

Utnyttelse av oppløst og partikulært avfall fra smoltproduksjon i et resirkulasjonssystem (AQP Vest)

RAPPORT

Hovedkontor

Gaustadalléen 21
0349 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 22 18 52 00
Internett: www.niva.no

NIVA Region Sør

Jon Lilletuns vei 3
4879 Grimstad
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 37 04 45 13

NIVA Region Innlandet

Sandvikaveien 59
2312 Ottestad
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 62 57 66 53

NIVA Region Vest

Thormohlensgate 53 D
5006 Bergen
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 55 31 22 14

NIVA Region Midt-Norge

Hogskoleringen 9
7034 Trondheim
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 73 54 63 87

Tittel Utnyttelse av oppløst og partikulært avfall fra smoltproduksjon i et resirkulasjonssystem	Løpenr. (for bestilling) 6581-2013	Dato 31. oktober 2013
	Prosjektnr. Undernr. 11347	Sider Pris 64
Forfatter(e) Ole-Kristian Hess-Erga (NIVA) Ingrid Gjesteland (NTNU/NIVA) Silje Aase Wolff (NTNU Samfunnsforskning AS) Erik Vikingstad (ApN)	Fagområde Akvakultur	Distribusjon Åpen
	Geografisk område Hordaland	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Marin tilskotsordning i Hordaland, Hordaland fylkeskommune, Klima- og naturressursseksjonen	Oppdragsreferanse 201003640-39/313/LARAND
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------

<p>Sammendrag</p> <p>Norsk landbasert yngel- og settefiskproduksjon av laksefisk er i endring. Utviklingen går mot større og færre enheter hvor vannet resirkuleres og renses for avfallsstoffer. Disse avfallsstoffene representerer en resurs og ikke et miljøproblem hvis avfallsstoffene samles opp og brukes som gjødsel (planter/alger/mikroorganismer) eller gjennomgår en foredling til energi. Industrideltagerne Hardingsmolt AS og Berge Gard og Gartneri, og FoU-partnerne Norsk institutt for vannforskning (NIVA), Akvaplan-niva, NTNU Samfunnsforskning og Norsk Landbruksrådgiving veksthus har gjennomført et samarbeidsprosjekt innen ovennevnte tema. Hovedmålet har vært å etablere et kunnskapsfundament knyttet til utnyttelse av avløpsvann og oppdrettsslam fra landbasert fiskeoppdrett for å redusere miljøbelastningen ved utslipp. Resultatene fra overvåkingsprogrammet (~3 produksjonssykluser) viste tydelige variasjoner i både vannkvaliteten og mengden avfallsprodukter. Næringspotensialet har blitt demonstrert gjennom to planteforsøk (liljer og salat) og ett komposteringsforsøk (slam og liljerester), og slammet er vurdert med tanke på anvendelse som gjødsel og til energiproduksjon.</p>

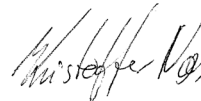
<p>Fire norske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Akvakultur 2. Veksthus 3. Akvaponikk 4. Avfall 	<p>Fire engelske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Aquaculture 2. Green house 3. Aquaponics 4. Waste
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



Ole-Kristian Hess-Erga
Prosjektleder



Mark Darryn Powell
Forskningsleder



Kristoffer Næs
Forskningsdirektor

Marin tilskotsordning i Hordaland

**Utnyttelse av oppløst og partikulært avfall fra
smoltproduksjon i et resirkulasjonssystem**

Forord

Prosjektet; Utnyttelse av oppløst og partikulært avfall fra smoltproduksjon i et resirkulasjonssystem (AQP Vest) ble utviklet sammen med partnerne Hardingsmolt AS, Berge Gard og Gartneri, NTNU Samfunnsforskning AS, Veksthusringen avdeling Hordaland (nå Norsk Landbruksrådgiving Veksthus), Akvaplan-niva AS og Norsk institutt for vannforskning. Marin tilskotsordning i Hordaland, Hordaland fylkeskommune innvilget søknaden og har finansiert prosjektet sammen med egeninnsats fra Hardingsmolt AS og Berge Gard og Gartneri, og økonomisk støtte fra Norsk institutt for vannforskning.

Samarbeidspartnerne har vært representert ved Jacob Drivenes (Hardingsmolt AS), Anne Grete Berge (Berge Gard og Gartneri), Silje Aase Wolff (NTNU Samfunnsforskning AS, Magne Berland (Norsk Landbruksrådgiving Veksthus), Erik Vikingstad (Akvaplan-niva), Åse Åtland og Ole-Kristian Hess-Erga (begge Norsk institutt for vannforskning). I tillegg har Ingrid Gjesteland gjennomført masteroppgaven under prosjektet, med veileder Øyvind Mikkelsen fra Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, institutt for kjemi.

Arbeidet har blitt ledet av Ole-Kristian Hess-Erga (prosjektleder) og kvalitetssikret av Bjørn Olav Rosseland.

Takk for alle bidrag som har gjort dette prosjektet vellykket!

Bergen, 31. oktober 2013

Ole-Kristian Hess-Erga
prosjektleder

Innhold

Sammendrag	5
1 Innledning	8
1.1 Utgangspunkt	9
1.2 Gjennomført	10
2 Prosjektdesign og metoder	11
2.1 Overvåkingsprogram	11
2.2 Forsøk	12
2.2.1 Liljeforsøk	12
2.2.2 Salatforsøk	13
2.2.3 Slamforsøk	18
2.3 Analyser og målinger	19
2.3.1 Kjemisk analyse	19
2.3.2 Øvrige målinger	19
2.3.3 Mikrobiell karakterisering	20
2.4 Dataanalyse og beregninger	20
3 Resultat og diskusjon	21
3.1 Avløpsvann fra fiskeoppdrett (oppløst fraksjon)	21
3.1.1 Overvåkingsprogram, plantevekst og løste næringsalter	21
3.1.2 Planter som rensemethode	40
3.2 Slam fra fiskeoppdrett (partikulær fraksjon)	47
3.2.1 Overvåkingsprogram og næringsverdi	47
3.2.2 Anvendelse av oppdrettsslam	51
3.3 Avfallsberegninger	57
4 Konklusjon	59
4.1 Avløpsvann	59
4.2 Oppdrettsslam	61
5 Referanser	63

Sammendrag

Norsk landbasert yngel- og settefiskproduksjon av laksefisk er i endring. Utviklingen går mot større og færre enheter hvor vannet resirkuleres og renses for avfallsstoffer. Både avløpsvannet og avfallsstoffene som fjernes fra vannet inneholder en rekke ulike næringssalter og organisk materiale som vil være mer konsentrert enn tidligere. Disse avfallsstoffene representerer en resurs og ikke et miljøproblem hvis avfallsstoffene samles opp og brukes som gjødsel (planter/alger/mikroorganismer) eller gjennomgår en foredling til energi. Utnyttelse av slike avfallsstoff krever en inngående forståelse og fornuftig utviklingsstrategi, hvor både akvakulturnæringen og forvaltningen har en viktig rolle.

Med utgangspunkt i ovennevnte ble det etablert et samarbeidsprosjekt med industrideltagerne Hardingsmolt AS og Berge Gard og Gartneri, og FoU-partnerne Norsk institutt for vannforskning (NIVA), Akvaplan-niva, NTNU Samfunnsforskning AS og Norsk Landbruksrådgiving veksthus. Prosjektet har vært finansiert av Marin tilskotsordning i Hordaland, Hordaland fylkeskommune, gjennom industrideltagerens egeninnsats og økonomisk støtte fra NIVA. Hovedmålet har vært å etablere et kunnskapsfundament knyttet til utnyttelse av avløpsvann og oppdrettsslam fra landbasert fiskeoppdrett for å redusere miljøbelastningen ved utslipp. Prosjektet har fokusert på integrert produksjon av fisk og planter (akvaponikk) tilpasset de klimatiske forholdene på Vestlandet, og hvordan oppdrettsslammet kunne utnyttes som en ressurs. Arbeidet ble delt inn i fire deler. (1) Samle inn grunnleggende dokumentasjon (overvåkingsprogram) om innhold av næringssalter i avløpsvann fra et kommersielt, landbasert resirkuleringsanlegg for lakseyngel, (2) velge ut relevante planter for integrert produksjon av planter og fisk (akvaponikk), (3) gjennomføre et testforsøk av et enkelt akvaponikk-system, og (4) karakterisere oppdrettsslam (overvåkingsprogram) og undersøke mulig anvendelse av slam fra ovennevnte resirkuleringsanlegg.

Resultatene fra overvåkingsprogrammet viste tydelige variasjoner i både vannkvaliteten og mengden avfallsprodukter. Slike variasjoner er naturlige og varierer i henhold til driftsintensitet, fiskestørrelse og rensertiltak. Avløpsvannets innhold av plantenæringsstoffer som nitrat, fosfat, bor og kalsium viste størst variasjon, og skyldes at de er direkte relatert til førmengde, tilsetninger og råvannskvalitet. Bruk av sjøvannet bidro til forhøyet pH, ledningsevne og alkalitet, og i tillegg var nesten alle prøvenes konsentrasjon av magnesium skadelig for planter.

Avløpsvann fra to av perioder ble benyttet i henholdsvis et liljeforsøk (feltforsøk hos Berge Gard og Gartneri) og et salatforsøk (lab-forsøk (*Nutrient Film Technique* – NFT) hos NIVA Bergen). Liljeforsøket viste at liljer dyrket med avløpsvann og liljer dyrket med kommersiell næringsløsning ikke kunne skilles kvalitetsmessig fra hverandre. Dette indikerer tilstrekkelig næring og ikke hemmende saltnivå i

avløpsvannet, og at avløpsvannet kan brukes som alternativ næringsløsning. Salatforsøket viste derimot betraktelig redusert vekst for salatplanter dyrket på avløpsvann i forhold til kontrollen (kommersiell næringsløsning). Både størrelse (høyde, vekt og antall blader) og utseende var markant forskjellig. Filteret utgjorde ingen betydelig forskjell på vekst eller næringsinnholdet med unntak av forhøyet konsentrasjonen av jern, aluminium og silisium (utlekking fra steinullfilteret) i alle de filtrerte behandlingene. Salat dyrket med avløpsvann kunne gjenoppta vekst både ved overgang til nitrat-anrikt avløpsvann og spesielt til kommersiell næringsløsning. Dette indikerer sammen med de øvrige resultatene at forhøyede saltnivå og pH var den primære årsaken til svekket vekst. Andre plantesorter med høyere salttoleranse vil sannsynligvis trives bedre med et slikt avløpsvann. Hvis man ser på planter som en rensemetode viste resultatene fra salatforsøket at salat tar opp metaller fra avløpsvannet (uten å overskride grenseverdiene) som er toksiske for fisk, som kobber og aluminium. Dette er gunstig både dersom vannet skal resirkuleres tilbake til fiskekarene eller slippes ut til miljøet. Organisk materiale kan danne komplekser med toksiske metaller som videre kan fjernes med et trommelfilter. Dersom filteret ikke klarer å fjerne det partikulære avfallet kan imidlertid metallene frigjøres igjen dersom faktorer som pH endres. Det organiske materiale vil dermed utgjøre et uønsket toksisk potensial for fisken, og næring for mikrobiell vekst. I salatforsøket er bakteriesamfunnet tilpasset høy mattilgang, og fordi det er en jevn og høy mattilgang virker bakteriesamfunnet relativt stabilt mot slutten av forsøket, men det skal lite forstyrrelser til for å endre denne stabiliteten. Hvorvidt høyt mikrobielt antall er uønsket i et produksjonssystem eller i naturen, avhenger av vekststrategien til mikrobene og om de har potensial til å indusere sykdom, uønsket vannkvalitet eller har en stabiliserende funksjon. I tilfeller der bakteriell omdanning av giftige forbindelser er en del av vannbehandlingen (for eksempel nitrifikasjon i RAS), er det viktig at de øvrige bakteriene ikke hemmer slike mikrobielle samfunn (bl.a. konkurranse).

Slamkvaliteten og mengden av de ulike avfallsprodukter varierer naturlig i henhold til driftsintensitet, fôrspill, fiskestørrelse og rensetiltak. Sammenliknet med eldre data på oppdrettsslam er nivåene av tungmetaller ikke redusert. Basert på endret sammensetning og bedre råvarer i fôret, skulle man forventet en reduksjon, men en mulig forklaring kan være mangelfulle historiske data. Forholdet mellom N og P i oppdrettsslam er også rapportert til å ha endret seg til det bedre i forhold til plantenes behov, men resultatene fra overvåkingsprogrammet viser et stort overskudd av fosfor i forhold til mengde nitrogen. Dette er dårligere tilpasset plantenes behov og kan føre til restriksjoner for anvendelse på enkelte typer areal. Sjøvannet bidro spesielt til forhøyede verdier av natrium og klorid, men også til forhøyede verdier av magnesium og bor. Forhøyet innslag av sjøvann vil hemme veksten til de fleste planter, og som vist i salatforsøket vil et relativt lavt innslag hemme veksten betraktelig. En mulig løsning på dette problemet kan være å bruke ferskvann som spylevann i trommelfilteret. Resultatene fra overvåkingsprogrammet viser at det gjennomsnittlig produseres 169 kg (TS) per døgn ved Hardingsmolts produksjon og hvis vi antar en renseseffekt på 87,5 % kan det samles opp 148 kg (TS) per døgn, noe som gir ca. 52 tonn per år. Dette er

noe høyere enn andre beregninger, men en av forskjellene er at disse beregningene ikke baseres på utfôret mengde, men på førfaktor og forventet biomasseøkning. Reell mengde oppsamlet slam er uansett vanskelig å beregne og må verifiseres med målinger i hvert enkelt tilfelle for å få et mer nøyaktig anslag.

Avløpsslam har i dag flere anvendelsesområder som biogass og gjødsel, men oppdrettsslam er stort sett begrenset til lokal anvendelse på jordbruksareal. Ved anvendelse som gjødsel vil oppdrettsslammet være underlagt forskrift om gjødselvarer, men slikt slam er ikke tydelig definert i forskriftene eller i tilhørende veiledning. Oppdrettsslammet har absolutt et næringspotensiale, men bruken og mengden bør tilpasses anvendelsesområde. Kanskje bør det blandes med et annet organisk materiale eller tilsettes en næringsløsning. For større oppdrettsanlegg kan et samarbeid om energiproduksjon med andre biomasseleverandører (jordbruk, slakteri, kommunale renholdsverk o.l.) være et alternativ. Kompostering, hygienisering og luktfjerning av slam fra fiskeoppdrett kan integreres med fiskeproduksjon for å produsere gjødsel til jordbruk. Tilsvarende samarbeid som nevnt ovenfor kan benyttes for å få en god sammensetning av rå-biomasse. Langtidslagring, enkel rankekompostering og reaktorkompostering er komposteringsmetoder som enten er i bruk eller som har blitt testet. Ved Hardingsmolt AS ansees bruk av slammet i lokalt jordbruk og eller grøntanlegg som det mest kostnadseffektive og sikre i forhold til eventuell smittespredning. Valg av slambehandlingsmetode bør baseres på utslippstillatelse (avgjørende for mengde produsert slam), kostnader og muligheter for lokalt samarbeid og anvendelse. Samkompostering av oppdrettsslam og liljerester er mulig og kan ved optimalisering danne et godt vekstsubstrat (evt. innblandet i kommersiell veksttorv) for veksthusproduksjon av liljer. Et slikt produkt både tilføre ekstra næringsstoff og minimalisere avfallsproblemet med liljeproduksjonen.

1 Innledning

Norsk landbasert ferskvannsooppdrett kan i all hovedsak deles i to; yngel og settefiskproduksjon av laksefisk og innlandsoppdrett av røye og ørret. Førstnevnte er desidert størst og produserer store mengder avfallsstoffer (både oppløst og fast stoff) som slippes ut til sjø. Innlandsoppdrett er lite i sammenlikning, men utslipp av avfallsstoff til vassdrag er strengt regulert. I begge tilfellene kan utslipp av slike avfallsstoff representere et miljøproblem med potensial til å forårsake eutrofiering og tap av biodiversitet, avhengig av resipientens egnethet og andre lokale forhold. Dette problemet kan løses ved en effektiv utviklings- og forvaltningsstrategi rettet mot en bærekraftig landbasert produksjon og tiltak for å beskytte miljøet mot tilførsel av uønskede næringsstoff. En slik forvaltning av miljøet fordrer strengere regulering i fremtiden og vil slik øke viktigheten av avfallshåndtering i akvakulturnæringen.

Like viktig som en god forvaltning av landbasert oppdrett er karakterisering og utnyttelse av avløpsvann og slam fra fiskeoppdrett. Det er velkjent at avløpsvannet fra landbasert oppdrett kan føre til akkumulering av fôrrester og fiskefekalier rundt utslippspunktet. Dette avløpsvannet inneholder mange ulike næringssalter og organisk materiale som kan indusere økt vekst av heterotrofe mikroorganismer og økt produksjon av mikro- og makroalger. Avfallsstoffene representerer derfor en resurs og ikke et miljøproblem hvis avfallsstoffene samles opp og brukes som gjødsel i veksthus, i landbruket eller gjennomgår en foredling til biogass. Økende energikostnader og deponeringsavgifter for slam kan også bidra til lønnsomhet for avansert slambehandling lokalt. Opp til nå har utnyttelse av avfallsstoff fra landbasert oppdrett fått liten oppmerksomhet. Relativ liberal regulering av utslipp, lokalisering av landbasert oppdrett (i distriktene), begrenset kunnskap om slik avfallsutnyttelse og i noen tilfeller gode resipienter har forsinket slike undersøkelser. Den forventede økningen i landbasert oppdrett, utbygging av større enheter og strengere utslippskrav nødvendiggjør studier av avfallsutnyttelse. Det særdeles viktig at vi har en god forståelse av slik utnyttelse både for å beskytte miljøet og for en bærekraftig utvikling av akvakulturindustrien.

Avfallshåndtering er et viktig tema i landbasert oppdrett og spesielt for anlegg som benytter resirkuleringssystem (Recirculating Aquaculture Systems - RAS). RAS er utviklet for oppdrett av store mengder fisk i et relativt lite vannvolum ved å behandle vannet for å fjerne begrensende og giftige avfallsprodukter (hovedsakelig nitrogenforbindelser og karbondioksid) for så og bruke vannet på nytt. Næringssaltene og det organiske materialet i avløpsvannet kan deles i en oppløst og en sedimenterbar fraksjon som krever ulike behandlingsmetoder. Fraksjonene påvirkes både av fôrtype og grad av vannbehandling. Generelt inneholder den sedimenterbare fraksjonen (partikulære) mesteparten av fosforutslippet (50–85 %), mens det meste av nitrogenutslippet (75–80 %) er som løst ammonium (eller nitrat hvis nitrifisering foregår) (Timmons et al., 2002). Næringsstoffene i den sedimenterbare fraksjonen

kan utnyttes enten som gjødsel (komposteres eller brukes direkte som gjødsel på landbruksområder) eller videreføres via mikrobiell omdannelse i reaktorer til biodrivstoff (delCampo et al., 2010). Sistnevnte anvendelse krever ofte en høy grad av behandling og tilførsel av annet organisk avfall som gjør den relativt kostnadskreven. Men høye energikostnader og deponeringsavgift for slam kan gjøre en slik behandling fordelaktig. De løste næringssaltene i avløpsvannet er en attraktiv gjødselskandidat, men kan være vanskeligere å få tak i. En mulighet er integrert produksjon av fisk og planter i et akvaponikksystem. Dette er en kombinasjon av fiskeoppdrett (akvakultur) og vannbasert planteproduksjon i veksthus (hydroponikk). Akvaponikk er et lovende system som kan bedre ressursutnyttelsen, øke inntjeningen og bærekraften både for fiske- og planteproduksjon (Adler et al., 2000). En slik samproduksjon er mulig fordi systemkravene er relativt like for oppdrett av fisk og planteproduksjon. Plantene tar opp næringssaltene og bidrar til vannrensing sammen med naturlig tilstedeværende mikroorganismer. I tillegg kan utluftet karbondioksid fra produksjonsvannet (fiskekar) utnyttes som karbonkilde i veksthuset. Veksthusnæringen bruker mye CO₂-gass som er en relativt stor kostnad. Dette kan hjelpe fiskeprodusentens avfallsproblem og planteprodusentens behov for næringsrikt vann (gjødsel) samt skape nye bærekraftige produkter. Samdrift av fisk og planter krever biologisk skadedyrbekjempelse fremfor plantevernmidler og er godt tilrettelagt for økologisk produksjon. En oppkonsentrering og omdanning av løste næringssalter, samt oppsamling av partikulært materiale foregår allerede i RAS. Ferskvannsbaserte resirkuleringsystem er derfor særdeles attraktive for utnyttelse av avfallsstoffer og på den måten kan miljøbelastningene reduseres og ressursutnyttelsen økes. Dette kan oppnås ved å tilrettelegge og utvikle integrert produksjon av fisk og planter (akvaponikk) og energiproduksjon fra slam. En slik utnyttelse er spesielt viktig med tanke på den økende avfallsproduksjonen fra en voksende akvakulturindustri, men også for å stimulere til økt lokal produksjon av fisk og planter.

En fornuftig forvaltningspolitikk og utviklingsstrategi krever en inngående forståelse av hvordan avfallsstoff fra landbasert oppdrett kan utnyttes i en integrert produksjon av fisk og planter og energiproduksjon, samt hvordan fremme utviklingen av slike system i Norge. Dette er tema som er lite undersøkt og lite kjent for kaldtvannsarter og de klimatiske forholdene i Norge. Internasjonalt har akvaponikk-fokuset i all hovedsak vært på varmekjære fiskearter som tilapia (*Oreochromis* sp) med helt andre produksjonsbetingelser og klimatiske forhold.

1.1 Utgangspunkt

Intensjon med dette prosjektet var å etablere et kunnskapsfundament knyttet til utnyttelse av avløpsvann og oppdrettsslam fra landbasert fiskeoppdrett for å redusere miljøbelastningen ved utslipp. Fokuset skulle være på integrert produksjon av fisk og planter (akvaponikk) tilpasset de klimatiske forholdene på Vestlandet, og hvordan oppdrettsslammet kunne utnyttes som en ressurs.

Prosjektets delmål:

- Grunnleggende dokumentasjon av innholdet av næringssalter i avløpsvann fra et kommersielt resirkuleringsanlegg for laks med tanke på utnyttelse i aquaponics.
- Finne frem til aktuelle planter og fremlegge konkrete anbefalinger for aquaponics i Norge basert på tilgjengelig litteratur, erfaring og foreløpig resultat fra analyse av avløpsvann.
- Å gjennomføre et testforsøk av et enkelt akvaponikk-system med bruk av avløpsvann fra lakseoppdrett og utvalgte planter.
- Grunnleggende karakterisering av slam fra et kommersielt resirkuleringsanlegg for laks med tanke på energiproduksjon og hvis mulig å foreta initiale reaktortester for produksjon av biogass.

For å oppnå prosjektets delmål, ble prosjektet delt opp i 4 tett relaterte arbeidspakker, som har vært en blanding av kort- og langtidsundersøkelser og analyser med tidsramme på opptil 2 år.

- Arbeidspakke 1: Dokumentasjon av avløpsvann fra landbasert ferskvannsoffdrett
- Arbeidspakke 2: Utvelgelse av relevante planter for aquaponics
- Arbeidspakke 3: Gjennomføre et testforsøk med bruk av avløpsvann fra et RAS for smoltoppdrett og noen utvalgte planter
- Arbeidspakke 4: Slamkarakterisering og vurdering av energiproduksjon

1.2 Gjennomført

Hovedmålet for dette prosjektet; å etablere et kunnskapsfundament knyttet til utnyttelse av avløpsvann og oppdrettsslam fra landbasert fiskeoppdrett for å redusere miljøbelastningen ved utslipp, er oppnådd. Samtidig er det dannet et godt grunnlag for videre samarbeid med prosjektdeltagerne, og etablert gode kontakter med institusjoner og bedrifter som er opptatt av problemstillingene. Tidsplanen har blitt noe forskjøvet, hovedsakelig på grunn av tilpassing til Hardingsmolts produksjon og praktiske hensyn.

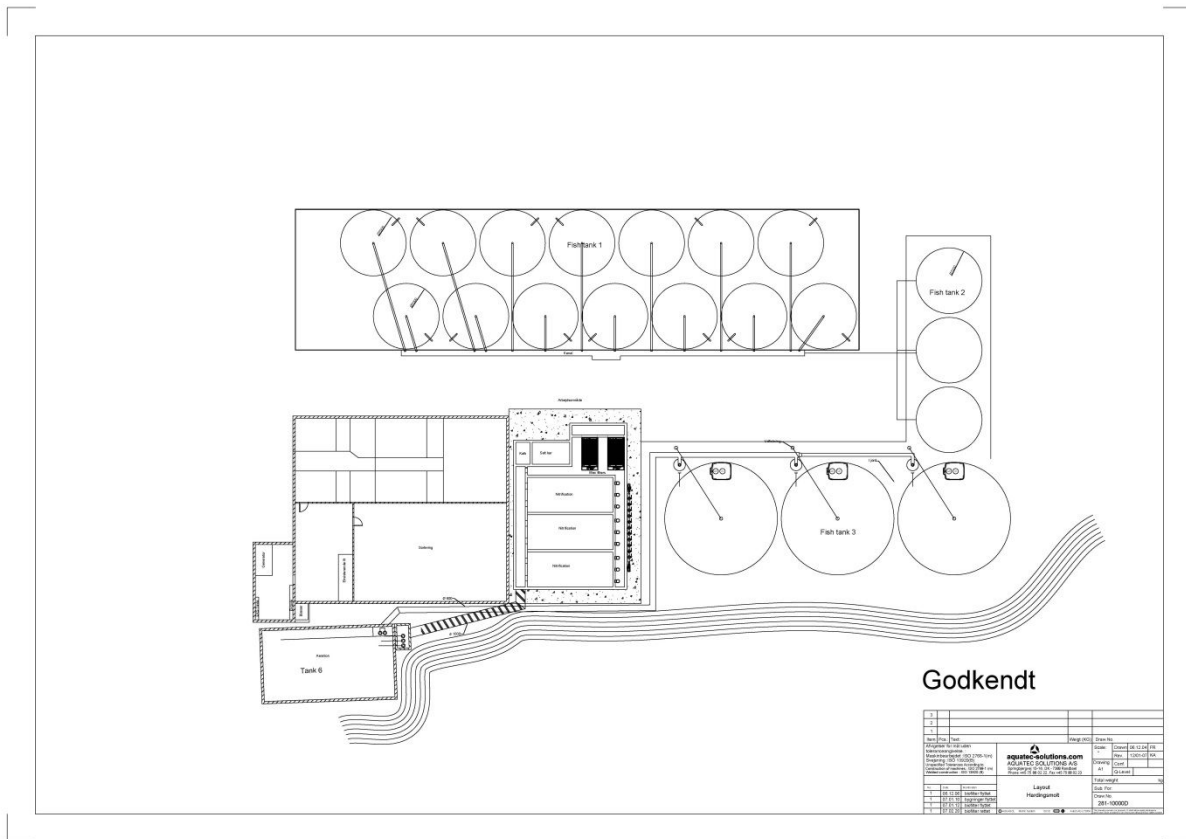
I løpet av prosjektet har prosjektgruppen gjennomført et overvåkingsprogram (~3 produksjonssykluser) av avløpsvann og oppdrettsslam fra landbasert resirkuleringsanlegg for oppdrett av laksesmolt. Dette ble gjort for å kartlegge og vurdere avløpsvannets egnethet som gjødsel i vannbasert planteproduksjon, og hvordan oppdrettsslammet kunne utnyttes. Basert på disse analysene ble relevante plantearter for integrert produksjon av fisk og planter på Vestlandet identifisert for videre undersøkelser. Prosjektgruppen utførte to separate forsøk hvor avløpsvannet ble brukt som næring (felt- og lab-forsøk). I tillegg ble det utført en litteraturstudie og et komposteringsforsøk (lab-forsøk) av det partikulære avfallet (slam), henholdsvis for å vurdere slammet som basis for energiproduksjon og vurdere slammets egnethet som gjødsel.

2 Prosjektdesign og metoder

Prosjektet ble delt inn i fire deler. (1) Samle inn grunnleggende dokumentasjon (overvåkingsprogram) om innhold av næringsalter i avløpsvann fra et kommersielt, landbasert resirkuleringsanlegg for lakseyngel, (2) velge ut relevante planter for integrert produksjon av planter og fisk (akvaponikk), (3) gjennomføre et testforsøk av et enkelt akvaponikk-system, og (4) karakterisere oppdrettsslam (overvåkingsprogram) og undersøke mulig anvendelse av slam fra ovennevnte resirkuleringsanlegg. Formålet med prosjektet var å undersøke om næringsrikt oppløst (avløpsvann) og partikulært (slam) avfall fra fiskeoppdrett kan brukes som en ressurs, som en alternativ næringsløsning for planteproduksjon. Salatforsøket skulle også brukes til å bedømme hvorvidt salat kan benyttes som en naturlig rensemetode av avløpsvann med tanke på utslipp til miljøet eller ved gjenbruk av avløpsvannet.

2.1 Overvåkingsprogram

Et overvåkingsprogram ble startet opp i november 2011 ved Hardingsmolt AS. Hardingsmolt AS produserer årlig ca. 2,5 million smolt av Atlantisk laks (*Salmo salar*) i et RAS hvor det benyttes mekaniske og biologiske filtre for å behandle vannet (Figur 1). I tillegg blir vannet pH-justert (kalk), luftet for CO₂ (bobling med vanlig luft), tilført ren oksygen (oksygenkjegler) og UV-bestrålt. Overvåkingen foregikk over en periode på halvannet år (ca. 3 produksjonssykluser) med prøvetaking ca. 1 gang per måned (tilpasset produksjonen), og ble avsluttet våren 2013. Det ble tatt ut prøver av avløpsvann (etter biofilter, 1 L + 0,5 L) og slam (i sedimenteringsrennen etter trommelfilter, 0,5 L) som ble analysert for en rekke ulike parametere (pkt/tabell). Målinger av generelle vannkvalitetsparametere og beregninger av slamproduksjon og utluftet CO₂ ble inkludert, og relevante driftsdata (antall fisk, størrelse, biomasse, førmengde og vannutskifting) ble registrert av bedriften. Alle prøver ble analysert enten av Eurofins eller ved NIVA-lab (CO₂) etter gjeldende prosedyrer.



Figur 1. Hardingsmolt AS sitt produksjonssystem (Tegning: Hardingsmolt/Aquatec Solutions).

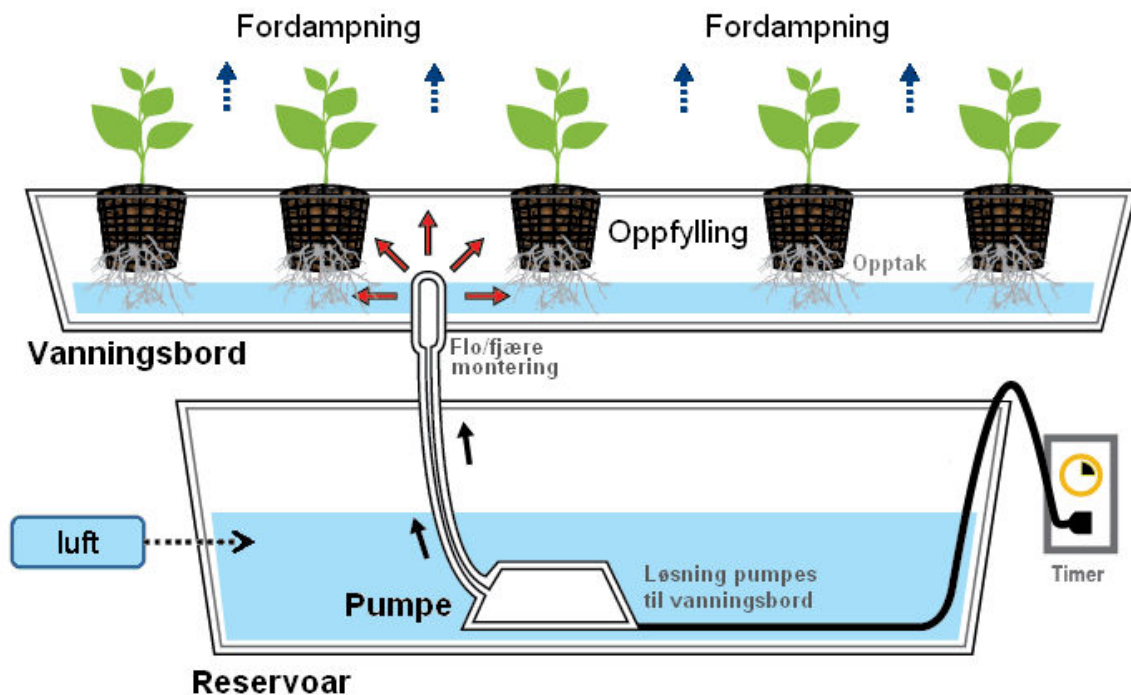
2.2 Forsøk

Samarbeidspartneren Berge Gard og Gartneri (BGG) i Tørvikbygd, Kvam kommune, produserer liljer og andre blomster i veksthus. Gartneriet ligger 2,7 km bortenfor Hardingsmolt AS og er derfor en potensiell samarbeidspartner primært for utnyttelse av avløpsvann, men også for utnyttelse av slam (samkompostering med liljerester) fra fiskeoppdrett. Kronheim Grønt produserer salat og andre grønnsaker i veksthus til kommersielt bruk og bidro med oppalet (to uker gammel) Crispisalat (*Lactuca sativa* var. *crispi*) til salatforsøket.

2.2.1 Liljeforsøk

Et feltforsøk med produksjon av liljer (*Samur, Longiflorum Asiatic* hybrid, 200 stk) med avløpsvann ble gjennomført fra 26.juni til 27.august sommeren 2012, parallelt med den kommersielle produksjonen hos BGG. Systembrett, vanningsbord, veksttorv, og alle daglige prosedyrer og protokoller var tilsvarende vanlig produksjon, og ble driftet av personell ved BGG. Eier Anne Grete Berge vurderte sluttresultatet sammen med Magne Berland fra Norsk Landbruksrådgiving Veksthus.

Vanningsbordene fungerer etter et *flo og fjære*-system (Figur 2). Hvert bord fylles opp med næringsrikt vann (5 – 10 cm). Når alt gjødselvann er tatt opp av plantene eller fordampet fylles bordet opp på ny (noen dagers mellomrom). Et reservoar med avløpsvann (1 000 L) fra Hardingsmolt AS ble koblet til vanningsbordet med forsøksliljene og brukt ved vanning istedenfor kommersiell næringsløsning. En luftpumpe ble plassert i karet for å tilføre oksygen og sørge for kontinuerlig omrøring av avløpsvannet. Avløpsvannet til forsøket ble tatt samtidig som et av prøveuttakene til overvåkingsprogrammet (20.06.13), og enkelte vannkvalitetsparametere ble målt underveis i forsøket.

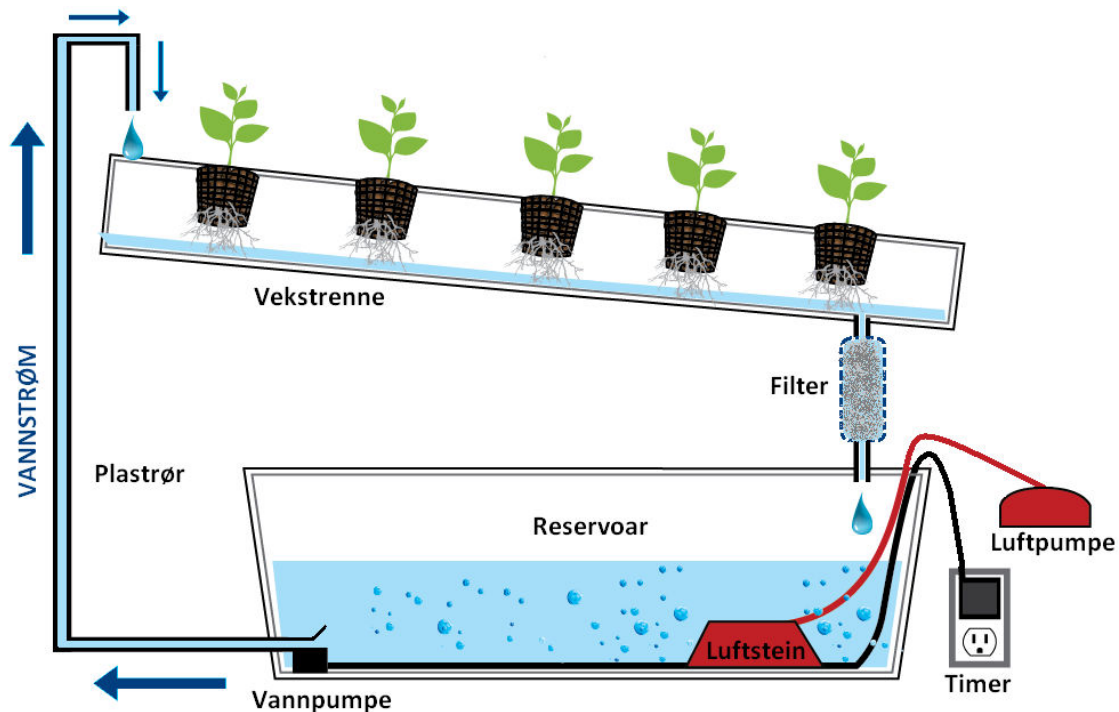


Figur 2. Prinsippskisse av et flo og fjære-system.

2.2.2 Salatforsøk

I perioden 20.september til 18.oktober høsten 2012 ble Crispisalat dyrket med ulike typer næringsløsninger i NIVA sitt eget klimarom i Bergen (inkludert en dag akklimatisering). Salaten ble dyrket i et *Nutrient Film Technique*-system (NFT) med jord som støtte for plantene (i dyrkningspotter), tilsvarende produksjonssystem som hos salatleverandøren Kronheim Grønt (Figur 3). Salaten ble dyrket i grunne vekstrenner (10 x 10 x 200 cm) med røttene hengende ned til bunnen av rennen. Næringsrikt vann (1 L) fra de ulike reservoarene (ca. 50 ml per plante) ble pumpet (peristaltisk pumpe) opp til rennen per vanning (6 x 4 min per døgn). En naturlig helning førte vannet gjennom rennen og til den andre enden hvor det ble ført tilbake, enten via filteret eller direkte, til reservoaret. Ved dag 1 ble det registrert et lavt

oksygennivå i alle behandlingene med avløpsvann, spesielt i avløpsvannet som også inneholdt slam. Reservoaret ble derfor luftet (20 minutter før hver vanning) for å unngå lave oksygenkonsentrasjoner ($O_2 < 70\%$).



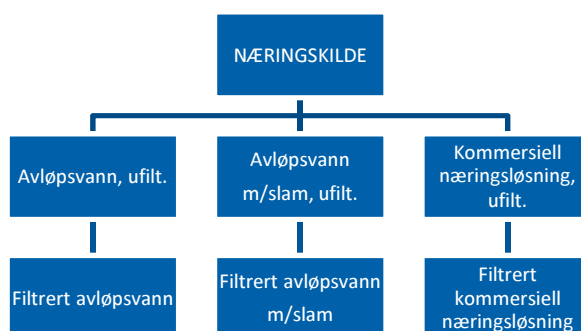
Figur 3. Prinsippkisse av et NFT system (*Nutrient Film Technique*).

To og to plastrenner ble plassert parallelt på til sammen seks hyller (Figur 4) med 10 planter per renne. Begge renner på hver hylle ble så koblet til én bøtte (10 L) som fungerte som reservoar. Salaten fikk 18 timer med lys ($250 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) hver dag (fra 06.00 til 24.00) og seks timer uten lys ved hjelp av tidsinnstilt fluorescerende lys (TL-D 58W/830 Philips, Tyskland). Temperaturen ble holdt konstant på 18°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) og fuktigheten mellom 75 og 85 %.



Figur 4. Forsøksoppsett i klimarom (dag 0).

Tre forskjellige næringskilder ble testet under forsøket, (1) rent avløpsvann fra Hardingsmolt, (2) avløpsvann blandet med slam fra Hardingsmolt, og (3) en kommersiell næringsløsning (kontroll) tilpasset NFT-systemer. De tre behandlingene ble i tillegg delt inn i to underbehandlinger; filtrert og ufiltrert. I den filtrerte behandlingen passerte løsningen gjennom et steinullfilter etter hver passasje gjennom rennene. Filtrene ble modnet med de respektive løsningene i en uke før forsøksstart. Til sammen ble det seks ulike behandlinger (Figur 5) knyttet til 20 salatplanter hver, der alle reservoar var like store (10 L). I behandlingene med bare avløpsvann ble avløpsvannet fra Hardingsmolt brukt direkte i reservoarene. I behandlingene med slam ble avløpsvann (20 L) fra Hardingsmolt tilsatt slam (2,5 g/L våtvekt, 1,57 g/L tørrvekt) og fordelt på de to reservoarene. Næringsløsningen ble laget til ved å blande Calcinit (300 mL, 10 %, Yara, Norge) og Superex vegetables (200 mL, 10 %, Kakkilä, Norge) i springvann (19,6 L) som ble fordelt på de to reservoarene. De respektive stamløsningene ble oppbevart kaldt i forsøksperioden.



Figur 5. Oversikt over de ulike behandlingene i forsøket.

En oversikt over hvilke dager vannprøver skulle tas ut og hvilket prøvepunkt (A, B eller C) prøvene skulle tas fra ble laget før salatforsøkets oppstart (Tabell 1). Prøvedag for jord og salat, samt instrumentmålinger ble inkludert i tabellen. Begerglass (1000 mL) ble brukt til å ta ut vann fra hvert reservoar slik at det var mulig å ta ut vannprøver til analyse. Medisinflasker (100 mL) ble fylt opp for å ha som reserve. En oversikt over hva som ble analysert, analysemetode (kjemisk/mikrobiologisk), volum per prøve og antall prøver per uke og totalt finnes i tabellen. Både vannprøver og reserver til de kjemiske analysene ble oppbevart i kjøleskap for analyse på NTNU. De øvrige prøvene ble enten opparbeidet umiddelbart eller lagret på kjøøl/frys i påvente av analyse.

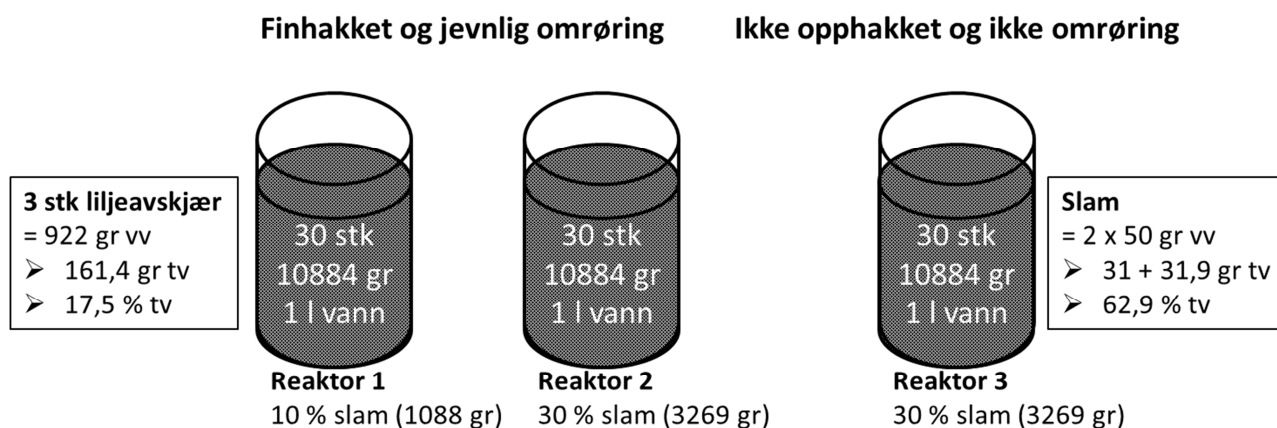
I et fullskala integrert akvaponikk-system ville vannforsyningen vært kontinuerlig (resirkulasjon), men i dette forsøket var det nødvendig å lage nye løsninger hver uke for å kompensere for plantenes næringsopptak og vannforbruk (fordamping, opptak og prøveuttak). Dette forsøket fokuserer på tilgjengelig konsentrasjon av ulike næringsalter i reservoarene og omhandler ikke massebalanse. Konsentrasjonen av de ulike forbindelsene presenteres og diskuteres i henhold til hvordan planteveksten påvirkes og hvilke konsekvenser gjenbruk eller utslipp kan få for henholdsvis oppdrettsfisk og miljøet.

For å undersøke om det lave innholdet av nitrat i avløpsvannet var veksthemmende på salaten ble 4 salatplanter fra hver behandling tatt ut midtveis (etter to uker) i forsøket og dyrket videre med en løsning av avløpsvann tilsatt nitrat (125 mg NaNO_3/L). Etter avsluttet forsøk ble alle de resterende plantene satt over på kommersiell næringsløsning (1 uke) for å vurdere effekten av optimale næringsforhold.

2.2.3 Slamforsøk

Etter ønske fra BGG ble det satt opp et forsøk for å undersøke samkompostering av liljerester (jord, røtter og planterest) og oppdrettsslam. Planterestene utgjør et avfallsproblem, men ved kompostering til jord og gjenbruk i liljeproduksjonen, kan dette problemet elimineres og heller utgjøre en ressurs.

Det ble satt opp 3 reaktorer med ulik blanding av liljerester og slam for å studere effekten av slamtilsetning og hvorvidt finhakking/omrøring ville bidra til hurtigere kompostering (Figur 6). Hver reaktor (20 l) ble tilsatt 30 liljeavskjær (jord, rotsystem og stengelrest) og vann (1 L). Reaktor 1 ble tilsatt 10 % oppdrettsslam (1088 g), reaktor 2 og 3 ble tilsatt 30 % (3269 g) oppdrettsslam. Liljeavskjæret i reaktor 1 og 2 ble finhakket før tilsetning og blandet ved ujevne mellomrom. Liljeavskjæret i reaktor 3 ble verken finhakket eller blandet i forsøksperioden. Forsøket pågikk fra 26.september 2012 til 2.april 2013 i et kaldt laboratorium (tilnærmet lik temperaturen ute) uten lys.



Figur 6. Forsøksoppsett samkompostering av liljerester og oppdrettsslam.

2.3 Analyser og målinger

2.3.1 Kjemisk analyse

Vann- og slamprøvene fra overvåkingsprogrammet og liljeforsøket ble analysert av Eurofins og NIVA-lab etter gjeldende prosedyrer. I salatforsøket ble alle prøvene analysert ved NTNU, Institutt for kjemi etter gjeldende prosedyrer (tilsvarende Eurofins). I salatforsøket ble to parallelle vannprøver tatt ut til analyse av organisk materiale (Torch, Teledyne Tekmar, Ohio, USA), én ufiltrert (30 mL) for analyse av totalt organisk materiale (TOC) og én filtrert (30 mL) for analyse av oppløst organisk materiale (DOC). Deretter ble UV_{254nm} analyse utført på hver enkelt prøve (UVmini-1240, Shimadzu, Japan). To parallelle vannprøver ble tatt ut til elementanalyse (N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Al, Cr, Cd, Ni, Na, Cl, Si), én ufiltrert (10 mL) for analyse av total elementkonsentrasjon og én filtrert (10 mL) for analyse av oppløst fraksjon (Element 2™ ICP-MS, Thermo Scientific, Massachusetts, USA). Samme filtertype (25 mm, w/0,45 µm) ble brukt på alle filtrerte prøver og alle prøvene ble tatt ut med sterile sprøyter (BD Plastipak™, BD, New Jersey, USA) og oppbevart i sterile plastrør (SuperClear™, VWR, Pennsylvania, USA). Nitrat ble målt i utvalgte prøver fra hver behandling like etter prøvetaking (Cell Test method 14556, Pharo 300 Spectroquant®, Merck, Tyskland).

Tre salatplanter fra hver behandling ble tatt ut ved prosjektets slutt og veiet, deretter ble plantene tørket ved 100°C i 3-4 timer og veiet. Samlet tørrvekt for plantene i hver behandling ble registrert, det ble også tørrvekt av tre salatplanter fra Kronheim Grønt for sammenligning. Jord fra pottene i utvalget ble også tørket, og både våtvekt og tørrvekt ble registrert. Jord og salatprøvene ble fortynnet med syre (HNO₃, 3 M) og destillert vann før dekomponering (UltraCLAVE, Milestone, Connecticut, USA) og elementanalyse (Element 2™ ICP-MS, Thermo Scientific, Massachusetts, USA).

2.3.2 Øvrige målinger

Forsøksliljene ble vurdert etter ca. ni uker (vanlig produksjonstid for asiatiske liljer) av dyrkeren (Anne Grete Berge) og Magne Berland (NLR Veksthus). Lengde, farge på stengel, og antall knopper ble målt og sammenlignet med liljer dyrket på vanlig måte parallelt med forsøket.

I salatforsøket ble daglige (hverdager kl.09.00) instrumentmålinger i reservoarene (A) utført for å måle pH, vanntemperatur, oksygeninnhold, salinitet, elektrisk konduktivitet (Orion™ 5-Star, Thermo Scientific, Massachusetts, USA) og redokspotensialet (EcoSense®, YSI, Ohio, USA). De samme målingene ble gjort i de øvrige punktene (B og C) ved å fylle opp begerglass (1 000 mL) under vanning annenhver uke. Temperatur og luftfuktighet ble også registrert hver dag (Termometer/hygrometer, Clas Ohlson, Sverige).

Etter fire uker ble forsøkssalat fra alle de seks behandlingene vurdert av Magne Berland (NLR Veksthus) og sammenlignet med salat dyrket med kommersiell næringsløsning. Totalvekt, salgsvekt (vekt uten stygge blad) høyde og antall blader ble målt. Grønnfarge ble også bestemt på en skala fra 1 til 5.

I slamforsøket ble det målt temperatur (luft og reaktor), pH, konduktivitet og oksygenmetning (%) med ujevne mellomrom.

2.3.3 Mikrobiell karakterisering

Det mikrobielle samfunnet ble analysert ved dyrking av bakterier på syntetisk medium (heterotrof bakteriell vekst) og ved totaltelling av bakterier. Førstnevnte teknikk vil fange opp de bakteriene som lar seg dyrke og som er dyrkbare på prøvetidspunktet, og sistnevnte vil fange opp bakterier som har en tilfredsstillende mengde DNA som lar seg farge, uavhengig om de er levende og/eller dyrkbare. Sammen vil disse metodene kunne gi et innblikk i det mikrobielle samfunnet og dets hovedegenskaper. I tillegg ble det tatt ut oppkonsentrerte vannprøver for analyse av bakterielt DNA som inngår i en masteroppgave ved Universitetet i Bergen (ferdigstilles 2014).

Heterotrof bakteriell vekst (dyrkbare)

En fortyningsserie av prøvene og sterilt ferskvann (SFV) ble satt opp for så å bli platet ut på parallelle næringsmedium (3M Petrifilm). Disse ble deretter inkubert mørkt ved 20 °C. Antall kolonidannende enheter (CFU – Colony Forming Units) ble talt manuelt etter 3 dager (opportunist/hurtigvoksende) og etter 14 dager (total CFU).

Totaltelling av bakterier

10 ml prøve ble fiksert (sluttkonsentrasjon 0,2 % glutaraldehyd) og oppbevart ved 4 °C inntil analyse ved flow cytometri. De fikserte prøvene ble fortynnet i SFV og farget med 100x fortykning av SYBR Green I og analysert med et FACSCalibur flow cytometer (Becton Dickinson).

2.4 Dataanalyse og beregninger

Alle beregninger, tabeller og figurer ble utført i Excel (Microsoft® Office 2007). Excel ble også brukt til å utføre statistiske analyser som regresjon, paret t-test og ANOVA.

Relevante produksjonsdata ble beregnet ut fra innrapportert informasjon fra overvåkingsprogrammet.

3 Resultat og diskusjon

Resultatene fra prosjektet presenteres i henhold til karakter (oppløst/partikulært) og anvendelse (næring/energi). Det vil si at resultatene knyttet til avløpsvannet utgjør den oppløste fraksjonen av avfallsstoffene og resultatene knyttet til oppdrettsslammet utgjør den partikulære fraksjonen. I tillegg vil registreringer av driftsparameter presenteres og vurderes for å illustrere potensialet for utnyttelse av både oppløste og partikulære næringsstoffer.

3.1 Avløpsvann fra fiskeoppdrett (oppløst fraksjon)

Resultatene knyttet til avløpsvannet utgjør den oppløste fraksjonen av avfallsstoffene og omhandler hvorvidt de løste avfallsstoffene kan utnyttes som en resurs (overvåkingsprogram/plantevekst/næring) eller om de vil akkumuleres og utgjøre et problem for planteproduksjon, oppdrett eller det ytre miljøet (planter som rensemetode). Dette søkes besvart gjennom overvåkingsprogrammet og de to planteforsøkene (liljer og salat). Salatforsøket ble gjort i samarbeid med masterstudent Ingrid Gjesteland (NTNU) og utfyllende resultater/informasjon finnes i hennes masteroppgave (Gjesteland, 2013).

3.1.1 Overvåkingsprogram, plantevekst og løste næringsalter

Overvåkingsprogram

Overvåkingsresultatene viste varierende konsentrasjon for flere av de målte parameterne og næringsstoffene (Tabell 2 og Tabell 3). Vannkvaliteten og mengden avfallsprodukter varierer naturlig i henhold til driftsintensitet, fiskestørrelse og rensetiltak. Innholdet av plantenæringsstoffer som nitrat, fosfat, bor og kalsium viste størst variasjon, og skyldes at de er direkte relatert til førmengde, tilsetninger og råvannskvalitet. Avløpsvannets innhold av total nitrogen (Tot-N, brukes av veksthusindustrien som mål på nitrogen) varierte fra 14 mg N/L til 71 mg N/L i løpet av hele overvåkingsperioden. Nitrat (NO₃-N) varierer i samme periode fra 5,7 mg N/L til 42 mg N/L, men høye verdier samsvarer nødvendigvis ikke med høye Tot-N verdier. Innholdet av nitrat gir sannsynligvis et bedre bilde av mengden tilgjengelig nitrogen for plantevekst. Innholdet av aluminium og TOC varierte også. Konsentrasjonen av kobber, krom, molybden og mangan var stort sett under deteksjonsgrensen. I februar og mars 2012 (i kursiv i tabell) ble anlegget driftet med unormalt høy saltholdighet. Dette skyldes høy bruk av sjøvann ved oppdrettsanlegget på grunn av faren for resmoltifisering (reverserer de fysiologiske endringene tilbake til et liv i ferskvann). Den høye saltholdigheten er toksisk for de aller fleste plantesorter (Devitt et al., 1991). Nivåene kan tåles av ekstremt salttolerante arter som normalt vokser i områder med hyppig sjøsprøyt,

men slike planter ville vært uegnet i denne sammenhengen. Også ved de øvrige prøveuttakene var nivåene av natrium og klorid toksiske for mange plantesorter. Sjøvannet bidro til forhøyet pH, ledningsevne og alkalitet, og i tillegg var nesten alle prøvenes konsentrasjon av magnesium skadelig for planter. Det samme gjelder for bor, men nivåene var innenfor tålegrensen for moderat tolerante og tolerante sorter som salat og tomat (Shannon & Grieve, 1998). Plantenæringsstoffene er delt inn i makro- og mikronæringsstoffer basert på hvor mye av hvert stoff planten behøver. Makronæringsstoffene nitrogen, fosfor, kalium, kalsium, magnesium og svovel er de næringsstoffene planten trenger mest av for å utvikle seg optimalt. Jern, mangan, sink, kobber, bor og molybden er mikronæringsstoffer som planten ikke trenger like mye av, men som er essensielle for alle planter. Natrium, nikkel og silisium er inkludert fordi de anses som essensielle for enkelte planter (Mengel et al., 2001). Klorid er også essensielt for planter i lav konsentrasjon, men er toksisk for planter ved høy konsentrasjon.

Tabell 2. Online/håndholdte målinger (utført av personell ved Hardingsmolt AS) av kjemiske og fysiokjemiske parametere i avløpsvann fra Hardingsmolt AS i overvåkingsperioden 15.november 2011 til 22.mars 2013.

PARAMETER	DATO												
	2011					2012					2013		
	15.NOV	29.FEB	14.MAR	28.MAR	20.JUN	9.JUL	25.JUL	15.AUG	4.SEP	19.SEP	6.NOV	4.DES	22.MAR
Temperatur °C	-	10,4	9,15	8,55	19,5	18,8	19,1	17,6	15,4	12,7	7,9	-	-
pH -log [H ⁺]	-	6,6	6,8	7,3	6,9	6,9	7,0	6,8	6,7	6,8	6,9	-	-
Alkalitet mmol/L	-	0,6	1,0	2,0	1,0	1,2	1,9	1,3	1,3	0,9	1,2	-	-
Saltholdighet ppt	-	17,8	16,9	13,7	1,8	1,7	1,2	2,1	2,0	1,6	1,8	-	-
O ₂ %	-	85	95	95	91	82	82	75	87	86	84	-	-
CO ₂ µg/L	-	14 000	15 000	10 000	9 000	13 000	14 000	10 000	9 000	7 000	12 000	-	-
NH ₄ ⁺ -N µg/L	-	590	550	530	90	410	80	200	150	70	590	130	300
NO ₂ ⁻ -N µg/L	-	135	160	64	57	670	313	183	55	55	450	100	150
NO ₃ ⁻ µg/L	-	75 000	50 000	50 000	100 000	>100 000	250 000	100 000	>100 000	25 000	100 000	>100 000	>100 000

Tabell 3. Fysiskjemiiske parametere og konsentrasjon (µg/L) av næringsstoffer og metaller i avløpsvann fra Hardingsmolt AS målt av Eurofins i overvåkingsperioden. Grått felt indikerer avløpsvann benyttet i henholdsvis liljeforsøket og salatforsøket. Tekst i kursiv indikerer perioder med høyt innslag av sjøvann.

PARAMETER	DATO												
	2011						2012						2013
	15.NOV	29.FEB	14.MAR	28.MAR	20.JUN	9.JUL	25.JUL	15.AUG	4.SEP	19.SEP	6.NOV	4.DES	22.MAR
pH	6,8	6,3	7,2	7,2	7,4	7,7	7,4	7,3	7,3	7,6	7,7	7,6	7,4
Konduktivitet	2,4	24,5	23,6	19,8	2,3	2,6	1,8	3,0	3,3	2,1	2,9	4,6	4,5
Turbiditet	0,9	3,7	1,7	3,4	0,3	2,1	1,0	0,8	1,7	0,4	0,8	0,6	1,3
Alkalitet	0,6	0,6	2,1	2,6	1,2	2,3	3,1	2,3	2,6	1,6	1,9	1,9	2,7
TOC	6,0	8,8	4,5	4,3	3,6	7,0	6,4	4,6	11,0	3,3	4,4	3,5	5,6
Tot-N	24 000	26 000	18 000	14 000	30 000	39 000	54 000	22 000	71 000	20 000	20 000	19 000	36 000
NO ₃ ⁻ /NO ₂ ⁻ -N	25 000	25 000	-	12 000	25 000	5 700	42 000	19 000	35 000	10 000	17 000	17 000	34 000
NH ₄ ⁻ -N	210	650	450	510	120	310	1 000	1 900	620	11	9	1 200	210
Tot-P	3 200	4 000	2 200	750	1 700	3 800	3 900	2 600	4 800	2 200	2 800	2 800	4 900
PO ₄ ⁻ -P	2 600	3 500	490	710	1 600	3 700	3 700	2 500	3 800	1 700	890	2 600	4 700
K	15 000	140 000	96 000	140 000	17 000	17 000	14 000	22 000	22 000	16 000	20 000	32 000	33 000
SO ₄	116 000	1 300 000	450 000	920 000	98 000	100 000	64 000	130 000	130 000	97 000	120 000	200 000	200 000
Ca	58 000	220 000	210 000	200 000	79 000	130 000	140 000	100 000	130 000	64 000	82 000	92 000	140 000
Mg	44 000	550 000	510 000	470 000	42 000	46 000	26 000	63 000	60 000	45 000	57 000	99 000	95 000
Fe	25	510	170	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50
Mn	1,8	13	6	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Zn	12	37	16	16	11	15	16	12	21	6,8	11	10	10
Cu	2,8	<1	1,8	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	3,4
B	180	2 100	1 600	1 600	150	160	91	200	230	160	180	340	290
Mo	0,86	<5	<5	5,1	<1	<1	<1	<1	1,1	<1	<1	1,2	<1
Al	17	20	15	16	110	26	9,5	11	28	40	8,1	15	12
Cr	-	12	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Na	360 000	4 700 000	4 500 000	3 900 000	350 000	380 000	220 000	520 000	480 000	350 000	460 000	800 000	760 000
Cl	840 000	9 400 000	2 700 000	6 900 000	660 000	650 000	340 000	970 000	920 000	620 000	810 000	1 400 000	1 300 000
Si	550	370	330	390	340	180	340	<2	420	620	620	600	550

Anbefalte planter

Liljene ved Berge Gard og Gartneri dyrkes i jord/torv, et vekstmedium som har god bufferkapasitet og som i seg selv inneholder plantenæring. Dette muliggjør direkte bruk av avløpsvannet uten at dette trenger å ha negativ innvirkning på plantene.

En grei sort å dyrke for forskningsøyemed, som er mye brukt i hydroponikk systemer og som har kort kulturtid, homogen biomasse og der det finnes mye informasjon om forventet vekst og utvikling, er salat. Frillice, også kalt Vestfoldsalat eller Crispi (Figur 7), er en meget populær og utbredt sort i Norge. Frillice er en eikebladlignende sort med sterkt grønne blad. Den utvikles tidlig og vokser raskt. Den er vanligvis resistent mot bladlus, meldugg og salat mosaikk virus. Den er også tolerant mot nekrose og storkrenning (utvikling av blomsterstengel før matnyttig del). Da saltinnhold i vannet kan vise seg å være et problem kan det alternativt i tillegg dyrkes en sort med høyere salttoleranse enn salat. Sølvbete også kalt bladbete og mangold (*Beta vulgaris cicla*, Figur 7) er en moderat salttolerant sort med rask vekst og kort kulturtid, og som generelt går for å være en sort med høy stresstoleranse. Sølvbete med hvit stilk går for å ha raskere vekst og være mer hardfør enn andre sorter. Sorten `Fordhook Giant` anbefales da den er mer utprøvd enn andre sorter. Sortene kan dyrkes under samme vekstforhold og begge sorter vil trives i et NFT-system så vel som i vannkultur (floating raft, deep water culture).



Figur 7. Salatsortene som anbefales for forsøkene ved NIVA; Frillice (venstre), og sølvbete cv. `Fordhook giant` (høyre).

Salat vokser best ved moderate dagtemperaturer (15-25 °C) og kjølige netter (10-15 °C) med en daglengde på 16 timer. Ved høyere temperaturer kan salaten gå i stakk, for høy temperatur hindrer dessuten også spiring. Plutselige endringer i temperatur kan også føre til sykdomsutvikling (Jonas Viken, pers.komm) (Grubben, 2004). Salat trenger en relativt høy fuktighet for å vokse optimalt. En relativ fuktighet (RH) på 75-85 % er anbefalt i veksthusproduksjon. Opptaket av visse næringsstoffer har sammenheng med luftfuktighet, dette gjelder først og fremst kalsium, magnesium, kalium, nitrat og fosfor (Bævre & Gislerød, 2007). Anbefalte lyskilder er CWF (cool white fluorescent) lamper eller HPS (High Pressure Sodium / høytrykk-natriumdamplys). Sistnevnte kjennetegnes ved sitt gule natriumlys der de gule- og

gulgrønne bølgelengdene dominerer. Økt strekningsvekst har vært et problem ved dyrking av salat om vinteren ved bruk av disse lampene, man må derfor øke belysningsstyrken for å kompensere for de negative effektene (Bævre & Gislerød, 2007). I tillegg må lampene monteres på en slik måte at varmen fra lampene ikke forstyrrer spiring eller påvirker settpunktet for temperatur i rommet. Anbefalt lysmengde under forsøket er 250-300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ og en uniform distribusjon over hele vekstområdet. Lysintensitet anbefales å ligge noe lavere under spiring (50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) og deretter på ca. 250 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (Wheeler et al., 1994). Valg av vekstmedium avhenger av ønskede egenskaper. Torv vil ha større bufferkapasitet og holde bedre på fuktighet enn for eksempel leca og pimpstein, mens leca og pimpstein har fordel i at det ikke påvirker pH eller bringer organisk materiale inn i systemet. Ferdigpressede «klosser» av steinull eller den organiske varianten «perfect starts» har også vist seg å fungere bra i hydroponikk systemer. Næringsløsningens pH bør ligge mellom 5.6-6.0. Litt avhengig av vekstmedium kan det forventes at pH vil stige utover produksjonsperioden. pH kan enkelt reguleres ved tilførsel av salpetersyre (HNO_3) til næringsløsning. pH regulerer tilgjengeligheten av nærings saltene i løsningen og det er derfor viktig å regulere den til riktig nivå. Ved gjødning av planter i vannkultur tilføres næringsløsningen gjennom vanningsanlegget. Bruksløsning er den løsningen som blir tilført plantene, mens stamløsning er en konsentrert løsning av ett eller flere gjødselstoffer som etter en fortykning er med på å danne en bruksløsning. Stamlosninger lages ved å løse salter i vann og ionene dissosierer i vannet. Hvis stamløsningen har for høy konsentrasjon kan enkelte stoffer reagere med hverandre og man får en utfelling. Dette gjelder spesielt stoffene kalsium og sulfat. Disse to kan derfor ikke blandes i samme stamløsning (Resh, 1995). Følgende typer vannløselig gjødsel anbefales benyttet til salat og sølvbete (etter anbefalinger fra LOG):

Stamløsning 1: Superex grønnsaker (Kekkilä, LOG)

Stamløsning 2: Calcinit (Yara, LOG)

Disse løses i vann (i hver sin respektive tank) til en stamløsning på 10 %. Denne konsentrasjonen skal ikke overskrive 12,5 %, da man vil få utfellinger (Terje Wikmark, LOG, pers.komm.). Alternativt kan man tilføre gjødselen på en enklere måte ved å lage en stor tank med ferdig bruksløsning, som etterfylles ved behov. Dette anbefales til mindre systemer som forsøksanlegget planlagt ved NIVA. Ledningsevnen eller konduktiviteten forteller om den elektriske ledeevnen til en løsning og brukes til å måle konsentrasjonen på gjødselblandingen (Bævre & Gislerød, 2007). Salat anbefales å ha et ledetall på rundt 2-2,5 mS/cm i produksjonsfasen (Morgan, 1999). Salat og sølvbete såes typisk i pluggbrett. Mediet vannes før frøet legges på eller rett under overflaten og ytterligere vanning er ikke nødvendig før frøet har spirt. De to første dagene dekkes frøene av en transparent plast, for å holde luftfuktigheten oppe (95 %) rundt frøene i spirefasen. Etter at plasten tas bort, anbefales det lys 22 timer per døgn og luftfuktighet på ca. 70-80 %. Når frøplantene har utviklet to frøblad, kan plantene få en fortynt næringsløsning med ledetall på ca. EC 0,5-1.6 mS/cm. Samme gjødsel som til planter i produksjon kan benyttes, bare i fortynt form. Dette

vil gjøre planterøttene bedre i stand til å tilpasse seg de mye høyere ledetallene når de settes i produksjon (Morgan, 1999). For å hemme lengdevekst og få en tettere og mer robust plante, er det en fordel om plantene under oppal blir tilført lys med større innslag av blått lys (ser hvitt ut) enn under produksjon. Denne typen lys kan tilføres ved å bytte ut noen av de vanlige HPS lampene med metallhalogenpærer under oppalsperioden. Etter ca. 2 uker utføres en visuell inspeksjon for å utelukke frø som ikke har spirt eller planter som ikke vokser normalt. Frøplantene blir så flyttet over i rennene for neste fase; produksjonsfasen (Wheeler et al., 1994) (Jonas, pers.komm.). Etter oppalsperioden på ca. 2 uker overføres salatplantene til NFT/vann kultur systemet for den videre produksjonsfasen som varer fra 4-6 uker. Plantene står i samme pottes som i oppalsperioden og plasseres i plastrenner e.l. For å sikre salatplantene nok lys, anbefales det å beregne ca. 20 planter per m² ved produktvekt 250-330 g per hode ved høsting. Lysmengde i produksjonsfasen reguleres nå opp til ca. 200-250 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ og konsentrasjonen på gjødselen økes fra et ledetall på ca. 0,5-1,6 til rundt 2,5 mS/cm (Both, 2002). Det anbefales vanning ca. 6 ganger per døgn, litt avhengig av hvilket vekstmedium som velges, for at plantene skal få tilstrekkelig fuktighet og næring, samtidig som det tilføres nok oksygen. Hvis man tilfører luft gjennom systemet kan man sirkulere vannet kontinuerlig. Hyppigheten på vanningen kan justeres underveis dersom det er nødvendig.

Dersom avløpsvannet skal benyttes direkte til produksjon kan det vurderes å blande i materiale fra slamfraksjonen for å øke innholdet av fosfor, kalium, jern, kobber, molybden og sink (se avsnitt 3.2). Det mest begrensende næringsstoffet som da vil mangle er nitrogen, og det anbefales å tilsette nitrogen fra en ekstern kilde da dette vil øke sannsynligheten for å lykkes med friske planter betraktelig.

Plantevekst

Basert på vurderinger utført av Berge Gard og Gartneri kunne liljer dyrket med avløpsvann og liljer dyrket med kommersiell næringsløsning ikke skilles kvalitetsmessig fra hverandre. Forsøksliljene vokste som normalt gjennom hele produksjonssyklusen og var klar til høsting innenfor normal produksjonstid (Figur 8). Lengden av plantene, antall knopper/blomster, og fargen til bladene/greinene var tilsvarende liljene produsert med vanlig næringsløsning (Figur 9). Etter forsøket ble liljene høstet og solgt sammen med resten av produksjon.



Figur 8. Vanningsbord med 200 liljer dyrket med avløpsvann etter ca. 8 uker.



Figur 9. Vanningsbord med 1000 liljer dyrket med kommersiell næringsløsning etter ca. 8 uker.

Avløpsvannets innhold av magnesium og bor tilsvarte anbefalt konsentrasjon (Magne Berland, pers.komm.) for produksjon av liljer (Tabell 4). Konsentrasjonen av de andre næringsstoffene (blant annet nitrogen, fosfor og kalium) var lavere enn anbefalt, mens innholdet av salt (natrium og klorid) var høyt. Natrium, klorid, kalsium og magnesium har sannsynligvis bidratt til at konduktiviteten i avløpsvannet var noe høyere enn anbefalt. Verken mangel eller overskudd av enkelte næringsstoffene så imidlertid ut til å ha hatt noen effekt på liljene, men en bør ta høyde for at veksttorvet liljene ble dyrket i, er en svært god næringsbuffer (Uhlig & Fjelldal, 2005).

Tabell 4. Konduktivitet (mS/cm) og konsentrasjon av næringsstoff (mg/L) i avløpsvannet fra Hardingsmolt AS som ble brukt i liljeforsøket og anbefalt konduktivitet og konsentrasjon av næringsstoff for liljer (Magne Berland, pers. komm.).

	Næringsstoff															
	LT	Tot-N	NO ₃	NH ₄	Tot-P	K	S	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo	Cl
Avløpsvann	2,3	30	25	0,12	1,7	17	-	79	42	0	0	0,01	0	0,15	0	660
Anbefalt for liljer	1,8	181	164	17	28	180	43	135	31	1,4	0,54	0,26	0,11	0,21	0,05	<75

LT = Ledetall=Konduktivitet

Salat dyrket med kommersiell næringsløsning (kontrollsalat) hadde store og friske, grønne blader og et stort volum og ble ansett som egnet til å bruke som kontroll da den tilsvarte salat dyrket ved Kronheim Grønt parallelt med forsøket (Fig. 10).



Fig. 10. Salat dyrket med kommersiell næringsløsning uten filter (E) og med filter (F) like etter høsting (kontrollsalat), og salat dyrket ved Kronheim Grønt (G) parallelt med forsøket.

Salatplantene dyrket med ulike behandlinger av avløpsvann (forsøkssalat) ble sammenlignet med hverandre visuelt (Fig. 11). Plantene dyrket med avløpsvann viste betydelig hemmet vekst sammenliknet med kontrollplantene tilført kommersiell næringsløsning. Samtlige salatplanter dyrket på avløpsvann hadde en grønn kjerne, men korte og misfargede blader ytterst, samt et mye mindre volum enn kontrollsalaten. Røttene til kontrollsalaten var i tillegg mer kompakte og slyngtet seg rundt potten med jord, i motsetning til de lange og mindre kompakte røttene til forsøkssalaten. Planterøtter vokser og strekker seg aktivt etter de mest næringsrike områdene i jord og vann for å ta opp næring effektivt (Barley, 1970). Når planterøtter vokser i et saltholdig medium påvirkes imidlertid hele planten av saltstress (Cuartero & Fernández-Muñoz, 1998). Saltstress påvirker røttenes vekst, morfologi og fysiologi, som igjen påvirker vann og ioneopptak

samt produksjon av signaler (hormoner) til resten av planten. På tross av den negative effekten salt har på planterøtter påvirkes bladene mest av saltstress (Cruz et al., 1990).

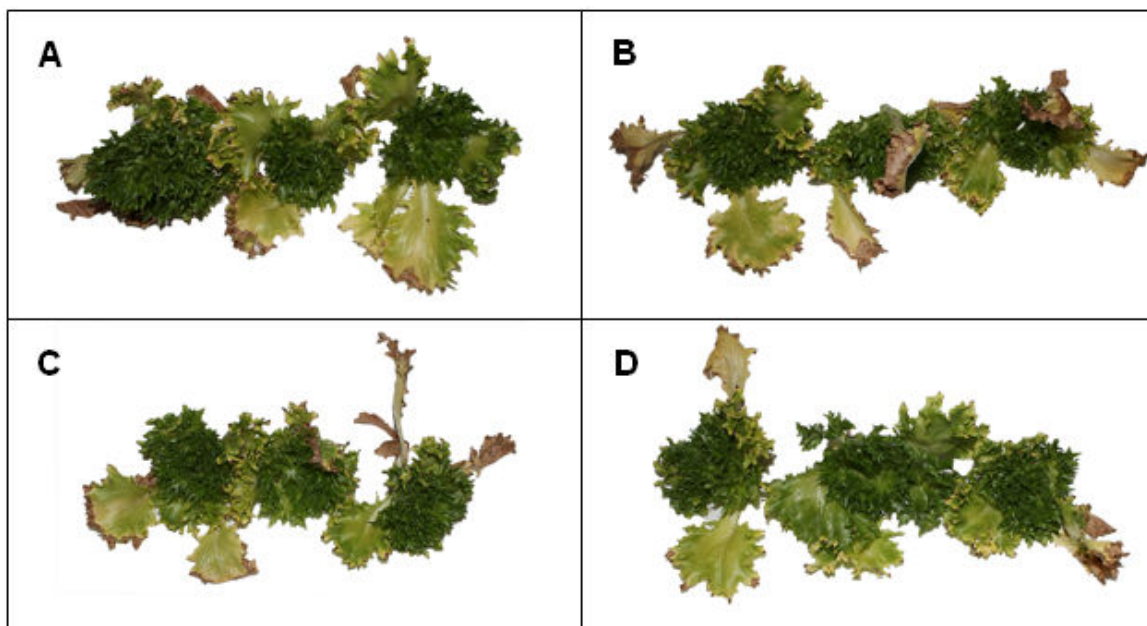


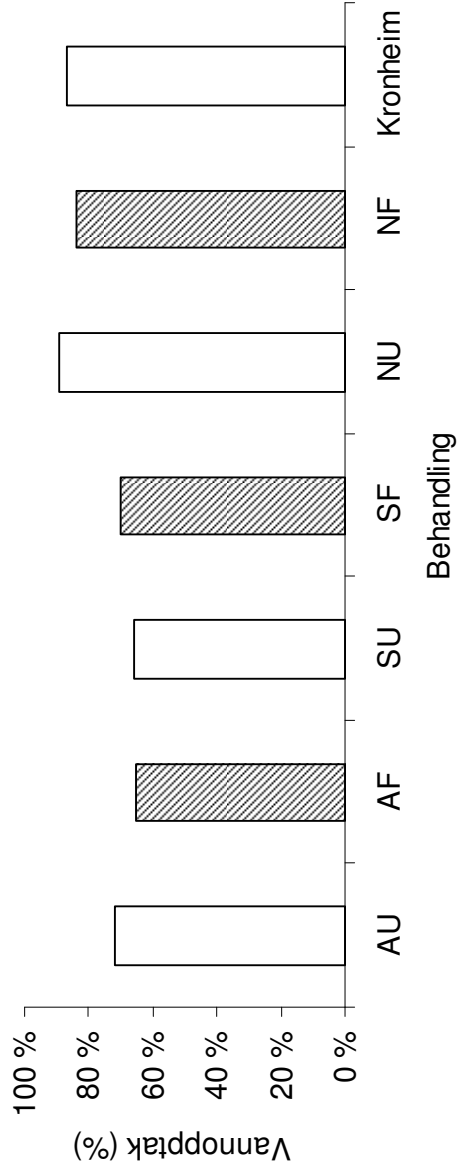
Fig. 11. Salat dyrket med ulike behandlinger med avløpsvann like etter høsting (forsøkssalat). A) avløpsvann, B) filtrert avløpsvann, C) avløpsvann m/slam, og D) filtrert avløpsvann m/slam.

Ingen nevneverdig forskjell basert på de manuelle målingene (Tabell 5) ble funnet mellom de fire ulike behandlingene med avløpsvann, og verken bruk av filter eller tilsetning av slam så ut til å ha påvirket vekst og farge. Målingene viste imidlertid stor forskjell mellom forsøkssalaten og kontrollsalaten. Både størrelse (høyde, vekt og antall blader) og utseende var markant forskjellig. Det ble observert synlig vekst kun den første uken i forsøket. I likhet med liljeforsøkets veksttorv, kan pottejorden brukt i salatforsøket ha fungert som en næringsbuffer for salaten (Pommeresche, 2011) og tilført salaten tilstrekkelig næring.

Ut ifra målingene utført på salaten var det mulig å beregne vanninnholdet i salatplantene fra de ulike behandlingene (Figur 12). All salat inneholdt mer enn 65 % vann, men vannopptaket var høyest i kontrollsalaten og salaten fra Kronheim Grønt (> 80 %). Figuren viser at planter dyrket i saltholdig medium har et lavere vannopptak enn planter dyrket i et medium med et normalt innhold av salt. Dette stemmer overens med forsøk utført med tomatplanter som viste at det var en lineær sammenheng mellom vannopptak og konduktivitet (Pessaraki & Tucker, 1988).

Tabell 5. Gjennomsnittlig målt høyde, total-, salgs-, og tørrvekt, grønnfarge og antall blad for tilfeldig valgt salat (n=3) fra behandlingene med avløpsvann (forsøksalat) og med kommersiell næringsløsning (kontrollsalat). Tre salatplanter fra Kronheim Grønt, dyrket parallelt med forsøket, er tatt med som kontroll. Standardavvik (SD) i parentes.

Parameter	Forsøksalat (Avløpsvann)				Kontrollsalat (Næringsløsning)			
	ufiltrert	filtrert	m/slam, ufiltrert	m/slam, filtrert	ufiltrert	filtrert	Kronheim	
Høyde	cm	7,3 (1,5)	6,3 (0,6)	6,7 (0,6)	6,7 (1,2)	14,0 (0)	14,7 (0,6)	19,0 (1,0)
Totalvekt	g	34,0 (12,9)	28,3 (4,9)	25,2 (5,4)	33,3 (3,0)	315,2 (19,0)	264,5 (15,3)	-
Salgsvekt	g	19,8 (11,0)	15,0 (2,6)	12,8 (1,3)	18,3 (4,1)	292,2 (14,3)	243,5 (8,0)	253,0 (25,7)
Tørrvekt	g	9,5 (-)	10,0 (-)	8,5 (-)	10,0 (-)	35,0 (-)	43,0 (-)	32,5 (-)
Grønnfarge	1-5	5 (-)	5 (-)	5 (-)	5 (-)	5 (-)	4 (-)	5 (-)
Blader	antall	15 (3)	15 (1)	15 (2)	16 (1)	24 (2)	24 (2)	19 (1)



Figur 12. Innhold av vann (%) i salat dyrket med avløpsvann (AU), filtrert avløpsvann (AF), avløpsvann m/slam (SU), filtrert avløpsvann m/slam (SF), kommersiell næringsløsning (NU), filtrert kommersiell næringsløsning (NF). Salatplanter dyrket med kommersiell næringsløsning hos Kronheim grønt er også inkludert (Kronheim). Filtrerte behandlinger er markert med stripete søyler.

Næringsinnholdet i salat fra de ulike avløpsvannbehandlingene ble sammenlignet (Tabell 6) uten at det ble funnet noen betydelig forskjell. Næringsinnholdet i forsøkssalat ble også sammenlignet med næringsinnholdet i kontrollsalat, samt anbefalt konsentrasjon hentet fra litteraturen (Marschner & Marschner, 2011). Kalium, magnesium, mangan og bor tilsvarte konsentrasjonen i kontrollsalaten, mens kalsium, molybden og fosfor var lik eller nær den anbefalte konsentrasjonen. Flere forskere har sett på sammenhengen mellom salt og innhold av kalsium i planter, og symptomer på kalsiummangel er vanlig når $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ raten er høy (Cuartero & Fernández-Muñoz, 1998; Shannon & Grieve, 1998). Det vanligste symptomet på kalsiummangel er svidde bladspisser. Kalsium er essensielt for planter og dersom konsentrasjonen er for lav vil man få en skjev fordeling av næringsstoffer og forhindre normal vekst (Tuna et al., 2007). Opptak av fosfor hindres også ved høyt innhold av salt i tillegg til at mobiliteten reduseres (Martinez et al., 1996).

Noen mikronæringsstoffer kan finnes i overskudd i plantematerialet, uten at det indikerer at plantens behov for næringsstoffet er høyere enn anbefalt (Mengel et al., 2001). Dette gjelder spesielt for mangan, og stemte overens med det høye innholdet som ble funnet i nesten alle salatprøver. Planter kan også inneholde høy konsentrasjon av ikke-essensielle elementer som kan være toksiske, slik som aluminium, nikkel, selen og fluorid. Tabellen (Tabell 6) viser at toksiske metaller ble tatt opp av all salat, og spesielt salat dyrket på avløpsvann, men uten å overskride grenseverdiene.

Foruten karbon, hydrogen og oksygen som tas opp fra atmosfæren, tas alle næringsstoffer opp på uorganisk form. Flere av mikronæringsstoffene (jern, sink, kobber og molybden) kan også tas opp på chelatert form (bundet til et organisk molekyl). Innholdet av jern, sink og kobber, samt svovel, i forsøkssalaten var allikevel lavere enn i både kontrollsalaten og lavere enn anbefalt. Nitrat i plantematerialet ble ikke målt. Det er imidlertid demonstrert at nitratkonsentrasjon i blader senkes betraktelig av salt (Cramer et al., 1995) og at kun svært tolerante planter klarer å opprettholde en høy nitratkonsentrasjon i bladene dersom de dyrkes i et svært saltholdig medium (Pérez-Alfocea et al., 1993). Den største forskjellen var imidlertid innholdet av klorid, som var over fem ganger så høyt i forsøkssalaten enn i kontrollsalaten. Opptaket av natrium var også usedvanlig mye høyere i forsøkssalaten, som forklares med at høy saltholdighet øker natriumkonsentrasjonen i røtter og blad (Cuartero & Fernández-Muñoz, 1998). Både natrium og klorid konkurrerer med andre næringsstoffer om opptak i planter og kan derfor hindre planters opptak av essensielle næringsstoffer (Tvedt et al., 2001). I tillegg kan høye saltkonsentrasjoner forårsake fysiologisk tørke, et velkjent problem for planter i områder med avrenning fra veier som saltes om vinteren. Når jordvæsken inneholder høye konsentrasjoner av salt vil osmotisk trykk i planten føre til at jordvæsken fortynnes for å utjevne forskjellen i saltkonsentrasjonen mellom plante og jordvæske. Planten må dermed bruke energi på å holde vann tilbake istedenfor å bruke energi på vekst og utvikling.

Tabell 6. Innhold av næringsstoffer (% og µg/g tørrstoff (TS)) i salat dyrket med avløpsvann (forsøkssalat) og salat dyrket med kommersiell næringsløsning (kontrollsalat). Verdiene er et snitt av tre salatplanter. Anbefalt konsentrasjon av hvert næringsstoff er inkludert.

Næringsstoff	Anbefalt	Forsøkssalat (Avløpsvann)				Kontrollsalat (Næringsløsning)		
		ufiltrert	filtrert	m/slam, ufiltrert	m/slam, filtrert	ufiltrert	filtrert	
N	1,5	-	-	-	-	-	-	
P	0,2	0,18	0,14	0,15	0,19	0,26	0,32	
Makro (%)	K	1,0	0,67	0,53	0,56	0,64	0,44	0,83
	S	0,1	0,06	0,05	0,06	0,06	0,11	0,14
Ca	0,5	0,35	0,40	0,32	0,39	0,58	0,61	
Mg	0,2	0,13	0,12	0,12	0,15	0,15	0,11	
Fe	100	30	35	31	39	71	81	
Mn	50	57	79	63	75	110	48	
Mikro (µg/g)	Zn	20	9	9	9	12	26	20
	Cu	6	1,2	1,2	1,1	1,6	3,8	3,6
B	20	33	43	34	39	39	29	
Mo	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	1,0	1,1	
Toksiske* (µg/g)	Al	13	3,4	4,5	4,5	8,1	6,6	1,8
	Cd	20	0,06	0,06	0,07	0,07	0,04	0,04
	Cr	10	0,41	0,57	0,26	0,14	0,17	0,18
Andre (µg/g)	Na	-	14 100	11 800	13 800	15 900	1 100	600
	Cl	100	7 500	7 700	10 200	11 200	1 400	1 300
	Ni	0,1	0,23	0,30	0,14	0,10	0,13	0,44

*Øvre grenseverdi som vil gi 10 % tap i produksjonsutbytte ved overskridelse.

Salaten som ble dyrket med kommersiell næringsløsning i to uker og deretter med avløpsvann tilsatt nitrat i ti dager så ut til å øke veksten etter skifte av næringskilden. Sammenlignet med salat dyrket kun med kommersiell næringsløsning var bladene mer oljeaktig og bløte (Fig. 13). Det høye innholdet av natrium og klorid i avløpsvannet har sannsynligvis hindret opptak av andre næringsstoffer og vann og dermed forhindret normal utvikling og vekst (Brown et al., 1999).



Fig. 13. Salat dyrket i to uker og 10 dager med kommersiell næringsløsning (venstre), og salat dyrket i to uker med kommersiell næringsløsning og 10 dager med avløpsvann tilsatt nitrat (høyre).

Etter at salatforsøket var avsluttet ble den resterende salaten dyrket videre med kommersiell næringsløsning (1 uke). Resultatet var at salaten begynte å vokse igjen og at de gule og misfargede bladene ble grønne igjen. Salt kan ha forhindret næringsopptak, men planten kan gjenoppta vekst selv etter en lengre periode med salt stress.

Løste næringsalter

I forhold til nivået av næringsstoffer som finnes i avløpsvannet fra Hardingsmolt AS viste overvåkingsprogrammet at avløpsvannet som ble brukt i salatforsøket (fra 19.09.12) inneholdt noen av de laveste nivåene målt for de fleste makro- og mikronæringsstoffene. Dette skyldes redusert føring i denne perioden hvor det ble tatt ut fisk for levering. Siden slam fra Hardingsmolt AS viste seg å inneholde en del av de plantenæringsstoffene det var lite av i avløpsvannet ble slam tilsatt avløpsvann for å øke innholdet av næringsstoffer (Tabell 7). Tabellen viser at tilsetning av slam til avløpsvann hadde betydning for den totale konsentrasjonen av nitrogen, fosfor, kalsium, samt en del av mikronæringsstoffene. Innholdet av klorid (1,5 mg/L) i slammet, bidro ikke til den totale konsentrasjonen i avløpsvannet. Mengde tilsatt slam ble begrenset av lukt.

Tabell 7. Konsentrasjon (mg/L) av næringsstoff i avløpsvann fra Hardingsmolt AS brukt i salatforsøket, beregnet konsentrasjon (mg/L) av næringsstoff i slam og beregnet konsentrasjon (mg/L) av næringsstoff i avløpsvann m/slam. Anbefalt konsentrasjon av næringsstoff for salat er også inkludert.

	Næringsstoff												
	N	P	K	SO ₄	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo	Cl
Avløpsvann	20	2,2	16	97	64	45	<0,1	<0,01	0,01	-	0,2	-	620
Slam*	26	64	0,3	0,4	270	7,4	2,4	0,1	0,7	0,01	<0,03	-	1,5
Avløpsvann m/slam*	46	62,2	16,3	97,4	334	52,4	<2,5	<0,21	0,61	0,01	<0,23	-	621,5
Anbefalt for salat	200	40	200	64**	150	35	3,0	1,0	0,3	0,1	0,3	0,1	<75

*beregnet verdi ut ifra 22,5 g slam (tørrvekt)

**anbefalt verdi av svovel

Siden salat dyrket med avløpsvann ikke vokste som normalt, ble også biomassen lavere. Dersom salaten hadde vokst seg større ville også næringsbehovet blitt større. Dette må tas i betraktning når en ser på hvilke næringsstoffer som fantes i avløpsvannet i tilstrekkelig mengde fordi mengdebehovet ville vært større dersom salaten var større. Konsentrasjonen av de fleste næringsstoffene i næringsløsningen var høyere ved forsøkets slutt enn ved forsøkets start, med unntak av klorid, aluminium, kadmium og nitrat (Tabell 8). Hver uke økte konsentrasjonen av næringsstoffer i reservoaret før konsentrasjonen ble senket som følge av at næringskilden ble byttet ut med en ny løsning. Siden salatplantene dyrket med næringsløsning vokste fint antas det at alle næringsstoffer som ikke endret seg vesentlig eller gikk opp i konsentrasjon i løpet av forsøket var til stede i tilstrekkelig mengde. For avløpsvannet betyr det at innholdet av plantenæringsstoffene svovel, kalsium, magnesium, bor, molybden og klorid var i høy nok konsentrasjon i forsøket og i forhold til anbefalte verdier. Magnesium og spesielt klorid fantes i så høy konsentrasjon at det kan ha vært toksisk for salaten. For klorid var konsentrasjonen gått *opp* med over 22 % i avløpsvannet ved forsøkets slutt, mens den til sammenligning var gått *ned* med over 60 % i den kommersielle næringsløsning. De viktigste næringsstoffene nitrogen, fosfor og kalium, og andre viktige næringsstoffer som jern, mangan, sink og kobber, fantes også i avløpsvannet, men ikke i tilstrekkelig konsentrasjon. Jern og sink finnes imidlertid i anbefalt konsentrasjon i slammet og kunne vært tilført avløpsvannet med slam dersom slammet ikke hadde sedimentert. Nitrogen og fosfor varierer begge med fôringsregime og kan tilsettes avløpsvannet når konsentrasjonen er for lav. Mangan og kobber kan tilføres plantene ved å gjødsle på blad. Da unngår man å tilføre metaller som kan være toksiske for fisk til avløpsvannet dersom det skal føres tilbake til fiskekaret. Innholdet av plantetoksiske metaller var lav og ble ikke regnet som toksisk.

I forhold til den kommersielle næringsløsningen (kontroll) var konsentrasjonen av essensielle næringsstoffer i avløpsvannet (pkt. A) lav, konsentrasjon av aluminium og magnesium var høyere, og konsentrasjonen av natrium og klorid betraktelig høyere. Filteret utgjorde ingen betydelig forskjell på næringsinnholdet med unntak av at konsentrasjonen av jern og aluminium økte i alle de filtrerte behandlingene, og at konsentrasjonen av silisium var nesten dobbelt så høy (både ved forsøkets start og ved slutt). Den kjemiske analysen av avløpsvannet påviste en utlekking av metaller fra filteret. Høye verdier av de samme tre elementene, aluminium, jern og silisium, ble funnet i samtlige av de filtrerte behandlingene. Ved nærmere undersøkelse viste det seg at filteret var hovedsakelig sammensatt av nettopp disse tre elementene og at filteret avgir dette over tid, selv om filtermaterialet ble vasket og skylt grundig før bruk. Resultatene fra målepunkt B og C viste at det ikke var noen umiddelbar endring i konsentrasjon forårsaket av salat (og eventuelt jord) i løpet av en vanning (pkt. B), og at heller ikke filteret (pkt. C) hadde noen umiddelbar effekt på konsentrasjonen.

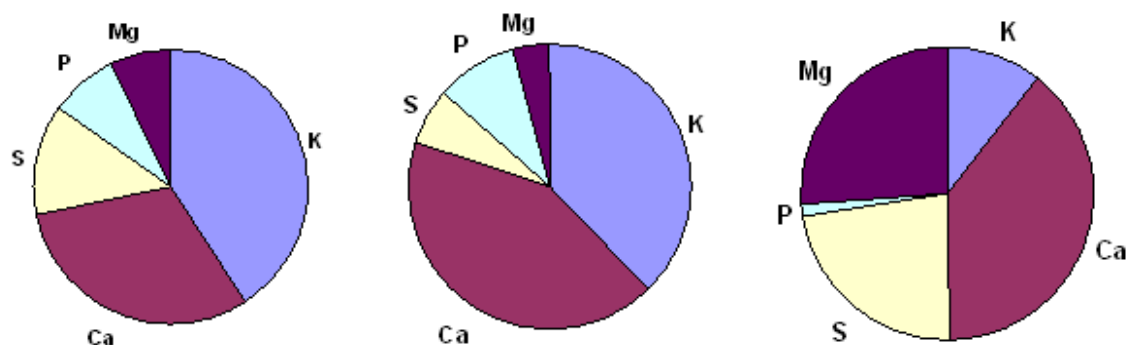
Tabell 8. Konsentrasjon av næringsstoffer ($\mu\text{g/L}$) i de fire ulike behandlingene med avløpsvann og de to behandlingene med kommersiell næringsløsning ved forsøket start og slutt ($n=9$). Næringsstoffene er delt inn etter plantens mengdebehov, og alle verdier er målt i punkt A.

Næringsstoff	Avløpsvann						Næringsløsning						
	ufiltrert		filtrert		m/slam, ufiltrert		m/slam, filtrert		ufiltrert		filtrert		
	Start	Slutt	Start	Slutt	Start	Slutt	Start	Slutt	Start	Slutt	Start	Slutt	
Makro	NO ₃ -N	1 800*	170	5 400*	1 360	2 800*	330	3 600*	720	244 000*	169 000	200 000*	195 000
	P	1 875	457	1 869	426	2 096	901	1 903	743	52 582	56 319	43 211	52 304
	K	15 060	4 607	18 048	5 377	15 549	7 320	17 058	6 329	194 980	154 230	189 059	196 154
	S	34 530	35 592	38 338	39 665	34 604	35 844	38 045	39 636	34 078	46 300	31 776	44 355
	Ca	56 108	65 081	64 977	72 591	58 717	71 768	70 413	83 399	221 720	300 837	210 532	299 629
Mikro	Mg	38 932	44 206	44 701	49 655	38 882	45 492	44 312	49 237	21 586	24 352	21 126	25 359
	Fe	23,2	22,2	17,0	31,7	19,9	19,6	15,2	27,5	1 656	2 323	1 542	1 957
	Mn	13,4	0,4	13,3	0,2	14,7	0,5	6,2	0,6	640	507	512	560
	Zn	11,5	9,3	11,5	8,7	12,1	8,2	9,6	9,2	244	346	200	117
	Cu	10,7	2,6	13,3	3,7	3,7	2,1	14,8	3,5	182	195	184	160
Toksiske	B	155	163	170	166	156	157	174	163	387	502	367	500
	Mo	2,2	3,2	3,6	4,9	2,6	4,2	4,3	4,6	47	60	46	60
	Al	24,1	6,8	48,2	88,8	7,7	3,0	12,0	40,4	14,5	7,7	10,5	7,1
	Cd	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02	0,01	0,03	0,01	0,46	0,23	0,13	0,08
	Cr	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1	0,5	0,7	0,4	0,6
Andre	Na	282 409	292 084	291 892	291 509	287 615	291 509	286 897	291 129	7 072	8 667	7 538	8 507
	Cl	674 314	864 162	806 105	986 592	701 462	883 527	806 845	978 647	9 671	182	9 777	3 848
	Ni	1,1	1,0	2,4	1,6	0,7	0,9	6,1	1,8	63,5	107,1	6,6	14,8
	Si	601	388	1 147	915	616	445	1 195	1 271	634	1 134	3 519	5 088

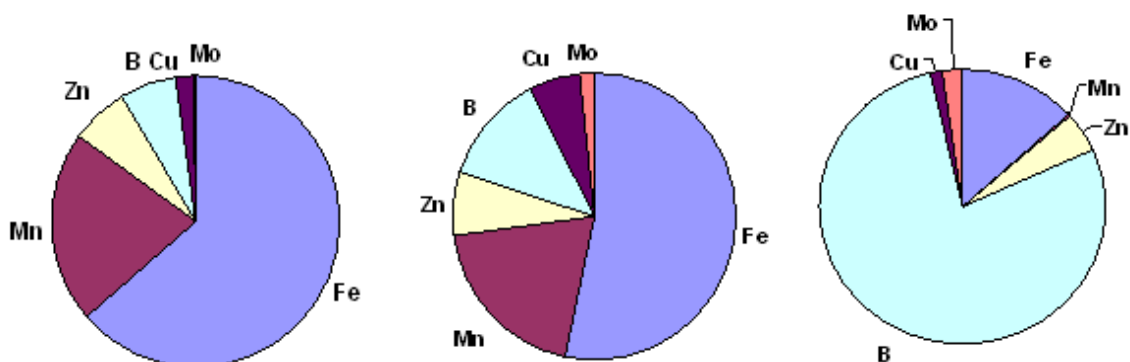
* Startkonsentrasjonen for NO₃-N ble målt på dag 2 i forsøket

** Øvre grense for når tegn på toksisitet kan observeres

Gjennomsnittlig konsentrasjon av næringsstoffer i alle behandlingene med avløpsvann ved starten av forsøket ble beregnet for å kunne sammenligne med gjennomsnittlig konsentrasjon i behandlingene med kommersiell næringsløsning (Figur 14-15). Bruk av gjennomsnittsverdier var mulig fordi startkonsentrasjonen i behandlingene med avløpsvann og startkonsentrasjonen i behandlingene med næringsløsning var tilnærmet lik. Figurene viser at sammensetningen av både makro- og mikronæringsstoffer i næringsløsningen var tilnærmet lik anbefalt, men ulik sammensetningen i avløpsvannet.



Figur 14. Sammensetning av mikronæringsstoffer (kalium (K), kalsium (Ca), svovel (S), fosfor (P), magnesium (Mg)) i næringskildene. Anbefalt (1), i næringsløsning (2), og i avløpsvann (3).



Figur 15. Sammensetning av mikronæringsstoffer (jern (Fe), mangan (Mn), sink (Zn), bor (B), kobber (Cu), molybden (Mo)) i næringskildene. Anbefalt (1), i næringsløsning (2), og i avløpsvann (3).

Det var forventet at tilsetning av slam til avløpsvannet kunne bidra til høyere konduktivitet og salinitet, i tillegg var oksygeninnholdet forventet å bli lavere på grunn av innhold av organisk materiale. De daglige instrumentmålingene viste at verken slam eller filter hadde noen åpenbar effekt på de ulike parameterne (Tabell 9) i avløpsvannet, men i forhold til den kommersielle næringsløsningen (kontroll) var spesielt konduktiviteten, saltholdigheten og pH verdien høyere i samtlige behandlinger med avløpsvann. Den første dagen i forsøket var innholdet av oppløst oksygen i reservoarene med slam svært lave (< 36 %) på grunn av bakteriell aktivitet. Lufting av reservoarene sørget for å holde oksygeninnholdet over 70 %, og målingene for alle parameterne fra den første dagen ble derfor ekskludert ved beregning av gjennomsnittsverdiene i tabellen.

Tabell 9. Gjennomsnittlig verdi* for parameterne målt i forsøket i de fire behandlingene med avløpsvann og de to behandlingene med kommersiell næringsløsning (n=28). Alle verdier er fra målepunkt A.

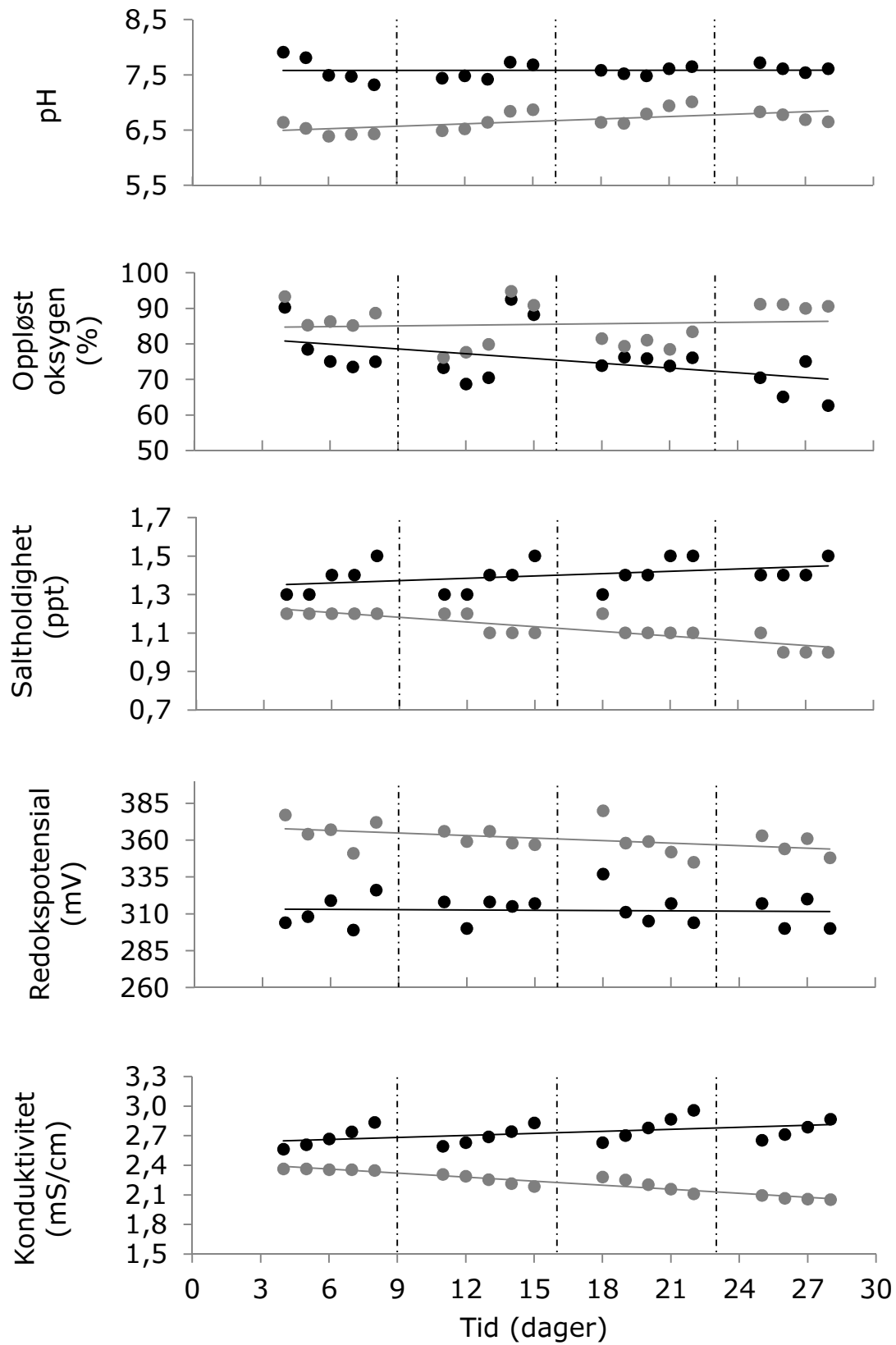
Parametere	Avløpsvann				Næringsløsning	
	ufiltrert	filtrert	m/slam, ufiltrert	m/slam, filtrert	ufiltrert	filtrert
pH	7,5	7,6	7,6	7,5	6,7	6,7
Temp. °C	17,9	17,5	17,9	17,5	17,5	17,6
O ₂ %	71	82	76	71	86	91
Konduktivitet mS/cm	2,6	2,8	2,7	2,9	2,2	2,3
Saltholdighet ppt	1,3	1,4	1,4	1,5	1,1	1,2
E _h mV	320	310	310	320	360	360

O₂ = Oppløst oksygen, E_h = Redokspotensial

*Gjennomsnitt er ekskludert målingene fra forsøksdag 1

De fire avløpsbehandlingene viste de samme trendene og representeres her av ufiltrert avløp m/slam for å få en mer oversiktlig presentasjon (Figur 16). De to næringsløsningene viste også tilsvarende trender og representeres derfor her av den ufiltrerte næringsløsningen som en kontroll. pH trenden var lik mellom avløpsvann og næringsløsning, men pH-verdien var høyere i avløpsvannet. For å gi fisken og biofilteret best mulig vannkvalitet opererer oppdrettsanlegget med en pH > 7. Det forklarer hvorfor pH-verdien er litt høyere enn anbefalt, men pH-verdien er enkel å justere ned ved å tilsette syre. En svakt sur pH, slik som i den kommersielle næringsløsningen, er å foretrekke i akvaponikk fordi tilgjengeligheten av næringsstoffer, spesielt jern, reduseres når pH blir for høy (Bugbee, 2003). Trenden for oppløst oksygen (%) i avløpsvann viser at luftingen var effektiv, men også at den kanskje burde vært intensivert mot slutten. Et høyere oksygenforbruk i avløpsvannet indikerer at det var høyere mikrobiologisk aktivitet i avløpsvannet enn i næringsløsningen (se avsnitt 3.1.2). Redokstrenden i avløpsvann og næringsløsning var tilnærmet lik, men noe lavere i avløpsvannet. Målingene var imidlertid innenfor et intervall som tilsvarer oksygenert vann (+100 til +400 mV).

Figur 16 viser tydelig at saltholdigheten i avløpsvannet økte, i motsetning til i næringsløsningen hvor trenden var avtagende. I næringsløsningen ble alle salter effektivt tatt opp i planten, og innholdet av klorid i løsningen, den viktigste bidragsyteren til saltholdighet, gikk ned (Sælen, 2009). Den økende saltholdigheten i avløpsvannet skyldes en akkumulering av næringssalter som kalsium, magnesium, natrium, klorid og svovel. Saltholdigheten styrer den elektriske konduktiviteten i vann (Havforskningsinstituttet, 2009). Dette ble bekreftet da de to parameterne var statistisk korrelert ($p < 0,0004$). Instrumentmålingene viste imidlertid at den høye konduktiviteten i avløpsvannet ikke påvirket de andre parameterne (pH, redokspotensial og O₂).



Figur 16. Trend for pH, O_2 (%), salt (ppt), redoks (mV) og konduktivitet (mS/cm) målt i ufiltrert avløpsvann m/slam (sort) og i ufiltrert næringsløsning (grå). Hvert punkt tilsvarer forsøksdag, stiplet linje markerer reservoarbytte.

Basert på visuell bedømmelse, manuelle målinger og kjemiske analyser, anses en kombinasjon av saltstress og en ubalansert sammensetning av essensielle næringsstoffer å være årsaken til den åpenbare forskjellen mellom salat dyrket med avløpsvann og salat dyrket med næringsløsning (kontroll). *Frislice* salat er en moderat salttolerant planteart som ikke tålte den mengden salt som avløpsvannet inneholdt. Grenseverdien for både klorid (355 000 mg/L) og ledningsevne (2,6 mS/cm) som salat kan tåle uten at vekst hemmes (Rodriguez-Delfin et al., 2000) ble overskredet i samtlige behandlinger med avløpsvann. Lavt innhold av essensielle næringsstoffer ble først indikert av mangelsymptomer som klorose og nekrose, som ifølge tabell for sammenheng mellom symptom og næringsstoff fra Marschner & Marschner (2011) skyldes mangel på henholdsvis nitrogen og kalium. Svidde bladspisser (nekrose) er også et symptom på toksisk konsentrasjon av salt (og/eller bor).

3.1.2 Planter som rensemetode

Resultatene fra salatforsøket viser at salat tar opp metaller fra avløpsvannet som er toksiske for fisk, som kobber og aluminium (Bjerknes, 2007). Dette er gunstig både dersom vannet skal resirkuleres tilbake til fiskekarene eller slippes ut til miljøet. Opptak av nitrat og fosfor i salat er viktig for å forhindre eutrofiering, og kan tilsettes avløpsvannet for å oppnå optimal salatvekst uten at det påvirke fisken. Det er velkjent at vannets innhold av basekationer (som kalsium og magnesium) påvirker vannets evne til å motstå forsuring. Mange oppdrettsanlegg tilsetter kalsiumkarbonat for å øke vannets alkalitet. Høyt innhold av kalsium og magnesium i avløpsvann kan dermed være gunstig for miljøet dersom bufferkapasiteten i vannet hvor avløpsvannet slipper ut i utgangspunktet er lav.

Resultatene fra TOC og DOC analysen viste at innhold av naturlig organisk materiale (NOM) i avløpsvannet var høyere ved forsøkets slutt enn ved start (Tabell 10). Ved forsøkets slutt var innhold av organisk materiale nesten fordoblet i samtlige behandlinger. Det var ingen markant forskjell mellom behandlingene med filter og behandlingene uten filter. Mest sannsynlig skyldes det at mer enn 80 % av det organiske materialet hovedsakelig forelå på oppløst form (< 0,45 µm) og ikke ble fanget opp av filteret.

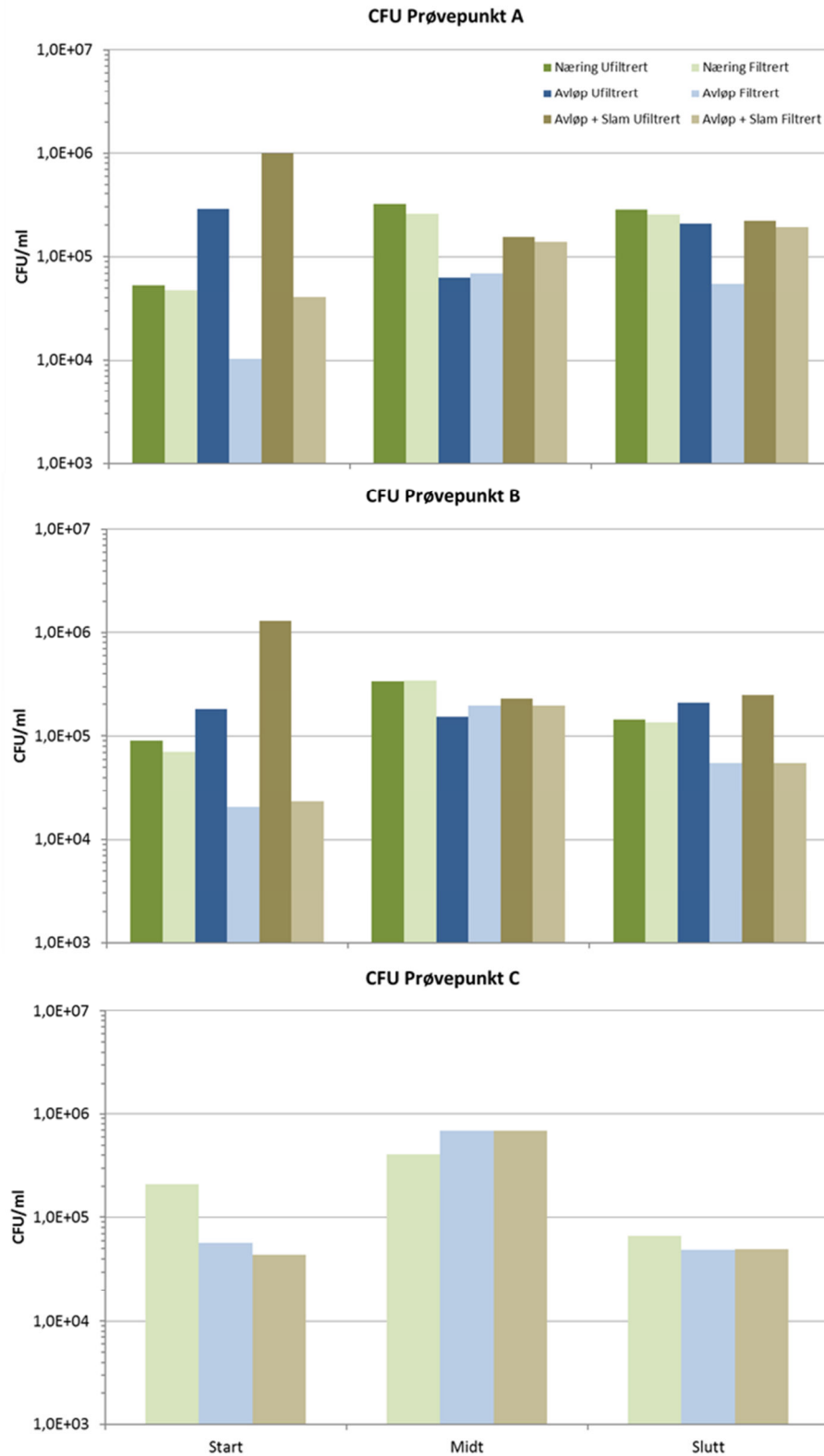
Tabell 10. Innhold (mg C/L) av totalt (TOC) og oppløst (DOC) organisk materiale, og beregnet verdi av partikulært (POC) organisk materiale i de fire behandlingene med avløpsvann og de to behandlingene med kommersiell næringsløsning (punkt A).

	Avløpsvann				Næringsløsning							
	ufiltrert		filtrert		m/slam, ufiltrert		m/slam, filtrert		ufiltrert		filtrert	
NOM	start	slutt	start	slutt	start	slutt	start	slutt	start	slutt	start	slutt
Totalt (TOC)	5,5	12,1	6,3	12,7	6,5	14,3	7,2	12,7	10,4	17,0	10,9	14,0
Oppløst (DOC)	5,0	9,6	6,0	10,0	5,6	11,3	5,9	10,3	10,3	10,4	9,8	9,4
Partikulært (POC)	0,5	2,5	0,3	2,7	0,9	3,0	1,3	2,4	0,1	6,6	1,1	4,6

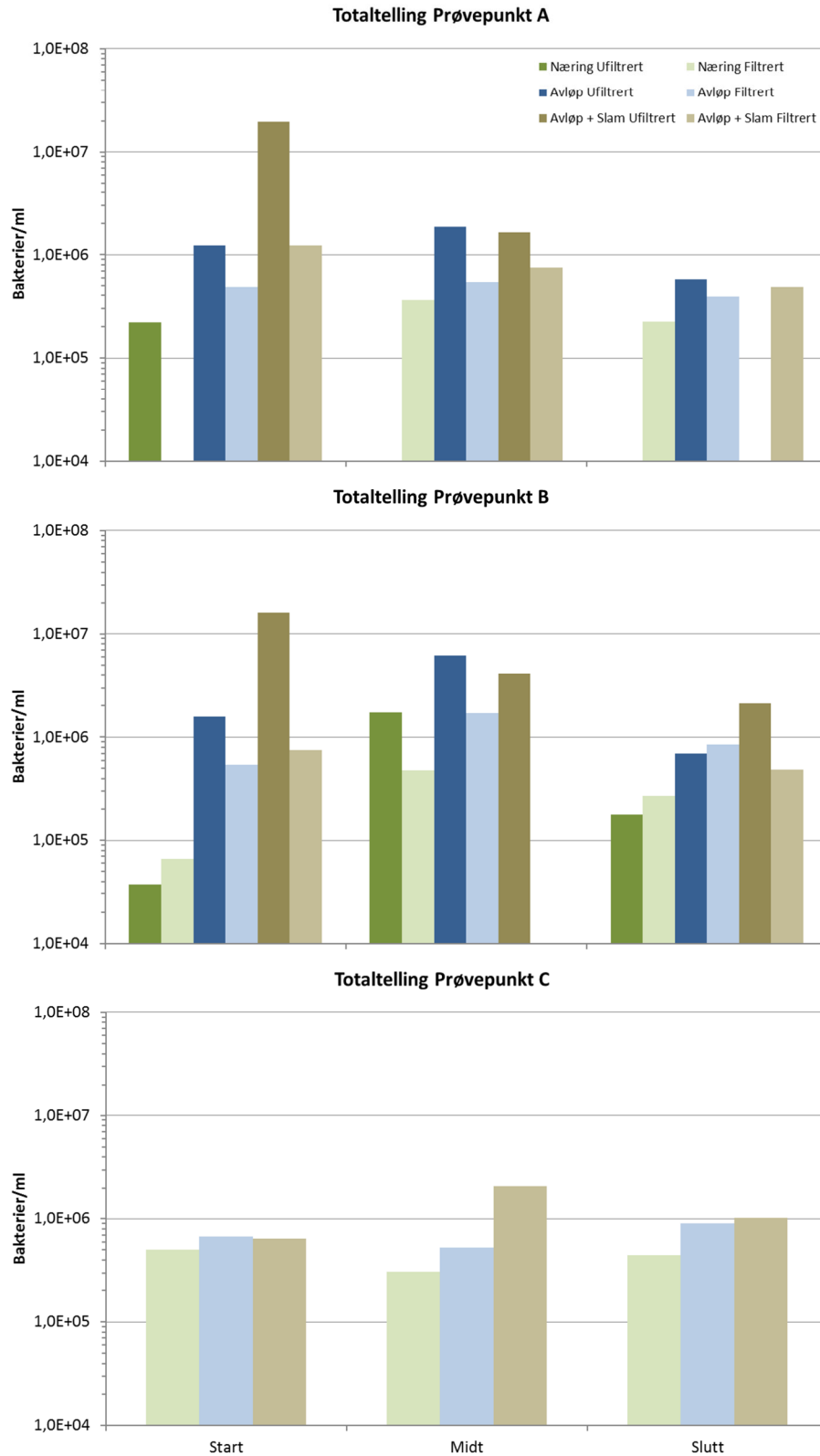
Planter kan delvis utnytte næring i organisk materiale via mikrobiell omdanning av partikulært materiale eller det oppløste materialet direkte. Sunne planter vil ha sin egen mikroflora assosiert med rotsystemet, som kan gjøre næringen mer tilgjengelig og dermed bidra til næringsopptaket. På den andre siden kan organisk materiale hindre opptak av næring gjennom rotsystemet og skape forhold med lav oksygenmetning gjennom mikrobiell aktivitet. Derfor bør mengden organisk materiale holdes på et lavt nivå i vannet som tilføres plantene. Siden mengde organisk materiale i næringsløsningen var høyere enn i avløpsvannet, og salat dyrket med næringsløsning vokste som normalt, kan det antas at nivået av organisk materiale i avløpsvannet ikke forårsaket redusert opptak gjennom rotsystemet. Derimot forårsaket det organiske materialet høy bakteriell vekst (Figur 17-20) og reduserte oksygenverdier (innførte lufting) i alle behandlingene (Tabell 9). I salatforsøket ble det tatt ut prøver for å studere bakteriesamfunnets utvikling og om mulig avgjøre hvordan bakteriene påvirket næringsløsningene.

Resultatene vedrørende bakterievekst (CFU) indikerer gode vekstbetingelser for bakteriene i løpet av forsøksperioden for alle behandlingene, med høyere antall i de ufiltrerte løsningene (Figur 17). Forskjellen mellom ufiltrert og filtrert behandling ser ut til å være større ved start og slutt, spesielt for avløp og avløp + slam. Samtidig stiger antallet bakterier fra punkt B til C ved start og midt, men ved slutt kan det se ut som antallet reduseres for alle løsningene. Dette indikerer at filteret tilfører bakterier (vekst i filteret) til de ulike løsningene ved start og midt, og på den måten styrer koloniseringen av løsningene. Totaltellingene viser et litt annet bilde hvor også bakterieantallet stiger etter filteret ved slutt (Figur 18). Ved slutt ser det uansett ut som det er større balanse mellom de ulike prøvepunktene og mer ensartet bakterieantall i alle løsningene/behandlingene. Dette kan indikere økende bakteriell stabilitet, noe som tilsynelatende støttes av like DOC-konsentrasjoner i alle reservoarene ved slutt. Totaltellingene i alle A-prøvepunktene indikerer også økende bakteriell stabilitet over tid (Figur 19). Opportunistiske bakterier karakteriseres ofte som hurtigvoksende og en høy andel hurtigvoksende representerer et lite stabilt mikrobielt samfunn, men et samfunn som er dominert av få arter og som kan endres fort. I dette systemet ble det tilført ny næring relativt hyppig, og sannsynligvis er de dominerende artene tilpasset en slik høy næringstilgang. Likevel indikerer resultatene økende bakteriell stabilitet over tid, men da med et relativt høyt bakterietall. I ulike vekstsystemer er det ønskelig med liten variasjon over tid og et mikrobielt samfunn som både virker stabiliserende (høy diversitet) og som kan motvirke etablering av patogene mikroorganismer. Hvorvidt de ulike behandlingene også har en høy diversitet kan ikke besvares med metodene som er brukt her, men flow cytometri-analysene gir likevel en indikasjon om høy diversitet i de fleste prøvene (Figur 20). Disse resultatene indikerer et komplekst samfunn, hvor både bakterier, alger og virus fluktuerer i løpet av forsøksperioden. Hvilken rolle og hvordan disse mikroorganismene påvirker plantenes opptak av næring og evt. beskytter mot plantepatogene organismer kan først avdekkes når man vet hvilke mikroorganismer som dominerer i slike system. Et slikt samfunn med høy diversitet har vanligvis en lav andel dyrkbare bakterier hvor samfunnet består av en rekke ulike arter som er tilpasset forhold med lav mattilgang, og som dermed virker stabiliserende. I dette tilfellet er nok samfunnet tilpasset høy mattilgang, og fordi det er

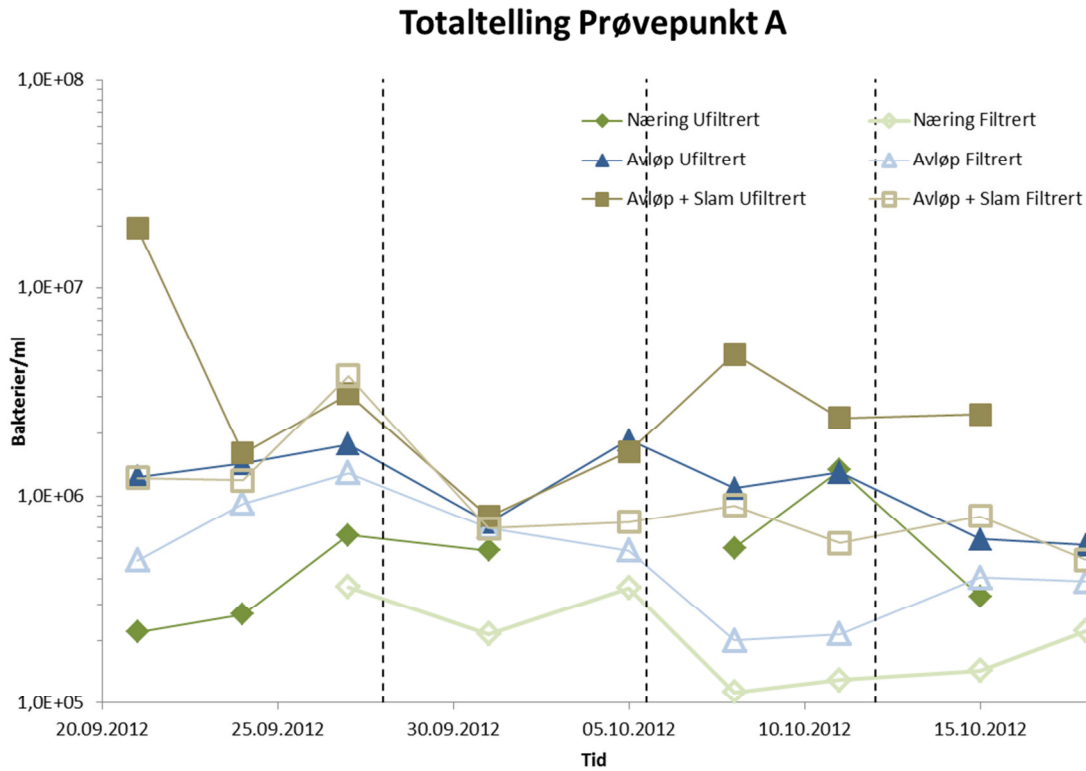
en jevn og høy mattilgang virker bakteriesamfunnet relativt stabilt mot slutten av forsøket, men det skal lite forstyrrelser til for å endre denne stabiliteten. Ved bedre filtereffektivitet kunne man forventet lavere mattilgang og dermed forbedret stabilitet, også ved ulike forstyrrelser.



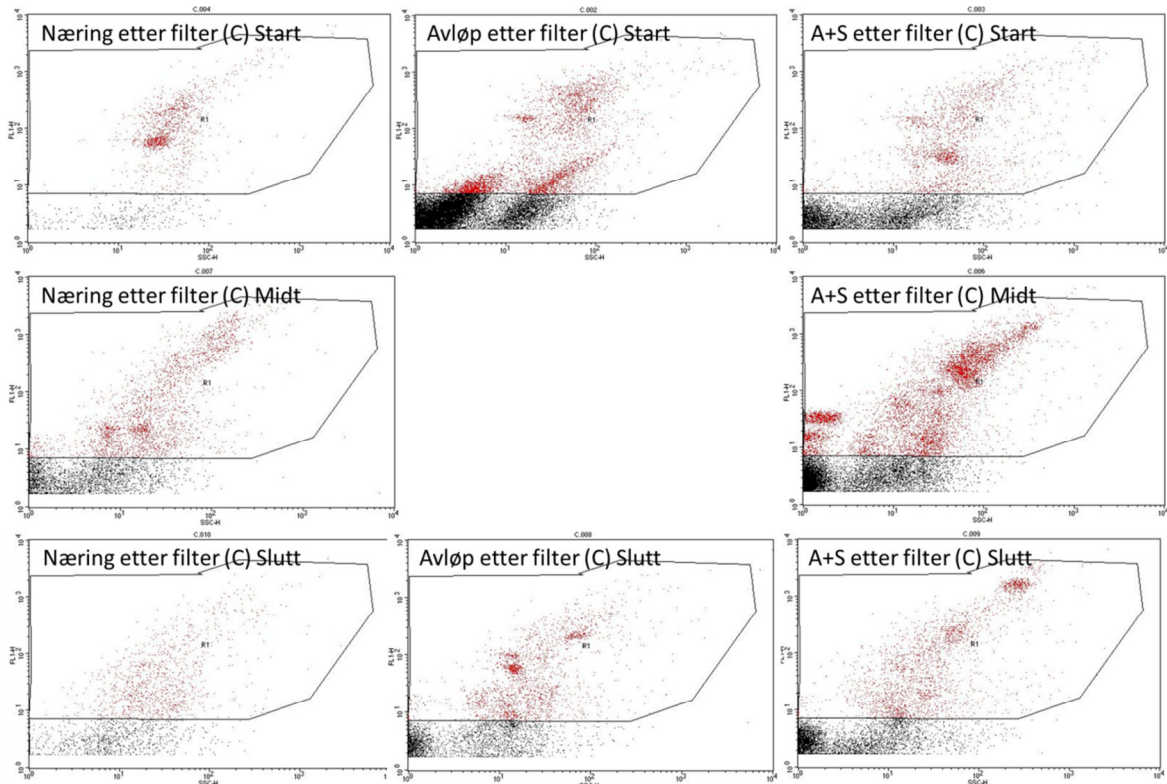
Figur 17. Kolonidannende bakterier (CFU) i reservoaret (A), etter plantene (B) og etter filter (C) i alle behandlingene ved start, midt og slutt.



Figur 18. Totaltelling av bakterier i reservoaret (A), etter plantene (B) og etter filter (C) i alle behandlingene ved start, midt og slutt.



Figur 19. Totaltelling av bakterier i reservoaret (A) i alle behandlingene gjennom forsøksperioden. Stiplet linje markerer bytte av reservoar.



Figur 20. Dot-plot (FCM) av bakterier etter filter (C) i alle behandlingene ved start, midt og slutt. Avløp Midt mangler.

Liten forskjell i mengden organisk materiale mellom ufiltrerte og filtrerte næringsblandinger tyder på at steinullfilteret ikke fjerner organisk materiale effektivt (Tabell 13). Derimot indikerer DOC-resultatene et opptak (nedgang i DOC hvis man tar hensyn til vannopptaket), enten av plantene eller av bakteriene (DOC > POC) i alle behandlingene. Større nedgang i næringsløsningene (både ufiltrert og filtrert) kan skyldes både større opptak av plantene og bakteriene, henholdsvis på grunn av høyere biomasse og antall bakterier.

Dersom avløpsvannet skal føres tilbake til fiskekarene (gjenbruk) eller slippes ut til miljøet kan et høyt innhold av organisk materiale medføre problemer. Organisk materiale kan danne komplekser med toksiske metaller som videre kan fjernes med et trommelfilter. Dersom filteret ikke klarer å fjerne det partikulære avfallet kan imidlertid metallene frigjøres igjen dersom faktorer som pH endres. Det organiske materiale vil dermed utgjøre et uønsket toksisk potensial for fisken, og næring for mikrobiell vekst. Hvorvidt høyt mikrobielt antall er uønsket i et produksjonssystem eller i naturen, avhenger av vekststrategien til mikroben og om de har potensial til å indusere sykdom, uønsket vannkvalitet eller har en stabiliserende funksjon. I tilfeller der bakteriell omdanning av giftige forbindelser er en del av vannbehandlingen (for eksempel nitrifikasjon i RAS), er det viktig at de øvrige bakteriene ikke hemmer slike mikrobielle samfunn (bl.a. gjennom konkurranse). I salatforsøket ble det tatt ut prøver for å studere bakteriesamfunnets utvikling (ikke del av denne rapporten) og om mulig avgjøre hvordan bakteriene påvirket næringsløsningene.

3.2 Slam fra fiskeoppdrett (partikulær fraksjon)

Resultatene knyttet til oppdrettsslammet utgjør den partikulære fraksjonen og omhandler hvorvidt slammet kan utnyttes som ressurs (næring/energi). Dette søkes besvart gjennom overvåkingsprogrammet, salatforsøket, komposteringsforsøket og vitenskapelig litteratur.

3.2.1 Overvåkingsprogram og næringsverdi

Oppdrettsslammet fra Hardingsmolt AS ble hentet fra sedimenteringsrennen hvor spylevannet fra trommelfilteret renner gjennom. Slammet hadde derfor betraktelig høyere tørrstoffinnhold enn selve spylevannet.

Overvåkingsprogram og næringsverdi

Overvåkingsresultatene viste varierende konsentrasjon for de fleste parameterne (Tabell 11). Slamkvaliteten og mengden av de ulike avfallsprodukter varierer naturlig i henhold til driftsintensitet, fôrspill, fiskestørrelse og rensiltak. I tillegg varierer tørrstoffinnholdet en del på grunn av prøveinnhenting og tidspunkt for siste rensing/vask av sedimenteringskanalen. Tørrstoffinnholdet vil uansett variere avhengig av rensemetode (Tabell 12), men det finnes en rekke metoder for avvanning (bla. Liltved, 2009) som både vil være nødvendig i forhold til transport og anvendelse. Komposteringsystemet fra Global Enviro International AS (GE) er et system som flere settefiskanlegg bruker/vurderer. For på den måten å produsere et relativt lagringsstabil slam og for å redusere eventuelle transport- og leveringskostnader. Hvis resultatet blir et salgbart produkt, kan muligens deler av utgiftene ved et slikt system dekkes inn.

Tabellen med resultatene fra overvåkingsprogrammet viser at tungmetallnivået varierer og i noen tilfeller vil slammets anvendelsesområde være begrenset (se avsnitt 3.2.2). Sammenliknet med eldre data på oppdrettsslam er nivåene av tungmetaller ikke redusert (Blytt et al., 2011). Basert på endret sammensetning og bedre råvarer i fôret, skulle man forventet en reduksjon, men en mulig forklaring kan være mangelfulle historiske data. Forholdet mellom N og P i oppdrettsslam er også rapportert til å ha endret seg til det bedre i forhold til plantenes behov (Blytt et al., 2011). N og P resultatene fra overvåkingsprogrammet viser ikke det samme, men heller et stort overskudd av fosfor i forhold til mengde nitrogen. Noe som er dårligere tilpasset plantenes behov og kan føre til restriksjoner for anvendelse på enkelte typer areal. Innholdet av kalium er lavt og vil være suboptimalt for plantevekst, men i perioder med høyt forbruk av sjøvann stiger konsentrasjonen. Sjøvannet bidro spesielt til forhøyede verdier av natrium og klorid, men også til forhøyede verdier av magnesium og bor. Forhøyet innslag av sjøvann vil hemme veksten til de fleste planter, og som vist i salatforsøket vil et relativt lavt innslag

hemme veksten betraktelig. En mulig løsning på dette problemet kan være å bruke ferskvann som spylevann i trommelfilteret.

Oppdrettsslammet har absolutt et næringspotensiale, men bruken og mengden bør tilpasses anvendelsesområde. Kanskje bør det blandes med et annet organisk materiale eller tilsettes en næringsløsning. Tilsetting av oppdrettsslam til avløpsvann for å dyrke planter og grønnsaker ble studert i salatforsøket, blant annet for å se om balansen av næringsstoff ble bedre (se avsnitt 3.1.1).

Tabell 11. Fysikokjemiske parametere og konsentrasjon (mg/kg TS) av næringsstoffer og metaller i slam fra Hardingsmolt AS målt av Eurofins i overvåkingsperioden. Grått felt markerer oppdrettslam benyttet i komposteringsforsøket. Tekst i kursiv indikerer perioder med høyt innslag av sjøvann.

PARAMETER	2012												2013	
	29.FEB	14.MAR	28.MAR	20.JUN	9.JUL	25.JUL	15.AUG	4.SEP	19.SEP	6.NOV	4.DES	22.MAR		
	DATO													
TS	40	31	22	30	35	37	40	48	36	19	22	27		
pH	7,2	6,7	6,7	6,0	7,1	7,2	7,0	7,1	7,0	6,1	6,2	6,1		
Alkalitet	18,0	11,4	16,1	13,0	11,2	12,0	14,5	11,6	11,2	6,2	7,7	7,3		
TOC	190	240	393	351	152	153	120	62	420	270	400	320		
Tot-N	40 000	58 000	73 000	50 000	31 000	30 000	21 000	22 000	23 000	74 000	37 000	67 000		
NO ₃ -N	<0,25	1,4	<0,47	370	34	42	72	48	65	900	760	<0,38		
NH ₄ -N	8 900	3 100	16 000	5 700	3 800	4 400	3 200	1 900	3 300	6 500	4 100	5 700		
P	92 000	66 000	33 000	43 000	51 000	82 000	73 000	55 000	57 000	68 000	50 000	55 000		
Makro														
PO ₄ -P	250	220	790	590	110	75	76	33	540	3 600	3 700	1 400		
K	1 800	2 600	1 100	470	250	300	330	230	310	640	550	1 700		
SO ₄	3 500	3 900	2 300	2 700	460	800	550	310	380	2 500	1 400	2 500		
Ca	85 000	44 000	92 000	130 000	110 000	240 000	210 000	240	240 000	150 000	120 000	100 000		
Mg	2 500	1 700	5 000	2 400	3 300	9 400	13 000	5 500	6 600	4 800	3 200	2 800		
Fe	740	370	800	1 800	830	990	1 200	2 400	2 100	1 200	1 100	580		
Mn	80	49	51	96	85	190	130	120	130	180	130	80		
Zn	220	180	320	440	380	800	560	420	580	770	450	280		
Cu	<2	2,9	8,2	7,3	5,9	5,9	3,4	4,5	8,3	11	6,8	6,2		
B	46	31	31	5,4	7,2	8,8	9,5	7,5	<28	<52	<46	<38		
Mo	<2,5	<3,3	<4,7	<3,4	<2,9	<2,7	<2,6	<2,1	0,35	0,55	<0,46	0,45		
Al	120	140	190	240	180	340	280	240	450	390	260	160		
Cr	3,3	2,3	1,6	1,8	1,7	1,1	3,2	2,4	3,8	2,1	47	<1,2		
Pb	1,9	<1,7	<2,4	<1,7	1,7	2	<1,3	<1,1	2,1	<3,6	<2,3	<1,9		
Cd	0,7	0,4	0,7	1,4	1,0	2,0	1,6	1,3	1,3	2,2	1,4	1,0		
Na	62 000	70 000	13 000	2 100	2 500	2 800	2 700	2 000	2 100	4 900	4 500	4 400		
Cl	14 800	16 000	14 900	1 360	1 100	496	1 400	1 030	1 320	5 510	5 840	6 630		
Ni	<2,5	<3,3	<4,7	<3,4	<2,9	<2,7	<2,6	<2,1	<2,8	<5,2	17	<3,8		
Si	250	340	380	330	200	270	210	230	260	320	250	250		

Tabell 12. Fysio kjemiske parametere og konsentrasjon (mg/kg TS) av næringsstoffer og metaller i slam fra Hardingsmolt AS målt av Eurofins (variasjon i de siste 9 uttakene, 20.6.12-22.3.13), Marine Harvest Nordheim (2012), Smøla klekkeri og settefisk (2012), Nofima NRCA (2012), Nofima NRCA (2012) og et settefiskanlegg (Global Enviro kompostsystem, 2011). Resultatene fra MH, Smøla og Nofima er hentet fra Ytrestøl et al. (2013) og sistnevnte settefiskanlegg fra Blytt et al. (2011).

PARAMETER	HARDINGSMOLT	MH NORDHEIM	SMØLA	NOFIMA NRCA	FISKESLAM (GE)
TS	19-48	16,6	3,6	1,1	86
pH	6,0-7,2	5,5	6,5	7,4	
	21 000-74 000				69 000
	<0,38-900				
	1 900-6 500				2 600
	43 000-82 000	8 500	6 800	15 000	17 000
Makro	33-3 700				
	230-1 700	1 400			3 000
	310-2 700				
	240-240 000	19 800	14 000	31 000	29 000
	2 400-13 000	600	2 600	3 100	1 700
	580-2 400				
Mikro	80-190	500	<40	<150	290
	280-800				11
	3,4-11				
	160-450				
	1,1-47				2,0
	1,0-2,2				0,4
Toksiske					
	2 000-4 900	1 800	7 800	9 000	2 000
	496-6 630				

3.2.2 Anvendelse av oppdrettsslam

Avløps slam har i dag flere anvendelsesområder (Rosten et al., 2013). Produksjon av biogass (Idsø & Årethun, 2013; Thuen et al., 2007) og produksjon av gjødsel (Fytili & Zabaniotou, 2008; Gouin, 1993) er gode eksempler på hvordan slik biomasse kan behandles og stabiliseres og samtidig utnyttes som en ressurs. Slambehandling for energiproduksjon (biogass) kan gjennomføres ved å benytte velkjent teknologi fra kommunale avløpsrensianlegg. For større oppdrettsanlegg kan et samarbeid om energiproduksjon med andre biomasseleverandører (jordbruk, slakteri, kommunale renholdsverk o.l.) være et alternativ. Slik kan det både være mulig å produsere lokal energi eller levere biomasse til et sentralt biogassanlegg. Uansett kan en slik utnyttelse av slammet bidra til å redusere energikostnadene. Oppdrettsslam brukes enkelte steder som alternativ eller tillegg til vanlig husdyrgjødsel, med godt resultat. Forsøk har vist at oppdrettsslammene ikke uten videre kan erstatte husdyrgjødsel (Ytrestøl et al., 2013). Sammensetningen av næringsstoff, luktutfordringer og eventuell spredning av smittestoff er tema som bør vurderes i hvert enkelt tilfelle. Kompostering, inaktivering av smittestoff og luktfjerning av slam fra fiskeoppdrett kan integreres med fiskeproduksjon for å produsere gjødsel til jordbruk (Blytt et al., 2011). Tilsvarende samarbeid som nevnt ovenfor kan benyttes for å få en god sammensetning av rå-biomasse. Langtidslagring, enkel rankekompostering og reaktorkompostering er komposteringsmetoder som enten er i bruk eller som har blitt testet. Oppdretterne kan med de overnevnte metodene få et tilleggsprodukt som reduserer driftskostnader eller gir en sekundær inntekt. Valg av slambehandlingsmetode bør imidlertid vurderes ut i fra mengde slam som produseres på oppdrettsanlegget da enkelte metoder krever store mengder slam (biogass) og andre metoder krever mindre mengder slam (kompostering, akvaponikk). I tillegg bør slambehandlingsmetode vurderes med tanke på bemanning og kompleksitet hvis det bare legges økonomiske kriterier til grunn. En må også tilpasse behandlingsmetode og bruksområde med tanke på luktutfordringene som følger med fiskeslam (Blytt et al., 2011). Selv ved enkle metoder som langtidslagring og kompostering av oppdrettsslam, vil en slik behandling være underlagt forskrift om gjødselvarer (Matdepartementet, 2003). Vitenskapskomiteen for mattrygghet (VKM) vurderer det som svært lite sannsynlig at oppdrettsslam representerer en fare for mennesker (virus, bakterier og parasitter) når det blir brukt som gjødsel eller jordforbedringsmiddel (Lunestad & Rimstad, 2011). Oppdrettsslam som skal spres på arealer må behandles på en slik måte at det ikke gir sjenerende lukt eller medfører risiko for spredning av fiskepatogene mikroorganismer og parasitter til omkringliggende vannforekomster. Det stilles også krav om at innholdet av tungmetaller (Tabell 13) og andre miljøgifter ikke må overstige gitte grenseverdier. Anvendelsesområde avhenger blant annet av kvalitetsklasse (Tabell 14).

Tabell 13. Kvalitetsklasser av organisk avfallsmaterialer basert på konsentrasjon av tungmetaller (mg/kg TS).

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

Tabell 14. Anvendelsesområde av organisk avfall i henhold til kvalitetsklasse.

Arealtype	Kvalitetsklasse	Mengdebegrensning
Jordbruk, hager og parker	0	Etter plantenes behov
	I	4 tonn TS per dekar og 10. år
	II	2 tonn TS per dekar og 10. år
Grøntarealer	0	Etter plantenes behov
	I-III	5 cm lag innblandet

Ved Hardingsmolt AS ansees bruk av slammet i lokalt jordbruk og eller grøntanlegg som det mest kostnadseffektive og sikre i forhold til eventuell smittespredning. Valg av slambehandlingsmetode bør baseres på utslippstillatelser (avgjørende for mengde produsert slam), kostnader og muligheter for lokalt samarbeid og anvendelse. Hvis det finnes regionale mottakere for kompostert slam til bruk i veianlegg, eller som annen fyllmasse kan dette også vurderes som et alternativ. Slamresultatene fra overvåkingsprogrammet viser et godt næringsinnhold, om en noe ubalansert, og relativt lave konsentrasjoner av tungmetaller (Tabell 11). Basert på innhold av tungmetaller havner oppdrettslammet i kvalitetsklasse 0-II, noe som betyr at det kan brukes på alle areal typer, men kan i noen tilfeller være mengdebegrenset (Tabell 14). Mengdebegrensningene som er angitt i gjødselverforskriften er utarbeidet for å begrense tilførselen av tungmetaller til arealer hvor det dyrkes matvekster, og ikke basert på agronomiske vurderinger. Mengdebegrensningene er basert på anvendelse som jordforbedring, men det kan benyttes 1/10 av maksimal mengde som gjødsel (klasse I og II). Hvordan produktet av en eventuell samkompostering (for eksempel oppdrettslam og liljerester) defineres bør undersøkes nærmere, siden dette ikke er tydelig definert i gjødselverforskriften eller tilhørende veiledning (Mattilsynet, 2007).

Komposteringsforsøk

Resultatene fra komposteringsforsøket viser at samkompostering av oppdrettsslam og liljerester er mulig og kan ved optimalisering danne et godt vekstsubstrat (evt. innblandet i kommersiell veksttorv) for veksthusproduksjon av liljer. Hvorvidt dette er praktisk mulig i stor skala (gammel silo e.l.) kan ikke vites med sikkerhet basert på disse relativt enkle forsøkene. Den viktigste faktoren i så måte vil være tilstrekkelig temperatur over tid. Dette for å sikre hygienisering og nedbryting av løkrester.

Resultatene fra komposteringsforsøket viser noe variable pH og relativt høye oksygenverdier ved de ulike måletidspunktene (Tabell 15). Begge parameterne endret seg noe etter omrøring (Reaktor 1 og 2), men endringene var mindre utover forsøket (resultat ikke vist). Dette tyder på en relativt stabil kompost, hvor mesteparten av det nedbrytbare materialet er omsatt. Prosessen utvikler varme, og temperaturen inne i komposten kan komme opp i 50-70 °C, noe som er tilstrekkelig for å inaktivere fiskepatogene bakterier. Resultatene indikerer noe varmeproduksjon i starten, men utover forsøket var temperaturen i reaktorene relativt lik med lufttemperaturen. Det rene oppdrettsslammet hadde en relativ stram luft som ved innblanding ble redusert betraktelig, spesielt i reaktorene med finhakkede liljerester (Tabell 16). Ytterligere luftreduksjon ble observert i løpet av de første ukene, hvor reaktor 1 (10 % slam våtvekt) var luftfri innen en måned etter forsøkstart. Det tok henholdsvis to og tre måneder før reaktor 2 (30 % slam våtvekt) og 3 (30 % slam våtvekt og ikke finhakked/omrørt) var luftfrie. Dette tyder på ulik stabiliseringstid, noe som kan kortes ned ved høyere temperatur og jevnlig omrøring. Ved raskere nedbrytingen ville blandingene vært luftfrie i løpet av relativ kort tid. Finhakking bidro til raskere omsetning og vil være nødvendig for et godt sluttprodukt. Resultatene viser og at alle kompostblandingene inneholdt spiredyktige løk (Fig. 21), noe som kan elimineres ved høyere temperatur. Alternativt må løkrestene fjernes før anvendelse. Næringsinnholdet i sluttkomposten var naturlig nok noe lavere enn i rent oppdrettsslam, og innholdet av tungmetaller plasserte sluttproduktet i kvalitetsklasse 0-I (Tabell 13). For øvrig vil kanskje det noe høye saltinnholdet skape utfordringer for plantevekst. Uansett vil det nok være fordelaktig å blande en slik kompost med kommersiell veksttorv og dermed reduser problemet med noe forhøyede verdier av enkelte forbindelser.

Oppsummert viser resultatene ufullstendig nedbryting av løk, hovedsakelig på grunn av lav temperatur. Økt temperatur vil også minimalisere faren for smittespredning. Finhakking bidro til hurtigere nedbryting og innblanding av slam opp til 30 % våtvekt går tilsynelatende bra. Ved optimalisering av komposteringsprosessen og innblanding med kommersiell veksttorv, vil et slikt produkt både tilføre ekstra næringsstoff og minimalisere avfallsproblemet med liljeproduksjonen.



Fig. 21. Reaktor 1, 2 og 3 (fra venstre) ved forsøkets slutt.

Tabell 15. Fysio kjemiske målinger i komposteringsforsøket.

DATO	TEMP LUFT °C	TEMP °C	pH <i>log [H⁺]</i>	KOND <i>µS/cm</i>	O ₂ %	KOMMENTAR
REAKTOR 1						
26.9.12						Start, blandet godt.
27.9.12	16,0	18,5	5,62	32,7	96,3	
2.10.12	17,1	18,1	6,16	304	92,9	Svak lukt.
22.10.12	16,3	17,1	6,53	51,2	95	Ingen lukt. Noen blader nedbrutt, men ikke stengler/løk. Tilsatte 1 l vann.
26.11.12	12,3	13,4	6,45	464	99,4	Jordlukt. Fremdeles rester av stengel/løk. Tilsatte 1 l vann.
8.1.13	12,0	13,9	6,32	585	97,5	Jordlukt. Fin jord, men enkelte løkspirer.
2.4.13	13,6	13,7	6,36	166,2	95,4	Jordlukt og mange nye spirer.
REAKTOR 2						
26.9.12						Start, blandet godt.
27.9.12		18,4	5,42	804		
2.10.12		19,1	6,08	3,14	82,8	Sterk lukt.
22.10.12		17,0	6,94	0,39	92,4	Svak lukt. Noen blader nedbrutt, men ikke stengler/løk. Tilsatte 1 l vann.
26.11.12		13,2	7,02	68	98,6	Jordlukt. Fremdeles rester av stengel/løk. Tilsatte 1 l vann.
8.1.13		12,5	6,98	408	98,9	Jordlukt. Fin jord, men enkelte løkspirer.
2.4.13		13,2	6,34	99,9	98,2	Jordlukt og mange nye spirer.
REAKTOR 3						
26.9.12						Start, blandet godt.
27.9.12		17,9	6,72	245	65,3	
2.10.12		18,1	6,69	0,27	90,3	Sterk lukt.
22.10.12		16,3	6,59	6,64	96,5	Svak lukt. Stengler/løk ikke nedbrutt. Tilsatte 1 l vann.
26.11.12		12,7	6,25	11,38	100	Svak lukt. Stengler/løk ikke nedbrutt. Tilsatte 1 l vann.
8.1.13		12,1	5,84	702	99,9	Jordlukt. Stengler/løk ikke nedbrutt.
2.4.13		13,3	6,27	84,9	98,3	Jordlukt. Stengler/løk ikke nedbrutt og mange nye spirer.

Tabell 16. Fysiokjemiske parametere og konsentrasjon (mg/kg TS) av næringsstoffer og metaller i slam fra Hardingsmolt AS og av jordblandingen i reaktorene ved start og slutt (komposteringsforsøk) målt av Eurofins. Grått felt markerer oppdrettslam benyttet i komposteringsforsøket.

PARAMETER	REAKTOR 1		REAKTOR 2		REAKTOR 3	
	START 2.OKT 2012	SLUTT 22.MAR 2013	START 2.OKT 2012	SLUTT 22.MAR 2013	START 2.OKT 2012	SLUTT 22.MAR 2013
TS	36	26	25,1	35	17,4	35
pH	7,0	6,8	7,23	7,1	6,7	5,7
Alkalitet	11,2	3,6	0,6	4,33	0,37	0,41
TOC	420	376	155	270	469	384
Tot-N	23 000	17 000	14 500	15 000	9 500	17 000
NO ₃ -N	65	2 100	-	3 100	-	5 200
NH ₄ -N	3 300	16	-	8,9	-	190
P	57 000	23 000	59 400	40 000	1 350	10 000
Makro						
PO ₄ -P	540	88	-	23	-	530
K	310	2 300	1 180	2 400	780	2 100
SO ₄	380	1 500	-	1 100	-	2 100
Ca	240 000	84 000	220 000	130 000	21 200	46 000
Mg	6 600	3 500	8 380	4 800	1 020	2 100
Fe	2 100	2 100	3 600	2 300	2 000	1 400
Mn	130	110	180	140	70,7	67
Zn	580	220	509	320	35	98
Cu	8,3	24	11,8	20	22,6	19
B	<28	<38	<20	<29	<20	<29
Mo	0,35	15	4,8	11	34	22
Al	450	590	625	480	798	360
Cr	3,8	2,7	4,7	4,3	2,3	1,6
Pb	2,1	13	4	7,8	13	9,5
Cd	1,3	0,74	1,6	1	<0,4	0,38
Na	2 100	950	1 720	1 300	270	890
Cl	1 320	835	-	1 380	-	1 170
Andre						
Ni	<2,8	<3,8	2,6	<2,9	2	<2,9
Si	260	570	500	450	620	360

3.3 Avfallsberegninger

Hardingsmolt AS registrerte en rekke drifts- og produksjonsparametere i overvåkingsperioden som tilsvarte ca. 3 produksjonsrunder av ca. 1 million smolt (Tabell 17). Disse registreringene danner grunnlaget for de ulike beregningene vedrørende avfallsproduksjon, og det antas at registreringene representerer en normal produksjon hos Hardingsmolt AS. Basert på tilgjengelig litteratur anslås det at slamproduksjonen er rundt 25 % (som tørrstoff) av utfôret mengde (Timmons et al., 2002), men dette avhenger av fiskestørrelse/-art, temperatur, fôrfaktor, fôrspill og liknende. Hvis man også vil beregne mengde slam som fanges opp/fjernes, må det også tas høyde for den totale renseeffektiviteten. Siden det verserer en rekke ulike verdier for både slamproduksjon og renseeffektivitet i vitenskapelig litteratur, må slike beregninger betraktes som grove anslag.

Hvis man antar at registreringene ved hvert prøvepunkt indikerer den samlede variasjonen og at gjennomsnittet vil gi et bilde av produksjonen ved Hardingsmolt, kan man beregne årlig produksjon av ulike avfallsprodukter. Andel som er mulig å fjerne eller utnytte vil naturlig nok variere i henhold til de samme faktorene som nevnt ovenfor, men beregningene vil uansett gi et grovt anslag om potensialet. Basert på målinger av løst karbondioksid og en utluftingseffektivitet som reduserer CO₂-konsentrasjonen til 5 mg/L inn til fisken, kan det estimeres mengde CO₂ utluftet. Denne CO₂-produksjonen kan muligens nyttegjøres i et lukket drivhus, da enkelte gartnerier tilfører CO₂ for å øke planteveksten. Gjennomsnittlig fjernes det 7,7 kg CO₂ per døgn ved Hardingsmolt AS sin produksjon. Sammenliknet med anbefalt dosering ved veksthusproduksjon av tomater (3 kg/1000 m²/t) er mengden utluftet CO₂ fra Hardingsmolt AS liten, men lavere dosering vil også kunne gi økt vekst (Siv Lene Gangenes Skar, pers. komm.).

Som nevnt over er det mange faktorer som påvirker slamproduksjonen, men en «tommelfingerregel» på 25 % av utfôret mengde som tørrstoff er mye brukt. Dette er en grov forenkling, men har kanskje like stor nytteverdi som andre beregningsfaktorer (Blytt et al., 2011 (delCampo et al., 2010)). Basert på en slik faktor kan det gjennomsnittlig produseres 169 kg (TS) per døgn ved Hardingsmolt AS sin produksjon og hvis vi antar en renseeffekt på 87,5 % (delCampo et al., 2010) kan det samles opp 148 kg (TS) per døgn, noe som gir ca. 52 tonn per år. Dette er noe høyere enn andre beregninger (Blytt et al., 2011 (delCampo et al., 2010)), men en av forskjellen er at disse beregningene ikke baseres på utfôret mengde, men på fôrfaktor og forventet biomasseøkning. Reell mengde oppsamlet slam er uansett vanskelig å beregne og må verifiseres med målinger i hvert enkelt tilfelle for å få et mer nøyaktig anslag. Liknende beregninger kan gjøres for næringsalter i vann og slam, og på den måten er det mulig å gi et grovt anslag på mengde utnyttbar næring.

Tabell 17. Driftsparametere og produktionsberegninger for Hardingsmolt AS ved prøvetidspunktene (15.november 2011 til 22.mars 2013). Grå felt markerer avløpsvann benyttet i forsøkene med lijjer og salat. CO₂ analysert ved NIVA-lab.

PARAMETER	DATO												
	2011					2012					2013		
	15.NOV	29.FEB	14.MAR	28.MAR	20.JUN	9.JUL	25.JUL	15.AUG	4.SEP	19.SEP	6.NOV	4.DES	22.MAR
Vannhastighet (maks)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Total biomasse	59 390	97 426	105 361	97 298	16 397	30 807	51 069	63 328	88 418	34 866	59 031	71 200	119 000
Fiskestørrelse	47	97	101	103	12	22	37	47	68	45	54	65	116
Antall fisk	1 259 068	1 049 667	1 038 359	945 533	1 355 843	1 391 710	1 380 045	1 343 314	1 283 098	775 249	1 085 796	1 097 000	1 020 000
Utført/døgn	822	761	427	142	703	951	861	870	720	574	666	340	935
Nytt vann	540	575	720	840	336	312	300	320	660	510	540	400	450
Vannutskiftning	946	1 088	2 428	8 518	688	472	502	530	1 320	1 279	1 168	1 694	693
Vannutskiftning %/døgn	39	41	52	60	24	22	22	23	48	37	39	29	32
CO ₂		25,7	7,3	8,4	11,7	13,6	19,5	12,9					26,4
Utløftet CO ₂		15	2	2	5	6	1	6					15
Slamproduksjon	205,5	190,3	106,8	35,5	175,8	237,8	215,3	217,5	180	143,5	166,5	85	233,8

4 Konklusjon

4.1 Avløpsvann

Resultatene fra overvåkingsprogrammet viste tydelige variasjoner i både vannkvaliteten og mengden avfallsprodukter. Slike variasjoner er naturlige og varierer i henhold til driftsintensitet, fiskestørrelse og rensiltak. Avløpsvannets innhold av plantenæringsstoffer som nitrat, fosfat, bor og kalsium viste størst variasjon, og skyldes at de er direkte relatert til fôrmengde, tilsetninger og råvannskvalitet. Avløpsvannets innhold av total nitrogen (Tot-N) varierte fra 14 mg/L til 71 mg/L i løpet av hele overvåkingsperioden. Nitrat (NO₃-N) varierer i samme periode fra 5,7 mg N/L til 42 mg N/L, men høye verdier samsvarer nødvendigvis ikke med høye Tot-N verdier. Innholdet av nitrat gir sannsynligvis et bedre bilde av mengden tilgjengelig nitrogen for plantevekst. Bruk av sjøvannet bidro til forhøyet pH, ledningsevne og alkalitet, og i tillegg var nesten alle prøvenes konsentrasjon av magnesium skadelig for planter. Basert på målinger av løst karbondioksid og en utluftingseffektivitet som reduserer CO₂-konsentrasjonen til 5 mg/L inn til fisken, fjernes det 7,7 kg CO₂ per døgn ved Hardingsmolt AS sin produksjon. Denne CO₂-produksjonen kan muligens nyttegjøres i et lukket drivhus, da enkelte gartnerier tilfører CO₂ for å øke planteveksten.

Plantevekst

Liljeforsøket hos Berge Gard og Gartneri viste at liljer dyrket med avløpsvann og liljer dyrket med kommersiell næringsløsning ikke kunne skilles kvalitetsmessig fra hverandre. Dette indikerer tilstrekkelig næring og ikke hemmende saltnivå i avløpsvannet, og at avløpsvannet kan brukes som alternativ næringsløsning. Langtidseffekter ble ikke vurdert og videre undersøkelser bør gjennomføres for avløpsvannet kan tas i kommersiell bruk.

NFT-systemet fungerte godt til produksjon av salat og kan være et egnet system for integrert produksjon av fisk og planter. I utgangspunktet skulle salat (Frillice) være en egnet forsøksplante, men på grunn av spesielt lavt innhold av næringsstoffer i det aktuelle avløpsvannet og hemmende nivå av salter, vokste salaten betraktelig dårligere enn kontrollen (kommersiell næringsløsning). Både størrelse (høyde, vekt og antall blader) og utseende var markant forskjellig. Filteret utgjorde ingen betydelig forskjell på vekst eller næringsinnholdet med unntak av forhøyet konsentrasjonen av jern, aluminium og silisium (utlekking fra steinullfilteret) i alle de filtrerte behandlingene. Kontrollsalat som ble dyrket med nitrat-anriket avløpsvann i deler av forsøket vokste tilsynelatende, men hadde en noe annen tekstur (oljeaktig og bløte). Salat dyrket med avløpsvann kunne gjenoppta vekst både ved overgang til nitrat-anriket avløpsvann og spesielt til kommersiell næringsløsning. Dette indikerer sammen med de øvrige resultatene at forhøyede saltnivå og

pH var den primære årsaken til svekket vekst. Andre plantesorter med høyere salttoleranse vil sannsynligvis trives bedre med et slikt avløpsvann (for eksempel Sølvbete).

Rensemethode

Resultatene fra salatforsøket viste at salat tar opp metaller fra avløpsvannet (uten å overskride grenseverdiene) som er toksiske for fisk, som kobber og aluminium. Dette er gunstig både dersom vannet skal resirkuleres tilbake til fiskekarene eller slippes ut til miljøet. Opptak av nitrat og fosfor i en kommersiell planteproduksjon er viktig for å forhindre eutrofiering, og kan tilsettes avløpsvannet for å oppnå optimal plantevekst uten at det påvirker fisken.

Salatforsøket viste at mengden organisk materiale økte i samtlige behandlinger, og ingen markant forskjell mellom behandlingene med filter og behandlingene uten filter. Liten effekt av filteret skyldes sannsynligvis at mer enn 80 % av det organiske materialet forelå på oppløst form og ikke ble fanget opp av filteret. Dersom avløpsvannet skal føres tilbake til fiskekarene (gjenbruk) eller slippes ut til miljøet kan et høyt innhold av organisk materiale medføre problemer. Organisk materiale kan danne komplekser med toksiske metaller som videre kan fjernes med et trommelfilter. Dersom filteret ikke klarer å fjerne det partikulære avfallet kan imidlertid metallene frigjøres igjen dersom faktorer som pH endres. Det organiske materiale vil dermed utgjøre et uønsket toksisk potensial for fisken, og næring for mikrobiell vekst.

Resultatene vedrørende bakterievekst (CFU) og totaltelling av bakterier indikerer gode vekstbetingelser for bakteriene i løpet av forsøksperioden for alle behandlingene, med høyere antall i de ufiltrerte løsningene. Ved slutt ser det uansett ut som det er større balanse mellom de ulike prøvepunktene og mer ensartet bakterieantall i alle løsningene/behandlingene. I dette tilfellet er nok samfunnet tilpasset høy mattilgang, og fordi det er en jevn og høy mattilgang virker bakteriesamfunnet relativt stabilt mot slutten av forsøket, men det skal lite forstyrrelser til for å endre denne stabiliteten. Ved bedre filtereffektivitet kunne man forventet lavere mattilgang og dermed forbedret stabilitet, også ved ulike forstyrrelser. Hvorvidt høyt mikrobielt antall er uønsket i et produksjonssystem eller i naturen, avhenger av vekststrategien til mikrobene og om de har potensial til å indusere sykdom, uønsket vannkvalitet eller har en stabiliserende funksjon. I tilfeller der bakteriell omdanning av giftige forbindelser er en del av vannbehandlingen (for eksempel nitrifikasjon i RAS), er det viktig at de øvrige bakteriene ikke hemmer slike mikrobielle samfunn (bl.a. konkurranse).

4.2 Oppdrettsslam

Overvåkingsresultatene viste varierende konsentrasjon for de fleste parameterne. Slamkvaliteten og mengden av de ulike avfallsprodukter varierer naturlig i henhold til driftsintensitet, fôrspill, fiskestørrelse og rensetiltak. Sammenliknet med eldre data på oppdrettsslam er nivåene av tungmetaller ikke redusert. Basert på endret sammensetning og bedre råvarer i fôret, skulle man forventet en reduksjon, men en mulig forklaring kan være mangelfulle historiske data. Forholdet mellom N og P i oppdrettsslam er også rapportert til å ha endret seg til det bedre i forhold til plantenes behov, men resultatene fra overvåkingsprogrammet viser et stort overskudd av fosfor i forhold til mengde nitrogen. Dette er dårligere tilpasset plantenes behov og kan føre til restriksjoner for anvendelse på enkelte typer areal. Innholdet av kalium er lavt og vil være suboptimalt for plantevekst, men i perioder med høyt forbruk av sjøvann stiger konsentrasjonen. Sjøvannet bidro spesielt til forhøyede verdier av natrium og klorid, men også til forhøyede verdier av magnesium og bor. Forhøyet innslag av sjøvann vil hemme veksten til de fleste planter, og som vist i salatforsøket vil et relativt lavt innslag hemme veksten betraktelig. En mulig løsning på dette problemet kan være å bruke ferskvann som spylevann i trommelfilteret. Resultatene fra overvåkingsprogrammet viser at det gjennomsnittlig produseres 169 kg (TS) per døgn ved Hardingsmolts produksjon og hvis vi antar en renseeffekt på 87,5 % kan det samles opp 148 kg (TS) per døgn, noe som gir ca. 52 tonn per år. Dette er noe høyere enn andre beregninger, men en av forskjellene er at disse beregningene ikke baseres på utfôret mengde, men på fôrfaktor og forventet biomasseøkning. Reell mengde oppsamlet slam er uansett vanskelig å beregne og må verifiseres med målinger i hvert enkelt tilfelle for å få et mer nøyaktig anslag.

Avløpsslam har i dag flere anvendelsesområder som biogass og gjødsel, men oppdrettsslam er stort sett begrenset til lokal anvendelse på jordbruksareal. Sammensetning av næringsstoff, luktutfordringer og eventuell spredning av smittestoff er tema som bør vurderes grundig. Ved anvendelse som gjødsel vil oppdrettsslammet være underlagt forskrift om gjødselvarer, men slikt slam er ikke tydelig definert i forskriftene eller i tilhørende veiledning. Oppdrettsslammet har absolutt et næringspotensiale, men bruken og mengden bør tilpasses anvendelsesområde. Kanskje bør det blandes med et annet organisk materiale eller tilsettes en næringsløsning. For større oppdrettsanlegg kan et samarbeid om energiproduksjon med andre biomasseleverandører (jordbruk, slakteri, kommunale renholdsverk o.l.) være et alternativ. Slik kan det både være mulig å produsere lokal energi eller levere biomasse til et sentralt biogassanlegg. Uansett kan en slik utnyttelse av slammet bidra til å redusere energikostnadene. Kompostering, hygienisering og luktfjerning av slam fra fiskeoppdrett kan integreres med fiskeproduksjon for å produsere gjødsel til jordbruk. Tilsvarende samarbeid som nevnt ovenfor kan benyttes for å få en god sammensetning av rå-biomasse. Langtidslagring, enkel rankekompostering og reaktorkompostering er komposteringsmetoder

som enten er i bruk eller som har blitt testet. Oppdretterne kan med de overnevnte metodene få et tilleggsprodukt som reduserer driftskostnader eller gir en sekundær inntekt. Valg av slambehandlingsmetode bør imidlertid vurderes ut i fra mengde slam som produseres på oppdrettsanlegget da enkelte metoder krever store mengder slam (biogass) og andre metoder krever mindre mengder slam (kompostering, akvaponikk). I tillegg bør slambehandlingsmetode vurderes med tanke på bemanning og kompleksitet hvis det bare legges økonomiske kriterier til grunn.

Ved Hardingsmolt AS ansees bruk av slammet i lokalt jordbruk og eller grøntanlegg som det mest kostnadseffektive og sikre i forhold til eventuell smittespredning. Valg av slambehandlingsmetode bør baseres på utslippstillatelser (avgjørende for mengde produsert slam), kostnader og muligheter for lokalt samarbeid og anvendelse. Hvis det finnes regionale mottakere for kompostert slam til bruk i veianlegg, eller som annen fyllmasse kan dette også vurderes som et alternativ. Samkompostering av oppdrettslam og liljerester er mulig og kan ved optimalisering danne et godt vekstsubstrat (evt. innblandet i kommersiell veksttorv) for veksthusproduksjon av liljer. Hvorvidt dette er praktisk mulig i stor skala (gammel silo e.l.) kan ikke vites med sikkerhet basert på disse relativt enkle forsøkene. Den viktigste faktoren i så måte vil være tilstrekkelig temperatur over tid for å sikre hygienisering og nedbryting av løkrester. Ved optimalisering av komposteringsprosessen og innblanding med kommersiell veksttorv, vil et slikt produkt både tilføre ekstra næringsstoff og minimalisere avfallsproblemet med liljeproduksjonen.

5 Referanser

- Adler, PR, Harper, JK, Wade, EM, Takeda, F, & Summerfelt, ST. (2000). Economic analysis of an aquaponic system for the integrated production of rainbow trout and plants. *International Journal of Recirculating Aquaculture*, 1.
- Barley, KP. (1970). The configuration of the root system in relation to nutrient uptake. *Adv. Agron*, 22, 159-201.
- Berland, Magne (2012). [Norsk Landbruksrådgivning Veksthus].
- Bjerknes, Vilhelm. (2007). *Vannkvalitet og smoltproduksjon* (Første utgave ed.). Norge: Juul forlag.
- Blytt, LD, Haraldsen, TK, Helness, H, Paulsrud, B, & Ulgenes, Y. (2011). Håndtering av slam fra rensing av avløp i settefiskanlegg: Forprosjektrapport. *SINTEF rapport SBF2011F0081*. SINTEF Byggeforsk, Trondheim, 37.
- Both, AJ. (2002). *Ten years of hydroponic lettuce research*. The State University of New Jersey, New Jersey.
- Brown, J Jed, Glenn, Edward P, Fitzsimmons, Kevin M, & Smith, Steven E. (1999). Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent. *Aquaculture*, 175(3), 255-268.
- Bugbee, Bruce. (2003). Nutrient management in recirculating hydroponic culture. *South Pacific Soilless Culture Conference-SPSCC 648*, 99-112.
- Bævre, Olav Arne, & Gislerød, Hans Ragnar. (2007). *Plantedyrking i regulert klima*. Landbruksforlaget.
- Cramer, MD, Schierholt, A, Wang, YZ, & Lips, SH. (1995). The influence of salinity on the utilization of root anaplerotic carbon and nitrogen metabolism in tomato seedlings. *Journal of experimental botany*, 46(10), 1569-1577.
- Cruz, V, Cuartero, J, Gómez-Guillamón, ML, & Fernández-Muñoz, R. (1990). *Effects of salinity at several developmental stages of six genotypes of tomato (Lycopersicon spp.)*. Paper presented at the Proceedings of the XIth Eucarpia meeting on tomato genetics and breeding.
- Cuartero, Jesús, & Fernández-Muñoz, Rafael. (1998). Tomato and salinity. *Scientia Horticulturae*, 78(1), 83-125.
- delCampo, L. M., Ibarra, P., Gutierrez, X., & Takle, H. (2010). Utilization of sludge from recirculation aquaculture systems (Vol. 9/2010). Tromsø: Nofima.
- Devitt, DA, Bowman, DC, & Morris, RL. (1991). Effects of irrigation frequency, salinity of irrigation water, and soil type on growth and response of bermudagrass. *Arid Land Research and Management*, 5(1), 35-46.
- Fytili, D, & Zabaniotou, A. (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 116-140.
- Gjesteland, Ingrid. (2013). *Study of Water Quality of Recirculated Water in Aquaponic Systems. Study of speciation of selected metals and characterization of the properties of natural organic matter*. (Mastergrad), Norges Teknologiske og Naturvitenskapelige Universitet, NTNU, Trondheim.
- Gouin, Francis R. (1993). Utilization of sewage sludge compost in horticulture. *HortTechnology*, 3(2), 161-163.
- Grubben, Gerardus JH. (2004). *Vegetables* (Vol. 2): Prota.
- Havforskningsinstituttet. (2009). Saltholdighet. Retrieved 9.oktober, 2013
- Idsø, Johannes, & Årethun, Torbjørn. (2013). Biogass i Sogn. *HSF notat*.
- Liltved, Helge. (2009). Teknologier for rensing av avløpsvann og slamhåndtering i landbasert oppdrett. NIVA-notat.
- Lunestad, Bjørn-Tore, & Rimstad, Espen. (2011). Uttalelse vedrørende hygieniske sider ved å bruke slam fra klekkeri og settefiskanlegg, og slam fra oppdrettsanlegg som gjødsel og jordforbedringsmiddel (F. f. h. o. smittestoffer, Trans.) (pp. 18). Oslo: Vitenskapskomiteen for Mattrygghet, VKM.
- Marschner, Horst, & Marschner, Petra. (2011). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (Vol. 89): Access Online via Elsevier.
- Martinez, Vicente, Bernstein, Nirit, & Läuchli, André. (1996). Salt-induced inhibition of phosphorus transport in lettuce plants. *Physiologia Plantarum*, 97(1), 118-122.
- Matdepartementet, Landbruks- og. (2003). Forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphav. FOR 2003-07-04 nr 951. <https://www.lovdata.no/cgi-wift/ldles?doc=/for/ff-20030704-0951.html>.

- Mattilsynet. (2007). Veiledning til forskrift 4.juli 2003 nr 951 om gjødselvarer mv. av organisk opphav. 50 s.
- Mengel, Konrad, Kosegarten, Harald, Kirkby, Ernest A, & Appel, Thomas. (2001). *Principles of plant nutrition*. Springer.
- Morgan, L. (1999). Hydroponic lettuce production. *Casper Productions, Narrabeen, NSW Australia*.
- Pérez-Alfocea, F, Estan, MT, Santa Cruz, A, & Bolarin, MC. (1993). Effects of salinity on nitrate, total nitrogen, soluble protein and free amino acid levels in tomato plants. *Journal of horticultural science*, 68.
- Pessaraki, M, & Tucker, TC. (1988). Dry matter yield and nitrogen-15 uptake by tomatoes under sodium chloride stress. *Soil Science Society of America Journal*, 52(3), 698-700.
- Pommeresche, Reidun. (2011). Et yrende liv rundt planterøttene, Bioforsk Økologisk. In A. Wibe (Ed.), *BIOFORSK TEMA* (Vol. 6).
- Resh, Howard M. (1995). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook of Soilless Food-Growing Methods* (5th ed.): Woodbridge Press.
- Rodriguez-Delfin, A, Chang, M, & Hoyos, M. (2000). Lettuce production in a Peruvian modified DFT system. *World Congress on Soilless Culture: Agriculture in the Coming Millennium 554*, 273-278.
- Rosten, Trond W Poulsen, Alanära, Helge, Eskelinen, Anders, Bergsson, Unto, & Arnljótur Bjarki Olafsen, Trude. (2013). *Perspectives for sustainable development of Nordic aquaculture*.
- Shannon, MC, & Grieve, CM. (1998). Tolerance of vegetable crops to salinity. *Scientia Horticulturae*, 78(1), 5-38.
- Skar, Siv Lene Gangenes (2013). [Bioforsk].
- Sælen, Odd Henrik. (2009). *Hav*
- Thuen, Erling, Harstad, Odd Magne, Garmo, Torstein H, Volden, Harald, Holand, Øystein, Horn, Svein Jarle, . . . Nielsen, Anders. (2007). Klimagasser og bioenergi fra landbruket-kunnskapsstatus og forskningsbehov. *Rapport utarbeidet på oppdrag fra: Styret for forskningsmidler over jordbruksavtalen. Fondet for forskningsavgift på landbruksprodukter og Norges forskningsråd. UMB-Rapport*.
- Timmons, M. B., Ebeling, J. M., Wheaton, F. W., Summerfelt, S. T., & Vinci, B. J. (2002). *Recirculating Aquaculture Systems* (2nd ed.). New York: Cayuga Aqua Ventures.
- Tuna, A Levent, Kaya, Cengiz, Ashraf, Muhammad, Altunlu, Hakan, Yokas, Ibrahim, & Yagmur, Bülent. (2007). The effects of calcium sulphate on growth, membrane stability and nutrient uptake of tomato plants grown under salt stress. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2), 173-178.
- Tvedt, Tilde, Randrup, Thomas Barfoed, Pedersen, Lars Bo, & Gludsted, Søren. (2001). *Planter & vejsalt: Skov & Landskab*, Københavns Universitet.
- Uhlig, Christian, & Fjelldal, Erling. (2005). Torv til strø og talle i Nord-Norge. *Grønn Kunnskap e*, 9, 1-56.
- Viken, Jonas (2013). [Viken Gartneri].
- Wheeler, RM, Mackowiak, CL, Sager, JC, Yorio, NC, Knott, WM, & Berry, WL. (1994). Growth and gas exchange by lettuce stands in a closed, controlled environment. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 119(3), 610-615.
- Wikmark, Terje (2012). [LOG].
- Ytrestøl, Trine, Løes, Anne-Kristin, Kvande, Ingvar, Martinsen, Svein, & Berge, Gerd Marit. (2013). *Utnyttelse av slam fra akvakultur I blandingsanlegg for biogassproduksjon: teknologi og muligheter*. Tromsø: NOFIMA.

NIVA: Norges ledende kompetansesenter på vannmiljø

NIVA gir offentlig vannforvaltning, næringsliv og allmennheten grunnlag for god vannforvaltning gjennom oppdragsbasert forsknings-, utrednings- og utviklingsarbeid. NIVA kjennetegnes ved stor faglig bredde og godt kontaktnett til fagmiljøer i inn- og utland. Faglig tyngde, tverrfaglig arbeidsform og en helhetlig tilnæringsmåte er vårt grunnlag for å være en god rådgiver for forvaltning og samfunnsliv.



Norsk institutt for vannforskning

Gaustadalléen 21 • 0349 Oslo
Telefon: 02348 • Faks: 22 18 52 00
www.niva.no • post@niva.no