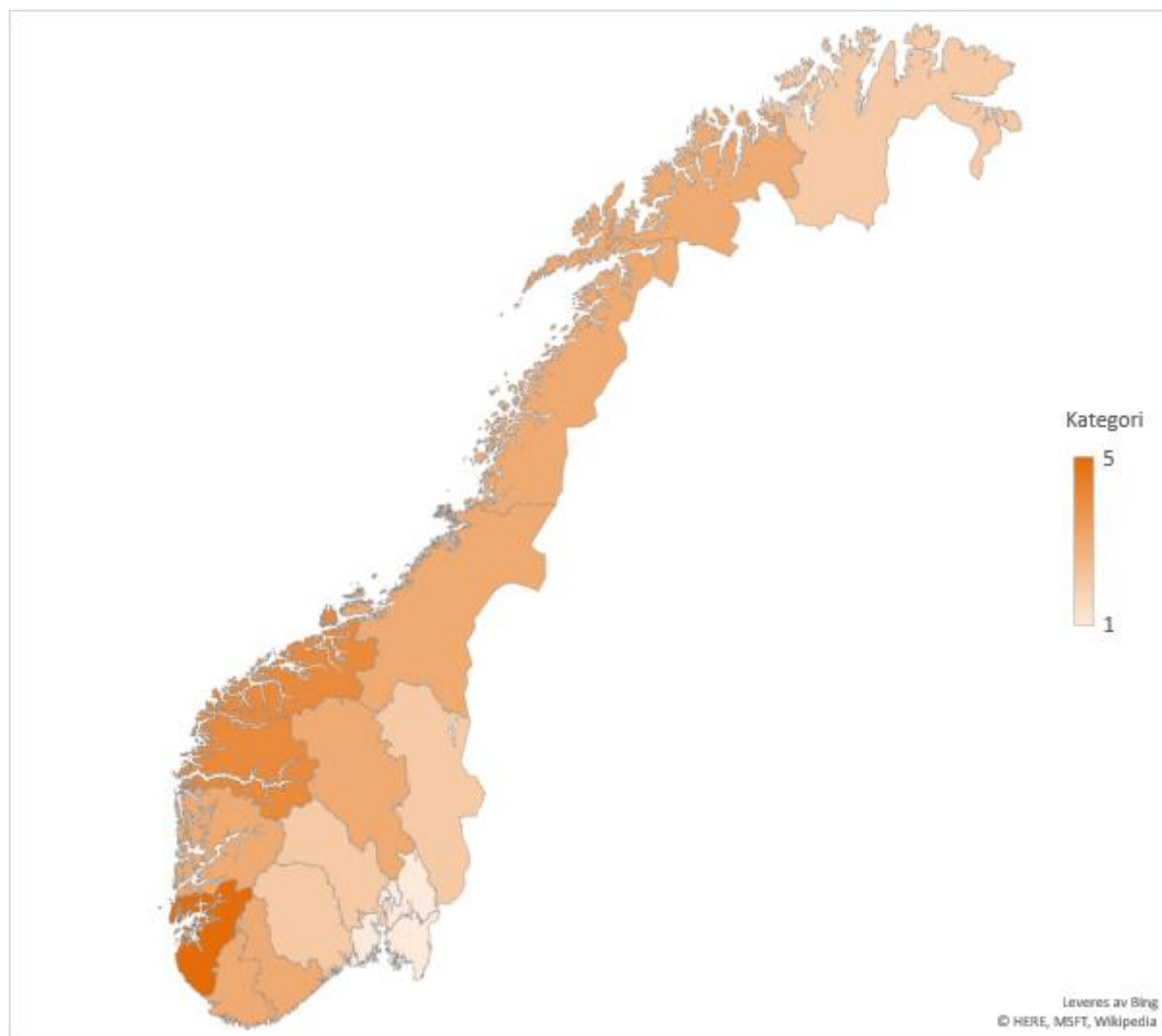
CO₂ brukes blant annet til å produsere drikke, tørris, i veksthus og til vannrensing. Utnyttelse av CO₂ som fjernes ved oppgradering av biogassen representerer en mulighet for å øke verdiskapningen i biogassverdikjeden ved at avfallsressursene utnyttes enda bedre. Basert på det teoretiske biogasspotensialet som er oppsummert i kapittel 3.9 og en antagelse om et gjennomsnittlig CO₂-innhold på 38%, er det teoretiske potensialet for produksjon av CO₂ fra oppgradering av biogass estimert til å være 297 852 tonn CO₂ med nåværende råstoffbase. Ved mulig fremtidig råstoffbase er potensialet 611 191 tonn CO₂.

I følge Thomassen og Hovland (2020) omsettes det omtrent 200 000 tonn CO₂-gass til ulike formål per år i Norge. Det teoretiske potensialet er dermed i overkant av det eksisterende norske markedet, og kan således erstatte all fossilbasert CO₂. Dersom CO₂-gassen flytendegjøres vil det i prinsippet være mulig å eksportere produktet og selge det i andre land. CO₂ kan også være et nyttig råstoff inn i nye teknologier, som beskrives i det neste kapittelet.

CO₂ fra oppgradert biogass kan også lagres permanent (CCS: carbon capture and storage/karbonfangst og lagring) eller konverteres til brensel eller andre produkter (CCU: carbon capture and utilization/karbonfangst og bruk). CCS er en måte å redusere karbondioksid til atmosfæren ved å fange og permanent lagre det, mens CCU er en måte å resirkulere karbonet i fanget CO₂ ved at CO₂ benyttes som råstoff i nye produkter (se også kap 4.5). Det er viktig å være klar over at det kun er CCS av biogent CO₂ som har potensial for å oppnå negative utslipp. Siden biogass kun består av biogen CO₂, har CCS derfor stort potensial for å oppnå negative utslipp. Bruk av CCU kan ikke medføre negative utslipp da CO₂ blir sluppet ut igjen ved bruk av de resirkulerte produktene om det ikke lagres i >100 år (se Raadal og Modahl (2021)).

3.11 Utnyttelse av biorest

Økt produksjon av biogass vil gi økt produksjon av biorest. For å oppnå en god verdikjede for biogass og høyest mulig klimanytte, er det nødvendig å finne en god avsetning for bioresten. Tidligere studier har vist at bruk av biorest som gjødsel som erstatning for mineralgjødsel kan bidra til en betydelig klimanytte (Lyng et al., 2015). I Lyng et al. (2019b) ble det gjort en analyse av tilgjengelig spredeareal i landets fylker, illustrert i Figur 3-5. I de lyse områdene (kategori 1) spres det husdyrgjødsel på mellom 10 og 20% av det totale dyrka arealet, mens i Rogaland spres det husdyrgjødsel på mellom 50 og 60 % av arealet.



Figur 3-5 Spredeareal i landets fylker (Lyng et al., 2019b)

Dette viser at det er gode muligheter for å øke bruken av biorest på jordbruksarealene, særlig i områdene rundt Oslofjorden.

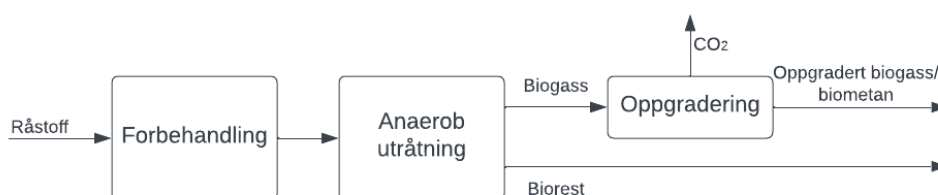
4 Kartlegging av metanpotensial knyttet til fremtidig teknologiutvikling

I forskningslitteraturen pekes det på at kombinasjon av anaerob utråtning (biogassproduksjon) med andre teknologier kan muliggjøre en enda bedre utnyttelse av de organiske restråstoffene i fremtiden. Det brukes ulike begreper for dette: sammenkobling eller integrering av teknologier, kaskadebehandling av organiske ressurser, anaerob utråtning som en del av et bioraffineri og biogassproduksjon som en del av industriell symbiose (Lin, O'Shea, Deng, Wu & Murphy, 2021; Lindfors, Gustafsson, Anderberg, Eklund & Mirata, 2020; Pecchi & Baratieri, 2019).

Nedenfor beskrives ulike teknologier som kan kombineres med anaerob utråtning med tanke på å øke fremtidens metanproduksjon i Norge. Informasjonen er basert på diskusjonsmøter gjennomført med ulike eksperter, supplert med litteraturgjennomgang. Det er viktig å være oppmerksom på at teknologiene som beskrives ikke er ment å være en uttømmende liste over teknologier, og at teknologiene som nevnes her i stor grad er på forsknings- og pilotstadium (lav technology readiness level (TRL)). Det kan derfor kreves et betydelig forsknings- og utviklingsarbeid før de eventuelt kan implementeres i industrielle anlegg.

4.1 Tradisjonell biogassproduksjon

Tradisjonell biogassproduksjon foregår ved anaerob utråtning, som illustrert i Figur 4-1.



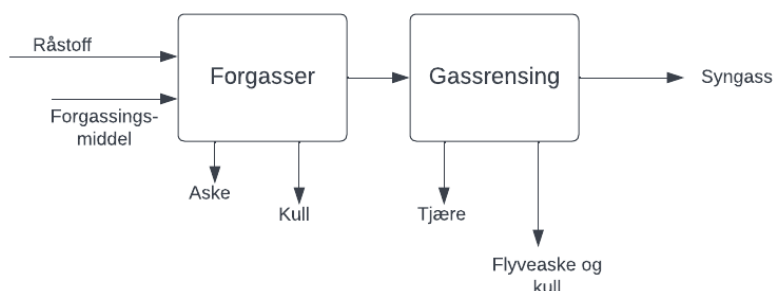
Figur 4-1 Flytskjema for tradisjonell biogassproduksjon

Det finnes en rekke ulike teknologier for dette, både kontinuerlig og batch, og tørr og våt prosess. Disse vil ikke beskrives ytterligere i denne rapporten, siden fokuset har vært på hvordan mulige fremtidige teknologier kan bidra til å øke biogassproduksjonen.

4.2 Metanproduksjon gjennom gassifisering

Termokjemisk konvertering omfatter både pyrolyse og gassifisering. Disse teknologiene krever materialer med høyt tørrstoffinnhold, og kan derfor være et godt substitutt til anaerob utråtning, som først og fremst er egnet for våte substrater.

Ved hjelp av gassifisering og syntetisering kan det produseres metan fra organisk råstoff med høyt tørrstoffinnhold som er mindre egnet for anaerob utråtning (Alamia, Magnusson, Johnsson & Thunman, 2016). Prosessen er illustrert i figuren under. Mens biogass fra anaerob utråtning i hovedsak består av metan (CH₄) og karbondioksid (CO₂), består syngass av CH₄, karbonmonoksid (CO) og CO₂.



Figur 4-2 Flytskjema for gassifisering basert på Pecchi og Baratieri (2019)

Foreløpig er ikke teknologien utbredt for biogassproduksjon, men det er dokumentert at den fungerer. GoBiGas i Göteborg var et demonstrasjonsanlegg i industriell skala som dokumenterte hvordan biogass kan produseres av trevirke ved hjelp av gassifisering. Resultater fra driften av anlegget viste at det er mulig å oppnå en produksjonseffektivitet på 70% av lavere brennverdi, og det ble oppnådd ønsket gasskvalitet fra ulike råvarer som trepellets, flis, barn og returtre (Larsson, Gunnarsson & Tengberg, 2018). En fullskala versjon ble ikke realisert, blant annet på grunn av lave energipriser. Det kan tenkes at store endringer i gassmarkedet og økt etterspørsel etter biogass vil gjøre slike anlegg mer aktuelle.

Siden teknologien vil gjøre det mulig å produsere biogass fra trevirke, kan dette bidra til en økning i det teoretiske biogasspotensialet. I en internasjonal rapport skrevet av ENGIE estimeres biogasspotensialet for trevirke og treavfall i Norge til å være 44,8 TWh (Birman et al., 2021). Trevirke omfatter i denne sammenheng kommersiell stammeved og pre-kommersiell tynning. Skogsavfall inkluderer rester fra hogst og tynning. Guidehouse (2022) har beregnet at biogasspotensialet knyttet til gassifisering basert på råstoff tilgjengelig i Norge er på 389 GWh i 2030 og 8356 GWh i 2050.

I denne rapporten inkluderes kun avfall og sidestrømmer, og det er derfor gjort egne beregninger for å sikre at dette prinsippet ivaretas. Det er tatt utgangspunkt i mengder rivningstrevirke fra byggeaktivitet, treavfall fra husholdninger, hageavfall, GROT (grener, kvister og røtter etter skogsavvirkning) og stubber.

Årlige mengder rivningstrevirke fra byggeaktivitet og hage- og treavfall fra husholdninger er hentet fra avfallstatistikken (SSB, 2021, 2022a), og brennverdier for avfallet er basert på Berg, Jørgensen, Heyerdal og Wilhelmsen (2003) og Knoop (2016). For GROT, stubber og røtter er det tatt utgangspunkt rapporten Bioenergi i Norge, som ser på mulighet for økt bruk av bioressurser. Tallene er hentet fra scenariet «forventet avvirkning som i dag», men med utnyttelse av GROT, stubber og røtter (Melbye, 2014).

Teoretisk biogasspotensial fra gassifisering er beregnet ved å multiplisere årlig energipotensial med en effektivitetsfaktor på 70%, basert på erfaringer fra GoBiGas-anlegget.

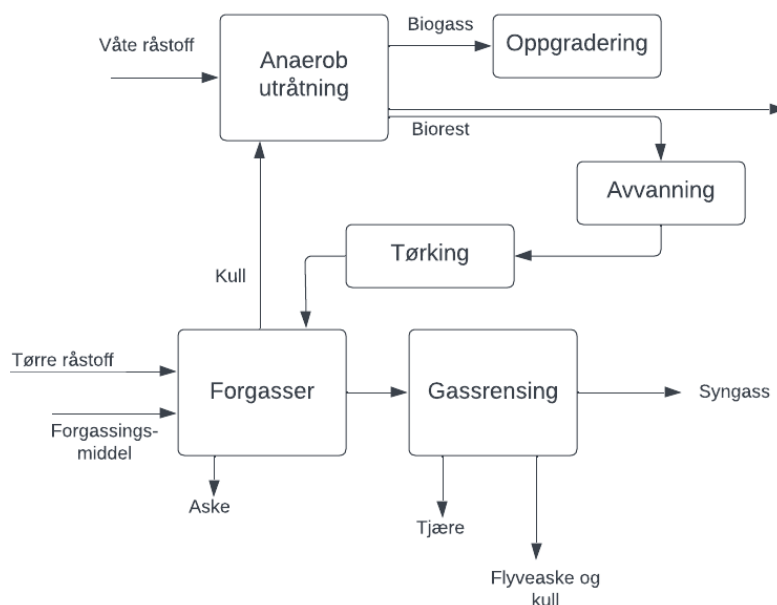
Tabell 4-1 Teoretisk potensial, biogassproduksjon fra gassifisering

	Energi-potensial (GWh)
Rivningstrevirke, avfall fra byggeaktivitet	609
Treavfall fra husholdninger	727
Hageavfall fra husholdninger	940
GROT	4620
Stubber og røtter	700
Totalt	7596

Estimatene viser at teknologien kan gi et ytterligere teoretisk biogasspotensial på ca 7,6 TWh. Det understrekes at dette er grove anslag for å gi et bilde av størrelsesorden, og at det kan være andre anvendelser som vil konkurrere om dette råstoffet. Det vil dessuten være utfordringer knyttet til denne type råstoff: de kan være lite homogene og dermed ha varierende egenskaper, og de kan være spredt over store geografiske områder som kan innebære høye kostnader knyttet til innhenting og transport.

4.3 Gassifisering i kombinasjon med anaerob utråtning

I følge Pecchi og Baratieri (2019) er det i hovedsak utforsket to ulike måter å kombinere gassifisering og anaerob utråtning: gassifisering av tørket biorest for å øke biogassproduksjonen og å bruke kull fra gassifisering inn i anaerob utråtning for å forbedre råtneprosessen samtidig som kull fra gassifisering får en nyttig anvendelse. Kombinasjon av gassifisering og utråtning er vist i figuren under.

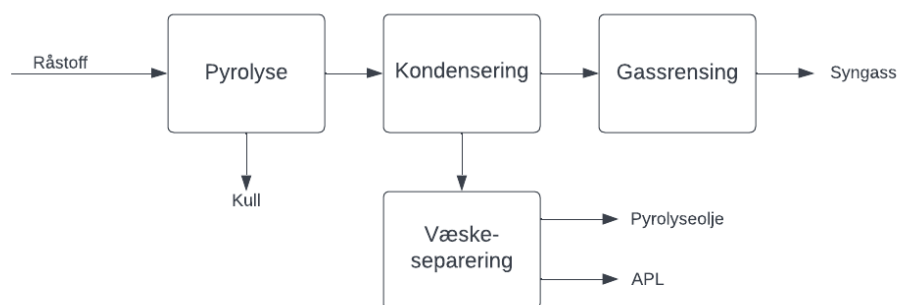


Figur 4-3 Illustrasjon av hvordan gassifisering og anaerob utråtning kan kombineres

Dersom bioresten skal brukes til gassifisering må bioresten tørkes til et fuktinnhold på under 30% (Pecchi & Baratieri, 2019). Ramachandran et al. (2017) sammenliknet konvensjonell biogassproduksjon med biogassproduksjon der bioresten ble gassifisert og beregnet en økt energiproduksjon på mellom 2,8 og 24%. Det er ikke klart om dette er utover teoretisk potensial eller om det kun er en større andel av det teoretiske potensialet som blir bedre utnyttet. Bruk av biokull i råtnetanken kan gi lavere andel CO₂ i biogassen, og dermed høyere metanprosent (Pecchi & Baratieri, 2019). Det er ikke gjort noen beregninger av den potensielle effekten av dette i denne rapporten.

4.4 Pyrolyse i kombinasjon med anaerob utråtning

Pyrolyse er en prosess der et råstoff eller et materiale utsettes for høy temperatur uten tilgang på oksygen. Mens gassifisering i hovedsak konverterer biomassen til syngass og noe kull, gir pyrolyse en større andel kull, og det genereres veskefraksjoner (olje og Aqueous HTC liquids (APL)) i tillegg til syngass (Pecchi & Baratieri, 2019).

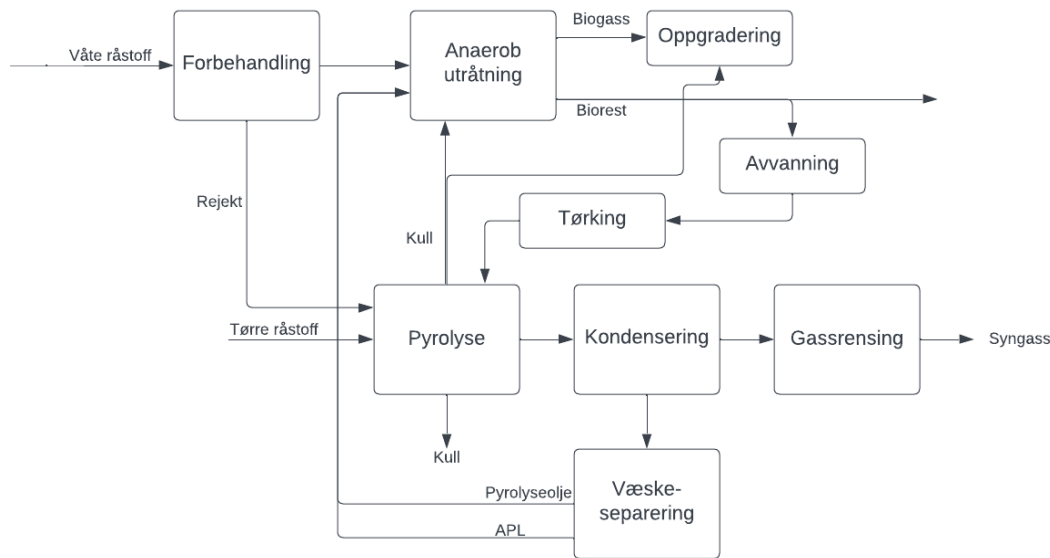


Figur 4-4 Flyskjema for pyrolyse basert på Pecchi og Baratieri (2019)

Egenskapene til produktene fra pyrolyse avhenger både av egenskapene til råstoffene og selve pyrolyseprosessen. Det finnes tre ulike typer pyrolysering: langsom, hurtig og flash, der førstnevnte fokuserer på å produsere kull og den andre på å produsere væske (olje). Pyrolyse muliggjør utnyttelse av råstoffer med et høyt tørrstoffinnhold som ikke er egnet til anaerob utråtning.

Å kombinere pyrolyse med biogassproduksjon (anaerob utråtning) kan gi en rekke synergier, som vist i Figur 4-5 (Pecchi & Baratieri, 2019; Tayibi, Monlau, Bargaz, Jimenez & Barakat, 2021):

- Utvidelse av råstoffgrunnlaget: Råstoffer som er lett nedbrytbart organisk materiale kan sendes til anaerob utråtning, mens råstoffene med høyt tørrstoffinnhold kan pyrolyseres
- Pyrolyseolje og APL kan brukes som råstoff til biogassproduksjon for å øke biogassutbyttet
- Pyrolyse av biorest som ikke allerede har en god anvendelse kan gi biokull som kan brukes i landbruket eller i prosessindustrien, og olje som kan brukes til biogassproduksjon
- Pyrolysering av rejekt kan potensielt gi en mer høyverdig utnyttelse sammenliknet med å sende til forbrenning
- Biokull kan brukes i biogassreaktoren eller i oppgraderingsprosessen for å øke metaninnholdet i biogassen



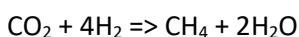
Figur 4-5 Illustrasjon av hvordan pyrolyse og anaerob utråtning kan kombineres

Selv om det er mange fordeler med å kombinere anaerob utråtning og pyrolyse, gjenstår det en del forskning og utvikling for at dette skal kunne gjennomføres i storskala. Enkelte norske biogassanlegg utforsker pyrolyse, og det er flere pågående forskningsprosjekter som ser nærmere på dette.

Potensialet for økt biogassproduksjon knyttet til pyrolyse av treavfall antas å være overlappende med potensialet som er beregnet for gassifisering, og det er derfor ikke gjort egne beregninger av dette potensialet.

4.5 Power to gas og biometanering

Power to gas er en teknologi der det brukes elektrisitet (fortrinnsvis fornybar) til å produsere hydrogengass (H₂) ved hjelp av vannelektrolyse. Deretter produseres metan og vann ved hjelp av hydrogengass og CO₂ (Lin et al., 2021):



Dette gjør det mulig å produsere metan fra elektrisitet via elektrolyse og tilsats av CO₂, og det kan også fungere som en oppgraderingsteknologi. Det skilles mellom in-situ biometanering der hydrogen tilsettes rånetaken eller ex-situ der hydrogenet tilsettes i en ekstern bioreaktor (Lin et al., 2021). I ex-situ brukes hydrogenotrofe bakterier til å konvertere CO₂ i biogassen til metan, og dermed øke biogassutbyttet. Oppgraderingseffektiviteten kan ligge mellom 79 og 98% (Angelidaki et al., 2018).

Dette er også en form for CCU (se kap 3.10) der CO₂ fra biogassen kan videreføres til metan gjennom tilsats av hydrogen.

Hvis det antas at biometanering kan bidra til å konvertere CO₂ i biogassen til CH₄, og dermed oppnå 98% metaninnhold i biogassen, vil dette representere et teoretisk biogassutbytte på 1434 GWh per år dersom en tar utgangspunkt i nåværende råstoffbase og 2943 GWh med utgangspunkt i mulig fremtidig råstoffbase.

Tallene er beregnet med utgangspunkt i det teoretiske potensialet for CO₂ ved oppgradering av biogass (se kap 3.10).

4.6 Algeproduksjon i kombinasjon med anaerob utråtning

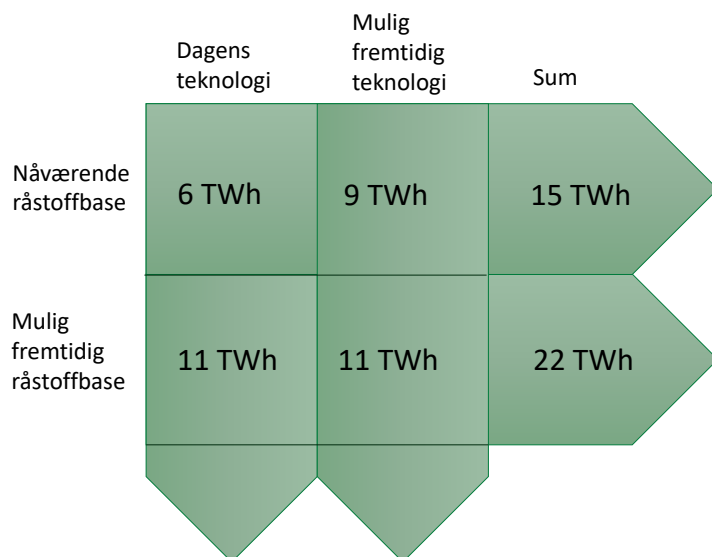
Algeproduksjon kan integreres med anaerob utråtning på ulike måter: alger kan brukes som råstoff til biogassproduksjon, mikroalger kan brukes i oppgradering av biogass og det kan produseres mikroalger fra biorest og CO₂ (Leong & Chang, 2022).

Bruk av alger som råstoff til biogassproduksjon er ikke inkludert som en del av råstoffgrunnlaget i det teoretiske potensialet i denne rapporten. Dette skyldes at dyrking eller høsting av alger til bruk i energiproduksjon kan defineres som energivekster, og energivekster er utenfor rammene til denne rapporten. Alger kan dessuten utnyttes på et mer høyverdig nivå, for eksempel som mat, fôr eller til materialproduksjon. I noen tilfeller vil alger likevel kunne defineres som en avfallsstrøm: biogassproduksjon fra alger er foreslått som et tiltak for å redusere påvirkning ved algeoppblomstring (Leong & Chang, 2022).

Algeproduksjon fra biorest vil kunne bidra til å øke biogassproduksjonen hvis de produserte algene brukes som råstoff inn i biogassanlegget igjen. Dersom det produseres alger vil det likevel være mer hensiktsmessig å bruke algene til et mer høyverdig formål, som kan bidra til å gi verdikjeden et høyere verdiskapningspotensial. Biogasspotensialet knyttet til algeproduksjon er derfor ikke kvantifisert i denne rapporten.

5 Oppsummering av teoretisk biogasspotensial

Oppsummering av de teoretiske biogasspotensialene vises i Figur 5-1.



Figur 5-1 Biogasspotensial (TWh) for nåværende og mulig fremtidig råstoffbase og nåværende og mulig fremtidig teknologi

Det nåværende teoretiske biogasspotensialet er estimert til å være 6 TWh. Mulig fremtidig teknologiutvikling med utgangspunkt i nåværende råstoffbase er estimert til å være ytterligere 9 TWh, noe som gir et totalt teoretisk biogasspotensial på 15 TWh.

Med utgangspunkt i dagens teknologi er biogasspotensialet for den mulige fremtidige råstoffbasen anslått å være 11 TWh. Økningen skyldes i hovedsak den norske havbruksnæringens mål om vekst. Dersom en tar utgangspunkt i både mulig fremtidig råstoffbase og mulig fremtidig teknologiutvikling øker potensialet med 11 TWh, og det totale teoretiske potensialet blir 22 TWh.

Det understrekes at det er usikkerheter knyttet til vekst i havbruksnæringen og at det gjenstår en del forsknings- og utviklingsarbeid før potensialet for ny teknologi eventuelt kan realiseres. Resultatene indikerer likevel at det teoretiske biogasspotensialet vil kunne øke i årene fremover, og at det kan være mye å hente på å kombinere eller supplere anaerob utrånning med andre teknologier.

6 Klimanytte ved økt biogassproduksjon

Tidligere studier har vist at biogassproduksjon fra matavfall og husdyrgjødsel kan gi klimanytte i et livsløpsperspektiv (Lyng et al., 2015; Lyng & Saxegård, 2020). Analyser av ulike typer verdikjeder for biogass indikerer at jo flere sektorer som er involvert i verdikjeden, dess større klimanytte (Lyng, Stensgård, Hanssen & Modahl, 2018). Klimanytten knyttet til biogassproduksjon kan deles i fire hoveddeler:

- Nytten ved at biogass erstatter fossile energibærere
- Nytten ved at CO₂ fra oppgradering av biogass erstatter fossilbasert CO₂
- Nytten ved at biorest erstatter mineralgjødsel eller torvbaserte jordprodukter
- Nytten ved at avfalls- og gjødselressurser behandles i biogassanlegg som har lavere klimapåvirkning enn alternativ håndtering

I dette prosjektet har det vært hovedfokus på å beregne klimanytten ved at biogass erstatter fossile energibærere (naturgass og diesel), ved å utnytte CO₂ fra oppgradert biogass som erstatning for fossilbasert CO₂ og utslippsreduksjoner ved at husdyrgjødsel går til biogassproduksjon og dermed har en kortere lagringsperiode.

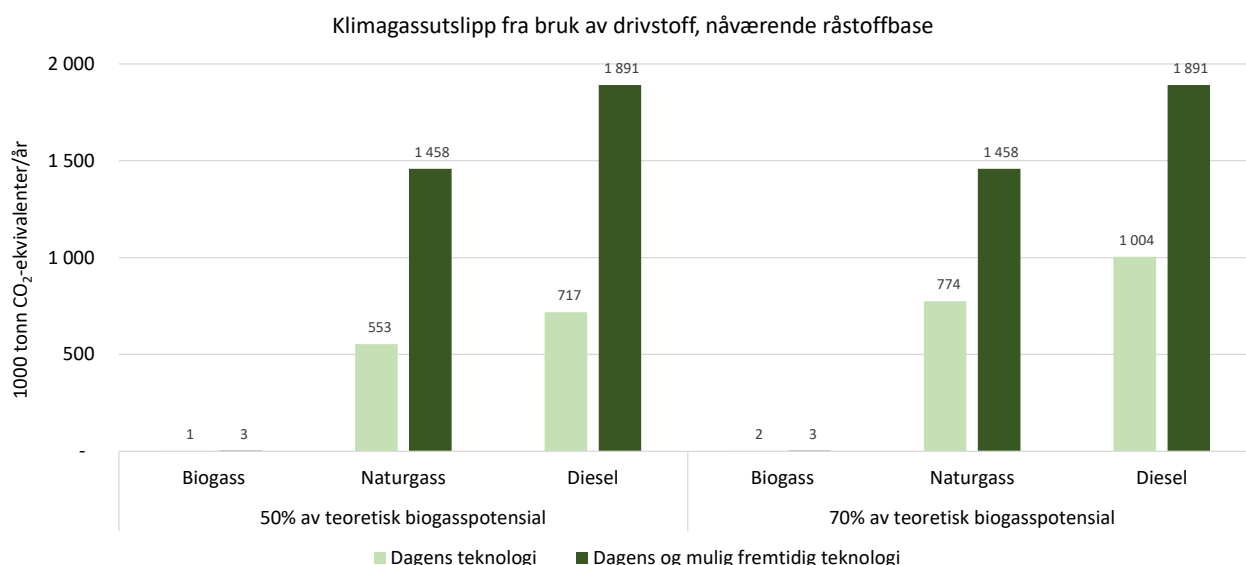
6.1 Nytten ved at biogass erstatter fossile energibærere

Klimanytten knyttet til økt bruk av biogass vil avhenge av hva biogassen brukes til og hvilke energibærere som erstattes. Dersom biogass brukes som drivstoff i busser, lastebiler og andre kjøretøy på vei, er det naturlig å forutsette at diesel fortrenses. Brukes biogass i industri eller i skip, er det sannsynlig at biogassen erstatter naturgass.

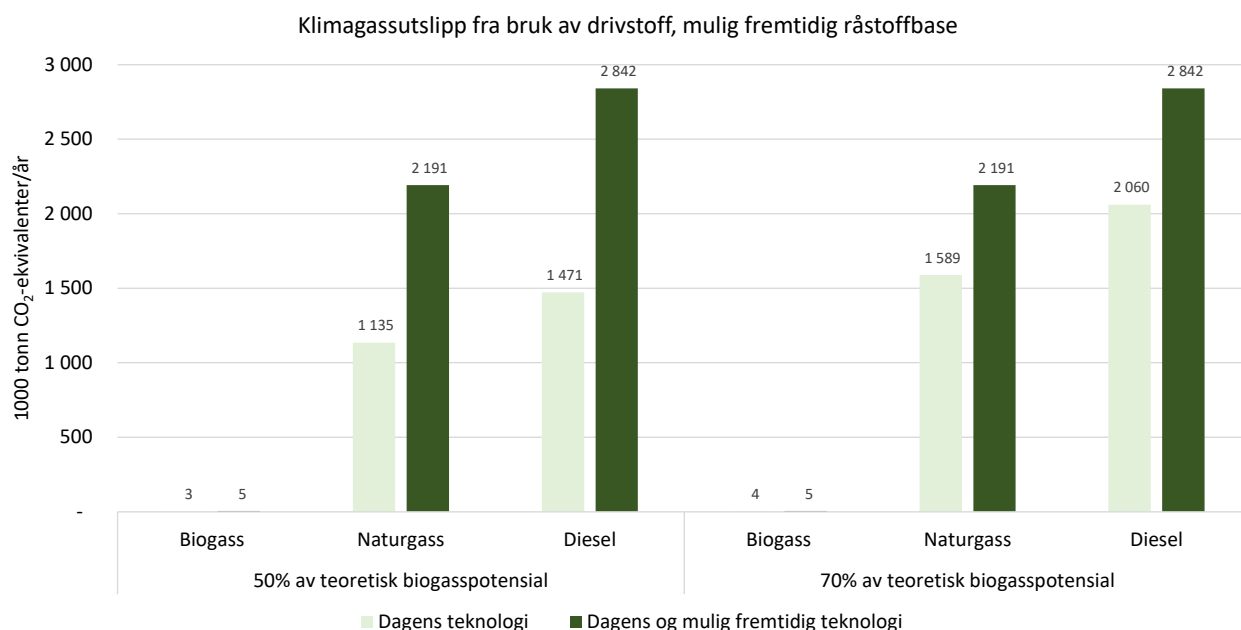
Potensiell årlig klimanytte ved at biogass erstatter naturgass eller diesel er analysert for ulike mengder produsert biogass: 50% og 70% av teoretisk biogasspotensial med henholdsvis nåværende råstoffbase og dagens teknologi (5,5 TWh), nåværende råstoffbase og dagens og mulig fremtidig teknologi (14,5 TWh), mulig fremtidig råstoffbase og dagens teknologi (11,3 TWh) og mulig fremtidig råstoffbase og dagens og mulig fremtidig teknologi (21,9 TWh). Det er ikke gjort analyser av klimagassreduksjoner knyttet til bruk av 100% av det teoretiske potensialet, fordi det alltid vil være noe tap gjennom verdikjeden (innsamling, prosessering, osv). Scenariet med 70% er dermed svært ambisiøst og indikerer f.eks 100% innsamlingsgrad og 70% virkningsgrad, som til sammen utgjør en utnyttelsesgrad på 70% av det teoretiske potensialet.

Klimagassutslipp for bruk av biogass, naturgass eller diesel for de ulike scenariene er beregnet i henhold til metodikk som brukes i nasjonalt utslippsregnskap (Miljødirektoratet, 2022c; Norwegian Environment Agency, 2021).

Figur 6-1 viser direkte klimagassutslipp fra forbrenning av henholdsvis 50% og 70% av biogasspotensialet med nåværende råstoffbase og med summen av dagens og mulig fremtidig teknologi. Figur 6-2 viser tilsvarende tall, men med mulig fremtidig råstoffbase.



Figur 6-1 Direkte utslipp fra forbrenning av biogass, naturgass eller diesel tilsvarende 50% og 70% av teoretisk biogasspotensial, beregnet fra nåværende råstoffbase og dagens teknologi (6 TWh) og dagens og mulig fremtidig teknologi (15 TWh).



Figur 6-2 Direkte utslipp fra forbrenning av biogass, naturgass eller diesel tilsvarende 50% og 70% av teoretisk biogasspotensial, beregnet fra mulig fremtidig råstoffbase med dagens teknologi (11 TWh) og dagens og mulig fremtidig teknologi (22 TWh).

Utslippsreduksjonen knyttet til bruk av biogass sammenlignet med naturgass eller diesel fremkommer ved å beregne differansen mellom utslippene fra henholdsvis biogass og naturgass/diesel.

Resultatene viser at produksjon av 2,8 TWh biogass (tilsvarende 50% av det teoretiske biogasspotensialet for nåværende råstoffbase med dagens teknologi), kan potensielt gi en utslippsreduksjon på ca 552 000 tonn CO₂-ekvivalenter per år dersom biogassen erstatter naturgass og 716 000 tonn dersom biogassen erstatter diesel. De andre scenariene viser tydelig at jo mer biogass man produserer, jo større blir klimagevinsten.

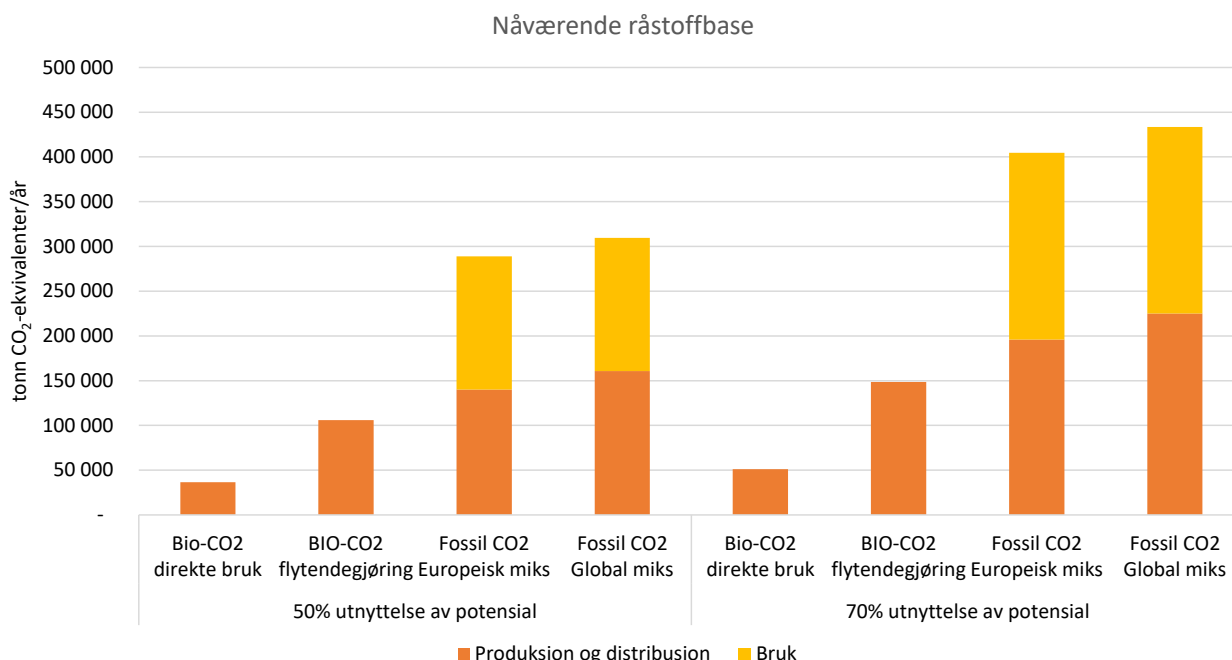
De nasjonale klimagassutslippene fra veitransport var på 8,7 millioner tonn CO₂-ekvivalenter i 2021 (Miljødirektoratet, 2022b). De ovenfor beregnede utslippsreduksjonen ved produksjon av 2,8 TWh (50% av det teoretiske biogasspotensialet med dagens teknologi og nåværende råstoffbase) utgjør dermed mellom 6 og 8% av de nasjonale utslippene fra veitransport, avhengig av om det er naturgass eller diesel som forutsettes erstattet.

Dersom biogassproduksjonen øker til 5,7 TWh (tilsvarer 50% av mulig fremtidig råstoffbase med dagens teknologi), kan klimanytten øke til ca 1 132 000 tonn CO₂-ekvivalenter når biogassen erstatter naturgass og 1 469 000 tonn når biogassen erstatter diesel. Dette utgjør mellom 13 og 17% av de nasjonale utslippene fra veitransport i 2021. Det presiseres at alle tall for klimagassutslipp i dette underkapittelet representerer direkte utslipp fra forbrenning i henhold til nasjonalt utslippsregnskap, og at produksjon av drivstoffene ikke er inkludert.

6.2 Nyttene ved at CO₂ fra oppgradering av biogass erstatter fossil CO₂

Potensiell klimanytte ved bruk av CO₂ fra biogass er analysert for de samme scenariene for mengde produsert biogass som over (50% og 70% av teoretisk biogasspotensial for nåværende råstoffdatabase). Dette tilsvarer bruk av CO₂ fra produksjon av henholdsvis 2,8 TWh og 3,9 TWh, som representerer 148 926 og 208 497 tonn CO₂ (hhv 50% og 70% av CO₂-mengdene oppgitt i kapittel 3.10).

Det er analysert to ulike verdikjeder for CO₂ fra biogass: bruk av CO₂ direkte og flytendegjøring og transport av CO₂ før bruk. Dette sammenlignes med klimagassutslipp knyttet til produksjon og bruk av europeisk og global markedsblanding for industriell CO₂. Resultatene presenteres i Figur 6-3.



Figur 6-3 Utslipp fra produksjon og bruk av 148 926 tonn og 208 497 tonn som forutsettes tilgjengeliggjort ved utnyttelse av henholdsvis 50% og 70% av teoretisk biogasspotensial, sammenlignet med tilsvarende mengde CO₂ produsert på konvensjonell måte.

Bruk av biogent CO₂ vil ikke medføre fossile utslipp i bruksfasen. Ved overgang fra biogent til fossilt CO₂, vil det derfor oppnås en direkte utslippsreduksjon på 1 tonn CO₂ per tonn CO₂ som brukes. Flytendegjøring av

CO₂ er mer energikrevende enn å bruke CO₂ direkte, men siden bruk av CO₂ direkte krever en avsetning av noen i umiddelbar nærhet av biogassanlegget (som f.eks et veksthus), er det usannsynlig at hele potensialet kan realiseres uten flytendegjøring.

Utnyttelse av 50% av det teoretiske potensialet av CO₂ fra oppgradering av biogass, kan medføre en utslippsreduksjon på mellom 183 000 og 273 000 tonn CO₂-ekvivalenter per år. Øker utnyttelsesgraden til 70%, øker potensialet for utslippsreduksjon til mellom 256 000 og 382 000 tonn CO₂-ekvivalenter.

Det er viktig å være klar over at deler av metanpotensialet knyttet til mulige fremtidige teknologier forutsetter at CO₂ fra oppgradering blir omdannet til metan, og dette vil i så fall medføre at mindre mengder CO₂ fra oppgradering av biogass kan brukes til å erstatte industriell CO₂.

6.3 Nyttene ved reduserte utslipp når husdyrgjødsel går til biogassproduksjon

Nasjonale utslipp fra jordbruk i Norge utgjorde 4,6 millioner tonn CO₂-ekvivalenter i 2021 (Miljødirektoratet, 2022b). Av dette utgjorde gjødselhåndtering omtrent 11% (Norwegian Environment Agency, 2021). Jordbruket har forpliktet seg til å bidra til en utslippsreduksjon på 5 millioner tonn CO₂-ekvivalenter i perioden 2021-2030. Dette tilsvarer 500 000 tonn CO₂ ekvivalenter per år i gjennomsnitt.

Når husdyrgjødsel brukes til biogassproduksjon forkortes lagringstiden sammenliknet med vanlig håndtering av husdyrgjødsel, som er at ubehandlet gjødsel lagres fra den oppstår frem til den benyttes i spredeperioden. Redusert lagringstid gir reduserte utslipp av klimagasser (metan og lystgass) fra lager. Utslippsreduksjonene avhenger både av type gjødsel, type lager og lagringstid. Det er ikke gjort egne beregninger av utslippsreduksjoner fra lager for økt utnyttelse av husdyrgjødsel til biogassproduksjon i dette prosjektet, da dette er utforsket i tidligere studier.

Studiene som er gjennomført har sett på differansen mellom utslipp fra lagring av husdyrgjødsel for en antatt referansebane for husdyrproduksjon frem mot 2030 eller 2050, sammenliknet med et scenario med gradvis oppskalering av husdyrgjødsel til biogassproduksjon. Resultatene avhenger av hvordan referansebanen defineres, hva slags type husdyrgjødsel som antas å gå til biogassproduksjon og hvilken tidsperiode som analyseres.

I Klimakur 2030 ble utslippsreduksjonspotensial for perioden 2021-2030 beregnet til å være 253 000 tonn CO₂-ekvivalenter akkumulert i perioden 2021-2030 dersom andelen husdyrgjødsel som går til biogassproduksjon økes fra dagens nivå på 1% til 25 % (Miljødirektoratet, 2020). Resultatene er nedskalert for å ta høyde for overlapp med andre tiltak.

Bardalen et al. (2019) estimerte utslippsreduksjoner fra lagring av husdyrgjødsel i 2030 til å være 55 000 tonn CO₂-ekvivalenter dersom 20% av husdyrgjødsel går til biogassproduksjon. Tilsvarende oppnås utslippsreduksjoner på 155 000 tonn CO₂-ekvivalenter i 2050 dersom 50% går til biogassproduksjon. Dersom substitusjonseffekten for den produserte biogassen inkluderes, blir utslippsreduksjonene henholdsvis 148 000 tonn og 287 000 tonn CO₂ ekvivalenter i 2030 og 2050, men dette overlapper med substitusjonseffekter beregnet i kapittel 6.1.

Pettersen, Grønlund, Stensgård og Walland (2017) har beregnet utslippsreduksjoner ved økt andel husdyrgjødsel til biogassproduksjon (5%, 20%, 35% og 50%). De estimerte den totale effekten av at 50% av husdyrgjødsel i Norge går til biogassproduksjon i 2050 (både redusert lagring og substitusjonseffekt) til å være 284 000 tonn CO₂-ekvivalenter, som tilsvarer over 5,5 % av klimagassutslippene fra landbruket (ekskludert utslipp fra jord). Gjennomsnittlig årlig utslippsreduksjon for analyseperioden utgjorde 160 096

tonn CO₂-ekvivalenter. Dersom en kun ser på utslipp fra lagring slik at det unngås dobbelttelling med substitusjonseffektene estimert i kapittel 6.1, er de akkumulerte utslippsreduksjonene ca 154 000 tonn CO₂-ekvivalenter ved 50% husdyrgjødsel til biogassproduksjon.

7 Konklusjon

Det teoretiske biogasspotensialet i Norge er estimert til å være i underkant av 6 TWh for nåværende råstoffbase og med dagens teknologi. Analysene av mulig fremtidig råstoffbase viser at potensialet kan øke betydelig hvis havbruksnæringen oppnår sine vekstambisjoner. I tillegg kan potensialet øke dersom anaerob utråtning suppleres eller kombineres med nye teknologier. Dersom en tar utgangspunkt i både mulig fremtidig råstoffbase og mulige fremtidige teknologier kan potensialet komme opp i 22 TWh.

Funnene i rapporten understreker at det er et stort potensial som ikke er realisert og at biogass både kan bidra til å redusere klimagassutslipp og kan være en nyttig komponent i fremtidens energisystem. Biogassproduksjon basert på avfalls- og sidestrømmer kan bidra til klimagassreduksjoner på flere områder: reduserte utslipp fra bruk av fossile drivstoff, reduserte utslipp ved utnyttelse av CO₂ i biogass og reduserte utslipp fra lagring av husdyrgjødsel. Størrelsesordenen på utslippsreduksjonene er avhengig av hvor stor andel av det teoretiske potensialet som utnyttes.

Ut ifra et miljø- og ressursperspektiv er det viktig å understreke at produksjon av energi/drivstoff fra et råstoff kun bør gjennomføres hvis det ikke finnes en mer høyverdig utnyttelse av råstoffet. Dette bør likevel ikke stå i veien for å lage gode biogass-verdikjeder som kan sørge for en forsvarlig håndtering av de organiske avfallsressurser som oppstår i samfunnet.

8 Referanser

- Alamia, A., Magnusson, I., Johnsson, F. & Thunman, H. (2016). Well-to-wheel analysis of bio-methane via gasification, in heavy duty engines within the transport sector of the European Union. *Applied Energy*, 170, 445-454. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.001>
- Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H. & Kougias, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, 36(2), 452-466. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>
- Bardalen, A., Rivedal, S., Aune, A., O'Toole, A., Walland, F., Silvennoinen, H., ... Øygarden, L. (2019). *Utslippsreduksjoner i norsk jordbruk. Kunnskapsstatus og tiltaksmuligheter. NIBIO rapport. 4/149,/2018.*
- BarentsWatch. (2022). Fiskedødelighet og tap i produksjonen <https://www.barentswatch.no/havbruk/fiskedodelighet-og-tap-i-produksjonen>.
- Berg, L. N., Jørgensen, P. F., Heyerdal, P. H. & Wilhelmsen, G. (2003). *Bioenergiressurser i Norge. Oppdragsrapport NVE 7/2003.*
- Biogass Norge. (2022). EU satser 37 mrd euro på biogass <https://biogassnorge.no/2022/05/27/eu-satser-37-mrd-euro-pa-biogass/>.
- Birman, J., Burdloff, J., De Peufelhous, H., Erbs, G., Feniou, M. & Lucille, P.-L. (2021). *Geographical analysis of biomethane potential and costs in Europe in 2050.* . Engie.
- Cabell, J. (2019). *Biogas in Norway and its role in the new circular bioeconomy. Presentation at the Nordic Biogas Conference.*
- Cabell, J., Solli, L., Linjordet, R. & Eggen, T. (2022). Fra utslipp til bioenergi, bærekraftig gjødselprodukt og mye mer. *Nfexpert*, 2.
- Carlsson, M. & Udal, M. (2009, 2009). Substrathandbok för biogasproduktion, Rapport SGC 200 - 1102 - 7321 - ISRN SGC-R-200-SE (In Swedish only.). I.
- Danielsen, R., Stensgård, A. E., Myhre, M. S. & Carvaja, A. K. (2021). *Basis for new EU reporting on food waste (OR.49.21).* NORSUS Norwegian Institute for Sustainability Research. Hentet fra <https://norsus.no/wp-content/uploads/OR.49.21-Basis-for-new-EU-reporting-on-food-waste.pdf>
- European Commission. (2022). *REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe* https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en.
- fiskeridepartementet:, N.-o. (2021). Et hav av muligheter – regjeringens havbruksstrategi
- Fiskeridirektoratet. (2022). *Laks, regnbueørret og ørret - matfiskproduksjon. Tap av laks, regnbueørret og ørre i produksjon etter art og fylke.*
- Fjørtoft, K., Morken, J., Hanssen, J. F. & Briseid, T. (2014). Methane production and energy evaluation of a farm scaled biogas plant in cold climate area. *Bioresource Technology*, 169, 72-79. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.06.077>
- Guidehouse. (2022). *Biomethane production potentials in the EU. Feasibility of REPowerEU 2030 targets, production potentials in the Member States and outlook to 2050.* .
- Gustafsson, M., Ammenberg, J. & Murphy, J. D. (2020). IEA Bioenergy Task 37–Country Reports Summaries 2019. I.
- Isakova, I., Voss, K., Vandenbussche, V. & Morken, J. (2019). *Ressursgrunnlaget for produksjon av biogass i Norge i 2030. Sammenfatning av kunnskap og oppdaterte analyser. Carbon Limits.*
- Knoop, M. (2016). *Hageavfall som brensel i fjernvarme. Kan hageavfall brukes som brensel i fjernvarme? Analyse av brenselsegenskaper til hageavfall. Masteroppgave NMBU.*
- Kristiansen, T. K. & Hetland, T. (2021). *Undersøkelse av økende mengde fiskeavfall til biogassproduksjon. Biogass Oslofjord.*
- Landbruksdirektoratet. (2022). *Levering av husdyrgjødsel til biogassproduksjon - mengde levert.* <https://www.landbruksdirektoratet.no/nb/statistikk-og-utviklingstrekk/miljostatistikk/utslipp-til-luft>.

- Larsson, A., Gunnarsson, I. & Tengberg, F. (2018). The GoBiGas Project. Demonstration of the Production of Biomethane from Biomass via Gasification.
- Leong, Y. K. & Chang, J.-S. (2022). Integrated role of algae in the closed-loop circular economy of anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 360, 127618. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127618>
- Lin, R., O'Shea, R., Deng, C., Wu, B. & Murphy, J. D. (2021). A perspective on the efficacy of green gas production via integration of technologies in novel cascading circular bio-systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111427. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111427>
- Lindfors, A., Gustafsson, M., Anderberg, S., Eklund, M. & Mirata, M. (2020). Developing biogas systems in Norrköping, Sweden: An industrial symbiosis intervention. *Journal of Cleaner Production*, 277, 122822. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122822>
- Lyng, K.-A. (2020). *Bruk av CO2 fra oppgradering av biogass. Beregning av potensiell klimaeffekt ved bruk i veksthus. Østfoldforskning, OR.24.20.*
- Lyng, K.-A., Callewaert, P. & Prestrud, K. (2019a). *Kunnskapsgrunnlag for nasjonal strategi for husdyrgjødsel til biogassproduksjon. Del 2: Nasjonale scenarier (OR.50.19).* Ostfold Research.
- Lyng, K.-A., Callewaert, P. & Prestrud, K. (2019b). *Kunnskapsgrunnlag for nasjonal strategi for husdyrgjødsel til biogassproduksjon. Del 1: Råstoffgrunnlag, gjødselbehov og synergier mellom sektorer. (OR 25.19).*
- Lyng, K.-A., Modahl, I. S., Møller, H., Morken, J., Briseid, T. & Hanssen, O. J. (2015). The BioValueChain model: a Norwegian model for calculating environmental impacts of biogas value chains. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(4), 490-502. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0851-5>
- Lyng, K.-A. & Saxegård, S. (2020). Livsløpsvurdering av produktene og tjenestene til Den Magiske Fabrikken: Avfalls- og gjødselhåndtering, biodrivstoff, biogjødsel og bio-CO2. NORSUS OR23.20.
- Lyng, K.-A., Stensgård, A. E., Hanssen, O. J. & Modahl, I. S. (2018). Relation between greenhouse gas emissions and economic profit for different configurations of biogas value chains: A case study on different levels of sector integration. *Journal of Cleaner Production*, 182, 737-745. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.126>
- Magnolo, F., Dekker, H., Decorte, M., Bezzi, G., Rossi, L., Meers, E. & Speelman, S. (2021). The Role of Sequential Cropping and Biogasdoneright™ in Enhancing the Sustainability of Agricultural Systems in Europe. *Agronomy*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy11112102>
- Mattilsynet. (2014). *Veileder Animalske biprodukter.*
- Melbye, A. M. (2014). *Bioenergi i Norge. NVE oppdragsrapport, 41/2014.*
- Miljødirektoratet. (2020). *Klimakur 2030. Rapport M-1625|2020.*
- Miljødirektoratet. (2022a). *Kraftbehov til transport. Nullutslippsscenarioer for 2050.*
- Miljødirektoratet. (2022b). *Norges totale klimagassutslipp i 2021* <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/klima/norske-utslipp-av-klimagasser/>.
- Miljødirektoratet. (2022c). *Utslippsfaktorer i klimagassregnskap for Norge* <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/klimagasser-utslippstall-regnskap/utslippsfaktorer-klimagassregnskap/>.
- Miljøstatus. (2022). *Overgjødsling langs kysten* <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/forurensning/overgjodsling/>.
- Misund, B. (2022). *Kostnadsutvikling i oppdrett av laks og ørret: Hva koster biologisk risiko?*
- Modahl, I. S., Lyng, K.-A., Elstad Stensgård, A., Hanssen, O. J., Møller, H., Arnøy, S., ... Sørby, I. (2016). *Biogassproduksjon fra matavfall og møkk fra ku, gris og fjørfe. Status 2016 (fase IV) for miljønytte og verdikjedeøkonomi for den norske biogassmodellen BioValueChain (978-82-7520-749-2).* Østfoldforskning AS.
- Morken, J., Briseid, T., Hovland, J., Lyng, K.-A. & Kvande, I. (2017). *Veileder for biogassanlegg - mulighetsstudie, planlegging og drift. REALTEK Rapport 56. Norges miljø- og biovitenskapelige universitet Fakultet for realfag og teknologi Seksjon bygg og miljøteknologi. Ås.*
- NorskIndustri. (2017). *Veikart for havbruksnæringen.*

- Norwegian Environment Agency. (2021). Greenhouse Gas Emissions 1990-2019. National Inventory Report, M-2013 2021.
- Pecchi, M. & Baratieri, M. (2019). Coupling anaerobic digestion with gasification, pyrolysis or hydrothermal carbonization: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 462-475. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.003>
- Pettersen, I., Grønlund, A., Stensgård, A. & Walland, F. (2017). *Klimatiltak i norsk jordbruk og matsektor Kostnadsanalyse av fem tiltak. NIBIO rapport, VOL. 3, nr. 2, 2017.*
- Ramachandran, S., Yao, Z., You, S., Massier, T., Stimming, U. & Wang, C.-H. (2017). Life cycle assessment of a sewage sludge and woody biomass co-gasification system. *Energy*, 137, 369-376. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.139>
- Raadal, H. L. & Modahl, I. S. (2021). *Guidelines for Life Cycle Assessment (LCA) of CCU systems. NORSUS, OR 28.22.*
- Raadal, H. L., Schakenda, V. & Morken, J. (2008). *Potensialstudie for Biogass i Norge. Østfoldforskning, OR 21.08. Kråkerøy, Norway.*
- Scarlat, N., Fahl, F., Lugato, E., Monforti-Ferrario, F. & Dallemand, J. F. (2019). Integrated and spatially explicit assessment of sustainable crop residues potential in Europe. *Biomass and Bioenergy*, 122, 257-269. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.021>
- Solli, L., Bergersen, O., Sørheim, R. & Briseid, T. (2014). Effects of a gradually increased load of fish waste silage in co-digestion with cow manure on methane production. *Waste Management*, 34(8), 1553-1559. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.011>
- SSB. (2021). Avfall fra byggeaktivitet <https://www.ssb.no/statbank/table/09247/>.
- SSB. (2022a). Avfall fra husholda <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/avfall/statistikk/avfall-fra-hushalda>.
- SSB. (2022b). Avfallshåndtering ved avfallsanlegg <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/avfall/statistikk/avfallshandtering-ved-avfallsanlegg>.
- SSB. (2022c). *Har verden nok fornybar strøm til transportsektoren?* <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/landtransport/artikler/har-verden-nok-fornybar-strom-til-transportsektoren>.
- SSB. (2022d). Korn og oljevekster, areal og avlinger. Tabell 07479 Kornavling (1 000 tonn).
- SSB. (2022e). *Produksjon og forbruk av energi, energibalanse og energiregnskap. Tabell 11561: Energibalansen. Tilgang og forbruk.*
- Tayibi, S., Monlau, F., Bargaz, A., Jimenez, R. & Barakat, A. (2021). Synergy of anaerobic digestion and pyrolysis processes for sustainable waste management: A critical review and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111603. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111603>
- Thomassen, T. & Hovland, J. (2020). *Sustainable biogas – Bærekraftig biogass. Use of CO2. Sintef Tel-Tek.*

Visjonen til NORSUS Norsk institutt for bærekraftsforskning AS, tidligere Østfoldforskning AS, er å bidra til bærekraftig samfunnsutvikling. Vi utvikler kunnskap og metoder for å forstå og implementere bærekraft bedre i samfunnet. Sammen med bedrifter og offentlige aktører kartlegger og reduserer vi miljøbelastninger, ofte med økonomisk gevinst. Slik bidrar vi til å bevege samfunnet i en bærekraftig retning.