



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 94/2025

# Kalankasvatuksen sivuvirrat hyötykäyttöön

Satu Ervasti, Jaakko Hiidenhovi, Mika Laakkonen, Ilmari Laaksonen,  
Jani Pulkkinen, Saija Rasi, Markku Vainio ja Jouni Vielma

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 94/2025

# **Kalankasvatuksen sivuvirrat hyötykäyttöön**

**Satu Ervasti, Jaakko Hiidenhovi, Mika Laakkonen, Ilmari Laaksonen,  
Jani Pulkkinen, Saija Rasi, Markku Vainio ja Jouni Vielma**



Euroopan unionin  
osarahioittama



KESKI-SUOMEN LIITTO

JÄMSÄ

**Viittausohje:**

Ervasti, S., Hiidenhovi, J., Laakkonen, M., Laaksonen, I., Pulkkinen, J., Rasi, S., Vainio, M. & Vielma, J. 2025. Kalankasvatuksen sivuvirrat hyötykäyttöön. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 94/2025. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 65 s.

Satu Ervasti ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0002-7489-7717>



ISBN 978-952-419-144-9 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-419-144-9>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Satu Ervasti, Jaakko Hiidenhovi, Mika Laakkonen, Ilmari Laaksonen, Jani Pulkkinen, Saija Rasi, Markku Vainio ja Jouni Vielma

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2025

Julkaisuvuosi: 2025

Kannen kuva: Jussi Judin / Luke

## Tiivistelmä

Satu Ervasti<sup>1</sup>, Jaakko Hiidenhovi<sup>2</sup>, Mika Laakkonen<sup>3</sup>, Ilmari Laaksonen<sup>2</sup>, Jani Pulkkinen<sup>4</sup>, Saija Rasi<sup>5</sup>, Markku Vainio<sup>2</sup> ja Jouni Vielma<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Luonnonvarakeskus, Rovaniemi

<sup>2</sup> Luonnonvarakeskus, Jokioinen

<sup>3</sup> Luonnonvarakeskus, Helsinki

<sup>4</sup> Paras Aqua Oy, Jyväskylä

<sup>5</sup> Luonnonvarakeskus, Jyväskylä

Kalojen kiertovesikasvatuksen tavoitteena on resurssitehokas kalantuotanto; suuri osa vedestä puhdistetaan ja pystytään käyttämään uudelleen, mikä vähentää puhtaan korvausveden käyttötarvetta. Samalla poistettavan, eli kalalaitoksen läpi käyneen veden määrä perinteisiin kalalaitoksiin verrattuna on pienempi, ja suljettu systeemi mahdollistaa ravinteiden poiston.

Kalalaitoksilla perinteisesti muodostuvien sivuvirtojen, kalanperkeiden ja kuolleiden kalojen lisäksi kiertovesilaitoksilla muodostuu kiintoainesta ja ravinteita sisältävää lietevedettä. Tavanomainen käsittelytapa on ollut lieteveden tiivistäminen saostuskemikaalien avulla ja syntyvän lietteen kompostointi. Ravinteiden käyttökelpoisuuden kannalta kyseinen käsittelyketju hukkaa tyypeä ja heikentää fosforin käyttökelpoisuutta kasveille - nykytilassa kiertovesilaitokset pääosin poistavat ravinteita niiden talteenoton sijaan.

Optimaalisesti kiertovesikasvatus mahdollistaa myös sivuvirtojen tehokkaan käsittelyn sekä niiden ravinne-, hiili- ja energiapotentiaalin hyödyntämisen. Raportissa käydään läpi keskeisimmät tekniikat ravinteiden talteenottoon, joiden avulla edistetään niin ympäristökuormituksen hillintää kuin ravinteiden kierrätystä. Lietejakeiden käsittelyyn voidaan hyödyntää esimerkiksi biokaasutekniikkaa eri reaktorityypeillä. Kalanperkeistä on mahdollista prosessoida erilaisia öljyjä, rehuja ja ravintolisiä. Haasteeksi tunnistettiin veteen liunneen fosforin sekä typen talteenotto.

Raportissa esitellään kaksi kalojen kiertovesikasvatukselle soveltuvaa kiertotalouskonseptia, joista ensimmäinen painottaa energiatehokkuutta ja toinen sivuvirtojen hyödyntämistä mahdollisimman korkean jalostusasteen tuotteina. Esimerkeissä tarkasteltiin 500 ja 5 000 tonnin vuosituotannon kalalaitoksia. Energiatuotantoon painottuva konsepti on prosesseiltaan yksinkertaisempi, mutta energiasta saatava taloudellinen hyöty on varsin maltillinen. Tuotteisiin painottuva konsepti sen sijaan tuottaisi taloudellisesti arvokkaampia tuotteita, mutta aiheuttaa suuremmat investointi- ja käyttökustannukset.

Raportti on koottu vuosina 2023–2025 toteutetussa Keski-Suomen liiton ja Jämsän kaupungin osarahoittamassa Kalankasvatuksen kiertotalouskonsepti (KiertoKala) -hankkeessa.

**Asiasanat:** kalankasvatus, kiertovesikasvatus, RAS, liete, lietevesi, sivuvirrat, perkeet, ravinteet, energia

## Abstract

Satu Ervasti<sup>1</sup>, Jaakko Hiidenhovi<sup>2</sup>, Mika Laakkonen<sup>3</sup>, Ilmari Laaksonen<sup>2</sup>, Jani Pulkkinen<sup>4</sup>, Saija Rasi<sup>5</sup>, Markku Vainio<sup>2</sup> ja Jouni Vielma<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Natural Resources Institute Finland, Rovaniemi

<sup>2</sup> Natural Resources Institute Finland, Jokioinen

<sup>3</sup> Natural Resources Institute Finland, Helsinki

<sup>4</sup> Paras Aqua Oy, Jyväskylä

<sup>5</sup> Natural Resources Institute Finland, Jyväskylä

The goal of recirculating aquaculture systems (RAS) is to produce fish in a resource-efficient manner. A large proportion of the water is purified and can be reused, reducing the need for clean replacement water. At the same time, the amount of water removed from the system is smaller than in traditional fish farms. The closed system also enables the removal of nutrients.

In addition to the traditional byproducts of fish farming, such as fish viscera and dead fish, recirculating aquaculture systems produce sludge containing solids and nutrients. The conventional treatment method is to thicken the sludge with coagulation chemicals and then compost it. However, this treatment process wastes nitrogen and reduces the usability of phosphorus for plants. Currently, recirculation facilities primarily remove nutrients rather than recover them.

Optimal recirculation enables efficient treatment of side streams and utilization of their nutrient, carbon, and energy potential. This report reviews key technologies for nutrient recovery that reduce environmental impact and promote recycling. For instance, biogas technology with various reactor types can treat sludge fractions. Fish viscera can be processed into oils, feeds, and supplements. Recovering phosphorus and nitrogen dissolved in water was identified as a challenge.

The report presents two circular economy concepts suitable for recirculating aquaculture systems. The first emphasizes energy efficiency, while the second focuses on using side streams to create value-added products. The examples examined fish farms with an annual production of 500 and 5,000 tons. The energy production concept is simpler in terms of processes, but the economic benefits of energy are modest. The concept focusing on value-added products, on the other hand, would produce more valuable products but incur higher investment and operating costs.

This report was compiled as part of the Circular bioeconomy concept of aquaculture (Kierto-Kala) project, carried out from 2023 to 2025, and co-funded by the Regional Council of Central Finland and the City of Jämsä.

**Keywords:** fish farming, recirculating aquaculture systems, RAS, sludge, sludge water, side streams, waste, nutrients, energy

# Sisällys

<b>1. Johdanto .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Kalankasvatus.....</b>	<b>8</b>
2.1. Kalojen kiertovesikasvatus .....	8
2.2. Kalankasvatuksen sivuvirrat.....	9
2.2.1. Perkeet ja kalateollisuudet sivuvirrat.....	9
2.2.2. Kuolleet kalat.....	10
2.2.3. Liete- ja vesijakeet .....	10
<b>3. Lainsäädäntö .....</b>	<b>13</b>
<b>4. Sivuvirtojen käsittelymenetelmät.....</b>	<b>15</b>
4.1. Liete- ja vesijakeet.....	15
4.1.1. Biokaasuteknologia.....	15
4.1.2. Kompostointi.....	17
4.1.3. Liukoisten ravinteiden talteenotto .....	18
4.2. Kokeet vesi- ja lietejakeilla.....	22
4.2.1. Lietejakeiden biokemiallinen metaanintuottopotentiali .....	22
4.2.2. Lieteveden käsittely UASB-reaktorilla.....	25
4.2.3. Liukoisen fosforin talteenotto biohiilen ja poloniitin avulla .....	28
4.3. Perkeet ja kuolleet kalat.....	29
4.3.1. Perinteiset menetelmät.....	29
4.3.2. Uudet sovellukset.....	30
4.3.3. Öljyn erotus.....	31
4.3.4. Proteiinijakeiden tuotto.....	34
4.3.5. Proteiinihydrolysaattien tuotto.....	34
4.3.6. Entsyymien tuotto.....	36
<b>5. Kiertotalouskonseptit.....</b>	<b>37</b>
5.1. Kalalaitoksen kuvaus .....	38
5.2. Energiaskenaario.....	42
5.2.1. Energiatase .....	42
5.2.2. Ravinteiden hyödyntäminen.....	44
5.2.3. Taloudellisuus.....	45
5.3. Tuoteskenaario .....	46
5.3.1. Energiatase .....	47
5.3.2. Ravinteiden hyödyntäminen.....	49

5.3.3. Taloudellisuus.....	50
5.4. Yhteenvedo konseptitarkastelusta.....	51
<b>6. Johtopäätökset.....</b>	<b>54</b>
<b>Viitteet.....</b>	<b>56</b>
<b>Liitteet .....</b>	<b>64</b>

# 1. Johdanto

Kotimaisen ruuantuotannon tavoitetila on siirtyä kohti kala- ja kasvisperäistä ruokavaliota, jolloin ruuantuotannon hiilijalanjälki laskee mutta myös kansalaisten terveys ja hyvinvointi paranee. Kalatalouden omavaraisuusaste on kuitenkin heikko, sillä suomalaisten kalankulutuksesta 66 % on ulkomailta tulevasta kalasta peräisin. Kotimaista tuotantoa voitaisiin nostaa kalankasvatusta lisäämällä ja edistämällä vajaasti hyödynnettyjen kalalajien kulutusta.

Kalankasvatuksen tuotantoa ei ole viime vuosina saatu nostettua tavoitteista huolimatta, sillä kalankasvatuksesta tulevat ravinteet voivat lisätä rehevöitymisvaikutuksia matalilla ja herkällä vesialueilla, jolloin uusien tuotantolupien saaminen on ollut vaikeaa. Uudet kalankasvatuksen teknologiat voivat mahdollistaa rehevöitymisvaikutuksen minimoimisen, joista kalojen kierto-vesikasvatus on noussut lupaavaksi menetelmäksi. Kalojen kierto-vesikasvatuksessa vesi kiertää kala-altaiden ja vedenkäsittelyjärjestelmän läpi, jolloin vedestä poistetaan kiintoainetta ja typpi muutetaan nitraattimuotoon. Veden kierrätyksen ansiosta kaloille otetaan uutta vettä jopa alle prosentin verrattuna perinteiseen kalankasvatukseen. Tällöin poistuvat vesimäärät ovat pieniä ja ravinteet ovat konsentroituneena, joka mahdollistaa niiden poistamisen tai jopa hyötykäytön. Vaikka kalojen kierto-vesikasvatuksella saadaan ravinnepäästöjä pienennettyä, on veden kierrättämisen ja vedenkäsittelytekniikan takia energiankulutus ja hiilijalanjälki perinteistä kalankasvatusta suurempaa. Tämän lisäksi suuret investointi- ja käyttökustannukset haastavat kierto-vesikasvatuksen taloudelliseen kannattavuuteen pääsemistä. Kalankasvatuksen sivuvirtojen paremmalla hyödyntämisellä voitaisiin ottaa askel kohti parempaa taloudellista kannattavuutta.

Erilaisissa kiertotalouskonsepteissa on yleensä taustalla ankkurilaitos, jonka sivuvirtojen ympärille lasketaan, selvitetään, ja suunnitellaan sopivat toimijat ja yritykset. Vaikka kalojen kierto-vesikasvatuksessa puhtaan veden käyttö on perinteistä kalankasvatusta pienempää, on vesimäärät silti suuria verrattuna muihin kiertotalouden ympärille muodostettaviin sivuvirtoja hyödyntäviin toimijoihin, kuten kasvihuoneisiin tai hyönteisten kasvattamiseen. Eri toimijoiden yhteensovittamisen takia kierto-vesikasvatus ei ole osoittautunut houkuttelevaksi vaihtoehdoksi osana kiertotalouden konsepteja (Lokka ym. 2021; Leppänen ym. 2018). Mikäli kalankasvatustaloksesta nostettaisiin kiertotalouskonseptin ankkurilaitokseksi, voisi sivuvirtoja hyödyntävät toimijat optimoida vesi- ja materiaalivirtoja varten, joka voisi tehdä konseptista houkuttelevamman toteuttaa.

Kalankasvatuksen pääasialliset sivuvirrat jakaantuvat orgaanisiin ja epäorgaanisiin sivuvirtoihin. Orgaanisista sivuvirroista tärkeimmät ovat kalojen liete, fileeraus- ja perkuujäännös, sekä mahdolliset kuolleet kalat. Epäorgaanisista sivuvirroista tärkeimmät ovat poistovedessä olevat typpi ja fosfori. Kiertotalouden kannalta on tärkeää tarkastella myös kalalaitoksen tuotantopanoksia, sillä rehut, sähkö ja lämpö, sekä vesi ovat oleellisia ympäristöystävällisen kalankasvatuksen kannalta. Tässä raportissa esitellään kalankasvatuksen sivuvirrat sekä niiden hyötykäytön mahdollistavat menetelmät. Sivuvirtojen määrät ovat tärkeässä roolissa niiden hyötykäytön kannattavuuden kannalta ja tässä raportissa tarkastellaan kahden eri kokoluokan kalankasvatustaloksesta sivuvirtojen hyödyntämistä (kalankasvatuksen tuotantokapasiteetti 500 ja 5 000 tn).

## 2. Kalankasvatus

### 2.1. Kalojen kiertovesikasvatus

Kalojen kiertovesikasvatuksen peruseräkkeet ovat jo vuosikymmeniä vanhoja, mutta vasta 2000-luvun aikana menetelmä on alkanut yleistymään. Kiertovesikasvatuksessa käytetään lähes suljetun vesikierron periaatetta, jolloin suurin osa vedestä käsitellään eri tekniikoilla ja kierrätetään uudelleen kasvatusalaksiin. Tällöin laitoksen vedentarve pienenee ja poistettava vesi voidaan puhdistaa tehokkaasti ja tuotantomäärää kohden rehevöittävät päästöt vähenevät. Kierrätettävä vesimäärä mahdollistaa ympärivuotisen veden lämpötilan säätämisen, jolloin kasvatusolosuhteet ovat tasaiset sekä ne saadaan optimoitua kasvatettavalle lajille. Vähän vettä käyttävä laitos voidaan perustaa myös sellaisille alueille, jossa perinteistä tekniikkaa käyttävää laitosta ei veden vähyyden tai epäsuotuisien lämpötilojen vuoksi voida rakentaa.

Vaikka kiertovesilaitoksen vedentarve on pientä perinteiseen kasvatukseen verrattuna, veden saannin varmistaminen, esimerkiksi lähde, pohjavesi tai laadukas pintavesi, on kiertovesilaitoksellekin tärkeää. Kiertovesilaitosten tekniikka vaatii paljon investointeja sekä energiaa, joten synergia teollisuuden, valmiin infrastruktuurin ja palveluiden kanssa alentaisivat kustannuksia. Tällaisia synergioita hyödyntäviä laitoksia on kuitenkin vielä vähän.

Kiertovesikasvatuksen vedenkäsittelyprosessissa kaloista ja rehusta peräisin oleva kiintoaine poistetaan, proteiiniaineenvaihdunnasta tuleva ammoniakkityppi muutetaan haitattomampaan muotoon nitraatiksi, sekä kalojen erittämä hiilidioksidi ilmastetaan pois (Kuva 1). Kiintoaineen poisto toteutetaan yleensä laskeuttamalla tai erilaisilla suodatukseen perustuvilla tekniikoilla. Ammoniakkityppi on pieninäkin pitoisuuksina haitallista kaloille, joten se muutetaan bakteerien avulla biologisissa suodattimissa nitraatiksi. Hiilidioksidi poistetaan vedestä ilmastamalla joko valutustornien avulla tai pumppaamalla ilmaa veteen. Kyseisellä prosessilla saadaan nostettua myös veden happipitoisuutta, mutta korkean liuennon hapen kulutuksen takia laitoksilla veteen lisätään myös puhdasta happea. Kierrätettävää vettä voidaan tarpeen mukaan puhdistaa myös lisää, esimerkiksi desinfioidulla tai poistamalla vedestä mikropartikkeleita proteiiniskimmereiden avulla. Kiertovesikasvatuksessa uutta vettä käytetään korvaamaan vedenkäsittelystä pois johdettavaa poistovettä, mutta myös pitämään liukoisten yhdisteiden, kuten nitraattitypen, pitoisuudet kalojen kasvatukseen sopivalla tasolla.

## Kiertovesikasvatuksen prosessi



Kuva 1. Kalojen kiertovesikasvatuksen periaatteet

## 2.2. Kalankasvatuksen sivuvirrat

### 2.2.1. Perkeet ja kalateollisuudet sivuvirrat

Kasvatettu kala perataan kasvattamalla ennen sen lähettämistä jatkojalostukseen. Kirjolohen perkuusaanto on noin 85 %, eli noin 15 % teurastetun kalan massasta on perkeitä. Kalan perkaamisessa poistetaan kalan vatsaontelon sisältö (perkeet), jotka koostuvat suolistosta, maksasta, pernasta, haimasta, viskeraalirasvasta ja munuaisista. Jos kala tuottaa mätiä, se kerätään talteen erikseen ja se on itsessään arvokas lopputuote. Mätiä tuottavan kalan perkuusaanto on pienempi kuin 15 %.

Perattu kala jalostetaan edelleen erilaisiksi kalatuotteiksi, jolloin kalateollisuuden sivuvirtoina syntyy kirjolohen päitä, ruotoja, leikkuujäännöksiä ja nahkoja. Ruodoista erotetaan tai kaavietaan yleensä pääosa lihasta elintarvikkeiden raaka-aineeksi. Taulukossa 1 on arvioitu peratuista kaloista muodostuvien fileointisivuvirtojen osuuksia. Ne ovat myös potentiaalisia elintarvikkeiden ja lisäarvotuotteiden raaka-aineita, mutta koska tässä selvityksessä käsitellään vain kalankasvatustaloksessa syntyviä sivuvirtoja, on ne rajattu selvityksen ulkopuolelle.

Kalan perkeiden pääkomponentit ovat vesi, öljy ja proteiini (Taulukko 2). Sekä öljy että proteiini ovat arvokkaita elintarvikkeiden ja lisäarvotuotteiden ainesosia. Kalaöljy sisältää merkittäviä määriä omega-3-rasvahappoja ja kalaperkeiden proteiini on proteiiniivisteiden,

hydrolysaattien ja bioaktiivisten peptidien raaka-aine. Lisäksi perkeet ovat kalojen ruoansulatuselimä ja sisältävät erilaisia entsyymejä, kuten lipaaseja ja proteaaseja, joita voidaan hyödyntää eri teollisuuden aloilla.

**Taulukko 1.** Kalanjalostuksessa syntyvien fileointisivuirtojen osuudet.

Fileointisivuvirta	%
Päät	12
Ruodot	4
Leikkuujäännöksiä	8
Nahat (10 %:sta peratuista kaloista)	6
Liha keskiruodoista	9

Lähteet: Miresan ym. 2012; Souza ym. 2015; Vielma ym. 2013

**Taulukko 2.** Perkeiden ja kokonaisten kalojen peruskoostumus ainesosittain.

	Kosteus (%)	Proteiini (%)	Rasva (%)	Tuhka (%)
Perkeet	58,1	11,7	29,8	1,3
Kokonainen kala	70,4	16,6	10,2	2,4

Lähteet: Dumas ym. 2007; Ervasti ym. 2022; Polat ym. 2022; Rasmussen & Ostenfeld 2000; Taheri ym. 2013; Vasquez ym. 2018; Viles ym. 2013; Wang ym. 2021.

### 2.2.2. Kuolleet kalat

Vaikka kiertovesikasvatuksessa voidaan optimoida olosuhteet kasvatettavalle kalalajille, on tuotannossa silti aina jonkin verran kuolleisuutta. Kuolleisuus on suurinta alkukasvatusvaiheessa ja kokonaisuudessaan kuolleita kaloja voi olla noin 5–10 % kasvatetusta biomassasta.

Kuolleet (kokonaiset) kalat sisältävät enemmän proteiinia, mutta vähemmän rasvaa kuin perkeet (Taulukko 2).

### 2.2.3. Liete- ja vesijakeet

Kasvatusaltaiden vettä kierrätetään puhdistuslaitteistojen läpi useita kertoja tunnissa. Ensimmäisenä käsittelyvaiheena altaista poistettavalle vedelle on karkea kiintoaineen poisto. Tässä prosessointivaiheessa muodostuvaa kasvatusvettä kiintoainepitoisempaa, joskin erittäin laimeaa, jaetta kutsutaan **lietevedeksi**.

Kiertovesikasvatuksessa lietevesi kerätään yleensä laskeuttimilla (pyörre- ja pystyselkeytin, liete-kaivot eli lietetaskut), siivilöimällä (rumpusiivilä), tai bioreaktoreiden avulla (kiinteäpöiset bioreaktorit). Lietteveden kuiva-ainepitoisuus on yleensä vain 0,2–0,4 %. Vedessä ja lietteessä, eli kaloihin sitoutumattomana olevat ravinteet ja kiintoaine ovat pääosin peräisin kalojen ulosteista, mutta mukana voi olla myös syömätöntä rehua ja bioreaktoreiden bakteeribiomassaa.

Kaloihin sitoutumattoman, eli vesi- ja lietejakeessa olevan kuiva-aineen määrä on karkeasti arvioituna noin 20–25 % ruokintaan käytetyn rehumäärän kuiva-ainemäärästä. Lietteen kuiva-ainesta noin 60–80 % on orgaanista ainetta (Brod ym. 2023, Pettersen ym. 2025).

Rehun mukana systeemiin tulevasta fosforista noin puolet sitoutuu kaloihin ja toinen puoli päätyy altaan veteen pääosin ulosteessa partikkeleihin sitoutuneena fosforina, mutta pieneltä osin myös virtsan mukana liukoisena fosforina. Ulosteen fosforista noin 20–30 % liukenee veteen, josta 70–80 % jo ensimmäisen vuorokauden aikana (Steward ym. 2006, Garcia-Ruiz & Hall 1996). Liukoistumisesta huolimatta kaloihin sitoutumattomasta fosforista suurempi osa päätyy vedenerotusprosesseissa (kiintoaineen mukana) lietejakeisiin.

Altaista poistettava veden sisältämä typpi on peräisin pääasiassa kalojen aineenvaihdunnasta ja pienemmissä määrin syömättä jääneestä rehusta. Kalojen erittämä typpi on peräisin rehujen proteiineista, eli kalojen proteiiniaineenvaihdunnasta; kirjolohilla noin 40–45 % rehun sisältämästä typestä sitoutuu kalaan. Kirjolohirehujen keskimääräinen typpipitoisuus koko kalan elinkaaren osalta on noin 6,2 %, eli tonnista ruokittua rehua (typpeä keskimäärin 62 kg) veteen erittyy typpeä noin 35 kg. Proteiinin (typen) sulavuus on hyvä ja ulosteen mukana partikulaarisena typpenä erittyy vain 10–15 % kalan syömästä typestä. Kalat erittävät pääosan typestä ammoniakkinä kidusten kautta. Kaloihin sitoutumattoman typen talteenotto ja hyödyntäminen onkin ollut perinteisesti melko haastavaa, koska liukoisessa olomuodossa oleva typpi päätyy kiintoainetta erottelevissa erotusprosesseissa pääosin vesijakeisiin.

Kalankasvatuksessa muodostuvassa lietteessä on melko matala hiilen ja typen suhde (6,1; Netshivhumbé ym. 2024), koska liete koostuu pääosin kalojen ulosteista, eli biologisesti helpoiten hyväksikäytettävät hiiliyhdisteet ovat suurelta osin jo hyödynnetty kalojen energiaksi.

Kiertovesikasvatuksessa vedessä esiintyy ammoniumtypen ammoniakki ( $\text{NH}_3$ ) ja ionimuotoa ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ). Etenkin ammoniakki on erittäin myrkyllinen kaloille, ja veden käsittelyssä se muutaankin bioreaktoreissa nitriitiksi ( $\text{NO}_2$ ) ja edelleen nitraatiksi ( $\text{NO}_3$ ), joka on typen pääasiallinen muoto poistovesissä. Nitraattitypen pitoisuus on voimakkaasti riippuvainen kierto-vesijärjestelmän korvausveden määrästä, ollen noin 30–60 mg/l, kun korvausvesi on välillä 500–1000 litraa syötettyä rehukiloa kohden.

Ravinteiden ja orgaanisen aineksen keskimääräisiä pitoisuuksia kalalaitoksen eri sivuvirroissa on koottu taulukkoon 3. Pettersenin ym. (2025) katsausartikkelin laajassa aineistossa RAS-laitoksen lietejakeen keskimäärin fosforipitoisuus kuiva-ainetta kohti oli 3,3 %, keskimääräinen typpipitoisuus 5 % ka ja keskimääräinen kaliumpitoisuus 0,3 % ka. Kuiva-ainekohtaiset ravintepitoisuudet lietteessä olivat hyvin samaa luokkaa myös Brod ym. (2023) tutkimuksessa, fosfori 2,7 % ka ja typpi 5,4 % ka.

Lietteeseen kertyy myös rehusta peräisin olevia metalleja. Osa niistä on kalojen ravitsemuksen kannalta välttämättömiä hivenaineita, joita myös lisätään rehuun, mutta jotka voivat korkeina pitoisuuksina estää lietteen jatkokäytön kasvintuotannossa. Pettersenin ym. (2025) kokoomassa katsausartikkelissa todettiin kalalietteiden keskimääräisiksi alkuainepitoisuuksiksi (mg/kg kuiva-ainetta): sinkki 500; kupari 40; rauta 1100; alumiini 400; mangaani 200; elohopea 0,1; lyijy 3; kadmium 0,9; kromi 14; seleeni 2; nikkeli 10; arseeni 3. Vaihtelua pitoisuuksiin aiheuttaa mm. rauta- ja alumiinikoagulanttien käyttö sekä syömättä jääneen rehun määrä lietteestä.

Koska lietevedettä kertyy valtavat määrät, se yleensä tiivistetään laitoksella kuljetuskustannusten säästämiseksi. Lietteveden tiivistykseen **lietteeksi** käytetään yleensä apuna rauta- tai alumiinipohjaisia kemikaaleja, jolloin fosfori on sitoutunut tiukasti metalliyhdisteisiin. Tällaisen kemikaloidun ja sen jälkeen laskeutetun tai nauhasuodatetun tiivistetyn lietteen kuiva-ainepitoisuus voi vaihdella noin 3–12 % välillä (Howard 2025). Tässä raportissa myöhemmin

esitettävissä laskelmissa tavanomaisesti käsitellyn lietteen kuiva-ainepitoisuudeksi on valittu 5,5 %. Tiivistetyn lietteen kuiva-ainepitoisuutta voidaan nostaa edelleen korkeammaksi muun muassa sentrifugoinnilla tai puristustekniikoilla. Tekniikoilla voidaan päästä jopa 20–30 % kuiva-ainepitoisuuksiin. Toisaalta tämä taso on usein jo riittävä ja myös maksimitavoite, koska sitä korkeamman kuiva-ainepitoisuuksien lietteitä ei voi enää pumpata. Pitkäaikaista varastointia ja kuljetusta varten kuiva-ainepitoisuus voidaan nostaa erilaisilla kuumennustekniikoilla yli 90 %:iin. Tällöin materiaali myös hygienisoituu eli sen mikrobiologinen aktiivisuus pienenee.

Tiivistyksessä toisena jakeena muodostuva nestejake johdetaan kiertoveden (ja poistoveden) käsittelyyn yhdessä rumpusiivilältä aiemmin erotetun kirkkaamman veden kanssa, jonka määrä riippuu laitokselle otettavan uuden veden määrästä, ts. veden käytön intensiteetistä eli kierrätysasteesta.

Taulukossa 3 on esitetty kirjallisuudesta koottuja arvoja kalankasvatuksen sivuvirtojen kemiallisista ominaisuuksista.

**Taulukko 3.** Kalankasvatuksen orgaanisten sivuvirtojen koostumustietoja.

	Kuiva-aine (TS) (% tuorepainosta)	Orgaaninen kuiva-aine (VS) (% TS:stä)	Fosfori (g/kg)	Typpi (g/kg)	Lähteet
Kokonaiset (kuolleet) kirjoloheet	23–40 24–27 27–31	90–96 93 91–93	2,9–4,4 - -	19–27 31–36 27	Bureau ym. 2003 Oz & Dikel 2015 Rasmussen & Ostenfeld 2000
Kirjoloheen perkeet	71 51 61–65	99 98 99–100	1,3 2 -	8,1 13,6 -	Ervasti ym. 2019 Ervasti ym. 2022 Albuzio ym. 2011
Lietevesi	3,6 1,4–2,4 0,2	87 62–71 82	0,75 - -	2,3 0,06–0,20 0,07	Choudhury ym. 2023 Lanari & Franci 1998 Sharrer ym. 2007

### 3. Lainsäädäntö

Kalankasvatuksen sivuvirtana muodostuvien ravinne- ja hiilipitoisten materiaalivirtojen hyödyntämisessä on huomioitava erityisesti sivutuote- ja lannoitelainsäädännön asettamat vaatimukset. Lainsäädännön tehtävänä on turvata tuotteiden vaatimustenmukaisuus ja turvallisuus ja Suomessa lannoitevalmisteiden valmistusta ja käyttöä säätelee sekä kansallinen että EU-tason lainsäädäntö.

Lietevesi ja siitä tiivistettävä liete koostuvat pääosin kalojen ulosteista, mutta sivutuotelainsäädännön näkökulmasta kalan lanta ei rinnastu kotieläinten lantaan (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EY) N:o 1069/2009, jäljempänä sivutuoteasetus). Kalan lanta on rajattu sivutuoteasetuksen ulkopuolelle (2 artikla, 2. kohta, alakohta k; sekä ja 3 artikla kohta 20). Näin ollen kalalaitoksen liete ei siis ole lannaksi luettavaa eläinperäistä sivutuotetta, toisin kuin kotieläinten lanta.

Nykyisen lainsäädännön rajoitteet on tunnistettu useissa EU-jäsenvaltioissa esteeksi tehokkaalle sivuvirtojen käytölle ravinnekiertojen sulkemiseksi, ja kalankasvattajien eurooppalainen etujärjestö FEAP on pyrkinyt vaikuttamaan lainsäädäntöön niin, että kalankasvatusliete rinnastettaisiin muiden eläinten lantaan. Komission tuoreen näkemyksen mukaan FEAP:n tulisi kerätä aineistoa lietteiden koostumuksesta, koostumuksen vaihtelun teknisistä syistä ja suunnitellusta käyttötarkoituksesta EFSA:n tieteellistä arviointia varten (Klemencic 2025). Joissakin maissa, ei kuitenkaan Suomessa, kalanviljelylaitoksen liete rinnastetaan direktiivin 86/278 (Neuvoston direktiivi ympäristön, erityisesti maaperän, suojelusta käytettäessä puhdistamoliettä maanviljelyssä) mukaiseksi puhdistamolietteeksi. Tällöin sitä voidaan käyttää maataloudessa, kuitenkin niin, että koostumuksen ja turvallisuuden säätely on samanlaista kuin yhdyskuntalietteelle.

Kuolleiden kalojen ja kalanperkeiden hyödyntämistä säätelee eläimistä saatavia sivutuotteita koskeva lainsäädäntö: Sivutuoteasetus (1069/2009) sekä kansallinen sivutuotelaki (Laki eläimistä saatavista sivutuotteista 517/2015) ja kansalliset asetukset (Maa- ja metsätalousministeriön asetus eläimistä saatavista sivutuotteista MMMa 783/2015 ja muutos 1142/2022). Vesieläimistä peräisin olevat sivutuotteet kuuluvat pääsääntöisesti sivutuoteluokkaan 3, eli ns. pienemmän riskin ja sitä myötä keveimmän käsittelyn vaatimaan luokkaan. Sivuvirtojen käsittely on toteutettava sivutuoteasetuksen mukaisesti, sen sallimalla käsittelymenetelmällä ja hyväksytyssä käsittelylaitoksessa. Sekä biokaasukäsittely että kompostointi soveltuvat luokan 3 sivutuotteille hyväksytyihin käsittelymenetelmiin. Sivutuotteille on taattava hygienisoiva käsittely, joka usein toteutetaan erillisellä hygienisoinnilla (70 °C, 1 h, palakoko ≤12 mm).

Lannoitelainsäädännön näkökulmasta oleellista on, mihin ainesosaluokkiin kalankasvatuksen sivuvirrat kuuluvat; lannoitevalmisteiden valmistuksessa käytettävien ainesosien on oltava ainesosaluettelossa (Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 964/2023, jäljempänä lannoitevalmisteasetus). Suomessa luetteloa ylläpitää Ruokavirasto (Ruokavirasto 2024). Raportin kirjoitushetkellä *kalaviljelylaitosten lietteet* löytyvät ainesosaluettelosta ainesosaluokista 3. komposti sekä 4. mädäte. Tämä tarkoittaa, että kalankasvatuksessa muodostuvia lietteitä voi kansallisen lannoitelainsäädännön puitteissa kompostoida tai mädättää, ja käyttää tuotettua kompostia tai mädätettä lannoitevalmisteen ainesosana.

Sekä EU-lannoitevalmisteasetuksessa (2019/1009) että Suomen vuodesta 2022 voimassa olleessa lannoitelaisa (711/2022) säädetään muun muassa lannoitevalmisteiden

tuotevaatimuksista. Lannoitevalmisteasetuksessa (964/2023) annetaan tarkempia säännöksiä eri tuoteluokille koskien muun muassa haitallisten aineiden enimmäispitoisuuksia ja primaaristen pääravinteiden (N, P, K) vähimmäispitoisuuksia. Raaka-aineina käytettävät materiaalit ovat ainesosia, jotka määritellään laissa ainesosaluokkiin.

Kalalaitoksilla muodostuvista sivuvirroista prosessoidut jakeet voivat kuulua esimerkiksi seuraaviin tuoteluokkiin (Lannoitevalmisteasetus 964/2023):

- Orgaaninen lannoite: Orgaanisten lannoitteiden on sisällettävä vähintään yhtä primääria pääravinnetta 1,0 massaprosenttia. Pääravinteiden kokonaispitoisuuden on oltava yhteensä vähintään 2 massaprosenttia. Sivutuoteasetuksen mukaisesti korkeimmat sallitut metallipitoisuudet on säädetty mm., kuparille ja sinkille, sekä nikkelille, kadmiumille, elohopealle ja lyijylle.
- Kiinteä orgaaninen maanparannusaine: min 15 % kuiva-aine, orgaanisen hiilen pitoisuus min 7,5 %
- Nestemäinen orgaaninen maanparannusaine: orgaanisen hiilen pitoisuus min. 2 % tai primaaristen pääravinteiden pitoisuus min. 0,2 %

Tämän raportin kannalta keskeisen ravinteiden kierrättämiseen liittyvän lainsäädännön lisäksi kalankasvatusta koskee ravinnepäästöjen säätely. Kalankasvatus tarvitsee ympäristönsuojelulain mukaisen ympäristöluvan toiminnalleen, mikäli rehunkäyttö tai kalojen lisäkasvu on vähintään 2 000 kg vuodessa (527/2014). Tämän lisäksi kalankasvatus tarvitsee yleensä vesilain mukaisen luvan pinta- tai pohjaveden ottamiseen laitokselleen (587/2011). Ympäristönsuojelu- ja vesilain lisäksi kalankasvatusta ohjaavat erityisesti niiden nojalla annetut valtioneuvoston asetukset (713/2014 YSA ja 1560/2011 VA) sekä laki vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä (1299/2004). Suuria laitoshankkeita saattaa koskea myös laki ympäristövaikutusten arviointimenettelystä (YVA, 252/2017). Hankeluettelossa on mainittu merellä sijaitsevat kalankasvatuslaitokset, joiden lisäkasvu on vähintään 1 000 tn vuodessa mutta arviointimenettelyä voidaan soveltaa yksittäistapauksissa myös muihin laitoksiin, kuten kiertovesilaitoksiin.

Ympäristönsuojelulaissa ei ole suoraan raja-arvoja kalankasvatuslaitosten ravinnepäästöille, vaan tarkastelu tehdään tapauskohtaisesti ympäristölupaprosessissa. Tyypillisesti ruokakalankasvatuksessa merellä ominaiskuormitus on ollut fosforin osalta 5 g ja typen osalta 40 g lisäkasvikiloa kohden. Ensimmäisissä kiertovesilaitosten ympäristöluvuissa ei vaadittu liukoisen typen poistamista, jolloin typen ominaiskuormitus on noin 35 g lisäkasvikiloa kohden. Fosforista suurin osa poistuu lietteen mukana ja fosforin ominaiskuormitus on ollut noin 1,5 g lisäkasvikiloa kohden. Uudemmissa ja isoimmissa kiertovesilaitosten ympäristöluvuissa on ollut jo vaatimukset typenpoistolle mutta myös fosforipäästöjä on entisestään tiukennettu. Typen osalta ominaispäästöt voivat olla alle 4 g ja fosforin osalta alle 0,5 g lisäkasvikiloa kohden, joka vastaa molempien osalta 90 % poistotehokkuutta.

## 4. Sivuvirtojen käsittelymenetelmät

Tässä kappaleessa tutustutaan valittuihin prosessointitekniikoihin, joilla ravinteita ja energiaa voidaan ottaa talteen kiertovesikasvatuksen sivuvirroista, sekä esitellään hankkeessa tehdyt pilotoinnit. Menetelmistä mukaan on valittu muutamia Suomen olosuhteisiin sopivia tekniikoita, eivätkä tässä raportissa mukana olevat tekniikat ole ainoita mahdollisia vaihtoehtoja. Laajemmin eri käsittelytapoja on esitelty muun muassa Pohjoismaisen ministerineuvoston raportista (Howard ym. 2023). Tähän kappaleeseen koottujen käsittelymenetelmiä hyödyntäen kappaleeseen 5 on rakennettu skenaarit, joissa erikokoisten kiertovesilaitosten sivuvirrat ohjataan valikoituihin prosesseihin.

### 4.1. Liete- ja vesijakeet

Kuten kappaleessa 2 todettiin, kiertovesikasvatuksessa kalojen ulosteesta, syömättömästä rehusta ja järjestelmään kertyvästä biofilmistä muodostuvaa kiintoainetta erotetaan kierrätettävästä vedestä ensivaiheessa yleensä laskeuttimilla (pyörre- ja pystyselkeytin, liete-kaivot), siivilöimällä (rumpusiivilä), tai bioreaktoreiden avulla (kiinteäpöiset bioreaktorit). Muodostuvan lieteveden kuiva-ainepitoisuus on melko matala, yleensä vain noin 0,2–0,4 %. Lietevesi sisältää siis paljon vettä ja sellaisenaan sen käsittely ja kuljetus on kallista perinteisillä lietteenkäsittelymenetelmillä. Sen takia lietevedestä prosessoidaankin usein lietettä poistamalla siitä vettä. Lietevettä tiivistetään myös siksi, että tiivistyksen myötä laitoksen ravinnekuormitusta voidaan hallita ympäristöluvan vaatimalla tavalla; tiivistys väkevöi fosforia kuivajakeeseen, jolloin laimeampi poistovesi sisältää vähemmän ravinteita. Tiivistetyn lietteen kuiva-ainepitoisuus vaihtelee lähtömateriaalin ominaisuuksista, prosessointitekniikasta ja käytetyistä prosessointiparametreista riippuen, mutta on tyypillisesti noin 5,5 % mitä käytetään kappaleen 5 konseptitarkastelussa. Tavanomaisen kemikaaliavusteisen lietteen tiivistyksen heikkoutena on, että fosfori sitoutuu liukenemattomaan muotoon, jolloin tällaisen lietteen lannoitevaikutus maatalouskäytössä on hidas.

#### 4.1.1. Biokaasuteknologia

Biokaasuprosessi tapahtuu anaerobisissa eli hapettomissa olosuhteissa. Biologisessa prosessissa useat eri mikrobiryhmät hajottavat orgaanista ainesta vaihe vaiheelta yksinkertaisimmiksi molekyyleiksi, ja hajoamisen kaasumaisena lopputuotteena muodostuu pääosin metaanista (CH<sub>4</sub>) ja hiilidioksidista (CO<sub>2</sub>) koostuvaa biokaasua. Toisena lopputuotteena muodostuu ravinne- ja hiilipitoinen mädätysjäännöstä, jota voidaan käyttää lannoitevalmisteena maataloudessa.

Biokaasua voidaan käyttää yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon (CHP, combined heat and power), lämpökattilassa lämmöntuotantoon tai jalostaa biometaaniksi, jota voi käyttää liikennepolttoaineena. Mädätysjäännöstä voidaan hyödyntää maataloudessa sellaisenaan maanparannusaineena tai lannoitevalmisteiden ainesosana. Biokaasuprosessi ei muuta materiaalin kokonaisravinnepitoisuuksia, mutta mikrobiologinen prosessi liukoistaa orgaanista typpeä, jolloin se on nopeammin kasveille käyttökelpoista. Lannoitevalmisteena tai sen osana mädäte on hygienisoitava lannoitevalmisteasetuksen (964/2023) säätämällä menetelmillä ja vuoden 2027 alusta lähtien täytettävä myös asetuksen määrittämä stabiilisuuskriteeri.

Kalalaitosten lietteiden metaanintuottopotentiaali voi vaihdella suuresti, ja kirjallisuudessa on raportoitu hyvin eri tasoilla olevia potentiaaleja. Netshivumbe ym. (2024) tutkimuksessa jätikonnamonnin (*Clarias gariepinus*) kasvatuksessa muodostuneen lietteen orgaanista kuiva-ainetta kohti laskettu metaanisaanto oli vain 49 NmL/gVS. Toisaalta esimerkiksi Choudhury ym. (2023) raportoivat kalalietteelle hyvin korkeita VS-kohtaisia metaanintuottopotentiaaleja, 422–519 mL/gVS. Kalalietteiden metaanintuottopotentiaali riippuukin monesta asiasta, muun muassa kalalajista, ja sen vaatiman rehun laadusta ja syömättömän rehun osuudesta. Kaloja ja kalanperkeitä pidetään yleisesti erittäin energia- ja ravinnepitoisina syötteinä (metaanipotentiaali jopa yli 900 NmL/gVS), ja ne soveltuvat esimerkiksi lannan lisäsyötteeksi (Ervasti ym. 2022).

Biokaasuprosessi voidaan toteuttaa erityyppisissä reaktoreissa. Reaktortyyppin valintaan vaikuttaa suuresti käsiteltävän biomassan kuiva-ainepitoisuus. Kalalaitoksen sivuvirroille soveltuvia menetelmiä ovat lietemäisille massoille ja nesteille suunnitellut tekniikat. Prosessin yleisimmät operointilämpötila-alueet ovat mesofiilinen, noin 35 °C ja termofiilinen, noin 55 °C. Materiaalin viipymäaika biokaasuprosessissa tulee olla riittävän pitkä, jotta mikrobitoimintaan perustuva hajotusprosessi ehtii toimia optimaalisesti. Energiapotentiaalın toteutumisen lisäksi riittävän pitkällä viipymäajalla (noin 4–6 viikkoa) reaktorissa edistetään päästöjen minimointi mädätteen käsittelyssä (Luostarinen ym. 2023).

#### Jatkuvasekoitteinen reaktori

Jatkuvasekoitteinen reaktori (continuously stirred tank reactor, CSTR) soveltuu kuiva-ainepitoisuudeltaan noin 3–15 % massoille. Kuivempiakin materiaaleja voidaan menetelmällä käsitellä, mutta tällöin prosessi vaatii laimennusvettä. Lopputuotteena muodostuu ravinnepitoista mädätysjäännöstä, jonka ominaisuudet määrittyvät pitkälti syötemateriaalien koostumuksen perusteella. Laimelle materiaaleille, kuten lietevedelle, tekniikka ei ole järkevä, koska reaktorikapasiteetin tulisi olla valtava käsiteltäessä suuria määriä lietettä.

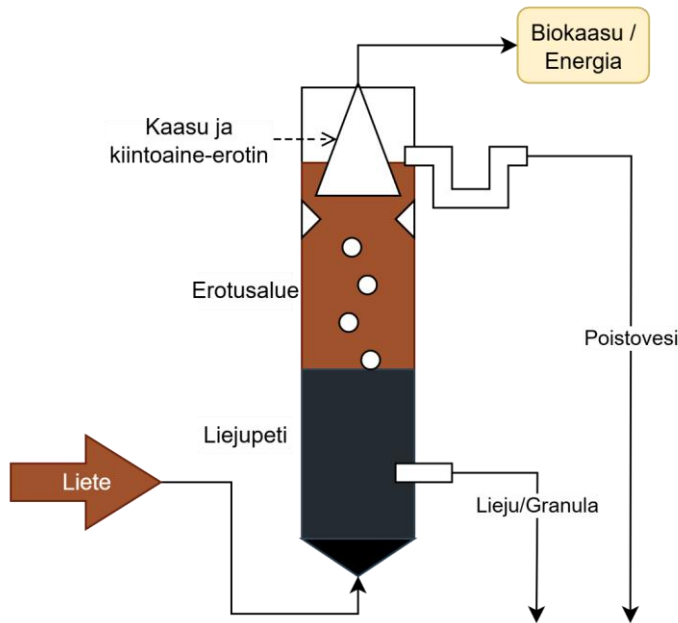
Jatkuvasekoitteisessa biokaasureaktorissa syötteiden sisältämä typpi ja fosfori poistuvat biokaasureaktorista mädätteessä. Ravinteiden käytettävyyttä voidaan helpottaa jatkoprosessoinnalla mädätettä: Yksinkertaisimmillaan ravinteiden kuljetettavuutta edistää separointi ruuvi- tai linkoseparaattorilla typpipitoisempaan nestejakeeseen ja fosforipitoisempaan kuivajakeeseen.

#### UASB-reaktori

Nestemäisille ja hyvin matalan kuiva-ainepitoisuuden omaaville materiaaleille kehitetty liejupetimenetelmä (UASB, upflow anaerobic sludge bed) toimii huomattavasti lyhemmillä viipymäajoilla kuin lietereaktorit, ja reaktorin koko suhteessa käsiteltävään vesimäärään on pieni. Operointia pidetään suhteellisen yksinkertaisena ja edullisena. Prosessiin ei voi syöttää kiintoainepitoisia syötteitä ja mahdolliset kuivemmat materiaalit on homogenoitava veden sekaan, kuitenkin niin, ettei seoksen kuiva-ainepitoisuus nouse liian korkeaksi. UASB-reaktorin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2.

Kirjallisuudessa on jonkin verran raportoituja tuloksia kalalaitosten lietteen UASB-käsittelyistä. Esimerkiksi Lanari & Franci (1998) raportoivat kirjolohen kasvatuksessa muodostuneen lietteen metaanisaannoksi 400–460 mLCH<sub>4</sub>/gVS ja tilavuuskohtaiseksi tuotoksi 100–300 mLCH<sub>4</sub>/L/d käsittelylämpötilan ollessa 24–25 °C.

UASB-tyyppisessä reaktorissa poistuva jae on nestettä, jossa on matala kiintoainepitoisuus. Kiinteää ainesta kertyy granuloista koostuvaksi lietteeksi, jota poistetaan vain ajoittain. Liukoinen fosfori poistuu yleensä pääosin nesteen mukana, mutta mahdollisuuksia saada fosfori jäämään lietteeseen, on myös kehitetty. Orgaanista typpeä liukoistuu prosessissa ammoniumtypeksi, eli UASB-prosessin poistovedessä ammoniumtyypen osuus kokonaistypestä on korkeampi kuin prosessiin syötettävällä raaka-aineella.



**Kuva 2.** Kaavio UASB-reaktorin toimintaperiaatteesta.

#### 4.1.2. Kompostointi

Kompostointi on yleinen käsittelymenetelmä etenkin jätevesilietteille ja myös kalankasvatuslaitosten lietteille. Kompostointia varten lietteestä on esikäsittelynä poistettava vettä, koska huolimatta tukiaineen käytöstä, lietteen kuiva-ainepitoisuus on nostettava vähintään noin 20 %:n tasolle. Kompostointi hajottaa orgaanista ainesta kuluttaen happea ja tuottaen hiilidioksidia eksotermisesti, eli lämpöä vapauttaen. Orgaanista typpeä mineralisoituu ammoniumtypeksi, mutta prosessissa tapahtuu haihdunnan vuoksi myös typpihäviöitä, eli typpeä hävitetään ammoniakkinä ilmakehään, eikä kaikkea käsiteltävässä materiaalissa olevaa typpeä siis saada talteen. Tuotteena muodostuu kompostia.

Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista (964/2023) asettaa kompostoinnille laatuvaatimuksena muun muassa riittävän pitkän viipymän riittävän korkeassa lämpötilassa (mitä korkeampi lämpötila, sitä lyhyempi viipymäaika). Lannoitevalmisteen ainesosana kompostin on oltava myös riittävän stabiilia, eli sen hiilidioksidintuotto on oltava tarpeeksi pieni, ja mikäli kompostointiprosessi ei ole suljettu, vaaditaan myös kompostin jälkikypsytyt.

Orgaanista ainesta päätyy hiilidioksidina ilmakehään, samoin kuin typpeä, mutta fosfori säilyy pääosin kompostoituneessa massassa (mahdolliset suotovedet huomioitava). Perinteiset kompostointimenetelmät vaativat myös seosaineen käyttöä, jotta massa pysyy ilmapana. Turve on ollut yleinen seosaine, mutta ilmastokestävyys ja sitä myötä saatavuus heikkoa.

### 4.1.3. Liukoisten ravinteiden talteenotto

Vesijakeissa liuenneena olevat ravinteet ovat haastavia poistaa, koska kalalaitoksilla vesimäärät ovat suuria ja ravinteita on tilavuutta kohti varsin pieninä pitoisuuksina. Kalalaitosten tapauksessa onkin tärkeää, että käsittelykapasiteetiltaan suurten prosessien tulee olla myös energia- ja kustannustehokkaita.

#### Kemiallinen saostus

Perinteisesti kiertovesilaitoksesta poistuvan liukoisen fosforin määrää pyritään minimoimaan tehostamalla saostusta, jolloin poistettavaan veteen päätyy vähemmän fosforia. Erotuksen toteuttamiseksi veden käsittelyssä käytetään koagulointi- ja flokkulointikemikaaleja, joiden avulla fosforia pystytään saostamaan, ja johtamaan se erotusprosesseissa kiintoainepitoiseen jakeeseen. Perinteinen kemikaaliavusteinen saostus onnistuu kuitenkin vaihtelevasti ja varastoi ravinteet liukenemattomaan muotoon, rauta- ja alumiinifosfaattina. Ravinteiden hyödyntämisen näkökulmasta tarve olisi tarve liukoisen fosforin tehokkaalle talteenotolle siten, että lopputuote olisi kasveille käyttökelpoisessa muodossa.

Kehitettävänä on erilaisia biopohjaisia kemikaaleja jätevesien käsittelyyn. Muun muassa biopolymeerit (Jiang ym. 2021), ja erityisesti kitosaani (Józwiak ym. 2021) ovat osoittautuneet tutkimuksissa potentiaalisiksi apuaineiksi fosforin talteenottoon.

#### Struviittisaostus

Struviitti, eli magnesium ammonium fosfaatti ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ) on epäorgaaninen fosfaattimineraali, jota voidaan saostaa ravinnepitoisista liuoksista, kuten UASB-prosessin poistovedestä. Struviittina voidaan ottaa talteen samanaikaisesti sekä fosforia että tyypeä, mutta koska yhdiste sisältää myös magnesiumia (Mg), sitä on yleensä lisättävä prosessiin erikseen. Toimiakseen optimaalisesti, reaktio vaatii oikeat fosforin, typen ja magnesiumin keskinäiset suhteet (esimerkiksi fosforin ja magnesiumin suhde 1:1–1:2) sekä korkean pH:n, 8.0–9.5 (Aguilar-Pozo ym. 2023). Menetelmän etuna on se, että fosfori ja typpi saadaan talteen kiinteänä korkean ravinnepitoisuuden ravinnetuotteena, mutta magnesiumin lisäksi sekä pH:n säätö natriumhydroksidilla (NaOH) tuovat lisäkustannuksia, ja saostus vaatii oman tekniikan ja laitteiston.

#### Kalsiumfosfaattisaostus

Yksi lupaavista kustannustehokkaista talteenottomenetelmistä fosforille on sen saostaminen kalsiumin kanssa kalsiumfosfaattina (CaP – kemiallinen kaava esimerkiksi  $Ca_3(PO_4)_2$  tai  $CaHPO_4$ ). Menetelmän etuna on sen kustannustehokkuus ja toimivuus laajalla pH-alueella. Heikkoutena puolestaan on saostuksen, ja etenkin tuotteen kemiallisen rakenteen muodostumisen vaikea hallittavuus (Deng & Dhar, 2023).

Menettelyssä on tärkeää taata prosessille riittävä kalsiumpitoisuus (Cunha ym. 2018), jolloin käytännössä tavanomaisen kalalaitoksen tapauksessa kalsiumia tulisi lisätä vedenkäsittelyprosessiin. Mahdollisiksi kalsiumlähteiksi on kirjallisuudessa mainittu ainakin kalsiumoksidi (CaO) (Ahmad ym. 2011), kalsiumkloridi  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  (Cunha ym. 2018) ja kalsiumhydroksidi  $Ca(OH)_2$ .

Kalsiumfosfaattisaostus on ollut esillä myös UASB-tekniikkaa käsittelevissä tutkimuksissa, jolloin tavoitteena on saada fosfori saostumaan tehokkaammin granulalietteeeseen. UASB-reaktoritekniikkaa koskevissa tutkimuksissa on havaittu, että valtaosa, noin 50–60 % käsiteltävässä

vedessä liuenneena olevasta fosforista poistuu poistoveden mukana (De Graaff ym. 2011; Tervahauta ym. 2014). UASB:n kontekstissa kalsiumfosfaattisaostuksessa vaarana voi olla kalsiumkarbonaatin ( $\text{CaCO}_3$ ) muodostuminen, jonka suurissa määrin voi haitata aineensirtoa huokostasolla, jolloin muodostuu agglomeraatteja ja lietepatjan tiivistymistä, mikä heikentää metaanintuottoa (Tiwari ym. 2006).

### **Adsorbointi biohiileen**

Liukoisia ravinteita voidaan myös adsorboida eli ottaa talteen kiinteään materiaaliin suodattamalla puhdistettavaa vettä talteenottavan materiaalin läpi. Biohiili on materiaalina herättänyt kiinnostusta erilaisiin ravinteiden talteenoton sovellutuksiin. Biohiilen kyky sitoa itseensä ravinteita riippuu pitkälti sen ominaispinta-alasta sekä pinnan aktiivisuudesta ja sen funktionaalista ryhmistä. Ominaispinta-alaa ja huokoisuutta voidaan lisätä biohiilen aktivoinnilla, ja aktivoitunut biohiilet ovatkin osoittautuneet tehokkaimmiksi ravinteiden talteenotossa (Xiang ym. 2020). Ravinteiden talteenotossa on kokeiltu myös magnesiumilla rikastettua biohiiltä, jolloin tyyppiä ja fosforia voidaan saostaa struviitiksi biohiilen pinnalla (Xiang ym. 2020).

Biohiilen valmistusprosessia kutsutaan yleisesti pyrolyysiksi. Pyrolyysi tapahtuu korkeassa lämpötilassa (300–650 °C) hapettomissa olosuhteissa. Käsiteltävässä materiaalissa oleva vesi ja hajoamistuotteet haihtuvat, jolloin kiintoaineesta muodostuu huokoista hiilipitoista materiaalia, biohiiltä. Biohiili on hyvin pysyvä hiilen muoto, eli hiili pysyy pitkään kiinteään olomuotoon varastoituna. Sen valmistukseen voidaan käyttää muun muassa maa- ja metsätalouden erilaisia sivuvirtoja.

### **Adsorbointi poloniittiin**

Poloniitti (tuotemerkki Polonite®) on opoka-nimisestä mineraalista valmistettu suodatinmateriaali, jota käytetään ravinteiden, ja erityisesti fosforin sitomiseen erilaisista jätevesistä. Opokamineraalin pääkomponentit ovat piioksidi ( $\text{SiO}_2$ ) ja kalsiumkarbonaatti ( $\text{CaCO}_3$ ) (Kacprzak & Sobik-Szołtysek 2022). Poloniitin valmistuksessa opokaa kalsinoidaan, jolloin  $\text{CaCO}_3$ :sa muodostuu kalsiumoksidia ( $\text{CaO}$ ), mikä parantaa materiaalin kykyä sitoa fosforia (Arenas-Montaña ym. 2021). Sidontakykyyn vaikuttaa myös ominaispinta-ala, jota voidaan lisätä esimerkiksi palakokoa pienentämällä jauhamalla. Fosforin talteenottotehokkuus on parhaimmillaan yli 90 % (Cucarella ym. 2009, Kacprzak & Sobik-Szołtysek 2022), mutta materiaali myös kyllästyy fosforilla ajan kuluessa, jolloin talteenottotehokkuus laskee. Käytetty suodatinmateriaali soveltuu fosforilannoitteeksi maatalouteen. Sekä opoka että poloniitti nostavat maan pH:ta, mikä edistää ravinteiden käyttökelpoisuutta kasveille ja ehkäisee niiden huuhtoutumista.

### **Muita adsorbointi- ja suodatinmateriaaleja**

Biohiilen ja poloniitin lisäksi liukoisten ravinteiden talteenottoon on kokeiltu lukuisia erilaisia muun muassa teollisuuden sivuvirtoina muodostuvia kiinteitä materiaaleja (Arenas-Montaña ym. 2021). Adsorptio onkin varteenotettava vaihtoehtoinen menetelmä ravinteiden talteenottoon kalalaitosten kierto- ja poistovesistä, koska sitä pidetään varsin kustannustehokkaana ja soveltuvana suurille vesimäärille (Usman ym. 2022). Optimaalisen adsorbenttien kehittäminen ei kuitenkaan ole yksinkertaista, koska materiaalilla täytyy olla riittävä adsorbointikapasiteetti ja selektiivisyys halutuille ravinteille, mitä sivuvirroilla ei välttämättä luontaisesti ole. Aktivointi ja huokosrakenteen muokkaaminen lisää luonnollisesti materiaalien hintaa. Adsorbenttimateriaaleihin voidaan lisätä fosforia sitovia rauta-, alumiini-, kalsium- tai magnesiumyhdisteitä

(Usman ym. 2022), mikä saattaa heikentää ravinteiden käyttökelpoisuutta maataloudessa. Adsorbenttien kehityksessä onkin talteenottotehokkuuden ohella huomioitava ravinteilla rikastetun adsorbentin toimivuus lannoitekäytössä.

### Typen poistaminen - Denitrifikaatio

Liukoista typpeä pitää poistaa kiertovesikasvatuksen kierrosta ympäristökuormituksen ohella myös kalankasvatuksen onnistumisen vuoksi. Lähes täysin suljettu vesikierto kohottaa veden nitraattipitoisuuden kalojen kannalta haitallisen korkeaksi. Käytännössä nitraattia poistetaan kalalaitoksen sisäisessä vesikierrossa denitrifikaation avulla. Kaupallisesti jo käytössä oleva menetelmä on käsitellä kiertovesilaitoksen poistuva vesijae denitrifikaatioprosessissa, jossa bakteerit muuttavat hapettomissa olosuhteissa nitraattityypin typpikaasuksi. Heterotrofisessa denitrifikaatiossa bakteerit tarvitsevat typen poistamiseen hiilen lähteen, joka voi olla teollista alkuperää, kuten metanoli, etanoli, etikkahappo ja melassi. Hiiltä syötetään yleensä 4:1 suhteessa nitraattityypin määrään ja viipymää säätelemällä voidaan saada 85–95 % poistoteho. Pienillä kiertovesilaitoksilla voidaan käyttää myös puuhakereaktoreita, jossa puun hiili toimii bakteerien hiilen lähteenä. Prosessi voi kuitenkin olla 20-kertaa hitaampaa verrattuna teollisiin hiilenlähteisiin, jolloin reaktorin kokoa pitää kasvattaa voimakkaasti. Typen poistaminen voi maksaa noin 2–4 € poistettua typpikiloa kohden, joka vastaa noin 0,08–0,016 € kustannusta tuotettua kalakiloa kohden (Taulukko 4).

**Taulukko 4.** Denitrifikaation arvioidut kustannukset kolmelle eri laitoskokuuokalle (MBBR = moving bed bioreactor, liikkuvapetinen bioreaktori).

Tuotantokapasiteetti (tn)	500	500	2500	5000
Reaktorityyppi	Puuhake	MBBR	MBBR	MBBR
Investointikustannus (t€)	240	213	1 012	1 984
Käyttökustannukset (t€/a)	10	44	180	360
Kokonaiskustannukset (t€/a)	31	63	271	539
Poistettua typpeä kohden (€/kg)	2.0	4.0	3.4	3.4
Tuotettua kalaa kohden (€/kg)	0.08	0.16	0.13	0.13

### Biologiset menetelmät ravinteiden talteenottoon

Liukoista fosforia ja typpeä voidaan sitoa kasvavaan biomassaan. Biopuhdistukseksi (bioremediation) kutsuttu prosessi toteutetaan hallitusti erillisenä käsittelyvaiheena. Biopuhdistukseen käytetyistä organismeista yleisesti tunnettuja ovat etenkin mikrolevät. Mikrolevät ovat yksisoluisia organismeja, jotka hyödyntävät fotosynteesiä, eli (auringon) valoa energian lähteenään. Jäteveden käsittelyssä tarkoituksena on saada ravinteet, fosfori ja typpi, sitoutumaan mikrolevän biomassaan, joka voidaan erottaa tai jatkojalostaa edelleen.

Ongelmana biologisten puhdistusmenetelmien käytölle tuotantomittakaavassa on niiden hitaus: Vaikka mikro-organismit olisivat suhteellisen nopeakasvuisia, eli viipymä olisi vain tunteja tai päiviä, vaatii käsittely kuitenkin massiivisen kokoisia rakenteita suurien vesimäärien käsittelyyn. Reaktorit tarvitsevat paljon energiaa valaistukseen ja reaktoreiden valaistun pinta-alan on oltava suuri. Ravinteiden talteenoton lisäksi kasvatettavissa levissä tulisi mieluusti olla arvokomponentteja korkeiden kustannusten kattamiseksi.

Fosfaattia keräävien organismien (PAO) käyttö on yleistä jätevedenpuhdistamoissa, mutta vastaavia aktiivilieteprosessin kaltaisia reaktoreita on tutkittu vain vähän kalankasvatuksessa.

### **Weeefiner:n uudet tekniset ratkaisut ravinteiden talteenottoon**

Weeefiner on vuonna 2017 perustettu suomalainen teknologian kehitysyritys, joka on erikoistunut innovatiivisiin vedenkäsittely- ja materiaalien talteenottoratkaisuihin. 4D Sieppari™ (eng. *4D Scavenger*®) on Weeefinerin kehittämä teknologia, joka ottaa talteen arvokkaita liuennetta metalleja ja ravinteita vesivirroista. Sen ydin on 3D-tulostettu, kemiallisesti aktiivinen suodatin, jota voidaan räätälöidä syötteen ja kohdemateriaalien mukaan.

Kun ravinteita tai metalleja sisältävä syöte pumpataan 4D Siepparin läpi, se sitoo tarkasti kohdemateriaalit itseensä. Talteenoton jälkeen suodatin huuhdellaan laimealla happo- tai emäsluoksella, jolloin saadaan aikaan laadukas metalli- tai ravinnekonentraatti. Konsentraatti voi olla suoraan hyödynnettävissä esimerkiksi lannoitteiden tai teollisuuden raaka-aineena. Kuvassa 3 on esitetty esimerkki 4D siepparista.



**Kuva 3.** 4D Scavenger® Skid / 4D sieppari™ Räkki (kuvan lähde: Weeefiner verkkosivut).

Käyttökohteena kehitetyssä teknologiassa ovat erilaisen teollisuuden lisäksi myös kalankasvatus ja teknologiaa on testattu ja kehitetty myös kalojen kiertovesikasvatuksessa. Weeefiner on käynnistänyt hankkeen, jossa se tutkii nitraatin, fosfaatin ja kaliumin talteenottoa 4D sieppari teknologialla kalojen kiertovesikasvatuksessa. Hankkeessa keskitytään liuennneiden ravinteiden talteenottoon, johon on nykyisellään käytössä hyvin rajallisesti menetelmiä. Ravinteiden talteenottoon keskittyvä hanke on saanut tukea Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmasta 2020–2022 Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta. Tavoitteena on kehittää menetelmä, jonka avulla aiemmin hyödyntämättä jääneet ja jätteenä päätyneet ravinteet saadaan talteen ja talteenotetuista ravinteista pyritään tuottamaan raaka-aineita kierrätyslannoitteisiin.

Hankkeessa keskitytään pääasiassa kalojen kiertovesikasvatuksessa muodostuvien ravinteiden talteenottoon. Hankkeen aikana katsotaan myös muita kohteita, joissa liuenneiden ravinteiden talteenotto on potentiaalista. Kehitystyötä on pilotoitu yhteistyössä Luonnonvarakeskuk- sen kanssa Laukaan kalanviljelylaitoksella. Weeefiner:n kehitystyön tulokset ovat olleet lupaa- via ja mm. nitraattia on saatu hyvin talteen 4D sieppareilla ja pestyä pois suodattimista. Tuo- tantomittakaavan toimivat ratkaisut avasivat monipuoliset hyödyntämis- ja soveltamismah- dollisuudet kalankasvatuksen ravinteiden talteenotossa ja hyödyntämisessä.

## 4.2. Kokeet vesi- ja lietejakeilla

### 4.2.1. Lietejakeiden biokemiallinen metaanintuottopotentiaali

Biokemiallinen metaanintuottopotentiaali (BMP) kuvaa materiaalin maksimaalista metaani- saantoa anaerobisissa olosuhteissa ja halutussa lämpötilassa. BMP-tulokset ilmoitetaan yleensä orgaanista kuiva-ainetta (VS, volatile solids) kohti, koska se helpottaa eri kosteuksissa ja eri tuhkapitoisuuksien omaavien materiaalien potentiaalien vertailua; vedestä ja epäorgaa- nisesta materiaalista ei metaania muodostu. Kalalaitosten lietejakeissa on eroja keskenään, joten metaanipotentiaalin arviointiin valittiin näytteitä useammalta suomalaiselta laitokselta ja eri tavoin käsiteltyjä lietejakeita.

#### Materiaalit

Näytteitä otettiin Luken Laukaan tutkimuslaitokselta (Laitos 1) sekä kahdelta kaupalliselta kiertovesikasvatustalokselta (Laitokset 2 ja 3). Kaikilta laitoksilta näytteitä otettiin sekä liete- vedestä että tiivistetystä lietteestä. Lietevettä tiivistettiin eri laitoksilla eri tavoin. Laitokselta 1 otettiin näytteitä viisi kertaa, joista kahtena kertana näytteitä otettiin sekä lietevedestä että tiivistetystä lietteestä. Laitoksella 1 lietevesi erotetaan rumpusuodattimella ja lietteen tiivistys tapahtuu laskeuttamalla lietevedettä polyalumiinikloridin avulla, jolloin lietteen kuiva-ainepitoi- suus jää melko matalaksi. Kaupallisilta laitoksilta otettiin yhden näytteen sekä lietevedestä että tiivistetystä lietteestä. Myös Laitoksen 2 lietevesi tuli rumpusuodattimelta, mutta liete tiivisteti- tiin koagulantti- ja flokkulanttilisäyksen jälkeen nauhasuodatuksella. Laitoksella 3 lieteveden erotus oli hieman erilainen ja vesijae oli käynyt läpi kemikaloinnin ja flotaation ennen rumpu- suodatusta. Laitoksen 3 korkeamman kuiva-ainepitoisuuden liete oli ruuvipuristettua flotaati- lietettä. Kokeissa olleet materiaalit ja niistä määritettyjen kuiva-aineen (TS) ja orgaanisen kuiva-aineen (VS) pitoisuudet sekä pH on esitetty taulukossa 5.

**Taulukko 5.** BMP-kokeen näytteet, ja niiden TS, VS ja pH ennen kokeen alkua.

Näyte	Lyhenne	TS (%)	VS (%)
Laitos 1, lietevesi 7.7.2021	LV1_1	2,02	1,66
Laitos 1, lietevesi 28.7.2021	LV1_2	0,25	0,19
Laitos 1, lietevesi 2.8.2021	LV1_3	0,83	0,58
Laitos 1, lietevesi 10.9.2021	LV1_4	0,46	0,38
Laitos 1, lietevesi 20.9.2022	LV1_5	0,05	0,05
Laitos 1, liete 10.9.2021	L1_1	0,78	0,61
Laitos 1, liete 20.9.2022	L1_2	1,15	0,84
Laitos 2, lietevesi 3.8.2022	LV2	0,17	0,12
Laitos 2, liete 3.8.2022	L2	12,82	7,42
Laitos 3, lietevesi 23.9.2021	LV3	3,5	2,57
Laitos 3, liete 23.9.2021	L3	14,9	12,8

## Menetelmät

Ympinä kokeessa 1 käytettiin maatalousbiomassaa käsittelevän biokaasulaitoksen perkolaationestettä (Laukaa, Suomi) ja kokeessa 2 Luken omasta pilot-mittakaavan biokaasureaktorista otettua perkolaationestettä. Ymppejä säilytettiin lämpökaapissa 37 °C:n lämpötilassa 3–5 vrk ennen kokeiden käynnistämistä. TS ja VS määritykset tehtiin standardin SFS 3008 mukaisesti.

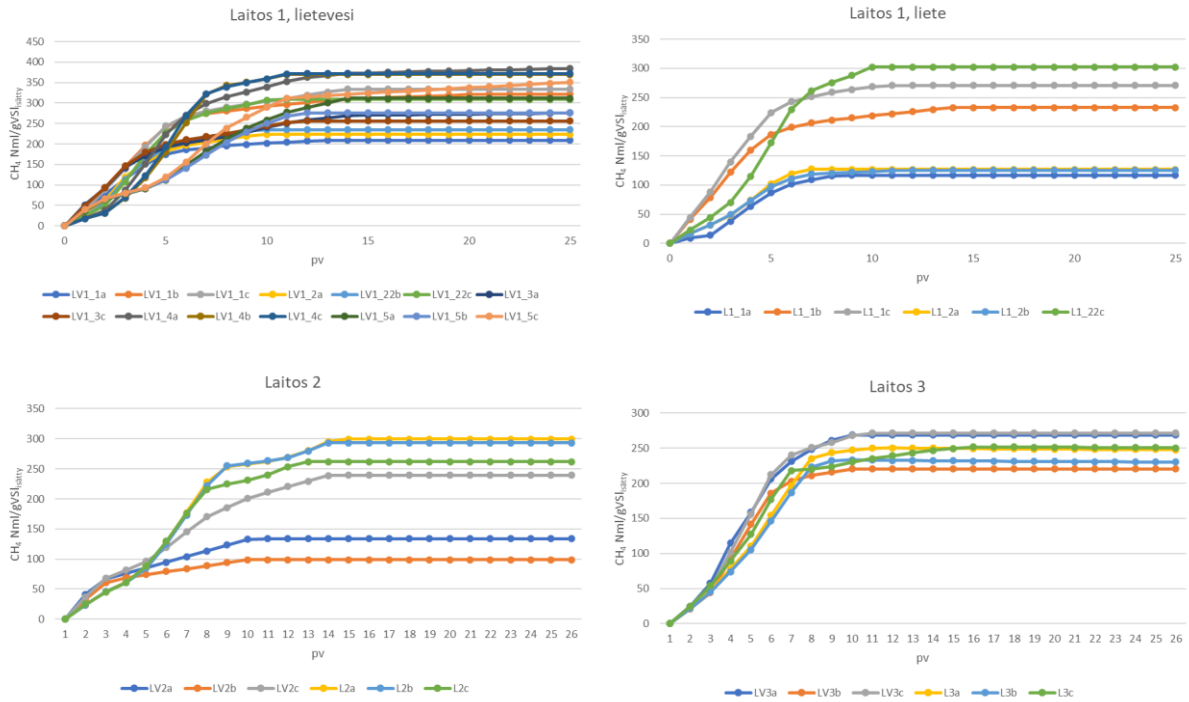
Metaanintuottopotentiaalin määrittäminen toteutettiin kolmena rinnakkaisena käsittelyä automaattisen mittauslaitteiston avulla (Bioprocess Control Ab, Ruotsi) 37 °C:n lämpötilassa ( $\pm 1$  °C). Kokeiden kesto oli 25 päivää. Kokeet toteutettiin 500 mL lasipulloissa ja näytteen ja ympin VS/VS-suhde oli 0,5. Pullot täytettiin tislatulla vedellä 400 g kokonaisuudessaan.

Näyteseosten pH mitattiin ennen ja jälkeen koetta. Ennen kokeen alkua todettiin, että pH:t olivat lähellä optimaalista (7,8), joten pH:n säätöä ei tarvittu. Pulloihin lisättiin pH:n puskuroimiseksi natriumbikarbonaattia ( $\text{NaHCO}_3$ ) annostuksella 3 g/L.

Pullot suljettiin kaasutiiviisti ja muodostuva biokaasu johdettiin  $\text{CO}_2$ -sitoutusyksikköön, jossa biokaasun sisältämä hiilidioksidi sitoutui natriumhydroksidin kanssa. Jäljellä jäävä metaani johdettiin edelleen kaasun tilavuusmittaukseen, joka perustuu nesteensyrjäytykseen. Ennen kokeen alkua pullojen kaasutila ja letkulinjat huuhdeltiin typpikaasulla, jotta olosuhteet saatiin hapettomiksi. Näytteiden kaasuntuotto laskettiin vähentämällä ympin tulos näytettä ja ympiä sisältävän pullon kaasuntuotosta. Kaasumäärät on ilmoitettu normaalitilassa (lämpötila 0 °C = 273,15 K, paine 1 atm).

## Tulokset

Lietevesien metaanintuottopotentiaali orgaanista kuiva-ainetta kohti vaihteli melko paljon; Laitoksen 1 lieteveden BMP oli 200–400 NmL/gVS ja Laitoksen 3 lieteveden BMP 220–270 NmL/gVS. Suurin vaihtelu rinnakkaisten näytteiden välillä oli Laitoksen 2 lietevesissä, jossa kaksi rinnakkaista tuotti selvästi vähemmän metaania (100–130 NmL/gVS) kuin kolmas (240 NmL/gVS). Kaikissa näytteissä oli nähtävissä jonkinlaista vaihtelevuutta sekä rinnakkaisien koeyksilöiden, että eri näytteenottokertojen välillä (Kuva 4, Taulukko 6). Eroja selittää muun muassa se, että lietevesinäytteet olivat hyvin epähomogeenisia ja pienessä mittakaavassa toteutettavissa laboratoriokokeissa oli haastava saada rinnakkaisiin näytteisiin tismalleen sama määrä orgaanista ainesta. Lisäksi lieteveden ja siitä tiivistetyn lieteen laatuun vaikuttaa se, kuinka paljon joukossa on syömätöntä energiapitoista rehua. Sama kuiva-ainemäärä rehua ja ulostetta sisältää selvästi erilaisen määrän energiaa, koska rehusaasti proteiinia ja rasvaa, kun taas ulosteen kuiva-aineessa on enemmän kuituja, mineraaleja ja hiilihydraatteja.



**Kuva 4.** Kumulatiivinen metaanintuotto. LV = lietevesi; L = tiivistetty liete.

**Taulukko 6.** Metaanintuoton vaihtelu kolmen rinnakkaisen kesken suhteutettuna sekä näytteen orgaanisen aineen määrään, että märkäpainoon.

Näyte	CH <sub>4</sub> NmL/gVS		CH <sub>4</sub> NmL/g märkäpaino	
	Min	Max	Min	Max
LV1_1	115	184	3,5	5,5
LV1_2	123	170	0,4	0,6
LV1_3	141	156	1,5	1,6
LV1_4	204	220	1,4	1,5
LV1_5	276	351	0,1	0,2
L1_1	117	271	0,7	1,6
L1_2	126	302	1,0	2,5
LV2	99	240	0,1	0,3
L2	262	300	19,4	22,2
LV3	220	271	5,7	7,0
L3	228	248	29,2	31,9

Kaupallisten laitosten tiivistettyjen lietteiden metaanintuottopotentialissa oli vaihtelua mallillisesti, potentiaalinen ollen 228–300 NmL/gVS. Sen sijaan Laitoksen 1 lietteen metaanintuottopotentialissa oli suurta vaihtelua kahden eri näytteenottokerran välillä. Lisäksi lietteen tiivistysprosessi ei ainakaan näytteenottohetkillä ollut kovin tehokasta, mikä nähdään myös lietteen TS- ja VS-pitoisuuksista (Taulukko 5). Kaupallisilta laitoksilta analysoitiin vain yhden näytteen, mutta tuloksista voi nähdä, että lieteveden tiivistys on nostanut kuiva-ainepitoisuutta moninkertaisesti lietevedeen verrattuna.

## **Yhteenveto metaanintuottopotentialaaleista**

Kalalaitosten vesi- ja lietejakeiden metaanintuoton tasaantui melko nopeasti viimeistään 15 vuorokauden kuluessa, eli orgaaninen aines oli melko nopeasti muunnettavissa metaaniksi (Kuva 4). Metaanintuottopotentialaaleissa oli suurta vaihtelua eri laitosten ja näytteenottoajan-kohtienkin välillä. Metaanipotentialaalit ovat maltillisia ja orgaanista kuiva-ainetta kohti samaa suuruusluokkaa kuin kotieläinten lannoilla (Tampio ym. 2019). Huomionarvoista kuitenkin on, että lietejakeet olivat hyvin laimeita, jolloin tuorepainokohtainen metaanintuotto oli hyvin matala (Taulukko 6). Vastaavasti tehokas tiivistys nostaa tuorepainokohtaista metaanintuottoa merkittävästi.

### **4.2.2. Lieteveden käsittely UASB-reaktorilla**

Kuten edellä todetaan, kalalaitosten lietejakeet ovat usein erittäin laimeita. KiertoKala-hankkeessa testattiin tiivistämättömän lieteveden käsittelyä laboratoriomittakaavan UASB-reaktorilla. Kokeita toteutettiin kaksi, ensimmäinen aloittaen laboratoriossa ja toinen kokonaisuudessaan Laukaan kalanviljelylaitoksella.

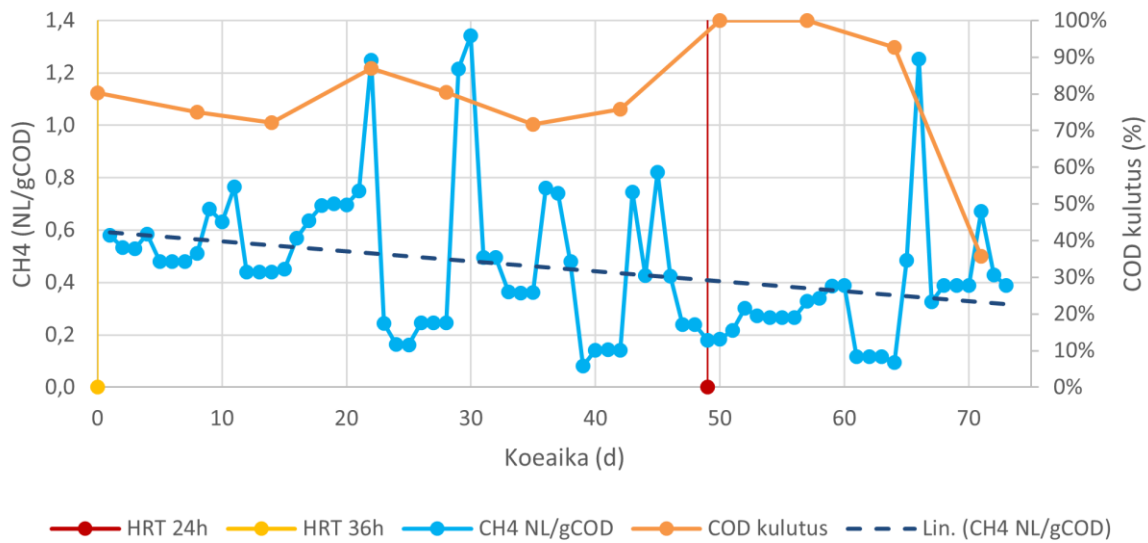
UASB-kokeet tehtiin 6-litran koereaktorilla, jonka toimintaperiaate oli kuvan 2 mukainen. Ensimmäisen kokeen ympäristönä käytettiin kunnallisen jätevedenpuhdistamon lietettä ja toisessa kokeessa ympäristönä käytettiin UASB-reaktorin granulalietettä metsäteollisuuden jätevedenkäsittelystä. Molempien koejaksojen alussa syötteenä käytettiin ensin synteettistä jätevettä, eli eri alkuaineilla ja hiilen lähteillä rikastettua puhdasta vettä. Muodostunut biokaasu johdettiin reaktorin yläosasta kaasukellon kautta kaasupussiin. Nesteen poisto tapahtui ylivuotona reaktorin yläosasta kaasu- ja kiintoaine-erottimen jälkeen.

#### **Koe 1**

Ensimmäinen koejakso (toteutus vuonna 2024) aloitettiin kontrolloidusti laboratoriossa käyttäen syötteenä synteettistä jätevettä. Syöte vaihdettiin asteittain kalalaitokselta toimitettuun lietevedeen, jolla varsinainen 11 viikkoa kestänyt laboratorioskoe toteutettiin. Lieteveden hydraulinen viipymäaika mesofiilissä olosuhteissa (37 °C) toteutetussa kokeessa oli aluksi 36 tuntia ja kokeen loppupuolella se lyhennettiin 24 tuntiin. Prosessin orgaaninen kuormitus (organic loading rate, OLR) oli 0,5–1,1 gCOD/L/vrk. Lietevettä toimitettiin kokeeseen Luukan tutkimusasemalta kolmessa erässä. Lieteveden kuiva-aineen, orgaanisen aineen ja ravinteiden pitoisuudet vaihtelivat huomattavasti erien välillä, mikä aiheutti vaihtelua orgaanisessa kuormituksessa (OLR) ja ravinnekuormituksessa.

- Syötteen (=lieteveden) COD-pitoisuus 0,47–1,51 g/L
- Syötteen (=lieteveden) TSS-pitoisuus 0,44–1,73 g/L

Lietevedellä toteutetussa laboratorioskokeessa COD-vähennemä oli keskimäärin 75 %, eli UASB-käsittely vähensi selvästi lieteveden COD-pitoisuutta. Lietevedellä toteutetulla jaksolla metaanintuotto oli keskimäärin 0,5 NL/gCOD, joskin tuotto vaihteli melko paljon välillä 0,1–1,3 NL/gCOD (Kuva 5). Biokaasun metaanipitoisuus oli 60–80 % ja loppu kaasu oli pääosin hiilidioksidia.



**Kuva 5.** Koejakson 1 metaanintuotto (metaania litroina normaalitilassa / gCOD) ja COD-kulutus.

Kokeessa analysoitiin säännöllisesti myös poistoveden ravinnepitoisuuksia, mutta syötemateriaalin laatuvaihteluiden (ja teknisten ongelmien) ja lyhyen kokeen keston vuoksi ravinnevaiikutuksissa oli paljon epävarmuutta. Kokonaistypen pitoisuuksissa havaittiin suurehkoa vaihtelua ja jopa syöttöä korkeampia pitoisuuksia. Syynä tähän on luultavasti granulalietteen hajoaminen. Myös fosforipitoisuuksissa erot syötteeseen olivat vaihtelevia, eikä tämän lyhyen kokeen perusteella prosessin tehokkuudesta fosforin poistoon pystytä ottamaan kantaa. On kuitenkin huomattava, että lietepatjasta otetuissa näytteissä granulalietteen P-pitoisuudet olivat moninkertaisia lietevedeen nähden, mikä indikoi fosforin sitoutumista lietteeseen.

Ammoniumtyypen ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) osuus poistuvan veden kokonaistypestä nousi prosessissa selkeästi läpi koko kokeen: Syötettävällä lietevedellä  $\text{NH}_4\text{-N}$  osuus kokonaistypestä oli 17–44 % ja poistossa osuus oli noussut 31–86 %:iin.

UASB-laitteisto ympäröineen siirrettiin tämän esitellyn koejakson päätteeksi Laukaan kalalaitokselle, jossa oli tarkoitus jatkaa koetta tuoreemmalla lietevesisyötteellä. Kokeessa ilmeni kuitenkin monia teknisiä ongelmia, ja koe päätettiin uusien teknisten parannusten jälkeen.

## Koe 2

Hankkeen toinen koejakso toteutettiin vuonna 2025 kokonaisuudessaan Laukaan tutkimusasemalla. Reaktori sijoitettiin lämpimään tilaan, ja reaktorin rakennetta ja pumppauksia yksinkertaistettiin tukosten ja muiden prosessihäiriöiden ehkäisemiseksi. Sijoittamalla koe kalalaitoksen yhteyteen, kokeeseen saatiin syötteeksi tuoretta lietevedettä. Syötettävä lietevesi vaihdettiin päivittäin tuoreeseen lietteeseen ja se pidettiin homogeenisena hitaan sekoituksen avulla. Lietevesi myös siivilöitiin ennen välisäiliöön asettamista suurten partikkeleiden erottamiseksi tai rikkomiseksi, jotta nämä eivät tukkisi reaktorin syöttöletkua.

Kaasukellon kumulatiivisesti kertyvä tilavuuslukema kirjattiin ylös arkipäivisin. Laukaassa toteutetussa kokeessa muodostuvasta biokaasusta ei mitattu metaanipitoisuutta, vaan kaasun oletettiin vastaavan Jokioisilla toteutetun kaasun laatua eli biokaasun oletettiin sisältävän 60 % metaania ( $\text{CH}_4$ ) ja 40 % hiilidioksidia ( $\text{CO}_2$ ). Poistosta mitattiin päivittäin pH ja otettiin

näytteet viikoittain. Reaktorin alaosaan kertyvästä lietteestä otettiin näyte viikoittain näytteenottohanan kautta. Sekä poistovesi- että lietenäytteet pakastettiin analyysijä varten.

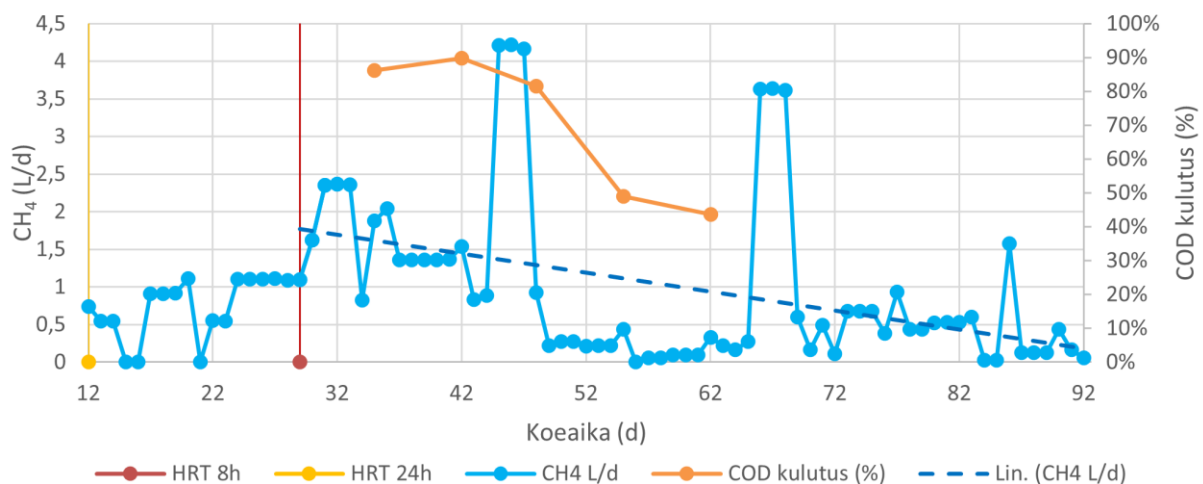
Kokeen 2 kemialliset analyysit toteutettiin aiemmasta kokeesta poiketen kaupallisessa laboratoriossa. Menetelmäeroista johtuen etenkin kemiallisen hapenkulutuksen (COD) pitoisuuksissa oli kokeiden (kokeet 1 ja 2) välillä melko suuria eroja, joten absoluuttisten pitoisuuksien vertailu kahden kokeen kesken ei ole mielekästä. Prosentuaaliset osuudet, kuten esimerkiksi prosessin COD kulutus, ovat kuitenkin vertailtavissa.

Kokeessa lyhennettiin hydraulista viipymäaika asteittain seuraavasti:

- Koevuorokausien 1–14 aikana siirtymä synteettisestä syötteestä kalalietteestä
- Päivät 0–21: HRT: 24 h
- Päivät 21–28: HRT: 18 h
- Päivät 28–91: HRT: 8 h

Reaktorin ja syötteen käsittelyn parannukset autoivat kokeen alussa toimintaa, mutta 4 viikon jälkeen tukoksia alkoi syntyä jälleen reaktoriin. Neljän ensimmäisen koeviikon aikana COD-vähennemä oli noin 78 % (Kuva 6), joka vastasi kokeen 1 tuloksia.

Kaasun mitattu tuotto jäi kokeessa hyvin alhaiseksi, noin 0,9 L/d keskiarvoltaan. Kaasun tuotto laski hyvin nopeasti noin kolmen viikon jälkeen syöttönopeuden noston jälkeen. Muutamasta suuresta kaasuntuotto piikistä voidaan päätellä, että kaasu on voinut jäädä liejupetiin jumiin ja vapautunut kerralla esimerkiksi viikonlopun aikana.



**Kuva 6.** Kokeen 2 metaanintuotto (litraa metaania normaalitilassa / päivä) ja COD-kulutus.

Typen liukoistumista oli havaittavissa myös koejaksolla 2: Koepäivien 35 ja 62 välillä, jolloin prosessin toimi parhaiten, NH<sub>4</sub>-typen osuus kokonaistypestä reaktorista poistuvassa vedessä oli 13–38 %. Samalla aikavälillä syötteessä NH<sub>4</sub>-N osuus kokonaistypestä oli 4–12 %.

## Yhteenveto UASB-kokeista

Pilotoinnit osoittivat, että lieteveden käsittely on mahdollista UASB-tekniikalla, ja jaksoilla, joissa ei ollut teknisiä ongelmia, COD-kulutus oli kohtuullisen korkea, yli 70 %, joskin korkeampiakin kulutuksia on kirjallisuudessa raportoitu (99 %, Mirzoyan & Gross 2013).

Kokeiden ongelmat johtuivat muun muassa siitä, että poistolietettä ei kierrätetty lieteveden mukaan syötön yhteydessä korkeamman ylöspäin virtauksen saavuttamiseksi reaktorissa. Lisäksi ongelmat UASB-kokeissa johtuivat osittain koemittakaavan dimensioista: Koelaitteissa syöttö-, poisto- ja näytesyhteet ovat pieniä, jolloin erilaisia tukoksia muodostuu helpommin kuin tuotantomittakaavassa. Lisäksi näytteenotto häiritsee prosessia suuremmalla massaosuudella verrattuna teollisen mittakaavan laitteistoihin. On siis mahdollista, että liika näytteenotto granulalietteestä on voinut poistaa liikaa liejua reaktorista ja täten häirinnyt sen toimintaa.

Lisäksi kokeessa 2 kiinteän aineen viipymäaika (SRT, solid retention time, "lieteikä") oli todennäköisesti liian lyhyt. Hitaasti kasvavat mikro-organismit, kuten metanogeenit, vaativat pitkän viipymäajan. UASB tekniikan etuna on, että mikrobit pysyvät granulalietteessä, joka ei poistu yhtä nopeasti kuin vesi, jolloin lietteen viipymä saadaan säilytettyä huomattavasti pidempänä kuin hydraulinen viipymäaika;  $HRT \ll SRT$ .

Koska kokeessa ei käytetty nesteen kierrätystä ja lietteestä otettiin säännöllisesti näytteitä, granulalietteen määrä väheni. Lopulta granulalietettä lietteestä sekoittui reaktorin sisältöön, ja kiintoainepitoista lietteä huuhtoutui poistoon, jolloin SRT jäi liian lyhyeksi ja mikrobiologinen prosessi kaatui.

### 4.2.3. Liukoisen fosforin talteenotto biohiilen ja poloniitin avulla

KiertoKala-hankkeessa testattiin RAS-järjestelmässä kaloilla kiertävän veden fosforin poistamista kahdella tavalla aktivoidun biohiilen (Hemka Oy) ja yhden poloniittivalmisteen (Polonite Nordic AB) avulla. Kokeessa käytetty RAS-järjestelmä sijaitsee Luken Laukaan kalanviljelylaitoksella ja on kuvattu julkaisussa Pulkkinen ym. (2021). Koe tehtiin loka-marraskuussa 2024. Vedenkäytön intensiteetti oli noin 700 litraa uutta vettä per kg rehua, jolloin veden  $NO_3-N$  pitoisuus oli noin 30 mg/l. Koe toteutettiin pumppaamalla RAS-järjestelmässä kiertävää vettä 50 litran säiliöihin, joihin on lisätty 25 litraa tutkittavaa materiaalia. Säiliöiden viipymä on kaksi tuntia. Materiaalit kyllästyivät vedellä, eli säiliön vedenpinta on materiaalin ylätasolla, johon vesi pumpattiin. Vesi poistui säiliön alaosasta. Tulevasta ja lähtevästä vedestä otettiin vesinäytteet viikoittain 27 vrk kokeen aikana. Materiaaleista otettiin kokeen aluksi ja lopuksi eri kohdista säiliötä näytteitä, jotka lähetettiin laboratorioon ravinne- ja metallianalyysjä varten.

Vesinäytteistä tehtyjen kokonaisfosforin analyysien perusteella materiaalien fosforinpidätyskyky oli odottamattoman huono (Taulukko 7). Biohiilet pidättivät 1,5 ja poloniitti 1,9 % tulevan veden fosforista eli käytännössä ei lainkaan. Materiaalien analyysitulokset eivät olleet yhtään rohkaisevampia vaan fosforin pidätyskyky näytti päinvastoin vieläkin huonommalta. KiertoKala-hankkeen puitteissa ei ollut mahdollisuutta perata odottamattoman huonon tuloksen syitä tarkemmin. Liukoisen fosforin sieppaamiseen tarvitaan uusia, innovatiivisia ja riittävän edullisia menetelmiä perinteisen fosforin koaguloinnin ja flokkuloinnin tueksi.

**Taulukko 7.** Kiertovesijärjestelmästä kolmeen eri materiaalilla täytettyyn reaktoriin johdetun veden koko-naisfosforipitoisuus ennen reaktoria ja reaktorin jälkeen sekä koko koejaksolle las-kettu fosforin pidätyskyky eli reduktio.

Pvm.	Kok-P, mg/litra			
	Tulovesi	Poloniitti, ulostuleva	Biohiili 1, ulostuleva	Biohiili 2, ulostuleva
17.10.2024	1,31	1,36	1,33	1,32
24.10.2024	1,37	1,41	1,40	1,34
31.10.2024	1,46	1,38	1,38	1,28
7.11.2024	1,48	1,28	1,51	1,54
13.11.2024	1,3	1,26	1,30	1,30
Reduktio, %		3,1	-0,1	1,9

## 4.3. Perkeet ja kuolleet kalat

### 4.3.1. Perinteiset menetelmät

Kalaperkeitä on perinteisesti hyödynnetty eläinten rehuna, lannoitteina ja biopolttoaineina eri käsittelymenetelmien avulla. Kalan perkeet ja vesiviljelystä peräisin olevat kuolleet kalat sisältävät runsaasti rasvoja ja proteiineja, minkä vuoksi ne soveltuvat hyvin biokaasun tuottoon niiden korkean energiasisällön vuoksi. Biokaasuprosessi aloitetaan kalaraaka-aineen murskaamisella ja samalla siitä poistetaan mahdolliset epäpuhtaudet. Murskattu kalamassa sekoitetaan nesteeseen, jotta siitä saadaan pumpattavaa lietettä. Samalla varmistetaan tasainen koostumus ja mikrobien ravinteiden saatavuus. Kalaliete sekoitetaan yleensä muun orgaanisen aineksen kanssa.

Kalanperkeiden käytöstä biokaasun tuotantoon on monia hyötyjä. Prosessi vähentää orgaanisen jätteen määrää ja tuottaa uusiutuvaa energiaa. Samalla syntyy ravinnepitoista lannoitetta. Lisäksi biokaasun valmistus vähentää kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna jätteen polttoon tai kaatopaikkasijoitukseen.

Toinen perinteinen kalaperkeiden/kuolleiden kalojen hyödyntämismuoto on säilörehun (silage) valmistus, jossa kalajätettä, kuten perkeitä tai kuolleita kaloja, säilötään ja jalostetaan nesteyttämällä se happojen ja entsyymien avulla. Näin syntyy nestemäinen tuote, jossa on runsaasti proteiineja, rasvoja ja muita ravintoaineita. Prosessi on suhteellisen yksinkertainen, ja se voidaan toteuttaa pienessäkin mittakaavassa, mikä tekee siitä kestävä tavan käsitellä kalajätettä.

Valmistusprosessin aluksi kalaraaka-aine jauhetaan. Kalasäilörehu valmistetaan joko happoja lisäämällä tai hiilihyaattien aiheuttaman mikrobiperäisen käymisen avulla. Haposäilörehua valmistetaan lisäämällä kalamassaan orgaanisia tai epäorgaanisia happoja (keskimäärin 3 %) tai molempien happojen sekoitusta siten, että kalamassan pH on < 4. Kalan omat suolistoentsyymit pilkkovat kalan proteiinit pienemmiksi liukeneviksi komponenteiksi (peptidit, aminohapot). Happo myös lisää entsyymien aktiivisuutta estäen samalla myös bakteerien aiheuttamaa pilaantumista. Vahvat mineraalihat on neutraloitava lopputuotteesta ennen sen

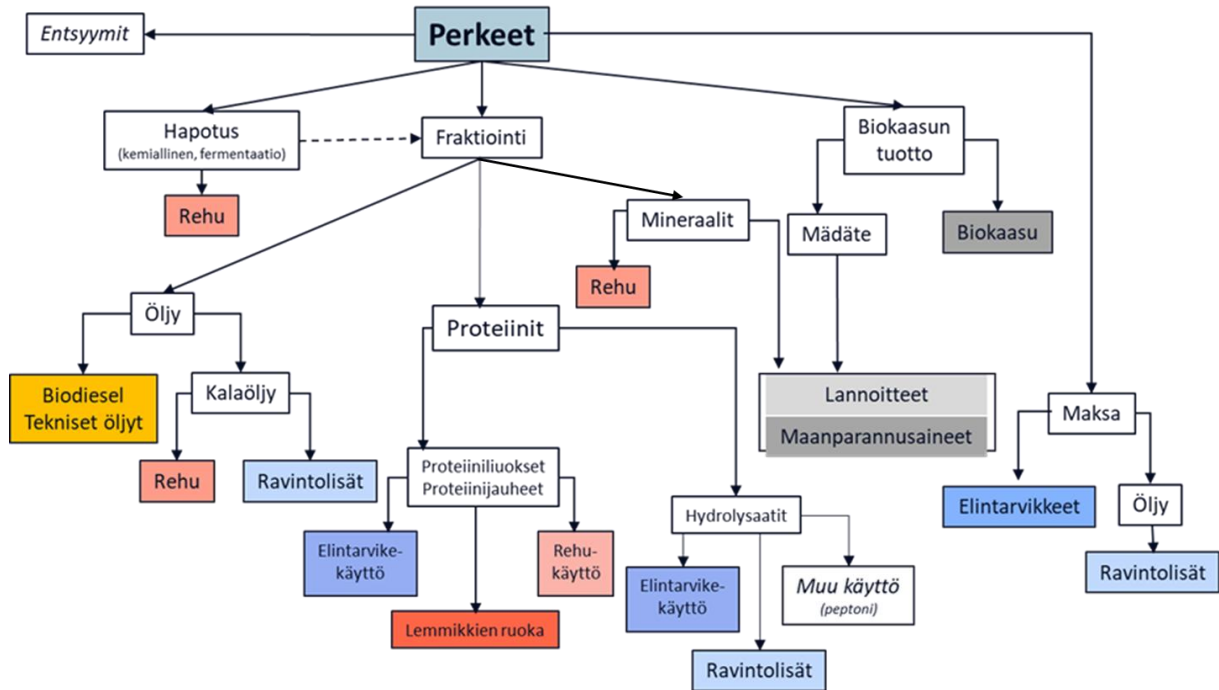
syöttämistä eläimille. Varastoinnin aikana proteiini muuttuu liukenevaksi ja vapaiden rasvahappojen määrä nousee säilörehussa olevassa öljyssä. Oikeassa happamuudessa happosäilörehu säilyy huoneenlämpötilassa vähintään 2 vuotta. Fermentoitu säilörehu valmistetaan lisäämällä siihen maitohapporyhmään kuuluvia mikro-organismeja (*Lactobacillus* sp. ja *Lactococcus* sp. tai *Hansenula*- ja *Saccharomyces*-sukuisia hiivoja), jotka käyttävät kalajätteeseen lisättyä hiilihydraattilähdettä. Fermentoinnissa tapahtuva maitohapon muodostuminen alentaa säilörehun pH:ta ja estää näin ollen patogeenisten ja tuhoavien bakteerien lisääntymistä.

Kalasäilörehua käytetään proteiinipitoisena ainesosana kalojen ja katkarapujen rehuissa. Se parantaa kasvunopeutta ja rehun tehokkuutta. Kalasäilörehu voi korvata kalajauhon osittain tai kokonaan joissakin rehukoostumuksissa. Se sopii myös tuotanto rehuksi, kuten sioille, siipikarjalle ja märentijöille. Kalasäilörehu sekoitetaan usein muiden rehukomponenttien kanssa ravitsemuksen tasapainottamiseksi. Se sisältää välttämättömiä aminohappoja ja rasvahappoja. Sitä voidaan lisätä myös koirien ja kissojen märkä- tai kuivaruoikiin parantamaan lemmikkien ruuan maistavuutta ja sulavuutta. Ravinteikasta säilörehua käytetään myös orgaanisena lannoitteena lisäämään maaperään typpeä, fosforia ja hivenaineita. Se voidaan levittää suoraan tai kompostoinnin jälkeen. Lisäksi säilörehua käytetään sekä biokaasun että bioetanolin raaka-aineena. Säilörehua voidaan hyödyntää myös bioaktiivisten yhdisteiden, kuten peptidien, aminohappojen ja öljyjen lähteenä, joita käytetään lisäravinteissa, kosmetiikassa ja lääkkeissä.

Kolmas perinteinen perkeiden/kuolleiden kalojen hyödyntämismuoto on biodieselin valmistaminen. Tämä prosessi mahdollistaa kalanperkeiden hyödyntämisen uusiutuvana energialähteenä ja vähentää samalla kalateollisuuden jätettä. Ensiksi kalaraaka-aines murskataan ja siihen lisätään muurahaishappoa säilyvyyden parantamiseksi. Hapotettu massa (säilörehu) kuljetetaan jatkokäsittelyyn, jossa massasta erotetaan öljy puristamalla. Öljyn puristuksessa syntynyt jäännös voidaan käyttää biokaasun tuotantoon. Erotettu öljy puhdistetaan ennen varsinaista biodieselin valmistusta. Puhdistuksen jälkeen öljy lämmitetään reaktorissa tavoitelämpötilaan. Siihen lisätään alkoholi (yleensä metanoli) ja katalyytti (esim. natrium- tai kaliumhydroksidi). Seosta sekoitetaan voimakkaasti, jolloin tapahtuu kemiallinen vaihtoesteröinti-reaktio, joka hajottaa öljyn triglyseridit rasvahappometyyliesteriksi (biodiesel) ja glyseriiniksi. Vaihtoesteröinti voidaan tehdä myös entsymaattisesti lipaasientsyymien avulla. Reaktion jälkeen seos jaetaan kahteen faasiin. Ylempi faasi on biodieseliä ja alempi faasi on glyserolia, jota voidaan käyttää muissa teollisissa prosesseissa. Lopuksi biodiesel pestään vedellä useaan kertaan epäpuhtauksien ja reaktiotähteiden poistamiseksi. Vesi poistetaan ja biodiesel suodatetaan.

#### 4.3.2. Uudet sovellukset

Uusien bioteknisten sovellusten avulla on huomattavia mahdollisuuksia jalostaa näistä sivuvirroista arvokkaampia tuotteita ja samalla parantaa ympäristön laatua. Perkeet sisältävät arvokkaita bioaktiivisia ainesosia ja fraktioita, kuten kalaöljyjä, proteiineja, peptidejä sekä entsyymejä. Nämä yhdisteet tarjoavat mahdollisuuksia kehittää uusia sovelluksia esimerkiksi elintarvikkeisiin, ravintolisiin ja lemmikkien ruokiin. Kuvassa 8 esitetty erilaisia mahdollisuuksia perkeistä valmistettaviksi lisäarvotuotteiksi.



Kuva 7. Perkeistä valmistettavia lisäarvotuotteita.

#### 4.3.3. Öljyn erotus

Kalan rasva on tärkeä monitydyttymättömien n-3-rasvahappojen, erityisesti EPA:n (eikosapentaenihappo, 20:5 n-3) ja DHA:n (dokosaheksaenihappo, 22:6 n-3), lähde. Ihminen pystyy muuntamaan EPA:a jonkin verran DHA:ksi mutta EPA on saatava ravinnosta. Euroopan elintarviketurvallisuusviranomaisen (EFSA) on hyväksynyt useita terveystieteitä EPA:sta ja DHA:sta. Nämä väitteet liittyvät muun muassa sydämen terveyteen, aivojen toimintaan ja näkökykyyn (Puroomega 2016).

Suurin osa eläinrehuksi käytetystä raakakalaöljystä (crude fish oil) tuotetaan maailmanlaajuisesti märkäpuristusmenetelmällä kalajauhon tuotantoprosessin yhteydessä. Perinteinen kalaöljyn tuotantoprosessi (renderöinti) alkaa raaka-aineen murskaamisella ja esilämmityksellä. Keittovaiheessa raaka-aine kuumennetaan (noin 85–95 °C:seen) suurissa keittokattiloissa. Kuumennus hajottaa kudusrakenteet ja vapauttaa öljyn. Kuumennettua massaa puristetaan mekaanisesti, jolloin syntyy nestemäinen osa (vesi + öljy) ja kiinteä jäännös (käytetään usein kalajauhon tuotannossa). Neste syötetään separaattoriin, jossa öljy erotetaan vedestä. Saatu raakakalaöljy sisältää monia epäpuhtauksia, kuten vapaita rasvahappoja, primaarisia hapettumistuotteita, mineraaleja, väriaineita, kosteutta, fosfolipidejä ja liukenemattomia epäpuhtauksia. Eristetty kalaöljy ei ole sellaisenaan elintarvikekelpoista, vaan se on puhdistettava eli raffinoitava, jotta sen aistinvaraiset ominaisuudet ja säilyvyys paranevat. (Huang & Sathivel 2010, Maqsood ym. 2012, Bimbo 2019). Puhdistuksen ja kirkastuksen jälkeen omega-3-rasvahapot (esimerkiksi EPA ja DHA) voidaan väkevöidä seuraavassa vaiheessa. Ensinnäkin EPA ja DHA muuttetaan etyyliestereiksi ja erotetaan tislamalla. Väkevöidyt rasvahapot voidaan muuttaa takaisin triglyseridimuotoon, joka on luonnollisempi ja usein paremmin imeytyvä muoto. Väkevöinti-prosessi suoritetaan erityisesti ravintolisien valmistuksen yhteydessä. Kirjalohtiöljy ei sovellu tähän tarkoitukseen, koska sen omega-3-rasvahappopitoisuus on liian alhainen (noin 7 %). Lopuksi öljy pakataan hapettumista estävään astiaan ja varastoidaan viileässä, valolta suojatussa paikassa. Prosessin lopputuote on joko raakakalaöljy (käytetään eläinrehussa) tai

puhdistettu kalaöljy (käytetään ihmisravinnossa ja ravintolisissä). Lisäksi tiettyjen kalalajien kalaöljystä voidaan tuottaa korkean omega-3-pitoisuuden kalaöljyä molekyyllislaamalla ja transesteröimällä.

Tuoreet raaka-aineet ovat välttämättömiä korkealaatuisen kalaöljyn tuottamiseksi ihmisravinnoksi. Esimerkiksi kalasivuvirrat pyritään kuljettamaan öljynjalostamoon muutaman tunnin kuluessa perkuusta. Raaka-aineen laatua voidaan parantaa myös saaliin tehokkaalla jäähdytyksellä. Korkealaatuista ihmisravinnoksi tarkoitettua öljyä tuotetaan teollisesti pääasiassa kolmella eri menetelmällä (Rustad ym. 2011). Ensimmäisessä menetelmässä öljy erotetaan kalamassasta lämpötilan avulla. Käytetyt lämpötilat ovat kuitenkin alhaisemmat (70–90 °C) kuin perinteisessä renderöintiprosessissa. Ruuvipuristimen sijaan kuumennettu massa pumpataan suoraan dekanteriin tai trikantteriin. Dekanteri erottaa massan ensin kiinteään ja nestemäiseen osaan. Nestemäinen osa pumpataan sitten separaattoriin, joka erottaa öljyn ja veden toisistaan. Dekantterin sijaan voidaan käyttää trikantteria, joka erottaa kuumennetun massan suoraan kolmeen faasiin: kiinteään, nestemäiseen ja öljyyn. Tämän alemmassa lämpötilassa suoritettavan erotusprosessin etuna on öljyn erittäin alhainen hapettumistila (sekä peroksidittä anisidiinipitoisuudet ovat alle yhden) ja alhaisempi vapaiden rasvahappojen pitoisuus verrattuna esimerkiksi kalajauhon ja säilörehun tuotannossa saatavaan kalaöljyyn.

Toisessa elintarvikelaatuisen kalaöljyn tuotantoprosessissa kalaraaka-aine hydrolysoidaan 40–60 °C:ssa käyttämällä kaupallisia proteolyttisiä entsyymejä ja kalan omia (endogeenisiä) entsyymejä. Hydrolyysi pysäytetään kuumentamalla seos 90 °C:seen entsyymien inaktivoimiseksi. Seuraavaksi öljy, vesiliukoinen hydrolysaatti ja liukenematon sakka erotetaan toisistaan dekantterilla tai trikantterilla, kuten edellä on kuvattu. Tämän prosessin päätuote on kalaproteiinihydrolysaatti (FPH), joten prosessi on yleensä optimoitu FPH:n saannon eikä öljyn laadun kannalta. Esimerkiksi edellä kuvattuun erotteluprosessiin verrattuna kalaraaka-aineiden lipaasi pysyy aktiivisena hydrolyysiprosessin aikana, mikä lisää öljyn vapaiden rasvahappojen määrää. Vapaat rasvahapot hapettuvat helposti, mikä myös heikentää öljyn laatua.

Kolmas prosessi elintarvikekäyttöön soveltuvan kalaöljyn tuottamiseksi on yhdistelmä kahdesta edellisestä menetelmästä. Tässä prosessissa suurin osa öljystä erotetaan ensin korkealaatuisena (premium) öljynä kuumentamalla raaka-aine 70–90 °C:seen, minkä jälkeen denaturoitu proteiini hydrolysoidaan kaupallisilla proteaaseilla 40–60 °C:ssa. Entsyymien inaktivoinnin jälkeen jäljelle jäänyt öljy, vesiliukoinen hydrolysaatti ja liukenematon sakka erotetaan. Tämän prosessin etuna on korkealaatuisen öljyn saanto ja se, että endogeeniset entsyymit eivät häiritse proteiinihydrolyysiä. Lisäksi hydrolysaattien koostumus ja ominaisuudet ovat toistettavampia, vaikka saannot ovat pienemmät.

Kalaöljyä voidaan valmistaa monilla erilaisilla menetelmillä. Perinteisiä valmistusmenetelmiä ovat edellä kuvatut menetelmät: märkäprosessi (yleisin teollinen menetelmä, jossa käytetään lämpöä ja mekaanista puristusta rasvan vapauttamiseen) ja entsyymaattinen uutto (hyödyntää luonnollisia tai lisättyjä entsyymejä rasvan vapauttamiseen). Kolmas perinteinen kalaöljyn valmistusmenetelmä on liuotinuutto, josta on käytössä useita eri variaatioita, kuten maserointi, Soxhlet-uutto ja Randall-uutto. Tämä tekniikka perustuu öljyn hydrofobisuuteen eli se liukenee poolittomiin orgaanisiin liuottimiin, kuten petroleetteriin, heksaaniin, metanoliin ja kloroformiin. Turvallisuus- ja ympäristöystävällisyyskysymykset rajoittavat kuitenkin liuotinuuton käyttöä (Estiasih ym. 2021).

Ylikriittinen uutto (SFE) on mielenkiintoinen moderni vaihtoehto korkealaatuisen kalaöljyn tuotantoon (Letisse ym. 2006, Rubio-Rodríguez ym. 2012). SFE on ympäristöystävällinen ja tehokas tapa tuottaa erittäin puhdasta öljyä ilman liuottimia. SFE-menetelmän etuna on, että siinä käytetään alhaisia lämpötiloja ja hiilidioksidia, jotka vähentävät n-3-rasvahappojen haurautta. Menetelmän ongelmana on sen korkeat tuotantokustannukset, jotka johtuvat sekä laitteiden (korkea paine) että raaka-aineen (kuivaus  $\leq 20$  % kosteuspuhtausasteen) erityisvaatimuksista (Rubio-Rodríguez ym. 2012). Muita uusia kalaöljyn tuotantomenetelmiä ovat infrapuna- (IR), ultraääni- (UAE) ja mikroaaltouuniavusteinen uutto (MAE). Infrapuna on osa sähkömagneettista spektriä, jonka aallonpituudet vaihtelevat välillä 0,75–1000  $\mu\text{m}$ . Perinteiseen lämmitykseen verrattuna IR-menetelmän etuja ovat lyhentynyt lämmitysaika, korkea lämmönsiirtokerroin, infrapunalaitteiden pieni koko, alhaiset energiakustannukset ja prosessin helppo hallinta. Korkean lämpötilan nousun vuoksi proteiinien denaturoituminen on kuitenkin mahdollista. UAE perustuu akustiseen kavitaatioon, joka rikkoo soluseinät, lisää liuotuksen tunkeutumista ja helpottaa öljyn vapautumista. UAE lyhentää uuttamisaikaa, mutta sen energiankulutus on suurempi ja sen laajentaminen suurempaan mittakaavaan on vaikeaa. MAE-menetelmässä mikroaallot lämmittävät liuotinta, mikä vähentää kalan sisäelinten kosteuspuhtautta ja lisää painetta. Paine rikkoo kalan solukalvot ja vapauttaa öljyn. Tämä uuttomenetelmä käyttää alhaisempaa lämpötilaa ja lyhentää uuttoaikaa, mutta voi aiheuttaa haurautta. Vaikka öljyn talteenoton parantamiseksi on kehitetty erilaisia uusia tekniikoita, kuten IR, MAE ja UAE, niiden kustannukset ovat erittäin korkeat teollisen mittakaavan tuotannossa. Koska nämä modernit tekniikat ovat kustannustehottomia, useimmat teollisuudenalat valitsevat perinteiset tekniikat, erityisesti märkärenderöinnin ja liuotinuuton. Omega-3-rasvahappojen tuotantoon suositellaan matalassa lämpötilassa tapahtuvaa renderöintiä, vaikka kuumennuksen kesto on pidempi kuin korkeassa lämpötilassa. Renderöinnin haittana on proteiinien denaturoituminen korkeiden lämpötilojen vuoksi. Tästä syystä menetelmä ei sovellu ruoansulatusentsyymien eristämiseen. Toisaalta denaturoitunut proteiini hydrolysoituu helpommin kalaproteiinihydrolysaatin tuotannossa (Estiasih ym. 2021).

Kalaöljyä käytetään monipuolisesti sekä ihmisravinnossa että teollisuudessa. Sen tärkeimmät käyttötarkoitukset ovat:

### 1. Ravintolisät ihmisille

- Kalaöljy on tunnettu omega-3-rasvahappojen (EPA ja DHA) lähde.
- Käytetään kapsleina tai nesteinä tukemaan sydämen terveyttä, aivotoimintaa, näkökykyä ja tulehdusten vähentämistä
- Suositellaan erityisesti ihmisille, jotka eivät syö säännöllisesti rasvaista kalaa.

### 2. Rehuteollisuus

- Käytetään kalankasvatuksessa tärkeänä energian ja rasvahappojen lähteenä.
- Soveltuu myös siipikarjan ja sikojen ruokintaan.
- Parantaa eläinten kasvua, vastustuskykyä ja rehun hyväksikäyttöä.

### 3. Lemmikkieläinten ravinto

- Lisätään koirien ja kissojen ruokaan tukemaan ihon ja turkin hyvinvointia, nivelten liikkuvuutta ja kognitiivista toimintaa

#### 4. Teolliset sovellukset

- Käytetään voiteluaineissa, maaleissa ja saippuoissa.
- Joissain tapauksissa myös biopolttoaineiden valmistuksessa.

#### 5. Farmaseuttiset ja kosmetiikkatuotteet

- Käytetään ihonhoitotuotteissa (esim. voiteet, seerumit) sen antioksidanttisten ja tulehdusta ehkäisevien ominaisuuksien vuoksi.

#### 4.3.4. Proteiinijakeiden tuotto

Perkeistä ja kuolleista kaloista voidaan valmistaa useita erilaisia proteiinijakeita, joita hyödynnetään elintarvike- ja rehuteollisuudessa. Huomioitava, että kuolleiden kalojen käyttö vaatii tiukkaa valvontaa (esim. EU:n rehuhygienialainsäädäntö). Elintarvikekäyttöön soveltuvat vain tuoreet ja turvallisesti käsitellyt raaka-aineet. Alla lyhyt yleiskatsaus tärkeimpiin kala-proteiinijakeisiin:

Kalaproteiiniivisteet (Fish Protein Concentrates, FPC)

- Koostumus: 70–90 % proteiinia
- Käyttö: Elintarvikkeiden proteiinivahvistus, erityisesti kehitysmaissa
- Valmistus: Liuottimilla rasvan ja veden poisto, proteiinin kuivaus

Kalajauho (Fish Meal)

- Koostumus: 60–72 % proteiinia, rasvaa ja mineraaleja
- Käyttö: Eläinrehut, erityisesti kalanpoikasille ja siipikarjalle
- Valmistus: Keittäminen, puristus, kuivaus ja jauhaminen

Kalaproteiini-isolaatit (Fish Protein Isolates)

- Koostumus: >90 % proteiinia
- Käyttö: Funktionaaliset elintarvikkeet, proteiinipatukat
- Valmistus: pH:n säätö (isoelektrinen saostus, isoelectric precipitation), suodatus ja kuivaus

#### 4.3.5. Proteiinihydrolysaattien tuotto

Kalan proteiinihydrolysaatit voidaan tuottaa kemiallisella tai entsymaattisella hydrolyysillä. Kemiallisessa hydrolyysissä proteiinien peptidisidokset hajotetaan hapolla tai emäksellä erittäin korkeissa lämpötiloissa (jopa 118 °C) ja pH-arvoissa. Kemiallisessa hydrolyysissä yleisimmin käytetyt hapot ovat suolahappo ja rikkihappo. Ne tuottavat erittäin hydrolysoituja tuotteita, joilla on korkea liukoisuus. Happohydrolyysi on hyvin yksinkertainen menetelmä, mutta sitä on vaikea hallita. Tästä syystä hydrolysaattien kemialliset ja koostumukselliset ominaisuudet voivat vaihdella suuresti eri tuotantoerissä (Kristinsson & Rasco 2000). Lisäksi käytetyt ankarat olosuhteet voivat heikentää lopputuotteiden ravintoarvoa tuhoamalla tärkeitä aminohappoja, kuten tryptofaania, mikä voi rajoittaa happohydrolysaattien käyttöä elintarvikesovelluksissa. Toinen ongelma johtuu hapon neutraloinnista emäksellä (esimerkiksi natriumhydroksidilla, NaOH), joka tuottaa suuria määriä suolaa. Suola heikentää myös hydrolysaatin maittavuutta

ja häiritsee sen toiminnallisia ominaisuuksia. Siksi happohydrolyysiä käytetään pääasiassa lannoitteiden valmistuksessa (Kristinsson & Rasco 2000). Emäksinen hydrolyysi (usein NaOH:ta käyttäen) aiheuttaa myös ongelmia lopputuotteessa. Proteiinien kuumentaminen emäksisissä olosuhteissa tuhoaa osittain muun muassa välttämättömiä aminohappoja (treoniini, kysteiini ja lysiini). Lisäksi se voi aiheuttaa L-aminohappojen rasemisoitumisen D-aminohapoksi, jotka eivät imeydy ruoansulatuskanavasta. Emäshydrolyysissä voi myös muodostua myrkyllisiä yhdisteitä, kuten lysinoalaniinia (Friedman 1978, Kristinsson & Rasco 2000). Kemiallisista menetelmistä happohydrolyysi on yleisimmin käytetty menetelmä.

Kaupallisten entsyymien käyttö kalahydrolysaattien tuotannossa on yleistynyt, koska entsyymit mahdollistavat lopputuotteelle toivotun hallitun pilkkoutumisen. Hydrolyysiprosessi aloitetaan kalaraaka-aineen jauhamisella. Jauhetun kalamassaan proteiinipitoisuus säädetään 8–12 %:iin lisäämällä siihen vettä. Seuraavaksi massa kuumennetaan ja tarvittaessa sen pH säädetään entsyymiaktiivisuuden kannalta optimaaliselle tasolle. Hydrolyysi aloitetaan lisäämällä entsyymi massaan. Hydrolyysin aikana massan lämpötila pidetään entsyymille optimaalisella tasolla massaa samalla sekoittaen. Halutun ajan kuluttua hydrolyysi lopetetaan inaktivoimalla entsyymi joko kuumentamalla tai säätämällä massan pH:n tasolle, jolla entsyymi ei ole aktiivinen. Hydrolysoitu massa pumpataan esimerkiksi trikantteriin, joka erottaa sen kiintoaineseen, nesteeseen ja öljyyn. Erottelun jälkeen vesiliukoinen FPH joko konsentroidaan, hydrolysaatit voidaan varastoida vähentämällä niiden vesipitoisuus 50 %:iin haihduttamalla (Thorkelson & Kristinsson 2009, Shaviklo 2015) tai kuivataan esimerkiksi sumutuskuivaimella.

Kalan proteiinihydrolysaatit liukenevat pääsääntöisesti hyvin veteen laajalla pH- ja ioniväkevyysalueella ja kestävät hyvin kuumentamista ilman saostumista (Skanderby 1994). Yleensä niillä on myös hyvät vedensidonta-, emulgoituvuus-, geelitymis- ja vaahoutumisominaisuudet, joita voidaan hyödyntää erilaisissa elintarvikkeissa (Kristinsson 2006). Lisäksi niiden ravintoarvo on myös erinomainen (Shahidi ym. 1995, Slizyte ym. 2005a). Elintarvikkeiden lisäksi entsyymaattisesti tuotettuja kalaproteiinihydrolysaatteja käytetään rehuissa, ravintolisissä, mikrobien kasvualustojen tuotannossa ja lääketieteellisyydessä (Gildberg ym. 2002, Dauksas ym. 2005, Slizyte ym. 2005a, Slizyte ym. 2005b).

Bioaktiivisilla peptideillä tarkoitetaan peptidejä, joilla on jokin biologinen tai fysiologinen ominaisuus eli ne vaikuttavat elimistön toimintoihin tavalla, joka voi olla hyödyllinen terveydelle. Kaloista tuotetuilla bioaktiivisilla peptideillä arvioidaan olevan suuri kaupallinen potentiaali erilaisissa ravintolisissä ja lääketieteellisissä sovelluksissa, koska niillä on havaittu olevan monia bioaktiivisia ominaisuuksia, kuten antimikrobisia, antiviraalisia, kasvaimia estäviä, antioksidanttisia, verenpainetta sääteleviä, antikoagulanttisia, kipua lievittäviä (analgettisia), ahdistusta lievittäviä (anksiolyyttisiä) ja ruokahalua hillitseviä ominaisuuksia (Kim & Wijesekara 2010, Cheung ym. 2015). Bioaktiivisten peptidien kaupallistamisessa on huomioitava, että terveysväittämien hyväksyntä EU:ssa on tiukasti säädelty ja kuuluu Euroopan elintarviketurvallisuusviranomaisen vastuulle. EFSA:n ohjelmasuunnitelmassa 2025–2027 korostetaan edelleen tarvetta luotettavalle tieteelliselle näytölle ja kuluttajaviestinnän selkeydelle. Bioaktiiviset yhdisteet ovat osa EFSA:n kiinnostuksen kohteita, mutta hyväksyntäprosessi on edelleen tiukka.

#### 4.3.6. Entsyymien tuotto

Kalan perkeet ja kokonaiset kalat sisältävät kalan suoliston, joka on potentiaalinen kalaentsyymien lähde. Entsyymit ovat biologisia katalyyttejä, mikä tarkoittaa, että ne nopeuttavat reaktioita. Niitä käytetään monilla teollisuudenaloilla, koska ne ovat spesifisiä, nopeavaikutteisia ja säästävät usein raaka-aineita, energiaa, kemikaaleja ja/tai vettä perinteisiin menetelmiin verrattuna (Jegannathan & Nielsen 2013). Kalojen ruoansulatuselimien tärkeimmät proteaasit ovat samanlaisia kuin nisäkkäillä, eli pepsiini (happaman mahalaukun entsyymi) ja emäksiset ohutsuolen entsyymit, kuten trypsiini, kymotrypsiini, kollageenaasi ja elastaasi.

Vaihtolämpöisten kalojen selviytyminen kylmässä vedessä edellyttää, että niiden entsyymit ovat aktiivisia alhaisissa lämpötiloissa. Kylmissä ympäristöissä, kuten Suomessa, kalojen entsyymiaktiivisuus on korkeampi kuin tasalämpöisten eläinten. Toisaalta niiden lämpöstabiilisuus on suhteellisen alhainen (Asgeirsson ym. 1989, Kristjansson 1991). Korkea entsyymiaktiivisuus alhaisissa lämpötiloissa on erityisen kiinnostava ominaisuus elintarviketeollisuudelle, jossa käytetään alhaisia prosessointilämpötiloja. Lisäksi kalojen entsyymien suhteellisen alhainen lämpöstabiilisuus on hyödyllistä elintarvikkeiden jalostuksessa, koska entsyymiaktiivisuus voidaan nopeasti inaktivoida vähemmällä lämpökäsittelyllä (Simpson & Haard 1987, Kishimura ym. 2008).

Kalojen sivutuotteista peräisin olevien entsyymien käyttöä rajoittavat raaka-aineiden kausittainen saatavuus, ravitsemustilan aiheuttamat vaihtelut määrän ja/tai entsyymiaktiivisuuden suhteen sekä raaka-aineen pilaantumisalttius. Lisäksi entsyymien eristäminen luonnollisista lähteistä on kallista, mikä rajoittaa niiden laajamittaista käyttöä. Lisätutkimusta tarvitaan uusien spesifisten ja lupaavien entsyymien löytämiseksi ja niiden optimaalisten käyttöolosuhteiden määrittämiseksi, samalla kun kiinnitetään huomiota erotusprosessien kustannustehokkuuteen (Bougatef 2013).

## 5. Kiertotalouskonseptit

Sivuvirtojen erilaisia hyödyntämistapoja havainnollistetaan laskennallisten esimerkkikonsepttien avulla. Konsepttien avulla pyritään tuomaan esiin sivuvirtojen käsittelytapojen vaikutuksia ravinteiden hyödyntämiseen, kustannuksiin, tuottoihin ja energiankulutukseen. Tarkastelut toteutetaan kahdelle eri kokoiselle kirjolohen kasvatuksen kiertovesilaitokselle: 500 ja 5 000 tn/vuosi (tuotetun kalan määrä). Kapasiteetiltaan Suomen suurimmat kiertovesilaitokset ovat 2 000–3 000 tn/vuosi, pienimmät 50–100 tn/vuosi. 5 000 tn toteutunutta tuotantoa vuodessa olisi globaalisti iso laitos, joskin suurimmat hankkeet tähtäävät jopa joihinkin kymmeneen tuhansiin tonneihin vuodessa. Suomessa kulutetaan kasvatettuja lohikaloja noin 40 000 tonnia vuodessa, josta tällä hetkellä 15 000 tonnia tuotetaan Suomessa. Tarkastelun pohjana käytettiin kirjallisuudesta saatuja lähtöarvoja ja -oletuksia sekä asiantuntija-arvioita. Erityisesti massamääriltään suurimpien jakeiden, eli vesi- ja lietejakeiden käsittelyyn pohdittiin aluksi erilaisia vaihtoehtoja (Taulukko 8), ja listattiin asiantuntija-arvioiden pohjalta niiden heikkouksia ja vahvuuksia eri mittareilla.

**Taulukko 8.** Vesi- ja lietejakeiden prosessointimenetelmien vaikutusten alustava vertailu.

	Lietevesi jätevedenpuhdistamolle	Lietevesi UASB-käsittelyyn	Tiivistetty liete kompostointiin	Tiivistetty liete biokaasulaitokselle
Energia	- Etenkin ilmastus kuluttaa energiaa jätevedenpuhdistuksessa.	+ Tuotetaan biometania, mutta suuret käsiteltävät vesimäärät.	- Mahdollisuus kompostoinnin lämmön hyödyntämiseen?	++ Biometaanin tuotanto.
Ravinteiden kierrätys	-- N poistetaan (ilmakehään). P heikosti hyödynnettävään muotoon.	+ N ja P kasveille käyttökelpoisessa muodossa. N menee pääosin prosessin läpi, ja hyödyntäminen riippuu veden jatkokäsittelystä.	- N hävikkiä. P heikosti hyödynnettävään muotoon.	+/- N liukoistuu biokaasuprosessissa. P heikosti hyödynnettävissä muodossa.
Talous	- Voi olla kallista (ei aina).	-- Olisi saatava tuottoa.	+ Melko edullista pienessä mittakaavassa.	- Porttimaksu + Ei investointia
Toteutettavuus	+ Kalalaitokselle helppo ratkaisu, mikäli viemäriverkoston piirissä.	+/- Ei kovin yleinen Suomessa.	+ Tunnettua tekniikkaa.	+ Helpohko ratkaisu jos biokaasulaitos lähellä.

Tarkastelussa on kaksi eri skenaariota, joista ensimmäinen malli painottaa energian tuotantoa, kun taas toinen painottuu enemmän arvokomponenttien ja ravinteiden talteenottoon ja hyödyntämiseen. Tarkastelu keskittyy kalan tuotannon sivuvirtojen, eli lieteveden, perkuujätteiden ja kuolleiden kalojen hyödyntämiseen. Varsinaisen lopputuotteen, eli syötäväksi kasvatetun kalan, tuotantoprosessin optimointiin ei tässä tarkastelussa oteta kantaa. Vesi- ja lietejakeiden käsittelymenetelmien valinta toteutettiin alustavan arvioinnin (Taulukko 8) pohjalta.

- **Energiaskenaario**  
Painotus energiatehokkuudessa ja energiankulutuksen minimoinnissa sekä energian tuotannossa.
- **Kiertotalousskenaario**  
Painotus resurssien (ravinteet ja arvokomponentit) hyödyntämisessä ja jalostuksessa.

## 5.1. Kalalaitoksen kuvaus

Sivuvirtojen käsittelyn konseptit rakennettiin kahdelle eri kokoluokan kuvitteelliselle kalalaitokselle. Kiertotalousskonseptit keskittyvät vain sivuvirtojen resurssitehokkaaseen hyödyntämiseen, joten itse kalankasvatuksen osuus on kaikissa skenaariossa samanlainen.

Esimerkkinä käytettävien kalalaitosten yksinkertaistettu panosten ja tuotosten koonti on esitetty taulukossa 9 ja laskennan lähtötiedot yksityiskohtaisemmin liitteessä. Kalojen kiertovesikasvatustilalaitoksen käyttämistä tuotantopanoksista tarkastelussa on mukana rehu, puhdas korvausvesi sekä sähkö ja lämpö. Energiankulutus sisältää kalankasvatuksen perustoiminnot, eli veden pumppauksen, käsittelyn ja lämpötilan säädön sekä veden- ja lietteenkäsittelyn osalta rumpusuodattimen ja kierrätettävän veden mikrobiologisen puhdistuksen vaatiman (ja tuotettaman) energian. Systemin tuotoksina huomioitiin perattu kala ja kalasivuvirrat sekä lietevesi ja poistovesi. Lisäksi massataselaskennassa huomioitiin kalojen elintoimintojen myötä muodostuvan hiilidioksidi ja hiilen poistuma kaasuna. Vuosikuolleisuuden oletettiin olevan 5 % ja lieteveden kiintoainepitoisuuden 1,25 %. Kuten taulukosta 9 nähdään, massaosuutena selvästi suurimmat sivuvirrat ovat lietevesi ja poistovesi. Kalabiomassaan sitoutuneena sivuvirtana prosessista poistuu kuolleita kaloja sekä perkeitä.

**Taulukko 9.** Panosten ja tuotosten määrät kahdessa eri kokoisessa kiertovesilaitosesimerkissä.

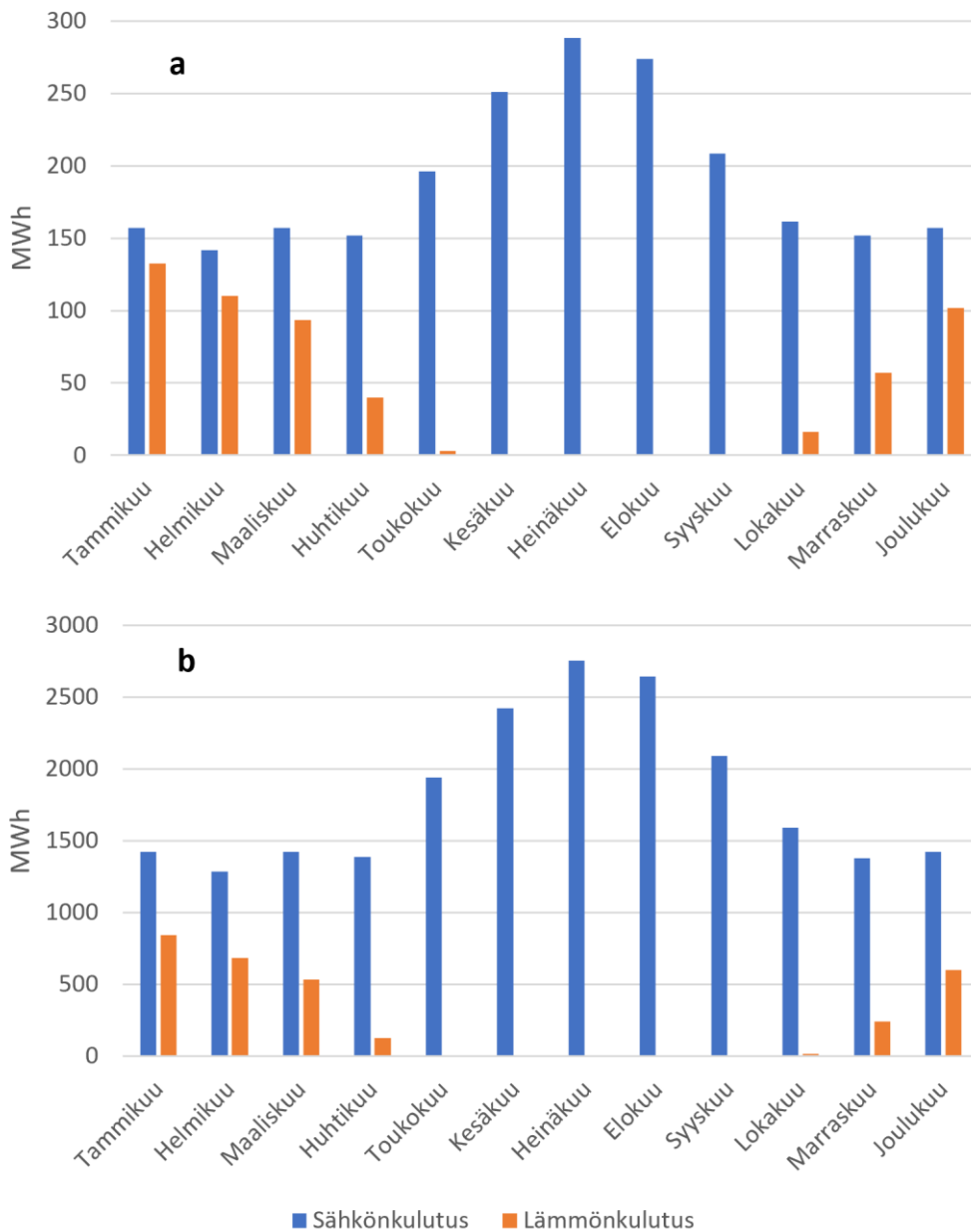
Tuotantomäärä	500 tn	5 000 tn
<b>Tuotantopanokset</b>		
Rehunkäyttö (tn)	537	5 370
Vedenkäyttö (tn)	322 000	3 222 000
Sähkö (MWh)	2 297	21 746
Lämpö (MWh)	554	3 043
<b>Kaloihin sitoutuneena poistuva</b>		
Perattu kala (tn)	404	4 038
Perkeet (tn)	71	713
Kuolleet kalat (tn)	25	250
<b>Kaloihin sitoutumattomana poistuva</b>		
Lietevesi (tn)	107 400	1 074 000
Poistovesi (tn)	214 697	2 146 658

Massataseiden oletettiin kasvavan lineaarisesti laitoksen kasvaessa; 10 kertaa suurempi tuotantomäärä tuottaa 10-kertaiset määrät sivuvirtoja. Sen sijaan energiankulutuksessa laitoksen kasvattaminen tuo synergiaetuja. Erityisesti lämmönkulutuksessa suuremmat tuotantotilat ja isompi eläinmäärä parantavat energiatehokkuutta. Kalojen elintoiminnoista ja veden

pumppauksesta muodostuvaa lämpöä kertyy isommissa tuotantoyksiköissä enemmän, ja suurempien hallien pinta-alakohtaiset lämpöhäviöt ovat pienempiä. Pienemmällä laitoksella (500 tn/vuosi) lämpöenergian tarve on noin 19 % vuosittaisesta kokonaisenergiatarpeesta, kun suuremmalla laitoksella (5 000 tn/vuosi) lämmön tarpeen osuus on vain 12 % kokonaisenergiasta. Sähkönkulutus kasvaa melko tasaisesti laitokseen kasvaessa, mutta siinäkin suurempi yksikkö tuo hieman etua tehokkuuteen.

Kirjolohen kiertovesikasvatuksessa veden lämpötila pyritään pitämään läpi vuoden melko tasaisena ja tässä työssä oletimme veden tasaista 15 °C lämpötilaa. Tämä tarkoittaa sitä, että Suomessa laitos vaatii talviaikaan lämmitystä, mutta kevästä syksyyn jäähdytystä, mikä myös kuluttaa energiaa. Lämmön- ja sähkönkulutus jakaantuukin epätasaisesti eri vuodenojalle (Kuva 9), mikä täytyy ottaa huomioon erityisesti lämmöntarpeen tyydyttämisessä.

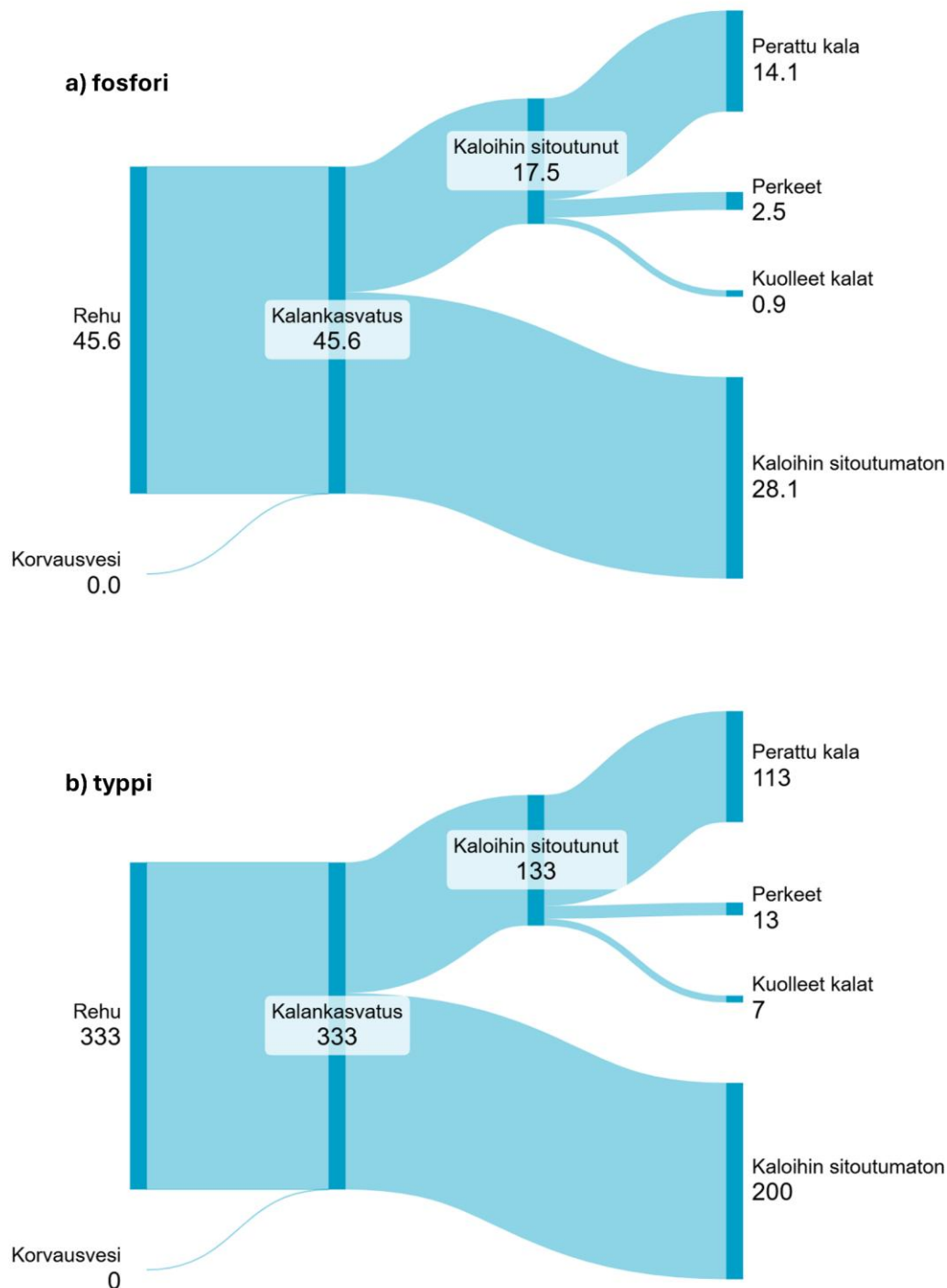
Kalalaitoksen lämmönkulutus riippuu voimakkaimmin ulkoilman lämpötilasta, mutta jossain määrin myös käytettävän veden lämpötilasta. Kiertovesikasvatuksessa uuden veden osuus, ja siten vaikutus lämpötaseeseen, on melko pieni. Järvissä niin sanottu alusvesi on yleensä viileä kesäisin sekä pintavettä lämpimämpää talvisin, jolloin sekä jäähdytys- että lämmitystarve on pienempää kuin pintavettä käytettäessä. Tässä tarkastelussa ilman lämpötilana on käytetty Jyväskylän lentoaseman keskimääräisiä lämpötiloja (2014–2023) sekä tuloveden lämpötilana Peurunkajärven pintaveden (4 m syvyys pinnasta) keskimääräisiä lämpötiloja (2014–2023). Tuotantoteknisistä asioista energian tarpeeseen mallissa vaikuttaa eniten kalamäärä per allas-tilavuus (oletusarvo laskennassa korkea tiheys 90 kg/m<sup>3</sup>).



**Kuva 8.** Kahden eri kokoluokan; a) 500 tn/vuosi; b) 5 000 tn/vuosi; kalalaitoksen energiantarpeet kuukausitasolla.

Ravinteet tulevat kalalaitokselle käytännössä rehun mukana. Vaikka ravinteiden tarkoituksena on tukea kalojen kasvua, yli puolet ravinteista päätyy syömättömän rehun ja kalojen ulosteiden mukana lieteveeten (josta osa tiivistyksen jälkeen lietteeseen) ja poistoveteen. Lisäksi myös kaloista peräisin oleviin sivuvirtoihin (kuolleet kalat ja perkeet) sitoutuneena poistuu ravinteita. Kuvassa 10 on esitetty suuremman, 5 000 t laitoksen P ja N taseet vuositason (tn/v). Koska massataseissa skaalautumisen oletettiin olevan lineaarinen, jakauma on vastaava myös pienemmällä laitostuolla. Ravinteiden talteenoton haasteena on, että kaloihin sitoutumattomana olevat ravinteet ovat hyvin pieninä pitoisuuksina valtavassa määrässä vettä ja lietettä. Kaloihin sitoutuu rehun sisältämästä typeistä noin 41 % ja fosforista noin 38 %, joista osa siis päätyy kalasivuvirtoihin. Selvästi suurin osa systeemiin tulevista ravinteista päätyykin sivuvirtoihin: Muussa kuin peratussa kalassa prosessista poistuu yhteensä noin 67 % systeemiin tuodusta typeistä ja 69 % systeemiin tuodusta fosforista.

Tavanomaisessa tilanteessa kustannuksia kalalaitoksen sivuvirtojen käsittelyssä muodostuu käsittelyn investointien ja energiakustannusten ohella esimerkiksi kemikaalien käytöstä, lietteen kompostoinnista, ja etenkin kompostoinnissa tukiaineena käytettävästä turpeesta. Oletuksena voidaan pitää, että maanparannusaineena käytettävä komposti ei tuota laitokselle tuloja. Kalanperkeitä on aiemmin toimitettu turkiseläinten rehuksi, jolloin on säästyty perkeiden käsittelyn ja hävittämisen kustannuksilta.

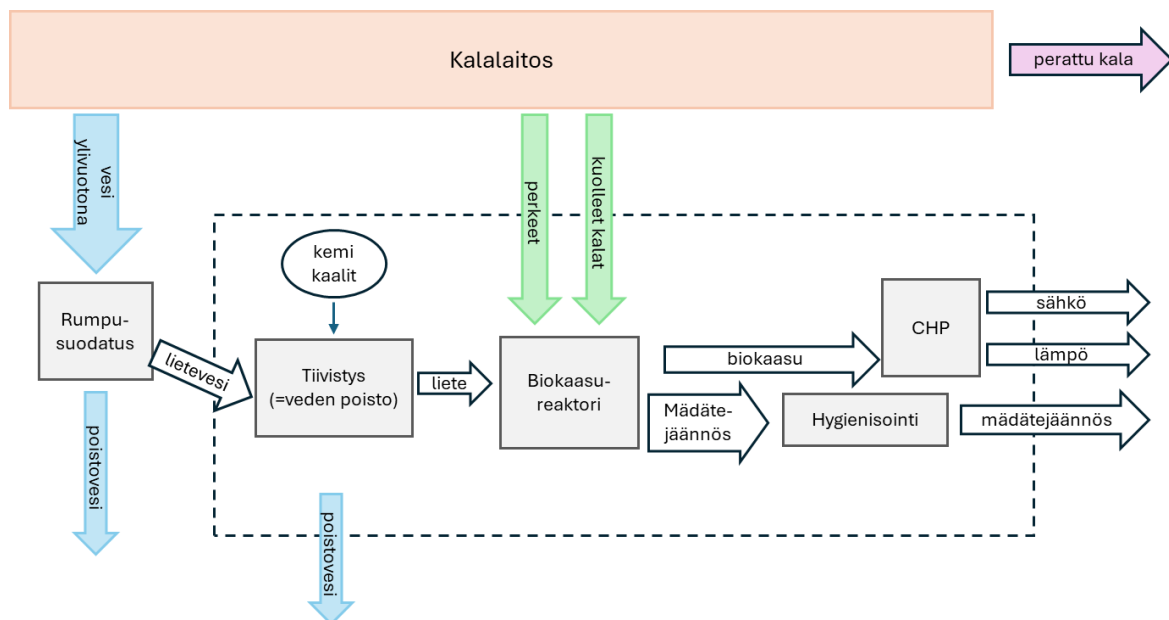


**Kuva 9.** Fosfori- ja typpitase (tn/vuosi) isomman kokoluokan (5 000 tn/v) kalalaitoksella.

## 5.2. Energiaskenaario

Energiaskenaariossa kalalaitoksen sivuvirtojen (liete, kuolleet kalat sekä kalanperkeet) energiapotentiaali otetaan talteen biokaasuteknologiaa hyödyntäen. Märkämädätys, jossa syötteen kuiva-ainepitoisuus on maksimissaan noin 15 %, on vakiintunutta tekniikkaa esimerkiksi erilaisten lietteiden ja lantojen käsittelyyn.

Energiaskenaariossa lietevesi tiivistetään koagulointi- ja flokkulointikemikaalien avulla 5,5 % kuiva-ainetta sisältäväksi lietteeksi. Tiivistettyä lietettä muodostuu pienemmän laitosesimerkin tapauksessa 2 150 tn/v ja suuremmalla laitoksella 21 500 tn/v. Liete syötetään biokaasuprosessiin yhdessä murskattujen perkuujätteiden ja kuolleiden kalojen kanssa. Biokaasuprosessi operoidaan skenaariossa 37 °C lämpötilassa 50 vrk viipymällä, ja kaikki syötteen (tai mädäte) hygienisoidaan mädätteen turvallista käyttöä ajatellen. Biokaasusta tuotetaan sähköä ja lämpöä CHP-laitteistolla (combined heat and power). Määdetejäännös hyödynnetään maataloudessa sellaisenaan lietteenä, eli sitä ei esimerkiksi separoida. Energiaskenaarion tarkastelun rajaus on esitetty kuvassa 10.



**Kuva 10.** Sivuvirtojen käsittely energiaskenaariossa, tarkasteluun sisällytettyjen vaiheiden systeemirajaus katkoviivalla.

### 5.2.1. Energiatase

Energiaskenaariossa kaikkien orgaanisten sivuvirtojen (tiivistetty liete, kalanperkeet sekä kuolleet kalat) oletettiin päätyvän biokaasuprosessin syötteenä. Vaikka biokaasuprosessi tuottaa energiaa metaanin muodossa, on tuotantoa varten myös käytettävä energiaa; käsiteltävä liete on lämmitettävä mikrobiologiselle prosessille optimaaliseen lämpötilaan (37 °C) ja lisäksi syötteille laskettiin hygienisoinnin vaatima energiankulutus.

#### Pieni laitos (500 tn/v):

Kalalaitoksen sivuvirtoina muodostuvista biomassoista (liete, kuolleet kalat sekä perkeet) tuotettavan metaanin energiantuotto CHP yksiköllä olisi 459 MWh vuodessa, josta 306 MWh lämpöä ja 153 MWh sähköä. Biokaasulaitoksen oma lämmön- ja sähkötarve hygienisointi

mukaan lukien (yhteensä 88 MWh lämpö + 43 MWh/v sähkö) pystyttäisiin kattamaan kokonaisuudessaan omalla energiantuotannolla. Biokaasulaitoksen oman energiankäytön jälkeen hyödynnettäväksi jäisi noin 218 MWh lämpöä ja 110 MWh sähköä tasaisesti vuoden aikana tuotettuna. Lämpöä voitaisiinkin hyödyntää myös itse varsinaisen kalalaitoksen lämmöntarpeeseen (554 MWh/v), mutta kalalaitoksen sähkönkulutuksen tarvetta (2 297 MWh) oman biokaasulaitoksen sähköntuotto ei juuri pysty tukemaan.

#### Iso laitos (5 000 tn/v):

Isomman laitoksen sivuvirtojen metaanintuoton tunnusluvut on esitetty taulukossa 10. Laskelema etenee vastaavasti kuin pienemmän kalalaitoksen tapauksessa, ja biokaasulaitoksen oman energiankäytön jälkeen hyödynnettäväksi jää vuositasolla noin 2 265 MWh lämpöä ja 1 339 MWh sähköä. Verrattaessa näitä kalalaitoksen energiatarpeeseen, huomataan, että biokaasulaitoksen tuottama lämpöenergia vastaa kolmea neljäsosaa vuoden lämmöntarpeesta. On kuitenkin muistettava, että kalalaitoksen lämmöntarve oli erittäin vahvasti sidonnainen ulkoilman lämpötilaan. Käytännössä lämpöä jäisi siis hyödyntämättä kesäaikaan, kun taas talvella lämpöä tulisi hankkia suurempi osuus muista energialähteistä. Sähköenergian osalta tuotanto ei isommassakaan laitoskoossa kykene vastaamaan merkittävää osaa kalalaitoksen kulutuksesta.

**Taulukko 10.** Energian tuotantomäärät ja kulutukset biokaasulaitoksella, sekä osuudet kalalaitoksen energiatarpeen kattamisesta.

	Biokaasulaitoksen energiantuotto (MWh/v)		Biokaasulaitoksen oma kulutus (MWh/v)		Kalalaitoksen energiankulutuksesta pystytään kattamaan (% vuosikulutuksesta)	
	Lämpö	Sähkö	Lämpö	Sähkö	Lämpö	Sähkö
500 tn/v sivuvirrat	306	153	88	43	39 %	4,8 %
5 000 tn/v sivuvirrat	3 069	1 534	804	195	74 %	6 %

Koska kalalaitoksen tuotanto on ympärivuotista, myös sivuvirtojen muodostumistahti on tasaista. Näin ollen myös biokaasulaitoksen energiantuotto on tasaista ympäri vuoden, kun taas kulutus vaihtelee kalalaitoksella huomattavasti ympäristön lämpötilan mukaisesti. Sivuvirtojen energiaksi hyödyntämisen haasteena onkin se, että energiantuotantoa on hankala optimoida kulutushuippujen ajalle, esimerkiksi koville pakkasille, tai kesän kuumien jaksojen ajalle.

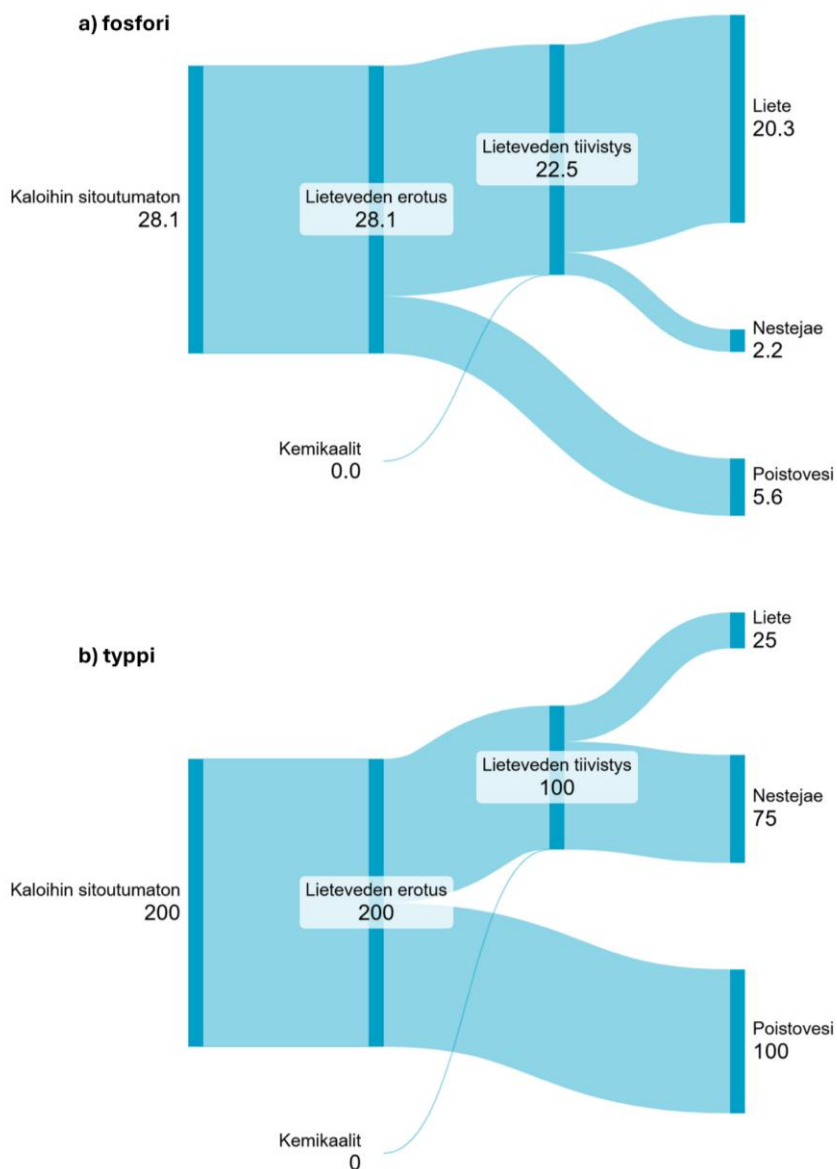
Energiantuotannossa olisi jonkin verran säätömahdollisuutta säilömällä kalasivuvirtoja (perkeet ja kuolleet kalat), esimerkiksi hapottaen, ja hyödyntäminen ne syötteenä talviaikaan. Perkeillä ja kuolleilla kaloilla on erittäin merkittävä rooli tarkasteltavan konseptin energiantuotannossa. Etenkin kirjolohen perkeet ovat hyvin rasvapitoisia, minkä vuoksi niiden metaanintuottopotentialiaali on erittäin korkea, jopa yli 900 m<sup>3</sup>/tVS. Skenaariossa perkeiden osuus biokaasun kokonaistuotannossa on suurempi kuin lietteellä. Perkeet tuottavat melkein puolet kokonaiskaasuntuotosta, vaikka perkeiden massaosuus on hyvin pieni lietteeseen nähden (3,2 %).

### 5.2.2. Ravinteiden hyödyntäminen

Perattuun kalaan (eli päätuotteeseen) sitoutumattomasta fosforista 75 % ja typestä noin 23 % päätyy tässä skenaariossa biokaasukäsittelyyn ja sitä myötä mädätejäännökseen (Kuva 11). Typen talteenotto kuiva-ainetta erottelevilla menetelmillä ei ole tehokasta, koska kalalaitoksen vesissä ja lietteissä oleva typpi on valtaosin liukoisessa muodossa, ja päätyy suurelta osin vesijakeisiin.

Lieteveden tiivistyksessä käytettävät flokkulointi- ja koagulointikemikaalit edesauttavat fosforin pidättäytymistä lietejakeeseen, mutta toisaalta kemikaalit heikentävät fosforin käyttökelpoisuutta kasvinviljelyssä.

Suuremman kalalaitoksen kokoluokassa biokaasulaitoksen syötteiden (tiivistetty liete + perheet + kuolleet kalat) sisältämä fosforimäärä (noin 24 tonnia vuodessa) kattaa noin 1 500 hehtaarin viljelyalan, mikäli fosforin lannoitustaso olisi 16 kh/ha. Tämä on fosforilannoituksen enimmäistaso esimerkiksi viljoilla viljavuusluokan 3 pelloilla.



**Kuva 11.** Fosforin (yläkuva) ja typen (alempi kuva) jakaantuminen 5 000 t laitoksen vesi- ja lietejakeiden käsittelyssä energiaskenaariossa (tn/v).

### 5.2.3. Taloudellisuus

Sivuvirtojen käsittelyn taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttavat käsittelyn kustannukset ja toisaalta sivuvirtojen käsittelyssä mahdollisesti valmistettavista tuotteista saatavat tulot. Tämän lisäksi merkittävää on, mitä kustannuksia vaihtoehtoinen käsittelytapa korvaa – eli mitä kustannuksia käsittely vähentää tavanomaiseen käytäntöön verrattuna. Energiaskaenaarion vahvuutena taloudellisen kannattavuuden kannalta onkin se, että biokaasulaitoksen tuottamalla energialla pystytään osittain kattamaan myös kalalaitoksen energiantarvetta. Vaikka omista sivuvirroista tuotettu energia ei riitä kattamaan itse kalalaitoksen energiantarvetta kummassakaan kokoluokassa kokonaan, on osittainenkin ostoenergian tarpeen korvaaminen tärkeää.

Perkeiden ja kuolleiden kalojen hyödyntäminen energiantuotannossa on ratkaisevassa roolissa energiantuotantoa ja taloudellisuutta ajatellen. Ilman perkeiden käyttöä biokaasulaitoksen metaanintuotto ja sitä myötä myös kannattavuus olisi huonompi.

Biokaasulaskurin (biokaasulaskuri.luke.fi) arvioima investointikustannus pienemmän kalalaitokseen sivuvirtojen biokaasulaitokselle on 650 000 euroa ja suuremman kalalaitoksen sivuvirroille 1 600 000 euroa. Laskelmassa pienemmän biokaasulaitoksen vuosittaiset käyttökustannukset ylittävät sen tuotot, eikä biokaasulaitos käytetyillä lähtöoletuksilla ole kannattava. Sen sijaan suuremman kalalaitoksen sivuvirroille mitoitettun biokaasulaitoksen vuosittaiset tuotot (320 t€) olivat käyttökustannuksia (47 t€) suuremmat, mutta laskenta sisälsi oletuksena merkittävän investointituen, 40 %. On myös mahdollista, että laitosten todelliset investointihinnat ovat nousseet vuosien saatossa, joidenkin asiantuntija-arvioiden mukaan jopa noin 30 %. Biokaasulaskurin laskelma on hyvin ylätasolla, eikä sisällä kaikkia kalalaitoksen massoihin liittyviä käsittelyvaiheita. Laskelma osoittaa kuitenkin sen, että biokaasukäsittelyn kannattavuus yleensä paranee käsittelykapasiteetin kasvaessa.

Kannattavuuden arvioinnissa on huomioitava käsittelyketju kokonaisuudessaan. Energiaskaenaarion tapauksessa käsittelyketjun kustannuksia nostaa merkittävästi koagulointi- ja flokkulointikemikaalien tarve lietteen tiivistykseen. Vaikka niiden määrällinen tarve on suhteellisen pientä vesimäärään verrattuna, ovat ne kuitenkin kalliita, jopa tuhansia euroja tonni, mikä aiheuttaa merkittävät kemikaalikustannukset. Esimerkiksi nämä kustannukset eivät ole mukana biokaasulaskurin laskelmassa. Lisäksi käsittelyketjun kustannuksia on verrattava korvattavan käsittelytavan (esimerkiksi kompostointi ja/tai porttimaksut toimitettaessa materiaali muualle käsiteltäväksi) kustannuksiin. Kannattavuuteen voi vaikuttaa myös muutokset esimerkiksi energian verotuksessa.

Koska tilavuudeltaan valtaosa syötteestä on vettä (syöteseoksen kuiva-ainepitoisuus <15 %), lietteen kuiva-ainepitoisuudella on suuri merkitys reaktorikapasiteettiin. Mitä kuivemmaksi liete saadaan, sitä pienempi reaktorin tarvitsee olla, mikä heijastuu myös investointikustannuksiin sekä hygienisoinnin ja reaktorin lämmitysenergian tarpeeseen.

Etenkin pienemmän kalalaitoksen tapauksessa olisi järkevä kartoittaa lietteen toimittamista jo olemassa olevalle keskitetylle biokaasulaitokselle. Mikäli liete toimitettaisiin keskitettyyn biokaasulaitokseen, lietteen toimittamisesta veloitettaisiin mitä luultavimminkin tapauskohtaisesti neuvoteltavissa oleva porttimaksu. Rasvapitoinen ja hyvin energiaa tuottava perkuujätteen sijaan voisi olla joissain tapauksissa jopa porttimaksutonta, mutta myöskään tuottoa siitäkään ei välttämättä saa.

### 5.3. Tuoteskenaario

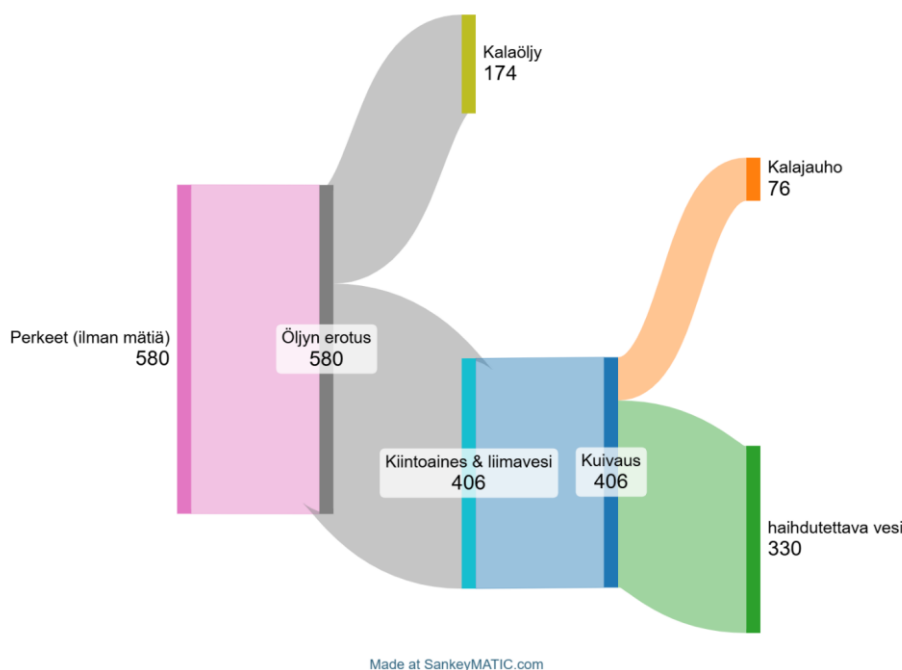
Kiertotalousajattelussa materiaali tulisi hyödyntää mahdollisimman korkean jalostusasteen tuotteina, mikäli sen muodostumista ei pystytä alun alkaen estämään. Vaikka biokaasutuotanto mahdollistaa myös mm. ravinteiden talteenoton ja niiden uudelleen käytön, monia kalalaitosten sivuvirtoja voidaan hyödyntää myös energian tuotantoa arvokkaammin, ja ravinteet voidaan prosessoida lannoitevalmisteiksi, joissa ravinteiden pitoisuudet ja keskinäiset suhteet vastaavat paremmin käyttötarvetta.

Kalasivuvirrat sisältävät runsaasti proteiinia ja rasvaa. Taulukossa 11 on arvioitu eri kokoluokan kiertovesikasvatuslaitoksissa muodostuvien perkeiden ja mädin määrät. Tuoteskenaariossa oletetaan, että mädintuotanto hallitaan RAS-olosuhteissa ja arvokas mäti kerätään talteen. Kalan perkeistä tuotetaan päätuotteena öljyä. Öljyn tuotannossa muodostuu sivuvirtana ns. liimavettä sekä kuivajaetta, jotka skenaariorissa hyödynnetään kaupallisesti kalajauhona (Kuva 12). Kuolleet kalat joudutaan edelleen hyödyntämään energian tuotannossa, sillä niitä ei saa käyttää rehujen tai elintarvikkeiden raaka-aineissa eikä käsitellä rehu- tai elintarvikkeetun laitteilla. Tuoteskenaariossa kuolleet kalat toimitetaan porttimaksullisena jakeena ulkopuoliselle keskitetylle biokaasulaitokselle.

**Taulukko 11.** Kiertovesikasvatuslaitoksessa muodostuvat kalasivuvirrat.

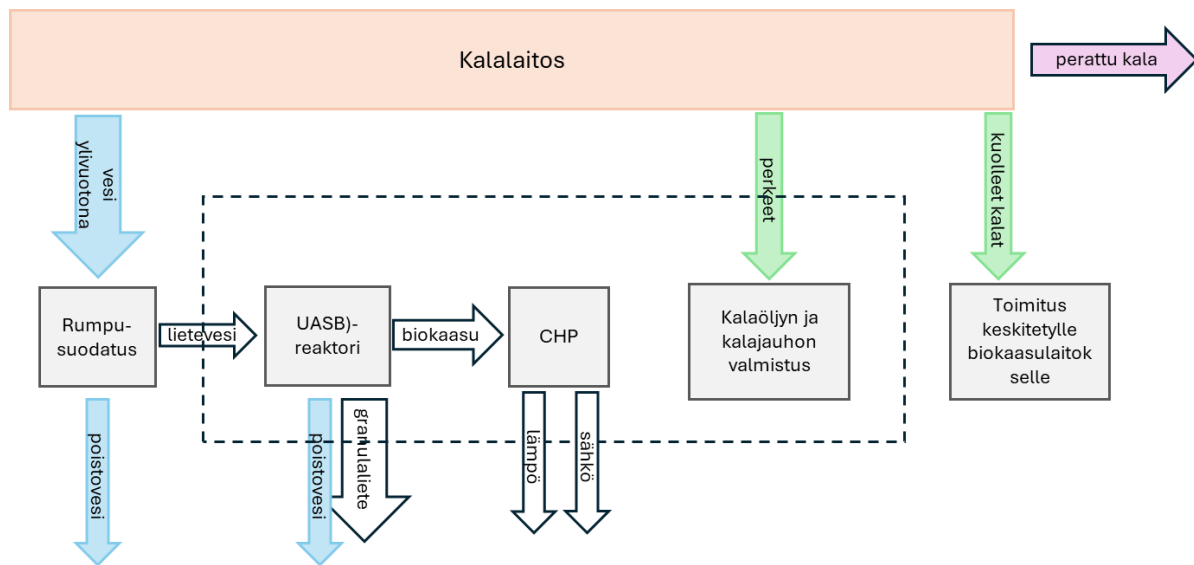
	500 tn laitos	5 000 tn laitos
Kuolleita kaloja (5 %)	25	250
Perkeitä, sis. mäti (15 %)	71	713
Mätiä (2,8 % kalan painosta) *	13	133
Perkeitä ilman mätiä	58	580
Perattua kalaa	404	4 038

\*Suomessa elintarvikkeeksi myyty kirjoloihen mäti (kg)/Suomessa kasvatettu kirjolohi (kg), <https://www.luke.fi/fi/ti-lastot/vesiviljely/vesiviljely-2023>



**Kuva 12.** Perkeiden prosessoinnin massatase tn/v (kalatuotannolla 5 000 tn/v).

Kuten kappaleen 5 alustuksessa todettiin, kaloihin sitoutumattomat ravinnevirrat ovat huomattavia, mutta ravinteet ovat laimeina pitoisuuksina valtavassa määrässä vettä ja lietettä. Perinteisesti lieteveden käsittelyssä käytetty kemikaaleilla tehostettu saostus sitoo fosforin kasveille heikosti käytettävään muotoon. Kalalietteen saostus ilman ravinteita sitovia kemikaaleja on kuitenkin haastavaa, joten yksi ratkaisu olisikin lieteveden käsittely sellaisenaan. Koska käsiteltävät määrät ovat suuria, tarvitaan lyhyen viipymääjän käsittely, jotta käsittelylaitteistojen tilavuudet eivät kasva suunnattoman suuriksi. Yksi mahdollinen käsittelymenetelmä on UASB-tekniikalla toimiva biokaasuntuotanto, joka valittiinkin tuoteskenaariossa lieteveden prosessoinniksi. Toisin kuin energiaskenaariossa, tuoteskenaarion biokaasutuotannon arviointiin ei voitu käyttää biokaasulaskuria, koska laskurissa ei raportin kirjoitushetkellä ole UASB-tekniikkaan perustuvaa reaktorivaihtoehtoa.



**Kuva 13.** Sivuvirtojen käsittely tuoteskenaariossa, tarkasteluun sisällytettyjen vaiheiden systeemirajaus katkoviivalla.

Tuoteskenaariossa UASB-prosessin lietteessä olevat ravinteet oletetaan olevan hyödynnettävissä kasvilannoituksessa täysimääräisesti. Konseptin muotoilussa ei oteta kantaa poistoveden liukoisten ravinteiden talteenotossa käytettäviin tekniikoihin (Kuva 13).

Useampien eri prosessointien käyttö tuo lisäkustannuksia, ja erityisesti korkeamman jalostusasteen tuotteita valmistettaessa suurempi käsittelykapasiteetti mahdollistaa yleensä kannattavamman investoinnin ja toiminnan. Tämän vuoksi tuoteskenaario on rakennettu vain suuremman kalalaitoksen (5 000 tn/vuosi) sivuvirroille.

### 5.3.1. Energiatase

Tuoteskenaariossa energian tuotanto on varsin maltillista, ja tuotteita valmistettaessa pääky-symys onkin, kuinka paljon energiaa erilaiset prosessoinnit kuluttavat. Perkeistä tuotettavan kalaöljyn ja kalajauhon tuotanto vaatii sekä sähköä että lämpöä. Kalasivuvirtojen prosessoinnin energian tarvetta voidaan arvioida karkeasti vaadittavien prosessiolosuhteiden ja kuivamistarpeen pohjalta:

- Kalaöljyn tuotantoa varten perkeet (580 tn/v) on kuumennettava 90 °C:seen lämpötilaan. Mikäli perkeiden ominaislämpökapasiteetiksi oletetaan 3 600 J/kg°C → lämmöntarve **48 MWh/v**.
- Kalajauhon kuivaamista varten liimaveden ja kiintoaineen seoksesta (406 tn/v) on haihdutettava vettä pois 330 tn/v. Tämä vaatii ensin koko massan kuumentamisen 90 -> 100 °C:seen, ja sen jälkeen veden haihduttamisen → lämmöntarve yhteensä **212 MWh/v**. (*Laskennassa massan lämmittämisen energiantarve arvioitu käyttäen veden ominaislämpökapasiteettia 4186 J/kg°C ja veden höyrystämisen energiantarve käyttäen veden höyrystymislämpöä 2260 kJ/kg*)

Kyseinen arvio perustuu pelkästään fysikaaliskemiallisiin ilmiöihin ja ominaisuuksiin esitetyillä yksinkertaistuksilla. Käytännössä prosesseissa tapahtuu energiahäviöitä ja massoja tulee prosessoida lämpötiloissa pidempiä aikoja, mikä lisää energiatarvetta. Lisäksi prosessointi vaatii sähköä erilaisiin massojen siirtoihin, sekoitukseen ym., eikä näiden prosessien sähköenergian tarvetta pystytty tässä arvioimaan. Esimerkki kuvaa kuitenkin sitä, että prosessointi vaatii huomattavasti energiaa lämmön nostamiseen ja veden poistoon.

Vaikka tuoteskenaariossa energiantuotanto ei ole pääroolissa, sitä muodostuu lieteveden UASB-käsittelyssä. UASB-reaktori tuottaa lietereaktorin tavoin metaanipitoista biokaasua, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon, tai jalostaa kaasun metaani liikennepolttoaineeksi.

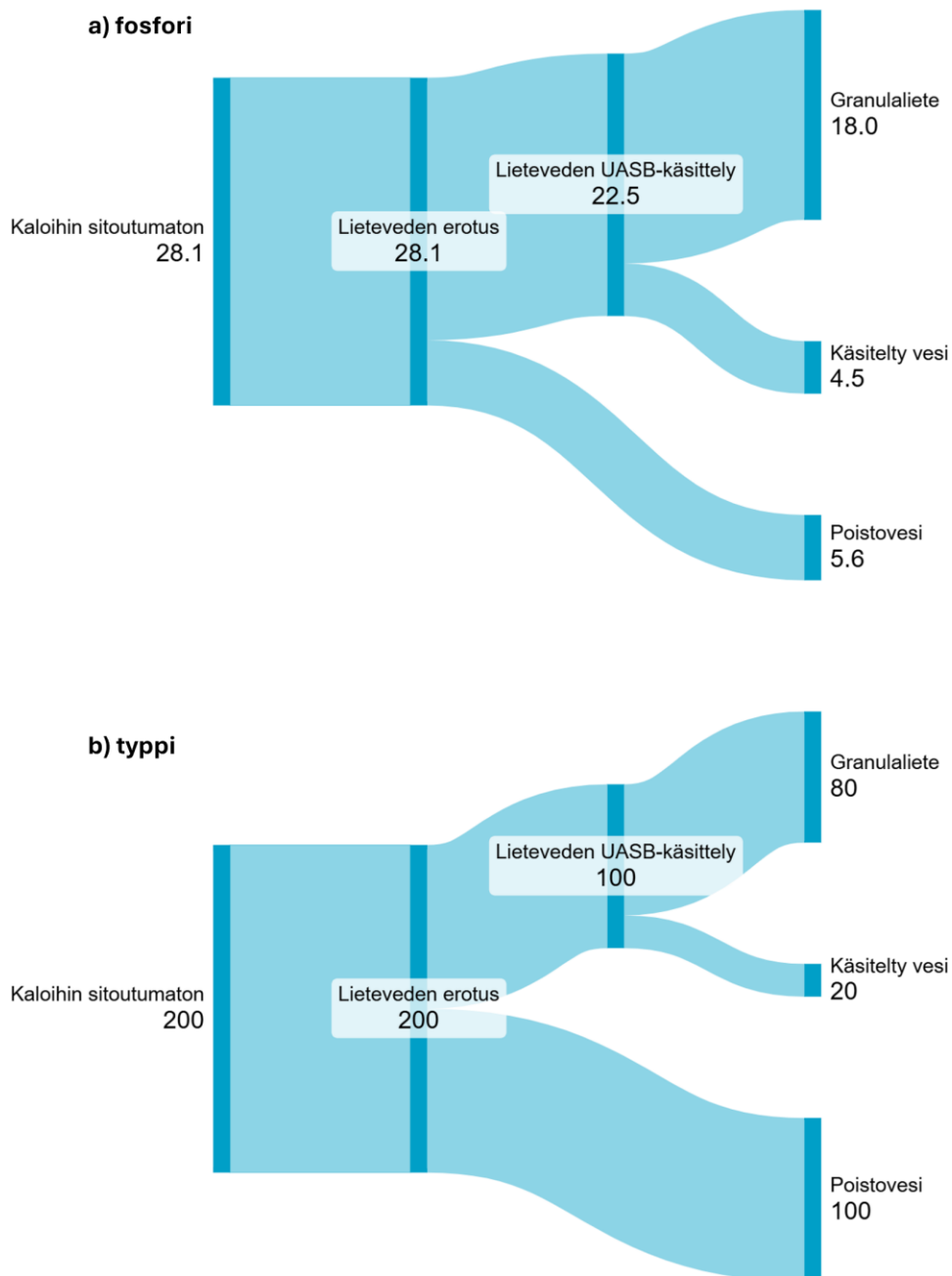
Käsittely kuitenkin myös kuluttaa energiaa. Mikrobiologinen prosessi toimii tehokkaammin lämpimissä olosuhteissa, joten UASB-reaktorin toimintalämpötilaksi asetettiin laskennassa 37 °C, mikä edellyttää käsiteltävän veden lämmitystä. Lämmitystarvetta pienentää lämmön talteenotto lämpimästä poistovedestä lämmönvaihtimien avulla. Lisäksi veden pumppaus, joiden osuus kuitenkin pieni lämmitykseen verrattuna. Mikäli UASB-prosessi operoitaisiin 25 °C:een lämpötilassa, lämmitysenergiatarve olisi vain noin 45 % siitä, mitä mesofiilisiin olosuhteisiin lämmittäminen vaatii. Toisaalta matalampi käsittelylämpötila voi heikentää metaanintuotantoa (Wang 2021).

Mikäli lieteveden COD-pitoisuuden oletetaan olevan 2 g/l ja metaanintuoton reaktorissa 0,2 l CH<sub>4</sub>/gCOD, suuremman kalalaitoksen lieteveden energiapotentiaali metaanina olisi 4 300 MWh vuodessa. Arvio vastaa melko tarkasti energiaskenaariossa arvioitua tiivistetyn lietteen ja kalasivuvirtojen energiantuottoa. UASB-reaktorin energiatarkastelussa on kuitenkin huomioitava suuren vesimäärän lämmityksen aiheuttama kulutus: 15 % lämpöhäviö reaktorista ja 40 % lämmön talteenotto poistovedestä huomioiden UASB reaktorin vaatima syötteen lämmitystarve on noin 6-kertainen sen tuottamaan energiamäärään verrattuna.

Kokonaisuutta voisi kuitenkin optimoida siten, että UASB-käsittelyn lämmitykseen käytettäisiin kiertovesilaitoksen jäädyttämässä syntyvää hukkalämpöä. Jäähdytystarvetta on vuodessa noin 8 kk vuodessa, eli kalalaitoksen oman hukkalämmön käyttö voisi tuoda merkittävää etua. Toisena kehitysehdotuksena skenaariossa käytettyyn tilanteeseen olisi UASB-prosessin operointi viileämmässä olosuhteissa, jotta lämmitystarve olisi pienempi. Jätevesipuolella näin usein toimitaankin.

### 5.3.2. Ravinteiden hyödyntäminen

Kuten kuvasta 14 nähdään, noin 80 % kaloihin sitoutumattomasta fosforista päätyy lieteveeseen. UASB käsittelyn myötä suuri osa tästä fosforista voidaan sitoa granulalietteeseen, jota voidaan poistaa prosessista ja hyödyntää lannoitevalmisteena. Näin ollen fosforin hyödyntämisaste on tässä konseptissa varsin hyvä. Fosforin hyödyntämispotentiaalia lisää se, että granulalietteen muodostamiseksi ei vaadita alumiini- tai rautapohjaisia koagulantteja, minkä vuoksi fosfori on liukoisemmassa muodossa ja näin ollen kasvien käytettävissä.



**Kuva 14.** Fosforin (yläkuva) ja typen (alempi kuva) jakaantuminen 5 000 tn laitoksen vesi- ja lietejakeiden käsittelyssä tuoteskenaariossa (tn/v).

Typen talteenottoa ja hyödyntämistä heikentää se, että jo lieteveden erottelussa noin puolet typestä päätyy liukoisena ravinteena poistoveteen. Tuoteskenaariossa lietevesi käsitellään kuitenkin kokonaisuudessaan UASB-tekniikalla, millä on havaittu varsin hyviä, jopa yli 80 % typen talteenottotehokkuuksia. Näin ollen typenkin talteenottotehokkuus tuoteskenaariossa on melko hyvä, etenkin verrattuna energiaskenaariossa käytettyyn tavanomaiseen tiivistykseen ja vasta sitä seuraavaan lietteenkäsittelyyn. Energiaskenaariossa (Kuva 11) vain alle 13 % kaloihin sitoutumattomasta typestä päätyi mädätteeseen. Vastaava osuus tuoteskenaariossa granulalietteeseen päätyvälle typelle on noin 40 %.

Tuoteskenaarion yhteydessä voidaan spekuloida myös yhä tehokkaammalla ravinteiden talteenoton mahdollisuudella. Tämä vaatisi toimivia menetelmiä liukoisten ravinteiden talteenottoon poistovedestä ja UASB-käsittelyn läpikäyneestä vedestä.

Kuolleiden kalojen mukana poistuvat ravinteet (0,9 tn P/v ja 6,9 tn N/v) rajautuvat pois tuoteskenaarion tarkastelusta, koska ne käsitellään ja hyödynnetään toisen yrityksen käsittelemänä.

### 5.3.3. Taloudellisuus

Tuoteskenaariota rakennettaessa hypoteesina on, että taloudellinen kannattavuus rakentuu sivuvirtojen käsittelyssä tuotettavien hyödykkeiden myynnistä saatavien tulojen varaan. Tarkasteltavassa mallissa tuotteina ovat kalaperäiset öljy ja kalajauho (koostuu kiintoaineksesta ja liimavedestä) sekä veden- ja lietteenkäsittelyssä tuotettavat lannoitevalmisteet sekä biomeetaani (Taulukko 12). Kustannussäästöjä odotettiin tulevan erityisesti lietteenkäsittelyprosessista ja jätevedenkäsittelystä. Lietteenkäsittelystä pois jää tiivistys energia- ja kemikaalikustannuksineen. Poistoveden ravinnepitoisuuden lasku taas vähentää jäteveden käsittelyn kustannuksia.

Kalaöljyn maailmanmarkkinahinnat ovat raportin kirjoitushetkellä matalat. Kirjolohiöljyn, jonka omega-3-pitoisuus on matala (5–7 %), hintahaarukka on raportin kirjoitushetkellä asiantuntija-arvioiden perusteella 0,9–1,4 euroa/kg. Jos kalaöljyn saannoksi oletetaan 30 % (taulukko 2) ja hinnaksi 1,4 €/kg, skenaarion mukaisen kalalaitoksen perkeistä (580 tn/v) valmistetun kalaöljyn (174 tn/v) vuosittainen tuotto olisi parhaimmillaan 243 000 €. Kalajauhon tuotantopotentiaali kyseisellä määrällä perkeitä on 75,4 tn/v ja kalajauhon hinta kirjoitushetkellä noin 1,9 €/kg (Hammersmith 2025), eli tuotettavan kalajauhon arvo olisi noin 143 000 euroa. Yhteensä arvofraktioiden tuotot ovat siis noin 386 000 €. Tarvittavat tuotantolaitokset ovat kuitenkin miljoonainvestointeja, joten käyttökustannuksineen voidaan todeta arvotuotteiden valmistuksen olevan heikosti kannattavaa tarkastelun isommassakin mittakaavassa.

Kuolleiden kalojen käsittelyn ulkoistaminen keskitetylle biokaasulaitokselle aiheuttaa tapauskohtaisesti sovittavissa olevan porttimaksun.

Ravinteiden talteenoton merkitystä voidaan arvioida lannoitevalmisteisiin teoreettisesti saatavilla olevilla ravinnemäärillä. Granulalietteeseen sitoutuneen fosforin arvo on noin 26 t€/v ja granulalietteeseen sitoutuneen typen arvo noin 102 t€/v. Erityisesti typen talteenotossa olisi edelleen kehitettävää myös tuoteskenaariossa. Vesi- ja lietejakeissa olevan, kaloihin sitoutumattoman, fosforin arvoksi voidaan arvioida 40 t€/vuosi ja vastaavasti kaloihin sitoutumattoman typen arvoksi 250 t€/vuosi (oletuksena P 1,43 €/kg ja N 1,28 €/kg; laitostekniikka 5 000 tn/v). Kirjoitushetken ravinteiden hinnoilla typen ja fosforin arvo lannoitteina ei siis ole järin suuri.

Lieteveden käsittelyssä kustannuksia muodostuu etenkin UASB-reaktoriin johdettavan veden lämmityksestä. Lämmitysenergian kustannus 7 sentin/kWh lämmitysenergian hinnalla, on suuremmalla laitoksella noin 1 200 000 €/vuosi, kun 40 % lämmöstä saadaan otettua talteen poistuvasta vedestä. Verrattuna energiaskenaarioon, lieteen käsittelyn taloudellisuutta parantaa kuitenkin se, että UASB-käsittely ei vaadi kalliiden kemikaalien käyttöä lieteen tiivistykseen. Tietyn TS-pitoisuuden alittavilla lietteillä biokaasuprosessin tuottama energiamäärä on pienempi kuin biokaasuprosessin oma lämmönkulutus on ja tällöin anaerobiselle käsittelylle on vaikeampi saada järkevää taloudellista perustetta – se ei tule ainakaan energiantuotannosta, mikäli prosessi kuluttaa enemmän energiaa kuin tuottaa. Tällöin on kuitenkin mietittävä, tuoko prosessi etuja esimerkiksi jäteveden ja lieteen käsittelyn muihin kustannuksiin?

**Taulukko 12.** Tuoteskenaariossa tunnistettujen tuotteiden arvon potentiaali 5 000 t laitoksessa.

Tuote	Vuosittainen tuotto (€/v)
Kalaöljy	243 000
Kalajauho	143 000
UASB-granulaliete <i>typen ja fosforin markkina-arvolla</i>	128 000
Biometaani <i>sähkönä ja lämpönä</i>	322 000
<b>Yhteensä</b>	<b>836 000</b>

Yhteenvedona tuoteskenaariion taloudellisista vaikutuksista voidaan todeta, että

- Merkittäviä tuottopotentiaaleja, mutta myös suuria investointeja.
- Nykyisellään kyseisen sivuvirtakonseptin arvo ei tule taloudellisilla ajureilla.

## 5.4. Yhteenvedo konseptitarkastelusta

Kalankasvatuksen sivuvirtojen erilaisia hyödyntämistapoja tarkasteltiin kahden erilaisen esimerkkikonseptien kautta. Tarkastelussa käytettiin kahta eri kokoista kiertovesilaitosta ja kirjo-lohen kasvatusta (500 ja 5 000 tn/vuosi, tuotettua kalaa). Tarkastelun pohja-aineistoina käytettiin kirjallisuudesta saatuja lähtöarvoja ja -oletuksia sekä asiantuntija-arvioita. Tarkastelussa arvioitiin eri sivuvirtojen hyödyntämistapojen toteutettavuutta, hyötyjä ja haittoja, sekä taloudellisia näkökulmia ja kehittämiskohteita.

Tarkastelut konseptit ja skenaariot olivat seuraavat:

- **Energiaskenaario**  
Painotus energiatehokkuudessa ja energiankulutuksen minimoinnissa sekä energian tuotannossa.
- **Kiertotalousskenaario**  
Painotus resurssien (ravinteet ja arvokomponentit) hyödyntämisessä ja jalostuksessa.

Alla on esitetty taloudelliset yhteenvedot molemmista skenaariosta, tarkastelun kohdistuessa suurimpaan 5 000 tn/v kalalaitoksen kokoon (Taulukko 13). Asiantuntija-arvioiden perusteella on odotettavaa, että tuoteskenaarion vaatimat investoinnit olisivat suurempia kuin energiaskenaariossa.

Jotta energiaskenaarion ja tuoteskenaarion energian**kulutusta** pystyttäisiin paremmin vertailemaan, lietteen ja lieteveden lämmityksen teoreettinen energiatarve laskettiin myös erikseen. Laskenta perustuu veden ominaislämpökapasiteettiin ja käsiteltävään liete- tai lietevesimäärään. Tuoteskenaariossa lämmitettävä vesimäärä on huomattavasti suurempi, yli miljoona tonnia vuodessa, koska prosessin syötteenä on lietevesi sellaisenaan. Energiaskenaariossa biokaasuprosessia edeltää varsin tehokas lietteen tiivistysprosessi, jonka myötä lietteen massa (noin 21 tuhatta tonnia vuodessa) on vain noin 2 % lieteveden massasta. Näin ollen energiaskenaariossa biokaasuprosessia varten lämmitettävä lietemäärä ja sitä myötä myös lämmitysenergian tarve on huomattavasti pienempi kuin tuoteskenaariossa.

**Taulukko 13.** Yhteenveto molempien skenaarioiden taloudellisesta tarkastelusta 5 000 tn/v kalalaitoskoolla.

	Energiaskenaario		Tuoteskenaario	
<b>Kustannukset</b>		<b>219 000</b>		<b>1 219 000</b>
	tiivistyksen kemikaalikustannus	195 000 €/v	kalaöljyn valmistuksen ja kalajauhon kuivauksen vaatima vähimmäisenergia	19 000 €/v
	lietteen lämmitys CSTR	24 000 €/v	lieteveden lämmitys UASBille	1 200 000 €/v
<b>Tuotot myynneistä</b>		<b>0 €/v</b>		<b>836 000</b>
			kalaperäiset arvotuotteet	386 000 €/v
	lietemäinen mädätejäännös	0 €/v	granulaliete	128 000 €/v
			biokaasu (lämmön ja sähkön hinnalla)	322 000 €/v
<b>Mitä korvaa? Korvaavuus kalalaitokselle</b>		<b>292 000 €/v</b>		<b>0 €/v</b>
	sähkö	134 000 €/v	-	
	lämpö	158 000 €/v	-	
<b>Tuotot + Korvaavuus - Kustannukset</b>		<b>72 000 €/v</b>		<b>-383 000 €/v</b>

Kuten taulukosta 13 nähdään, käytetyllä laskentarajauksella ja lähtötiedoilla energiaskenaariossa tuottojen ja korvaushyötyjen osuus on kustannuksia suurempi (72 t€/v). Sitä vastoin tuoteskenaariossa tuotot jäävät kustannuksia pienemmäksi (-383 t€/v). Toisaalta tuoteskenaariossa on potentiaalia liikevaihdon kasvattamiseen (jopa 4 %, jos karkeana oletuksena ison kalalaitoksen liikevaihto 22 milj. €/v), mutta toiminta vaatii suuria investointeja ja lisää käyttökustannuksia. Käyttökustannuksia on kuitenkin varmasti mahdollista optimoida mm. prosessointilämpötiloja alentamalla ja tehokkaalla lämmön talteenotolla. Tässä raportissa esitettyjen kannattavuusarvioiden tarkoitus on mahdollistaa karkea vertailu erilaisten kiertotalouskonseptien välillä: Todellisten laitossuunnitelmien kannattavuutta tulee arvioida

tapauskohtaisesti. Muun muassa yksityiskohtaisemmat investointi- ja käyttökustannukset tarvittavien laitteistojen osalta ovat välttämättömiä lisätietoja tarkempiin suunnitelmiin.

Erityisesti tuoteskenaarion kohdalla todettiin, että monivaiheiset prosessointiketjut ovat erittäin haasteellisia saada kannattavaksi pienessä mittakaavassa (500 tn/v) ja mittakaavan kasvattaminen tuo etuja. Mitään tiettyä kannattavuusrajaa kalalaitoksen koolle sivuvirtojen edistyneempien käsittelymenetelmien käyttöönotolle ei kuitenkaan voida asettaa. Kysymys ei ole niinkään mittaluokasta ja sen kasvattamisesta, vaikka isommat yksiköt tuovat kustannushyötyjä. Merkityksellisempää on tuotteiden arvo ja vastaavasti niitä korvaavien, fossiilisilla tuotantopanoksilla tuotettujen, tuotteiden arvo ja näiden keskinäiset suhteet. Samoin hukkalämmön hyödyntämismahdollisuudet ovat erittäin tärkeässä roolissa; kalalaitoksen kevästä syksyyn kestävä jähdyttämisen lämpökuorma olisi saatava hyödynnettyä.

## 6. Johtopäätökset

Kiertokala-hankkeen tavoitteena oli selvittää kalojen kiertovesikasvatuksen sivuvirtojen hyödyntämisen ja ravinteiden talteenoton tuottamaa lisäarvoa. Käsittelytekniikoiden osalta raporttiin valittiin kirjoitushetkellä relevanteimmiksi arvioituja tekniikoita. Selvitys osoitti, että teknisesti esimerkiksi biokaasuprosessilla pystytään hyödyntämään lietteiden ja muiden sivuvirtojen energiapotentiaali, ja samalla myös ravinteet säilyvät käyttökelpoisina kasveille. Samoin kalaöljyn ja -jauhon tuotanto on mahdollista kalojen perkuujätteistä. Sivuvirtojen hyödyntämisen suurimmaksi haasteeksi osoittautui toiminnan taloudellisuus. Hyödykkeet, joita sivuvirroista valituilla tekniikoilla valmistetaan, ovat nykyisellään melko edullisia, eli sivuvirroista valmistus ei tuo taloudellista etua, vaikka raaka-aine on edullinen tai jopa ilmainen.

Teknisiä kehityskohteita kalalaitosten sivuvirtojen käsittelyssä on etenkin liukoisten ravinteiden talteenoton tekniikat. Tässä selvityksessä liukoisten ravinteiden talteenottokokeissa kiinteillä adsorbenteilla, poloniitilla ja biohiilellä, havaittiin hyvin heikkoja talteenottotehokkuuksia. Talteenoton tehostaminen edistäisi typen kierrätystä, mutta ajurina voi olla myös typpikuormituksen lupaehdojen tiukentuminen. Jos ravinteiden talteenottoa saadaan kehitettyä, luo se edellytyksiä myös kestäväen kalantuotannon lisäämiseen. Toisaalta toistaiseksi edullisin tapa pienentää typpikuormitusta on poistaa se biologisella prosessilla typpikaasuksi.

Jatkossa vesi- ja lietejakeiden ravinteiden talteenottoa onkin tutkittava vielä lisää, erityisesti epäorgaanisten sivuvirtojen, eli veteen liunneen fosforin sekä typen osalta. Lisäksi myös biokaasuprosessin tuotevalikoiman laajentamista kannattaisi tutkia lisää. Anaerobisella prosessilla olisi mahdollista tuottaa myös esimerkiksi vetyä ja rasvahappoja, mutta aihe vaatii vielä lisätutkimusta.

Toisena kehityskohteena tunnistettiin kalanperkeistä valmistettavat lisäarvotuotteet (öljyt, proteiinijakeet, ym.) ja niiden taloudellisen hyödyntämisen edistäminen. Perkeistä voidaan jalostaa useita erilaisia tuotteita, mutta niiden taloudellisesti kannattava tuotanto edellyttää lisäpanostuksia. Kannattavuuden varmistaminen vaatii riittävää ja vakaata lisäarvotuotteiden kysyntää sekä toimivan tuotantoketjun. Keskeistä on, että perkeiden saatavuus on jatkuvaa ja määrät riittävät teollisen mittakaavan tuotantoon. Tätä voidaan edistää keskittämällä perkeiden toimituksia useammalta kasvatuslaitokselta. Kehittämistyötä tarvitaan myös lisäarvotuotteiden valmistustekniikoiden osalta, jotta tuotantokustannuksia voidaan alentaa ja kustannustehokkuutta parantaa. Lisäksi yksi mahdollisuus on brändätyjen erikoistuotteiden kehittäminen lisäarvotuotteista, esimerkiksi kotimaisuutta korostaen, mikä voi mahdollistaa nykyisiä markkinahintoja korkeammat yksikköhinnat. Kokonaisuutena lisäarvotuotteilla voi olla tulevaisuudessa laajempaan taloudellisesta merkitystä kalankasvatuksen sivuvirtojen kestävässä hyödyntämisessä.

Keskeisimpiä epävarmuustekijöitä raportissa esitetyissä laskelmissa ovat kustannusarviot ja energiankulutus. Esimerkiksi investointikustannuksia ei järjestelmällisesti arvioitu. Myös porttimaksujen arviointi on hyvin haastavaa, koska porttimaksut ovat neuvoteltavissa tapauskohtaisesti. Konseptitarkasteluissa käytettiin hyvin karkeita ja yksinkertaistettuja arvioita eri prosessivaiheiden energiankulutuksesta ja/tai tuotannosta. Laskelmissa ei huomioitu energian hinnan vaihteluita tai arvioitu tasoa, millä energianhinnoilla mikäkin prosessointi voisi olla kannattavaa (herkkyystarkastelu).

Kalalietteen jatkojalostuksen osalta on huomioitava myös EU-tason lainsäädännön tulkinnan kehittyminen, eli mihin ainesosaan kalalaitosten lietteet luetaan. Suomessa kansallisesti tilanne on yksiselitteisemmin tulkittu, eli kalalietettä ei tulkita puhdistamolietteeksi. Mikäli lannoitevalmistetta pyritään tuottamaan EU:n laajuisille markkinoille, on tarkistettava kulloinkin voimassa oleva tilanne EU-tasolla.

## Viitteet

- Aguilar-Pozo, V.B., Chimenos, J.M., Elduayen-Echave, B., Olaciregui-Arizmendi, K., López, A., Gómez, J., Guembe, M., García, I., Ayesa, E. & Astals, S. 2023. Struvite precipitation in wastewater treatment plants anaerobic digestion supernatants using a magnesium oxide by-product. *Science of The Total Environment* 890: 164084. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164084>
- Ahmad, A., Ghufuran, R. & Wahid, Z.A. 2011. Role of calcium oxide in sludge granulation and methanogenesis for the treatment of palm oil mill effluent using UASB reactor. *Journal of Hazardous Materials* 198: 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.10.008>
- Albuzio, A., Durigon, V. & Provenzano, M.R. 2011. Anaerobic Digestion of Trout By-Products. *Waste and Biomass Valorization* 2: 127–131. <https://doi.org/10.1007/s12649-011-9070-x>
- Arenas-Montaño, V., Fenton, O., Moore, B. & Healy, M.G. 2021. Evaluation of the fertiliser replacement value of phosphorus-saturated filter media. *Journal of Cleaner Production* 291: 125943. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125943>
- Asgeirsson, B., Fox, J.W. & Bjarnason, J.B. 1989. Purification and characterization of trypsin from the poikilotherm *Gadus morhua*. *European Journal of Biochemistry* 180: 85–94. DOI: 10.1111/j.1432-1033.1989.tb14618.x
- Bimbo, A.P. 2019. Marine oils – AOCs lipid library <https://www.aocs.org/resource/marine-oils/>. Päivitetty 23.7.2019. Viitattu 10.112.2025.
- Bougatef, A. 2013. Trypsins from fish processing waste: characteristics and biotechnological applications - comprehensive review. *Journal of Cleaner Production* 57: 257–265.
- Brod, E., Henriksen, T.M., Ørnsrud, R. & Eggen, T. 2023. Quality of fish sludge as fertiliser to spring cereals: Nitrogen effects and environmental pollutants. *Science of The Total Environment* 875: 162541. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162541>
- Bureau, D.P., Gunther, S.J. & Cho, C.Y. 2003. Chemical composition and preliminary theoretical estimates of waste outputs of rainbow trout reared in commercial cage culture operations in Ontario. *North American Journal of Aquaculture* 65: 33–38. [https://doi.org/10.1577/1548-8454\(2003\)065<0033:CCAPTE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8454(2003)065<0033:CCAPTE>2.0.CO;2)
- Cheung, R. C., Ng, T. B. & Wong, J. H. 2015. Marine peptides: bioactivities and applications. *Marine Drugs* 13: 4006–4043. <https://doi.org/10.3390/md13074006>
- Choudhury, A., Lepine, C. & Good, C. 2023. Methane and Hydrogen Sulfide Production from the Anaerobic Digestion of Fish Sludge from Recirculating Aquaculture Systems: Effect of Varying Initial Solid Concentrations. *Fermentation* 9(2): 94. <https://doi.org/10.3390/fermentation9020094>
- Cucarella, V., Mazurek, R., Zaleski, T., Kopeć, M. & Renman, G. 2009. Effect of Polonite used for phosphorus removal from wastewater on soil properties and fertility of a mountain meadow. *Environmental Pollution* 157: 2147–2152. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.02.007>

- Cunha, J.R., Schott, C., van der Weijden, R.D., Leal, L.H., Zeeman, G. & Buisman, C. 2018. Calcium addition to increase the production of phosphate granules in anaerobic treatment of black water. *Water Research* 130: 333–342. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.012>
- Dauksas, E., Falch, E., Slizyte, R. & Rustad, T. 2005. Composition of fatty acid and lipid classes in bulk products generated during enzymic hydrolysis of cod (*Gadus morhua*) by-products. *Process Chemistry* 40(8): 2659–2670. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.12.012>
- De Graaff, M.S., Temmink, H., Zeeman, G. & Buisman, C.J.N. 2011. Energy and phosphorus recovery from black water. *Water Science and Technology* 63: 2759–2765. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.558>
- Deng, L. & Dhar, B.R. 2023. Phosphorus recovery from wastewater via calcium phosphate precipitation: A critical review of methods, progress, and insights. *Chemosphere* 330: 138685. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138685>
- Dumas, A., de Lange, C.F.M., France, J. & Bureau, D.P. 2007. Quantitative description of body composition and rates of nutrient deposition in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 273: 165–181. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.09.026>
- Ervasti, S., Vainio, M. & Tampio, E. 2019. Use of local resources as co-substrates in a farmscale biogas plant. *Open Agriculture* 4: 650–660. <https://doi.org/10.1515/opag-2019-0065>.
- Ervasti, S., Kostensalo, J. & Tampio, E. 2022. Effects of seasonal and local co-feedstocks on the performance of continuous anaerobic digestion of cattle slurry. *Bioresource Technology Reports* 19: 101207. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101207>
- Estiasih, I., Ahmadi, K., Ali, D.Y., Nisa, F.C., Suseno, S.H. & Lestari, L.A. 2021. Valorisation of viscera from fish processing for food industry utilizations, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 924: 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/924/1/012024>
- Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EY) N:o 1069/2009, annettu 21 päivänä lokakuuta 2009, muiden kuin ihmisravinnoksi tarkoitettujen eläimistä saatavien sivutuotteiden ja niistä johdettujen tuotteiden terveys sääntöistä sekä asetuksen (EY) N:o 1774/2002 kumoamisesta (sivutuoteasetus). Euroopan unionin virallinen lehti 14.11.2009. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R1069>. Viitattu 22.10.2025.
- Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2019/1009, annettu 5 päivänä kesäkuuta 2019, EU-lannoitevalmisteiden asettamista saataville markkinoilla koskevien sääntöjen vahvistamisesta ja asetusten (EY) N:o 1069/2009 ja (EY) N:o 1107/2009 muuttamisesta sekä asetuksen (EY) N:o 2003/2003 kumoamisesta (ETA:n kannalta merkityksellinen teksti). Euroopan unionin virallinen lehti 25.6.2019. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1009>. Viitattu 22.10.2025.
- Friedman, M. 1978. Inhibition of Lysinoalanine Synthesis by Protein Acylation. Teoksessa Friedman, M. (toim.). *Nutritional Improvement of Food and Feed Proteins*. Advances in

- Experimental Medicine and Biology, 105: 613-648. Boston, MA: Springer US. Saatavissa: [https://doi.org/10.1007/978-1-4684-3366-1\\_30](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-3366-1_30)
- Garcia-Ruiz, R. & Hall, G.H. 1996. Phosphorus fractionation and mobility in the food and faeces of hatchery reared rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Aquaculture 145: 183–193. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(96\)01329-4](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(96)01329-4)
- Gildberg, A., Arnesen, J.A. & Carlehog, M. 2002. Utilisation of cod backbone by biochemical fractionation. Process Biochemistry 38(4): 475–480. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(02\)00103-6](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(02)00103-6)
- Hammersmith, 2025. Hammersmiths reports. Verkkosivu. Viitattu 20.10.2025. <https://hammersmithltd.blogspot.com/2025/10/weekly-report-october-11-2025.html>
- Howard, C., Prescott, S., Spigseth, K., Vestrum, R.I., Martinsen, S., Evje, I., Love, A., Skjennum, F., Sorella, D., Eisenbeck, T., Hartley, A. & Robinson, F. 2023. Best Available Techniques for Reduction and Reuse of Emissions in Nordic Land-based Aquaculture. Nordic Council of Ministers. 2023:514.
- Howard, C. 2025. Sludge collection in RAS and the implications for down stream applications. Recycling of aquaculture sludge to agriculture and nutrient recycling. Presentation at ESPP Workshop on nutrients in aquaculture and fisheries. 11.6.2025 Bergen.
- Huang, J. & Sathivel, S. 2010. Purifying salmon oil using adsorption, neutralization, and a combined neutralization and adsorption process. Journal of Food Engineering 96: 51–58.
- Jegannathan, K.R. & Nielsen, P.H. 2013. Environmental assessment of enzyme use in industrial production - a literature review. Journal of Cleaner Production 42: 228–240.
- Jiang, X., Li, Y., Tang, X., Jiang, J., He, Q., Xiong, Z. & Zheng, H. 2021. Biopolymer-based flocculants: a review of recent technologies. Environmental Science and Pollution Research 28: 46934–46963. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15299-y>
- Jóźwiak, T., Kowalkowska, A., Filipkowska, U., Struk-Sokołowska, J., Bolożan, L., Gache, L. & Ilie, M. 2021. Recovery of phosphorus as soluble phosphates from aqueous solutions using chitosan hydrogel sorbents. Scientific Reports 11: 16766. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96416-2>
- Kacprzak, M.J. & Sobik-Szołtysek, J. 2022. The opoka-rock in N and P of poultry manure management according to circular economy. Journal of Environmental Management 316: 115262. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115262>
- Kim, S.K. & Wijesekara, I. 2010. Development and biological activities of marine-derived bioactive peptides: a review. Journal of Functional Foods 2: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2010.01.003>
- Kishimura, H., Klomklo, S., Benjakul, S. & Chun, B.S. 2008. Characteristics of trypsin from ceca of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*). Food Chemistry 106: 194–199. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.05.056>

- Kristinsson, H.G. & Rasco, B.A. 2000. Fish protein hydrolysates: Production, biochemical and functional properties. Critical reviews. Food Science and Nutrition 40: 43–81.
- Kristjansson, M. 1991. Purification and characterization of trypsin from the pyloric caeca of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Journal of Agricultural and Food Chemistry 39: 1738–1742.
- Klemencic, M. 2025. Regulatory status of aquaculture wastes/by-products under the EU Animal By-Products legislation. Presentation at ESPP Workshop on nutrients in aquaculture and fisheries. 11.6.2025 Bergen.
- Laki vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä 1299/2004. Ympäristöministeriö. Voimaantulo 31.12.2004. <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/2004/1299>. Viitattu 22.10.2025.
- Laki ympäristövaikutusten arviointimenettelystä 252/2017. Ympäristöministeriö. Voimaantulo 16.5.2017. <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/2017/252>. Viitattu 22.10.2025.
- Lanari, D. & Franci, C. 1998. Biogas production from solid wastes removed from fish farm effluents. Aquatic Living Resources 11: 289–295. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(98\)80014-4](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(98)80014-4)
- Lannoitelaki 711/2023. Voimaantulo 16.7.2022. <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskokoelma/2022/711>. Viitattu 22.10.2025.
- Leppänen, T., Anttila, J., Lind, V., Haapasalo, H., Ulvi, T., Rytönen, A.-M., Ihme, R., Vehviläinen, H., Jokinen, K., Kankainen, M. & Vielma, J. 2018. Kalankasvatuksen ympärille rakennettava yritysekosysteemi – SIBE-projektin tapaustutkimus. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 3/2018. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 54 s.
- Letisse, M., Rozieres, M., Hiol, A., Sergent, M., Comeau, L., 2006. Enrichment of EPA and DHA from sardine by supercritical fluid extraction without organic modifier. I. Optimization of extraction conditions. Journal of Supercritical Fluids 38: 27–36.
- Lokka, J., Haapalainen, P., Rasi, S., Kotilainen, T., Seppänen, A.-M., Tampio, E., Pulkkinen, J., Tampio, M., Tuuri, M., Lehtinen, V., Ervasti, S., Timonen, K., Rasa, K., Välisuo, P. & Uotila, L. 2021. Teollinen ekosysteemi energian- ja ruoantuotantoon. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 64/2021. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 65 s.
- Luostarinen, S., Tampio, E., Lehtoranta, S., Valve, H., Laakso, J., Rasi, S., Pyykkönen, V., Markkanen, J., Heikkinen, J., Haapala, H., Winquist, E., Lång, K., Timonen, K., & Silfver, T. 2023. Kestävät käytännöt biokaasutuotannossa. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:32.
- Maa- ja metsätalousministeriön asetus eläimistä saatavista sivutuotteista 783/2015. Voimaantulo 1.7.2015. <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskokoelma/2015/783>. Viitattu 22.10.2025.
- Maa- ja metsätalousministeriön asetus eläimistä saatavista sivutuotteita annetun maa- ja metsätalousministeriön asetuksen 783/2015 muuttamiseksi 1142/2022. Voimaantulo 1.1.2023. <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskokoelma/2022/1142>. Viitattu 22.10.2025.

- Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 964/2023. Voimaantulo 11.10.2023. <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskokoelma/2023/964>. Viitattu 22.10.2025.
- Maqsood, S., Benjakul, S. & Kamal-Eldin, A. 2012. Extraction, Processing, and Stabilization of Health-Promoting Fish Oils. *Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture* 4: 141-147.
- Mireşan, V., Cocan, D., Răducu, C., Feştilă, I., Coroian, A., Constantinescu, R., Negrea, O. & Ranga, R. 2012. Slaughter Yield and Weight of Body Segments in Rainbow Trout (*Oncorhynchus Mykiss*) Reared in two Different Growth Systems. *Scientific Papers: Animal Science and Biotechnologies* 45 (2): 67-71.
- Mirzoyan, N. & Gross, A. 2013. Use of UASB reactors for brackish aquaculture sludge digestion under different conditions. *Water Research* 47: 2843–2850. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.02.050>
- Netshivhumbe, R., Faloye, F., Tolessa, A., Görgens, J. & Goosen, N. 2024. Anaerobic Co-Digestion of Fish Sludge Originating from a Recirculating Aquaculture System. *Waste and Biomass Valorization* 15: 5589–5605. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02569-2>
- Neuvoston direktiivi 86/278/ETY, annettu 12 päivänä kesäkuuta 1986, ympäristön, erityisesti maaperän, suojelusta käytettäessä puhdistamolietettä maanviljelyssä. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti nro L 181. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:31986L0278>. Viitattu 22.10.2025
- Oz, M. & Dikel, S. 2015. Comparison of Body Compositions and Fatty Acid Profiles of Farmed and Wild Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Food Science and Technology* 3 (4): 56–60. <https://doi.org/10.13189/fst.2015.030402>
- Pettersen, K.S., Sele, V., Araujo, P., Belghit, I., Benestad, S.L., Bernhoft, A., Booth, A.M., Eriksen, G.S., Farkas, J., Handå, A.H., Hansen, B.H., Helgesen, K.O., Holst-Jensen, A., Johannessen, G.S., Liland, N.S., Lundebye, A.-K., Malzahn, A.M., Nilsen, H., Nordtvedt, T.S., Norström, M., Owczarek-Kościelniak, M.M., Øines, Ø., Patel, S.J., Sindre, H., Standal, I.B. & Hagemann, A. 2025. Fish Sludge as Feed in Circular Bioproduction: Overview of Biological and Chemical Hazards in Fish Sludge and Their Potential Fate via Ingestion by Invertebrates. *Reviews in Aquaculture* 17: e12996. <https://doi.org/10.1111/raq.12996>
- Polat, A., Tokur, B. & Buga, H. 2022. Extraction of protein from fresh rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) viscera and smoked trout trimmings using commercial enzymes. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 39(1): 71-80.
- Pulkkinen, J.T., Ronkanen, A.-K., Pasanen, A., Kiani, S., Kiuru, K., Koskela, J., Lindholm-Lehto, P., Lindroos, A.-J., Muniruzzaman, M., Solismaa, L., Klöve, B. & Vielma, J. 2021. Start-up of a “zero-discharge” recirculating aquaculture system using woodchip denitrification, constructed wetland, and sand infiltration. *Aquacultural Engineering* 93: 102161. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2021.102161>
- Puroomega, 2016. Approved Omega Health Claims. Verkkosivu. Viitattu 20.10.2025. <https://www.puroomega.com/wp-content/uploads/2016/06/Approved-Omega-Health-Claims.pdf>

- Rasmussen, R.S. & Ostefeld, T.H. 2000. Effect of growth rate on quality traits and feed utilisation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Aquaculture* 184: 327–337. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00324-5](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00324-5)
- Rubio-Rodríguez, N., de Diego, S.M., Beltrán, S., Jaime, I., Sanz, M.T. & Rovira, J. 2012. Supercritical fluid extraction of fish oil from fish by-products: A comparison with other extraction methods. *Journal of Food Engineering* 109: 238–248.
- Ruokavirasto 2024. Lannoitevalmisteiden kansallinen ainesosaluettelo. <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/ainesosaluettelo/> Päivitetty 25.9.2024. Viitattu 22.10.2025.
- Rustad, T., Storrø, I. & Slizyte, R. 2011. Possibilities for the utilization of marine by-products. Invited review. *International Journal of Food Science and Technology* 46: 2001–2014.
- SFS 3008. 2000. Veden, lietteen ja sedimentin kuiva-aineen ja hehkutusjäännöksen määrittäminen. Helsinki: Suomen Standardit ry.
- Shahidi, F., Han, X. & Synowiecki, J. 1995. Production and characteristics of protein hydrolysates from capelin (*Mallotus villosus*). *Food Chemistry* 53: 285–293.
- Sharrer, M.J., Tal, Y., Ferrier, D., Hankins, J.A. & Summerfelt, S.T. 2007. Membrane biological reactor treatment of a saline backwash flow from a recirculating aquaculture system. *Aquacultural Engineering* 36: 159–176. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2006.10.003>
- Shaviklo, A.R. 2015. Development of fish protein powder as an ingredient for food applications: a review. *Journal of Food Science and Technology* 52: 648–661. <http://doi.org/10.1007/s13197-013-1042-7>
- Simpson, B.K. & Haard, N.F. 1987. Cold-adapted enzymes from fish. Teoksessa: Knorr, D. (toim.). *Food Biotechnology*. Marcel Dekker, Inc., New York & Basel, pp. 495–527.
- Skanderby, M. 1994. Protein hydrolysates: Their functionality and applications. *Food Technology International Europe* 10: 141–144.
- Slizyte, R., Dauksas, E., Falch, E., Storrø, I. & Rustad, T. 2005a. Characteristic of protein fractions generated from hydrolysed cod (*Gadus morhua*) by-products. *Process Biochemistry* 40(6): 2021–2033.
- Slizyte, R., Dauksas, E., Falch, E., Storrø, I. & Rustad, T. 2005b. Yield and composition of different fractions obtained after enzymatic hydrolysis of cod (*Gadus morhua*) byproducts. *Process Biochemistry* 40: 1415–1424.
- Souza, M.L.R., Macedo-Viegas, E.M., Zuanon, J.A.S., Carvalho, M.R.B. & Reis Goes, E.S. 2015. Processing yield and chemical composition of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) with regard to body weight. *Acta Scientiarum. Animal Sciences Maringá*, 37(2): 103–108. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v37i2.24165>
- Steward, N.T., Boardman, G.D. & Helfrich, L.A. 2006. Characterization of nutrient leaching rates from settled rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) sludge. *Aquacultural Engineering* 35: 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2006.01.004>

- Taheri, A., Anvar, S.A.A., Ahari, H. & Fogliano, V. 2013. Comparison the functional properties of protein Hydrolysates from poultry byproducts and rainbow trout (*Onchorhynchus mykiss*) viscera. Iranian Journal of Fisheries Sciences 12 (1): 154–169.
- Tampio, E., Laakso, J., Ervasti, S., Vainio, M., Pyykkönen, V., Luostarinen, S. 2019. Anaerobic digestion of fur animal manure and assessment of co-digestion with other livestock manures. Poster. 16th IWA World Conference on Anaerobic Digestion.
- Tervahauta, T., van der Weijden, R.D., Flemming, R.L., Hernández Leal, L., Zeeman, G. & Buisman, C.J.N. 2014. Calcium phosphate granulation in anaerobic treatment of black water: A new approach to phosphorus recovery. Water Research 48: 632–642. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.012>
- Tiwari, M.K., Guha, S., Harendranath, C.S. & Tripathi, S. 2006. Influence of extrinsic factors on granulation in UASB reactor. Applied Microbiology and Biotechnology 71: 145–154. <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0397-3>
- Thorkelson, G. & Kristinsson, H.G. 2009. Bioactive peptides from marine sources. State of art. Report to the NORA fund. Skýrsla Matis 14-09.
- Usman, M.O., Aturagaba, G., Ntale, M. & Nyakairu, G.W. 2022. A review of adsorption techniques for removal of phosphates from wastewater. Water Science and Technology 86: 3113–3132. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.382>
- Valtioneuvoston asetus vesitalousasioista 1560/2011. Voimaantulo 1.1.2012. <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/2011/1560>. Viitattu 22.10.2025.
- Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta 713/2014. Voimaantulo 10.9.2014. <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/2014/713>. Viitattu 22.10.2025.
- Vasquez, P. & Zapata, J.E. 2018. Optimization of enzymatic hydrolysis of viscera proteins of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Advance Journal of Food Science and Technology 16(SP): 292–300.
- Vesilaki 587/2011. Oikeusministeriö. Voimaantulo 1.1.2012. <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/2011/587>. Viitattu 22.10.2025.
- Vielma, J., Setälä, J., Airaksinen, S., Kankainen, M., Tarkki, V. & Kaitaranta, J. 2013. Vähäarvoisen kalamateriaalin jalostus lisäarvotuotteiksi – liiketoimintanäkymät. RKT:n työraportteja 28/2013, 62 s.
- Viles, A., Karahmet, E., Toroman, A. & Kokorovic, E. 2013. Chemical composition of rainbow trout waste. Proceedings-24th International Scientific-Expert Conference of Agriculture and Food Industry – Sarajevo 2013: 48–51.
- Wang, Z. 2021. Effect of low temperature on the performance of UASB reactor for municipal wastewater treatment: recent advances and future perspectives. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 621: 012103. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/621/1/012103>

- Wang, M., Zhou, J., Collado, M.C. & Barba, F.J. 2021. Accelerated Solvent Extraction and Pulsed Electric Fields for Valorization of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) and Sole (*Dover sole*) By-Products: Protein Content, Molecular Weight Distribution and Antioxidant Potential of the Extracts. *Marine Drugs* 19: 207. <https://doi.org/10.3390/md190402>
- Xiang, W., Zhang, X., Chen, J., Zou, W., He, F., Hu, X., Tsang, D.C.W., Ok, Y.S. & Gao, B. 2020. Biochar technology in wastewater treatment: A critical review. *Chemosphere* 252: 126539. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126539>
- Ympäristönsuojelulaki 527/2014. Ympäristöministeriö. Voimaantulo 1.9.2014. <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/2014/527>. Viitattu 22.10.2025.
- Yogev, U., Sowers, K.R., Mozes, N. & Gross, A. 2017. Nitrogen and carbon balance in a novel near-zero water exchange saline recirculating aquaculture system. *Aquaculture* 467: 118–126. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.04.029>
- Yogev, U., Vogler, M., Nir, O., Londong, J. & Gross, A. 2020. Phosphorous recovery from a novel recirculating aquaculture system followed by its sustainable reuse as a fertilizer, *Science of The Total Environment* 722: 137949. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.-2020.137949>

## Liitteet

**Taulukko L1.** Konseptitarkastelun lähtötietoja ja laskennassa käytettyjä vakioita.

Laskennassa käytetyt kertoimet prosessivaiheittain		
Tuotantoparametrit (kiertovesilaitos)	yksikkö	
Rehukerroin (koko tuotantocykli)		1,074
Vedenkäyttökerroin (korvausvesi)	m <sup>3</sup> /tn rehua	600
Teuraspaino	g	2 300
<b>Kalantuotto</b>		
Vuosikuolleisuus	%	5
Perkuusaanto	%	85
<b>Lieteveden erotus</b>		
Fosforista lieteveeten	%	80
Typestä lieteveeten	%	50
<b>Lietteen tiivistys</b>		
Fosforista lietteeseen	%	90
Typestä lietteeseen	%	25
Koagulanttikemikaalin käyttömäärä	% rehun painosta	1,3
Flokkulanttikemikaalin käyttömäärä	% rehun painosta	1,3
<b>UASB-käsittely</b>		
Fosforista granulalietteeseen	%	80
Typestä granulalietteeseen	%	80
<b>Kustannukset</b>		
sähkön hinta	€/kWh	0,1
lämmön hinta	€/kWh	0,07
tiivistyskemikaalien hinta	€/tn	1 400
<b>Tuotot</b>		
P hinta	€/kg	1,43
N hinta	€/kg	1,28
kalaöljy	€/kg	1,4
kalajauho	€/kg	1,9

**Taulukko L2.** Skenaariotarkastelussa käytetyt arvot jakeiden ominaisuuksille.

	Tiivistetty liete	Kuolleet kalat	Perkeet
TS (% tuorepainosta)	5,5	29,6	41,9
VS (% kuiva-aineesta)	89,2	91,9	96,9
BMP (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tVS)	230	790	900
kokonaistyyppi (g/kg)	1,16	26,6	18,7
liukoinen typpi (g/kg)	0,0003	0,60	0,60
kokonaisfosfori (g/kg)	0,94	3,5	3,5
kokonaiskalium (g/kg)	0,40	2,00	1,90
lämpötila (°C)	15	15	8
Biokaasun CH <sub>4</sub> -pitoisuus (%)	60	60	60
tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	1 000	500	500
olomuoto	liete	kiinteä	liete

BMP, biokemiallinen metaanintuottopotentiaali



**Löydät meidät  
verkosta**

**luke.fi**



Luonnonvarakeskus (Luke) Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki