



Luonnonvara- ja
biotalouden
tutkimus 76/2020

Läpivirtauslaitosten ravinnekuormituksen vähentäminen

Jouni Vielma, Martti Naukkarinen, Riitta Myyrä, Jani Pulkkinen ja
Tapio Kiuru

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 76/2020

Läpivirtauslaitosten ravinnekuormituksen vähentäminen

Jouni Vielma, Martti Naukkarinen, Riitta Myyrä, Jani Pulkkinen ja Tapio Kiuru

Luonnonvarakeskus, Helsinki 2020

Viittausohje:

Vielma, J., Naukkarinen, M., Myyrä, R., Pulkkinen, J. & Kiuru, T. 2020. Läpivirtauslaitosten ravinnekuormituksen vähentäminen. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 76/2020. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 38 s.



ISBN 978-952-380-069-4 (Painettu)

ISBN 978-952-380-070-0 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-070-0>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Jouni Vielma, Martti Naukkarinen, Riitta Myyrä, Jani Pulkkinen ja Tapio Kiuru

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2020

Julkaisuvuosi: 2020

Kannen kuva: Jani Pulkkinen

Painopaikka ja julkaisumyynti: PunaMusta Oy, <http://luke.juvenesprint.fi>

Tiivistelmä

Jouni Vielma¹⁾, Martti Naukkarinen²⁾, Riitta Myyrä²⁾, Jani Pulkkinen¹⁾ ja Tapio Kiuru¹⁾

¹⁾ Luonnonvarakeskus, Tuotantojärjestelmät, Survontie 9A, 40500 Jyväskylä

²⁾ Clewer Aquaculture, Linnankatu 34, 20100 Turku

Suomen sisävesialueen kalankasvatus on pysynyt, kiertovesikasvatuksen yleistymistä lukuun ottamatta, melko samanlaisena vähintään pari vuosikymmentä. Yritysten ympäristöluvut ovat muutamaa säännöstellyn vesialueen poikkeusta lukuun ottamatta pikemminkin pienentyneet kuin kasvaneet. Tässä raportissa kuvataan mahdollisuuksia suomalaisten läpivirtauslaitosten kuormituksen pienentämiseksi. Kyseeseen voivat tulla yksinkertaiset rehutehokkuutta edistävät menetelmät kuten lisähapetus tai kiintoaineen poistoa tehostavat menetelmät kuten uudenlaiset liettaskut ja yksinkertaiset suodattimet. Projektin päätavoitteena oli löytää Suomen kaupallisiin laitoksiin soveltuvia, ravinteiden ominaiskuormitusta pienentäviä tekniikoita, joiden käyttöönottoa ympäristöviranomaiset haluavat tukea luvituksen keinoin ja joihin yritykset voivat investoida. Lisäksi tarkoituksena on ollut kerätä oleellinen tieto läpivirtauslaitosten ravinnekuormituksen pienentämisestä tiivistäen yksiin kansiin.

Tässä projektissa arvioitiin maaomalaitokselle toteutettavien kuormitusta alentavien toimenpiteiden vaikutusta tuotetun kalan ja poistetun fosforin kustannuksiin kolmelle toimenpiteelle: 1) laitokselle rakennetaan hapetusjärjestelmä 2) laitoksen uoma-altaisiin rakennetaan uusi lietteenkeruujärjestelmä 3) laitoksen uoma-altaat korvataan pyöröaltailla ja niille rakennetaan lietteenkeruujärjestelmä. Kolmen menetelmän vertailussa poistetun fosforikilon kustannus oli noin 600–800 euroa. Pienimmilläänkin fosforikuormituksen pienentäminen olisi noin 10 kertaa kalliimpaa kuin peltojen kipsikäsitteilyllä saavutettava fosforikuormituksen vähentämisen hinta 60–70 euroa per kg fosforia. Näin suuri ero toimenpiteen kustannustehokkuudessa kyseenalaistaa maaomalaitosten saneerausten ympäristöpoliittisen järkevyyden. Ravinnekuormituksen pienentäminen olisi tämän selvityksen perusteella tehokkainta rakentamalla kullekin laitokselle räätälöity hapetusjärjestelmä. Maaomalaitoksen liettaskujen saneeraus nosti tuotantokustannuksia 0,60 €/kg. Jos laitos tuottaisi perattua kalaa, kustannuksen nousu perattua kalakiloa kohden olisi vielä 20 % suurempi. Tämä saattaisi olla niin paljon, että toiminta olisi keskimäärin tappiollista ja laitos lopettaisi toiminnan. Laitoksen muuttaminen pyöröaltaisiin perustuvaksi olisi niin kallista, etteivät sen toteutusta yritykset edes harkitsisi vaan toiminta lakkaisi. Aito kuormituslupa ilman tuotannon ja rehunkäytön rajoitusta pienentäisi jonkin verran kuormituksen pienentämisen kustannusta.

Asiasanat: kalankasvatus, läpivirtauslaitos, vesiviljely, ympäristökuormitus, ympäristölupa

Sisällys

1. Johdanto	5
2. Läpivirtauslaitokset ja niiden tuotanto	6
3. Ravinnekuormituksen alkuperä ja olomuodot	7
4. Kuormituksen vähentäminen	9
4.1. Parhaan käyttökelpoisen tekniikan (BAT) määritelmä	9
4.2. Erilaiset tavat ravinnekuormituksen pienentämiseksi	9
4.3. Kiintoaineen kerääminen	10
4.3.1. Altaiden mittasuhteet ja rakenne	10
4.3.2. Laskeutus	11
4.3.3. Siiviliönti	13
4.4. Lietteen jatkokäsittely ja hyödyntäminen	13
4.5. Liuenneiden ravinteiden poistaminen	14
4.5.1. Veden osittaiskierrättäminen	14
4.5.2. Kosteikot	15
4.5.3. Muut menetelmät	16
4.6. Ravinnekuormituksen pienentäminen kasvatusolosuhteita kehittämällä	17
4.6.1. Hapetus	17
4.6.2. Rehujen ja ruokinnan merkitys ravinteiden poistossa	18
5. Kolmen menetelmän tekninen kuvaus	20
5.1. Lähtötilanne	20
5.2. Hapetus	20
5.2.1. Tekninen kuvaus	20
5.2.2. Kustannustarkastelu	23
5.3. Uoma-altaan lietteenpoiston tehostaminen	24
5.3.1. Tekninen kuvaus	24
5.3.2. Kustannustarkastelu	26
5.4. Laitoksen saneeraus pyöröaltaiksi	27
5.4.1. Tekninen kuvaus	27
5.4.2. Kustannustarkastelu	28
6. Uusia avauksia uomalaitosten ravinnekuormituksen kehittämiseksi	30
6.1. Yleistä	30
6.2. Soluvirtaus	30
6.3. Laskeutuksen ja siivilöinnin yhdistäminen	31
7. Johtopäätökset	35
Viitteet	36

1. Johdanto

Suomen sisävesialueen kalankasvatus on pysynyt, kiertovesikasvatuksen yleistymistä lukuun ottamatta, melko samanlaisena vähintään pari vuosikymmentä. Yritysten ympäristöluvut ovat muutamaa säännöstellyn vesialueen poikkeusta lukuun ottamatta pikemminkin pienentyneet kuin kasvaneet. 14 vuotta sitten julkaistussa raportissa totesimme, että sisävesialueen kasvatukseen soveltuvien puhdistustekniikoiden käytännön toimivuudesta, ympäristötehokkuudesta ja yritystaloudellisista vaikutuksista on vähän tutkittua tietoa (Vielma ym. 2006). Raportin julkaisun jälkeen kiertovesikasvatukseen on tullut paljon sekä yksityistä että julkista rahoitusta. Kiertovesikasvatus on kuitenkin suuri hyppy intensiivisempään, monimutkaisempaan, ajoittain epävarmempaan ja valitettavasti samalla myös kalliimpaan suuntaan. Samaan aikaan perinteisen läpivirtauskasvatuksen poistoveden käsittelyn kehitystyöhön ei ole panostettu, vaan suuri osan työstä on edelleen peräisin 1980- ja 1990-luvuilta. Suomessa ei ole tapahtunut samansuuntaista kehitystä kuin Tanskassa, jossa osa perinteisistä läpivirtauslaitoksista muutti tuotantoa asteittain intensiivisempään suuntaan, investoiden aluksi hapetusjärjestelmiin ja ottaen lopulta käyttöön osittain vettä kierrättäviä ns. modeldambrug-tekniikoita. Muutos sopi Tanskan luonnonolosuhteisiin ja sitä tuki pitkä T&K-toiminta sekä kuormitusperusteiseen lupaan sidottu normiohjaus. Tanskan sisävesialueen kalankasvatuksessa annetaan aitoja kuormituslupia ilman tuotantokatkoa, mutta lupien edellytyksenä on tiettyjen tekniikoiden käyttö.

Tässä raportissa kuvataan mahdollisuuksia suomalaisten läpivirtauslaitosten kuormituksen pienentämiseksi. Kyseeseen voivat tulla yksinkertaiset rehutehokkuutta edistävät menetelmät kuten lisähapetus tai kiintoaineen poistoa tehostavat menetelmät kuten uudenlaiset lietetaskut ja yksinkertaiset suodattimet. Raportti perustuu valtioneuvoston kärkihankerahoitukseen vuosille 2017–2019. Lukelle myönnetyn rahoituksen pääosa käytettiin uuden kiertovesikasvatuksen konseptin suunnitteluun ja toteutukseen Laukaan kalanviljelylaitokselle ja osa käytettiin läpivirtauslaitosten ravinnekuormituksen pienentämiseen liittyvään työhön (tämä raportti).

Projektin päätavoitteena oli löytää Suomen kaupallisiin laitoksiin soveltuvia, ravinteiden ominaiskuormitusta pienentäviä tekniikoita, joiden käyttöönottoa ympäristöviranomaiset haluavat tukea luvituksen keinoin ja joihin yritykset voivat investoida. Lisäksi tarkoituksena on ollut kerätä oleellinen tieto läpivirtauslaitosten ravinnekuormituksen pienentämisestä tiivistäen yksiin kansiin. Toisena tarkoituksena oli rakentaa käytännön mittakaavan hapetusjärjestelmiä ja dokumentoida niiden hyötyjä tuotannon lisäämiseksi ravinnekuormitusta kasvattamatta. Kolmanneksi kuvaamme Clewer Aquaculturen töissä syntyneitä ideoita uusista tavoista pienentää läpivirtauslaitosten ravinnekuormitusta. Lopuksi erilaisten teknisten ratkaisujen toteuttavuutta tuotantomittakaavassa on tarkasteltu ja toteutuksen kustannusvaikutuksia on laskettu.

2. Läpivirtauslaitokset ja niiden tuotanto

Läpivirtauslaitoksissa Suomessa tuotetaan sekä poikasia ruokakalatuotantoon ja istutuksiin, että ruokakalaa myyntikokoon asti. Poikasia tuotettiin vuonna 2018 noin 50 miljoonaa yksilöä 71 laitoksella. Noin 17 % (2,4 milj. kiloa) Suomen ruokakalatuotannosta vuonna 2017 tuotettiin sisämaan alueella, yhteensä 52 laitoksella. Useilla laitoksilla on sekä poikas- että ruokakalatuotantoa. Kiertovesilaitosten osuutta tuotannosta ei erikseen tilastoida, mutta 7–8 laitoksen tuotannon osuus Suomen kokonais-tuotannosta lienee 10–20 % (Forsman 2018).

Läpivirtauslaitoksia on sekä poikas- että ruokakalantuotannossa sisämaan alueella ympäri Suomen. Poikastuotantoon erikoistuneet laitokset käyttävät muovisia ja lasikuituisia pyöröaltaita sekä maa-al-taita hyödyntäviä laitoksia, ja tuotanto voi olla sijoitettu joko sisätiloihin tai ulos.

Suomessa ruokakalatuotannossa olevat läpivirtauslaitokset käyttävät pääasiassa maapohjaisia altaita. Maa-altaat ovat yleensä malliltaan pitkänomaisia uomia, joissa saattaa olla liettaskut lietteenkeräystä varten. Osa ruokakalatuotannosta hyödyntää myös pyöröaltaita joko sisähalleissa tai ulkona.

Altaat voidaan sijoittaa joko rinnan (kaikkiin vesi samasta tulovesikanavasta), sarjaan (altaasta poistuva vesi johdetaan seuraavaan altaaseen) tai voidaan käyttää näiden yhdistelmiä. Myös osittaisen kierrä-tyksen menetelmiä käytetään, jolloin sama vesi voi osittain kiertää samaan altaaseen uudelleen. Käyt-tömäärän kasvaessa vedenlaatu luonnollisesti heikkenee, mikä pitää huomioida altaiden käytön suun-nittelussa (erityisesti kasvatustiheys, hapetus ja ilmastus). Laitoksilla voi olla useita purkuputkia, mikä hankaloittaa keskitettyjen ravinteiden poistojärjestelmien rakentamista. (Fornshell & Hinshaw 2008, Vielma et al. 2006).

3. Ravinnekuormituksen alkuperä ja olomuodot

Kalankasvatuksen ravinnekuormitus on pääosin peräisin kalan ulosteesta ja liukoisista eritteistä sekä hyvin pienissä määrin syömättömästä rehusta. Ulostee ja syömättä jäävä rehu ovat partikkelimuodossa. Kalan aineenvaihdunnan tuotteina syntyy ammoniakkaa, ammoniumia, fosfaattia ja ureaa, joita erittyy liukoisessa muodossa kalan kiduksista ja virtsan mukana. Partikkeleista eli kiintoaineesta muodostuu ns. lietettä, joissa olevat ravinteet liukenevat ajan myötä osittain veteen.

Ravinnekuormituksen vähentämisen apuna voidaan käyttää tietoa kuormituksen laadusta, koostumuksesta ja sen vaihteluista. Tätä varten on esitetty laskentamalleja (mm. Brinker ym. 2006), mutta niiden yksityiskohtainen esittely ei ole tässä yhteydessä tarkoituksenmukaista. Tanskan teknillisen yliopiston vesiviljelyn tutkimus (DTU Aqua) käyttää kalankasvatuksen tutkimuksessa Excel-mallia, jota on jaettu mm. kiertovesikasvatuksen kursseilla. Laskentapohjan avulla voidaan arvioida partikkeleissa ja liukoisena olevien ravinteiden osuus. Taulukossa 1 on esimerkki kirjolohen kasvatuksesta, jossa rehukertoimeksi oletetaan 1, rehuhävikiksi 1 % (pölynä) ja rehun koostumukseksi 40 % proteiinia, 30 % rasvaa ja 0,8 % fosforia, mikä vastaa markkinoilla olevaa kotimaista 5 mm pelletin koostumusta. Fosforin ja typen sulavuusiksi oletetaan tyypilliset 65 ja 90 %.

Fosforikuormituksesta kolme neljäsosaa on alun perin sitoutuneena partikkeleihin, mutta jo melko nopeasti osa kiintoaineeseen sitoutuneesta fosforista alkaa liueta veteen. Minuuttien kuluessa liukenee noin 20 % ulosteen fosforista lopun ollessa tiukemmissa kemiallisissa sidoksissa ja siten hitaammin liueta (Eskelinen 1988). Rehut ovat kuitenkin muuttuneet eikä uusien vähäfosforisten rehujen fosforikuormituksen pysyvyyttä kiintoaineessa tunneta. Erityisesti kiertovesikasvatukseen on kehitetty rehuja, joissa fosfori saattaa pysyä tiukemmin ulosteen kiintoaineeseen sitoutuneena. Typpikuormituksesta noin viidesosa on aluksi kiintoaineessa ja ajan myötä yhä suurempi osa liuenneena. Koska kuormituksen pienentäminen perustuu käytännössä vain partikkeleissa olevien ravinteiden talteenottoon, taulukon luvut antavat suuruusluokan ravinnekuormituksen pienentämisen teoreettiselle maksimille perinteisessä läpivirtauskasvatuksessa.

Taulukko 1. Veteen pääsevät ravinteet fosfori (P) ja typi (N) 0.5–1 kg:n kirjolohen kasvatuksessa. Arvio on tehty DTU Aquan laskentapohjaa käyttäen (Dalsgaard ja Pedersen 2016). Eri olomuodoissa olevien ravinteiden suhteet ovat samankaltaisia myös muun kokoisilla kaloilla ja muilla kalalajeilla.

	kg/tn lisäkasvua	%
Kokonais-P	4,00	100,0
Partikkeleihin sitoutunut P	3,08	77,0
Liuennut P	0,92	23,0
Kokonais-N	36,50	100,0
Partikkeleihin sitoutunut N	6,98	19,1
Ammonium-N	20,96	57,4
Urea-N	2,95	8,1
Muut typpiyhdisteet	5,61	15,4

Koemittakaavan pyöröaltaiden yhteydessä olevan tehokkaan kiintoaineen laskeutuksen sekä rehujen sulavuuskokeiden perusteella voidaan päätellä, että 1 kg:n rehun ruokinnasta partikkeleita on noin 0,10–0,20 kg kuiva-aineena laskien. Kun tuoreen kalanulosteen kuiva-ainepitoisuus on noin 10 %, ns. lietettä syntyy 1–2 litraa per kg rehua, olettaen, että kiintoaine saadaan talteen ilman ylimääräistä

vettä. Luvut ovat linjassa Suomessa 1980-luvulla tehtyjen ainetasekokeiden kanssa (mm. Eskelinen 1984). Käytännössä kaikkea kiintoainetta ei saada talteen eikä näin pienessä lietevesimäärässä, jolloin lieteveden kuiva-ainepitoisuus on pienempi. Kiintoaineen kertymiseen vaikuttavat mm. rehun koostumus ja rakenne, ruokintarytmi, ruokintatapa (käsini/automaateilla), kasvatusolosuhteet (happipitoisuus, vedenlaatu, lämpötila, stressi), veden virtausolosuhteet (turbulenssi, virtausnopeus), rehu- ja ulostepartikkeleiden ominaisuudet sekä altaiden rakenteet (Jobling 1998, Roque d'Orbcastel ym. 2008, Sindilariu 2007).

4. Kuormituksen vähentäminen

4.1. Parhaan käyttökelpoisen tekniikan (BAT) määritelmä

Ympäristöministeriön kalankasvatuksen ympäristönsuojeluohjeessa vuodelta 2020 todetaan parhaasta käyttökelpoisesta tekniikasta oheisesti. Käytämme suoraa lainausta, koska ohje on käynyt läpi laajan valmistelun ja lausuntokierroksen.

”Ympäristönsuojelulaki ohjaa ympäristöä kuormittavia toimialoja parhaan käyttökelpoisen tekniikan (BAT, Best Available Techniques) ja ympäristön kannalta parhaan käytännön (BEP, Best Environmental Practices) periaatteilla. Nykyisen tiedon perusteella voidaan todeta, että sisämaan kalankasvatukseen on mahdollista soveltaa BAT-periaatetta, kun taas verkkoallaskasvatuksen ympäristönsuojelua voidaan edistää BEP-periaatteen mukaisesti, koska verkkoallaskasvatukseen ei ole saatavilla vesiensuojelutekniikkaa.

Ympäristönsuojelulaissa parhaalla käyttökelpoisella tekniikalla tarkoitetaan mahdollisimman tehokkaita ja kehittyneitä, teknisesti ja taloudellisesti toteuttamiskelpoisia tuotanto- ja puhdistusmenetelmiä ja toiminnan suunnittelu-, rakentamis-, ylläpito-, käyttö- sekä lopettamistapoja, joilla voidaan ehkäistä toiminnan aiheuttama ympäristön pilaantuminen tai tehokkaimmin vähentää sitä ja jotka soveltuvat ympäristölupamääräysten perustaksi (YSL 5 § kohta 7). Tekniikka on teknisesti ja taloudellisesti toteuttamiskelpoista silloin, kun se on saatavissa käyttöön yleisesti ja sitä voidaan soveltaa asianomaisella toiminnan alalla kohtuullisin kustannuksin.

Euroopan unionissa parhaaseen käyttökelpoiseen tekniikkaan liittyvän tiedonvaihdon ja lupakäytäntöjen yhtenäistämisen vastuusta säädetään teollisuuden päästödirektiivillä (Industrial Emissions Directive, IED 2010/75/EU). Tätä tarkoitusta varten EU valmistelee BAT-vertailuasiakirjoja eli BREF-dokumentteja (BAT Reference Document). Näitä laaditaan eri sektoreilta, mutta kalankasvatuksesta BREF-asiakirjaa ei ole tehty, koska kalankasvatus ei kuulu IED-laitokseen. Sen sijaan HELCOM hyväksyi kestäväen vesiviljelyn suositukset vuonna 2016. Yhden suosituksen mukaan HELCOM valmistelee parhaat BAT- ja BEP-periaatteet vesiviljelylle. Luvituksen yhteydessä selvitetään, mikä on paras käyttökelpoinen tekniikka.”

Termiä BAT on ajoittain käytetty varomattomasti. Pohjoismainen ministerineuvosto julkaisi 2013 tanskalaisen AquaCircle-verkoston tekemän koosteen Pohjoismaissa käytössä olevista erilaisista kalankasvatustekniikoista, mädin haudonnasta verkkoallaskasvatukseen (Heldbo ym. 2013). Raportin otsikointi on vahva ”Paras käyttökelpoinen tekniikka kalankasvatuksessa Pohjoismaissa”, vaikka raportissa ei käsitellä esitettyjen tekniikoiden soveltuvuutta erilaisilla tuotantoalueilla eikä raportti ole käynyt läpi laajempaa valmistelua tai lausuntokierrosta. Sitten osittain samat tekijät julkaisivat aihepiiristä raportin (Heldbo & Meyer 2016), jossa on lähemmin tarkasteltu olosuhteita ja lainsäädäntöä Tanskan, Saksan, Puolan ja Iso-Britannian kirjolohen sisävesikasvatuksen näkökulmasta. Siinä on mm. kuvattu Tanskan lainsäädännön normatiivinen ohjaus, jossa kuormitusluvan saaminen on kytketty erilaisten tekniikoiden pakolliseen käyttöönottoon.

4.2. Erilaiset tavat ravinnekuormituksen pienentämiseksi

Kuormituksen pienentämisen keinot on tavattu jakaa sisäisiin ja ulkoisiin menetelmiin ja jako on edelleen toimiva. Sisäisiä menetelmiä voidaan hyödyntää niin läpivirtauskasvatuksessa maa-altaissa, keinoaltaissa ja verkkoaltaissa kuin kiertovesikasvatuksessa. Sisäisistä menetelmistä tehokkaimpia ovat rehujen kehittäminen, veden hapettaminen ja kalan ominaisuuksien parantaminen valintajalostuksen

avulla. Ulkoiset menetelmät poistavat vedestä kiintoaineeseen sitoutuneita partikkeleita tai joissakin tapauksessa myös liukoisia ravinteita. Tyypillisiä ulkoisia menetelmiä ovat kiintoaineen laskeuttaminen kala-altaassa tai altaan jälkeen, veden tai kerätyn lieteveden siivilöinti sekä lieteveden jatkokäsittely sen tiivistämiseksi. Menetelmiä esitellään tarkemmin kappaleissa 4.3–4.6.

4.3. Kiintoaineen kerääminen

4.3.1. Altaiden mittasuhteet ja rakenne

Laitoksella käytössä oleva vesityslähde, laitosalueen korkeuserot, ja maa-aines vaikuttavat paljon siihen, millaisia teknisiä ratkaisuja voidaan rakentaa. Laitoksen mahdollisimman tehokkaan toiminnan ja sitä kautta vähäisen kuormituksen kannalta oleellista on, että hyvälaatuista vettä on saatavilla riittävästi. Kalat hyödyntävät rehun ravinteet tehokkaasti, kun lämpötila on optimaalinen ja hapekasta vettä on runsaasti. Puhdistusratkaisujen ja hapetuksen kannalta olisi hyödyllistä, että laitoksella olisi riittävästi pudotuskorkeutta. Yleensä pudotuskorkeutta on kuitenkin aika niukalti, joka hidastaa veden vaihtuvuutta ja vaikeuttaa partikkeleiden tehokasta kertymistä haluttuihin rakenteisiin. Jos toiminnassa olevan laitoksen maa-aines on hyvin pehmeää, syvien uusien rakenteiden kaivaminen voi olla hyvin vaikeaa tai jopa mahdotonta.

Kiintoaineen saaminen pois kasvatusaltaista on ensiarvoisen tärkeää, jotta ravinteiden liukenemista poistoveteen voidaan vähentää. Fosforin liukeneminen on nopeinta alussa, mutta liukenemista tapahtuu useiden vuorokausien ajan (Vesi- ja ympäristöhallituksen työryhmä 1988). Asiasta ei ole uutta tutkimustietoa. Kiintoaineen nopea poistaminen on hyödyllistä myös hyvän vedenlaadun ylläpitämiseksi kaloille. Ylimääräinen kiintoaine kuluttaa happea, voi nostaa veden ammoniumtasoa ja voi aiheuttaa ärsytystä esim. kiduksissa. Tyypillisesti altaiden pohjaan tai lietetaskuihin kertyvää kiintoainesta poistetaan vain kasvukauden jälkeen, mutta joillakin laitoksilla kuukausittain tai poikaslaitoksilla päivittäin. Erittäin intensiivisessä kasvatuksessa kuten kiertovesilaitoksissa, kiintoaineen on poistettava altaasta jatkuvasti.

Kiintoaine poistetaan riittävän veden virtauksen ja kiintoaineen keräyssysteemien avulla. Altaiden olisi hyvä olla ns. itsepuhdistuvia eikä niissä saisi muodostua virtauksia, jotka johtavat kiintoaineen kerääntymiseen sellaisiin paikkoihin, joista se ei poistu. Altaan tasainen ja sileä pinta auttaa kiintoaineen poistossa. Myös virtausnopeuden ja/tai kalatiheyden on oltava riittävä, jotta kiintoainepartikkelit kulkeutuvat haluttuun paikkaan. Lietteveden jatkokäsittelyn tulisi sijaita mahdollisimman lähellä kala-altaita, jotta vältytään liialliselta ravinteiden veteen liukenemiselta. Kiintoainetta sisältävän veden pumppaaminen ja ”vesiputoukset” rikkovat kiintoainesta pienemmäksi, jolloin se on huonommin talteen otettavissa. Tämä tulee huomioida myös kalojen käsittelyssä, ettei altaiden pohjia esimerkiksi pöyhitä tarpeettomasti lajitteluiden ja kalasiirtojen yhteydessä.

Maa- ja uoma-altaiden virtausnopeus, muoto ja pinta ovat useimmiten hankalia tehokkaan kiintoaineen poiston kannalta (esim. Karttunen ym. 1988). Altaat voivat toimia itse laskeutusaltaina. Uoma-altaissa veden virtaus on tehokkainta veden keskikerroksessa. Pinnassa virtaus on hitaampaa kuin keskikerroksessa, mutta nopeampaa kuin pohjalla, jossa virtaus on kitkan vuoksi hitainta. Jotta uoma-altaasta saadaan mahdollisimman hyvin itsepuhdistuva, tulee altaan mittasuhteiden ja veden virtauksen olla oikein mitoitetuja. Uoma-altaan syvyys ei saa olla liian suuri, sillä matalissa ja riittävän kapeissa altaissa vesi virtaa tehokkaimmin. Tyypillinen uoma-altaan kokosuhteet ovat noin 30:3:1 (pituus:leveys:syvyys), mutta kapeampia, matalampia ja lyhyempiä altaita on suosittu esim. USA:ssa, jossa betonisia uoma-altaita käytetään yleisesti. Suomessa vallinneen käsityksen mukaan veden virtausnopeuden tulisi olla pohjassa 3-4 cm/s, jotta kiintoainetta saadaan kertymään altaan loppupäähän sijoitettuihin lietetaskuihin (VYH 1988). Korkeilla virtausnopeuksilla kiintoainetta laskeutuu vähemmän altaaseen ja

sellaisessa tapauksessa kiintoaine pitää poistaa altaan jälkeen muulla tavalla kuin altaissa olevilla lietetaskuilla. Kalojen liike nostaa partikkeleita pohjasta ja ne kulkeutuvat alavirtaan pienemmilläkin virtausnopeuksilla. Korkeissa kalatiheyksissä kiintoainetta laskeutuu vähemmän altaan pohjalle. Virtausnopeus ei saa olla myöskään liian suuri, jotta kalat eivät väsy ja joudu kuluttamaan liikaa energiaa uimiseen. Optimaalinen virtausnopeus olisi kalan terveyden ja energiankulutuksen kannalta 0,5–2 ruu-miinpituutta/s. Turvallinen raja uoma-altaissa yli 10 cm:n kaloille on 22 cm/s.

Pyöröaltaissa altaan mittasuhteilla on suuri merkitys kiintoaineen poiston tehokkuudelle. Suositeltu halkaisija:syvyys -suhde on 5:1 – 10:1, tosin myös 3:1 suhde on yleisesti käytössä. Valittavaan suhdeluukuun vaikuttavat käytössä oleva tila ja tilan hinta; halleissa altaista olisi kustannustehokasta tehdä syviä. Myös vedenkorkeus, kalalajit, kasvatustiheydet, ruokintamenetelmät ja muut käytännölliset tekijät esim. työskentely vaikuttavat altaiden mitoitukseen. Mittasuhteiden lisäksi tuloveden ja mahdollisen ilman jakotapa vaikuttaa kiintoaineen kertymiseen. Tuloveden johtamiseen kannattaisi rakentaa rei'itetty pystyputki, jonka reikien suuntaa voidaan kääntää ja osa rei'istä peittää. Huolellisesti suunniteltu pyöröallas ja käytön aikana viimeistelty tulovesitys muodostaa virtaaman, jossa kiintoaines painuu altaan pohjaan keskelle, josta se on kerättävissä pois jatkuvatoimisesti tai pulsseittain lietekartiosta. Poistuva vesi tulisi saada pois altaista mahdollisimman rauhallisesti (ei turbulenssia tai vesiputouksia), jotta kiintoainepartikkelit säilyvät ehjinä ja ovat tehokkaimmin talteen otettavissa.

Kiertovesilaitoksissa on usein ns. kaksipoistoiset pyöröaltaat. Suurin osa, noin 90 %, virtaamasta poistuu sivusta altaan yläreunasta ja pieni osa altaan keskeltä pohjasta, josta lietevesi voidaan ohjata eri käsittelyyn kuin altaan päävirta. Samaa periaatetta voisi käyttää myös läpivirtauskasvatuksessa pyöröaltaissa, jolloin altaat toimisivat pyörreselkeyttiminä ja pääosa kiintoaineesta saataisiin konsentroitua pienempään vesimäärään. Summerfeltin ym. (2000) mukaan tällaisella altaalla saadaan talteen noin 78 % laskeutuvasta kiintoaineesta, mikäli 12–15 % virtaamasta ohjataan jatkuvasti pohjan keskipoistoon. Taulukon 1 lukuja hyödyntäen tämä tarkoittaisi sitä, että noin 60 % veteen päätyvästä fosforista saataisiin virtaamaan, joka olisi kuitenkin vielä suuri ja vaatisi jatkokäsittelyä.

Aihepiiristä löytyy lisätietoja mm. seuraavista julkaisuista: Brinker & Rösch (2005), Brinker ym. (2006), Fornshell & Hinshaw (2008), Timmons ym. (1998), Aarnipuro (1999, 2004).

4.3.2. Laskeutus

Läpivirtauslaitoksissa on sovellettu kiintoaineen laskeutusta altaiden sisällä tai altaiden jälkeen erillisissä laskeutusalueissa tai -altaissa. Allaslaskeutuksessa altaaseen rakennetaan hitaamman virtauksen alue esim. lietetasku. Maauoma-altaiden lietetaskuina on kokeiltu erilaisia rakenteita ja niitä on sijoitettu eri osiin allasta. 1980-luvulla tutkimuksia tehtiin mm. Nilakkalohi Oy:n Tervon uoma-altaissa sekä Tarmo Kallio Ky:n, Siikakosken ja Varisjoen Lohiyhtymän laitoksilla (VYH 1988). Viimeksi mainitussa raportissa todettiin, että lietetaskuja tulisi olla vähintään kaksi allasta kohden ja niiden tulisi sijaita ruokintapaikan alapuolella ja altaan loppupäässä.

Kala-altaan ulkopuolisessa laskeutuksessa altaista poistuva vesi ohjataan erillisiin laskeutusaltaisiin tai selkeyttiiniin, joissa vettä painavampi kiintoaines saadaan laskeutumaan pohjalle. Mikäli yli 100 µm kiintoainepartikkelit saadaan poistettua vedestä, voidaan kokonaisfosforikuormitusta laskea n. 20 % (True ym. 2004). Laskeutusallasta mitoitettaessa on tarkkaan arvioitava kiintoaineen laskeutumisenopeus ja suhteutettava se virtausnopeuteen altaan läpi sekä virtauksen nopeuteen laskeutusaltaan poistossa, jotta kiintoaines ehtisi mahdollisimman hyvin laskeutua ennen veden poistumista. Virtauksen tulisi olla tasainen, jotta turbulenssia tai ohivirtauksia ei pääsisi muodostumaan. Virtauksen lineaarisuus on tärkeää myös siksi, etteivät ulostepartikkelit hajoa ennen laskeutusta. Ulostoiden tiheys on noin 1,2, joka on lähellä veden tiheyttä, joten hajooneita pieniä partikkeleja ei saada tehokkaasti laskeutettua. Esimerkiksi 100 µm partikkelin laskeutumisenopeus on vain noin 1,5 cm/min. Lohikalajien

intensiivikasvatuksessa laskeutusaltaiden mitoitusarvoina käytetään 40–80 m³ vettä vuorokaudessa per m² laskeutusalaan kohden (Ebeling & Vinci 2006).

Lietetaskuihin ja laskeutusaltaaseen kertyvä kiintoaine tulee tyhjentää säännöllisesti ja mahdollisimman usein. Päivittäinen tyhjentäminen on harvoin käytännössä mahdollista, mutta tyhjennysvälin kasvaminen vaikuttaa ravinteiden liukenemiseen. Idahossa tehdyssä tutkimuksessa todettiin, että kerran viikossa tyhjennettävän lietetaskun jälkeen poistoveden fosforista liuenutta oli noin 50 %, mutta kahden viikon välein tyhjennettävän systeemin jälkeen lähes 70 %. Lietteen jatkokäytöstä riippuu, kuinka usein tyhjentäminen käytännössä on järkevää tehdä. MacMillan ym (2003) päätyivät siihen, että Yhdysvalloissa betonisten uomien lopussa olevien lietetaskujen viikoittainen tyhjentäminen ei ole vielä taloudellisesti liian raskasta mutta pienentää tehokkaasti ravinnekuormitusta. Lietetaskut ovat rakenteeltaan yksinkertaisia: pystyputken nostaminen johtaa lietteen erillisiä putkia pitkin laskeutusaltaisiin. (Fornshell & Hinshaw 2008, True et al. 2004.)

Suomessa maaomalaitosten lietteenpoiston tehokkuutta voidaan arvioida laitosten vuosittaisten ilmoitusten perusteella. Esimerkiksi Nordic Troutin (ent. Taimen Oy) Siikakosken laitoksen poistetun liemäärän, lietteen fosforipitoisuuden ja laitoksen lisäkasvun sekä rehunkäytön perusteella voidaan laskea, että lietteenpoistolla on saatu talteen keskimäärin 5 % kaloihin sitoutumattomasta fosforista.

Myös pyörre- ja pystyselkeyttimet perustuvat partikkeleiden laskeutumiseen. Pyörreselkeyttimessä vesi ohjataan pyöreään altaaseen ja poistetaan pinnasta reunoilta tai keskeltä putkella. Partikkelit laskeutuvat pohjalla olevaan suppiloon. Pyörreselkeytin toimii hyvin kun partikkeleiden tiheys on suuri, selkeyttimen mitoitus on oikea ja virtauksissa ei ole turbulenssia. Suositeltu virtaussuositus pyörreselkeyttimeen on kalanviljelykäytössä 10 m³/m²/h (Ebeling & Vinci 2006) eli vesimäärät ovat pinta-alaa kohti 3–6 kertaa suurempia kuin laskeutusaltaissa. Joissakin kiertovesikonsepteissa on mitoitettu pyörreselkeyttimiä vielä huomattavasti suuremmille virtaamille (30 m³/m²/h). Tavoitteena ei tällöin olekaan ottaa pois kuin helpoimmin poistettavat suuret partikkelit, joissa merkittävä osa ravinteista kuitenkin on. Tämän tyyppisiä pyörreselkeyttimiä on sovellettu yleensä yhdessä rumpusuodattimen kanssa tai kaksipoistoisen altaan kanssa, mutta konseptilla voisi olla potentiaalia myös läpivirtauslaitoksissa, jos kiintoaineen keräys altaasta saadaan hallintaan. Pyörreselkeyttimen optimaalisesta mitoituksesta yksityiskohtaisempaa tietoa löytyy raporteista Naukkarinen ja Mäkinen (1982), sekä Mäkinen ja Sumari (1983). Pyörreselkeyttintä tutkittiin Luken (RCTL:n) Laukaan laitoksella 1980-luvun alussa, ja selvitykset johtivat useiden pyörreselkeyttimien rakentamiseen erityisesti valtion kalanviljelylaitoksille. Enonkosken laitoksen viiden pyörreselkeyttimen keskimääräinen fosforin poistoteho oli 20 % kaloihin sitoutumattomasta fosforista (Runeberg 1992). Myös muovipohjaisista kalvoista tai pressuista tehtyä pyörreselkeyttintä kokeiltiin 1980-luvulla Tervon Nilakkalohi Oy:n laitoksella.

Pystyselkeytin on ulkomuodoltaan pyörreselkeyttimen kaltainen, mutta siinä vettä ei ohjata tuloveden suuntauksella pyörivään liikkeeseen, vaan tavoitteena on kiintoainepartikkeleiden laskeutumisnopeutta hitaampi laminaarinen virtaus alhaalta ylöspäin. Kiertovesilaitoksen kiintoaineenpoistossa pystyselkeytin on osoittautunut merkittävästi pyörreselkeyttintä tehokkaammaksi. Järjestelmässä, jossa oli sekä selkeytin että rumpusuodatin, pyörreselkeytin poisti 23 % kiintoaineiden kokonaismäärästä kun taas samankokoinen pystyselkeytin poisti 48 % kiintoaineesta (Davidson & Summerfelt, 2005). Kalanviljelylaitoksen tuottaman kiintoaineen tiheys on niin lähellä veden tiheyttä, ettei keskipakovoimalla ole käytännön merkitystä pyörreselkeyttimen kiintoaineen poistotehokkuuteen, vaan teho perustuu myös pyörreselkeyttimessä laskeutukseen. Niinpä pystyselkeytin voisi olla pyörreselkeyttintä tehokkaampi myös läpivirtauslaitoksen poistovesien käsittelyssä, vaikkei asiasta ole tutkittua tietoa.

Vaikka pyörre- ja pystyselkeyttimet ovat yksinkertaisia, niiden rakentaminen suurille virtausmäärille on kallista. Niiden etu laskeutusaltaisiin verrattuna on pienempi pinta-alarive ja lietteen poiston

helppous. Liete voidaan johtaa tai pumpata selkeyttimen kartiopohjalta kun taas laskeutusaltaista liete on yleensä poistettava imuroimalla.

4.3.3. Siivilöinti

Kiintoainepartikkeleita voidaan poistaa myös suodattamalla ja suodatusta voidaan soveltaa myös laskeutumattomien ja hitaasti laskeutuvien partikkeleiden poistoon. Siivilöiden tehokkuus riippuu kiintoaineen partikkelikoosta ja siivilöiden havaskoosta. Siivilöitä on sekä staattisia (mm. kolmiosuodatin) että liikkuvia (nauhasuodattimet, rumpusiivilät ja kiekkosuodattimet). Yleisimmin käytetyt havaskoot siivilöissä ovat 65 µm, 80 µm ja 100 µm, ja yleisin siivilätyyppi rumpusuodatin. Kiintoaineen ravinteiden poistotehokkuudet vaihtelevat eri tutkimusten mukaan melko paljon. Taulukossa 2 on esitetty rumpusuodattimen puhdistustehoja tanskalaisilta laitoksilta (Heldbo ym. (2013)).

Taulukko 2. Tanskalainen arvio rumpusuodattimen puhdistustehoista (%) betonisessa uoma-altaassa ja pyöröaltaassa, kun siivilän koko on 40, 60 tai 90 µm.

	Uoma-allas			Pyöröallas		
	40 µm	60 µm	90 µm	40 µm	60 µm	90 µm
Fosfori	50–75	40–70	35–65	65–84	50–80	45–75
Typpi	20–25	15–25	10–20	25–32	20–27	15–22
BOD5	45–75	40–65	30–60	55–80	50–75	35–70
Kiintoaine	50–80	45–75	35–70	60–90	55–85	50–80

Siivilöinnin haasteena ovat läpivirtauslaitoksissa erittäin suuret vesimäärät ja allashydrauliikka, joka vaikuttaa partikkeleiden siivilälaitteeseen kulkeutumiseen. Koko poistovesijakeen siivilöintiin läpivirtauslaitos tarvitsisi noin neljä kertaa suuremman siivilöintilaitteiston kuin vastaavan vuosituotannon omaava kiertovesilaitos prosessivetensä käsittelyyn. Kiintoaineen mukana kerättävien ravinteiden poistotehokkuus jäisi kuitenkin merkittävästi alhaisemmaksi hitaan virtauksen uoma-altaista kuin kiertovesilaitoksen itsepuhdistuvista altaista. Tanskassa rumpusuodattimet yleistyivät kun laitosten käyttämää vesimäärää pienennettiin hapettamalla. Näillä laitoksilla voitiin käyttää viileää pohjavettä, sillä vedenkäytön pienentäminen nostaa lämpötiloja altaissa. Hapetus mahdollisti myös kalatiheyden noston, mikä edisti kiintoainepartikkeleiden kulkeutumista rumpusuodattimille.

Jos lietteen keräystä läpivirtausaltaista saadaan tehostettua, on rumpusuodatus potentiaalinen vedenkäsittelymenetelmä kiintoainepitoisemman vesijakeen käsittelyssä. Suodatettu ja talteen otettu lietevesi vaati useimmiten edelleen jatkokäsittelyä.

4.4. Lietteen jatkokäsittely ja hyödyntäminen

Laskeutukseen tai suodatukseen perustuvan kiintoaineen sieppauksen jälkeen lietevedtä on yleensä tiivistettävä, sillä sen vesipitoisuus on vielä korkea. Jatkokäsittely ja lietteen stabilointi kalkilla vähentää myös hajuhaittoja.

Turvesuodatin on melko yksinkertainen rakenne, jonka huonoja puolia voivat olla pintakerroksen paakkuuntuminen, suodattimen jäätyminen pakkasella ja oikovirtausten muodostuminen. Nordic Troutin Siikakosken ja Korholankosken laitosten turvesuodattimelle johdettavan lieteveden ja siitä suotuvan poistoveden fosforipitoisuutta on mitattu 10 ja 8 kertaa vuosina 2009–2018. Turvesuodattimeen on pidättynyt lieteveden fosforista keskimäärin 68 % Siikakoskella ja 83 % Korholankoskella.

Lietevettä voidaan tiivistää laskeuttamalla ja laskeutumista voi tehostaa saostamalla mm. rauta- ja alumiinisulfaateilla. Tuore liete laskeutuu nopeammin ja siitä on ehtinyt liueta vähemmän fosforia kuin vanhasta lietteestä. Tehokkaammat lieteveden käsittelyprosessit kuten flokkulointi ja sitä seuraava suodatus tai konsentroidi flotaation avulla tulevat kyseeseen kiertovesilaitoksissa, joissa käsiteltävät vesimäärät ovat pienempiä. Liete stabiloidaan esimerkiksi kalkilla.

Konsentroitua lietettä on mahdollista hyödyntää lannoitteena esimerkiksi peltoviljelyssä. Mikäli liete on mahdollista kompostoida ennen käyttöä, päästään lähes kokonaan eroon hajuhaitoista ja saadaan monikäyttöisempi lopputuote. Hyvin toimivan lietteenkompostoinnin yhteydessä voidaan kompostoida myös esimerkiksi kuolleet kalat ja perkeet. Aikataulu on myös vapaampi, kun lietettä ei tarvitse käyttää heti tyhjennysten yhteydessä.

Laskeutettu liete on vesipitoista ja kuiva-aine koostuu pääosin hiilestä (25–70 %), kalsiumista (7 %), typestä (3 %) ja fosforista (3 %) (Naylor ym. 1999). Kompostointia varten lietteeseen tulee lisätä yhtä tai useampaa lisäkemateriaalia, jolla kosteutta saadaan sidottua, lisättyä hiilipitoista ainesta ja huokoisuutta, sillä kompostoituminen on aerobinen prosessi. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi sahanpuru, olki ja puuhake. Sekoitussuhde on 1 osa kalalietettä ja 2-3 osaa muita materiaaleja. Kalalietettä käyttävän kompostin prosessi on nopea, joten sen olisi hyvä antaa jälkikompostoitua vielä varsinaisen kompostoitumisprosessin jälkeen, jotta lisäkemateriaali kompostoituu tasalaatuisemmaksi. Toisaalta esimerkiksi peltolannoituskäytössä tällä ei liene suurtakaan merkitystä. (Buyuksonmez et al. 2005, Fornshell & Hinshaw 2008)

Lannoitekäytön lisäksi kalalietettä on mahdollista käyttää syötteenä biokaasulaitoksissa. Kalaliete voidaan sekoittaa muun materiaalin sekaan (esimerkiksi karjatalousliete), mutta kokeellisessa mittakaavassa on tehty myös biokaasuyksiköjä, jotka toimivat pelkällä kalalietteellä. (Bregnballe 2017, Tal et al. 2009)

4.5. Liuenneiden ravinteiden poistaminen

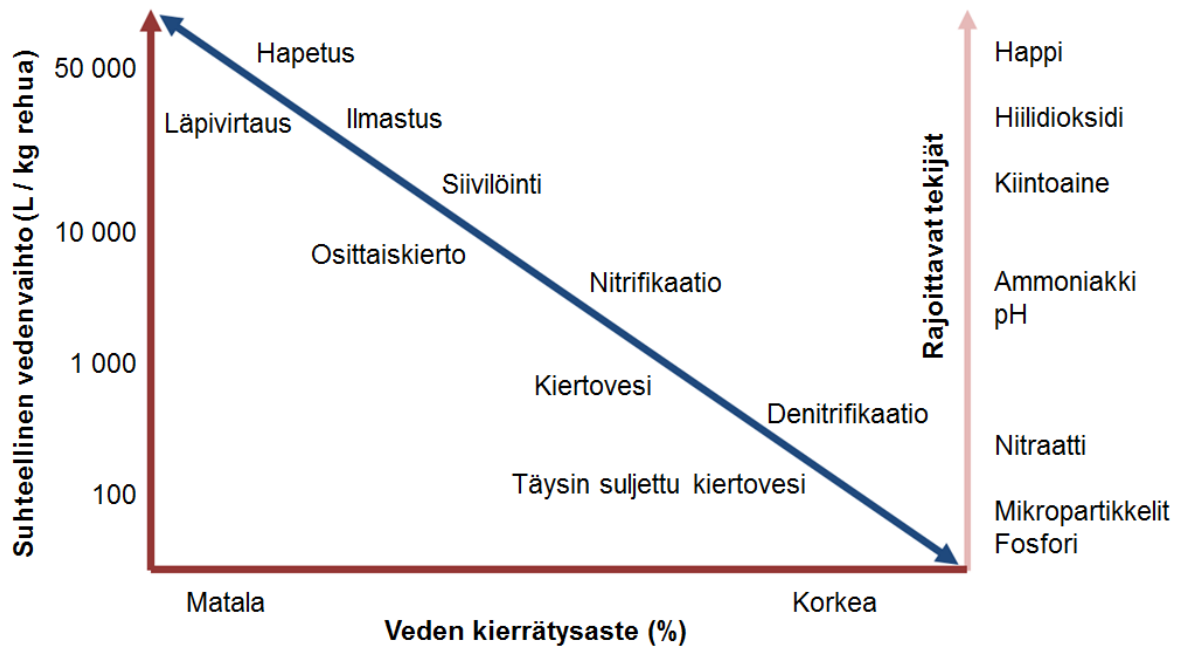
4.5.1. Veden osittaiskierrättäminen

Tässä raportissa ei paneuduta tarkemmin varsinaiseen kiertovesikasvatukseen, joissa sama vesi käytetään 50–100 kertaa sitä monimutkaisin menetelmin ja laittein puhdistuen. Vedenkäyttöä voi tehostaa myös vähemmän intensiivisesti, ja edellä käsitellyt ilmastus ja hapetus ovat ensimmäiset menetelmät veden osittaisessa kierrättämisessä. Vesi voidaan johtaa altaasta ilmastimeen ja/tai hapettimeen ja siitä takaisin altaaseen. Tällöin korjataan vedenkäytön tehostamisesta johtuvat ensimmäiset ongelmat, hapen puute ja kalojen veteen erittämä hiilidioksidi (Kuva 1).

Jos vedenkäyttöä edelleen tehostetaan sitä ilmastaen ja hapettaen, seuraavaksi kalojen olosuhteet heikkenevät veteen kertyvän kiintoaineen vuoksi. Altaasta poistuva vesi voidaan siivilöidä ja palauttaa se ilmastuksen ja hapetuksen jälkeen altaaseen. Samalla siivilöinti poistaa altaasta kiintoaineen sisältämää fosforia lietevedessä. Tällainen ilmastuksen, hapetuksen ja rumpusiivilöinnin yhdistelmä oli Tanskassa ensimmäinen askel ns. mallilaitoskonseptin kehittämisessä (modeldambrug).

Kierrättäminen nostaa kuitenkin veden lämpötilaa, mikä lienee jatkossa yhä suurempi ongelma suomalaisessa kalankasvatuksessa. Viime vuosina useina lämpiminä kesinä olisi lämpötilan säätömahdollisuuksista ollut hyötyä. Vedenotto esimerkiksi syvänteestä on kannatettava tapa, jos se on taloudellisesti järkevää. Kylmän veden sekoittaminen voi leikata juuri kriittisimmät lämpöhuiput pois. Veden lämpötilan tasaaminen läpivirtauslaitoksella kriittisinä kesähelteinä on mahdollista käytännössä vain ottamalla riittävä määrä lämpötilaltaan kylmempää vettä virtaaman joukkoon. Mikäli kohtuullisella etäisyydellä on vesistöissä syväne, jossa on selvästi kylmempää vettä, on harkittavissa vedenotto-

putken rakentaminen syvänteeseen. Syvänteen laajuutta arvioidaan syvyyskäyrien ja lämpötilatietojen perusteella. Viilennystä tarvitaan usein parin kuukauden verran. Pumppausta on todennäköisesti käytettävä hyväksi useimmissa tapauksissa, jotta veden hallittu virtaus on saavutettavissa. Pumppaus voidaan tehdä rannassa kaivosta uppopumpulla tai suoraan putkeen asennetulla keskipakopumpulla.



Kuva 1. Vedenlaadun rajoittavat tekijät ja tarvittava tekniikka veden kierrätysasteen noustessa.

4.5.2. Kosteikot

Kasvien käyttöä maaomalaitoksen fosforin pidätyksessä on kokeiltu Tervossa 1980-luvun alussa (Puustinen ja Lindqvist 1982). Touko-heinäkuussa korjatun vesiruton mukana saatiin poistumaan noin 5 % Nilakkalohi Oy:n fosforikuormituksesta. Menetelmä oli työläs ja ravinteiden sitomistehokkuus heikko suuren vesimäärän seurauksena olevan lyhyen viipymän vuoksi.

Kosteikoiden käytöstä kalankasvatuksessa on eniten kokemusta Tanskassa, jossa kosteikkoja on rakennettu ns. mallilaitosten yhteyteen. Tällaiset laitokset käyttävät vettä noin 5000 m³ per kg rehua, joka on noin 10 % tyyppillisen läpivirtauslaitoksen käyttämästä vesimäärästä (noin 50 000 m³ per kg rehua), mutta noin 10 kertaa enemmän kuin tyyppilliset kiertovesilaitokset käyttävät (noin 500 m³ per kg rehua). Tanskan lainsäädäntö edellyttää, että kosteikon pinta-ala on 25 m² per tonni rehua kun laitoksen rehunkäyttö on yli 55 tonnia vuodessa, tai 40 m² per tonni rehua tätä pienemmillä laitoksilla. Kosteikot on rakennettu lähes aina maa-uomalaitoksen alajuoksun altaisiin. Osaan kosteikoista on tuotu toimivuuden kannalta sopivia maalajeja, jolloin puhutaan rakennetuista kosteikoista (constructed wetland). Tyyppillisiä kasvilajeja kosteikoissa ovat järviruoko, järvikaisla ja osmankäämi. Tanskassa viipymät kosteikoissa ovat noin 8 tuntia.

Kasvit sitovat ravinteet varsin nopeasti ja tehokkaasti, minkä lisäksi kosteikkoihin syntyy myös bakteerikasvustoja, jotka omalta osaltaan poistavat ravinteita vedestä (nitrifikaatio ja denitrifikaatio). Hajoava kasviainne toimii myös hiilenlähteenä denitrifikaatioreaktioissa. Biologisen ravinteiden poiston lisäksi kosteikossa tapahtuu myös kemiallista sitoutumista (haihtuminen, sedimentaatio ja kasvualueisiin sitoutuneet yhdisteet). Tanskassa ja muualla Euroopassa tehtyjen tutkimusten perusteella ravinteiden sitomistehokkuus on ammoniumin ja kokonaistypen osalta jopa yli 80 % ja fosforin osalta

30–70 %. Liuenneen kiintoaineen poistuma on 70–95 % ja biologisen hapenkulutuksen lasku on ollut (BOD₅) 65–95 %. Suomessa kasvien kasvu ei ole ympärivuotista, mutta mikäli maa-alaa kosteikkojen rakentamiseen on käytettävissä riittävästi suhteessa laitoksen vesimäärään, voisi niiden hyödyntämistä pilotoida. (Aquaetreat 2007, Lin 2002, Sindilariu et al. 2009, Turcios & Papenbrock 2014, Dalsgaard et al. 2018).

Kosteikkojen talviaikaisesta toiminnasta Suomen oloissa ei ole kattavaa tietoa toistaiseksi saatavilla, mutta Oulun yliopistolla on aiheesta meneillään tutkimuksia. Typen ja kemiallisen hapenkulutuksen poistoteho vaihtelee vuodenajoin, mutta fosforin ja kiintoaineen pidättyminen on ollut tasaisempaa. Kosteikkojen suunnitteluun ja rakentamiseen on kiinnitettävä erityistä huomiota, jotta niiden mitoitus (koko, viipymä) suhteessa kuormitukseen on oikea ja jotta esimerkiksi oikovirtauksilta voidaan välttyä. Mikrobiologinen aktiivisuus on kosteikon puhdistustehon kannalta olennaista, joten kosteikon kasvilajien oikea valinta ja tärkeiden mikrobien kasvuolosuhteiden vaaliminen edesauttavat kosteikon toimintaa ravinteiden sitomisessa. (Marttila et al. 2016)

4.5.3. Muut menetelmät

Tässä kappaleessa tuodaan lyhyesti esille sellaisia menetelmiä, joita voitaisiin soveltaa kun vedenkäyttöä on voimakkaasti pienennetty sitä kierrättämällä. Menetelmiä ei voi käyttää perinteisessä läpivirtauskasvatuksessa.

Viime vuosina on tehty useita tutkimuksia erilaisten puupohjaisten materiaalien käytön mahdollisuuksista vedenpuhdistuksessa. Puuhakkeen käyttöä kalanviljelylaitosten poistovesien ravinteiden poistossa on tutkittu pääasiassa kiertovesilaitosten poistoveden osalta, sillä puuhakereaktorin denitrifikaatioprosessi poistaa nitraattityyppiä typpikaasuksi. Kalojen erittämä typpi on pääosin ammoniakkinä ja ammoniumionina, joka pitäisi hapettaa nitraatiksi nitrifikaatioprosessissa ennen puuhakkeelle johtamista. Lisäksi puuhakereaktorin viipymä on yleensä 12–24 h, jolloin maauomalaitosten suurten virtaamien takia tekniikka on mahdotonta toteuttaa koko vesimäärälle.

Kationisoidun sahanpurun (mänty) käyttö nitraatin poistossa ioninvaihtoon perustuen on osoittautunut toimivaksi sekä laboratorio- että teollisuusjätevesiolosuhteissa poistotehon ollessa yli 70 % (lähtötaso 30 mg N/l, josta poisto maksimissaan 32,8 mg NO₃-N/g). Toimiva lämpötila-alue oli laaja (5–70 °C) ja purumateriaalin todettiin olevan helposti regeneroitavissa ja uudelleen käytettävissä. Myös biohiilen (pyrolysoitu hiili) käyttöä jätevesien käsittelyssä on tutkittu. Biohiili on aktiivihiltä edullisempaa ja käytettyä, ravinteita sisältävää biohiilimateriaalia voitaisiin käyttää maanparannusaineena. Biohiilen on todettu sitovan sekä ammoniumia, nitraattia että fosfaattia jätevesistä, mutta tulokset ovat toisaalta lupaavia (jopa 90 % poistoteho NH₄ ja 87 % PO₄), toisaalta vaihtelevia (materiaalin kemiallinen kuluminen vähentää biohiilen käyttökelpoisuutta) eivätkä suoraan vesiviljelyyn sovellettavia. Sekä puupurun että biohiilen käytön osalta tarvittaisiinkin lisätutkimusta. (Hollister et al. 2013, Keränen 2017, Huggins et al. 2016).

Fosforia adsorboivien reaktiivisten materiaalien käyttöä on kokeiltu kiertovesikasvatuksessa laboratoriomittakaavassa (Renman ym. 2019). Tällaisia materiaaleja kuten poloniitti ja sorbuliitti on käytetty toistaiseksi lähinnä yhdyskuntajätevesien pienpuhdistamoissa.

Liukoisia ravinteita voidaan hyödyntää ns. aquaponics viljelyssä, jossa kalankasvatuksen yhteydessä kasvatetaan hyödynnettäviä kasveja. Akvaponisessa viljelyssä käytetään kalojen kiertovesikasvatusta, sillä ravinteet ovat konsentroituneena ja paremmin kasvien hyödynnettävissä. Ravinteiden hyödyntämiseen pyritään myös IMTA:ssa (Integrated Multi-Trophic Aquaculture) eli systeemeissä, joissa kasvatetaan usean eri trofiatason eliölajeja. Järjestelmässä eri tasoilta poistuvat ravinteet ja energia ovat myös tuotannollisesti hyödynnettävissä aina seuraavalla tasolla. Esimerkkejä tällaisesta ovat

systemit, joissa kalalaitosten poistovedessä kasvatetaan leviä, joita käytetään puolestaan ravinnoksi simpukoiden tuotannossa. Kasvatettavat levät voivat olla joko makroleviä, joille voi olla kaupallista sel-laisenaan, tai mikroleviä, joita käytetään systeemin seuraavan tason ravintona. Kaupallisen mittakaavan tutkimuksia IMTA-systeemien käytöstä on tehty melko vähän, mutta tutkimusmittakaavalla on päästy jopa 100 % ravinnepoistotehokkuuksiin sekä typpi- että fosforiyhdisteiden osalta. Tällainen vaati-tisi kuitenkin epärealistisen pitkiä viipyymiä. (Milhazes-Cunha & Otero 2017, Törnroos-Remes 2018)

4.6. Ravinnekuormituksen pienentäminen kasvatusolosuhteita kehittämällä

4.6.1. Hapetus

Ravinteiden hyväksikäyttö kalan elimistössä vaatii happea. Hapen kulutukseen vaikuttavat ennen kaik-kea kalan koko, veden lämpötila, kalan syömän rehun energiamäärä ja kalan aktiivisuus. Hapen tarve lisääntyy veden lämpötilan noustessa ja ravinnon mukana saadun energiamäärän lisääntyessä. Kalan kokoon suhteutettu hapen kulutus on pienillä kaloilla suuria kaloja suurempi. Myös stressitekijät kuten hapen puute, suuri kasvatustiheys tai sairaudet lisäävät hapenkulutusta.

Hapen puute vaikuttaa kalojen kasvuun ja ympäristökuormitukseen heikentämällä sekä rehunkäytön tehokkuutta että kalojen ruokahalua. Tutkimusten mukaan happipitoisuuden laskiessa rehunkäytön tehokkuus heikkenee ennen ruokahalun heikkenemistä. Veden liian matalaa happipitoisuutta ei siten voida heti havaita kalojen ruokahalun perusteella, vaan kaloja ruokitaan helposti liikaa. Veden happi-pitoisuuden lisääminen puhdasta happea käyttämällä vähentää lisäksi veden kiintoainepitoisuutta ver-rattuna vastaavaan tuotantoon esim. ilmastuksen avulla. Hapetuksella ja jossain määrin myös ilma-stuksella voidaan pienentää käytettävää vesimäärää, mikä voi mahdollistaa tehokkaampien poistove-den käsittelymenetelmien hyödyntämisen. Hyvät happiolot mahdollistavat myös korkeammat kasva-tustiheydet, millä on suotuista vaikutus altaiden itsepuhdistuvuuteen.

Turvallisena veden happipitoisuuden alarajana pidetään lohikalojen viljelyssä noin 5 mg/l pitoisuutta. Tämä vastaa 15 °C lämpötilassa noin 50 % saturaatiotasoa eli kyllästeisyyttä. Kasvun, ruokahalun, stres-sin ja rehun muuntotehokkuuden kannalta optimaalisten olosuhteiden ylläpito edellyttää kuitenkin huomattavasti korkeampia happitasoja. Tutkimusmittakaavan kokeissa lohikalojen poikasten kasvu on heikentynyt 10 % kun happipitoisuus laski alle 8 mg/l, 20 % kun happipitoisuus alitti 7 mg/l ja 22 % kun happipitoisuus oli 5–6 mg/l (WDOE 2002). Hapen kyllästeisyyden nosto yli 80 %:n ei kuitenkaan enää paranna kasvua tai rehukerrointa. Happipitoisuuden laskiessa tätä alemmaksi myös rehukerroin alkaa kuitenkin huonontua. Turvallisena pidetyn 50 % (5 mg/l) kohdalla rehukerroin (kasvuun sitoutuneen energian mukaan laskettuna) on jo 44 % huonompi kuin 70 % (7 mg/l) happitasolla (Pedesen 1987). Veden happipitoisuuden on lisäksi osoitettu vaikuttavan siihen, missä muodossa kala erittää ylimää-räisen fosforin (McDaniel ym., 2005). Matalafosforisilla rehuilla (0,7 %) veden hyvä happipitoisuus näyttäisi myös tehostavan fosforin sitoutumista kalaan. Samaa ilmiötä ei kuitenkaan havaittu kun re-hun fosforipitoisuus oli korkeampi (1,0 %).

Veden happipitoisuutta voidaan lisätä ilmastamalla, jos veden happikyllästeisyys on alle 100 %. Usein tavoitellaan kuitenkin tätä korkeampaa hapen ylikyllästeisyyttä, jottei tarvittava vesimäärä nouse koh-tuuttoman suureksi. Ylikyllästeisyys saadaan aikaan vain käyttämällä puhdasta happea. Tällöin hapen osapaine vedessä kasvaa. Muita hapen liukoisuuteen ja saavutettavaan veden happipitoisuuteen vai-kuttavia tekijöitä ovat veden lämpötila ja paine, jossa hapen liuotus tehdään.

Tuotantomittakaavassa happilähteinä käytetään joko teollisesti tuotettua nestemäistä happea tai painepäällä generaattoreilla tuotettavaa happikaasua. Teollisesti tuotettua paineistettua kaasumaista happea (pullot ja pullopatterit) käytetään kustannussyistä lähinnä vain tilapäis- ja hätähapetuksissa.

Hapen liuotustekniikat jaetaan kahteen päätyyppiin: 1) matalapainehapetus ja 2) korkeapainehapetus. Korkeapainehapettimilla päästään korkeampiin happipitoisuuksiin ja parempiin liuotuksen hyötysuhteisiin, mutta paineen nosto kuluttaa myös energiaa ja tekee järjestelmästä sähköstä riippuvaisen.

Happipitoisuuden nostolla saadaan hyötyä vain tiettyyn rajaan asti. Korkein käytännössä mahdollinen hapenkäyttö (hapen kulutus) voidaan läpivirtauslaitoksessa laskea muodostuvan hiilidioksidin perusteella. Lohikalat tuottavat noin 1,4 mg hiilidioksidia kuluttaessaan yhden milligramman happea. Jos veden hiilidioksidipitoisuuden ylärajana pidetään noin 15 mg/l pitoisuutta (suositus kirjolohelle), voidaan kalojen hengitykseen kuluttaa happea vajaa 11 mg/l. Jos poistoveden happipitoisuus halutaan pitää tasolla 7 mg/l, päädytään tuloveden enimmäishappipitoisuuteen 18 mg/l. Tätä suuremmalla hapenkulutuksella veteen muodostuva hiilidioksidi alkaa rajoittaa kalojen kasvua ja rehutehokkuutta ellei hiilidioksidia tuuleteta pois ilmastamalla.

4.6.2. Rehujen ja ruokinnan merkitys ravinteiden poistossa

Vaikka tämä raportti keskittyy teknisiin menetelmiin kuormituksen pienentämiseksi, lyhyt tiivistys ympäristökuormitusta pienentävästä ruokinnasta on paikallaan. Kuormitusta aiheuttavat ravinteet ovat peräisin rehusta, joten ruokintaan ja rehuihin kiinnitetään erityistä huomiota. Kalankasvatuksen ravintekuormitus on pienentynyt erityisesti rehuja kehittämällä ja huolellisella ruokinnalla.

Tarvittavaan ruokinnan tasoon vaikuttaa erityisesti kalalaji, kalan koko ja veden lämpötila, mutta myös rehu, vuodenaika, veden happipitoisuus ja muut tekijät kuten kalojen terveystilanne. Kaloja voidaan ruokkia ruokahalun mukaan tai ruokintataulukkoa soveltaen. Rehuvalmistajilla on omia ruokintataulukkoita, joita sitten sovelletaan paikallisiin olosuhteisiin. Menemättä tarkemmin taulukkoruokinnan ja kylläisyysruokinnan tapoihin ja edellytyksiin voi todeta, että pienin rehukerroin ja siten ominaiskuormitus saavutetaan sellaisella ruokintatasolla, joka ei anna aivan maksimaalista kasvua.

Ruokinta on mahdollista tehdä joko käsin, ns. pendeliautomaatilla tai kokonaan automatisoiduilla järjestelmillä. Käsin ruokinta mahdollistaa ruokinnan tarpeen mukaan ja niin, että koko parvi tulee ruokituksi. Kalojen voinnin seuraaminen on näin toimien myös helpointa. Toisaalta isoissa laitoksissa käsin ruokinta ei taloudellisista ja logistisista syistä ole aina mahdollista, joten automaattejakin tarvitaan. Yliaruokinnan mahdollisuus on kokonaan automatisoiduilla järjestelmillä erityisesti käsin ruokintaa suurempi, koska ruokinta tapahtuu ruokahalusta ja hetkellisistä häiriötekijöistä riippumatta. Syömättä jäävää rehua mittaavat järjestelmät eivät ole yleistyneet Suomessa eikä niiden läpimurtoa tapahtunut maailmallakaan. Norjan lohenkasvatuksessa ruokinnan sopivaa tasoa seurataan vedenalaisten videokameroiden avulla.

Koska ruokinta nostaa kalojen hapenkulutusta, ruokinnan ajallinen hajauttaminen pienentää veden happipitoisuuden laskua. Mitä isommasta kalasta on kyse, sitä harvemmin sitä kannattaa ruokkia. Perkauskoisella kalalla 2–3 päivittäistä ruokintakertaa voi riittää, poikasia kannattaa ruokkia vähemmän kerrallaan ja useammin. Peräkkäisten uoma-altaiden laitoksilla ruokinnan ajoituksessa kannattaa kiinnittää huomiota laitoksen happitaseeseen. Ruokinnan aiheuttama happitason lasku kulkeutuu alapuolisiin altaisiin pienellä viiveellä ja jos laitoksella ei ole hapetusta, kalojen ruokinta kannattaa porrastaa niin, että ruokinnan aikana vedessä on mahdollisimman paljon happea.

Ruokinnan ja rehujen avulla voidaan myös edesauttaa puhdistusjärjestelmien tehoa. Jos se vain altaan pituuden ja lietetaskujen sijainnin kannalta on mahdollista, kaloja kannattaa ruokkia lietetaskujen ylävirran puolella. Jos lietettä voidaan poistaa tiheästi esimerkiksi alipaineella, lietteenkeräys kannattaa

toteuttaa ruokinnan aikana ja välittömästi sen jälkeen. Rehun laatu vaikuttaa kalojen ulosteen koostumukseen. Kiertovesikasvatuksessa partikkeleiden poisto on erityisen tärkeää ja kiertovesirehujen raaka-aineilla kuten erilaisilla sideaineilla saadaan paremmin koossa pysyvä uloste. Kiertovesirehuista voisi siten olla hyötyä myös läpivirtauskasvatuksessa, kun laitoksella pyritään tehostettuun kiintoaineen poistoon.

5. Kolmen menetelmän tekninen kuvaus

5.1. Lähtötilanne

Maaomalaitokselle toteutettavien kuormitusta alentavien toimenpiteiden vaikutus tuotetun kalan ja poistetun fosforin kustannuksiin arvioidaan kolmelle toimenpiteelle:

1. Laitokselle rakennetaan hapetusjärjestelmä.
2. Laitoksen uoma-altaisiin rakennetaan uusi lietteenkeruujärjestelmä.
3. Laitoksen uoma-altaat korvataan pyöröaltailla ja niille rakennetaan lietteenkeruujärjestelmä.

Toimenpiteiden kustannukset tuotettua kalakiloa kohden voidaan laskea kahdella tavalla. Ensimmäisessä vaihtoehdossa voidaan olettaa, että laitoksen kokonaiskuormitus pysyy toimenpiteiden jälkeen samana ja tuotanto saa nousta ominaiskuormituksen pienentyessä. Tämä edellyttäisi aitoa kuormituslupaa ilman rehunkäyttöön liittyviä rajoituksia ja sitä, että laitoksen kuormitus saisi pysyä ennallaan. Toisessa vaihtoehdossa lähtökohtana on, että toimenpiteiden myötä kokonaiskuormitus pienenee ja tuotanto pysyy samana. Tässä raportissa kustannukset on laskettu jälkimmäisen vaihtoehdon mukaan.

Lähtöoletuksia:

- Laitoksen vuosituotanto 200 tn
- Fosforikuormitus 760 kg: rehukerroin 1,0, rehun keskimääräinen fosfori 8 g/kg ja nykyinen kuormituksen pienentyminen lietetaskuilla 5 %
- Virtaama 2 – 2,5 m³/s
- Altaita 12 kpl ja niiden kokonaistilavuus 12 000 m³
- Lämpötila ei nouse kesällä yli 22 asteen
- Tuotanto tapahtuu uoma-altaissa siten, että loppusyksyllä biomassaa on 80 % koko tuotannosta ja loppu kasvusta tapahtuu keväällä
- Oletetaan, että tuote on noin 0,5 kg painoinen kirjolohi kasvaen tähän painoon kesän yli seuraavaan kevääseen
- Sähkön hinta siirtoineen 0,12 €/kWh
- Rehun hinta 1,4 €/kg, tämä huomioidaan kun hapetus pienentää rehukerrointa 5 %
- Pääoman kuoletusaika 6 vuotta
- Korkeus 5 %

5.2. Hapetus

5.2.1. Tekninen kuvaus

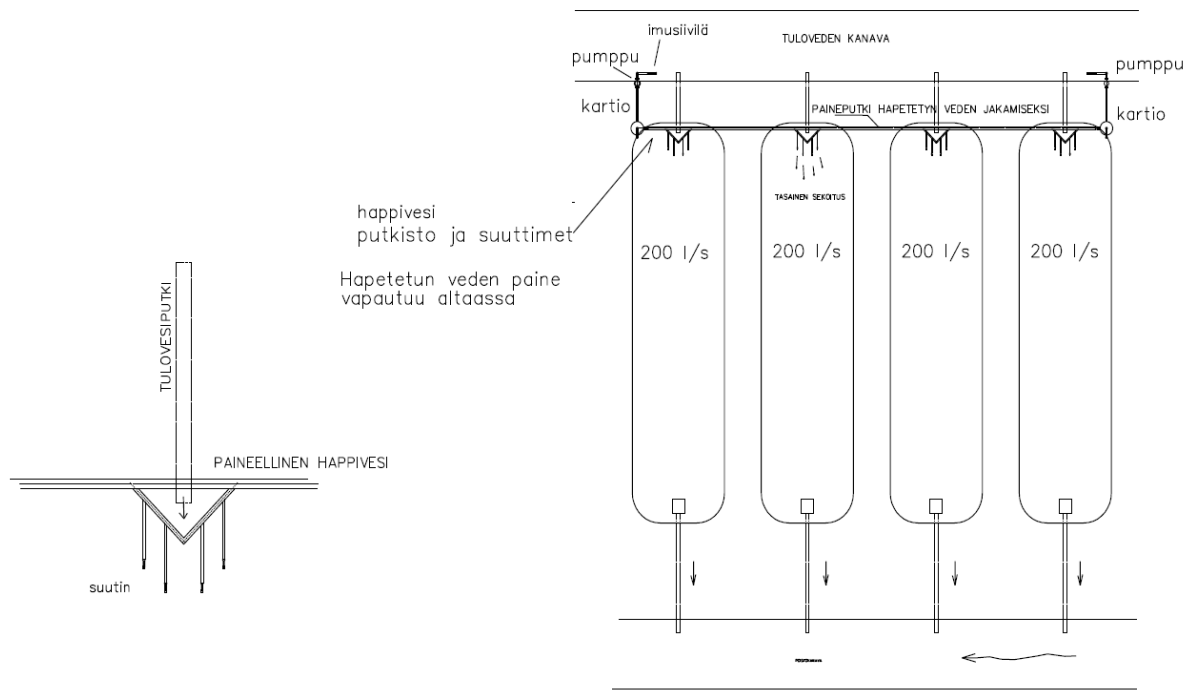
Erilaisia hapetuksen toteutustapoja on esitetty kuvissa 2–5. Tämän raportin taustalla olevan projektin rahoituksella suunniteltiin kuvien 3–4 mukainen hapetusjärjestelmä Nordic Trout Oy:n Siikakosken laitokselle. Laiteinvestoinnit yritys toteutti omalla rahoituksellaan saaden osaan investoinnista tukea.



Kuva 2. Happi voidaan tuottaa paikallisesti generaattorilla tai tuoda nestehappena. Kuva: Martti Naukkarinen.



Kuva 3. Happi voidaan liuottaa paineistetussa tilassa tai valuttamalla. Kuva: Martti Naukkarinen.



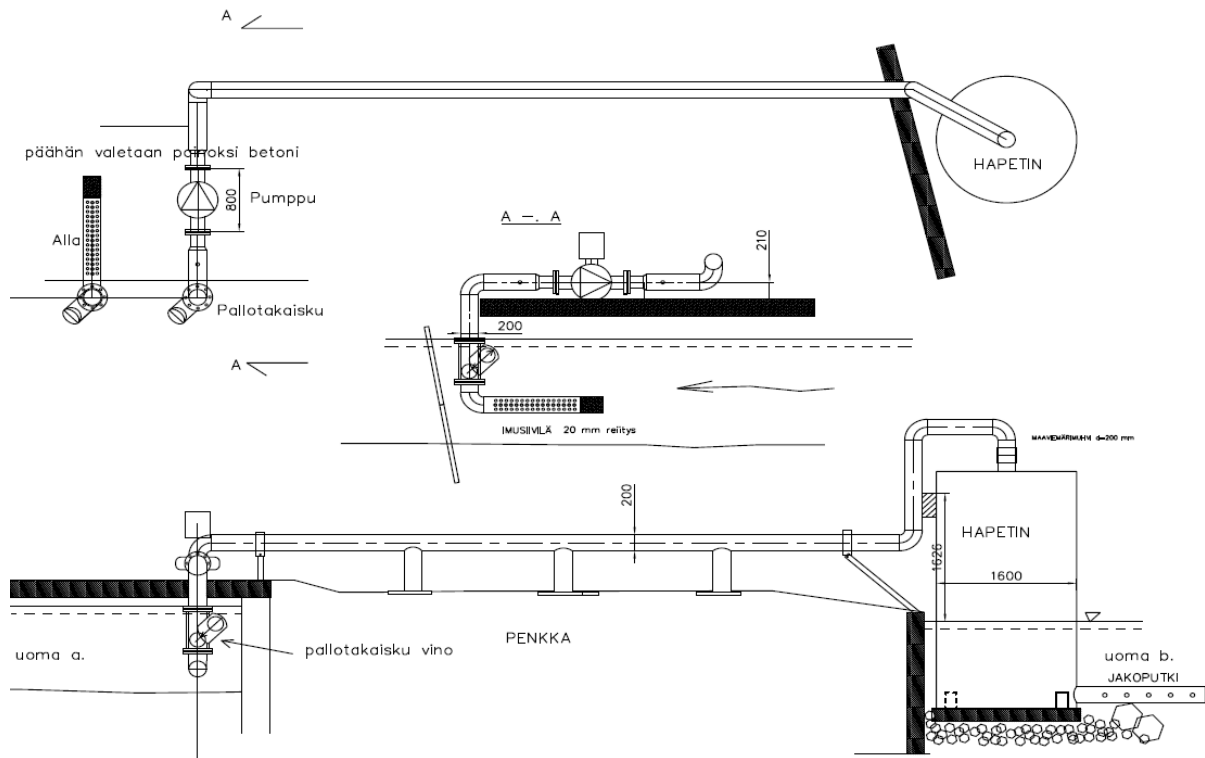
Happivesi suuttimista tulovirtaukseen sekoittaen



Kuva 4. Siikakosken laitoksella testattiin uutta hapen jakotapaa, jossa runsashappinen vesi jaettiin kala-altaisiin upotettujen rei'itettyjen putkien kautta. Kuva: Martti Naukkarinen.

Kaaviokuva

hapettimesta



Kuva 5. Matalapainehapettimessa vesi pumpataan uomasta suljetun hapettimen sisälle, johon syötetty puhdas happi liikenee tehokkaasti veteen.

5.2.2. Kustannustarkastelu

Tässä vaihtoehdossa investoidaan kuvan 4 mukainen hapetusjärjestelmä 12 altaalle. Hapetta lisätään painehapetinjärjestelmällä heinäkuussa 1,5 mg/l, elokuussa 2,5 mg/l ja syyskuussa 2,0 mg/l. Oletetaan, että hapetuksella voidaan parantaa rehukerrointa 5 %, jolloin laitoksen fosforikuormitus pienenee 760 kg:sta 684 kg:aan.

Lasketaan kustannukset seuraavilla laitteilla ja toimenpiteillä:

- Happikartiot hapen liuotukseen
- Pumput, joilla saadaan kartioiden vaatima paine
- Nestehappiasema
- Happilinjat, putkitukset
- Mittareita, hälytysjärjestelmä, varavoima
- Sähköasennukset ja tarvikkeet

Taulukko 3. Investoinnit hapetukseen.

Hankinta	Hinta, €/kpl	Kpl	Hinta yht
Happikartiot (hapen liuotus)	8 000	4	32 000
Pumput ja niiden ohjaukset	4 000	4	16 000
Putkitukset	20 000	1	20 000
Hapen jakolaitteet	700	12	8 400
Aidattu happiasema	9 000	1	9 000
Varahapetus keraamisina hapettimin	170	48	8 160
Happilinjat kartioille ja hapettimille	2 000	8	16 000
Virtausmittari hapelle	125	16	2 000
Virtausmittari vedelle, siirrettävä	1 500	2	3 000
Happimittarit	3 000	2	6 000
Hälytyspaketti puhelimiin	4 000	1	4 000
Varavoimakone	17 000	1	17 000
Asennukset laitteille	24 000	1	24 000
Sähköasennukset ja tarvikkeet	7 000	1	7 000
Yhteensä			172 560

Kuuden vuoden poistoajalla ja 5 %:n korolla vuotuiset kiinteät kustannukset ovat 34 000 €.

Käyttökustannukset lasketaan 90 vuorokaudelta heinä-syyskuussa, jolloin järjestelmä on päällä teholla $4 \times 13 \text{ kW} = 52 \text{ kW}$. Sähkön hinnalla 0,12 €/kWh energiakustannus on 13 500 € per kasvatuskausi. Hapen kulutus oletetaan tasaiseksi, koska kesällä heinä-elokuussa vesi on lämpimämpää ja kala pienempi, jolloin kalan hapentarve on suurempi. Happea lisätään 400 kg vuorokaudessa. Hapen hinnaksi oletetaan kuljetusten kanssa 0,20 €/kg nestehappea. Säiliön vuokra ja siihen liittyvän etävalvonnan kustannus on 7 000 €/vuosi. Pääoma- ja käyttökustannukset olisivat yhteensä 62 000 euroa vuodessa. Viiden prosentin rehukertoimen parantumisella rehukustannukset pienentyvät 14 000 €/vuosi. Hapetusjärjestelmän rakentamisen ja käyttöönoton jälkeen kirjolohen tuotantokustannus nousisi 0,24 euroa per kg kalaa. Fosforikuormitus olisi 684 kg vuodessa ja pienennetyn fosforikuormituksen kustannus olisi 627 euroa/kg fosforia.

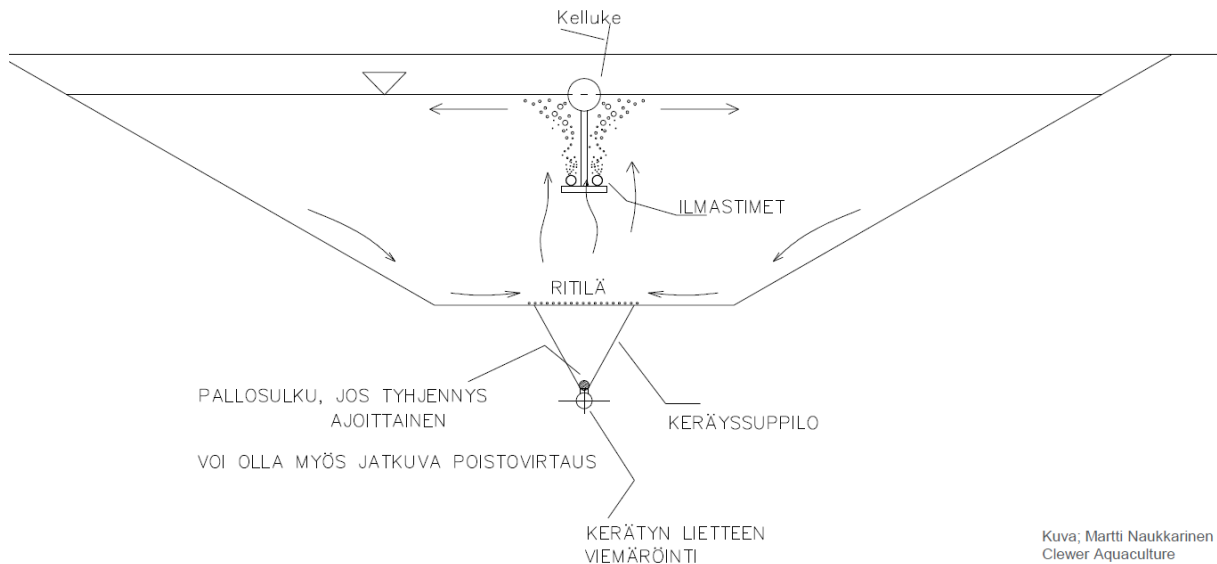
5.3. Uoma-altaan lietteenpoiston tehostaminen

5.3.1. Tekninen kuvaus

Tässä vaihtoehdossa toteutetaan lietteenpoiston tehostaminen soveltaen ajatusta ilmastuksella tehostuneesta kiintoaineen keräytymisestä. Ajatusta ei ole testattu pilotti- tai tuotantomittakaavassa, joten siltä osin tehostunut kuormituksen pienentyminen ei ole varmaa.

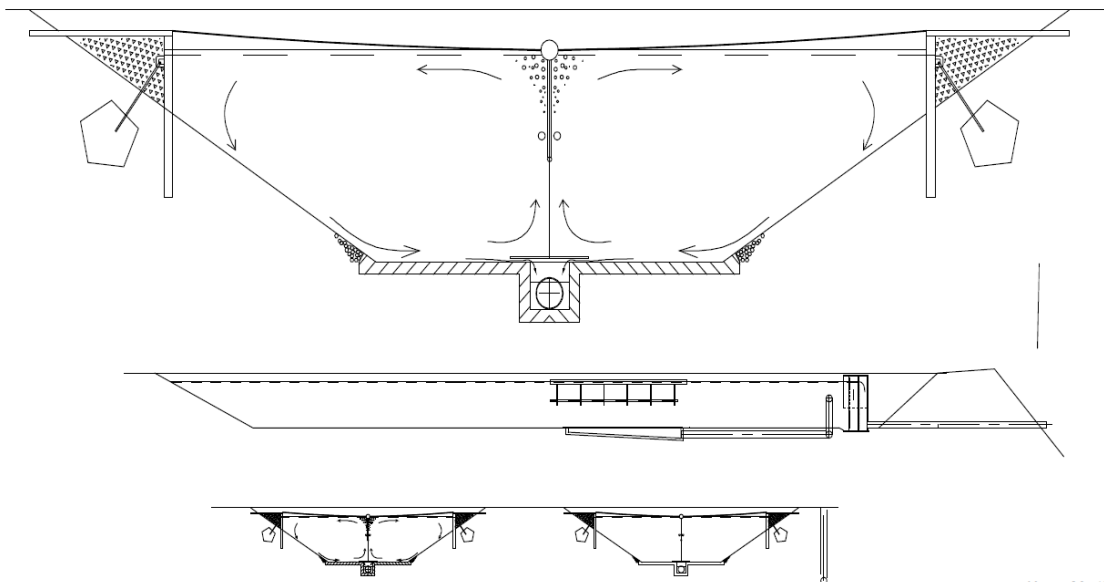
Altaisiin rakennetaan uudet lietetaskut ja 30–50 % virtauksesta poistetaan altaan loppupäähän sijoitettavan pituus- tai poikittaissuuntaisen pohjapoiston kautta. Pohjapoiston päälle sijoitetaan ilmastin, jonka ansiosta altaan pohjan virtaus kohti pohjapoistoa tehostuu (Kuvat 6 ja 7). Ilmastin on joko pitkitäinen tai poikittain riippuen pohjapoiston suunnasta. Ilmastus suunnataan siten, että ilmastuksen aiheuttama pintavirtaus suuntautuu vastavirtaan kohti tulovesipäätä. Altaan luiskia muotoillaan pituus-suuntaisen poiston tapauksessa niin, että saadaan virtauksellisesti edullisempi muoto ilmastuksen kohdalle. Ilmastuksen avulla voidaan myös jonkin verran nostaa veden happipitoisuutta ja poistaa hiilidioksidiä.

Pohjapoiston kautta virtaava vesi johdetaan kiintoaineen erotukseen joko laskeuttimeen (pyörreselkeyttimeen) tai rumpusiivilään. Tässä esimerkissä oletamme lieteveden tiivistyksen tapahtuvan rumpusiivilällä, jonka käytöstä lieteveden tiivistyksessä on eniten kokemusta. On oletettavaa, että uoman pituus ei voi olla kuinka pitkä tahansa, jotta yhdellä keräyskohdalla voitaisiin saada merkittävästi hyötyä tästä järjestelmästä. Tämä arvio tehdään niin, että uoma on pituudeltaan maksimissaan 50–70 m. Oletetaan, että järjestelmällä voidaan nostaa fosforin poistoteho 5 %:sta 25 %:iin, jolloin laitoksen fosforikuormitus pienenee 760 kg:sta 600 kg:aan.



Kuva; Martti Naukkarinen
Clewer Aquaculture

Kuva 6. Kala-allasta ilmastetaan keskeltä, joka saa aikaan pyörteen altaan pinnalta kohti reunoja ja niistä kohti pohjaa. Altaan pohjassa on keräyssuppilo, johon pyörteen kuljettama kiintoaine laskeutuu. Suppilo voidaan tyhjentää ajoittain tai jatkuvasti, jolloin kiintoaine saadaan talteen.



Kuva; Martti Naukkarinen
Clewer Aquaculture

Kuva 7. Kala-altaaseen muodostuvaa pyörrettä voidaan myös tehostaa sijoittamalla altaan reunoille rakenteita, joilla reunoista saadaan jyrkempiä. Pitkittäissuunnassa keräyssuppilo sijoitetaan altaan viimeisen kolmanneksen alueelle.

5.3.2. Kustannustarkastelu

Lasketaan uoma-altaan uusien lietetaskujen ja lieteveden käsittelyn kustannukset seuraavilla laitteilla ja toimenpiteillä:

- Pohjan pinnan tasoitus ja oikominen betonilla kiintoaineen keräysalueella
- Kourumainen poistovesitysrakenne edellä mainitun betonilaatan yhteyteen pohjan tason alapuolelle
- Virtauksen ohjaus kouruun, niin että imu on tasainen ja kalojen sekä kookkaampien kappaleiden pääsy on hyvin estetty
- Pohjapoiston johtaminen kiintoaineen keräykseen putkella sellaisella virtaamalla, ettei lietettä laskeudu putkistoon
- Pintavirtausta varten munkkirakenne
- Rumpusiivilä ja sen betoninen allas
- Huuhteluveden pumppaus ja putkitus kiintoaineen keräykseen
- Poistoputket
- Virtaaman mittaukset
- Ilmastinlaite ja puhallin
- Sähköasennukset ja tarvikkeet

Taulukko 4. Investoinnit maa-uoma-altaan kiintoaineen keräykselle ja jatkokäsittelylle.

Hankinta	Hinta, €/kpl	Kpl	Hinta yht
Maa- ja betonityöt	5 000	12	60 000
Poistokouru ja virtauksen ohjaus	4 000	12	48 000
Putki d=315	2 000	12	24 000
Munkki	2 000	12	24 000
Rumpusiivilä neljälle altaalle ja allas siivilälle	42 000	3	126 000
Lietteen pumppaus ja poistoputket	30 000	1	30 000
Kellutettu ilmastuslaite ilmalinjoineen	4 000	12	48 000
Puhallin ja äänieristykset (yhteinen neljälle altaalle)	3 000	3	9 000
Sähkötyöt ja mittaukset	24 000	1	24 000
Lietteen talteenotto laskeutus ja turvesuodatus	30 000	1	30 000
Asennustyöt	2 000	12	24 000
Yhteensä			447 000

Kuuden vuoden poistoajalla ja 5 %:n korolla vuotuiset kiinteät kustannukset ovat 88 000 €.

Käyttökustannuksia koituu sähköstä, lietteen loppusijoittamisesta ja laitteiston huoltotyöstä. Sähköteho allasta kohti arvioidaan olevan ilmastuksen osalta noin 1,5 kW ja siivilöinnin ja lietteen pumppauksen osalta noin 0,5 kW eli yhteensä 2,0 kW. Käyttöajaksi arvioidaan puoli vuotta, jolloin saadaan altaalle energiankulutukseksi 8 640 kWh kasvatuskaudessa eli yhteensä koko laitokselle noin 105 000 kWh. Sähkön hinnalla 0,12 €/kWh energiakustannus on 12 600 € vuodessa. Lietteen käsittely esimerkiksi pellolle lannoitteeksi sopivaksi ja ajo maksaa vuodessa noin 15 000 € ja muut huoltotyöt noin 4 000 €. Pääoma- ja käyttökustannukset olisivat yhteensä noin 120 000 euroa vuodessa, mikä nostaisi tuotantokustannusta 0,60 euroa per kg kalaa. Poistetun fosforin kustannus olisi 748 euroa/kg.

5.4. Laitoksen saneeraus pyöröaltaiksi

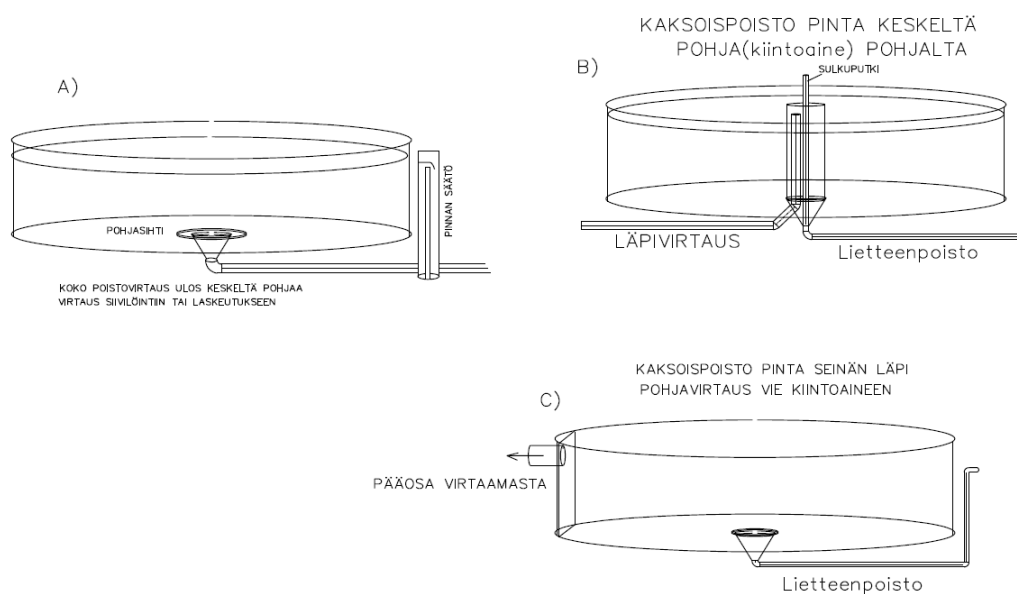
5.4.1. Tekninen kuvaus

Tässä vaihtoehdossa maauoma-altaiden tilalle rakennetaan samaan kasvatusmäärään pystyvät pyöröaltaat. Kuvataan ensin tarvittavan allaskapasiteetin arviointia, koska altaat pohjatyöt ja altaat olisivat suurin kustannuserä.

Kasvatukseen käytetään pyöröaltaita, joiden läpimitta on 12 ja korkeus 2,5 metriä. Vesitilavuus on 270 m³. Laitos tuottaa kaksi kalaerää ja suurin massa laitoksella on noin 100 000 kg, jolloin allasta kohti on kalaa 7 000 kg ja kalatiheys on noin 26 kg/m³.

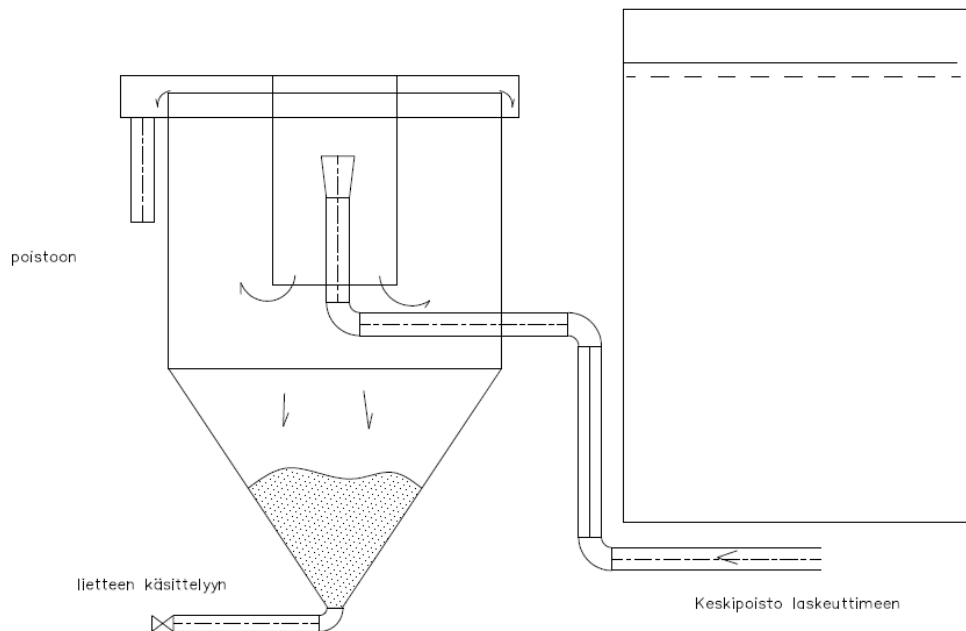
Hapenkulutus on allasta kohti noin 2 kg tunnissa. Oletetaan, että ilman lisähapetta kaloille olisi käytettävissä 3 mg per virtaava litra. Tässä tapauksessa tarvitaan virtaamaksi 660 m³ tunnissa eli 180 l/s. Vettä tarvittaisiin siis ilman lisähapetusta 2700 l/s. Jaetaan kolmen altaan ryhmiin, joten ryhmän virtaama olisi 540 l/s. Veden hapenlisäyksellä voitaisiin lisätä kasvatuksen turvallisuutta ja tarvittaessa nostaa kalatiheyttä, mikäli toimitukset esimerkiksi viipyvät ja massa kasvaa enemmän. Varaudutaan tuplaamaan käytettävissä olevan hapen määrä eli lisää noin 1 000 kg vuorokaudessa. Maksimi hapentarve kestää noin 3 viikkoa. Käyttö on lyhytaikaista, mutta niin suurta, että nestehappi on käyttökelpoisen vaihtoehto. 20 m³ säiliö täytetään kerran kolmessa viikossa.

Pääosa vedestä poistuu altaiden sivusta eikä sitä käsitellä. Altaan keskeltä pohjasta poistettu vesi ohjataan rumpusiivilälle. Rumpusiivilän huuhteluvesi käsitellään laskeuttaen ja sen ylivuoto turvesuodattimella. Oletetaan, että putouskorkeutta virtauksen aikaansaamiseksi on kaikkiaan käytettävissä 1 m. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että altaat on pumpattava tyhjäksi ja ne pitää pystyä pitämään siten painotettuna, etteivät ne pohjaveden nosteen vaikutuksesta tyhjinä nouse kellumaan. Laskelmassa asennetaan kolme allasta samaksi monoliitiksi yhteiseen laattaan kiinni. Nostovoima on hyvin suuri, mikäli altaan ulkopuolella on metrin verran vettä ja yksi allas tyhjennetään, noste repii allasta ylös 108 tonnin voimalla. Useat uoma-allaslaitokset ovat melko pienen putouskorkeuden ja korkean pohjaveden takia hankalia muuttaa pyöröaltaiksi.



Kuva 8. A) Pyöröaltaan koko poistovirtaus voidaan johtaa ulos keskeltä pohjaa. B) Pyöröaltaaseen voidaan tehdä myös kaksoispoisto keskeltä pohjaa ja keskeltä pintaa, jolloin pohjasta poistuvassa vedessä on suurempi

kiintoainepitoisuus. C) Kaksoispoisto voidaan tehdä myös siten, että kiintoainepitoinen vesi poistuu keskeltä pohjaa ja pääosa virtaamasta altaan reunalta seinän läpi.



Kuva 9. Kiintoainepitoinen vesi pyöröaltaan pohjalta voidaan ohjata pystyselkeyttimelle. Pystyselkeyttimessä vesi johdetaan kartion keskeltä kohti pohjaa, josta se kulkeutuu reunoja myöten ylös ja pois kartiosta. Raskas kiintoaine laskeutuu kartion pohjalle, josta se saadaan talteen.

5.4.2. Kustannustarkastelu

Edellä kuvattuun tuotantoon tarvitaan viisi kappaletta kolmen altaan moduulia. Kussakin moduulissa on seuraavia komponentteja:

- Altaiden alueella maanvaihto ja salaojitus
- Altaat yhdistävä pohjalaatta
- Betonielementeistä tehdyt altaat
- Tulo- ja poistovesitykset putket
- Sihdit altaiden pohjalla ja sivussa
- Rumpusiivilä ja sen betoninen allas
- Hätähapetus: letkut ja ilmastinkivet
- Altaita ympäröivät täytöt
- Asennukset

Taulukko 5. Investoinnit laitoksen saneeraukseen pyöröaltaisiin.

Hankinta, kolmen altaan ryhmä	Hinta, €/kpl	Kpl	Hinta yht.
Maanpinnan tasaus ja salaoitus	10	2 500	25 000
Pohjalaatta, 250 mm betoni	450	125	56 250
Betoniset pyöröallaselementit	339	150	50 850
Aukot putkituksille sisään ja ulos	100	9	900
Elementtien asennus	48	200	9 600
Poistokupit ja sihti pohjavirtaukselle	700	3	2 100
Sivusihti	500	3	1 500
Tulovesiputki	45	140	6 300
Sivupoistoputki	45	150	6 750
Pohjapoisto	12	100	1 200
Pohjapoisto kokoojaputki	30	60	1 800
Ympäristöjen täytöt	10	600	6 000
Muut maatyöt, tiivistys ym.	5	600	3 000
Rumpusiivilä, 170 l/s x 60 mikronia	30 000	1	30 000
Siiviläsäiliö betonia	5 000	1	5 000
Kalojen keräilylaitteet	10 000	1	10 000
Turvahapetus	250	24	6 000
Virtaamanmittari	1 500	3	4 500
Asennustyö	8 000	3	24 000
Yhteensä			250 750

Yhden moduulin kustannus on noin 251 000 euroa, ja 200 tonnin tuotantoon tarvittavan viiden moduulin kustannus 1,25 miljoonaa euroa. Kaikille yhteisiä hankintoja ovat vielä nestehappitorni ja turvesuodatin. Hapentarve on melko vähäinen eikä paineliuotusta tarvita. Koko saneerauksen investointikustannus on yhteensä 1,29 milj. euroa ja pääomakustannukset 200 tonnin tuotannossa 255 000 euroa vuodessa eli 1,28 euroa per kg.

Energiankulutukseksi arvioidaan 27 000 kWh ja kustannukseksi siten noin 3 200 € vuodessa. Lietteen käsittely esimerkiksi pellolle lannoitteeksi sopivaksi ja ajo maksaa vuodessa noin 15 000 € ja muut huoltotyöt noin 4 000 €. Pääoma- ja käyttökustannukset olisivat yhteensä noin 277 000 euroa vuodessa, mikä nostaisi tuotantokustannusta 1.39 euroa per kg kalaa. Poistetun fosforin kustannus olisi 845 euroa/kg.

6. Uusia avauksia uomalaitosten ravinnekuormituksen kehittämiseksi

6.1. Yleistä

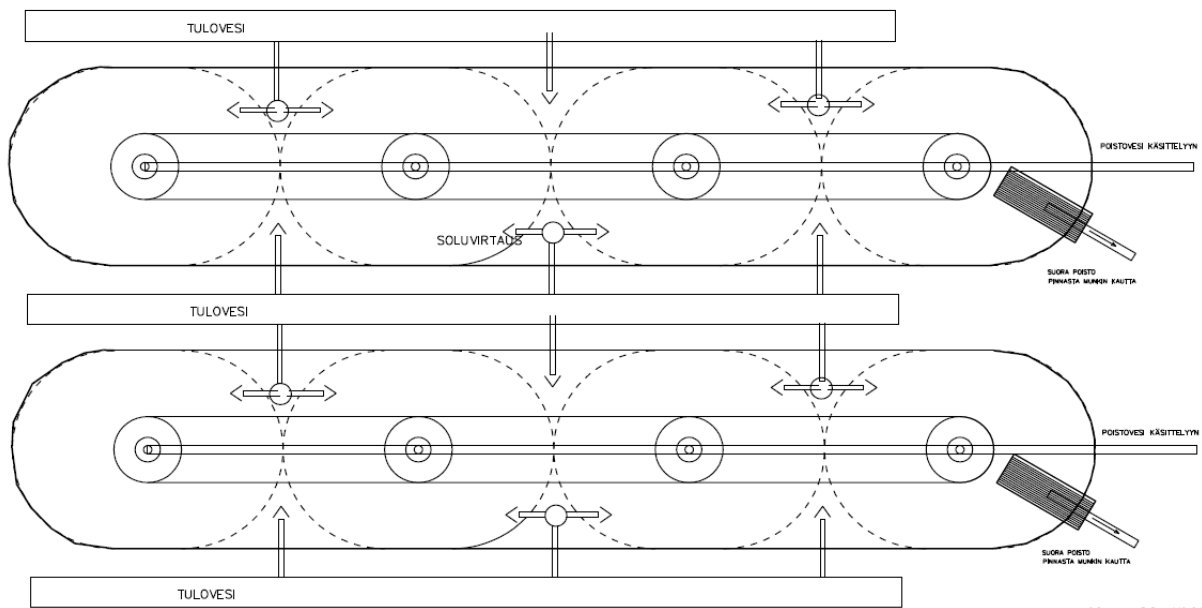
Koska uoma-altaiden virtaus on keskimäärin hyvin hidasta, kiintoainetta laskeutuu myös altaan pohjalle. Altaissa on kalojen uinnin aiheuttamia pyörteitä, mitkä siirtelevät kiintoainepartikkeleita paikasta toiseen ja useimmin partikkelit päätyvät lopulta alueille, minne ei synny syystä tai toisesta näitä virtauksia. Tätä ilmiötä on hyödynnetty perinteisessä lietetaskuihin perustuvassa kiintoaineen keräämisessä. Altaiden pohjille on sijoitettu taskuja partikkelien laskeutumista ja keräämistä varten niin, ettei kalojen liikkuminen häiritsisi ja että virtailu pyöräyttelisi partikkeleita taskun suojaan. Uomien muoto ja niiden poikkileikkaukset sekä altaan virtaama vaikuttavat kiintoaineen kertymiseen. Paikalliset havainnot laitoksella ovat siten tärkeitä. Jos altaat ovat hyvin pitkiä, tulee kiintoaineen paikallisten keräyspisteiden sijoittaminen vaikeaksi, koska ruokintaa halutaan yleensä tehdä koko altaan pituudella. Lyhyemmissä altaissa voitaisiin ruokinnalle rajoittaa esimerkiksi toinen pääty altaasta, jolloin keräyksen osumatarkkuus voitaisiin saada paremmaksi.

Usein tällainen rauhallinen kohta on myös altaan luiskissa vesipinnan rajassa oleva kapea kaista, jossa voi olla nähtävissä nauhamainen kertymä kalan ulostepartikkeleita. Tätä ilmiötä voitaisiin ehkä käyttää hyödyksi sijoittamalla kourumaisia keräimiä luiskiin. Lietevettä tulisi kerätä imuroimalla tai aikaansaamalla virtaus pitkin kourua kiintoaineen talteenottoon. Pitkissä ja muodokkaissa uomissa tämän tekeminen on hankalaa, eikä menetelmää ole kokeiltu.

Ilmastuksella voidaan aikaansaada sopivia virtauksia ja samalla tuoda kala-altaaseen happea ja poistaa hiilidioksidia. Ilmastimien avulla kiintoainetta saatettaisiin saada kertymään niiden alle lietetaskuihin tai kouruihin, joista lietevedettä viedään jatkuvan pienemmän virtauksen mukana pois. Lietetasku voisi olla suppilo tai jyrkkäseinäinen laatikko v-muotoisella pohjalla. Menetelmää ei ole kokeiltu, mutta sillä hyvin todennäköisesti päästäisiin suurempaan fosforin ja orgaanisen aineksen reduktioon kuin perinteisillä lietetaskuilla.

6.2. Soluvirtaus

Pyörivää virtausta hyödyntävää soluihin jaettua uoma-allasta on testattu ja käytetty betoni-uoma-altaissa Yhdysvalloissa (Kuva 10). Ratkaisussa vesi johdetaan altaaseen useasta kohdasta altaan reunoilta niin, että altaaseen syntyy useita pyöriviä ”akanvirtoja”. Näiden akanvirtojen tai solujen keskelle rakennetaan lietetaskut. Liete voitaisiin kerätä altaan alla tai vedenpinnan päällä olevia putkistoja pitkin jatkokäsittelyyn. Maa-altaan loivat luiskat heikentävät pyörimistä, mutta sopivilla apurakenteilla virtauksia voisi saada parannettua. Menetelmää kannattaisi pilotoida tuotantomittakaavan maa-uoma-altaassa Suomessa.

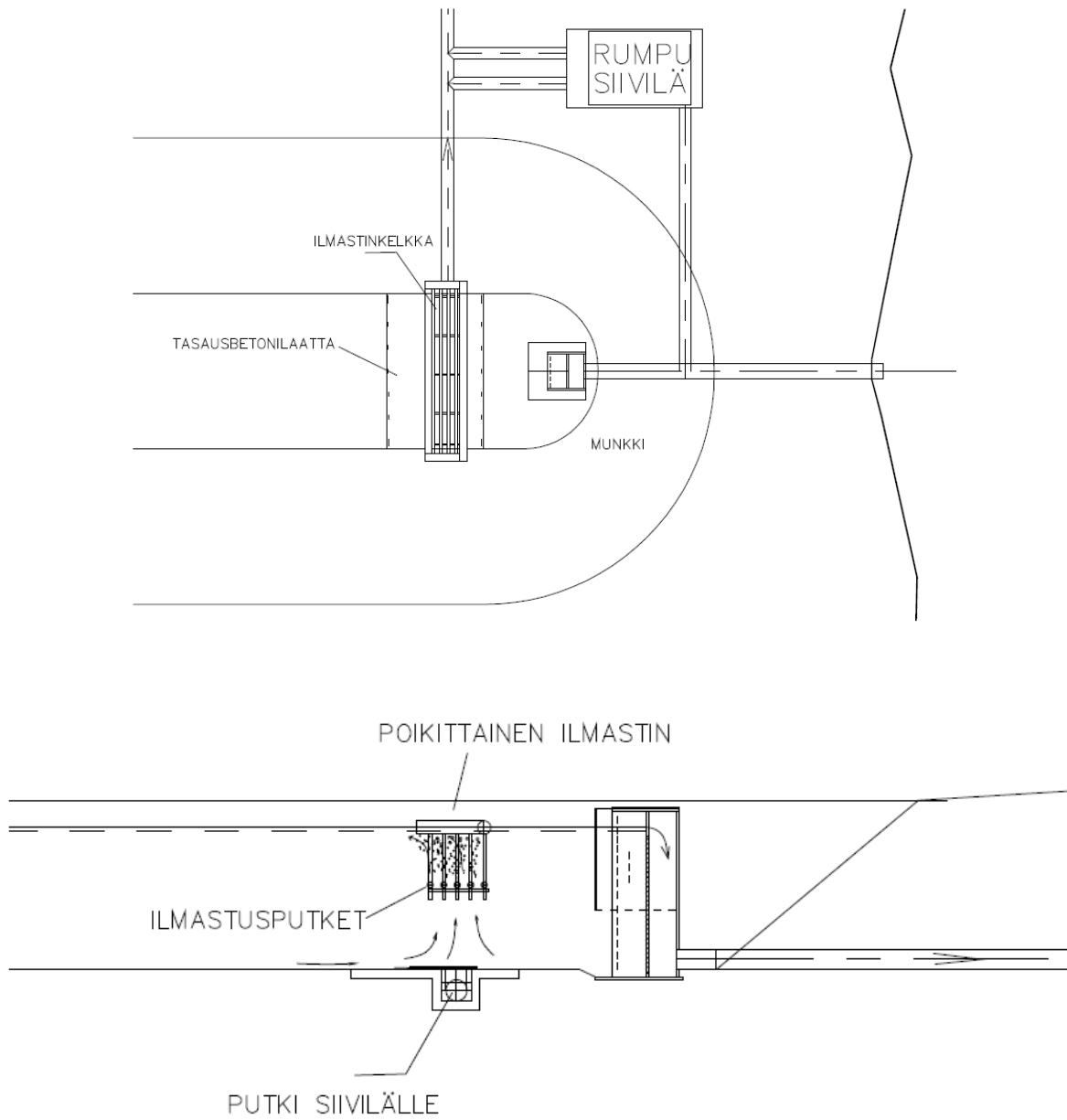


Kuva 10. Uoma-allas voidaan jakaa soluihin, jossa sivuun sijoitetuilla suuttimilla luodaan altaaseen pyörteitä, joiden pohjalta voidaan ottaa talteen kiintoaine. Tehtyjen pyörteiden lisäksi uoma-altaan päävirtaama kulkeutuu altaan suuntaisesti.

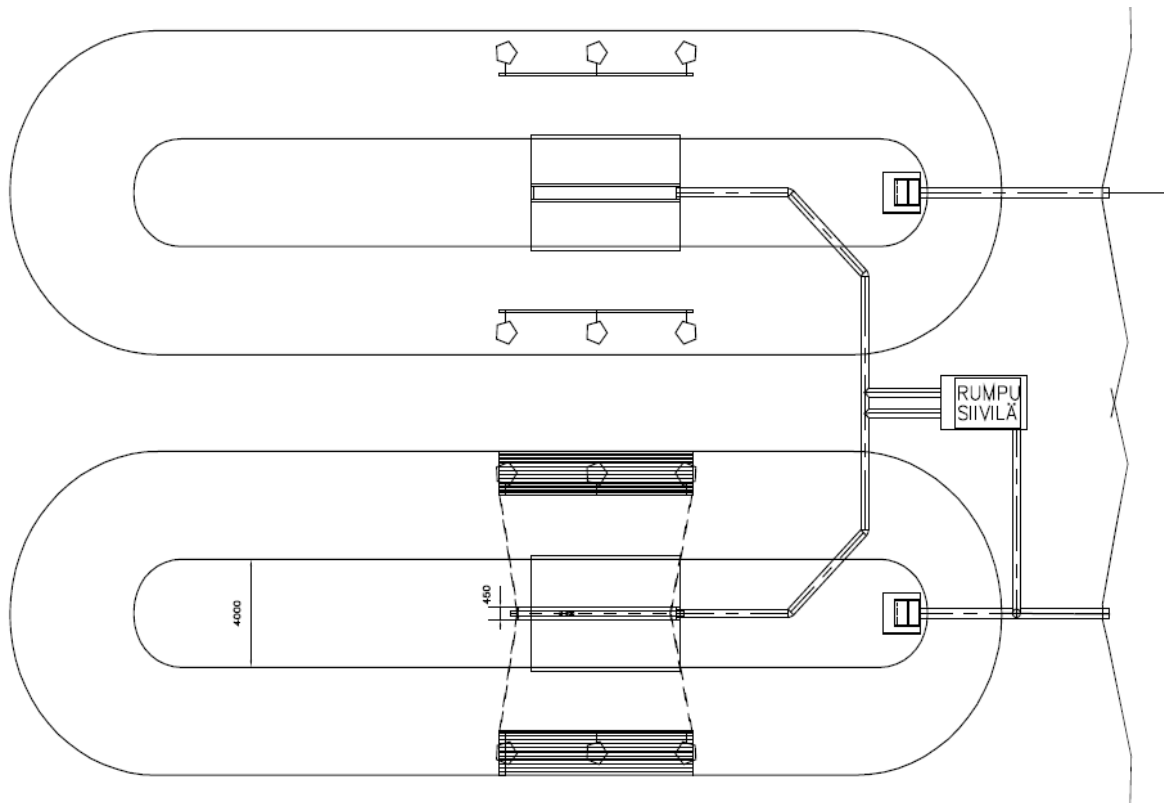
6.3. Laskeutuksen ja siivilöinnin yhdistäminen

Laskeuttaminen ja siivilöinti voidaan, ainakin periaatetasolla, yhdistää monella tavalla. Maa-altaaseen voitaisiin rakentaa altaan pituussuuntaiset pohjapoistot, joiden avulla virtaaman mukana viedään laskeutuvat partikkelit saman tien altaasta siivilöintiin (Kuvat 11–13). Pituussuuntaisten poistojen rakenne voi olla sellainen, että nuottaus on mahdollinen ja poistojen puhdistaminen käy yksinkertaisesti. Tällaiset rakenteelliset yksityiskohdat on hyvä muistaa työskentelyolosuhteiden ja kalojen hyvinvoinnin kannalta kaikissa lietteenpoiston ratkaisuissa.

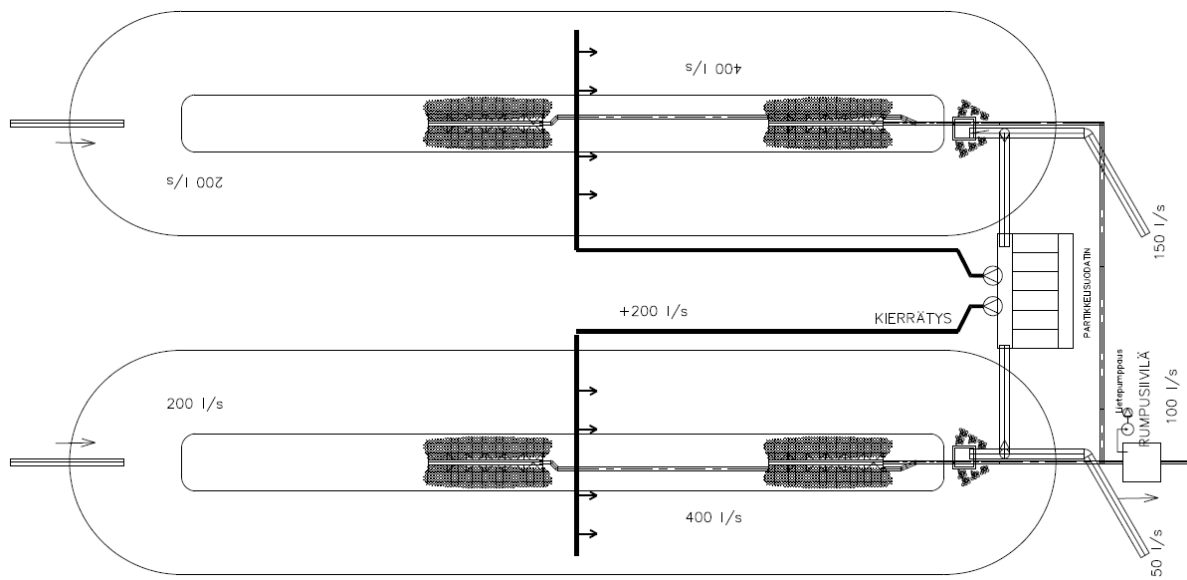
Siivilöintiä voidaan käyttää suspentoituneen eli huonosti laskeutuvan kiintoaineiden keräämiseen koko altaasta poistuvasta vesijakeesta. Siivilöinnillä voidaan myös tiivistää laskeutettua lietevedettä. Nämä tavat voidaan myös toteuttaa yhtä aikaa eri siivilöillä, jolloin saadaan mahdollisesti tarkemmin hyödynnetyksi erikokoisten siivilöiden kapasiteetit; pienempi kapasiteetti riittää lieteveden tiivistämiseen kun taas koko poistovesijakeen käsittely vaatii suuret rumpusiivilät. Pitkälle viety poistoveden käsittely on esitetty kuvassa 14.



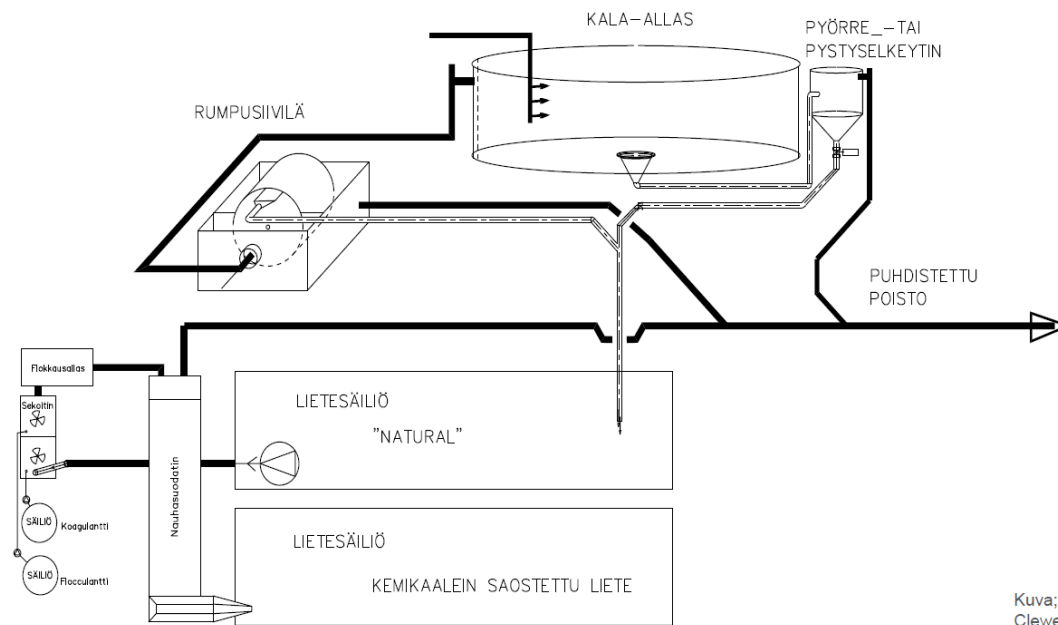
Kuva 11. Altaan pohjissa olevista lietteen keräyssuppiloista ja pohjapoistoista voidaan vesi johtaa edelleen rum-pusiivilöille, joilla saadaan kiintoainetta erotettua vedestä.



Kuva 12. Kala-altaassa oleva lietetasku voi olla myös pitkittäissuunnassa uoma-altaaseen nähden.



Kuva 13. Uoma-allas voidaan myös jakaa osiin ja niihin sijoittaa useampia lietetaskuja. Osa vedestä voidaan myös pumpata altaan päältä takaisin uoma-altaaseen, jolloin voidaan kierrättää osa vedestä kaloille.



Kuva; Martti Naukkarinen
Clewer Aquaculture

Kuva 14. Kaikkia edellä mainittuja menetelmiä voidaan yhdistää, jolloin saadaan aikaan tehostettu kiintoaineen poisto. Kuvassa pyöröaltaan pohjasta poistettu vesi kulkeutuu pysty- tai pyörreselkeyttimen läpi sekä päävirtaama altaan sivusta rumpusiivilän läpi. Selkeyttimeltä ja siivilältä kerätty kiintoainepitoinen vesi ohjataan lietesäiliöön, josta se edelleen käsitellään kemikaaleilla ja nauhasuodattimella. Näin saadaan aikaan saostettua lietettä.

7. Johtopäätökset

BAT-vertailuasiakirjoja eli BREF-dokumentteja (BAT Reference Document) ei ole tehty kalankasvatuksesta. Parhaan käyttökelpoisen tekniikan määrittelyä ei koordinoita, vaan määrittelyä tehdään eri tavoilla erilaisiin olosuhteisiin, tuotantotapoihin, maihin jne. Suomalaisten olemassa olevien sisävesilaitostenkin ravinnekuormituksen vähentämisen mahdollisuudet riippuvat paikallisista olosuhteista mm. käytössä olevan veden ja pudotuskorkeuden määrästä ja maaperän rakennettavuudesta. Uusien laitojen osalta vaadittava tekniikka voitaisiin määritellä selvemmin.

Suomessa perinteisen läpivirtauskasvatuksen poistoveden puhdistuksen kehitystyö on lähes loppunut jo 30 vuotta sitten. Suomeen osittain sovellettavissa olevaa uutta tietoa on tuotettu erityisesti Tanskassa ja Yhdysvalloissa. Tähän raporttiin on koottu tietoa sekä olemassa olevien laitosten että uusien laitosten ravinnekuormituksen pienentämisen teknisistä keinoista.

Kolmen menetelmän vertailussa poistetun fosforikilon kustannus oli noin 600–800 euroa. Pienimmilläänkin fosforikuormituksen pienentäminen olisi noin 10 kertaa kalliimpaa kuin peltojen kipsikäsitellyllä saavutettava fosforikuormituksen aleneman hinta 60–70 euroa per kg fosforia (Ollikainen ym. 2018). Näin suuri ero toimenpiteen kustannustehokkuudessa kyseenalaistaa maaomalaitosten saneerausten ympäristöpoliittisen järkevyyden.

Ravinnekuormituksen pienentäminen olisi tämän selvityksen tehokkainta rakentamalla kullekin laitokselle räätälöity hapetusjärjestelmä.

Maaomalaitoksen lietetaskujen saneeraus nosti tuotantokustannuksia 0,60 €/kg. Jos laitos tuottaisi perattua kalaa, kustannuksen nousu perattua kalakiloa kohden olisi vielä 20 % suurempi. Tämä saattaisi olla niin paljon, että toiminta olisi keskimäärin tappiollista ja laitos lopettaisi toiminnan. Laitoksen muuttaminen pyöröaltauksiin perustuvaksi olisi niin kallista, etteivät sen toteutusta yritykset edes harkitsisi vaan toiminta lakkaisi.

Aito kuormituslupa ilman tuotannon ja rehunkäytön rajoitusta pienentäisi jonkin verran kuormituksen alentamisen kustannusta.

Raportin loppuksi on esitetty ajatuksia ratkaisuista, joita mielestämme voisi kehittää edelleen ja pilotoida lähellä tuotantomittakaavaa.

Viitteet

- Aarnipuro, Y. 1999. Kalaviljelyaltaat; materiaalit ja rakenteet. *Kala- ja riistaraportteja* 168.
- Aarnipuro, Y. 2004. Tuloveden johtaminen ja käsittely. *Kala- ja riistaraportteja* 302.
- Aquaetreat 2007. Manual on effluent treatment in aquaculture: science and practice. EU-projektin julkaisu (Aquaetreat – Improvement and Innovation of Aquaculture Effluent Treatment Technology).
- Bergheim, A. & Brinker, A. 2003. Effluent treatment for flow through systems and European Environmental Regulations. *Aquacultural Engineering* 27: 61–77.
- Bregnballe, J. 2017. Suullinen tieto, esitys DanAqua “Farmer’s Day” Aalborg 11.10.2017.
- Brinker, A. & Rösch, R. 2005. Factors determining the size of suspended solids in a flow-through fish farm. *Aquacultural Engineering* 33: 1–19.
- Brinker, A., Koppe, W. & Rösch, R. 2005. Optimised effluent treatment by stabilised trout faeces. *Aquaculture* 249: 125–144.
- Brinker A., Berg R. & Rösch, R. 2006. Neue Methoden in der Forellenzucht: Wege zur Minimierung der Ablaufwasserbelastung – Grundlagen und Techniken. In Berichte zur Fischereiforschung Baden-Württemberg (ed. by Staatl. Lehr- und Versuchsanstalt Aulendorf), Druckerei Marquard, Aulendorf, Germany. 55 pp. *Sindilariun (2007) mukaan*.
- Buyuksonmez, F., Rynk, R., Hess, T.F. & Fornshell, G. 2005. Composting characteristics of trout manure. *Journal of residuals science and technology* 2: 149–157.
- Buzby, K.M., West, T.P., Waterland, N.L. & Lin, L.-S. 2017. Remediation of Flow-Through Trout Raceway Effluent via Aquaponics. *North American Journal of Aquaculture* 79: 53–60.
- Christianson L., Lepine, C., Sharrer, K. & Summerfelt, S. 2016. Denitrifying bioreactor clogging potential during wastewater treatment. *Water Research* 105: 147–156.
- Dalsgaard, J. von Ahnen, M., Naas, C., Pedersen, P.B. 2018. Nutrient removal in a constructed wetland treating aquaculture effluent at short hydraulic retention time. *Aquaculture Environment Interactions* 10: 329–343.
- Davidson, J. & Summerfelt, S.T. 2005. Solids removal from a coldwater recirculating system- comparison of a swirl separator and a radial-flow settler. *Aquacultural Engineering* 33: 47–61.
- Ebeling, E. M. & Vinci, B. 2006. Solid Capture. Recirculation Aquaculture Systems short course. <https://cals.arizona.edu/azaqua/ista/ISTA7/RecircWorkshop/Workshop%20PP%20%20&%20Misc%20Papers%20Adobe%202006/5%20Solids%20Capture/Solids%20Control.pdf>
- Eskelinen, P. 1984. Fosforiainetase kirjolohella. *Vesihallituksen monistesarja* 241: 33–42.
- Eskelinen, P. 1988. Fosforin välitön liukeneminen veteen kalanrehuista ja kalojen ulosteesta. *Vesitalous* 29: 10–13.
- Forsman, L. 2018. Vesiviljely 2017. *Luonnonvarakeskus, tilastot*.
- Fornshell, G. & Hinshaw, J.M. 2008. Better Management Practices for Flow-Through Aquaculture Systems. Teoksessa: Tucker & Hargreaves (eds.) – *Environmental Best Management Practices for Aquaculture*. Wiley-Blackwell.
- Heldbo J., R.S. Rasmussen ja S.H. Løvstad. 2013. Bat for fiskeopdræt i Norden. TemaNord 2013: 529. Pohjoismaisen ministerineuvoston raportti.
- Heldbo, J. & Meyer, S. 2016. Comparison of legal regulation and technology level requirements, for aquaculture facilities producing rainbow trout in freshwater, in selected European countries. Environmental Protection Agency. 180 p.
- Hollister, C., Bisogni, J. & Lehmann, J. 2013. Ammonium, Nitrate, and Phosphate Sorption to and Solute Leaching from Biochars Prepared from Corn Stover (*Zea mays* L.) and Oak Wood (*Quercus* spp.). *Journal of Environmental Quality* 42: 137–144.
- Huggins, T., Haeger, A., Biffinger, J. & Ren, Z. 2016. Granular biochar compared with activated carbon for wastewater treatment and resource recovery. *Water Research* 94: 225–232.
- Jobling, M. 1998. Feeding and nutrition in intensive fish farming. Teoksessa: Black & Pickering (eds.) - *Biology of farmed fish*. Sheffield Academic Press.

- Karttunen, E., Ritola, O., Matinvesi, J. 1988. Kalanviljelyn maauomalaitosten lietteen kerääntyminen ja hydrauliiikka : esitutkimus. Vesi- ja ympäristöhallinnon monistesarja nro 73. 54 s.
- Keränen, A. 2017. Water treatment by quaternized lignocellulose. Väitöskirja *Acta Universitatis Ouluensis C 608*.
- Lin, Y-F., Jing, S.-R., Lee, D.-Y. & Wang, T.-W. 2002. Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system. *Aquaculture* 209: 169–184.
- MacMillan, J.R., Huddleston, T., Woolley, M. & Fothergill, K. 2003. Best management practice development to minimize environmental impact from large flow-through trout farms. *Aquaculture* 226: 91–99.
- Marttila, H., Ronkanen, A.-K., Postila, H., Eskelinen, R., Palmer, K. & Klöve, B. 2016. Uutta tietoa vesiensuojelukosteikkojen merkityksestä. Esitys Vesistökuunnostusverkoston vuosiseminaarissa 2016.
- McDaniel, N. K., Sugiura, S. H., Kehler, T., Fletcher, J.W., Coloso, R.M., Weis, P. & Ferraris, R.P. 2005. Dissolved oxygen and dietary phosphorus modulate utilization and effluent partitioning of phosphorus in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) aquaculture. *Environmental Pollution* 138: 350–357.
- Milhazes-Cunha, H. & Otero, A. 2017. Valorisation of aquaculture effluents with microalgae: The Intergrated Multi-Trophic Aquaculture concept. *Algal Research* 24: 416–424.
- Naylor, S., Moccia, R.D. & Durant, G.M. 1999. The chemical composition of settleable solid fish waste (manure) from commercial rainbow trout farms in Ontario, Canada. *North American Journal of Aquaculture* 61: 21–26.
- Ollikainen, M., Ekholm, P., Punttila, E., Ala-Harja, V-, Riihimäki, J., Purolla, S., Kosenlus, A.-K. & Iho, A. 2018. Peltojen kipsikäsittely maatalouden vesiensuojelukeinona. SAVE raportti. Helsinki
- Renman, G., Renman, A., Pulkkinen, J. ja Vielma, J. 2019. Phosphorus removal from recirculating aquaculture systems (RAS) effluent by reactive column filters. Esitelmä European Aquaculture 2019-konferenssissa.
- Roque d'Orbcastel E., Blancheton, J.P. Boujard, T., Aubin, J., Moutounet, Y., Przybyla, C. & Belaud, A. 2008. Comparison of two methods for evaluating waste of a flow through trout farm. *Aquaculture* 274: 72–79.
- Schumann M., Unger, J. & Brinker, A. 2017. Floating faeces: Effects on solid removal and particle size distribution in RAS. *Aquacultural Engineering* 78: 75–84.
- Sindilariu, P.D. 2007. Reduction in effluent nutrient loads from flow-through facilities for trout production: a review. *Aquaculture Research* 38: 1005–1036.
- Sindilariu, P.D. Brinker, A. & Reiter, R. 2009. Factors influencing the efficiency of constructed wetlands used for the treatment of intensive trout farm effluent. *Ecological Engineering* 35: 711–722.
- Sørensen, M., Berge, G.M., Thomassen, M., Ruyter, B., Hatlen, B., Ytrestøyl, T., Aas, T.S. & Åsgård, T. 2011. Today's and tomorrow's feed ingredients in Norwegian aquaculture. *Nofima Reports* 52/2011.
- Summerfelt, S.T., Davidson, J. & Timmons, S.B. 2000. Hydrodynamics in the "Cornell-type" dual-drain tank. S. 160-166 *The Third International Conference on Recirculating Aquaculture*. Libey, G.S. & Timmons, M.B. (eds.).
- Tal, Y., Schreier, H.J., Sowers, K.R., Stubblefield, J.D., Place, A.R. & Zohar, Y. 2009. Environmentally sustainable land-based marine aquaculture. *Aquaculture* 286: 28–35.
- Timmons, M.B., Summerfelt, S.T. & Vinci, B.J. 1998. Review of circular tank technology and management. *Aquacultural Engineering* 18: 51–69.
- True, B., Johnson, W. & Chen, S. 2004. Reducing phosphorus discharge from flow-through aquaculture I: facility and effluent characterization. *Aquacultural Engineering* 32: 129–144.
- Turcios, A.E. & Papenbrock, J. 2014. Sustainable Treatment of Aquaculture Effluents – What Can We Learn from the Past for the Future? *Sustainability* 6: 836–856.
- Törnroos-Remes, A. 2018. Esitys Maa- ja metsätalousministeriön järjestämässä Sinisen biotalouden keskustelutilaisuudessa 20.3.2018. ” DEEP Baltic Sea Challenge – Kestävää liiketoimintaa

Itämerestä Innovaatiokilpailussa palkitut yritykset esittäytyvät: Levästä aurinkolaseihin vähentäen samalla Itämeren rehevöitymistä ja muovijätettä”.

Vielma, J., Kankainen, M., Setälä, J. Naukkarinen, M. & Koskela, J. 2006. Fosforikuormituksen alentamisen yritystaloudelliset vaikutukset kirjolohen kasvatuksessa sisävesialueella. *Kala- ja riistaraportteja 394*.

von Ahnen, M. 2016. New approaches to improve the removal of dissolved organic matter and nitrogen in aquaculture. Ph.D. thesis 2016, Technical University of Denmark.

WDOE (Washington State Department of Ecology). 2002. Evaluating criteria for the protection of freshwater aquatic life in Washington’s surface water quality standards: dissolved oxygen (draft discussion paper and literature summary). *WDOE*, Publication Number 00-10-071, Lacey.



luke.fi

Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000