



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 106/2022

Kirjoloheen käyttäytymisen havainnointi akustisella telemetryjärjestelmällä

Käyttökokeet kalankasvatuslaitoksella
Saaristomerellä 2021

Kalle Sinisalo, Harri Vehviläinen, Markus Kankainen ja Antti Forsman

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 106/2022

Kirjoloheen käyttäytymisen havainnointi akustisella telemetryjärjestelmällä

Käyttökokeet kalankasvatuslaitoksella Saaristomerellä 2021

Kalle Sinisalo, Harri Vehviläinen, Markus Kankainen ja Antti Forsman



Viittausohje:

Sinisalo, K., Vehviläinen, H., Kankainen, M. & Forsman, A. 2022. Kirjoloheen käyttäytymisen havainnointi akustisella telemetriajärjestelmällä : Käyttökokeet kalankasvatustiloksella Saaristomerellä 2021. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 106/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 59 s.

Kalle Sinisalo ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0003-4860-7576>

Selvityksessä käytettyjä laitteistoja on rahoitettu Suomen akatemian tutkimusinfrastruktuurit FIRI2018 -rahoituksella [Päätös n:o 319496]. Tutkimukset on suoritettu Euroopan meri- ja kalatalousrahaston rahoituksella.



ISBN 978-952-380-575-0 (Painettu)

ISBN 978-952-380-576-7 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-576-7>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Kalle Sinisalo, Harri Vehviläinen, Markus Kankainen ja Antti Forsman

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2022

Julkaisu vuosi: 2022

Kannen kuva: Kalle Sinisalo

Painopaikka ja julkaisumyynä: PunaMusta Oy, <http://luke.omapumu.com/fi>

Tiivistelmä

Kalle Sinisalo¹, Harri Vehviläinen², Markus Kankainen³ ja Antti Forsman⁴

¹ Luonnonvarakeskus (Luke), Vilppulantie 415, 41340 Laukaa

² Luonnonvarakeskus (Luke), Korkeakoulunkatu 7, 33720 Tampere

³ Luonnonvarakeskus (Luke), Itäinen Pitkäkatu 4 A, 20520 Turku

⁴ Ammattiopisto Livia, Kalakouluntie 72, 21610 Parainen

Suomessa on kasvava kiinnostus ja sijainninohjauksesta tuleva paine siirtää kalankasvatusta kohti uusia yhä avoimempia tuotantoalueita sekä ottamaan käyttöön uusia viljelytekniikoita. Kuitenkin vain vähän tiedetään viljellyn kirjolohen käyttäytymisestä ja tarpeista, jotka voivat olla ristiriidassa uusien alueiden ja tuotantotekniikoiden kanssa. Tästä johtuen kalojen käyttäytymisen tutkiminen vaihtelevissa ympäristöoloissa on tärkeää ennen uusien tuotanto-olosuhteiden tai -tekniikoiden käyttöönottoa, jotta voidaan varmistua, että uudet menetelmät tai tuotanto-alueet eivät vaaranna kalaterveyttä.

Tässä raportissa esitellään Kustavin Korrassa sijainneella upotettavalla kalankasvatuslaitoksella akustisella telemetrialaitteistolla vuonna 2021 kerättyä aineistoa. Aineistoa kirjolohen käyttäytymisen tutkimista varten kertyi tuotantomittakaavan laitteistolla yhtäjaksoisesti heinä-joulukuun välisenä aikana yhteensä lähes 3 miljoonaa havaintoa.

Aluksi raportti käy läpi biosensoreiden ja akustisen telemetrian käytön vesiviljelytutkimuksessa laajan kirjallisuuskatsauksen kautta. Raportin toisessa osassa esitetään kattavasti tutkimuksessa käytössä ollutta telemetrialaitteistoa, ympäristömittauslaitteet sekä käydään seikkaperäisesti läpi kerätty aineisto ja sen purkaminen ymmärrettävään muotoon.

Raportin lopuksi esitetään tuloksia Korrassa valinneista ympäristöoloista sekä kalojen syvyys, lämpötila ja aktiivisuusdataan perustuvaa telemetria-aineistoa. Aineiston perusteella pyrittiin luomaan käsitys kalojen peruskäytöksestä kasvatuskauden aikana, kun ympäristöolot ja kasvatustoiminta on normaalia. Tätä perustasoa vasten voidaan jatkossa verrata kalojen käyttäytymisen muutoksia sään ääri-ilmiöiden (poikkeuksellisen kova virtaus, korkea/alhainen veden lämpötila, korkea aallokko) tai uusien tuotantotekniikoiden (verkkoaltaan upottaminen tai käytös puolisoljetussa merilaitoksessa) aikana.

Viljellyn kirjolohen uintikäyttäytymistä ja -syvyyttä ohjaavat vahvasti valo-hämäräsykli sekä ruokinnat. Kalat uivat hämärään aikaan lähempänä pintaa kuin vuorokauden valoisaan ajankohdaksi. Päivän syvempää uintia rikkovat ruokintajaksot, jonka ajaksi kalat nostavat aktiivisuustasoaan ja tulevat ruokailemaan lähelle pintaa. Ruokinnan päätyttyä aktiivisuus laskee lähelle aiempaa ja kalat palaavat uimaan syvempään veteen. Yksilöiden välillä on vaihtelua sekä uintisyvyydessä että syvyyden vaihtelussa.

Asiasanat: kalanviljely, kirjolohi, mittausmenetelmät, telemetria-tutkimus, akustinen telemetria

Sisällys

1. Johdanto	5
2. Biosensorit kalatutkimuksessa	6
2.1. Biosensorit	6
2.2. Biosensorit kalankasvatuksen käyttäytymistutkimuksessa	8
2.2.1. Syvyys- ja lämpötilasensorit	8
2.2.2. Tilankäyttö (3D-paikannus).....	11
2.2.3. Aktiivisuus.....	13
2.2.4. Syke.....	15
2.2.5. Muita sensoreita	19
3. Telemetrijärjestelmä Korran laitoksella	20
3.1. Merialueen tutkimusympäristö.....	20
3.2. Telemetrijärjestelmän valintaan liittyvät kriteerit	21
3.3. Kuvaus Korraan hankitusta telemetrijärjestelmästä	22
3.4. Telemetriadata ja sen käsittely	24
4. Muu Korran laitoksen tutkimuslaitteisto	29
5. Koeasetelma	30
5.1. Biosensoreiden asettaminen kaloihin	30
5.2. Telemetrijärjestelmän käyttö kokeen aikana	32
5.3. Ympäristöolosuhteet koejakson aikana	33
6. Tulokset.....	38
6.1. Kalojen vuorokausirytmä – valon ja ruokinnan vaikutus.....	38
6.2. Kalojen tilankäyttö.....	41
6.3. Lämpötila telemetriasensoreista	44
7. Yhteenveto.....	47
Viitteet.....	49
Liitteet	53

1. Johdanto

Suomessa vesiviljelylle on tunnistettu uusia tuotantoalueita yhä avoimemmilta alueilta. Lisäksi uusien viljelytekniikoiden testaaminen ja käyttöönotto asettavat uusia haasteita ja herättävät kalaterveydellisiä kysymyksiä, jotka on ratkaistava ennen uusien alueiden ja menetelmien kaupallista käyttöönottoa. Viljeltyjen kalojen hyvinvointi on lailla turvattu, minkä lisäksi se on kasvattajalle yksi tärkeimmistä perusedellytyksistä kaupallisesti kannattavaan vesiviljelytoimintaan.

Uusien tutkimusmenetelmien myötä kalojen käyttäytymistä on mahdollista seurata entistä kattavammin, kun kalojen liikettä ja käytöstä voidaan seurata ilman näköyhteyttä eläimeen. Käyttäytymisen etähavainnointi on tullut mahdolliseksi erilaisten biosensoreiden kautta, joilla voidaan mitata esimerkiksi kalojen uintisyvyyttä, lämpötilaa tai aktiivisuutta. Uuden tekniikan avulla voidaan luoda entistä tarkempi kuva kalojen käytöksestä normaalin kasvatustoiminnan aikana sekä verrata miten käytös muuttuu erilaisten ympäristötekijöiden vaikutuksesta.

Erotuksena radiotelemetriasta, joka hyödyntää radioaaltoja, akustinen telemetria hyödyntää ääniaaltoja signaalin välittämiseksi lähettimeltä vastaanottimelle. Akustista telemetriaa on käytetty luonnonkalojen seurantaan jo pitkään, mutta menetelmä on tekemässä yhä suurempaa läpimurtoa myös vesiviljelytutkimuksessa, jossa uudet innovaatiot ja tuotantotavat ohjaavat tutkijoita ja kasvattajia ymmärtämään kasvattamaansa kalaa yhä paremmin. Tässä raportissa telemetriasta puhuttaessa viitataan nimenomaan akustiseen telemetriaan.

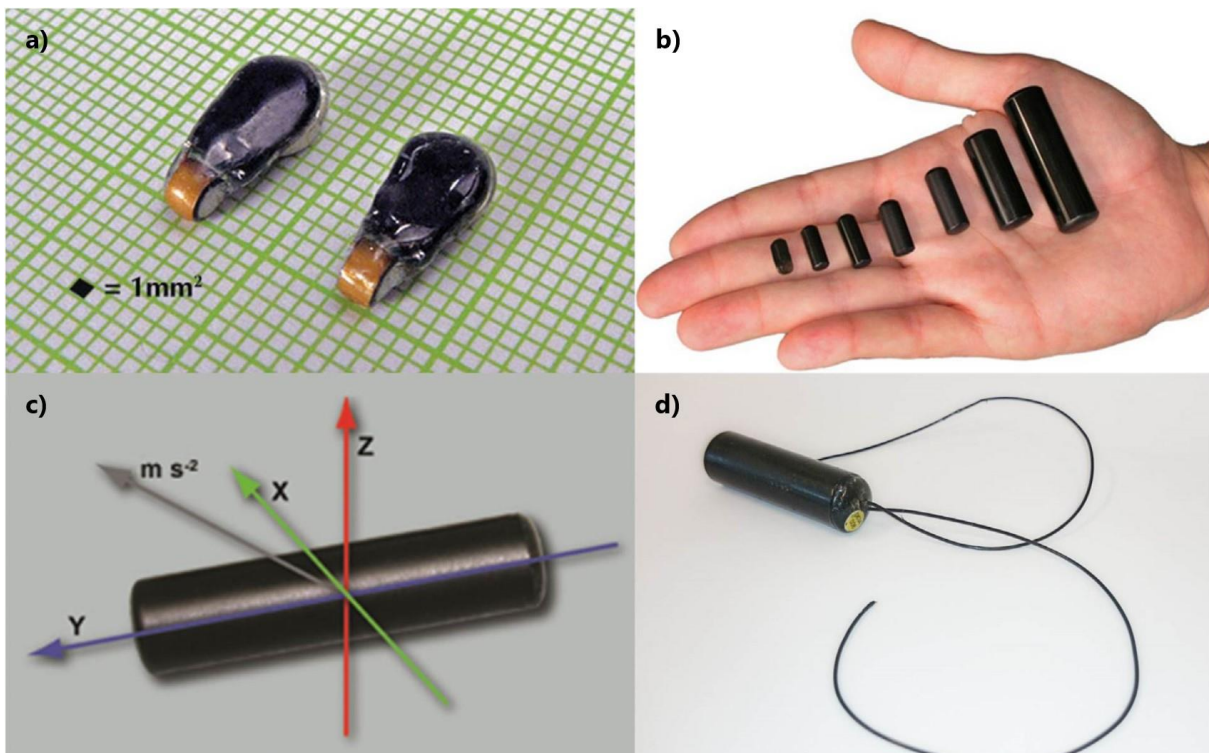
Raportti kokoaa yhteen tietoa vesiviljelyssä tehdystä telemetriatutkimuksesta ja raportti pyrkii antamaan lukijalle kattavan kuvan akustisesta telemetriasta ja sen käyttösovelluksista. Lisäksi raportti esittää vuonna 2021 Saaristomerellä tuotantomittakaavan verkkoallaslaitoksella kerättyyn telemetria-aineistoon pohjautuen kirjolohen käyttäytymistä ja havainnollistaa kuvin käytöksen perustasoa kasvukauden aikana. Raportin tulokset perustuvat lähes 3 miljoonaan akustiseen telemetria havaintoon, joita on saatu heinä-joulukuun aikana vuonna 2021.

2. Biosensorit kalatutkimuksessa

2.1. Biosensorit

Eläinten fysiologian ja käyttäytymisen etähavainnointi on tullut mahdolliseksi kehittyneen sensoriteknikan myötä. Menetelmään viitataan usein termillä "biotelemetry" (engl. *biotelemetry*) tai nykyään lisäksi termillä "biologgaus" (engl. *biologging*) (Cooke ym. 2004; Whitford & Klimley, 2019). Termien ja menetelmien välillä on yhtäläisyyksiä ja eroja, mutta sekä biotelemetriassa että biologgauksessa käytettävistä sensoreista voidaan puhua biosensoreina. Kehittynyt teknologia on tuonut uusia tutkimusmahdollisuuksia, ja tutkijat ovatkin kääntäneet katseensa yhä enenevässä määrin pinnan alle selvittäessään kalan käyttäytymistä.

Eläintutkimuksessa biosensoreilla viitataan yleisesti sensoreihin, joita voidaan asettaa koe-eläimen ulkopintaan tai sen sisälle (esimerkiksi ruumiinonteloon) ja joilla voidaan mitata yhtä tai useampaa muuttujaa. Kala- ja vesiviljelytutkimuksessa käytetyt biosensorit ovat pääsääntöisesti joko loggereita (biologgaus) tai lähettäjiä (biotelemetry). Loggerit tallentavat havainnot laitteen sisäiseen muistiin, kun taas lähettimet hyödyntävät akustista telemetriaa siirtääkseen tiedon lähettimeltä vastaanottimelle (=hydrofoni), jonne havainnot tallentuvat. Biologgauksessa, havaintoaineiston talteen saaminen edellyttää biologgerin palautumista/takaisin saamista, kun taas biotelemetriassa aineisto siirretään tietokoneelle vastaanottimelta, jolloin ei ole väliä saadaanko lähetintä talteen vai ei.



Kuva 1. Esimerkkejä eri käyttötarkoituksen biosensoreista. a) erittäin pieni lähetin (Lotek Wireless Inc: 11,1×5,5× 3,7 mm, 0,32 gr.) muutaman gramman painoisille kaloille; b) eri kokoluokan telemetrialähettäjiä (Vemco); c) moniakseli kiihtyvyyssensori kalan aktiivisuuden ja pyrstönlyöntien mittaamiseen (Vemco); d) sydänekäyrä- eli elektrokardiogrammisensori (EKG) sykkeen mittaamiseksi (Thelma Biotel AS) (Hellström ym., 2016).

Biologgerin palautuminen on ongelmallista etenkin tilanteissa, joissa biologgerein varustettujen kalojen osuus samassa altaassa olevien muiden kalojen kanssa on todella pieni. Esimerkiksi Føre ym. (2017) onnistuivat palauttamaan vain 4/20 biologgeria, kun sensoroidut tutkimuskalat olivat samassa verkkoaltaassa 330 000 muun kalan kanssa. Biotelemetriassa ongelmana voi taas olla, että koska biotelemetria hyödyntää akustista telemetriaa tiedon siirtämiseen, vaikuttaa tutkimusympäristö sekä etenkin siellä vallitseva taustakohina (=melu) tiedonsiirron (lähettimeltä vastaanottimelle) luotettavuuteen. Tämä on tosin harvoin (jos koskaan) muodostunut ongelmaksi kalankasvatustutkimuksessa. Lisää aiheesta myöhemmin kohdassa 3.4 *Telemetriadata ja sen käsittely*.

Vesiviljelyssä mitattuja muuttujia ovat etenkin paine (=syvyys), lämpötila, kiihtyvyys (=aktiivisuus) ja uintikulma sekä esimerkiksi syke ja hengitystiheys (Arechavala-Lopez ym. 2021; Chambers 2013; Føre ym. 2017, 2018, 2021; Gamperl ym. 2021; Hvas ym. 2020 Kolarevic ym. 2016, 2021; Korsøen ym. 2012; Muñoz ym. 2020; Ulvund ym. 2021). Lisäksi akustista telemetriaa voidaan hyödyntää kalan tilankäytön ja sijainnin arvioinnissa, mikäli vastaanottimia on käytössä useita, jolloin lähettimen sijaintia voidaan kolmiomitata (Hassan ym. 2019, Leclercq ym. 2018, Muñoz ym. 2020, Rillahan ym. 2009, 2011). Jos käytetään lyhyttä lähetysintervallia (<5–10 s), on sijainnin kautta lisäksi mahdollista arvioida esimerkiksi hetkellistä uintinopeutta. Kalojen uintinopeus on myös mahdollista johtaa kiihtyvyyden kautta, kunhan kohdeyksilön mitattu uintinopeus saadaan linkitettyä aktiivisuushavaintoihin. Tämä voidaan suorittaa esimerkiksi mittaamalla aktiivisuutta samalla, kun kala ui eri virtausnopeuksissa uintirespirometrissä (Arechavala-Lopez ym. 2021, Brownscombe ym. 2017, Carbonara ym. 2021, Zupa ym. 2021). Samalla voidaan mitata kalan hapenkulutusta. Kalatutkimuksessa käytetään lisäksi esimerkiksi johtokykyä (=suolapitoisuus) sekä magneettikentän vaihteluita mittaavia sensoreita, mutta näiden soveltaminen vesiviljelyyn ei ole saavuttanut laajaa suosiota.

Biosensorin paino suhteessa koe-eläimen painoon pyritään pitämään mahdollisimman pienenä, jotta sensori ei vaikuttaisi koe-eläimen normaaliin käyttäytymiseen. Niin kutsuttua 2 %-sääntöä on pitkään käytetty nyrkkisääntönä telemetriatutkimuksissa perusteluna sille, että biosensori ei ole vaikuttanut koe-eläimen normaaliin käyttäytymiseen. Säännön mukaan, biosensorin painon vedessä tulisi olla alle 1,25 % ja ilmassa alle 2 % kalan painosta (Winter 1996). 2 %-säännön mukaan esimerkiksi 500 g painoisen kalan sisälle voidaan asettaa maksimissaan 10 g painoinen sensori ilman merkittäviä vaikutuksia. Nyrkkisääntö on kuitenkin vain suuntaa antava, eikä sitä tule pitää totuutena tai yleistyksenä, joka soveltuu kaikkiin tilanteisiin.

Jepsen ym. (2005) sekä Macaulay ym. (2021) korostavatkin, että tällaisen karkean yleistyksen soveltaminen kaikkiin käyttäytymistutkimuksiin ei ole täysin yksiselitteistä. Biosensorin ja kalan painosuhteen lisäksi esimerkiksi sensorin tilavuus, sijoittaminen ja sensorin mittasuhteet vaikuttavat, kuten myös mahdollinen sensorissa oleva antenni ja sen materiaalit. Lisäksi tutkittava parametri ja tutkimusasetelma vaikuttavat. Suuren sensorin vaikutus voi olla hyvin erilainen, mikäli tutkitaan kalan pitkäaikaista vaelluskäyttäytymistä (useita viikkoja) tai nopeita kiihdytyksiä saalistuksen aikana. Vertauskuvana Jepsen ym. (2005) esittävät tilanteen, jossa 20 kg rinkan voidaan katsoa vaikuttavan suuresti pikajuoksijan suoritukseen, kun taas vastaavan painon vaikutus voi olla vähäistä pitkän vaellussuorituksen aikana.

Wright ym. (2019) huomasivat omassa kokeessaan, että sisäisen biosensorin aiheuttama lisäpaino vaikutti merkittävästi Atlantin lohen (Salmon salar) (ka±SD: 306±35 g; vaihteluväli: 245–395 g) neutraalin nosteen maksimisyvyyteen (engl. *maximum neutral buoyancy depth, MNBD*) eli syvyyteen, jota alempana kala alkaa vajota, sillä sen kokema noste tulee pienemmäksi kuin kalan paino. Tutkijat arvioivat, että biosensorin lisämassa laskee Atlantin lohen neutraalin nosteen rajaa 22 metristä vain 4 metriin, kun huomioitiin sekä biosensorin lisäpaino, että sen viemä

tila kalan ruumiinontelosta. Tutkimuksessa, biosensorin paino ilmassa (13 g) suhteessa kalan painoon oli 3,2–5,3 %.

Hvas ym. (2020) tutkivat sykkeenmittaussensoreiden (DST milli-HRT, paino 11,8 g) vaikutusta lohen hyvinvointiin. Tutkijat havaitsivat, että sensori, joka painoi vain noin 1 % kalan painosta vaikutti lohen kasvuun. 13 viikkoa kestäneessä kokeessa 12 kappaletta (~1200 g) Atlantin lohia merkittiin ruumiinonteloon sijoitettavalla kalan sykettä seuraavalla loggerilla. Vaikka operoidut kalat keräsivät painoa kokeen aikana, oli kokeen päätteeksi kontrolliryhmän kaloilla, joita ei ollut operoitu, huomattavasti suurempi paino, pituus ja kuntokerroin. Kalan sisälle asetetuilla biologgereilla voikin olla pitkäkestoisia heikentäviä vaikutuksia kalan kasvuun (Hvas ym., 2020). Samankaltaisia tuloksia ovat saaneet myös Warren-Myers ym. (2021), joiden tutkimuksessa 24 biosensorin (DST centi-HRT, paino 19 g) varustettua lohta (3.6 ± 0.8 kg; keskiarvo \pm SD) olivat 5 kuukauden kasvatuskokeen päätteeksi arviolta 20 % kevyempiä ja 8 % lyhyempiä kuin ilman biosensoria varustetut verrokkikalat. Tutkimuksessa sensorin ja kalan painosuhte oli vain 0,5 %, mikä alleviivaa tarvetta varovaisuuteen, kun arvioidaan biosensorin vaikutusta kalan hyvinvointiin ja käyttöön.

Tutkijat suosittelivat, että telemetriatutkimuksessa arvioitaisiin aina tapauskohtaisesti biosensorin vaikutusta kalan käyttöön ja huomioitaisiin sekä kyseessä oleva laji, mitattavat suureet, aiempi tutkimus ja -kirjallisuus sekä koeasetelma (Jepsen ym. 2016; Wright ym. 2019; Macaulay ym. 2020, 2021).

2.2. Biosensorit kalankasvatuksen käyttäytymistutkimuksessa

2.2.1. Syvyys- ja lämpötilasensorit

Syvyys ja lämpötilasensoreita on käytetty kalankasvatuksen tutkimuksissa mm. selvittämään kalan uintisyvyyttä sekä sen vuorokausirytmiiä tai eri käsittelyiden vaikutusta uintisyvyyteen. Lisäksi tutkijat ovat selvittäneet millä tavoin esimerkiksi äkilliset lämpötilan vaihtelut vaikuttavat kalan käyttöön tai ylipäättään saadaksesen tarkkaa tietoa vesipatsaan lämpötilasta tutkimusjakson aikana ja verratakseen tätä tietoa toisiin muuttujiin.

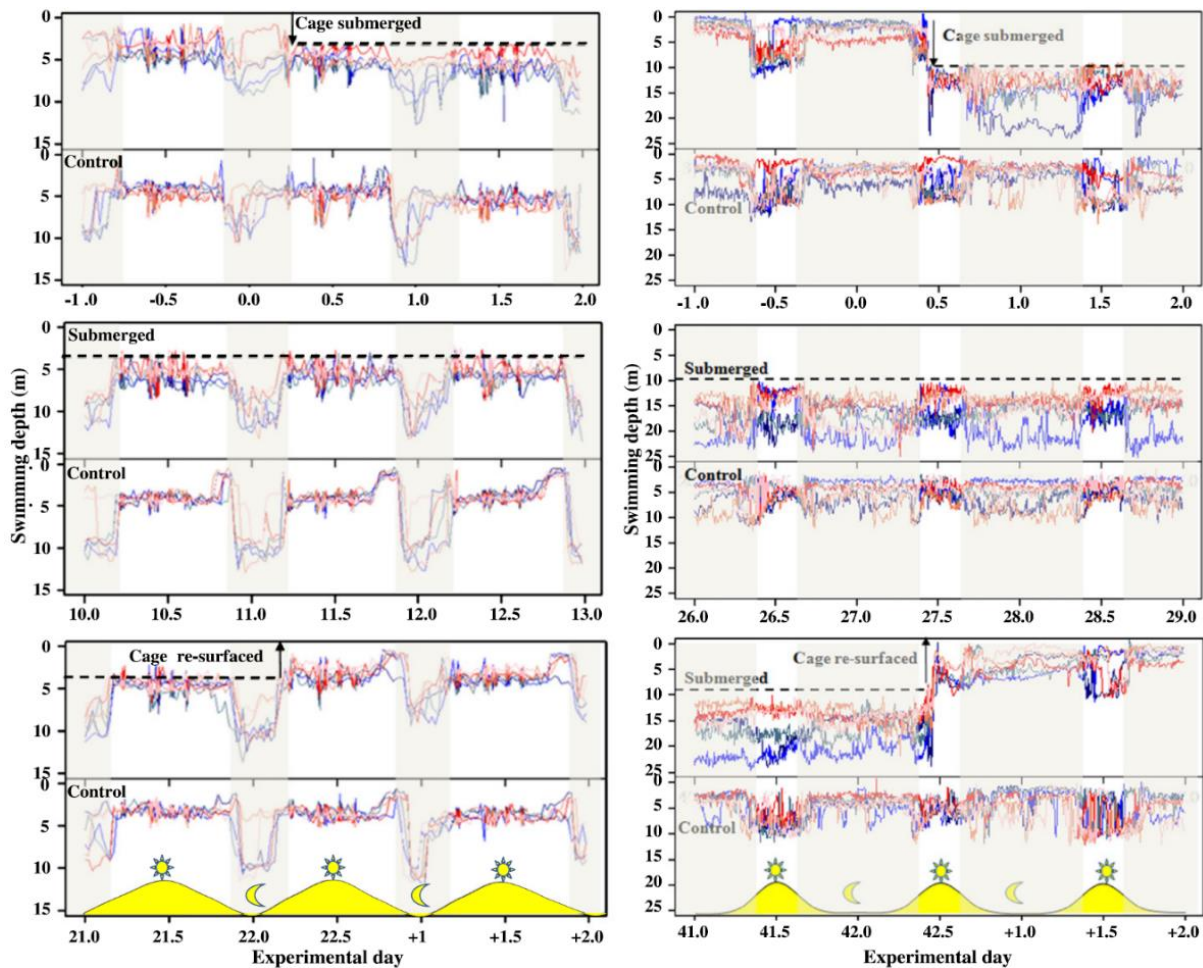
Korsøen ym. (2012) käyttivät painetta ja lämpötilaa kerääviä biologgereita (Star-Oddi DST micro-TD; halkaisija 8 mm; pituus 26 mm; paino ilmassa* 3,3 g) selvittääkseen kalaviljelyaltaan upotuksen ja keinotekoisien valaistuksen vaikutuksia Atlantin lohen vuorokausirytmiiin, uintisyvyyteen ja kasvuun. Kahden kokeen aikana yhteensä 68 lohen uintisyvyyttiedot analysoitiin kalojen ruumiinonteloon asetetun biosensorin avulla. Sensorit mittasivat kalan syvyyttä 1–30 minuutin intervalleissa riippuen vuorokaudenajasta. Kokeissa oli kaksi eri koeasetelmaa, joita verrattiin perinteisesti kasvatettuihin kontrolliryhmiin. Koeasetelmat olivat:

- i. Upotus 4 m; 24 h lisävalaistus; kesto 22 vrk huhti-toukokuu; keskipaino 0,4–0,5 kg.
- ii. Upotus 10 m; ei lisävalaistusta; kesto 42 vrk marras-tammikuu; keskipaino 3,8–3,9 kg.

*sensorin painoa ei ole ilmoitettu alkuperäisessä lähteessä vaan haettu (4.2.2022) valmistajan sivuilta.

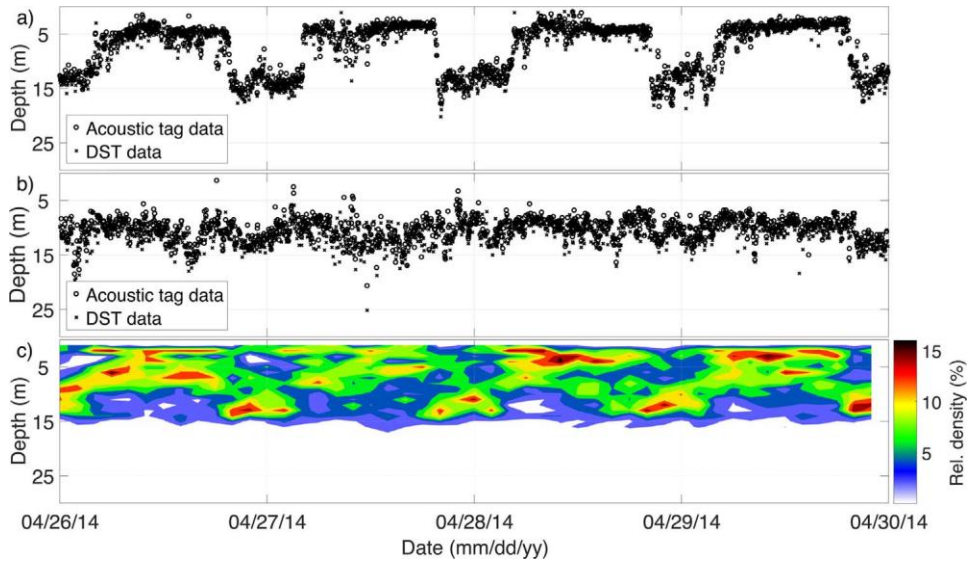
<https://www.star-oddi.com/products/data-loggers/small-archival-tag-fish-depth-temperature-micro>.

Tutkimuksen koeasetelmien välillä oli varsin monta muuttujaa eikä kahden koeasetelman välisille eroille voitu rakentaa selvää yhteyttä. Tutkijat vetivät kuitenkin johtopäätöksen, että lyhytkestoinen ja matala upotus jatkuvatoimisella valolla ei vaaranna kalojen hyvinvointia. Biosensoreiden avulla tutkijat pystyivät havaitsemaan, että lohella on uintisyvydessä ja tilankäytössä yksilöllistä vaihtelua ja uintikäytöksessä on havaittavissa selkeä vuorokausirytmä (Kuva 2).

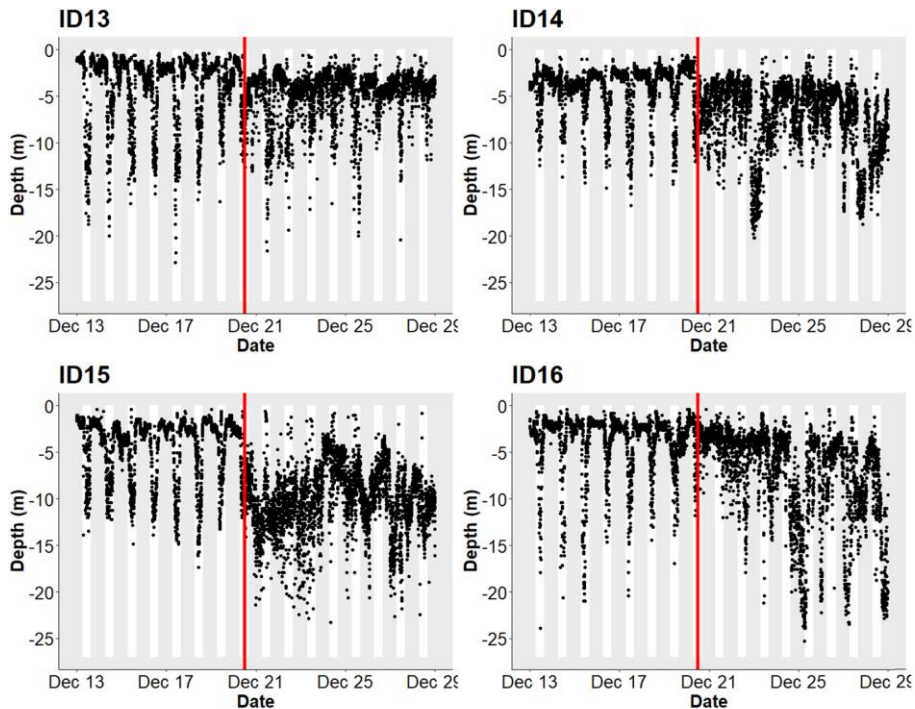


Kuva 2. Atlantin lohien uintisyvyyden vaihtelu Korsøen ym. (2012) käyttäytymistutkimuksessa. Valkoinen taustaväri kuvaa vuorokauden valoisaa ja harmaa taustaväri pimeää ajanjaksoa.

Føre ym. (2017) sekä Ulvund ym. (2021) rekisteröivät biosensoreilla (Føre ym. (2017): Thelma Biotel ADT-MP13 sekä Star-Oddi DST micro-TD | Ulvund ym. (2021): Thelma Biotel ADT-MP9) lohella selkeää vuorokausirytmä, jossa oli havaittavissa myös yksilöiden välistä vaihtelua. Osalla kaloista uintisyvyyden vaihtelu noudatti selkeää rytmiä, kun taas muutamalla tutkimuskalalla uintisyvyys saattoi pysyä saman aikajakson aikana hyvinkin tasaisena (Kuva 3). Ulvund ym. (2021) havaitsivat, että uintisyvyys ja uintikäytöksen vuorokausirytmä noudattivat luonnollista valojaksoa sekä ruokinta-aikoja ja että Korsøen ym. (2012) havaintojen tapaan, uintikäyttäytymistä voidaan manipuloida keinotekoisella valaistuksella (Kuva 4).

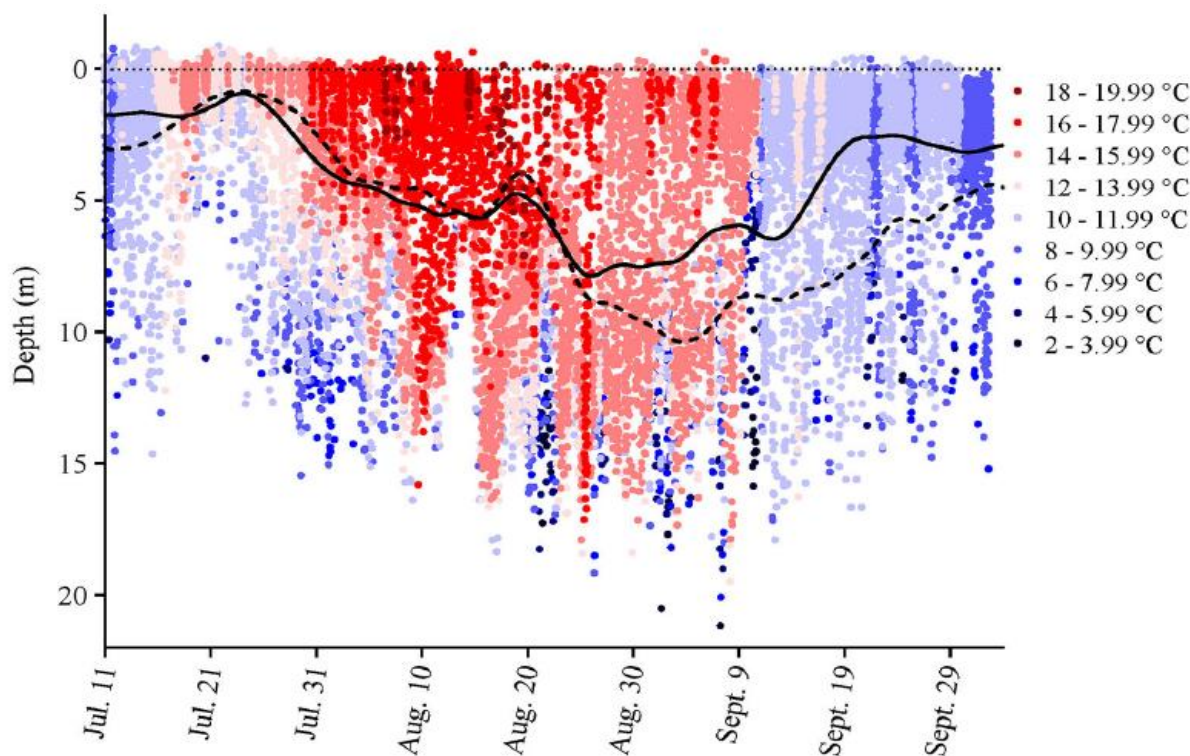


Kuva 3. a) ja b) kahden eri lohien syvyyshavainnot sekä c) syvyysjakauma 15:stä yksilöstä.



Kuva 4. Neljän eri lohien syvyyshavainnot verkkoaltaan sisällä. Valkoinen taustaväri kuvaa vuorokauden valoisaa ja harmaa taustaväri pimeää ajanjaksoa. Punainen pystyviiva kuvaa keinotekoisesti vedenalaisen valon päälle laittoa (muokattu lähteestä: Ulvund ym. 2021).

Biosensoreilla on mahdollista saada myös syvyyskohtaista lämpötilatietoa, jonka avulla voidaan luoda hyvinkin tarkka kuva tutkimuksen aikaisista olosuhteista sekä tehdä johtopäätöksiä olosuhteiden vaikutuksista kalan käyttökseen. Gamperl ym. (2021) tutkivat biologgereilla (Star-Oddi milli-HRT ACT ja Milli-TD) lohien käyttäytymistä Kanadan Newfoundlandissa kesä- ja alkusyksyn aikana. Kesän 2019 aikana Newfoundlandissa mitattiin poikkeuksellisen korkeita meriveden lämpötiloja, jotka saatiin taltioitua biosensoritutkimuksen yhteydessä. Tutkijat havaitsivat, että ympäröivän veden lämmitessä lohi alkoi hakeutua niin päivä- kuin yöaikaan syvempiin vesikerroksiin ja meriveden viilennettyä syysmyrskyjen myötä, uinti palautui lähemmäs pintaa (Kuva 5).

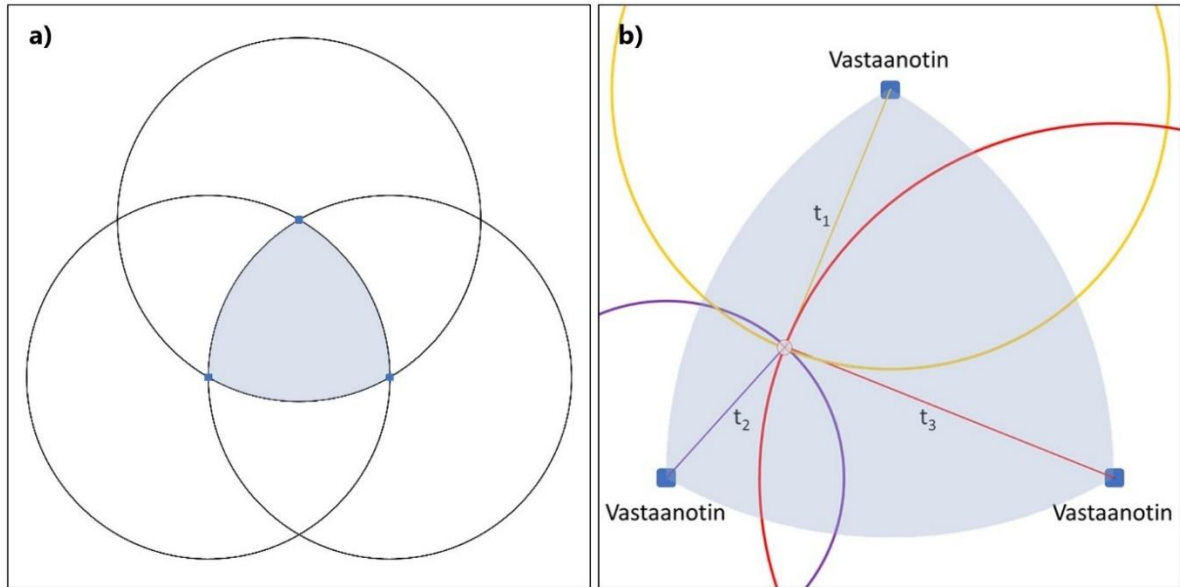


Kuva 5. Biosensoreilla mitattuja syvyyskohtaisia lämpötilatietoja Newfoundlandissa, Kanadassa. Ehyt musta viiva kuvaa kalojen keskisyvyyttä päivän aikana ja katkoviiva kuvaa kalojen keskisyvyyttä yöaikana (Gamperl ym., 2021).

Loggereiden ja lähettimien resoluutiossa ja mittatarkkuudessa ei ole merkittäviä eroja. Biosensoreiden resoluutioon vaikuttaa lähinnä mitattavan muuttujan mittaussväli ja havainnon tallennuksen koodaustapa. Føre ym. (2017) vertasivat lähettimen (Thelma Biotel ADT-MP-13; halkaisija 13 mm; pituus 42 mm; paino vedessä 6,9 g) ja loggerin (Star-Oddi DST micro-TD; halkaisija 8,3 mm; pituus 25,4 mm; paino vedessä 1,9 g) havaintojen eroja sekä telemetriajärjestelmän soveltuvuutta kalojen havainnointiin kaupallisen mittakaavan kalankasvatusaltaassa. Molempien biosensoreiden resoluutio (lähetin 0,2 m; loggeri 0,12 m) sekä mittatarkkuus (lähetin 0,5–1 m; loggeri 0,75 m) olivat hyvin lähellä toisiaan ja keskinäisten havaintojen poikkeama (0,12–0,7 m) oli pienempi kuin sensoreiden mittatarkkuus.

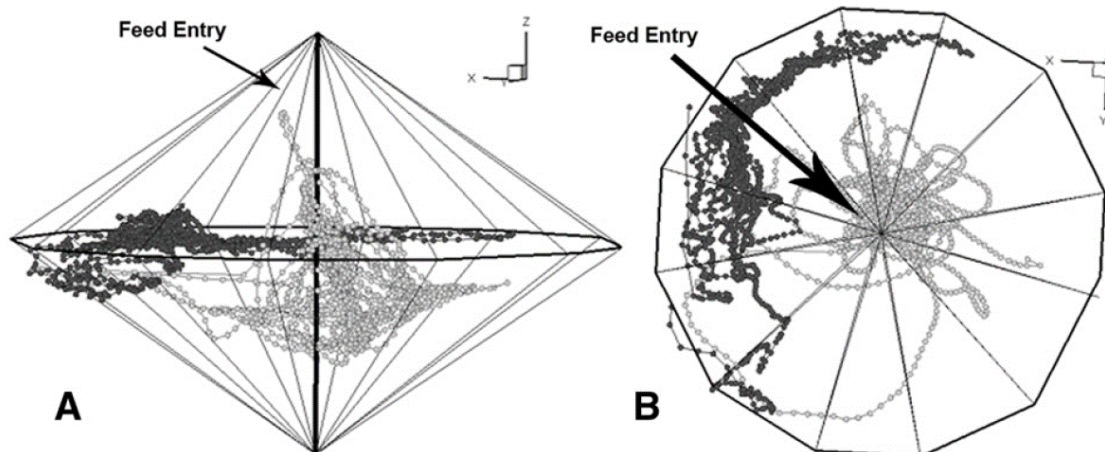
2.2.2. Tilankäyttö (3D-paikannus)

Telemetriajärjestelmää, jossa on vähintään kolme vastaanotinta, voidaan käyttää kalojen sijainnin 2D- ja 3D-paikannukseen. Sijainnin arvioiminen perustuu kolmiomittaukseen. Kolmiomittauksessa, arvioidaan lähettimen sijaintia suhteessa vastaanottiin. Lähettimen sijainti laskeaan hyödyntämällä eri vastaanottimien rekisteröimän saman signaalin saapumisaikojen eroja. Kun lähetin lähettää signaalin, rekisteröivät eri vastaanottimet tämän signaalin hieman eri aikoihin. Kun tiedetään äänen nopeus väliaineessa (=vedessä), voidaan saapumisaikojen erojen avulla arvioida alkuperäisen signaalin sijainti (Kuva 6). Toimiakseen, kolmiomittaus edellyttää vastaanottimilta erittäin hyvää aikaresoluutiota (≤ 1 ms), sillä lähettimen lähettämä signaali kulkee vastaanottimille äänen nopeudella, eli vedessä noin 1400–1500 m/s.



Kuva 6. Havainnekuva kolmiomittauksen periaatteesta. a) Vastaanottimien (■) kuuluvuusalue (musta ympyrä) rajaa mittatarkkuuden kannalta parhaan alueen (harmaa). b) t_1 , t_2 ja t_3 kuvaavat aikaa/matkaa, joka signaalilta kuluu lähettimeltä (⊗) vastaanottimelle.

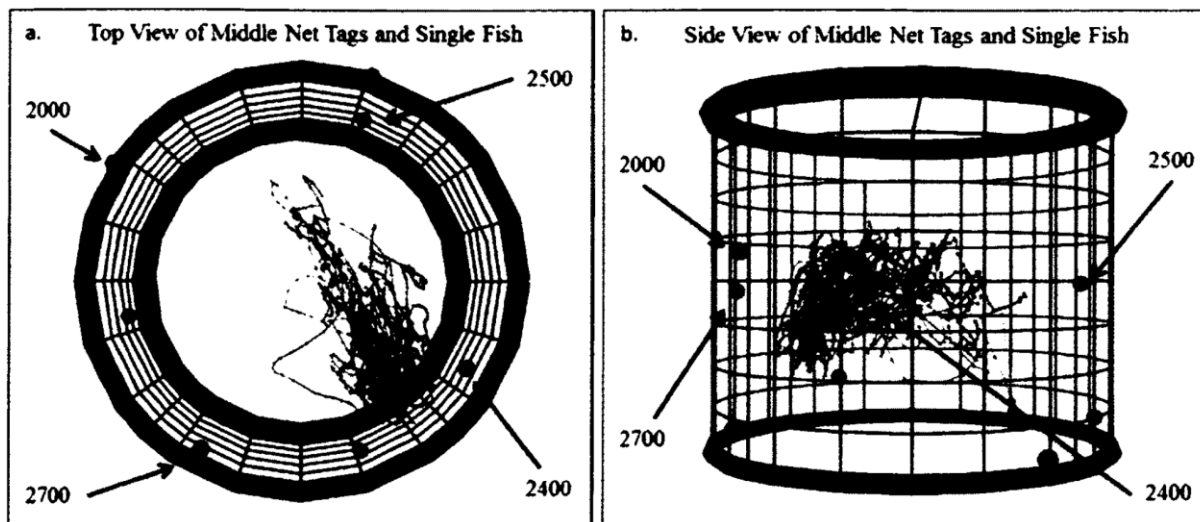
Rillahan ym. (2009) tutkivat turskien käyttäytymistä upotettavassa kalankasvatuslaitoksessa. Kalojen seuranta perustui HTI:n (vuodesta 2016 Hti-Vemco ja nykyinen Innovasea) akustiseen *Model 291 Portable Acoustic Tracking System* -järjestelmään, jossa kaloja seurattiin niiden ruumiinonteloon asetetun sensorien avulla. Järjestelmän neljä hydrofonia oli asennettu ympäri upotettavaa kalankasvatuslaitosta ja hydrofoneilta tieto välittyi kaapeleita pitkin tietokoneelle, joka sijaitsi pinnalla kelluvassa poijussa sijoitetussa vesitiiviissä rasiassa. Järjestelmä hyödynsi tavallista akustista meriympäristön paikannusjärjestelmää korkeampaa taajuutta (307,2 kHz), jonka avulla saavutettiin noin 10 cm kolmiulotteinen resoluutio. Kokeessa kalojen sijainnin mitausjakso vaihteli 10–30 päivään, mikä oli kokeessa käytettyjen HTI F-tag ja G-tag lähettimien akunkesto. Pingerit lähettivät yksilöllisen signaalin 1,7–3,3 sekunnin intervaleissa. Data käsiteltiin kahdella ohjelmistolla MarkTag (Version 4.0) sekä AcousticTag (Version 4.0), jotta mittaukset saatiin muutettua aikaleimatuiksi x,y,z -koordinaateiksi. Koeasetelman 22 akustisilla sensoreilla merkityistä turskista saatiin yksilökohtaista tietoa, josta kävi ilmi niiden liikkuminen kalankasvatusaltaan sisällä (Kuva 7).



Kuva 7. Kahden turskan kolmiulotteinen liikkuminen upotettavassa kalankasvatusaltaassa (A) kuvattuna sivusta ja (B) päältä (Rillahan ym., 2009).

Chambers (2013) tutki vuorovesivirtauksen ja verkkoaltaan muodonmuutoksen vaikutuksia kirjolohen liikkumiseen verkkoaltaassa. Tutkimuksessa kahdeksan kirjolohen ruumiinonteloon asetettiin HTI:n Model 795Z pingerit, joita seurattiin ympäri verkkoaltaasta asennetuin hydrofonein. Ennen kalojen ruumiinonteloon asettamista, jokainen pingeri ohjelmoitiin lähettämään signaalia, jonka lähetysväli vaihteli 1100–1800 ms välillä. Chambers (2013) otti lisäksi erillisen 9 kalan otoksen, jota tutkittiin kontrolliolosuhteissa ja joista selvitettiin operaation vaikutuksia kalan kasvuun ja kuolleisuuteen. Kolmeen kalaan asetettiin pingeri samalla tavalla kuin koeseitelman kaloihin, kolmeen asetettiin pingeri, joka ei lähettänyt signaalia ja kolmelle kalalle ei tehty operaatiota. Yhden kuukauden havaintojakson aikana leikkausoperaation ei havaittu vaikuttavan kalojen kasvuun tai kuolleisuuteen.

Chambersin (2013) keräämä aineisto käsiteltiin kahdella eri ohjelmistolla. Ensiksi Python Visual Studio 2.0 Alpha:lla rakennettiin rautalankamalli verkkoaltaan eri virtausoloissa. Nämä mallit vietiin tämän jälkeen TecPlot (Version 10) -ohjelmaan, jossa kalojen reitit asetettiin rautalankamallin päälle, jotta voitiin havainnoida kalojen liikettä verkkoaltaan sisällä (Kuva 8)



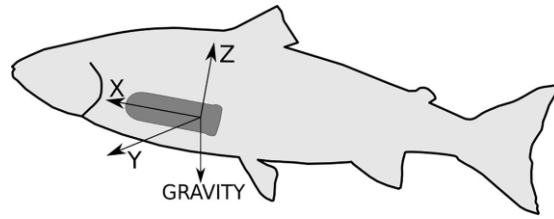
Kuva 8. Arvio turskan kolmiulotteisesta sijainnista verkkoaltaassa (muokattu lähteestä Chambers, 2013).

Chambers (2013) toi ilmi myös akustisen koejärjestelmän rajoituksia ja puutteita. Ensinnäkin hän keräsi valtavan määrän dataa neljän viikon kokeen aikana, mutta kaikkea dataa ei voitu käyttää. Tämä johtui siitä, että jotkin kokeen 20 lähettimestä lähettivät ajoittain signaalin samanaikaisesti toisen lähettimen kanssa, jolloin järjestelmä ei tunnistanut mikä yksilöllinen pingeri oli signaalin lähettänyt. Toiseksikin, koemittakaavan verkkoallas oli hyvin pieni ja hydrofonien lähekkäinen sijoittelu teki kolmiomittauksesta hankalampaa. Kun hydrofonit ovat hyvin lähellä, saapuu pingerien lähettämä signaali hyvin nopeasti hydrofoneille ja erot signaalin havaitsemisten välillä ovat hyvin pieniä, mikä huonontaa järjestelmän resoluutiota. Lisäksi telineet joihin hydrofonit olivat kiinnitettynä, värähtelivät kovassa virtauksessa mitä pahensi niihin kertynyt merilevä.

2.2.3. Aktiivisuus

Kalojen aktiivisuutta mitataan pääasiassa kolmiakselisilla kiihtyvyyssantureilla (engl. *triaxial accelerometer*), jotka nimensä mukaisesti mittaavat kiihtyvyyttä x-, y- ja z-suuntaan (Kuva 9). Sensoreista puhutaan yleisesti nimellä aktiivisuussensori tai kiihtyvyyssensori. Sensorityypistä

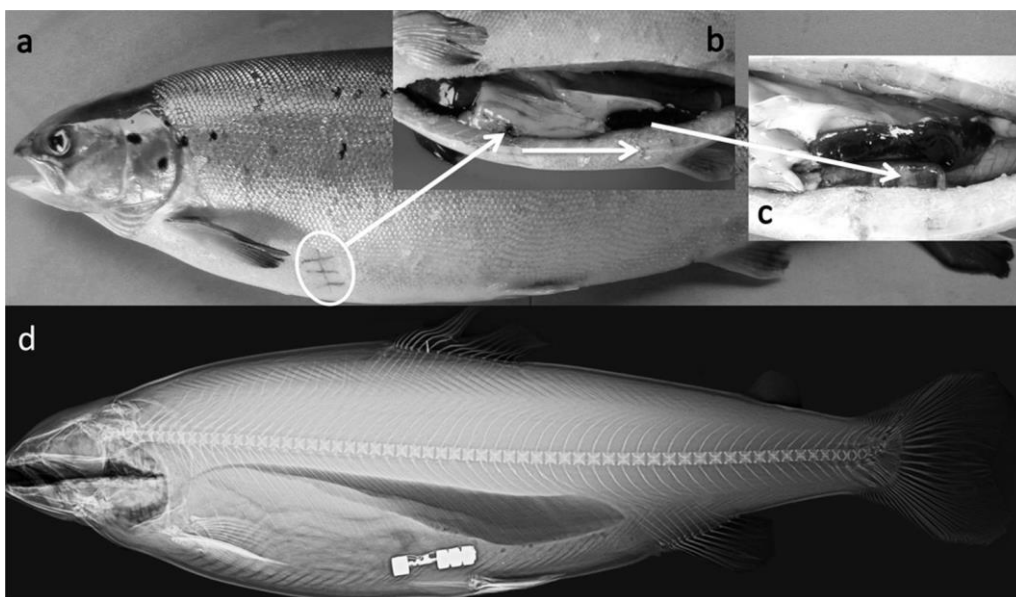
riippuen, aktiivisuussensori voi tallentaa/lähetää kiihtyvyyksvektorien pituudet akselikohtaisesti tai niiden resultanttivektorista. Tietyn tyyppisillä kiihtyvyyssantureilla voidaan mitata myös esimerkiksi pyrstön lyöntifrekvenssiä (engl. *tail-beat frequency*) (Macaulay ym., 2021).



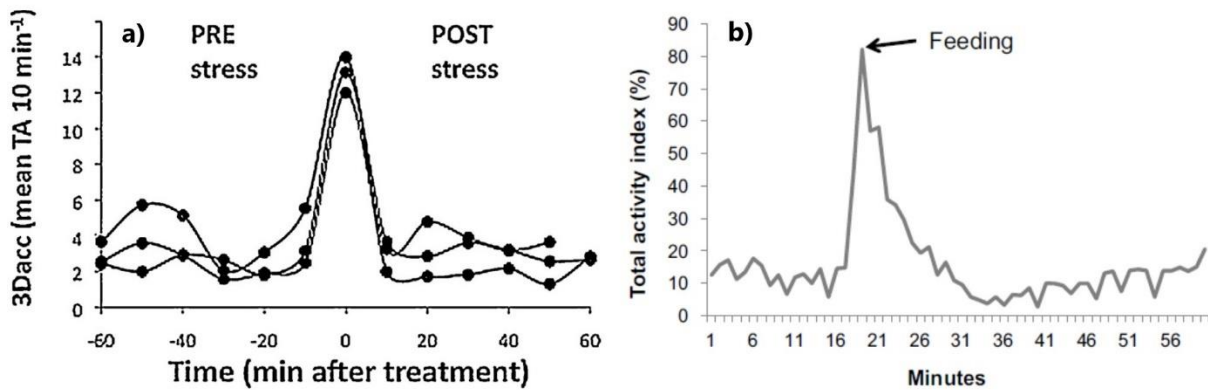
Kuva 9. Havainnekuva kolmiakselisen kiihtyvyyssanturin kiihtyvyyksvektorien suunnista (Svendsen ym. 2021).

Kalojen käyttäytymistä on tutkittu aktiivisuussensoreilla tilanteissa, joissa kala altistuu normaalia poikkeavaan tilanteeseen. Tällaisia ovat esimerkiksi merikasvatuksen täikäsittely, kiertovesilaitoksessa kasvatusaltaan tyhjentyminen tai biosensorin leikkausoperaatio ja siitä toipuminen (Føre ym. 2018 ja 2021, Svendsen ym. 2021). Sensoreita on hyödynnetty myös mm. kiertovesikasvatuksessa, jotta saataisiin kokonaisvaltaisempi kuva, miten eri kiertovesilaitoksen muuttujat vaikuttavat kalan käytökseen ja hyvinvointiin.

Kolarevic ym. (2016) operoivat kiihtyvyyssanturin (Thelma Biotel AccelTag; halkaisija 9 mm; pituus 39 mm; paino ilmassa 6,25 g) 12:sta lohi post-smoltin ruumiinonteloon (Kuva 10) tutkiaseen kalojen käytöstä kiertovesiympäristössä. Kokeen aluksi kalat laitettiin toipumaan leikkauksesta altaisiin, joiden veden viipymä oli 29 minuuttia ja happisaturaatio 85–90 %O₂. Toipumisjakson jälkeen vesiparametreja muutettiin 4 päivän ajaksi pienentämällä tai lisäämällä sekä happisaturaatiota (60 %O₂ / 170 %O₂) että veden viipymää (23 min / 58 min). Kokeen aikana tutkijat arvioivat lisäksi ruokinnan sekä haavimisen vaikutusta kalan aktiivisuuteen. Kokeessa sekä hapen yli- (=hyperoksia) että alisaturaatio (=hypoksia) alensivat kalojen aktiivisuutta, kun taas muutokset viipymässä lisäsivät aktiivisuutta. Odotetusti haaviminen ja ruokinta lisäsivät kalojen aktiivisuutta merkittävästi (Kuva 11).



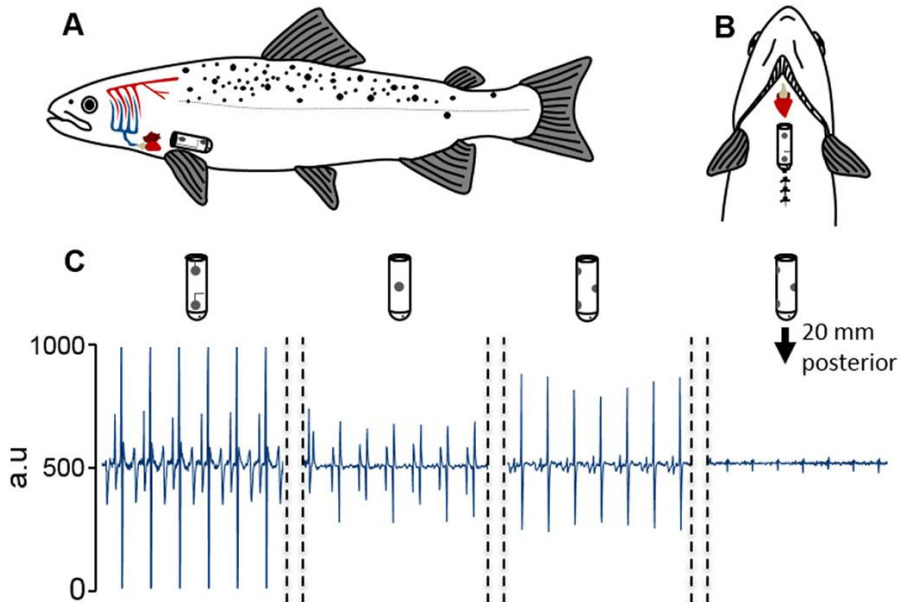
Kuva 10. Kiihtyvyyssensorin leikkauskohta lohella (a), sensorin sijainti ruumiinontelossa (b, c) sekä röntgenkuva koekalasta (d) (Kolarevic ym., 2016).



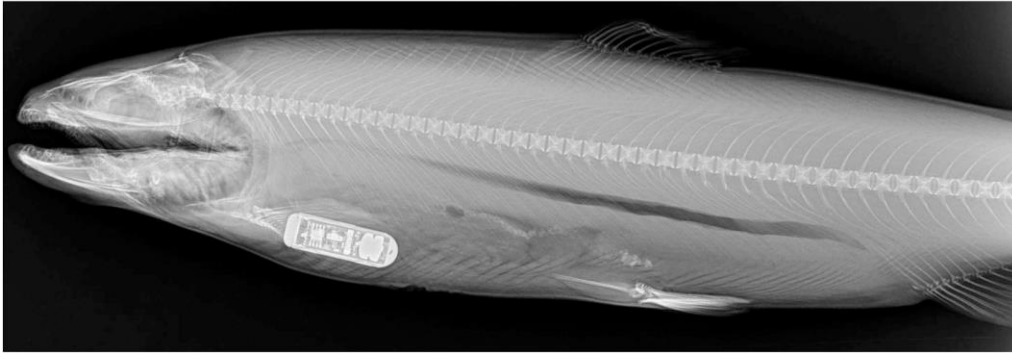
Kuva 11. a) Haavimisen ja b) ruokinnan vaikutus kirjolohen aktiivisuuteen (muokattu lähteestä: Kolarevic ym., 2016).

2.2.4. Syke

Aktiivisuussensoreiden tavoin, sykesensoreilla on tutkittu eri kalankasvatustoimintojen ja stressitilanteiden vaikutusta kalan hyvinvointiin sekä leikkausoperaatiosta toipumiseen (Brijs ym. 2018, 2019, Føre ym. 2021, Hvas ym. 2020, Svendsen ym. 2021). Kuten muitakin biosensorytyyppejä, sykesensoreita on sekä biologgereina että lähettiminä. Sykesensorin asentamisessa tulee kiinnittää erityistä huomiota, sillä sensorin sijainti ja asento kalan ruumiinontelossa vaikuttavat huomattavasti mitattavan EKG-signaalin voimakkuuteen (Kuva 12). Muista sensorityypeistä poiketen, sykesensori asetetaan lähelle kalan sydäntä, kun taas muut ruumiinonteloon laitettavat sensorit asemoidaan lähemmäksi kalan vatsaevä, jossa on enemmän tilaa (vertaa Kuva 10 ja Kuva 13). Sensorin väärä asento tai sijainti liian kaukana sydäimestä heikentävät EKG-signaalia merkittävästi (Kuva 12C).



Kuva 12. Havainnekuva (A, B) sykesensorin asemoinnista kirjolohen ruumiinonteloon suhteessa sydämen sijaintiin sekä (C) sykesensorin asennon vaikutus EKG-signaalin voimakkuuteen (Brijs ym., 2018).



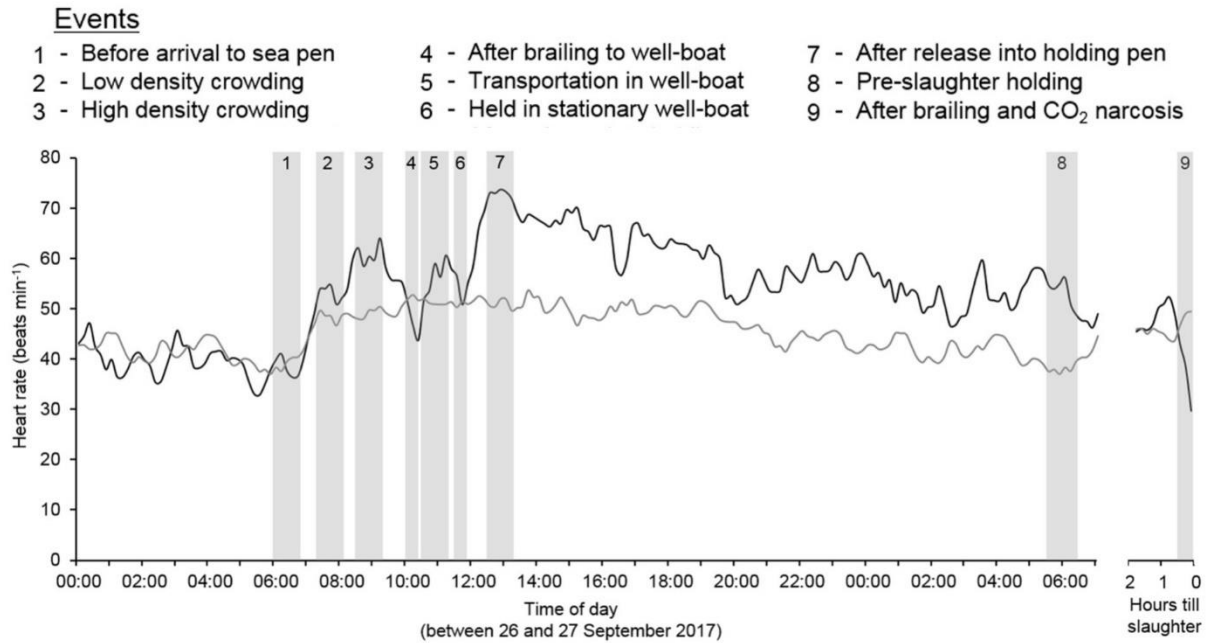
Kuva 13. Röntgenkuva sykesensorin sijainnista lohella (Hvas ym. 2020).

Kiinnostus kalojen hyvinvointiin on lisännyt sykesensoreiden hyödyntämistä tutkimuksessa. Sykesensoreiden avulla on pystytty havaitsemaan, että esimerkiksi lohella sykkeen palautuminen merkittävää stressisignaalia edeltävälle tasolle vie aikaa noin 24 tuntia (Hvas ym. 2020; Svendsen ym. 2021). Tutkimukset myös osoittavat, että kalan palautuminen leikkauksolektion jälkeen voi viedä useista päivistä muutamaan viikkoon, mikä on hyvä huomioida kokeita suunniteltaessa.

Hvas ym. (2020) havaitsivat, että lohella leposykkeet olivat korkealla välittömästi leikkauksolektion jälkeen. Sykkeet laskivat 2–3 viikon ajan, minkä jälkeen leposyke stabiloitui. Føre ym. (2021) havaitsivat lohella sykkeiden pysyvän korkealla heti leikkauksen jälkeen ja että syke normalisoitui 4–6 vuorokauden aikana. Kirjoloheella sykkeen ja sykkeessä havaittavan vuorokausirytmin stabiloitumisen on havaittu vievän aikaa noin 4 vuorokautta (Brijs ym. 2018).

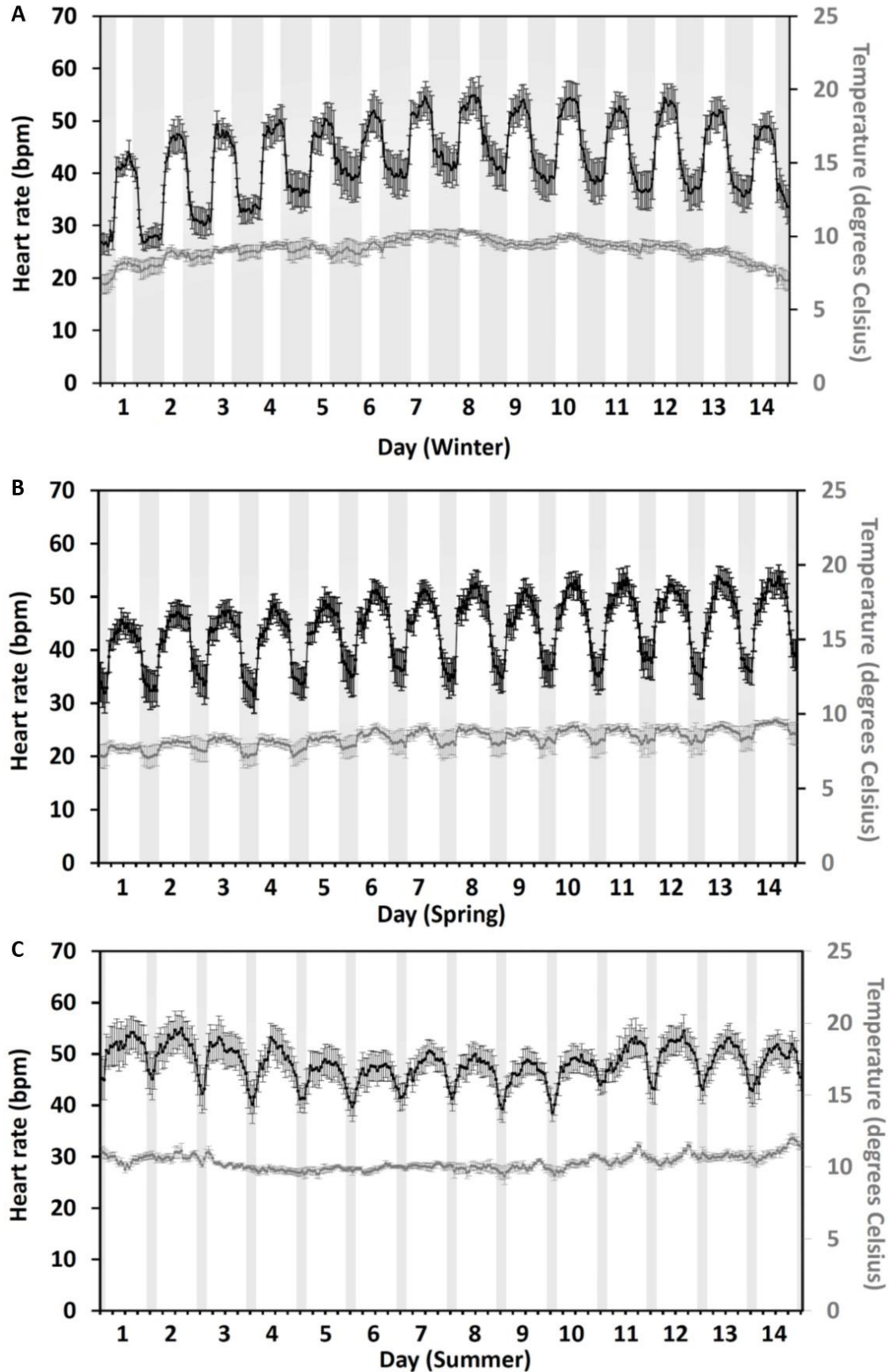
Tietyt kalankasvatustoiminnot, esimerkiksi kalojen ahdistaminen ja kuljettaminen, aiheuttaa kaloille stressiä. Tämä on pystytty todentamaan tutkimuksella, jossa seurattiin kirjolohien sykkeitä sekä veren kortisolipitoisuutta merikasvatuksen yhteydessä (Brijs ym. 2018). Tutkijat saivat yhteyden kohonneen kortisolipitoisuuden ja sykkeen välille, joten sykettä voidaan pitää kirjoloheella yhtenä hyvinvointi-indikaattorina kalan stressiä arvioitaessa, tiettyjä tilanteita lukuun ottamatta.

Sykesensoreilla on huomattu, että kalojen syke voi pysyä normaalia korkeammalla tasolla tavallisen kalankasvatustoiminnan aiheuttaman stressivasteen jälkeisenä päivänä (Brijs ym. 2018). Peräkkäisillä stressisignaaleilla on kumulatiivinen pitkäkestoinen vaikutus kalan sykkeeseen ja plasman kortisolitasoon (Kuva 14). Tästä syystä Brijs ym. (2018) suosittelevat, että mikäli kaloja altistetaan useille stressitekijöille, näille annetaan riittävä palautumisaika ennen seuraavaa stressitekijää.



Kuva 14. Eri kalankasvatustoimintojen vaikutus kirjolohen sykkeeseen. Sykkeen tuntikohtainen liukuva keskiarvo kaksi vuorokautta ennen teurastusta (musta viiva) verrattuna ”normaaliin” vuorokausittaiseen sykkeeseen (harmaa viiva) (muokattu: Brijs ym. 2018).

Uintsivyyden vuorokausirytmien lisäksi myös lohikaloiden sykkeessä on havaittu vuorokausikohtaista vaihtelua, mikä on vahvasti sidoksissa luonnolliseen valo- ja hämäräjaksoon ja siten myös vuodenaikoihin. Biosensoreiden (Star-Oddi DST centi-HRT, halkaisija 15 mm; pituus 46 mm; paino ilmassa 19 g; paino vedessä 12 g) avulla Warren-Myers ym. (2021) tutkivat lohien sykkeen vaihteluita eri vuodenaikoina. Tutkijoiden aineisto osoittaa, että lohien syke seuraa luonnollista valo- ja hämäräjaksoa siten että syke on alempana yöllä (keskisyke talvella 39 lyöntiä minuutissa (bpm), keväällä 37 bpm, kesällä 43 bpm) kuin päivällä (talvella 50 bpm, keväällä 48 bpm, kesällä 49 bpm) (Kuva 15).



Kuva 15. Tuntikohtainen keskiarvo 17 lohen sykkeestä (musta viiva) ja lämpötilasta (harmaa viiva) 14 vuorokauden ajalta (A) talvella, (B) keväällä ja (C) kesällä. Kuvaajan taustan harmaat alueet kuvaavat vuorokauden porvarillista hämärää (Warren-Myers ym. 2021).

2.2.5. Muita sensoreita

Tutkijat ja valmistajat kehittävät yhä uudenlaisia sensoreita eri parametrien mittaamiseksi, mistä hyvänä esimerkkinä on kalan kiduskanteen asennettava aktiivisuutta ja hengitystiheyttä mittaava sensori (Kuva 16). Kalojen uintikulmaa on perinteisesti mitattu videokuvasta otetuista pysäytyskuvista. Markkinoilla on kuitenkin olemassa kallistusta/kulmaa (engl. *tilt*) mittaavia biosensoreita, joita on tosin käytetty kalatutkimuksessa vielä rajallisesti. Chambers (2013) käytti kirjolohella kalan ulkopintaan asetettavia kallistussensoreita selvittääkseen uintikulman muutosta kalankasvatusaltaan upotuksen aikana. Merkit eivät kuitenkaan pysyneet kaloissa luotettavasti, joten tutkija joutui hylkäämään sensoreilla saadut mittaukset.



Kuva 16. Kalan kiduskanteen asennettava aktiivisuutta ja hengitystiheyttä mittaava AEFishBIT biosensori. Kuvissa esitetty kaksi erityyppistä kiinnitystapaa (A,B) ja (C,D) (Kolarevic ym. 2021).

3. Telemetriajärjestelmä Korran laitoksella

3.1. Merialueen tutkimusympäristö

Kirjolohen käyttäytymisen havainnointi telemetriajärjestelmän avulla on toteutettu Luken hankkimalla ja omistamalla upotettavalla kalankasvatuslaitoksella. Kalojen kasvatuksesta ja hoidosta on vastannut Lännenpuolen Lohi Oy. Kasvatuspaikka sijaitsee Saaristomerellä, Kihdin selän pohjoispuolella Korran saaren eteläpuolella. Laitoksen keskipisteen koordinaatit (ETRS-TM35FIN) ovat I:179331; P:6729004. Kalanviljelylaitokseen viitataan jatkossa nimellä Korran laitos.



Kuva 17. Korran upotettava kalankasvatuslaitos.

Korran laitokselle hankittiin vuoden 2021 aikana telemetriajärjestelmä, jonka avulla on havainnointu tutkimusaseman vesipatsaan lämpötilaa, verkkoaltaan liikettä sekä kirjolohien käyttäytymistä. Hankinnan lähtökohtana on ollut selvittää telemetriajärjestelmän potentiaali vesiviljelytutkimuksessa sekä havainnoida ja kuvata kalan käyttäytymisen niin sanottu ”perustaso”, jota vasten eri ympäristömuuttujia voidaan jatkossa verrata.

Korran laitos on Badinotti Groupin toimittama upotettava Oceanis 2 -mallin tuotantomittakaavan kalankasvatuslaitos. Kauempaa katsottuna Korran laitos vaikuttaa tavalliselta verkkoallaslaitokselta ja suurimman osan kasvukaudesta laitos on pinnan yläpuolella. Laitos voidaan kuitenkin upottaa (usean metrin syvyyteen) ympäristöolojen muuttuessa epäsuotuisiksi (esim. kova tuuli, aallokko tai jääkansi/ajo-/ahtojäät). Laitoksen upottaminen ja pintaan nostaminen perustuu verkkokassin alapuolelle viritettyyn ilmalla täytettävään sukelluskelloon. Laitosta nostettaessa sukelluskello täytetään paineilmakompressorin avulla ilmalla, jolloin sukelluskellon noste kasvaa ja laitos nousee pintaan. Vastaavasti laitosta upotettaessa sukelluskello tyhjenetään ilmasta, jolloin sukelluskellon noste pienenee ja laitos uppoaa pinnan alle.

Korran laitoksen kehikot ovat HDPE polyeteeniä. Yläkehikon (engl. *floating collar*) ulkohalkaisija on noin 28 m ja alakehän (engl. *sinker tube*) halkaisija on noin 21 m. Yläkehikko koostuu kahdesta 315 mm PE-putkesta ja käsikaiteesta, jotka on yhdistetty yhtenäiseksi kokonaisuudeksi tukikannakkeiden/yhdyskappaleiden (engl. *brackets*) avulla. Alakehä koostuu kolmesta putkesta, joista alimman sisällä kulkee lisäpainona teräskettinki. Verkkokassi (solmuväli 20 mm) on vedenpinnan tasolla halkaisijaltaan 25 m (ympärysmitta 78,5 m) ja 14 metrin syvyydessä 17 m

(ympärysmitta 53,4 m). Verkkokassin pohja on muodoltaan 5 metriä korkea kartio. Verkkoaltaan tilavuus on 5250 m³.

Verkkoaltaan yläkehikko on kiinnitetty kahdeksasta pisteestä ankkurointikehän (engl. *mooring grid*) neljään kulmaan harusköysillä (engl. *bridle rope*). Jokaisesta ankkurointikehän kulmasta lähtee köydet kolmeen eri betoniankkuriin.

Korran laitoksella on ollut Etelä-Suomen aluehallintoviraston (ESAVI) myöntämä lupa harjoittaa koeluonteista toimintaa ajanjaksolla 1.7.2019–30.5.2022. Ensimmäinen toimintajakso (1.7.2019–30.4.2020) koskee ainoastaan rakenteiden asentamista ja kokeilua. Toisella ajanjaksolla (1.5.2020–30.5.2022) saa rakenteiden asentamisen ja kokeilun lisäksi laitoksella kasvattaa kalaa. Koeluonteisen kalankasvatustoiminnan luvan sallima lisäkasvu on ollut noin 95 000 kg/a (ESAVI 12.6.2019 dnro. ESAVI/15436/2019).

3.2. Telemetriajärjestelmän valintaan liittyvät kriteerit

Korran laitokselle hankitulle telemetriajärjestelmälle asetettiin kriteeristö, jonka avulla pyrittiin löytämään käyttökelpoisin laitteisto merialueen tutkimuskäyttöön. Koska telemetriajärjestelmän ensisijainen käyttökohde oli upotettava kalanviljelylaitos, yhtenä tärkeänä kriteerinä oli, että kaikki telemetriajärjestelmän laitteet ovat täysin vedenpitäviä ja upotettavissa laitoksen mukana.

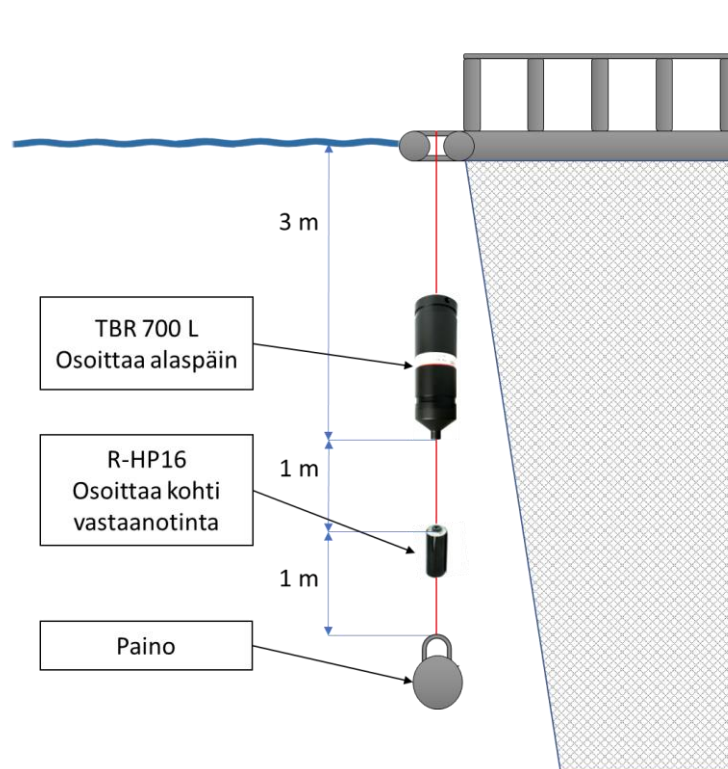
Toiseksi datan tallennuksen tuli olla luotettavaa ja riski tallennetun tiedon menettämiselle pyrittiin kaikin keinoin minimoimaan. Tutkimusympäristön haasteena oli, että tutkimuskaloja (joiden ruumiinoteloissa telemetriajärjestelmän lähettimet ovat) olisi vain 10–20 kappaletta, kun koko tuotantarparven koko on noin 35 000 kpl. Tämä tarkoittaa noin 0,03 % kaikista verkkokassissa olevista kaloista. Mikäli tiedon tallennus tapahtuisi vain ja ainoastaan lähettimen omaan sisäiseen muistiin olisi suuri riski, että kaikkia lähettäviä ja näin ollen kaikkea dataa ei saataisi talteen tutkimusjakson päätyttyä. Myöskään dataa ei voisi lukea kokeen aikana vaan ainoastaan kokeen päätyttyä.

Muut kriteerit liittyivät laitteiston resoluutioon, mitattaviin suureisiin, akunkestoon sekä mahdollisuuteen soveltaa hankittavaa laitteistoa tulevaisuudessa. Kirjallisuus ja markkinakatsauksen jälkeen potentiaalisimmiksi järjestelmän toimittajiksi tunnistettiin: Innovasea Systems Inc. (entisen HTI-Vemcon omistaja), Star-Oddi Ltd. ja Thelma Biotel As. Toimittajien kanssa järjestettyjen markkinavuoropuheluiden päätteeksi todettiin, että vain Thelma Biotelin toimittama järjestelmä soveltuu Korran tutkimusympäristöön.

Ratkaisevana teknisenä erona muihin markkinavuoropuhelussa mukana olleisiin järjestelmien toimittajiin Thelma Biotelin järjestämässä oli se, että sensorit eivät tallenna keräämäänsä dataa itse sensoriin vaan ne lähettävät tiedon vedenkestävälle vastaanottimelle, johon data tallentuu. Näin ollen vastaanottimet voidaan asentaa siten, että ne roikkuvat päällikehystä muutaman metrin verran vedenpinnan alapuolella, missä ne vastaanottavat tietoa sensoreilta. Kun data halutaan kerätä, voidaan vastaanottimet käydä nostamassa pinnan yläpuolelle ja tieto saadaan siirrettyä tietokoneelle bluetoothin välityksellä. Muissa järjestelmissä, joko mittauksen tarkkuus oli liian epätarkka, sensorit eivät mahdollistaneet yhtä laajaa alasta mittausta, sensorit täytyy saada talteen, jotta tieto saadaan talteen tai laitteiston vedenkestävyys tai akusto/virtalähde eivät olleet soveltuvia avomeriolosuhteisiin tai upotettavaksi.

3.3. Kuvaus Korraan hankitusta telemetrijärjestelmästä

Korran laitokselle hankittiin Thelma Biotel As:n toimittama telemetrijärjestelmä. Järjestelmä koostuu kolmesta vastaanottimesta (TBR 700 Long) sekä erityyppisistä lähettimistä. Vastaanottimet on asennettu tasaisesti ympäri verkkoallasta ja ne on roikotettu narulla yläkehästä siten, että vastaanottimen pää on suunnattu kohti pohjaa ja se sijaitsee kolmen metrin syvyydessä (Kuva 18). Vastaanottimen ilmoitettu akunkesto on 16–18 kk ja vastaanottiin hankittiin lisäksi päivitys, joka mahdollistaa kolmen eri taajuusalueen kuuntelemisen samanaikaisesti. Tällä tavoin eri sensorit voitiin asettaa eri taajuusalueille ja näin ollen minimoida päällekkäisten ”pingien” (sensorin lähettämä signaali) tapahtuminen. Pingien tapahtuessa samanaikaisesti vastaanotin ei kykene havainnoimaan molempia, jolloin päällekkäisyyden johdosta osa datasta menetetään. Koska vastaanottimia on kolme, on niiden avulla mahdollista myös kolmiomittata kalojen sijaintia verkkoaltaan sisällä. Kolmiomittaus perustuu eri vastaanottimien havaitseman lähettimen saman signaalin saapumisaikojen eroihin (engl. *Time Difference of Arrival, TDoA*). Vastaanottimet aikaleimaavat vastaanotetun pingin millisekunnin tarkkuudella. Äänen nopeus vedessä on ensisijaisesti riippuvainen veden lämpötilasta, suolapitoisuudesta sekä paineesta (National Physical Laboratory, 2000). Saaristomerellä, jossa suolapitoisuus on arviolta 6 ‰ ja veden lämpötila vaihtelee 0–25 °C välillä on äänen nopeus matalassa (<20 m) vedessä noin 1410–1500 m/s. Näin ollen telemetrijärjestelmän mittaustäisyyden teoreettinen tarkkuus on enimmillään 1,4–1,5 metriä, kun se tallentaa tietoa 1 ms tarkkuudella.

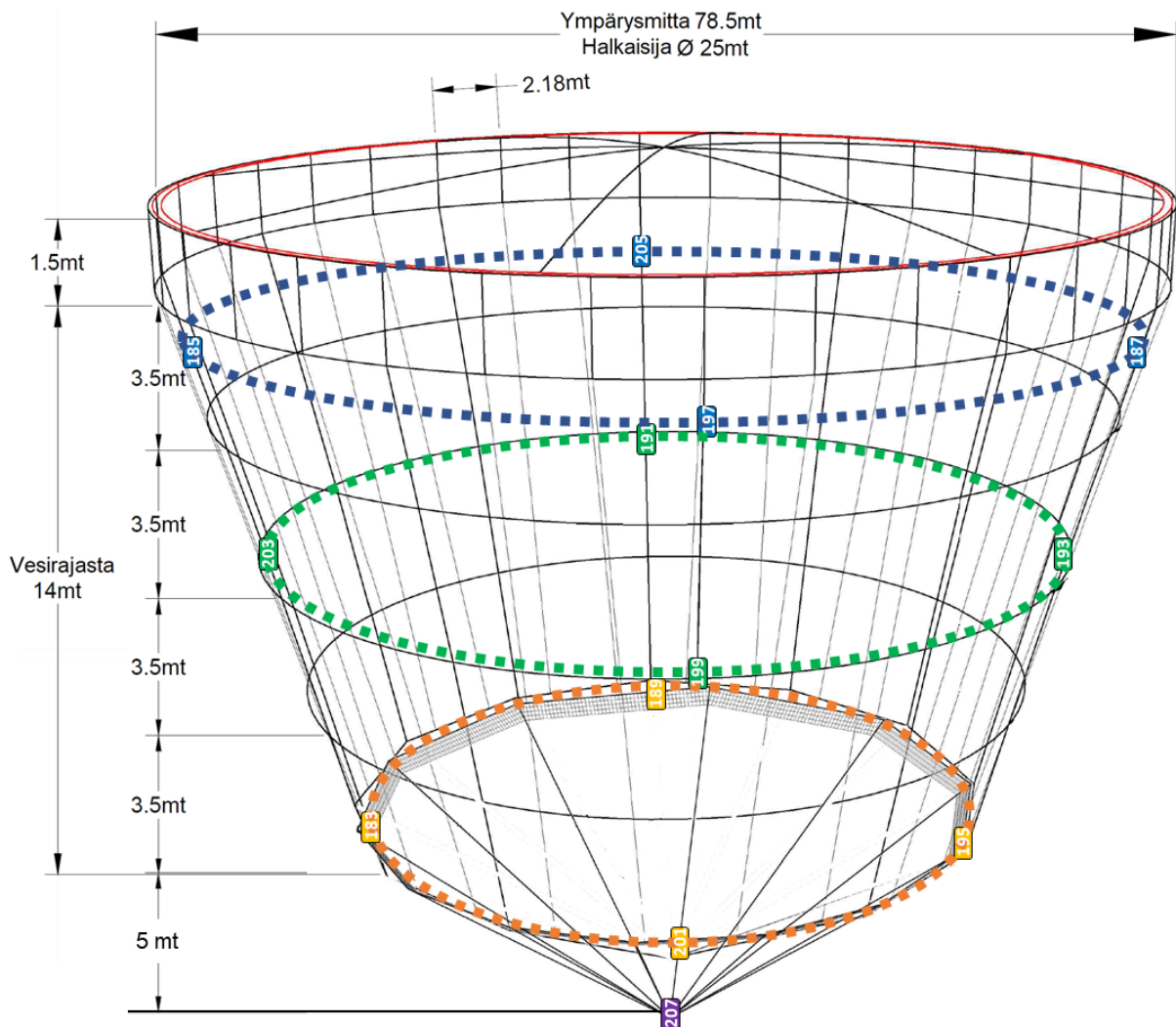


Kuva 18. Havainnekuva vastaanottimen asennuksesta (kuvat vastaanottimesta ja lähettimestä on noudettu valmistajan sivuilta <https://www.thelmabiotel.com/>).

Korran laitoksella lähettämiä on kolmentyyppisiä: verkkoallas-, kala- ja synkronointisensorit. Lähettimien akut eivät ole vaihdettavia. Näin ollen, kun akku tyhjenee, on lähetin saavuttanut käyttöikänsä. Lähettimen akunkesto vaikuttaa lähettimen koko, mitattavat suureet sekä lähetysintervalli (=mittausväli). Suurempaan lähettimeen mahtuu suurempi akku, jolloin kookkaimmissa lähettimissä on myös pisin akunkesto. Mitä tiheämmin lähetyksiä suoritetaan, sitä

nopeammin lähettimen akku kuluu. Jos esimerkiksi ADT-HP16 lähettimellä lähetyksintervalli on 10 sekuntia kestää sen akku teoriassa 11 kk. Mikäli lähetyksintervallia harvennetaan 60 sekuntiin, saavutetaan noin 56 kk akunkesto (<https://www.thelmabiotel.com/tag-builder/>). Lähettimet voidaan kytkeä pois päältä tutkimusjaksojen ulkopuoliseksi ajaksi, joten sensoreita voidaan käyttää sekä todella pitkäkestoisiin että useisiin lyhytkestoisinkin kokeisiin.

Verkkoaltaan ympärille on asennettu neljään eri syvyyteen yhteensä 13 sensoria (Thelma Biotel ADT-HP16; halkaisija 16 mm; pituus 72,4 mm; paino ilmassa 29,6 g; paino vedessä 15 g; teho 158 dB), siten että lähettimen pää osoittaa kohti vastaanotinta (Kuva 19). Ne mittaavat painetta (=syvyyttä), lämpötilaa ja kallistusta (engl. *tilt*). Sensoreiksi valittiin kooltaan suurimmat sensorit, jotta niillä saavutettaisiin mahdollisimman pitkä käyttöaika kohtuullisella lähetyksintervallilla. Sensoreiden lähetyksintervalli on keskimäärin 4 minuuttia ja tällä saavutetaan yli 5 vuoden akunkesto (teoreettinen 146 kk). ADT-HP16 sensorit lähettävät 69 kHz taajuudella. Sensoreiden mitausvälit ovat: 0–30 000 mbar (paine), –1,5–24 °C (lämpötila) ja 0–180° (kallistuskulma).



Kuva 19. Havainnekuva verkkoaltaaseen asennettujen ADT-HP16 sensoreiden sijainnista. Väritetyt katkoviivat kuvaavat eri syvyyskerroksia ja numeroidut suorakulmiot syvyyskerroksessa olevia sensoreita sekä näiden ID numeroa.

Kalasensorit valittiin siten, että sensorilla saavutetaan arviolta yhden vuoden akunkesto. Tätä pidempää akunkesto ei katsottu tarpeelliseksi, sillä yksittäisten kokeiden keston ei katsottu

ylittävän tätä aikaa. Lähettimen koolle asetettiin lisäksi maksimipaino suhteessa kalan kokoon, sensorin kalan käyttäytymiseen aiheuttaman vaikutuksen minimoimiseksi tutkimuksen aikana. Kalan sisälle leikattavan sensorin maksimipaino suhteessa kalan painoon asetettiin valmistajan ilmoittaman sekä yleisesti käytössä olevan suosituksen mukaisesti suhdelukuun 2 %.

Kalasureiksi valittiin Thelma Biotelin ADT-LP9L sensorit (halkaisija 9 mm; pituus 31,9 mm; paino ilmassa 5,9 g; paino vedessä 3,9 g; teho 149 dB). Sensorit mittaavat syvyyttä, lämpötilaa sekä kiihtyvyyttä (=aktiivisuutta). Sensoreiden lähetysintervalli on keskimäärin 90 sekuntia (60–120 sekunnin vaihteluväli) ja niiden arvioitu akunkesto on 15 kk. Puolet hankituista ADT-LP9L sensoreista lähettävät 67 kHz ja puolet 71 kHz taajuudella. Sensoreiden mittausvälit ovat: 0–51 m (syvyys), –1,5–24 °C (lämpötila) ja 0–3,465 m/s² (kiihtyvyys). Kiihtyvyys ilmoitetaan xyz-suuntien neliöllisenä keskiarvona (engl. *root-mean-square acceleration*, A_{RMS}). Kiihtyvyyden RMS-keskiarvostuksen mittausintervalli on 5 Hz ja mittausajanjakso lähetystä edeltävät 30 sekuntia eli RMS-keskiarvostus lasketaan 150 mittauspisteen perusteella.

Järjestelmään on asennettu lisäksi kaksi synkronointisensoria (Thelma Biotel R-HP16; halkaisija 16 mm; pituus 70 mm; paino ilmassa 29 mm; paino vedessä 14,9 mm; teho 158 dB), joita hyödynnetään vastaanottimien sisäisten kellojen ajautumisen (engl. *time drift*) korjaamiseksi, kun vastaanottimilla halutaan suorittaa kolmiomittausta. Eri vastaanottimissa kellot ajautuvat eri aikaan eri nopeudella. Lisäksi vastaanottimet voivat hieman liikkua toisiinsa nähden, kun yläkehä, josta vastaanottimet roikkuvat vääntyy esimerkiksi kovan virtauksen johdosta. Koska pienikin ero kellojen ajautumisissa voi aiheuttaa suuria mittavirheitä täytyy ajautuminen huomioida laskelmissa. Synkronointisensorit, on asemoitu kahden eri vastaanottimen alapuolelle 1 metrin etäisyydelle vastaanottimesta. Vastaanottimien kellot voidaan synkronoida suhteessa toisiinsa, kun tarkastellaan synkronointisensoreilta (joiden sijainti suhteessa yläpuoliseen vastaanottiin pysyy vakiona) tulevien pingien saapumisaikojen eroja. Synkronointisensorit toimivat 69 kHz taajuudella ja ne lähettävät 600 ja 603 sekunnin välein. Synkronointisensoreiden arvioitu akunkesto on yli 5 vuotta.

3.4. Telemetriadata ja sen käsittely

Havainnon tallentuminen ja havaintojen lukeminen

Telemetriälähtimissä on laaja joukko eri protokollia, joilla lähettimen havainnoima tieto siirretään vastaanottimelle. Korran lähettimet hyödyntävät pulssimodulaatioksi (engl. *pulse position modulation*, *PPM*) kutsuttua periaatetta. PPM-periaatteen mukaisesti, lähettimet lähettävä sarjan pulsseja, joista jokaiseen on koodattu yksilöllinen ID. Yksilöllinen ID on koodattu saapuvien perättäisten pulssien aikaeroihin (Reubens ym. 2021). Lähettimien käyttämä PPM-periaatteen mukainen tarkka protokolla on S256 ja vastaanotin on asetettu käyttämään tätä protokollaa.

Kun vastaanotin havaitsee sensorilta tulevan lähetyksen, se muuttaa saapuvan havainnon lukuarvoksi S256 protokollan mukaisesti. Saapuva havainto saa samalla vastaanottimen sisäisen kellon mukaan leimatun, koordinoitua yleisaikaan (UTC) sidotun aikaleiman. Havainto tallentuu vastaanottimen sisäiseen muistiin ja siinä on aikaleiman ja lukuarvon (data) lisäksi mukana lähettävän sensorin ID-numero, lähetystaajuus sekä signaali-kohinasuhde (*signal-to-noise ratio*, *SNR*).

Kaikki havainnot tallentuvat vastaanottiin ja havainnot saadaan siirrettyä tietokoneelle bluetooth-yhteyden välityksellä eikä toimenpide vaadi verkkoyhteyttä. Tiedonsiirtoon

hyödynnetään Thelma Biotelin ComPort -ohjelmistoa ja tiedonsiirron ajaksi vastaanottimet on otettava vedenpinnan yläpuolelle. Kuukauden havaintoaineisto siirtyy tietokoneelle muutamassa minuutissa, joten havaintoaineiston siirtäminen verkkoaltaalla käy nopeasti ja vastaanottimet saadaan takaisin veteen ilman merkittäviä havaintokatkoja.

Havaintoaineiston filteröinti

Jokainen sensori on asetettu lähettämään vain tietyllä taajuusalueella. Havaintoaineistoon tulee kuitenkin myös virrehavainnoita, joita ovat olemattomille ID numeroille tai väärällä taajuusalueella tehdyt havainnot. Kuvassa 20 on esimerkki molemmista virrehavainnoista. Korrasa pienin sensori-ID on numeroltaan 143 ja silti aineistosta löytyy havainto ID-numerolla 5. Lisäksi, vastaanotin 1693 on tehnyt saman havainnon kolmella eri taajuusalueella. Sensori 172 on ohjelmoitu lähettämään 71 kHz taajuudella, joten kaksi muuta havaintoa tulee suodattaa pois aineistosta. Aikavälillä 6.7.–9.12.2021 Korran laitoksella tehtiin yhteensä 3 195 210 havaintoa. Näistä 848 (0,03 %) oli vääriä ID numeroita ja 500 923 (15,68 %) oli havainnoitu väärällä taajuusalueella. Oikeita havainnoita koko aineistosta oli 84,3 %.

Date and Time (UTC+02:00)	ID	Data	Protocol	SNR	Receiver
2021-07-08 23:43:56.830	169	15798	HS256-71kHz	36	001691
2021-07-08 23:43:47.293	5	4100	HS256-71kHz	28	001693
2021-07-08 23:43:24.255	176	4669	HS256-71kHz	39	001692
2021-07-08 23:43:22.625	176	4669	HS256-71kHz	37	001693
2021-07-08 23:43:11.269	172	4639	HS256-71kHz	34	001692
2021-07-08 23:43:09.633	172	4639	HS256-67kHz	14	001693
2021-07-08 23:43:09.633	172	4639	HS256-71kHz	49	001693
2021-07-08 23:43:09.633	172	4639	HS256-69kHz	20	001693
2021-07-08 23:43:09.400	172	4639	HS256-71kHz	33	001691

Kuva 20. Esimerkki havaintoaineistossa olevista virrehavainnoista.

Korran havaintojen lukuarvojen dekooodaus mitattaviksi suureiksi

Vastaanottimen tallentama data-arvo sisältää sensorin ID numerosta riippuen sekä syvyyden että joko lämpötilan, kiihtyvyyden tai kallistuskulman. Eri sensoreille lukuarvon muuttaminen mitattavaksi suureksi käy hieman eri tavoin ja dekooodausprosessi tulee varmistaa valmistajalta. Pääpiirteittäin data-arvo muutetaan mitattavaksi suureeksi seuraavalla tavalla:

- i. Data-arvo muutetaan neljän merkin pituiseksi heksadesimaaliarvoksi (esim. lukuarvo 1 = 0001_{16} , 10 = $000A_{16}$, 100 = 0064_{16} , 1000 = $03E8_{16}$, 10000 = 2710_{16}).
- ii. Saatu heksadesimaaliarvo jaetaan kahteen osaan.
- iii. Kaksi ensimmäistä merkkiä ovat aina syvyyesarvo ja kaksi jälkimmäistä merkkiä ovat joko lämpötila, kiihtyvyys tai kallistuskulma, riippuen ID numerosta ja sensorista.
- iv. Kahden merkin pituiset heksadesimaaliarvot (=8-bittinen tavu) muutetaan takaisin kymmenkantaiseen muotoon.
- v. Saatu kymmenkantainen luku edustaa mitattavaa suuretta ja tämä täytyy vielä sovittaa sensorin mittausrajojen mukaan.

Huom. Sensorin ADT-LP9L mittaamien parametrien arvot on jaettu kahden merkin pituiselle heksadesimaaliluvulle eli toisin ilmaistuna 8-bitille. 8-bittisellä binääriluvulla voi ilmaista 256 mahdollista arvoa, jotka ovat kokonaisluvut 0–255 ($00_{16}=0$ ja $FF_{16}=255$). Näistä luku 0 kuvaa mitattavan suureen minimiarvoa ja luku 255 maksimiarvoa. Näin ollen mitattavan suureen resoluutio on yhtä kuin mittausväli / 255. Esimerkiksi syvyyden mittausväli on 0–51 m eli syvyysresoluutio on $51 \text{ m} / 255 = 0,2 \text{ m}$.

$$\text{resoluutio} = \frac{\text{mittausvälin maksimiarvo} - \text{mittausvälin minimiarvo}}{255} \quad (3.1)$$

Syvyys, lämpötila ja kiihtyvyydet saadaan ADT-LP9L sensoreille alla olevilla kaavoilla:

$$\text{syvyys [m]} = \text{havaintoarvo} * \text{resoluutio} - \frac{P_{\text{atm}}[\text{mbar}] - 1000 [\text{mbar}]}{100} \quad (3.2)$$

$$\text{lämpötila [}^\circ\text{C]} = \text{havaintoarvo} * \text{resoluutio} + T_{\text{min}} \quad (3.3)$$

$$\text{kiihtyvyys [m/s}^2\text{]} = \text{havaintoarvo} * \text{resoluutio} \quad (3.4)$$

Huom. Koska painesensorit (=syvyys) ovat kalibroitu 1000 mbar paineeseen täytyy ilmanpaine huomioida laskelmissa, mikäli halutaan saavuttaa mahdollisimman tarkka tulos. 1 cm vesipatsas aiheuttaa 1 mbar paineen. Korrassa ilmanpaine vaihteli vuoden 2021 tutkimusjakson aikana välillä 966–1037 mbar. Jos ilmanpainetta ei huomioida tulee syvyysuunnassa heittoa 34–37 cm todelliseen syvyyteen verrattuna.

Esimerkki, käyttäen ADT-LP9L sensoria ja kuvitteellista havaittua data-arvoa 18234:

- i. Muuntaminen heksadesimaaliksi: $18234 = 473A_{16}$.
- ii. Jaetaan kahteen osaan: $473A_{16} \rightarrow 47_{16}$ ja $3A_{16}$.
- iii. Muutetaan heksadesimaalit takaisin kymmenkantaiseen muotoon: $47_{16} = 71$ ja $3A_{16} = 58$.
- iv. Jos ADT-LP9L sensorin ID numero on pariton jälkimmäinen osa (58) kuvaa lämpötilaa ja mikäli ID numero on parillinen jälkimmäinen osa kuvaa kiihtyvyyttä. Ensimmäinen osa (71) kuvaa hankituilla sensoreilla aina syvyyttä.
- v. Jos ilmanpaine olisi 980 mbar vastaa syvyyttä kuvaava arvo 71 syvyyttä 14,4 m ($71 * \frac{51-0}{255} - \frac{980-1000}{100} = 14,4$). Jos kyseessä on parittoman ID numeron havainto, arvo 58 vastaisi lämpötilaa $4,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ($58 * \frac{24-(-1,5)}{255} + (-1,5) = 4,3$). Mikäli kyseessä on parillisen ID numeron havainto, arvo 58 vastaisi kiihtyvyyttä $0,79 \text{ m/s}^2$ ($58 * \frac{3,465-0}{255} = 0,79$).

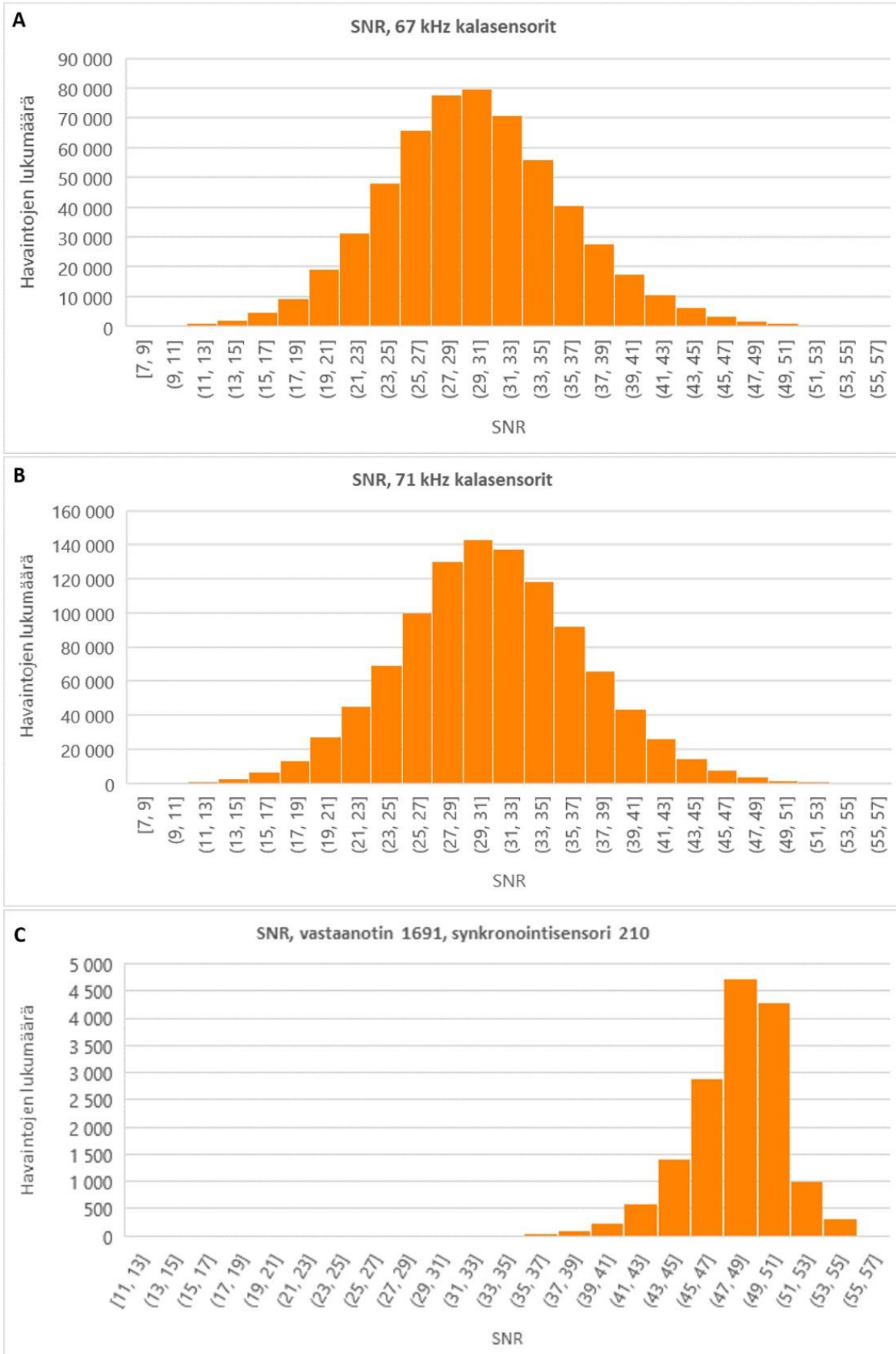
Signaali-kohinasuhde

Vastaanotin rekisteröi myös signaali-kohinasuhteen eli SNR-arvon. Signaali-kohinasuhde kuvaa varsinaisen signaalin ja taustakohinan tehojen suhdetta. Mitä suurempi arvo, sitä vahvempi on varsinainen signaali suhteessa taustakohinaan. Vastaavasti pieni SNR-arvo tarkoittaa, että varsinainen signaali on heikko ympäröivään kohinaan verrattuna. Liian voimakas taustakohina voi johtaa ongelmiin varsinaisten signaalien havainnoinnissa, minkä lisäksi pieni SNR-arvo voi lisätä keskihajontaa signaalin saapumisajoissa, mikä lisää epävarmuutta signaalin etäisyyden arvioinnissa (Ehrenberg & Steig 2002). SNR-arvo voi mennä myös hyvin pieneksi (0–2), mikäli vastaanottimen akun varaus on käymässä vähiin.

Valmistajat eivät yleensä ilmoita minimi raja-arvoa hyväksyttävälle signaali-kohinasuhteelle. SNR-arvoa ei myöskään yleisesti käsitellä vertaisarvioidussa telemetriatutkimuksessa, joten asiassa ei vallitse konsensusta, miten pieni SNR-arvo on vielä hyväksyttävissä. Ehrenberg ja Steig (2002) esittivät, että riittävä SNR-arvo olisi 10 dB. SNR-arvo voidaan esittää kahdella eri tavalla:

$$SNR = \frac{P_{\text{signaali}}}{P_{\text{kohina}}} = 10 * \log_{10} \left(\frac{P_{\text{signaali}}}{P_{\text{kohina}}} \right) \text{ dB} \quad (3.5)$$

Ehrenberg ja Steigin (2002) esittämä raja-arvo 10 dB vastaa SNR-arvoa 10, jolloin varsinainen signaaliteho on kymmenen kertaa kohinatehoa voimakkaampi. Korran filtoeröidyssä havainto-aineistossa ei ole käytännössä lainkaan SNR < 10 havaintoja (Kuva 21).



Kuva 21. Signaali-kohinasuhde A) 67 kHz ja B) 71 kHz kalasensoreiden sekä C) suoraan vastaanottimen 1691 alapuolella olevan synkronointisensorin havainnoille.

4. Muu Korran laitoksen tutkimuslaitteisto

Ympäristöpoiju

Korran laitoksen välittömässä läheisyydessä on vuodesta 2021 saakka kerätty ympäristödataa niin kutsutulla ympäristöpoijulla (EHP-Ympäristöpoiju®). Poijulla mitataan reaaliajassa veden fysikaalisia ominaisuuksia (pintaveden lämpötila sekä virtausnopeus ja -suunta eri syvyyskerroksissa) sekä vedenlaatuun liittyviä parametrejä (mm. liennut happi pintavedessä, pinta-sameus sekä -johtokyky). Lisäksi ympäristöpoijulla mitataan sääolosuhteita (tuulen suunta ja -nopeus, ilmanpaine, -kosteus, lämpötila, kastepiste ja säteily).

Lukuun ottamatta virtausnopeutta ja -suuntaa, veden ominaisuuksien mittaukset tapahtuvat noin 1 metrin syvyydellä. Virtauksen mittaustavasta johtuen pinnassa on niin kutsuttu ”sokea alue”, josta virtausnopeutta ja -suuntaa ei voida mitata. Sokea alue kattaa 6 metriä pinnasta alaspäin. Tämän kerroksen alapuolella virtausnopeuden ja -suunnan arvot on ilmoitettu syvyyskerroksittain kolmen metrin jaolla, siten että esimerkiksi *Virtaus 6 m [cm/s]* tarkoittaa virtausnopeutta välillä 6–9 metriä. Vastaavasti *Suunta 6 m [°]* tarkoittaa virtauksen menosuuntaa välillä 6–9 metriä.

Ympäristöpoijun mittausväli on 30 minuuttia ja mittaukset ovat hetkellisiä arvoja. Kun kerättyä dataa ryhdytään linkittämään telemetria havaintoihin, on syytä huomioida, että molempien havaintojen aikaleimat tulee esittää UTC ajassa, jolloin kesä- ja normaaliajan vaihtelulla ei ole merkitystä.

Tarkempi kuvaus ja käyttökokemukset ympäristöpoijusta julkaisussa Niukko ja Kankainen (2021) *Vedenlaadun mittauksia kalankasvatustaloksilla: Havainnot automaattisista mittareista Saaristomerellä 2019–2020*. Ympäristöpoijun keräämä aineisto on vapaasti ladattavissa osoitteesta <https://ehp-data.com/>. Korrassa oleva ympäristöpoiju on nimeltään *LUKE Ympäristöpoiju 1*. Ympäristöpoijun sensorit puhdistettiin laitoksella suoritetun sukellustöiden yhteydessä 22.9.2021, mikä näkyy epäjatkuvuutena mittausaineistossa. Ympäristöpoiju siirrettiin talvisäilytykseen maalle 3.12.2021.

Aaltopoiju

Korran laitoksella on ollut vuoden 2021 aaltopoiju, jolla on mitattu 19 eri muuttujaa mm. merkitsevää aallonkorkeutta, aallokon huipun taajuutta, aallokon huipun suunta sekä aallokon suunnan hajontaa. Aaltopoijun mittausjakson väli on 30 min, josta 26,7 min on itse mittausta.

Virtausmittari

Talven ajaksi ympäristöpoiju on otettava pois merestä, jotta se ei vaurioituisi mahdollisen jääkannen ja liikkuvan jään seurauksena. Jotta Korran laitoksella voitiin mitata virtausta myös talven upotusjakson aikana, asennettiin laitoksen viereen pohjaan asennettava virtausmittari (Aanderaa SeaGuard SW ZPulse, DCS 300 m).

EXO2 -moniparametrianturi

Ympäristöpoijun datankeruu on talvikaudeksi korvattu EXO2 -moniparametrianturilla, jolla voidaan jatkuvatoimisesti mitata veden lämpötilaa, johtokykyä, sameutta, liunneen hapen määrä sekä klorofylliä että fykosyaniinia.

5. Koeasetelma

5.1. Biosensoreiden asettaminen kaloihin

Telemetriajärjestelmän käyttöönotto ja kasvatuskauden käyttökokeet suoritettiin Korran laitoksella vuoden 2021 aikana. Kokeen aikana kalojen päivittäisestä hoidosta vastasi Lännepuolen Lohi Oy. Korran laitoksen verkkokassi ja päälliverkko huollettiin, pestiin ja värjättiin ennen kasvatuskauden alkua ja asennettiin takaisin paikoilleen 2.6.2021. Korran laitokselle siirrettiin 3.6.2021 15 900 kg kirjolohta (keskipaino ~450 g; kappalemäärä ~35 000 kpl) Lännepuolen Lohen omalta poikaslaitokselta Kustavista, jossa ne olivat kasvaneet edellisen kasvukauden sekä talvehtineet edellisen talven. Kalasiirrot Korran laitokselle toteutettiin sumpuvuoneen avulla. Siirtoa varten kalat ahdistettiin poikaslaitoksen verkkoaltaassa pienempään tilaan, josta kalat voitiin siirtää sumpuvuoneeseen aluksen oman nostohaavin avulla. Sumpuvuoneesta kalat siirrettiin Korran laitokseen poistoputkea pitkin.

Korrassa suoritettulle telemetria tutkimukselle on ollut Etelä-Suomen aluehallintoviraston myöntämä koe-eläintoiminnan harjoittamiselle vaadittava hankelupa (ESAVI 3.6.2021 dnro. ESAVI/14356/2021). Biosensoreiden operoinnit kaloihin suoritettiin 1.7.2021 Lännepuolen Lohen Aava-aluksen kannella. Operoitavat kalat haavittiin verkkokassin sisälle asennettuun pienempään lieriönmalliseen sumppuun (halkaisija ~1,5 m; syvyys ~2,5 m) jo 25.6.2021, jossa kalat paastosivat ennen leikkausta. Leikkauspäivänä kaikki kalat siirrettiin sumpusta haavin avulla Aavan kannelle asetettuun muoviseen paljuun (vesimäärä paljussa ~4 m³), jossa vettä vaihdettiin pumpun avulla koko ajan. Vesi pumpattiin paljuun muutaman metrin syvyydestä. Leikkauspäivänä veden lämpötila oli 14,3 °C ja happipitoisuus 10,0 mg/l.

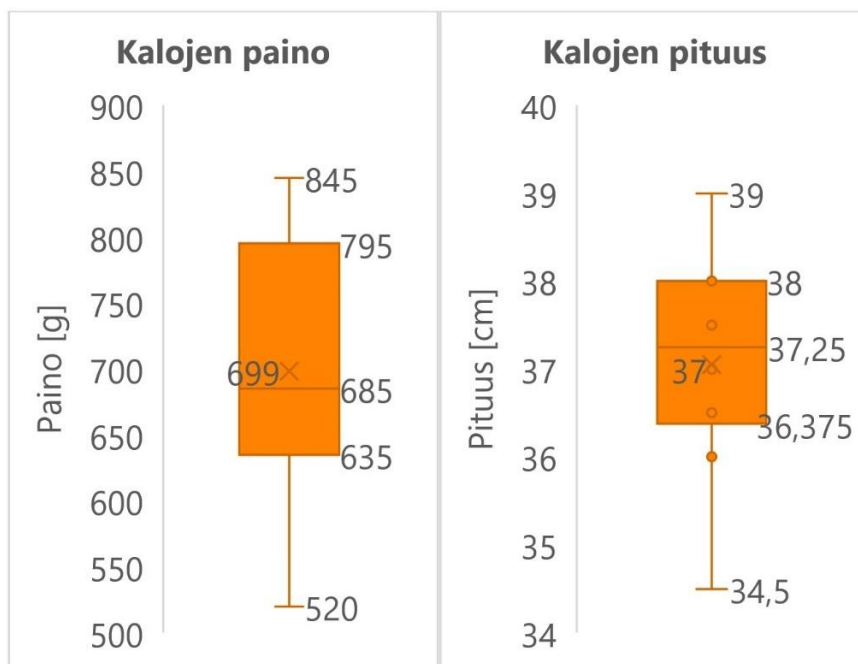
Leikkausoperaatio suoritettiin kokonaisuudessaan 15 kirjolohelle. Kalat leikattiin yksitellen ja leikkauksen jälkeen kalat palautettiin toipumaan verkkoaltaan sisällä edelleen olevaan sumppuun. Varsinainen leikkausoperaatio oli seuraava:

- i. Leikattava kala siirrettiin erilliseen pienempään paljuun, joka sisälsi nukutusaineliuosta. Nukutusaineena käytettiin MS-222 (=trikaiinimetaanisulfonaatti) ja nukutusaineliuoksen konsentraatio oli 140 mg/l, mikä on Eviran (2016) ja Rahkosen ym. (2012) suosituksen mukainen MS-222 konsentraatiovahvuus lohikaloiden nukuttamiselle.
- ii. Kalan annettiin olla nukutusaineliuoksessa, kunnes se saavutti anestesiataston 5. Anestesiataston 5 saavuttamiseen kului aikaa noin 3 minuuttia (ks. Liite 3 – Anestesiataston määrittäminen)
- iii. Anestesiataston 5 saavuttamisen jälkeen kala valokuvattiin, punnittiin, mitattiin sekä rasvaevämerkittiin. Mittaamiseen kului aikaa keskimäärin noin puoli minuuttia.
- iv. Kala siirrettiin vatsapuoli ylöspäin vedellä kyllästetyllä vaahtomuovilla vuorattuun muovilaatikkoon, jossa leikkausoperaatio suoritettiin. Leikkauksen ajaksi kalan kiduksiin ohjattiin hetkittäisinä pulsseina (~5 sekunnin annos muutamia kertoja minuutissa) laimeampaa nukutusaineliuosta (MS-222, konsentraatio 70 mg/l), jolla varmistettiin hyvä anestesiataso koko leikkauksen ajan.
- v. Kalan vatsaan tehtiin #11 skalpellilla viilto, joka oli vain hieman akustisen lähettimen halkaisijaa pidempi (15–20 mm). Viilto sijoitettiin vatsan keskilinjalle, noin puoliväliin rinta- ja vatsaevä. Liian pitkää ja syvää viiltoa pyrittiin välttämään.

- vi. Akustinen lähetin (Thelma Biotel ADT-LP9L; halkaisija 9 mm; pituus 31,9 mm; paino ilmassa 5,9 g; paino vedessä 3,9 g; teho 149 dB) asetettiin viiltoon ja työnnettiin vatsaonteloon. Viillosta ruumiinonteloon laitettiin lisäksi PIT-merkki. Lähetin ja PIT-merkki oli desinfioitu (Etax A16) ennen kalan ruumiinonteloon laittamista.
- vii. Viilto suljettiin 2 tai 3 pisteompeleella, joiden ommelväli oli noin 5–6 mm. Ommelsolmuna oli kirurginsolmu. Ommelaineena käytettiin sulamatonta 4/0 ommelainetta (Dafilon® ommelaine sininen 4/0 (1,5) 45 cm DS19). Leikkausoperaation kesto oli keskimäärin 5 minuuttia.
- viii. Kala siirrettiin toipumaan verkkoaltaan sisällä olevaan sumppuun. Toipumisen nopeutta seurattiin visuaalisesti ja se vei aikaa 2–3 minuuttia. Toipumisen merkinä pidettiin tasapainoisen uinnin palautumista.

Leikkauksen jälkeen kalat saivat toipua sumpussa 5 vuorokautta, minkä jälkeen niiden leikkaushaavan kunto tarkastettiin visuaalisesti. Leikkaushaavan kunnon tarkistaminen tapahtui 6.7.2021 laittamalla kala laimeaan nukutusaineliuokseen (MS-222, 70 mg/l) ja kun se oli saavuttanut anestesia-asteen 4, haavan kunto tarkistettiin. Tämän jälkeen kalan PIT-merkki luettiin ja osa kaloista siirrettiin verkkoaltaaseen tuotantokalojen joukkoon.

Kaikkien 15 kalan leikkaushaavat olivat parantuneet hyvin, eikä niissä ollut havaittavissa infektiota tai nekroosia. Myös kaikki tikit olivat pysyneet paikoillaan. Tarkastuksen yhteydessä 10 sattumanvaraisesti valittua kalaa siirrettiin varsinaiseen verkkoaltaaseen ja loput 5 kalaa lopetettiin Eviran (2016) ohjeiden mukaisesti vahvalla nukutusaineliuoksella (MS-222, konsentraatio 280 mg/l), minkä jälkeen lopetus varmistettiin napakalla iskulla päähän. Kaikkia leikattuja kaloja ei siirretty verkkoaltaaseen, sillä varsinaisia koekaloja tarvittiin vain 10 kappaletta. ”Ylimääräisillä” kaloilla haluttiin kuitenkin varmistaa, että mikäli jonkin kalan leikkaushaava ei ole lähtenyt parantumaan voidaan se jättää pois kokeesta ja kokeen alkaessa kaikki kalat ovat hyvässä kunnossa. Varsinainen koe katsottiin alkaneeksi 6.7.2021, jolloin biosensorein varustettujen kirjojen keskipaino oli 699 g ja keskipituus 37 cm (Kuva 22).



Kuva 22. Laatikko-janakuvi koekalojen (10 kpl) painosta ja pituudesta telemetriajärjestelmän käyttökokeen alkaessa 6.7.2021.

5.2. Telemetriajärjestelmän käyttö kokeen aikana

Vastaanottimet

Telemetriajärjestelmän vastaanottimet (Thelma Biotel TBR 700 Long) asennettiin 6.7.2021 kello 12 tasaisesti verkkokassin ympärille kuvan 18 mukaisesti. Vastaanottimet olivat päällä ja vedessä koko koejakson ajan, lukuun ottamatta lyhyitä (~5 min) ajanjaksoja, jolloin dataa käytiin lukemassa vastaanottimilta tietokoneelle. Vastaanottimet luettiin bluetoothin välityksellä yksi kerrallaan, minkä aikana kaksi muuta vastaanotinta oli vedessä täydessä toiminnassa. Vastaanottimien lukeminen tapahtui kokeen aikana 4.8., 21.9., 19.10.2021 sekä kokeen päättyessä 9.12.2021. Lokakuussa tapahtuneen tiedonsiirron yhteydessä vastaanottimien sisäisten kellojen ajautuminen korjattiin synkronoimalla vastaanottimien kellot. Kaikki vastaanottimet toimivat moitteettomasti koko koejakson ajan.

Verkkoaltaan sensorit

Verkkoaltaan sensorien (Thelma Biotel ADT-HP16) asentaminen edellytti sukeltajan käyttämistä. Sensorien asennus suoritettiin muiden sukellustöiden ohella laitoksen huoltotoimintojen yhteydessä 21.9.2021. Verkkoallasensorit asetettiin nk. "asennussukan" sisälle, joka kiinnitettiin altaan sisäpuolelta, nippusiteillä verkkoaltaaseen. Verkkoallasensorien sijainnit on esitetty kappaleessa 3.3 Kuvaus Korraan hankitusta telemetriajärjestelmästä (Kuva 19). Sukellustöitä suoritettiin Korraan laitoksella 21.-22.9.2021, jonka aikana sukeltaja oli verkkoaltaan sisällä ainoastaan 21.9.2021 kello 10–13 välisenä aikana.

Kasvatustoiminta ja upotukset

Vaikka kyseessä oli upotettava kalankasvatustilasto, ei kalankasvatustoiminta (esim. ruokinta) merkittävästi eronnut tavanomaisella kalankasvatustilastolla tehtävästä kasvatuksesta. Laitos oli tavallisen kalankasvatustilaston tapaan pinnalla koko kasvatuskauden, lukuun ottamatta kahta suhteellisen lyhytkestoista upotusjaksoa. Laitos oli upotettuna koejaksolla ensimmäisen kerran kovien ympäristöolosuhteiden takia 31.8. kello 14:30 ja se nostettiin takaisin pintaan 5.9.2021 kello 14:30. Ensimmäinen upotusjakso kesti 5 vuorokautta. Koejakson toinen upotus tehtiin ehkäisemään päälliverkon ja siinä olevan vetoketjun jäätymistä ennen kalojen siirtoa teurastukseen. Päälliverkon vetoketjun jäätyminen olisi merkittävästi haitannut päälliverkon irtottamista, mikä olisi haitannut kalojen saamista pois laitokselta. Toinen upotusjakso alkoi 2.12. kello 10:30 ja päättyi 9.12.2021 kello 9:30 (kesto 7 vrk).

Koekalojen kuolleisuus kokeen aikana ja biosensorien takaisinsaanti

Koekaloihin operoitiin biosensorit 1.7.2021 ja niiden annettiin toipua leikkauksesta 5 vrk ennen verkkoaltaaseen vapauttamista. Kaksi sensoria kuitenkin menetettiin muutamia viikkoja leikkauksen jälkeen. Ensimmäinen sensori menetettiin 29.7.2021 (28 vrk leikkauksen jälkeen) ja toinen sensori 30.8.2021 (29 vrk leikkauksen jälkeen). Sensorien lähettämän syvyystiedon perusteella sensorit ovat pudonneet kalan sisältä ja vajonneet heti pohjaan.

Toisen upotusjakson alkaessa 2.12.2021 kaikki jäljellä olevat koekalat (8 kpl) olivat telemetriadatan perusteella hengissä. 2. upotusjakson aikana osa kaloista painui verkkoaltaan pohjaan eivätkä ne enää kyenneet uimaan pintaan upotusjakson päätyttyä. Vain puolet (4/8) koekaloista pystyi uimaan takaisin pintaan ja tämän jälkeen säätelemään uintisyvyyttään. Koejakson telemetria-aineistoon pohjautuvia havaintoja upotuksen vaikutuksista ei käsitellä sen tarkemmin tässä raportissa, mutta niitä tullaan käsittelemään myöhemmissä julkaisuissa.

Telemetriajärjestelmä oli suunniteltu siten, että kerättyä tietoa ei menetetä, vaikka biosensoreita ei saada talteen kokeen päätteeksi. Perkaamon henkilökuntaa ohjeistettiin mahdollisesti löytyvistä sensoreista, mutta muihin toimenpiteisiin biosensoreiden takaisinsaamiseksi ei ryhdytty. Perkuun yhteydessä vain 1 sensori löytyi.

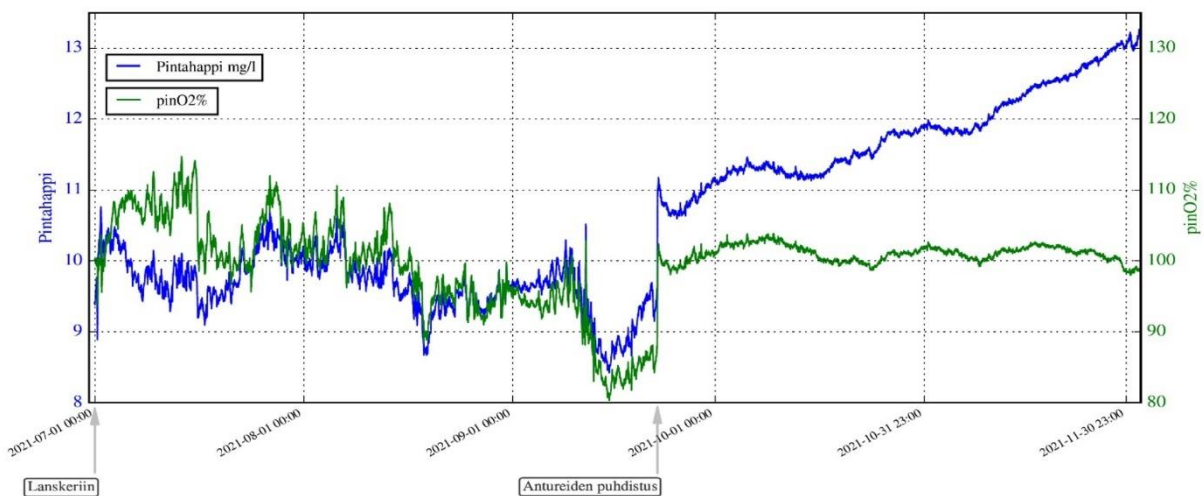
Kokonaisuudessaan vuoden 2021 telemetriakoe Korran laitoksella kesti 1.7.–9.12.2021 (161 vrk). Havaintoaineistoa kertyi kaikista 10 koekalasta lähes koko heinäkuun ajan (2 sensoria menetettiin heinäkuun viimeisten päivien aikana), minkä jälkeen aineistoa saatiin kahdeksasta kalasta, koko loppukokeen ajan. Vaikka vain 1 biosensori saatiin onnistuneesti noudettua koejakson päätyttyä, havaintoaineisto tallentui koko koejakson ajan telemetriajärjestelmän vastaanottimiin, joista se saatiin kokonaisuudessaan, ehjänä ja käyttökelpoisena talteen.

5.3. Ympäristöolosuhteet koejakson aikana

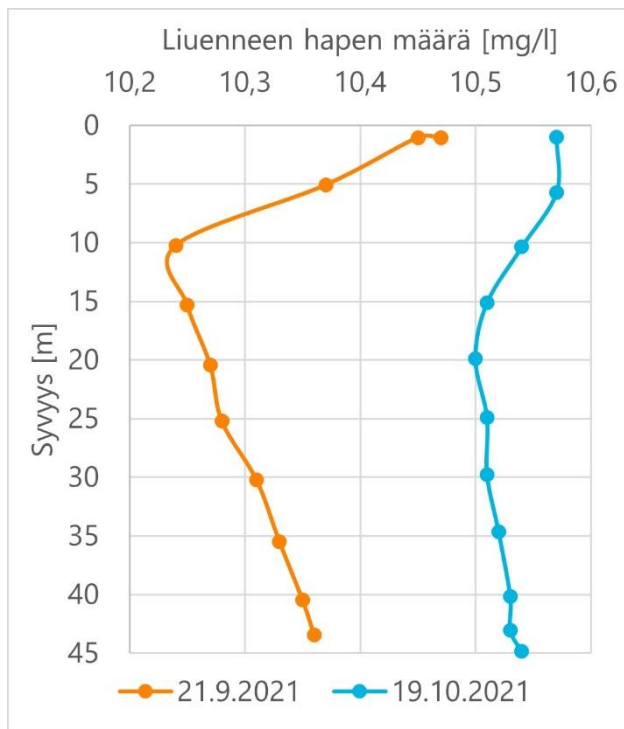
Pintahappi ja happisaturaatio

Veteen liuenneen hapen määrää seurattiin Korran laitoksella EHP-ympäristöpoijulla, joka mittaa liuenneen hapen määrää noin 1 metrin syvyydellä 30 minuutin välein. Veteen liuenneen hapen määrä pysyi hyvänä koko koejakson ajan ja happisaturaatio oli pääsääntöisesti 90–100 % (Kuva 23). Koejakson aikana syvempien vesikerrosten liuenneen hapen määrää ei laitoksella erikseen jatkuvatoimisesti seurattu. Kasvatuskauden aikana Korran laitoksella kuitenkin suoritettiin muutamia EXO2 -moniparametrianurimittauksia, joiden yhteydessä liuenneen hapen määrä mitattiin myös koko vesipatsaasta (Kuva 24).

Syyskuun puolivälissä ympäristöpoijulla mitatun liuenneen hapen määrä hieman väheni, ollen 15.9.2021 pienimmillään noin 8,5 mg/l (~80 O₂%). Ympäristöpoijun mittaama vähäisempi liuenneen hapen määrä selittyy osittain poijun happiantureiden likaantumisen, sillä happimittaukset olivat välittömästi antureiden puhdistamisen jälkeen huomattavasti korkeampia. Antureiden puhdistustöitä edeltävänä päivänä suoritettuna EXO2 -moniparametrianurimittauksen mukaan liuenneen hapen määrä pintavedessä oli 10,5 mg/l, kun ympäristöpoiju rekisteröi liuenneen hapen määrä oli vain 9,5 mg/l.



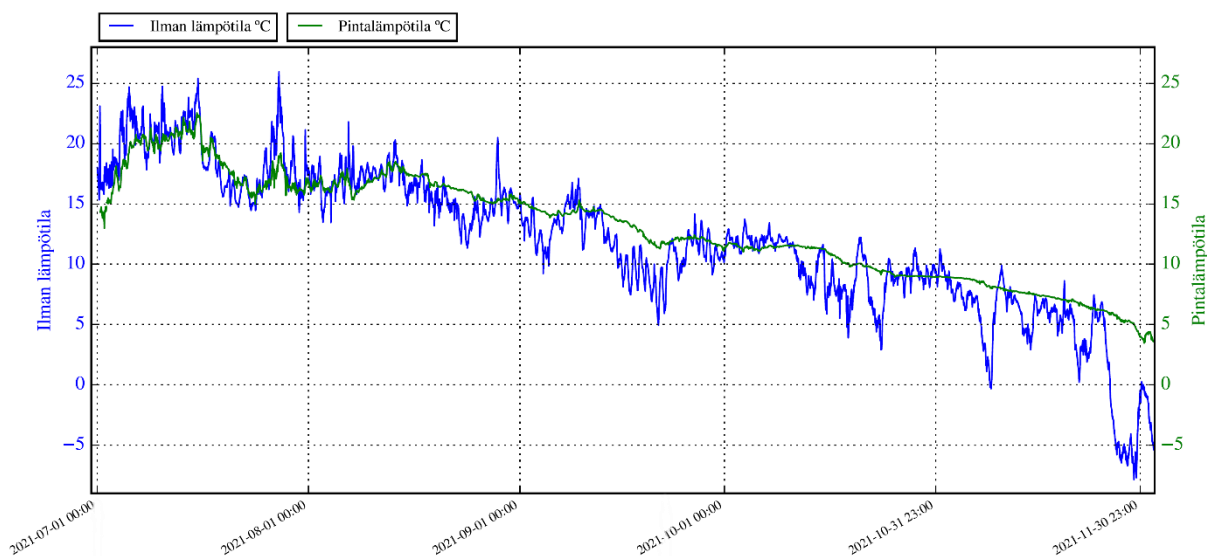
Kuva 23. Pintaveden liuenneen hapen määrä ja happisaturaatio Korran laitoksella 1.7.–2.12.2021.



Kuva 24. EXO2 -moniparametrian turilla mitattu liuenneen hapen määrä koko vesipatsaan syvyydellä Korran laitoksella 21.9. ja 19.10.2021.

Ilman lämpötila ja veden pintalämpötila

Koejakson alkaessa veden pintalämpötila oli noin 14 °C. Pintaveden lämpötila nousi aluksi noin kahden viikon ajan saavuttaen korkeimmillaan hieman yli 23 °C lämpötilan. Tämän jälkeen pintaveden lämpötila lähti laskuun myötäillen ilman lämpötilaa (Kuva 25). Vesipatsaan lämpötilaa verkkokassin syvyydellä pystyttiin seuraamaan telemetriajärjestelmällä sukellustöinä tehtyjen verkkokassin sensoreiden asennuksen jälkeen, 21.9.2021 alkaen. Näiden lämpötilahavaintojen tuloksia käsitellään kappaleessa 6.3 Lämpötila telemetriasensoreista.

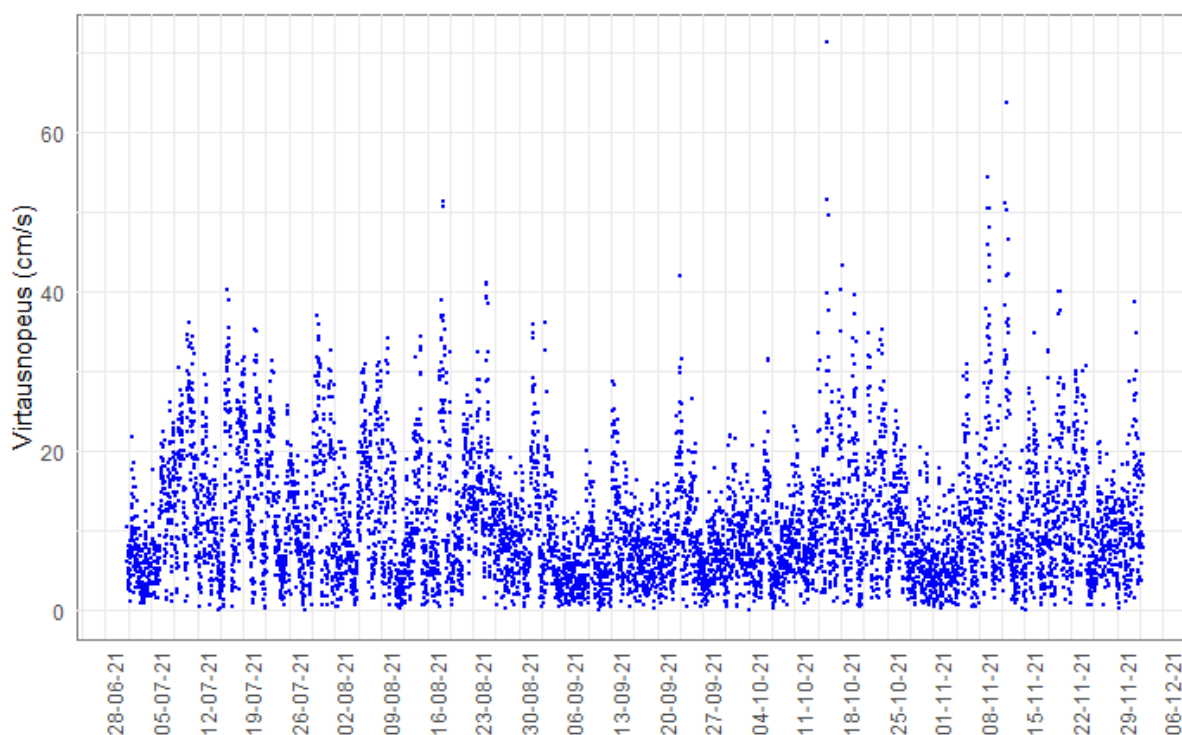


Kuva 25. Ympäristöpoijun mittaama ilman- ja pintaveden lämpötila Korran laitoksella 1.7.-2.12.2021.

Virtausnopeus

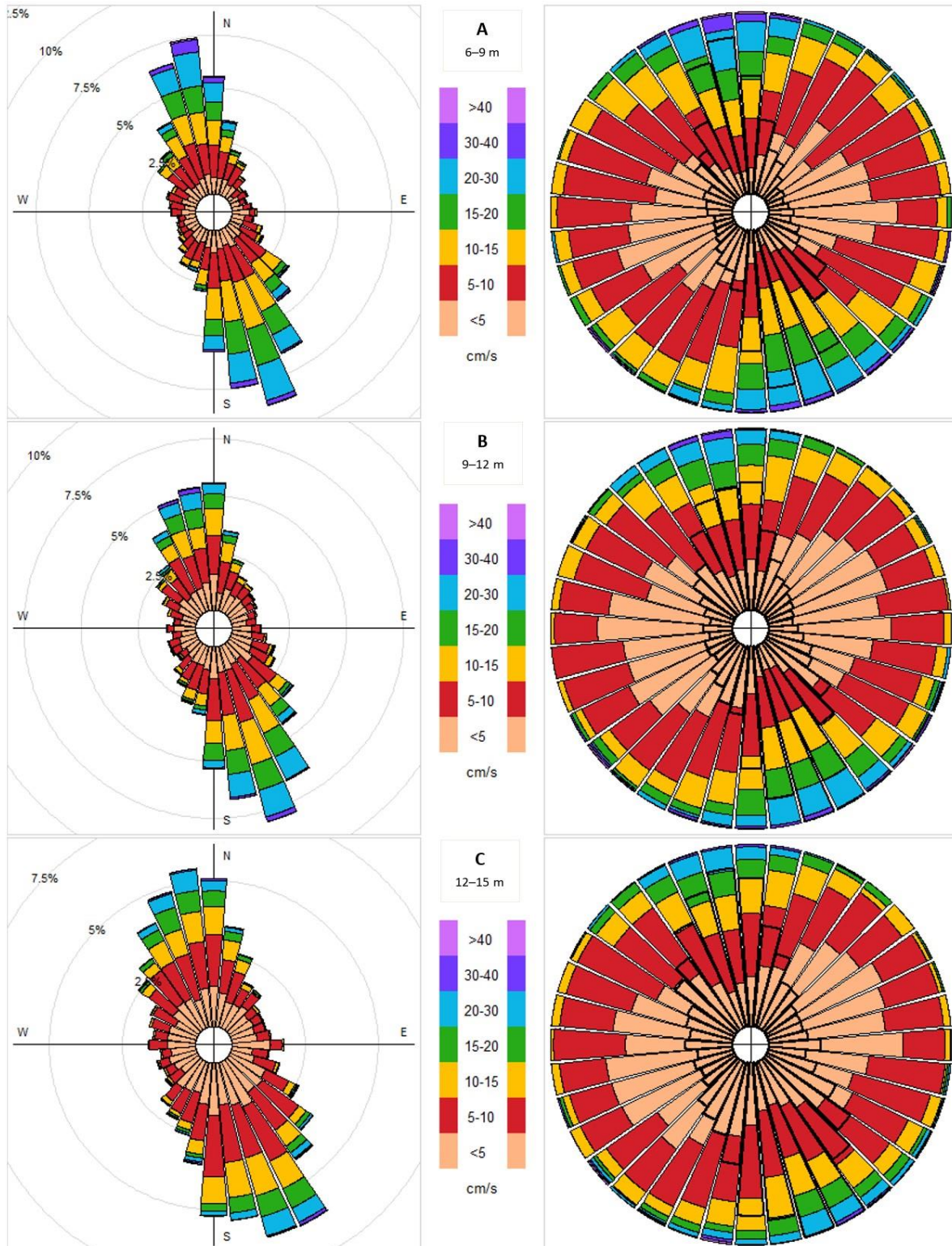
Vuonna 2021 valtaosa virtauksesta oli alle 40 cm/s (Kuva 26), mitä voidaan koeasetelman kaloille pitää vielä maltillisena. Uintinopeuden kuormittavuus on riippuvainen kalan pituudesta ja uintinopeus ilmaistaankin usein suhteessa kalan pituuteen muuttujalla $BL\ s^{-1}$ (engl. *body lengths per second*; kehomittaa sekunnissa). Kokeen alussa kalojen keskipituus oli 37 cm, joten 40 cm/s virtaus vastaa vain noin 1,1 $BL\ s^{-1}$. Tämän nopeuden ei pitäisi pitkäkestoisenakaan uuvuttaa koekaloja, vaan koekalat pystyvät uimaan tätä nopeutta vielä niin kutsuttua ”matkanopeutta”, mikä ei erityisesti väsytä kalaa.

Burgetz ym. (1998) arvioivat, että kirjolohen lihastyö pysyy aerobisella alueella uintinopeuden ollessa alle 70 % kalan kriittisestä uintinopeudesta (U_{crit}). Tämä on siis uintinopeuden raja, jota kala kykenee ylläpitämään pitkäkestoisesti väsymättä. Kriittinen uintinopeus on taas maksimi uintinopeus, jonka kala kykenee ylläpitämään lyhyen aikaa ennen kuin se uupuu. Burgetz ym. (1998) määrittivät kirjolohen ($492 \pm 17\ g / 35.8 \pm 0.4\ cm$) kriittiseksi uintinopeudeksi $2,13\ BL\ s^{-1}$ ja aerobisen uintinopeuden rajaksi $1,48\ BL\ s^{-1}$. Korran koekaloille aerobisen uinnin rajaksi tulee noin 55 cm/s ja kriittiseksi uintinopeudeksi noin 80 cm/s. Näiden rajojen puitteissa aerobisen uinnin rajan ylittäviä virtausnopeuksia ei mitattu kuin muutama kappale koko koejakson aikana.



Kuva 26. Ympäristöpoijulla mitatut virtausnopeudet 6–9 m syvyyskerroksessa Korran laitoksella 1.7.-2.12.2021.

Päävirtaussuunta Korran laitoksella on Kihdin suuntaisesti pohjois-eteläsuunta ja kovimmat virtaukset tulevat juuri pohjoisesta tai etelästä (Kuva 27). Virtausruususta voidaan havaita, että kovempia virtauksia on suhteessa useammin ylemmissä kerroksissa eikä yli 40 cm/s virtausnopeuksia edes käytännössä ole itä-länsisuunnassa. Virtausnopeus ei ole noussut tutkimusjakson aikana pitkäkestoisesti yli 40 cm/s nopeuksiin koko vesipatsaan alueella vaan kaloilla on lähes aina ollut mahdollisuus hakeutua, niin halutessaan, pienemmän virtausnopeuden vesikerrokseen (Kuva 28).

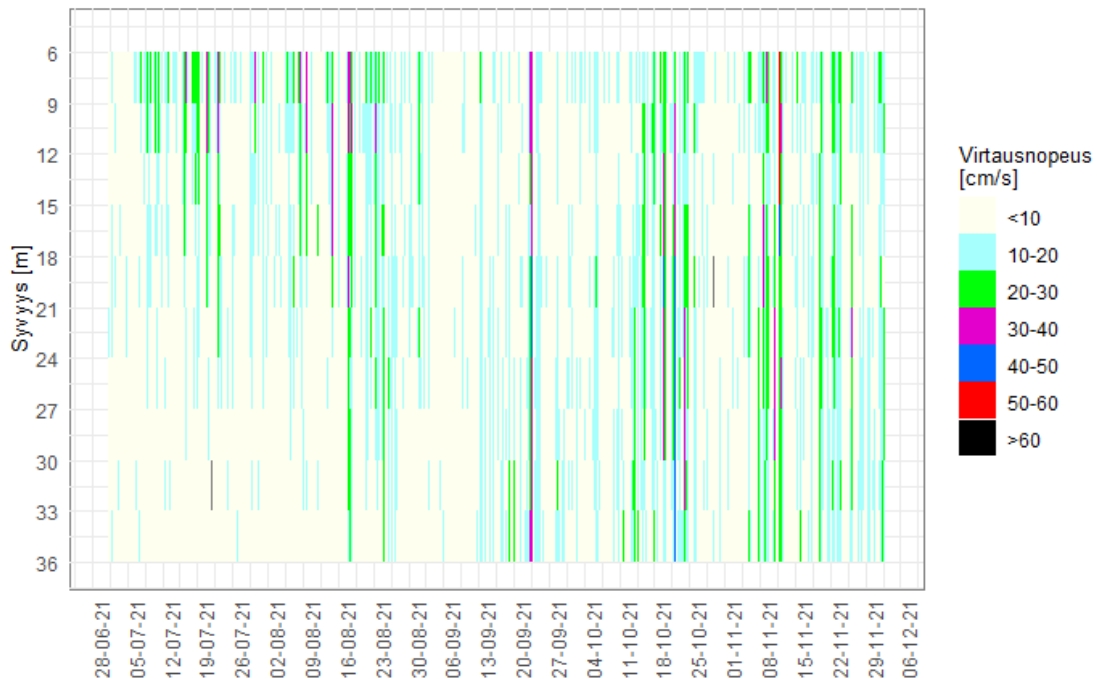


Kuva 27. Korran laitoksen virtausruusut 10° sektorijaolla[†] (vasen) ja sektorikohtaiset ajan suhteen normalisoidut nopeusjakaumat (oikea) A) 6–9 m, B) 9–12 m ja C) 12–15 m syvyydellä ajanjaksolla 1.7.-2.12.2021.

[†] Virtausruusun sektorit ilmaisevat virtauksen kulkusuuntaa eli suuntaa, johon vesimassa on menossa.



Kuva 28. Vesipatsaan virtausnopeusprofiili[‡] verkkokassin syvyydellä (6–18 m) Korran laitoksella 1.7.–2.12.2021.



Kuva 29. Koko vesipatsaan (6–36 m) virtausnopeusprofiili[‡] Korran laitoksella 1.7.–2.12.2021.

[‡] Ympäristöpöijun mittaustavasta johtuen virtausnopeudet on esitetty syvyyskerroksittain 3 metrin jaolla (ks. Kappale 4. Muu Korran laitoksen tutkimuslaitteisto)

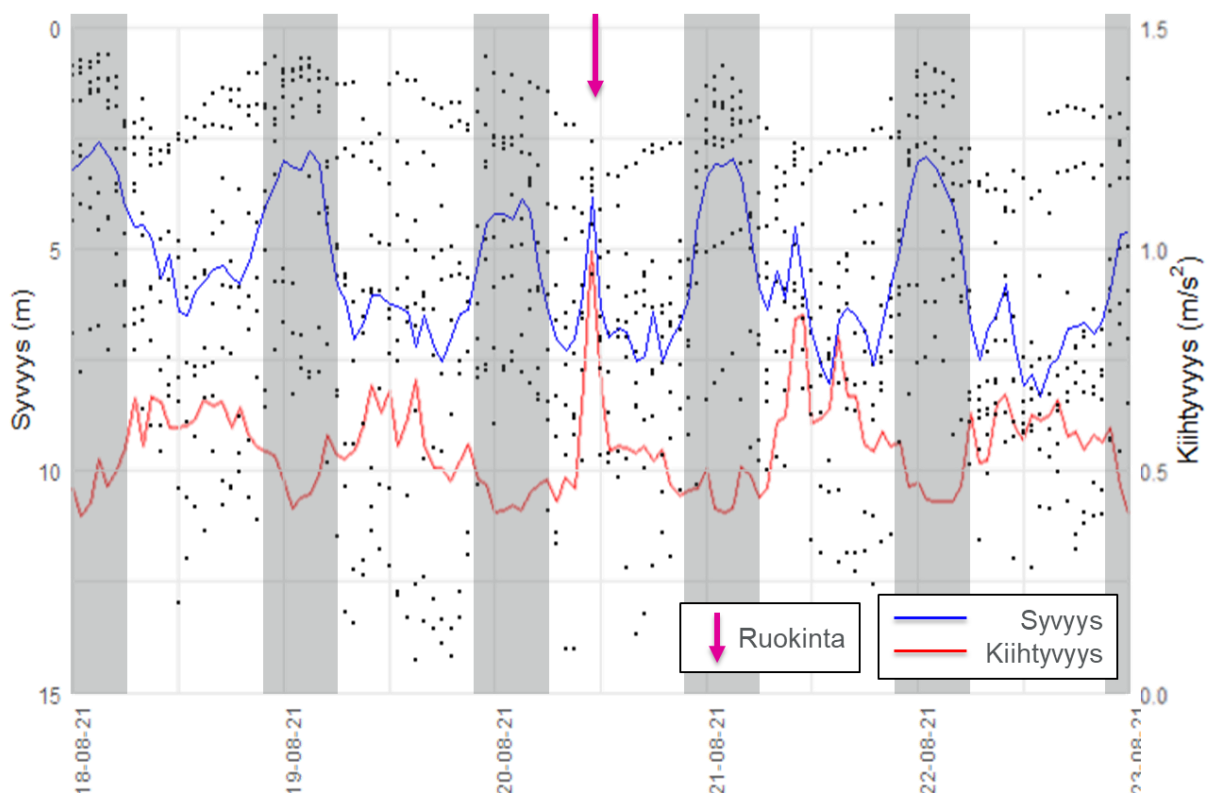
6. Tulokset

Tulosten osalta tässä raportissa esitetään telemetria-aineistoa, joka kuvaa tavanomaista kalan- kasvatustoimintaa normaaleissa ympäristöoloissa. Tulosten esittelyn ulkopuolelle on rajattu erityistapaukset kuten verkkoaltaan upotukset tai äkilliset muutokset ympäristöolosuhteissa (voimakas virtaus, vesipatsaan kerrostuneisuus, korkea tai matala veden lämpötila jne.). Näitä tekijöitä tullaan esittelemään myöhemmissä julkaisuissa.

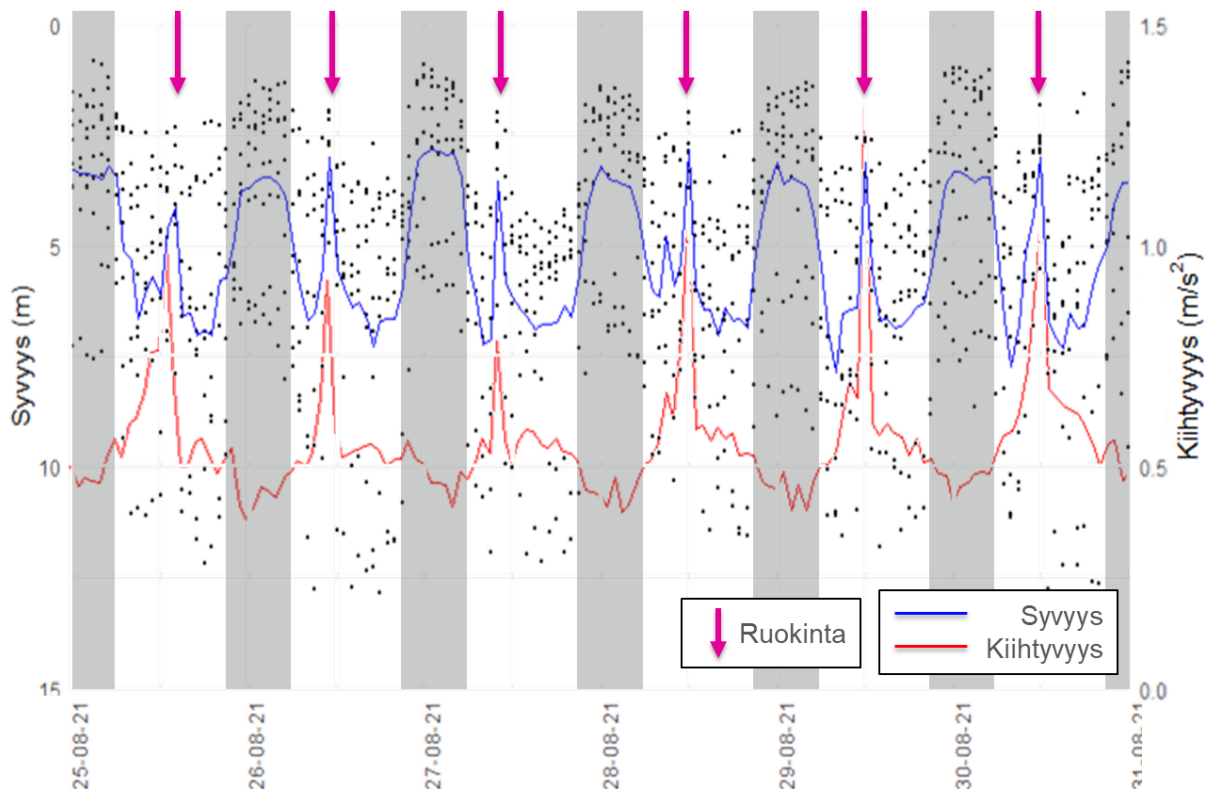
6.1. Kalojen vuorokausirytmäisyys – valon ja ruokinnan vaikutus

Vuorokausirytmisissä on havaittavissa selkeä säännönmukaisuus; kalat uivat lähempänä pintaa hämärän aikana ja syvemmällä valoisaan aikaan. Sama rytmi toistuu vuodenajasta riippumatta. Kalojen aktiivisuudessa on havaittavissa vaihtelua vuorokauden eri aikojen välillä siten, että kalat uivat hieman aktiivisemmin valoisaan kuin hämärään aikaan.

Kun kaloja ei voida syystä tai toisesta ruokkia, noudattaa kalojen syvyys ja kiihtyvyyden vuorokauden normaalia valo-hämäräsykliä (Kuva 30). Ruokinta rikkoo syklin siten, että kalat alkavat uimaan huomattavasti aktiivisemmin ja pyrkivät lähemmäs pintaa. Ruokinnan loputtua kalat palaavat takaisin ”normaaliin” vuorokausirytmiiin niin syvyyden kuin kiihtyvyydenkin osalta (Kuva 30). Havaintoaineiston perusteella ruokintaa seuraavana päivänä on havaittavissa pieni aktiivisuustason nousu, vaikka ruokintaa ei olisikaan.



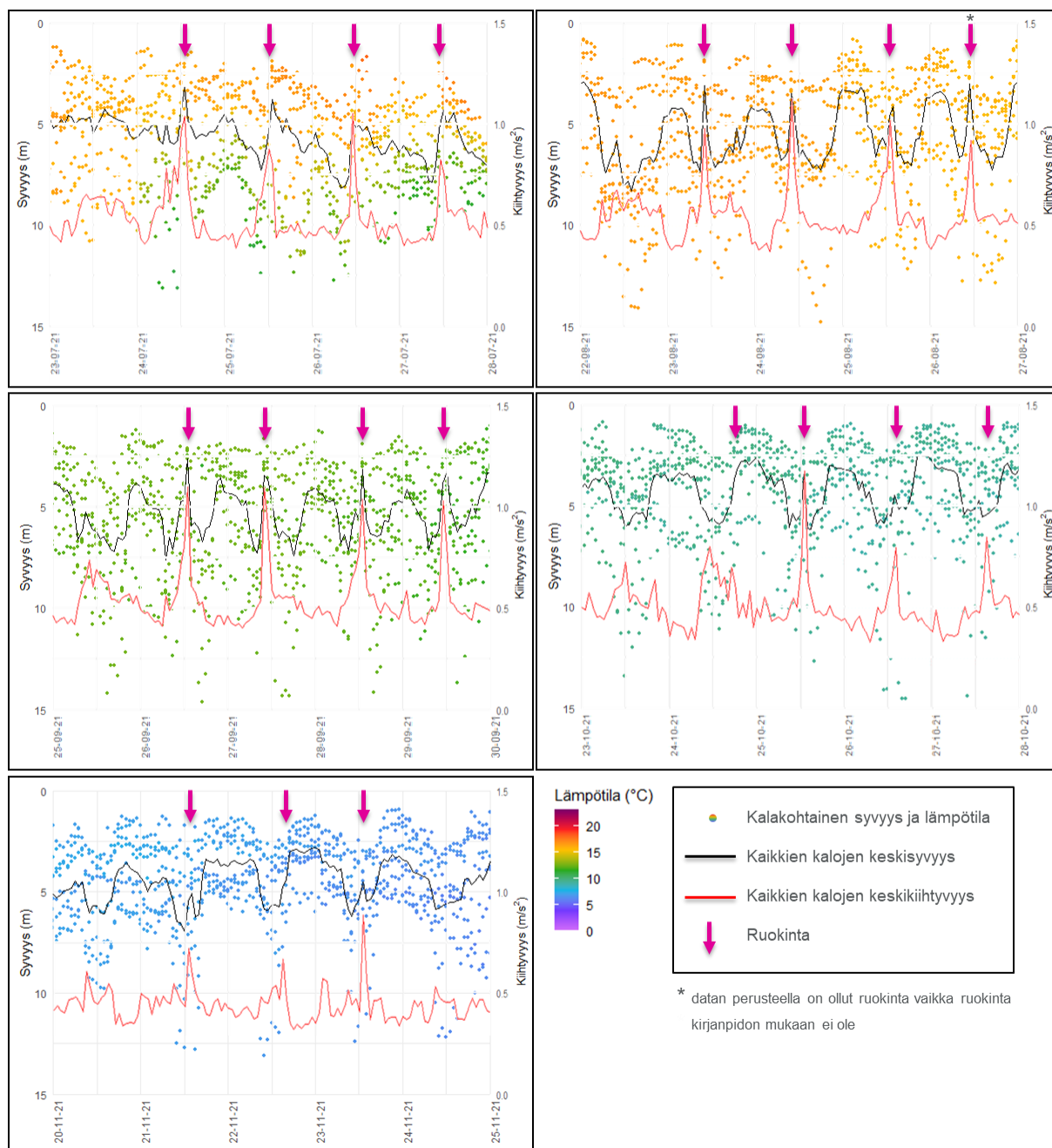
Kuva 30. Kalakohtaiset yksilölliset uintisyvyudet (mustat pisteet, tuntikeskiarvo) sekä kaikkien kalojen tuntikohtainen keskisyvyys (sininen viiva) ja -kiihtyvyyden (punainen viiva) välillä 18.–23.8.2022. Ajanjakso auringon laskusta -nousuun (hämäräjakso) on kuvattu harmaalla.



Kuva 31. Kalakohtaiset yksilölliset uintisyvytydet (mustat pisteet, tuntikeskiarvo) sekä kaikkien kalojen tuntikohtainen keskiyvyys (sininen viiva) ja -kiihtyvyys (punainen viiva) välillä 25.-31.8.2022. Ajanjakso auringon laskusta -nousuun (hämäräjakso) on kuvattu harmaalla.

Telemetria-aineistosta haettiin joka kuukaudelta (heinä-marraskuu) 5 vuorokauden tarkastelujakso, jossa kalankasvatuksen kannalta merkittävät ympäristöolosuhteet ovat saman kaltaiset. Merkittävänä kriteerinä oli, että kalankasvattaja on päässyt ruokkimaan kaloja normaalisti 3–4 peräkkäisenä päivänä. Peräkkäiset ruokintapäivät indikoivat, että tuulisuus ja aallokko eivät merkittävästi poikkea eri tarkastelujaksojen välillä, sillä kovassa kelissä kasvattaja on estynyt ruokkimasta kaloja. Näin ollen eri kuukausien tarkastelujaksojen pitäisi olla hyvinkin vertailukelpoisia keskenään.

Kalojen uintisyvyys ja -aktiivisuus vaihtelevat hyvin vähän eri kuukausien tarkastelujaksojen aikana (Kuva 32). Kalojen ”perusaktiivisuus” ruokintajaksojen ulkopuolella on noin $0,5 \text{ m/s}^2$ ja se nousee merkittävästi ruokinnan aikana hiipuen ruokinnan jälkeen takaisin ”perustasolle”. Veden viilennyttyä loka-marraskuussa vaikuttaa aktiivisuus alentuneen hieman niin ruokintojen aikana kuin niiden ulkopuolellakin.

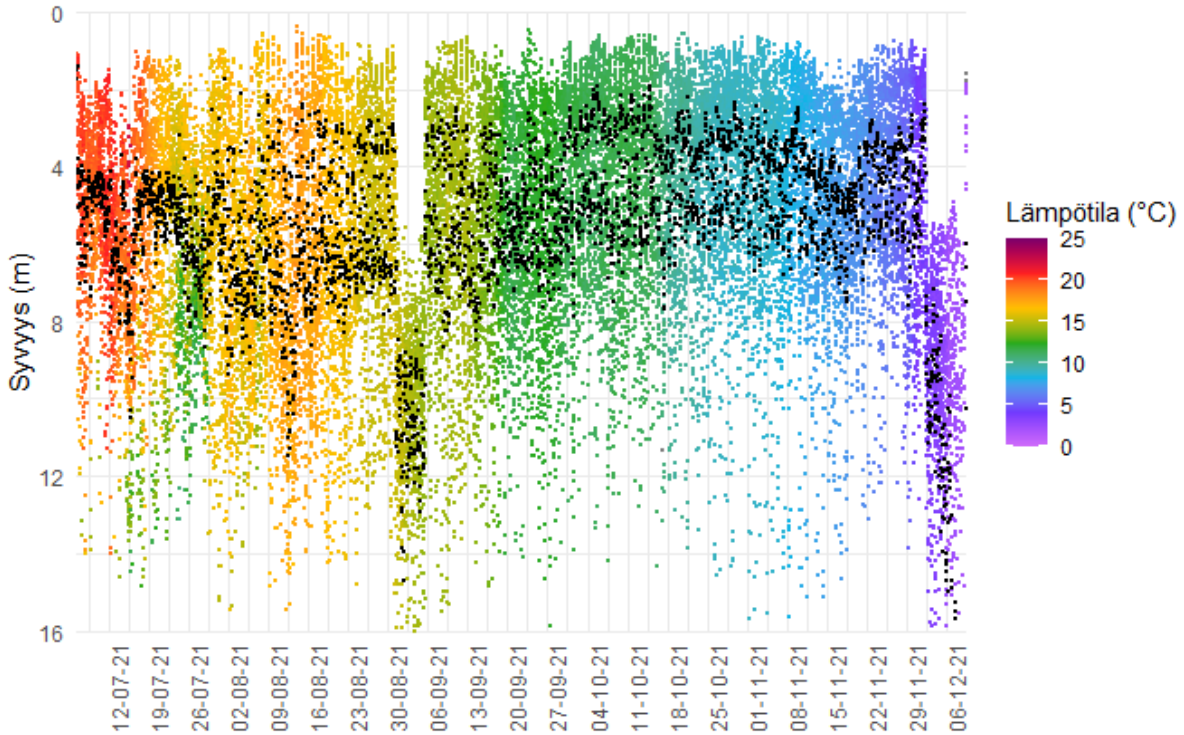


Kuva 32. Kalojen syvyys, lämpötila ja kiihtyvyyt tuntikohtaisina keskiarvoina 5 vrk ajan eri kuu-
kausina, kun kaloja on voitu ruokkia yhtäjaksoisesti 3–4 vuorokautena tarkastelujakson aikana.

6.2. Kalojen tilankäyttö

Korran verkkoaltaan sivun korkeus on 14 metriä, jonka pohjasta lähtee vielä 5 metriä syvä pohjakartio (Kuva 19). Teoriassa kaloilla on siis mahdollisuus hyödyntää vesipatsasta 0–19 metrin syvyydeltä. Liitteessä 1 on esitetty kalojen lämpötila- ja syvyytiedot kuukausittain.

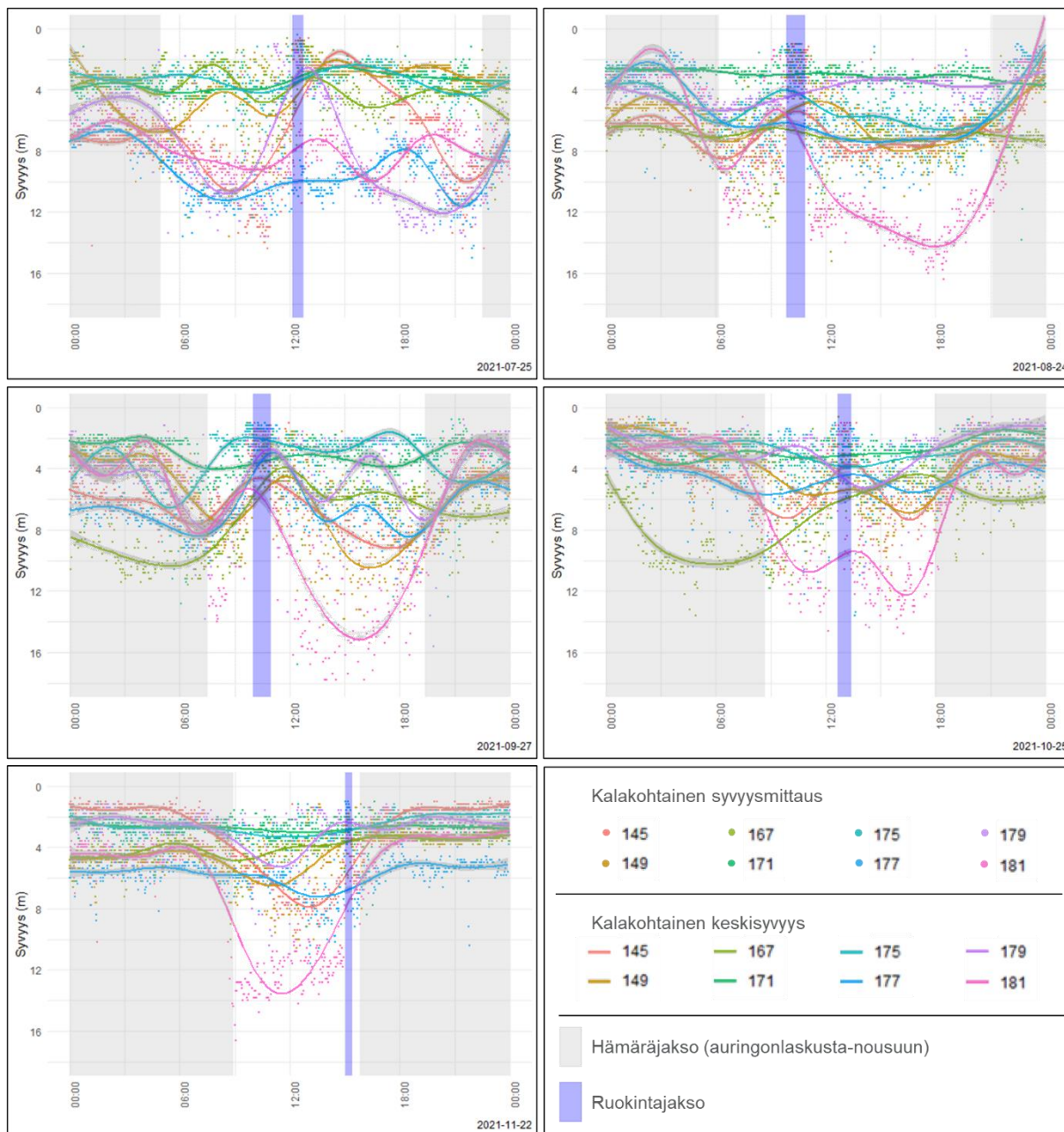
Valtaosa havainnoista on tehty syvyydellä 1–8 metriä (Kuva 33). Kalat kuitenkin hyödyntävät suurinta osaa vesipatsasta käyden yli 8 metrin syvyydellä päivittäin. Havaintoja syvyydellä 12–16 m on tehty lähes jokaisena päivänä tutkimusjakson aikana.



Kuva 33. Kalasensoreilla mitatut syvyydet (pisteen sijainti y-akselilla) ja lämpötilat (pisteen väri) Korran laitoksella 7.7.–9.12.2021. Mustat pisteet kuvaavat kaikkien sensorikalojen keskisyyvyyttä tunnin aikana. Laitos on ollut upotettuna 31.8.–5.9.2021 sekä 2.12–9.12.2021 välisinä aikoina.

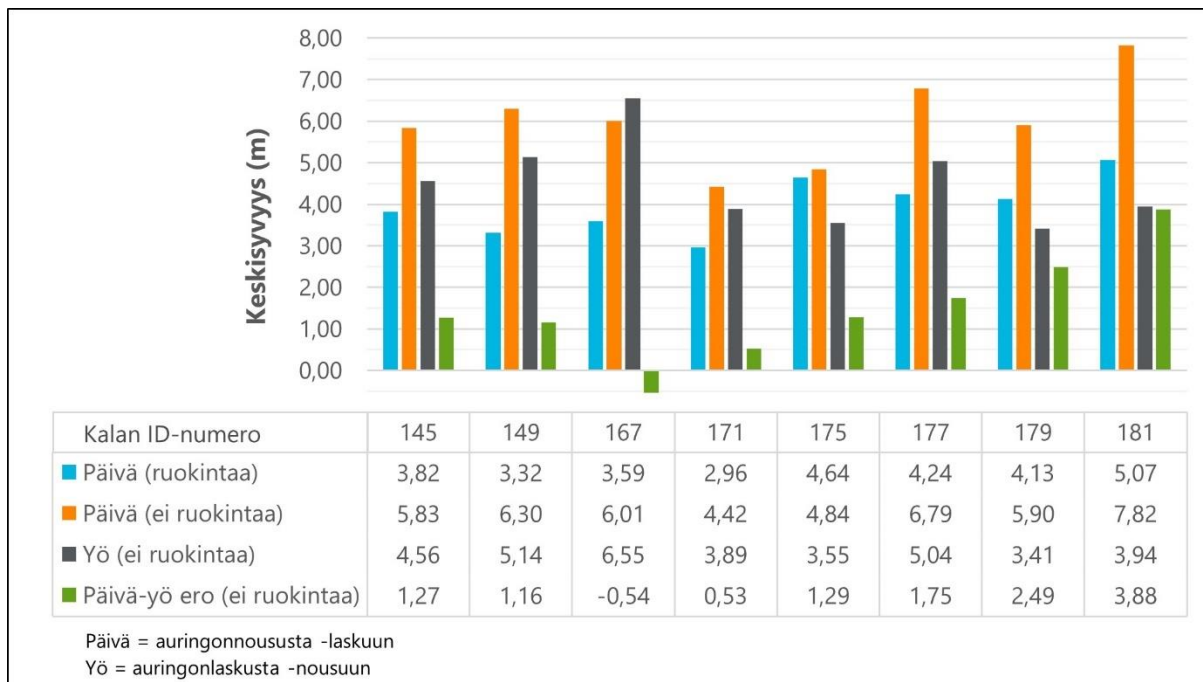
Kalojen tilankäytössä ja uintisyvyyksissä on suuria yksilökohtaisia eroja. Uintikäyttäytymistä ja uintisyvyyttä ohjaavat valo-hämäräsykli sekä ruokinnat. Kuvassa 34 on esitetty kalakohtaiset syvyydsmittaukset eri kuukausilta (heinä–marraskuu) yhden vuorokauden ajalta. Jokaisen kuukauden vuorokauden mittaiseksi ajanjaksoksi on valittu aiemmin esitetyn tarkkailujakson (Kuva 32) toinen ruokintapäivä. Kuvista voi havaita, että auringonnousulla ja -laskulla on suuri vaikutus kalojen uintisyvyyteen samoin ruokinnalla. Lisääntyvä valoisuus päivällä saa kalat uimaan syvemmälle, mikä voi selittyä ruoanetsinnän ja predaatoriskin vaihtokauppana (Davidsen ym., 2008). Syvemmällä vesipatsaassa on vähemmän valoa, jolloin predaatoriski pienenee, mutta ruoanetsintä vaikeutuu. Kalat nousevat lähelle pintaa ruokinnan ajaksi, minkä jälkeen ne palaavat takaisin syvemmälle.

Hämärään aikaan kalojen välinen uintisyvyyksien ero on pienempää ja kalat uivat ”tiivimässä”. Valon lisääntyessä päivällä kalojen uintisyvyyksien välinen ero lisääntyy ja kalat jakaantuvat tasaisemmin verkkoaltaaseen. Valoisan ajan lyhetessä loppuvuodesta kalat viettävät eniten enemmän aikaa lähellä pintaa (Kuva 34).



Kuva 34. Kalojen yksilölliset uintisyvyudet eri kuukausina.

Kalojen uintisyvyuksien yksilökohtaiset erot näkyvät koko kasvatusjakson ajalta kerätystä aineistosta (Kuva 35). Osa kaloista näyttää suosivat uintia lähempänä pintaa, kun taas osa hakeutuu selvästi syvemmälle verkkokassissa. Kalan 171 havaintojen keskisyvyys päivällä, kun ruokinta ei ollut käynnissä, oli 4,42 m, kun kalalla 181 vastaava uintisyvyys oli 7,82 m. Myös uintisyvyuden vaihtelussa valoisa-hämäräjaksojen välillä on suuria eroja. Neljällä kalalla syvyysvaihtelu yön ja päivän välillä on pientä (0,5–1,5 m), kahdella kohtalaista (1,5–2,5 m) ja yhdellä suurta (>2,5 m). Lisäksi yhdellä kalalla (ID = 167) yö-päivärytmi on niin sanotusti käänteinen, sillä kala ui päivällä matalammalla kuin yöllä.

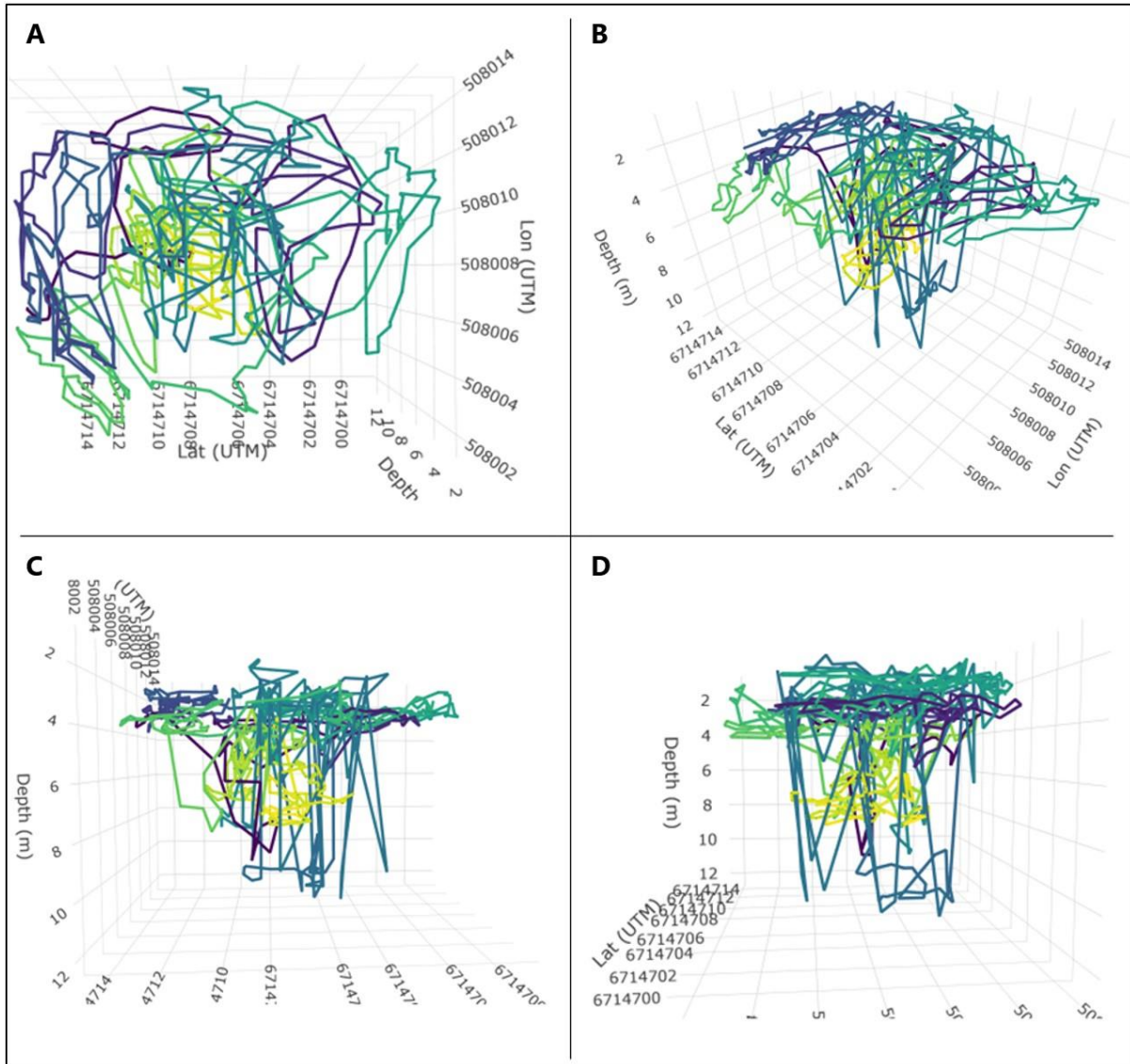


Kuva 35. Kalojen uintisyvyyksien keskiarvot tutkimusjakson aikana päivällä ja yöllä laitoksen ollessa pinnalla, kun kaloja joko ruokitaan tai ei ruokita.

Koska Korran telemetriajärjestelmässä on kolme vastaanotinta, mahdollistaa se havaintojen kolmiomittauksen ja kalojen sijainnin määrittämisen kolmiulotteisesti. Aineiston käsitteleminen kolmiomittausta varten onnistuu R ohjelmointikielellä ja siihen tehdyllä YAPS (*Yet Another Positioning Solver*) laajennuspaketilla. Kolmiomittauksen suorittaminen YAPS:illa on raskasta ja aikaa vievää. Tästä syystä tilankäytön tutkimiseen kolmiomittauksen avulla ei tässä raportissa paneuduta. Aineisto ja menetelmä on kuitenkin olemassa ja kolmiomittausta on testattu eri kaloille muutamina eri päivinä.

Kuvassa 36 on esitetty esimerkin vuoksi kalan 145 kolmiulotteinen reitti 7.7.2021 eri perspektiiveistä. Kuvassa viivan väri indikoi kellonaikaa reitin seuraamisen helpottamiseksi. Reitti *siksakkaa* johtuen siitä, että lähetyksiä tulee vain noin 3 minuutin välein. Mikäli lähetysväli olisi ollut vain muutamia sekunteja ei samanlaisia ”hyppäyksiä” reittiin olisi muodostunut ja kalan kulkema reitti olisi tarkemmin määritettävissä.

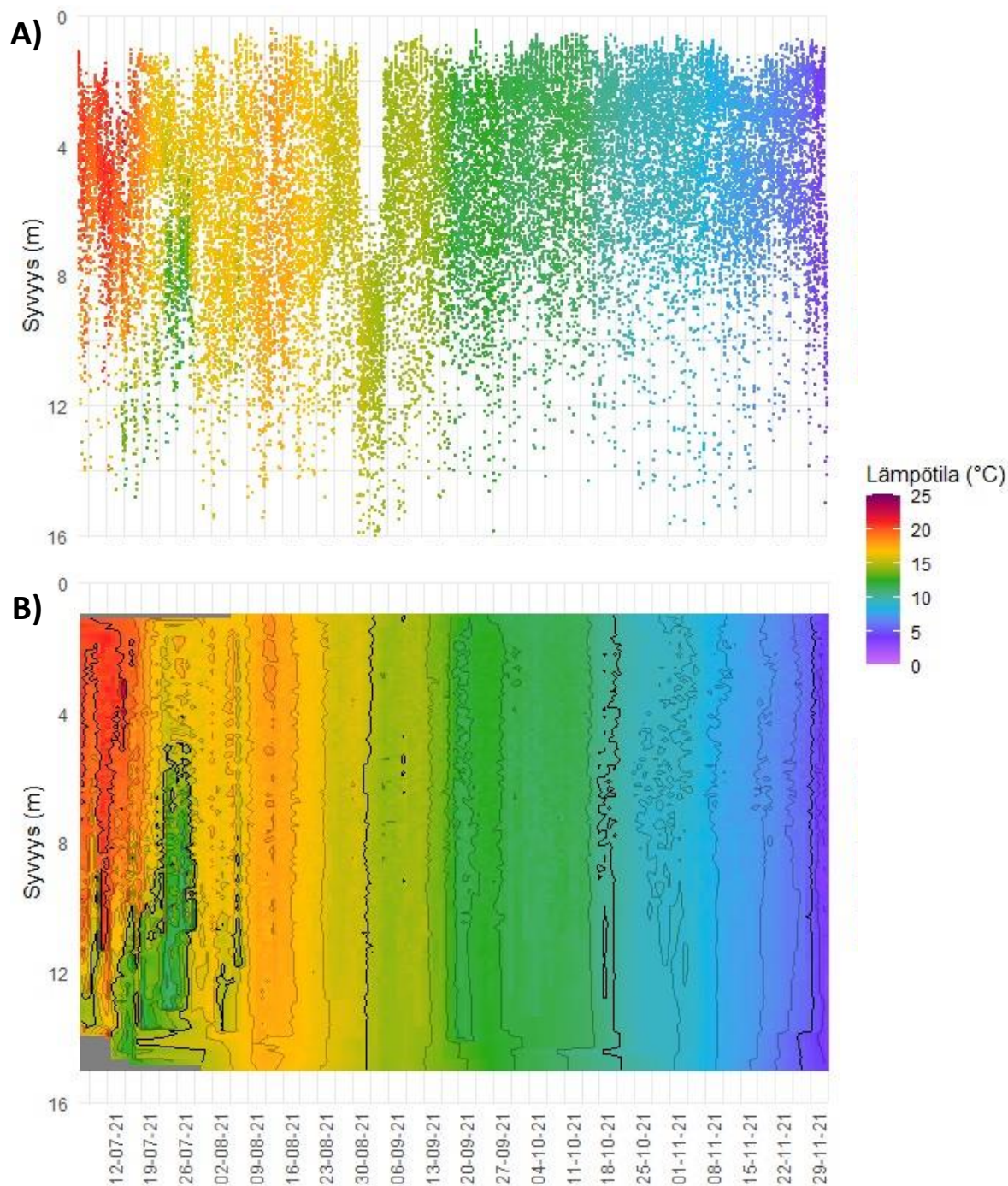
Päältä päin katsottuna (Kuva 36A) voidaan nähdä, että kyseisenä vuorokautena kala käyttää verkkoaltaan pinta-alaa hyvin hyödyksi, tehden laajaa reittiä pyöreän verkkoaltaan sisälle. Kyseisenä vuorokautena kala on ollut suurimman osan ajasta lähellä pintaa noin 0–4 m syvyydessä.



Kuva 36. Arvio kalan 145 kolmiulotteisesta sijainnista verkkoaltaassa 7.7.2021 eri perspektiiveistä: A) päältä; B) yläviistosta; C) ja D) sivulta. Viivan väri indikoi kellonaikaa reitin seuraamisen helpottamiseksi.

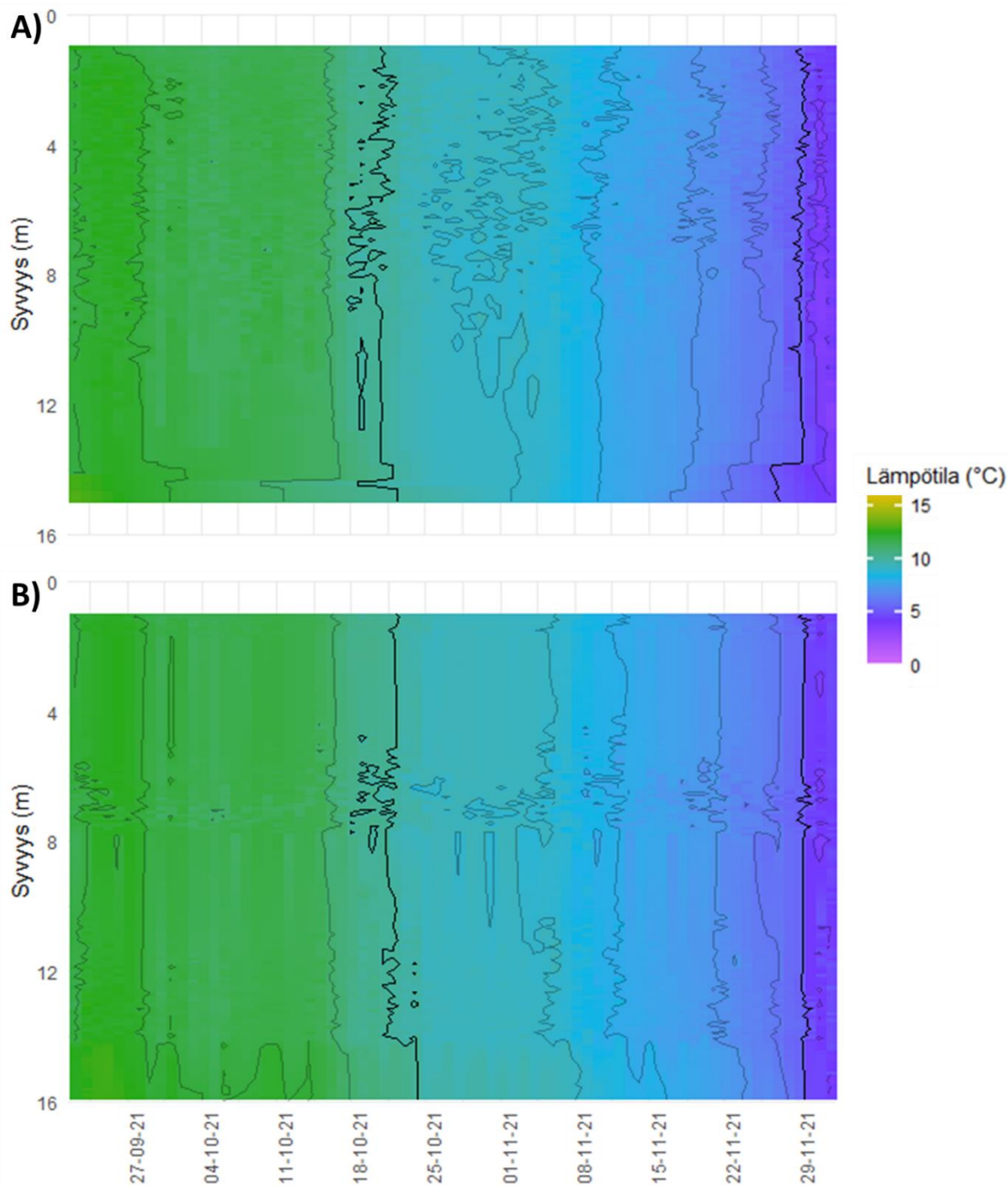
6.3. Lämpötila telemetriasensoreista

Korran laitoksella on saatu lämpötilatietoa sekä verkkokassiin kiinnitetyillä sensoreilla että kalloissa olevilla sensoreilla. Vaihtolämpöisinä eläiminä kalojen ruumiinlämpö on hyvin lähellä ympäröivän veden lämpötilaa, joskin mittauksissa voi olla pientä viivettä. Näin ollen kalasensoreilla mitattuja lämpötiloja voidaan hyödyntää koko vesipatsaan lämpötilaprofiilin mallintamiseen. Kuvassa 37A on esitetty kalasensoreilla mitatut lämpötilat eri syvyyksissä. Näiden avulla on voitu interpoloida koko vesipatsaan lämpötila (Kuva 37B). Kasvukauden aikana vesipatsaassa on ollut lämpötilan suhteen kerrostuneisuutta ainoastaan heinäkuussa, muuten lämpötila on ollut lähes saman lämpöistä pinnasta verkkoaltaan pohjaan saakka.



Kuva 37. A) Kalasensoreilla mitatut lämpötilat sekä B) kalasensoreiden mittaustulosten perusteella interpoloitu koko vesipatsaan lämpötilaprofiili syvyydellä 1–15 m Korran tutkimuslaitoksella 7.7.–2.12.2021. B) kuvan mustat viivat +5 °C jaolla ja haaleammat viivat +1 °C jaolla.

Vertaamalla kalasensoreilla mitattuja lämpötila verkkokassisensoreiden mittauksiin (Kuva 38) voidaan todeta, että molempien sensoreiden lämpötilat ovat hyvin lähellä toisiaan. Eroja syntyy lähinnä siitä, että verkkokassin lämpötilatietoja saadaan käytännössä vain 4 eri syvyydestä, kun taas kalasensoreilla saadaan lämpötiladataa lähes koko vesipatsaasta. Näin ollen kalasensoreiden lämpötilamittauksilla suoritettu interpolointi antaa tarkemman resoluution verrattuna verkkoaltaan sensoreihin.



Kuva 38. Vesipatsaan lämpötilaprofiili syvyydellä 1–15 m Korran tutkimuslaitoksella 22.9.–2.12.2021. Arvot saatu interpoloimalla A) kaloissa; B) verkkokassissa olevien sensorimittausten arvoja. Musta viiva kuvan oikeassa laidassa +5 °C; musta viiva kuvan keskikohdassa +10 °C. Haaleammat viivat yhden celsiusasteen jaolla.

7. Yhteenveto

Tämän tutkimuksen tarkoitus on ollut kuvata kalanviljelyyn käytössä olevia biosensoreita, niillä tehtävää tutkimusta sekä kerätä telemetrialaitteiston käyttökokemuksia kaupallisen mittakaavan kalankasvatuslaitoksella merellä. Lisäksi tutkimuksen tavoitteena oli kerätä kattava havaintoaineisto kaloista ja ympäristöolosuhteista sekä kuvata kirjolohen käytöstä yhden merikasvatuskauden ajan. Havaintoaineiston perusteella pyrittiin luomaan kalojen käyttäytymiselle niin kutsuttu perustaso, jota vasten voidaan jatkossa verrata erilaisia ympäristömuuttujia tai -ärsykeitä, kuten esimerkiksi ympäristöolosuhteiden äärioloja (kova virtaus, poikkeuksellisen korkea/alhainen veden lämpötila, aallokko), kalankasvatuslaitoksen upotuksen vaikutuksia tai haittaeläimien aiheuttamia häiriötä.

Hankittu telemetriajärjestelmä osoittautui erittäin toimivaksi upotettavalle kalankasvatuslaitokselle sekä hyvin soveltuvaksi vesiviljelytutkimukseen. Laitteiston käyttö, tiedonkeruu ja datan talteen saanti oli yksikertaista ja luotettavaa. Sensoreiden valittu mittausväli sekä -muuttujat antoivat erittäin kattavan havaintoaineiston kasvatuskaudelta 2021.

Telemetriadata yhdessä Korran laitoksen välittömässä läheisyydessä suoritettuna ympäristödatankeruun kanssa antaa poikkeuksellisen kattavan aineiston, jolla voidaan jatkossa arvioida sääilmiöiden, uusien viljelytekniikoiden sekä kasvatusta mahdollisesti muuten haittaavien tekijöiden vaikutusta kirjolohen käyttäytymiseen ja hyvinvointiin. Tieto on arvokasta, mikäli vesiviljelyä aiotaan siirtää uudentyypisille tuotantoalueille (esim. avoimille, aallokkoisille tai kovan virtauksen alueille) tai mikäli kalankasvatuksessa halutaan ottaa käyttöön uudenlaisia viljelytekniikoita (upotettavat tai puolisoljetut laitokset).

Tutkimuksesta saatiin myös arvokasta lisätietoa telemetriasensorin leikkauksesta nukutetun kirjolohen ruumiinonteloon, leikkauksesta toipumisesta sekä sensoreiden takaisinsaannista tuotantomittakaavan parven seasta. Sensorien takaisinsaanti osoittautui erittäin haastavaksi ja vain yksi sensori kahdeksasta onnistuttiin löytämään perkuiden yhteydessä.

Tutkimuksen tarkoituksena oli kuvata kirjolohen käyttäytymisen perustaso merellä sijaitsevassa kaupallisen mittakaavan verkkoaltaassa. Kerätystä aineistoista oli nähtävissä hyvin selkeitä vuorokausirytmiejä, joita valo ja ruokinnat ohjaavat. Valo-hämäräsykli vaikuttaa kirjolohen uintiin siten, että kalat uivat lähempänä pintaa yöllä kuin päivällä. Ruokinnat rikkovat tätä rytmiä niin, että ruokinnan ajaksi kalat nostavat aktiivisuustasoaan ja hakeutuvat lähemmäksi pintaa. Ruokinnan loputtua kalojen aktiivisuus laskee lähelle aiempaa ja kalat palaavat takaisin syvempään veteen. Kalojen välillä oli yksilöllistä vaihtelua uintisyvyyksissä. Jotkin kalat uivat sekä päivällä että yöllä paljon keskimääräistä syvemmällä ja niiden uintisyvyyden vaihteluissa oli isompaa syvyysvaihtelua. Seitsemän kalaa kahdeksasta uivat päivällä syvemmällä kuin yöllä ja vain yhdellä kalalla vuorokausirytmie oli niin sanotusti käänteinen, eli se ui päivisin lähempänä pintaa.

Kirjolohet uivat valtaosan ajasta 0–8 metrin syvyydessä käyden ajoittain myös syvemmällä. Tämän tiedon valossa erityisen syvät verkkoaltaat eivät välttämättä vaikuta merkittävästi tuotantoparven tiheyteen, vaikka laskennallisesti kalatiheys olisikin huomattavasti pienempi.

Kirjolohien aktiivisuus pysyi tutkimusjakson ajan melko tasaisena vuodenajasta riippumatta. Veden viiletessä kasvatuskauden loppua kohden aktiivisuus hieman alenee, mutta ei paljon. Perusaktiivisuustaso pysyi ruokintojen ulkopuolella noin $0,5 \text{ m/s}^2$ lähetyillä ja aktiivisuus nousi merkittävästi ruokinnan ajaksi.

Kattavaa telemetria-aineistoa voidaan soveltaa jatkossa entistä paremmin, kunhan aktiivisuuden ja uintinopeuden sekä kalan fysiologian välille voidaan luoda yhteys. Aktiivisuusdatasta

tulisi olla mahdollista johtaa uintinopeus, kunhan aktiivisuus ja uintinopeus saadaan mitattua tutkimusoloissa tarkasti ja linkitettyä toisiinsa. Uintinopeusmittaukset tulee suorittaa eri kokoisille kaloille, sillä sama aktiivisuustaso voi merkitä kalan koosta riippuen täysin eri uintinopeutta. Uintinopeuden lisäksi on syytä tutkia, milloin uinnin edellyttämä lihastyö muuttuu aerobisesta anaerobiseksi, jotta aktiivisuusaineistosta voidaan havaita, millä tasolla kala alkaa väsyä.

Tutkimuksen aikana nousi esiin kysymyksiä muun muassa kalan hakeutumisesta tiettyihin virtausolosuhteisiin tai lämpötilakerroksiin. Tai miten kala käyttäytyy tilanteessa, jossa vesipatsas on lämpötilan suhteen kerrostunutta? Lisäksi herää kysymys voisiko lämpötilan ja aktiivisuustason seurannalla entisestään tehostaa esimerkiksi ruokintoja.

Koska kalan ruumiinonteloihin asennetulla sensorilla saadaan hyvin kattava tieto vesipatsaan lämpötilasta voisi telemetriaa hyödyntää vesiviljelyn ulkopuolella rajatuilla vesialueilla (joki, lampi, pieni järvi, patoallas, vesivoimaloiden läheisyydessä) ei vain kalojen liikkeen, mutta vesialueen lämpötilaprofiilin kartoittamiseen. Tekniikan avulla voitaisiin saada pitkältä aikaväliltä todella kattavaa tietoa vesialueiden lämpötilaprofiileista, kalojen vuodenaikaisista liikkeistä sekä kutu ja syönnösalueista.

Viitteet

- Arechavala-Lopez, P., Lankheet, M.J., Díaz-Gil, C., Abbink, W. & Palstra, A.P. 2021. Swimming activity of gilthead seabream (*Sparus aurata*) in swim-tunnels: acoustic accelerometry, oxygen consumption and body motion. *Frontiers in Animal Science* 2(25).
- Brijs, J., Sandblom, E., Axelsson, M., Sundell, K., Sundh, H., Huyben, D., Broström, R., Kiessling, A., Berg, C. & Gräns, A. 2018. The final countdown: Continuous physiological welfare evaluation of farmed fish during common aquaculture practices before and during harvest. *Aquaculture* 495: 903–911.
- Brijs, J., Sandblom, E., Axelsson, M., Sundell, K., Sundh, H., Kiessling, A., Berg, C. & Gräns, A. 2019. Remote physiological monitoring provides unique insights on the cardiovascular performance and stress responses of freely swimming rainbow trout in aquaculture. *Scientific reports* 9(1): 1–12.
- Brown, R.S., Cooke, S.J., Wagner, G.N. & Eppard, M.B. 2010. Methods for surgical implantation of acoustic transmitters in juvenile salmonids. Prepared for the US Army Corps of Engineers, Portland District. Contract DE-AC25e76RL01830. 68 p.
- Brownscombe, J.W., Cooke, S.J. & Danylchuk, A.J. 2017. Spatiotemporal drivers of energy expenditure in a coastal marine fish. *Oecologia* 183(3): 689–699.
- Burgetz, I.J., Rojas-Vargas, A.N.I.B.A.L., Hinch, S.G. & Randall, D.J. 1998. Initial recruitment of anaerobic metabolism during sub-maximal swimming in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *The Journal of Experimental Biology* 201(19): 2711–2721.
- Chambers, M.D. 2013. Research and development of steelhead trout *Oncorhynchus mykiss* aquaculture in sea cages. Dissertation. University of New Hampshire, USA. 140 p.
- Carbonara, P., Alfonso, S., Dioguardi, M., Zupa, W., Vazzana, M., Dara, M., Spedicato, M.T., Lembo, G. & Cammarata, M. 2021. Calibrating accelerometer data, as a promising tool for health and welfare monitoring in aquaculture: Case study in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) in conventional or organic aquaculture. *Aquaculture Reports* 21: 100817.
- Cooke, S.J., Hinch, S.G., Wikelski, M., Andrews, R.D., Kuchel, L.J., Wolcott, T.G. & Butler, P.J. 2004. Biotelemetry: a mechanistic approach to ecology. *Trends in ecology & evolution* 19(6): 334–343.
- Davidson, J.G., Plantalech Manel-la, N., Økland, F., Diserud, O.H., Thorstad, E.B., Finstad, B., Sivertsgård, R., McKinley, R.S. & Rikardsen, A.H. 2008. Changes in swimming depths of Atlantic salmon *Salmo salar* post-smolts relative to light intensity. *Journal of Fish Biology* 73(4): 1065–1074.
- Ehrenberg, J.E. & Steig, T.W. 2002. A method for estimating the “position accuracy” of acoustic fish tags. *ICES Journal of Marine Science* 59(1) 140–149.
- Evira. 2016. Tarkastus ja näytteenotto-ohje vesiviljelylaitoksia valvoville eläinlääkäreille. Vesiviljelylaitosten valvontaopas. Haettu 18.5.2021 https://www.ruokavirasto.fi/global-asets/tietoa-meista/asiointi/oppaat-ja-lomakkeet/viljelijat/elainten-pito/elainten-terveys/kalanviljelylaitosten-tarkastusopas_vers6_2016.pdf.

- Føre, M., Frank, K., Dempster, T., Alfredsen, J.A. & Høy, E. 2017. Biomonitoring using tagged sentinel fish and acoustic telemetry in commercial salmon aquaculture: a feasibility study. *Aquacultural Engineering* 78: 163–172.
- Føre, M., Svendsen, E., Alfredsen, J.A., Uglem, I., Bloecher, N., Sveier, H., Sunde, L.M. & Frank, K. 2018. Using acoustic telemetry to monitor the effects of crowding and delousing procedures on farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture* 495: 757–765.
- Føre, M., Svendsen, E., Økland, F., Gräns, A., Alfredsen, J.A., Finstad, B., Hedger, R.D. & Uglem, I. 2021. Heart rate and swimming activity as indicators of post-surgical recovery time of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Animal Biotelemetry* 9(1): 1–13.
- Gamperl, A.K., Zrini, Z.A. & Sandrelli, R.M. 2021. Atlantic salmon (*Salmo salar*) cage-site distribution, behavior, and physiology during a Newfoundland heat wave. *Frontiers in physiology* 1269.
- Hassan, W., Føre, M., Urke, H.A., Kristensen, T., Ulvund, J. B. & Alfredsen, J.A. 2019. System for real-time positioning and monitoring of fish in commercial marine farms based on acoustic telemetry and internet of fish (iof). In *The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference*. OnePetro.
- Hellström, G., Klaminder, J., Jonsson, M., Fick, J. & Brodin, T. 2016. Upscaling behavioural studies to the field using acoustic telemetry. *Aquatic Toxicology* 170: 384–389.
- Hvas, M., Folkedal, O. & Oppedal, F. 2020. Heart rate bio-loggers as welfare indicators in Atlantic salmon (*Salmo salar*) aquaculture. *Aquaculture* 529: 735630.
- Jepsen, N., Schreck, C., Clements, S. & Thorstad, E. B. 2005. A brief discussion on the 2% tag/bodymass rule of thumb. *Aquatic telemetry: advances and applications*. In: Spedicato, M.T., Lembo, G. & Marmulla, G. (eds.). *Aquatic telemetry: advances and applications*. Proceedings of the Fifth Conference on Fish Telemetry held in Europe. Rome, FAO/COISPA. Ustica, Italy, 9–13 June 2003. p. 255–259.
- Kolarevic, J., Aas-Hansen, Ø., Espmark, Å., Baeverfjord, G., Terjesen, B.F. & Damsgård, B. 2016. The use of acoustic acceleration transmitter tags for monitoring of Atlantic salmon swimming activity in recirculating aquaculture systems (RAS). *Aquacultural engineering* 72: 30–39.
- Kolarevic, J., Calduch-Giner, J., Espmark, Å.M., Evensen, T., Sosa, J. & Pérez-Sánchez, J. 2021. A Novel Miniaturized Biosensor for Monitoring Atlantic Salmon Swimming Activity and Respiratory Frequency. *Animals* 11(8): 2403.
- Korsøen, Ø.J., Dempster, T., Oppedal, F. & Kristiansen, T.S. 2012. Individual variation in swimming depth and growth in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) subjected to submergence in sea-cages. *Aquaculture* 334: 142–151.
- Leclercq, E., Zerafa, B., Brooker, A.J., Davie, A. & Migaud, H. 2018. Application of passive-acoustic telemetry to explore the behaviour of ballan wrasse (*Labrus bergylta*) and lumpfish (*Cyclopterus lumpus*) in commercial Scottish salmon sea-pens. *Aquaculture* 495: 1–12.
- Macaulay, G., Warren-Myers, F., Barrett, L.T., Oppedal, F., Føre, M. & Dempster, T. 2021. Tag use to monitor fish behaviour in aquaculture: a review of benefits, problems and solutions. *Reviews in Aquaculture* 13(3): 1565–1582.

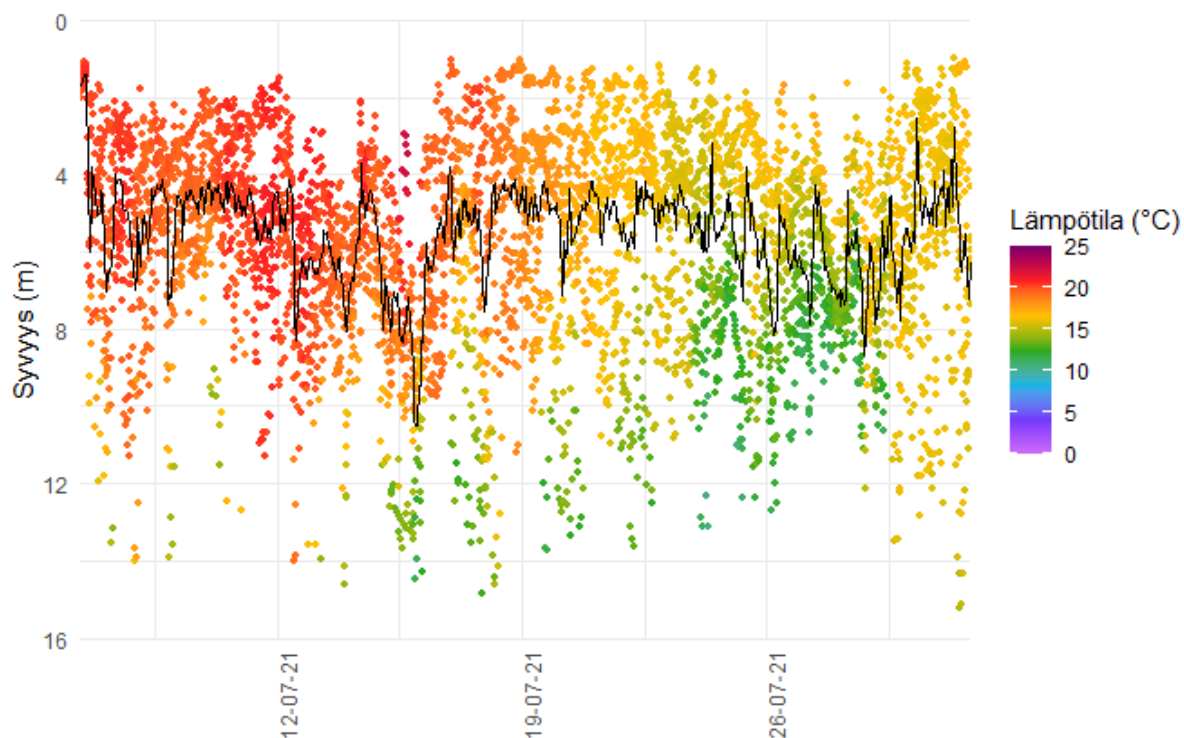
- Macaulay, G., Wright, D., Oppedal, F. & Dempster, T. 2020. Buoyancy matters: Establishing the maximum neutral buoyancy depth of Atlantic salmon. *Aquaculture* 519: 734925.
- Muñoz, L., Aspillaga, E., Palmer, M., Saraiva, J.L. & Arechavala-Lopez, P. 2020. Acoustic telemetry: a tool to monitor fish swimming behavior in sea-cage aquaculture. *Frontiers in Marine Science* 645.
- National Physical Laboratory. 2000. Underwater Acoustics Technical Guides - Speed of Sound in Sea-Water. National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, UK, TW11 0LW. Haettu 2.2.2022. https://www.comb-tec.com/library/technical_papers/speedsw.pdf.
- Niukko, J. & Kankainen, M. 2021. Vedenlaadun mittauksia kalankasvatustiloissa: Havaintoja automaattisista mittareista Saaristomerellä 2019–2020. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 41/2021. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 39 s.
- Rahkonen, R., Vennerström, P., Rintamäki, P. & Kannel, R. 2012. Terve kala: Tautien ennaltaehkäisy, tunnistus ja hoito. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos. Helsinki. 139 s.
- Reubens, J., Aarestrup, K., Meyer, C., Moore, A., Okland, F. & Afonso, P. 2021. Compatibility in acoustic telemetry. *Animal Biotelemetry* 9(1): 1–6.
- Rillahan, C., Chambers, M.D., Howell, W.H. & Watson III, W.H. 2009. A self-contained system for observing and quantifying the behavior of Atlantic cod, *Gadus morhua*, in an offshore aquaculture cage. *Aquaculture* 293(1-2): 49–56.
- Rillahan, C., Chambers, M. D., Howell, W. H., & Watson III, W. H. 2011. The behavior of cod (*Gadus morhua*) in an offshore aquaculture net pen. *Aquaculture*, 310(3–4), 361–368.
- Svendsen, E., Føre, M., Økland, F., Gräns, A., Hedger, R.D., Alfredsen, J.A., Uglem, I., Rosten, C., M., Frank, K., Erikson, U. & Finstad, B. 2021. Heart rate and swimming activity as stress indicators for Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture* 531: 735804.
- Summerfelt, R.C. & Smith, L. 1990. Anesthesia, surgery, and related techniques. In: Schreck C.B. & Moyle P.B. (eds.). *Methods for fish biology*. American Fisheries Society, Bethesda, MD. pp. 213–272.
- Ulvund, J.B., Engebretsen, S., Alfredsen, J A., Kristensen, T., Urke, H.A. & Jansen, P.A. 2021. Behavioural response of farmed Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) to artificial underwater lights: Wavelet analysis of acoustic telemetry data. *Aquacultural Engineering* 95: 102196.
- Warren-Myers, F., Hvas, M., Vågseth, T., Dempster, T. & Oppedal, F. 2021. Sentinels in Salmon Aquaculture: Heart Rates Across Seasons and During Crowding Events. *Frontiers in physiology* 2086.
- Whitford, M., & Klimley, A.P. 2019. An overview of behavioral, physiological, and environmental sensors used in animal biotelemetry and biologging studies. *Animal Biotelemetry* 7(1): 1–24.
- Winter, J.D. 1996. Advances in underwater biotelemetry. In: Murphy, B.R. & Willis, D.W. (eds.). *Fisheries Techniques*, 2nd Edition. American Fisheries Society. Bethesda, Maryland. pp. 555–590.

- Wright, D.W., Stien, L.H., Dempster, T. & Oppedal, F. 2019. Differential effects of internal tagging depending on depth treatment in Atlantic salmon: a cautionary tale for aquatic animal tag use. *Current Zoology* 65(6): 665–673.
- Zupa, W., Alfonso, S., Gai, F., Gasco, L., Spedicato, M.T., Lembo, G. & Carbonara, P. 2021. Calibrating accelerometer tags with oxygen consumption rate of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and their use in aquaculture facility: a case study. *Animals* 11(6): 1496.

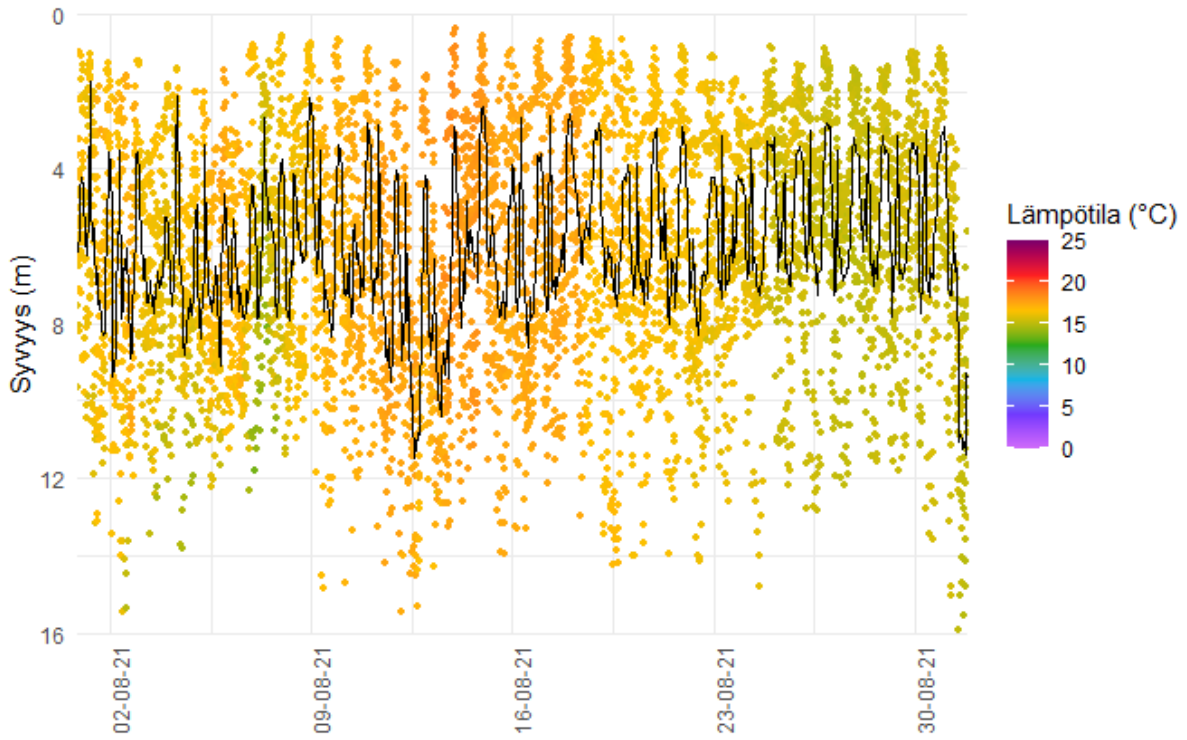
Liitteet

Liite 1 – Kalojen keskisyyvyys ja lämpötila

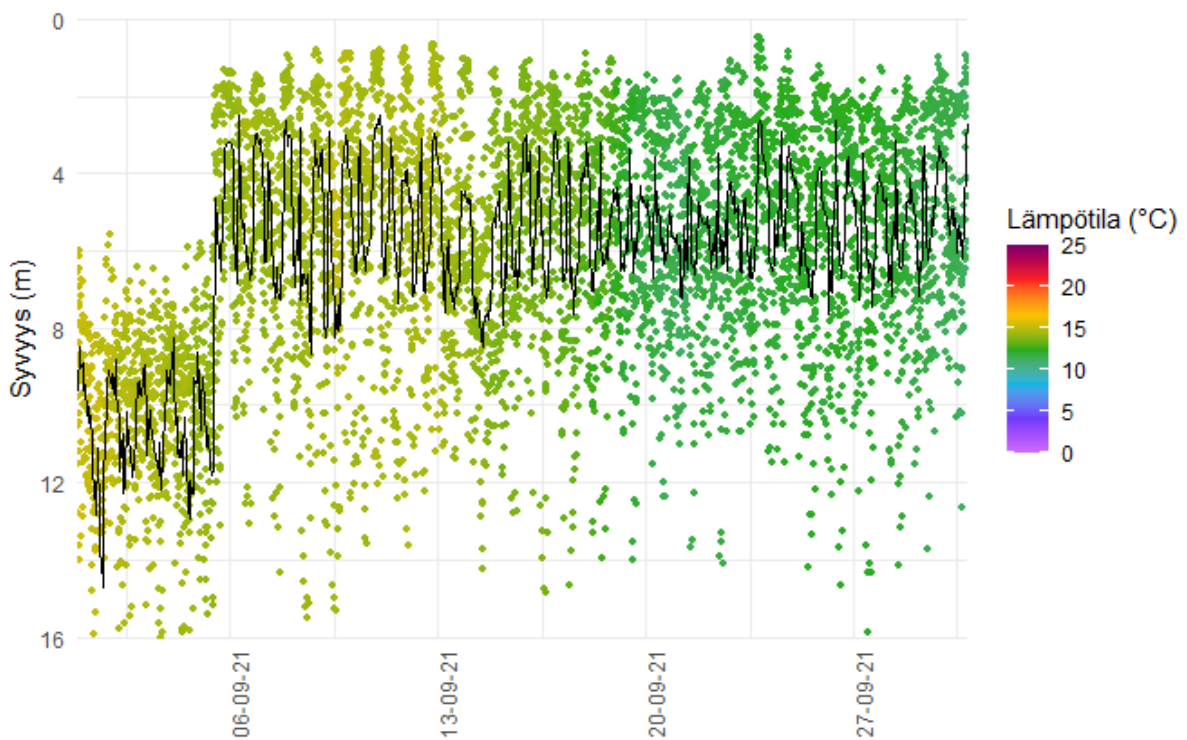
Liitteen 1 kuvissa on esitetty kalojen yksittäiset lämpötilamittaukset (väritetyt pisteet) sekä tunnikohtainen keskiarvo kaikkien kalojen syvyydestä (musta viiva). Lämpötilamittauksen sijainti pystyakselilla kertoo mittaussyvyyden ja väri indikoi mitattua lämpötilaa. Lämpötilan väriskaala on sama kaikissa kuvissa. Kuvat on jaettu aikasarjoihin kuukausien mukaan.



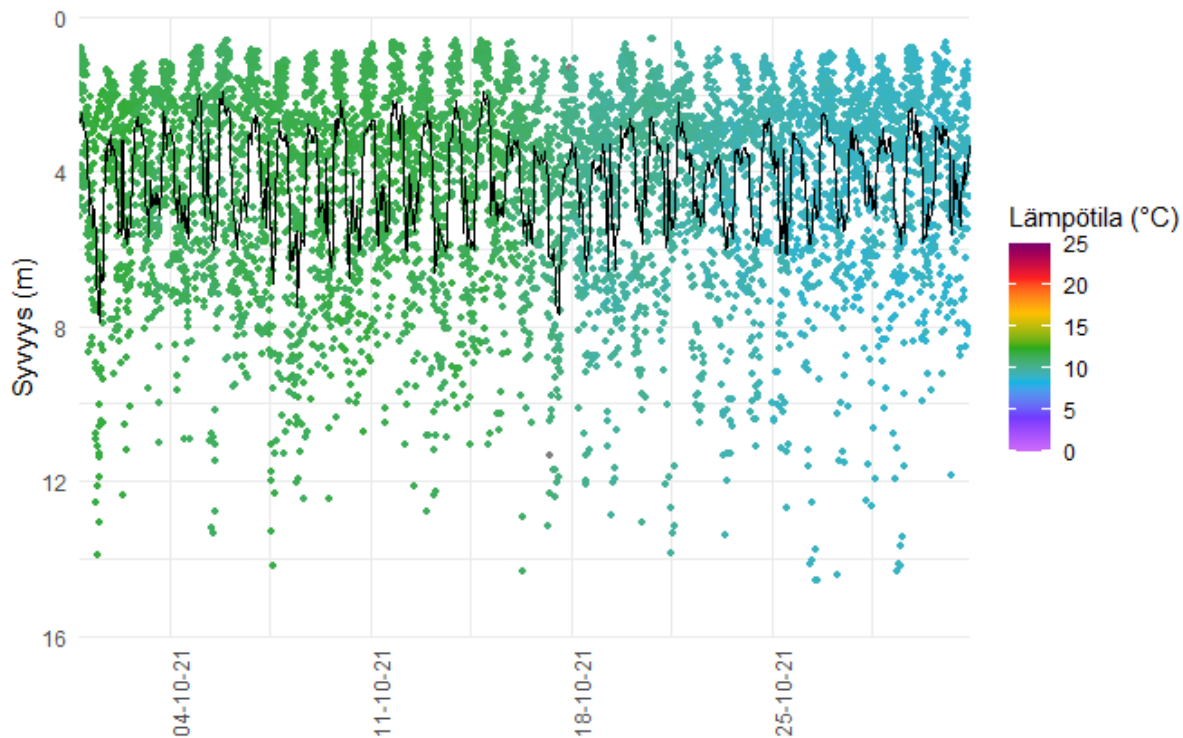
Kuva 1. Kalasensoreista saadut syvyys-/lämpötilamittaukset (väritetyt pisteet) sekä tuntikohtainen keskiarvo kaikkien kalojen syvyydestä (musta viiva). Heinäkuu 2021.



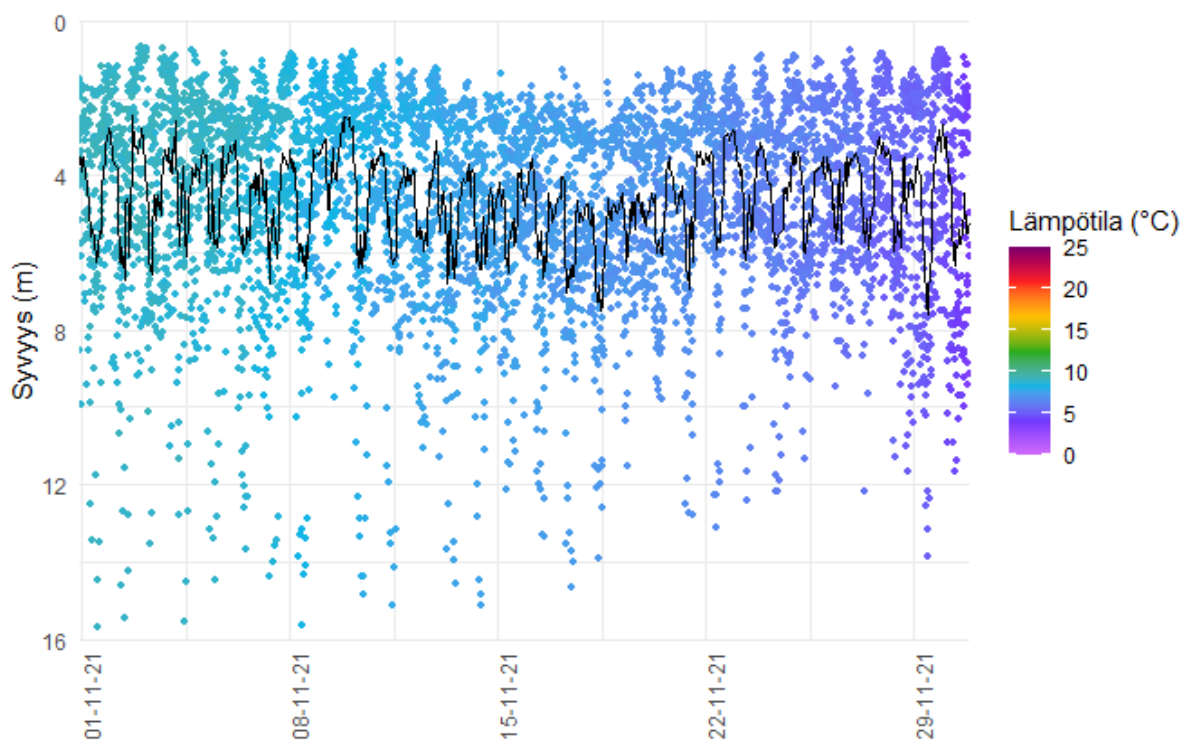
Kuva 2. Kalasensoreista saadut syvyys-/lämpötilamittaukset (väritetyt pisteet) sekä tuntikoh-
tainen keskiarvo kaikkien kalojen syvyydestä (musta viiva). Elokuu 2021.



Kuva 3. Kalasensoreista saadut syvyys-/lämpötilamittaukset (väritetyt pisteet) sekä tuntikoh-
tainen keskiarvo kaikkien kalojen syvyydestä (musta viiva). Syyskuu 2021.



Kuva 4. Kalasensoreista saadut syvyys-/lämpötilamittaukset (väritetyt pisteet) sekä tuntikoh-
tainen keskiarvo kaikkien kalojen syvyydestä (musta viiva). Lokakuu 2021.



Kuva 5. Kalasensoreista saadut syvyys-/lämpötilamittaukset (väritetyt pisteet) sekä tuntikoh-
tainen keskiarvo kaikkien kalojen syvyydestä (musta viiva). Marraskuu 2021.

Liite 2 – Suositukset telemetriatutkimuksen raportointiin

Liitteen 2 taulukoihin on koottu yhteenvedot suosituksista vesiviljelyn merkitsemistutkimuksen kokeen suunnittelua ja raportointia varten. Taulukon yhteenvedot perustuvat Macaulay ym. (2021) esittämiin suosituksiin, joilla pyritään tarkempaan ja läpinäkyvämpään raportointiin kalatutkimuksessa, jossa hyödynnetään biosensoreita.

Taulukko 1. Yhteenveto suosituksista vesiviljelyn merkitsemistutkimusten kokeen suunnittelua varten (Macaulay ym., 2021).

Suosituksen merkitsemistutkimuksen koetoiminnalle	
Huomioita ja ehdotuksia	Kuvaus
Vaihtoehtoiset menetelmät	Onko viljeltyjen kalojen käyttäytymisen seurantaan käytettävissä vaihtoehtoisia tekniikoita, jotka voisivat vastata tutkimuskysymykseen ilman kalojen merkintää? Esimerkiksi videokamerat tai kaikuluotaimet?
Asianmukainen toistojen määrä	Jos mahdollista, käytä vähintään kolme erillistä yksikkökopiota (lammet/altaat/verkkoaltaat) ja jaa sama määrä merkittyjä yksilöitä näiden kesken välttääksesi näennäiskopiot.
Merkinnän vaikutus	Vertaa merkittyjen kalojen kasvua, käyttäytymistä, fysiologiaa (a) merkitsemättömiin kontrollikaloihin, (b) 'huijaus' tai toimenpiteeseen liittyviin kontrollikaloihin ja (c) kaloihin, joita käsiteltiin ja nukutettiin.
Bioottiset tekijät	Vertaa eri elämänvaiheissa, sukupuolissa tai lähteistä tulevien merkittyjen kalojen kasvua, käyttäytymistä ja fysiologiaa
Abioottiset tekijät	Testaa kuinka erilaiset abioottiset tekijät, kuten lämpötila, pH, liuennut happi ja suolapitoisuus, vaikuttavat leikkauksen lopputulokseen
Merkintämenettelyjen näkökohdat	Vertaa eri merkintätoimenpiteitä läpikäyneiden merkittyjen kalojen kasvua, käyttäytymistä ja fysiologiaa. Esimerkiksi erilaiset toipumisajat, kiinnitystavat/-paikat, anestesia, haavan sulkemiset, kirurgin kokemus

Taulukko 2. Yhteenveto suosituksista vesiviljelyn merkitsemistutkimusten kokeen raportointia varten ennen merkintää ja sen aikana (Macaulay ym., 2021).

Suosituksen merkitsemistutkimuksen raportointiin ennen merkintää ja sen aikana	
Ennen merkitsemistä	Kuvaus
Sensorin/Tunnisteen mitat	Tallenna tunnisteen merkki, pituus, leveys, tilavuus, paino ilmassa, paino vedessä. Varmista, että tunnisteen mitat raportoidaan myös ulkoisille merkkitunnisteille
Merkityn kalan alkuperä	Mistä merkityt kalat ovat peräisin?
Kalojen keräämismenetelmä	Ahdistettiin kaloja? Käytettiin verkkoa?
Merkintämenettely	Kuvaus
Paino ja pituus	Kirjaa muistiin merkittyjen ja merkitsemättömien kalojen paino ja pituus ennen merkin kiinnittämistä tai välittömästi sen jälkeen
Nukutusaine	Käytetyn anestesian tyyppi ja määrä sekä anestesian saavuttamiseen kuluva keskimääräinen aika
Kiinnitysprosessi	"Miten merkki kiinnitettiin (ulkoisesti vs. sisäisesti)? Missä kiinnityspaikka oli kalassa? Haavan sulkemismenetelmä (esim. ommel, kirurginen liima, niitit). Käytettiin profylaktisia antibiootteja? Mikä oli veden lämpötila merkitsemisen aikana? Kuinka kauan tunnisteen kiinnitysprosessi kesti keskimäärin? Käytettiin ulkoisia merkkilappuja elektronisten tunnisteiden lisäksi?"
Toipuminen	Missä kalat toipuivat? Kuinka kauan kaloilla keskimäärin kesti toipua? Millä mittarilla määritettiin, että kala toipui (esim. tasapainoinen uinti tai vaste agitaatioon)? Kirjaa ylös merkittyjen kalojen epänormaali käyttäytyminen tai fyysiset vauriot toipumisen aikana
Merkittyjen kalojen lukumäärä	Merkitse muistiin kalojen kokonaismäärä, joille on tehty merkin kiinnitysmenettely
Kuolleisuus	Kirjaa muistiin kalojen kokonaismäärä, jotka eivät toipuneet tai kuolivat tunnisteen kiinnittämisen jälkeen

Taulukko 3. Yhteenveto suosituksista vesiviljelyn merkitsemistutkimusten kokeen raportointia varten kokeen aikana ja sen jälkeen (Macaulay ym., 2021).

Suosituksen merkitsemistutkimuksen raportointiin kokeen aikana ja sen jälkeen	
Kokeen aikana	Kuvaus
Merkittyjen ja merkitsemättömien kalojen määrä toistoa kohti	Kirjaa kuhunkin yksikkökopioon sijoitettujen merkittyjen ja merkitsemättömien kalojen kokonaismäärä
Käyttäytyminen ja fyysinen terveys	Kirjaa muistiin merkittyjen kalojen käyttäytymispoikkeavuudet ja fyysiset vauriot koko kokeen ajan verrattuna merkitsemättömiin kaloihin
Kuolleisuus	Sekä merkittyjen että merkitsemättömien kalojen kokonaismäärä, jotka kuolivat kokeen aikana kussakin toistoyksikössä
Laitoksen menettelyt/koeolosuhteet	Kirjaa kaikki kokeen (tai kokeellisen käsittelyn) aikana tapahtuneet laitoksen tai eläinten käsittelyn toimenpiteet.
Ympäristöolosuhteet	Altaan/verkkoaltaan/lammen tilavuus ja syvyys. Veden lämpötila, liunneen hapen määrä ja suolapitoisuus koeajan aikana
Kokeen jälkeen	Kuvaus
Merkin takaisinsaanti	Onnistuneesti noudettujen merkittyjen kalojen kokonaismäärä kopioyksikköä kohden ja merkittyjen kalojen lukumäärä, jotka jäivät löytämättä
Paino ja pituus	Kalan keskimääräinen paino ilmassa ja pituus kokeen jälkeen sekä merkittyjen että merkitsemättömien kalojen osalta
Käytettävissä olevat merkit	Takaisinsaatuisten tunnisteen kokonaismäärä, joiden tallentama tieto on ehjää ja käyttökelpoista (kopioyksikköä kohden)
Kalan paino vedessä	Kalojen punnitseminen vedessä teurastuksen jälkeen (uimarakko tyhjennettynä tai poistettuna) mahdollistaa kalan tiheyden ja tilavuuden laskemisen
Merkittyjen kalojen kunto	Tunnisteen kiinnityskohtaan tarkastus: onko siellä tulehdusta? Merkkejä nekroosista, infektiosta? Näyttääkö merkittyjen kalojen fyysinen kunto näkyvästi erilaiselta kuin merkitsemättömän kalan?

Liite 3 – Anestesiataason määrittäminen

Taulukossa 4 on esitetty kalojen anestesiataason määrittämisessä yleisesti käytetty Summerfelt & Smithin (1990) tekemä seitsenportainen kalan käytökseen perustuva anestesia luokittelu.

Taulukko 4. Anestesian eri vaiheet (Brown ym. 2010, 41 [Summerfelt and Smith, 1990]).

Vaihe	Kuvaus	Kalan käytös
0	Normaali	Reagoi ulkoisiin ärsykkeisiin; hengitys ja lihaskontrolli normaali.
1	Lievä rauhoittuminen	Lievä reaktiivisuuden menetys ulkoisille visuaalisille- ja kosketusärsykkeille; hengitysnopeus hieman laskenut; tasapaino normaali
2	Syvä rauhoittuminen	Syvä reagoinnin menetys ulkoisille ärsykkeille paitsi voimakkaalle paineelle; lievä hengitysnopeuden lasku; tasapaino normaali
3	Tasapainon osittainen menetys	Lihaskontrollin osittainen menetys; epäsäännöllinen uinti; lisääntynyt hengitysnopeus; reagoi vain voimakkaisiin kosketus- ja värinä-ärsykkeisiin;
4	Tasapainon täydellinen menetys	Lihaskontrollin ja tasapainon täydellinen menetys; hidas mutta säännöllinen hengitysnopeus; selkärangan refleksien menetys
5	Refleksien reaktiivisuuden menetys	Reaktiivisuuden täydellinen menetys; hengitysliikkeet hitaita ja epäsäännöllisiä; syke erittäin hidas; kaikkien refleksien menetys
6	Hengitystoimintojen romahtaminen (asfyksia)	Hengitysliikkeet lakkaavat; sydämenpysähdys seuraa yleensä nopeasti



luke.fi

Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000