

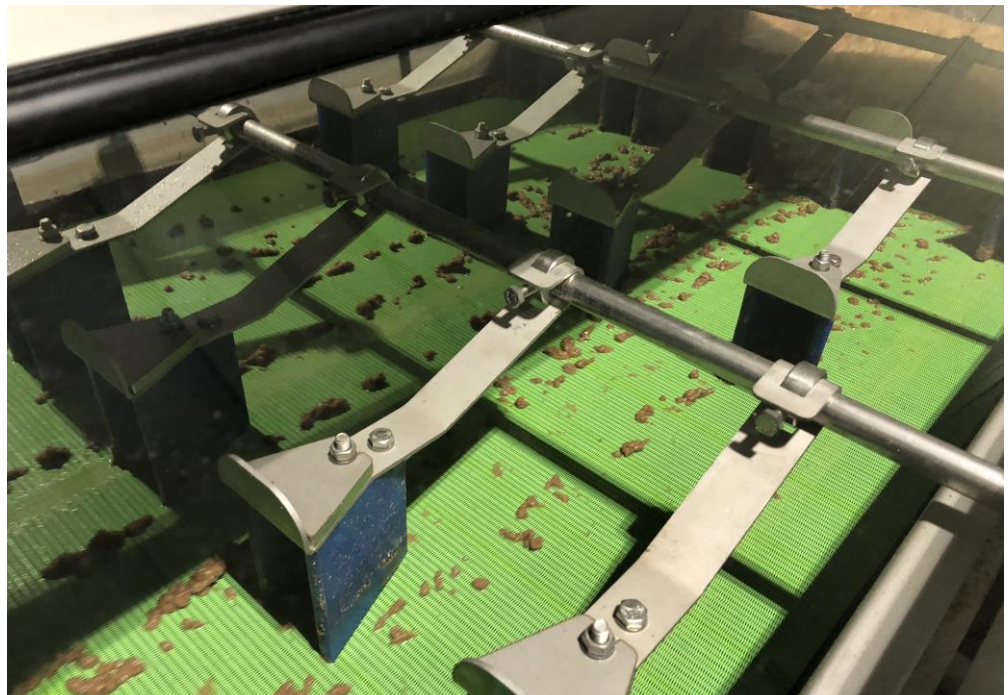
Rapport

Kunnskaps- og erfaringskartlegging om effekter av og muligheter for utnyttelse næringsstoffer fra oppdrett

Delrapport 3 – Utnyttelse av organisk materiale og næringsalter

Forfattere

Øyvind Hilmarsen (SINTEF nord as), Andreas Hagemann (SINTEF Ocean as), Matilde Skogen Chauton (SINTEF Ocean as), Jan Ove Evjemo (SINTEF Ocean as), Jon Hovland (SINTEF Industri), Hanne Wasmuth Brendeløkken (SINTEF nord as), Randulf Høyli (SINTEF nord as), Simon Goddek (Bluecycling B.V.,), Grethe Lilleng (SINTEF nord as)



Rapport

Kunnskaps- og erfaringskartlegging om effekter av og muligheter for utnyttelse næringsstoffer fra oppdrett

Delrapport 3 – Utnyttelse av organisk materiale og næringsstoffer

EMNEORD:

Organisk materiale, næringsstoffer, oppdrett, biogass, fosfor, pyrolyse, børstemark, SCP, encelleprotein, gammarider, akvaponi, slam, utslipp

VERSJON

1.0

DATO

2020-11-27

FORFATTER(E)

Øyvind Hilmarsen (SINTEF nord as), Andreas Hagemann (SINTEF Ocean as), Matilde Skogen Chauton (SINTEF Ocean as), Jan Ove Evjemo (SINTEF Ocean as), Jon Hovland (SINTEF Industri), Hanne Wasmuth Brendeløkken (SINTEF nord as), Randulf Høyli (SINTEF nord as), Simon Goddek (Bluecycling B.V.,), Grethe Lilleng (SINTEF nord as)

OPPDRAGSGIVER(E)

Fiskeri- og havbruksnærings forskningsfinansiering

OPPDRAGSGIVERS REF.

901572

PROSJEKTNR

822100158

ANTALL SIDER OG VEDLEGG:

67

SAMMENDRAG

Dette er en delrapport i prosjektet "Kunnskaps- og erfaringskartlegging om effekter av og muligheter for utnyttelse av organisk materiale og næringsstoffer fra havbruk" finansiert av FHF (prosjektnummer 901572). I dag brukes organisk materiale i form av slam fra oppdrett i all hovedsak til biogass- og gjødsel- og jordforbedringsproduksjon. Gjenvinning av kun fosfor fra slam er i dag ikke økonomisk lønnsomt, men produksjon av organisk gjødsel gjenvinner noe fosfor. Pyrolyse av slam for produksjon av varme og biokoks er ikke aktuelt, da det ikke er markedet for biokoks. Organisk materiale og næringsstoffer kan brukes til biologiske produksjoner som bakterier, alger, grønnsaker og sopp. Det kan også brukes som fôsubstrat for børstemark, reker og insekter, men dagens regelverk tillater ikke slik bruk.

UTARBEIDET AV


Øyvind Hilmarsen

SIGNATUR**KONTROLLERT AV**

Aleksander Handå

SIGNATUR**GODKJENT AV**

Ståle Walderhaug

SIGNATUR
Ståle Walderhaug (Nov 27, 2020 15:06 GMT+1)

SINTEF Nord AS

Postadresse:
Postboks 118
9252 Tromsø

RAPPORTNR
2020:01309

ISBN
978-14-06449-0

GRADERING
Åpen

GRADERING DENNE SIDE
Åpen

Foretaksregister:
NO 992 769 211 MVA

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBEKRIVELSE
1.0	2020-11-27	Rapport oversendt oppdragsgiver

Innholdsfortegnelse

1	Sammendrag	7
2	Introduksjon.....	9
3	Metode	10
4	Næringsstoffer fra oppdrett av fisk	11
4.1	Partikulært materiale fra oppdrett	11
4.2	Næringsstoffer fra oppdrett	12
4.3	Total mengde utslipp av næringsstoffer fra norsk oppdrett	13
4.3.1	Mengde partikulært materiale fra landbasert oppdrett	13
4.3.2	Mengde næringsstoffer fra oppdrett	16
4.3.3	Teknologi for avvanning og tørking av slam	16
5	Utnyttelse av næringsstoffer fra oppdrett	18
5.1	Utnyttelse av næringsstoffer fra oppdrett i dag.....	18
5.1.1	Biogass og gjødsel.....	18
5.1.2	Slam til produksjon av organisk gjødsel	18
5.1.3	Kompostering til jordprodukter.....	19
5.2	Biogassproduksjon	19
5.2.1	Bakgrunn.....	19
5.2.2	Biogassprosessen.....	20
5.2.3	Produksjonsteknologi	21
5.2.4	Produkter og produksjonspotensial	22
5.3	Gjenvinning av fosfor fra fiskeslam.....	24
5.3.1	Fosfor i omløp i Norge	24
5.3.2	Hvordan gjenvinne fosfor fra fiskeslam?	27
5.3.3	Fosfor fra aske	27
5.3.4	Utfelling av fosfor som struvitt.....	27
5.3.5	Fosfor i avløpslam	27
5.3.6	Fosfor fra biogassanlegg.....	28
5.3.7	Bruk av utfelt fosfor hos Yara	28
5.4	Organisk gjødsel.....	28
5.5	Mineralsk gjødsel	29
5.6	Gjenvinning av fosfor i akvaponi.....	29
5.6.1	Økonomiske aspekter	29
5.6.2	Konklusjon for gjenvinning av fosfor	30
5.7	Pyrolyse.....	31
5.7.1	Bakgrunn.....	31
5.7.2	Pyrolyseprosessen	31

5.7.3	Marked og modenhet.....	31
5.7.4	Sluttprodukter ved pyrolyse av slam.....	32
5.7.5	Produksjonspotensial.....	33
5.7.6	Konklusjon for pyrolyse som løsning for håndtering av fiskeslam.....	34
6	Ny biologisk produksjon basert på næringsstoffer fra oppdrett.....	35
6.1	Børstemark.....	35
6.1.1	Bakgrunn og biologi.....	35
6.1.2	Akvakultur og høsting av børstemark.....	36
6.1.3	Anvendelse av restprodukter fra akvakultur til produksjon av børstemark.....	37
6.1.4	Kjemisk sammensetning.....	37
6.1.5	Produksjonsteknologi.....	39
6.1.6	Marked.....	40
6.1.7	Teoretisk produksjonsutbytte.....	41
6.2	Encelleprotein (Single Cell Protein).....	42
6.2.1	Bakgrunn og biologi.....	42
6.2.2	Kjemisk sammensetning.....	42
6.2.3	Produksjonsteknologi.....	43
6.2.4	Bioproduksjon/produksjonspotensial.....	44
6.2.4.1.1	Teoretisk produksjonspotensial med fototrof produksjon.....	45
6.2.4.2	Sammenligning av produksjonspotensialet i fototrof produksjon og heterotrof fermentering.....	46
6.2.5	Anvendelse av restprodukter fra industri til produksjon av SCP.....	47
6.2.6	Regulering/"legal readiness level".....	48
6.2.7	Konklusjon encelleproteinproduksjon.....	48
6.3	Intensiv produksjon av Gammaridaer.....	48
6.3.1	Bakgrunn og biologi.....	48
6.3.2	Kjemisk sammensetning.....	49
6.3.3	Produksjonsteknologi.....	49
6.3.4	Produksjon av biomasse.....	49
6.3.5	Anvendelser av restprodukter fra industri som fôr til <i>Gammaridaene</i>	50
6.3.6	Teoretisk produksjonsutbytte.....	50
6.4	Akvaponi.....	52
6.4.1	Utnyttelse av næringsstoffer.....	52
6.4.2	Akvaponi.....	53
6.4.3	Flersløyfede akvaponisystemer.....	54
6.4.4	Dyrking av sopp.....	58
6.4.5	Akvaponi i Norge og internasjonalt.....	59
6.4.6	Konklusjoner om akvaponi.....	60
6.5	Andre aktuelle biologiske utnyttelser.....	60
6.6	Forutsetninger for bruk av organiske materiale og næringsalter fra akvakultur til nye anvendelser.....	60

7 Referanser.....62

BILAG/VEDLEGG

[Skriv inn ønsket bilag/vedlegg]

1 Sammendrag

Denne rapporten er en del av prosjektet "Kunnskaps- og erfaringskartlegging om effekter av og muligheter for utnyttelse av utslipp av organisk materiale og næringssalter fra havbruk" finansiert av Fiskeri og havbruksnæringens forskningsfinansiering (Prosjektnr. 901572). Rapporten gir en status over hvordan næringsstoffene fra oppdrett utnyttes i dag og gjennomgår de mest aktuelle fremtidige anvendelsene av organisk materiale og næringssalter.

Partikulært materiale fra oppdrett består av fôrrester og faeces fra fisken og benevnes ofte som slam i oppsamlet form. Næringssalter fra oppdrett omfatter hovedsakelig nitrogen i form av ammonium, nitrat, nitritt og fosfor (fosfat) i form av løste uorganiske forbindelser som dannes under fiskens metabolisme, i biologiske renseanlegg for landbaserte resirkulerende oppdrettsystemer (RAS-anlegg), og ved oppløsning av faeces og fôrrester i vann.

Hovedårsaken til de økte mengdene tilgjengelig slam fra oppdrett i Norge er innføringen av rensekravet for landbaserte oppdrettsanlegg og den kraftige utbyggingen av nye settefiskanlegg de siste 15 år.

I Delrapport 1 (Broch og Ellingsen 2020) er de totale utslippene fra matfiskanlegg til norsk kystvann i 2019 beregnet til 224 000 karbon, 66 000 tonn nitrogen og 14 000 tonn fosfor. I tillegg bidro settefiskanlegg med 3 219 tonn karbon, 925 tonn nitrogen og 149 tonn fosfor, forutsatt en rensegrad på 50 %. Aas & Åsgård (2017) har beregnet at det slippes ut 535 412 tonn slam fra lakseoppdrett i sjø fordelt på 355 602 tonn faeces og 179 540 tonn fôrspill, samt 10 716 tonn slam fra settefiskproduksjonen, fordelt på 6 768 tonn fôrspill og 3 948 tonn faeces.

Næringsstoffer i form av organisk materiale og næringssalter som samles opp eller er tilgjengelig for utnyttelse, stammer i all hovedsak fra landbasert settefiskproduksjon av laks og ørret. Krav til vannkvalitet i landbasert RAS-anlegg og Forurensingslovens regler om rensing av utslipp, gjør det nødvendig å filtrere ut partikulært materiale fra produksjonsvann og avløpsvann som slam. Dette må behandles etter gjeldende regler om avhending og dette utgjør i dag en utfordring og kostnad for oppdretter, samtidig som det utgjør en mulighet for ny næringsvirksomhet. Fra RAS-anlegg er næringssalter i form av totalt ammonium nitrogen (TAN) og nitrat tilgjengelig for utnyttelse fra produksjonsvann eller avløpsvann. Næringsstoffer fra åpne merdanlegg i sjø er svært krevende å utnytte. Lukkede anlegg i sjø drives kun i små skala kommersielt, på forsøksstadiet eller som utviklingsprosjekter knyttet til utviklingskonsesjoner.

Behandlingsgrad for oppsamlet slam er avhengig av hvilket utnyttelsesformål som velges. Det kan oppkonsentreres og avvannes til om lag 10–20 % før det fraktes vått til utnyttelse eller det kan tørkes ytterligere på anlegget. Det er utviklet flere typer tørkeanlegg som tørker slam til tørrstoffgrad over 90 %. Slammet blir da lagringsstabil.

Det oppsamlede slammet fra norsk oppdrett gikk i 2019 hovedsakelig til biogass, gjødselproduksjon samt kompostering og jordforbedring. Dette utgjør fortsatt en stor kostnad for oppdretter, som må betale for å få avhendet slam. Det eksporteres organisk gjødsel som inneholder tørket oppdrettslam (inkludert fosfor) til Vietnam. Innsamlet fosfor i fiskeslam og annet avfall bør i en sirkulær økonomi erstatte råfosfat fra gruver som i dag brukes som fosforgjødsel for mat- og fôrproduksjon. Med dagens kostnadsbilde vil håndtering av fiskeslam koste så mye at verdien av fosfor alene, sammenlignet med prisen på råfosfat eller diammoniumfosfat på om lag 9–10 NOK/kg P, ikke er bedriftsøkonomisk lønnsomt. Pyrolyse er per tiden ikke en aktuell anvendelse for slam, da det ikke er marked for biokoks.

Det er mulig og tillatt å utnytte organisk materiale og næringssalter som næringssubstrat for nye biologiske produksjoner av alger, bakterier, grønnsaker og sopp. Fototrof og heterotrof produksjon av encelleprotein er mulig og det er utviklet mange kommersielle produksjonskonsepter, selv om slam ikke er et optimalt substrat. Næringssalter har et stort potensial for dyrking av grønnsaker og alger i akvaponiske systemer,

men har ikke fått kommersielt gjennomslag i Norge. Slam kan brukes til dyrking av sopp, men produsent må dokumentere matvaresikkerhet.

Børstemark er godt egnet for landbasert produksjon basert på slam som fôsubstrat, som kan gi ytterligere verdiskaping og utgjøre et viktig bidrag til å skape en bærekraftig utnyttelse av sidestrømmene fra landbasert oppdrett. Slam kan også være egnet som fôsubstrat for reker. Dagens regelverk tillater imidlertid ikke bruk av faeces som fôsubstrat til dyr eller insekter.

Det er et pågående revisjonsarbeid med å endre gjødselvareregelverket i Norge. Underliggende direktorater har i 2018 levert endring til forskrift om organisk gjødsel. Det er foreslått en positivliste for råvarer, men slam fra marine akvakulturanlegg står ikke på slik positivliste. I Forordning EF nr 1009/2009 angående CE-merket gjødsel er ikke marint fiskeslam tatt inn som aktuell råvare. For å kunne ta inn slam som råvare, er det nødvendig med en omfattende dokumentasjon av biosikkerhet endring av dagens regelverk.

2 Introduksjon

Sjømatnæringen opplever stor etterspørsel etter sine produkter som matkilde for protein, sunne fettsyrer og mikronæringsstoffer. Utfordringer med bærekraftig tilgang på råstoff til fôr for oppdrett er knyttet sammen med mulighetene for bruk av næringsstoffer i utslipp fra den samme virksomheten. Disse næringsstoffene kan knyttes sammen med eksisterende verdikjeder for matproduksjon for å ta vare på polysakkarider, proteiner og essensielle næringsstoffer. En drastisk endring og økning av verdens matproduksjon er påkrevd for å bære den kraftige befolkningsveksten. For å realisere Norges bioøkonomistrategi (Nærings- og fiskeridepartementet, 2016) kreves det løsninger for bærekraftig utnyttelse av biologiske ressurser med minimal miljøpåvirkning.

Utnyttelse av næringsstoffer fra dyreproduksjon i landbruket har vært en kjent metode i flere tusen år. Næringsstoffer i faeces fra tradisjonelt dyrehold brukes til å øke grasproduksjonen. Landbruket nyttiggjør seg næringsstoffer fra dyreproduksjonen til å øke egen avkastning. Tradisjonell ekstensiv landbasert akvakultur har samme tradisjoner der f.eks. karper oppdrettes i rismarker.

Problemstilling: Hvilke teknologiske og økonomiske lønnsomme verdikjeder kan utvikles for å løse avfallsproblemer fra RAS-anlegg, og hva er deres teknologiske modenhetsnivå?

Organisk materiale fra utslipp fra norsk akvakultur utgjør i dag en ressurs som brukes innenfor energi- og gjødselproduksjon og kan danne grunnlaget for nye verdikjeder, som fôringrediens for andre biologiske produksjoner. Organisk materiale kan fungere som fôr for akvatiske organismer som f.eks. børstemark og tanglopper, mens næringssalter kan danne grunnlaget for dyrking av grønnsaksaker og alger. Oppdrettsnæringen har tidligere lyktes å omgjøre dødfiskensilasje fra et problem til en ressurs. I tilknytning til lakseslakterier er det også etablert anlegg som utnytter de biologiske restproduktene fra prosessen. Organisk materiale og næringssalter fra oppdrett har potensiale til å bli utnyttet i større grad enn i dag og dette prosjektet har sett på hvilke muligheter som er for utnyttelse av næringsstoffene.

Landbasert resirkuleringsanlegg (RAS) tilbyr ikke bare god beskyttelse mot sykdommer og predatorer – det er i tillegg en ideell plattform for oppdrettsfisk eller krepsdyr. Vannet kan avkjøles, varmes opp, avsaltet eller bli tilsatt salt, alt etter behov for å oppnå optimal produksjon (Lekang, 2008; Timmons & Ebeling, 2013). Nyere utvikling og forskning innen fiskeoppdrett arbeider mot resirkulering for å beskytte miljøet og forhindre at ressurser går tapt (eksempelvis Miljøvernloven). Da det ikke er mulig å kontrollere avfallsstrømmene i tradisjonelle åpne oppdrettsanlegg i sjø, gir RAS-teknologien nettopp denne muligheten. Samtidig er en ikke kommet like langt med tiltak for gjenvinning av næringsstoffer. Potensialet for gjenbruk av avfallsstrømmer blir sjeldent kartlagt og utforsket. Dette er særlig tilfelle i Norge, som ikke er bundet av rigid EU-lovgivning på miljøområdet, hvor spesielt nitrogenutslipp fra RAS slippes ut i sjøen.

Landbaserte oppdrettsanlegg blir behandlet som landbasert industri iht. Forurensingsloven § 7 og 11. Nye landbaserte oppdrettsanlegg er i dag underlagt primærrensekrav for utslipp til resipient (område som mottar utslipp). Utslippstillatelser og renskrav for landbaserte oppdrettsanlegg har endret seg etter hvert som kravene fra myndighetene har økt, næringen har vokst og tatt i bruk ny teknologi. Gamle anlegg har ikke krav til rensing av avløpsvann, men kravene til rensing har gradvis blitt økt for nye anlegg. Etter årtusenskiftet ble renskravene basert på produsert mengde fisk og tildelt fôrmengde per år, kombinert med krav til renseseffekt. Nye utslippstillatelser er nå i større grad basert på utslippsmengde (nitrogen, fosfor og totalt organisk karbon) til resipient, men kravene kan variere fra fylke til fylke. Det er dermed

forskjeller i rensekrav mellom anleggene basert på når anleggene har fått innvilget utslippstillatelsen og den geografiske plasseringen. Før utslipp til resipient skal avløpsvannet renses mekanisk gjennom et primærrenseanlegg, det vil si at avløpsvannet skal renses i silanlegg, mekanisk sedimenteringsanlegg eller annen type renseanlegg som oppfyller rensekrav. For suspendert stoff er det krav om minst 50 % reduksjon og for organisk stoff er kravet minst 20 % reduksjon.

3 Metode

Kapittelet gir en kort innføring i prosjektets avgrensing, anvendt metode for gjennomføring av erfaringskartlegging og en oppdatert kunnskapsstatus for utnyttelse av organisk materiale og næringsalter fra oppdrett.

Prosjektet har konsentrert seg utslipp i form av slam og næringsalter fra oppdrett av laks. Det er ikke tatt hensyn til ensilasje fra lakseproduksjon og slakterier. Prosjektet har gjennomført en kartlegging av dagens anvendelse av organisk materiale og næringsalter fra oppdrett av laks i Norge. Det er gjennomført en kartlegging av hva næringsstoffene brukes til gjennom intervjuer med oppdrettsanlegg, avfallsselskaper, biogassanlegg og mulige aktører som kunne utnytte næringsstoffene.

Det er gjennomført en klassisk litteraturstudie, av både fagfellebehandlet litteratur og tilgjengelig grålitteratur i form av rapporter utgitt av vitenskapelige forskningsinstitusjoner med interne kvalitetssikringssystemer. Det er mangel på offentlige datakilder for behandling av organisk avfall fra oppdrett i dag, da slam fra oppdrettsanlegg faller mellom to kategorier i de offentlige registre. De mest aktuelle alternativene for utnyttelse av organisk materiale er kartlagt og for nye mulige anvendelser har det vært viktig å ikke begrenses av dagens regelverk omkring slik utnyttelse.

Det er kartlagt modenhet for teknologiske, biologiske og legale løsninger for de ulike utnyttelsene. Det er fokusert på å bevare næringsstoffene i utslippene av organiske materiale og næringsalter fra akvakultur i en sirkulær tankegang.

Det ble arrangert et arbeidsmøte 5. mai med om lag 100 deltagere om mulighetene for å utnytte organisk materiale og næringsalter fra akvakultur til industrielle anvendelser, gjødsel og nye bioproduksjoner som oppdrett av lavtrofiske akvatiske arter, insekter og grønnsakprodukter. En rekke innledere var invitert og det ble tilrettelagt for diskusjoner og muligheter for å utnytte ressursene fra oppdrett. Møtet er oppsummert i et eget referat som en leveranse i prosjektet og foredragene er tilgjengelig på nettsiden (<http://www.sintef.no/workshop1205>) og på hjemmesiden til Fiskeri og havbruksnærings forskningsfinansiering.

Gjennom prosjektperioden er det arbeidet aktivt for å skape interesse og oppmerksomhet omkring nye næringsmuligheter gjennom utnyttelse av næringsstoffer fra oppdrett. Dette er gjort gjennom foredrag og deltagelse på medlemsmøte for Nordnorsk havbrukslag 9.1.2020 med i overkant av 400 deltagere, og en sesjon på konferansen TEKSET 2020 13.2.20 ble brukt til å presentere muligheter for utnyttelse av næringsstoffene fra akvakultur. Innleggene er tilgjengelige på www.tekset.no.

4 Næringsstoffer fra oppdrett av fisk

Gjennom fiskens metabolisme omsettes fôr til biomasse, energi og ekskresjonsprodukter. Disse skilles ut over gjeller, skinn, faeces og urin. Ekskresjonsprodukter fra fisken består av næringsalter og partikulært materiale. Det er i hovedsak tre typer organisk eller biogent utslipp fra oppdrettsanlegg; partikulært materiale, samt oppløst organisk og uorganisk materiale. De løste stoffene består både av organiske og uorganiske forbindelser som vil virke som næringsalter. Det partikulære utslippet kommer fra fôrspill og faeces. Løste uorganiske næringsstoffer er næringsalter som skilles ut ved ekskresjon. Løste organiske næringsstoffer er molekyler og partikler $<0,2 \mu\text{m}$ som inneholder nitrogen eller fosfor. Tilførselen skjer primært ved lekkasje fra fekalier og fôrspill. Løste uorganiske næringsstoffer fra fôrspill er sannsynligvis lett utnyttbart for bakteriene i vannet, mens det som kommer fra fekalier er fordøyd og har lavere biologisk tilgjengelighet. Løst nitrogen og fosfor representerer en mindre fraksjon av utslippene, stoffene er stabile og har generelt lang omsetningstid i det marine næringsnettet (Anon, 2011).

Ekskresjonsproduktene skilles ut til omgivelsene over gjellene, via avføring og løses delvis opp i vann. I tillegg vil fôrspill fra produksjonen utgjøre en spredning av næringsstoffer fra oppdrett til omgivelsene. De metabolske prosesser hos fisk og ekskresjonsproduktene anses godt kjent og er beskrevet i litteraturen.

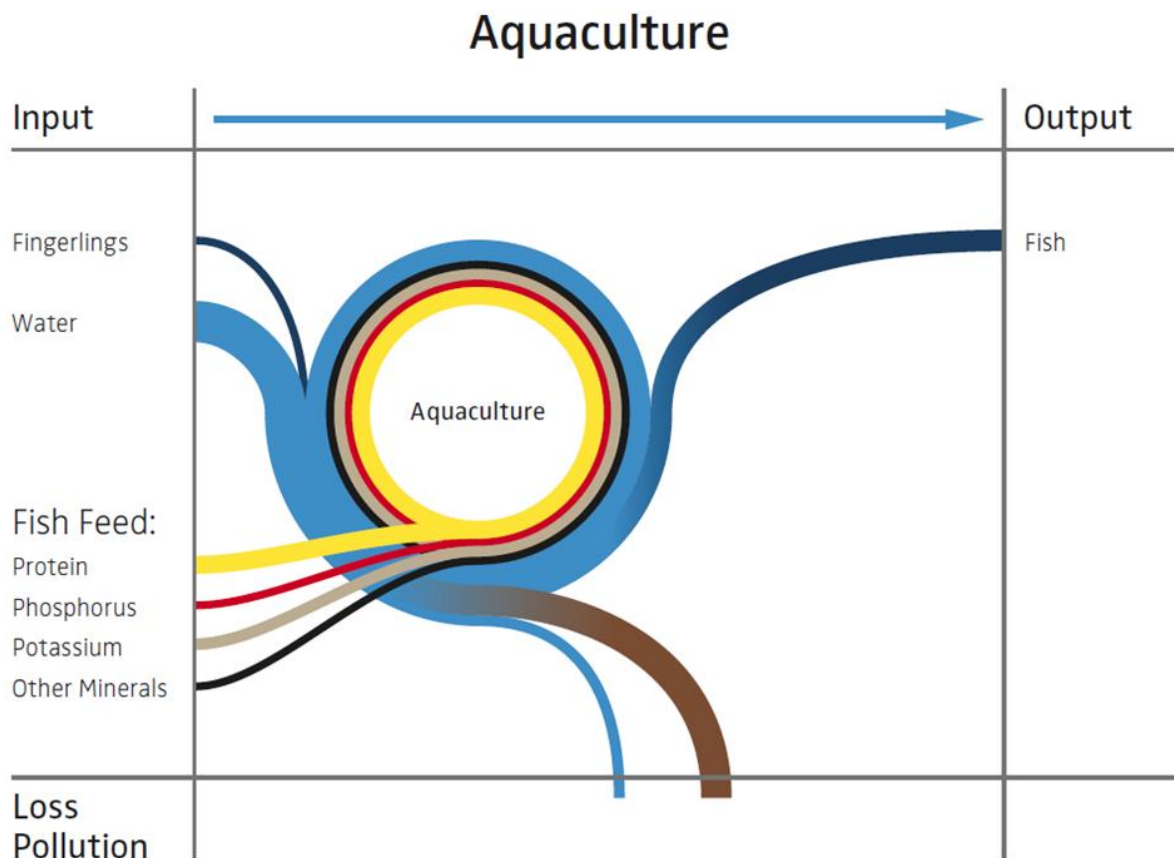
Avfallsstrømmer kan deles i to kategorier (figur 1):

1. Partikulært materiale: Tørrstoff som slam som blir filtrert ut av systemet med mikroskjermfiltre (for eksempel trommelfilter) (Espinal & Matulić, 2019).
2. Næringsalter: oppløste næringsstoffer med en høy andel av nitrogen.

4.1 Partikulært materiale fra oppdrett

Partikulært materiale fra filtrert fra avløpsvann eller produksjonsvann fra oppdrett av fisk består av fôrrester og faeces fra fisken og benevnes ofte som slam. Ved måling av partikulært materiale i vann benevnes det som suspendert stoff. Slammet inneholder vanligvis 1–10 % totalt suspendert tørrstoff (TS). Sammensetningen avhenger helt av fôret som brukes i oppdrettsanlegget. Mengde fôrspill, fôrets sammensetning, teknisk kvalitet og teknologi for oppsamlinga av slam vil avgjøre slammets næringsinnhold. Plantebasert fôr inneholder ofte høyere andeler av cellulose og hemicellulose enn det en finner i ikke-plantebasert fôr (dvs. fiskemelbasert fôr). Slammet inneholder også høye andeler fosfat (Goddek mfl. 2018), som i likhet med olje eller kull er en begrenset ressurs (Beardsley, 2011; Sverdrup & Ragnarsdottir, 2011). Dette betyr at store utslipp av fosfor i naturen ikke bare fører til unødvendig sløsing med ressurser, men kan i noen tilfeller også føre til eutrofiering (Joyce m.fl., 2019). Det finnes ikke dokumentasjon fra den totale flyten av næringsstoff fra fôr i settefiskanlegg (Aas & Åsgard 2019), men det er gjort en rekke forskjellige analyser av innholdet i slam og avløpsvann fra settefiskanlegg (Gebauer & Eikebrokk 2004, 2006; del Campo m.fl., 2010, Cabell m.fl., 2019; Brod m.fl., 2017; Ytrestøyl m.fl., 2016; 2013; Rosten m.fl., 2013).

Ytrestøyl m.fl. (2016) har analysert og karakterisert slam fra tre kommersielle settefiskanlegg som ble samlet inn hver måned gjennom ett år. Resultatene viser et energiinnhold på 20 MJ/kg tørrstoff, 5–7 % nitrogen og 14–18 % fett og 11–19 % akse i gjennomsnitt på tørrstoffbasis gjennom året. Det var ikke forskjell mellom RAS-anlegg og gjennomstrømningsanlegg. Det ble antatt at fôrspill utgjorde 50 % av slammet. Det ble ved bruk av kommersielle renseanlegg fanget 0,14, 0,07 og 0,07 kg slam per kg utfôret mengde fôr. Dette samsvarer med 0,12 slam per kg utfôret mengde fôr (Aas m.fl., 2019). Innholdet av tungmetaller, polyklorertebifenyl (PCB) og klorerte pesticider var så lavt at det ikke utgjorde noen risiko for bruk som jordforbedringsmiddel, men innholdet av sink og til en viss grad kadmium gjorde at slammet falt inn under kategori 1 i gjødselvereforskriften.



Figur 1. Oversikt over tilførsler, utganger og utslipp i et resirkuleringsanlegg for fiskeoppdrett, der den brune strømmen representerer partikulært materiale (Goddek m.fl., 2019).

4.2 Næringsalter fra oppdrett

Utslipp fra oppdrett i form av næringsalter omfatter hovedsakelig nitrogen i form av ammonium, nitrat, nitritt og fosfor (fosfat) i form av løste uorganiske forbindelser som dannes under fiskens metabolisme, i biologiske renseanlegg for landbaserte resirkulerende oppdrettsystemer (RAS-anlegg), og ved oppløsning av faeces og fôrrester i vann. Organisk nitrogen brytes ned til mineralsk nitrogen.

Fisken skiller ut NH_3 (ammoniakk) og NH_4^+ (ammonium) over gjellene til vannmassene. Ammoniakk og ammonium står i likevekt, som reguleres av pH, temperatur og salinitet. I sjø vil mesteparten forefinnes som ammonium. Summen av ammoniakk og ammonium benevnes totalt ammonium nitrogen, TAN. I åpne merdbaserte oppdrettsystemer spres og fortynnes disse næringssaltene raskt i vannmassene. For lukkede oppdrettsystemer er det avgjørende å holde konsentrasjonen av ammoniakk på et svært lavt nivå for å unngå negative effekter på fisk. For lukkede akvakultursystemer med gjennomstrømmingsteknologi slippes TAN ut med avløpsvannet i lave konsentrasjoner. Ved bruk av lukkede resirkulerende akvakultursystemer er det nødvendig med biologiske filter som omdanner TAN til NO_2^- (nitritt) og videre til NO_3^- (nitrat). Fosfor finnes hos fisk som fosfat (PO_4), enten som uorganisk fosfat eller i organisk form i DNA, RNA eller ATP, fosforlipider i celledmembraner eller kalsiumfosfat i tenner og skjelett. Fosfat skiller ut av fisken i urin eller som ufordøyd fosfor i faeces.

Aas og Åsgård (2019) har målt konsentrasjoner N-ammonium, N-nitritt og N-nitrat i produksjonsvannet til tre settefiskanlegg, vist i tabell 1 og viser hvilke konsentrasjoner en kan forvente seg i RAS-anlegg.

Tabell 1. Gjennomsnitt, minimum- og maksimumsverdier (mg/l) av daglig målte N-forbindelser i vannet i tre RAS-anlegg (Aas og Åsgård 2019).

	RAS 1			RAS 2			RAS 3		
	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N
Snitt	0,580	0,210	17,2	0,377	0,167	13,0	0,893	0,204	15,9
Minimum	0,014	0,012	3,5	0,024	0,014	1,7	0,042	0,042	1,7
Maksimum	0,987	0,399	29,9	1,942	0,557	129	2,32	0,809	57

Fosfat skilles ut av fisken i urin eller som ufordøyd fosfor i faeces, men mesteparten av utslipp av fosfor stammer fra fosfor i oppløst fôr og faeces og behandles under neste avsnitt.

4.3 Total mengde utslipp av næringsstoffer fra norsk oppdrett

I dette prosjektet er det beregnet et utslipp fra norsk oppdrett basert på assimileringmetoden, nærmere beskrevet i av (Broch & Ellingsen 2020) Delrapport 1 Kvantifisering av utslipp og vist i tabell 2.

Faeces og fôr som ikke blir spist antas å slippes ut som partikulært organisk materiale, og vi følger karbonet, nitrogenet og fosforet gjennom henholdsvis partikulært organisk karbon (POC), partikulært organisk nitrogen (PON) eller partikulært organisk fosfor (POP). Ekskresjonsprodukter antas å slippes ut som oppløste uorganiske forbindelser: oppløst uorganisk karbon (DIC (CO₂)), oppløst uorganisk nitrogen (DIN) eller oppløst uorganisk fosfor (DIP). For laks og ørret slippes DIN hovedsakelig ut i form av ammonium (NH₄⁺) og ammoniakk (NH₃), mens DIP slippes ut i form av f.eks. fosfat (PO₄³⁻). En viss andel av POC, PON og POP løses opp til oppløst organisk materiale, oppløst organisk karbon DOC, oppløst organisk nitrogen DON og oppløst organisk fosfor DOP.

Tabell 2. Utslippsberegninger fra norsk oppdrett av laks og ørret fra delrapport 1 i tonn.

Type produksjon	Karbon (unntatt CO ₂)	Nitrogen	Fosfor
Matfiskproduksjon	223 845	66 463	13 972
Settefisk	3 219	925	149
Totalt	227 064	67 338	14 121

4.3.1 Mengde partikulært materiale fra landbasert oppdrett

De største mengdene næringsstoffer fra oppdrett som fanges og tas vare på i dag foreligger som partikulært materiale (slam) fra landbasert lakseproduksjon i settefiskfasen. Alle nye oppdrettsanlegg bygget på land etter må ha en utslippstillatelse etter forurensingsloven og rense utslippene i henhold til den. Utslippstillatelsen kan være utformet som en tillatelse som angir hvor stor mengde fôr som er lov å bruke per år, absolutte utslippsmengder per år (nitrogen og fosfor) eller som prosentvis utslippsreduksjon av suspendert stoff, biokjemisk oksygenforbruk (BOF) og kjemisk oksygenforbruk (KOF). Dette medfører at nye landbaserte oppdrettsanlegg basert på gjennomstrømmingsteknologi må rense avløpsvannet, før det slippes ut i sjø. Landbaserte oppdrettsanlegg basert på RAS-teknologi må rense produksjonsvannet kontinuerlig for partikulært materiale for å holde en tilstrekkelig god vannkvalitet i produksjonen av fisk. Disse to faktorene fører til at slam produseres på anleggene og må behandles etter de regler som gjelder for organisk avfall.

Det samles opp noe slam fra forskningsanlegg og utviklingskonsesjoner for lukkede og semilukkede matfiskanlegg i sjø. Dette utgjør foreløpig en ubetydelig del av de totale mengdene partikulære utslipp fra norsk lakseoppdrett og slammet inneholder også salt fra sjøvannet. Det er enkelte anlegg som tester ut lukkede og semilukkede oppdrettsanlegg i sjø og noen av disse samler opp slam fra anleggene. Det ble i 2019 levert i underkant av 1 000 tonn vått slam (TS 8–25 %) fra sjøbasert lakseproduksjon til biogassanlegget til Biokraft på Skogn (pers med. T. Hyldmo, Biokraft).

Basert på produsert biomasse per år i norsk landbasert produksjon av laks er det mulig å estimere produksjonen av slam fra settefiskproduksjon av laks i Norge. Fiskeridirektoratet offentliggjør statistikk over antall solgte settefisk i Norge etter art og fylke per år. Det finnes ikke en offentlig statistisk oversikt over gjennomsnittlig størrelse for settefisk ved utsett i sjø eller fôrforbruk for settefiskproduksjon. Det rapporteres fra og med 2018 antall settefisk over 250 gram, mens det ikke er oppgitt størrelse for fisk under 250 gram. Det er dermed ikke mulig å fastslå med sikkerhet hvor stor biomasse som produseres i settefiskfasen i landbaserte oppdrettsanlegg i Norge. Det er publisert tall på 24 000 tonn med snittvekt på 80 gram (Ytrestøl m.fl., 2016). Produksjon stor smolt og postsmolt er en strategisk omlegging av produksjonen av laks i Norge for å redusere tid fisken står i sjø og dermed reduserer risiko. Det er derfor riktig å anta at snittvekt og dermed biomasseproduksjon har økt de siste årene.

Det er bygget mange settefiskanlegg i Norge de siste 15 årene og produksjonskapasiteten per år på disse nye settefiskanleggene er på over 50 000 tonn per år (Craze m.fl., 2020). Dette omfatter i all hovedsak nye RAS-anlegg, selv om enkelte anlegg bygges som gjennomstrømningsanlegg, med rensing av vannet for CO₂. I tillegg kommer produksjonskapasiteten på de eldre gjennomstrømningsanleggene. Totalt er det om lag 120 settefiskanlegg i drift og det ble i 2019 solgt 398 millioner settefisk i Norge, se tabell 3. Dersom vi antar at produksjonskapasiteten er 10 000 tonn per år på eldre anlegg og 50 000 tonn på nybygde settefiskanlegg vil den totale produksjonskapasiteten være om lag 60 000 tonn per år. Dette gir en snittvekt for settefisk på om lag 150 gram ved en produksjon på 398 millioner settefisk per år.

Teoretisk slamproduksjon beregnes basert på biomasseproduksjon, fôrfaktor, og teoretiske omregningsfaktorer kjent fra litteraturen. Slike omregningsfaktorer er kjent fra settefiskanlegg og det er antatt lik for slamproduksjon matfiskoppdrett i sjø. Alle RAS-anlegg og nybygde gjennomstrømningsanlegg har krav om rensing av avløpsvannet. Det er gjort flere studier på faktisk fanget mengde slam fra moderne landbaserte oppdrettsanlegg. 0,14 0,07 og 0,07 kg slam per kg utfôret mengde (Ytrestøl m.fl., 2016) og 0,119 kg av utfôret mengde blir slam tørrstoff (Aas & Åsgård, 2019).

I denne beregningen er det satt en gjennomsnittlig størrelse på 150, 120 og 80 gram ved utsett, en fôrfaktor på 1 og en slamproduksjon på 1,5 ganger utfôret mengde med 10 % tørrstoffgrad (Blytt m.fl., 2011). Dette omregnes til en tørrstoffgrad på 90 %. Det gir en biomasseproduksjon i norsk settefiskproduksjon av laks og regnbueørret på om lag 60 000, 48 000 og 32 000 tonn per år og en slamproduksjon på 8 964, 7163 og 4775 tonn slam.

Tabell 3. Teoretisk produksjon av slam fra laks i landbasert settefiskanlegg i Norge, basert på tre forskjellige estimat for gjennomsnittlig størrelse ved utsett i sjø (www.fiskeridirektoratet.no).

Produksjon laks og regnbueørret (antall)	Produksjon per år (tonn biomasse)	Slamproduksjon (90 % tørrstoff, tonn)
397 941 000	59 691 (150g)	8 954
397 941 000	47 753 (120g)	7 163
397 941 000	31 835 (80g)	4 775

Ytrestøl m.fl. (2016) beregnet 14 800 tonn slam fra en biomasseproduksjon på 30 000 tonn settefisk, mens Aas og Åsgård (2017) har beregnet produsert mengde slam basert på fôrforbruk, fordøyelighet og fôrspill og kommet frem til en produksjon av slam på 10 716 tonn per år, se tabell 4.

Tabell 4. Estimert årlig mengde tørrstoff i slam fra norsk smoltproduksjon i ferskvann (Aas & Åsgård, 2017).

	Tørrstoff
Innhold i fôr, %	94
Tilsynelatende fordøyelighet, %	75
Mengde omsatt, tonn	22.560
Mengde spist, tonn	15.792
Mengde i fôrspill, tonn	6.768
Mengde i faeces, tonn	3.948
Total mengde i slam, tonn	10.716

For matfiskoppdrett av laks og ørret har Aas og Åsgård (2017) beregnet at det slippes ut 535 412 tonn slam fra lakseoppdrett i sjø i Norge fordelt på 355 602 tonn faeces og 179 540 tonn fôrspill, se tabell 5. Tallene er basert på en årlig produksjon på om lag 1,3 millioner tonn laks og 1,5 millioner tonn fôr omsatt, en økonomisk fôrfaktor på 1.15 og en biologisk fôrfaktor på 1.0. Det er også beregnet et fosforutslipp på 9 096 tonn per år i faeces og fôrspill.

Tabell 5. Estimert årlig mengde tørrstoff i slam fra sjøfasen i norsk lakseproduksjon (Aas & Åsgård 2017)

	Tørrstoff
Innhold i fôr, %	94
Tilsynelatende fordøyelighet, %	70
Mengde omsatt, tonn	1.364.880
Mengde spist, tonn	1.185.340
Mengde i fôrspill, tonn	179.540
Mengde i faeces, tonn	355.602
Total mengde i slam, tonn	535.142

Mengde slam produsert fra norsk oppdrett er her gjennomgått for å gi et overslag over mengden slam som produseres fra landbasert og sjøbasert oppdrett. Kapasiteten innenfor settefiskproduksjonen er ventet å øke ytterligere fremover. Det er mange anlegg under planlegging og utbygging (Craze m.fl., 2020) som vil gi en økning av produksjonskapasiteten på over 30 000 tonn per år frem mot 2025, dersom alle anleggene realiseres. Det vil dermed være ventet en total produksjonskapasitet på om lag 90 000 tonn settefisk av laks og regnbueørret i 2025.

Det er gitt konsesjoner for landbasert matfiskproduksjon av laks på 182 622 tonn laks per år (www.fiskeridirektoratet.no), og etter hvert som disse bygges og kommer i drift vil slamproduksjonen øke fra oppdrettsanlegg som opereres med saltvann. Landbaserte matfiskanlegg må følge samme regler for rensning av avløpsvann som settefiskanlegg, redegjort for tidligere. Fredrikstad Seafood produserer matfisk av laks på land og har startet slaktning. Andfjord Salmon på Andøya og Salmon Evolution på Indre Harøy i Møre og Romsdal har startet byggingen av sine anlegg. I tillegg har flere andre prosjekter kunngjort oppstart av bygging og det er flere pågående søknadsprosesser for etablering av nye landbaserte anlegg. Det er vanskelig å anslå hvor stor mengde slam som vil bli produsert fra landbaserte matfiskanlegg for laks i årene fremover. Dersom alle anleggene realiseres og produserer biomasse lik omsøkt maksimal produksjon, vil det teoretisk produseres 27 300 tonn salt slam med TS 90 %, basert på Blytt m.fl. (2011).

4.3.2 Mengde næringsalter fra oppdrett

Næringsalter fra merdoppdrett i sjø eller gjennomstrømningsanlegg på land består i all hovedsak av nitrogen som TAN og fosfor som fosfat. For RAS-anlegg vil TAN i stor grad bli omdannet til nitrat før det slippes ut. Mengden produsert TAN produsert i fisk kan beregnes med bakgrunn i proteininnholdet i fôr. I gjennomsnitt inneholdt laksefôr i 2016 93,4 % tørrstoff, 35,6 % protein, 33,5 % fett, 11,0 % karbohydrater og 1,3 % fosfor (Aas m.fl. 2019).

For enkelhets skyld kan man si at 10 % av protein spist av Atlantisk laks blir til TAN (Timmons m.fl., 2001). I denne beregningen er det satt en gjennomsnittlig størrelse på 150, 120 og 80 gram ved utsett, en førfaktor på 1, en utfôret mengde lik biomasseproduksjonen, et proteininnhold i fôret på 35,6 % og en TAN-produksjon på 10 % av proteininnholdet. Det gir en TAN-produksjon i norsk settefiskproduksjon av på 2 125, 1 700 og 1 133 tonn, avhengig av størrelse på settefisk ved utsett.

Tabell 6. Produksjon av totalt ammonium nitrogen (TAN) fra norsk settefiskproduksjon.

Produksjon av laks og regnbueørret (antall mill.)	Utfôret mengde per år (tonn biomasse)	TAN produsert per år (tonn)
397 941	59 691	2 125
397 941	47 753	1 700
397 941	31 835	1 133

For landbaserte gjennomstrømningsanlegg renses ikke avløpet for nitrogenforbindelser som TAN. For et RAS-anlegg omdannes TAN til nitritt gjennom nitrifikasjonsprosessen. Forholdet mellom nitrogenmolekylet i prosessen er 1:1 og vil få dannet samme antall TAN-N til NO₃⁻-N.

Ett RAS-anlegg med en produksjonskapasitet på 2 000 tonn fisk per år vil med en førfaktor på 1, proteinmengde i fôret 35,6 %, en TAN produksjon på 10 % av proteininnholdet i fôret produsere 70 tonn N-TAN og dermed om lag 70 tonn nitritt per år.

For fosfor er det ikke gjennomført egne beregninger i denne rapporten, men Aas og Åsgard (2017) har estimert en produksjon av fosfor på 225 tonn per år fra norsk settefiskproduksjon, se tabell 7 samt kapittel 5.3 Gjenvinning av fosfor fra oppdrett.

Tabell 7. Estimert årlig mengde fosfor i slam fra norsk smoltproduksjon i ferskvann (Aas & Åsgard 2017).

	Fosfor
Innhold i fôr, % 'as is'	1,3
Innhold, % i tørrstoff	1,4
Tilsynelatende fordøyelighet, %	40
Mengde omsatt, tonn	312
Mengde spist, tonn	218
Mengde i førspill, tonn	94
Mengde i faeces, tonn	131
Total mengde i slam, tonn	225 ¹

1) Tilsvarende mengden fosfor som spredes på 150 000 mål landbruksareal i Norge årlig.

4.3.3 Teknologi for avvanning og tørking av slam

For landbasert oppdrett skal avløpsvannet for utslipp til resipient renses mekanisk gjennom et primærrensanlegg, dvs. at avløpsvannet skal renses i silanlegg, mekanisk sedimenteringsanlegg eller

annen type renseanlegg som oppfyller rensekrav. For suspendert stoff er det krav om minst 50 % reduksjon og for organisk stoff (BOF og KOF) er kravet minst 20 % reduksjon.

I RAS-anlegg renses vannet kontinuerlig for partikulært materiale og for ammoniakk. Partikulært materiale består både av fôrspill og faeces, som skilles ut i filteranlegg og benevnes som slam. Hvilken måte slam behandles på vil avgjøre hvilke utnyttelser som kan velges i etterkant. Vanligvis oppkonsentreres og avvannes slam til om lag 10–20 %. Tykkflytende slam vil lett gå i forråtnelsesprosesser og gir raskt utfordringer med lukt og må derfor raskt transporteres til behandlingsanlegg eller tørkes ytterligere. Dersom slam tørkes på anlegget gjennomgår det en tørkeprosess som bringer slam opp i en tørrstoffgrad på over 85–90 %. Slammet er da tørt, i pulverform og lagringsstabil. Dette gjør mulighetene for rimelig transport lettere, da det kan utnyttes returlastkapasitet og/eller sørge for full utnyttelse av transportkapasitet. Det er flere leverandører som leverer slambehandlings- og tørkeanlegg og konkurransen på området er god. Det finnes også leverandører som leverer hele slambehandlingsprosessen og avhending som en tjeneste og sørger for drift og investering i utstyr mot et fast vederlag. For å kunne bruke tørket slam til organisk gjødsel må slammet hygeniseres i tørkeprosessen.

Cambell m.fl. (2019) har i prosjektet Fish2Farm undersøkt kvaliteten på tørket slam fra settefisk som gjødsel og hvordan kvaliteten påvirkes av ulike behandlingsteknologier for tørking av slammet. Resultatene tyder på en kraftig oppkonsentrering av nitrogen og fosfor under avvanning/filtrering av fiskeslam og deretter tap under tørking, særlig for mineralsk nitrogen. Om lag 62–71 % av nitrogen i fiskeslam etter filtrering er i form av organisk nitrogen, mens de resterende 29–38 % forefinnes som mineralsk nitrogen. For mineralsk nitrogen (NH_4^+ og NO_3^-) ble konsentrasjonen redusert med mellom 90–98 % fra råslam til tørket slam. Fiskeslam er godt egnet som nitrogengjødsel, men det vil være en fordel om det tørkes på en måte som hindrer tap av mineralsk nitrogen fra råslammet. Det er prisen på nitrogen som, i større grad enn prisen på fosfor, styrer gjødselprisen.

Offentlige myndigheter krever at det gjennomføres måleprogram på oppdrettsanlegget for å oppfylle de pålagte rensekrav, som omfatter minst 50 % reduksjon for suspendert stoff og 20 % for organisk stoff (BOF og KOF). Denne renseeffekten omfatter selve renseanlegget for avløpsvannet og vannet skal måles før og etter renseanlegget. Det har vist seg vanskelig å dokumentere denne renseeffekten for landbaserte gjennomstrømningsanlegg, da vannmengdene er svært store og konsentrasjonene av suspendert stoff er svært lave og ofte under deteksjonsgrense for de akkrediterte målemetodene. RAS-anlegg har i de fleste fylker fått godkjent bruk av massebalanseprinsippet for dokumentasjon av rensekravet, der et regnskap over massebalansene i anlegget (fôr inn i anlegget, produsert fiskebiomasse og oppsamlet slam) kan dokumentere rensekravet (Hilmarsen, 2020).

5 Utnyttelse av næringsstoffer fra oppdrett

5.1 Utnyttelse av næringsstoffer fra oppdrett i dag

Oppdrettsanlegg med rensing av avløpsvann og/eller produksjonsvann i RAS eller lukket anlegg i sjø, må velge type slambehandling i anlegget og i hvilken grad slam skal avvannes og tørkes lokalt. Hvor mye slam skal avvannes og eventuelt tørkes avgjøres av hvilke muligheter det finnes i nærheten av anlegget for avhending av oppsamlet slam. Oppdrettsanlegg nært biogassanlegg eller komposteringsanlegg kan i større grad levere slam med lav tørrstoffgrad (10–20 %) enn anlegg med lange transportveier og dertil kostbar transport. Da velges det ofte å tørke slammet til over 90 % for å gjøre slam lagringsstabil og redusere transportkostnadene. Slik tørking krever installasjon av tørkeanlegg lokalt. Slike anlegg har vist seg utfordrende i driftsfasen, krever dedikert personellressurser og er en energikrevende. Både tørkeanlegg og forretningsmodeller utvikles, og konkurransen i leverandørmarkedet er god.

Oppsamlet slam fra oppdrettsanlegg går i dag til:

1. Biogassproduksjon som vått slam (TS 10–25 %) der biorest brukes til gjødselproduksjon.
2. Produksjon av organisk gjødsel av tørket slam.
3. Kompostering av vått slam på godkjent anlegg og produksjon av jordprodukter.

5.1.1 Biogass og gjødsel

Det er undersøkt mottak av vått slam til biogassanleggene til Biokraft på Skogn, Ecopro i Trønderlag, IVAR i Stavanger og Fortum. I tillegg har Cermaq installert ett småskala biogassanlegg i direkte tilknytning til sitt settefiskanlegg på Forsan i Steigen. Det er ikke en fordel for biogassprodusentene å motta tørket slam da det støver i prosess og må vannes ut igjen før det kan brukes til biogassproduksjon.

Total mengde slam til biogassproduksjon med tørrstoffgrad > 90 % totalt utgjør 1 200–1 800 tonn for 2019, se tabell 8. Biogasselskapene rapporterer om økende mengder for 2020. Biorest fra biogassanleggene brukes til produksjon av gjødsel.

Tabell 8. Mottak av slam til biogassanlegg fra oppdrettsanlegg i 2019.

Biogassanlegg	Vått slam (tonn TS 8-25) fra ferskvann	Vått slam (tonn) Saltvann	Tørt slam TS >90 % tonn
Biokraft Skogn	8–10 000	1 000	1000-1500
Ecopro	4–500		50
IVAR	1 123		67
Cermaq Forsan			180
Totalt		1000	1297-1797

5.1.2 Slam til produksjon av organisk gjødsel

Fiskeslam er ikke et fullverdig gjødselprodukt alene. Fiskeslam vil som regel ha for mye fosfor i forhold til nitrogen, slik at man må ha en annen kilde til nitrogen. En slik kilde kan være mineralgjødsel eller et organisk produkt med høyt nitrogeninnhold, eventuelt også kalium, i forhold til fosfor. Ifølge Eva Brod ved NIBIO er "fiskeslam ikke alene et fullverdig gjødselprodukt da nitrogen:fosfor ratio er for lav. I tillegg er det lavt kaliuminnhold, variabel nitrogenerffekt og lavere fosforeffekt enn husdyrgjødsel og mineralgjødsel". Fiskeslam fra akvakultur med sjøvann eller høy innblanding av sjøvann kan også inneholde klorid. Klorid er skadelig for mange av våre vanlige matvekster. Det finnes plantearter som tåler mer klorid, men disse er så langt ikke vanlige i matproduksjon i Norge. Utnyttelse av slam fra oppdrett må derfor kombineres med andre kilder for å brukes som gjødsel.

IVAR IKS og Grønn vekst as (tidligere HØST verdien i avfall as) utviklet en verdikjede for produksjon av organisk gjødsel (Minorga) basert på biorest fra biogassproduksjon og tørket slam fra oppdrett. Slam fra tørkes og hygeniseres på oppdrettsanlegget og må være garantert smittfritt. Førleverandøren Skretting tar

så slammet i retur etter levering av fôr til settefiskanleggene og det fraktes til Stavanger, der det inngår i produksjon av Minorgagjødsel. Tørket fiskeslam blandes med andre fraksjoner og tilsettes N og K for å få et fullverdig gjødselprodukt. Slammet utgjør om lag 10 % av ferdig gjødselprodukt. Erfaringer viser at kvaliteten på slammet fra oppdretter varierer både fysisk og kjemisk. Minorgagjødsel eksporteres i neste omgang til Vietnam, hvor det er et stort marked for organisk gjødsel med høyt fosforinnhold, og prisen er høyere enn i Norge. Terramarine AS har overtatt Grønn vekst AS sin avdeling i Vietnam og Asia, som selger jordprodukter produsert i Norge. Denne eksporten tilfører organisk materiale og fosfor til landbruket i Vietnam, der jorda er som tropisk jord generelt, fattig på humus og annet organisk materiale, til forskjell fra jord i Norge som generelt har mer humus. Transport med skip til Vietnam nytter godt av at varestrømmen den veien er lav og kostnadene tilsvarende. Det ble for 2019 brukt mellom 500–600 tonn tørket slam i produksjon av Minorgagjødsel, noe som tilsvarer om lag 5 000 tonn vått slam (pers med. T.N. Ugeland).

Det er gjennomført få studier og feltforsøk på bruk av slam fra oppdrett som gjødsel og det er mange problemstillinger knyttet til uønskede organiske stoffer, saltinnhold, spredning og aksept hos forbruker. Slam er en stor ressurs totalt sett, men det betyr nødvendigvis ikke at næringsstoffet er tilgjengelig plantene. Det foregår flere prosjekter som studerer slam til gjødsel som FishBash (Havbruk2 NFH 2019–2022), Kretsløp SIS (Landbruksdepartementet 2017–2021), MindP (Bionær 2017–2021) og Magigold (Matfondmidlene 2019–2021).

5.1.3 Kompostering til jordprodukter

Kompostering har vært og er mye brukt som løsningen for avhending av slam fra opprett av fisk. Det finnes en rekke avfallsmottak langs kysten som har komposteringsanlegg og som har tatt imot vått slam fra oppdrettsanlegg. Når slam fra havbruk tas inn hos avfallsanlegg, føres ikke dette som egen kategori i de offentlige system. Det har derfor ikke vært mulig å få data på hvor mye slam fra oppdrett som er levert til kompostering. Kompostering defineres som er biologisk nedbryting av organisk avfall under kontrollerte aerobe forhold.

Mye av det som tilbys til hagemarkedet i dag er jordprodukter som inneholder en stor andel torv. Uttak av torv tørker ut myrer og tilfører dermed oksygen som bidrar til å frigjøre CO₂. Dette er ikke ønskelig og direktøren i Miljødirektoratet har uttalt: "Det beste for naturmangfold og klima er å fase ut uttak og bruk av torv raskt, men vi ser at profesjonelle dyrkere trenger noe tid på å omstille seg og at det må utvikles bærekraftige erstatningsprodukter. En god start vil være å ikke åpne for uttak av torv på nye arealer." Fiskeslam kan derfor i større eller mindre grad være en fosforkilde i jordblandinger uten torv, samtidig som det organiske materialet kan bidra til mindre uttak av torv.

Et utvalg av produsenter av jord – listen er ikke fullstendig:

- Jordfabrikken AS i Verdal
- Equus <https://equus-garden.no/>
- Lindum <https://lindum.no/vi-tilbyr/jord-og-kompost/>
- Høst med datterselskap Grønn Vekst <https://www.høst.no/>, <https://www.gronnvekst.no/>

5.2 Biogassproduksjon

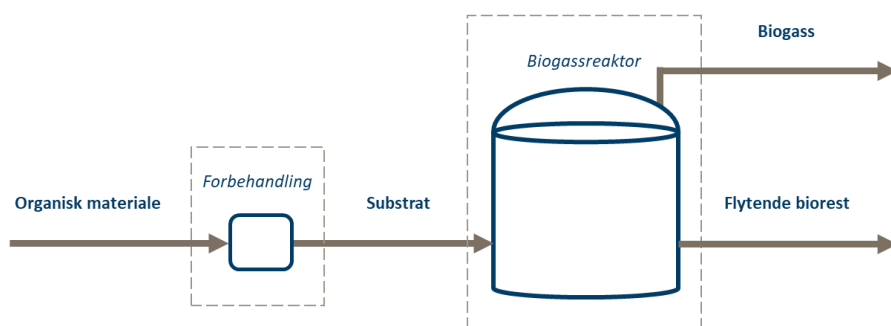
5.2.1 Bakgrunn

Biogass er en fornybar energikilde som dannes ved anaerob (oksygenfri) nedbrytning av organisk materiale. Gassen består hovedsakelig av metan og karbondioksid, og kan benyttes til ulike formål slik som direkte varmeproduksjon, strøm- og varmeproduksjon eller oppgraderes til drivstoffkvalitet. Biogass kan produseres fra en rekke ulike organiske materialer, og mengden biogass som produseres vil avhenge av ulike faktorer.

Biogass produseres hovedsakelig basert på avløpsslam og matavfall i Norge, men det er et stort potensial for å i større grad utnytte annet organisk materiale til biogassproduksjon (Sletten & Maass, 2013). Akvakulturnæringen har store mengder organisk materiale i form av slam (fekalier og fôrrester), og i 2013 gjennomførte Ytrestøyl m.fl. (2013) en pilotstudie som viste at biogassproduksjon basert på fiskeslam gir et svært godt gassutbytte. I dag er det flere industrielle biogassanlegg som mottar og benytter slam som råvare, og Sterner har utviklet et småskala biogassanlegg som Cermaq har installert i tilknytning til sitt settefiskanlegg i Steigen (Witzøe, 2019).

5.2.2 Biogassprosessen

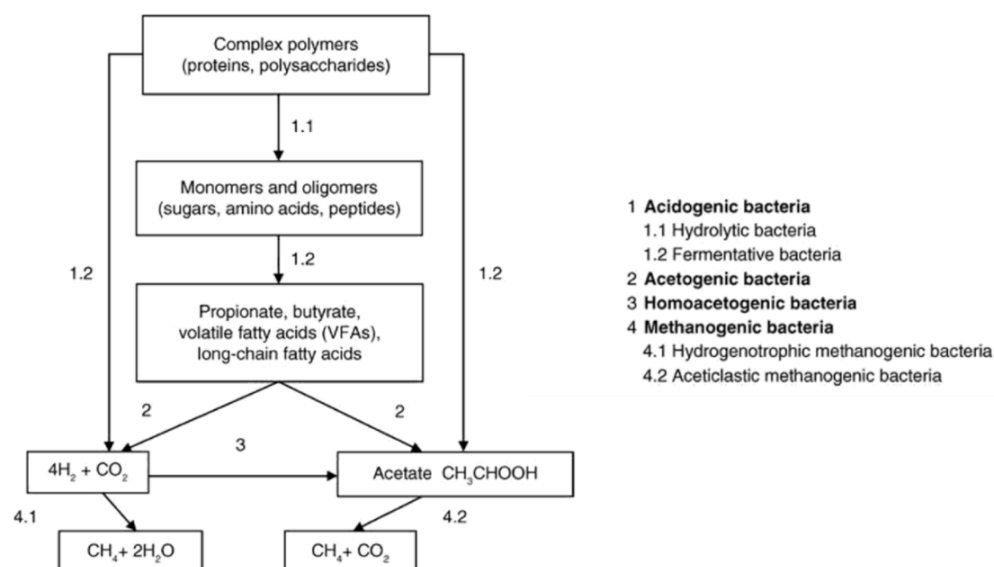
Biogassprosessen består ofte av en type forbehandling av råvarene før massen (substratet) pumpes videre inn i biogassreaktoren, se figur 2. Forbehandlingen benyttes for å tilfredsstille regelverket, og for å oppnå en bedre nedbrytningsgrad (større gassutbytte). Animaliebiproduktforskriften (2007) har krav til partikkelstørrelse og temperatur/trykk ved hygienisering, og dersom sluttproduktet (bioresten) skal benyttes som gjødsel må også fremmedlegemer slik som plast, glass og metall fjernes ifølge gjødselvereforskriften (2003).



Figur 2. Biogassprosessen.

Som en del av forbehandlingen blir det organiske materialet ofte kvernet ned til mindre partikler, og uønskede fraksjoner blir separert ut. Dersom biogassteknologien tar utgangspunkt i en våt prosess, blir vann ofte blandet inn i råvarene for å oppnå en homogen og pumpbar masse. Tørrestoffinnholdet på råstoffet vil avgjøre hvor mye vann som må tilsettes. Tørrestoffinnholdet [TS] er en benevnning som oppgir den delen av en masse som ikke fjernes som vann ved tørking på 105 °C i ett døgn eller 60 °C i to døgn (Kristoffersen, u.å.). Slam fra akvakulturanlegg har variabelt tørrestoffinnhold avhengig av hvilken rense- og eventuell tørketeknologi som benyttes. Mekanisk filtrering og avvanning er den vanligste praksisen for håndtering av slam, og gir et produkt med rundt 12–20 % TS (Cabell m.fl., 2019), men også videre tørking til over 90 % TS brukes av flere anlegg (Aadland, 2019). Tørking av slam kan forenkle lagring, transport og distribusjon, men er ikke en forutsetning for å bruke slam i biogassproduksjon.

Etter forbehandling blir massen ført inn i biogassreaktoren hvor det foregår en kompleks mikrobiologisk prosess som er sammensatt av flere trinn (figur 3). Trinnene omtales gjerne som hydrolysetrinnet, syretrinet og metantrinnet, hvorav syretrinet kan deles opp i acidigonesetrinn og acetogenesetrinn (Morken m.fl., 2017).



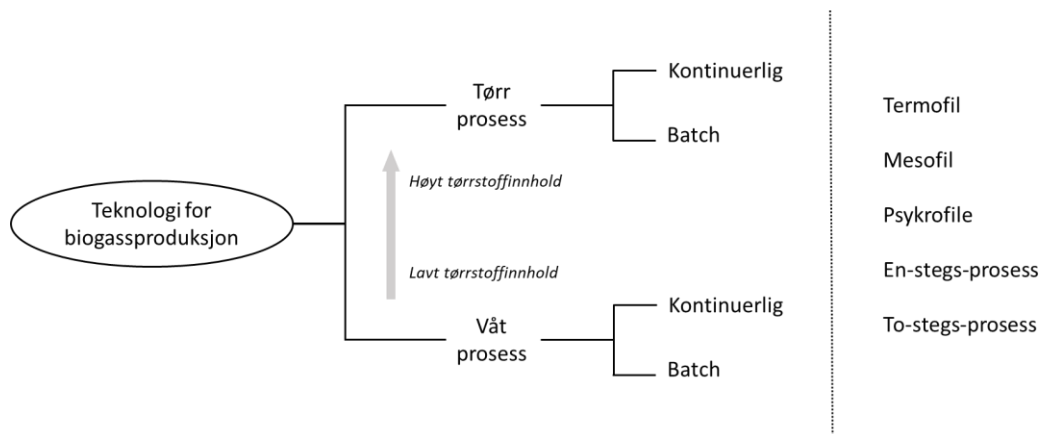
Figur 3. Anaerob nedbrytning av organisk materiale (Wellinger m.fl., 2013).

I hydrolysetrinnet blir sukker, fett og proteiner kuttet opp til mindre organiske komponenter slik som aminosyrer, enkle sukkerarter, fettsyrer og noen alkoholer (Schnürer & Jarvis, 2009). Det er ulike typer enzymer som bidrar til denne spaltingen, og dette steget er nødvendig for at det organiske materialet spaltes opp og kan brytes videre ned til metan (Schnürer & Jarvis, 2009). Neste steg i den mikrobiologiske prosessen er syretrinnet. Under denne delen brytes aminosyrer, alkoholer og sukker ned gjennom en rekke ulike reaksjoner til organiske syrer, alkoholer, ammoniakk, hydrogen sulfid, karbondioksid og hydrogen (Schnürer & Jarvis, 2018). Metantrinnet er den siste delen av prosessen, og i dette steget dannes metan og karbondioksid gjennom ulike direkte eller indirekte prosesser (Morken m.fl., 2017).

I produksjonsprosessen er det mange aspekter som må tas hensyn til, blant annet temperatur, oksygen, pH og salt. Biogassprosessen kan ha ulike driftstemperaturer slik som psykrofil $15\text{--}25\text{ }^\circ\text{C}$, mesofil $35\text{--}37\text{ }^\circ\text{C}$ eller termofil $50\text{--}60\text{ }^\circ\text{C}$ (Rameshprabu & Yuwalee, 2016). Den mikrobiologiske aktiviteten er en funksjon av temperatur i prosessen (Kettunen & Rintala, 1997), og vanlig driftstemperatur for norske biogassanlegg er rundt $37\text{ }^\circ\text{C}$. For å kunne produsere mest mulig biogass, er det viktig å ha optimale driftsforhold for mikroorganismene. Dette innebærer at endringer i prosessen gjennomføres med forsiktighet for å unngå en forstyrrelse av mikroorganismene som igjen kan føre til at prosessen går saktere eller stopper opp. Metanproduserende mikroorganismer er anaerob og svært sensitiv til oksygen, og overlever ikke dersom oksygen er til stede (Schnürer & Jarvis, 2009). Metanproduserende mikroorganismer trenger en relativt nøytral pH-verdi mellom $6,5\text{--}7,5$ (Sørheim m.fl., 2010), og det er gjennomført forsøk som viser at det er mulig å få et bedre biogassutbytte ved regulering og optimalisering av pH-verdien (Hajji m.fl., 2016).

5.2.3 Produksjonsteknologi

Det finnes ulike teknologier som bygger på forskjellige prinsipper, men i hovedsak kan teknologiene deles inn i tørr eller våt prosess, se figur 4 (Schnürer & Jarvis, 2018).



Figur 4. Produksjonsteknologi for biogass (tilpasset fra Schnürer & Jarvis, 2018).

Tørr prosess er aktuell å bruke for materialer som har et høyt tørrstoffinnhold på rundt 25-35 %, eksempelvis kildesortert matavfall og energivekster (Sørheim m.fl., 2010). For å opprettholde gode forhold for mikroorganismene, bør det ikke være et høyere tørrstoffinnhold enn 35 % (Schnürer & Jarvis, 2009). Fordeler med denne typen prosess er at man unngår store mengder væske i bioresten dersom det skal lagres og transporteres. Bioresten fra en tørr prosess er ofte mer egnet som jordforbedring enn som gjødsel fordi det inneholder lite nitrogen og må ofte komposteres når det kommer ut fra biogassanlegget (Sørheim m.fl., 2010).

Den vanligste biogassprosessen er en våt prosess der tørrstoffinnholdet ligger mellom 2 % og 15 % (Schnürer & Jarvis, 2009). Dersom råvarene som benyttes har et høyt tørrstoffinnhold vil det bli tilsatt vann, slik at det er mulig å pumpe substratet. Biorest fra denne prosessen egner seg godt som gjødsel, og næringsstoffene som er mest plantetilgjengelig, slik som nitrogen og kalium, finnes hovedsakelig i den flytende fasen (Øgaard m.fl., 2017).

Biogass produseres i dag i industriell skala, og ved flere biogassanlegg inngår slam som en del av råvaremiksen. Teknologi for produksjon av biogass kan dermed settes til TRL-nivå 9.

5.2.4 Produkter og produksjonspotensial

Biogass og biorest er produktene som oppstår i biogassprosessen. Biogass består hovedsakelig av metan og karbondioksid, men innholdet av ulike gasser vil variere ut ifra hvilke råvarer som benyttes i anlegget. Tabell 8 viser en oversikt over komposisjonen for biogass og hvordan den kan variere.

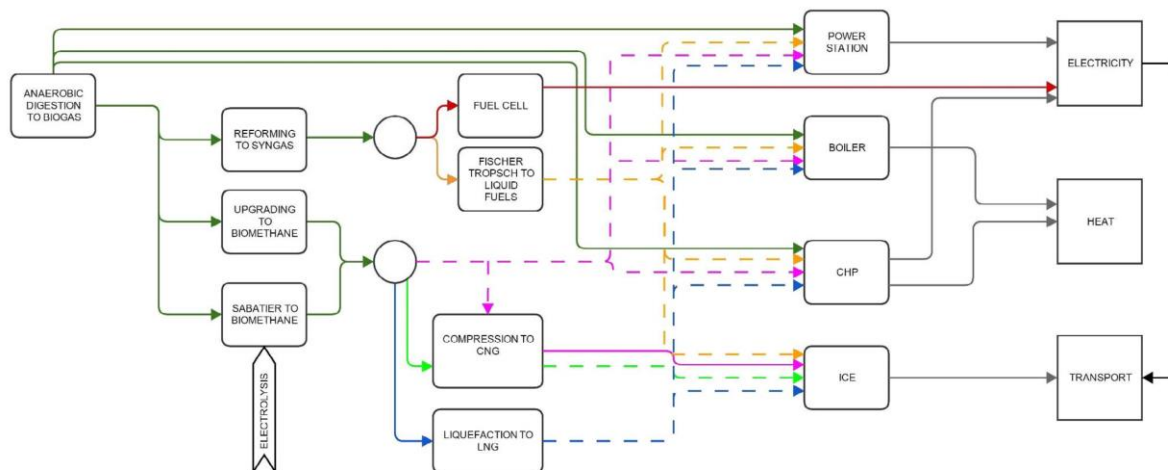
Tabell 8. Komposisjon av biogass (Nizami, 2012).

Gass	Prosentandel
Metan (CH ₄)	55–80
Karbondioksid (CO ₂)	20–45
Nitrogen (N ₂)	0–10
Hydrogen (H ₂)	0–1
Hydrogen sulfid (H ₂ S)	0–3
Oksygen (O ₂)	0–2

Ved biogassanlegget som Cermaq har installert i tilknytning til settefiskanlegget i Steigen, produserer de i overkant av 407 000 kWh fra 180 tonn tørrstoff slam (Witzøe, 2019). Basert på dette kan man ta utgangspunkt i at energiproduksjonen fra slam er på 2 261 kWh/tonn TS slam. Under et forsøk gjennomført av Gebauer m.fl. (2016) ble det rapportert om en biogassproduksjon tilsvarende 593 kWh/tonn substrat når fiskeslam ble tilsatt i husdyrgjødsel. Potensialtester gjennomført i studien til Ytrestøyl m.fl. (2013) viser at en kombinasjon av slam og storfe gjødsel (87,5:12,5) ga et metanutbytte på 860 l/kg volatile solids (VS). Omregnet med 90 % VS/TS og 66 % VS/TS i henholdsvis slam og storfe gjødsel, utgjør det en

metanproduksjon på 750 m³/tonn TS substrat. Det er utfordrende å konkludere konkret hva biogassproduksjonen fra slam er, da det vil variere med ulike faktorer slik som innhold av organisk tørrstoff (VS) og eventuelt synergi-effekter ved kombinasjon av slam med andre råvarer (Ytrestøyl m.fl., 2013).

Biogass kan anvendes på ulike måter, men ofte kan man dele alternativene inn i grupper for direkte bruk til varme, strømproduksjon eller oppgradering til drivstoff, figur 5. Den mest energi- og kostnadseffektive anvendelsen vil være avhengig av lokasjon og forutsetninger gitt herunder.



Figur 5. Alternative anvendelser for biogass (Hakawati m.fl., 2017).

Biorest inneholder mange næringsstoffer, og egner seg som gjødsel (Øgaard m.fl., 2017). Brod m.fl. (2016) analyserte gjødseffekten av biorest fra ulike kombinasjoner av fiskeslam og husdyrgjødsel. Det er ikke gjennomført gjødselforsøk på biorest som kun baserer seg på slam, og dermed er biorest som baserer seg på 40 % slam og 60 % husdyrgjødsel tatt som et utgangspunkt i denne rapporten. Analyseresultatet viste at bioresten var nitrogenrik. Pottforsøket av bioresten ga god effekt som nitrogengjødsel – på lik linje som mineralgjødsel. Utfordringer med biorest fra slam er at det inneholder en høy andel tungmetaller fra sink (Zn) og kadmium (Cd) som kan gi begrensninger for videre bruk i henhold til gjødselforskriften. Ved produksjon av biogass oppkonsentreres tungmetallinnholdet i forhold til tørrstoffinnhold, og dette kan føre til høye verdier. Tabell 9 viser en oversikt over analyseresultatene fra bioresten. Med utgangspunkt i analyseresultatene kan man eksempelvis beregne hvor mye nitrogen og fosfor man kan få ut fra bioresten.

Tabell 9. Innhold i biorest fra 40 % slam og 60 % husdyrgjødsel (Brod m.fl., 2016).

Analyse av biorest		
TS	g100g ⁻¹	4,9
OM	g 100g ⁻¹ TS	65
pH		8,3
N	g kg ⁻¹ TS	130
NH ₄ -N	g kg ⁻¹ TS	110
NO ₃ -N	g kg ⁻¹ TS	-
Nmin	% av total N	84,6
P	g kg ⁻¹ TS	31
K	g kg ⁻¹ TS	46
S	g kg ⁻¹ TS	9,6
Ca	g kg ⁻¹ TS	63
Mg	g kg ⁻¹ TS	3,8
Al	mg kg ⁻¹ TS	460
Fe	mg kg ⁻¹ TS	1700
Cd	mg kg ⁻¹ TS	1,7

Pb	mg kg ⁻¹ TS	0,76
Hg	mg kg ⁻¹ TS	0,141
Ni	mg kg ⁻¹ TS	15
Zn	mg kg ⁻¹ TS	990
Cu	mg kg ⁻¹ TS	68
Cr	mg kg ⁻¹ TS	22

5.3 Gjenvinning av fosfor fra fiskeslam

Dersom fiskeslam samles opp og behandles kan det være aktuelt å gjenvinne fosfor med tanke på produksjon av gjødselvarer eller annet bruk. EU har satt fosfor på listen over kritiske råmaterialer. Fosfor er et grunnstoff nødvendig for alt liv, og er som mineralgjødsel en viktig innsatsfaktor i mat- og fôrproduksjon. I tillegg er det en forsyningsrisiko forbundet med fosfor (sett med EU øyne) fordi bare 12 % av råfosfat (phosphate rock) produseres i EU – i Yaras gruve i Sillinjärvi i Finland.

De landene som eksporterer til EU er ikke nødvendigvis stabile leverandører og med derav følgende høyere risiko, inkludert politisk risiko. Vest-Sahara (tidligere Spansk Sahara) som har betydelige fosfatreserver betraktes av Marokko som en del av deres territorium, mens det i henhold til FN-paktens bestemmelse er et "ikke-selvstyrt område". Det har blitt reist kritikk mot gjødselselskaper som kjøper råfosfat med opprinnelse i Vest-Sahara (Doherty, 2020, 15.mars).

5.3.1 Fosfor i omløp i Norge

Miljødirektoratets rapport M-846|2017 utarbeidet av Blytt m.fl. (2017) har en tabell med fosfor i omløp i Norge:

Tabell 10. Mengder av fosfor i årlig omløp i Norge, tabell fra rapport utarbeidet av COWI for Miljødirektoratet.

Tabell 1 Fosforpotensial og plantetilgjengelig fosfor (P) fra ulike mulige kilder.

Avfallskilder	Fraksjon	TS	P	Mengde	Tot-P	Plantetilgjengelig P
		%	kg P/ tonn TS	Tonn TS/år	Tonn	Tonn
Avløpsslam, (ikke spredt avløp)	Kjemisk felt primær slam (Kjemisk rensing (Fe og Al))	12-90 ¹⁾	1-3 ²⁾	184.600 ^{4a)}	1.900 ¹²⁾	400-750 ¹²⁾
	Kjemisk-/ biologisk slam (Kjemisk-/ biologisk rensing)		1-3 ²⁾			
	Primærslam, silslam (Sedimentasjon/flotasjon uten kjemikalier, mekanisk rensing)		0,1-1,1 ³⁾			
Fiskeslam (land)	Primærslam (Sedimentasjon/flotasjon uten kjemikalier, mekanisk rensing)	12-90	0,9-2,9	8.500	85 ⁵⁾	75 ⁶⁾
	Primær- og biologisk slam (resirkuleringsanlegg)					
Fiskeslam (postsmolt)	Saltvann	10-90	0,9-2,9	57.000	570 ⁵⁾	510 ⁶⁾
Fiskeslam (hav)	Slam under merder		0,9-2,9	~450.000	8.450 ^{8),5)}	1.800-8.450 ¹²⁾
Husdyrgjødsel (total)			0,7 (storfe)-1,6 (gris), 1 (fjørfe) ⁷⁾		11.400 ⁸⁾	8700 – 11.400 ¹²⁾
....derav Husdyrgjødsel (lagret) ¹⁰⁾	Ikke tatt med i sluttsummen				8.000-9.000	8.000-9.000
Slakteriavfall	Kategori 3	90			2040	400-1250 ¹²⁾
Fiskeensilasje	Kategori 2	20	1-1,7 ⁹⁾	8.000 ⁹⁾	80-170	80-170 ¹²⁾
Matavfall	Kompost	33 ¹³⁾		27.600 ^{4b)}	2.600 ⁸⁾	1250-1950 ¹²⁾
	Biorest		3,8 ¹³⁾	30.500 ^{4b)}		
Treaske					800 ¹⁴⁾	400-640 ¹²⁾
Sum					ca. 28.000	ca. 13.600-18.500

¹⁾ 90% ved termisk slamtørring, vanligvis er avvanning på ~25 %

²⁾ Øgaard og Brod 2016

³⁾ Paulsrud 2005 – råslam

⁴⁾ SSB statistikk (2015) ^{a)} Mengde slam disponert, ^{b)} Levert anlegg for behandling

⁵⁾ Estimert basert på Martinsen (2016)

⁶⁾ Antagelse 90% utnyttelse

⁷⁾ Nesheim og Sikkeland, 2013

⁸⁾ Hamilton m.fl. (2016)

⁹⁾ Åhlstrøm 2015 og Beachell 2016

¹⁰⁾ Gundersen og Magnussen (2015) SSB – gjødselundersøkelsen

¹¹⁾ Estimert basert på Brod (2016)

¹²⁾ Hamilton m.fl. (2017) (fra vekstforsøk)

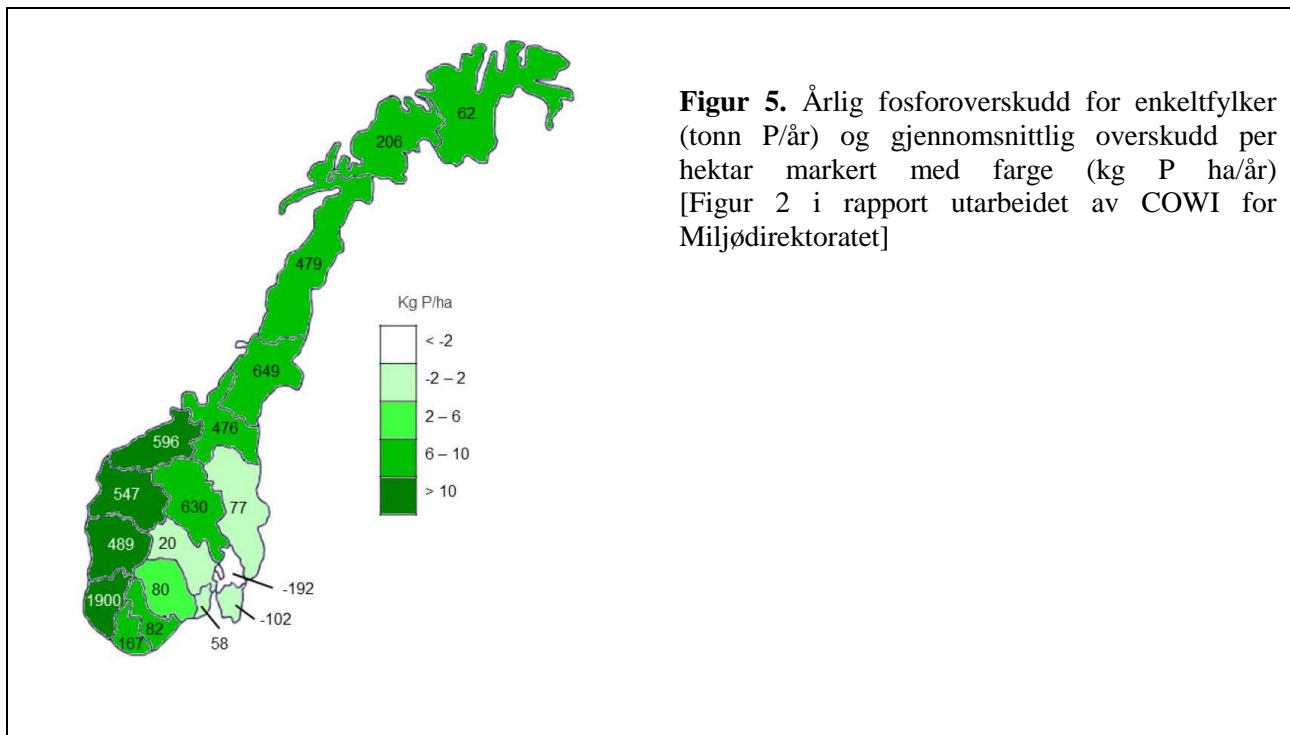
¹³⁾ Modahl *et.al.*, 2014 (TS i råstoff)

¹⁴⁾ Miljødirektoratet, 2015

Tabellen viser at mengden fosfor i fiskeslam er omtrent lik mengden fosfor i lagret husdyrgjødsel, og omtrent lik mengden fosfor i mineralgjødsel. Hver av disse er i mengde 8–9 000 tonn per år. Det vil si at dersom fiskeslam brukes til gjødsling i Norge blir det fort et enda større overskudd dersom ikke bruken av fosfatholdig mineralgjødsel reduseres tilsvarende.

Det er slik at det allerede er et betydelig fosforoverskudd i store deler av Norge, og i utkast til ny gjødselbrukforskrift er det lagt opp til en reduksjon i mengden fosfor som det er lov til å spre. Alt etter hvilket alternativ som velges kan reduksjonen i tillatt mengde bli opp mot 30 %.

Det har vært signalisert fra Miljødirektoratet at sekundært fosfor bør tilbakeføres inn i mineralgjødselproduksjon eller eksporteres. Det vil si at sekundært fosfor må brukes på en slik måte at det erstatter bruk av primært fosfor (råfosfat). Dette gjelder også fosfor som er lite plantetilgjengelig, slik som fosfater fra avløpsrensingsfelt med jern- eller aluminiumsalter. Selv om de er tungt løselig anses det at de på sikt vil bli mobilisert og dermed påvirke planteproduksjon og miljø.



5.3.2 Hvordan gjenvinne fosfor fra fiskeslam?

Prosessene for gjenbruk og gjenvinning av fosfor kan grovt deles i to alternativer:

- Gjenbruk uten å fjerne organisk materiale.
- Gjenvinning av fosfor som et uorganisk produkt.

Hvilke løsninger man lager for gjenbruk/gjenvinning av fosfor må ta hensyn til at det er uttalt fra Miljødirektoratet at de anser at slikt sekundært P må føres inn i matproduksjon (og erstatte importert primært P), eller eksporteres som egne produkter, eller brukes i mineralgjødsel-produksjon. Det vil si at "deponering" av P på arealer som ikke er til mat- eller fôrproduksjon ikke er ønsket.

Det er et europeisk nettverk, European Sustainable Phosphorus Platform (ESPP), som arbeider for gjenvinning og gjenbruk av fosfor. ESPP har en oversikt over prosesser for gjenvinning/gjenbruk på nettet (ESPP, 2020). Det arbeides med å etablere et Nordisk Fosfor Nettverk. Avfall Norge deltar i dette.

EØS-avtalen omfatter ikke EUs felles marked for landbruksvarer eller EUs felles landbrukspolitik. Produksjonen av gjødselvarer er imidlertid av såkalt EØS relevans og i Norge må man derfor forholde seg til EUs direktiver og forordninger for produksjon av gjødselvarer.

5.3.3 Fosfor fra aske

Det finnes flere prosesser for å gjenvinne fosfor, da som uorganisk fosfat, fra aske. I hovedsak går de på å løse opp fosfater i aske med syre for deretter å gjennomføre forskjellige prosesstrinn for å fjerne forurensninger. I Tyskland er det kun små avløpsrensaneanlegg som har lov til å levere slam til jordbruket. Det vil si at slam fra større avløpsrensaneanlegg brennes i kullkraftverk eller i egne anlegg dedikert til slam. Asken fra de dedikerte anleggene legges i egne deponi med tanke på gjenvinning i fremtiden. At asken legges på deponi er et uttrykk for at det enn så lenge er for dyrt å gjenvinne P sammenlignet med prisen på råfosfat. Andre land i EU har tilsvarende lovgiving som Tyskland, eller vurderer å innføre det. Deutsche Phosphor Plattform har samlet flere av disse prosessene for aske i en felles oversikt (Anon, 2020). Dokumentet heter "Alle Kennblätter" og er en ZIP-fil med PDF dokumenter. Gjenvinning av fosfor fra fiskeslam kan utføres på tilsvarende måte, og krever muligens mindre kjemikalier og eller prosessering sammenlignet med avløpsslam som er felt med jern- eller aluminiumsalter, fordi disse binder hardere enn kalsium til fosfater.

5.3.4 Utfelling av fosfor som struvitt

Utfelling av det fosforholdige mineralet struvitt, også kalt MAP (MagnesiumAmmoniumFosfat • 6H₂O) er etter hvert brukt på flere avløpsrensaneanlegg, i hovedsak anlegg med biologisk rensing, men også i biogassanlegg. Struvitt kan spontant gi uønskete utfellinger i rensaneanlegg på steder som kan skape driftsproblemer. Struvitt-utfellinger er harde og sitter godt fast på overflater og kan være kostbare å fjerne. Dersom man feller ut struvitt i et eget prosesstrinn for bruk som gjødsel er det dermed også fordelaktig for driften av rensaneanlegget. Reduserte driftskostnader kan derfor bidra til at struvitt-produksjon er lønnsomt selv med en lav pris for produktet. Utfelling av struvitt kan bare fjerne en andel av fosforet i avløpet på grunn av likevekten som trengs med ammonium og magnesium.

5.3.5 Fosfor i avløpsslam

I Norge er avløpsrensaneanlegg med kjemisk rensing mye brukt. Det tilsettes jern- eller aluminiumsalter som feller ut både organisk materiale og fosfater. Slammet er tillatt brukt i landbruket i begrensede mengder forutsatt at innholdet av tungmetaller er under visse grenser. Som nevnt er fosfatene hardt bundet i slikt slam og gjødselverdien er lav. Avløpsslam er derfor et jordforbedringsmiddel og ikke et gjødselprodukt. Et par steder i Norge bruker man kalk som fellingsmiddel i avløpsrensaneanlegg. Kalk binder ikke fosfater så hardt som jern og aluminium så fosfater i slikt slam er derfor noe mer plantetilgjengelig. I noen biologiske avløpsrensaneanlegg kan man styre anlegget, det vil si tilførselen av luft, på en slik måte at man får en anrikning

av fosfater i slammet man tar ut fra anlegget. Dette kalles ofte bio-P prosess. Slikt slam antas å ha høy plantetilgjengelighet for P.

5.3.6 Fosfor fra biogassanlegg

I Norge er det flere biogassanlegg. Grovt sett kan de deles i to grupper, de som behandler slam fra avløpsrensing og de som behandler matavfall/næringsavfall. Ett anlegg, Greve Biogass AS, tar også inn betydelige mengder bløtgjødsel fra ku og gris. I biogassprosessen vil en del av fosfor som er bundet i organisk materiale frigjøres som fosfat. Den væskefasen med partikler som kommer ut fra en biogassreaktor kalles ofte digestat [engelsk: digestate]. Fosfor i digestatet vil dels være bundet i partiklene og dels være løste fosfater. Fordelingen mellom løst fosfat og fosfater i partikkelfraksjonen vil være meget avhengig av føden til prosessen. Dersom råstoffet er kjemisk felt avløpslam vil en stor andel av fosfor følge partiklene.

Det kan være mulig å ta ut fosfor fra digestat på flere måter alt etter prosessdesign. Dersom fosfor følger partikkelfraksjonen kan denne tas ut. Siden en del av det organiske materialet er nedbrutt og omdannet til gasser, metan og CO₂, vil fosforkonsentrasjonen være noe høyere enn i føden til prosessen. Dersom det er mest løste fosfater i digestatet kan det være mulig å felle ut fosfater for eksempel med kalsium eller som struvitt. Det vil da i de fleste tilfelle være nødvendig å separere ut partikkelfraksjonen før en slik felling.

5.3.7 Bruk av utfelt fosfor hos Yara

Nitrofosfatprosessen som Yara bruker i de to fabrikkene i Norge, krever råstoff med høyt P-innhold og lite forurensinger. Forurensninger vil være et problem både i prosessen og som forurensninger i produktet. Eksempler på prosessforstyrrelser er skumming og økt viskositet. Det vil derfor bare være små, begrensede mengder sekundært fosfor som eventuelt kan brukes i de norske fabrikkene. Yara har en gjødselabrikk i Ferrara i Italia som er mer egnet for mottak av sekundært fosfor.

Et annet aspekt er innhold av kadmium. I mineralgjødsel er det en maksimalgrense for innholdet av kadmium i forhold til fosformengden. Noen typer råfosfat har et for høyt innhold av kadmium. Det er nå foreslått i EU å senke grensen for kadmium, noe som kan øke prisen på lav-kadmium råfosfat, eller tvinge produsentene til å innføre et prosesstrinn for å fjerne kadmium. Flere gjødselprodusenter har en slik prosess "på vent". Dette vil i så fall også få betydning for sekundært fosfor som råstoff for mineralgjødselproduksjon. Kadmium har lignende egenskaper som sink, og fiskefôr tilsatt sink vil derfor kunne ha mer kadmium. Dette vil da slå ut som høyere kadmiuminnhold i fiskeslam og kan påvirke både kostnaden og muligheten for å lage gjødselprodukter. Merk at for gjødselvarer basert på organisk material er det kadmiuminnhold per kg tørrstoff som er parameter for klassifisering.

Yara publiserte i 2017 et "position paper" på sirkulær økonomi (Yara, 2017) hvor det ble uttrykt at det er ønskelig at sekundære fosforkilder er mest mulig lik råfosfat, og at kalsium-salter av fosfater er foretrukket.

5.4 Organisk gjødselvarer

Ved produksjon av organiske gjødselvarer gjelder kvalitetskravene i gjødselvarerforskriften (2003). For bruk av slike gjødselvarer er det egne regler for landbruksarealer, som da ikke gjelder for privat bruk i hager, anleggsjord og lignende. I mange land brukes derfor struvitt i hovedsak til produkter som er ikke er beregnet til landbruket.

Landbruksdirektoratet og Miljødirektoratet samarbeider om utkast til to nye forskrifter som skal erstatte dagens gjødselvarerforskrift. Det blir da én forskrift for produksjon og omsetning og én for bruk:

- Utkast til forskrift om produksjon, omsetning og import av gjødselvarer av organisk opphav og visse uorganiske gjødselvarer (Utkast til forskrift, 2018).

- Forskrift om lagring og bruk av gjødsel og plantenæring (Forslag til gjødselbrukforskrift, 2018).

Det er i EU et prosjekt – STRUBIAS – som ser på gjenvinning og gjenbruk av fosfor fra aske og pyrolyserte materiale (dvs. biokull og lignende).

5.5 Mineralisk gjødsel

Råfosfat er meget lite plantetilgjengelig og inneholder uønskede stoffer. Den oppløses derfor i syre som et trinn i produksjonsprosessen. Syren som brukes er i hovedsak svovelsyre og i mindre grad salpetersyre. Konvertering til produkter med svovelsyre skjer i stor grad nært koblet til gruvedriften. Det vil si at mye av den fosfor som importeres til EU enten er i form av ferdig mineralgjødsel eller er halvfabrikata som prosesseres videre. Tidligere skjedde oppløsningen av råfosfat med svovelsyre ved europeiske fabrikker. På grunn av håndteringen av avfallsproduktet gips, som dannes i store mengder, er denne del av produksjonen lagt ned i Europa.

5.6 Gjenvinning av fosfor i akvaponi

Produksjonssystemet akvaponi [aquaponics på engelsk], er et konsept der akvatiske organismer som fisk, kreps og reker produseres i tilknytning til et system med planteproduksjon (grønnsaker, medisinske planter eller aromatiske planter). Det vil si at avløpsvann fra et settefiskanlegg kan benyttes som gjødselvann i planteproduksjon. Dette er nærmere beskrevet i kapittel 6.4.4. Denne bruken av fosfor og andre næringsalter i avløpsvann kan derfor gi lokale arbeidsplasser og verdiskaping, men kan ikke gi noe stort bidrag til bruk av overskuddet av fosfor i Norge.

5.6.1 Økonomiske aspekter

En verdikjede for resirkulert fosfor inneholder flere ledd, alt etter om det er desentralisert produksjon eller en sentralisert produksjon. Typiske ledd er:

- Behandling på oppdrettsanlegg, typiske enhetsprosesser: separering, konsentrering, biogassprosess, tørking, pakking eller lignende prosesser.
- Transport: bil og/eller båt.
- Produksjonsanlegg: ferdig gjødselvarer eller halvfabrikat for videreprosessering.



Figur 6. Pris på råfosfat i verdensmarkedet. Hentet fra IndexMundi (2020).

Prisen på råfosfat (Phosphate rock [Morocco] free alongside ship) på verdensmarkedet ligger i første halvår 2020 på rundt 71 USD/tonn, Figur 6. Dette er råfosfat med 7 % fosfor. I januar 2010 var prisen ca. 200 USD/tonn og har vært nokså jevnt synkende etter det (IndexMundi, 2020). Antar vi fiskeslam har 2 % fosfor

og bruker samme pris som for råfosfat på verdensmarkedet i 2020, 9,20 NOK/kg P så er verdien av 20 kg P i ett tonn tørket slam 184 NOK.

En annen måte å se på verdien av P er verdensmarkedsprisen for DAP (DiAmmoniumPhosphate). Denne er diskutert grundig i et rapportutkast for STRUBIAS-prosjektet (Huygens & Saveyn, 2018). Prisen for fosfor i denne publikasjonen er basert på DAP-prisen "free on board" fratrukket beregnet verdi av nitrogen i DAP som ren ammoniakk. Konklusjonen er: "A price of 988 Euro per tonne P FOB is indicated for the year 2017". Med 1 EUR = 10 NOK tilsvarer dette 9,88 NOK/kg P.

Dersom verdien av fosfor i fiskeslam skal bære alle kostnadselementene som er nevnt ovenfor, er det åpenbart at fosfor alene ikke kan bære kostnadene ved å behandle fiskeslam ut fra en bedriftsøkonomisk vurdering.

5.6.2 Konklusjon for gjenvinning av fosfor

Dersom man i større grad enn i dag samler opp slam fra havbruk vil det bidra til et økt fosforoverskudd på land i Norge. Innsamlet fosfor i fiskeslam og annet avfall bør i en sirkulær økonomi erstatte råfosfat fra gruver som i dag brukes som fosforgjødsel for mat- og fôrproduksjon. Med dagens kostnadsbilde vil håndtering av fiskeslam koste så mye at verdien av fosfor alene, sammenlignet med prisen på råfosfat eller diammoniumfosfat på ca. 9–10 NOK/kg P, ikke er bedriftsøkonomisk lønnsomt. Dette kan endre seg dersom prisen på råfosfat stiger på grunn av politiske inngrep. Lavere grense for kadmiuminnhold kan også endre prisbildet. Dersom politiske eller samfunnsøkonomiske vurderinger setter strengere krav til gjenvinning og gjenbruk av fosfor i mat- og fôrproduksjon kan det komme rammebetingelser som gir en bedre økonomi i gjenvinning av fosfor. I dagens situasjon og rammebetingelser kan det beste være å primært søke anvendelser for fiskeslam der man også kan få verdiskaping av andre stoffer enn fosfor.

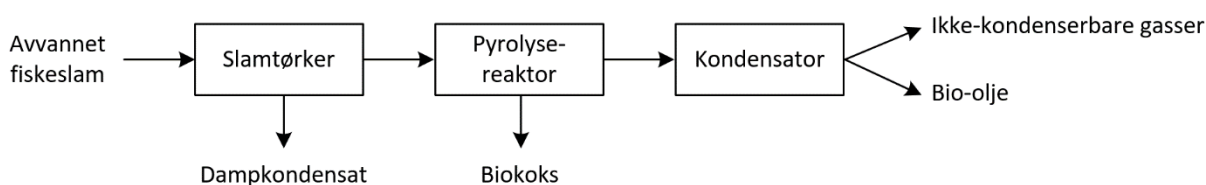
5.7 Pyrolyse

5.7.1 Bakgrunn

Pyrolyse er en fellesbetegnelse for en rekke prosesser der sammensatte, fortrinnsvis organiske, materialer varmes opp i en atmosfære med lavt innhold av oksygen. I pyrolyseprosessen brytes de organiske forbindelsene ned til både kondenserbare- og ikke-kondenserbare gasser, samt en fast fase (karbonaske). Det finnes en rekke varianter av pyrolyseteknologi, og prosessen kan skreddersys for å favorisere produksjon av enkeltfraksjoner (olje, gass eller karbon). Hva som er prioritert produkt kan henge sammen med hvilket råmateriale som behandles, hva som etterspørres i markedet og hvilke muligheter som finnes lokalt med hensyn på samhandling og energiintegrasjon mot annen industri.

5.7.2 Pyrolyseprosessen

Figur 7 illustrerer et mulig forløp for pyrolyse av fiskeslam, der avvannet fiskeslam tørkes og pyrolyseres. Uttakbare produkter i dette tilfellet vil være bioolje, biokull og et dampkondensat fra tørking av slam. Biooljen vil inneholde en del vann og organiske komponenter løst i vannet, slik at det i de fleste tilfeller vil være behov for prosessering før oljen kan anvendes. Hva man får ut av prosessen vil avhenge av hvordan anlegget designes med hensyn på forbehandling, reaktortype, teknologi for varmeoverføring og prosessparametere. Pyrolyseprosesser genererer typisk større mengder overskuddsvarme i form av ikke-kondenserbare gasser som kan benyttes til å drive prosessen.



Figur 7. Forenklet skisse som viser mulig forløp og produkter fra pyrolyse av fiskeslam.

Overordnet kan pyrolyse deles inn tre pyrolyseprosesser basert på hvordan prosessen styres og hvilke sluttprodukter som prioriteres (Zaker m.fl., 2019). De viktigste styringsparametere er temperatur, oppvarmingshastighet, oppholdstid og partikkelstørrelse på råvaren. Det er også disse parametere som skiller de tre pyrolysevariantene, *slow*, *fast* og *flash*, fra hverandre. I angitt rekkefølge vil temperaturnivået være stigende, oppvarmingshastigheten raskere, oppholdstiden kortere og partikkelstørrelsen finere for de tre variantene. Generelt kan man si at mens *slow*-pyrolyse favoriserer produksjon av karbonstoffet, vil hurtigere pyrolyseprosesser brukes når formålet er å ta ut mest mulig verdi fra oljefasen. I tillegg til de tre nevnte pyrolyseprosessene, finnes det flere mellomliggende varianter som sier noe om hvilket miljø materialet dekomponeres i (Martinez m.fl., 2013). Eksempel på dette er pyrolyse under lavt trykk (*vakuumpyrolyse*), pyrolyse med tilstedeværelse av hydrogen (*hydro-pyrolyse*) eller bruk av katalysatorer (*katalytisk-pyrolyse*). Videre vil de forskjellige pyrolyseprosessene ha ulike krav til hvordan et anlegg bør designes med hensyn til reaktortype (batch, semi-batch, kontinuerlig) og teknologi eller metode for oppvarming og varmeoverføring. Noen varianter er roterovner med ekstern oppvarming og forbrenning av produsert gass, el-basert mikrobølgeteknologi hvor materialet varmes opp fra innsiden, og fluidisert-seng reaktorer som benytter et egnet medium for varmeoverføring i reaktoren. Dette er ingen fullstendig oversikt, og det finnes en rekke ulike varianter av pyrolyse, både hva gjelder teknologivalg, reaktortyper og fleksibilitet med hensyn på prosessstyring og output fra prosessen.

5.7.3 Marked og modenhet

Pyrolyse er en kjent teknologi som er tatt i bruk mange steder i verden for å behandle flere ulike avfallsfraksjoner – også i Skandinavia. Eksempel på dette er danske Elysium Nordic

(<https://elysiumnordic.com/>) som har planer om å etablere et pyrolyseanlegg for behandling av 30.000 tonn kasserte bildekk årlig, med pyrolyseteknologi som er utviklet av det svenske selskapet Scandinavian Enviro Systems. Norske Quantafuel (<https://quantafuel.com/>) er en annen aktør innen pyrolyse som fokuserer på behandling av plastavfall. Selskapet arbeider med en fabrikk ved Skive i Danmark, der de skal konvertere 16 000 tonn/år plastavfall til råstoff for ny plastproduksjon (Tholey, 2019). Også Pyrocells (<https://www.setragroup.com/sv/pyrocell/>) planlegger å etablere pyrolysefabrikk for produksjon av drivstoff, men da med sagspon som råmateriale. I løpet av et år skal anlegget kunne behandle 80 000 sagspon og produsere 25 000 tonn pyrolyseolje. Norske Biozin (<http://biozin.no/>) har også planer om å etablere pyrolyseanlegg for produksjon av biodrivstoff basert på trevirke.

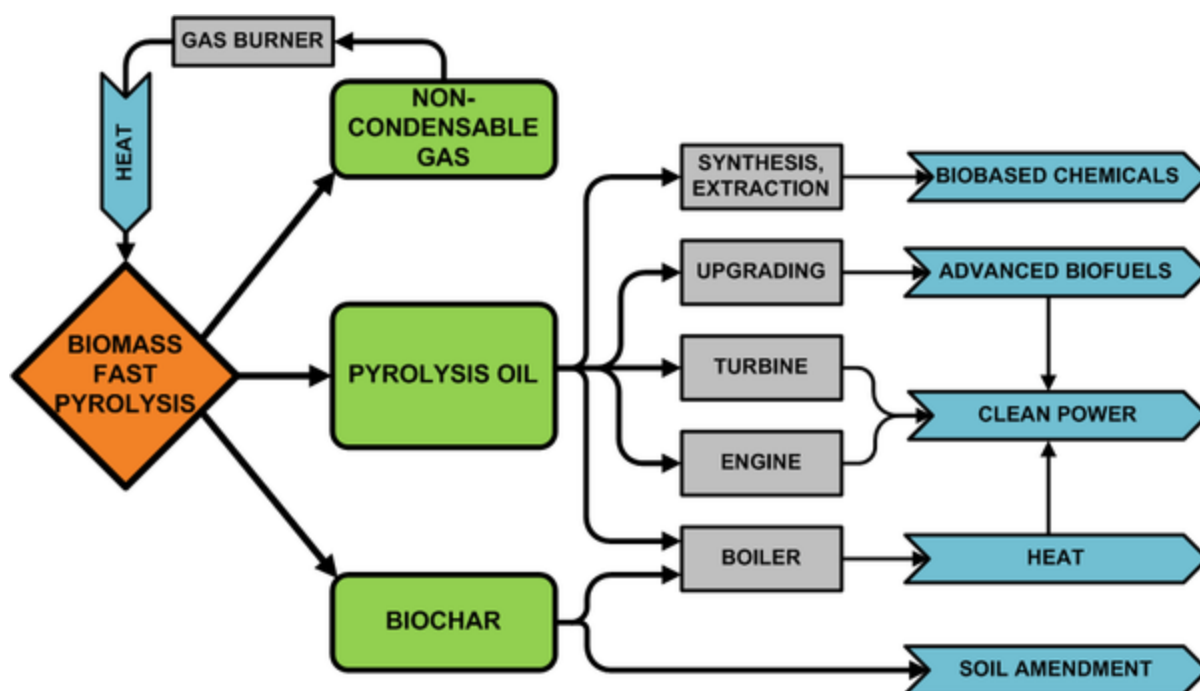
Eksempelene ovenfor er ikke uttømmende og det er med andre ord mye aktivitet og mange aktører som arbeider med å etablere pyrolyseanlegg, selv i Skandinavia. De forskjellige initiativene adresserer også mange ulike råmaterialer/avfallsfraksjoner og baserer seg på forskjellige pyrolyseteknologier, noe som gir et inntrykk av variasjonen og bredden som pyrolyseprosesser representerer. Felles for de nevnte prosjektene, er dog at de gjerne skal kunne ta imot en relativt stor mengde råstoff per år.

Relatert til behandling av fiskeslam, er det derimot færre eksempler på anvendelse av pyrolyseteknologi. Det mest kjente initiativet er nok prosjektet danske AquaGreen (<https://aquagreen.dk/>) hadde med Melbu Systems (<https://www.melbusystems.no/produktutvikling/>) og oppdrettselskapet Nordlaks (Sparboe, 2016). Her så de på en to-steps løsning der slammet først tørkes med overopphetet damp ved 200 °C, før det pyrolyseres ved 600–650 °C. Pyrolysegassen som genereres under oppvarmingen forbrennes og benyttes som energi for å tørke slammet. Med andre ord er det energien i slammet som benyttes for å tørke slam. Sluttproduktet fra prosessen er en fast fase kalt biokoks, som skal ha potensial som gjødsels- og jordforbedringsmiddel. Biokoksen har også et betydelig redusert volum, ca. 2–3 % av tynnslam. Fra prosessen genereres i tillegg et dampkondensat med temperatur på 80–90 °C, som f.eks. kan benyttes til lokal oppvarming. Dette prosjektsamarbeidet er nå avsluttet og det skal ikke foreligge noen konkrete planer om å installere en pyrolyseenhet på oppdrettsanlegget.

Det finnes lite publisert forskningslitteratur på pyrolyse av fiskeslam, men derimot er det en del aktivitet rettet mot avløpsslam; en avfallsfraksjon med flere likhetstrekk til fiskeslam. Her arbeider også nevnte AquaGreen i utgangspunktet mot kommunal sektor og pyrolyse av avløpsslam. Den største forskjellen mellom fraksjonene er nok at fiskeslam er mer energirikt enn avløpsslam. I tillegg er det sannsynlig med et høyere tungmetallinnhold i avløpsslam, selv om også fiskeslam inneholder tungmetaller, blant annet sink og kadmium. Fiskeslam vil i tillegg inneholde en del klorider, spesielt hvis man skal adressere utslipp fra havbaserte oppdrettsanlegg.

5.7.4 Sluttprodukter ved pyrolyse av slam

Figur 8 viser mulige anvendelsesområder for sluttprodukter fra pyrolyse av biomasse. Nevnte Biozin og Pyrocells sikter seg inn på biodrivstoffmarkedet, og begge samarbeider i den sammenheng med det svenske raffineriselskapet Preem om oppgradering av pyrolyseoljen. Pyrolyseolje produsert fra ulike avfallsfraksjoner, eksempelvis plast, gummi og trevirke, kan også være et råmateriale for kjemisk industri eller brukes direkte for å produsere varme. Fremstilling av biodrivstoff og råmateriale for kjemisk industri er å anse som høyverdig utnyttelse av pyrolyseoljen. Dette kan også være mulig for fiskeslam, men her behøves det mer utviklingsarbeid for å verifisere denne type anvendelse. I tillegg er disse anvendelser som sannsynligvis fordrer en større råstoffmengde enn hva enkeltstående oppdrettsanlegg kan generere.



Figur 8. Sluttprodukter fra pyrolyse av biomasse. Hentet fra Avello (2020).

Biochar eller biokull fra fiskeslam inneholder mye fosfor og kan utgjøre et attraktivt gjødselprodukt. Samtidig er det utfordringer omkring hvor tilgjengelig fosforet er for planter, samt at biokull ser ut til å fungere best på karbonfattig jord, mens vi i Norge har karbonrike jordarealer. Foreløpig virker det heller ikke å være noen betalingsvilje for dette produktet i Norge. Alternativt kan man, slik Figur 8 illustrerer, benytte energien i biokullet til å produsere varme/elektrisitet. Det finnes også et mulig anvendelsesområde gjennom oppgradering til aktivert kull og bruk i f.eks. vann- eller røykgassrensing. Dette er derimot ikke anvendelser som vil utnytte næringsstoffene i slammet.

5.7.5 Produksjonspotensial

Det finnes lite arbeid å ta utgangspunkt i for å illustrere et produksjonspotensial for pyrolyse av fiskeslam. Dette er usikkert også fordi det kan være store variasjoner på fordelingen av sluttprodukter fra pyrolyse, selv for samme råmateriale.

Som eksempler kan det nevnes følgende resultater:

- AquaGreen: 320 tonn TS = 130 tonn biokoks og 730 MWh varme.
- Avløpsslam (Zaker m.fl., 2019): gjennomsnittlig utbytte ca. 45 % biokoks, 25 % bioolje og 30 % gass. Men som alltid: det avhenger av type avløpsslam og prosessparametere/pyrolyseteknologi. Fiskeslam er også mer energirikt enn avløpsslam.

Dersom vi bruker eksemplet ovenfor vil 1 kg slam gi 0,41 kg biokoks og 2.28 kWh varme. For et landbasert anlegg med en produksjonskapasitet på 2 000 tonn per år, produserer 300 tonn slam og kan dermed produsere 123 tonn biokoks og 0,68 MWh varme per år. For hele norsk settefiskproduksjon vil det teoretiske produksjonspotensialet være 3 671 tonn biokoks og 20 GWh varmeenergi, tabell 11.

Tabell 11: Produksjon av biokoks og varmeenergi basert på pyrolyse (tall i tonn).

Biomasse laks	Slam	Biokoks	Varmeenergi (GWh)
2 000	300	123	0,68
59 691	8 954	3 671	20,4

5.7.6 Konklusjon for pyrolyse som løsning for håndtering av fiskeslam

Pyrolyseprosesser gir muligheter for å fremstille interessante produktspektre fra en rekke forskjellige råmaterialer, inkludert fiskeslam. Men selv om prosessen er kjent og utprøvd for andre materialfraksjoner, virker det å være behov for både markeds- og utviklingsarbeid før man lykkes med kommersiell etablering av pyrolyseanlegg for fiskeslam. Noen utfordringer og kunnskapsbehov er oppsummert nedenfor:

- Enkeltstående settefiskanlegg representerer et begrenset råvarevolum, spesielt sett opp mot pyrolyseetableringene nevnt tidligere i kapitlet. Det betyr ikke at dette ikke er gjennomførbart, men man må kanskje se på andre forretningsmodeller. For eksempel kan regionale HUB-er være en løsning som gir pyrolyseanlegget et bedre grunnlag for å oppnå lønnsom drift. Her kan det også være interessant å behandle fiskeslam sammen med andre avfallsfraksjoner for å øke volumet.
- Drift av termokjemiske prosessanlegg er ikke en del av oppdretters kjernevirksomhet. På regionale slambehandlingsanlegg vil det være enklere å forsvare ansettelse av kompetanse for å drifte denne type anlegg.
- Pyrolyseanlegg genererer overskuddsenergi som kan la seg utnytte mer effektivt i samhandling med annen industri. For eksempel kan man potensielt få opp anleggets virkningsgrad gjennom utnyttelse av overskuddsenergi fra prosessindustri, kjøleanlegg, e.l., samt ved integrasjon og utnyttelse av andre energiformer som f.eks. solenergi og muligheter for termisk energilagring. Denne type synergier gjør at man potensielt kan få utnyttet riktig energikvalitet på riktig sted og tid, noe som vil bidra til et mer energieffektivt og lønnsomt anlegg.
- Det virker å være liten eller ingen betalingsvilje for biokull som gjødselprodukt i Norge, slik at det behøves økt innsats for å utvikle et salgbart produkt. Alternativt kan man se på muligheter for eksport eller andre anvendelsesområder.
- Produksjon av bioolje har den fordel at utnyttelse av energien ikke er stedbunden, men kan transporteres til forbrukeren. Produksjon av høykvalitets biodrivstoff fordrer derimot sannsynligvis en større råvaretilgang enn hva enkeltstående anlegg kan generere. Regionale behandlingsanlegg kan øke tilgangen, men ikke uten å også generere større kostnader til transport av slam. Produksjon av andre drivstoffkvaliteter, f.eks. marin gassolje til kystfiskeflåten, kan muligens være et interessant anvendelsesområde.
- Pyrolyse som slambehandlingsmetode gir et lagringsstabil, luktfritt og hygienisert sluttprodukt, som også har et betydelig redusert volum. Men så lenge det ikke er betalingsvilje for dette produktet, kan det være utfordrende å skulle forsvare merkostnaden ved investering i et pyrolyseanlegg sammenlignet med et tradisjonelt tørkeanlegg. Da må de øvrige produktene/overskuddsenergien skape nok merverdi til at investeringen skal lønne seg.

6 Ny biologisk produksjon basert på næringsstoffer fra oppdrett

Næringsstoffer i utslipp fra oppdrett kan danne næringsgrunnlag for organismer i nye og eksisterende biologiske verdikjeder. En hovedutfordring for fremtidig akvakulturnæring er å skaffe råstoff til produksjon av fôr av høy kvalitet for bruk til alle livsstadier av oppdrettsfisk. Omfattende aktiviteter er iverksatt for å finne alternative råstoffkilder som inneholder lipid og protein som kan utnyttes i fiskefôrproduksjon ved å høste fra de lavere nivå i næringskjeden, alger og zooplankton (raudåte, krill). Dette vil bedre utnyttelsen av naturlig biologisk produksjon, samt at det vil forhindre for hard beskatning på enkelte marine fiskeressurser.

Vi vil i de følgende kapitler gjennomgå de biologiske mulighetene for de mest aktuelle biologiske produksjoner basert på oppløste næringsstoffer og organisk materiale i utslipp fra akvakultur.

6.1 Børstemark

6.1.1 Bakgrunn og biologi

Leddormer (*Annelida*) deles inn i tre hovedgrupper: mangebørstemark (*Polychaeta*), fåbørstemark (*Oligochaeta*) og igler (*Hirudinea*). Gruppen leddormer omfatter omtrent 20 000 arter (Fadhullah & Syakir, 2016; Nygren & Pleijel, 2015), fordelt på omtrent 85 familier (Bakken m.fl., 2015), hvorav cirka 15 000 av disse er marine flerbørstemark, også kalt havbørstemark (Nygren & Pleijel, 2015; Read & Fauchald, 2020). Flerbørstemark okkuperer de fleste økologiske nisjer i det akvatiske miljø. De finnes på eller nedgravd i sedimenter, i selvlagde eller innflyttede rørstrukturer og frittlevende i vannmassene, fra dyphavssletter til tidevannssonen. Havbørstemark er nøkkelorganismer i det marine økosystemet, såkalte "ecosystem engineers" (Jones m.fl., 1994), fordi de endrer fysikalske og kjemiske tilstander for biotiske og abiotiske materialer i habitatene de lever i som tilgjengeliggjør næringsstoffer og vedlikeholder eller skaper ny habitater for andre organismer. Det er identifisert mer enn 700 arter flerbørstemark i norske farvann, hvorav de fleste er bunnlevende (Bakken m.fl., 2015).

Flerbørstemark varierer i størrelse fra noen få millimeter til flere meter. Karakteristisk for disse evertebratene er at de er satt sammen av kroppsringer (segmenter) med separate indre organer som er stort sett identiske langs hele kroppen. Fordøyelseskanaalen som går fra hodet lengst fremme til anus på bakerste ledd (pygidium) er omgitt av en kroppshule (coelom). Bevegelse foregår enten ved sammentrekning og forlenging av hudmuskelsekker i coelom og/eller ved å bevege børsteføttene (parapodiene).

Flerbørstemark har forskjellige typer fødeopptak, og disse vil sammen med miljøkrav, størrelse, fekunditet og vekstrater være førende for om det er mulig å produsere børstemarkbiomasse på partikulære sidestrømmer fra akvakultur. Disse strategiene kan deles inn i følgende 4 grupper (Nygren & Pleijel, 2015):

- Ikke-selektive sedimentetere – For gravende arter er dette den vanligste strategien, hvor sedimentet de lever samles ved at marken vrenger ut og fanger sedimenter i svelget. Næringsstoffene tas opp i tarmkanaalen og ikke fordøyelig materiale passerer gjennom. Dette er vanlig for arter som lever i sedimenter med høy organisk belastning. Noen eksempler på arter vanlige i norske farvann her er fjæremark (*Arenicola marina*) og arter i *Capitella* familien.
- Selektive sedimentetere – Arter som benytter denne strategien har ikke et utkrengebart svelg, men bruker isteden klebrige palper til å fange mat. Næringsstoffene føres deretter via cilier, hvor partikler selekteres, til munnen. Noen eksempler på vanlige arter i norsk fauna er arter i familiene *Terebellidae*, *Pectinariidae*, *Spionidae* og *Oweniidae*.
- Filterspisere – Omfatter arter som har en tentakelkrone kledd med cilier som børstemarken bruker til å fange partikler fra vannmassene (f.eks. *Sabella* sp.). Gjelder også arter som graver tunneler som er åpne i begge ender, hvor børstemarken bruker parapoder til å skape en vannstrøm gjennom tunnelen

hvor partikler og planktonorganismer fanges opp i en filterpose plassert i inngangen på tunnelen som spises når den er full.

- Rovdyr, åtsel-, plante- og omnivore – Representert av arter som har utkrengebare svelg som ofte er innsatt med tenner, kjever eller papiller som brukes til å fange byttet. Enkelte arter kryper rundt og jakter på byttet, andre ligger i skjult og venter på at byttedyr skal passere innen rekkevidde. Her hører blant annet to av de vanligste artene som utnyttes kommersielt i dag til, grønmark (*Alitta virens*) og broket sjønymfe (*Hediste diversicolor*).

6.1.2 Akvakultur og høsting av børstemark

I 2018 ble det produsert nesten 4 millioner tonn reker globalt, hvorav 75– 80 % kom fra Sørøst-Asia og Kina (Anderson m.fl., 2016; FAO, 2019). Børstemark brukes som levendefôr til stamreker fordi de leverer viktige hormoner, aminosyrer og enzymer som induserer kjønnsmodning hos reker og øker kvalitet og overlevelse hos rekeyngel (Mandario, 2018). Det er svært få arter som blir produsert i dag, men interessen rundt akvakultur av sykdomsfrie børstemark er stor. Dette er av flere grunner: Rekeindustrien er avhengig av børstemark og etterspørselen overgår det som kan høstes fra naturlige bestander. I tillegg er det en betydelig biosikkerhetsrisiko knyttet til å bruke høstede børstemark til stamreker fordi de ofte er bærere av virus og patogener, som forårsaker sykdom hos stamreker og yngel.

Det er krevende å skaffe en fullstendig oversikt over alle aktører som driver akvakultur på børstemark i dag, men det anslås at det produseres opptil 1 000 tonn børstemark per år (pers med. O. Oddsen, Sea Farms Nutrition Limited (UK)). Ifølge Pombo m.fl. (2018) foregår det akvakultur på børstemark i Kina (*A. virens*), Australia (*A. virens* og *Diopatra aciculata*), Taiwan (*Perinereis brevicirrata*) og småskala produksjon av *Perinereis* spp. sør i Japan. Det finnes lite lett tilgjengelig informasjon om disse produsentene i bransjemagasiner og vitenskapelige databaser. I Europa er det to selskaper som produserer børstemark i dag. Topsy Baits (<https://www.topsybaits.nl>) er ifølge dem selv den største børstemarkprodusenten (*Alitta virens*) i Europa med en produksjonskapasitet på over 100 tonn år⁻¹. Ifølge selskapets hjemmeside planlegger de å utvide produksjonen til å omfatte andre kommersielt interessante arter som blodmark (*Glycera* sp.), fjæremark (*Arenicola marina*) og *Dioptra* sp. På forespørsel oppgir selskapet priser på 20 og 18 € kg⁻¹ for henholdsvis fersk og frossen *A. virens*. Delta Farms (<https://www.deltafarms.nl>) produserer *N. virens* og *A. marina* for bruks som agn, kjønnsmodningsfôr til akvakulturindustrien og lager også spesialiserte farmasøytiske produkter av børstemark. Begge disse selskapene produserer børstemark utendørs i store lengdenner. Siam Sand Worm Company (Thailand) produserer børstemarken *Perinereis nuntia* i utendørs sementtanker som leveres til de største rekeprodusentene i Thailand (Panakorn, 2015). Produksjonen er i størrelsesorden 5 tonn børstemark per måned. På produktutviklingssiden finner vi selskapet ProChaete (<https://www.prochaete.com>) som er innrettet mot å lage børstemarkmel, reke- og fiskefôr av børstemarkråstoff de kjøper fra produsenter slik som Topsy Baits og Delta Farms.

I Europa var Storbritannia, sammen med Nederland, først ute med akvakultur av børstemark (Pombo m.fl., 2018) og har også lang tradisjon for høsting av børstemark fra ville bestander. De første kommersielle selskapene som produserer børstemark ble etablert i Storbritannia tidlig på 1980-tallet (Pombo m.fl., 2018). Sustainable Feeds Ltd (www.sustainablefeeds.com) produserer *A. virens* i utendørs jorddammer. De markedsfører hovedsakelig børstemark som ingrediens i fôr, men tilbyr også levende børstemark av artene *H. diversicolor*, *A. virens* og *A. marina* gjennom sine nettsider. Selskapet oppgir ikke produksjonsvolum. Shoreline Polychaetes Farm (www.seabait.com) ble etablert for over 20 år siden og produserer *A. virens* som agn, priset til ca. 35 £UK kg⁻¹. Selskapet benytter seg av overskuddsvarme fra en nærliggende kraftstasjon til å varme opp sjøvann slik at de kan drive helårlig produksjon. Det har ikke blitt opprettet dialog med disse selskapene, men ifølge en artikkel i The Independent har disse selskapene nå opphørt (Barnett, 2017, 12. januar).

På grunn av dagens begrensninger rundt bruk av avfallsprodukter som fôr til produksjonsdyr, baseres dagens børstemarkproduksjon seg på bruk av blant annet rekefôr som mat til børstemarken, gjerne blandet med spesialisert fôr og/eller ingredienser for å øke næringsverdien på børstemarken like før de skal selges.

6.1.3 Anvendelse av restprodukter fra akvakultur til produksjon av børstemark

Børstemarken reflekterer i stor grad det den spiser, som betyr at kvaliteten på fôret vil påvirke kvaliteten på råstoffet man får ut. Dette har ført til at produsenter som Siam Sand Worm Company kan produsere børstemarken på billig og lett tilgjengelig fôr, for så å anrike børstemarken ved å bruke høykvalitetsfôr som for eksempel rekefôr i den siste produksjonsfasen før børstemarken høstes og distribueres. Samtidig finnes det sterke indikasjoner på at noen arter børstemark er nettopprodusenter av langkjedede flerumettede omega-3 fettsyrer ved enten *de novo* syntese gjennom sekvenser av kjemiske reaksjoner muliggjort av spesielle enzymatiske prosesser (Kabeya m.fl., 2018) eller ved å bio-akkumulere fettsyrer som produseres av mikrober i samme produksjonssystem (Olive m.fl., 2009; Olive m.fl., 2007).

Flere studier har vist at flerbørstemark kan produseres i integrerte systemer koblet sammen med annen bioproduksjon, hvor avfallsstoffer fra for eksempel fisk eller skaldyr kan benyttes som vekstsubstrat til børstemarken. *H. diversicolor* har hittil blitt dyrket på slam fra settefiskanlegg (Wang, Hagemann, m.fl., 2019; Wang, Seekamp, m.fl., 2019), fast biorest (solid biogas digestate) fra biogassproduksjon som inneholder rester av slam og dødfisk (Wang, Hagemann, m.fl., 2019), stør (*Huso huso*; Pajand m.fl. (2020)), havkaruss (*Sparus aurata*; Bischoff m.fl. (2009)), senegalesisk tunge (*Solea senegalensis*; Marques m.fl. (2018)), teppeskjell (*Ruditapes decussatus*; Batista m.fl. (2003)), og ål (García-Alonso m.fl. (2008)), med lovende resultater. Fjæremark (*A. marina*) viste god vekst og lipidprofil når det ble tilsatt avfallsprodukter fra fisk sammen med ølgjær (Olive m.fl., 2009), og Brown m.fl. (2011) har vist at *A. virens* kan produseres på partikulært avfall fra kveiteoppdrett samlet opp fra et resirkuleringsanlegg. Det har også blitt vist at *Capitella* sp. og *Ophryotrocha craigsmithi* kan produseres på slam fra lakseoppdrett og at disse får en gunstig næringsprofil med hensyn til essensielle aminosyrer og fettsyrer for marin fisk når de dyrkes på slam (Nederlof m.fl., 2019).

Honda og Kikuchi (2002) viste at *Perineris nuntia vallata* kan dyrkes på avfallsstoffer fra japansk flyndre (*Paralichthys olivaceus*). Børstemark i størrelsesorden 0,2–0,6 g kroppsvekt spiste mellom 4,9–25,7 mg feces dag⁻¹, og konverterte i gjennomsnitt omtrent 50 % av nitrogenet som ble spist til kroppsvev. Palmer (2010) viste at det er mulig å produsere børstemark (*Perinereis nuntia* og *P. helleri*) i sand-filter brukt til rensing av eutrofisert vann fra landbasert akvakultur uten ekstra tilsetning av næringsstoffer, og oppnådde en produksjonskapasitet på 300–400 g m⁻².

Eksempelene viser at børstemark er i stand til å vokse på avfallsstoffer fra fiskeoppdrett, og kan samtidig gjenvinne marine proteiner og flerumettede fettsyrer som dokosaheksaensyre (DHA) og eikosapentaensyre (EPA) som vanligvis ville gått tapt i produksjonen og på den måten omgjøre partikulært slam fra oppdrett til en verdifull biomasse som potensielt kan brukes som en høykvalitets fôringrediens. Dette gjør børstemark til en svært godt egnet kandidat for integrert land-basert produksjon som kan gi ytterligere verdiskapning for oppdrettere og gi et viktig bidrag til å skape en bærekraftig utnyttelse av sidestrømmene som landbasert oppdrett genererer fremover.

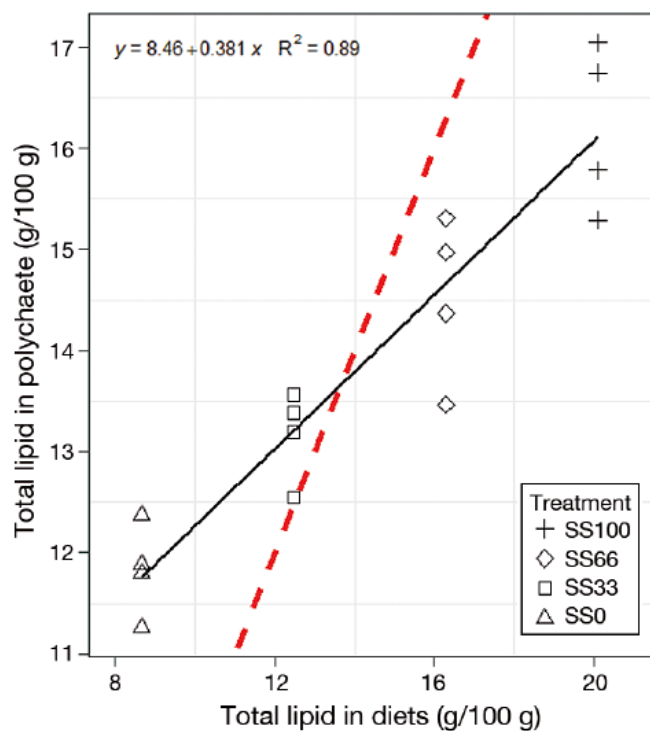
6.1.4 Kjemisk sammensetning

Tabell 12 viser noen referanseverdier for den kjemiske sammensetningen i arten *H. diversicolor*. Det er vist at fôrkvaliteten vil ha stor innvirkning på lipidinnhold, fettsyresammensetning og aminosyresammensetning i børstemarken som vist i figur 8–9.

Tabell 12: Oversikt over anslagsvis nærings sammensetning i *H. diversicolor* fôret med blant annet slam fra oppdrettsanlegg.

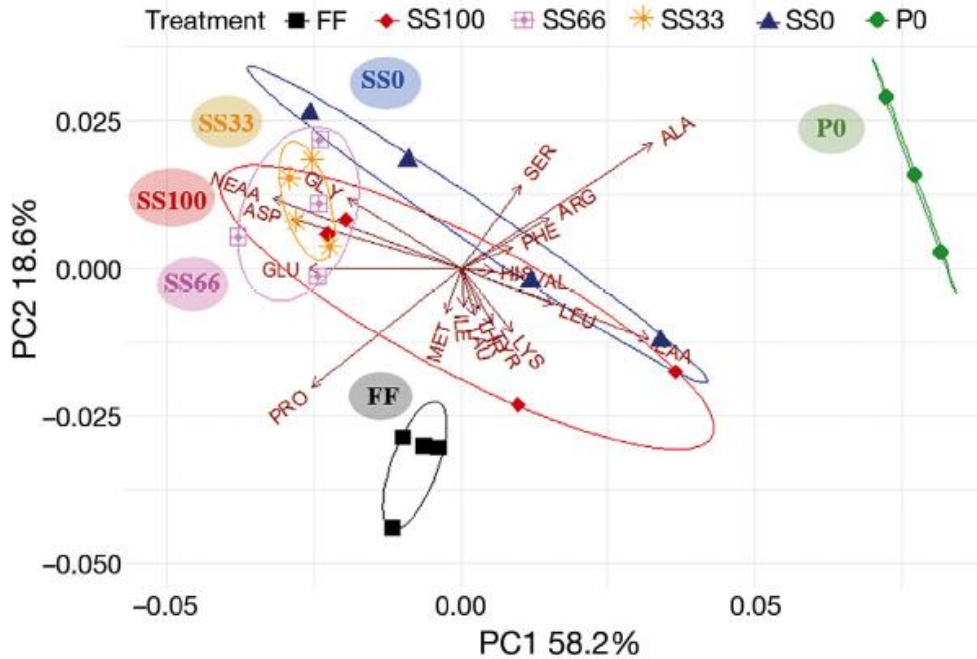
Organisme	Vanninnhold (%)	Aske (% av TV)	Protein (% av TV)	Lipider (% av TV)	Fettsyrer (% av TV)	Karbohydrater (% av TV)
<i>Hediste diversicolor</i>	79–81	11–17	42–60 %	11–23	4–8	18–27

(Batista m.fl., 2003; Bischoff m.fl., 2009; García-Alonso m.fl., 2008; Nesto m.fl., 2012; Pajand m.fl., 2020; Wang, Hagemann, m.fl., 2019; Wang, Seekamp, m.fl., 2019)

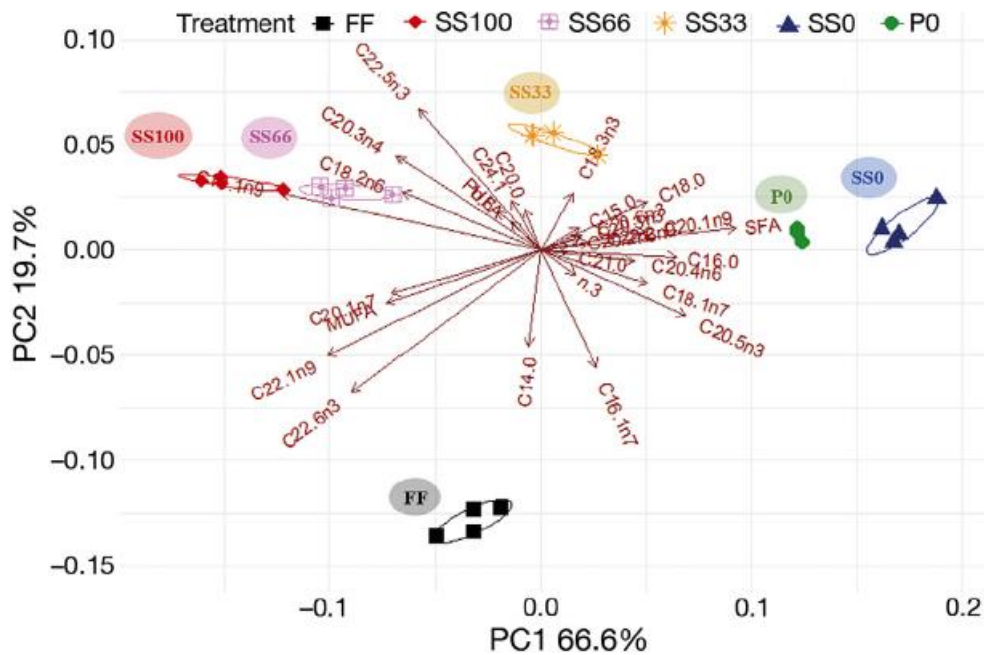


Figur 8: Forhold mellom fôr og totalt lipidinnhold i *H. diversicolor* etter et 30-dagers fôringsforsøk hvor børstemarken har blitt fôret enten kun med slam fra laksesmolt (SS100) eller slam blandet med fast biorest fra et biogassanlegg (33, 66 og 100 % innblanding; SS66, SS33 og SS0). Kilde: Wang, Hagemann, m.fl. (2019).

A



B



Figur 9: Effekt av fôr på A: innhold av essensielle (EAA) og ikke-essensielle (NEAA) aminosyrer og B: fettsyresammensetning i *H. diversicolor* etter et 30-dagers fôringsforsøk hvor børstemarken har blitt fôret med slam fra laksesmolt (SS100), slam blandet med fast biorest fra et biogassanlegg (33, 66 og 100 % innblanding; SS66, SS33 og SS0) og fiskefôr (FF). P0: børstemark samlet fra felt. Kilde: Wang, Hagemann m.fl. (2019).

6.1.5 Produksjonsteknologi

Hvis man skal etablere landbasert oppdrett av børstemark, er det naturlig å se på arter som er stede for den norske faunaen. Dette for å unngå risiko for å introdusere nye arter i Norge forårsaket av rømming. Flere av artene som er omtalt hittil i denne rapporten, og som allerede har et etablert marked og stor etterspørsel, finnes naturlig i norsk fauna. Storskala børstemarkproduksjon foregår i utendørs systemer, ofte enkle jorddammer

eller betongrenner fylt med sand og gjerne med netting spent over dammene for å hindre beiting fra fugler og andre predatorer. Stamdyrene anskaffes fra ville populasjoner eller tas fra egen produksjon hvorpå hanner og hunner bør holdes separat (om de er mulige å skille fra hverandre morfologisk) i kontrollerte omgivelser for å unngå spontan og ukontrollert gyting. Når børstemarken er kjønnsmoden kan larver anskaffes ved å samle begge kjønn i samme tank for naturlig gyting, eventuelt ved kunstig fertilisering ved å ekstrahere spermatozoer og egg fra stamdyrene for så å blande de sammen i sterilt sjøvann. Larveproduksjonen bør foregå innendørs under kontrollerte forhold i et klekkeri frem til de sås ut i anlegget for påvekst, fordi larvene er spesielt sårbare og kan trenge spesialisert fôr de første ukene. De enkleste produksjonsmetodene for påvekst baseres på å pumpe naturlig sjøvann inn og ut av betongtanker for å simulere naturlige tidevannsrhythmer. Sjøvannet vil i seg selv kunne tilføre nok næringsstoffer til å fremme vekst hos børstemarken, men raskere vekst oppnås ved tilleggsfôring. Siam Sand Worm Company rapporterte at de kunne produsere >3,5 kg børstemark m⁻² i slike systemer.

Produksjonstiden er avhengig av art, næringstilgang, naturlige vekstrater og hva som anses som kommersiell størrelse, som kan variere ut ifra om børstemarken skal brukes som agn, til produksjon av børstemarkmel eller som levendefôr til stamreker, rekeyngel og fisk. Høsting foregår med enkle redskaper (spader, greip) for å snu sedimentet hvorpå børstemarken håndplukkes. Det finnes spesialisert utstyr til formålet, slik som redskaper som er avbildet på hjemmesiden til Topsy Baits (<https://www.topsybaits.nl/history.html>) som viser en slede/plog med trommel uten av utstyret er beskrevet nærmere.

Behovet for børstemark er økende, og akvakultur er trolig den eneste måten å møte den kommende etterspørselen på. For å lykkes med å etablere akvakultur av børstemark må det både mye grunnforskning og et langt tidsperspektiv til. Det krever at man har god kontroll på produksjonsbiologi og miljøkrav, hvilket kan være vidt forskjellig fra larve- og yngelproduksjon til påvekst. Man må også ha kunnskap om kvaliteten på råstoffet, herav innhold av høyverdikomponenter og fremmedstoffer samt hvordan råstoffet skal prosesseres og utnyttes.

Etter hvert som flere aktører begynner med akvakultur av flere arter børstemark vil teknologiske fremskritt følge etter. SINTEF Ocean jobber blant annet med å utvikle arealeffektive og automatiserte produksjonsløsninger for arten *H. diversicolor* i prosjektet POLYCHAETE (Prosjektnummer #280836) finansiert av Norges forskningsråd. I konseptet inngår overvåking av vekst og biometri ved bruk av maskinsyn, regulering av abiotiske miljøparametere, automatisert fôring tilpasset biomassen i systemet og konsepter for høsting av biomassen. Slike prosjekter vil være en viktig driver for utvikling av teknologiske nyvinninger innen akvakultur av børstemark, med overføringsverdi til andre arter.

På sikt kan akvakultur av børstemark bidra til å redusere belastningen på ville børstemarkbestander med de negative miljøeffektene dette medbringer, redusere miljørisiko knyttet til den internasjonale handelen av børstemark som agn, og fremskaffe nye fôringredienser som vil bidra til en mer bærekraftig akvakultur.

6.1.6 Marked

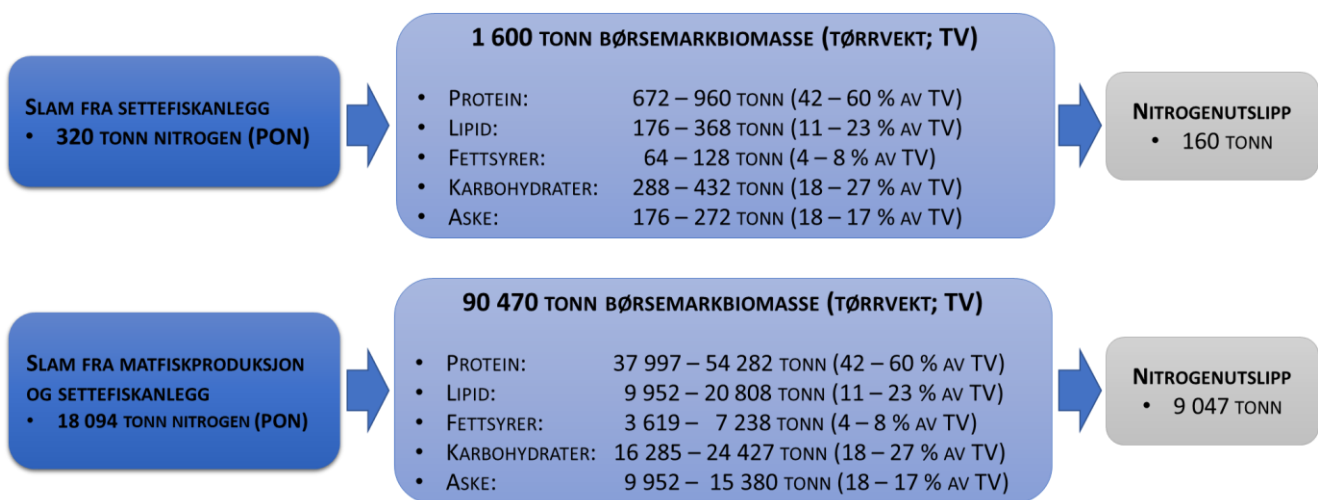
Det internasjonale markedet for børstemark er hovedsakelig for bruk som agn i rekreasjonsfiske og en mindre andel blir brukt som kjønnsmodningsfôr til stamreker i rekeakvakultur i Asia. Det foregår både kommersiell og rekreasjonshøsting fra ville børstemarkbestander, hovedsakelig av arter i familiene *Arenicolidae*, *Eunicidae*, *Nereididae* og *Onuphidae*. Ifølge Watson m.fl. (2017) høstes det årlig 121 000 tonn børstemark globalt til en estimert markedsverdi på £5.9 milliarder, som utelukkende blir brukt som agn. Forfatterne inkluderte ikke børstemark som brukes til andre formål slik som akvariefôr, reke- og stamdyrfôr og humant konsum i deres studie, så den reelle mengden børstemark som høstes og omsettes er trolig langt høyere (Cole m.fl., 2018). Høstingen foregår stort sett uregulert til tross for at den på grunn av omfanget er antatt å ha betydelig negativ påvirkning på bestander lokalt, regionalt og nasjonalt. Det er enighet om at etterspørselen kraftig overgår tilgangen.

Utsalgspriisen på børstemark varierer med art og opprinnelsesland samt om børstemarken selges levende eller frossen. Blant de høyest prisede artene finner vi *Halla okudai* (Imajima, 1967) og "blood worms" (*Glycera dibranchiata*) som selges for henholdsvis 606 USD kg⁻¹ i Japan (Saito m.fl., 2014) og 200 USD kg⁻¹ i USA (Watson m.fl., 2017). For *N. Virens*, *A. marina* og *H. diversicolor*, arter som er stedege i Norge, er utsalgspriisen henholdsvis 62, 40 og 32 UK£ kg⁻¹ (Watson m.fl., 2017). For børstemark som skal brukes som føringrediens (børstemark-mel), vil prisene man kan forvente å oppnå trolig være langt lavere.

6.1.7 Teoretisk produksjonsutbytte

For å fremheve mulighetene som ligger i å produsere børstemarkbiomasse på utslipp fra akvakultur er det gjennomført et svært forenklet regnestykke basert på beregnet årlig utslipp av nitrogen fra matfisk- og settefiskanlegg (Delrapport 1 Broch og Ellingsen 2020) og en bioassimileringsrate på 50 % for nitrogen hos børstemarken som vist i Honda og Kikuchi (2002), vist i figur 10. Beregningen har kun tatt med utslipp av partikulært organisk nitrogen (PON) og antar for øvelsens skyld at alt nitrogenet som slippes ut er biotilgjengelig for børstemarkproduksjon. For børstemarken er nitrogeninnholdet satt til 10 % av tørrvekt (Wang, Hagemann, m.fl., 2019), og det antas 100 % overlevelse gjennom produksjonssyklusen. Beregning av teoretisk utbytte av ulike næringsstoffer fra børstemarken er gjort med bakgrunn i laveste og høyeste referanseverdier som oppgitt i tabell 13 for to ulike scenarier; kun slam fra settefiskproduksjonen og det totale utslippet fra laksenæringen gitt at dette kan samles opp og gjøres tilgjengelig for bioproduksjon. Det er ikke tatt hensyn til om andre makro- og mikronæringsstoffer kan påvirke vekst hos børstemarken gitt at nitrogen ikke er den begrensende faktoren for vekst.

Hvis vi antar at børstemarken kan produsere i en tetthet på 1000 individer per m², og individuell vekt ved høsting er 1 gram våtvekt (1 kg biomasse m⁻²), vil det for de to scenarioene som vist i figur 10 kreve arealer på henholdsvis 16 og 452 km² for å produsere børstemarken, gitt at produksjonen foregår på ett plan. Dette vil skape verdier på henholdsvis 6 og 177 milliarder NOK gitt en salgspris på 390 kroner per kilo våtvekt (Watson m.fl., 2017).



Figur 10: Teoretisk produksjonsutbytte av børstemark produsert på slam fra settefiskproduksjon (øverst) og alt utslipp fra havbruksnæringen i 2019 (nederst), beregnet ut fra årlig utslipp av partikulært organisk nitrogen (PON).

6.2 Encelleprotein (Single Cell Protein)

6.2.1 Bakgrunn og biologi

Bruken av encellede organismer i mat både til dyr og mennesker er ikke nytt (Aztekerne i Mexico spiste blågrønnalger som Spirulina (SpirulinaSmoothie, 2020)) og systematisk, oppskalert produksjon av "mikrobielle proteiner" begynte allerede i etterkrigstiden (Matassa m.fl., 2016). Begrepet "Single cell protein" (også kjent som "microbial protein") eller "encelleprotein" brukes om mikrobielt fremstilt protein, og omfatter nokså forskjellige organismer:

- Bakterier og blågrønnbakterier (ofte kalt blågrønnalger) er prokaryote (dvs. uten avgrenset cellekjerne), blågrønnbakterier er fotosyntetiserende.
- Celleformede sopper: gjærsopp og Thraustochytrider, eukaryote (dvs. med avgrenset cellekjerne).
- Mikroalger: Eukaryote, finnes mange ulike typer med karakteristiske egenskaper (f.eks. er noen veldig rike på omega 3-fettsyrer, noen rike på astaxanthin el andre pigmenter, noen rike på karbohydrater, i tillegg til at de fleste har et relativt høyt proteininnhold).

Fordi det dreier seg om vesentlig forskjellige organismer, er produksjonsmetodene også forskjellige (se kapittel 6.2.3 Produksjonsteknologi nedenfor). Opprinnelse/genetiske stammer og produksjonsmetode vil være med på å forme den kjemiske profilen, så de ulike SCP-råvarene kan ha ulike profiler og anvendelsesområder. Det er etablerte produksjoner av enkelte arter innenfor alle gruppene, spesielt innenfor bakterier og gjær. Med tanke på hvor mange ulike arter det finnes innen alle gruppene, så er det sannsynligvis et stort potensial for å utforske nye arter og etablere produksjoner (Linder, 2019). Ofte brukes hele biomassen. i eksempelvis fôr (lav prosesseringsgrad), noe som påvirker fordøybarheten hos en del dyr.

6.2.2 Kjemisk sammensetning

Proteininnhold vil variere fra gruppe til gruppe og med produksjonsbetingelser, noe som kan brukes til å "skreddersy" råvaren ved å velge de riktige organismene for formålet og styre produksjonsbetingelsene (tabell 13). Fordi proteiner er så viktige i alle celleprosesser, så vil celleinnholdet imidlertid ikke variere like mye som innholdet av f.eks. lagringsforbindelser (stivelse, lipider) eller sekundære metabolitter.

Næringsverdien henger sammen med aminosyreprofil i proteinene, og en fordel med marine mikroalger er at de er basisen i marine næringskjeder og har en aminosyreprofil som passer for akvatiske organismer. SCP fra bakterier vil ofte ha god fordøybarhet og gunstig aminosyreprofil for flere dyr, men kan ha høyt tryptofan/lavt lysin-innhold sammenlignet med fiskemel. Det er viktig å teste fordøybarhet ved bruk av uprosessert biomasse, og det er gjort en del undersøkelser med tilsats av SCP i fôr til forskjellige dyr (gris, kylling, fisk, m.fl.). Celler med kraftig cellevegg (f.eks. cellulose) kan være vanskelig å bryte ned i fordøyelsessystemet, og det kan være en fordel å knuse cellene før bruk.

Nukleinsyre er en utfordring i flere av SCP-gruppene fordivivået av nukleinsyrer (DNA, RNA) sammen med proteinene varierer mellom organismegruppene. Mennesker har begrenset evne til å bryte ned nukleinsyrer, noe som fører til opphopning av urinsyre og utvikling av nyrestein og urinsyregikt. På den annen side kan nukleinsyreinnhold være veldig interessant i fôr til akvatiske organismer: "It is also important to mention that Prosa feed additive contains 7.7 percent of nucleotides, which are attractants for shrimps, and over 10 percent of glutamine, which is an amino acid known to be highly palatable" (Lesaffre, 2019, 1. september).

Tabell 13. Oversikt over hovedgrupper av encellede organismer, anslagsvis proteininnhold (% av biomasse) og nukleinsyrer, produksjonsprinsipp (fermentor vs. fotobioreaktor/PBR), salttoleranse og eksempler på andre egenskaper som kan utnyttes.

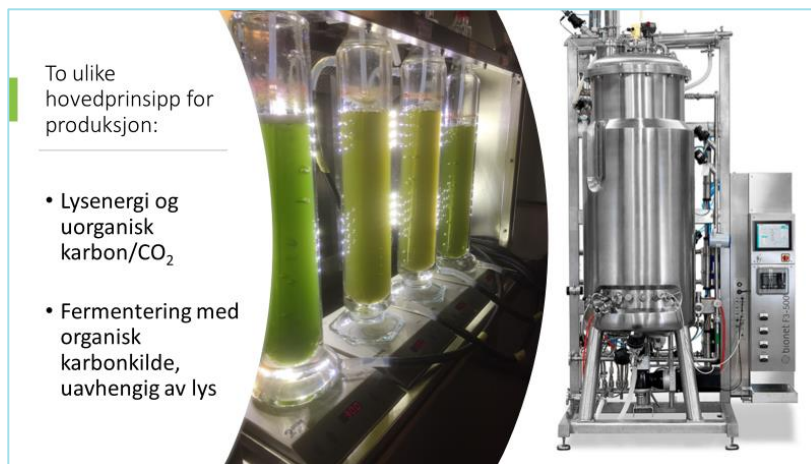
Organisme	% protein	Nukleinsyrer	Produksjon	Medium	Evt. andre egenskaper som kan utnyttes
Bakterier	50–85	10–16%	Fermentor	Hovedsaklig ferskvann	Bioaktiver, rekombinante proteiner, farmaka
Blågrønnbakterier	40–70		PBR	0-Brakkvann	Pigmenter
Gjærsopp	45–55	5–12 %	Fermentor	Ferskvann	Rekombinant insulin, m.fl.
Hyfesopp	30–55	3–10 %			
Thraustochytrider	10–30	Ukjent	Fermentor	Hovedsaklig saltvann	Oljer/DHA
Mikroalger	45–65	4–6 %	PBR	0–35 ‰	Pigmenter, oljer, bioaktiver

6.2.3 Produksjonsteknologi

Produksjon av bakterier, gjær og thraustochytrider foregår i fermenteringssystemer (figur 11), dvs. uavhengig av lysenergi og med organiske karbonforbindelser som "næring" (såkalt heterotrofi). Dette er en etablert metode på industriell skala, med høyt TRL-nivå (TRL 7–9). Et eksempel er BioProtein fra olje/naturgass ("petroprotein") som ble produsert på Tjeldbergodden allerede i 1999 (Equinor, 1991).

Fototrof produksjon av mikroalger og mange cyanobakterier foregår i alt fra rimelige, åpne dammer til lukkede, kontrollerbare fotobioreaktorer. Noen organismer kan veksle mellom heterotrof og fototrof vekst – såkalt miksotrofi – og det utnyttes i produksjon ved å endre betingelsene på bestemte stadier i produksjonen. Reaktorteknologi for lysstyrt produksjon er under utvikling, og det er nokså høy TRL for etablerte systemer (f.eks. klassiske rørreaktorer, TRL 5–9) og lavere TRL for nye konsepter.

Utvikling av integrerte produksjoner på tvers av organismegrupper og nivå i næringskjeden (akvaponi, IMTA) gir gode muligheter for bruk av avfallstrømmer og økt utbytte av protein, og her vil det sannsynligvis skje mye fremover. En storskalaproduksjon av f.eks. alger vil normalt være et økologisk sammensatt samfunn med bakterier, ciliater og andre protozoa, og det kan være et utgangspunkt for enda høyere proteinutbytte i biomassen.



Figur 11. SCP produseres med to ulike hovedprinsipper: Fototrof produksjon der energien kommer fra lys og CO₂ er karbonkilden, eller heterotrof produksjon der energien kommer fra organisk karbon i løsning (f.eks. metan, sukker).

6.2.4 Bioproduksjon/produksjonspotensial

Encellede organismer kjennetegnes ofte ved rask veksthastighet og høy produktivitet, og det er fokus på seleksjon og optimalisering av vekst og andre egenskaper for oppskalert produksjon. Som nevnt er det mange uutnyttede arter i alle gruppene, men før man tar i bruk nye arter må man verifisere at de ikke er giftige eller vanskelig fordøybare, og hvor godt de egner seg for produksjon under ulike dyrkingsbetingelser/med ulike ressursstrømmer.

Samtidig er det klare utfordringer i produksjonene, både biologiske (som f.eks. relativt ineffektiv lysutnyttelse i fototrof produksjon grunnet selvskygging i tette kulturer) og tekno-økonomiske (som behov for avvanning og tilførsel av kunstig lys) (Hua m.fl., 2019). En utfordring med avløpsstrømmer er at de ofte inneholder mye oppløst tørrstoff og har en sterk farge, og disse må fortynnes hvis de skal brukes i fotobioreaktorer (eller man må fjerne tørrstoff mekanisk, men det øker kostnaden og er neppe gjennomførbart i store volumer). Fermentering er en relativt godt etablert industriell produksjon, men der er det også utfordringer som f.eks. kontamineringer, skumdannelse og nedsatt produktivitet, samt kostnader knyttet til blant annet karbonkilden og avvanning.

Det er også stor forventning til synergieffekter i blandede produksjonssamfunn, og man kan utnytte ulike egenskaper til å styre produksjonen og øke det samlede utbyttet. Forsøk med bakterier og mikroalger sammen viste at bakteriene hadde moderat effekt med hensyn til å ta opp næringsstoffer/høyere utbytte, mens mikroalger hadde høy evne til å ta opp næringsalter/moderat utbytte (Hülsem m.fl., 2018). Her kan man hente inn kunnskap fra økologi, og bruke til design og styring av integrerte produksjonssamfunn.

Mikroalger kan bruke løste, uorganiske N-ressurser (DIN) som ammonium, urea og nitrat og bruk av avløpsstrømmer til algeproduksjon er et tema i rask utvikling også i akvakultur (Andreotti m.fl., 2020). Det finnes alger både i sjøvann og ferskvann, så man kan velge en alge for produksjon basert på saltinnhold i vannet. I et øyeblikksbilde ser biomasseutbytte fra en mikroalgeproduksjon veldig lavt ut (ofte < 1 g/L) men dette veies opp av høy veksthastighet og korte produksjonssykluser, så det endelige utbyttet er i størrelsesorden 4–15 tonn per hektar per år (Bleakley & Hayes, 2017). Biomasseutbyttet kan øke til 6 g/L i foto/miksotrof produksjon, og 10 g L⁻¹ i heterotrof produksjon (Benedetti m.fl., 2018). Til sammenligning er produksjon av soya og hvete i størrelsesorden 1–2 tonn ha⁻¹ år⁻¹ (Bleakley & Hayes, 2017).

6.2.4.1.1 Teoretisk produksjonspotensial med fototrof produksjon

I det følgende overslaget tar vi utgangspunkt i 1 tonn DIN fra settefiskanlegg, og at 1 kg mikroalgebiomasse inneholder 90 g N (Beal m.fl., 2012). Det er vist i forsøk at mikroalger kan ta opp nær 100 % av NH₄-N og NO₃-N (Wu m.fl., 2012), men det vil variere fra art til art og med N-kilde. Mikroalgebiomasse har relativt høyt innhold av protein, opp mot 50 % men det avhenger av art og dyrkingsbetingelser og ligger vanligvis på 30–40 % (Becker, 2007). Vi antar volumetrisk biomasseproduksjon på 1,5 g/L (som er realistisk i dagens system, men som vi forventer at øker med fremtidig teknologiutvikling) og 35 % protein i biomassen.

1 tonn DIN kan dermed teoretisk produsere 11,1 tonn algebiomasse, som består av 3,9 tonn protein. Det krever et produksjonsvolum på ca. 7 400 m³ (tabell 14), til sammenligning så er det 2 500 m³ vann i et olympisk svømmebasseng. Produksjonszyklusen vil være på 10 dager med optimal vekst og biomasseutbytte, i tillegg må man regne noe tid til opp- og nedrigg, samt tid for å bygge opp maksimalt biomasseutbytte i kulturen. Ved å utnytte høyden med en bioreaktor på 5x2x8 m (som okkuperer 10 m² areal) kan man holde 10 000 L algekultur. Produksjonen som kan ta unna 1 tonn DIN her krever 0,74 ha areal (Vargas m.fl., 2014), som ved 24 sykluser per år (15 dager per syklus), kan ta unna 24 tonn DIN. Arealbehovet for å utnytte 71 tonn DIN fra et settefiskanlegg med produksjonskapasitet på 2 000 tonn per år, blir da om lag 22 200 m². For å sammenligne med andre produksjoner så betyr estimatet ovenfor at det krever 0,2 m² areal å produsere 100 g protein fra mikroalger, noe som er langt lavere enn både soyabønner og reker (Poore & Nemecek 2018). Tabell 15 viser produksjonspotensialet for et standard settefiskanlegg med produksjon på 2 000 tonn settefisk per år og hele norsk settefiskproduksjon.

Tabell 14. Oversikt over parameter for mikroalgeproduksjon

Estimert SCP-produksjon fra mikroalger og DIN	Str.	Benevning
DIN	1	t
N for å prod. 1 kg algebiomasse	90	g
Teoretisk prod. algebiomasse fra 1 t DIN	11,1	t
Hvorav protein	3,9	t
Volumetrisk biomasseproduksjon, alger	1,5	g/L/dag
Estimert produksjonsvolum	7,41E+06	L
Produksjonsvolum i reaktor	1,00E+04	L pr 10 m ²
Arealkrav for produksjonen	0,74	ha
Protein prod. per areal	525	g m ²

Tabell 15. Teoretisk produksjonspotensial fototrof SCP-produksjon basert på et RAS-anlegg med produksjonskapasitet på 2 000 tonn per år og Norges settefiskproduksjon i 2019.

Produksjon	Prod. TAN (tonn)	Algebiomasse (tonn)	Protein (tonn)	Arealbehov (mål)
RAS-anlegg 2 000 tonn per år	71	790	277	22
Settefiskprod. (2019) 59 691 tonn	2 125	23 588	8 256	656

6.2.4.2 Sammenligning av produksjonspotensialet i fototrof produksjon og heterotrof fermentering

Heterotrof produksjon tar som oftest utgangspunkt i tilgjengelig organisk karbon, ofte rapportert som totalt organisk karbon (TOC). Ulike heterotrofe organismer (f.eks. gjær, bakterier eller thraustochytrider) vil ha ulike produksjonsegenskaper, proteininnhold og optimale forhold for vekst og lignende. Karbonforbindelsene i slam kan være av forskjellig art, hvor noen er mer tilgjengelige for opptak og omsetning enn andre. Produksjonsestimat har derfor en viss usikkerhet, men sier allikevel noe om potensialet.












I det følgende tar vi utgangspunkt i 1 tonn slam fra settefiskanlegg med et innhold av TOC på 23 % (Brod m.fl., 2017). Biomasseutbytte per glukose-enhet (som er vanlig karbon-kilde i eksperimentelt medium og næringsmiddelproduksjon) er i størrelsesorden 0,4-0,5 g biomasse per gram glukose, og en heterotrof SCP-produksjon med gjær (*Wickerhamomyces anomalus*) i 42 L batch fermentor viste et biomasseutbytte på 3,92 g/L/dag med ca. 48 % proteininnhold (Lapeña m.fl., 2020). I en produksjon med ulike karbonforbindelser fra slammet (som varierer i tilgjengelighet og effektivitet med tanke på mikrobiell omsetning) kan vi anta et utbytte på mellom 20–50 % protein i forhold til TOC i substratet, det vil si at fra 1 tonn slam vil en kunne produsere mellom 46–115 kg protein. Tabell 16 viser produksjonspotensialet for heterotrof SCP-produksjon basert på et RAS-anlegg med en produksjonskapasitet på 2 000 tonn årlig, samt settefiskproduksjonen i Norge i 2019.

Tabell 16. Teoretisk produksjonspotensial heterotrof SCP-produksjon basert på et RAS-anlegg med produksjonskapasitet på 2 000 tonn per år og Norges settefiskproduksjon i 2019.

Produksjon	Slam (tonn)	Protein (tonn)
RAS-anlegg 2 000 tonn per år	300	21
Settefiskproduksjon i Norge 59 691 tonn	8 354	618

Nye fermenteringsprosesser har høy volumetrisk produktivitet på 3–4 kg biomasse (tørrvekt) per m³ og time, som tilsvarer 0,001 eller mindre av arealbehovet dersom man produserer protein fra grønnsaker (Matassa m.fl., 2016). Det er fullt mulig å etablere fermenteringsproduksjon basert på saltvann, dersom vann er en begrensende ressurs (Zaky m.fl., 2018). Lapeña m.fl. (2020) oppgir at et fermenteringsvolum på ca. 5 000 m³ vil kunne gi nok protein til å dekke 10 % av proteinene som inngår i dagens fiskefôr (81 500 tonn), dersom man tar utgangspunkt i en proteinproduktivitet på 1,87 g L⁻¹ h⁻¹ el 0,16 tonn L⁻¹ år⁻¹. Lallemand Inc. produserer bakegjær i reaktorer på 100–300 m³, og med et arbeidsvolum på 200 m³ vil man trenge 25 slike fermentorer for å produsere denne mengden SCP.

Fermentering er en etablert industri, så TRL-nivå på dyrkingsteknologien er høy. Det er dermed også omfattende system av patetentering og lignende (Ritala m.fl., 2017, se også kap. 6.2.6 nedenfor). Det finnes mange eksempler på produksjoner som er av en viss størrelse med gjær eller bakterier (figur 12). Karbonkilden utgjør en vesentlig del av kostnadene forbundet med en storskala produksjon og man ser derfor etter rimelige kilder som f.eks. metan el CO₂ fra andre kilder, eller sukker-rester. Mange av produsentene leverer til fôrmarkedet eller næringsmiddel-produksjon, og i tillegg til protein er omega-3-fettsyrer ettertraktet. Fôrselskapene Skretting og Biomar tilbyr fôr med høyt DHA-innhold fra thraustochytrider, som i markedsføring ofte kalles for alger (Skretting, 2019).

COMPANY	FEEDSTOCK	MICROORGANISM	PRODUCTION INFRASTRUCTURE	PRODUCT AND MARKET
 CALYSTA	Methane, ammonia, oxygen	Bacteria (<i>Methylococcus capsulatus</i>)	Partnership with Cargill to produce at large-scale in Memphis, TN; production system is expected to reach a 200,000 MT annual capacity by 2021	FeedKind Animal feed
 String Bio	Methane	Bacteria	Pilot-scale production in India; capacity is undisclosed	String Pro Animal feed
 unibio	Methane, ammonia, oxygen	Bacteria (<i>Methylococcus capsulatus</i>)	Full-scale facility (6,250 MT/yr) in Russia with Protelux; partnership with Core Protein LLC to construct a facility in Texas, USA; partnership with Edhafat to construct a facility in Saudi Arabia (50,000 MT/yr)	UniProtein Animal feed
 novonutrients	Carbon dioxide (CO ₂), hydrogen, nitrogen, water	Bacteria	Pilot-scale production (between 1,000 and 2,000 MT/yr) in CA, USA; collaborating with the National Renewable Energy Laboratory; joined Chevron Ventures' catalyst program	Novomeal Animal feed
 KIVERDI AIR PROTEIN™	Carbon dioxide (CO ₂), hydrogen, oxygen	Bacteria (<i>Methylobacterium extorquens</i>)	Operating a pilot facility as a part of the Valorisation Carbone Québec program; anticipates to produce at commercial scale in 2022	KnipBio Meal, Animal feed, food
 WASTE DOO LAGO	Carbohydrates (first and second generation sugars, glycerol; corn ethanol)	Bacteria (<i>Clostridium</i>)	Collaboration with MRE ethanol plant in Sutherland, NE; 3,000 MT/yr facility anticipated to increase capacity to 30,000 MT/yr by the end of 2021; acquired Central Minnesota Renewables plant in Little Falls, MN	ProTyton Animal feed
 Deep Branch	Carbon dioxide (CO ₂), hydrogen	Bacteria	Moving to a pilot-scale gas fermentation system within Drax's Carbon Capture Usage and Storage Incubation Area	Proton Animal feed
 KnipBio	Methanol, condensed distillers' solubles	Bacteria	Pilot-scale production in Lowell, MA; capacity estimated within low per-ton scale	KnipBio Meal Animal feed
 ARBIOM	Wood	Yeast (<i>Candida utilis</i>)	Scaling production (80,000-L industrial fermentation scale) in VA, USA with undisclosed partners; estimated to produce 30,000 MT/yr of feed	SylPro Animal feed, food
 SOLAR FOODS	Carbon dioxide (CO ₂), hydrogen, water	Yeast	1 g/day protein bench-scale unit at VTT Technical Research Centre and is currently commissioning a 1 kg/day protein pilot-scale unit at its company headquarters in Finland	Solein Food
 SUSTAINABLE BIOPRODUCTS	Carbohydrates (first and second generation sugars, glycerol, starch)	Filamentous fungi (<i>Fusarium oxysporum</i> and <i>Fusarium venenatum</i>)	Pilot production out of the Polsky Center for Entrepreneurship and Innovation at the University of Chicago	Product name N/A Food

Figur 12. Sammenlikning av produksjonsfaktorer for heterotrofe SCP-produsenter. Hentet fra Krishfield (2020).

6.2.5 Anvendelse av restprodukter fra industri til produksjon av SCP

Bruk av nye substrater fra sidestrømmer/restråstoff vil kunne bli en viktig økonomisk faktor for industriell produksjon av SCP, men det vil kreve arbeid å få satt det inn i storskala produksjon. Med tanke på bærekraft bør ikke avfallsvannet transporteres over lange avstander, og transport og vannbehandling må sees på som kostnader som helst bør reduseres. Det er også viktig å vite hva som skjer med restproduktene dersom det behandles underveis, for eksempel bør man unngå for høy varme under tørking av slam ellers forsvinner mye av nitrogenet som gass og tørrstoffet er mindre egnet som N-kilde i ny produksjon.

En god begynnelse er å definere den aktuelle slamfraksjonen med hensyn til viktige faktorer som saltholdighet, turbiditet, løst organisk karbon og uorganiske næringsstoffer (særlig N og P), og derfra vurdere hvor det egner seg i de ulike produksjonssystemene (fototrof vs. fermentering) og valg av organisme. Innhold av eventuelle toksiner, tungmetaller, patogener, osv. må også kartlegges, som en del av en vurdering om det er nødvendig med vannbehandling/sanitering før bruk.

Proteinproduksjon har også kostnader etter selve dyrkingen. Felles for all produksjon i løsning ("submerged fermentation" og fotobioreaktorer) er relativt høyt vanninnhold og lavt biomasseutbytte, som gir betydelige kostnader for avvanning. Lav prosesseringsgrad er positivt for kostnadsbildet, og det er vanlig å bruke hel tørket biomasse. Lav prosesseringsgrad må i noen tilfeller vurderes opp mot fordøybarhet, men en interessant

"merverdi" når hele biomassen brukes er probiotika-effekt fordi det følger med gunstige vitaminer, mineraler, anti-oksideranter, essensielle fettsyrer, osv. (Einstein-Curtis, 2019, 4. oktober). Prosesseringsgrad kan tilpasses markedet, der "bulk protein" (større volum, lavere pris) kan være egnet for fôr, og raffinerte proteiner/rekombinante proteiner kan selges som bioaktiver/medisinske aktiver (små volum, høyere pris).

6.2.6 Regulering/"legal readiness level"

Regulering avhenger av substrat i produksjonen (f.eks. anvendelse av Kat. II–III animalske biprodukter/slam), og rundt anvendelse gjennom regelverk som f.eks. Food and feed additives. For noen anvendelser av SCP eller andre mikrobielt fremstilte ingredienser brukes betegnelsen Generally Regarded As Safe (GRAS) når produktene har gjennomgått testing av konkrete anvendelser i eksempelvis fôr. Et eksempel er "KnipBio's single-cell protein" som er godkjent for bruk i akvafôr til salmonider av US Food and Drug Administration (Fishfarmingexpert, 2019, 18. februar). I Norge produseres fiskefôr med DHA-rik olje fra fermenterte "alger" (Thraustochytrider). Quorn mycoprotein gjennomgikk mer enn 16 år med testing av eventuelle toksiner før produktet kunne tas ut på markedet (Ritala m.fl., 2017).

Noen av produksjonene er omfattet av betydelig patenteringsvirksomhet, særlig innen fermentering og produksjon av bakterier og thraustochytrider (Cagnac m.fl., 2017) til mat, helsekost og farmakologiske anvendelser. Patenteringene omfatter hele verdikjeden fra dyrkingsteknologi og produksjonsbetingelser, til produkter. For mikroalger og cyanobakterier gjelder at majoriteten av patenter er knyttet til noen få arter (*Chlorella* og *Spirulina*) som brukes i helsekost m.m. (Chilton m.fl., 2016), og så utvides det med nye arter ettersom man utvikler nye produkter som for eksempel astaxanthin fra *Haematococcus* spp.

Ordtaket "using waste is a waste of time" sier en hel del om hvordan mange anser bruk av sidestrømmer i bioproduksjon som økonomisk ulønnsomt, og hvor vanskelig det er på grunn av strenge reguleringer for bruk av biomasse produsert med avløpsstrømmer/restråstoff. Det forventes endringer i regelverk ettersom kunnskapsnivået øker om ressursstrømmene og anvendelser, og holdningsendringer hos forbrukere som er mer oppmerksomme på avfallshåndtering og bærekraft. Merverdi i form av bærekraftig produksjon og vannbehandling, økt ressursutnyttelse, og tilgang på nyttige råstoff, er temaer som benyttes for å promotere fremstilling av SCP (McKellar m.fl., 2019).

6.2.7 Konklusjon encelleproteinproduksjon

For gjær og bakterier er det allerede etablert fermentering i industriell skala, det samme gjelder etter hvert også for thraustochytrider der man evt. bruker samme fermenteringsteknologi som for gjær/bakterier. Mikroalger og fotosyntetiserende blågrønnalger dyrkes i stort omfang i områder med mye naturlig sollys, og *Spirulina* er et kjent innslag i helsekostmarkedet. Produksjonspotensialet for encelleprotein fra noen av disse organsimegruppene er presentert her, eksemplifisert med hhv. mikroalger i fototrof produksjon/bioreaktor og gjær i fermentor. Med de gitte verdiene hentet fra publiserte kilder så kan man rent teoretisk produsere i størrelsesorden 8 256 tonn protein fra alger og 600 tonn protein fra gjær, med bruk av næringsalter slam fra settefiskproduksjonen i Norge.

6.3 Intensiv produksjon av Gammaridaer

6.3.1 Bakgrunn og biologi

Gammaridaer er en gruppe rekkelignende krepsdyr som lever både i sjøvann, ferskvann og brakkvann. Mange av artene er viktige næringsorganismer for ørret og annen laksefisk, og felles for flere arter er at de inneholder astaxanthin som farger fiskekjøttet rødt hos både laks og ørret. *Gammaridaene* er relativt små krepsdyr som er mellom 5 og 25 mm lang.

De to marine *Gammaridaene*, *Gammarus oceanicus* og *Gammarus locusta* er gjennom flere generasjoner blitt holdt i kultur ved SINTEF Ocean. Det er gjennomført omfattende studier i laboratorieforsøk der vekst og kjemisk sammensetning er blitt dokumentert. Hovedforskjellen mellom disse to artene er at *G. locusta* er noe mindre og har lavere veksthastighet enn *G. oceanicus* mens den kjemiske sammensetningen varierer i langt mindre grad. I naturen er begge disse artene tallrike i littoralsonen og finnes i relativt høye tettheter innenfor spesifikke biotoper. Det er velkjent at de tåler store daglige variasjoner i miljøbetingelsene, ettersom de gjennomlever tidevanns-syklus 2 ganger i løpet av et døgn. De miljøparametrene som spesielt påvirker disse organismene er temperatur, lys og vannkvalitet (sensitive ovenfor ammonium og variasjon i pH). Begge artene spiser detritus, dvs. organisk materiale både fra plante og dyreriket, og viser høy veksthastighet og reproduksjonsrate når dyrkningsbetingelsene optimaliseres. Laboratorieforsøk har vist at generasjonstiden for begge artene varierer avhengig av temperaturen. Dyrkningsforsøk ved vanntemperatur på 12 °C har vist at generasjonstiden for *G. locusta* og *G. oceanicus* er henholdsvis 72 og 41 dager, og den individuelle tørrvekten av de voksne stadiene 31 mg (*G. locusta*) og 52 mg (*G. oceanicus*) (Evjemo & Reitan, 2006).

6.3.2 Kjemisk sammensetning

Kjemiske analyser av råstoff fra *Gammaridaer* fra naturlige populasjoner, og dyrket på tang/tare i kombinasjon med rekeskall, har vist at de har et høyt innhold proteiner (47–53 % av tørrvekt), med bl.a. aminosyrene arginine, isoleucine, lysine, methionine, phenylalanine, threonine, valine, histidin. Lipidfraksjon utgjør 6,5 %–14 % av tørrvekten, og inneholder n-6 og n-3 fettsyrer. Analyser gjennomført ved SINTEF viser at lipidfraksjon består av 22 % n-3 fettsyrer hvor DHA og EPA utgjør henholdsvis 5–10 % og 8–12 % av total mengde fettsyrer. Omega-6 fettsyrer (2/3 i form av ARA) hovedsakelig i phospholipider (60 %). Restfraksjonen består i hovedsak av triglycider (25–30 %). Varierende lipidinnhold og varierende fettsyresammensetning påvirkes av føret de spiser (Evjemo, 2007, 2011).

I tillegg har disse organismene et høyt innhold av karotenoider (0,36–0,40 mg g⁻¹ tørrvekt), hvor astaxanthin utgjør opp mot 80–85 % av totalmengden karotenoider. I tillegg inneholder *Gammaridaene* vitamin E (300–550 ppm), karbohydrater (ca. 8 % av tørrvekt), i hovedsak chitin og beta-glucaner, samt mineraler, herunder kalsium (12 % av tørrvekt) og fluorider (i ppm kvantiteter) (Evjemo, 2007, 2011).

Den kjemiske sammensetningen, sammen med de biologiske egenskapene til disse organismene, gjør at de er attraktive for kommersiell utnyttelse; herunder fôr eller fôrtilsetning for fisk og fiskelarver, humant konsum, helsekost og smakstilsetninger i ulike matprodukter. Tidligere økonomiske beregninger som er gjennomført av SINTEF viser at produksjon av biomasse fra *Gammaridaer* har et betydelig potensial under de forutsetninger er beskrevet ovenfor, men skal man være i stand til å ta ut dette potensialet må kunnskapsgrunnlaget utvikles på flere felter. Dette må bland annet skje gjennom utvikling av produksjonsteknologi og gjennomføring av kontinuerlig produksjon i industriell skala.

6.3.3 Produksjonsteknologi

Det er ikke utviklet en fullstendig prosess som muliggjør dyrking av *Gammaridaer* i industriell skala. Dyrkningsteknologien som er utviklet ligger på TRL-nivå 5. Det vil si det er utført laboratorieskala testing under relevante dyrkningsbetingelser for å dokumentere biologiske produksjonsparametere, og viktige tekniske løsninger for hvordan et pilotanlegg for *Gammaridaer* kan etableres.

6.3.4 Produksjon av biomasse

Dyrkningsperioden, det vil si tiden fra *Gammaridae*-eggene klekker til de når voksent stadium (ikke kjønnsmodne) og kan høstes er artsavhengig. *G. locusta* når voksent stadium etter 72 dager og har en individuell tørrvekt mellom 28 og 35 mg, mens *G. oceanicus* som er noe større og samtidig vokser raskere oppnår en tørrvekt på 48–55 mg i løpet av 41 dager. Hvert hunndyr produserer mellom 30–40 egg pr syklus

og overlevelsen fra klekking og frem til voksent stadium har i labforsøk vært mellom 80 og 90 %. Hvert hunddyr kan produsere avkom 2–3 ganger per år.

Reproduksjon og antall avkom som hvert hunddyr produserer har stor betydning dersom dette skal foregå i industriell skala og det er derfor viktig at biologiske nøkkelfaktorer er klart definert. Det er den kvalitative og kvantitative lysmengden i kombinasjon med temperatur som er de viktigste parametrene som påvirker reproduksjonen til disse organismene.

Tettheten av *Gammaridaer* i produksjonskar kan være høy og teoretiske produksjonsmodeller har vist at det kan produseres relativt mye biomasse på kort tid. Voksne dyr høstes, og kan deretter tørkes ned til 10 % av våtvekten. En ser for seg en rekke muligheter for videreføring av biomassen for å øke verdiskapningen. Dersom produktsortimentet prosesseres til to hovedfraksjoner slik som helmel (ikke-fraksjonert) eller fraksjonerte produkter (proteinfraksjon, lipidfraksjon med innhold av karotenoider), kan dette være forretningsområder både innenfor akvakultur og humant konsum.

6.3.5 Anvendelser av restprodukter fra industri som fôr til *Gammaridaene*

I dyrkningsforsøk med *Gammaridaer* er det brukt ulike arter tang, storetare, fingertare og sukkertare. Dyrene vokser bra på alle disse substratene. I noen av disse vekstforsøkene er det i tillegg brukt rekeskall (restprodukt fra rekeindustrien) noe som har bidratt til å øke innholdet av karotenoider og det totale lipidinnholdet i dyrene. I det pågående prosjektet BIOCYCLES som ledes av SINTEF Ocean, er det blitt brukt ulike typer slam og restråstoffer som fôr til *Gammaridaene*. De innledende forsøkene viser de spiser partikulært tørket slam og enkelte restprodukter fra landbruket, men det er til nå ikke gjennomført vekststudier gjennom en hel generasjonssyklus med disse substratene. Det samme gjelder slam som ble brukt fra SalMar sitt settefiskanlegg i Follafoss. I dette tilfellet ble *Gammaridaene* føret med slam i 41 dager. Overlevelsen var god (76–89 %) og det ble i løpet av dyrkningsperioden registrert en svak økning av innholdet av de viktige fettsyrene DHA og EPA (Evjemo, 2016). På bakgrunn av disse resultatene er det ikke mulig å si hvor lang produksjonstiden vil være eller hvordan den kjemiske sammensetning blir i *Gammaridaer* som er blitt føret med slam.

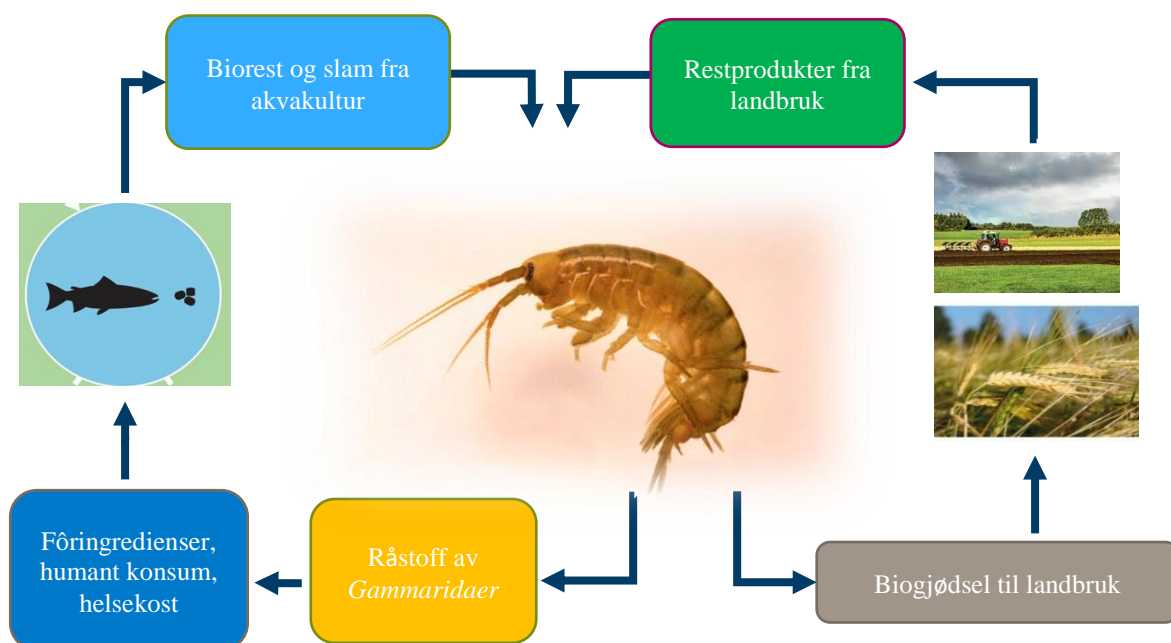
Tabell 15: Oversikt som viser viktige faktorer som har betydning for intensiv produksjon av biomasse fra *Gammaridaer*.

Produksjonskrav	Generasjonstid	Produksjonspotensial	Fôrfaktor	Produksjonsutbytte
Stamdyrpopulasjon Produksjonsanlegg Fôr Fysiske faktorer; Vanntemp. 14–16 °C Lysstyring	Avhengig av art (1–3 måneder)	Høyt under gitte betingelser*	Tare som fôr gir fôrfaktor ~ 3. Usikkert for andre fôrsubstrater	Protein, 47–53 % Lipid, 6,5 %–14 % Karbohydrat, 6 % Askeinnhold, 33 %**

6.3.6 Teoretisk produksjonsutbytte

For å beregne biomasseproduksjonen av *Gammaridaene* er det laget flere teoretiske modeller som estimerer totalt produksjonsutbytte etter 5 generasjoner når utgangspunktet er 1 000 voksne hunner og 1 000 voksne hanner (stamdyrpopulasjon). Det må tas forbehold om at beregningene er gjort ut fra erfaringer fra laboratoriet og et gitt antall produksjonsforsøk som er gjennomført under optimale laboratoriebetingelser. Direkte overføring av disse resultatene til industriell storskalaproduksjon må derfor gjøres med stor varsomhet.

Gitt at *Gammaridaene* føres med stortare og generasjonstiden settes til 69 dager, individuell tørrvekt av dyr som høstes 30,5 mg, overlevelse 80 % og reproduksjonsrate 35 avkom/hunn, blir total biomasseproduksjon i løpet av 5 generasjoner (345 dager) i overkant av 6 tonn. En betydelig del av askeinnholdet består av kalsium (Ca) (12,3 %) som sammen med saltinnholdet (NaCl, 2,2–2,9 %) utgjør dette omtrent halve askeinnholdet.



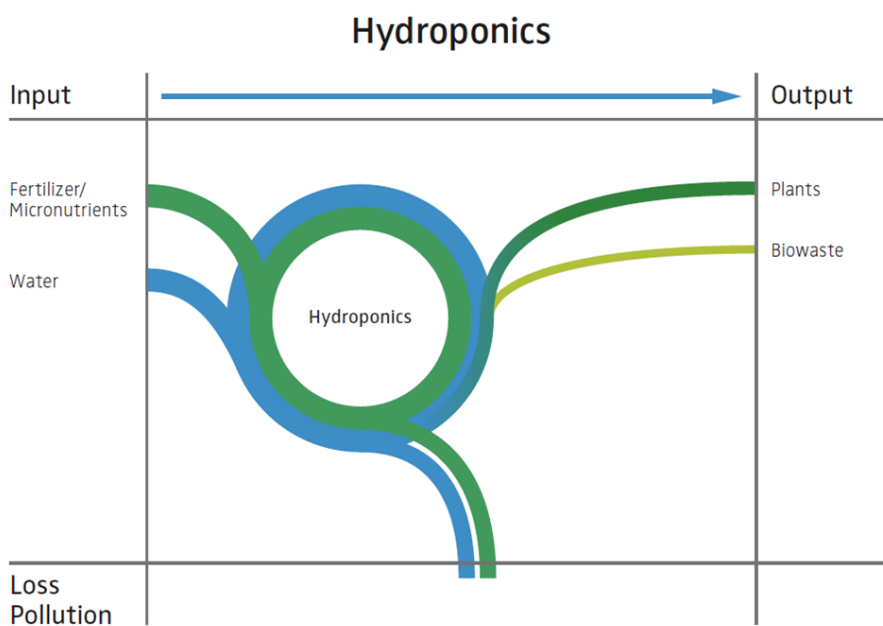
Figur 13. Prinsippskisse som viser hvordan biorest og slam fra akvakultur og restprodukter fra landbruket kan inngå i produksjon av råstoff fra *Gammaridaer*.

6.4 Akvaponi

6.4.1 Utnyttelse av næringsstoffer

Stoffer rike på nitrogen og fosfor gir et godt grunnlag for plantegjødsel, og den åpenbare løsningen er å distribuere slammet og avløpsvannet fra RAS-systemer til jordbruksfelt. Samtidig har landbruket et høyt utslipp av fosfor og nitrat (European Commission, 2008). En slik distribusjon vil føre til vannforurensing (grunnvann og overflatevann, inkludert havvann), noe som resulterte i et EU-direktiv om nitratforurensning. Fra et juridisk ståsted er Norge, sammenliknet med andre skandinaviske land, mindre strengt. Likevel har Norge den klart høyeste brutto nitrogenbalansen av de skandinaviske landene, med et nitrogenoverskudd på 100 kg ha^{-1} (Hellsten m.fl., 2017).

På lik linje med RAS finnes delvis-lukkede systemer for å dyrke næringsrike planter. Planter som vokser uten jord i resirkuleringsystemer kalles hydroponisk dyrking. Hydroponiske systemer krever gjødseltilførsel, og kan benyttes i forskjellige grader i kontrollerte miljøer. Det kan sammenliknes med fisken i et RAS-anlegg: dess mer et miljø (dvs. temperatur, relativ fuktighet, vannets næringskonsentrasjon) blir kontrollert og optimalisert, desto bedre vokser plantene. Vanligvis er hydroponiske systemer implementert i drivhus. Dessverre gjelder ikke prinsippet om en *Perpetuum Mobile* for hydroponiske systemer. Som illustrert i figur 14 krever disse systemene gjødsel og vann. I tillegg krever planter høye strålingsnivåer for å utføre fotosyntese.



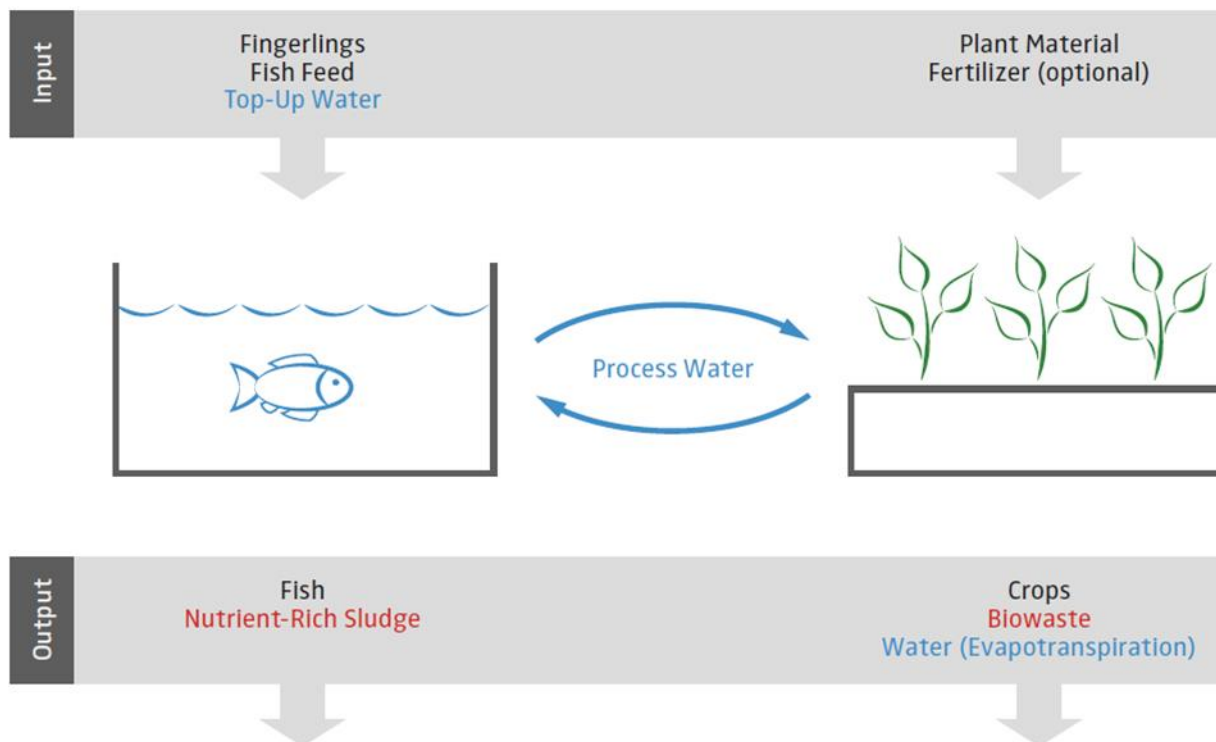
Figur 14. Flytskjema over et hydroponisk system (Goddek m.fl., 2019).

Figuren angir eksplisitt bioavfall som et utbytte, da det vanligvis brukes i biogassanlegg eller overføres til komposteringsenheter. Salter har dog en tendens til å akkumuleres i sterile hydroponiske systemer. Det betyr at som i RAS, kreves det utskifting av vann som igjen fører til tap av næringsstoffer.

I 2016 oppdaget Delaide m.fl. (2016) og Goddek og Vermeulen (2018) de første indikatorene på at planter (dvs. salat) som vokste i et høykonsentrert (dvs. optimal) næringskonsentrasjon basert på RAS-avløpsvann, viste (1) en høyere vekstrate (20–40 %) og (2) var i stand til å absorbere oppløste salter langt bedre enn planter i sterile hydroponiske systemer. Konseptet med å koble til RAS og hydroponiske systemer kalles akvaponi.

6.4.2 Akvaponi

Akvaponi er en eldgammel metode for å dyrke fisk og planter i ett system. Tidligere ble akvaponi brukt i rismarker, helt til forskere utviklet konseptet videre. Både fisk og planter ble dyrket i ett (øko-) system, noe som reduserte avfallsstrømmene. Vanligvis ble varmtvannsfiskearter som tilapia (f.eks. *Oreochromis niloticus*) eller maller brukt i slike resirkulerende akvaponisystem, som illustrert i figur 15. Ved å se nærmere på tabell 1 kan en lettere forstå hvorfor nettopp disse artene ble valgt.



Figur 15. Skjematisk illustrasjon av et resirkulerende akvaponisystem. Det markert i rødt viser til ikke-brukte avfallsstrømmer.

Tabell 1. Optimale forhold for forskjellige fisk- og plantearter.

Sub-System	Art	pH	EC/Salinitet	Optimal Temp (°C)	Ammonia (mg L ⁻¹)
RAS	<i>Oreochromis niloticus</i>	7–9	sal.: <15‰	29.5	<0.1 N-NH ₄
	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	6.5–8.5	sal.: <26‰	15	<0.0125 N-NH ₃
Hydroponics	<i>Lactuca sativa</i>	5.5–6.5	1–2 mS/cm	21–25	<10 N-NH ₄
	<i>Lycopersicon esculentum</i>	6.3–6.5	<2.5 mS/cm	18–24	n/a

Denne tabelloversikten viser store avvik med hensyn til denne tilnærmingen som kan oppsummeres som følger:

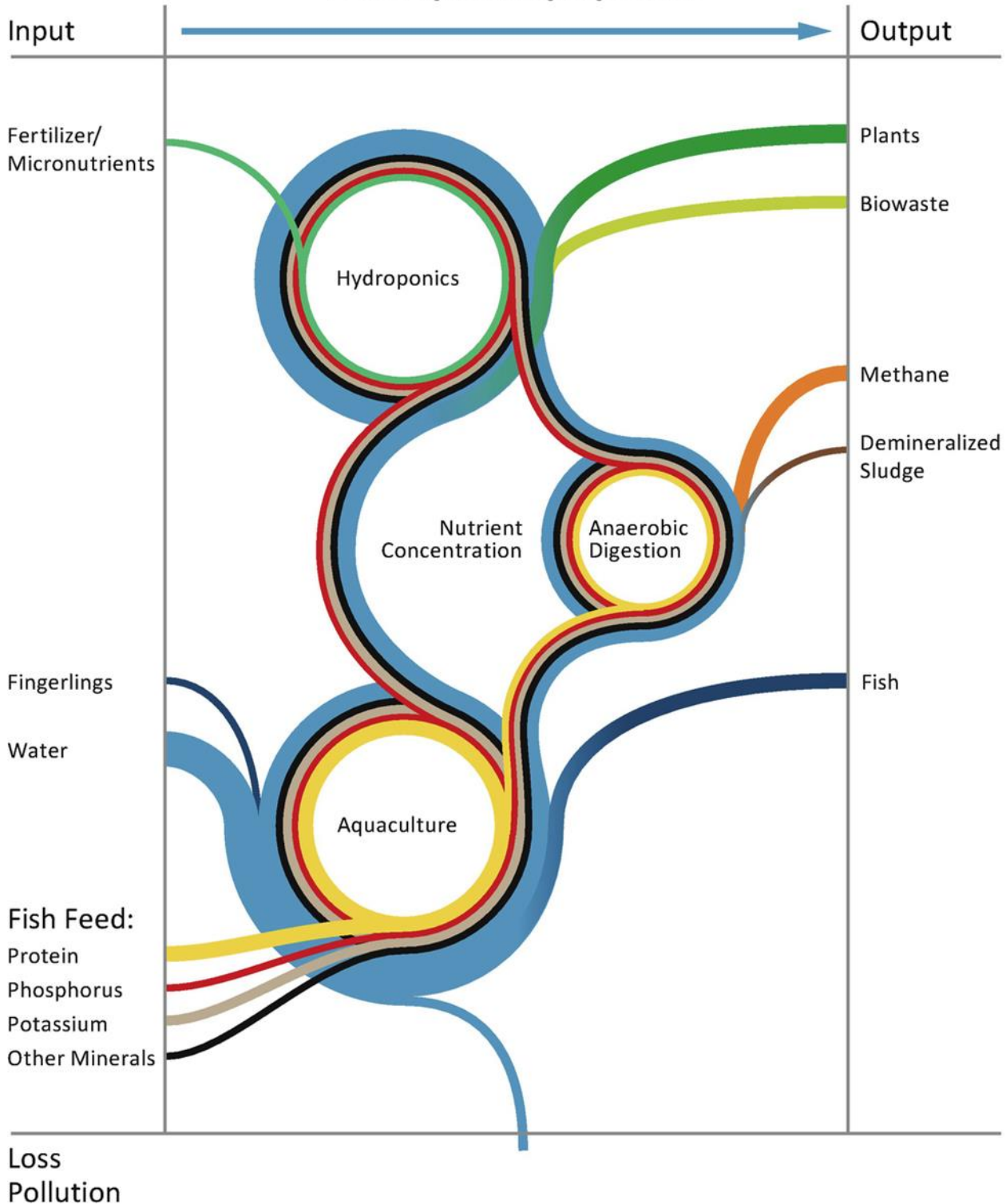
1. Salat (*Lactuca sativa*) og tomater (*Lycopersicon esculentum*) krever for eksempel svært høye næringskonsentrasjoner som er representert av den elektriske konduktiviteten til prosessvannet. Samtidig krever fisken mye renere vann.
2. Planter er avhengig av nitrogen og har en vekstfordel når en andel av nitrogenet er tilgjengelig som ammoniakk. Typiske hydroponiske næringsløsninger inneholder rundt 200 mg L⁻¹ nitrat og rundt 10-20 mg L⁻¹ ammoniakk. Samtidig er ammoniakk giftig for fisken. Kaldtvannsarter har flere problemer når de blir utsatt for ammoniakk, og til og med nitrat. Mens tilapia lett kan håndtere nitratkonsentrasjoner på > 150 mg L⁻¹, er en omtrentlig veiledende verdi for ørret rundt 30 mg L⁻¹ (Davidson m.fl., 2014).
3. Den optimale pH-verdi og temperatur samsvarer ikke mellom artene i de forskjellige systemene.

Alle disse faktorene hemmer veksten til både planter og fisk, og det er en av årsakene til at akvaponi til nå ikke har klart å hevde seg. Likevel gir den ideologiske tilnærmingen til å dyrke fisk og planter i ett og samme system gradvis vei for teknologiske løsninger som kan konkurrere med, og mest sannsynlig overgå, moderne hydroponisystemer.

6.4.3 Flersløyfede akvaponisystemer

Ideen bak et flersløyfet akvaponisystem er å drifte, betjene og vedlikeholde hvert delsystem (dvs. hydroponisk og RAS) uavhengig. I stedet for systemer som har kun ett økosystem, som verken fisk eller planter foretrekker, bør paradigmet skifte tilbake til to frittstående systemer som uansett er sammenkoblet. Både slammet og prosessvannet, som er rikt på næringsstoffer, bør brukes effektivt i den grad den tekniske og økonomiske implementeringen tillater det.

Decoupled Aquaponics

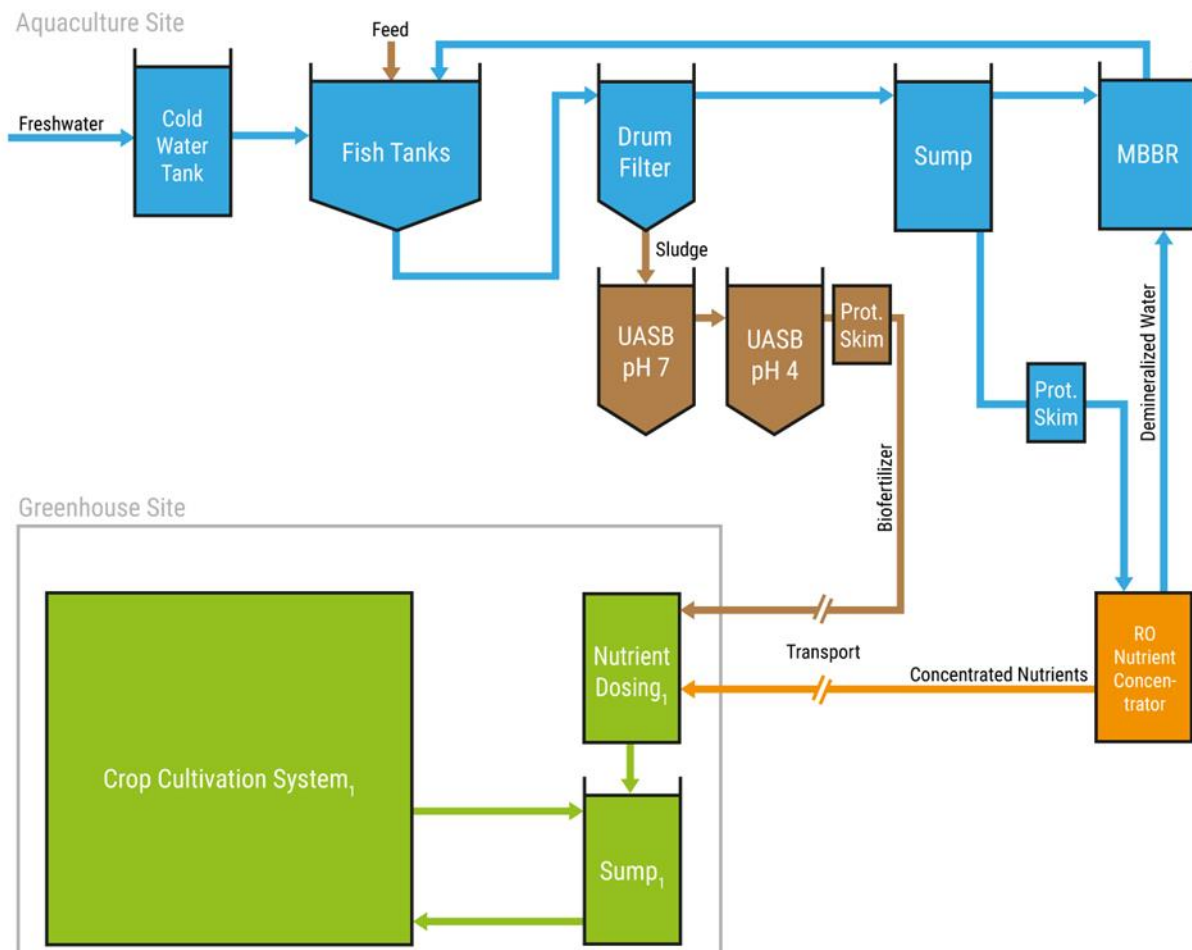


Figur 16. Illustrasjon av et flytskjema over et enkelt flersløyfed akvaponisystem bestående av et hydroponisk system, et RAS-system og næringsstoffkonsentrasjon i bioreaktor for å transformere fast RAS-avfall til flytende biogjødsel (Goddek m.fl., 2019).

Figur 16 illustrerer hvordan avfallsstrømmene fra akvakultursystemene kan behandles og gjenbrukes i et hydroponisystem. Bioavfallet som oppstår fra det hydroponiske systemet kan også tilsettes bioreaktoren. Avfallsstrømmene og tapene i systemet er ubetydelige og oppstår hovedsakelig ved evaporasjon/evapotranspirasjon, og demineralisert slam med lite næringsstoffer. Både drivhuset (hydroponi) og RAS trenger ikke å være på samme sted. For eksempel kan næringsstoffkonsentratoren og bioreaktoren være plassert på RAS-området. For å forstå hvorfor, må vi dykke litt dypere inn i omfanget og prosessene som utføres av både næringsstoffkonsentratoren og bioreaktoren.

Næringsstoffkonsentratoren må være en teknologi som kan skille oppløste faste stoffer fra prosessvannet. En vanlig teknologi med maksimal TLR (Technology Readiness Level) på 9 er omvendt osmose (OO). De fleste næringsstoffene i RAS-vannet separeres ved å presse næringssaltene i vann under trykk gjennom en halvgjennomtrengelig membran. Den næringsrike strømmen i separasjonsprosessen blir *saltlake*, og denne saltlaken er et konsentrat av RAS-vannet. Konsentrasjonen av næringsstoffene i laken er rundt 8–10 ganger høyere enn næringsstoffkonsentrasjonen i RAS-vannet.

Den implementerte OO-teknologien utgjør dermed en prosess for fjerning av nitrogen. Når en vet at planter krever mye høyere konsentrasjon av nitrat, er konsentrert RAS-vann å foretrekke. Dette er fordi den har den fordelen at man ikke trenger å tilsette store mengder ekstra gjødsel for å oppnå gunstige konsentrasjoner av næringsstoffer i det hydroponiske systemet.

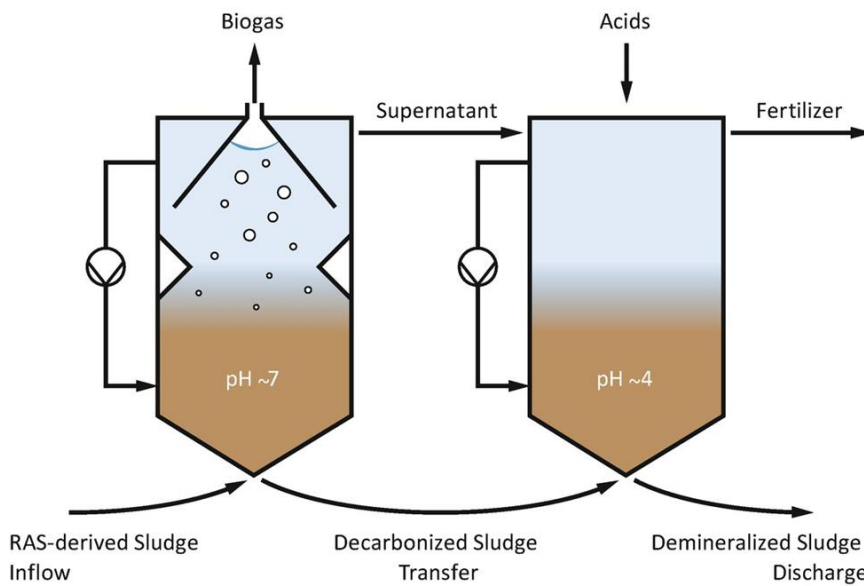


Figur 16. Implementering av en næringsstoffkonsentrator og et anaerobt bioreaktorsystem til de to frittstående RAS og drivhussystemene (Goddek m.fl., 2019).

Figur 16 viser hele konteksten av OO-prosessen (oransje og betegnet RO i figur). Før vannet ledes til OO, kreves det et filtreringssystem for å fjerne mikro- og nanopartikler fra RAS-vannet. En god løsning for dette er en proteinskimmer (posefiltre kan også brukes, men de må ofte rengjøres). Fordelen med denne løsningen er retur av det demineraliserte vannet tilbake til RAS-systemet. På denne måten kan vannparameterne holdes på et gunstig nivå, uten å måtte slippe ut prosessvann. Dimensjonene på OO-konsentratoren baseres på det daglige utslippsnivået og effektiviteten på OO. Eksempelvis, dersom effektiviteten til OO er 85 % og det daglige utslippsnivået er 15 % av volumet, bør den daglige kapasiteten til OO være 17,6 % av det totale volumet til systemet (dvs. 15 %/0,85). Et RAS-system på 1000 m³ vil derfor krevet et OO-system med en kapasitet per time på 7,3m³(1000*0.176/24).

Fra et økonomisk synspunkt må det elektriske energiforbruket til et OO-system belyses. Den typiske kostnaden for avsalting av sjøvann ved bruk av OO-teknologier ligger på rundt 35 kWh/m³ (Antonyan, 2019). Å behandle brakkevann er billigere og ligger på rundt 1,5–2 kWh/m³ med en total systemgjenoppbygging på 85 % (VEOLIA, personlig kommunikasjon). Dersom man tar til betraktning at næringskonsentrasjonen fra RAS-vann er langt under brakkevann, bør kostnaden for å utvinne næringsstoffer fra RAS-vannet ligge på under 1,5 kWh/m³. Strømprisen for industrier forutsettes ligge på rundt 0,5 NOK. Forutsatt OO-kostnader på 1,2 kWh m⁻³, vil det fiktive små- til medium skala oppdrettsanlegget på 1000 m³ forbruke 105 NOK i strøm per dag for å utvinne næringsstoffene fra RAS-vannet. Uten utnyttelse av næringsstoffene fra RAS-vannet vil kostnaden være uforholdsmessig stor i forhold til kostnadsbesparelsene (dvs. tilsette ferskvann). Samtidig ville man kanskje sett denne prosessen i nytt lys dersom man utarbeidet et avfall-til-verdi-konsept (for eksempel plantedyrking).

Den andre komponenten i et flersløyede akvaponisystem (Multi-Loop Aquaponics System) fokuserer heller på fosforutvinning enn nitrogenfjerning. Det er mange aerobe og anaerobe måter å redusere RAS-avledet slam og gjøre komponentene biotilgjengelige (Delaide m.fl., 2019). Nyere forskning har imidlertid vist at UASB-reaktorer (Upflow Anaerobic Sludge Blanketing) er svært effektive og pålitelige til dette formålet (Goddek m.fl., 2018). Figur 16 viser en lovende tilnærming. UASB opererer under konstant oppstrømning. Vanligvis kreves det ikke resirkuleringspumper for kommunalt avløpsvann hvor det kun er en hydraulisk retensjonstid på noen timer for å redusere avløpsvannets KOF. Imidlertid vil en nedbrytning av komplekse bindinger kreve hydraulisk retensjonstid på flere dager. Det første trinnet kjøres ved en høyere pH (f.eks. 7) for å fremme metanogenese. Her produseres metan (CH₄) og det meste av karbonet (C) fjernes fra slammet. Dette er viktig ettersom det andre trinnet går på lav pH for å fremme solubilisering/mobilisering av næringsstoffer som er "fanget" i slammet. Slam med mye karbon vil bli omdannet til flyktige fettsyrer når de blir utsatt for et miljø med lav pH. Slike flyktige fettsyrer hemmer plantevekst i høye konsentrasjoner.



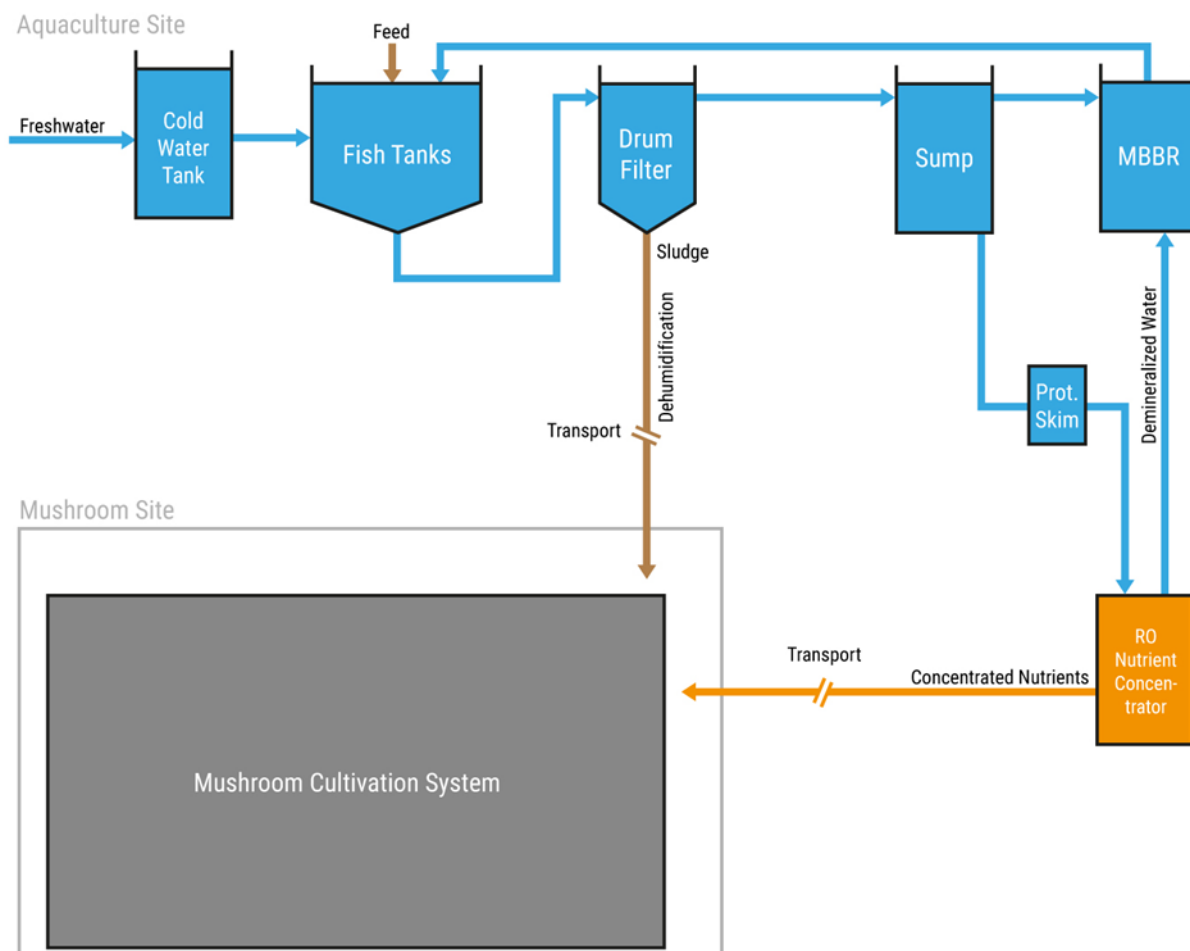
Figur 17. Illustrasjon av et to-trinns UASB-system (Delaide m.fl., 2019).

En stor andel av fosforet kan utvinnes på den måten for så å bli tilsatt i det hydroponiske systemet i form av flytende gjødsel. Som vist i figur 17 krever denne gjødselen også en del etterbehandling ettersom mikro- og nanopartikler ellers ville akkumulert i plantenes rhizofære, og dermed hemmet planteveksten.

Technology Readiness Level (TRL) til UASB er også 9. De har blitt implementert over hele verden i flere tiår. Den justerte versjonen for lengre hydraulisk retensjonstid med resirkulasjonspumper er imidlertid ikke utbredt. Likevel er den teknologiske hindringen lav og en installasjon av et slikt system er ukomplisert. En av de største utfordringene en står ovenfor er at kombinasjonen av utstrømning fra UASB og OO mest sannsynlig ikke utgjør en optimal sammensetning av næringsstoffer for plantene. Av den grunn må en doseringsenhet (se figur 17) tas i betraktning som kan fortynde eller tilsette næringsstoffene som kommer fra RAS, med andre næringsstoffer som plantene trenger. Slike doseringsenheter er etablerte standardteknologier for hydroponiske systemer.

6.4.4 Dyrking av sopp

Spesielt for kaldere land vil en alternativ tilnærming være å bruke avfallsstrømmene til oppdrett av sopp (se figur 17). Sopp dyrkes i lukkede omgivelser, noe som betyr at produksjonsanlegget kan ha langt lavere U-verdier (dvs. isolasjon) enn drivhus. For å dyrke sopp er det nødvendig med et næringsrikt vekstmedium. Slam kan være et godt alternativ eller komplement til kompostert jord. Samtidig vil det være behov for å avfukte slammet før det tilføres i systemet, avhengig av hvor stor andel som brukes som vekstmedium. Konsentrerte næringsstoffer fra OO kan også brukes for å tilsette vekstmediet næringsstoffer etter hver vekstsyklus. Mediet brukes vanligvis flere ganger før det byttes ut på grunn av næringsmangel.



Figur 17. Teoretisk implementering av veksthus for sopp ved bruk av avfallsstrømmene fra RAS-anlegg (Goddek m.fl., 2019).

Denne ideen vil imidlertid kreve ytterligere forskning, spesielt når det gjelder vekstrater sammenlignet med toppmoderne systemer. I teorien skal sopp vokse godt i slike næringsrike miljøer.

6.4.5 Akvaponi i Norge og internasjonalt

I Norge har Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO) bygget opp et forsøksanlegg for akvaponi på Landvik i Grimstad, som har vært drevet siden 2009/2010. Akvaponianlegg i Norge drives som demonstrasjon- og småskalaanlegg som f.eks. tidligere Naturlig Grønn i Sandefjord (nå Greenfarm) og Landbrukskvartalet i Oslo (VårtOslo, 2017, 19. desember). I Stordal utenfor Ålesund drev Lotics AS er pilotanlegg med 10 000 lakseyngel og 350 m² planter, men selskapet ble nedlagt i 2018 (Sunnmørsposten, 2018, 12. juli). Lofoten akvaponi har fått konsesjon for produksjon av 50 tonn røye per år og skal starte opp sin produksjon av grønnsaker i tilknytning til røyeproduksjonen.

Akvaponi har vært drevet i småskala anlegg over hele verden, og det begynner å bli flere store kommersielle anlegg som Superior Fresh Inc i Wisconsin USA som produserer laks og salat (www.superiorfresh.com) I Huston USA produserer Sustainable Harvester 10 000 salathoder i uka basert på næringsstoffer fra fisk. (<https://www.sustainableharvesters.com/>). I Europa finnes det flere eksempler på urbane akvaponianlegg i byer som ECF Farmsystems i Berlin (abbor og basilikum). I 2019 ble det annonsert at Europas største akvaponianlegg skulle bygges i Frankrike i tilknytning til et anlegg som produserer 1 000 tonn ørret og stå ferdig i 2022 til en kostnad av 12 millioner euro (Evans, 2020, 16. januar).

6.4.6 Konklusjoner om akvaponi

Stedsuavhengige moderne flersløyfedede akvaponisystemer (Multi-Loop Aquaponics Systems) gir et stort potensial for å gjøre avfallsstrømmer fra RAS-anlegg til et verdifullt produkt. Gitt det faktum at planter krever et konstant klima litt over 20°C, vil det være nødvendig med oppvarming det meste av året i kalde og tempererte områder. I det norske tilfellet kan et slikt drivhus bygges nær industrianlegg (f.eks. smelteverk) som tillater bruk av industriell spillvarme. En ekstra industriell kilde til CO₂ vil være en annen fordel med ytterligere industrielle partnerskap.

Tatt i betraktning en stor import av grønnsaker, gir utvinning, prosessering og gjenbruk av RAS-avledede næringsstoffer i hydroponisystemer en god mulighet med hensyn til nasjonal matsikkerhet og nasjonal helse. Sett bort i fra den økonomiske merverdien, fører "avfall-til-verdi"-prinsippet i betydningen sirkulær økonomi til en miljøvennlig utvikling av den landbaserte oppdrettsnæringen. På grunnlag av det høye kravet om TRL for de nødvendige komponentene (OO & UASB), kunne den foreslåtte løsningen bli implementert umiddelbart – aller helst med en annen industripartner som ønsker å redusere sitt energi- og karbonfotavtrykk. Produksjon av grønnsaker basert på nitrogen- og fosfor ressursene i utslippene fra landbasert oppdrett i RAS-systemer har et stort potensial i Norge.

6.5 Andre aktuelle biologiske utnyttelser

I denne rapport har vi konsentrert oss om marine og akvatiske utnyttelser av næringsstoffer fra oppdrett til ny biologisk produksjon. Insektsproduksjon er en raskt voksende næring internasjonalt og insektsmel tas inn som ingredienser til fôrproduksjon i Norge i dag. Det er det tillatt å drive produksjon av svart soldatflue (*Hermetia illucens*), melbiller (*Tenebrio molitor* og *Alphitobius diaperinus*), sirisser (*Acheta domesticus*, *Gryllodes sigillatus*, *Grullus Assimilis*) og husflue (*Musca Domestica*). Det er samme krav til fôr/substrat til oppdrettsinsekter som til andre produksjonsdyr. Det er derfor ikke valgt å utrede nærmere produksjon av insekter på slam fra oppdrettsnæringen.

6.6 Forutsetninger for bruk av organiske materiale og næringsstoffer fra akvakultur til nye anvendelser

Avfallsstoffer/næringsstoffer fra oppdrett, behandling og bruk av disse er underlagt et omfattende regelverk. Alle nyere landbaserte oppdrettsanlegg har en utslippstillatelse, som spesifiserer tillatte mengder utslipp/og eller rensegrad av spesifikke parameter som suspendert stoff, biokjemisk oksygenforbruk (BOF) og kjemisk oksygenforbruk (KOF). Oppsamlet avfall på anleggene skal behandles etter gjeldende regelverk. For sjøanlegg gjelder også utslippstillatelser basert på maksimalt tillatte biomasser tillatte mengder fôr per år på lokalitetsnivå. I denne rapporten har vi tatt for oss mulighetene for utnyttelse av organisk avfall og næringsstoffer fra oppdrett til industrielle anvendelser som, gjødselproduksjon, gjenvinninger av råstoff som fosfor, samt som næringsstoff og fôrråstoff til nye bioproduksjoner. Regelverket for slike utnyttelser er gjennomgått i dette kapitlet.

I 2009 kom det et generelt forbud mot deponering av organisk materiale i Norge. Det har ført til at oppsamlet organisk materiale fra f.eks. kommunale avløpsrensaneanlegg og oppdrettsanlegg har blitt behandlet hos godkjente avfallsmottak der kompostering er tillatt.

Biogassproduksjon med basis i organisk avfall/slam er en tillatt anvendelse av slam. Biogassanlegg må i tillegg ha en utslippstillatelse og en anvendelse for biorest fra produksjonen.

Bruk av slam til gjødselproduksjon er tillatt. Organisk gjødselproduksjon med basis i organisk avfall/slam reguleres av gjødselsvareforskriften og økologiforskriften. Dersom slam blandes med animalske biprodukter omfattes gjødselproduksjonen også av animaliebiproduktforskriften. Forskriftene omfatter grenseverdier for tungmetaller, aktsomhetsplikt for organiske miljøgifter, krav om hygienisering for å unngå smittespredning og

stabilisering for å hindre lukt og andre miljøulemper. Organisk gjødsel med innslag av slam fra oppdrett som oppfyller de grenseverdier som stilles, er lov å selge og bruke i Norge.

Det er et pågående revisjonsarbeid med å endre gjødselvareregelverket i Norge. Underliggende direktorater har i 2018 levert endring til forskrift om organisk gjødsel. Det er foreslått en positivliste for råvarer, men slam fra marine akvakulturanlegg/står ikke på slik positivliste. I Forordning EF nr 1009/2009 angående CE-merket gjødsel er ikke marint fiskeslam er ikke tatt inn som aktuell råvare. For å kunne ta inn slam som råvare, er det nødvendig med en omfattende dokumentasjon av biosikkerhet og en endring av filosofien og grunnlaget bak dagens regelverk.

Bruk av næringsstoffer fra oppdrett som fôrråvare reguleres forskrifta om merking og omsetning av fôrråvarer, fôrråvareforskriften, forskrift om animalske biprodukter og TSE-forskriften, samt EU-lovgivningen. Hovedformålet for regelverket er å sørge for god mattrygghet og håndtere risiko for folkehelse, dyrehelse og miljø. Dyr som holdes og føres for å gå til mat eller fôr er produksjonsdyr og disse har samme krav til fôr som andre vanlige produksjonsdyr. Forskrift om merking av om omsetning av fôr har bestemmelser om forbudte fôrmidler. Det er ikke lov å bruke avføring, urin, innhold i mage/tarm, avfall fra rensing av avløpsvann/spillvann, husholdningsavfall, emballasjen, besia såkorn eller impregnert trevirke i fôrproduksjon. Tilsetningsstoffer i fôr reguleres av forskrift om tilsetningsstoffer til bruk i fôrråvarer. Dette betyr at organisk avfall/slam fra oppdrett etter dagens regelverk ikke kan brukes til fôr for andre dyr, selv på et lavere trofisk nivå. Endringer av regelverket krever kunnskap basert på vitenskap og endring av EU-regelverk er meget tidkrevende.

For organismer som ikke spiser fôr, men tar opp næringsstoffene over cellevegg, er det lov å bruke organiske utslipp som slam fra oppdrett som næringsstoffer. Det betyr at slam fra oppdrett er lovlig å bruke til rekke algeproduksjoner og encelleproteinproduksjoner. Næringsalter som oppløst nitrogen og fosfor er tillatt brukt som næring til planter og alger og akvaponi er derfor tillatt. Dersom slam brukes som substrat for soppproduksjon er slam å regne som organisk gjødsel og må oppfylle kravene til organisk gjødsel.

Tabell 16. Oppsummering av hva næringsstoffer er lov å bruke til.

Utnyttelse	Slam/organisk materiale	Oppløste næringsalter
Biogass	Tillatt	Ikke aktuelt
Pyrolyse	Tillatt	Ikke aktuelt
Gjødsel	Tillatt	Tillatt
Fôringrediens for dyr	Ikke tillatt	Ikke aktuelt
Substrat encelleproteinproduksjon	Tillatt	Tillatt
Alger	Tillatt	Tillatt
Akvaponi inkl. sopp-produksjon	Tillatt	Tillatt

Slam fra oppdrett kan ikke brukes som fôringrediens for andre organismer som spiser fôret. For å utnytte næringsstoffene må en gå veien om primærproduksjon som bakterier og alger, før dette igjen kan brukes som fôringrediens. Dette kan sammenliknes med slik faeces brukes i landbruksproduksjon, der det går om primærproduksjon av planter, som så brukes som fôr til dyrene.

7 Referanser

- Aadland, C. (2019). *Tørking av fiskeslam og fiskerester gir nye markeder for denne bedriften*. Hentet 14. juni fra <https://fiskeribladet.no/tekfisk/nyheter/?artikkel=69757>
- Aas, T. S. & Åsgård, T. E. (2017). *Estimert innhold av næringsstoff og energi i forspill og faeces fra norsk lakseoppdrett* (8282965162). Nofima rapportserie.
- Aas, T. S., Ytrestøyl, T. & Åsgård, T. (2019). Utilization of feed resources in the production of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in Norway: An update for 2016. *Aquaculture Reports*, 15, 100216.
- Aas, T. S. & Åsgård, T. E. (2019). *Stoff-flyt av næringsstoff og energi fra fôr i et landbasert settefiskanlegg* (8282965820). Nofima rapportserie.
- Anderson, J. L., Valderrama, D. & Jory, D. (2016). *Shrimp Production Review*. GOAL 2016 - Global Aquaculture Alliance, Guangzhou, China. https://www.aquaculturealliance.org/wp-content/uploads/2017/06/Day1_JimAnderson.pdf
- Andreotti, V., Solimeno, A., Rossi, S., Ficara, E., Marazzi, F., Mezzanotte, V. & García, J. (2020). Bioremediation of aquaculture wastewater with the microalgae *Tetraselmis suecica*: Semi-continuous experiments, simulation and photo-respirometric tests. *Science of The Total Environment*, 738, 139859.
- Animaliebiproduktforskriften. (2007). *Forskrift om animalske biprodukter som ikke er beregnet på konsum* (FOR-2016-09-14-1064). <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2016-09-14-1064>
- Anon. (2011) Vurdering av eutrofieringssituasjonen i kystområder, med særlig fokus på Hardangerfjorden og Boknafjorden. Rapport, Fiskeri- og kystdepartementet, 83 s.
- Anon. (2020). *Dokumente*. Deutsche Phosphor Plattform. <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/information/dokumente/>
- Antonyan, M. (2019). *Energy Footprint of Water Desalination*. University of Twente.
- Avello. (2020). *Fast Pyrolysis Process*. Hentet 8. juni fra http://www.avellobioenergy.com/en/technology/fast_pyrolysis/
- Bakken, T., Oug, E. & Haraldsen, T. K. (2015). *Leddormer (Annelida)*. Norsk rødliste for arter 2015. Artsdatabanken. <https://www.artsdatabanken.no/Rodliste/Artsgruppene/Leddormer>
- Barnett, D. (2017, 12. januar). *The early bird catches the worm to sell for billions*. The Independent <https://www.independent.co.uk/news/science/worms-bait-industry-brexit-fishing-beaches-wildlife-rag-worm-digging-a7522316.html>
- Batista, F., e Costa, P. F., Matias, D., Joaquim, S., Massapina, C., Passos, A., Ferreira, P. P. & da Fonseca, L. C. (2003). Preliminary results on the growth and survival of the polychaete *Nereis diversicolor* (OF Muller, 1776), when fed with faeces from the carpet shell clam *Ruditapes decussatus* (L., 1758). *BOLETIN-INSTITUTO ESPANOL DE OCEANOGRAFIA*, 19(1/4), 443.
- Beal, C. M., Stillwell, A. S., King, C. W., Cohen, S. M., Berberoglu, H., Bhattarai, R. P., Connelly, R. L., Webber, M. E. & Hebner, R. E. (2012). Energy return on investment for algal biofuel production coupled with wastewater treatment. *Water Environment Research*, 84(9), 692-710.
- Beardsley, T. M. (2011). Peak Phosphorus. *BioScience*, 61, 91-91. <https://doi.org/https://doi.org/10/dbmpxd>
- Becker, E. W. (2007). Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology advances*, 25(2), 207-210.
- Benedetti, M., Vecchi, V., Barera, S. & Dall'Osto, L. (2018). Biomass from microalgae: the potential of domestication towards sustainable biofactories. *Microbial Cell Factories*, 17(1), 173. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-1019-3>
- Bischoff, A. A., Fink, P. & Waller, U. (2009). The fatty acid composition of *Nereis diversicolor* cultured in an integrated recirculated system: Possible implications for aquaculture. *Aquaculture*, 296(3-4), 271-276.
- Bleakley, S. & Hayes, M. (2017). Algal proteins: extraction, application, and challenges concerning production. *Foods*, 6(5), 33.

- Blytt, L. D., Brod, E., Øgaard, A., Johannessen, E., Estevez, E. & Paulsrud, B. (2017). *Bedre utnyttelse av fosfor*. Miljødirektoratet.
- Brod, E., Haraldsen, T. K. & Krogstad, T. (2016). *Fiskeslam som nitrogengjødsel*. NIBIO Rapport.
- Brod, E., Oppen, J., Kristoffersen, A. Ø., Haraldsen, T. K. & Krogstad, T. (2017). Drying or anaerobic digestion of fish sludge: Nitrogen fertilisation effects and logistics. *Ambio*, 46(8), 852-864.
- Brown, N., Eddy, S. & Plaud, S. (2011). Utilization of waste from a marine recirculating fish culture system as a feed source for the polychaete worm, *Nereis virens*. *Aquaculture*, 322, 177-183.
- Cabell, J., Brod, E., Ellingsen, J., Løes, A.-K., Solli, L., Standal, I. B., Toldnes, B. & Vivestad, H. (2019). *Bruk av tørket slam fra settefiskanlegg som gjødsel i norsk landbruk*. NIBIO Rapport.
- Cagnac, O., Cyril, R., Pagliardini, J., Calleja, P., Cécille, G. & Vandeplass, S. (2017). *Protein-rich biomass of thraustochytrids, culturing method, and uses*. Google Patents. <https://patentimages.storage.googleapis.com/80/9a/21/4b489ffd8eb428/WO2017012931A1.pdf>
- Chilton, V., Mantrand, N. & Morel, B. (2016). *Patent Landscape Report: Microalgae-Related Technologies*. WIPO. https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_947_5.pdf
- Cole, V. J., Chick, R. C. & Hutchings, P. A. (2018). A review of global fisheries for polychaete worms as a resource for recreational fishers: diversity, sustainability and research needs. *Reviews in Fish Biology Fisheries*, 28(3), 543-565.
- Craze, M., Aguilon, O. & Royce, K. (2020). *The Land-Based Salmon Handbook*. Spheric Research. https://www.undercurrentnews.com/report/land-based_salmon-handbook/
- Davidson, J., Good, C., Welsh, C. & Summerfelt, S. T. (2014). Comparing the effects of high vs. low nitrate on the health, performance, and welfare of juvenile rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* within water recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 59, 30-40.
- Delaide, B., Goddek, S., Gott, J., Soyeurt, H. & Jijakli, M. H. (2016). Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *Sucriner*) Growth Performance in Complemented Aquaponic Solution Outperforms Hydroponics. *Water Environment Research*, 8, 467.
- Delaide, B., Monsees, H., Gross, A. & Goddek, S. (2019). Aerobic and Anaerobic Treatments for Aquaponic Sludge Reduction and Mineralisation. I S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen & G. M. Burnell (Red.), *Aquaponics Food Production Systems* (s. 247-266). Springer International Publishing.
- Del Campo, L. M., Ibarra, P., Gutiérrez, X., & Takle, H. R. (2010). Utilization of sludge from recirculation aquaculture systems. Nofima rapportserie.
- Doherty, B. (2020, 15.mars). *West Saharan group takes New Zealand superannuation fund to court over 'blood phosphate'*. Hentet 31. oktober fra <https://www.theguardian.com/world/2020/mar/16/west-saharan-group-takes-new-zealand-superannuation-fund-to-court-over-blood-phosphate>
- Einstein-Curtis, A. (2019, 4. oktober). *Study: Fish fed yeast had better growth performance and feeding behaviour in fresh- and post seawater transfer*. <https://www.feednavigator.com/Article/2019/10/04/Benefits-of-yeast-in-fresh-and-post-salmon-seawater-transfer>
- Equinor. (1991). *Første bioprotein på Tjeldbergodden*. <https://www.equinor.com/no/news/archive/1999/02/17/BioproteinBegins.html>
- Espinal, C. A. & Matulić, D. (2019). Recirculating Aquaculture Technologies. I S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen & G. M. Burnell (Red.), *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future* (s. 35-76). Springer International Publishing.
- ESPP. (2020). *Catalogue of phosphorus recovery technologies*. ESPP European Sustainable Phosphorus Platform, DPP German Phosphorus Platform and NNP Netherlands Nutrient Platform. https://phosphorusplatform.eu/images/download/ESPP-NNP-DPP_P-recovery_tech_catalogue_v_25_2_2020.pdf
- European Commission. (2008). *ISSION REGULATION (EC) (No 889/2008)*.

- Evans, J. (2020, 16.januar). *L'Occitane-backed group to open Europe's largest aquaponic farm in 2022*. IntraFish. Hentet 31.oktober fra <https://www.intrafish.com/aquaculture/loccitane-backed-group-to-open-europes-largest-aquaponic-farm-in-2022/2-1-738581>
- Evjemo, J. O. (2007). *Kjemiske analyser av råstoff fra Gammarus oceanicus*. SINTEF Rapport, SFH80 F072014.
- Evjemo, J. O. (2011). *Pilotproduksjon av Gammaridaer*. SINTEF Rapport, SFH80 F1897.
- Evjemo, J. O. (2016). *Kartlegging av mulighetene for å utnytte slam til dyrkning av marin biomasse*. SINTEF Rapport, F27561.
- Evjemo, J. O. & Reitan, K. I. (2006). *Industriell produksjon av Gammaridaer som komponent i fôret til oppdrettsfisk*. SINTEF Rapport, SFH80 F062066.
- Fadhullah, W. & Syakir, M. I. (2016). Polychaetes as ecosystem engineers: agents of sustainable technologies. I *Renewable Energy and Sustainable Technologies for Building and Environmental Applications* (s. 137-150). Springer.
- FAO. (2019). *An estimated 3 million tonnes of shrimp entered the international trade in 2018*. <http://www.fao.org/in-action/globefish/market-reports/resource-detail/en/c/1199292/>
- Fishfarmingexpert. (2019, 18. februar). *US approves single-cell protein for salmonids*. <https://www.fishfarmingexpert.com/article/us-approves-single-cell-protein-for-salmonids/>
- Forskrift om organisk gjødsel. (2003). *Forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphav* (FOR-2003-07-04-951). <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2003-07-04-951>
- Forslag til gjødselbrukforskrift. (2018). *Forskrift om lagring og bruk av gjødsel og plantenæring*. https://www.landbruksdirektoratet.no/no/miljo-og-okologisk/jordbruk-og-miljo/gjodsling/regelverk/_attachment/71668?_ts=16652b67830&download=true
- García-Alonso, J., Müller, C. T. & Hardege, J. (2008). Influence of food regimes and seasonality on fatty acid composition in the ragworm. *Aquatic Biology*, 4(1), 7-13.
- Gebauer, R., Cabell, J. F. & Ween, O. (2016). Biogassproduksjon fra settefiskslam i sentraliserte og desentraliserte biogassanlegg.
- Goddek, S., Delaide, B. P. L., Joyce, A., Wuertz, S., Jijakli, M. H., Gross, A., Eding, E. H., Bläser, I., Reuter, M., Keizer, L. C. P., Morgenstern, R., Körner, O., Verreth, J. & Keesman, K. J. (2018). Nutrient mineralization and organic matter reduction performance of RAS-based sludge in sequential UASB-EGSB reactors. *Aquacultural Engineering*, 83, 10-19.
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B. & Burnell, G. (2019). *Aquaponics Food Production Systems*. Springer.
- Goddek, S. & Vermeulen, T. (2018). Comparison of Lactuca sativa growth performance in conventional and RAS-based hydroponic systems. *Aquacult Int*, 26, 1377-1386.
- Hajji, A., Rhachi, M., Garoum, M. & Laaroussi, N. (2016). The effects of pH, temperature and agitation on biogas production under mesophilic regime. 3rd International Conference on Renewable Energies for Developing Countries, Médina.
- Hakawati, R., Smyth, B. M., McCullough, G., Rosa, F. D. & Rooney, D. (2017). What is the most energy efficient route for biogas utilization: heat, electricity or transport? *Applied Energy*, 206, s. 1076-1087.
- Hellsten, S., Dalgaard, T., Rankinen, K. & Tørseth, K. (2017). *Nordic nitrogen and agriculture*. TemaNord, Nordic Council of Ministers.
- Hilmarsen, Ø (2020) *Dokumentasjon av renskrav for settefiskanlegg i Norge* (SINTEF-rapport 2020:00241).
- Honda, H. & Kikuchi, K. (2002). Nitrogen budget of polychaete *Perinereis nuntia vallata* fed on the feces of Japanese flounder. *Fisheries science*, 68(6), 1304-1308.
- Hua, K., Cobcroft, J. M., Cole, A., Condon, K., Jerry, D. R., Mangott, A., Praeger, C., Vucko, M. J., Zeng, C., Zenger, K. & Strugnell, J. M. (2019). The Future of Aquatic Protein: Implications for Protein Sources in Aquaculture Diets. *One Earth*, 1(3), 316-329. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.018>

- Huygens, D. & Saveyn, H. (2018). *DRAFT Market study for recovered phosphate salts, ash based materials and pyrolysis materials in view of their possible inclusion as Component Material Categories in the Revised Fertiliser Regulation*. https://phosphorusplatform.eu/images/download/STRUBIAS-draft-MARKET-report-20_12_2018.pdf
- Hülßen, T., Hsieh, K., Lu, Y., Tait, S. & Batstone, D. J. (2018). Simultaneous treatment and single cell protein production from agri-industrial wastewaters using purple phototrophic bacteria or microalgae—a comparison. *Bioresource technology*, 254, 214-223.
- Imajima, M. (1967). Errant polychaetous annelids from Tsukumo Bay and vicinity of Noto Peninsula, Japan. *Bulletin of the National Science Museum*, 10(4), 403-441.
- IndexMundi. (2020). *Rock Phosphate Monthly Price - US Dollars per Metric Ton*. Hentet 13.oktober fra <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=rock-phosphate&months=120>
- Jones, C. G., Lawton, J. H. & Shachak, M. (1994). Organisms as ecosystem engineers. I *Ecosystem management* (s. 130-147). Springer.
- Joyce, A., Goddek, S., Kotzen, B. & Wuertz, S. (2019). Aquaponics: Closing the Cycle on Limited Water, Land and Nutrient Resources. I S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen & G. M. Burnell (Red.), *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future* (s. 19-34). Springer International Publishing.
- Kabeya, N., Fonseca, M. M., Ferrier, D. E., Navarro, J. C., Bay, L. K., Francis, D. S., Tocher, D. R., Castro, L. F. C. & Monroig, Ó. (2018). Genes for de novo biosynthesis of omega-3 polyunsaturated fatty acids are widespread in animals. *Science advances*, 4(5), eaar6849.
- Kettunen, R. H. & Rintala, J. A. (1997). The effect of low temperature (5-29 degrees C) and adaptation on the methanogenic activity of biomass. *Applied Microbiology Biotechnology*, 4(48), 570-576.
- Krishfield, L. (2020) Strategies for Success in Single-Cell Protein Production. Lux Research. Hentet fra <https://www.luxresearchinc.com/blog/strategies-for-success-in-single-cell-protein-production>
- Kristoffersen, A. (u.å.). *Gjødslingshåndbok*. <https://www.nibio.no/tema/jord/gjodslingshandbok>
- Lapeña, D., Olsen, P. M., Arntzen, M. Ø., Kosa, G., Passoth, V., Eijsink, V. G. H. & Horn, S. J. (2020). Spruce sugars and poultry hydrolysate as growth medium in repeated fed-batch fermentation processes for production of yeast biomass. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 43(4), 723-736.
- Lekang, O. I. (2008). *Aquaculture Engineering*. Blackwell Publishing Ltd.
- Lesaffre, P. (2019, 1. september). *Enhancing feed palatability and intake of low fishmeal diets*. <https://aquafeed.co.uk/enhancing-feed-palatability-and-intake-of-low-fishmeal-diets-21023>
- Linder, T. (2019). Making the case for edible microorganisms as an integral part of a more sustainable and resilient food production system. *Food Security*, 1-14.
- Mandario, M. A. E. (2018). Addressing gaps in the culture of pathogen-free polychaetes as feed in shrimp hatcheries. *Fish for the People*, 16(3), 19-23.
- Marques, B., Lillebø, A. I., Ricardo, F., Nunes, C., Coimbra, M. A. & Calado, R. (2018). Adding value to ragworms (*Hediste diversicolor*) through the bioremediation of a super-intensive marine fish farm. *Aquaculture Environment Interactions*, 10, 79-88.
- Martinez, J. D., Puy, N., Murillo, R., García, T., Navarro, M. V. & Mastral, A. M. (2013). Waste tyre pyrolysis - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 179-213.
- Matassa, S., Boon, N., Pikaar, I. & Verstraete, W. (2016). Microbial protein: future sustainable food supply route with low environmental footprint. *Microbial biotechnology*, 9(5), 568-575.
- McKellar, S., Lasek, M., Day, J., Muñoz, A. & Tzafestas, K. (2019). *Future Food Sources: Market Developments and Intellectual Property Landscape* IP Pragmatics Limited. https://www.ip-pragmatics.com/media/1214/ip-pragmatics-future-food-sources-white-paper_jan2019.pdf
- Morken, J., Briseid, T., Hovland, J., Lyng, K.-A. & Kvande, I. (2017). *Veileder for biogassanlegg - mulighetsstudie, planlegging og drift*. Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.

- Nederlof, M. A., Jansen, H. M., Dahlgren, T. G., Fang, J., Meier, S., Iivind Strand, Å., Sveier, H., Verdegem, M. C. & Smaal, A. C. (2019). Application of polychaetes in (de) coupled integrated aquaculture: production of a high-quality marine resource. *Aquaculture Environment Interactions*, 11, 221-237.
- Nesto, N., Simonini, R., Prevedelli, D. & Da Ros, L. (2012). Effects of diet and density on growth, survival and gametogenesis of *Hediste diversicolor* (O.F. Müller, 1776) (Nereididae, Polychaeta). *Aquaculture*, 362-363, 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.07.025>
- Nizami, A. S. (2012). Anaerobic Digestion: Processes, Products and Application. I *Anaerobic Digestion* (s. 133-148). Nova Science Publisher
- Nygren, A. & Pleijel, F. (2015). *Ringmaskar: Havsborstmaskar, Annelida: Polychaeta*. ArtDatabanken. <http://www.slu.se/sv/centrumbildningar-och-projekt/artdatabanken/om-oss/publikationer/>
- Olive, P. J., Duangchinda, T., Ashforth, E., Craig, S., Ward, A. C. & Davies, S. J. J. M. E. P. S. (2009). Net gain of long-chain polyunsaturated fatty acids (PUFA) in a lugworm *Arenicola marina* bioturbated mesocosm. 387, 223-239.
- Olive, P. J. W., Craig, S. & Cowin, P. B. D. (2007). *Aquaculture of marine worms*. U.S. Patent and Trademark Office.
- Pajand, Z. O., Soltani, M., Kamali, A. & Bahmani, M. (2020). Growth, survival and fatty acids profile of Polychaete, *Nereis diversicolor* (Müller, 1776) cultured using waste water of great sturgeon, *Huso huso* (Linnaeus, 1758) at different densities in an integrated farming system. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 19(1), 234-247.
- Palmer, P. J. (2010). Polychaete-assisted sand filters. *Aquaculture*, 306(1-4), 369-377.
- Panakorn, S. (2015). Polychaetes for shrimp brood stock maturation. *AQUACULTURE Asia Pacific*, 11(4), 6-11.
- Pereira, H., Silva, J., Santos, T., Gangadhar, K. N., Raposo, A., Nunes, C., ... & Varela, J. (2019). Nutritional potential and toxicological evaluation of *Tetraselmis* sp. CTP4 microalgal biomass produced in industrial photobioreactors. *Molecules*, 24(17), 3192.
- Pombo, A., Baptista, T., Granada, L., Ferreira, S. M., Gonçalves, S. C., Anjos, C., Sá, E., Chainho, P., Cancela da Fonseca, L. & Fidalgo e Costa, P. (2018). Insight into aquaculture's potential of marine annelid worms and ecological concerns: a review. 12(1), 107-121.
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987-992.
- Rameshprabu, R. & Yuwalee, U. (2016). Effect of temperature on the performance of biogas production from Duckweed. *Chemistry Research Journal*, 1(1), 58-66.
- Read, G. & Fauchald, K. (2020). *World Polychaeta Database* <http://www.marinespecies.org/polychaeta%20on%202020-04-20>
- Ritala, A., Häkkinen, S. T., Toivari, M. & Wiebe, M. G. (2017). Single cell protein—state-of-the-art, industrial landscape and patents 2001–2016. *Frontiers in microbiology*, 8, 2009.
- Rosten, T. W., Azrague, K. & Toldnes, B. (2013). Karakterisering av avløpsvann fra norske landbaserte settefiskanlegg. VANN, (03/2015).
- Saito, H., Kawai, K., Umino, T. & Imabayashi, H. (2014). Fishing bait worm supplies in Japan in relation to their physiological traits. *Memoirs of Museum Victoria*, 71, 279-287.
- Schnürer, A. & Jarvis, Å. (2009). *Microbiological Handbook for Biogas Plants*. Avfall Sverige.
- Schnürer, A. & Jarvis, Å. (2018). *Microbiology of the Biogas Process*. Swedish University of Agricultural Sciences.
- Skretting (2019) Skretting fortsetter satsningen på algeolje. Hentet fra <https://www.skretting.com/nb-NO/settings/news/siste-nytt/skretting-fortsetter-satsningen-pa-algeolje/>
- Sletten, T. M. & Maass, C. (2013). *Underlagsmaterieell for tverrsektoriell biogass-strategi*. Klima- og forurensningsdirektoratet.
- Sparboe, L. O. (2016). *Fra slam til biokoks - utfordrerer?* . Tekset, Trondheim. <http://tekset.no/wp-content/uploads/2016/02/160203-Fra-slam-til-biokoks-Tekset-Sparboe-publ.pdf>

- SpirulinaSmoothie. (2020). *Spirulina, a history of food in Ancient Mexico*. Hentet 13. oktober fra <https://spirulinasmoothie.net/spirulina-a-history-of-food-in-ancient-mexico/>
- Sunnmørsposten. (2018, 12.juli). *Vi var nok kanskje litt tidlig ute i forhold til teknologien*. Hentet 31.oktober fra <https://www.smp.no/nyheter/2018/07/12/--Vi-var-nok-kanskje-litt-tidlig-ute-i-forhold-til-teknologien-17109660.ece>
- Sverdrup, H. U. & Ragnarsdottir, K. V. (2011). Challenging the planetary boundaries II: Assessing the sustainable global population and phosphate supply, using a systems dynamics assessment model. *Applied Geochemistry*, 26, 307-310.
- Sørheim, R., Briseid, T., Haraldsen, T. K., Linjordet, R., Wittgens, B., Hagen, Ø., Josefsen, K., Horn, S. J., Morken, J., Hanssen, J. F., Lunnan, A., Berglann, H. & Krokann, K. (2010). *Biogass - kunnskapsstatus og forskningsbehov*. Bioforsk.
- Tholey, F. (2019). *BASF invests in Quantafuel to jointly drive chemical recycling of mixed plastic waste*. BUSINESS & FINANCIAL NEWS. Hentet 13.oktober fra <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2019/10/p-19-356.html>
- Timmons, M.B., Ebeling, J.M., Wheaton, F.W., Summerfelt, S.T., Vinci, B.J. (2001) Recirculating aquaculture systems. NRAC Publication, No. 01-002. Cayuga Aqua Ventures, Ithaca, p. 650.
- Timmons, M. B. & Ebeling, J. M. (2013). *Recirculating Aquaculture* (3. utg.). Ithaca Publishing Company LLC.
- Utkast til forskrift. (2018). Utkast til forskrift om produksjon, omsetning og import av gjødselvarer av organisk opphav og visse uorganiske gjødselvarer (gjødselvarerforskriften). . https://www.landbruksdirektoratet.no/no/miljo-og-okologisk/jordbruk-og-miljo/gjodsling/regelverk/_attachment/71669?_ts=16652b6e590&download=true
- Vargas, J., Mariano, A., Corrêa, D. & Ordonez, J. (2014). The microalgae derived hydrogen process in compact photobioreactors. *International journal of hydrogen energy*, 39(18), 9588-9598.
- VårtOslo. (2017, 19.desember). *I et snekkerverksted på tjukkeste Grønland i Oslo fins et oppdrettsanlegg for en fisk som globalt metter millioner*. Hentet 31.oktober fra <https://vartoslo.no/akvaponikk-anders-hoilund-anders-skaug/i-et-snekkerverksted-pa-tjukkeste-gronland-i-oslo-fins-et-oppdrettsanlegg-for-en-fisk-som-globalt-metter-millioner/137648>
- Wang, H., Hagemann, A., Reitan, K. I., Ejlertsson, J., Wollan, H., Handå, A. & Malzahn, A. M. (2019). Potential of the polychaete *Hediste diversicolor* fed on aquaculture and biogas side streams as an aquaculture food source. *Aquaculture Environment Interactions*, 11, 551-562.
- Wang, H., Seekamp, I., Malzahn, A., Hagemann, A., Carvajal, A. K., Slizyte, R., Standal, I. B., Handå, A. & Reitan, K. I. (2019). Growth and nutritional composition of the polychaete *Hediste diversicolor* (OF Müller, 1776) cultivated on waste from land-based salmon smolt aquaculture. *Aquaculture*, 502, 232-241.
- Watson, G. J., Murray, J. M., Schaefer, M. & Bonner, A. (2017). Bait worms: a valuable and important fishery with implications for fisheries and conservation management. *Fish and fisheries* 18(2), 374-388.
- Wellinger, A., Murphy, J. & Baxter, D. (2013). *The biogas handbook*. Woodhead Publishing Limited.
- Witzøe, A. (2019). *Dette har Cermaq erfart så langt med produksjon av biogass fra fiskeslam*. Hentet 9. juni fra <https://ilaks.no/dette-har-cermaq-erfart-sa-langt-med-produksjon-av-biogass-fra-fiskeslam/>
- Wu, L. F., Chen, P. C., Huang, A. P. & Lee, C. M. (2012). The feasibility of biodiesel production by microalgae using industrial wastewater. *Bioresource technology*, 113, 14-18. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852411019092>
- Yara. (2017). *Our Position On Circular Economy* https://www.yara.com/siteassets/sustainability/position-papers/247755_pp_circulareconomy.pdf/
- Ytrestøyl, T., Løes, A.-K., Kvande, I., Martinsen, S. & Berge, G. M. (2013). *Utnyttelse av slam fra akvakultur i blandingsanlegg for biogassproduksjon: teknologi og muligheter*. Nofima.

- Ytrestøyl, T., Aas, T. S., Nerdal, K. S. & Berge, G. M. (2016). Karakterisering av slam fra tre kommersielle settefiskanlegg gjennom ett produksjonsår. Hovednæringsstoff, mineraler og tungmetaller (8282964085). Nofima rapportserie.
- Zaker, A., Chen, Z., Wang, X. W. & Zhang, Q. (2019). Microwave-assisted pyrolysis of sewage sludge: A review. *Fuel Processing Technology*, 187, 84-104.
- Zaky, A. S., Greetham, D., Tucker, G. A. & Du, C. (2018). The establishment of a marine focused biorefinery for bioethanol production using seawater and a novel marine yeast strain. *Scientific Reports*, 8(1), 12127. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30660-x>
- Øgaard, A. F., Kristoffersen, A. & Føreid, B. (2017). *Biorest*. Hentet 16. juni fra <https://www.nibio.no/tema/jord/organisk-avfall-som-gjodsel/biorest>



Teknologi for et bedre samfunn

www.sintef.no