

Tekniske løsninger og økonomiske vurderinger for behandling av biorest fra biogassproduksjon



Forord

Denne rapporten er en del av prosjektet «*Samarbeid for bedre ressursutnyttelse vest-øst*» 2022-2024. Bakgrunnen er den skjeve ressursfordelingen av fosfor mellom det husdyrintensive fylket Rogaland og kornområdene på Østlandet. For å lykkes med biogass-satsningen i Rogaland, må utfordringen med fosfor løses.

Rogaland fylkeskommune har vært prosjekteier representert ved Tore Meinert. Fra Rogaland har kommunene Hå ved Karin Hansen Nærland, Klepp ved Peter Willmann, Time ved Vegard Thorset Våge, Stavanger ved Silke Ullrich og Vindafjord ved Alf Ole Bull-Tornøe, samt Statsforvalteren i Rogaland ved Monica Dahlmo deltatt.

Fra Østlandet har kommunene Lillestrøm, Sarpsborg, Skiptvet og Ringerike, samt fylkeskommunene Viken og Vestfold og Telemark deltatt. Biogass Oslofjord ved Tord Araldsen bidro også i prosjektet, og var bindeleddet til østlandskommunene.

Prosjektet var finansiert med Klimasatsmidler fra Miljødirektoratets Klimasatsordning med egenandel fra Rogaland fylkeskommune, Biogass Oslofjord og Rogalands-kommunene.

Rogaland Landbrukspark SA ved Helga Hellesø har vært engasjert med prosjektledelse.

Rapporten er en oppsummering av deler av prosjektet. Hensikten er å gi en oppsummering av den kunnskapen vi har tilegnet oss på dette fagområdet.

Vi vil takke flere bidragsytere for faglige innspill til rapporten.

November 2024, Helga Hellesø



Statsforvalteren
i Rogaland

Foto framside: Helga Hellesø

Innhold

Forord	2
Sammendrag	4
Innledning.....	5
Metode	7
Egen forespørsel og Teams-møter	7
Studietur.....	7
Litteraturstudie	7
Avgrensinger.....	7
Vurderinger før valg av prosess	8
Mekanisk separering: skrupresse og sentrifuge	8
Skrupresse	8
Sentrifuge	9
Tørking.....	11
Pelletering	12
Behandling av biorest for å redusere volumet.....	12
Atmosfærisk fordamping.....	12
Vakuumbordampning.....	12
Membranfiltrering.....	13
Gjenvinning av næringsstoffer	14
Gjenvinning av nitrogen	15
Gjenvinning av fosfor	16
Utfelling som struvitt.....	17
Utfelling som kalsiumfosfat.....	18
Forbrenning.....	19
Momenter til vurdering av totale kostnader ved behandling av biorest.....	20
Vurdering.....	21
Konklusjon	22
Vedlegg 1 Marked dialogue.....	24

Sammendrag

Biorest fra biogassproduksjonen er et næringsrikt substrat velegnet som gjødsel, som er det vanligste bruksområdet. For å øke gassproduksjonen ved biogassanlegg tilsettes gjerne flere, energirike substrater. Dette fører til større mengder næringsstoffer inn i verdikjeden. I husdyrtette områder, som Rogaland, kan dette være en utfordring. Områdene har alt et næringsoverskudd, særlig av fosfor, selv om bruk av fosfor og til dels nitrogen er strengt regulerte i landbruket. Behandling av biorest kan være en del av løsningen på næringsoverskuddet. Biorest må gjøres egnet til transport til områder med behov for næringsstoffer og organisk materiale i jorda. Det arbeides med ulike løsninger for å øke verdien på biorest ved å lage salgbare gjødselslag eller jordforbedringsprodukter.

Hensikten med prosjektet «*Samarbeid for bedre ressursutnyttelse vest-øst*» har vært å vurdere ulike løsninger for overskuddet av fosfor fra biogassproduksjonen i Rogaland, og hvordan det kan brukes i områder med større behov for næringsstoffene og organiske materiale i jorda. Nitrogen ble også berørt.

Vi har gjennomført forespørsel til, og hatt Teams-møter med, leverandører. Vi har gjennomført studieturer og undersøkt eksisterende litteratur for å vurdere tekniske løsninger som er egnet for å behandle biorest. Vi har også vurdert økonomien knyttet til de enkelte tekniske løsningene. I tillegg har vi vurdert de totale kostnadene et biogassanlegg kan ha for å håndtere biorest.

De teknologiske løsningene hentes fra vannrensing. Prosessering av biorest fra husdyrgjødsel er mindre vanlig, men er under utprøving. Det er mer krevende å få teknikkene til å fungere på biorest fra husdyrgjødsel enn ved vannrensing da den inneholder en stor andel små, oppløste organiske partikler. Teknologiene trenger tilpasses håndtering av biorest. De ulike tekniske løsningene er på ulike TRL (Technology readiness level). Den teknologiske utviklingen er kommet lengst for nitrogen. For fosfor er teknikkene mindre modne, og er i liten grad oppskalerte til større industrielle anlegg. Det trengs mer forskning og innovasjon for å forbedre teknikkene for å gjøre de mer lønnsomme.

Det er forsket mest på gjenvinning og ekstrahering av nitrogen fra biorest grunnet Nitratdirektivet, og mindre er gjort på fosfor. Med økt usikkerhet om tilgang på fosfor er dette bildet i ferd med å endres.

Vi finner få og usikre økonomiske vurderinger for behandling av biorest fra Norge. På forespørsel til leverandører (både norske og utenlandske) om lønnsomhet ved håndtering av fosfor i biorest, får vi ingen respons, eller tilbakemeldinger om at økonomiske forhold ikke ønskes publisert. Dette indikerer et umodent marked og teknologi, og konkurranse og/eller usikkerhet mellom aktørene. Derfor har vi vurdert utenlandske forskningsprosjekter. Vi finner få prosjekter der alle kostnadene til prosessering av biorest er tatt med. Mange prosjekter har med kostnadene for de enkelte teknologiske prosessene, men mangler helhetlig tilnærming der flere usikkerhetsmomenter blir vurderte. De tre største kostnadsdriverne er energi-, kjemikaliebruk og vedlikehold. Vi finner få investeringer i

teknologiske prosesser som gir økonomisk overskudd; og energikostnadene er avgjørende for økonomien til biogassanleggene.

Hvilke substrater som brukes til biogassproduksjon må være kjente, da de påvirker videre behandling av biorest. Målene for videre behandling av biorest må være definerte før man vurderer valg av tekniske løsninger. Kostnadene varierer ut fra ulike forutsetninger, og må beregnes i hvert enkelt konkrete tilfelle.

Innledning

Forholdene for biogassproduksjon ligger godt til rette i Rogaland med store husdyrgjødselmengder, korte avstander, etablert rørledningsnett for gass og gasskompetanse.

Formålene med biogassproduksjon basert på husdyrgjødsel er å produsere fornybar energi og redusere klimagassutslipp fra lagring og spredning av husdyrgjødsel. Størst klimaeffekt oppnås ved å erstatte fossil energi med fornybar i andre sektorer enn landbruket. Lønnsomheten er størst der det er størst betalingsvilje/-evne

Målet med vårt arbeid har vært å få en oversikt over relevante teknikker for behandling av biorest, og på hvilket TRL de befinner seg. Vi har vurdert gjenvinningsgrad av nitrogen og fosfor, tekniske utfordringer og kostnader knyttet til de ulike tekniske prosessene vi har prioritert.

Rogaland kan produsere biogjødsel av bioresten til bruk i kornområder som kan erstatte mineralgjødsel produsert av fossil energi. Nye organiske gjødselslag kan også erstatte torvprodukter, jordforbedringsmidler og pottejord. Effekten av biorest på karbonbinding i jorda er avhengig av hvilke substrater bioresten er produsert av (Möller, 2015), men langvarige forsøk mangler. Langvarig effekter på jordhelse er også lite dokumenterte (Karimi, 2022). Dersom det kan lages salgbare, organiske gjødselprodukter som kan fraktes ut av Rogaland til områder som trenger økt organisk innhold i jorda, samt erstatte mineralgjødsel med nye produkter, kan dette være en vinn-vinn situasjon.

Nitrogen og fosfor er essensielle næringsstoffer for å kunne produsere tilstrekkelig mat til 9 milliarder mennesker i 2050 (Buckwell, 2015). Anaerob nedbryting av organiske avfallsprodukter kan anses som en ny kilde for å gjenvinne næringsstoffer. Tungt nedbrytbare organiske stoffer som ligning og uorganiske stoffer som nitrogen, fosfor og kalium forblir i bioresten etter den anaerobe råtneprosessen. Den største andelen av organisk bundet nitrogen blir frigjort, og funnet igjen i den flytende fraksjonen som ammonium-N (NH_4^+) (Bolzonella, 2018).

Ulike substrater og kombinasjoner av substrater påvirker både næringsinnholdet i og bruksegenskapene til bioresten. Ved knapphet på organiske innsatsfaktorer, der man på sikt tar i bruk større andel halm, vil bioresten endre karakter. Den vil få høyere tørrstoffinnhold som gir dårligere sprede-egenskaper på eng (Toft, 2023). Tilsvarende er kunnskapen om egenskaper ved biorest fra samrøtning med fiskeslam for lite kjent, og et nytt

forskningsprosjekt er etablert (Circulizer, 2024). Kjennskap til nitrogen og fosfor i substratene er avgjørende for å beregne eksakte mengder kjemikalier som skal brukes for å gjenvinne næringsstoffene (Yirmibesoglu, 2023). Kjemikaliene brukes til behandling av biorest for å forbedre prosessen og kvaliteten på sluttproduktene, og er avhengig av hvilke mål biogassanlegget har for behandlingen av bioresten. Syrer og baser brukes for å justere pH for å øke tilgjengeligheten av næringsstoffene i bioresten ved gjenvinning av fosfor eller nitrogen. Syrer som svovelsyre eller saltsyre senker pH, og baser som natriumhydroksid eller kalk brukes ofte for å heve pH. Andre syrer og baser testes for å redusere kostnadene.

Håndtering av bioresten er et viktig suksesskriterium for biogassproduksjonen i husdyrtette områder. Gitt skjerpet spredearealskrav, må vi finne nye løsninger for bioresten i Rogaland. Innblanding av andre, mer energirike substrater enn husdyrgjødsel i biogassproduksjonen, aktualiserer temaet ytterligere. Skal bioresten fraktes ut av husdyrtette områder, må vannet fjernes for å redusere transport- og lagerkostnadene. Produksjon av organiske gjødselprodukter fra bioresten øker verdien, og produktene kan nå nye markeder som har større betalingsvilje enn landbruket. Dette vil kunne øke inntektene til biogassanleggene. Nye markeder kan være gartnerier, hagebruk og anleggsvirksomhet. Mens verdien kan økes ved foredling av bioresten, kan målrettet markedsføring øke prisen på organiske produkter (Dahlin, 2019).

Det trengs etablerte verdikjeder for å flytte biorest til områder med behov for næringsstoffer og organisk materiale. EU vedtok i 2019 at biorest likestilles med mineralgjødsel, og vurderes som et organisk gjødselprodukt og jordforbedringsmiddel med tilgang til det indre markedet. Oppfatningen endres fra avfall til ressurs (European Commission 2019). Nytt regelverk i 2023 følger opp og presiserer 2019-regelverket, men begge har samme mål om å sikre bærekraftig bruk av gjødselprodukter i EU (European Commission, 2023). Endringen er viktig for at verdikjedene for organisk gjødsel kan komme på plass. Markedets oppfatning av biorest kan påvirkes, og gi den større aksept. Nytt gjødselregelverk er på trappene i Norge, med formål om å bruke biorest som ressurs.

Behandling av biorest kan medføre tap av ammoniakk og utslipp av klimagasser. Ammoniakk er ikke en klimagass, men i atmosfæren kan den reagere, og danner hovedsakelig ammoniumsulfat, en helseskadelig luftforurensing. (Rizzioli, 2023 med referanser). For å redusere tapene av ammoniakk og klimagasser må teknologiene tilpasses. Tapene må beregnes slik at man imøtekommer bærekraftige miljøkriterier (Lyons, 2021).

Gjennom vårt prosjekt har vi undersøkt mekaniske og kjemiske teknologier som mekanisk separering (skrupresse og sentrifuge), tørking, pelletering, fordamping, membranfiltrering og gjenvinning av nitrogen ved scrubbing og stripping og fosfor ved fellingsreaksjoner og forbrenning. Vi har sett på de viktigste kostnadsdriverne, samt hvilke andre faktorer som spiller inn for at man skal kunne gjøre en fullstendig, økonomisk vurdering.

Hvilke substrater som brukes inn i biogassproduksjonen og hvilke produkter man ønsker å produsere, avgjør valg av teknologier. Ulike kombinasjoner av teknikker påvirker kostnadene for anleggene. I Norge er det begrenset tilgang til opplysninger som trengs for å beregne

produksjons- og driftskostnader ved behandling av biorest. Vi har også avdekket at fagfeltet er umodent i Norge, og at vi trenger mer kunnskap på området tilpasset våre forhold. Derfor har vi valgt følgende tilnæringsmåter for å synliggjøre ulike alternativer for behandling av biorest.

Metode

Vi gjorde et valg av de teknologiene vi ville vurdere teknisk og økonomisk ut fra hvordan de håndterer nitrogen og fosfor, og hvilke muligheter disse gir for transport av næringsstoffer.

Vi startet med å samle inn kunnskap om de teknologiske løsningene som finnes. Vi besøkte anlegg etter kontakt med norske, danske og tyske biogassmiljøer, og gjennomførte studieturer for biogassbransjen. Besøkene ble kombinert med litteraturstudie. Vi sendte også ut en egen forespørsel til leverandører av teknisk utstyr som vi hadde Teams-møter med, se vedlegg 1.

Egen forespørsel og Teams-møter

For å finne relevante leverandører som kunne gi oss informasjon om tekniske løsninger og kostnader, vurderte vi om lag 200 bedrifter på European Biogas Association sine nettsider (EBA, 2023). Vi vurderte ut fra kriteriene husdyrgjødsel, biorest, teknologi, organiske gjødselprodukter og kostnader. 13 bedrifter ble vurderte som relevante å kontakte. Vi sendte forespørsel som en «Marked dialogue», vedlegg 1, med beskrivelse av hva vi var ute etter. Fem bedrifter responderte på kontakten vår, og vi gjennomførte Teams-møter med hver av dem høsten 2023.

Studietur

Vi gjennomførte studieturer til Tyskland både våren 2023 og 2024 med mål om å øke kunnskapen om tekniske løsninger for å håndtere næringsstoffene i bioresten på bærekraftige måter. Det er utarbeidet egen rapport fra turene.

Litteraturstudie

Vi gikk gjennom de mest relevante norske rapportene med økonomiske vurderinger før vi søkte etter europeisk litteratur på området. Rapportene og artiklene vi fant som mest relevante, er gjengitte i denne rapporten.

Avgrensinger

Tekniske løsninger for behandling av biorest kan være både fysiske, kjemiske og biologiske. Rapporten vurderer fysiske og kjemiske løsninger for å gjenvinne fosfor og nitrogen, da det er disse teknikkene vi har studert i prosjektet vårt. Kommersielle anlegg for avløpshåndtering er holdt utenfor. Det samme gjelder løsninger som er kommet kortere i teknologiutviklingen, samt biologiske løsninger. Her henvises blant annet til både Rizzioli (2023), Vaneeckhaute (2017) og Herbes (2020). Utdringer med tungmetaller er heller ikke tatt med.

Vurderinger før valg av prosess

Valg av behandling av den faste og flytende delen av biorest avgjør valg av teknikk (Herbes, 2020). Bruk av ubehandlet biorest som organisk gjødsel, eller om gjødselregelverket setter begrensninger for hvor mye fosfor og/eller nitrogen man kan spre, må vurderes. Det må også vurderes om det er behov for mer omfattende behandling av bioresten som avvanning for å redusere kostnader til transport og lagring. Denne behandlingen trenger ekstra energi, og det må vurderes om og hvor det i fall finnes overskuddsenergi. Overskudd av næringsstoffer i et område gjør at man må finne andre markeder for organisk gjødsel. Dette markedet er ikke etablert fullt ut ennå. Valgene man står overfor vil, som vi ser, variere alt etter lokale forutsetninger.

Mekanisk separering: skrupresse og sentrifuge

Mekanisk separering er oftest det første trinnet ved gjenvinning av næringsstoffer fra biorest. Hensikten er å skille biorest mekanisk i en våt og en fast, lagringsdyktig del. Den flytende delen er egnet for å ta ut fosfor (struvittfelling). Den flytende bioresten kan sendes tilbake til gårdsbruket for bruk som gjødsel, med en del løst nitrogen og kalium, men med redusert mengde fosfor. Både flytende og fast fraksjon er egnet til videre produktutvikling til gjødsel og jordforbedringsmidler, mens den faste fraksjonen også er egnet som alternativ til torv i vekstmedier.

Alt her er det to ulike produkter som krever to ulike lager og påfølgende ulike behandlingsmåter. De ekstra kostnadene dette medfører, vurderes ofte i liten grad.

Det finnes flere typer separering. Valg av teknikk vurderes gjerne ut fra ønskelig sluttprodukt, mengde som skal behandles (kapasitet) og investerings- og driftskostnader (Fangueiro, 2017). Separeringsprosessen påvirkes av lagringstid og temperatur, og ved lang lagringstid og høy temperatur brytes det organiske materialet ned (Lyons, 2021 med referanser).

Totalvolumet reduseres ikke etter separering, men lagerbehovet for den våte delen reduseres med rundt 10-20 % avhengig av sammensetningen av bioresten og separeringsteknikken (Fachverband Biogas, 2018). Etter separering får man en nitrogen- og kaliumrik flytende fraksjon, og en fast fraksjon rik på fosfor og organisk materiale (Fangueiro, 2017).

Skrupresse eller sentrifuge (dekanter) er vanlige separeringsteknikker.

Skrupresse

Skrupresse er den vanligste teknikken for separering. Hvordan skrupressa kjøres, avgjør separeringsresultatet. Høyt tørrstoffinnhold i den fraseparerte faste delen indikerer gjerne at utstyret presses, og vedlikeholdskostnadene øker gjerne. Høyt tørrstoffinnhold på massen inn i skrupressa, fører til at prosessen tar lengre tid, og energibruken øker.

Tørrstoffinnholdet i den faste delen er ofte rundt 25% (Sæbø, 2021). Den våte delen har et tørrstoffinnhold fra 1-8 %, flyter lett, og trenger raskt ned i jorda (Fachverband Biogas, 2018).

Små partikler (0,5-1,0 mm) i useparert del følger den våte fraksjonen. Høyt tørrstoffinnhold i bioresten gir mindre andel tørrstoff i den våte fraksjonen (Lyons, 2021 med referanser).

MAFIGOLD-prosjektet er gjennomført i Rogaland. I mangel av biorest er det utarbeidet flytskjema for separering med skrupresse av blautgjødsel fra storfe. Tørrstoffinnholdet i fast fraksjon var 21%, altså noe lavere enn ellers rapportert. Fosforet fordelte seg med 13,5 % av totalen i den tørre fraksjonen og 87,5 % i den våte fraksjonen. Våt fraksjon utgjør et mye større volum enn faste fraksjon etter separering og dermed blir summen av næringsstoffer i denne fraksjonen ganske stor, sammenliknet med den mye mindre mengden fast stoff. Beregning av massebalanse viser at den våte fraksjonen fremdeles inneholder overvekt av tørrstoff. Bare 0,125 m³ av totalt 1 m³ utgjør den tørre fraksjonen (Sæbø, 2024).

Resultatet vil muligens endres ved separering av biorest som har lavere viskositet og tørrstoffinnhold. Substratene inn i biogassanlegget avgjør den kjemiske sammensetningen av bioresten. Derfor må hvert anlegg ta regelmessige prøver for å kunne dokumentere næringsinnholdet.

Etter separering vil det oftest gå varmgang i den faste fraksjonen. Denne varmgangen (kompostering) kan benyttes som hygienisering av den tørre fraksjonen, men dokumentasjon av temperaturforløpet er nødvendig. En regner med at hygieniseringen er tilstrekkelig om massene har blitt utsatt for 70 °C i minst en time. Ved å redusere vanninnholdet blir den faste delen mer stabil, transporterbar og lagringsdyktig (Fachverband Biogas, 2018).

Sentrifuge

Separering skjer også med dekanter som er en sentrifuge. Dekanter er mer kostbar (både kapital- og driftskostnader) enn skrupresse, da investeringskostnadene gjerne er fem ganger så høye for dekanter enn for skrupresse. Kapitalkostnadene er påvirket av kapasitet, pumpeutstyr og tilleggsutstyr for å øke andelen næringsstoffer man ønsker å fjerne. De største driftskostnadene er energibehovet. Separering ved bruk av skrupresse har et energibehov på 0,4-1,2 kWh/tonn, mens dekanter krever vanligvis 2,2-5,1 kWh/tonn (Lyons, 2021 med referanser). Dette stemmer overens med (Fachverband Biogas, 2018) sine opplysninger om at energibehov for skrupresse er mellom 0,2-0,6 kWh_{el}/m³ tilført materiale, avhengig av type og størrelse, og energibehov for dekanter på 2-5 kWh_{el}/m³ tilført materiale.

Energibehovet er avhengig av hvordan skrupressa kjøres. Den har færre roterende punkter, og krever mindre spesial-vedlikehold eller tilsyn annet enn det en driftsoperatør kan gjennomføre. Dekanter krever mer vedlikehold da de består av flere bevegelige deler. Hastighet og oppholdstid for massen påvirker kostandene for begge teknikkene. Antatte vedlikeholdskostnader blir estimerte til 2,5% av investeringskostnadene pr. år (Møller, 2000). Årlige kostnader vil variere avhengig av kvaliteten på biorest, grove partikler i massen

som skaper slitasje og årlige mengder som separeres. (Lyons, 2021 med referanser). Skrupresse er mer prisgunstig, og er bedre tilpasset moderate mengder bioest (Fangueiro, 2017).

Faste og variable kostnader for separering består av investert kapital, nedskrivningstid, rentenivå, mengde energi- og kjemikaliebruk, arbeidskraft og tid brukt på vedlikehold og nye slitedeler. I tillegg kan det komme ekstra kostnader som ikke er åpenbare, samt kostnader til lager, transport og spredning for å håndtere separert fast og våt fraksjon og ubehandlet gjødsel (Gilkinson, 2007).

En sammenlignende studie av skrupresse og dekanter utført på grisegjødsel i Danmark viser økonomiske forskjeller mellom teknikkene, tabell 1 (Møller, 2000), gjengitt i Gilkinson, 2007.

Tabell 1 Sammenligning av kostnader for bruk av skrupresse og dekanter.

Variable	Screw Press	Decanting Centrifuge
Maintenance and repair	250	1250
Electricity (0.04 £/kWh)	80	480
Capital costs	1424	7119
Total yearly costs	1754	8849
Total costs £/tonne	0.44	2.21
Total costs £/kg of TP in solid fraction ^b	1.6	2.0

^a Yearly maintenance is calculated as 2.5% of the investment (I). Electricity consumption was set at 3.0 kWh t⁻¹ for decanting centrifugation and 0.5 kWh t⁻¹ for a screw press. ^b Assuming 20% and 80% removal of TP in a screw press and a decanting centrifuge, respectively (pig slurry with 1.4 g TP per litre).

Forklaring til Tabell 1: TP = total-fosfor.

Skrupresse er egnet teknikk når det er behov for å ta ut mindre mengder fosfor. Skrupresse separerer ut fra 4-34% total-fosfor, dekanter uten kjemisk tilsetning kan ta ut 30 til 90% (Lyons, 2021 med referanser). Basert på uttak av totalt fosfor, er kostnaden ved bruk av dekanter 25% høyere enn skrupresse. (Møller, 2000).

En annen måte å måle kostnadene ved separering på er å beregne kostnader per tonn av næringsstoffer fordelt i den separerte faste delen. Man fant en kostnad på £2000-6000/tonn total-N for skrupresse og £5000/tonn total-nitrogen for dekanter (Møller, 2000), (Gilkinson, 2007).

Dekanter passer i tilfeller der fosforfangst er viktig, mens skrupresse er fordelaktig når kostnader er den begrensende faktoren (Cathcart, 2023).

Tørking

Målet med tørking kan være å redusere volumet og produsere et homogent og lagringsdyktig produkt som kan transporteres til områder som har behov for et jordforbedringsprodukt og/eller organisk materiale (Fangueiro, 2017).

Selv om det ikke blir rapportert om et endelig tørrstoffinnhold i lagringsdyktig biorest i litteraturen, er verdier på 85-90% vanlige i kommersiell tørking (Awiszus, 2018).

Det er flere ulike tørkemetoder som både roterer, transporterer og vender fast, separert del av bioresten. De fleste metodene er robuste og velkjente. Fast separert biorest kan tørkes ved at luft blåses inn i ranker eller i en trommel. Dette er rimelige metoder. Oppvarmet luft kan også blåses gjennom massen på et eller flere transportbånd. Soltørking flatt på gulvet i kombinasjon med snuing med selvgående rotor-vogn, og eventuelt supplering med annen varme som solenergi, brukes også. Varmebehovet er fra 0,750-1,2 kWh/liter vann som skal fordampes (Fachverband Biogas, 2018). Energibehovet varierer mellom metodene, og er større for beltetørking enn ved bruk av soloppvarmet luft (Rehl, 2011). Reve Kompost AS har en helhetlig tilnærming ved tørking av kompost, der de gjenbraker energien fra komposteringen.

Lufting av massen kan også brukes som hygienisering ved å varme opp til 70° i 1 time. Bruksområdet for den faste fraksjonen blir større, og er godkjent som green bedding og til eksport (Fangueiro, 2017).

Kravene til oppsamling av ammoniakk fra lufta varierer mellom landene, og i Norge er det så langt ingen krav. Det finnes få studier av målinger av gassutslipp ved tørking av biorest, men fra Tyskland fant vi en studie som undersøker hvilke gassutslipp og mengder som oppstår ved tørking av biorest ved bruk av båndtørke. Målingene ble gjort ved forskjellige temperaturer, og effekten på næringsinnholdet i den tørka bioresten ble også målt. Da biogass hovedsakelig er sammensatt av CH₄ og CO₂, forventet man økt konsentrasjon av gass fra nedbrytningen under tørkingen. Det fant man for CO₂ sammenlignet med opphavlig konsentrasjon, men ikke for CH₄. Innholdet av kalium og fosfor var upåvirket av tørkeprosessen. Innholdet av total-N i tørket biorest sank etter tørking. Nedgangen kan i hovedsak tilskrives tap av NH₃ hvor innholdet sank fra 14,0 mg/g til mellom 1,8 og 2,7 mg/g i tørrstoffet. Tørking førte til et tap på omtrent 50% av total-N, som samsvarer med et tap på omtrent 80% av innholdet av NH₄-N. Høyere temperatur forårsaket signifikant høyere tap. Temperaturen påvirket NH₃ -konsentrasjonen i avgassene ved tørking. Ved 45°C ble det målt en NH₃ -konsentrasjonen på 85,1 mg/m³, mens ved 70°C ble det registrert 169.5 mg/m³. Høy temperatur reduserte tørketiden og økte gjennomstrømningshastigheten på bioresten, men NH₃ -utslippene ble totalt høyere. Man kan også senke pH i biorest før tørking for å hindre ammoniakktap. Da tørket biorest fremdeles inneholder NH₄-nitrogen, kan man ikke utelukke utslipp av NH₃ senere i prosessen, avhengig av temperatur og pH. (Awiszus, 2018).

Nitrogen i avgassene kan bli gjenvunnet med scrubbing basert på svovelsyre, H₂SO₄, se kapitlet om gjenvinning av nitrogen. Dette er et krav i enkelte land som f.eks. Nederland.

Pelletering

Hensikten med pelletering er å redusere volumet for å lette transport, omsetning og spredning. Før pelletering må bioresten tørkes til 85-90%. Bioresten blir presset gjennom en matrise, som fører til høy temperatur på overflaten. Pelletsen smelter på overflaten, og får en glassaktig glans (Fachverband Biogas, 2018).

Energibehovet for å pelletere tørket biorest er 30-50 kWh_{el}/tonn. Tørket biorest har en egenvekt på 250-350 kg/m³, mens pelletert pellets har en egenvekt på 700-750 kg/m³. Egenvekten øker ved pelletering, men volumet reduseres og næringsinnholdet er høyere. Transport-kostandene reduseres og lagerbehovet forenkles (Fachverband Biogas, 2018).

Pelletering kan åpne for nye markeder. Før pelletering kan tørket biorest også anrikes med mineralsk eller organiske tilsetningsstoffer for å få et gjødselslag tilpasset ulike planters behov.

Behandling av biorest for å redusere volumet

Hensikten med å redusere vannvolumet i bioresten er å minske kostnader. Mindre volum skal lagres og transporteres, og større arealer kan gjødsles på kortere tid. Teknikkene har fått større oppmerksomhet den siste tiden, særlig i Tyskland, der kravet til gjødsellagring går fra 6 til 9 måneder. Den største økonomiske gevinsten ved teknikken er at volumet reduseres, gjerne opp til 50%, og at det dannes ammoniumsulfat, et uorganisk gjødselslag, i trinn to av prosessen (Herbes, 2020 med referanser). Interessen for å produsere et uorganisk gjødselslag fra biorest kommer fra restriksjonene om at største lovlig mengde av nitrogen fra et organisk gjødselslag er 17 kg nitrogen/da (EUs nitratdirektiv).

Teknikkene er kjente fra vannrensing og annen industri. De er mindre vanlige for behandling av biorest, som er mer krevende å behandle på grunn av større andel organiske finstoffer. Det øker bufferkapasitet til løsningen, som betyr løsningens evne til å motstå endringer i pH når små mengder syre eller base tilsettes.

Det er flere måter å redusere vanninnholdet på i den flytende delen av bioresten, og her presenteres to systemer.

Atmosfærisk fordamping

Det er ikke nødvendig å separere bioresten på forhånd ved denne metoden. Fordampingen av vanddamp, ammoniakk, og karbondioksid skjer i et lukket system med normalt trykk. Massen blir fordelt over et stort areal slik at fordampingsflaten blir stor. Varmebehovet er 1000-1500 kWh_{term}/m³ fordampet vann (Fachverband Biogas, 2018).

Dette er trinn én i prosessen der nitrogen frigis som ammoniakk. I trinn to kan det gjenvinnes. Se kapitlet om gjenvinning av nitrogen.

Vakuumbordampning

Dette er en mer krevende prosess enn atmosfærisk fordampning.

Prosesen krever separering av bioresten, og den flytende delen blir oppvarmet under negativt trykk i en lukket tank. Det negative trykket reduserer kokepunktet til 40-75°C. H₂O, CO₂ og NH₃ fordampes.

Energibehovet er 10-13 kWh_{el}/m³ tilført materiale, og varmebehovet er 600-1000 kWh_{term}/m³ fordampet vann på en enkel-serie løsning. Flere trinn kan kobles i serie. Da kan varmen gjenvinnes fra dampen og brukes i neste trinn. Varmebehovet reduseres til 5 kWh_{el}/m³ tilført materiale, og varmebehovet til 250 kWh_{term}/m³ fordampet vann (Fachverband Biogas, 2018).

Den største kostnaden er varmen i tillegg til investeringskostnadene. Teknikken kan være aktuell der man har tilgang på rimelig varme.

I trinn to av prosessen kan den fordampede lufta fra både atmosfærisk og vakuumb-fordampning tilsettes svovelsyre og danne ammoniumsulfat.

Prosesen beskrives nærmere i kapitlet om gjenvinning av nitrogen.

Membranfiltrering

Membranteknologi er en fysisk prosess. Etter separering ved bruk av både skrupresse og sentrifuge tvinges den våte fraksjonen av bioresten gjennom et membransystem som skiller væskestrømmene. En væskestrøm går gjennom membranen (permeatet) og en blir tilbakeholdt (retentatet/konsentratet). Membranen er en fysisk barriere, der trykk mot porene i membranen tvinger væsken gjennom. Bare utvalgte deler av væskestrømmen passerer, og de ulike membranene har mindre og mindre porevolum. Flere ulike typer membran-filtrer koples ofte sammen: mikro- (porer > 0,1 µm, 0,1-3 bar), ultra- (0,01-0,05 µm, 2-10 bar) og nanofiltrering og til slutt omvendt osmose (0,0005-0,005 µm, 10-100 bar) (Fachverband Biogas, 2018) og (Rizzioli, 2023). De ulike trinnene filtrerer ut ulike typer og størrelser av partiklene. Suspenderte faste stoffer som bakterier og fettkuler fjernes ved mikrofiltrering, og proteiner, fett og polysakkarider får ikke passere ved ultrafiltrering. De fleste organiske forbindelsene slipper ikke gjennom ved nanofiltrering. I prinsippet slipper bare vann gjennom ved omvendt osmose (AlfaLavalNordic, 2024). Etter omvendt osmose inneholder permeatet noen ioner. Dette kan slippes ut etter et rensetrinn til, eller brukes som prosessvann (Fangueiro, 2017).

Tetting av membranene er det vanligste problemet. Som oftest brukes organisk-polymerisk og keramiske membraner. Organisk-polymeriske er rimeligere, men vanskeligere å holde rene, og tåler ikke så godt høyt trykk. Keramiske membraner er lettere å rengjøre. De har større ytelse fordi de tåler høyere trykk bedre. Større ytelse medfører større energibehov, noe som anses som den største begrensende faktoren for denne teknikken (Fangueiro, 2017).

I tillegg til investeringskostnadene er energi- og kjemikaliekostnadene de viktigste kostnadsdriverne for membranteknologien. Kjemikalier blir brukte for å hindre tetting og

gjenfroing (Herbes, 2020 med referanser). Kostnadene stiger etter hvert som problemene med tetting øker. Det er nødvendig med regelmessig vedlikehold og utskiftning av membranene for å opprettholde tilstrekkelig kapasitet, men drifts- og vedlikeholdskostnadene er lavere enn for andre separasjonsteknologier. Teknologien er på TRL 9, og utviklet for biorest de siste årene (Rizzioli, 2023). Man sitter igjen med en fast fraksjon rik på N og P egnet som gjødsel, og en våt fraksjon rik på ammonium-N og kalium, K, og utslippsklart vann (Gienau, 2018).

Mineralkonsentratet etter membranfiltrering kan behandles med ammoniumstripping for å fjerne ammoniakk. Ammoniumsulfat og utslippsrent vann produseres (Fangueiro, 2017).

Energibehovet for membranprosessen er 20-30 kWh/m³ biorest, og av disse brukes 10-15 kWh/m³ biorest til ultrafiltrering som er det mest kostbare trinnet. Enzymbehandling kan redusere viskositeten, og med det kostnaden (Gienau, 2018). Totalt kan 75-96 % av total ammonium-N og 87-98 % av fosfor fjernes (Rizzioli, 2023 med referanser). Totale kostnader (investerings- og driftskostnader) ligger mellom 4 og 13 € per m³ (Vaneckhaute, 2017).

Det finnes flere typer membranprosesser på ulike utviklingsnivåer, som ikke behandles her. (Rizzioli, 2023) og (Vaneckhaute, 2017).

Tabell 2 Oppsummering for gjenvinning av fosfor og nitrogen ved membranteknologi.

Teknikk	Separeringsandel % våt vektandel	Produkt	Utviklingsnivå	Merknad/flaskehals	Kostnader (investering og kapital), nøkkelkostnader	Kilder
Membran teknologi Fysisk trykkdrevet filtrering	N: 75-96 * P: 87-98 *	Fast fraksjon rik på N og P egnet som gjødsel. Våt fraksjon rik på ammonium-N og kalium, K (Utslippsklart vann **)	TRL 9	Tetting Energi- og kjemikaliebruk	4-13 €/m ³ ***	* Rizzioli (2023) ** Gienau 2018 ***Vaneckhaute 2017

Gjenvinning av næringsstoffer

Hensikten med å gjenvinne næringsstoffer, her N og P, fra bioresten er bedre agronomisk og miljømessig bruk. Begge er essensielle næringsstoffer, og fosfor er en ikke fornybar ressurs. Nitrogen fra biorest kan brukes både for å lage uorganiske gjødselslag og i den kjemiske industrien. Gjenvinning av nitrogen kan redusere energibruken og klimagassutslipp.

Prosessene er komplekse, og er så langt ikke vanlige å bruke for å oppgradere bioresten.

Gjenvinning av nitrogen

I flytende del av biorest foreligger nitrogen først og fremst som ammonium (NH_4^+), og forholdet mellom ammonium og ammoniakk påvirkes av pH og temperatur (Rizzioli, 2023).

Derfor blir kjente teknologier tatt i bruk ved at man omdanner deler av nitrogenet i den våte fraksjonen av biorest fra organisk gjødsel til et uorganisk nitrogengjødselsalg.

Selv om prosessen kan brukes på useparert biorest, fungerer prosessen best med minst mulig faste partikler. Etter innledende separering av bioresten, tilrås et trinn der de fine partiklene fjernes (Rizzioli, 2023 med referanser).

Fangueiro (2017) beskriver at ammoniakkstripping kan skje ved bruk av både luft, damp og vakuum av flytende fraksjon av bioresten gjennom flere tårn ved oppvarming til 80° . Ved å heve pH med NaOH (natronlut) til 10,5 og temperaturen til 70° blir 85-90% av ammoniakken strippet. Optimalisering av pH betyr mer enn temperaturen for å gjenvinne ammoniakk, og gjenvinningsgraden av nitrogen er dermed avhengig av NaOH-forbruket ved å heve pH. Vaneckhaute (2017) nevner at innenfor akseptable økonomiske kostnader kan mellom 80-90% av ammoniakken fjernes.

Ammoniakkstripping skjer ved at massen føres inn i to tårn. Stor overflate øker kapasiteten for masse-overføring: i det første tårnet blir den største andelen av nitrogen strippet fra den våte fraksjonen. Ammoniakk-gassen slippes motstrøms (top-down) inn i første tårnet. For å øke fordampningen av ammoniakk, økes pH, gjerne til 10, ved å tilsette sterke baser, vanligvis CaO (brent kalk), $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ (leska kalk) eller NaOH (natronlut). Økt temperatur opp til 50-85 grader ved bruk av varm luft, og negativt trykk, forsterker dette trinnet. Neste trinn er at den strippede ammoniakken føres til tårn to (down-up) der ammoniakk-gassen reagerer med svovelsyre og danner ammoniumsulfat. Ammoniumsulfat kan brukes som gjødsel, og erstatte fossil mineralgjødsel (Rizzioli, 2023).

Ammoniumsulfat har lavt innhold av nitrogen sammenlignet med andre nitrogenkilder (bl.a. CAN-NS 27% (4S)). Nitrogeninnholdet kan økes ved å bruke salpetersyre (HNO_3), og ammoniumnitrat (NH_4NO_3) produseres. Ammoniakkstripping kan også produsere ammoniakkvann til industrien som brukes for å rense avløpsgasser. Dette koster mer i form av energi til fordampning (Rizzioli, 2023).

Fachverband Biogas (2018) nevner at siden substratet er fritt for faste partikler, oppstår ikke vanlige problemer som tetting og begroing av strippe-systemet, mens (Rizzioli, 2023 med referanser) skriver at strippe-tårnene har en tendens til å tettes grunnet kalsiumkarbonatets (CaCO_3) skalldannelse, og korrosjon grunnet lav pH forårsaket av svovelsyre i enheten for scrubbing.

Den tyktflytende rest-fraksjonen har et tørrstoffinnhold på opptil 15%. Den har et lavt innhold av nitrogen og uforandret mengde P og K i forhold til innsatsfaktorene. Fraksjonen kan brukes som jordforbedring, direkte som gjødsel eller gå inn igjen i biogassproduksjonen for å senke ammoniakkinnholdet i råtnetanken og unngå hemming av den anaerobe råtneprosessen (Bolzonella, 2018). pH i rest-fraksjonen kan senkes ved syretilsetning, og på

den måten binde nitrogenet i den konsentrerte næringsoppløsningen (flytende del) (Fachverband Biogas, 2018).

Ifølge (Vaneckhaute, 2017) varierer kostnadene for å fjerne N mellom 2 og 7 €/kg fjernet N, hovedsakelig avhengig av hvordan pH styres: type base som brukes for å kontrollere pH, og temperaturen. Kostnadene inkluderer syre (1,5 l H₂SO₄/kg NH₃) og energibruken fast og flytende fraksjon og påfølgende ammoniakstripping er rapportert til mellom 3-6 € i fullskala anlegg. Energiforbruket er 5-10 kWh_{el}/m³ tilført materiale, og varmebehovet er 45-100 kWh_{therm}/m³ tilført materiale (Fachverband Biogas, 2018).

Rizzioli (2023) viser til flere forskningsprosjekter knyttet til kommersielle anlegg med både høy og medium TRL.

Flere forskningsprosjekter har studert kostnadene ved ammoniumskrubbing, og gjengis under.

Tabell 3 Oppsummering av gjenvinning av nitrogen ved ammoniumstripping og -skrubbing.

Teknikk	Separeringsandel % våt vektandel		Produkt	Ut- viklingsnivå	Merknad/ flaskehals/ kostnadsdrivere	Kostnader (kapital), nøkkelkostnader	Kilde
N Stripping Fysiokjemisk tårn	NH ₃	Stripping 80-90	Fast gjødsel konsentrat Flytende N- gjødsel avhengig av kjemikalier til skrubbing: svovelsyre salpetersyre	Fullskala *	Begroing og korrosjon Avhengig av pH og temperatur: 1,5 l H ₂ SO ₄ /kg NH ₃ og energibruk: (0,057Wh/m ³ luft) *	2-7 €/kg N	* Rizzioli (2023)
						3-6 € for både for separering og stripping	Rizzioli (2023)
						Kapital: 0,5-15 million € 2,0-8,1 €/m ³ for 70 m ³ /time	Vaneckhaute (2017)
Scrubbing Fysiokjemisk	NH ₃	Scrubbing 80-90				Kapital: € 13/kg NH ₃ Operasjonelle: € 6-7/ kg NH ₃ fjerna	Vaneckhaute (2017)

*Teknikker under utvikling: AMFER[®], Detricktion, NITROStripp

Gjenvinning av fosfor

Fosforutfelling som struvitt er kjent teknologi fra avløpshåndtering. Struvitt-utfelling kan være et problem i renseanlegg, og teknikken har vært mer brukt for å unngå tetting av rør enn for å gjenvinne fosfor (Le Corre, 2009). I landbruket er gjenvinning av fosfor knapt tatt i bruk. Noe av grunnen kan være at det mangler spesifikk regulering slik vi finner for nitrogen i Nitratdirektivet. Siden fosfor er en knapp ressurs globalt sett, burde gjenvinning vært mer interessant (Rizzioli, 2023). Struvitt har en økonomisk verdi, og fosfor bør gjenvinnes siden

det er en begrenset ressurs (Jaffer, 2002). Teknologien er velkjent og godt utviklet, og bør derfor utvikles til bruk i landbruket (Rizzioli, 2023 med referanser).

Fosfor kan gjenvinnes som struvitt eller kalsiumfosfat ved fellingsreaksjoner fra bioresten eller fra aske etter forbrenning. Kalsiumfosfat er mer plantetilgjengelig enn struvitt, men begge er mindre plantetilgjengelige enn superfosfat, og kan brukes som langtidsvirkende gjødselslag.

Det testes nå gjenvinning av struvitt fra biorest hos NIBIO, Særheim.

Utfelling som struvitt

Struvitt er et hvitt krystallinsk stoff som består av magnesium (Mg), ammonium (NH_4^+) og fosfat (PO_4^{3-}), ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (Shi, 2018). Under nøytrale og alkaliske forhold er struvitt tungt løselig, men løses lettere opp under sure forhold (Fangueiro, 2017). Nitrogen og fosfor frigis mer langsomt enn fra konvensjonell mineralgjødsel, og jord- og vannforurensing reduseres. Opptaket av næringsstoffer i avlingen blir høyere (Rahman Md M., 2011).

Både fysiske og kjemiske faktorer styrer utfellingen av struvitt. Ved å endre pH, vil konsentrasjonen av frie ioner som kan reagere, endres. Når pH øker, synker konsentrasjonen av Mg^{2+} og NH_4^+ . Mg binder seg til hydroksider, og ammonium fordampes som ammoniakk (NH_3). Derimot øker fosfatkonsentrasjonen. pH påvirker også løseligheten til struvitt, som er minimal med pH-verdier mellom 9 og 10,7 (Doyle, 2022).

For å framkalle struvitt tilsettes Mg (som magnesiumoksid, MgO, eller magnesiumklorid, MgCl_2), og pH økes ved å tilsette NaOH (natronlut). Alternativt kan CO_2 stripping brukes for å redusere forbruket av kjemikalier (Cerrillo, 2015).

Noen av hindringene for å felle ut struvitt fra flytende biorest er høy konsentrasjon av suspenderte faste stoffer, Ca^{2+} , høy ionestyrke, høy alkalitet og lavt innhold av løselig reaktiv fosfor (Tao, 2016)

Egenskapene kan variere avhengig av gjødseltype og behandling forut for struvittdannelsen (mekanisk separator, anaerob fordøyelse, etc.). Ulike strategier har blitt testet ut for å overvinne begrensningene, bl.a. surgjøring for å løse opp partikler av uorganisk fosfat (Massey, 2010), men utfordringen er lønnsomme verdikjeder.

Alternativt kan K-struvitt dannes ved at K^+ -ion reagerer i stedet for ammonium, NH_4^+ , og det felles ut en kjemisk sammensetning mellom kalium, magnesium og fosfat tilsvarende struvitt (Fangueiro, 2017).

Struvittutfelling gjenvinner 80-90 % av fosforet i 0,5-5 mm krystaller. For nitrogen gjenvinnes bare 10-40 % av $\text{NH}_4\text{-N}$. Prosessen krever store mengder lut for å heve pH i substratet som kan ha stor bufferkapasitet (Rizzioli, 2023 med referanser).

Kostnadene for å gjenvinne fosfor som struvitt, varierer totalt fra tap på € - 7800 til overskudd € 89400/år for struvitt produksjon, basert på gjenvinning fra vannrensing.

Kostnadene er særlig knyttet til mengde kjemikalier som trengs for å heve pH, og det er utfordringer med å få et rent produkt, og stabil og kontrollert produksjon (Vaneckhaute, 2017).

Struvittgjenvinning blir hovedsakelig brukt på kommunalt slamavløpsvann og industrielt avløpsvann. Begrensende faktor for implementering er en minimumskonsentrasjon på 100 mg/l oppløst P (orto-fosfat) (Fangueiro, 2017). For øyeblikket er bare noen få fosfatgjenvinningsteknikker utviklet for behandling av husdyrgjødsel.

Utfelling som kalsiumfosfat

Utfelling av fosfor som kalsiumfosfat begynner med forsuring av bioresten til pH rundt 5,5, eller enda lavere, ved bruk av svovelsyre, H_2SO_4 eller andre syrer. Partikkelbundet uorganisk fosfor løses opp. Det er kostbart å senke pH, og andre kilder til forsuring testes. CO_2 er alt lett tilgjengelig gjennom biogassprosessen, og i tester har man oppnådd en pH på 6, som er for høy til å frigjøre alt uorganisk fosfor. Men man må vurdere kost/nytte ved valg av syrer. Etter forsuring separeres bioresten ved bruk av skrupresse. Utfelling av fosfor som kalsiumfosfat skjer ved høy pH. Kalk, $Ca(OH)_2$, eller natriumhydroksid (NaOH) tilsettes for å heve pH til 10. Deretter siles/filtreres bioresten med svært liten hullstørrelse, ned til 80 μ . for å fjerne mest mulig organiske partikler. På grunn av siler med liten hullstørrelse, har prosessen liten kapasitet. Kalsiumfosfat felles ut. (Geltz, 2024).

Utfelling av kalsiumfosfat er svært komplekse prosesser. Prosessen er påvirket av ulike parameter som konsentrasjonen av kalsium- og fosfationer, ionestyrke, temperatur, ionetyper og pH, men også av tid. Når kalsiumhydroksid ($Ca(OH)_2$) tilsettes væskefraksjonen og pH øker over 10, med temperatur på $70^\circ C$, utfelles fosfor som $(Ca_5(PO_4)_3(OH))$ eller brushitt ($CaHPO_4 \cdot 2H_2O$). Avhengig av dosering kan tre forskjellige Ca-fosfater oppnås: vannløselig mono-kalsiumfosfat (MCP), sitronsyreløselige di-kalsiumfosfat (DCP) og det knapt løselige tri-kalsiumfosfatet (TCP). Som gjødsel er MCP og DCP foretrukket (Fangueiro, 2017).

Nitrogenet i den fraseparerte fast del av bioresten kan gjenvinnes ved ammoniumstripping.

Utfelling av kalsiumfosfat kan fjerne 50-60 % av P (Rizzioli, 2023). Prosessen er kostbar med kapitalkostnader på 2300-2900 €/tonn P og operasjonelle kostnader som avhenger av kjemikaliebruken. Den er påvirket av substratene (Vaneckhaute, 2017).

Rizzioli (2023 med referanser) viser til REVAWASTE®, et utviklet system på TRL 7, utviklet i Spania, med gjenvinning av næringsstoffer opp til 95,4 %, deriblant krystallisering av fosfor. Ash2Phos-systemet utviklet av EasyMining, et svensk selskap, se under kapitlet om forbrenning, blir beskrevet som det best utviklede systemet for å gjenvinne fosfor som kalsiumfosfat fra forbrent biorest.

Vaneckhaute (2017) stiller spørsmål ved om forbrenning/pyrolyse av biorest er en bærekraftig teknikk, og om man skal anbefale ekstrahering av fosfor fra aske, eller biokull, da man taper nitrogen og det organiske materialet ved forbrenning.

Tabell 4 Oppsummering av gjenvinning av fosfor som struvitt og kalsiumfosfat.

Teknikk	Separeringsandel % våt vektandel *	Produkt	Ut- viklingsnivå	Merknad/flaske hals	Kostnader (kapital), nøkkelkostnader	Kilde
Gjenvinning Struvitt Felling	P: 80-90 **	Fast, langtids- virkende gjødsleslag	TRL 9	Lovgivning Teknisk utvikling Kjemikalie- kostnader Rent produkt og stabil produksjon	Tap på € - 7800 til overskudd € 89400/år (kapital- og operasjonelle kostnader) ***	***Vaneckhaute 2017
Kalsium- fosfat Felling	P: 50-60 **	Fast, langtids- virkende gjødsleslag	TRL 6-7	Lovgivning Kjemikalie- kostnadene	Kapitalkostnader: 2300-2900 €/tonn P Operasjonelle: avhengig av kjemikaliebruk ***	** Rizzioli, (2023) ***Vaneckhaute 2017
* N kan gjenvinnes ved scrubbing						

Forbrenning

Etter forbrenning av organisk materiale felles fosfor ut som kalsiumfosfat fra asken, fortrinnsvis fra slambehandling. Teknikken kan også brukes på fast del av biorest (Lundbom, 2023). Etter forbrenning av den faste bioresten/slam inneholder aske både fosfor, kalium, aluminium og silisium i tillegg til gjerne også tungmetaller som kobber, sink og kadmium. Gjenvinning av fosfor kan være opp til 78 % (Vaneckhaute, 2017).

Flere selskaper har utviklet teknologier for å gjenvinne fosfor fra aske. I møte med Lundbom (2023) blir det opplyst at ved Ash2Phos-konseptet skal fast biorest forbrennes. pH i asken skal senkes ved å tilsette (HCl), og fosfat-ionene frigjøres. Deretter tilsettes kalk for å øke pH, og kalsiumfosfat utfelles. Kalsiumfosfat kan brukes i gjødselindustrien som erstatning for andre fosfatkilder. Tungmetaller skal gjenvinnes med 96 %. Jern og Aluminium skal brukes i avløpsrensing. Det kan medføre sterk binding til fosfor, slik at det blir utilgjengelig for plantene. Det kan også binde fosfor i ei jord med overskudd av jern- og aluminium-ion. Aluminiumforbindelser skal brukes i industrien og silisium skal erstatte sand i betongproduksjonen. Bedriften planlegger oppstart av fabrikk i Helsingborg i 2026.

Som vist i forrige kapittel, stiller (Vaneckhaute, 2017) spørsmål ved bærekraften ved forbrenning. Det er høyt energiforbruk, og kjemikaliebruken er avhengig av prosessen. Det kan også være behov for å fjerne tungmetaller. Kostnadene til forbrenning er beregnet til 0-10 € per m³ for tørr biorest (slurry).

Tabell 5 Oppsummering av gjenvinning av fosfor ved forbrenning.

Teknikk	Separeringsandel % våt vektandel	Produkt	Ut- viklingsnivå	Merknad/flaske hals	Kostnader, operasjonelle	Kilde
Forbrenning Varmeenergi	P: opp til 78	Bl.a. kalsium- fosfat	TRL 9	Energibruk Fjerne tungmetall pH Kjemikaliebruk	0-10 €/m ³	Vaneckhaute 2017

Momenter til vurdering av totale kostnader ved behandling av biorest

Kostnader til behandling av biorest er oftest en byrde for biogassanleggene. Så langt har de fleste undersøkelsene bare beskrevet de separate kostnadene ved de ulike tekniske behandlingsmåtene for biorest. Man har manglet en helhetlig vurdering av de totale kostnadene; kostnader som ligger utenom selve behandlingen av biorest. Det gjelder alle kostnadene fra bioresten forlater fermenteringstanken til den er spredd på jorda.

Det mangler kunnskap om hvilke teknologier som er best tilpasset de enkelte anleggs situasjon. Dette gjør at man har et begrenset grunnlag å fatte kritiske beslutninger på. Disse utfordringene er beskrevet i en rapport av Herbes (2020). Her pekes det på svakhetene ved tidligere kostnadsanalyser. Derfor er det gjennomført en «netto nåtidsverdi»-analyse (Net Present Value, NTP) av seks ulike oppgraderingsteknikker for biorest. Den økonomiske bærekraften ved behandlingene på større og mindre biogassanlegg vurderes. Fokuset har vært på fjerning av fosfor, men modellen kan også brukes på nitrogen.

Modellen viser at tre faktorer har avgjørende effekter på om et anlegg er økonomisk levedyktig: anleggsstørrelse, fordeling av den produserte energien: til salg eller brukt inn i prosessering av bioresten, og andelen av kostnadene anlegget må bære til lager, transport og distribusjon.

Resultatene viser at det er få investeringer i behandling av biorest som gir positiv avkastning. Dersom anleggene må betale for varme, og ikke mottar gratis overskuddsvarme de kan bruke, blir NPV for nesten alle teknologiene negative. Selv om volumet av fast og flytende fraksjon reduseres ved bruk av de ulike teknologiene, veier det ikke opp for reduserte kostnader til transport og distribusjon av biorest. Vakuumreduserende teknologier som forutsetter bruk av varme, viser bare en positiv NPT når varme er gratis tilgjengelig. Bare membranteknologien, som ikke trenger varme, viser en positiv NTP da redusert volum minker transportkostnadene.

Teknologi som er tilpasset fjerning av fosfor, har et kostnadsbilde. Endres fokus til fjerning av nitrogen, kan kostnadsbildet endre seg ved bruk av samme teknologi.

Vurderes teknologikostnadene isolert uten en helhetlig tilnærming, kan dyr teknologi vurderes som lite relevant sammenlignet med rimeligere teknologi. Dette bilde kan snus dersom anlegget må betale for varmen. Da kan dyr teknologi som bruker lite varme, framstå som et rimeligere alternativ enn teknologi som bruker mye varme. Derfor må totale kostnader vurderes for å kunne vite sikkert hvilken teknologi som er rimeligst i en gitt situasjon.

Vurdering

Strengere gjødselregelverk vil pålegge biogassanleggene å fjerne fosfor fra husdyrtette områder som Rogaland/Vestland. Dette gjelder særlig når fosforholdige substrater tilsettes for å øke gassproduksjonen. Dette er også et aktuelt og relevant tema i andre husdyrtette områder i Europa. Da fosfor er en begrenset ressurs, bør det legges vekt på hvordan man kan ta vare på og omfordele ressursen til områder som trenger fosfor. Fjerning av nitrogen har så langt ikke vært et aktuelt spørsmål hos oss utenom i Oslofjord-regionen.

I dag vil de fleste teknologiene for fjerning av fosfor være en økonomisk belastning for biogassanleggene. Derfor vil det være viktig at teknologien forbedres og blir mer effektive. Det forskes på alternative teknikker som skal kunne fjerne fosforet fra bioresten, og tekniske løsninger som reduserer kostnadene er en forutsetning for å lykkes. I tillegg bør det arbeides med energieffektivisering og bruk av overskuddsvarme fra tiliggende industrier. Nye markeder for salg av prosesserte produkter kan utvikles.

Noen av de kommersielle aktørene var interesserte i å dele tekniske løsninger med oss, men var tilbakeholdne med å synliggjøre kostnadene de estimerer med de ulike løsningene de har utviklet/holder på å utvikle. Dette viser at markedet er umodent i Norge, miljøet bruker ressurser på løsninger, og de ulike aktørene ønsker å bruke sin teknologi og sin kunnskap som et konkurransefortrinn overfor andre.

Man bør ha en helhetlig tilnærming i beslutningsprosesser. Oppnår man en miljøgevinst ett sted, kan andre gevinster oppstå et annet sted i verdikjeden. Aktørene som høster nytteverdiene, er ikke alltid de som betaler for prosessene. I tillegg til tekniske og økonomiske tilnærminger, trenger beslutningstagere å vurdere flere aspekter.

Vi har heller ikke funnet storskala teknologiske løsninger tilpasset store biogassanlegg med en kapasitet på 300 000-1 000 000 tonn, som det planlegges anlegg for i Rogaland. Det kan tyde på at ulike teknologier ikke er oppskalerte til så store dimensjoner. Vi finner økonomiske vurderinger fra andre land, der biogassindustrien er mer utbygd og bedriftene arbeider mer med innovasjon og utvikling enn det vi gjør. Utslippskrav for nitrogen er driveren da alternativet er redusert husdyrhold, mens fosfor er ikke en så stor utfordring som hos oss.

Konklusjon

Gjenvinning og fjerning av næringsstoffer kan oppnås gjennom både mekaniske, kjemiske eller biologiske prosesser. Vi har kun konsentrert oss om noen av de mekaniske og kjemiske teknikkene.

Fjerning av nitrogen har vært et prioritert område i EU. Utvikling av tekniske løsninger for nitrogen er kommet lengre enn for fosfor. TRL er på 8-9. Det har vært mindre krav om å fjerne fosfor i EU, og den teknologiske utviklingen er kommet kortere. TRL er på 6-7.

Det er behov for å intensivere arbeidet med å verdsette bioresten da fosfor er en kritisk ressurs. Potensialet for å nytte biorest må stimuleres gjennom at lovverket er på plass, og at det stimulerer til ny forskning og innovasjon.

Gjenvinning av næringsstoffer er kompliserte tekniske prosesser, og økonomien vurderes oftest for hver enkelt teknisk løsning. Helhetlige økonomiske vurderinger for biogassanlegg finnes det lite av.

De fleste teknologiene for gjenvinning eller ekstrahering av fosfor vil være ulønnsomme for biogassanleggene. Derfor må teknologien forbedres ved forskning og innovasjon.

Referanser

AlfaLavalNordic Alfa Laval Nordic AS. (2024). 04. 04. 2024.

<https://www.alfalaval.no/produkter/separering/membraner/hva-er-membranfiltrering/>.

Awiszus S., Meissner, K., Reyer, S., Müller, J. (2018). Ammonia and methane emissions during drying of dewatered biogas digestate in a two-belt conveyor dryer. *Bioresource Technology*. ELSEVIER, Vol. 247, pp. 419-425.

Bolzonella D., Fatone, F., Gottardo, M., Frison, N. (2018). Nutrients recovery from anaerobic digestate of agro-waste: Techno-economic assesment of full scale applications. *Journal of Environmental Management*. ELSIVIER. Vol 216, pp. 111-119.

Buckwell A., Nordang Uhre, A., Williams, A., Poláková, J., Blum, W., Schiefer, J., Lair, G., Heißenhuber, A., Schießl, P., Krämer, C., Haber, W. (2015). Sustainable Intensification of European Agriculture. Brussel : The Sustainable Intensification of European Agriculture. A review sponsored by the RISE Foundation.

Cathcart A., Smyth, B., Lyons, G., Murray, S., Rooney, D., Johnston, C. (2023). Optimising mechanical separation of anaerobic digestate for total solids. *Journal of Environmental Management*. ELSEVEIR. Vol 345.

Cerrillo M., Palatsi, J., Comas, J., Vicens, J., Bonmatí, A. (2015). Struvite precipitation as a technology to beintegrated in a manure anaerobic digestion treatment plant – removal

efficiency, crystal characterization and agricultural assessment. Chem Technol Biotechnol, Vol. 90, pp. 1135-1143.

Circulizer Norcus.no, 2024. 15. 04. 2024. <https://norsus.no/en/prosjekt/circulizer/>.

Dahlin J., Beuthner, C., Halbherr, V., Kurz, P., Nelles, M., Herbes, C. (2019). Sustainable compost and potting soil marketing: Private gardener preferences. Journal of cleaner production. ELSEVIER, Vol 208, pp. 1603-1612.

Doyle J., Parsons, S. (2002). Struvite formation, control and recovery. Water Res., 36. - pp. 3925-3940.

EBA, European Biogas Association. September 2023.

<https://www.europeanbiogas.eu/type-of-member/standard-members/>.

European Comission 2019 Regulation (EU) 2019/1009 of EU and of the Council 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003.

European Comission, 2023 Regulation (EU) 1605/2023 of 22 May 2023 supplementing Regulation (EC) No 1069/2009 of the European Parliament and of the Council as regards the determination of end points in the manufacturing chain of certain organic fertilisers and soil improvers [Internett]. - https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2023.198.01.0001.01.ENG&toc=OJ%3.

Fachverband Biogas Digestate as fertilizer. (2018).

[https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/BJHCPA-DE-Digestate-as-Fertilizer/\\$file/Digestate_as_Fertilizer.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/BJHCPA-DE-Digestate-as-Fertilizer/$file/Digestate_as_Fertilizer.pdf).

Fangueiro D., Snauwaert, E., Provolo, G., Hidalgo, D., Adani,F., Kabbe,C., Bonmati, A., Brandsma, J. (2017). Available technologies for nutrients recovery from animal manure and digestates. EIP-AGRI Focus Gr. Nutr. Recycl. pp. 1-20.

Geltz U. (2024). Presentasjon av forskningsanlegg i Kaupfersell [Møte]. 06. 03. 2024.

Gienau T., Brüß, U., Kraume, M., Rosenberger, S. (2018). Nutrient Recovery from Biogas Digestate by Optimised Membrane Treatment. SPRINGER LINK. 9. pp. 2337-2347.

Gilkinson S., Frost, P. (2007). Evaluation of mechanical separation of pig. Agri-Food and Biosciences Institute. Hillsborough.

Herbes C., U. Roth, S. Wulf, J. Dahlin. (2020). Economic assessment of different biogas digestate processing technologies: A scenario-based analysis. Journal of Cleaner Production. ELSIVIER.

Jaffer Y, Clark T.A., Pearce P., Parsons, S.A. (2002). Potential phosphorus recovery by struvite formation. Water Resarch. ELSEVIER. Vol. 36, pp. 1834-1842.

Karimi B., Sadet-Bourgeteau, M., Cannavacciuolo, M., Chauvin, C., Flamin, C., Haumont, A., Jean-Baptiste, V., Reibel, A., Vrignaud, G., Ranjard, L. (2022). Impact of biogas digestates on soil microbiota in agriculture: a review. *Environmental Chemistry Letters*. Vol 20, pp. 3265-3288.

Le Corre K.S., Valsami-Jones, E., Hobbs, P., Parsons, S. A. (2009). Phosphorus Recovery from Wastewater by Struvite Crystallization: A Review. *Environmental Science and Technology*. Vol 39, pp. 433-477.

Lundbom Anna. (2023). Presentasjon av ASH2PHOS [Møte]. 19. 12. 2023.

Lyons G., Cathcart, A., Frost, J.P., Wills, M., Johnston, C., Ramsey, R. (2021). Review of Two Mechanical Separation Technologies for the Sustainable Management of Agricultural Phosphorus in Nutrient-Vulnerable Zones. *Agronomy*. Vol 11.

Massey M.S., Ippolito, J.A., Davis, J.G., Sheffield, R.E., (2010) Macroscopic and microscopic variation in recovered magnesium phosphate materials: implications for phosphorus removal processes and product re-use. *Bioresour. Technol.* Vol. 109, pp. 877-885.

Møller H.B., Lund, I., Sommer, T. (2000). Solid–liquid separation of livestock slurry: efficiency and cost. *Bioresource Technology*. ELSEVIER. Vol. 74, pp. 223-229.

Möller K. (2015). Effects of anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions, and soil biological activity. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. Vol 35, pp. 1021-1041.

Rahman Md M. YingHao Liu, Jung-Hoon Kwag, ChangSix Ra. (2011). Recovery of struvite from animal wastewater and its nutrient leaching loss in soil. *J. Hazard. Mater.* 186, pp. 2026-2030.

Vedlegg 1 Marked dialogue

Market dialogue – innovation on digestate

Rogaland Biogas Network, Norway, is a non-commercial organization whose purpose is to support commercial manufacturers within biogas production and contribute to increase biogas production in the County of Rogaland, Norway.

Rogaland Biogas Network brings forth knowledge on how, through research and innovation, digestate can become a resource, and how to utilize organic waste in a sustainable way.

The County of Rogaland, Norway, has a high density of animal husbandry, as climatic conditions are well suited for grass and roughage production. The large amount of livestock

manure forces the County of Rogaland to transform digestate from biogas production into new products like organic fertilizer or soil improvers. The main purpose is to remove phosphorus from animal husbandry in the Western part of Norway and transport it to the Eastern part of Norway. To put it into perspective, we are looking at treating 300 000 m³ of manure with 4% dm. after the fermentation process, and before separating.

Particularly our aim is to facilitate commercial manufacturers to produce organic fertilizer from digestate and enable transport to regions in Norway producing crops in need of organic fertilizer and phosphorus. This is expected to become a new business in Norway, forced by the prospect of stricter legislation.

Rogaland Biogas Network is funded by Norwegian Environmental Agency and some County Municipalities. Signatory is Project manager for the biogas network. We have got the assignment to examine the availability of building a factory producing and transporting organic fertilizer produced by digestate in an economical way. Hence this request is a part of this project.

On this background we would like to request both technical equipment and costs to separate the digestate, handling separated digestate, both liquid and solid fractions. We are interested in either a total or a partial suggestion, whatever is possible for you to deliver. We are also looking for comparable reference projects.

We are asking for an overview of the production line, where the purpose of the different equipment is described, and how it functions.

Our request concerns the costs of the main components connected to the production line. We need both investment costs, power consumption for the different equipment, expected lifetime of the equipment and expected operating costs.

We would also like a recommendation on how production of organic fertilizer is realistic to obtain, and how your technique manages to produce organic fertilizer. We ask for technical parameters for the equipment best handling both fluent and solid fractions.

We will request different manufacturers of technical equipment and assess both different technical solutions and costs before involving commercial manufacturers interested in knowledge about new solutions.

We won't publish your offer if that prevents you from delivering a suggestion.

To prevent misunderstandings, we would like to invite you to a digital meeting.

These persons participate in the project and will join a digital meeting:

Tore Meinert, Project owner, Rogaland County Municipality.

Peter Willmann, Municipality of Klepp.

Tord Araldsen, Biogas Oslofjord, owned by the County Governor of Viken and the County Governor of Vestfold and Telemark.

Helga Hellesø, Project manager, Rogaland Biogas Network.