



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 122/2023

Kustavin Loukeenkarin kalankasvattamon vedenlaatu- vaikutukset vuonna 2022

Vuoden 2015 ympäristöseurantajärjestelmän päivitys

**Olli Malve, Matias Scheinin, Jari Niukko, Veera Hauhia,
Hedi Kanarik, Niina Kotamäki, Janne Ropponen ja
Markus Kankainen**

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 122/2023

Kustavin Loukeenkarin kalankasvattamon vedenlaatu- vaikutukset vuonna 2022

Vuoden 2015 ympäristöseurantajärjestelmän päivitys

**Olli Malve, Matias Scheinin, Jari Niukko, Veera Hauhia,
Hedi Kanarik, Niina Kotamäki, Janne Ropponen ja
Markus Kankainen**



ILMATIETEEN LAITOS



Osaa hankkeessa käytetyistä laitteistoista on rahoitettu Suomen akatemian tutkimusinfrastruktuurit FIRI2018 -rahoituksella [Päätös n:o 319496] sekä Euroopan meri- ja kalatalousrahaston rahoituksella.

Viittausohje:

Malve, O., Scheinin, M., Niukko, J., Hauhia, V., Kanarik, H., Kotamäki, N., Ropponen, J. & Kankainen, M. 2023. Kustavin Loukeenkarin kalankasvattamon vedenlaatuvaikutukset vuonna 2022 : Vuoden 2015 ympäristöseurantajärjestelmän päivitys. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 122/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 117 s.



ISBN 978-952-380-856-0 (Painettu)

ISBN 978-952-380-857-7 (Verkkójulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkójulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-857-7>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Olli Malve, Matias Scheinin, Jari Niukko, Veera Hauhia, Hedi Kanarik, Niina Kotamäki, Janne Ropponen ja Markus Kankainen

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2023

Julkaisu vuosi: 2023

Kannen kuva: Veera Hauhia

Tiivistelmä

Olli Malve¹, Matias Scheinin², Jari Niukko³, Veera Hauhia³, Hedi Kanarik⁴, Niina Kotamäki⁵, Janne Ropponen⁵ ja Markus Kankainen³

¹ Suomen ympäristökeskus (Syke), Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki

² Pro Litore ry, Långgatan 13, 10600 Tammisaari

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

⁴ Ilmatieteen laitos, Erik Palménin aukio 1, 00560 Helsinki

⁵ Suomen ympäristökeskus (Syke), Survontie 9 A, 40500 Jyväskylä

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli seurata Kustavin Loukeenkarin kalankasvattamon vedenlaatuvaikutuksia ympäröivällä merialueella ja kehittää vuoden 2015 KALA-MONITOR2020-hankkeessa ehdotettua, viiden vuoden välein toteutettavaa intensiivistä seurantajärjestelmää.

Käyttöön otettiin uudet mittaus- ja mallinnusmenetelmät, kuten Sentinel- satelliittien korkean alueellisen erotuskyvyn sameus- ja a-klorofylli-tulkinnat sekä automaattiset fluorometri-mittaukset poijuissa ja veneestä. Nämä mittaukset yhdistettiin intensiivisen vesinäytteenoton kanssa, interpoloitiin ajallisesti ja alueellisesti ja tehtiin päivittäiset vedenlaatukartat koko tutkimusalueelta sekä vedenlaadun syvyysprofiilit ja aikasarjat laitoksen ympäriltä.

Samanaikaisesti toteutetun virtausmittauksen ja aikaisemmin tehtyjen mallinnusten pohjalta arvioitiin vesimassojen liikkeet sekä kuormituksen kulkeutuminen ja sekoittuminen ympäröiville merialueille. Tulosten perusteella arvioitiin lähialuetta (1 km) laajemman merialueen alueellinen ja ajallinen vaihtelu, sekä mahdolliset vedenlaatuvaikutukset aikaisempaa tarkemmin ja kattavammin. Tuloksia verrattiin vuoden 2015 mallinnoiksi ja seurannan tuloksiin.

Tulosten perusteella Saaristo- ja Selkämeren vesimassat sekoittuivat tehokkaasti Loukeenkarin ympäröivällä saaristovyöhykkeellä. Elo-syyskuun seurantajakson alun etelätuulilla laitoksen ravinnekuorma kulkeutui pohjoista kohti sekoittuen Kihdin suunnalta virtaaviin vesimassoihin ja siitä edelleen Seksmiilarin ja Uudenkaupungin saaristoa kohden. Elo-syyskuun vaihteen pohjoistuulilla kuormitus sekoittui Uudenkaupungin saaristosta kulkeutuviin rehevämpiin vesimassoihin. Tyynemmillä jaksoilla a-klorofyllipitoisuus nousi ajoittain laitoksen ympärillä juuri ja juuri havaittavasti taustapitoisuuden yläpuolelle, mutta pysyi muualla ko. saaristossa havaitun vaihtelun sisällä. Yleisesti ottaen vedenlaatu ei oleellisesti poikennut vuoden 2015 mallinnus- ja mittaustuloksista, eikä laitoksen vaikutusalueella havaittu merkittäviä vedenlaatuvaikutuksia.

KALA-MONITOR2020-hankkeessa kehitettyä kalankasvatuksen ympäristöseurantajärjestelmää täydentävien satelliitti-, läpivirtaus- ja automaattimittausten sekä datafuusio-menetelmien avulla saatiin laitoksen vedenlaatuvaikutuksista alueellisesti ja ajallisesti tarkempi kuva. Seuraava viiden vuoden päästä toteutettava intensiiviseurantajakso voidaan toteuttaa yhteistarkkailuna lähialueen muiden kuormittajien kanssa.

Asiasanat: kalanviljely, mittausmenetelmät, seuranta, vedenlaatu, vesistövaikutukset, virtaus

Sisällys

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. Johdanto | 5 |
| 2. Aineisto ja menetelmät | 7 |
| 2.1. Loukeekarinarin laitoksen rehunkäytön seuranta | 7 |
| 2.2. Brändö100 seuranta-aseman trenditarkastelu | 8 |
| 2.3. EXO-pojjut ja syvyysprofiilit EXO-laitteella | 8 |
| 2.4. EXO- ja laboratoriomittausten korrelaatio..... | 9 |
| 2.5. Läpivirtaus-mittaukset veneestä | 11 |
| 2.5.1. CoastRider-järjestelmä..... | 11 |
| 2.5.2. Syken läpivirtausmittausjärjestelmä | 15 |
| 2.6. Virtausmittarit | 18 |
| 2.7. Satelliittikuvien tulkinnat | 19 |
| 2.8. Datafuusio-järjestelmä..... | 19 |
| 3. Tulokset..... | 21 |
| 3.1. Loukeekarinarin laitoksen rehunkäyttö..... | 21 |
| 3.2. Brändö100 seuranta-aseman vedenlaadun aikasarja-analyysi | 23 |
| 3.3. EXO-pojjut..... | 24 |
| 3.4. Syvyysprofiilit EXO-laitteella..... | 27 |
| 3.4.1. Syvyysprofiilit eri ajankohtina | 27 |
| 3.4.2. Poikkileikkaus-profiilit vesipatsaasta..... | 36 |
| 3.4.3. Syvyysprofiilimittaukset yleistettynä | 42 |
| 3.5. Läpivirtausmittaukset..... | 42 |
| 3.5.1. CoastRider..... | 42 |
| 3.5.2. Syken läpivirtausmittausjärjestelmä | 43 |
| 3.6. Laboratoriomääritykset | 45 |
| 3.7. Virtausmittaukset..... | 45 |
| 3.8. Satelliittikuvien tulkinnat | 52 |
| 3.9. Datafuusio | 53 |
| 4. Tulosten tarkastelu | 56 |
| 4.1. Vedenlaadun vaihtelu ja poikkeamat vertailuolosta laitoksen ympärillä..... | 56 |
| 4.2. Virtaukset ja kuormituksen kulkeutuminen laitoksen ympärivällä merialueella..... | 57 |
| 4.3. Laitoksen vedenlaatuvaikutukset..... | 57 |
| 4.4. Arvio mittausjärjestelmän toimivuudesta..... | 58 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.5. Suositus vedenlaadun ja virtausten seuraamisesta laitoksen vaikutusalueella ja merialueetasolla..... | 59 |
| 5. Yhteenveto..... | 60 |
| Liitteet | 65 |

1. Johdanto

Tausta

Loukeenkariin laitoksen oli ensimmäinen uusi kalankasvatustilasto, joka sai ympäristöluvan 2014 kalankasvatustilaston sijainninhajausuunnitelman valmistuttua (maa- ja metsätalousministeriö ja ympäristöministeriö 2014). Sijainninhajausuunnitelmassa uusia tilastoja ohjattiin avoimille ja syvemmille alueille. Samalla arvioitiin, että tuotantomääriä voi nostaa merkittävästi hyvien laimenemisolosuhteiden perusteella. Manner-Suomessa merialueella keskimääräiset tuotantomäärät olivat aiemmin noin 60 tonnia, kun esimerkiksi sijainninhajausuunnitelman ympäristöselostuksessa arvioitiin, että suositelluilla tuotantoalueilla tilaston koko voisi olla 400–600 tonnia ja parhaissa laimenemisolosuhteissa avoimilla alueille vielä suurempia (Setälä ym. 2014). Nykyään Suomen merialueella on myönnetty kuusi kappaleita 500–1 000 tonnin ympäristöluvia.

Loukeenkariin valittiin pilottiseurantakohteeksi ”Ympäristötehokas kalankasvatus ja seurantajärjestelmien kehittäminen” hankkeeseen (Kankainen 2015), jossa osatavoitteena oli arvioida suurempien avomeriolosuhteissa sijaitsevien tilosten ympäristövaikutuksia ja kehittää siihen soveltuvia menetelmiä. Hankkeessa (Kettunen ym. 2015) demonstroitettiin uusia työkaluja ja prosessia, joiden avulla kalankasvatustilaston ympäristövaikutusten arvioinnista ja seurannasta tulisi entistä tarkempaa ja luotettavampaa. Esimerkkitapauksena käytettiin vuonna 2014 toimintansa aloittanutta, Kustavissa sijaitsevaa Loukeenkariin kalankasvatustilastoa. Menetelmien kehitystä ja seurantaa on jatkettu sen jälkeen muun muassa vesiviljelyn innovaatio-ohjelmassa (Vielma (toim.) 2023). Ympäristöministeriö (2020) ja Hakala ym. (1994) ovat ohjeistaneet kalankasvatustilaston seurannan käytäntöjä ja Tattari ym. (2019) jatkuvatoimista vedenlaadun mittausta.

Kettunen ym. (2015) konstruoi kalankasvatustilaston vaikutusalueelle virtaus- ja vedenlaatu-mallin, jonka avulla ennustettiin veden virtaukset tilaston ympäristössä ja tilastolta purkautuvien kokonaisravinteiden leviäminen. Mallinnustulosten perusteella suunniteltiin ja hankittiin ulkopuoliselta toimittajalta kasvukauden pituinen, intensiivinen a priori mittauskampanja. Sillä todennettiin kokonaistypen, kokonaisfosforin, liukoisten ravinnefraktioiden, veden lämpötilan, happipitoisuuden ja suolapitoisuuden jakaumat tilaston ympärillä tyypillisissä tuulitilanteissa. Kampanja toteutettiin kesällä 2015. Mittaukset tehtiin kokoomanäytteistä pinta- ja pohjakerroksissa. Mittauskampanjan tulokset analysoitiin tilastollisesti ja niitä verrattiin tilaston läheisyydessä 14 vuotta toimineen Brändö100-havaintopisteen tilastollisiin ominaisuuksiin. Tämän jälkeen saatuja tuloksia arvioitiin vielä 18.8.2015 alueelta otettuun satelliittikuvan antamaan havaintojakaumaan. Lopuksi Loukeenkariin tilastolle laadittiin eri tietolähteistä yhdistelmä koostettu posteriori seurantasuunnitelma.

Sekä mallinnuksen että mittauskampanjan avulla päädyttiin tulokseen, jonka mukaan Loukeenkariin tilaston kuormitus ei erotu mittauksissa. Myös mallinnuksen mukaan kuormituksen laimentuminen on niin tehokasta, että ennustettu hetkellinen pitoisuusnousu on suurimmillaan selvästi alle mittaustarkkuuden. Kun esimerkiksi kokonaisfosforin mittaustarkkuus on suuruusluokkaa 2 µg/l, olivat ennustetut ja mitatut pitoisuusnousut suurimmillaankin alle 0,2 µg/l. Tutkimusalueella veden päävirtaussuunta on rannikkoa pitkin pohjoiseen. Niinpä tilaston mahdolliset pitkäaikaiset vaikutukset, jos niitä ilmenee, ovat todennäköisesti tilaston pohjoispuolisilla rannoilla. Mittauskampanja todensi ennusteen myös siltä osin, että kasvukaudella ei havaittu merkitseviä pitoisuuden kohoamisia. Vesipatsaan muuttujien vaihtelu

vuonna 2015 oli vähäistä mittausajankohtien välillä, ja etenkin alueellinen vaihtelu kasvattamon läheisyydessä (50–1 000 m) oli pientä eri näytteenottokerroilla. Fosfaatin, kokonaisfosforin ja a-klorofyllin mitatut pitoisuudet tai varianssikomponentit eivät poikenneet merkittävästi Brändö100 -vertailupisteen pitkän aikavälin havainnoista. Pitoisuusgradienttien puuttuminen sekä pieni vaihtelu kasvattamon lähiympäristössä sekä sama pitoisuustaso kuin Brändö100 -asemalla osoittavat, ettei ympäristössä voitu havaita kasvattamon rehevöittävää vaikutusta. Myös satelliittikuvan tulkinta osoitti, etteivät voimakkaat leväkukinnat esiintyneet laitoksen läheisyydessä, vaikka ne olivat voimakkaita ulkomerellä.

Tulosten mukaan vuosien välinen pitoisuusvaihtelu oli pientä verrattuna kuukausittaiseen tai satunnaiseen vaihteluun. Tästä vedettiin se johtopäätös, että jatkossa seuranta ei kannata tehdä joka vuosi vaan seurata laitoksen mahdollisia vaikutuksia intensiivisemmin esim. 5 vuoden välein ja, että lähivuosina uudeksi seurantavälineeksi otetaan EU:n Copernicus-ohjelman Sentinel-2-sarjan MSI:n (Multi-spectral Instrument) havainnot NASA:n Landsat-satelliitin OLI-instrumentin aineistojen lisäksi.

Tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena on seurata Kustavin Loukeenkariin kalankasvattamon vedenlaatuvaikutuksia ympäröivällä merialueella ja kehittää vuoden 2015 KALA-MONITOR2020-hankkeessa (Kettunen ym. 2015) ehdotettua, viiden vuoden välein toteutettavaa intensiivistä seurantajärjestelmää.

Vuonna 2015 tehdystä intensiiviseurannasta on kulunut yli kuusi vuotta. Kasvattamon tuotannossa, ympäristöolosuhteissa, ilmastossa ja taustakuormituksessa on tapahtunut muutoksia, jotka saattavat vaikuttaa merialueen tilaan. Kuuden vuoden aikana myös vedenlaatuvaikutusten mittaustekniikka on kehittynyt mahdollistaen entistä tarkemman ja kattavamman vaikutusten seurannan.

Tässä vuoden 2022 intensiiviseurantakampanjassa otettiin käyttöön uudet mittaus- ja mallinutusmenetelmät, kuten Sentinel-satelliittien korkean alueellisen erotuskyvyn sameus- ja a-klorofylli-tulkinnat sekä automaattiset fluorometri-mittaukset poijuissa ja veneestä. Nämä mittaukset yhdistettiin intensiivisen vesinäytteenoton kanssa, interpoloitiin ajallisesti ja alueellisesti ja tehtiin päivittäiset vedenlaatukartat koko tutkimusalueelta sekä vedenlaadun syvyysprofiilit ja aikasarjat laitoksen ympäriltä.

Läpivirtausmittausten yhteydessä tehtiin mittauksia myös orgaanisen aineen kuormituksen vaikutuksista vedenlaatuun ja kasvihuonekaasujen pitoisuuksiin, mutta nämä mittaukset esitetään tarkemmin erillisessä raportissa.

Aineiston pohjalta laskettiin merialuetyyppien vertailuarvot sekä poikkeamat niistä laitoksen mahdollisten vedenlaatuvaikutusten arvioimiseksi. Samanaikaisesti toteutetun virtausmittauksen ja aikaisemmin tehtyjen mallinnusten pohjalta arvioitiin vesimassojen liikkeitä sekä kuormituksen kulkeutuminen ja sekoittuminen ympäröiville merialueille. Tulosten perusteella arvioitiin lähialuetta (1 km) laajemman merialueen, koko tuotantokauden alueellinen ja ajallinen vaihtelu, sekä mahdolliset vedenlaatuvaikutukset aikaisempaa tarkemmin ja kattavammin. Tuloksia verrataan vuoden 2015 seurannan tuloksiin.

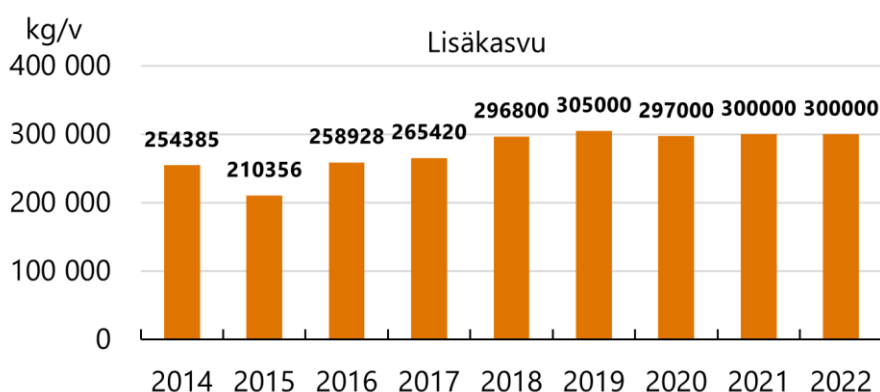
Lisäksi arvioitiin uusien menetelmien käyttökelpoisuus, jonka perusteella päivitettiin KALA-MONITOR2020-hankkeessa kehitetty kalankasvatuksen ympäristöseurantajärjestelmä ja tehtiin suositukset ja kriteerit seurannan järjestämiseksi jatkossa.

2. Aineisto ja menetelmät

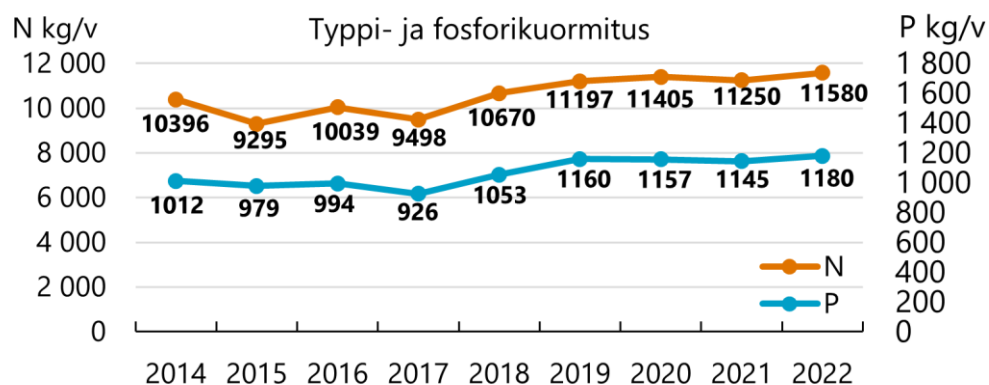
2.1. Loukeenkarin laitoksen rehunkäytön seuranta

Saaristomeren pohjoisosassa Kustavissa Kihdin pohjoispuolella avoimella merialueella sijaitsevassa kalankasvatustilaksessa on kasvatettu kirjoletta vuodesta 2014 lähtien. Loukeenkarin laitoksen vuosittainen lisäkasvutuotanto on noussut ensimmäisiä vuosista (Kuva 1) ja vuonna 2022 lisäkasvu oli 300 tonnia (Varsinais-Suomen ELY-keskus). Yritys on käynnistänyt uuden ympäristölupaprosessin YVA-tarveharkinnalla vuonna 2017 KALA-MONITOR2020 arvioiden perusteella hakemalla suurempaa 1000 tonnin lisäkasvatustilaa, mutta ympäristölupa on edelleen prosessissa Vaasan hallinto-oikeudessa. Tässä hankkeessa esiteltyjen seurantamenetelmien avulla voidaan arvioida luotettavammin lupaprosessissa käytettyjen ympäristövaikutusmallinnusten todenperäisyyttä.

Pääsääntöisesti kaloja ruokitaan päivittäin. Ruokintamäärät ovat alkukaudella vähäisempiä kalojen ollessa pieniä, yleistäen alkuvaiheessa esimerkiksi noin 500 grammaisia, mutta ruokintamäärät nousevat kasseissa olevan biomassan kasvaessa syksyä kohti. Veden lämpötila vaikuttaa myös ruokinnan määrään. Rehun käytön myötä aiheutuu ravinnekuormitusta mereen, lähes yksinomaan kalan ulosteiden kautta. Osa ravinteista sitoutuu kalaan mutta osa päätyy vesistöön kalojen aineenvaihdunnan kautta. Laitoksen vuosittaiset ravinnekuormitusmäärät on esitetty kuvassa 2.



Kuva 1. Loukeenkarin laitoksen vuosittaiset lisäkasvumäärät (Varsinais-Suomen ELY-keskus).



Kuva 2. Loukeenkarin typpi- ja fosforikuormitusmäärät (Varsinais-Suomen ELY-keskus).

2.2. Brändö100 seuranta-aseman trenditarkastelu

Kustavin Loukeenkarin laitoksen ympäristön vedenlaadun taustapitoisuuksien (sameus, suolaisuus, kokonaisfosfori, fosfaattifosfori ja a-klorofylli) selvittämiseksi analysoitiin Varsinais-Suomen ELY-keskuksen Brändö100-havaintoaseman (Kuva 3) trendi sekä sen kausi- ja satunnaisvaihtelun komponentit vuosilta 2000–2022 (Liitteet 1–3). Havaintopaikka sijaitsee kalan-kasvattamolta noin 2 km lounaaseen, ja näytteitä siellä on otettu 10–37 kertaa/vuosi, vuodesta 2000 alkaen. Kustavin laitoksen vaikutusten todentamiseksi tuloksia verrattiin kesän 2015 ja elokuun 2022 intensiivisten kenttätutkimusten tuloksiin.

Vuoden 2022 elo-syyskuussa lämpötila pysyi aikaisempien vuosien tasolla, mutta sameus oli alhaisempi ja suolaisuus syyskuussa tavallista korkeampi. Myös fosfaattifosfori elokuussa, ja a-klorofylli syyskuussa olivat keskimääräistä korkeammalla tasolla.



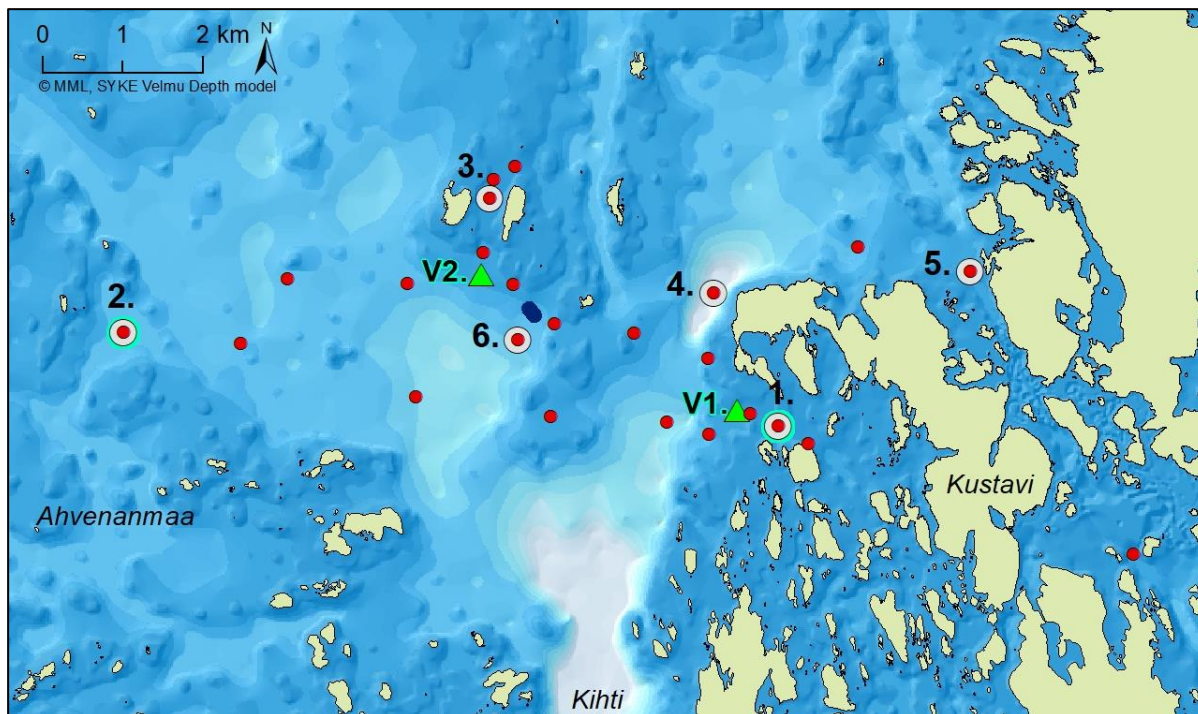
Kuva 3. Varsinais-Suomen ELY-keskuksen Brändö100-havaintoaseman sijainti.

2.3. EXO-pojjut ja syvyysprofiilit EXO-laitteella

Veden laadun muutosten seuraamiseksi asennettiin YSIn EXO2 vedenlaatumittareita (Multiparameter Water Quality Sonde) Saaristomeren pohjoisosiin Kihdin pohjoispuolelle jatkuvatoimiseen mittaukseen elokuussa 2022 (Kuva 4). EXO:t asennettiin 3.8.2022 ja mittauksia jatkettiin 5.9.2022 asti. Sondit oli kiinnitetty ankkuroituihin poijuihin siten, että anturit olivat kolmen metrin syvyydessä. Mittausväliksi asetettiin 15 minuuttia. Laitteissa oli antureina: lämpötila/ johtokyky, sameus, happi ja klorofylli/fykosyaniini ("Total Algae" optimoitu makeille vesille). EXOissa oli myös harjapyyhkijä, joka puhdisti anturit kuuden tunnin välein. Anturit käytiin puhdistamassa kerran myös käsin yhdeksän päivän mittauksen jälkeen. Dataa saatiin kahdesta mittalaitteesta siten, että toisesta tuli noin viiden viikon ja toisesta viiden päivän mittausdata.

EXO-pojujen tuottaman ajallisen muutoksen seurannan lisäksi yhtä EXOa käytettiin vesipatsaan syvyysuuntaisten muutosten mittauksiin vesipatsaaseen kohdistuvien vedenlaatuvaikutusten seuraamiseksi. Mittaukset suoritettiin laskemalla EXOa kaapelin varassa rauhallisesti pohjan läheisyyteen ja takaisin ylös siten, että mittaukset tallentuivat sekunnin välein. Syvyysprofilointia tehtiin pääasiassa Kihdin pohjoispuolisella alueella viitenä päivänä (2.8.–5.9.2022).

Syvyysprofilointia tehtiin yleistäen noin 8–60 metriä syvillä paikoilla. Syvyysprofilointipaikkoja oli Kihdin pohjoispuolella kaikkiaan yli 20. Excelillä tehtyjen syvyysprofiilikuvaajien lisäksi tehtiin interpolointi etäisyyden, syvyyden ja mitattavien suureiden mukaisesti Ocean Data View- ja SigmaPlot-ohjelmilla kuvaamaan vesipatsasta.



Kuva 4. Syvyysprofiilien paikat ovat punaisella. Numeroiduista paikoista on esitetty tarkemmin syvyyskuvaajat. EXO-poijut olivat paikoissa 1 ja 2. Virtausmittarien paikat on esitetty vihreällä kolmiolla (V1 ja V2). Loukeenkari kalankasvatustilan alue on keskellä tummalla sinisellä.

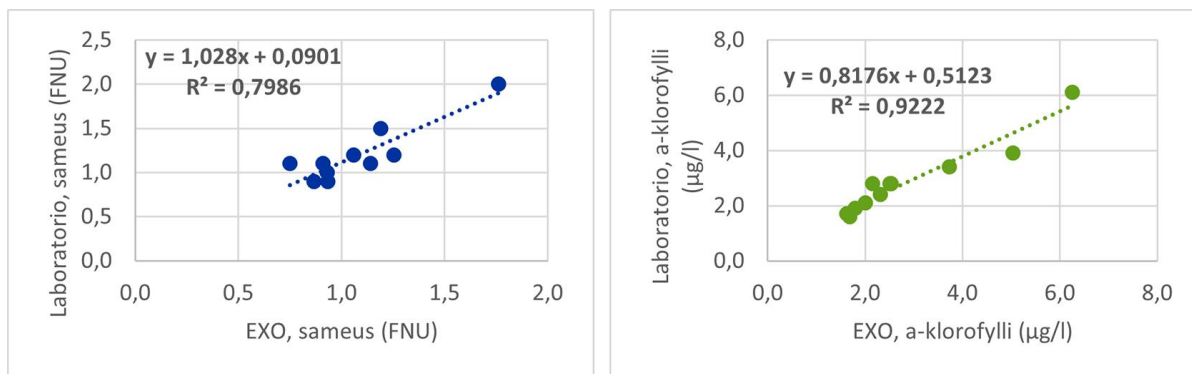
2.4. EXO- ja laboratoriomittausten korrelaatio

Ennen elokuun mittausten aloittamista EXO-laitteet tarkastettiin ja niiden anturit huollettiin/kalibroitiin Luode Consulting Oy:n toimesta. Huolto-/anturikalibroinnin lisäksi tulee mittausarvoille suorittaa vielä arvoja tarkentava korjaus perustuen laboratoriomäärityksiin (paikalliskalibrointi), jotta saadaan mahdollisimman tarkat loppuarvot.

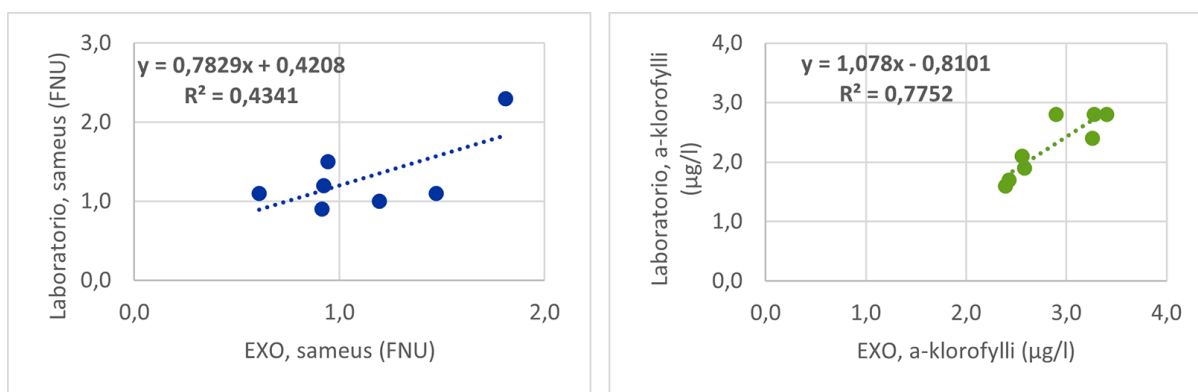
Arvojen tarkentamista varten EXO-laitteella tehtyjen mittausten ohessa otettiin laboratoriovesinäytteitä samoilta mittauspaikoilta, joiden perusteella EXOjen tuloksiin saatiin korrelaatio. Vesinäytteitä otettiin pintavedestä heittoämpäriä käyttäen ja syvemältä vesipatsaasta Limnos-vedennoutimella. Mittaaminen tapahtui veneessä, jossa jokaista EXO-laitetta käytettiin vesiämpäriä vuorotellen, niin että laite mittasi sekunnin välein minuutin ajan, josta saatiin keskiarvo paikalliskalibrointiä varten. Vesinäytteitä otettiin kahtena päivänä (3.8., 5.9.). Ensimmäisellä kerralla mittauksia tehtiin jokaisella EXO-laitteella yhteensä kahdeksan. Toisella kerralla mittauksia tehtiin vain kahdella EXO-laitteella vaihtelevin määrin. Vesinäytteistä määritettiin sameus ja a-klorofylli. Näytteiden määrityksestä vastasi Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy.

Jokaiselle EXO-laitteelle suoritettiin paikalliskalibrointi muodostamalla laitteen arvojen ja laboratorioarvojen välille lineaarinen regressioyhtälö. Yhtälön parantamiseksi poistettiin selvästi

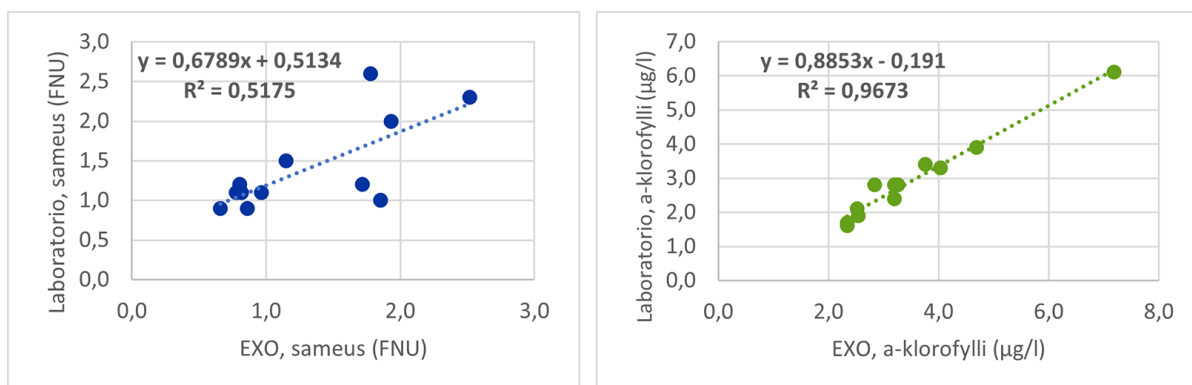
laboratorioarvoista poikkeavat mittausravot. EXO:n sameus- ja a-klorofylli-arvot korjattiin muodostettujen yhtälöiden mukaisesti (Kuva 5–7). EXO- ja lab-arvot ovat liitteessä 6. Poiju 1 sameuden suhteellinen keskimääräinen virhe on 19,4 % ja a-klorofyllin 13,1 %. Poiju 2 on vastaavasti 42,4 % ja 23,1 % ja profilointi-EXO 33,1 % ja 19,5 %.



Kuva 5. Katanpään eteläpuolisen EXO:n (poiju 1) sameusarvot (n=10) korreloivat hyvin laboratorioarvojen kanssa ($R^2 = 0,7986$) (vasen kuva). A-klorofylli arvojen (n=11) korrelaatio on hieman vahvempi ($R^2 = 0,9222$) (oikea kuva).



Kuva 6. Ahvenanmaan EXO:n (poiju 2) sameusarvot (n=7) korreloivat tyydyttävästi laboratorioarvojen kanssa ($R^2 = 0,4341$) (vasen kuva). A-klorofylli arvojen (n=8) korrelaatio on vahvempi ($R^2 = 0,7752$) (oikea kuva).



Kuva 7. Profilointi-EXO:n sameusarvot (n=12) korreloivat laboratorioarvojen kanssa ($R^2 = 0,5175$) (vasen kuva). A-klorofylli arvot (n=12) osoittavat vahvan korrelaation ($R^2 = 0,9673$) (oikea kuva).

2.5. Läpivirtaus-mittaukset veneestä

Ympäröivän merialueen pintaveden kohdistuvien vedenlaatuvaikutusten seuraamiseksi tehtiin läpivirtausmittauksia sekä Pro Litore Ry:n CoastRider -järjestelmällä että Sykkeen omalla läpivirtausmittausjärjestelmällä.

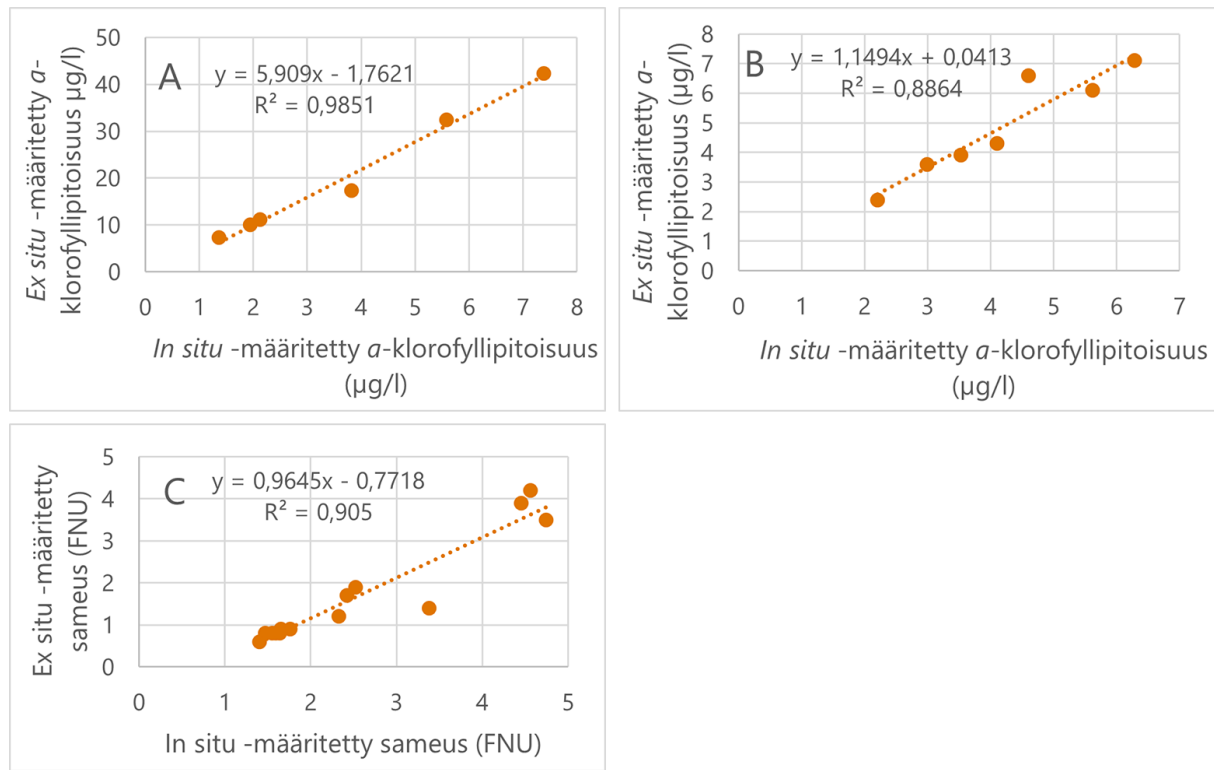
2.5.1. CoastRider-järjestelmä

Pintavedestä eli puolen metrin syvyydeltä vettä (29 l/min) keräävään läpivirtausjärjestelmään (Scheinin ja Asmala 2020) liitetyn EXO2-sondin (Xylem Inc., USA) anturit mittasivat vedestä keskeisimpiä tilaindikaattoreita eli liukoisen eloperäisen aineksen (fDOM) pitoisuutta, kasviplankton- ja sinileväpigmenttien (a-klorofylli ja fykosyaniini) pitoisuuksia, sameutta, hapen määrää sekä happamuutta. Lisäksi sondissa oli veden lämpötilaa ja suolapitoisuutta mittaava anturi ympäristöolosuhteiden rekisteröintiä varten. Sondiin suorassa yhteydessä oleva EXO Handheld -yksikkö mittasi samalla ilmanpainetta sekä rekisteröi GPS-sijainnin ja -ajan. Lisäksi läpivirtausjärjestelmään kuului veden hiilidioksidiosapainetta rekisteröivä CO2 Pro CV -anturi (Pro Oceanus Inc., Kanada) ja veden metaaniosapainetta rekisteröivä Mini CH4-anturi (Pro Oceanus Inc., Kanada). Veneen targakaarelle asennetuilla antureilla (Onset Computer Corp., USA) mitattiin yhteyttämislle aallonpituuksiltaan soveltuvan valon (PAR) määrää (S-LIA-M003) sekä ilman lämpötilaa ja kosteutta (S-THB-M002). Läpivirtausjärjestelmän runko (Luode Consulting Oy) koostui Utility Puppy 2000 -vesipumpusta (Jabsco Inc., USA) sekä valmistajan käyttötarkoitukseen räätälöimästä, pyörreperiaatteella toimivasta kuplanpoistajasta putkiliitännöineen. Mittausanturien valinta, niiden väliset kytkennät ja hydraulisten viiveaikojen säätäminen on tehty Pro Litore ry:n toimesta.

Läpivirtausjärjestelmällä pintavedestä (0,5 m) toteutettujen mittausten lisäksi kunakin kartoituskertana tutkimusalueelta kerättiin pintavesinäytteitä keskimäärin seitsemästä havaintopisteestä. Niiden tuloksia käytettiin automaattimittausaineiston a-klorofylli- ja sameusmittausten kalibrointiin (Kuva 8) ja muun aineiston validointiin (esim. johtokyky). Hankkeen ulkopuolisen rahoituksen mahdollistamissa puitteissa tuloksia voidaan jatkossa käyttää myös empiiristen mallien luomiseksi esim. kokonaistypen (Kok-N), kokonaisfosforin (Kok-P), eloperäisen hiilen (TOC), liukoisen eloperäisen hiilen (DOC) ja kromoforisen liukoisen eloperäisen aineksen (CDOM) pitoisuuksille sekä veden alkaliniteetille. Vesinäytteet otettiin läpivirtausjärjestelmään kuuluvasta hanasta. Näytteet analysoi Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy.

Hankkeen aikana tehtiin yhteensä kuusi CoastRider-kartoitusta. Yksi kartoituksista toteutettiin heinäkuussa (22.7.2022) kaksi viikkoa ennen muiden tutkimusten (ks. edellä) alkua. Muut kartoitukset toteutettiin samanaikaisesti muiden tutkimusten kanssa. Kukin kartoituskerta toteutettiin yhden päivän aikana. Mittaukset tehtiin avoveneeseen (Brig N610) kytkettyyn läpivirtausjärjestelmään (Kuva 9) liitetyillä sekä veneen kannelle kiinnitetyillä antureilla. Kaikkia mitattavia muuttujia rekisteröitiin yhdessä paikka- ja aikatiedon kanssa viiden sekunnin eli veneen nopeudesta (10–45 km/h) riippuen noin 15–60 metrin (keskimäärin 55 m) välein. Kultaikin kartoituskerralta havaintoja kertyi noin 6 000 mittauspisteestä. Näin ollen koko hankkeen aikana mittaushavaintoja tuotettiin kokonaisuudessaan noin 36 000 pisteestä. CoastRider-kartoituksen havaintopisteiden sijainti ja frekvenssi räätälöitiin ensisijaisesti kohdealueella sijaitsevien kalankasvattamoiden ja laajojen ympäristögradienttien mukaan. Vesien tilaa keskeisesti kuvaavien indikaattorimuuttujia mitattiin rinnakkain fysikaalisia olosuhteita kuvaavien muuttujien kanssa siten, että kaikissa muuttujissa ilmenevä alueellinen vaihtelu katettiin sekä edustavasti että korkealla resoluutiolla. Mittausaineistoa kerättiin yhteensä 320 kilometrin

mittaiselta linjastolta, joka kattaa edustavasti alueella vallitsevat, laajemmat ympäristögradientit sekä erilaisten ympäristötyyppien kirjon aina sisälahdistä välisaariston ulappavesille (Kuva 10).



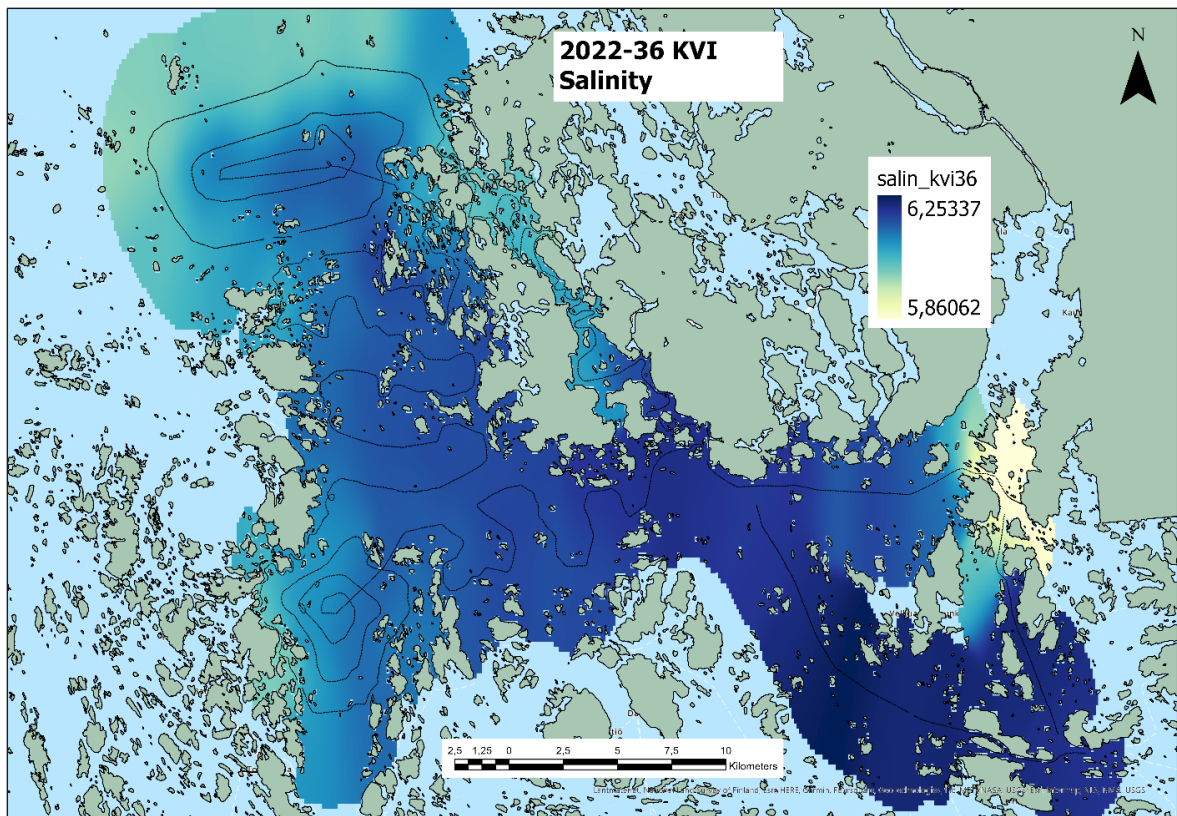
Kuva 8. Coastrider-mittausjärjestelmän rekisteröimät α -klorofyllipitoisuudet (in situ) kalibroitiin jokaisella mittauskerralla laboratorioanalyysin määritettyjen klorofyllipitoisuuksien (ex situ) suhteen. Kalibroinnissa sovellettavan lineaarisen regressioyhtälön vakio ja kulmakerroin muuttuivat huomattavasti esim. heinäkuun puolivälin (A) ja syyskuun alun (B) mittauksen välillä. Sameuden kalibroinnin suhteen ajankohdalla ei ole vastaavaa merkitystä (C).

Eri antureilla kerätty aineisto synkronoitiin GPS-sijainnin ja -ajan mukaan. Laitteiston hydraulisten ominaisuuksien sekä käytettyjen antureiden vasteaikojen viive on otettu huomioon säättämällä läpivirtausjärjestelmän putkisto pituudeltaan siten, että mittaushavaintojen ja niiden GPS-leiman välinen ero oli $10 (\pm 2)$ sekuntia. Kun mittausaineisto oli korjattu tämän kokonaisviiveen osalta, havainnot sijoitettiin viiden tasasekunnin välisiin aikaluokkiin (Scheinin ja Asmala 2020). Keskeisimmistä mitattavista muuttujista fluoresoivan liukoisen eloperäisen aineksen (fDOM) pitoisuus korjattiin laskennallisesti lämpötilan ja sameuden suhteen Snyderin ym. (2018) mukaisesti. Kaikissa analyyseissä ja muissa esityksissä käytettiin ainoastaan korjattuja fDOM-arvoja (fDOM[corr]), joiden yksikkönä on raaka-aineiston tapaan QSU (Quinone Sulphate Unit).



Kuva 9. Avoveneeseen asennettu läpivirtausjärjestelmä ja kartoituksissa käytetyt anturit. Mittattujen muuttujien lukumäärä on huomattavasti antureiden lukumäärää korkeampi, koska useat mittaustuottajat määritetään laskennallisesti muiden muuttujien perusteella. Vedenlaatuindikaattoreista tulosten tarkastelussa kiinnitetään huomiota erityisesti sameuteen, (fluoresoivaan) liukoiseen eloperäiseen ainekseen (fDOM) sekä α -klorofylliin. Kuva: Matias Scheinin.

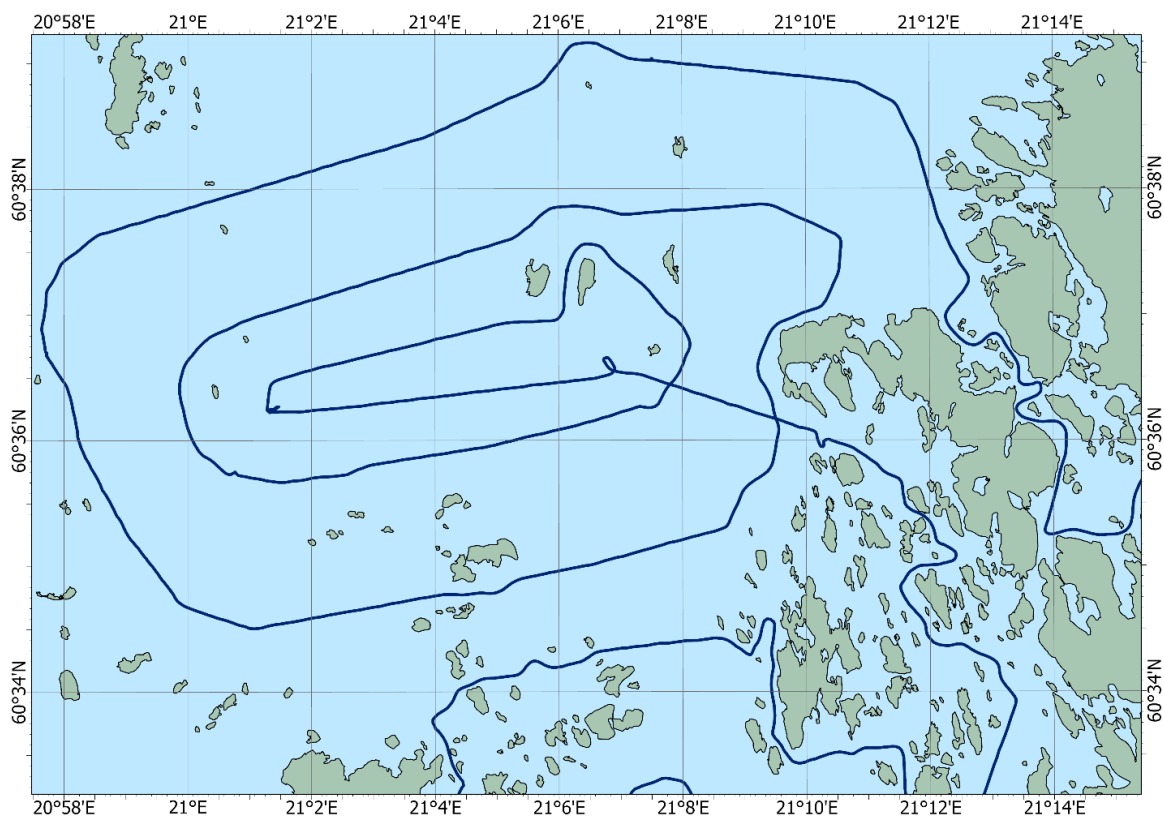
Hiilidioksidin ja metaanin osapaineiden määrittämisessä otettiin huomioon antureiden ajautuminen eli ns. "drift" (Fietzek ym. 2014, Canning ym. 2021), veden lämpötilan muutokset läpivirtausjärjestelmässä (Takahashi ym. 1993, Gültow ym. 2011), mahdolliset kalibraatioalueen ylitykset (Canning ym. 2021), hydrostaattisen paineen, virtausnopeuden ja lämpötilan vaikutukset antureiden vasteaikaan (Fiedler ym. 2013, Canning 2021) sekä antureiden vasteajan ja mittaustajuuuden välinen epäsuhta (Miloshevich ym. 2004). Kasvihuonekaasujen pitoisuusmäärittämisissä lähteinä olivat vastaavasti Weiss (1974) sekä Wiesenburg ja Guinasso (1979). Keskeisistä indikaattorimuuttujista α -klorofyllin pitoisuudet ($\mu\text{g/l}$) ja sameus (FNU) kalibroitiin vesinäytteistä laboratorioissa määritettyjen arvojen mukaan. Kummassakin tapauksessa antureiden mittaamille arvoille määritetään korjauskerroin ja -vakio soveltamalla lineaarisia regressiomalleja (Scheinin ja Asmala 2020). Kaikki mittaustanturit kalibroitiin valmistajien suositusten mukaisesti (1–6 kk ennen näytteenottoa anturista riippuen). Coastrider-aineistoon sovellettiin biogeokemiallisen "ferry box" -dataan käytettävää kolmiosaista kontrollirutiinia, joka koostuu muuttujien nimeämisen, puuttuvien mittaustulosten sekä mittaustulosten tarkastelusta (Linders ym. 2017).



Kuva 10. Mittausaineistoa kerättiin yhteensä 320 kilometrin mittaiselta linjastolta, joka kattaa edustavasti alueella vallitsevat, laajemmat ympäristögradientit sekä erilaisten ympäristötyyppien kirjon aina sisälahdista välisaariston kautta ulappavesille. Mittausreitti on merkitty mustalla. Keltasinivihreä viridis-väriskaala kuvaa suolapitoisuuden vaihtelua tutkimusalueella heinäkuussa 2022.

Kartoitusaineistot interpoloitiin ArcGIS-ohjelmalla soveltamalla *kernel diffusion* -menetelmää ja yhden meripeninkulman (1 852 m) interpolointietäisyyttä. Menetelmän avulla maa-alueet kyettiin ottamaan huomioon mittauspisteiden välisten etäisyyksien määrittämisessä. Kulkakin kartoituskerralta tuotettiin tällä tavoin interpoloituja karttoja suolapitoisuuden, lämpötilan, sameuden, liukoisen eloperäisen aineksen pitoisuuden sekä a-klorofyllipitoisuuden osalta.

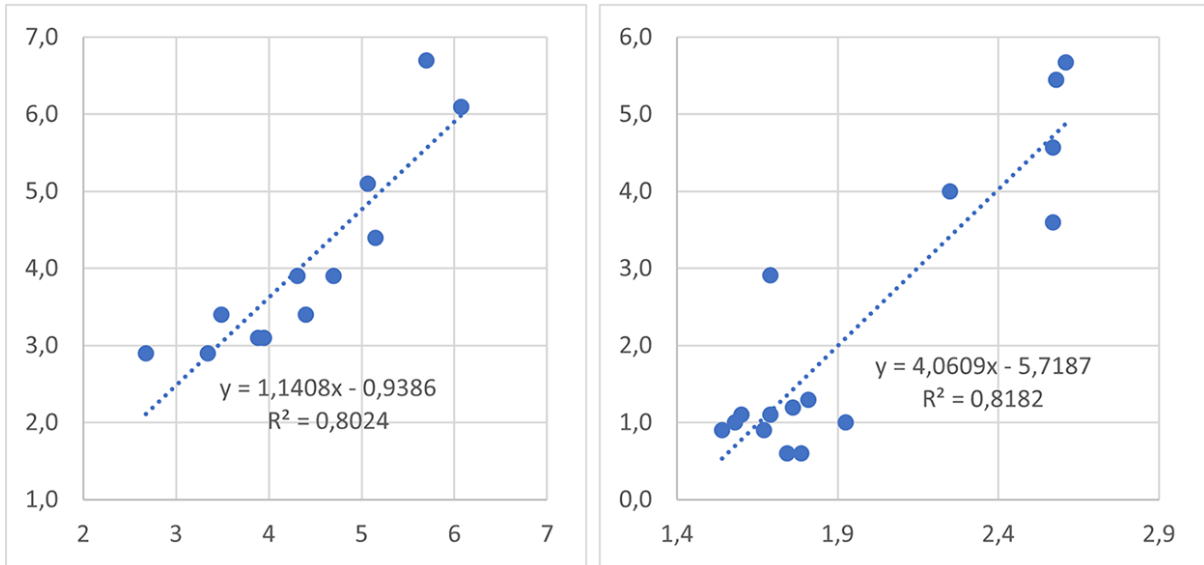
Suolapitoisuuden, lämpötilan, sameuden, liukoisen eloperäisen aineksen pitoisuuden sekä a-klorofyllipitoisuuden vaihtelua kuvaavissa karttakuvissa painotutaan Loukeenkarin lähialueeseen (Kuva 11). Kullekin muuttujalle ja aikapisteelle on kaksi rinnakkaista karttakuvaa. Alueellisessa vaihtelussa ilmenevien yksityiskohtien esiin saamiseksi toisessa karttakuvassa on noudatettu yksinomaan sen sisältämään aineistoon perustuvaa väriskaalaa (viridis). Alueellisen ja ajallisen vaihtelun samanaikaiseksi havainnollistamiseksi kutakin muuttujaa koskeva, koko mittausjakson kattava aineisto jaettiin lisäksi 32 tasaluokkaan, joita käytetään ensimmäisen karttakuvan vastinparin visualisoinnissa. Valkoinen väri edustaa Loukeenkarin lähialueelta eli karttojen kattamalta alueelta kerätyn aineiston 50. prosenttipistettä eli mediaania. Tästä tummansinistä kohti vaihtuva väri kuvaa kunkin muuttujan arvojen pienentymistä mediaanitasoon nähden. Vastaavasti tummanpunaista kohti vaihtuva väri kuvaa arvojen kasvua tästä aluekohtaisesta mediaanitasosta. Muiden muuttujien suhteen (esim. hiilidioksidin osapaine) tuloksia esitetään erillisessä raportissa.



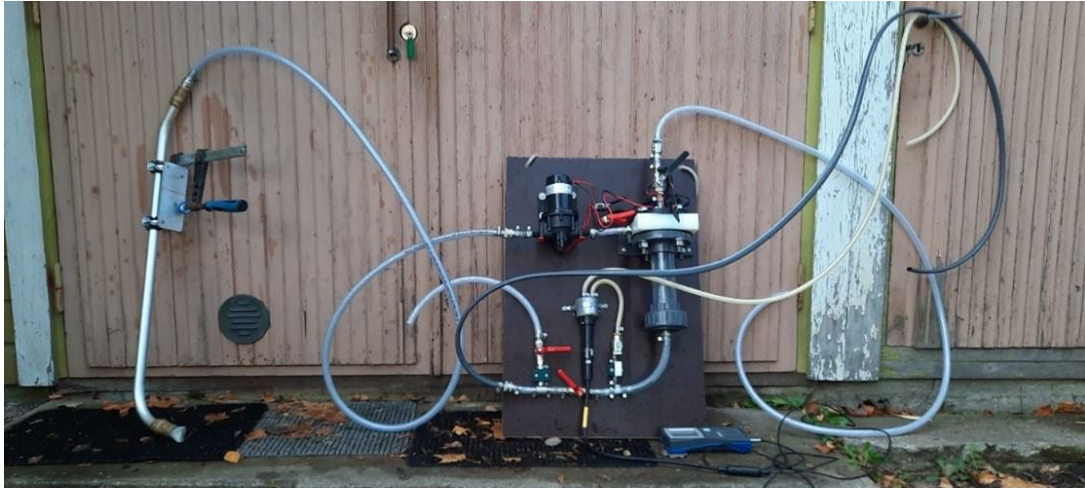
Kuva 11. Raportin karttakuvissa painotetaan Loueekankarin lähialueeseen. Tulosten yhteydessä esitettävien karttojen vedenlaatuaineistot on kerätty tummansinisellä merkityltä kartoituslinjalta. Loueekankarin kalankasvattamon sijainti on merkitty vedenlaatukarttoihin kalaa muistuttavalla symbolilla.

2.5.2. Syken läpivirtausmittausjärjestelmä

Syken läpivirtausmittausjärjestelmä (Kuva 13) pumppaa merivettä veneen perälautaan kiinnitettävän imuputken kautta kuplanpoistajaan ja siitä edelleen Chelsea Technologies Group'in TriLux-merkkisen fluorometrin läpivirtauskammioon, jossa fluorometri mittaa veden a-klorofyllin, sameuden ja fykosyaniinin pitoisuudet sekunnin välein. Mittauksen aikana veneen ajonopeus on noin 18 solmua. Mittaukset kalibroidaan mittausten aikana otettujen vesinäytteidensä ja niistä tehtyjen laboratorioanalyysien avulla (Kuva 12). Tässä työssä kerätyn kalibrointiaineiston perusteella sameuden suhteellinen keskimääräinen virhe on 52,4 % ja a-klorofyllin 15 %. Sameuden kohtalaisen suuri virhe johtuu siitä, että sameudet olivat lähellä mittarin mittaustarkkuuden alarajaa. Sekunnin välein tehtyjen mittausten kellonaika ja koordinaatit korjataan ottamalla huomioon läpivirtausviive (20 sekuntia). Mittaustulokset tallennetaan Excel-tiedostoon, siirretään datafuusio- ja QGIS-järjestelmiin yhdistettäväksi muuhun mittaustietoon vedenlaadun päiväkohtaisten karttojen ja aikasarjojen tuottamiseksi.



Kuva 12. SykeFlowTFMeter-järjestelmän TriLux- fluorometrin a-klorofylli (vasen) ja sameusanturien (oikea) kalibrointi 18.8. ja 5.9. havainnoilla.



Kuva 13. Syken läpivirtausmittausjärjestelmän instrumentointi veneessä. Kuva: Olli Malve.

2.6. Virtausmittarit

Virtausmittauksia tehtiin kuormituksen kulkeutumisreittien ja vedenlaatuvaikutusten arviointia varten. Niiden avulla voidaan arvioida, minne laitoksen kuormitus kulkeutuu ja sekoittuu, ja johtuuko havaitut vedenlaadun poikkeamat laitoksen kuormituksesta vai Uudenkaupungin ja Saaristomeren suunnalta virtaavista rehevämmissä vesistä.

Nortek Signature1000 ADCP



Kuva 14. Pohjaan laskettava virtausmittari, Nortek Signature1000 ADCP.

Vesipatsaan virtausprofiili pisteessä V1 (Kuva 4) mitattiin Nortek Signature1000 ADCP-laitteella (Kuva 14). Laite käyttää 1000 kHz taajuutta ja se soveltuu tarkkoihin profiilimittauksiin alle 30 metrin etäisyyksillä (syvyydellä). Laitteella voidaan mitata myös aallonkorkeuksia ja -suuntia. ADCP oli kiinnitetty asennuslaatikkoon, joka laskettiin pohjaan noin 14,4 m syvyyteen koordinaateissa 60° 36.086' N, 21° 09.729' E mittausjaksoksi 1.8.2022–5.9.2022. Laitteen anturit olivat noin 35 cm korkeudella pohjasta. Virtausprofiili mitattiin 1 m kerrospaksuudella, joista ylin käyttökelpoinen kerros oli 3 m syvyydessä ja alin käyttökelpoinen kerros 12 metrin syvyydessä. ADCP ei pysty mittaamaan virtauksia aivan pinnan ja pohjan läheisimmistä kerroksista signaalin lähetyksen aiheuttaman viiveen ja pohjan aiheuttaman voimakkaan sivukeilan vaikutuksesta. Laite mittasi kerrosten virtausnopeuksille 1 minuutin keskiarvon 10 minuutin välein.

Datan laatu tarkistettiin laitevalmistajan ohjelmistolla. Mittaukset merkittiin epäluotettavaksi, mikäli kaiun intensiteetissä esiintyi yli 50 dB:n piikkejä, syvyyssolun keskiarvoistettujen signaalien korrelaatio oli alle 90 % tai mittauksen keskihajonta oli yli 5 mm/s.

EHP-pojjun Nortek Aquadopp ADCP

Pisteessä V2 virtausmittauksissa käytettiin 400 kHz taajuista Nortek Aquadopp profiler ADCP-laitetta. Virtausmittari oli asennettu pintaan EHP-pojjun yhteyteen 3.8.2022 noin 16 m syvään paikkaan pisteeseen (60,614097 N, 21,101428 E, Kuva 4, piste V2). Anturit oli asetettu roikkumaan poijun alapuolelle. Virtauksia mitattiin 3 m paksuisista kerroksista, jolloin ylin mitattu kerros sijaitsi 6–9 m syvyydessä meren pinnasta ja toinen kerros 9–12 m syvyydessä.

Annetut nopeudet ovat hetkellisiä arvoja 3 merin syvyysalun alueelta saapuneista signaaleista. Mittari oli asetettu mittaamaan 30 minuutin välein, eikä siitä ole tallennettu laatuparametreja, joten varsinaista laaduntarkastusta ei datalle pystytty tekemään. Virtauksen suunnat on korjattu huomioimaan alueen +7 asteen eranto kompassissa.

2.7. Satelliittikuvien tulkinnat

Satelliittikuvien avulla saadaan yhtenäinen kuva vedenlaadun taustapitoisuuksista ja sen laajan skaalan vaihtelusta sekä laitoksen mahdollisista välittömistä vaikutuksista. Sameus tulkitaan satelliitti-instrumenttien havainnoista Suomen merialueilta ja järvistä pilvettömiltä alueilta (Koponen ja Attila 2017). Sameushavainnoissa näkyy usein luonnollista vaihtelua, kuten jokien rannikkovesiin tuoma maaperä tai voimakkaiden tuulien aiheuttama resuspensio, joka nostaa sameaa vettä pohjasta pintaan. Tulkinta perustuu EU:n Copernicus-ohjelman Sentinel-2-sarjan MSI:n (Multi-spectral Instrument) havaintoihin vuodesta 2016 lähtien. Tulkinta tehdään 60 metrin tarkkuudella. Vastaava sameustulkinta tehdään myös NASAn Landsat-satelliitin OLI-instrumentin aineistoista.

Sameuden tulkinta perustuu satelliitti-instrumentin havaitsemaan vesialueelta tulevan aurinkon säteilyn heijastukseen, joka on suurempi sameilla vesialueilla kuin kirkkailla alueilla. Sameuden tulkinta tehdään mallilla, joka perustuu neuroverkkoon (Case-2 Regional CoastColour), (Brockmann ym. 2016; Doerffer ja Schiller 2007, 2008a, 2008b). Malli on avoimesti saatavilla SNAP-ohjelmiston kautta. Syken tiedoissa mallin lopputulos on kuitenkin sovitettu vastaamaan Suomen rannikko- ja järviolueiden optisia ominaisuuksia. Sovitus perustuu kenttäkampanjoihin ja ympäristöhallinnon asemanäytteenottoon rannikolla ja järvillä (perusperiaate kuvattu Attila ym. 2013).

2.8. Datafuusio-järjestelmä

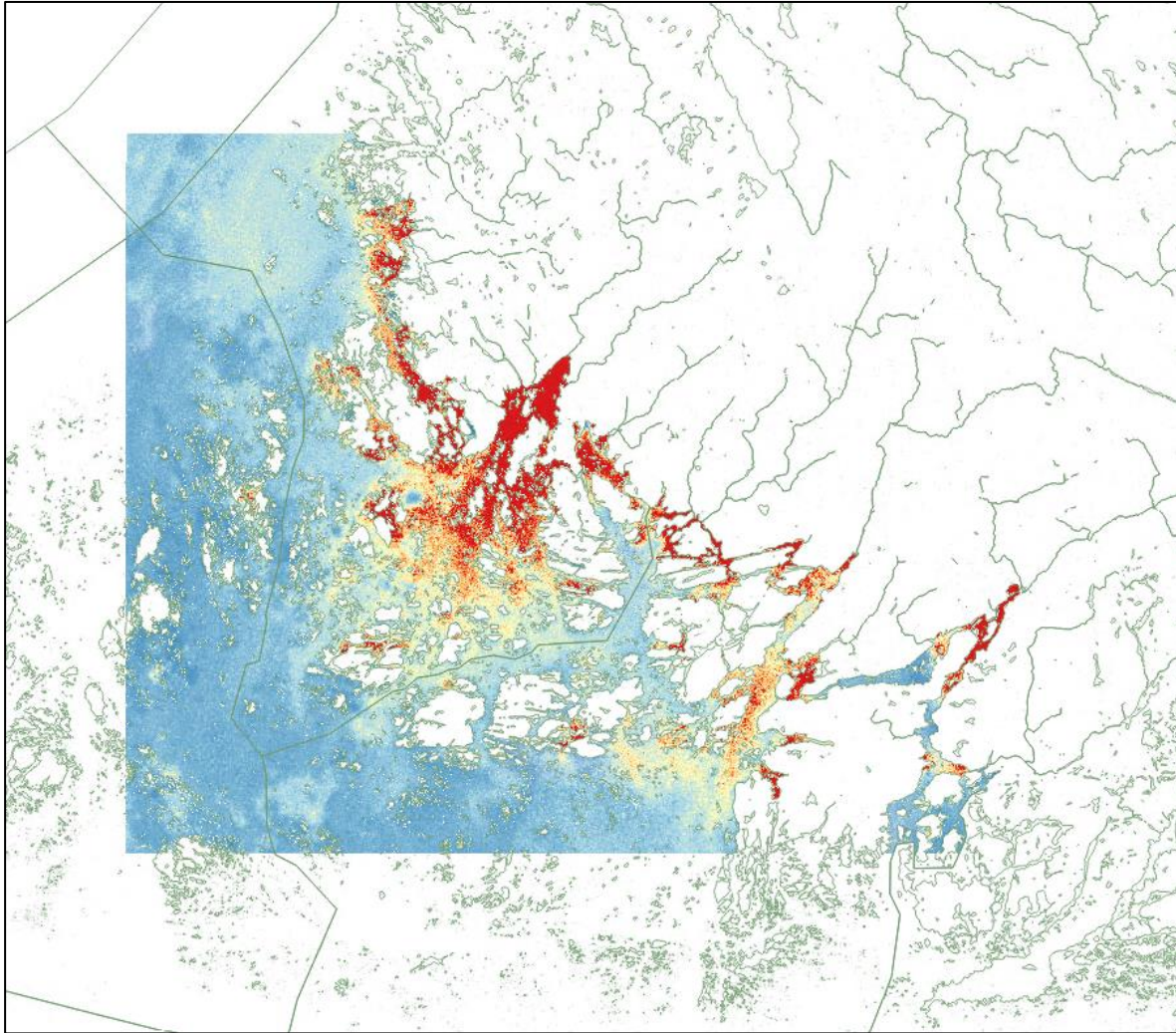
Mittauksia vedenlaadusta on saatavilla monista lähteistä. Tällöin oleellista on niiden informaation yhdistäminen optimaalisella tavalla. Fuusioitava data on usein epäsäännöllistä, siinä on puuttuvia tietoja ja edustavuudeltaan hyvin erityyppisiä havaintoaineistoja. Esimerkiksi satelliittihavainnoista saadaan vain pilvettömiltä alueilta. Vesinäytteistä tehdyt vesianalyysit puolestaan kuvaavat vedenlaatua tarkasti mittauspaikeilla ja mittaushetkellä. Näitä asemanäytteitä on kuitenkin harvakseltaan, tyypillisesti muutamia kertoja kesässä. Kun mittauksien lisäksi niihin liittyvät epävarmuudet tunnetaan, tuottaa datafuusio parhaan arvion vedenlaadusta.

Datafuusiolaskenta perustuu Kalman-suodatin ja -tasoin algoritmeihin sekä niiden erilaisiin yleistyksiin (Kauranne ym. 2019, Gunia ym. 2022) ja se vaatii tietoa tarkasteltavan ilmiön luonnollisesta ajallisesta ja paikallisesta vaihtelusta. Kriging-interpolaatio on samaan käyttötarkoitukseen luotu menetelmä spatiaalisessa tilastotieteessä. Tulokset mukailevat havainnoita silloin, kuin niitä on saatavilla. Menetelmä interpoloi puuttuvat arvot ajassa ja paikassa annettujen korrelaatioparametrien mukaisesti ja arvion epävarmuus kasvaa, mitä kauemmaksi mennään tunnetuista havainnoista.

Datafuusio-järjestelmä on kehitetty Syken ja Arbonaut Oy:n yhteistyönä (Kettunen ym. 2015, Laine ym. 2017). Järjestelmä tuottaa vesien ja merenhoidon käyttöön alueellista ja reaaliaikaista tietoa vesien tilasta ja luokituksista (Gunia ym. 2022, Malve ym. 2021a, 2021b). Järjestelmä yhdistää eri lähteistä saatavaa pintavesien ympäristötietoa (esim. a-klorofylli tai

sameus) perinteisistä seurannoista, automaattisilta mittausasemilta sekä satelliiteista. Järjestelmässä on karttapohjainen QGIS- käyttöliittymä datan käsittelyyn ja visualisointiin. Järjestelmän ohjelmistot ovat Syken palvelimella, ja Syke toimii niiden ylläpitäjänä.

Tässä työssä meri- ja rannikkoalueen sameus valittiin fuusioitavaksi tilamuuttujaksi ja kuvauksen ajallinen mittakaava on yksi vuorokausi Saaristomeren kattavassa alueellisessa mallihilassa, jonka yksittäisen hila-alkion koko oli 60 x 60 m (Kuva 15). Laskenta rajattiin avovesialueelle. Tuloksena saatiin paras mittauksiin perustuva informaatio jokaiselle merialueen laskehilan alkion jokaisena avovesikauden päivänä.



Kuva 15. Sameuden pitoisuus Datafuusio-järjestelmän 60 m x 60 m mallihilassa Saaristomeren ja Selkämeren eteläreunan alueella.

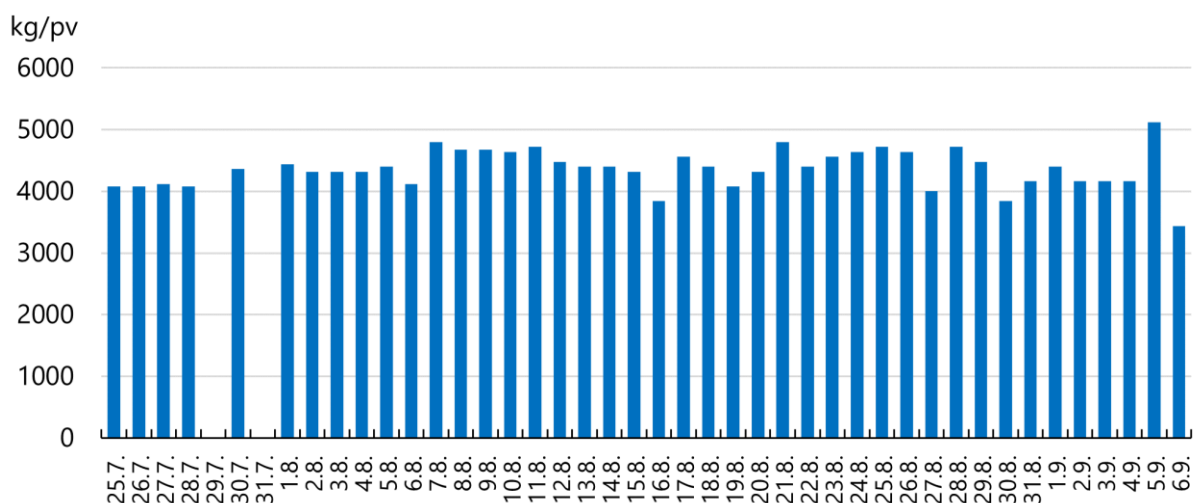
3. Tulokset

3.1. Loukeenkarin laitoksen rehunkäyttö

Loukeenkarin laitos sijaitsee alueella, jossa kalankasvatusolosuhteet ovat kirjolohen kasvun kannalta hyvät Suomen merialueiden mittakaavassa (Kankainen ym. 2020). Loukeenkarilla on peräkkäin kolme noin 38 metriä halkaisijaltaan olevaa kasvatuskehikkoa, jotka ruokitaan kukin erikseen ruokinta-aluksen rehutykillä. Ruokintamäärää voidaan säätää kalojen ruokahalun mukaisesti. Kirjolohen kasvun kannalta parhaita veden lämpötiloja ovat yleistään noin 14–17 °C vedet. Hellekausina ruokintaa voidaan Saaristomerellä joutua paikoin rajoittamaan korkean lämpötilan ja mahdollisesti alhaisen happipitoisuuden takia, mutta Loukeenkarin alueen laajoista vesimassoista johtuen lämpötilat jäävät yleisesti sisäosia alhaisemmiksi ja happipitoisuudet säilyvät hyvinä. Loukeenkarilla myrskytuulet voivat estää ruokinnan suorittamisen. Tätä voidaan mahdollisesti kompensoida muilla ruokintakerroilla. Pienillä kaloilla ruokintamäärät ovat painoon suhteutettuna suurempia kuin isoilla kaloilla, mutta rehun kokonaiskulutus on suurempaa loppukesällä ja alkusyksyllä kokonaisbiomassan lisääntyessä kuin mitä se on alkukaudella kalojen ollessa pienempiä.

Vuonna 2022 vedenlaadun mittauksia tehtiin elokuussa ja syyskuun alussa. Päivittäiset ruokintamäärät on esitetty mittauskampanjan ajalta ja noin viikkoa aikaisemmin ennen intensiivisen vedenlaatumittauksen alkua (Kuva 16). Ruokinta alkoi elokuussa yleensä kello 11, ja se kesti noin kaksi tuntia.

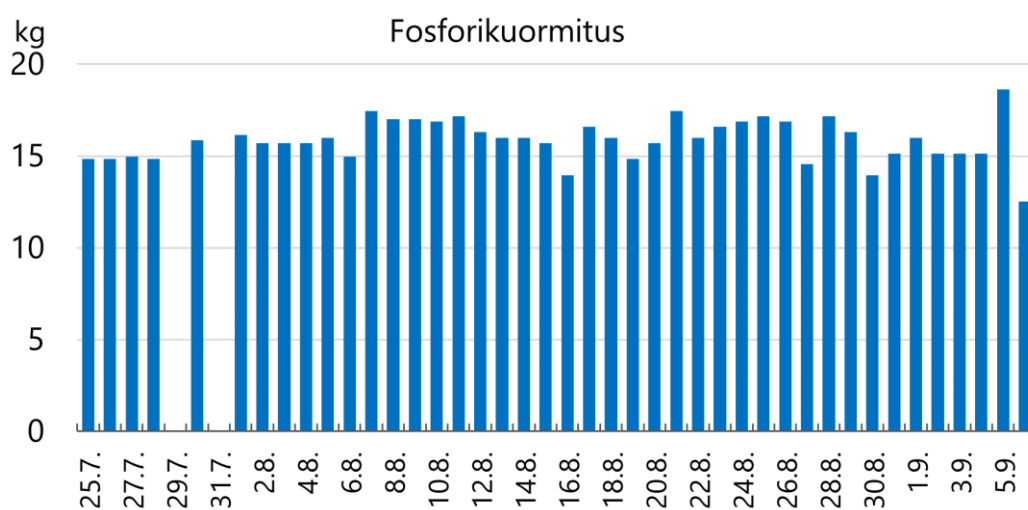
Heinäkuun lopulla oli kaksi päivää, jolloin laitoksella ei käyty ruokkimassa. Mittauskaudella ruokintapäivien ruokintamäärät olivat 3840–5120 kg/pv. Keskimääräinen ruokintamäärä niiden päivien osalta, jolloin ruokintaa tehtiin, oli vajaat 4400 kg/pv. Kalankasvatusta jatkettiin vuonna 2022 lokakuun loppupuolelle asti.



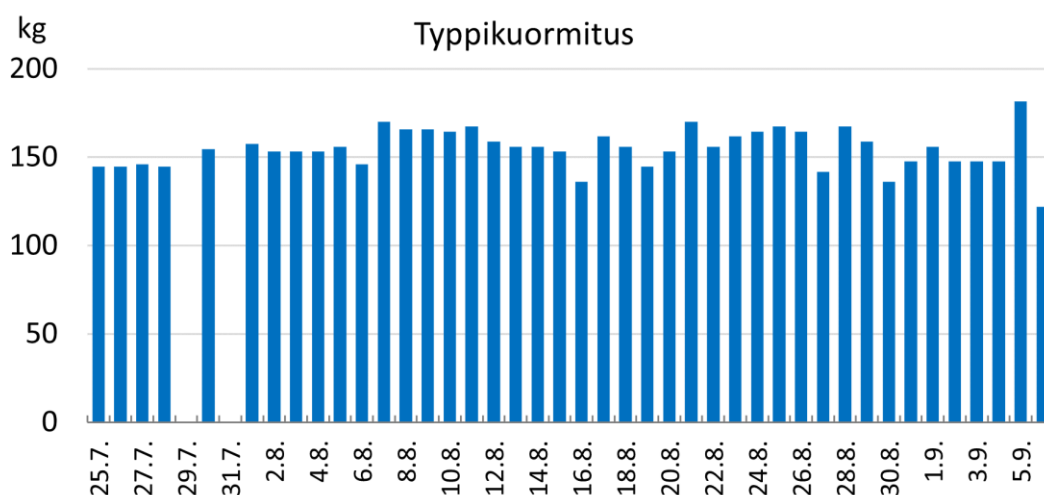
Kuva 16. Loukeenkarin laitoksen päivittäiset ruokintamäärät 25.7.–6.9.2022.

Vuonna 2015, jolloin tehtiin ensimmäinen vedenlaadun mittauskampanjointi ympäristövaikutusten arviointiin ja seurantaan liittyen, Loukeekarinar laitoksen lisäkasvutuotanto oli noin 210 tonnia. Tarkemmin vuodelta 2015 ei ole tiedossa ruokintamäärien päivittäisiä tai viikkokohtaisia jakaantumisia. Vuonna 2022 lisäkasvutuotanto oli 300 tonnia.

Kuvassa 17 ja 18 on esitetty suuntaa antavasti päivittäiseen ruokintamäärään perustuva ravinnekuormitus. Laskelma perustuu päivittäisen ruokintamäärän lisäksi rehukertoimeen 1,1 (=yleistään päivittäinen lisäkasvu) ja 4,0 fosforin ominaiskuormitukseen (g fosforia/kala kg) ja 39 typen ominaiskuormitukseen. Osa fosforista on leville käyttökelpoisessa liukoisessa muodossa ja osa laskeutuu pohjalle.



Kuva 17. Loukeekarinar laitoksen fosforikuormitus 25.7–6.9.2022.



Kuva 18. Loukeekarinar laitoksen typpikuormitus 25.7–6.9.2022.

3.2. Brändö100 seuranta-aseman vedenlaadun aikasarja-analyysi

Kustavin Loukeenkarin laitoksen ympäristön taustapitoisuuksien suuruuden ja vaihtelun selvittämiseksi analysoitiin Brändö100-havaintoaseman pitkäaikainen vertailuaineisto vuosilta 2000–2022.

Vuoden 2022 elo-syyskuussa (Liite 1) pintaveden lämpötila pysyi aikaisempien vuosien tasolla, mutta sameus oli alhaisempi ja suolaisuus syyskuussa tavallista korkeampi. Myös fosfaattifosfori elokuussa ja a-klorofylli syyskuussa olivat keskimääräistä korkeammalla tasolla.

Pintaveden kausivaihtelu ja vuosien välinen vaihtelu on ollut suurta (Liite 2). Kokonaisfosforin ja fosfaattifosforin pitoisuus on yleensä alhaisimmillaan kesäkuussa ja nousee voimakkaasti syksyä kohden, niin myös vuonna 2022. A-klorofylli on keväällä korkeammalla vaihdellen kesällä ja syksyllä alhaisemmalla tasolla. Kokonaistypen pitoisuus vaihtelee vuosien välillä suuresti vaihtelun ollessa pienetä kesällä. Kausivaihtelukin on suurta, mutta se ei ole kovin selväpiirteistä. Sameus on yleensä suurimmillaan syksyllä ja talvella, mutta suolaisuus näyttää vaihtelevan aika satunnaisesti.

Fysikaalis-kemiallisten havaintomuuttujien aikasarja jaettiin komponentteihin (trendi, kausivaihtelu, epäsäännöllinen vaihtelu). Liitteessä 3 on esitetty a-klorofyllin, kokonaisfosforin, fosfaattifosforin, kokonaistypen sameuden ja suolaisuuden havaitut kuukausiaikasarjat (observed) sekä niiden komponentit (trend, seasonal ja random) v. 2000–2022.

A-klorofyllin kausivaihtelu muuttui useaan otteeseen seurantajakson aikana, ja vuonna 2011 trendi nousi hieman pysyen muuten suht vakaana. Kokonaisfosforin trendi vaihteli moneen otteeseen seuraten suolaisuuden vaihteluita. Fosfaattifosforin kausivaihtelussa oli muutama muutoskohta (2012 ja 2016), ja trendi oli v. 2010 eteenpäin hyvin lievästi laskeva. Kokonaistypen trendi vaihteli lievästi useaan otteeseen, mutta sillä ei näkynyt selvää yhteyttä kokonaisfosforin ja suolaisuuden vaihteluihin. Sameus käyttäytyi suht vakaasti muutamaa kausivaihtelun ja trendin pientä muutosta (2004, 2006 ja 2008) lukuun ottamatta.

Vuonna 2015, (Kettunen ym. 2015) ei a-klorofyllin aikasarjassa havaittu pitkän ajan trendiä, vaikka vuoden 2010 jälkeen mitattiin jonkin aikaa keskimääräistä korkeampia a-klorofyllipitoisuuksia. Vuoden sisällä oli yleensä myös kaksi kukintahuippua, ja alhaisimmat pitoisuudet mitattiin yleensä tammikuussa. Huhtikuulle osuva pitoisuushuippu johtui kevätkukinnasta ja loppukesän pitoisuuksien kasvu sinileivistä. Vuoteen 2022 asti tilanne säilyi hyvin samanlaisena, joskin trendissä oli havaittavissa lievää nousua ja kausivaihtelussa useita muutoskohtia.

Poiketen vuoden 2015 tuloksista, kokonaisfosforissa ja fosfaattifosforissa oli havaittavissa lievä laskeva trendi, ja kokonaisfosforin kausivaihtelu muuttui hieman äärevämmäksi vuonna 2019.

Kalankasvatus sijoittuu toukokuun ja marraskuun väliseen aikaan, jolloin fosforipitoisuudet keskimäärin muutenkin kasvavat. Pitkän ajan tulosten perusteella kalankasvatuksen alkaessa fosforipitoisuudet ovat yleensä alimmillaan ja nousevat kesän ja syksyn mittaan luonnostaan. Kokonaisfosforin kausivaihtelun muuttuminen äärevämmäksi vuonna 2019 ja muutokset a-klorofyllin kausivaihtelussa ovat merkittävimmät saman suuntaiset muutokset vedenlaadussa laitoksen tuotannon alkamisen jälkeen. Laitoksen vaikutusta ei voi tämän perustella yhdistää näihin muutoksiin, ja suolaisuudessa tapahtuneet samanaikaiset muutokset viittaavat paremminkin virtauksissa ja vesimassojen suuren skaalan liikkeissä tapahtuneisiin muutoksiin.

3.3. EXO-pojjut

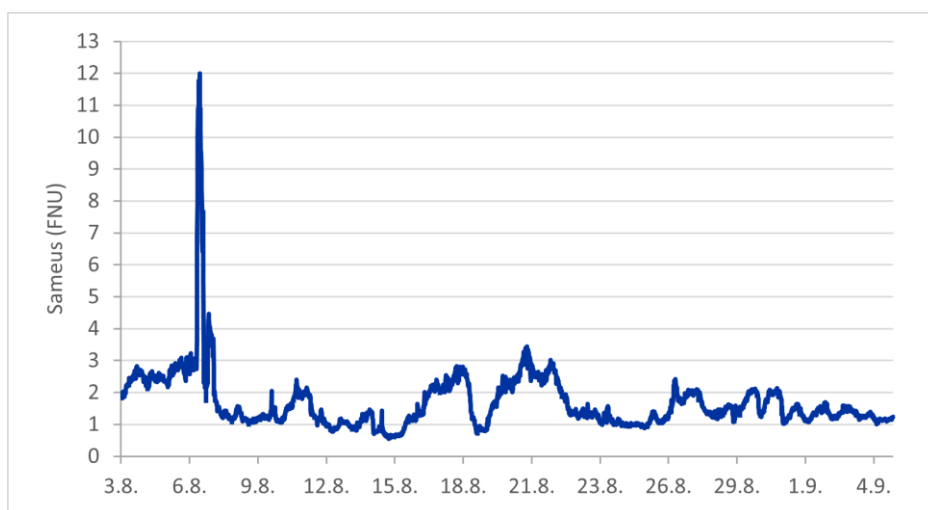
Katanpään poiju 1

Kustavin Katanpään eteläpuolelle asennettiin poiju 1, johon oli kiinnitettyä EXO2-vedenlaatumittari. Poiju mittasi noin viiden viikon ajan (3.8.–5.9.2022). EXO-laitteen anturit olivat noin kolmen metrin syvyydessä, paikan ollessa noin kahdeksan metriä syvä. Kuvassa 19–22 on esitetty mittausarvot koko ajalta.

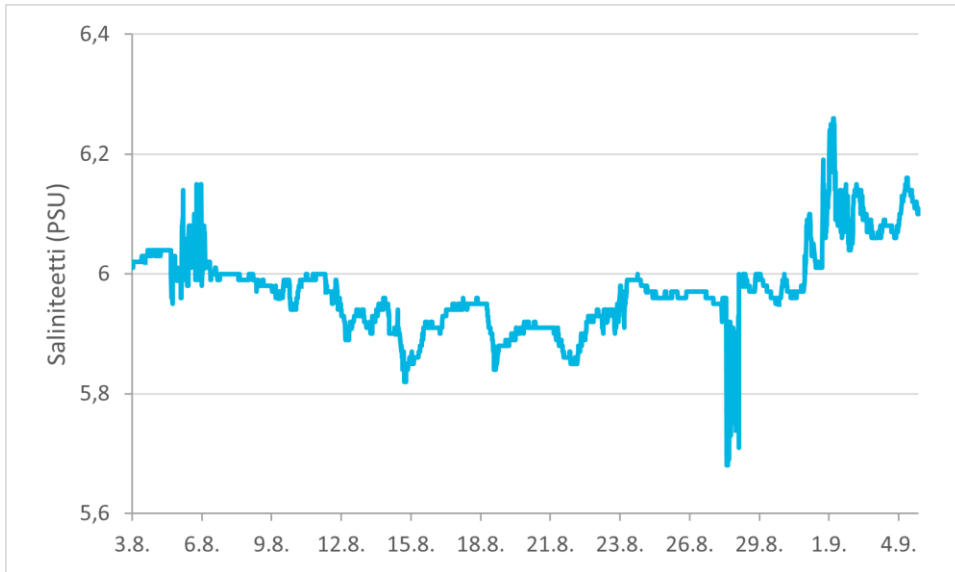
Mittausjakson a-klorofylliarvot vaihtelivat 1,5–7,3 µg/l välillä. Keskiarvo 15 minuutin välein tehdyille a-klorofyllimittauksille oli 3,4 µg/l. Elo-syyskuun vaihteessa vallinneiden pohjoistuulten aikana a-klorofylli oli selvästi koholla. Sameusarvossa oli voimakas nousu 6.8. Tällöin Iso-karin mittausasemalla mitattiin yli 21 m/s tuulenpuuskia, mikä on aiheuttanut vesien sekoittumista. Keskimääräinen sameusarvo koko ajanjaksolta oli 1,7 FNU. EXO-laitteessa ollut keskiharja puhdisti anturit neljä kertaa vuorokaudessa, eikä antureiden likaantumisen aiheuttavaa arvojen kohoamista ole havaittavissa.



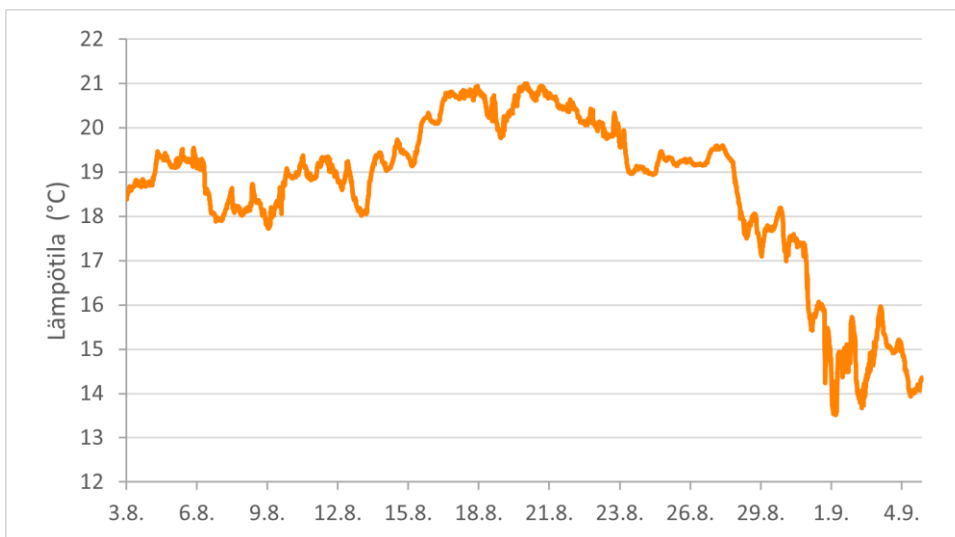
Kuva 19. A-klorofylli mittaukset Kustavin Katanpään eteläpuolen EXO-laitteella.



Kuva 20. Sameus (FNU) Katanpään eteläpuolella. Piikki sameudessa: Toimi-myrsky 6.8.2022.



Kuva 21. Lämpötila Katanpään eteläpuolella olevassa EXO-pojjussa.

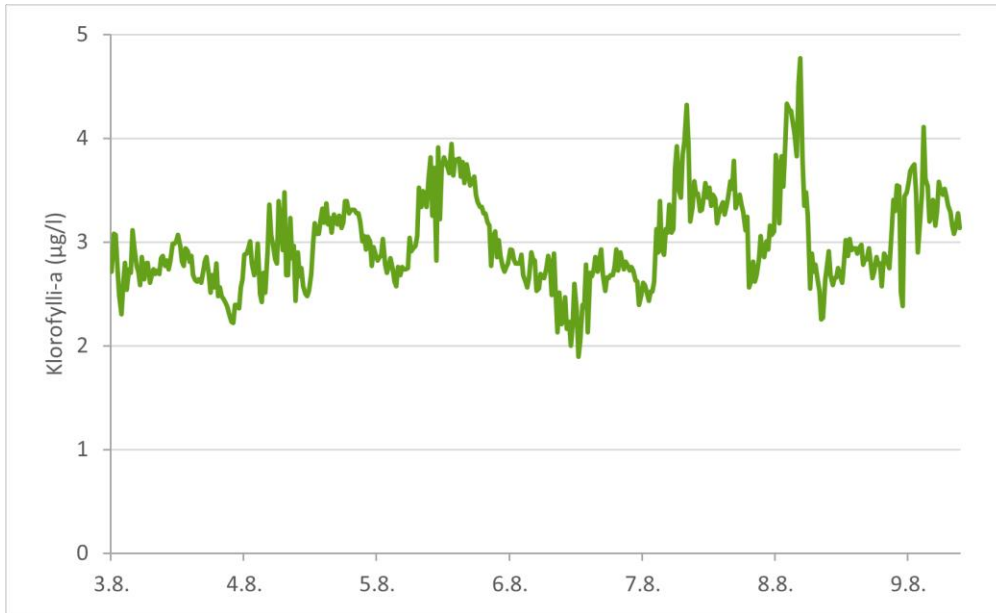


Kuva 22. Saliniteetti Katanpään eteläpuolella olevassa EXO-pojjussa.

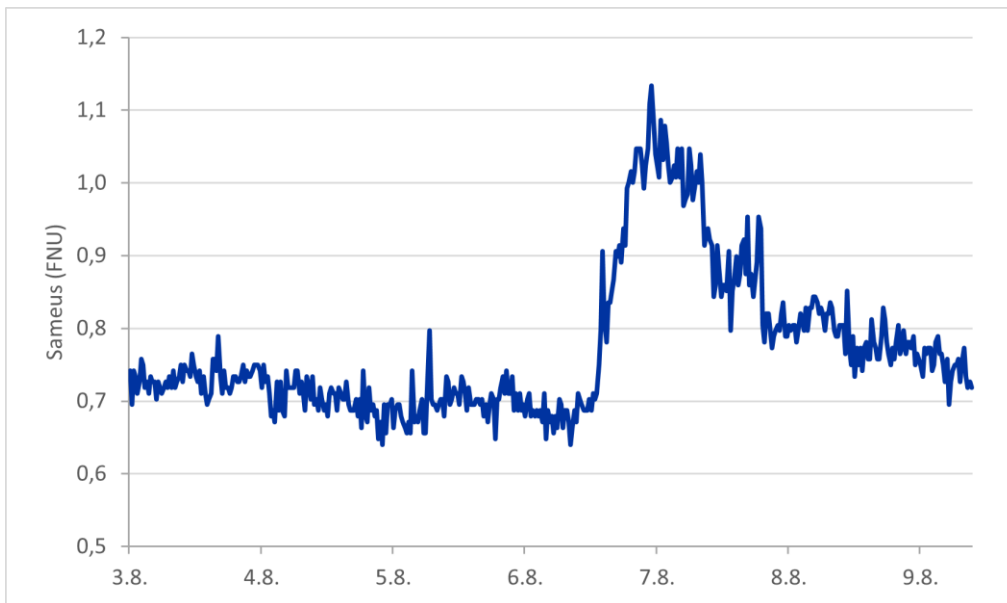
Ahvenanmaan poiju 2

Ahvenanmaan puolelle sijoitettu EXO-poiju 2 mittasi hieman yli viisi vuorokautta (3.8.–9.8.2022). EXO-laitteen anturit olivat noin kolmen metrin syvyydessä, paikan ollessa noin 25 metriä syvä. Kuvassa 23 ja 24 on esitetty arvot mittausajalta.

A-klorofylli-arvot vaihtelivat viiden päivän aikana 1,9–4,8 µg/l välillä, keskiarvon ollessa 3 µg/l. Sameudessa on havaittavissa 6.8. nousua ilmeisesti myrskytuusien seurauksena avoimella merialueella, vaikka arvojen nousu onkin vähäisempää kuin sisemmällä Katanpään eteläpuolella sijaitsevassa mittauspaikalla.



Kuva 23. A-klorofyllin vaihtelu Ahvenanmaan EXO-pojussa



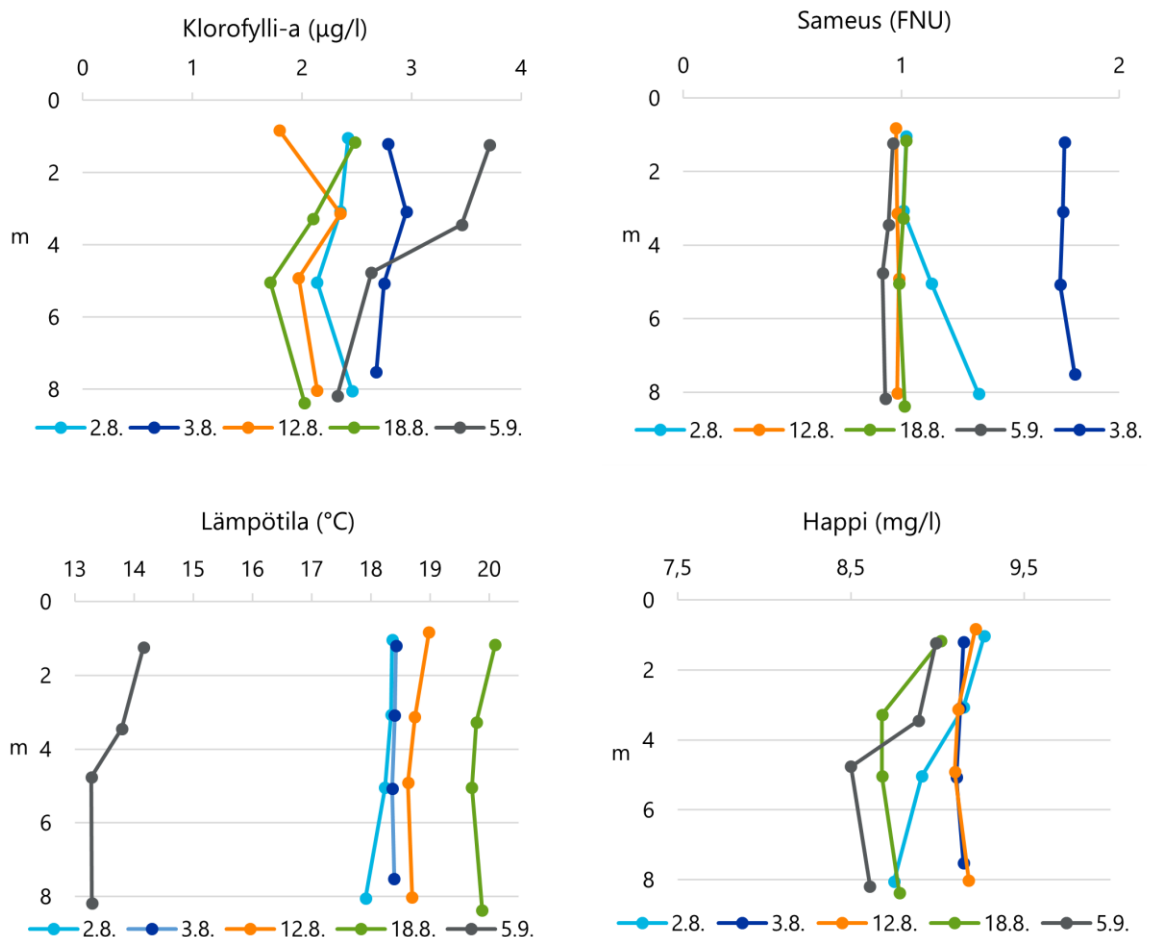
Kuva 24. Sameuden vaihtelu Ahvenanmaan EXO-pojussa.

3.4. Syvyysprofiilit EXO-laitteella

3.4.1. Syvyysprofiilit eri ajankohtina

Paikka 1, Heikinkari

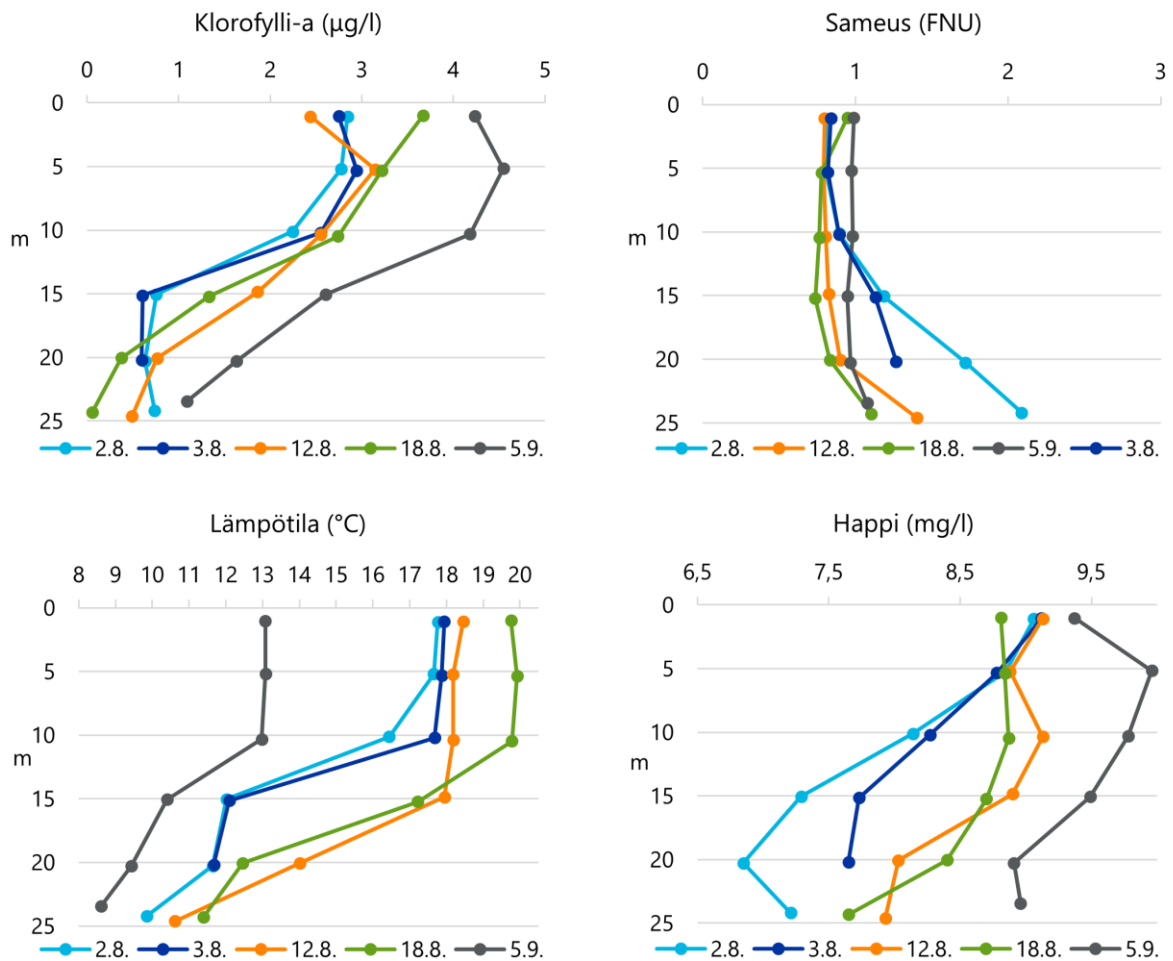
Kustavin paikassa 1 (Heikinkari, ks. Kuva 4) mittaukset tapahtuivat hieman eri paikoista (3.8. mittausta kaikista lähimpänä poijua). Paikka on matala ja suojainen. Profiilit ovat kuvassa 25. A-klorofylli arvot vaihtelivat koko vesikerros huomioiden vajaan kahden ja vajaan neljän µg/l välillä. Sameudessa ei ollut syvyysuuntaista vaihtelua paitsi 2.8.2022, jolloin arvot nousivat hie- man pohjaa kohti.



Kuva 25. Vedenlaadun mittaustuloksia esitettynä Katanpään eteläpuolelta poijun 1 vierestä.

Paikka 2, Ahvenanmaa

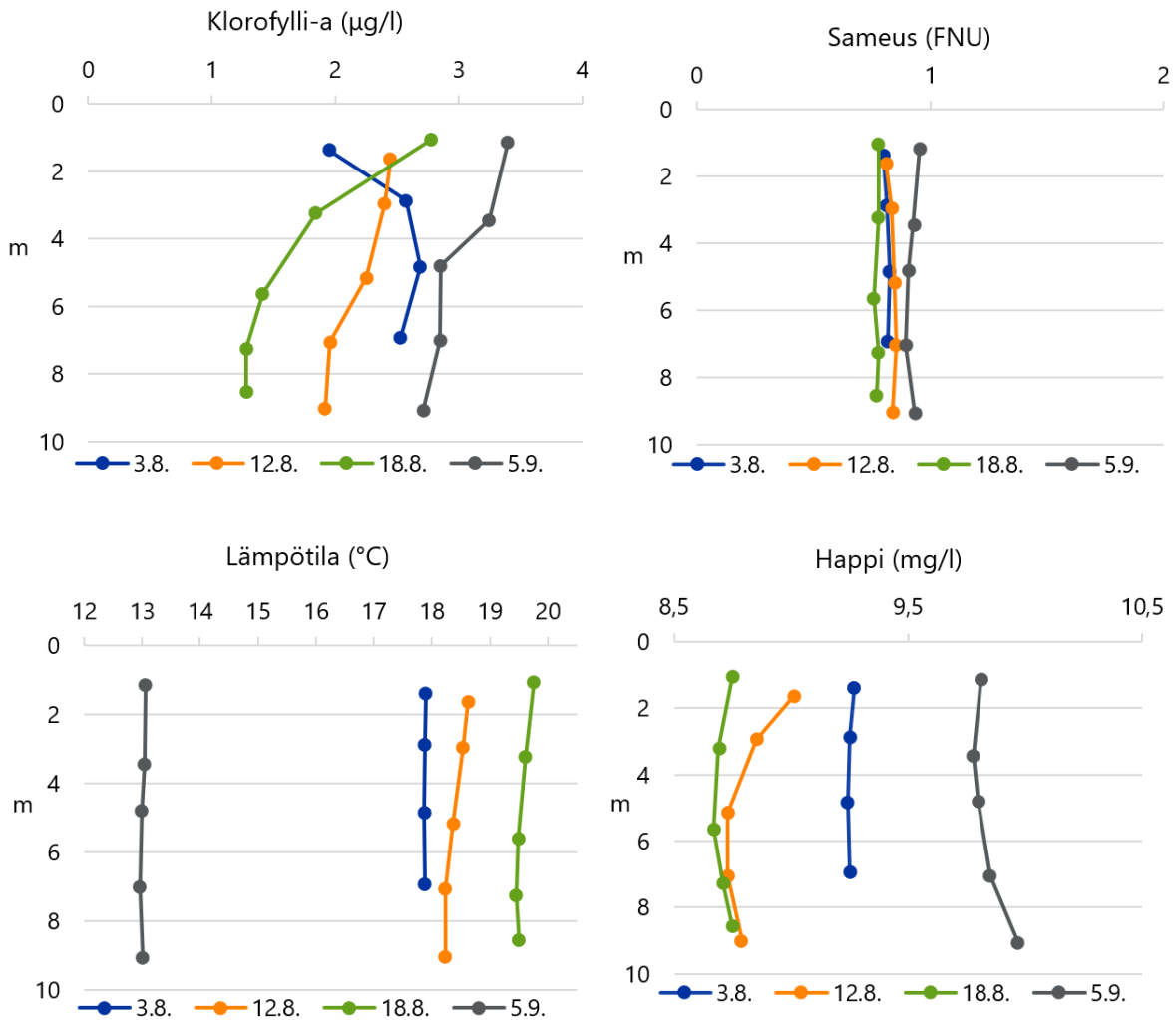
Ahvenanmaan poiju sijaitti avomerellä (Kuva 4). Profiilit ovat kuvassa 26. Vedet olivat mittauskerroilla lämpötilan mukaan kerrostuneita ja pintakerros ainakin 10 metriin asti pääsääntöisesti jokseenkin tasalämpöinen. Korkeimmat a-klorofylli arvot (2,2–4,5 µg/l) oli noin 0–10 metrin vesikerroksessa ja 15 metrissä jo selvästi alhaisemmat.



Kuva 26. Vedenlaadun mittaustuloksia esitettynä Ahvenanmaan poijun vierestä.

Paikka 3, Loukeenkari (saari)

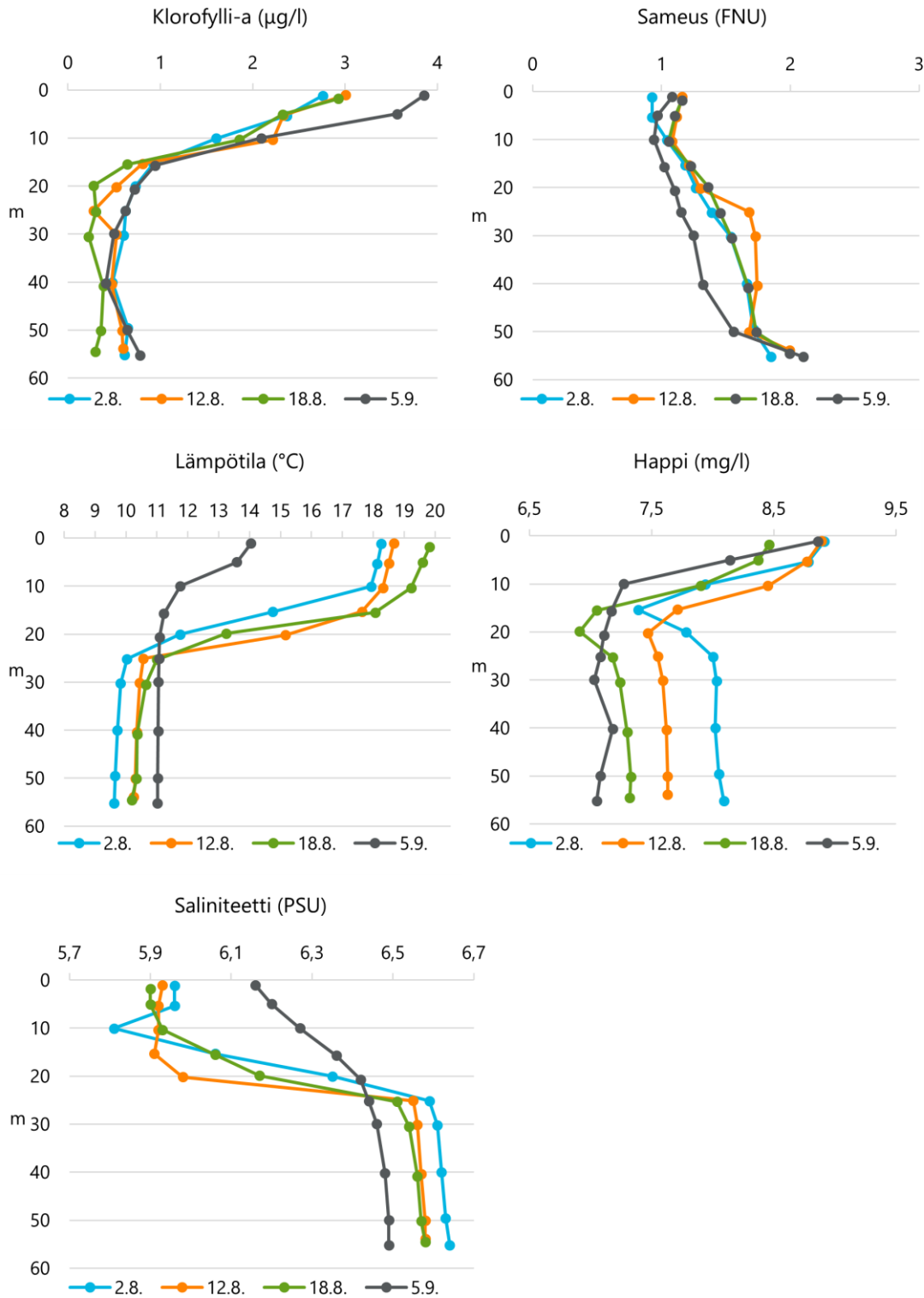
Paikka 3 sijaitti Loukeenkarin saaren itäpuolella (Kuva 4) alle kahden kilometrin päässä kalan- kasvatuksesta. Profiilit ovat kuvassa 27. Vesikerroksen a-klorofylli-arvot vaihtelivat mittausker- roilla 1,3–3,4 µg/l välillä.



Kuva 27. Vedenlaadun mittaustuloksia esitettynä Loukeenkarin saaren luota.

Paikka 4, Katanpään syväne

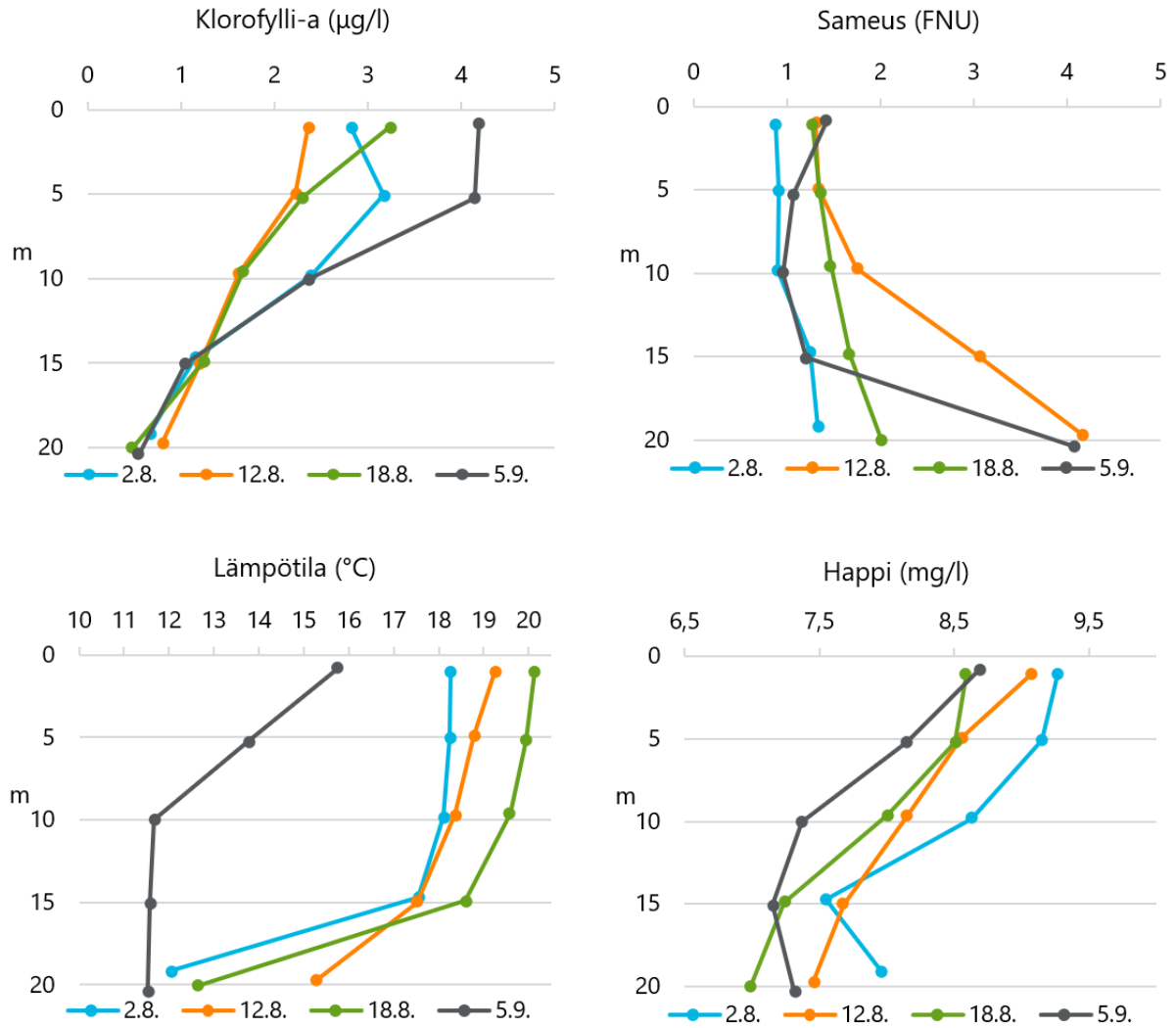
Kustavin Katanpään länsipuolella sijaitseva paikka (Kuva 4) on hieman alle 60 metriä syvä. Profiilit ovat kuvassa 28. Kuvista on selvästi nähtävissä jokaisena mittauskertana tapahtuva arvojen muutos pintaveden ja alusveden välillä. Elo-syyskuun vaihteen pohjoistuulilla pintavesi viilentyi selvästi, mutta sillä ei ollut suurta vaikutusta alusveden lämpötilaan tai happipitoisuuteen.



Kuva 28. Vedenlaadun mittaustuloksia esitettynä Katanpään syvänteestä.

Paikka 5, Katkuru

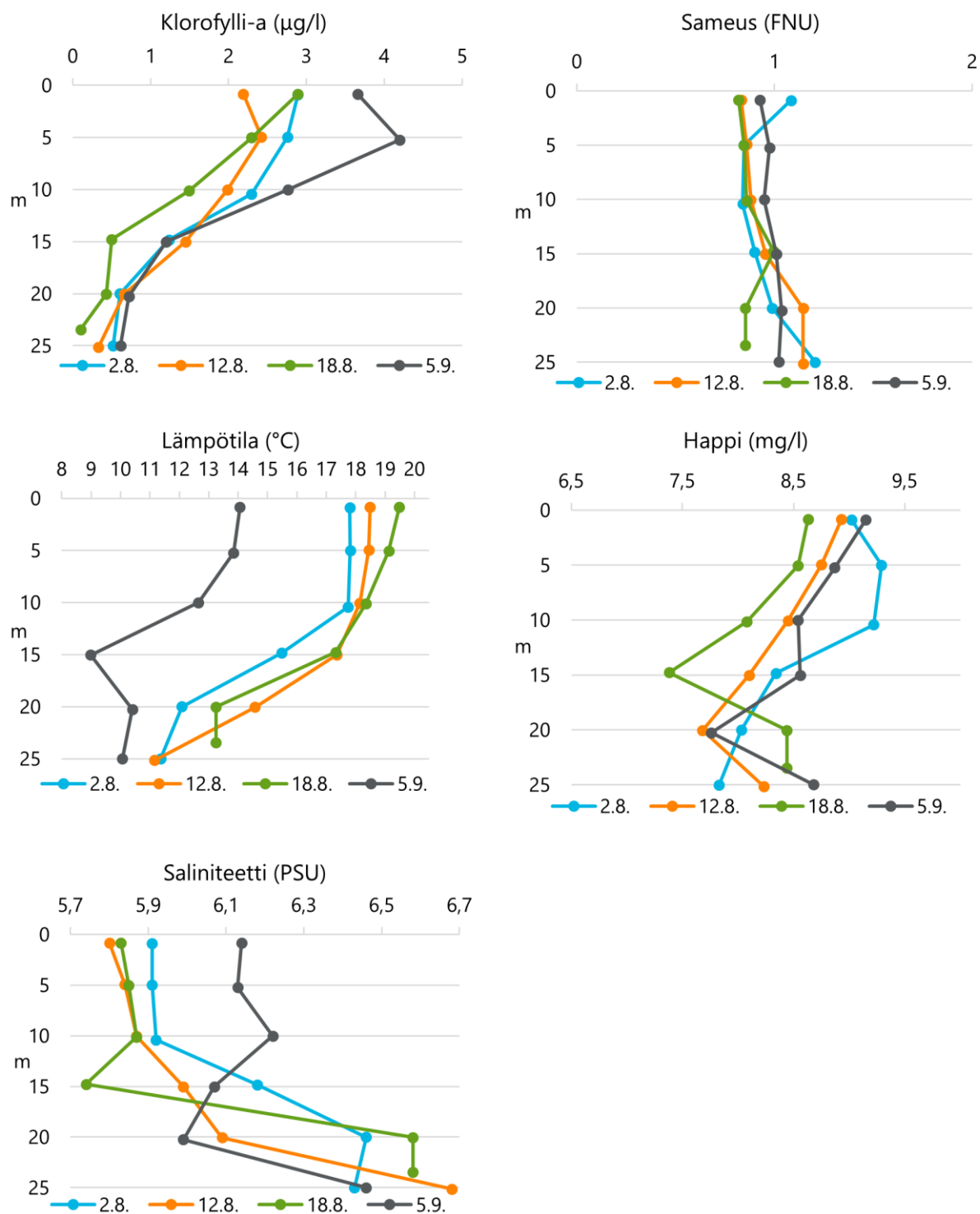
Paikka 5 sijaitsee (Kuva 4) Kustavin Ströömin pohjoispuolella. Profiilit ovat kuvassa 29. Sameusarvot ovat kahtena mittauskertana korkeahkot pohjan läheisyydessä ja vaikutusta voi olla osin myös Ströömin vesillä ja virtauksilla, jossa sameusarvot ovat korkeampia kuin avoimilla vesialueilla.



Kuva 29. Vedenlaadun mittauksia esitettynä Kustavin Ströömin pohjoispuolelta.

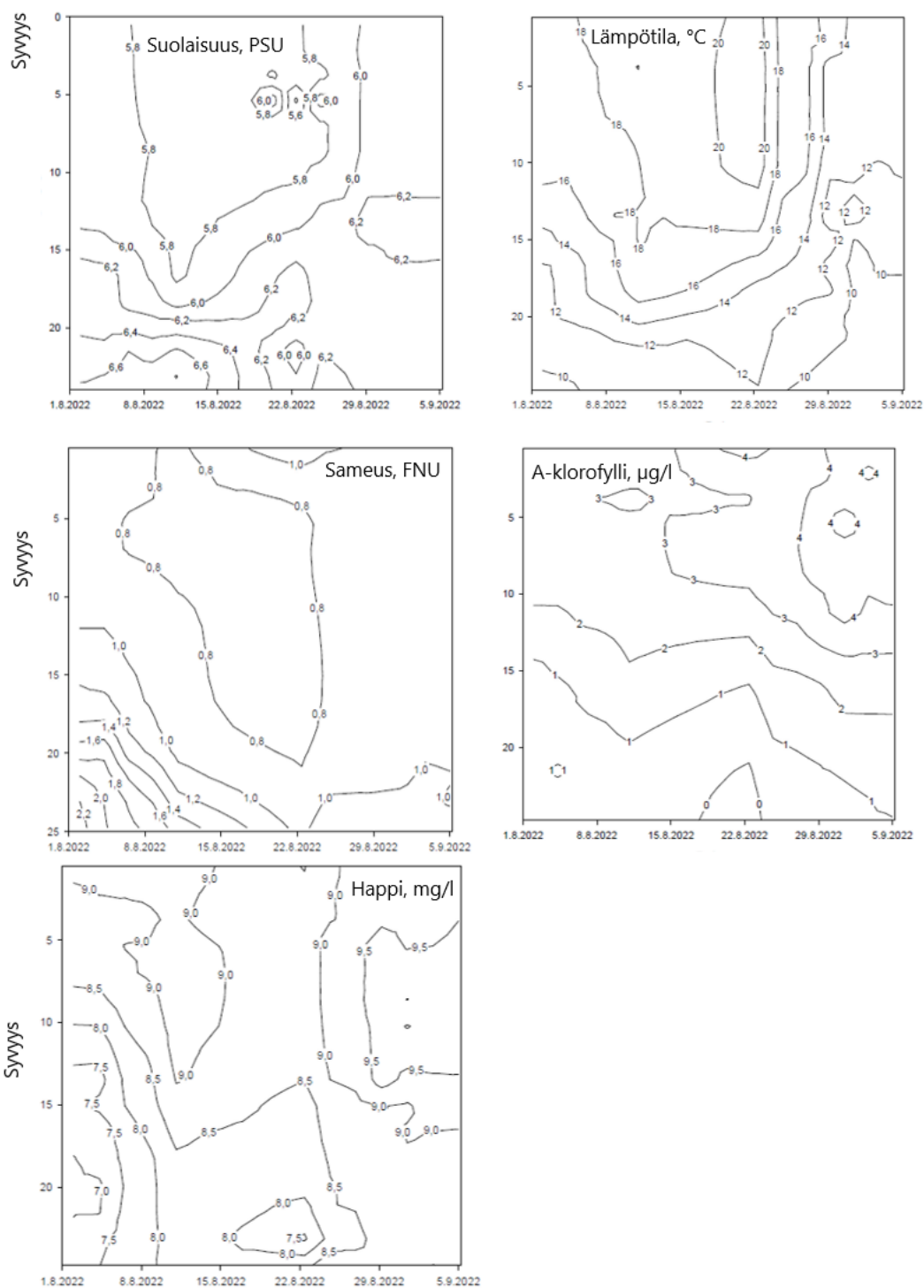
Paikka 6, Loukeenkarin laitoksen eteläpuoli

Paikka 6 sijaitsee Loukeenkarin kalankasvatustiloksen läheisyydessä (Kuva 4) suunnilleen 300 metrin päässä. Profiilit on esitetty kuvassa 30. Klorofylliarvot vaihteli 0–10 metrin vesikerroksessa 1,5–4,2 µg/l välillä. Sameusarvot vaihtelevat koko vesikerroksessa noin 0,8–1,1 FNU välillä.

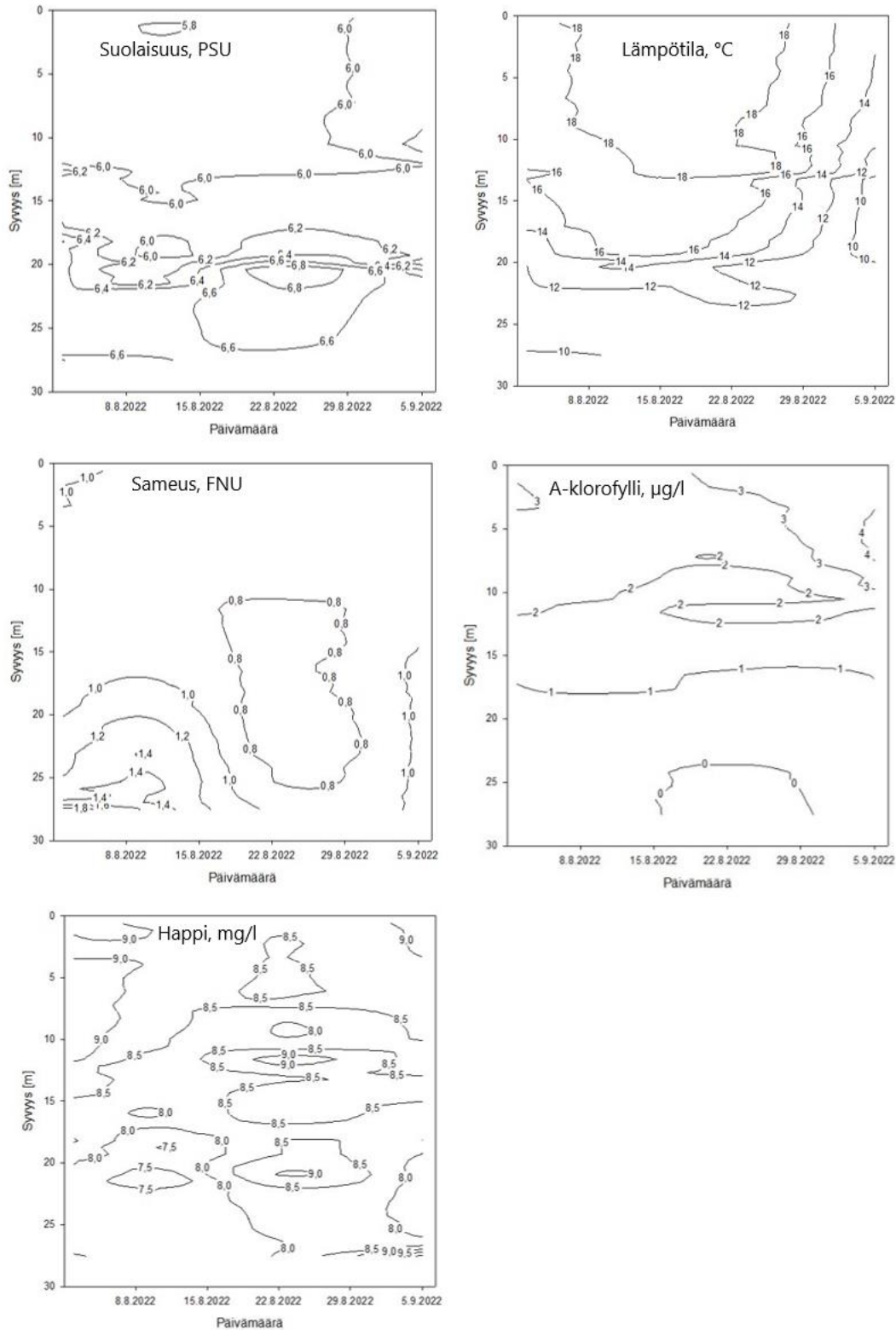


Kuva 30. Vedenlaadun mittaustuloksia 300 metrin päästä Loukeenkarin kasvatustiloksesta.

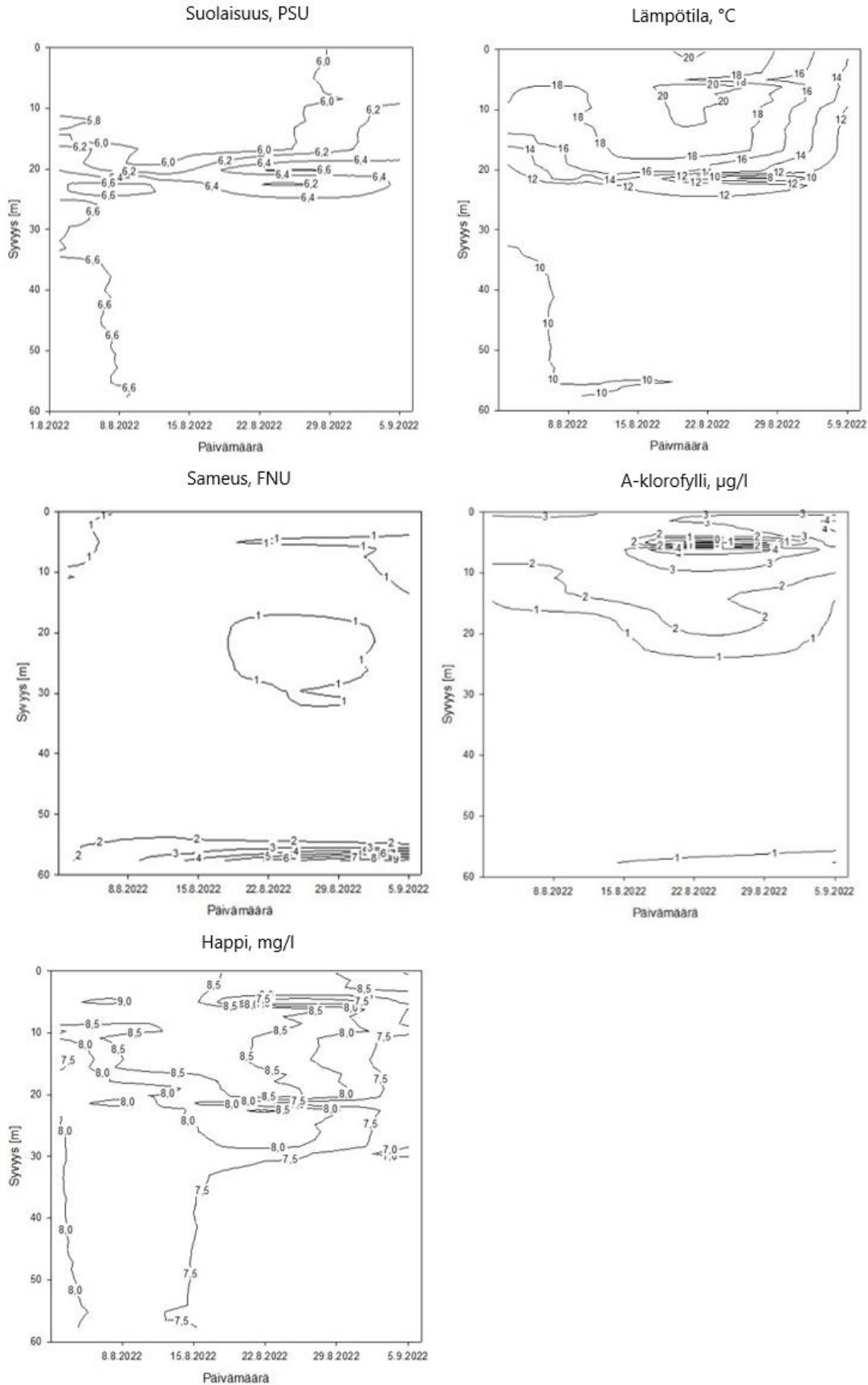
Syvyysluotausten perusteella piirrettiin suolaisuuden, lämpötilan, sameuden, a-klorofyllin ja hapen tasa-arvokäyrät syvyyden ja ajan suhteen. Kuvassa 31 on läntisin mittauspiste 2, kuvassa 32 on laitoksen eteläpuolella oleva mittauspiste 6 (kuva 4) ja kuvassa 33 on Katanpään syvänteen mittauspiste 4 (kuva 4). Kuvissa näkyy hyvin selvästi elo-syyskuun pohjoistuulten aiheuttamat muutokset pintakerroksen vedenlaadussa ja kerrostumisessa. Pintaveden lämpötila laski ja suolaisuus ja a-klorofylli nousivat molemmissa pisteissä.



Kuva 31. Vedenlaadun tasa-arvokäyrät ajansuhteen eri syvyyksissä (läntisin mittauspiste 2, Kuva 4). Ylhäällä suolaisuus ja lämpötila, keskellä sameus ja a-klorofylli ja alhaalla happi (1.8.–5.9.2022).



Kuva 32. Vedenlaadun tasa-arvokäyrät ajansuhteen eri syvyyksissä (laitoksen eteläpuolella mittauspiste 6, Kuva 4). Ylhäällä suolaisuus ja lämpötila, keskellä sameus ja a-klorofylli ja alhaalla happi (1.8.–5.9.2022).

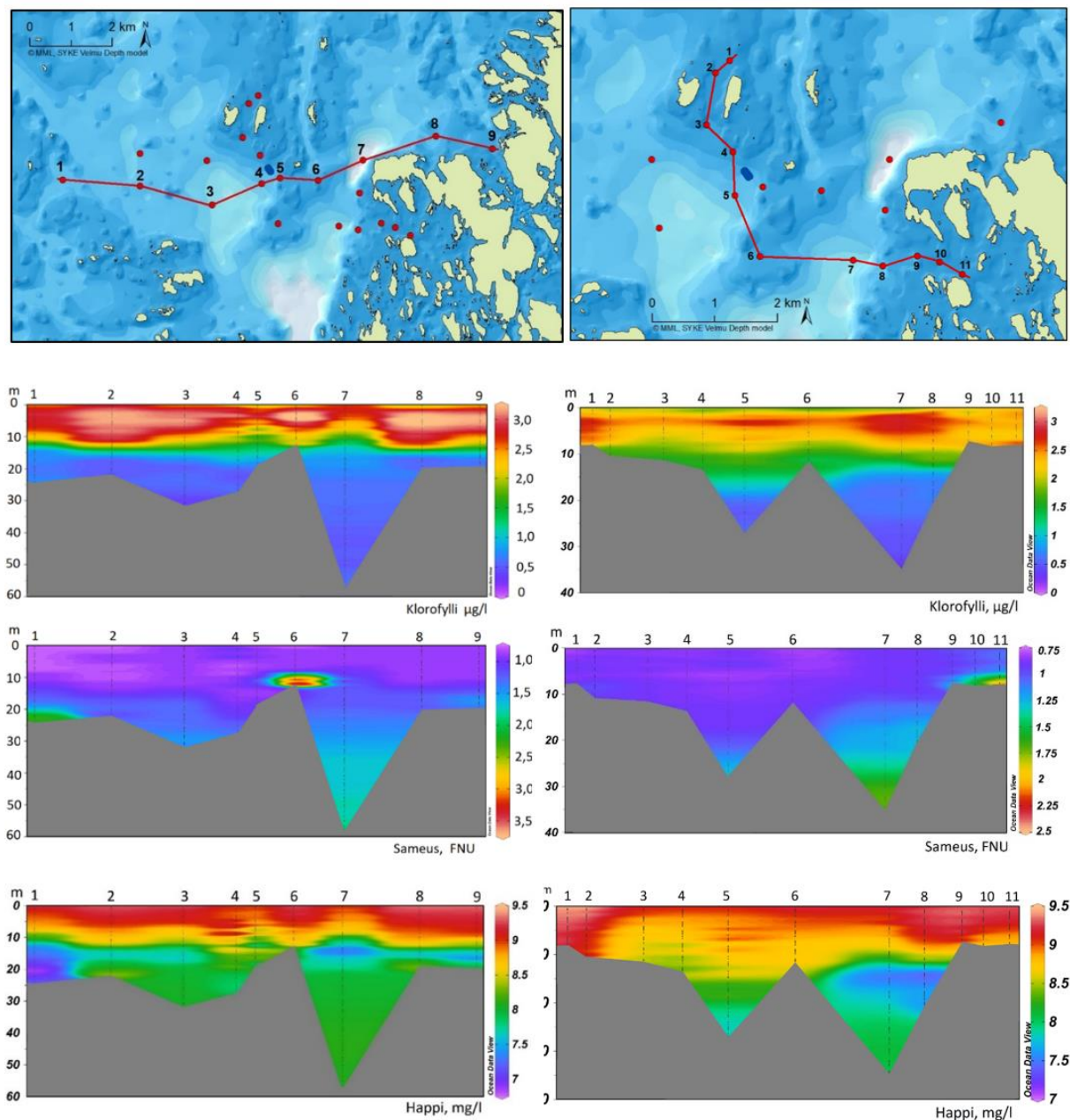


Kuva 33. Vedenlaadun tasa-arvokäyrät ajansuhteen eri syvyyksissä (Katanpään länsipuolella syvänteessä mittauspiste 4, Kuva 4). Ylhäällä suolaisuus ja lämpötila, keskellä sameus ja a-klorofylli ja alhaalla happi (1.8.–5.9.2022).

3.4.2. Poikkileikkaus-profiilit vesipatsaasta

Kuvissa 34–39 on esitetty syvyysprofilointien perusteella tehdyt poikkileikkaus-profiilikuvaajat. Tehdyistä profiloinneista on esitetty kolmen mittauskerran (2.8., 12.8. ja 5.9.) kuvaaja länsi-itä- ja luoteis-kaakko-suuntaisilta linjoilta.

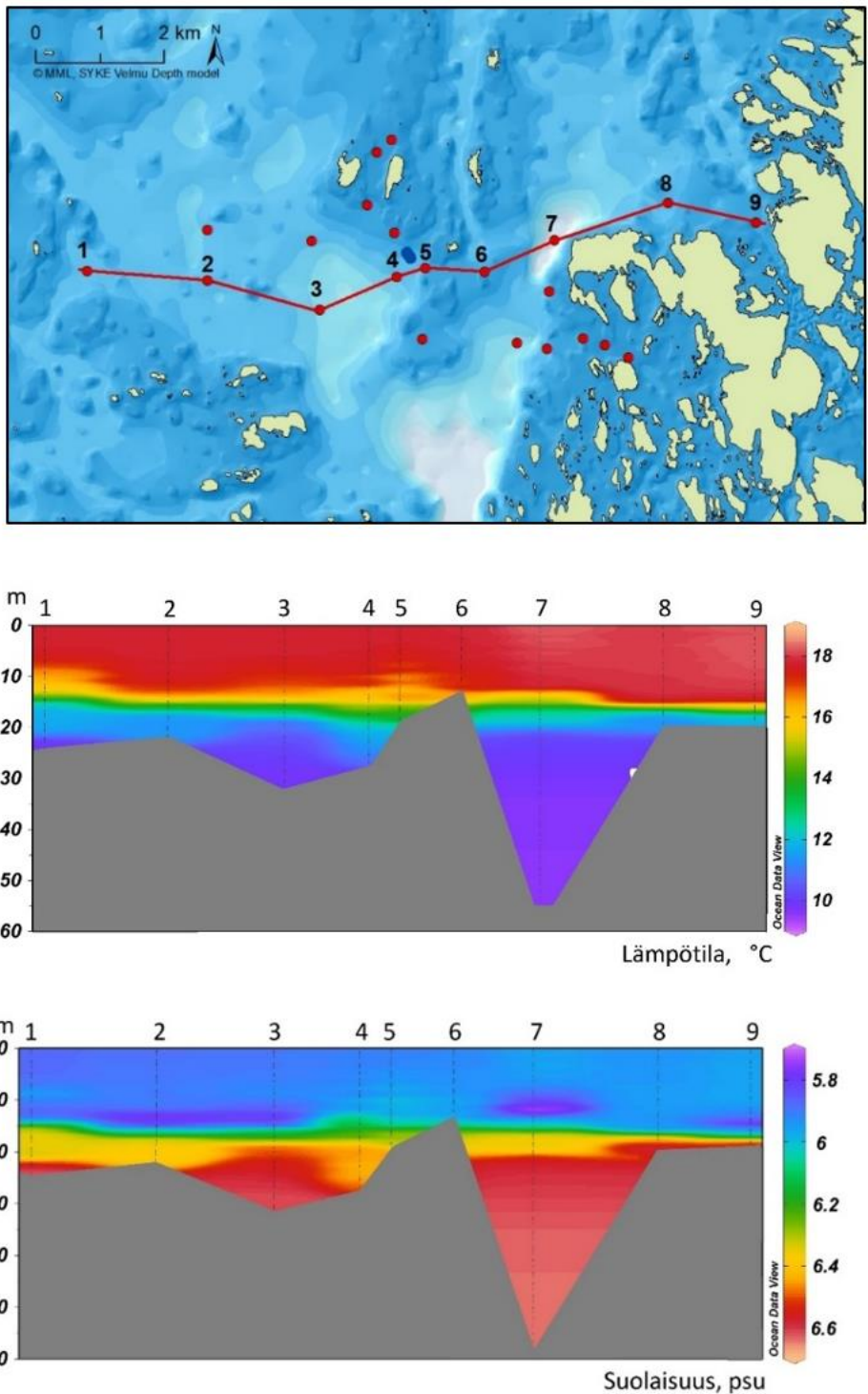
2.8.2022



Kuva 34. Poikkileikkausprofiilit 2.8.2022: a-klorofylli, sameus ja happi.

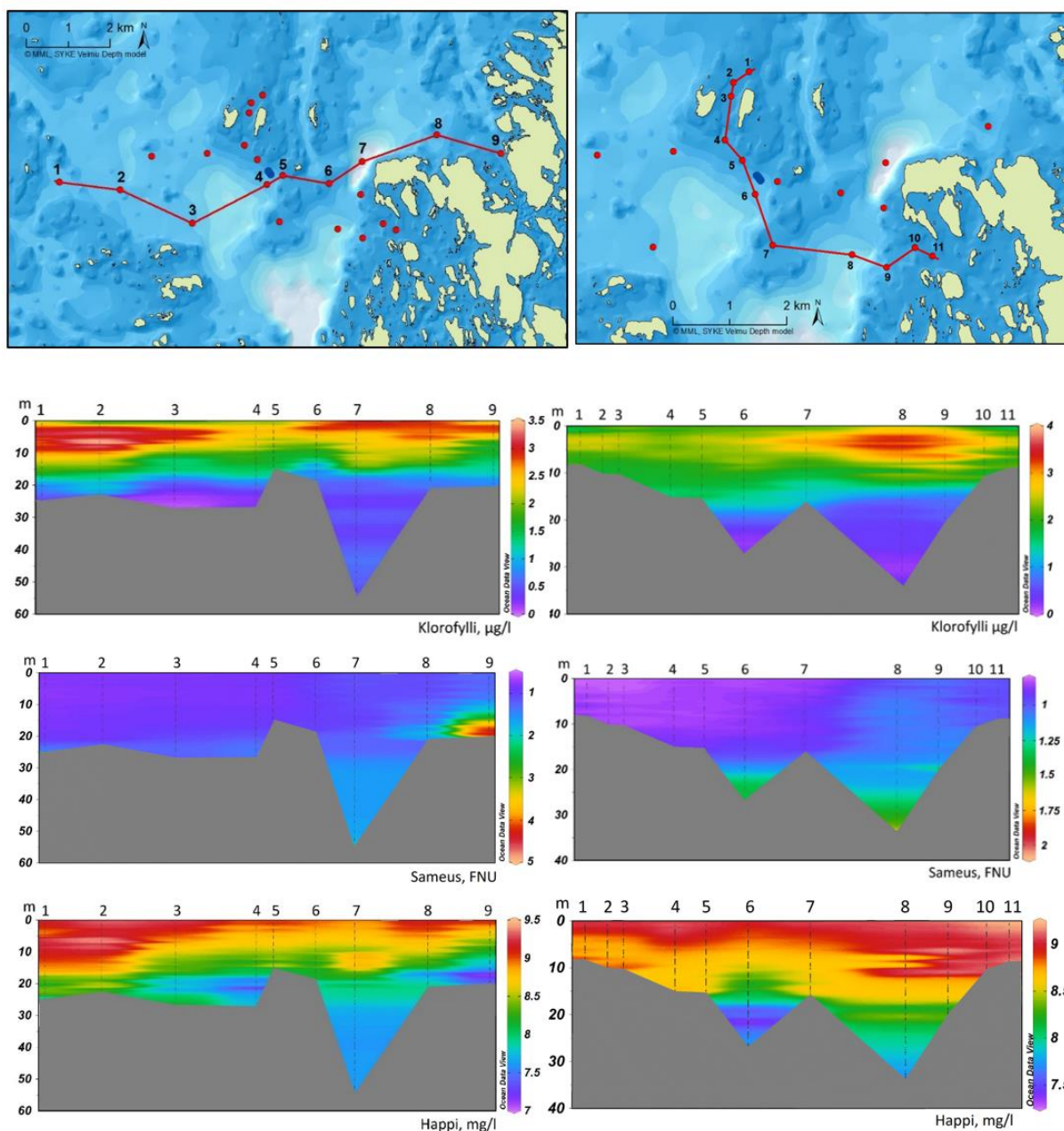
A-klorofylli-arvot ovat 2.8.2022 korkeimpia pinnan läheisessä vesikerroksessa noin 8 tai 12 metrin syvyyteen asti. Pisteessä 7 (Kuva 34) on pohjan läheisyydessä mitattu sameampaa vettä runsaan kilometrin päässä laitoksesta. Yleisesti ottaen voi olla mahdollista, että jossain tapauksissa anturin laskeminen hyvin lähelle pohjaa voi aiheuttaa korkeampia mittauksia, mutta tässä tapauksessa aiheuttajasta ei ole varmuutta. Tutkimusalueella on paikoin

alusveden lisäksi välivedessä hieman alhaisempia happipitoisuuksia. Lämpötilan mukainen kerrostuneisuus on näkyvässä suunnilleen 10–15 metrin syvyydessä (Kuva 35). Syvimmässä pisteessä Kantapään länsipuolella ero suolaisuudessa pintaveden ja alusveden välillä on noin 0,7 PSU.



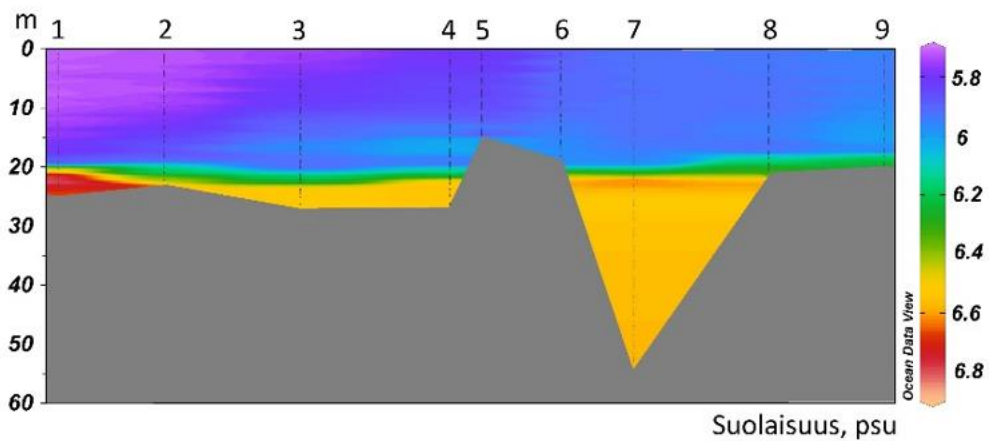
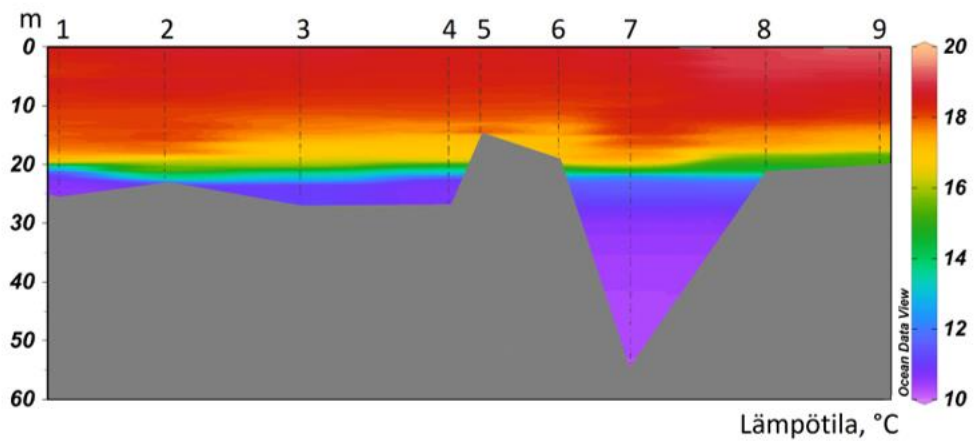
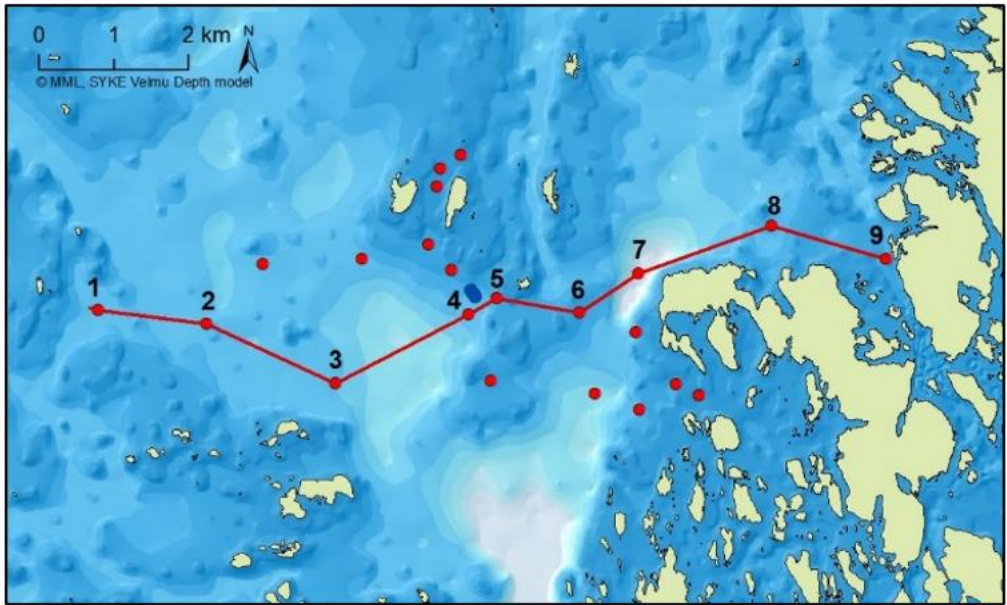
Kuva 35. Poikkileikkausprofiilit 2.8.2022: lämpötila ja suolaisuus 9 profiilin mukaan.

12.8.2022



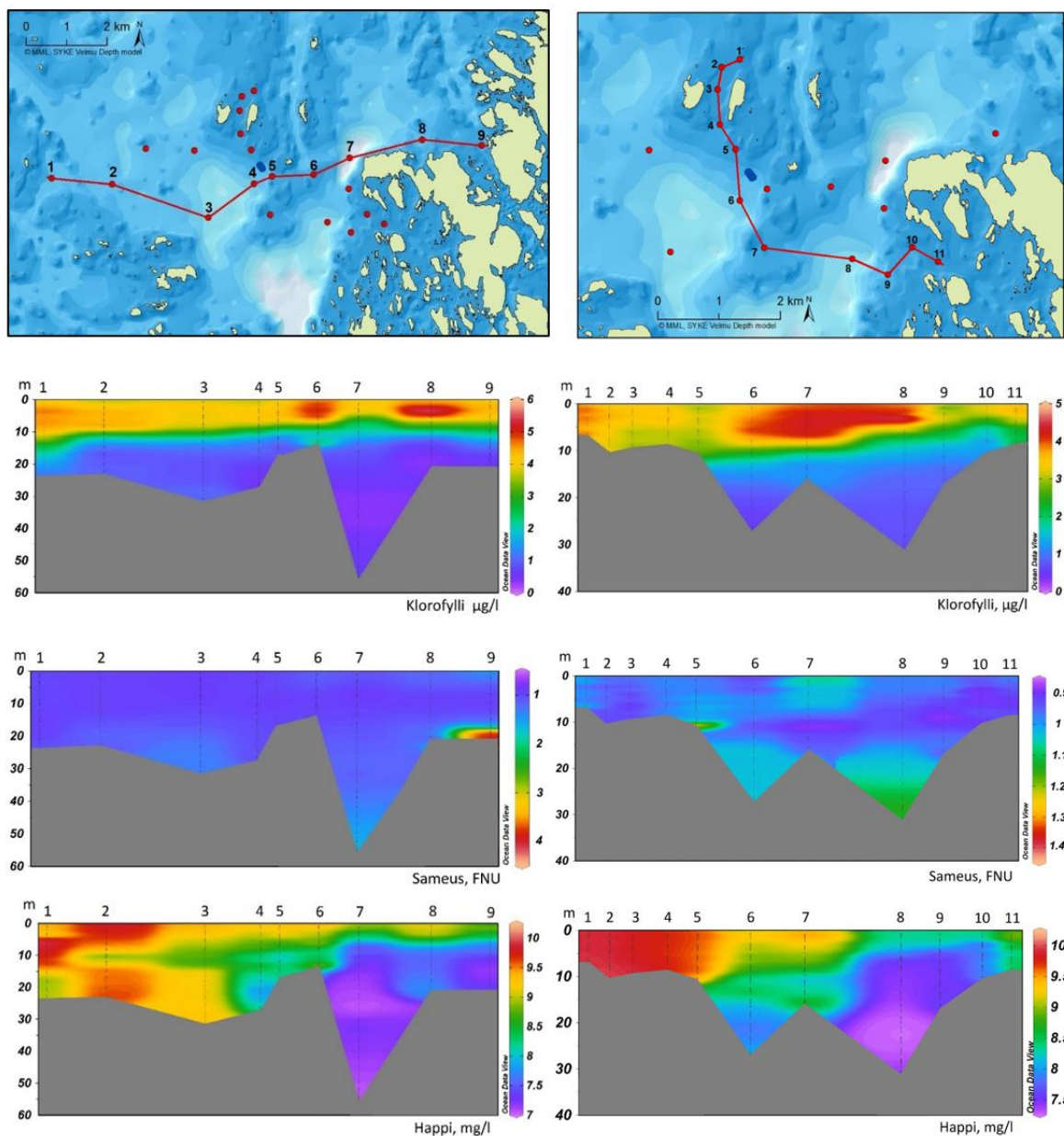
Kuva 36. Poikkileikkausprofiilit 12.8.2022: a-klorofylli, sameus ja happi.

Vedet lämpenivät (Kuvat 35 ja 37) hieman 2.8.–12.8. ja lämpimän veden kerroksen paksuus ulottui syvemmälle kuin 2.8. A-klorofylli-arvot olivat varsin epätasaisesti jakaantuneet horisontaalisesti, mutta osin myös vertikaalisesti päällysvedessä. Kuvassa 36 kalankasvatustaitoksen lähellä ja sen pohjoispuolisilla pisteillä a-klorofylliarvot ovat alhaisimpia. Länsi-itälinjalla klorofylliarvot ovatkin korkeimpia laitoksesta itään ja länteen päin mentäessä ja vastaavasti luoteiskaakkoislinjalla (Kuva 36) a-klorofylliarvot ovat korkeampia laitoksen kaakkoispuolella (etenkin piste 8). Sameuden kohdalla on nähtävissä Ströomin salmen pohjoispuolisen pisteen alusveden korkeampi arvo verrattuna ulompana oleviin avomerialueisiin.



Kuva 37. Poikkileikkausprofiilit 12.8.2022: lämpötila ja suolaisuus 9 profiilin mukaan.

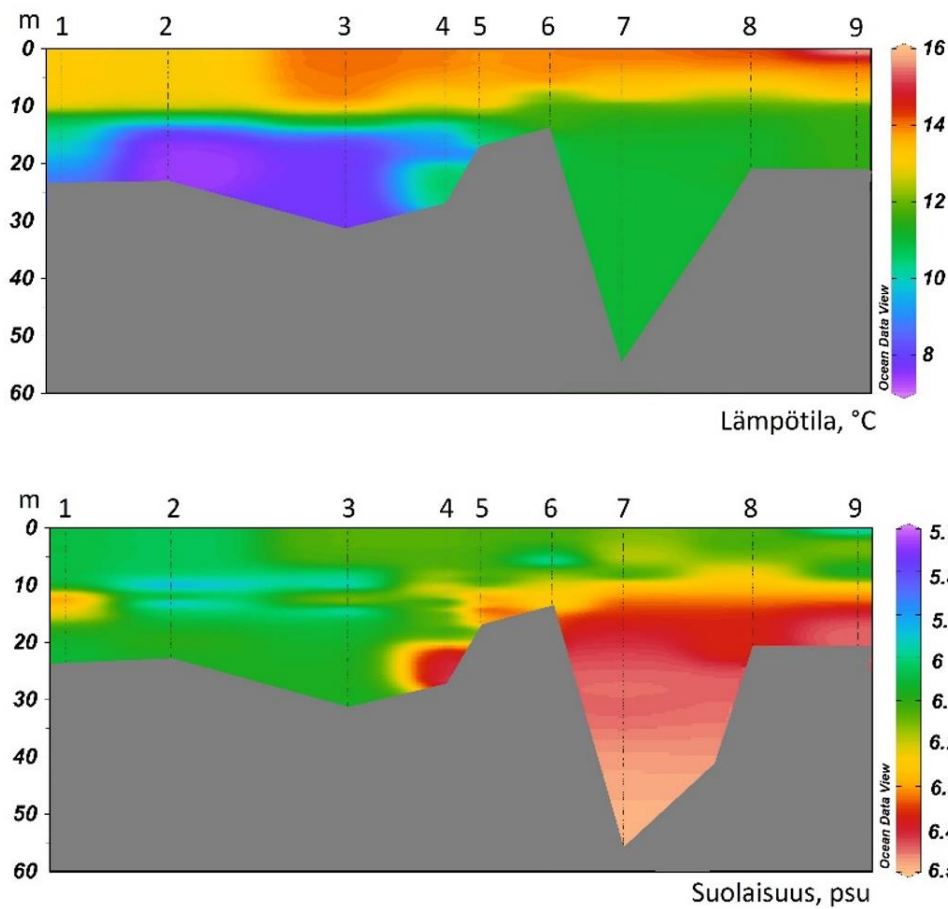
5.9.2022



Kuva 38. Poikkileikkausprofiilit 5.9.2022: klorofylli, sameus ja happi.

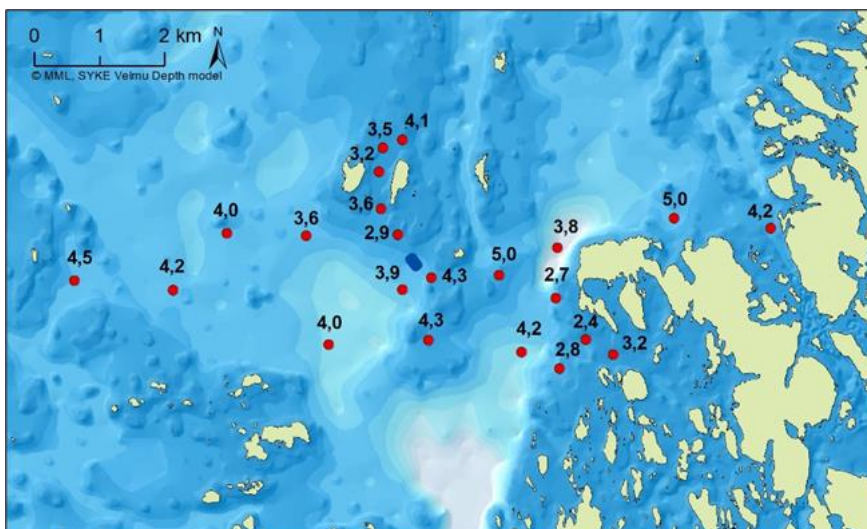
Vedet viilenivät elokuusta kohti 5.9. mittauksia (Kuvat 37 ja 39). Happipitoisuudet ovat yleis-
tään korkeampia alueen länsipuolella kuin itäpuolella (Kuva 38). Katanpään syvänteen koh-
dalla pintaveden happipitoisuus on 8,9 mg/l ja yli 50 metrin syvyydellä alusvedessä 7,1 mg/l.
Katanpään länsipuolella olevan syvänteen suolaisempi ja lämpimämpi alusvesi voi olla poh-
joistuulella Kihdin alusveteen syntyvän pohjoiseen suuntautuvan paluuvirtauksen mukana Saa-
ristomereltä kulkeutuvaa vettä. Sameuden kohdalla on jälleen nähtävissä Ströömin pohjoispuo-
lella pohjan läheisen veden korkeampi arvo verrattuna ulompana oleviin avomerialueisiin.

Laitoksen kaakkoispuolella (Kuva 38; luoteis-kaakkolinja: pisteet 6, 7 ja 8) a-klorofylli on pääl-
lysvedessä (pinnan alla) selvästi koholla. Tämä voi johtua laitoksen ravinnekuormituksesta tai
Uudenkaupungin saariston suunnalta pohjoistuulella kulkeutuvasta ravinteikkaammasta ve-
destä. Myös sameus on pisteessä 7 hieman koholla. Länsi-itälinjasta voi nähdä myös, että A-
klorofylli on idässä pisteissä 6 ja 8 pintavedessä korkeampia kuin länsiosissa.



Kuva 39. Poikkileikkausprofiili 5.9.2022: lämpötila ja suolaisuus 9 profiilin mukaan.

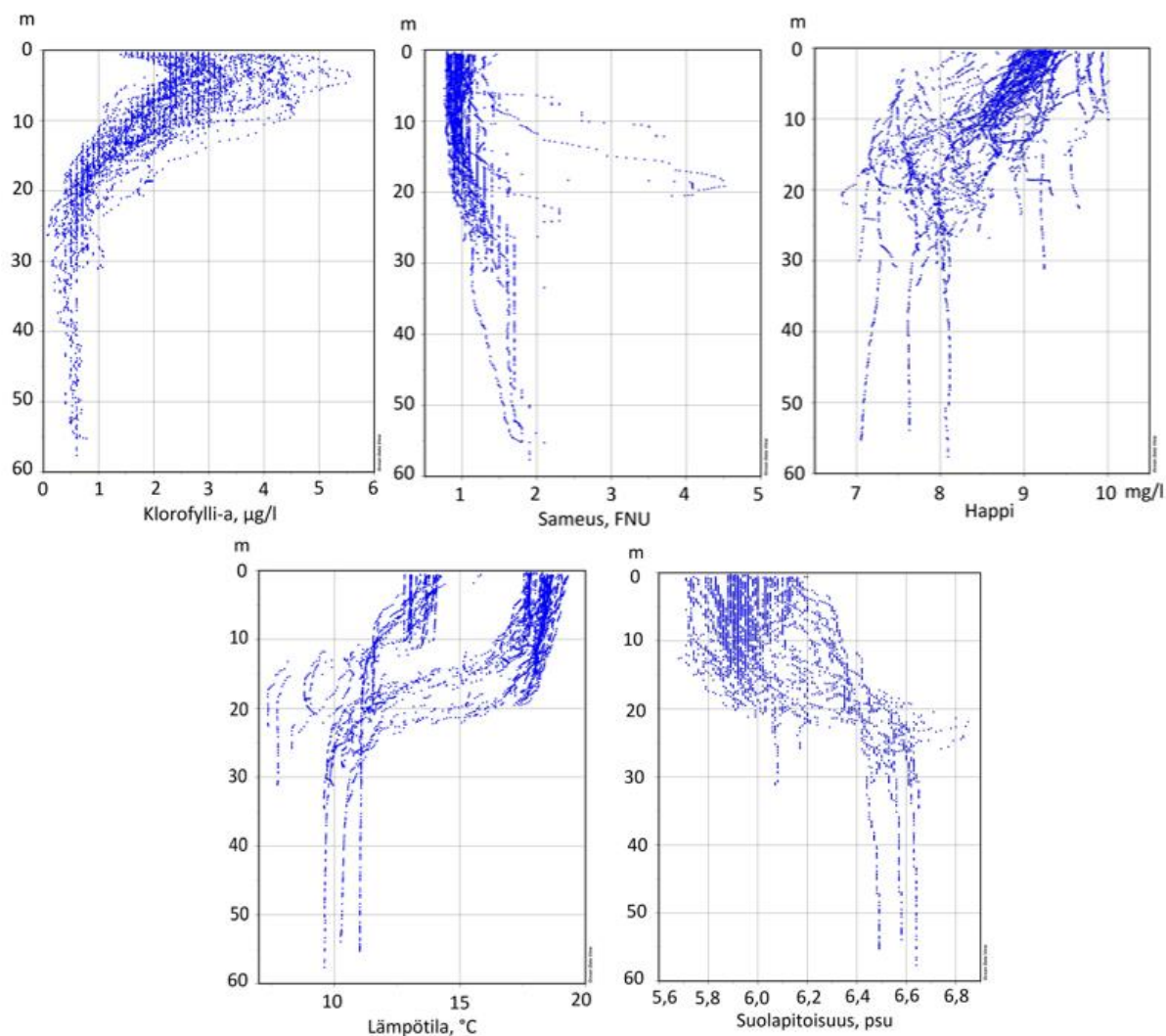
Kuvassa 40 on 0–6 metrin vesikerroksen a-klorofylli-pitoisuudet. Klorofylliarvot ovat epätasaisesti jakaantuneet. Katanpään ja laitoksen välillä havaitut hieman rehevämmät vedet ovat voineet kulkeutua alueelle Uudenkaupungin saariston suunnalta. Veden virtaussuunta (6–9 metrin kerros) oli 5.9. yleistäen lounaaseen ja länteen, mutta virtauksissa oli vaihtelua ja hieman eroa myös vesikerrosten välillä.



Kuva 40. A-klorofylli arvot 0–6 metrin keskiarvo 5.9.2022. Laitos on sinisellä keskellä.

3.4.3. Syvyysprofiilimittaukset yleistettynä

Kuvassa 41 on kolmen mittauskerran arvot. Arvot on kaikkien Kihdin pohjoispuolella tehtyjen syvyysprofilointien osalta yhdessä kuvaajassa (2.8., 12.8. ja 5.9.). A-klorofylli-pitoisuudet nousivat hieman aivan pintavedestä syvemmälle mentäessä ja laskevat yleistäen noin 10 metrin alapuolella, ollen 15–20 metrissä jo selvästi alhaisempia. Happipitoisuudet olivat pääsääntöisesti 7–10 mg/l välillä.



Kuva 41. Kolmen kerran (2.8., 12.8. ja 5.9.) profiilimittausten arvot (a-klorofylli, sameus, happi, lämpötila, suolaisuus) samassa kuvassa.

3.5. Läpivirtausmittaukset

3.5.1. CoastRider

Vedenlaadun alueellista vaihtelua Loukeenkariin lähialueella havainnollistettiin jokaisen CoastRider-kartoituskerran (Liite 4) osalta suolapitoisuuden (Liite kuvat L4.2–4.7), lämpötilan (Liite kuvat L4.8–13), sameuden (Liite kuvat L4.14–19), (fluoresoivan) liukoisen eloperäisen aineksen pitoisuuden (Liite kuvat L4.20–25) sekä a-klorofyllipitoisuuden suhteen (Liite kuvat L4.26–31).

Kustakin karttakuvasta on kaksi rinnakkaista versiota, joista jälkimmäisessä käytetään kartan kattamalta alueelta koko hankkeen aikana kerätyn aineiston jakaumaa (Kuva 42). Tämän lisäksi tutkimusalueen sijoittumista laajemmille ympäristöjatkumoille kuvataan liukoisen eloperäisen aineksen keskiarvoina koko mittausjakson ja -alueen havaintoihin perustuen (Liitekuva L4.32). Tämä kuvastaa ensisijaisesti tutkimusalueen sijaintia sisä- ja ulkosaariston välisellä jatkumolla.

| Suolapitoisuus | | Lämpötila (°C) | | Sameus (FNU) | | fDOM (QSU) | | α -klorofylli ($\mu\text{g/l}$) | |
|----------------|---------------|----------------|---------------|--------------|-------------|-------------|-------------|------------------------------------------|-------------|
| 5,701 - 5,715 | 5,946 - 5,96 | 12,71 - 12,96 | 16,95 - 17,2 | 1,31 - 1,43 | 3,33 - 3,44 | 4,33 - 4,39 | 5,49 - 5,55 | 2,6 - 2,96 | 8,52 - 8,88 |
| 5,716 - 5,731 | 5,961 - 5,976 | 12,97 - 13,23 | 17,21 - 17,46 | 1,44 - 1,55 | 3,45 - 3,57 | 4,4 - 4,47 | 5,56 - 5,62 | 2,97 - 3,33 | 8,89 - 9,25 |
| 5,732 - 5,746 | 5,977 - 5,991 | 13,24 - 13,49 | 17,47 - 17,73 | 1,56 - 1,68 | 3,58 - 3,69 | 4,48 - 4,54 | 5,63 - 5,69 | 3,34 - 3,7 | 9,26 - 9,62 |
| 5,747 - 5,761 | 5,992 - 6,006 | 13,5 - 13,76 | 17,74 - 17,99 | 1,69 - 1,8 | 3,7 - 3,82 | 4,55 - 4,61 | 5,7 - 5,76 | 3,71 - 4,07 | 9,63 - 9,99 |
| 5,762 - 5,777 | 6,007 - 6,022 | 13,77 - 14,02 | 18 - 18,26 | 1,81 - 1,93 | 3,83 - 3,94 | 4,62 - 4,68 | 5,77 - 5,84 | 4,08 - 4,44 | 10 - 10,4 |
| 5,778 - 5,792 | 6,023 - 6,037 | 14,03 - 14,29 | 18,27 - 18,52 | 1,94 - 2,06 | 3,95 - 4,07 | 4,69 - 4,75 | 5,85 - 5,91 | 4,45 - 4,81 | 10,5 - 10,7 |
| 5,793 - 5,807 | 6,038 - 6,052 | 14,3 - 14,55 | 18,53 - 18,79 | 2,07 - 2,18 | 4,08 - 4,2 | 4,76 - 4,83 | 5,92 - 5,98 | 4,82 - 5,18 | 10,8 - 11,1 |
| 5,808 - 5,823 | 6,053 - 6,068 | 14,56 - 14,82 | 18,8 - 19,05 | 2,19 - 2,31 | 4,21 - 4,32 | 4,84 - 4,9 | 5,99 - 6,05 | 5,19 - 5,55 | 11,2 - 11,5 |
| 5,824 - 5,838 | 6,069 - 6,083 | 14,83 - 15,08 | 19,06 - 19,32 | 2,32 - 2,43 | 4,33 - 4,45 | 4,91 - 4,97 | 6,06 - 6,12 | 5,56 - 5,92 | 11,6 - 11,8 |
| 5,839 - 5,853 | 6,084 - 6,098 | 15,09 - 15,35 | 19,33 - 19,58 | 2,44 - 2,56 | 4,46 - 4,57 | 4,98 - 5,04 | 6,13 - 6,2 | 5,93 - 6,29 | 11,9 - 12,2 |
| 5,854 - 5,868 | 6,099 - 6,113 | 15,36 - 15,61 | 19,59 - 19,85 | 2,57 - 2,69 | 4,58 - 4,7 | 5,05 - 5,11 | 6,21 - 6,27 | 6,3 - 6,66 | 12,3 - 12,6 |
| 5,869 - 5,884 | 6,114 - 6,129 | 15,62 - 15,88 | 19,86 - 20,11 | 2,7 - 2,81 | 4,71 - 4,83 | 5,12 - 5,19 | 6,28 - 6,34 | 6,67 - 7,03 | 12,7 - 12,9 |
| 5,885 - 5,899 | 6,13 - 6,144 | 15,89 - 16,14 | 20,12 - 20,38 | 2,82 - 2,94 | 4,84 - 4,95 | 5,2 - 5,26 | 6,35 - 6,41 | 7,04 - 7,4 | 13 - 13,3 |
| 5,9 - 5,914 | 6,145 - 6,159 | 16,15 - 16,41 | 20,39 - 20,64 | 2,95 - 3,06 | 4,96 - 5,08 | 5,27 - 5,33 | 6,42 - 6,48 | 7,41 - 7,77 | 13,4 - 13,7 |
| 5,915 - 5,93 | 6,16 - 6,175 | 16,42 - 16,67 | 20,65 - 20,91 | 3,07 - 3,19 | 5,09 - 5,2 | 5,34 - 5,4 | 6,49 - 6,56 | 7,78 - 8,14 | 13,8 - 14,1 |
| 5,931 - 5,945 | 6,176 - 6,19 | 16,68 - 16,94 | 20,92 - 21,17 | 3,2 - 3,32 | 5,21 - 5,33 | 5,41 - 5,48 | 6,57 - 6,63 | 8,15 - 8,51 | 14,2 - 14,4 |

Kuva 42. Luokitteluun perustuva väriskaala suolapitoisuuden, lämpötilan, sameuden, fluoresoivan liukoisen eloperäisen aineksen (fDOM) ja α -klorofyllin osalta.

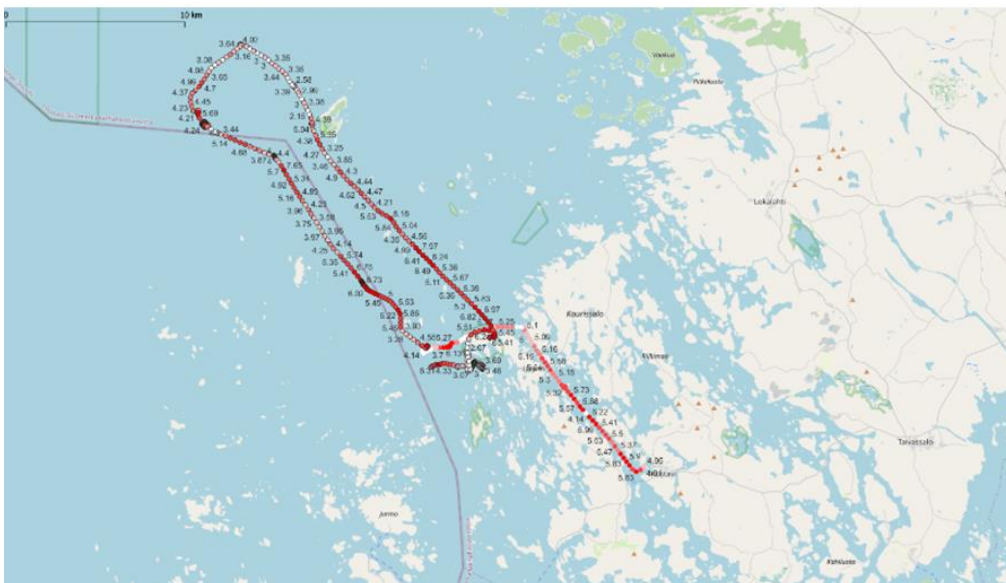
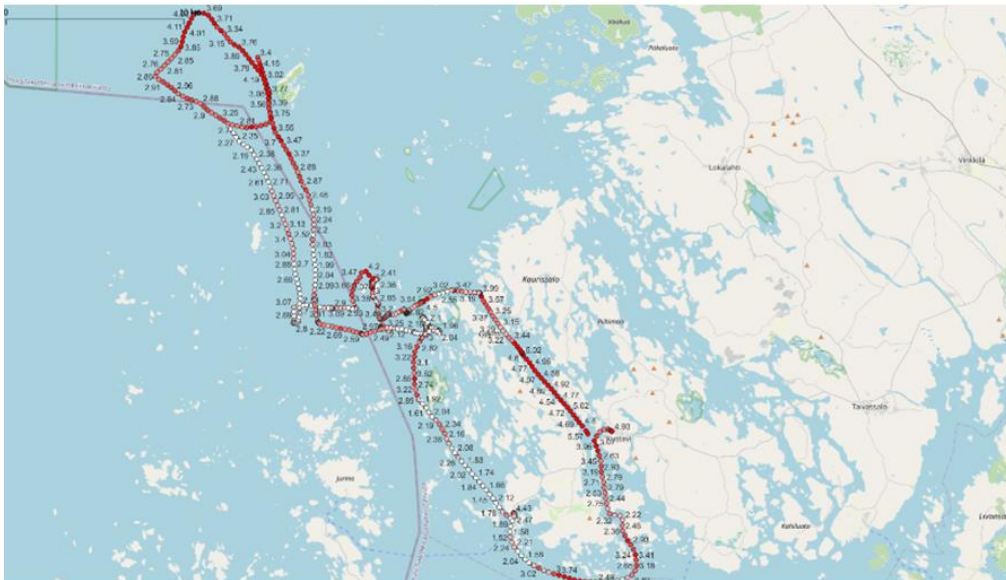
3.5.2. Syken läpivirtausmittausjärjestelmä

Syken läpivirtaus-järjestelmällä tehtiin Coastrider-mittauksia täydentäviä α -klorofyllin, fykosyaniinin ja sameuden vertailumittauksia 12.8., 18.8. ja 5.9. EXO-mittausten aikana (ks. Kuvat 43 ja 44 sekä Liite 5) Loukeekarilta Selkämerelle päin, aina Isokarille asti.

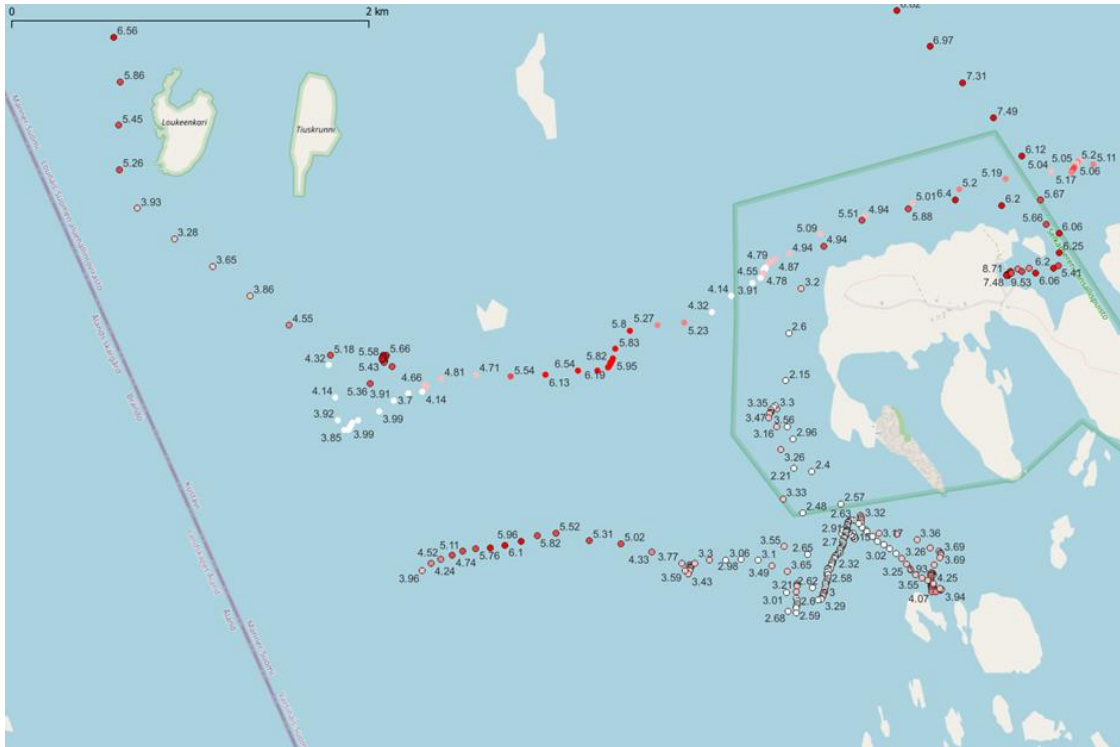
α -klorofylli pitoisuus oli alhaisimmillaan 12.8. (1,5–3,5 mg/l), nousi hieman 18.8. ja oli korkeimmillaan (2–7 mg/l) 5.9. Korkeimmat arvot olivat yleensä Ströömässä ja Loukeekarinn pohjois- ja luoteispuolilla – ajoittain (18.8. ja 5.9.) myös laitoksen lähialueella sekä siitä itään ja kaakkoon (Kuva 43).

Etelätuulilla vesi virtaa laitokselta luoteeseen, ja 12.8. ja 18.8. α -klorofylli-pitoisuudet olivat jonkin verran koholla laitoksen luoteispuolella. Tämä voi johtua laitoksen ravinnekuormituksesta.

Syken läpivirtausjärjestelmä toimi hyvin, ja mittaukset saatiin kalibroituja riittävän kattavalla aineistolle. Sameuden suhteellinen keskimääräinen virhe oli melko suuri (52,4 %) johtuen kalibrointiaineiston kapeasta vaihteluvälistä. Jatkossa kalibrointimittaukset tulisi tehdä laajemmalla vaihteluvälillä. α -klorofylli:n kalibrointi kattoi laajemman vaihteluvälin, jonka takia suhteellinen virhe oli selvästi pienempi (15 %). Mittaukset tehtiin muun näytteenoton yhteydessä. Järjestelmä on helposti siirrettävissä veneestä toiseen.



Kuva 43. Syken läpivirtausmittausjärjestelmän mittauslinjat ja a-klorofylli 12.8., 18.8. ja 5.9.



Kuva 44. Syken läpivirtausmittausjärjestelmän a-klorofylli-mittaukset 5.9. Loukenkarin ympärillä.

3.6. Laboratoriomääritykset

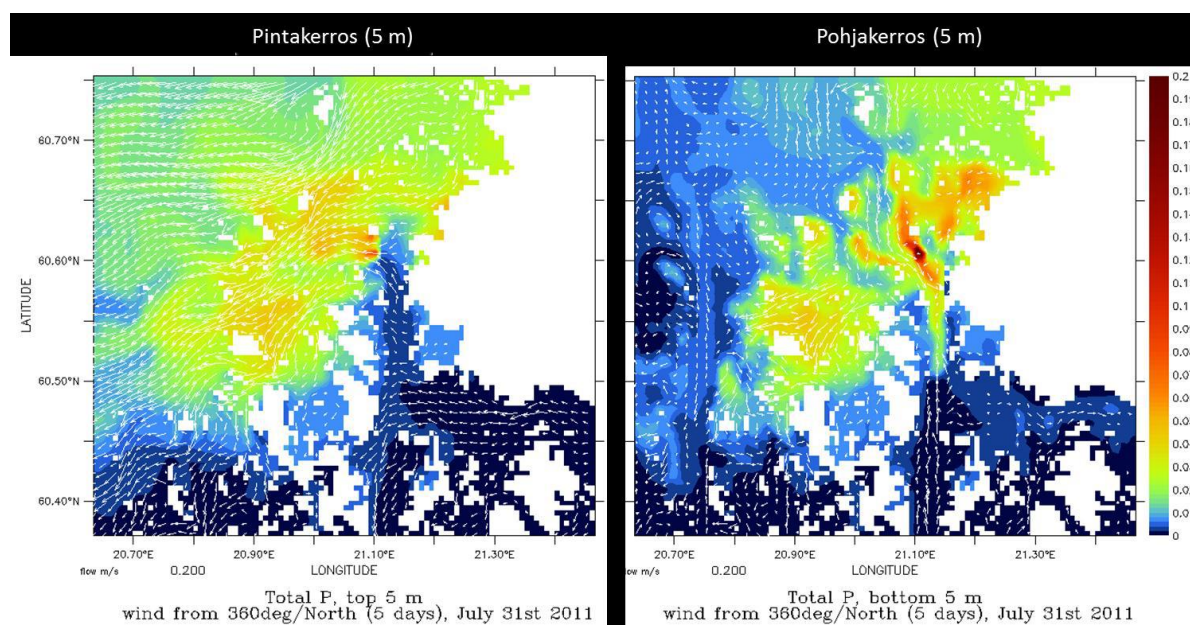
Saaristomeren alueelta otettiin vesinäytteitä Kustavin alueella sisemmistä paikoista ja avoimilta alueilta. Näytteet toimitettiin vuorokauden sisällä laboratorioon määrittäväksi. Määrityksen suoritti Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy. Saatuja arvoja hyödynnettiin EXO-mittalaitteiden arvojen tarkentamisessa. Liitteessä 6 ja 7 on esitetty eräitä lab-arvoja taukussa ja kartoissa.

3.7. Virtausmittaukset

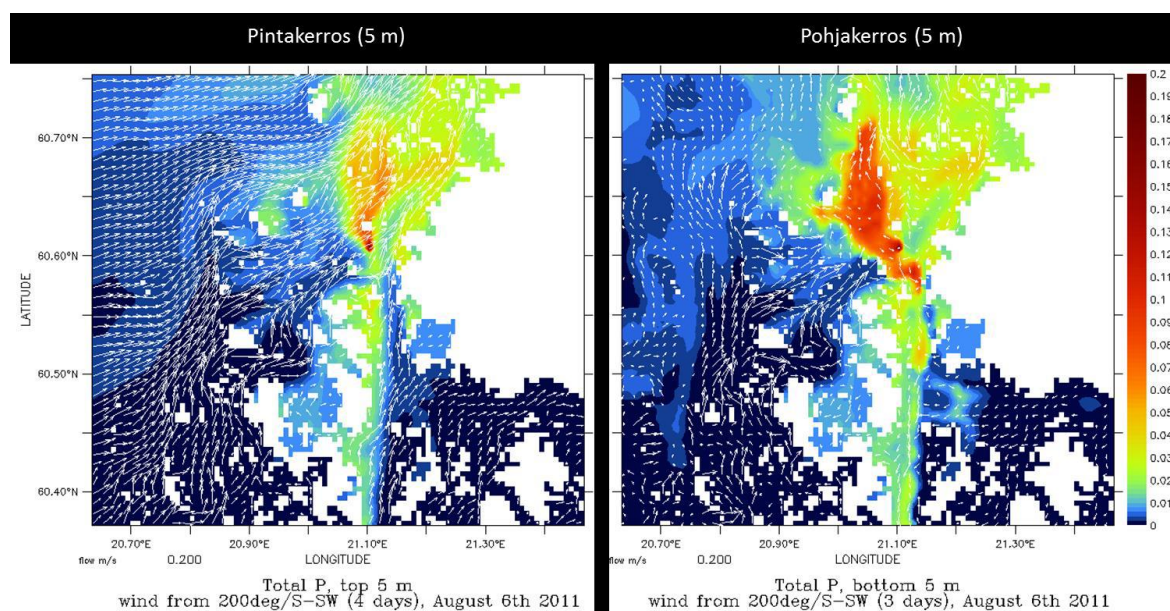
Virtausmittauksia tehtiin kahdelta pisteeltä mittauskampanjan ympäristöstä (V1 ja V2, kuvassa 4) noin kuukauden ajalta. Mittauksin pyrittiin validoimaan Kettusen ym. (2015) julkaisemat päätuulensuuntaiset virtauskenttämallinnukset (Kuva 45 ja 46).

Alueen virtaukset ovat voimakkaasti tuulen ajamia, joten tuulen suunnan vaihtelut vaikuttavat voimakkaasti ravinnepäästöjen kulkeutumiseen alueella (Kettunen ym. 2015). Alueen virtaukset ovat herkkiä tuulen suunnan muutoksille, sillä alueen saaristo ja pohjanmuodot voivat tuulen suunnasta riippuen joko rajoittaa virtauksia alueella tai voimistaa niitä. Kulkeutumisen suunnassa on alueella tutkitusti suurta vuosittaista ja vuodenaikaista vaihtelua (Miettunen ym. 2023). Esimerkiksi vallitsevat länsi-etelätuulet (Kuva 46) kasvavat kapeassa kanjonissa tuulen mukana voimakkaiksi ajaen ravinteita pohjoiseen, kun taas ajoittaiset pohjois-itätuulet ajavat etenkin pintavettä länteen saariston suojatessa väylää, jota pitkin ravinteet pääsisivät kulkeutumaan etelään (Kuva 45). Toisaalta kasvattamon kokonaisfosforipäästö laimenee alueella erittäin tehokkaasti, mikä näkyy kulkeutumismallin simulaatioiden pitoisuusskaalauksessa (maksimi 0,2 µgP/l).

Kahdesta vertailupisteestä (Kettunen ym. 2015), Brändö100 (Kuva 3) ja LL10 (kasvattamosta n. 3 km etelä-kaakkoon) päästöistä johtuva kokonaisfosforipitoisuuden nousu oli käytännössä aivan sama kuin vertailupisteissä (nousu oli alle 0,2 $\mu\text{g P/l}$, eli alle mittaustarkkuuden).



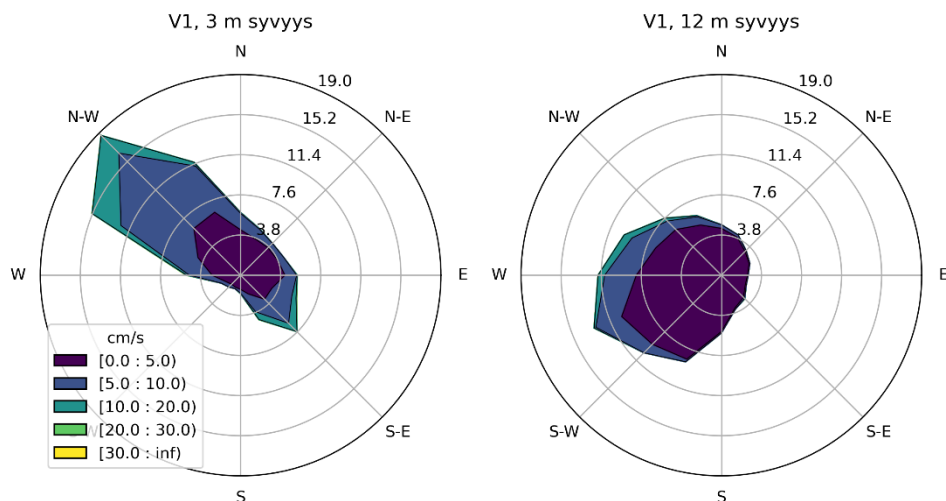
Kuva 45. Kustavin Loukeenkarin laitoksen kokonaisfosforikuormituksen mallinnettu pitoisuusvaikutus pohjoistuulella 27.–31.7.2011 (5 päivää) pinta- ja pohjakerroksessa (Kettunen ym. 2015). (Huom. pitoisuusskaala oikealla on 0–0,2 $\mu\text{g/l}$). Kuvassa nuolina tyypillinen veden virtaussuunta jakson aikana.



Kuva 46. Kustavin Loukeenkarin laitoksen kokonaisfosforikuormituksen mallinnettu pitoisuusvaikutus etelätuulella 3.–6.8.2011 (4 päivää) pinta- ja pohjakerroksessa (Kettunen ym. 2015). (Huom. pitoisuusskaala oikealla on 0–0,2 $\mu\text{g/l}$). Kuvassa nuolina tyypillinen veden virtaussuunta jakson aikana.

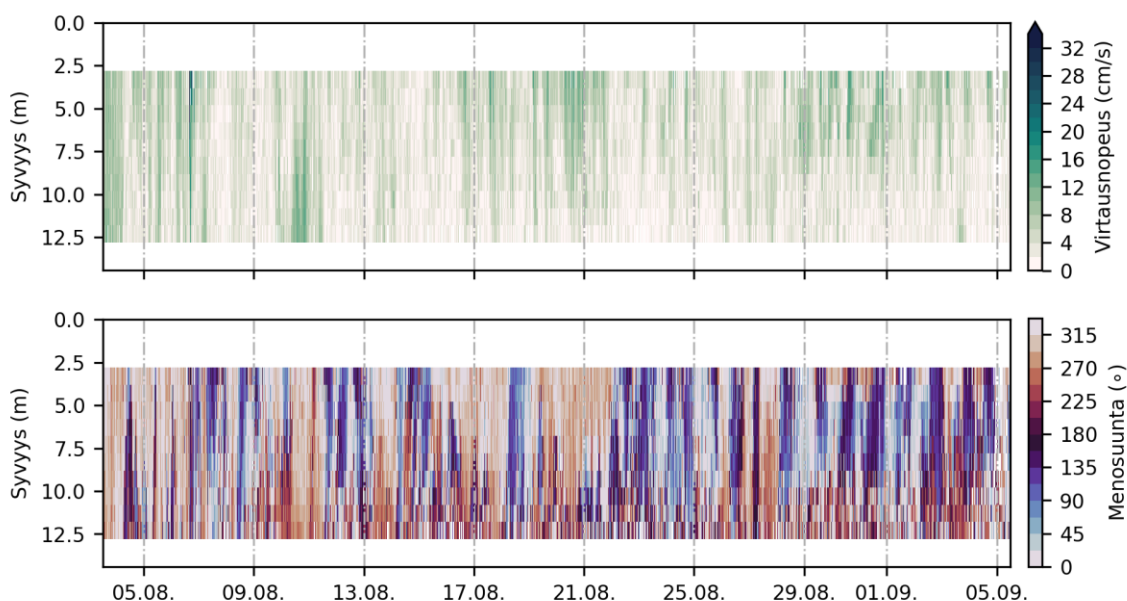
Syken ADCP

Virtaukset itäisemmällä virtausmittauspisteellä V1 (sijainti Kuvassa 4) ovat pinnan läheisimmässä kerroksessa (3 m syvyydessä) pääosin suuntautuneet bathymetrian ohjaamana luoteeseen ja pohjan läheisimmässä kerroksessa (12 m syvyydessä) lounaaseen (Kuva 47).



Kuva 47. Virtauksen menosuunnan ja voimakkuuden jakauma pinnan läheisimmässä (3 m) ja pohjan läheisimmässä (12 m) kerroksessa pisteessä V1 mittauskampanjan aikana.

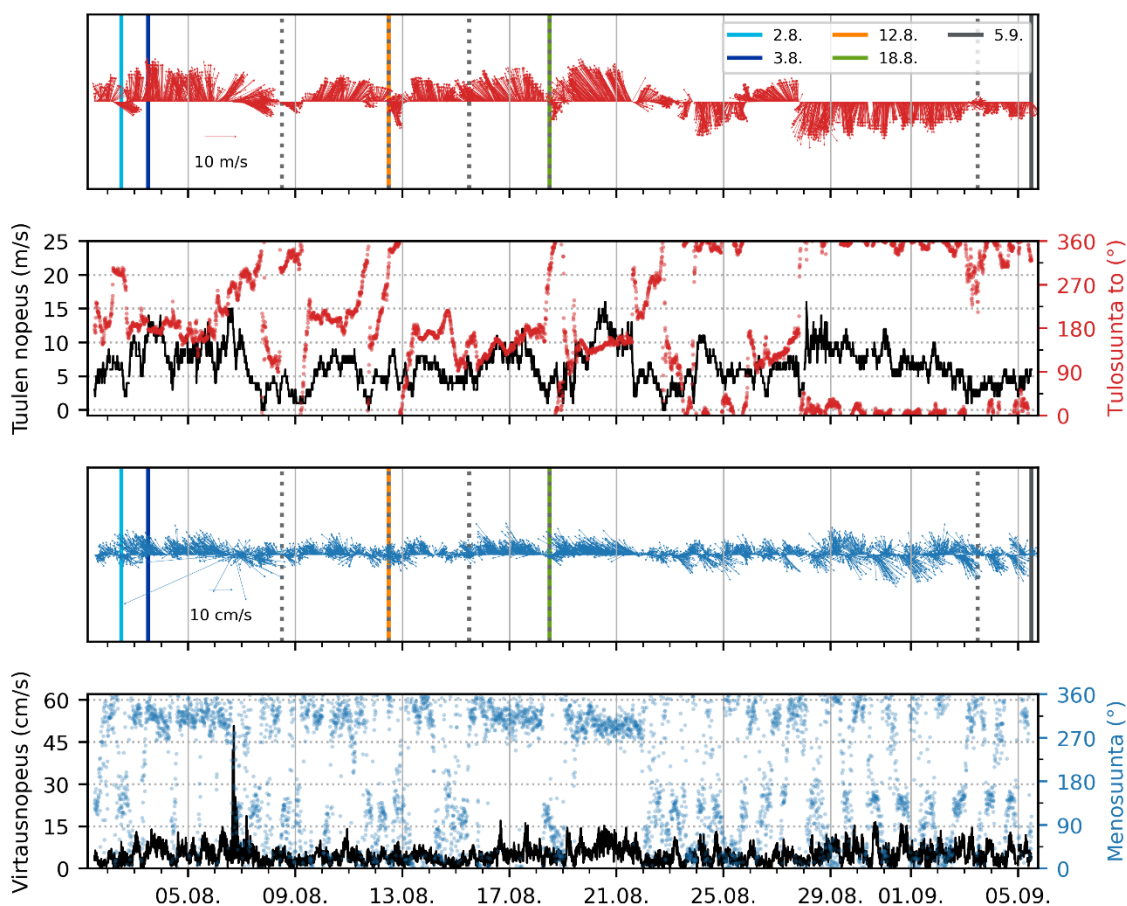
Keskimääräinen virtausnopeus oli 3 m syvyydessä 5 cm/s, ja pohjan läheisimmässä kerroksessa 3 cm/s. Virtausmittari oli asetettu alueen syvimmän poukaman itäiseen pätyyn, jota ympäröi luoteesta, pohjoisesta ja kaakosta matalampi alue, joka rajoitti vesipatsaan liikettä 9 m syvemmällä alueella (Kuva 48), eikä syvämpi vesi näin päässyt kulkeutumaan täältä sisämpiin saaristoon. Mittauspisteen koillisosassa oli myös kaakkois-luoteissuuntainen alle 3 m syvä matalikko, joka suuntasi virtauksia ADCP:n ylimmässä mitatussa 3 m kerroksessa.



Kuva 48. Virtauksen voimakkuus (ylempi paneeli) ja suunta (alempi paneeli) syvyyden suhteen mittauskampanjan aikana pisteessä V1.

Pinnan läheisen kerroksen virtauksia verrattiin myös alueella vallitseviin tuuliin Isokarin automaattisella sääasemalla (Kuva 49). Virtausnopeudet pysyivät mittausjakson aikana pääosin alle 15 cm/s. Voimakkain virtaus alueella mitattiin 6.8. klo 16, jolloin mitattiin jopa 50 cm/s virtauksia alueella. Tällöin tuulet olivat suoraan lännestä sisään saaristoon. Virtaukset olivat kuitenkin tänä aikana erittäin pyörteisiä ja kääntyivät nopeasti kaakosta kohti etelää ja takaisin länteen, eikä pitkäkestoista virtausta sisään saaristoon syntynyt ainakaan ADCP:n mittausalla 3–12 m syvyydellä.

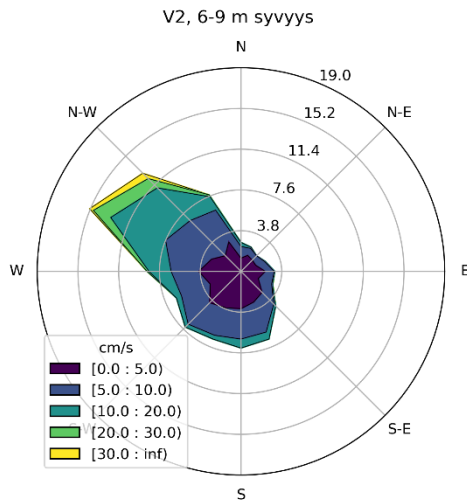
Kaakkoistuulilla virtaukset olivat alueella suhteellisen vakaasti tuulen suuntaisia, mutta pohjoistuulten vallitessa, virtauksissa oli voimakasta edestakaista heilahtelua, sillä alue on pohjoisesta saarten suojaama.



Kuva 49. Isokarin automaattisella sääasemalla mitatut tuulet (kaksi ylintä paneelia) ja virtausnopeudet 4 m syvyydessä pisteestä V1. Ensimmäisen ja kolmannen kuvan nuolet esittävät tuulen ja virtauksen menosuuntia. Poikkiviivat merkitsevät eri luotausten ajankohdan mittauskampanjan aikana. Värilliset viivat syvyysprofiili mittauksen ajankohtaan (kappale 3.4) ja katkoviivat läpivirtausmittauksiin (kappale 3.5).

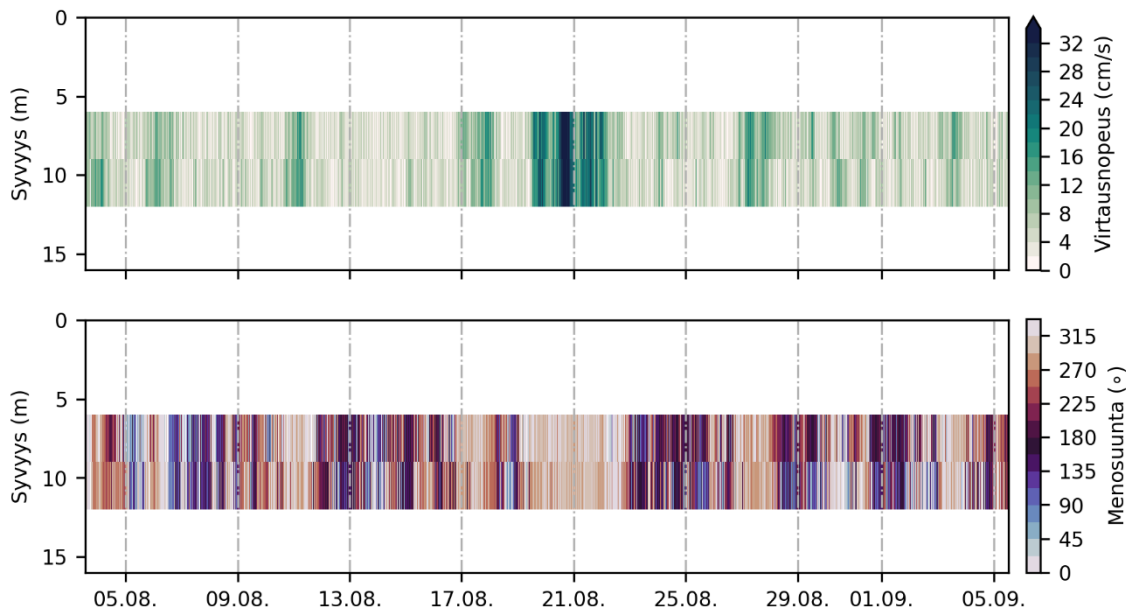
EHP-pojjun ADCP

Läntisemmät mittaukset tehtiin avoimemmalla alueella pisteessä V2 (sijainti Kuvassa 4). Virtaukset ovat 6–9 m kerroksessa pääosin suuntautuneet bathymetrian ohjaamana luoteeseen (Kuva 50). Mittausalueen koillispuolella on jyrkkä syvyysgradientti kaakkois-luoteissuunnassa joka ohjaa virtausta ja estää voimakkaat virtaukset koilliseen.

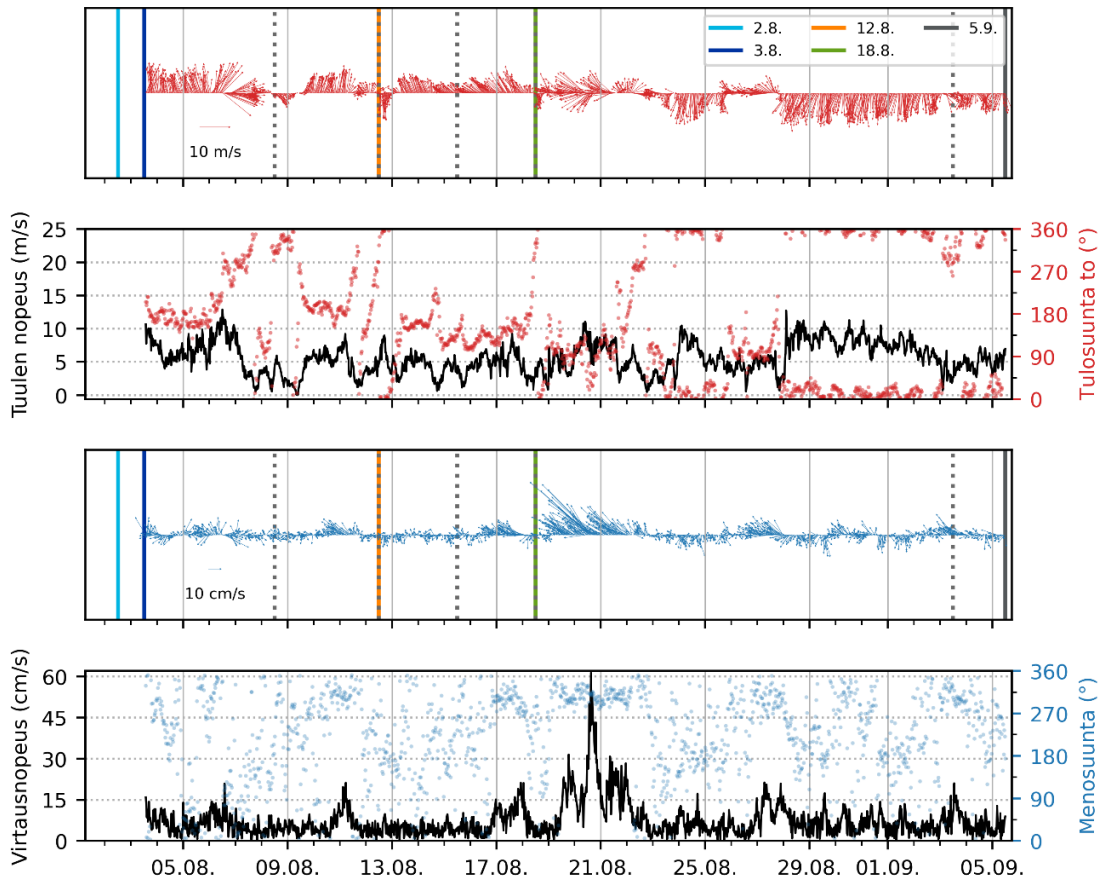


Kuva 50. Virtauksen menosuunnan ja voimakkuudenjakauma mittauskampanjan aikana pinnan läheisimmässä (6–9 m) kerroksessa pisteessä V2.

Mittauksen syvyysresoluutio on huomattavasti karkeampi kuin pisteessä V1, joten erot virtauskentässä syvyyden suhteen ei erotu (Kuva 51). Keskimääräinen virtausnopeus oli 7 cm/s. Kovemmat virtaukset suuntautuivat lähes poikkeuksetta luoteeseen (Kuva 52). Voimakkain virtaus mitattiin 20.8. klo 15, jolloin virtaukset nousivat jopa 61 cm/s. Kuvassa 52 kaksi ylintä paneelia kuvaavat EHP ympäristöpoijun mittaamia tuulia, josta nähdään, että tuulet olivat tuolloin vallinneen läheisen saariston suuntaiset kaakkoistuulet. Virtaukset jatkuivat samansuuntaisina ja voimakkaina noin kolme vuorokautta.

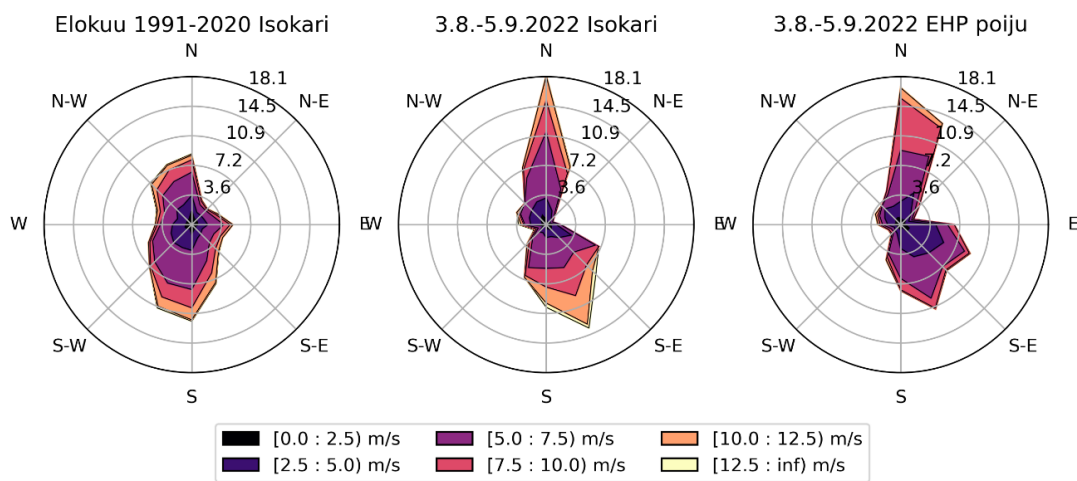


Kuva 51. Virtauksen voimakkuus (ylempi paneeli) ja suunta (alempi paneeli) syvyyden suhteen mittauskampanjan aikana pisteessä V2.



Kuva 52. Tuulet (kaksi ylintä paneelia) ja virtaus (kaksi alinta paneelia) pisteessä V2. Ensimmäisen ja kolmannen kuvan nuolet esittävät tuulen ja virtauksen menosuuntia. Poikkiviivat merkitsevät eri luotausten ajankohdan mittauskampanjan aikana: värilliset viivat syvyysprofiilimittauksen ajankohtaa (kappale 3.4) ja katkoviivat läpivirtausmittauksia (kappale 3.5).

Mittausjakson edustavuus



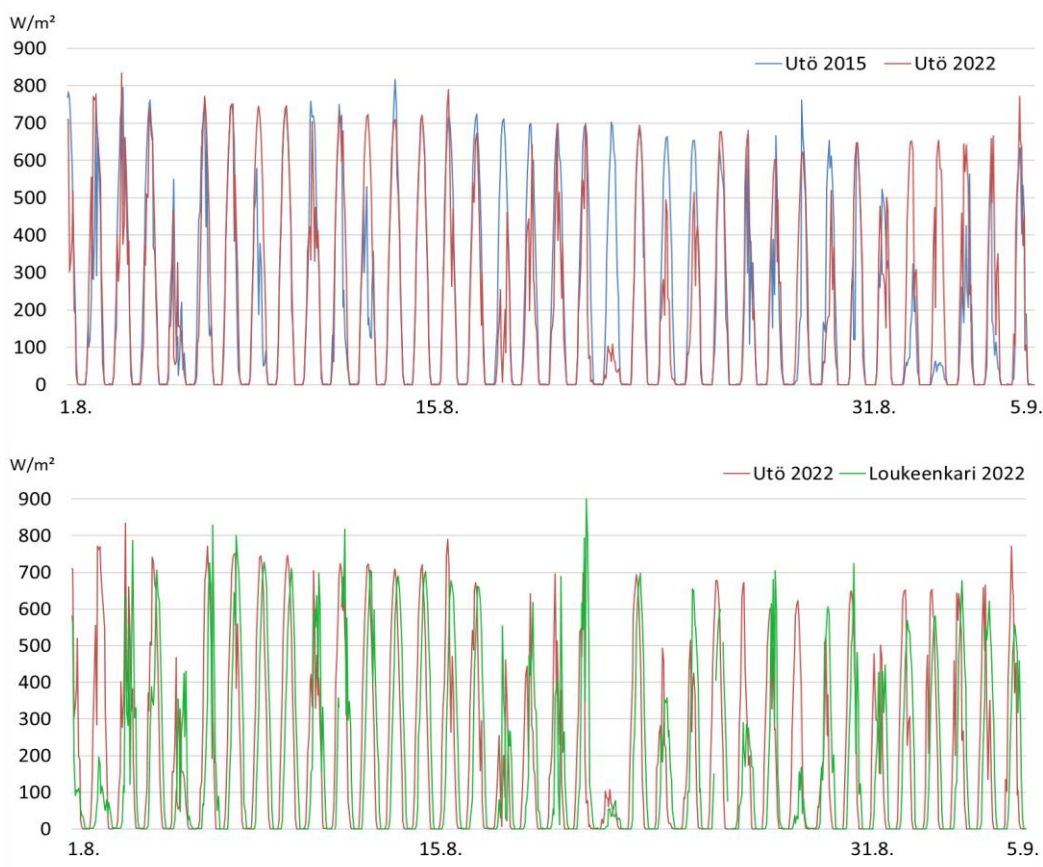
Kuva 53. Tuulen tulosuunnan ja voimakkuuden jakauma mitattuna Isokarin automaattiselta sääasemalla yleisesti elokuussa vuosina 1991–2020 (vasen paneeli). Mittauskampanjan aikainen tuulen suuntajakauma Isokarissa (keskimmäinen paneeli) ja EHP poijulla (oikea paneeli, piste V1 Kuvassa 4).

Alueen virtaukset ovat alueella suuren osan ajasta tuulen ajamia. Mittauskampanjan alkuvaiheessa alueella vallitsivat eteläiset tuulet, mutta tuulen vallitseva tulosuunta kääntyi pohjoiseksi 28.8. eteenpäin (Kuva 49 ja 52).

Mittausjakson aikana oli tavallista enemmän kaakkois- ja pohjoistuulia (Kuva 53). EHP poijun mittaamat tuulet ovat Isokaria heikompia, mutta näyttävät vastaavan suuntajakauman.

Auringon säteily

Auringon säteily vaikuttaa levän kasvuun ja vertikaaliseen jakautumiseen ja voi osaltaan selittää vuosina 2015 ja 2022 havaittujen a-klorofylli pitoisuuksien mahdollisen tasoeron. Auringon kokonaissäteilyä on vuosilta 2015 ja 2022 saatavissa Saaristomeren eteläosista Utöstä runsaan 90 kilometrin päästä. Kuvassa 54 on esitettyä vuoden 2015 ja 2022 kokonaisauringonsäteily (Ilmatieteen laitos 2022). Auringonsäteily on riippuvainen esimerkiksi pilvitilanteesta ja päiväkohtaisia eroja vuosien välillä on paljon. Aikajakson 1.8.–5.9. keskimääräinen arvo oli vuonna 2015 kaikilta vuorokausilta 211 W/m² ja vuonna 2022 lähes sama eli 205 W/m². Loukeenkarissa olleesta EHP-ympäristöpoijusta saadaan vuoden 2022 mittauskauden auringonsäteily. Tässä on nähtävissä tietyin osin samoja suuntauksia kuin Utössä, mutta erojakin esiintyy. Loukeenkarin ympäristöpoijussa olleen mittarin arvo kauden keskiarvoksi oli 186 W/m².



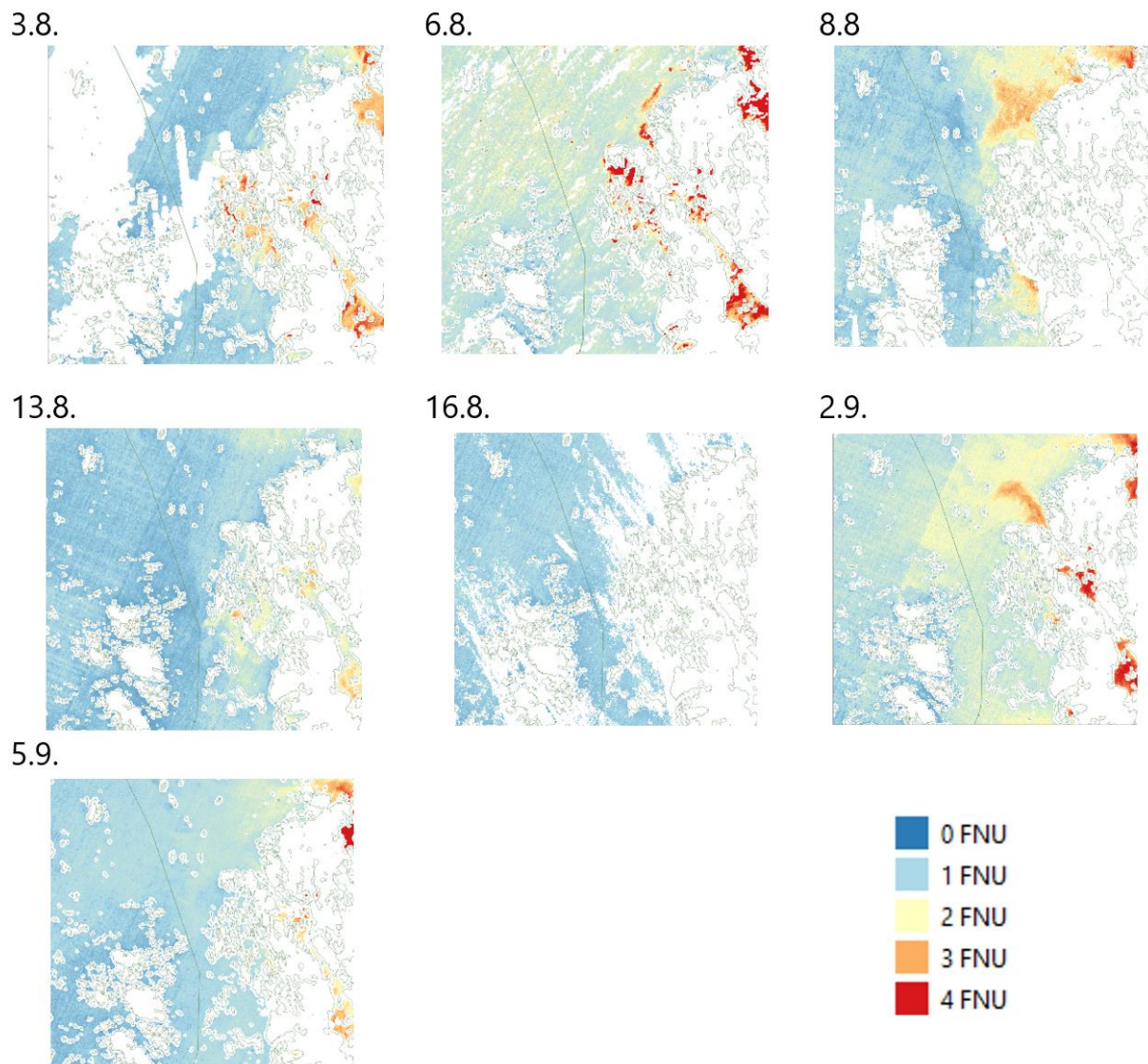
Kuva 54. Auringon säteilyn vertailu Utössä vuonna 2015 ja 2022 sekä Loukeenkarin säteily vuonna 2022 mittauskauden aikana.

3.8. Satelliittikuvien tulkinnat

Vuoden 2022 elo-syyskuun intensiivimittausten aikana oli saatavilla seitsemän sameuden satelliittikuvatulkintaa 3.8., 6.8., 8.8., 13.8., 16.8., 2.9. ja 5.9 (Kuva 55). Kuivissa näkyy Selkämeren kirkkaampien vesimassojen ja sisäsaariston sameampien vesimassojen liikkeitä ja sekoittumisen laitoksen ympärillä.

Sisäsaariston ja Ströömin sameampi vesi erottu selvästi Loukeenkarin ja ulkosaariston kirkkaammista selkävesistä. 6.8. Loukeenkari ja ulkosaarisossa on hetkellisesti hieman sameampaa ja samentuu uudestaan syyskuun alussa. Laitoksen kohdalla ja sen ympärillä ei ollut havaittavissa samentumaa. 2.9. ja 5.9. pohjoistuuli on ajanut Uudenkaupungin saariston suunnalta sameampaa vetää tarkastelualueelle.

Vuoden 2015 raportissa ei tarkasteltu sameuden vaihtelua laitosalueella, joten sen osalta ei voida arvioida muutosta vuoteen 2022. Jatkossa, seuraavalla intensiivijaksolla tulee pyrkiä tuottamaan myös a-klorofyllin ja lämpötilan satelliittikuvien tulkinnat laitoksen vaikutusten havaitsemiseksi.



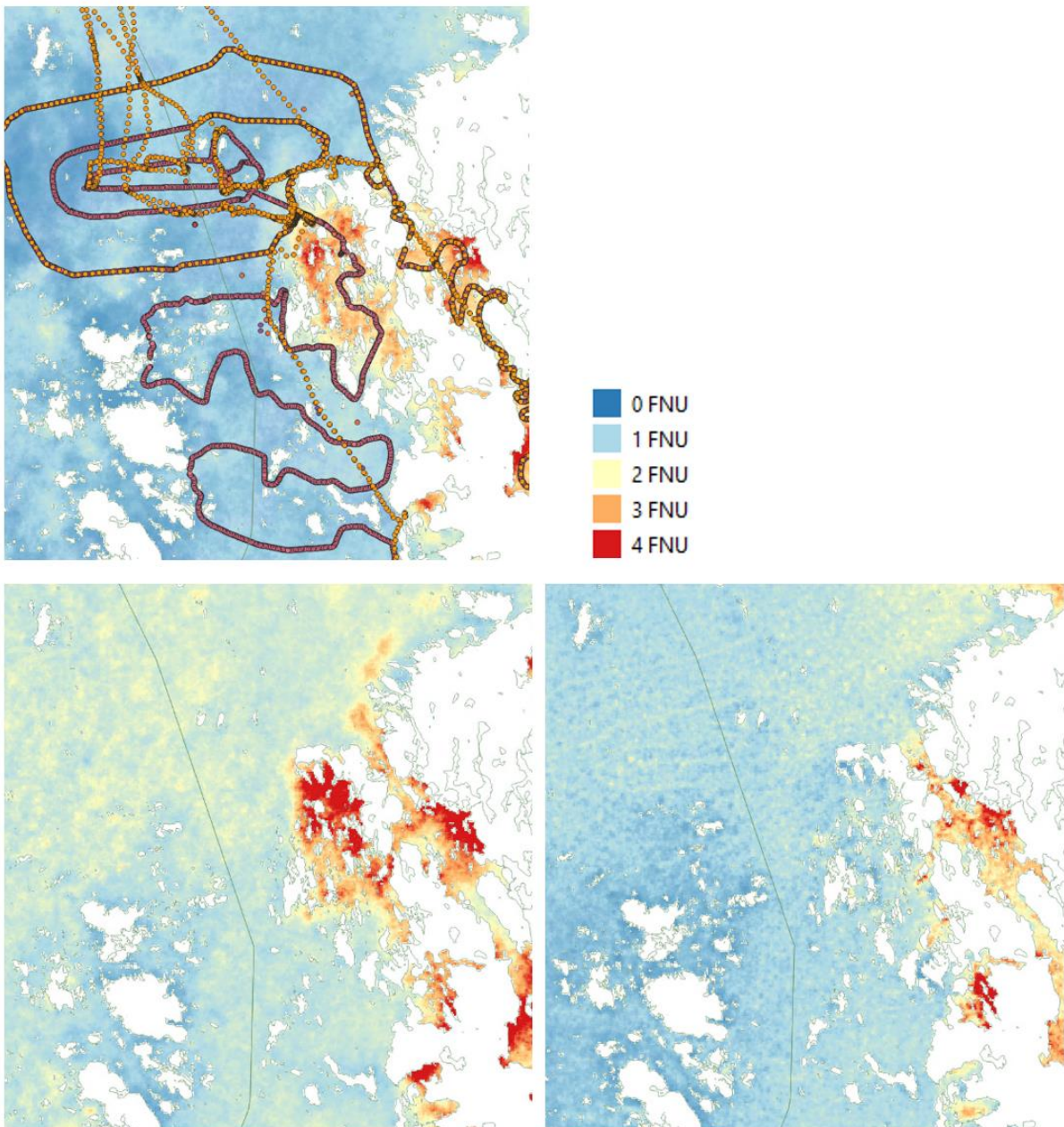
Kuva 55. Sameuden Sentinel 2 kuvien sameustulkinnat 3.8., 6.8., 8.8., 13.8., 16.8., 2.9. ja 5.9.

3.9. Datafuusio

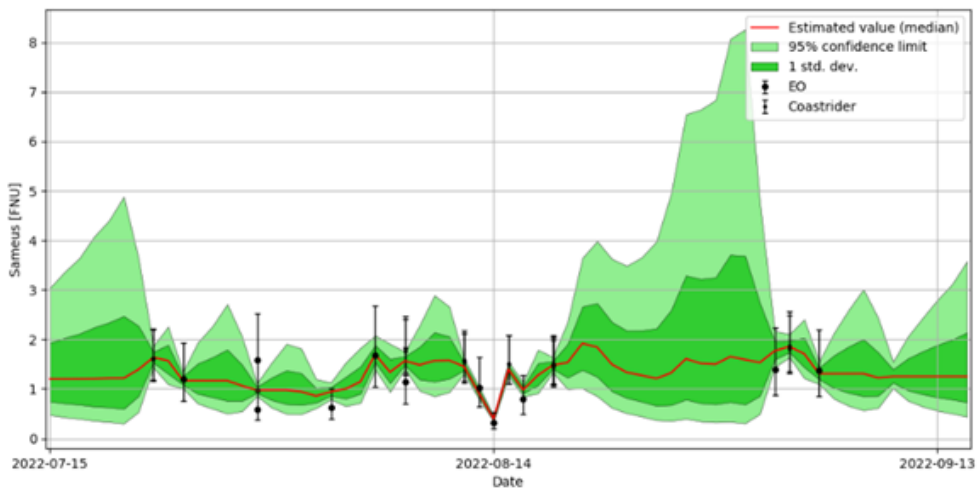
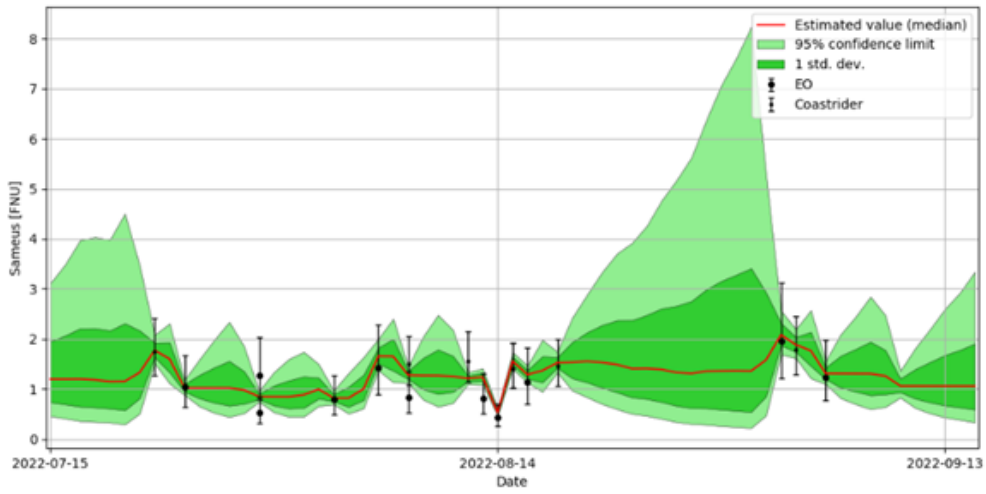
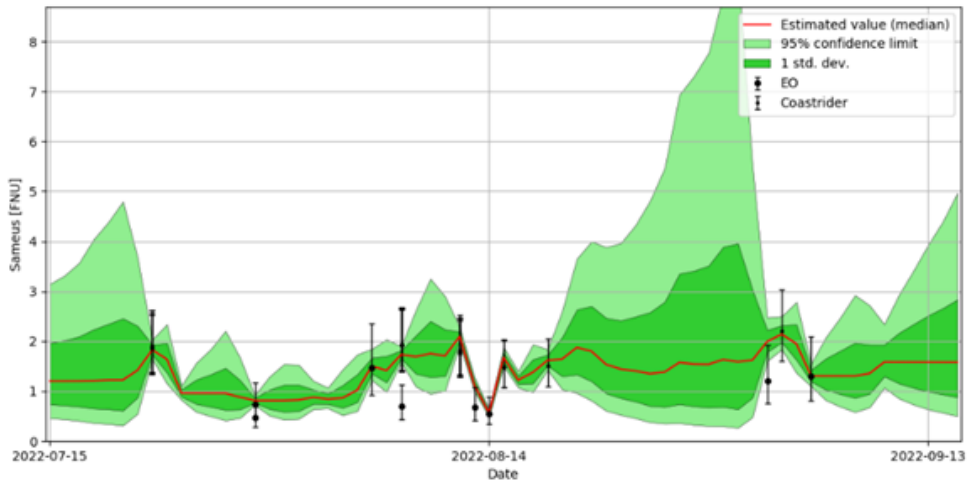
Sameuden vesianalyysit, EXO-mittaukset ja läpivirtauskartoitukset luettiin Syken DFS-järjestelmään. Aineistot harmonisoitiin ja yhdistettiin järjestelmässä ja niiden pohjalta interpoloitiin päivittäiset sameuskartat ja aikasarjat (Kuva 56–58).

Aineistot fuusioimalla saatiin kokonaiskuva sameuden ajallisesta ja alueellisesta vaihtelusta laitoksen ympärillä. Laitoksen ympärillä sameus ei poikennut ympäröivän merialueen pitoisuuksista (Kuva 56 ja 57).

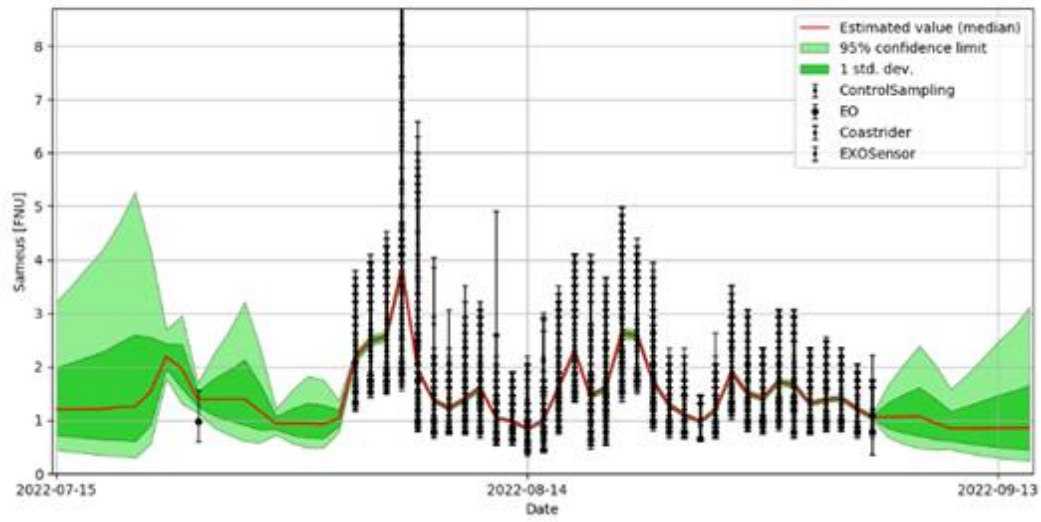
Katanpään eteläpuoleisessa EXO-mittauspisteessä (Kuva 56) sameus oli hieman korkeampi kuin ulappa-alueella ja vaihteli vuorokauden aikana muutaman FNU-yksikön verran. Laitoksen kuormitusvaikutus ei ulotu tänne asti.



Kuva 56. Fuusioitu ja interpoloitu sameus 3.8., 6.8. ja 5.9 (alhaalla oikealla). Mittauspisteet on merkitty 3.8. karttaan.



Kuva 57. Sameusmittaukset ja interpoloitu sameus laitoksen kohdalta sekä sen pohjois- ja kaakkoispuolelta.



Kuva 58. Sameus EXO-mittaukset ja interpoloitu sameus Katanpään eteläpuolella.

4. Tulosten tarkastelu

4.1. Vedenlaadun vaihtelu ja poikkeamat vertailuoloista laitoksen ympärillä.

Kaikkien Coastrider-kartoituksissa mitattujen muuttujien perusteella Loukeenkarin kalankasvattamo sijaitsee eräänlaisella murrosalueella, jossa sisä- ja ulkosaariston sekä Saaristo- ja Selkämeren vesimassat kohtaavat toisensa. Kokonaisvaltaisesti tarkasteltuna vedenlaadun taustataso laitoksen lähialueilla (Liitekuva L4.1) voi siis muuttua äkillisestikin vesimassojen laajamittaisten liikkeiden myötä. Tutkimusjakson aikana (22.7.–5.9.2022) yleiset ympäristöolosuhteet kalankasvattamon läheisyydessä olivat kuitenkin pidempiaikaiseen kausivaihteluun nähden ajallisesti verrattain vakaita. Tutkimuksen alusta saakka kalankasvattamon lähialuetta hallitsi lähes itä-länsisuuntainen pitoisuusgradientti, jolla kalankasvattamo sijaitsi. Vaikka tämä vaihtuminen oli selkeästi havaittavissa, se oli varsinkin intensiivimittausjaksolla (8.–18.8.2022) hyvin vaimeaa. Toisin sanoen Loukeenkarin lähialue oli vedenlaadultaan tällä jaksolla varsin homogeenistä. Tämä tukee aiempia havaintoja siitä, että vesien sekoittuminen on Loukeenkarin seudulla erittäin voimakasta ja tehokasta.

Veden lämpötila- ja suolaisuusmittausten avulla voitiin arvioida, missä määrin havaitut vedenlaadun vaihtelut johtuvat sisäsaariston rehevien ja ulkosaariston vähäravinteisten vesimassojen liikkeistä ja sekoittumisesta ja missä määrin kasvattamoiden kuormituksesta. Koko Coastrider-kartoitusaineiston (Liitekuva L4.32) tarkastelun perusteella Loukeenkarin lähialueella tehdyt intensiivimittaukset edustavat hyvin ajanjaksolla vallinnutta vaihtetta laajemman alueellisen mittakaavan ympäristövaihtelussa. Kalankasvattamon lähialueen vedenlaatu muuttui oleellisesti intensiivimittausjakson lopulla ennen viimeistä Coastrider-kartoitusta (3.9.2022) vesimassojen laajamittaisten liikkeiden vaikutuksesta. Pintaveden suolapitoisuus nousi (tutkimusaineiston sisäiseen) huippuunsa ja lämpötila vastaavasti laskenut matalimmilleen. Veden jäähtyminen avoimella merialueella oli niin nopeaa ja huomattavaa (noin 7 °C), ettei se voinut kuin hyvin pieneltä osin selittyä sään kylmenemisellä. Fysikaalisten olosuhteiden äkillinen muutos ei myöskään selity pintavesien liikkeellä, sillä veden suolaisuudessa ja lämpötilassa havaitut jatkumot olivat suunniltaan keskenään vastakkaisia (luode-kaakko). Avomeren pintavesi etäämpänä luoteessa ei myöskään ollut läheskään niin viileää, että tutkimusalueelle olisi siltä suunnalta voinut kohdistua kylmiä pintavirtauksia. Näin ollen muutoksen pääasiallisena selityksenä on pidettävä vesimassojen voimakasta, pystysuuntaista sekoittumista. Syvyysprofiilimittaukset tukevat kaikilta osin tätä olettamusta. Voimakas sekoittuminen voi vuorostaan selittyä vallitsevien tuuliolosuhteiden muutoksella. Noin viikkoa ennen viimeistä kartoituskertaa eli 28.8.2022 vallitseva tuulensuunta muuttui etelästä pohjoiseen. Lisäksi Porin ja Uudenkaupungin pintalämpötilapojut myös näyttivät voimakkaan kumpuamisen tapahtuneen Selkämeren itärannikolla elokuun lopussa. Koska Loukeenkarin kalankasvattamo sijaitsee kahden laajan ympäristöjatkumon risteyskohdassa, sekä vaaka- että pystysuuntainen vesien sekoittuminen lienee kasvattamon lähialueella sekä voimakasta että tyypillistä ja näin ollen myös vaikeasti ennustettavaa.

Aineiston yleisestä homogeenisuudesta huolimatta varsinaisten kuormittuneisuusindikaattori-muuttujien arvoissa (sameus sekä fDOM- ja a-klorofyllipitoisuudet) oli havaittavissa alueellista laukukkuutta. Nämä poikkeamat alueellisesta taustatasostaan olivat kuitenkin intensiteetiltään

matalia (eli pitoisuuseroiltaan pieniä) sekä alueelliselta laajuudeltaan ja sijainniltaan ajallisesti vaihtelevia.

Myös muiden mittausten perusteella paikkavaihtelun osuus kokonaisvaihtelusta oli pientä, eikä alueella havaittu esim. kuormituksen laimenemisgradienttia, eikä sekoittumisvyöhykettä.

4.2. Virtaukset ja kuormituksen kulkeutuminen laitoksen ympäröivällä merialueella

Tarkastelualueella ja -ajanjaksolla tuuli pääosin pohjoisesta ja etelästä. Elokuun alussa vallitseva tuulen suunta oli etelästä. Elo-syyskuun vaihteessa vallitseva tuulensuunta muuttui pohjoiseksi. Virtausmittausten ja aikaisemmin tehtyjen mallinnusten (Kettunen ym. 2015) perusteella etelätuulella laitokselta peräisin olevan kuormituksen voidaan olettaa kulkeutuneen virtausten mukana pintakerroksessa Seksmiilarin saariston pohjois- ja koillisosiin, sekä pohjoistuulella Kihdin pohjoisosia ja lounaan suunnassa olevaa avomerta kohden. Pohjan läheisissä vesikerroksissa hitaat virtaukset kuljettavat vettä laitokselta sekä pohjoista ja kaakkoa että etelää kohden. Näissä suunnissa ei havaittu merkittäviä poikkeamia vedenlaadussa.

4.3. Laitoksen vedenlaatuvaikutukset

Saaristomerellä tehtiin vuosina 2019–2020 vedenlaatumittauksia automaattisilla mittalaitteilla (Niukko ja Kankainen 2020). Mittauksia jatkettiin ja menetelmää pyrittiin kehittämään myös vuonna 2021. Vuonna 2022 mittauksia tehtiinkin kattavammin eri syvyydet huomioiden.

Vuoden 2022 mittaustulokset eivät merkittävästi poikenneet vuoden 2015 mallinnus- ja mittaustuloksista (Kettunen ym. 2015), eikä laitoksen vaikutusalueella havaittu merkittäviä vedenlaatuvaikutuksia. Saaristo- ja Selkämeren vesimassat sekoittuivat tehokkaasti Loukeenaria ympäröivällä Seksmiilarin saaristovyöhykkeellä ja kulkeutuvat sieltä ajoittain sekä lounaista ja luoteista ulkomerta, Kihdin pohjoispäätä että Uudenkaupungin saaristoa kohden. A-klorofyllin pitoisuus alueella vaihtelee tuulen suunnan ja voimakkuuden mukaan. Elo-syyskuun seurantajakson alun etelätuulilla laitoksen ravinnekuorma voidaan virtausten perusteella olettaa kulkeutuneen pohjoista kohden ja sekoittuneen nopeasti Kihdin suunnalta virtaaviin vesimassoihin ja siitä edelleen Seksmiilarin saaristoon ja Uudenkaupungin saaristoa kohden. Elo-syyskuun vaihteen pohjoistuulilla voidaan vastaavasti olettaa sekoittumista tapahtuneen Uudenkaupungin saaristosta kulkeutuviin rehevämpiin vesimassoihin, koska virtausten mukainen kulkeutumissuunta oli lounaaseen kohden avomerta.

Coastrider-kartoituksissa ja satelliittitulkinnoissa havaittu kuormittuneisuusindikaattorimuuttujien arvojen laukas vaihtelu ei ollut sellaisenaan assosioitavissa kalankasvattamon sijaintiin vaan pikemminkin alueen pohjanmuotoihin, tuuliolosuhteisiin sekä havaittuihin ja oletettuihin lateraali- ja vertikaalivirtauksiin.

Syvyysprofilointimittaukset täydensivät Coastrider-mittauksia ja antoivat paremman kuvan pitoisuuksien syvyysuuntaisesta jakaantumisesta. A-klorofylli-pitoisuus vaihteli alueella jonkin verran ja nousi päällysvedessä ajoittain hieman taustapitoisuuden yläpuolelle muutaman kilometrin etäisyydellä laitoksen kaakkois- ja luoteispuolilla. Nämä nousut olivat hyvin pieniä, paikallisia ja hetkittäisiä, eikä niillä näin ollen voida katsoa olevan alueellisesti tai ajallisesti laajempaa merkitystä ympäristön tilan kannalta.

Kaiken kaikkiaan laitoksen ympärillä ei ollut havaittavissa systemaattisesti taustapitoisuuksia korkeampia a-klorofylli- tai sameusarvoja, eikä sekoittumisvyöhykettä.

4.4. Arvio mittausjärjestelmän toimivuudesta.

Kuormittavan aineksen muuntuminen ja leviäminen pyrittiin ottamaan mahdollisimman hyvin huomioon mittausmuuttujien valinnassa sekä havaintopisteiden alueellisen ja ajallisen jakautumisen suunnittelussa. Koska kuormittava aines muuntuu sekä kalankasvattamon sisällä, että sen ulkopuolella (ks. 4.5), ympäristön kuormittuneisuutta mitattiin indikaattorein, jotka heijastelevat kuormittavan aineksen lisäksi sen vaikutuksia vesien tilaan mahdollisimman kokonaisvaltaisesti.

Niin liukoisessa kuin kiinteässäkin muodossa veteen päätyvät lukuisat hiili- ja ravinneyhdisteet voivat toisinaan kulkeutua muuttumattomina etäämmälle päästölähteestään. Rannikovesissä levitessään ja sekoittuessaan hiili ja ravinteet muuttavat kuitenkin useimmiten sekä kemiallista että fysikaalista olomuotoaan ja/tai sitoutuvat väliaikaisesti ekosysteemin elollisiin ja elottomiin komponentteihin. Hiili ja ravinteet voivat myös poistua käytännössä pysyvästi vesipatsaasta joko hautautumalla pohjaan tai haihtumalla ilmakehään. Näiden ns. coastal filter -pääfunktioiden – kulkeutuminen, muuttuminen, sitoutuminen ja poistuminen – keskinäiset suhteet sekä suhteelliset nopeudet ja voimakkuudet riippuvat veden lämpötilasta ja suolapitoisuudesta ja ohjaavat keskeisesti eri kuormitusmuotojen ja -määrien varsinaisia vaikutuksia vesien tilaan (Asmala ym. 2017, 2022). Keskeisimpiä ympäristön tilaa kuvaavia indikaattoreita seuraamalla voidaan arvioida erilaisten kuormituslähteiden suhteellista merkitystä huomattavasti kokonaisvaltaisemmin ja konservatiivisemmin kuin mittaamalla ympäristöä kuormittavien, yksittäisten kemiallisten yhdisteiden ja niiden fysikaalisten olomuotojen pitoisuuksia.

Kuormituksen vaikutukset ympäristön tilaan riippuvat myös erityisesti vastaanottavassa vesiympäristössä vallitsevista fysikaalisista olosuhteista kuten lämpötilasta ja suolaisuudesta. Käytännössä hiili- ja ravinnekuormitus ilmentyy mm. sameuden ja mikroleväbiomassan lisääntymisenä sekä tummumisena, happamoitumisena, hapen puutteena ja kohonneina hiilidioksidin- ja metaanipitoisuuksina. Hiili-, ravinne- ja kiintoainekuormituksesta kieliviä, keskeisimpiä ja konventionaalisimpia indikaattoreita ovat veden sameus sekä liukoisen eloperäisen aineksen ja a-klorofyllin pitoisuudet. Erityisesti hiilikuormituksen (tai laajemmin eloperäisen kuormituksen) osalta ympäristövaikutusten arvioinnissa on syytä mitata myös hiilidioksidin ja metaanin osapaineita sekä näiden kasvihuonekaasujen vapautumista ilmakehään. Hankkeessa mitattiin kaikkia näitä indikaattoreita rinnan fysikaalisten olosuhteiden eli ennen muuta suolaisuuden ja lämpötilan kanssa. Muuttujiensa osalta mittausjärjestelmää voi siis pitää toimivana ja tarkoituksenmukaisena. Erityisesti Coastrider-kartoitukset sisälsivät muuttujia, joiden arvoja ei aiemmissa alueella tehdyissä tutkimuksissa ole mitattu. Näistä keskeisimpiä olivat fDOM-, hiilidioksidin- ja metaanipitoisuudet, jotka liittyvät joko suoraan tai välillisesti eloperäisen kuormituksen kvantifointiin.

Hankkeessa mitatut indikaattorit ilmentävät vesien kuormittuneisuustasoa tarkoituksenmukaisesti kuitenkin vasta, kun niitä mitataan sellaisella tarkkuudella ja kattavuudella, että vaikutusten ajallisuusalueellisesta intensiteetistä ja laajuudesta kyetään esittämään riittävän luotettavia arvioita. Kuormittavan aineksen (ja sen ympäristövaikutusten) leviämisen ja laimentumisen kvantifoinnissa täytyy näin ollen ottaa huomioon erityisesti myös vallitsevat virtausolosuhteet. Näiltä osin mittausjärjestelmän toimivuudessa on vielä kehitettävää. Poikkeamia

ympäristön tilassa ei kerätyn aineiston perusteella ole mahdollista aukottomasti yhdistää kuormituslähteeseen. Vaikka aineisto olikin sekä resoluutioltaan että kattavuudeltaan aiempaa huomattavasti edistyneempää, ja virtauksia mitattiin ja mallinnettiin aiempaa yksityiskohdaisemmin, sekä havaintopisteiden alueellisajallista jakautumista että virtausmittauksia on jatkossa syytä kohdentaa ja synkronisoida entistä paremmin.

Poijuissa käytetyissä EXO-laitteessa oli käytössä keskiharjapyyhkijä, joka puhdisti anturit 6 tunnin välein. Poijussa, joka tuotti mittausdataa noin 5 viikon ajalta, ei ole havaittavissa anturien likaantumisen aiheuttamaa arvojen systemaattista nousua. Anturit puhdistettiin kerran myös käsin. EXO-laitteen tuottamat raaka-arvot (a-klorofylli ja sameus) saatiin tarkennettua riittävällä määrällä laboratoriomääryksiä. Jatkossa kalibroitinäytteitä on kuitenkin syytä kerätä paikoista, joissa lähtökohtaisesti parametrien vaihtelu olisi suurempaa.

4.5. Suositus vedenlaadun ja virtausten seuraamisesta laitoksen vaikutusalueella ja merialueella.

Avoimen veden kalankasvatuksessa käytetty ravinto ei sitoudu kokonaisuudessaan kalojen biomassaan. Osa kalojen ravinnosta vapautuu kasvatusaltaiden ympäristöön, joko sellaisenaan tai erilaisten fysiologisten prosessien kautta muuntuneena. Näin ollen ravinnon sisältämää hiiltä, typpeä ja fosforia päätyy veteen niin liukoisessa muodossa kuin kiintoaineksenaakin. Vedestä hiiltä ja typpeä voi siirtyä edelleen ilmakehään mm. kasvihuonekaasuina – joko sedimentin kautta tai suoraan. Koska kalanviljelylaitoksilla käytetty ravintobiomassa on osin peräisin muualta kuin niiden ympäristöstä, ja laitosten kokonaisbiomassa on huomattavasti ympäristöään konsentroituneempaa, avoimen veden kalanviljelylaitoksia tulee arvioida ulkoisina pistekuormituslähteinä sekä vesistöjen että ilmaston kannalta.

KALA-MONITOR2020-hankkeessa (Kettunen ym. 2015) kehitettyä kalankasvatuksen ympäristöseurantajärjestelmää täydentävien satelliitti-, läpivirtaus- ja automaattimittausten sekä datafuusio-menetelmien avulla saatiin tässä intensiivikampanjassa laitoksen vedenlaatuvaikutuksista alueellisesti ja ajallisesti tarkempi ja kattavampi kuva. Seuraava viiden vuoden päästä toteutettava intensiiviseurantajakso voidaan toteuttaa yhteistarkkailuna lähialueen muiden kuormittajien kanssa. Tällöin kannattaa ankkuroida automaattiset virtaus- ja vedenlaatumittarit heinä-, elo-, syys- ja lokakuun ajaksi muutamalle laitosta ympäröiville Kihdin ja Seksmiilarin saariston keskeisimmälle kulkeutumisreitille ja akkumulaatioalueelle ja tehdä kuukausittain vedenlaadun läpivirtausmittaukset ja luotaukset. Mittaustulokset kannattaa yhdistää Syken Tarkka-palvelusta saataviin sameus- ja a-klorofylli-tulkintoihin ja interpoloida karttakuviksi. Vedenlaatuvaikutusten toteamiseksi voidaan laskea a-klorofylli-pitoisuuden poikkeamat Brändö100-seurantapisteen pitoisuuksiin tai CoastRider-läpivirtausmittauksista johdettaviin vertailuarvoihin, joiden kehitteillä olevista laskentamenetelmistä on saatu hyviä tuloksia (Scheinin ym. 2023).

Tässä tutkimuksessa käytetty CoastRider-läpivirtausmittaustekniikkaa sekä poijuihin ja luotaimiin asennettua automaattista mittaustekniikkaa voidaan käyttää perinteisen näytteenoton ja vesianalytiikan lisäksi ja yhdistää ympäröivältä merialueelta saatuihin Sentinel 2 -satelliittimittaustuloksiin. Yhdistäminen sekä karttojen ajallinen ja alueellinen interpolointi on mahdollista tehdä esim. Syken datafuusio-järjestelmää käyttäen. Näin kalankasvattamoiden vedenlaatuvaikutukset saadaan huomattavasti aikaisempaa kattavammin ja tarkemmin kartoitettua.

5. Yhteenveto

Aikaisempien tutkimusten (Kettunen ym. 2015) perusteella Kustavissa sijaitsevan Loukeenkariin kalankasvattamon ympäristössä ei havaittu kasvattamon rehevöittävää vaikutusta, eikä voimakkaat leväkukinnat esiintyneet laitoksen läheisyydessä, vaikka ne olivat voimakkaita ulkomerellä. Lisäksi vuosien välinen pitoisuusvaihtelu oli pientä verrattuna kuukausittaiseen tai satunnaiseen vaihteluun. Tämän vuoksi seurantaa ei kannata tehdä joka vuosi vaan seurata laitoksen mahdollisia vaikutuksia intensiivisemmin esim. 5 vuoden välein.

Vuoden 2015 KALA-MONITOR2020-hankkeessa (Kettunen ym. 2015) tehdystä intensiiviseurannasta on kulunut yli kuusi vuotta. Uuden intensiiviseurantakampanjan toteuttaminen oli nyt ajankohtaista, muun muassa koska kasvattamon tuotannossa, ympäristöolosuhteissa, ilmastossa ja taustakuormituksessa on saattanut tapahtua muutoksia, jotka vaikuttavat merialueen tilaan. Kuuden vuoden aikana satelliittien sekä automaattisia virtausten ja vedenlaadun mittaus- ja kartoitustekniikat ovat kehittyneet mahdollistaen entistä tarkemman ja kattavamman vaikutusten seurannan.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli seurata Kustavin Loukeenkariin kalankasvattamon vedenlaatuvaikutuksia ympäröivällä merialueella ja kehittää KALA-MONITOR2020-hankkeessa ehdotettua, viiden vuoden välein toteutettavaa intensiivistä seurantajärjestelmää.

Käyttöön otettiin uudet mittaus- ja mallinnusmenetelmät, kuten Sentinel- satelliittien korkean alueellisen erotuskyvyn sameus- ja a-klorofylli-tulkinnat sekä automaattiset fluorometri-mittaukset poijuissa ja veneestä. Nämä mittaukset yhdistettiin intensiivisen vesinäytteenoton kanssa, interpoloitiin ajallisesti ja alueellisesti ja tehtiin päivittäiset vedenlaatukartat koko tutkimusalueelta sekä vedenlaadun syvyysprofiilit ja aikasarjat laitoksen ympäriltä.

Läpivirtausmittausten yhteydessä tehtiin alustavia arvioita myös eloperäisen aineen kuormituksen vaikutuksista vedenlaatuun, akkumuloitumisesta syvänteiden pohjalle ja kasvihuonekaasujen päästöihin mittaamalla hiilidioksidin ja metaanin osapainetta tutkimusalueen pintavesissä.

Samanaikaisesti toteutetun virtausmittauksen ja aikaisemmin tehtyjen mallinnusten pohjalta arvioitiin vesimassojen liikkeet sekä kuormituksen kulkeutuminen ja sekoittuminen ympäröiville merialueille. Tulosten perusteella arvioitiin lähialuetta (1 km) laajemman merialueen, heinä-lokakuun alueellinen ja ajallinen vaihtelu, sekä mahdolliset vedenlaatuvaikutukset aikaisempaa tarkemmin ja kattavammin. Tuloksia verrattiin vuoden 2015 mallinnuksiin ja seurannan tuloksiin.

Tulosten perusteella Saaristo- ja Selkämeren vesimassat sekoittuivat erityisen tehokkaasti Loukeenkaria ympäröivällä Seksmiilarin saaristovyöhykkeellä ja kulkeutuvat sieltä tuulitilanteesta riippuen joko ulkomerta ja Kihdin pohjoispäätä, tai Seksmiilarin ja Uudenkaupungin saaristoa kohden. A-klorofyllin pitoisuus alueella vaihtelee tuulen suunnan ja voimakkuuden mukaan. Elo-syyskuun seurantajakson alun etelätuulilla laitoksen ravinnekuorma kulkeutui pohjoista kohden sekoittuen nopeasti Kihdin suunnalta virtaaviin vesimassoihin ja siitä edelleen Seksmiilarin saaristoon ja Uudenkaupungin saaristoa kohden. Elo-syyskuun vaihteen pohjoistuulilla kuormitus sekoittui Uudenkaupungin saaristosta kulkeutuviin rehevämpiin vesimassoihin, ja kulkeutumissuunta oli lounaaseen kohden avomerta. Harvemmin esiintyvillä tynnemillä jaksoilla a-klorofyllipitoisuus nousi ajoittain juuri ja juuri havaittavasti taustapitoisuuden yläpuolelle muutaman kilometrin etäisyydellä kaakkoon ja luoteeseen laitoksesta.

Nämä nousut olivat lyhytaikaisia ja harvinaisia, eikä niillä ollut laajempaa tai pidempiaikaisempaa merkitystä.

Tulokset eivät oleellisesti poikenneet vuoden 2015 mallinnus- ja mittaustuloksista (Kettunen ym. 2015), eikä laitoksen vaikutusalueella havaittu merkittäviä vedenlaatuvaikutuksia.

KALA-MONITOR2020-hankkeessa (Kettunen ym. 20215) kehitettyä kalankasvatuksen ympäristöseurantajärjestelmää täydentävien satelliitti-, läpivirtaus- ja automaattimittausten sekä datafuusio-menetelmien avulla saatiin laitoksen vedenlaatuvaikutuksista alueellisesti ja ajallisesti tarkempi kuva. Seuraava 5 viiden vuoden päästä toteutettava intensiiviseurantajakso voidaan toteuttaa yhteistarkkailuna lähialueen muiden kuormittajien kanssa. Tällöin kannattaa ankkuroida automaattiset virtaus- ja vedenlaatumittarit heinä-, elo- ja syyskuun ajaksi muutamalle Seksmiilarin saariston keskeisimmälle kulkeutumisreitille ja akkumulaatioalueelle ja tehdä kuukausittain vedenlaadun läpivirtausmittaukset ja luotaukset. Mittaustulokset kannattaa yhdistää Syken Tarkka-palvelusta saataviin sameus- ja a-klorofylli-tulkintoihin, interpoloida karttakuviksi ja laskea poikkeamat tällä hetkelle kehitteillä olevilla menetelmillä (Scheinin ym. 2023) laskettuihin vertailuarvoihin vedenlaatuvaikutusten toteamiseksi.

Viitteet

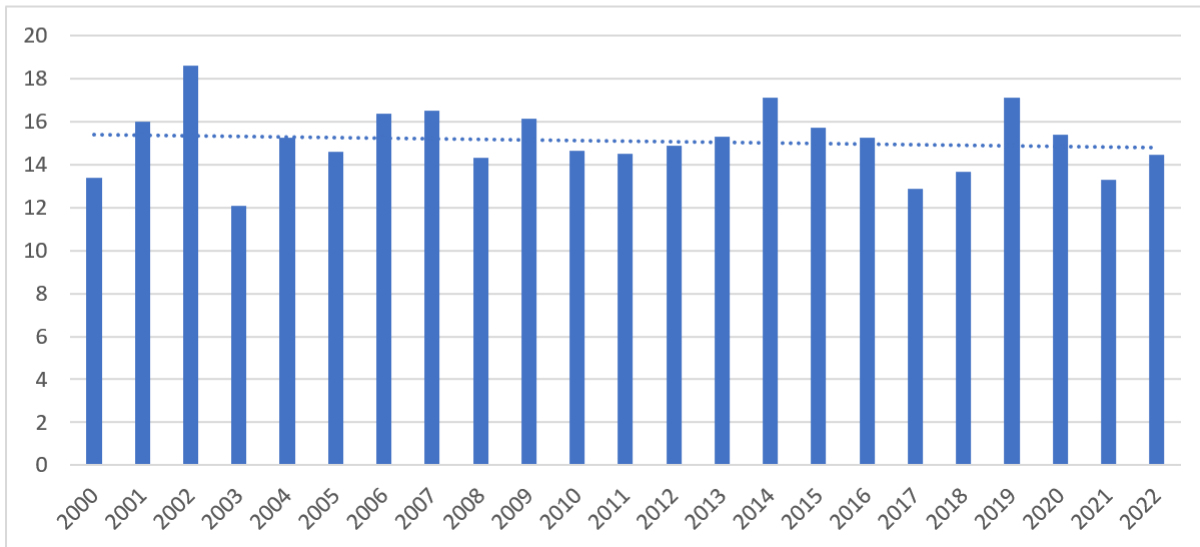
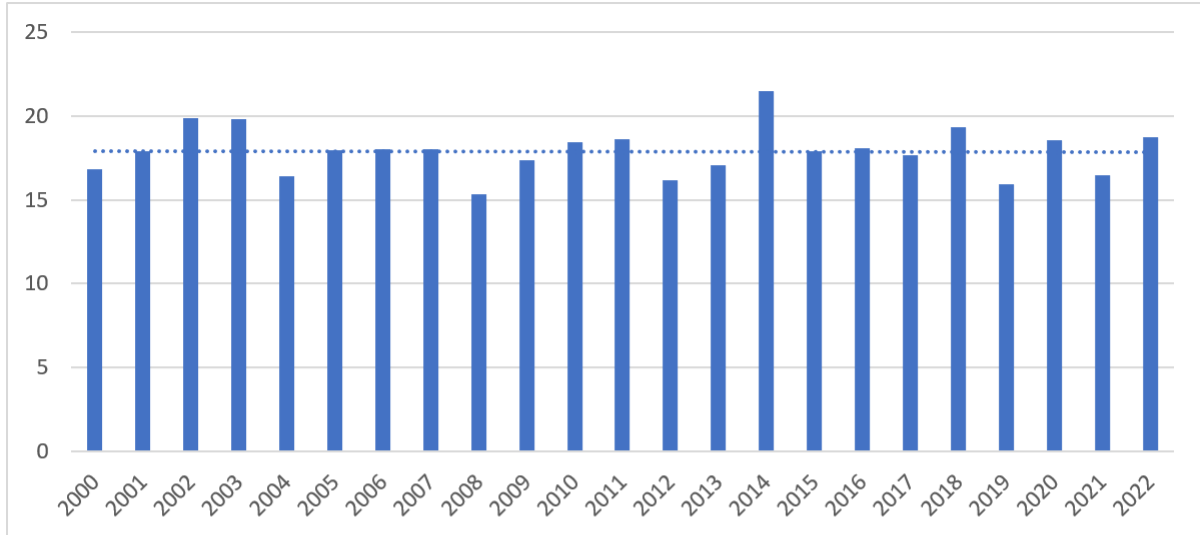
- Asmala, E., Carstensen, J., Conley, D.J., Slomp, C.P., Stadmark, J. & Voss, M. 2017. Efficiency of the coastal filter: nitrogen and phosphorus removal in the Baltic Sea. *Limnology and Oceanography* 62: 222–238.
- Asmala, E., Virtasalo, J., Scheinin, M., Newton, S. & Jilbert, T. 2022. Role of particle dynamics in processing of terrestrial nitrogen and phosphorus in the estuarine mixing zone.
- Attila, J., Koponen, S., Kallio, K., Lindfors, A., Kaitala, S. & Ylöstalo, P. 2013. MERIS Case II water processor comparison on coastal sites of the northern Baltic Sea. *Remote Sensing of Environment* 128: 138–149.
- Brockmann, C., Doerffer, R., Peters, M., Kerstin, S., Embacher, S. & Ruescas, A. 2016. Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters. *Proc. Living Planet Symposium, ESA SP-740*.
- Canning, A.R., Fietzek, P., Rehder, G. & Körtzinger, A. 2021. Technical note: Seamless gas measurements across the land–ocean aquatic continuum – corrections and evaluation of sensor data for CO₂, CH₄ and O₂ from field deployments in contrasting environments. *Biogeosciences* 18: 1351–1373. <https://doi.org/10.5194/bg-18-1351-2021>
- Doerffer, R. & Schiller, H. 2007. The MERIS Case 2 algorithm. *International Journal of Remote Sensing* 28 (3–4): 517–535. <https://doi:10.1080/01431160600821127>
- Doerffer, R., & Schiller, H. 2008a. MERIS Regional Coastal and Lake Case 2 Water Project Atmospheric correction ATBD (Algorithm Theoretical Basis Document) 1.0. 41 s.
- Doerffer, R. & Schiller, H. 2008b. MERIS Lake Water Project - Lake Water Algorithm for BEAM, ATBD (Algorithm Theoretical Basis Document) 1.0. 17 s.
- Fiedler, B., Fietzek, P., Vieira, N., Silva, P., Bittig, H.C. & Körtzinger, A. 2013. In situ CO₂ and O₂ measurements on a profiling float. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 30: 112–126. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00043.1>
- Fietzek, P., Fiedler, B., Steinhoff, T. & Körtzinger, A. 2014. In situ quality assessment of a novel underwater pCO₂ sensor based on membrane equilibration and NDIR spectrometry. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 31: 181–196. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00083.1>
- Gunia, M., Laine, M., Malve, O., Kallio, K., Kervinen, M., Anttila, S., Kotamäki, N., Siivola, E., Kettunen, J. & T. Kauranne 2022. Data fusion system for monitoring water quality: Application to chlorophyll-a in Baltic Sea coast. *Environmental Modelling & Software* 155. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105465>
- Gülzow, W., Rehder, G., Schneider, B., Deimling, J.S. & Sadkowiak, B. 2011. A new method for continuous measurement of methane and carbon dioxide in surface waters using off-axis integrated cavity output spectroscopy (ICOS): An example from the Baltic Sea. *Limnology and Oceanography Methods* 9: 176–184. <https://doi.org/10.4319/lom.2011.9.176>

- Hakala, J., Hynninen, P., Kaukoranta, E., Selänne, A. & Vuoristo, H. 1994. Velvoitetarkkailun yleisohjeen täydennys: kalankasvatusjien velvoitetarkkailu. Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja nro. 586. Vesi- ja ympäristöhallitus.
- Ilmatieteen laitos 2022. Havaintojen latauspalvelu. Säteilyhavainnot. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/avoin-data>
- Kankainen 2015. Ympäristötehokas kalankasvatus ja ympäristövaikutusseurantamenetelmien kehittäminen. Loppuraportti. Luonnonvarakeskus. 28 s.
- Kankainen, M., Vielma, J., Koskela, J., Niukko, J. & Niskanen, L. 2020. Olosuhteiden vaikutus kirjoloihen kasvatuksen tehokkuuteen Suomen merialueilla. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 28/2020. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 34 s.
- Kauranne, T., Gunia, M., Kallio, K., Malve, O., Kettunen, J., Laine, M. & Haario, H. 2019. Ensemble Kalman smoothing of algal bloom events. Data Assimilation, Predictability, Errors and Uncertainty Quantification in Geosciences. EGU General Assembly 2019: 7.4.2019 Austria.
- Kettunen, J., Lignell, R., Ropponen, J., Malve, O. & Kotamäki, N. 2015. Kalankasvatuksen ympäristöseurantajärjestelmän kehittäminen. Kalankasvatuksen ympäristöseurantajärjestelmän kehittäminen (KALA-MONITOR2020) -hankeen loppuraportti. 26 s.
- Koponen, S. & Attila, J. 2017. Sentinel-satelliitit mullistavat vesiseurannan. Vesitalous 2/2017.
- Laine, M., Haario, H., Kettunen, J. & Malve, O. 2017. Havaintojen yhdistämisellä tehoa vedenlaatuaseurantaan. Vesitalous 2/2017.
- Linders, J., Willstrand Wranne, A., Perivoliotis, L. & Gorringer, P. 2017. Best practices for quality control of sensor based biochemical data. Version 1.3. [Deliverable 5.11].
- Maa- ja metsätalousministeriö & ympäristöministeriö 2014. Kansallinen vesiviljelyn sijainnohjaussuunnitelma. 29 s. + liitteet.
- Malve, O., Kallio, K., Siivola, E., Kervinen, M., Kankainen, M. & Keto, V. 2021a. Datafuusio-menetelmän käyttö kalankasvattamoiden vedenlaatuvaikutusten seurannassa Saaristomereillä. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 51/2021. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 19 s.
- Malve, O., Kallio, K., Siivola, E., Kervinen, M., Kankainen, M. & Keto, V. 2021b. Kalankasvattamoiden vedenlaatuvaikutusten seuranta datafuusion avulla. Vesitalous 3/2021.
- Miettunen, E., Tuomi, L., Westerlund, A., Kanarik, H. & Myrberg, K. 2023. Transport dynamics in a complex coastal archipelago. EGUsphere [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1547>, 2023.
- Miloshevich, L.M., Paukkunen, A., Vömel, H. & Oltmans, S.J. 2004. Development and validation of a time-lag correction for Vaisala radiosonde humidity measurements. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 21: 1305–1327. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2004\)021<1305:DAVOAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2004)021<1305:DAVOAT>2.0.CO;2)

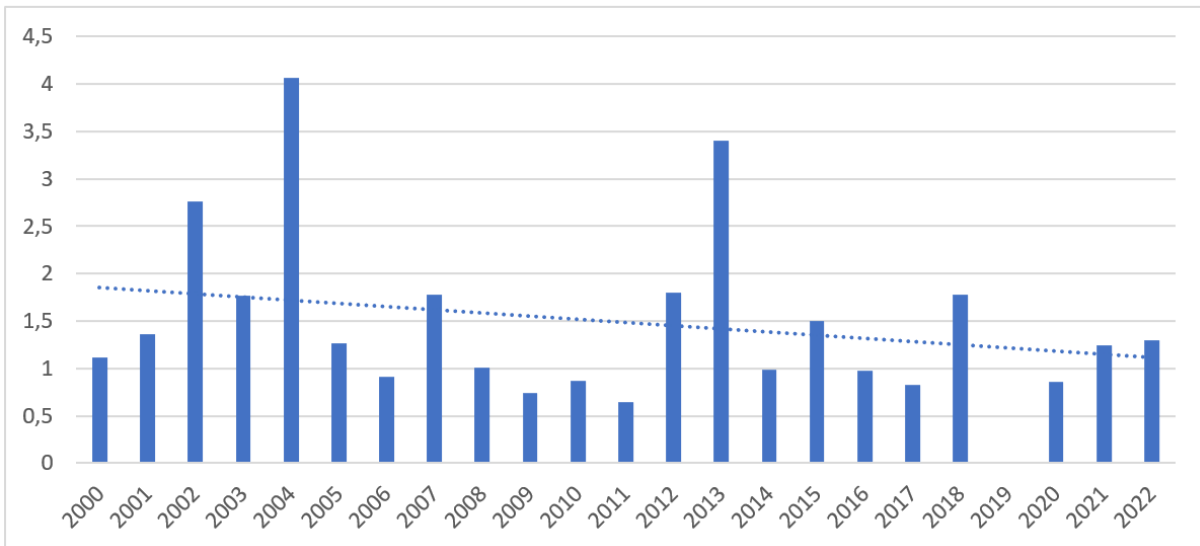
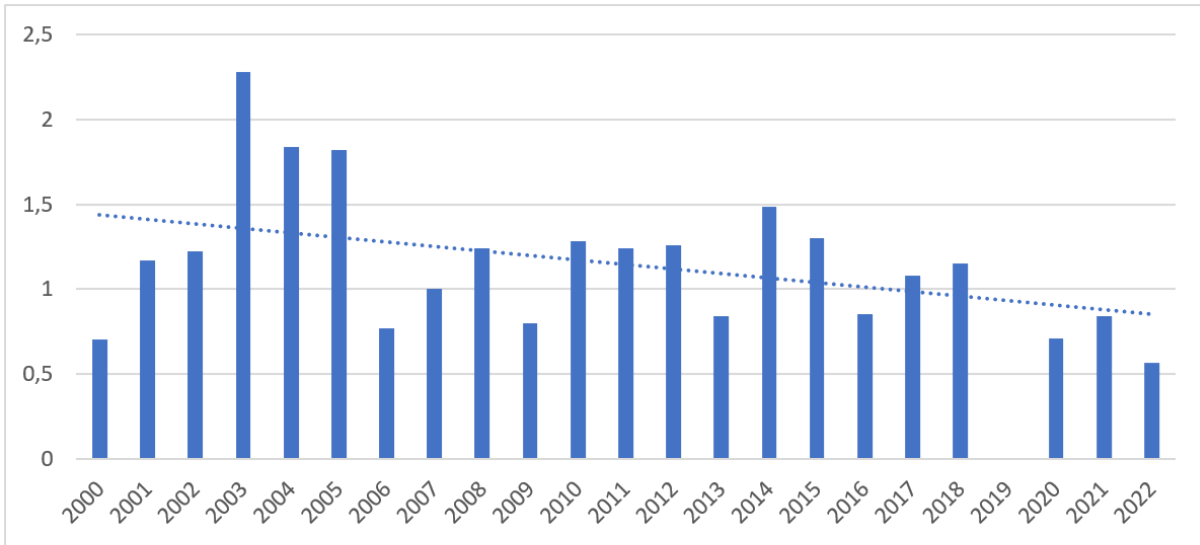
- Niukko, J. & Kankainen, M. 2021. Vedenlaadun mittauksia kalankasvatustiluksilla: Havaintoja automaattisista mittareista Saaristomerellä 2019–2020. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 41/2021. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 39 s.
- Scheinin, M. & Asmala, E. 2020. Ubiquitous patchiness in chlorophyll a concentration in coastal archipelago of the Baltic Sea. *Frontiers in Marine Science*.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00563>
- Scheinin, M., ym. 2023. Vedenlaadun ja kasvihuonekaasujen CoastRider-läpivirtausmittaukset Kustavi-Brändön merialueella vuonna 2022. Käsikirjoitus.
- Setälä, J., Kankainen, M., Suomela, J., Vielma, J. & Tarkki, V. 2014. Vesiviljelyn sijainninhjaussuunnitelman ympäristöselostus. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos. 75 s.
- Snyder, L., Potter, J.D. & McDowell, W.H. 2018. An evaluation of nitrate, fDOM, and turbidity sensors in New Hampshire streams. *Water Resources Research* 54: 2466–2479.
- Takahashi, T., Olafsson, J., Goddard, J.G., Chipman, D.W. & Sutherland S. 1993. Seasonal variation of CO₂ and nutrients in the high-latitude surface oceans: A comparative study. *Global Biogeochemical Cycles*. 7: 843–878.
- Tattari, S., Tarvainen, M., Kallio, K., Lepistö, A., Näykki, T., Raateoja, M. & Seppälä, J. 2019. Laatukäsikirja jatkuvatoimisille vedenlaadun mittauksille. Opas hyviksi käytännöiksi. Suomen ympäristökeskuksen julkaisu 2019:4. <http://hdl.handle.net/10138/299105>
- Vielma, J. (toim.) 2023. Vesiviljelyn innovaatio-ohjelma 2017–2022 loppuraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 60/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 73 s
- Weiss, R.F. 1974. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a nonideal gas. *Marine Chemistry* 2: 203–215. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(74\)90015-2](https://doi.org/10.1016/0304-4203(74)90015-2)
- Wiesenburg, D.A. & Guinasso, N.L. 1979. Equilibrium solubilities of methane, carbon monoxide, and hydrogen in water and sea water. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 24(4).
- Ympäristöministeriö 2020. Kalankasvatuksen ympäristönsuojeluohje. Ympäristöministeriön julkaisu 2020:22. <https://ym.fi/julkaisu?pubid=URN:ISBN:978-952-361-252-5>

Liitteet

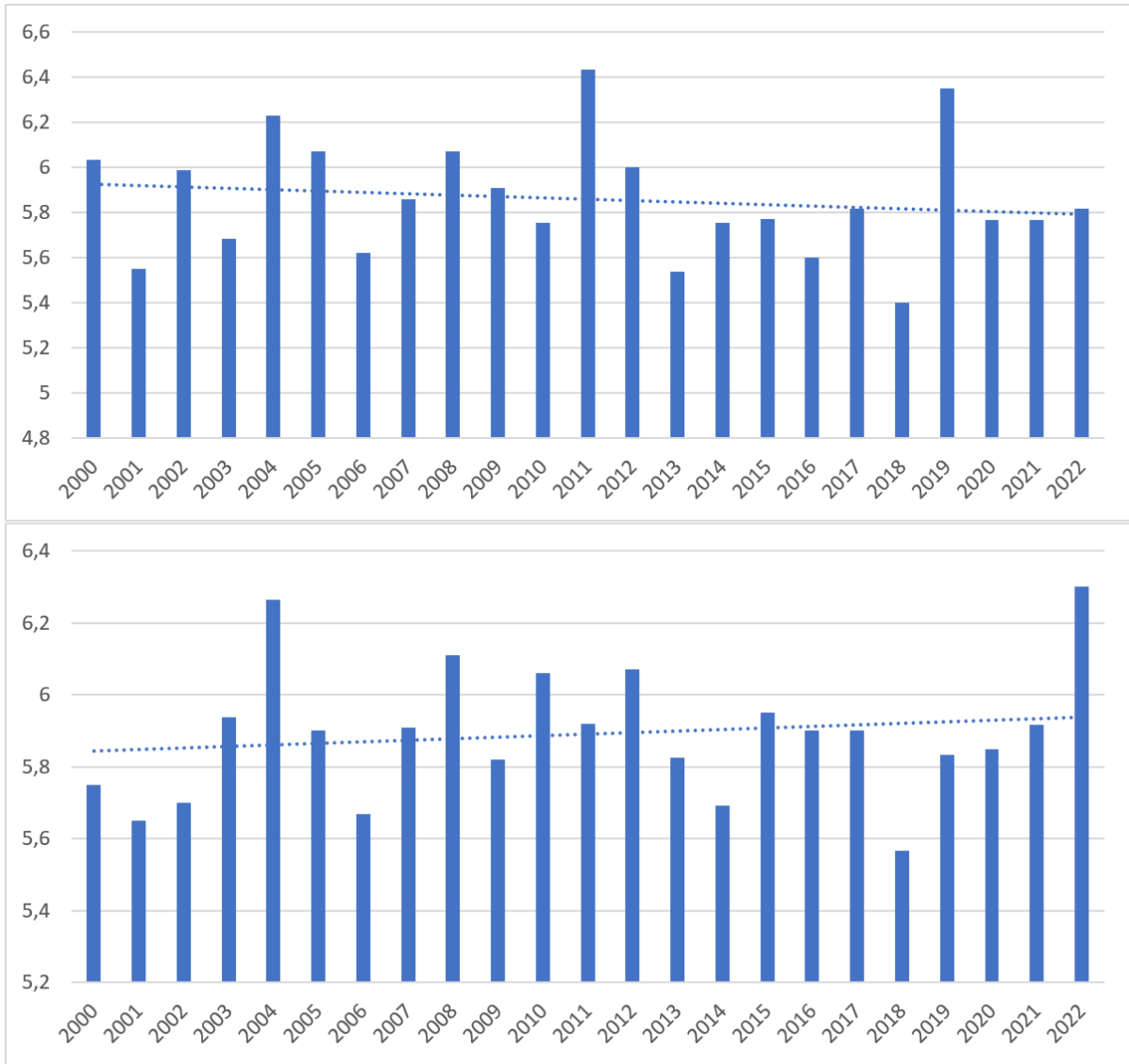
Liite 1. Fysikaalis-kemiallisten muuttujien vaihtelu Brändö100 seuranta- asemalla elosyyskuussa vuosia 2000–2022.



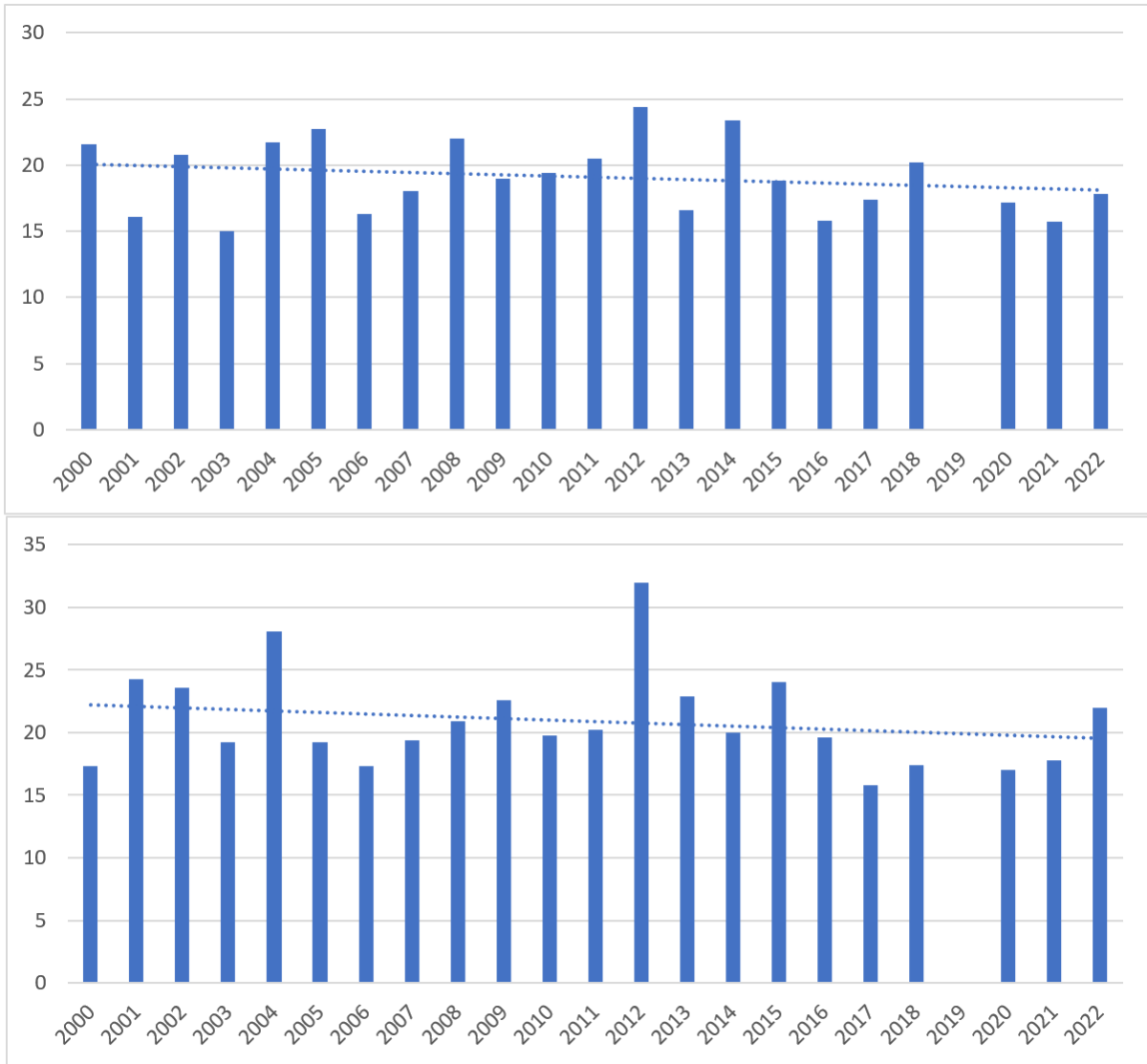
Kuva L.1.1. Lämpötilan (°C) kuukausikeskiarvo Brändö100-havaintoaseman pintavedessä elosyyskuussa (elokuu ylempi paneeli) vuosina 2000–2022.



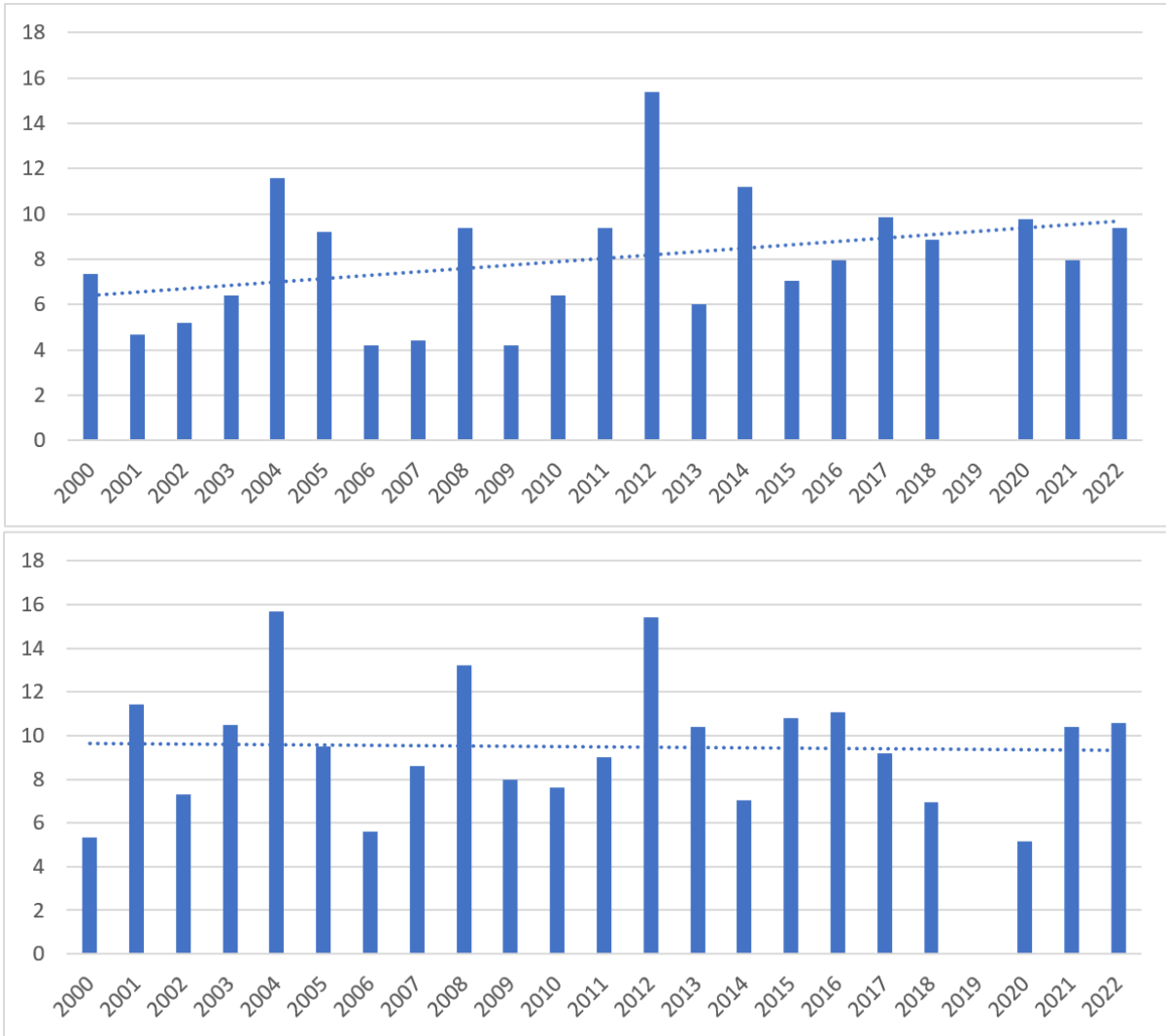
Kuva L.1.2. Sameuden (FNU) kuukausikeskiarvo Brändö100-havaintoaseman pintavedessä elo- syyskuussa (elokuu ylempi paneeli) vuosina 2000–2022.



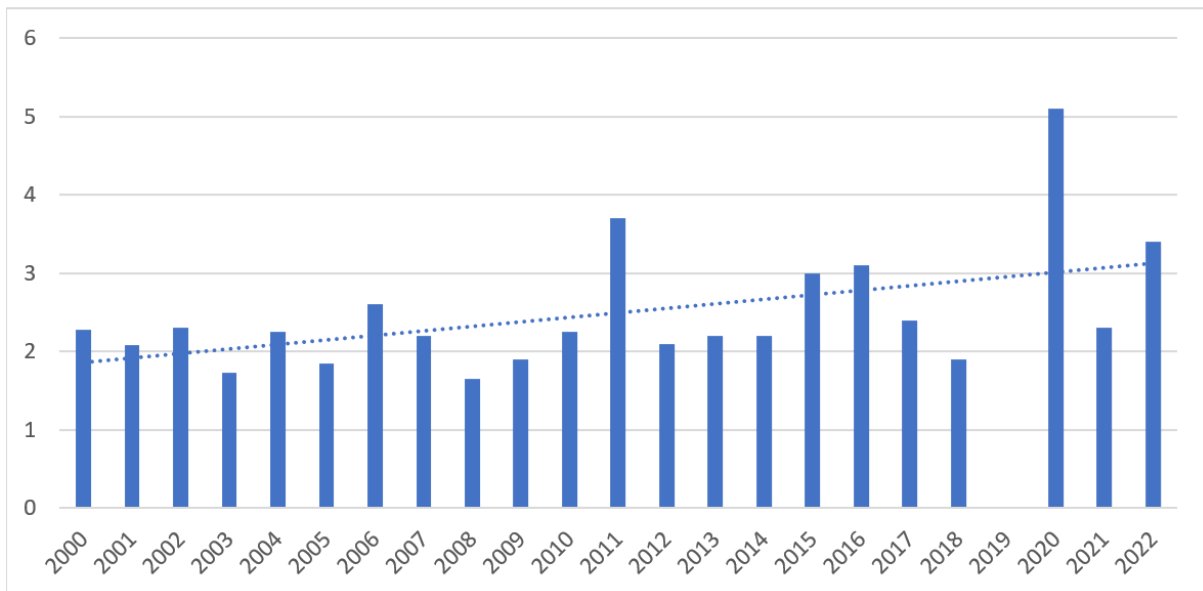
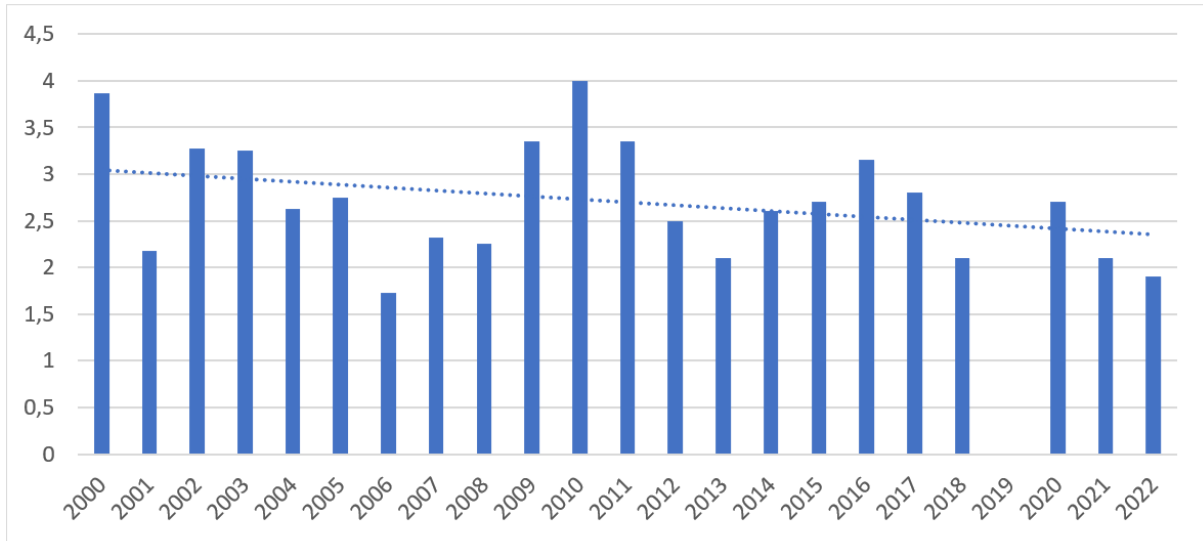
Kuva L.1.3. Suolaisuuden (PSU) kuukausikeskiarvo Brändö100-havaintoaseman pintavedessä elo- syyskuussa (elokuu ylempi paneeli) vuosina 2000–2022.



Kuva L.1.4. Kokonaisfosforin (µg/l) pitoisuuden kuukausikeskiarvo Brändö100-havaintoaseman pintavedessä elo- syyskuussa (elokuu ylempi paneeli) vuosina 2000–2022.

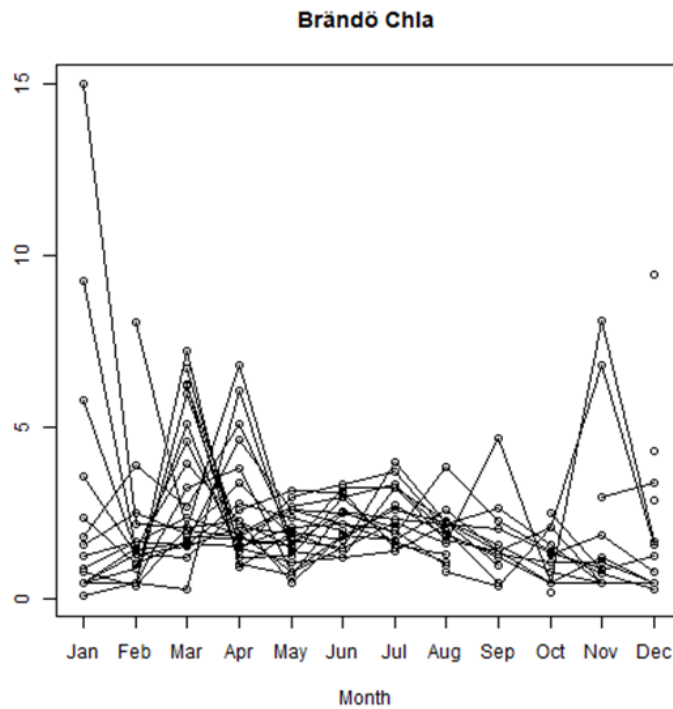


Kuva L.1.5. Fosfaattifosforin (µg/l) pitoisuuden kuukausikeskiarvo Brändö100-havaintoaseman pintavedessä elo- syyskuussa (elokuu ylempi paneeli) vuosina 2000–2022.

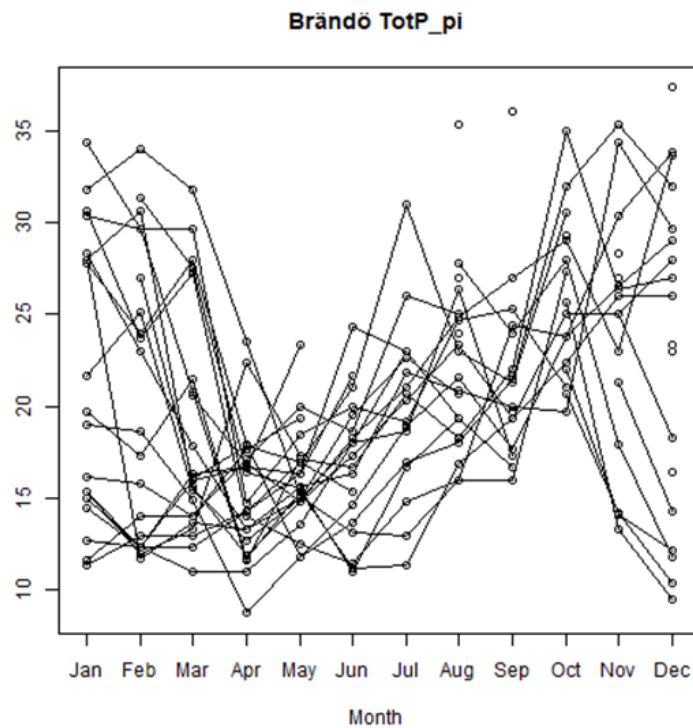


Kuva L.1.6. A-klorofyllin (µg/l) pitoisuuden kuukausikeskiarvo Brändö100-havaintoaseman pintavedessä elo- syyskuussa (elokuu ylempi paneeli) vuosina 2000–2022.

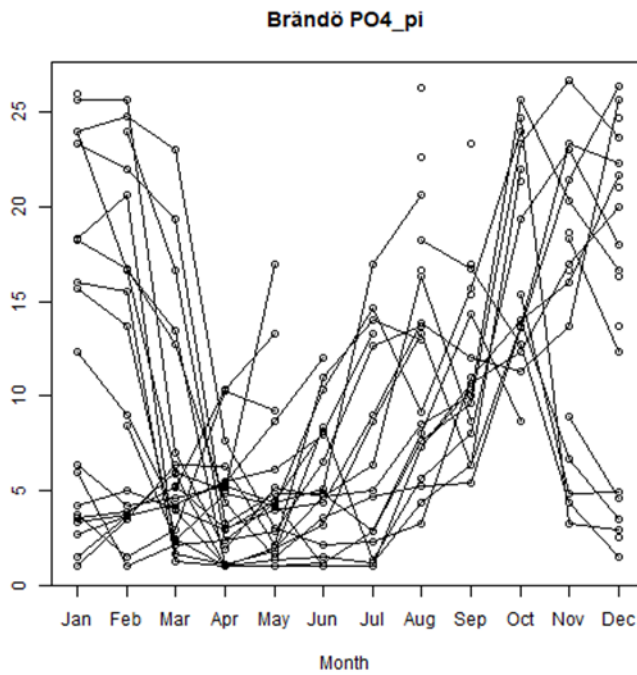
Liite 2. Brändö100 havaintoaseman pintaveden fysikaalis-kemiallisten muuttujien kausivaihtelu v. 2000–2022.



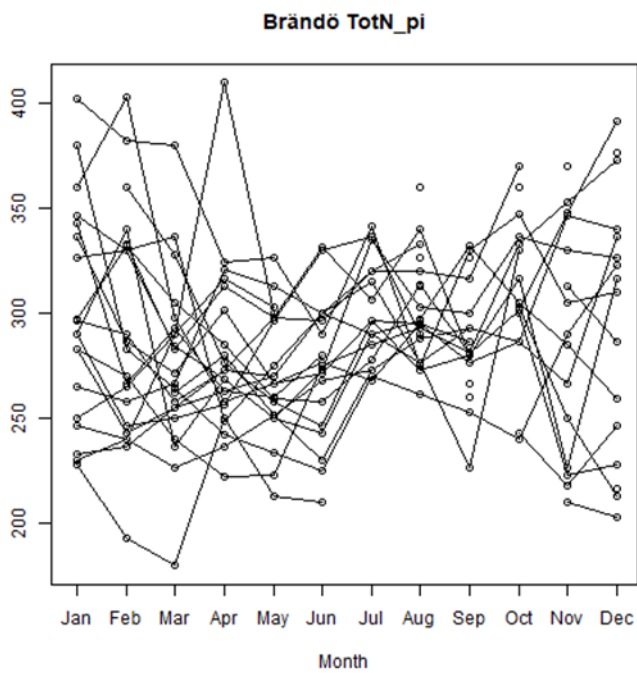
Kuva L.2.1. Brändö100 -mittausaseman a-klorofyllin ($\mu\text{g/l}$) kuukausikeskiarvojen vaihtelu vuosilta 2000–2022.



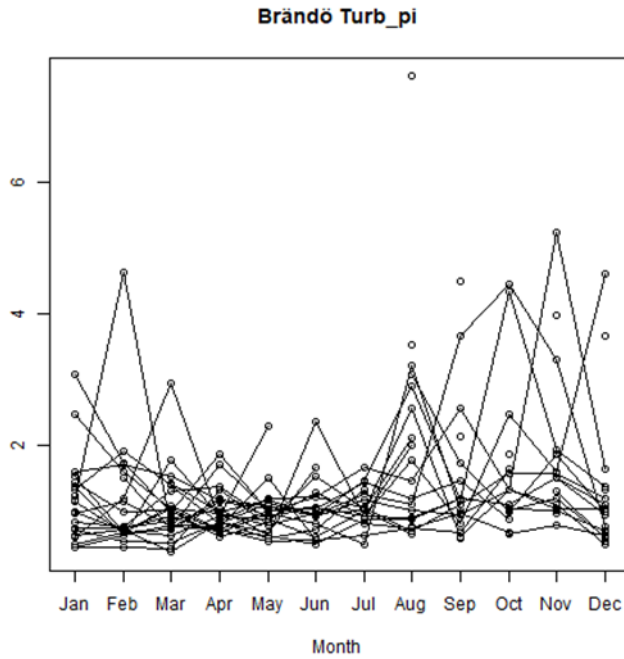
Kuva L.2.2. Brändö100 -mittausaseman kokonaisfosforin ($\mu\text{g/l}$) kuukausikeskiarvojen vaihtelu vuosilta 2000–2022.



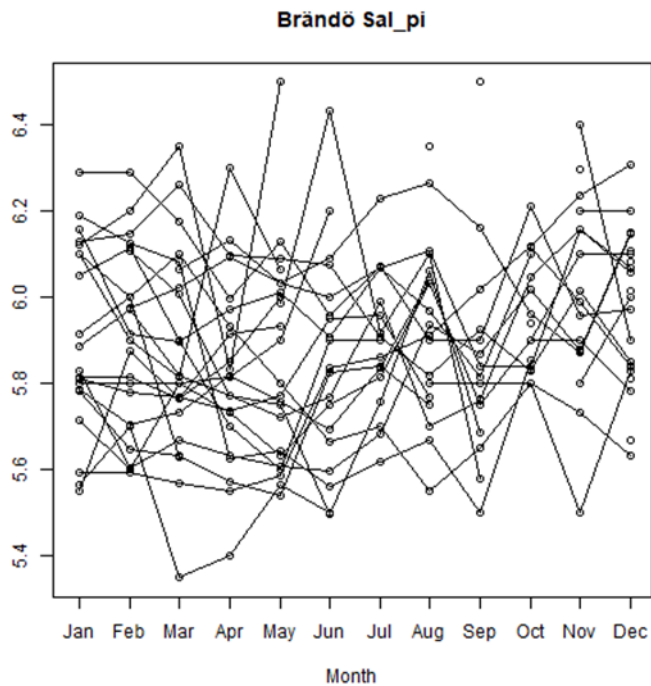
Kuva L.2.3. Brändö100 -mittausaseman fosfaattifosforin ($\mu\text{g/l}$) kuukausikeskiarvojen vaihtelu vuosilta 2000–2022.



Kuva L.2.4. Brändö100 -mittausaseman kokonaistyyppi ($\mu\text{g/l}$) kuukausikeskiarvojen vaihtelu vuosilta 2000–2022.

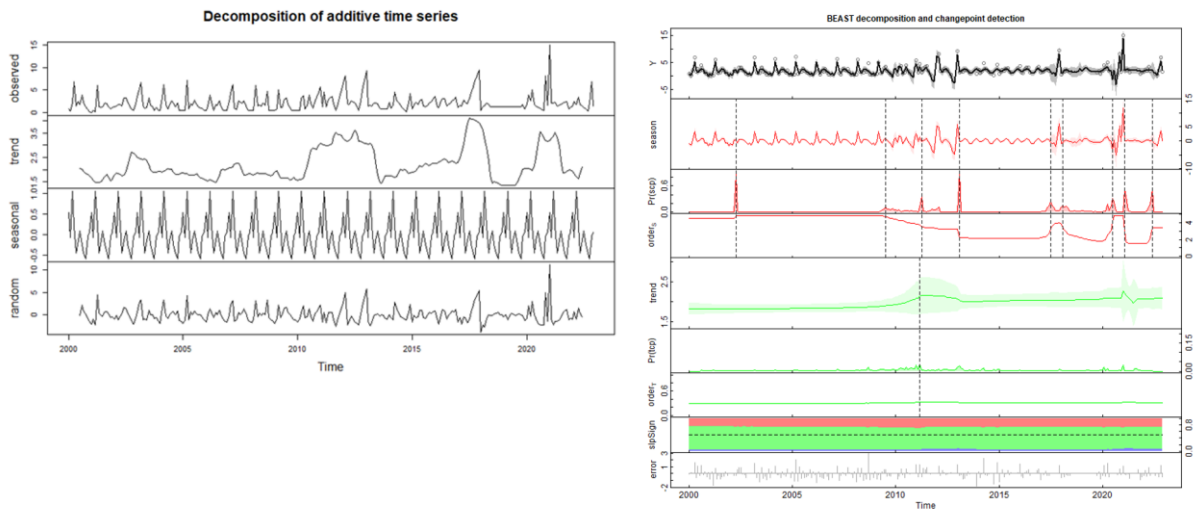


Kuva L.2.5. Brändö100 -mittausaseman sameus (FNU) kuukausikeskiarvojen vaihtelu vuosilta 2000–2022.

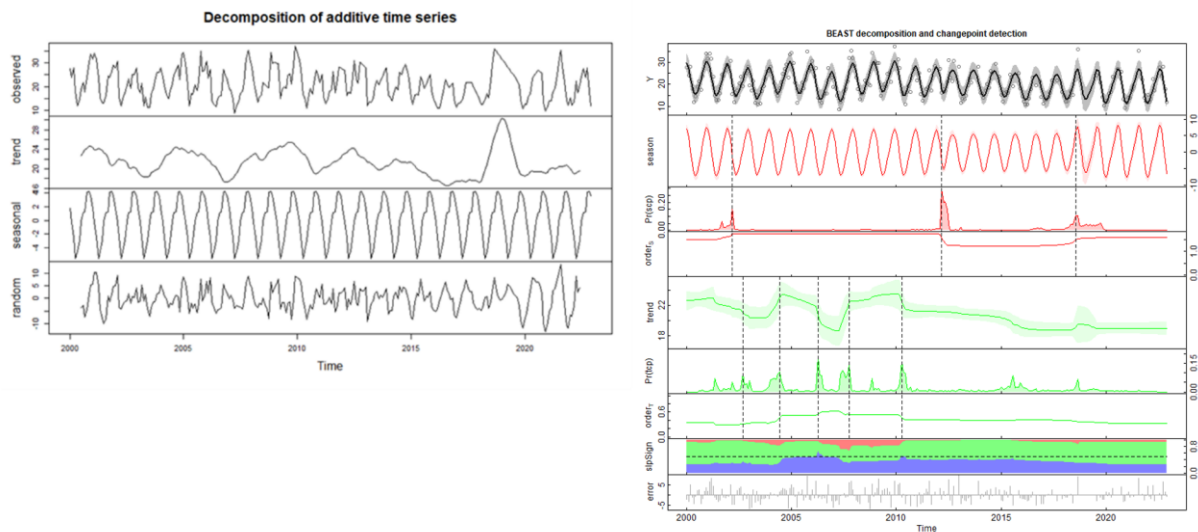


Kuva L.2.6. Brändö100 -mittausaseman suolaisuus (PSU) kuukausikeskiarvojen vaihtelu vuosilta 2000–2022.

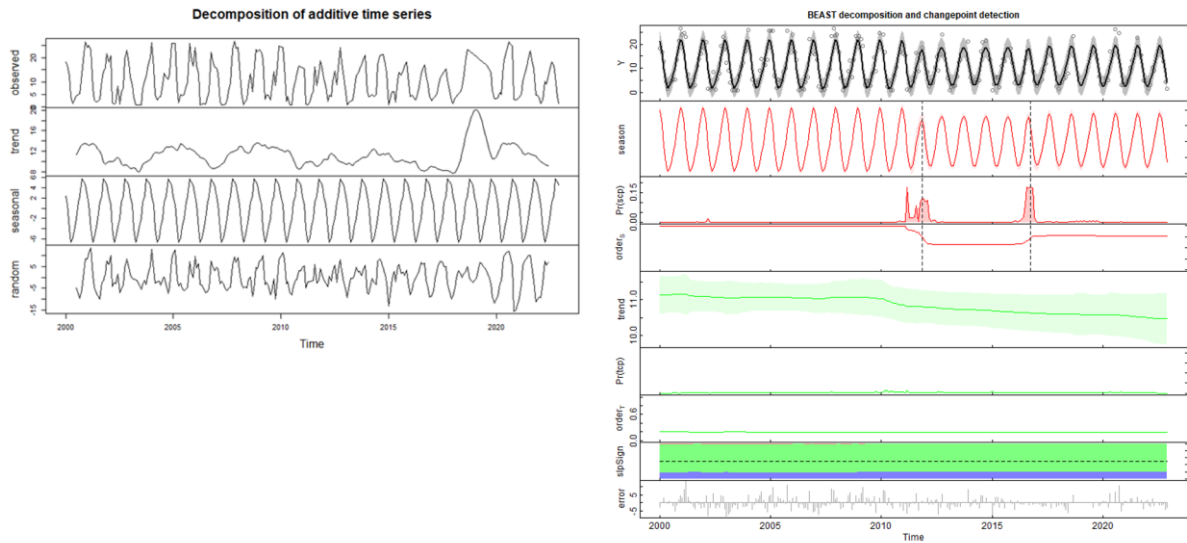
Liite 3. Brändö100 havaintoaseman fysikaalis-kemiallisten havaintomuuttujien vaihtelun komponentit (trendi, kausivaihtelu, epäsäännöllinen vaihtelu)



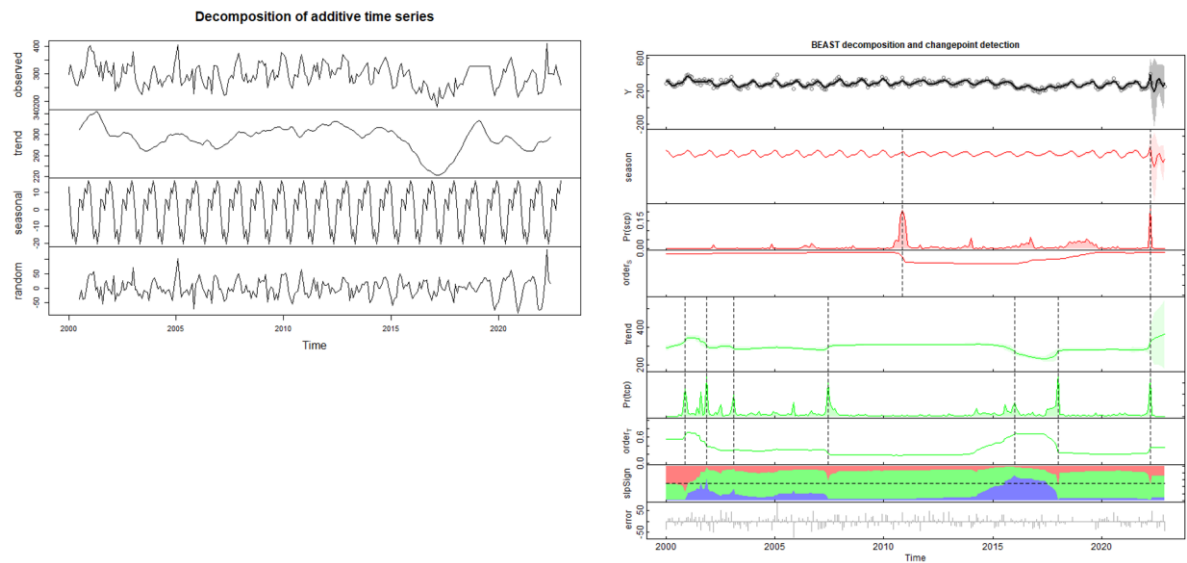
Kuva L.3.1. Brändö100 -mittausaseman a-klorofyllin ($\mu\text{g/l}$) kuukausikeskiarvo, muutos (trend), kausivaihtelu (seasonal) ja satunnaisvaihtelu (random) vuosilta 2000–2022.



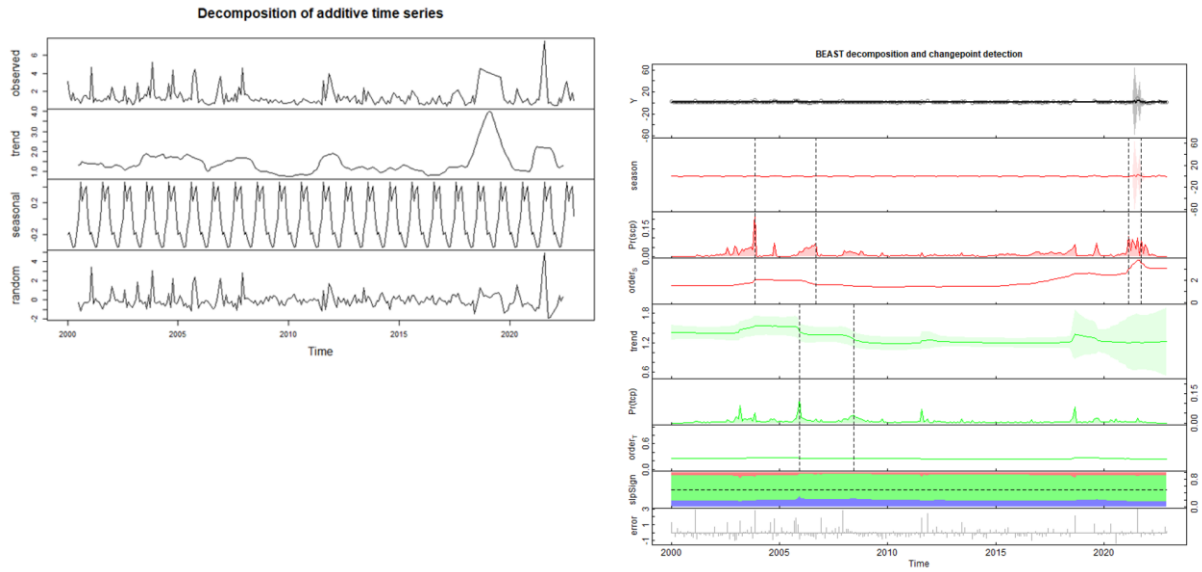
Kuva L.3.2. Brändö100 -mittausaseman kokonaisfosforin ($\mu\text{g/l}$) kuukausikeskiarvo, muutos (trend), kausivaihtelu (seasonal) ja satunnaisvaihtelu (random) vuosilta 2000–2022.



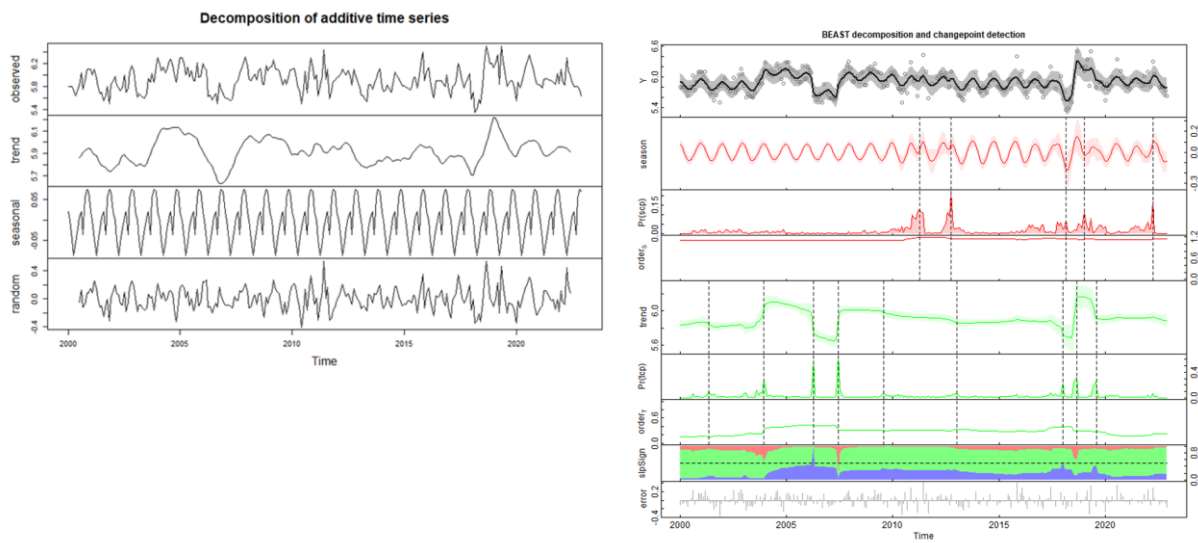
Kuva L.3.3. Brändö100 -mittausaseman fosfaattifosforin ($\mu\text{g/l}$) kuukausikeskiarvo, muutos (trend), kausivaihtelu (seasonal) ja satunnaisvaihtelu (random) vuosilta 2000–2022.



Kuva L.3.4. Brändö100 -mittausaseman kokonaistypen ($\mu\text{g/l}$) kuukausikeskiarvo, muutos (trend), kausivaihtelu (seasonal) ja satunnaisvaihtelu (random) vuosilta 2000–2022.



Kuva L.3.5. Brändö100 -mittausaseman sameuden (FNU) kuukausikeskiarvo, muutos (trend), kausivaihtelu (seasonal) ja satunnaisvaihtelu (random) vuosilta 2000–2022.



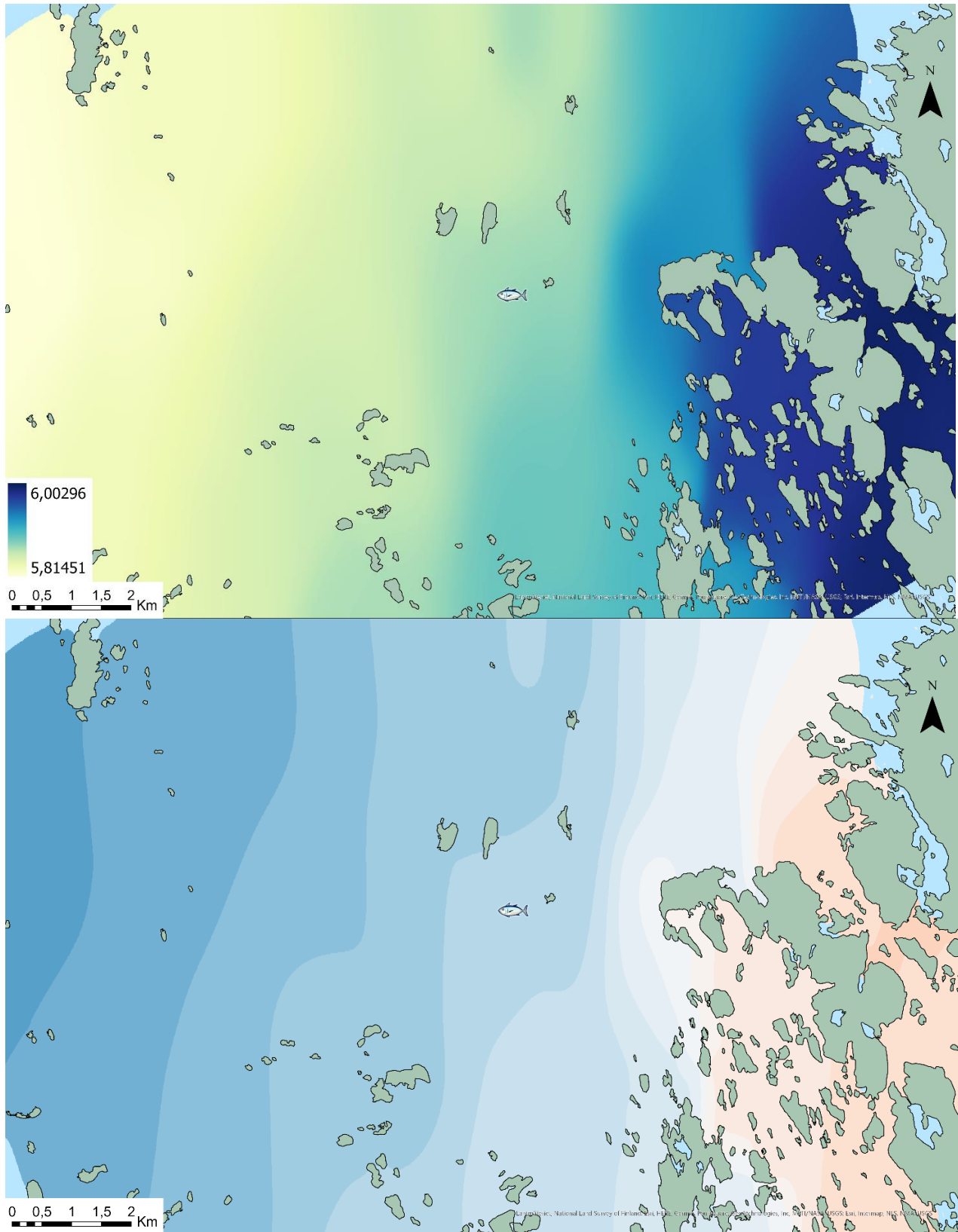
Kuva L.3.6. Brändö100 -mittausaseman suolaisuuden (PSU) kuukausikeskiarvo, muutos (trend), kausivaihtelu (seasonal) ja satunnaisvaihtelu (random) vuosilta 2000–2022.

Liite 4. CoastRider mittaukset

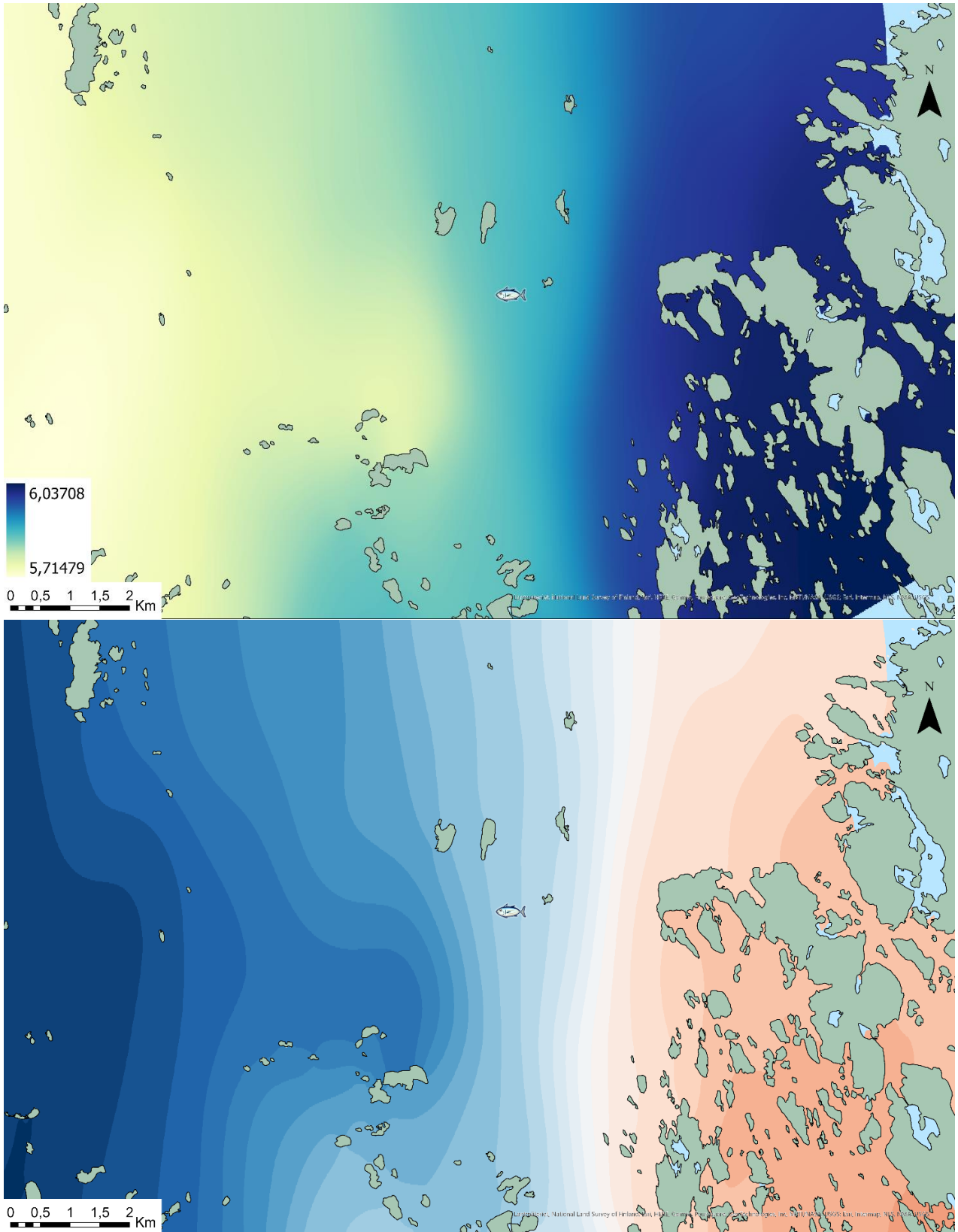
| Suolapitoisuus | | Lämpötila (°C) | | Sameus (FNU) | | fDOM (QSU) | | α-klorofylli (µg/l) | |
|----------------|---------------|----------------|---------------|--------------|-------------|-------------|-------------|---------------------|-------------|
| 5,701 - 5,715 | 5,946 - 5,96 | 12,71 - 12,96 | 16,95 - 17,2 | 1,31 - 1,43 | 3,33 - 3,44 | 4,33 - 4,39 | 5,49 - 5,55 | 2,6 - 2,96 | 8,52 - 8,88 |
| 5,716 - 5,731 | 5,961 - 5,976 | 12,97 - 13,23 | 17,21 - 17,46 | 1,44 - 1,55 | 3,45 - 3,57 | 4,4 - 4,47 | 5,56 - 5,62 | 2,97 - 3,33 | 8,89 - 9,25 |
| 5,732 - 5,746 | 5,977 - 5,991 | 13,24 - 13,49 | 17,47 - 17,73 | 1,56 - 1,68 | 3,58 - 3,69 | 4,48 - 4,54 | 5,63 - 5,69 | 3,34 - 3,7 | 9,26 - 9,62 |
| 5,747 - 5,761 | 5,992 - 6,006 | 13,5 - 13,76 | 17,74 - 17,99 | 1,69 - 1,8 | 3,7 - 3,82 | 4,55 - 4,61 | 5,7 - 5,76 | 3,71 - 4,07 | 9,63 - 9,99 |
| 5,762 - 5,777 | 6,007 - 6,022 | 13,77 - 14,02 | 18 - 18,26 | 1,81 - 1,93 | 3,83 - 3,94 | 4,62 - 4,68 | 5,77 - 5,84 | 4,08 - 4,44 | 10 - 10,4 |
| 5,778 - 5,792 | 6,023 - 6,037 | 14,03 - 14,29 | 18,27 - 18,52 | 1,94 - 2,06 | 3,95 - 4,07 | 4,69 - 4,75 | 5,85 - 5,91 | 4,45 - 4,81 | 10,5 - 10,7 |
| 5,793 - 5,807 | 6,038 - 6,052 | 14,3 - 14,55 | 18,53 - 18,79 | 2,07 - 2,18 | 4,08 - 4,2 | 4,76 - 4,83 | 5,92 - 5,98 | 4,82 - 5,18 | 10,8 - 11,1 |
| 5,808 - 5,823 | 6,053 - 6,068 | 14,56 - 14,82 | 18,8 - 19,05 | 2,19 - 2,31 | 4,21 - 4,32 | 4,84 - 4,9 | 5,99 - 6,05 | 5,19 - 5,55 | 11,2 - 11,5 |
| 5,824 - 5,838 | 6,069 - 6,083 | 14,83 - 15,08 | 19,06 - 19,32 | 2,32 - 2,43 | 4,33 - 4,45 | 4,91 - 4,97 | 6,06 - 6,12 | 5,56 - 5,92 | 11,6 - 11,8 |
| 5,839 - 5,853 | 6,084 - 6,098 | 15,09 - 15,35 | 19,33 - 19,58 | 2,44 - 2,56 | 4,46 - 4,57 | 4,98 - 5,04 | 6,13 - 6,2 | 5,93 - 6,29 | 11,9 - 12,2 |
| 5,854 - 5,868 | 6,099 - 6,113 | 15,36 - 15,61 | 19,59 - 19,85 | 2,57 - 2,69 | 4,58 - 4,7 | 5,05 - 5,11 | 6,21 - 6,27 | 6,3 - 6,66 | 12,3 - 12,6 |
| 5,869 - 5,884 | 6,114 - 6,129 | 15,62 - 15,88 | 19,86 - 20,11 | 2,7 - 2,81 | 4,71 - 4,83 | 5,12 - 5,19 | 6,28 - 6,34 | 6,67 - 7,03 | 12,7 - 12,9 |
| 5,885 - 5,899 | 6,13 - 6,144 | 15,89 - 16,14 | 20,12 - 20,38 | 2,82 - 2,94 | 4,84 - 4,95 | 5,2 - 5,26 | 6,35 - 6,41 | 7,04 - 7,4 | 13 - 13,3 |
| 5,9 - 5,914 | 6,145 - 6,159 | 16,15 - 16,41 | 20,39 - 20,64 | 2,95 - 3,06 | 4,96 - 5,08 | 5,27 - 5,33 | 6,42 - 6,48 | 7,41 - 7,77 | 13,4 - 13,7 |
| 5,915 - 5,93 | 6,16 - 6,175 | 16,42 - 16,67 | 20,65 - 20,91 | 3,07 - 3,19 | 5,09 - 5,2 | 5,34 - 5,4 | 6,49 - 6,56 | 7,78 - 8,14 | 13,8 - 14,1 |
| 5,931 - 5,945 | 6,176 - 6,19 | 16,68 - 16,94 | 20,92 - 21,17 | 3,2 - 3,32 | 5,21 - 5,33 | 5,41 - 5,48 | 6,57 - 6,63 | 8,15 - 8,51 | 14,2 - 14,4 |

Kuva L4.1. Luokitteluun perustuva väriskaala suolapitoisuuden, lämpötilan, sameuden, fluore-soivan liukoisin eloperäisen aineksen (fDOM) ja α-klorofyllin osalta.

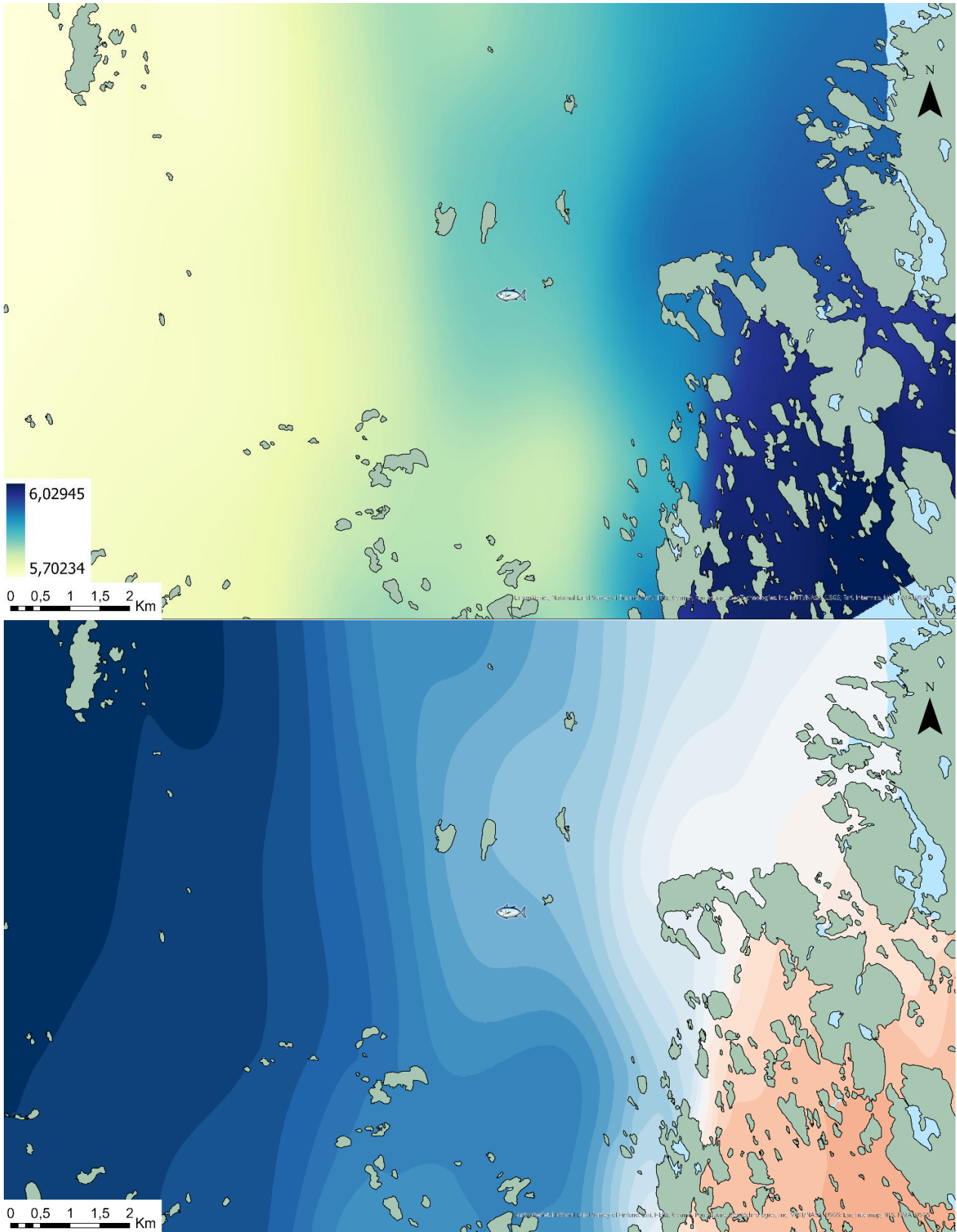
Suolapitoisuus



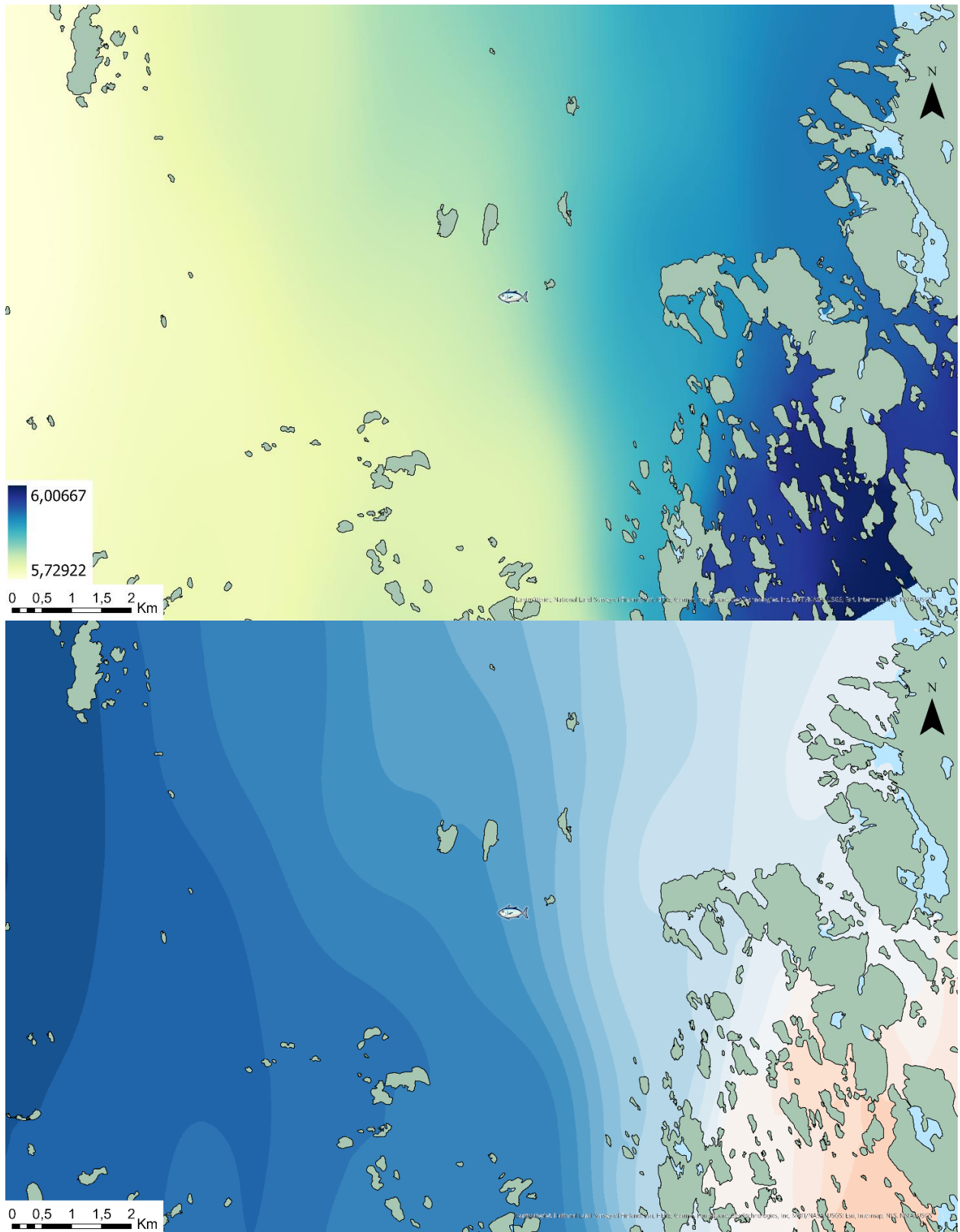
Kuva L4.2. Suolapitoisuuden vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 22.7.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Ala-paneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).



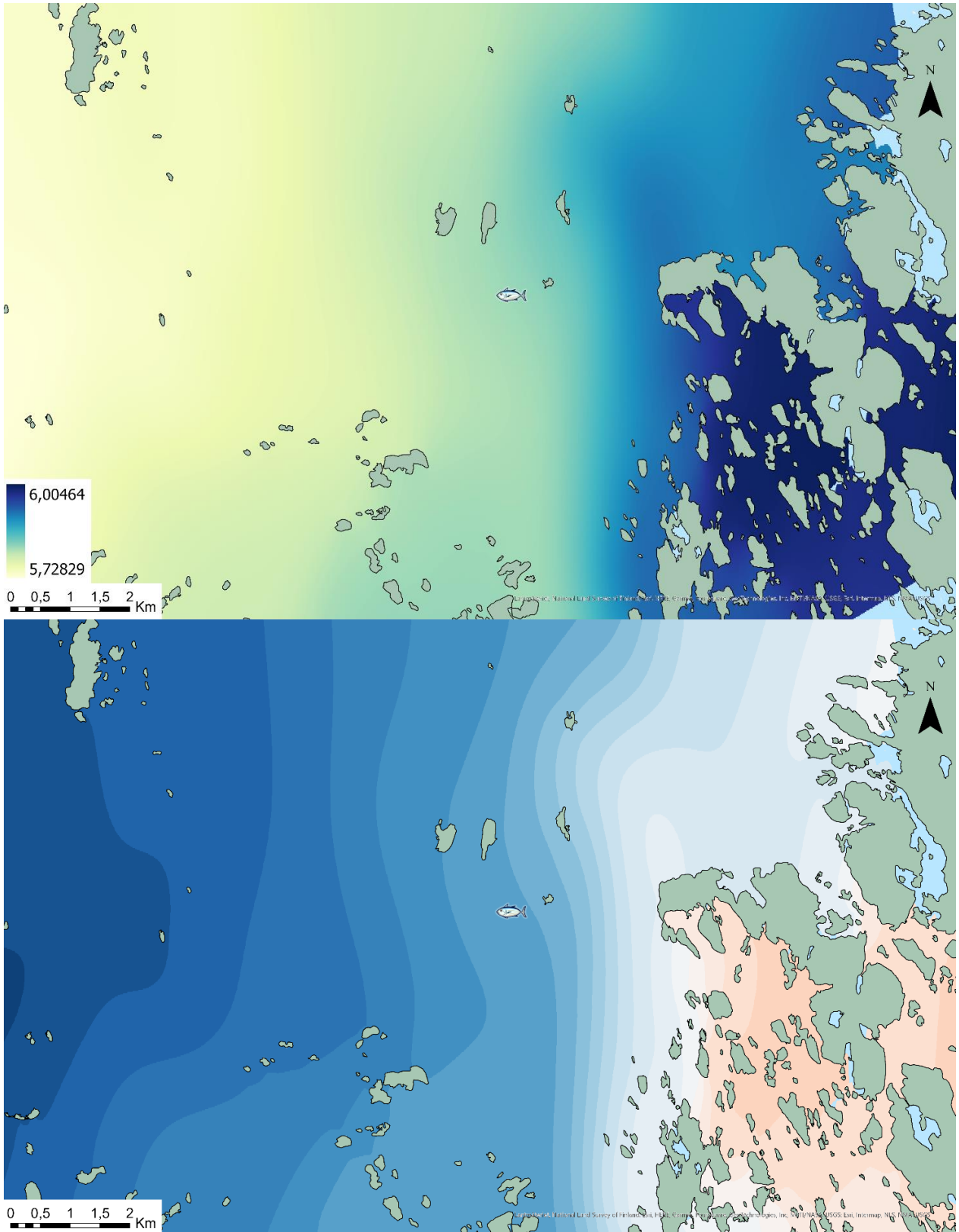
Kuva L4.3. Suolapitoisuuden vaihtelu Louheenkarin kalankasvattamon lähialueella 8.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Ala-paneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).



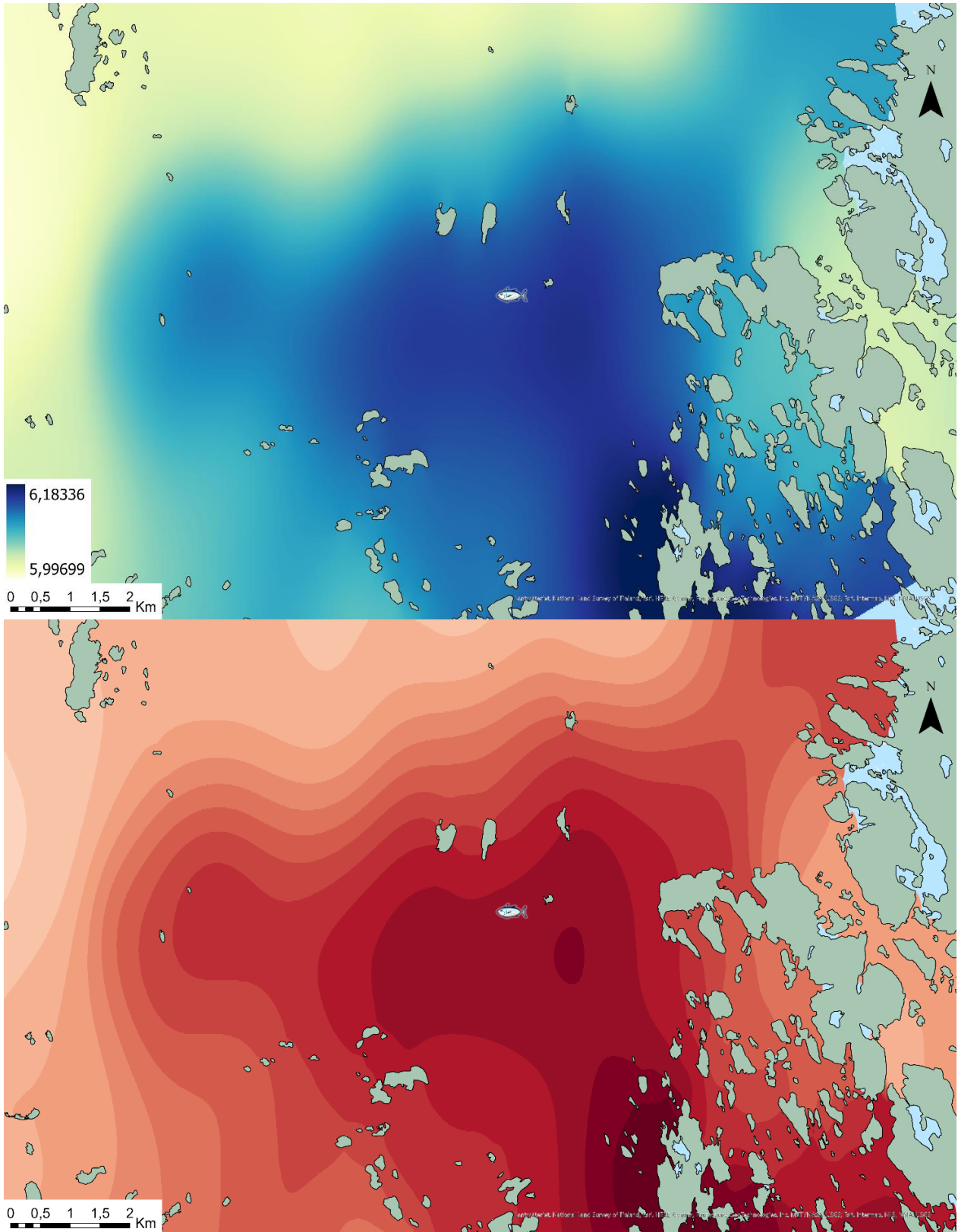
Kuva L4.4. Suolapitoisuuden vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 12.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Ala-paneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).



Kuva L4.5. Suolapitoisuuden vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 15.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Ala-paneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).

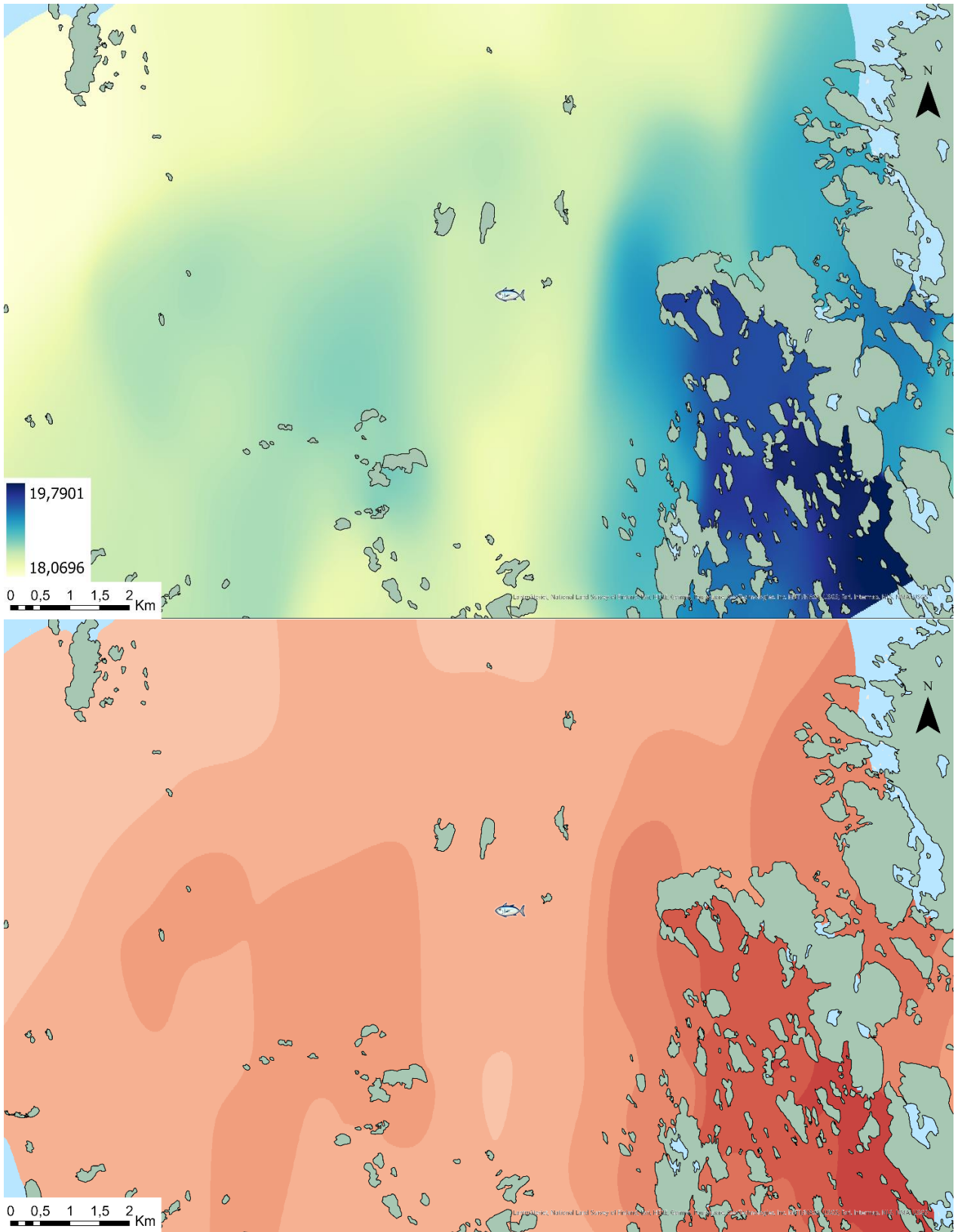


Kuva L4.6. Suolapitoisuuden vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 18.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Ala-paneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).

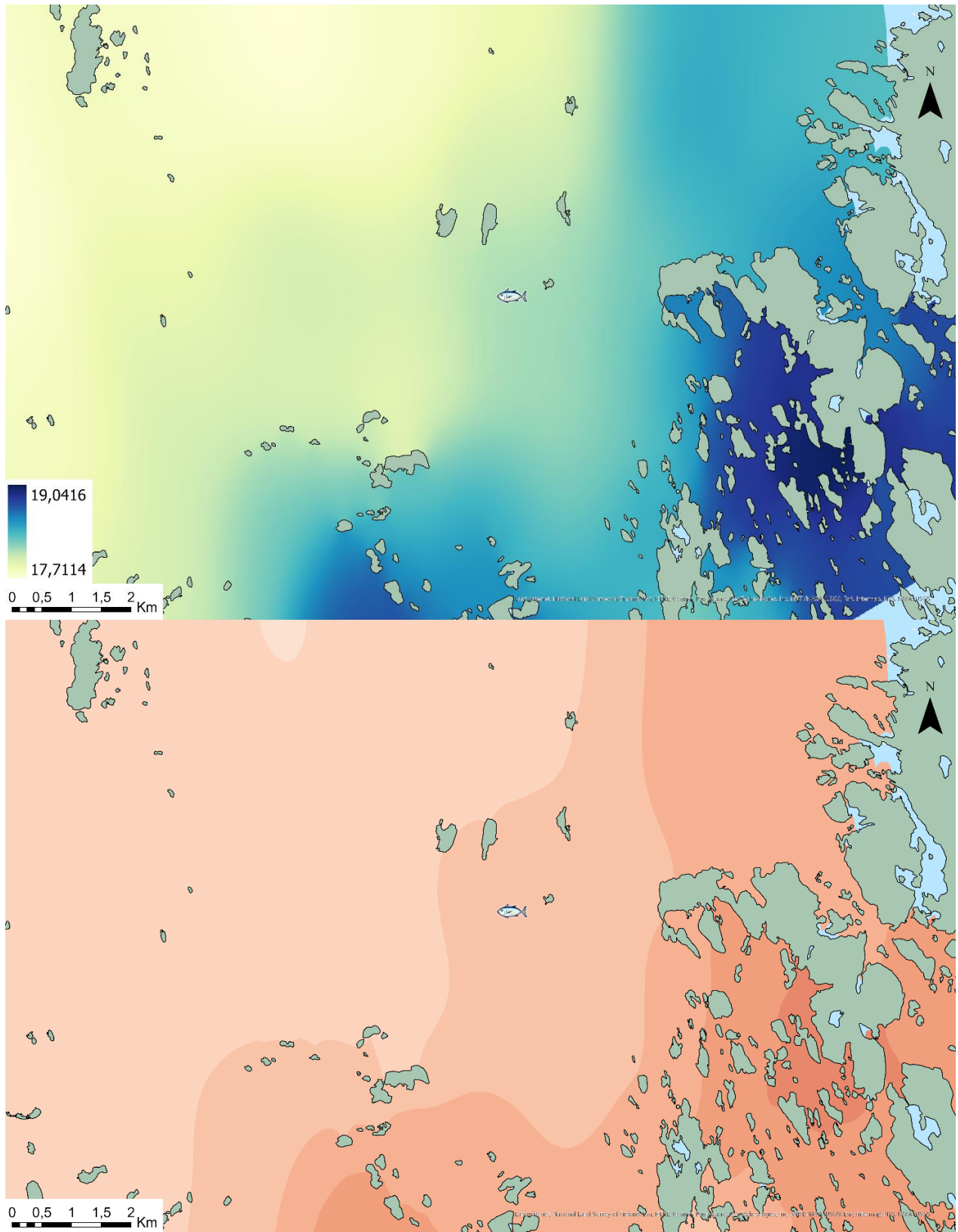


Kuva L4.7. Suolapitoisuuden vaihtelu Loukeenkarin kalankasvattamon lähialueella 3.9.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Ala-paneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).

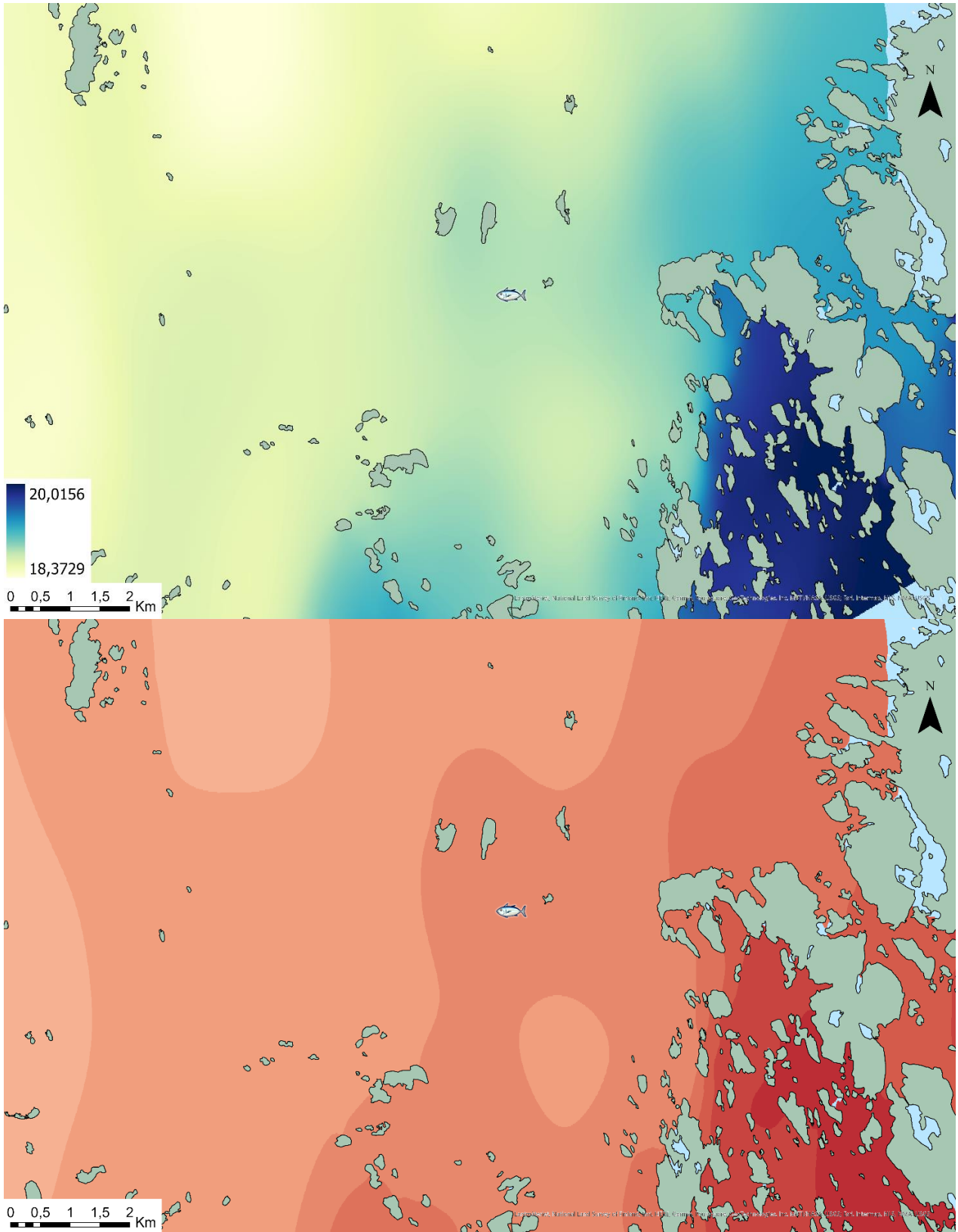
Lämpötila



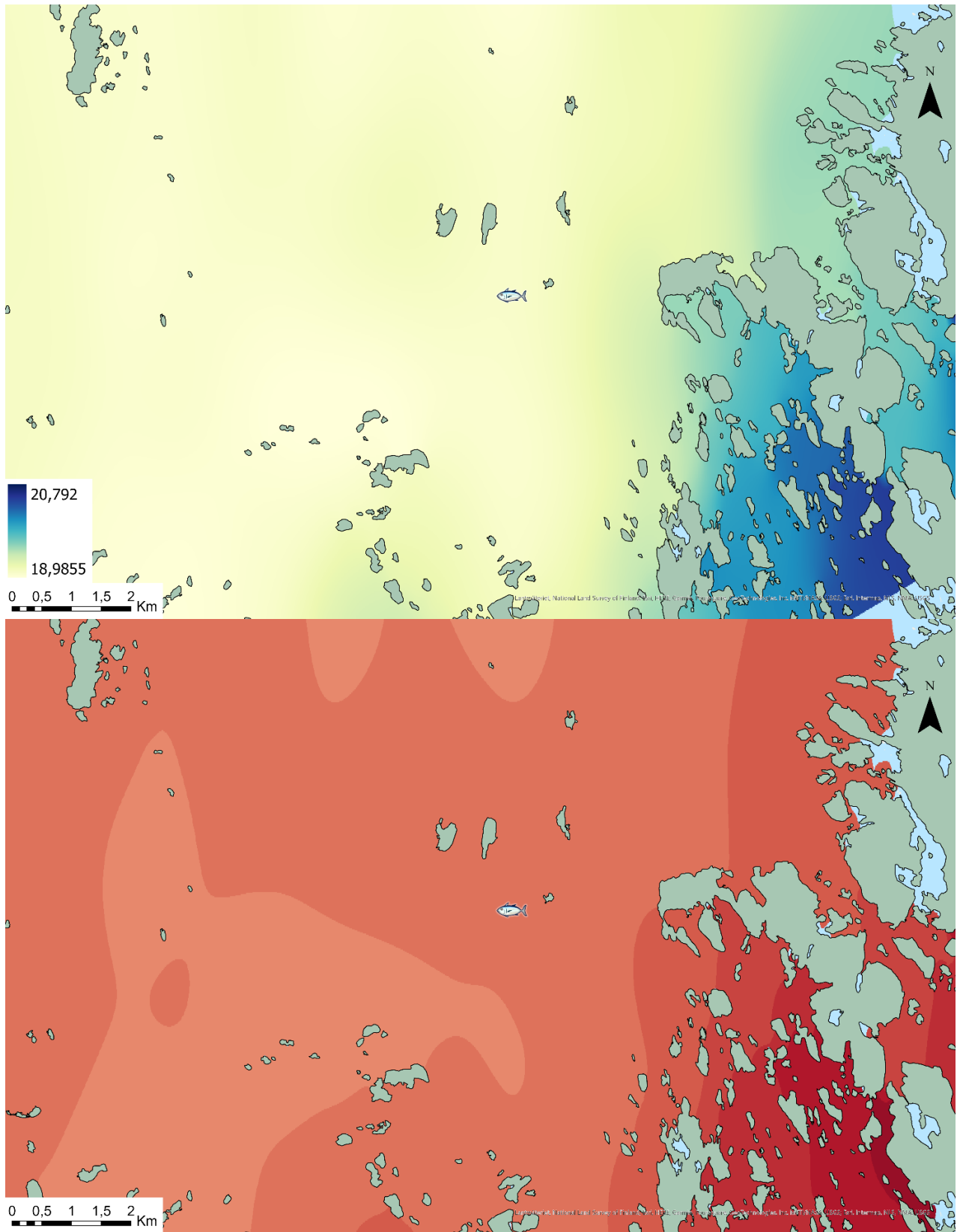
Kuva L4.8. Lämpötilan vaihtelu Loukeenkarin kalankasvattamon lähialueella 22.7.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).



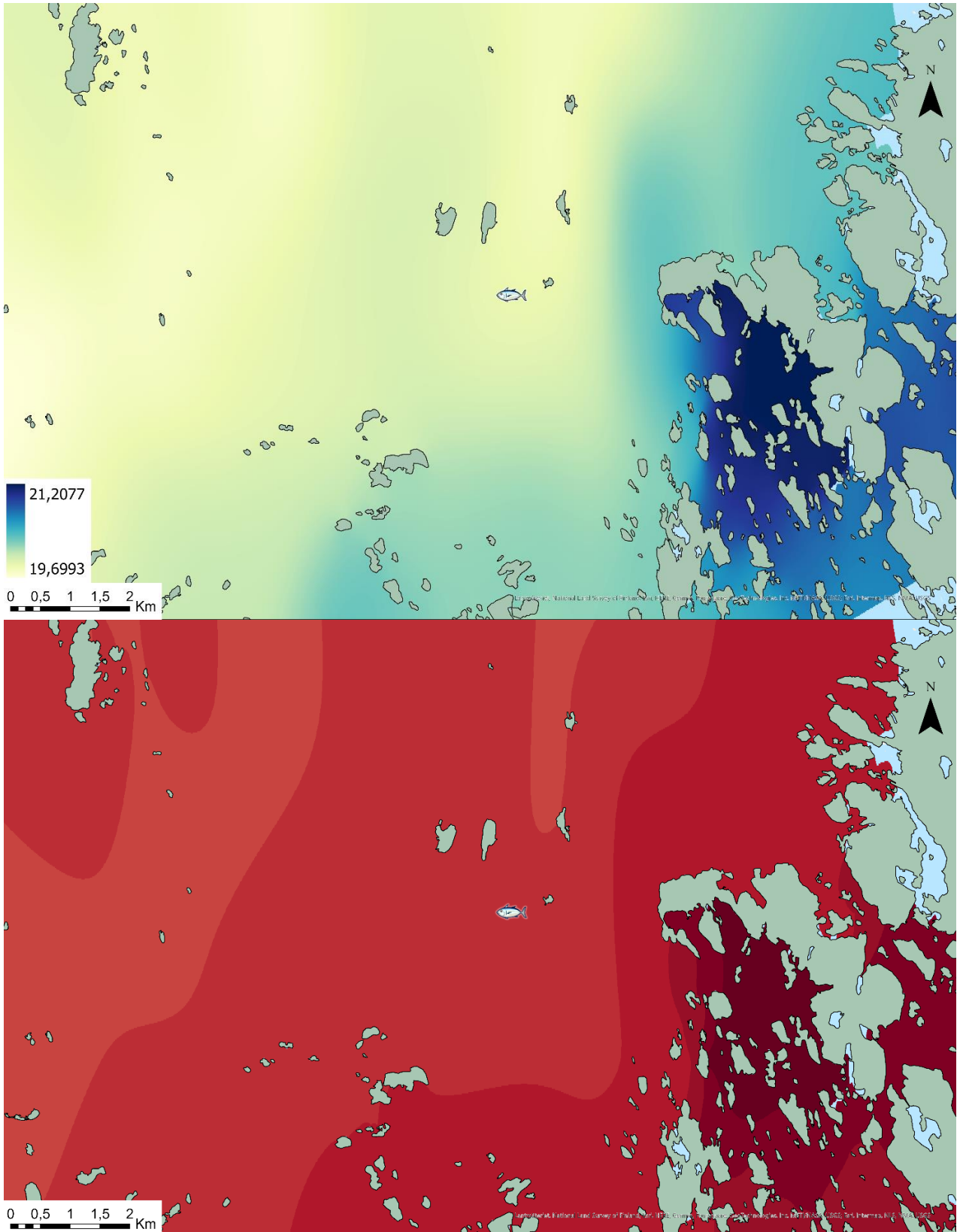
Kuva L4.9. Lämpötilan vaihtelu Louheenkarin kalankasvattamon lähialueella 8.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).



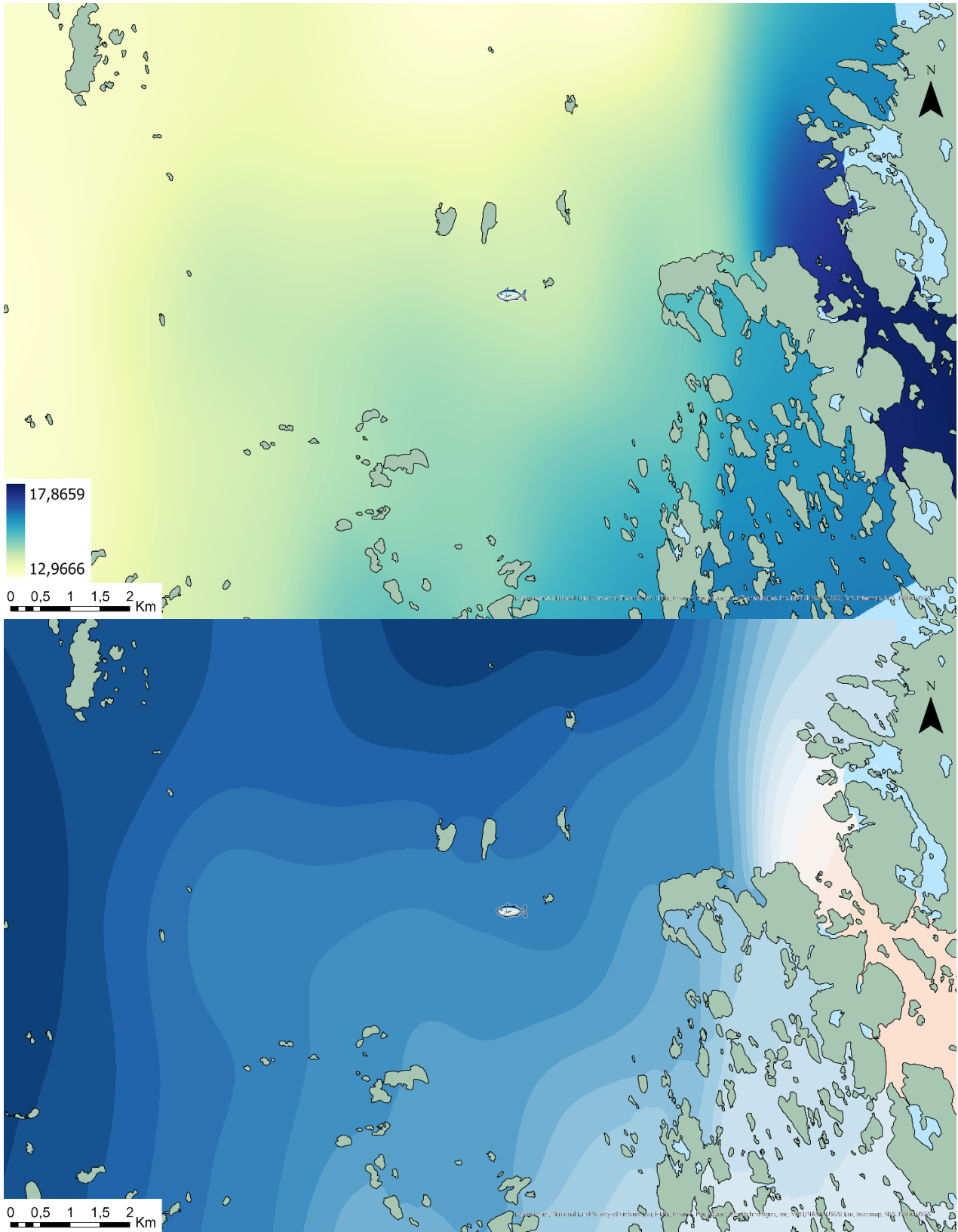
Kuva L4.10. Lämpötilan vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 12.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).



Kuva L4.11. Lämpötilan vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 15.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).

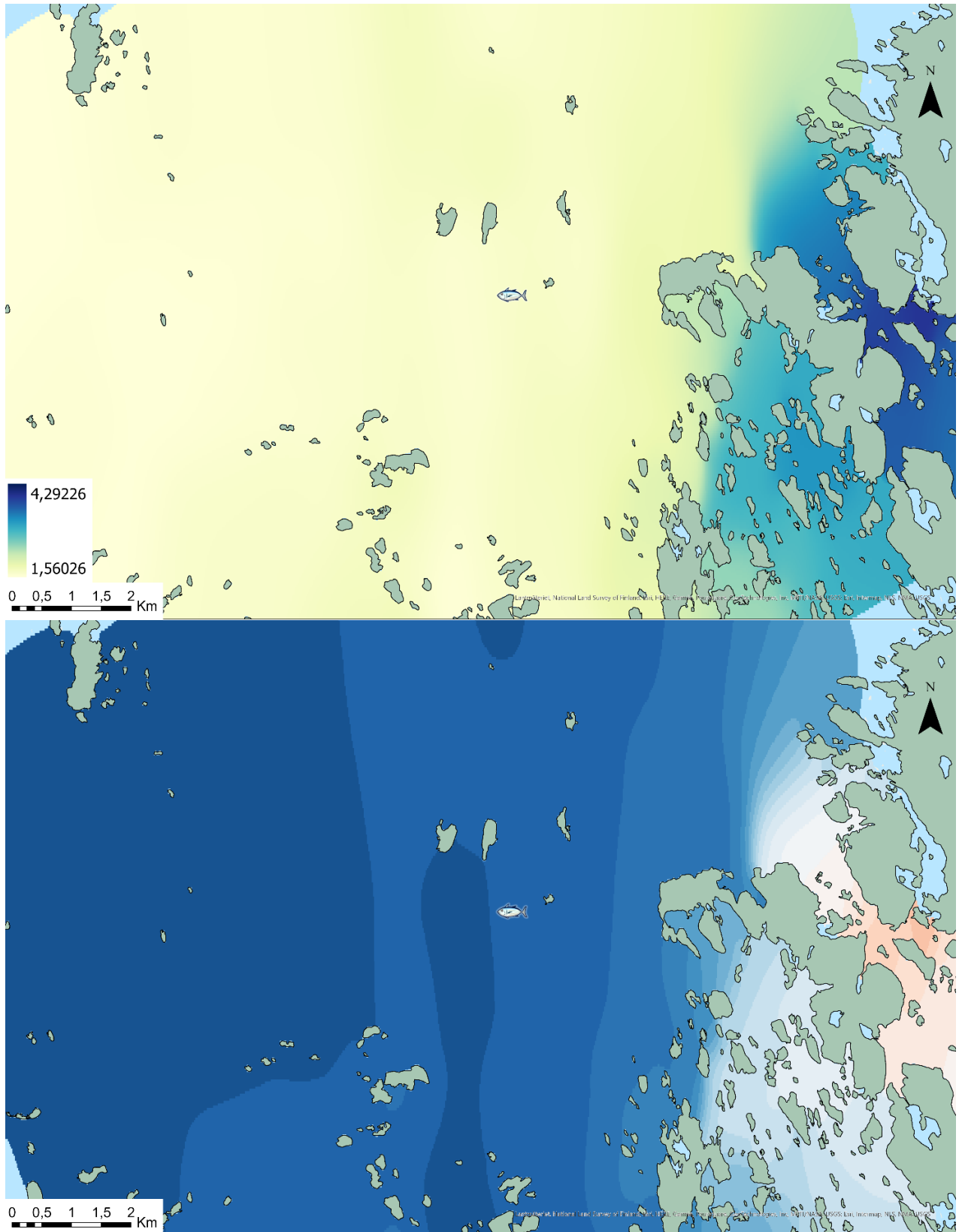


Kuva L4.12. Lämpötilan vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 18.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).

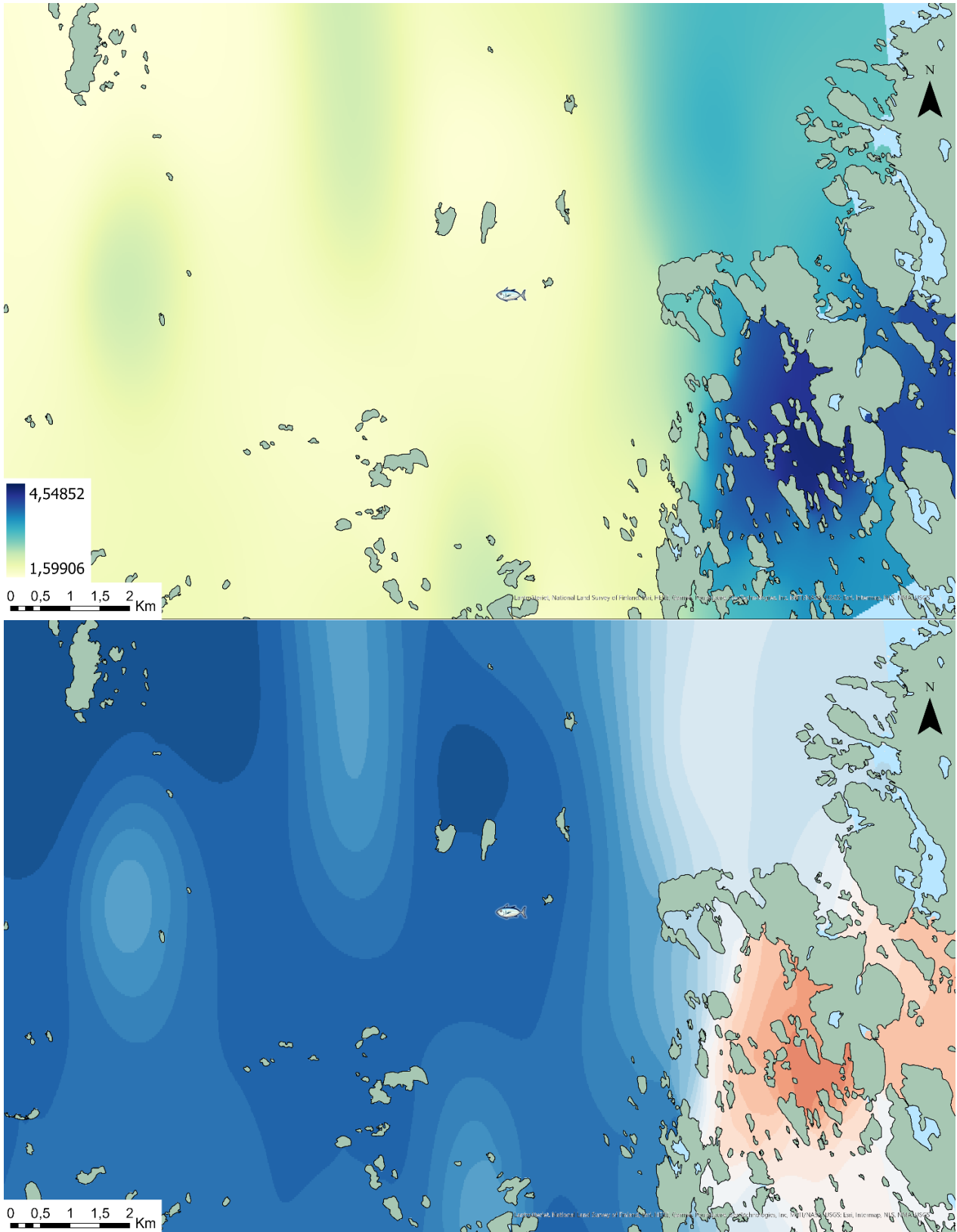


Kuva L4.13. Lämpötilan vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 3.9.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).

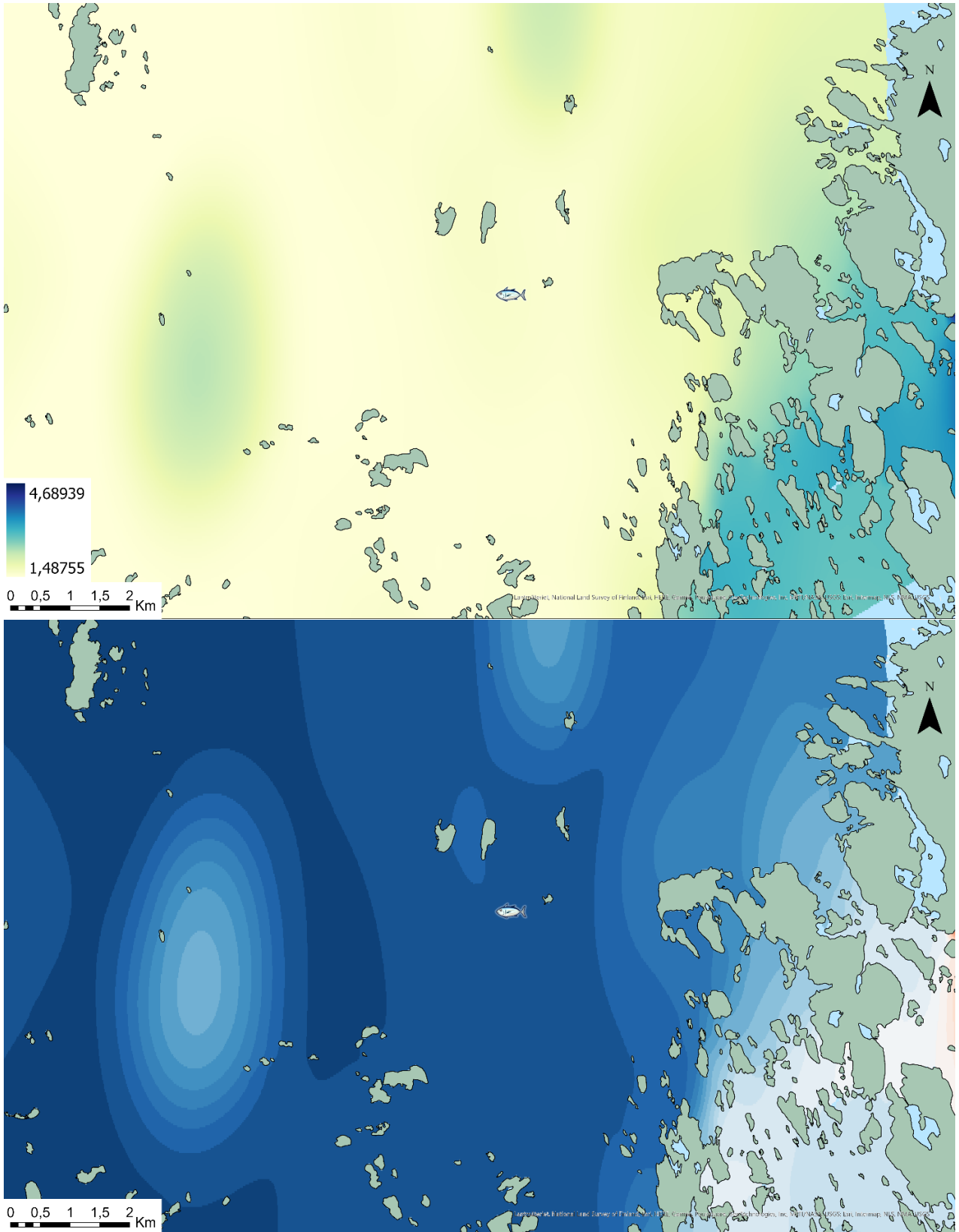
Sameus



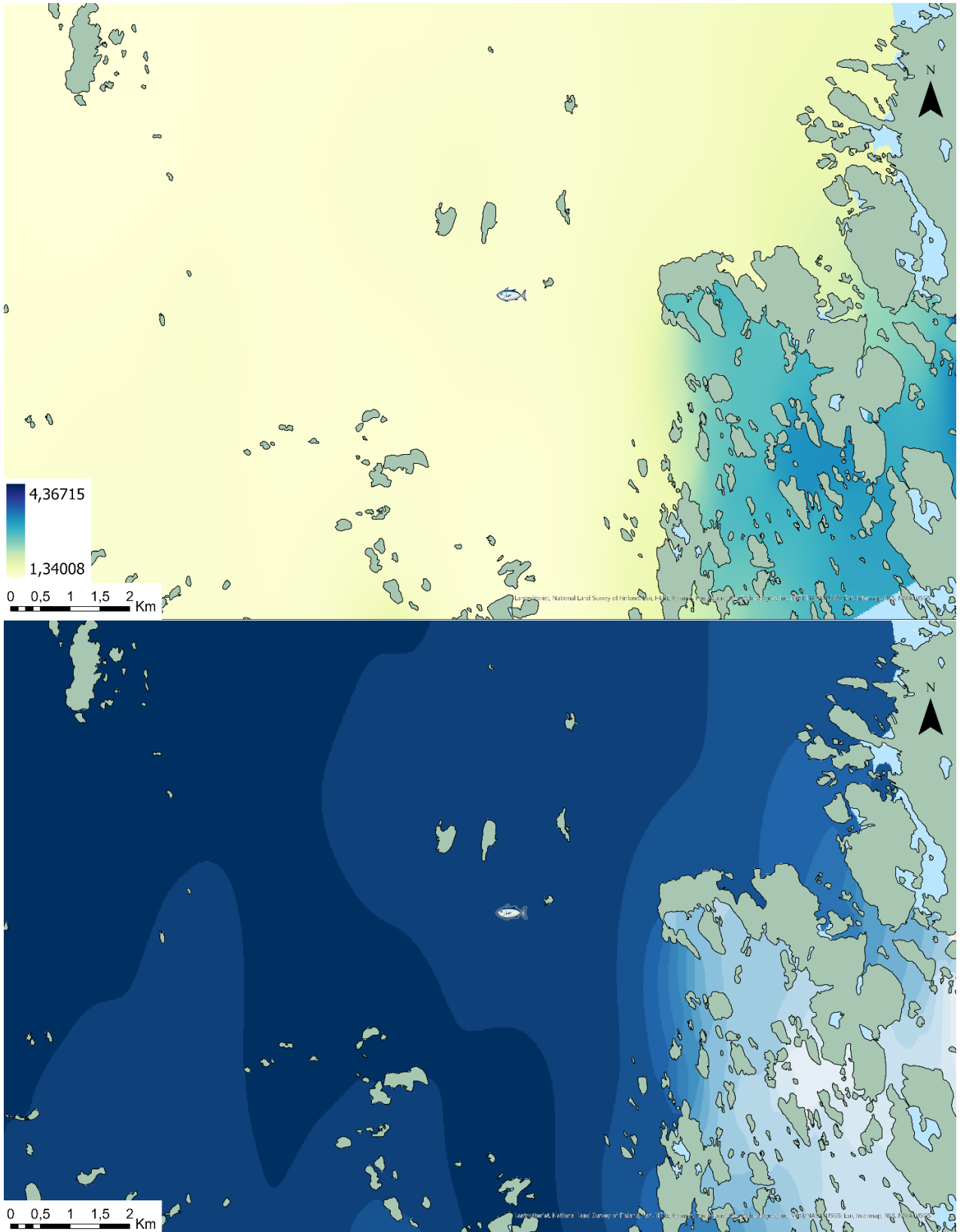
Kuva L4.14. Sameuden vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 22.7.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).



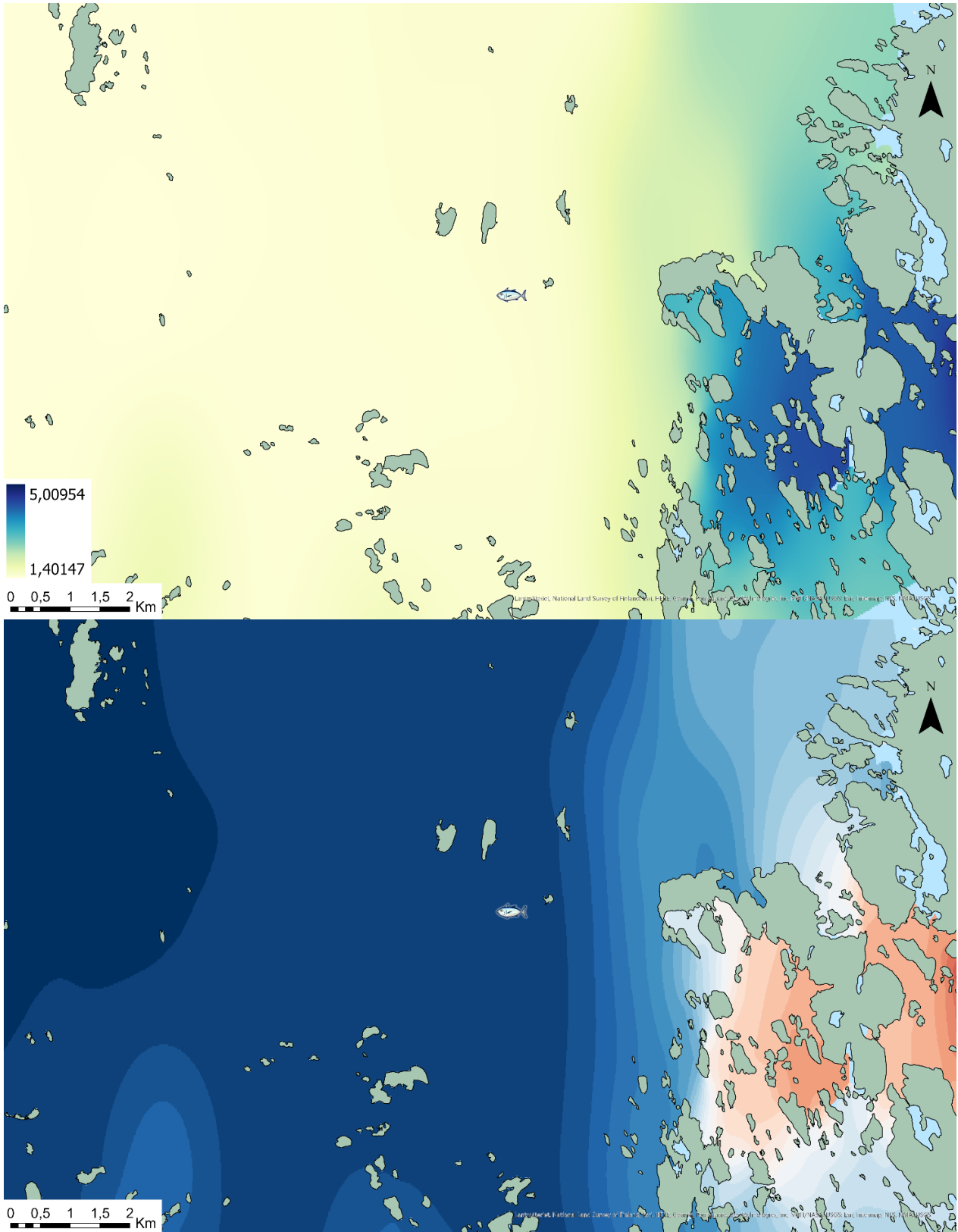
Kuva L4.15. Sameuden vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 8.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).



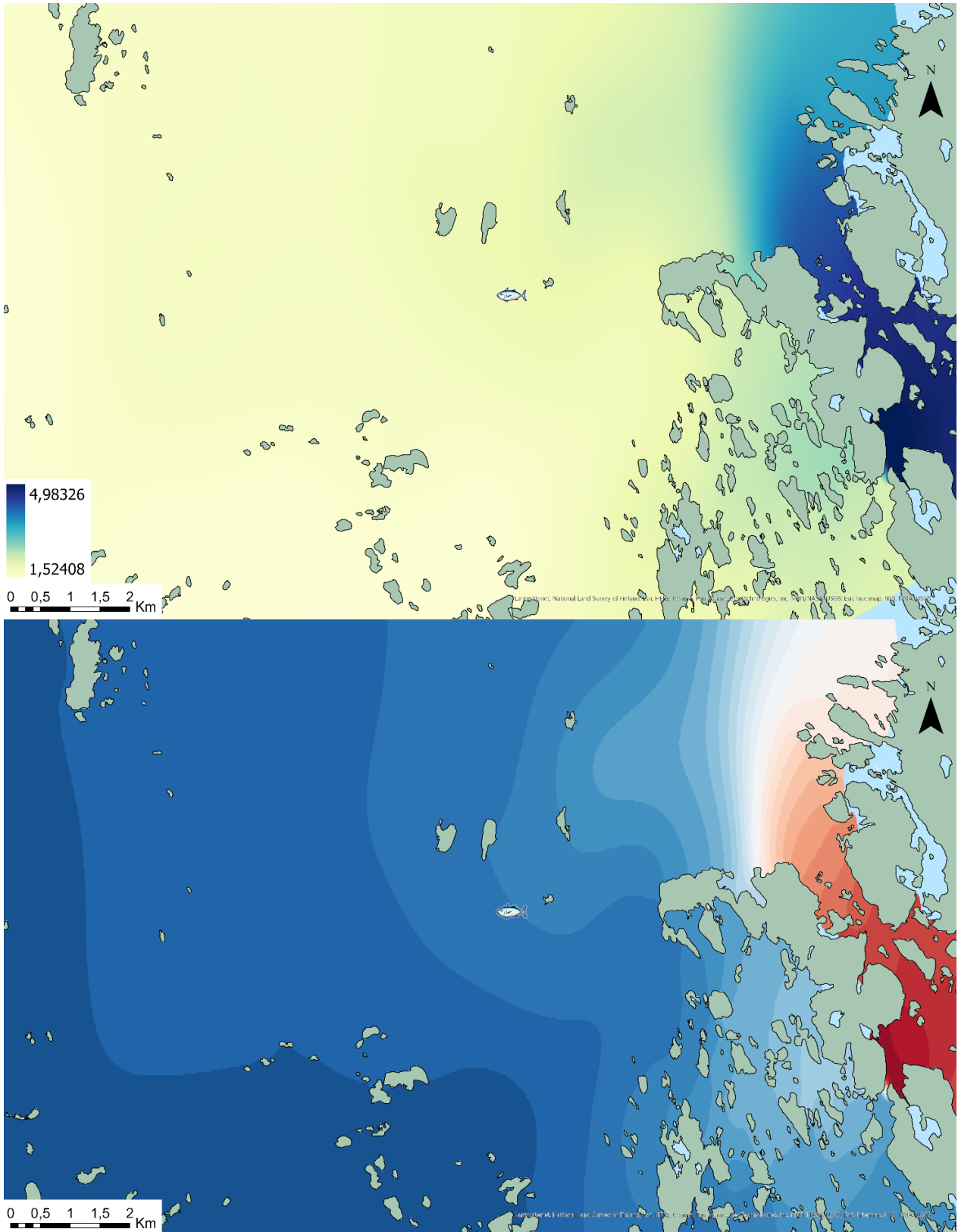
Kuva L4.16. Sameuden vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 12.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).



Kuva L4.17. Sameuden vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 15.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).

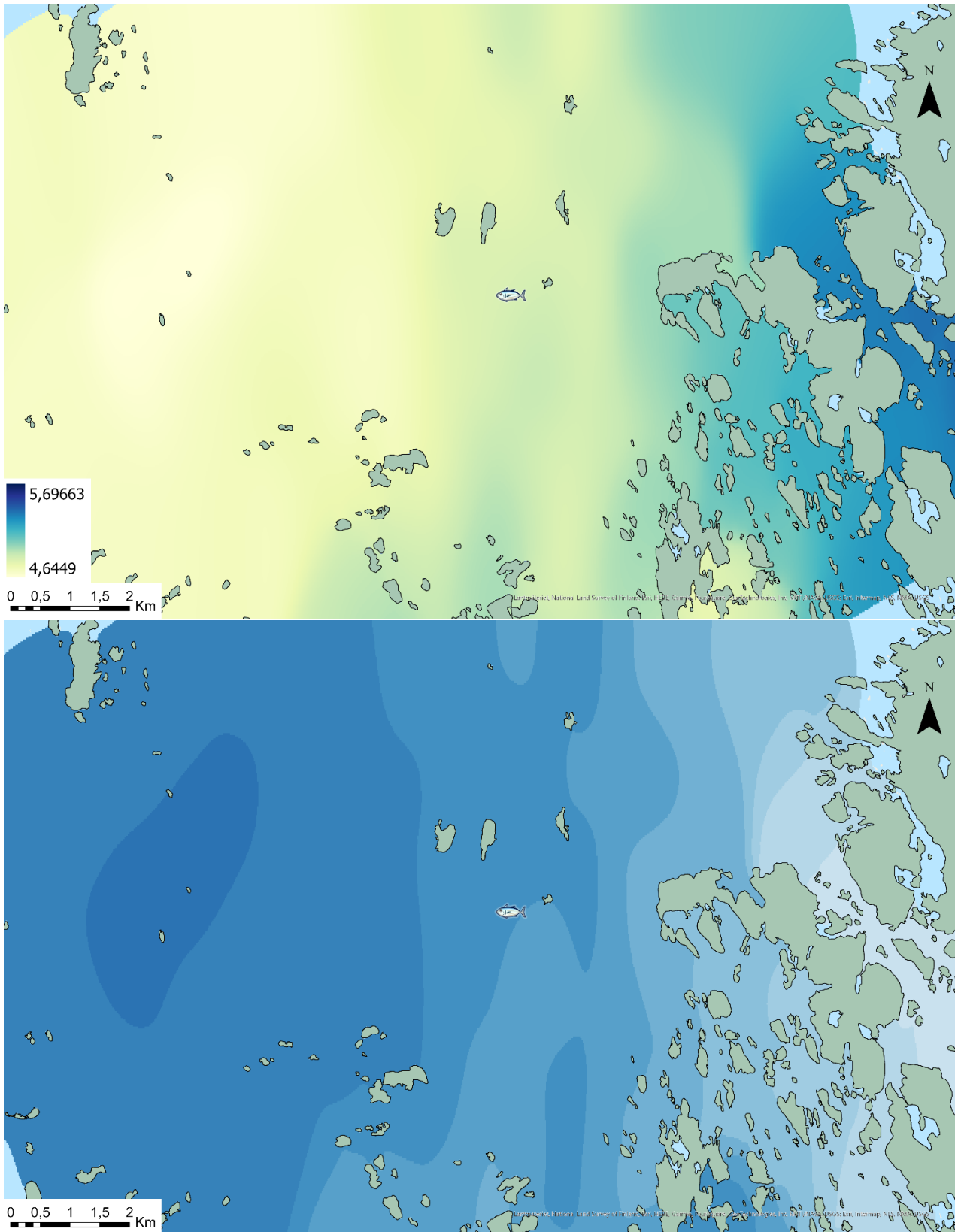


Kuva L4.18. Sameuden vaihtelu Loukeenkarin kalankasvattamon lähialueella 18.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).

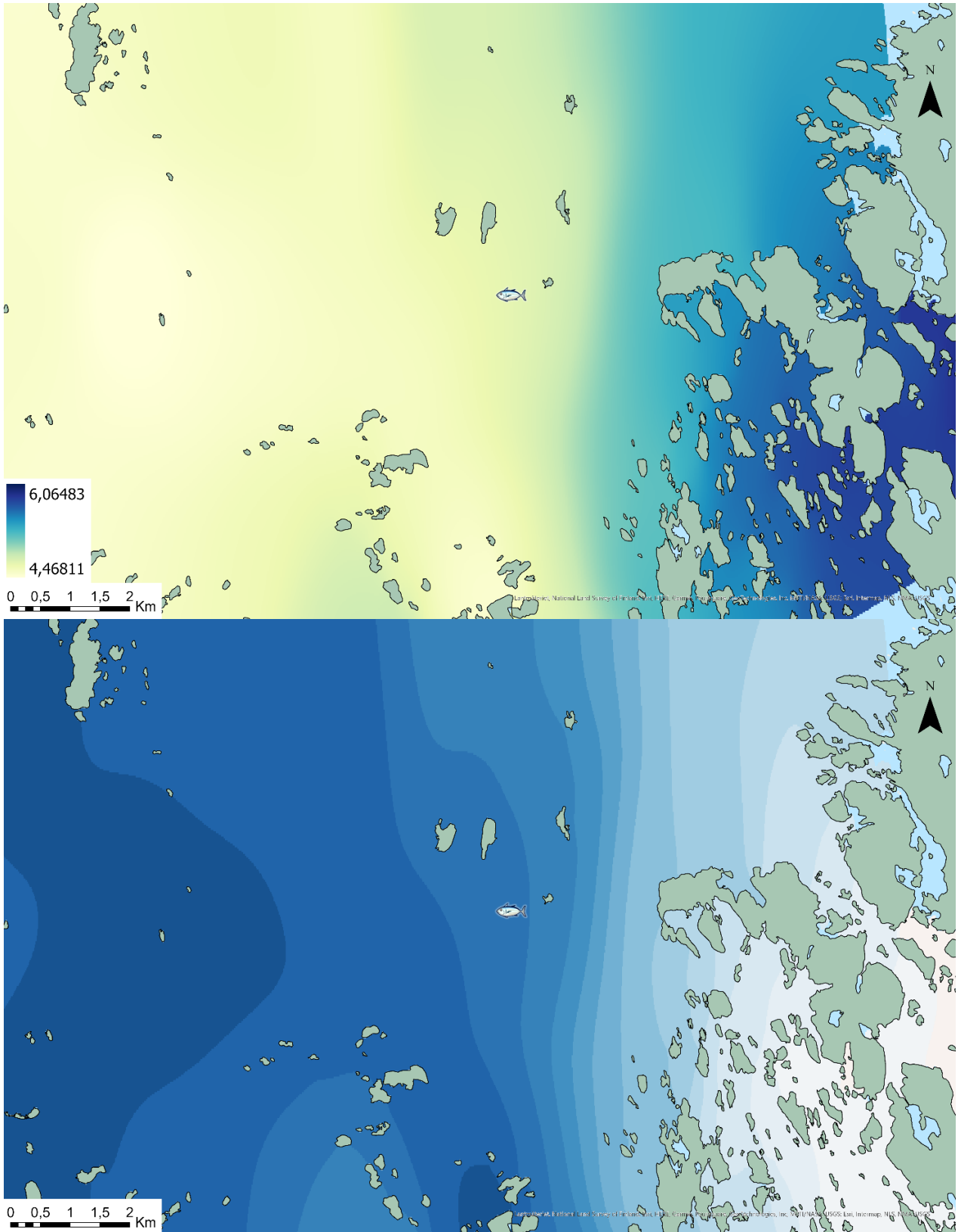


Kuva L4.19. Sameuden vaihtelu Louheenkarin kalankasvattamon lähialueella 3.9.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).

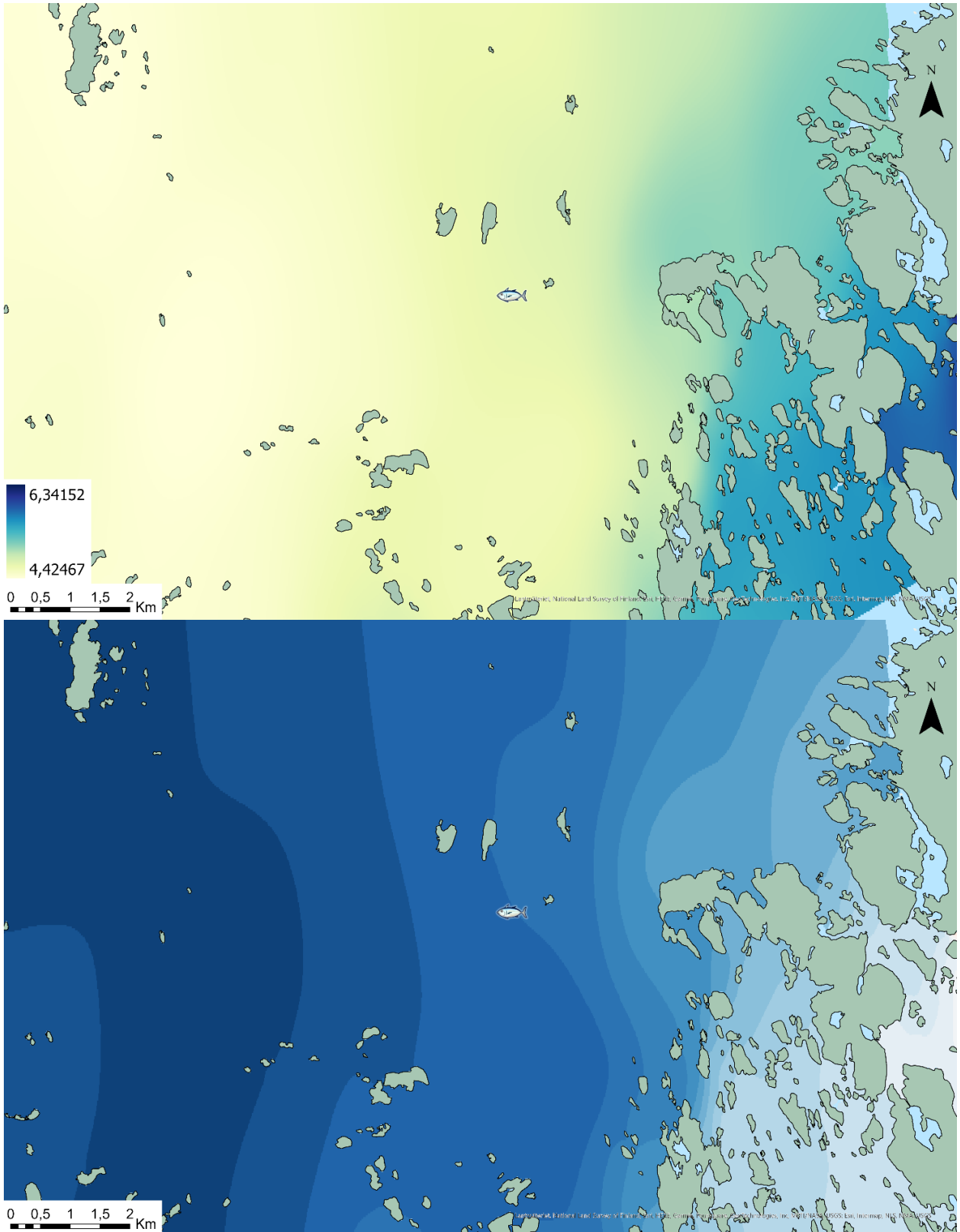
Fluoresoiva liukoinen eloperäinen aines (fDOM)



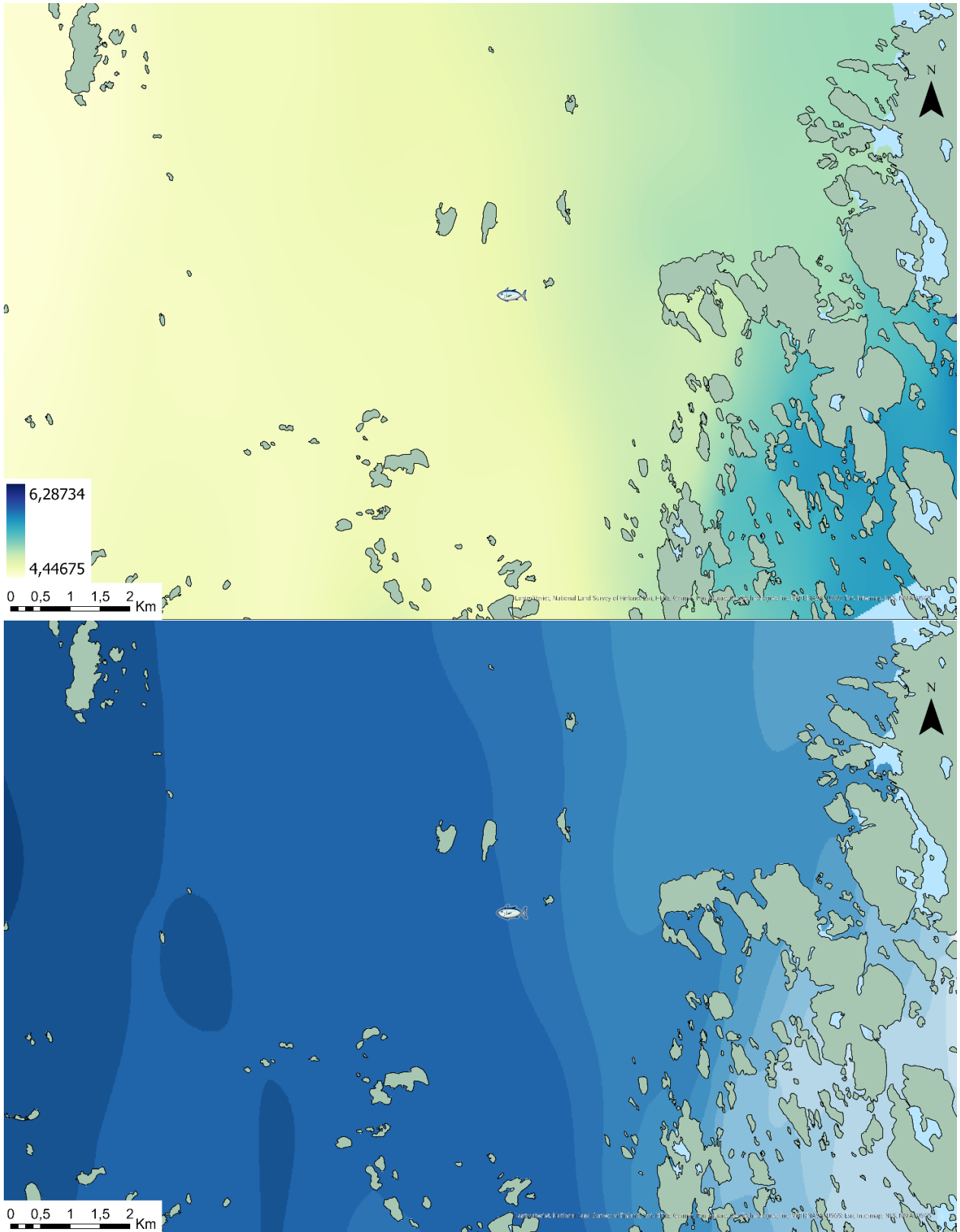
Kuva L4.20. fDOM-pitoisuuden vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 22.7.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).



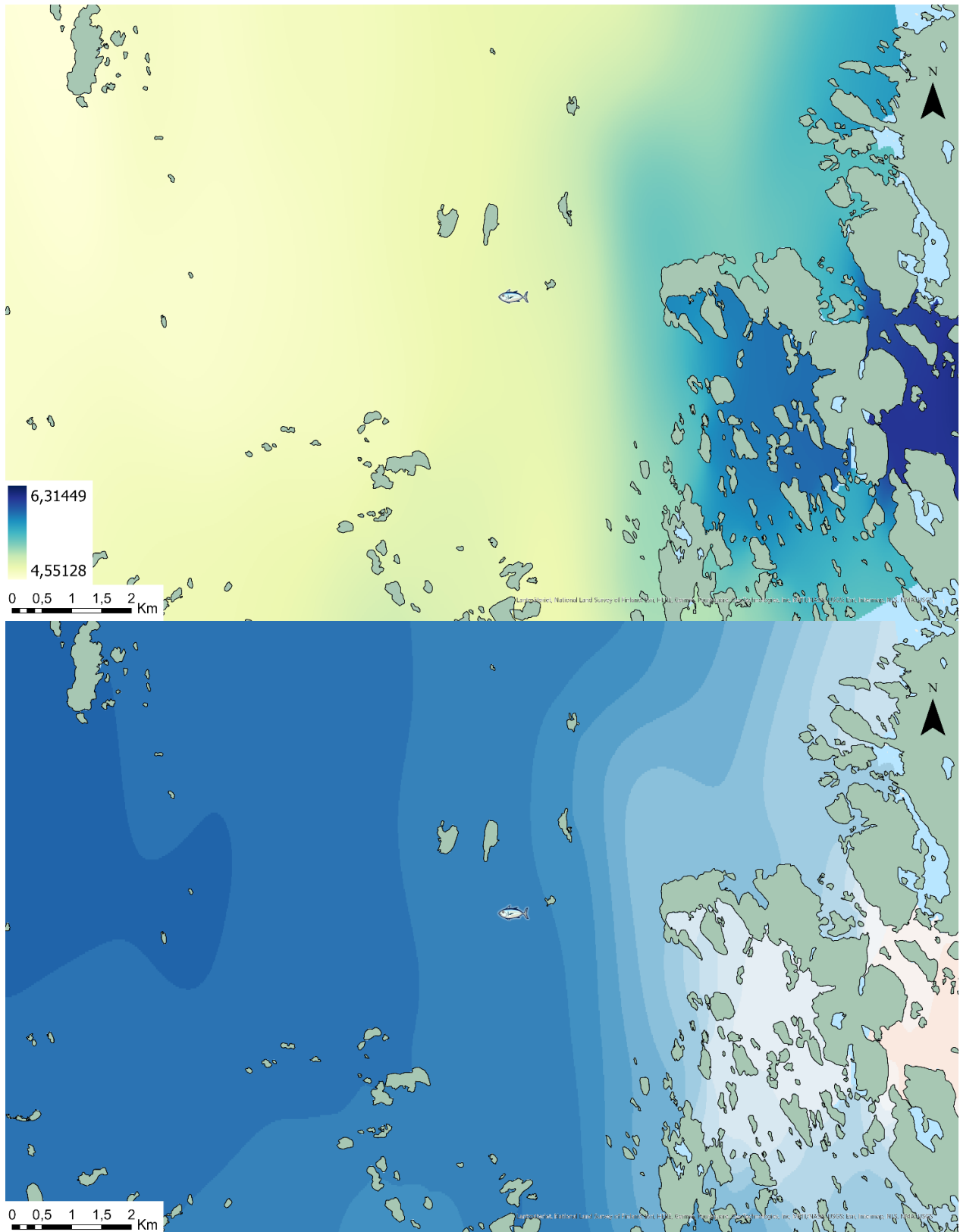
Kuva L4.21. fDOM-pitoisuuden vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 8.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).



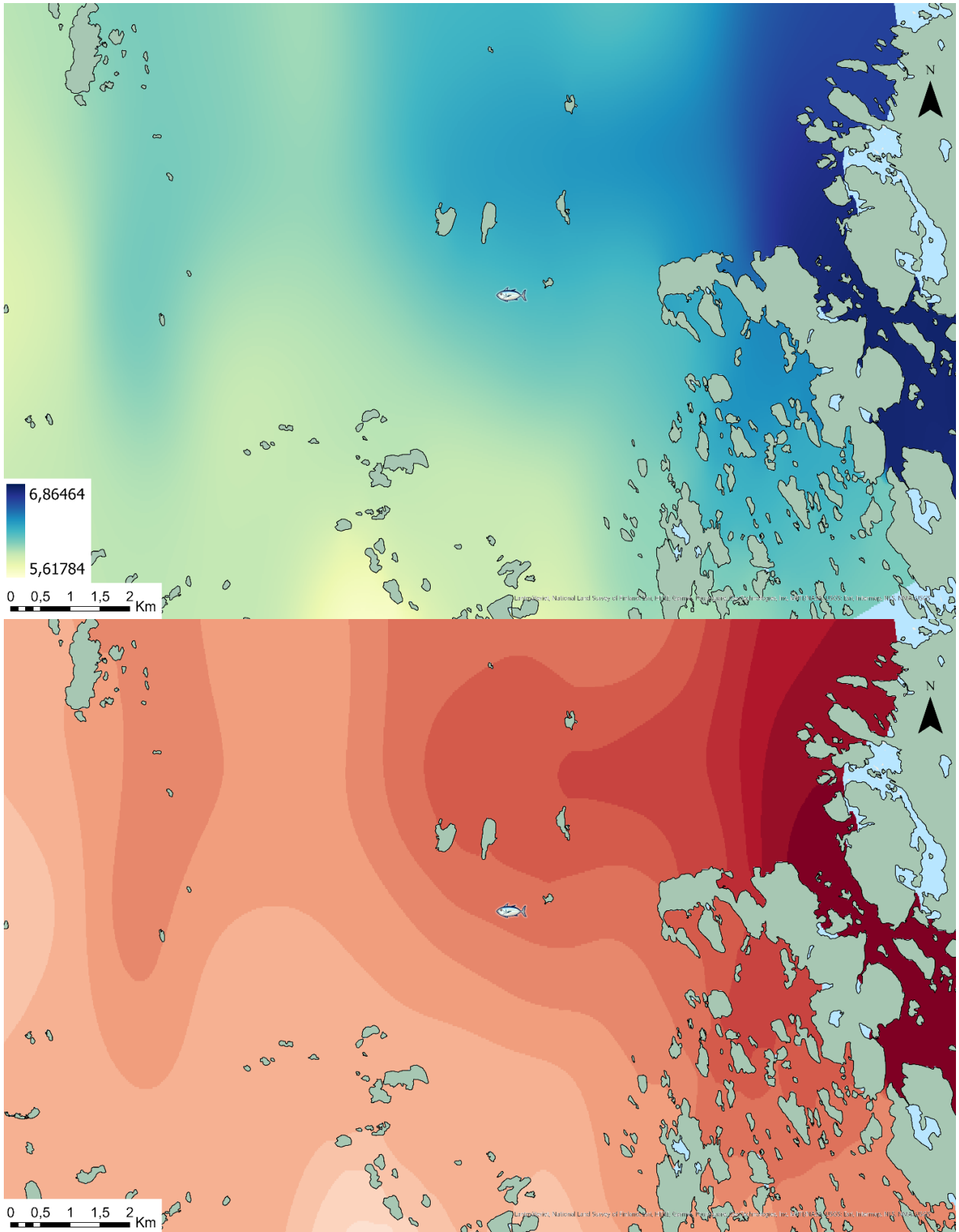
Kuva L4.22. fDOM-pitoisuuden vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 12.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausjankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).



Kuva L4.23. fDOM-pitoisuuden vaihtelu Loukeenkarin kalankasvattamon lähialueella 15.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).

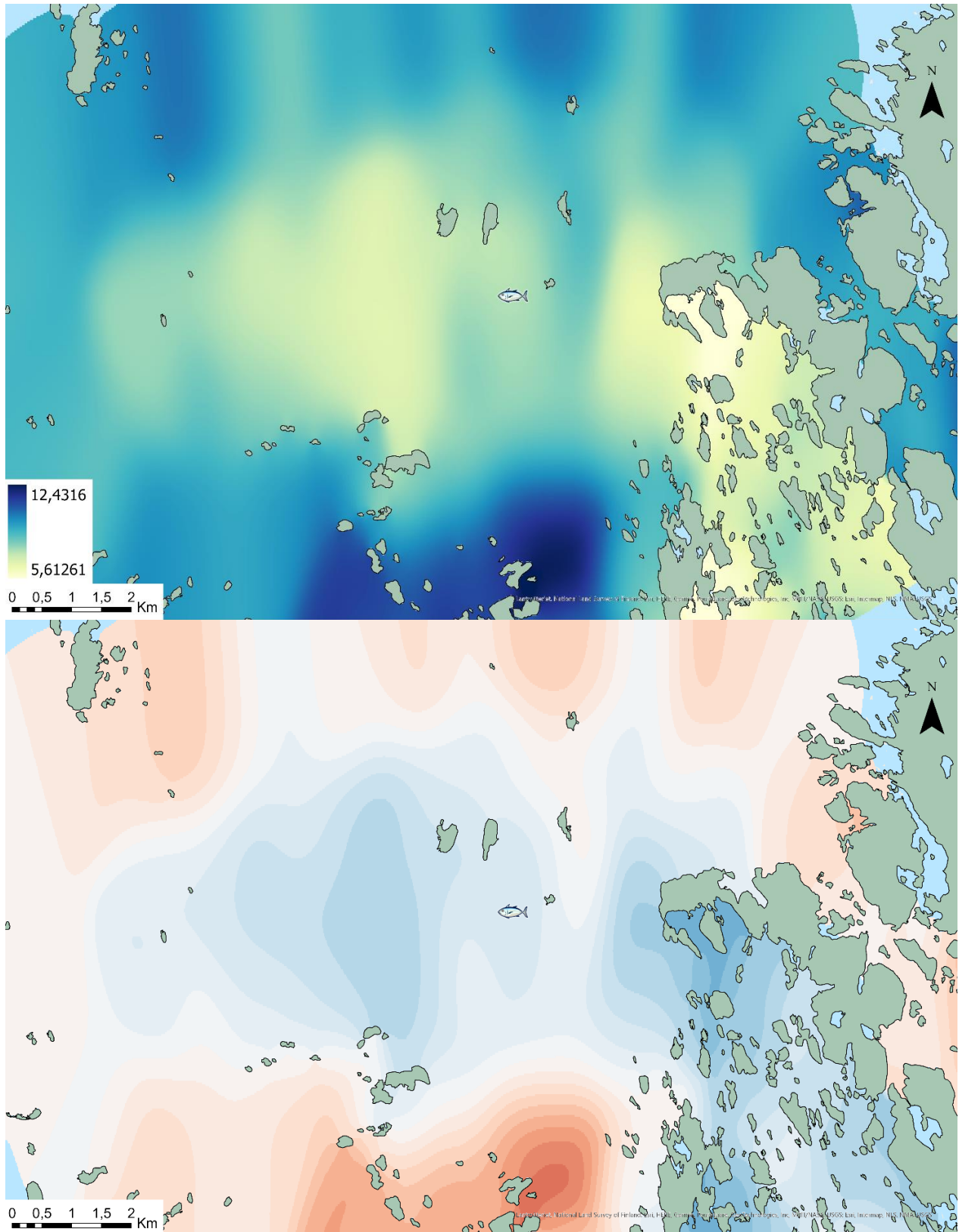


Kuva L4.24. fDOM-pitoisuuden vaihtelu Loukeenkarin kalankasvattamon lähialueella 18.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).

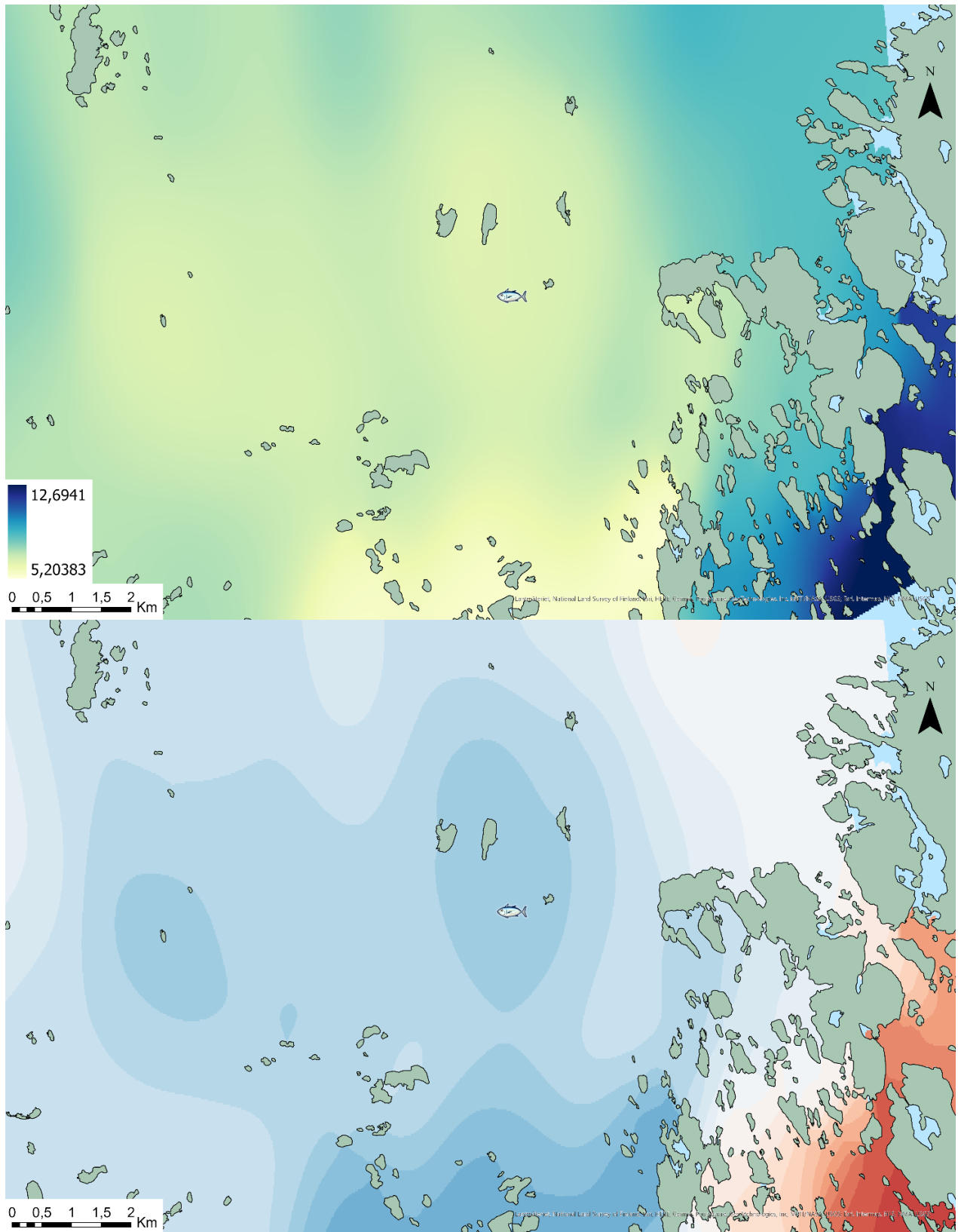


Kuva L4.25. fDOM-pitoisuuden vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 3.9.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Ala-paneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).

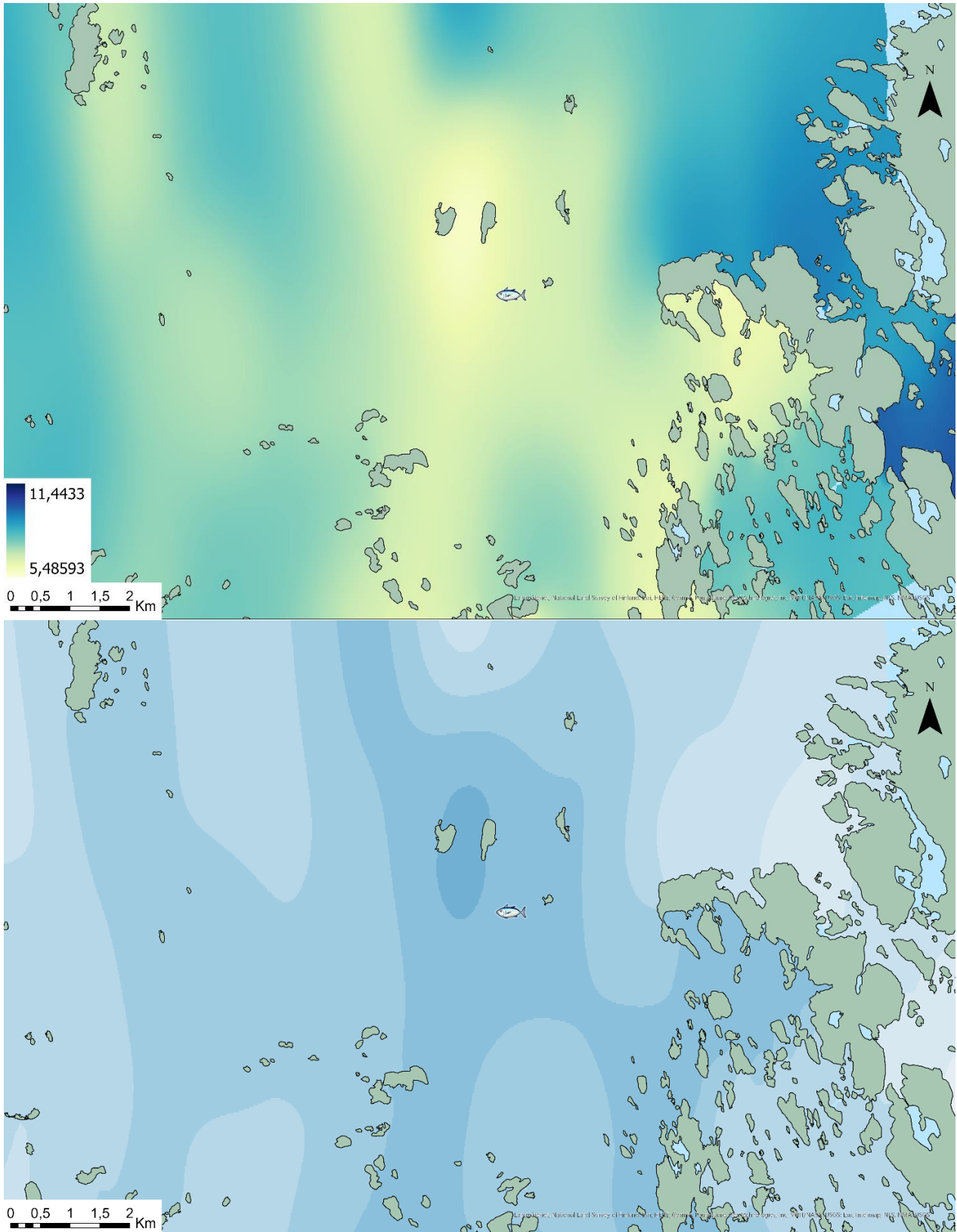
A-klorofylli



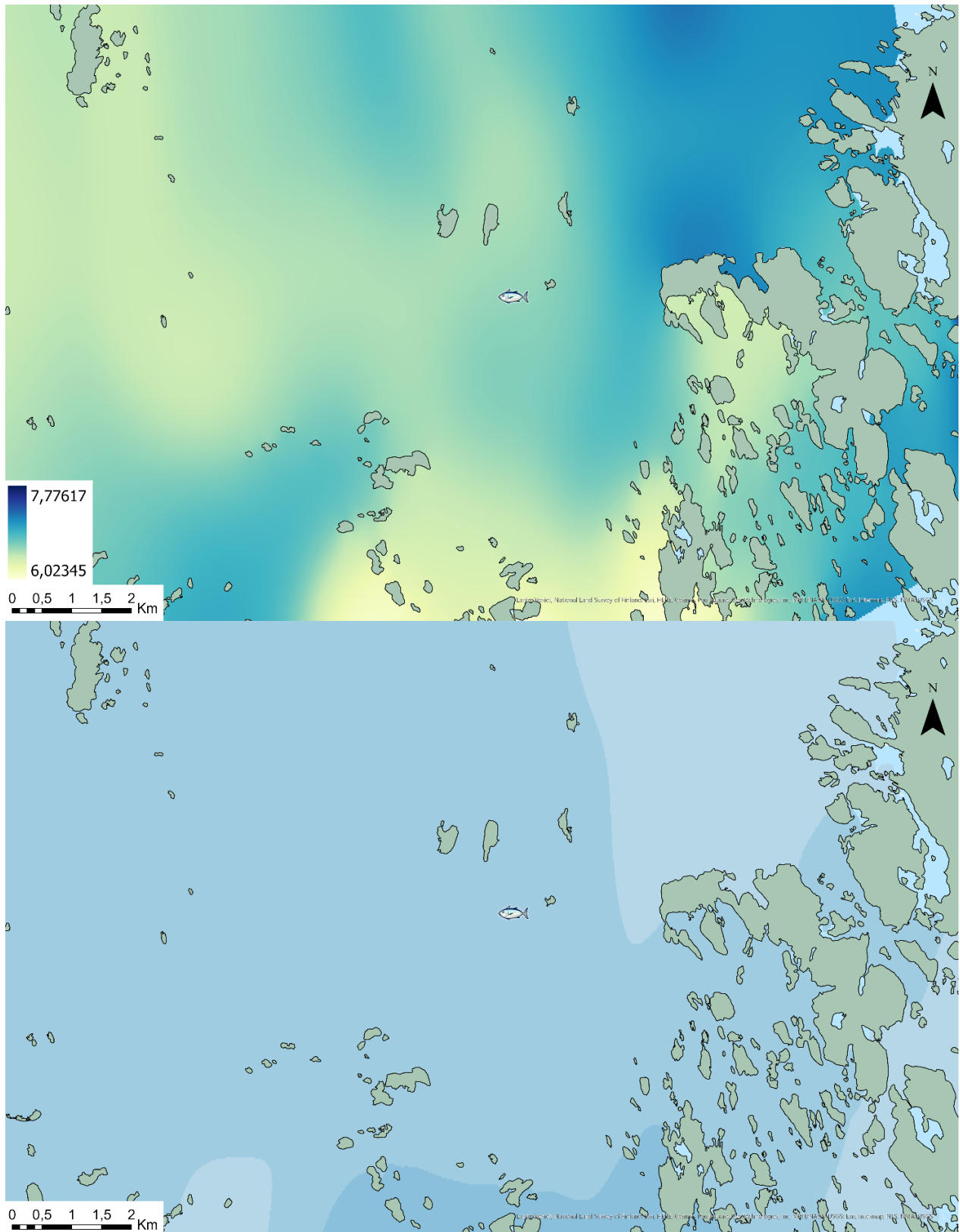
Kuva L4.26. A-klorofyllipitoisuuden vaihtelu Loukeenkarin kalankasvattamon lähialueella 22.7.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).



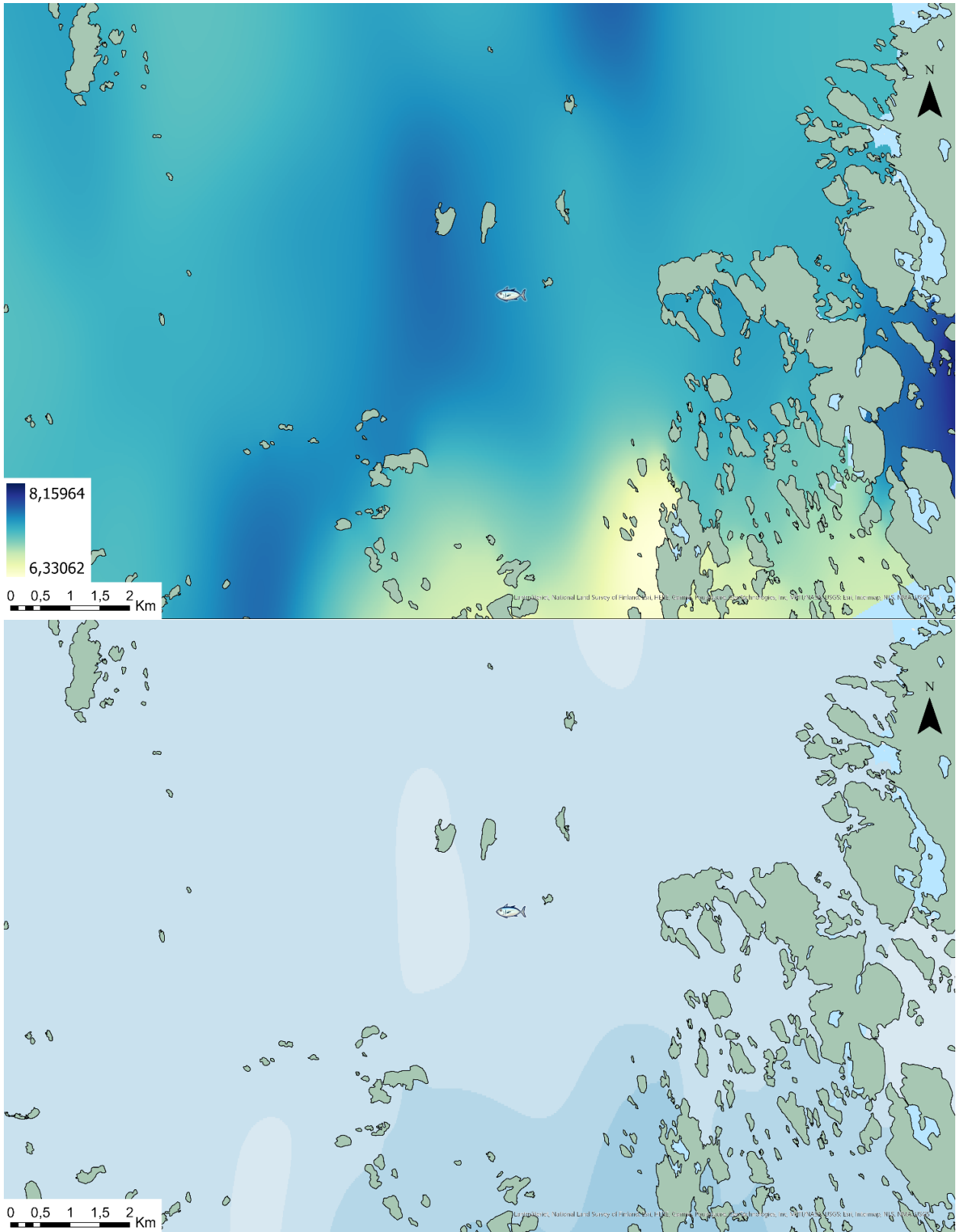
Kuva L4.27. A-klorofyllipitoisuuden vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 8.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).



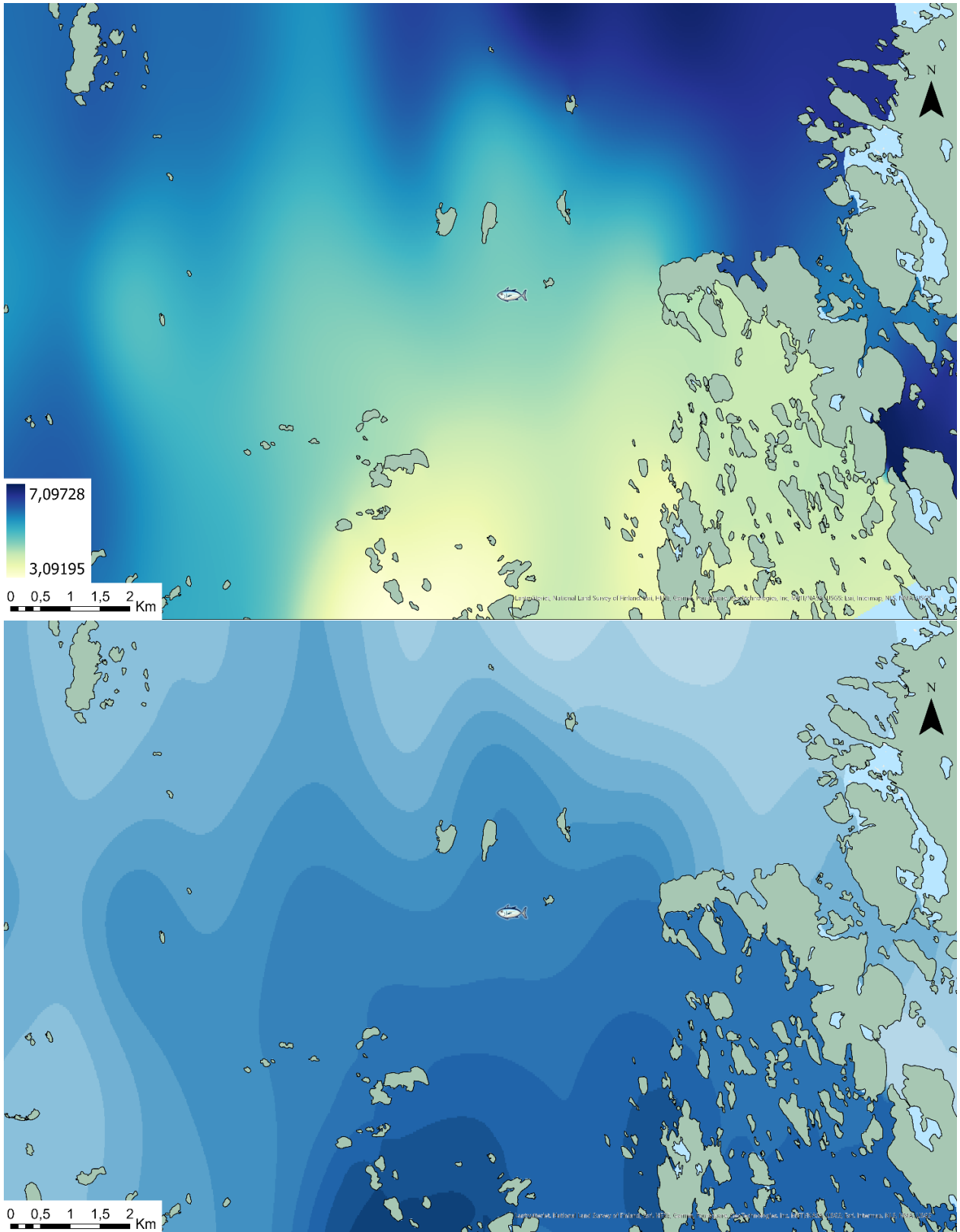
Kuva L4.28. A-klorofyllipitoisuuden vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 12.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).



Kuva L4.29. A-klorofyllipitoisuuden vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 15.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).

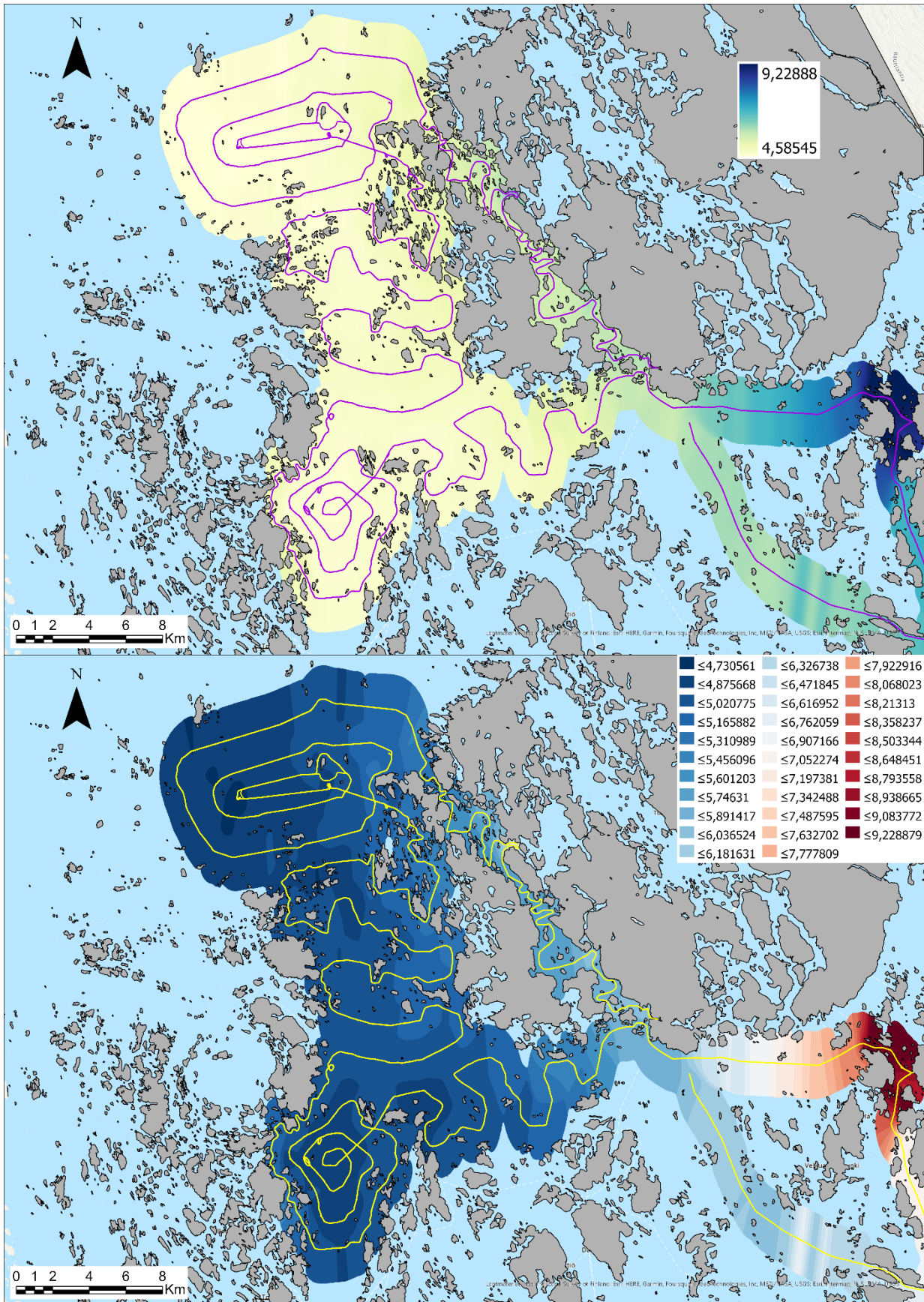


Kuva L4.30. A-klorofyllipitoisuuden vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 18.8.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).



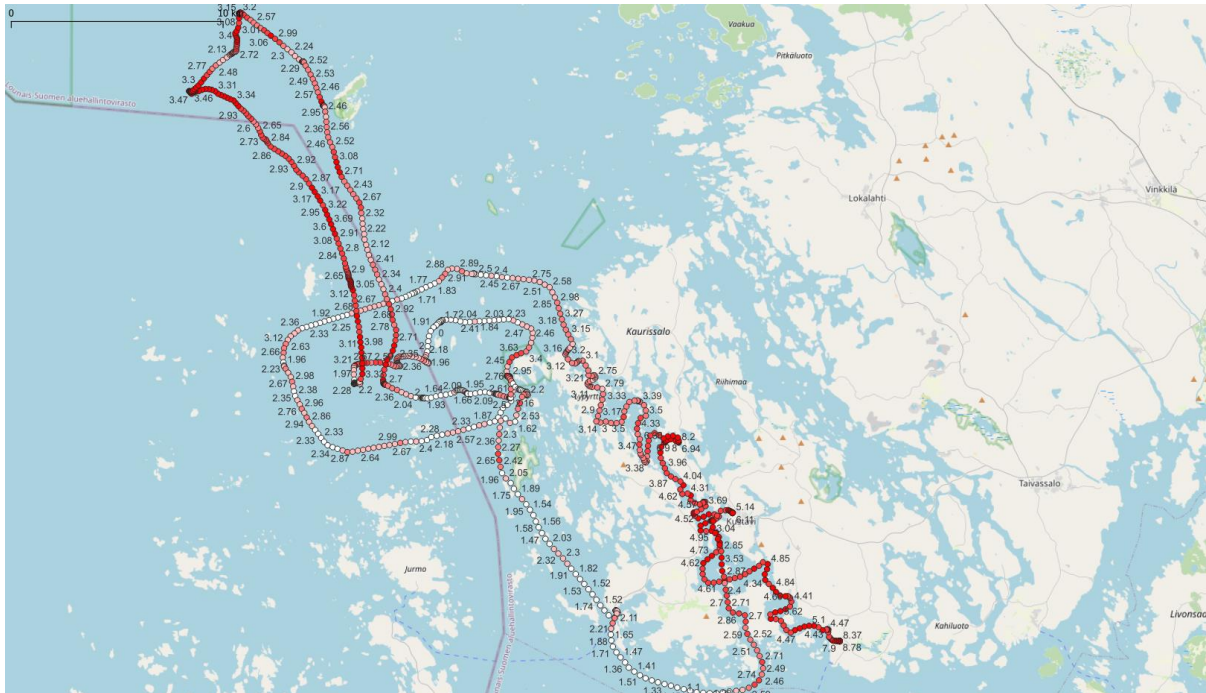
Kuva L4.31. A-klorofyllipitoisuuden vaihtelu Loukenkarin kalankasvattamon lähialueella 3.9.2022. Yläpaneelissa vaihtelua kuvataan mittausajankohdalle spesifin, jatkuvan väriskaalan avulla. Alapaneelissa vaihtelu on kuvattu koko tutkimusjakson jakaumaan perustuvalla, luokitellulla väriskaalalla (ks. kuva L4.1).

Yleiskuva

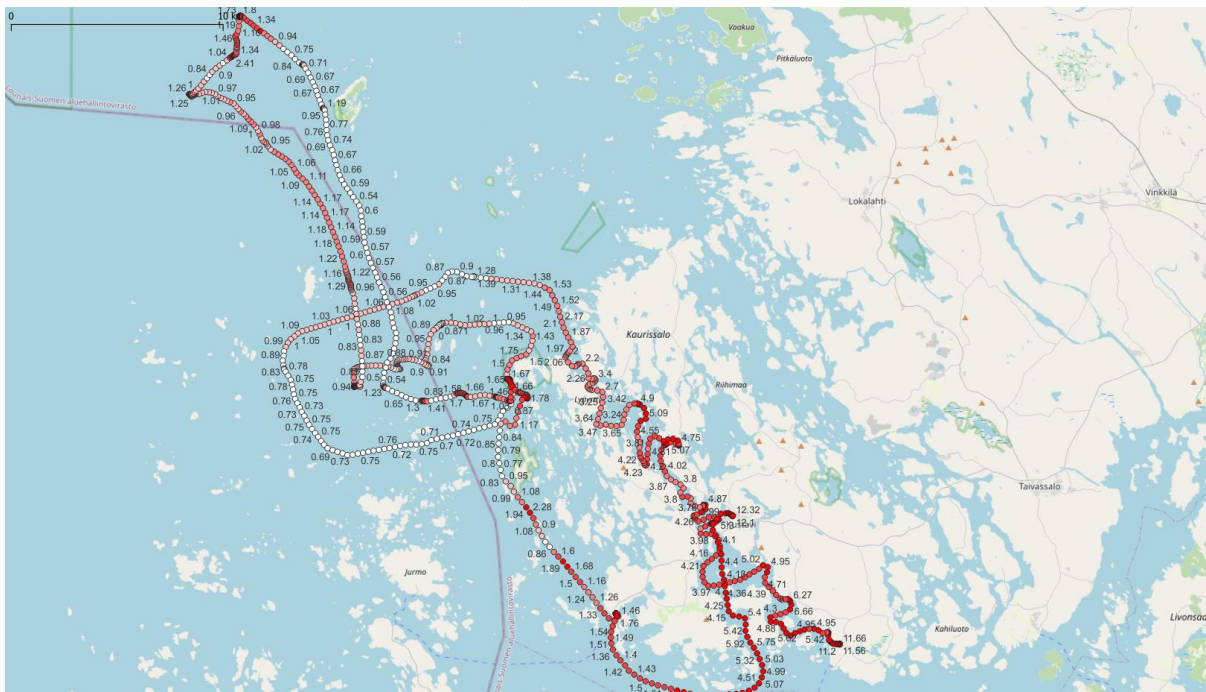


Kuva L4.32. fDOM-pitoisuuden keskiarvo koko mittausalueella ja koko mittausjakson aikana.

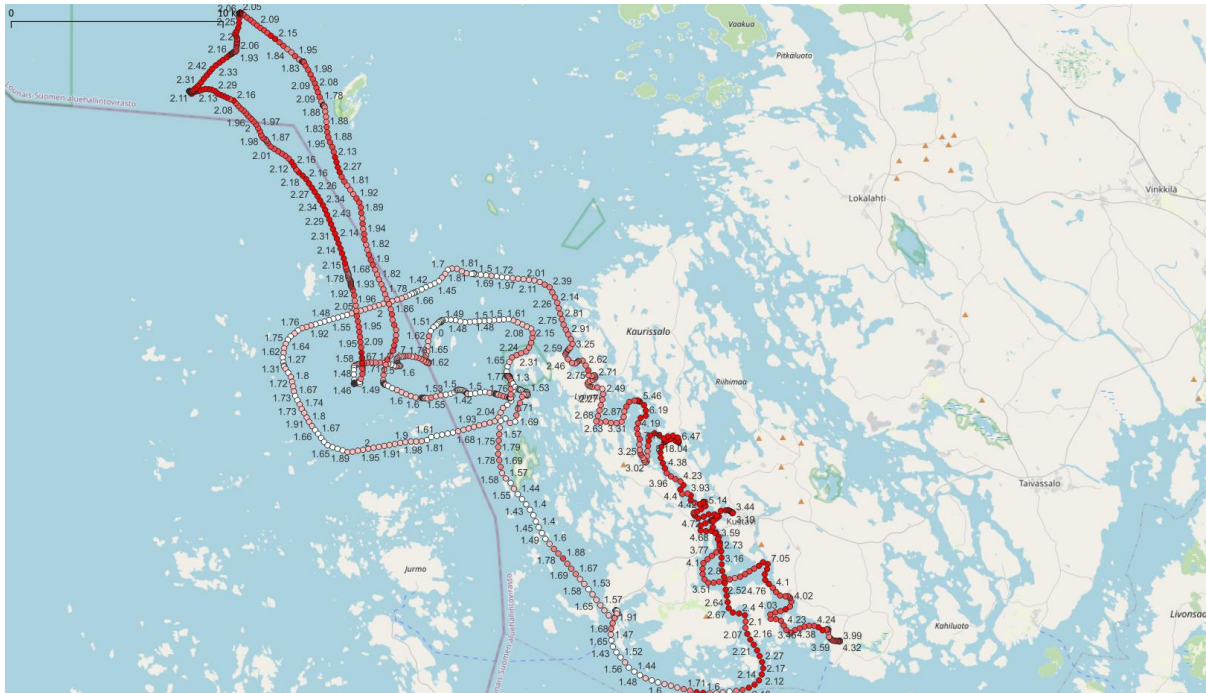
Liite 5. Syken läpivirtausmittausjärjestelmän a-klorofylli ($\mu\text{g/l}$), sameus- (FNU) ja fykosyaniini ($\mu\text{g/l}$) mittaukset



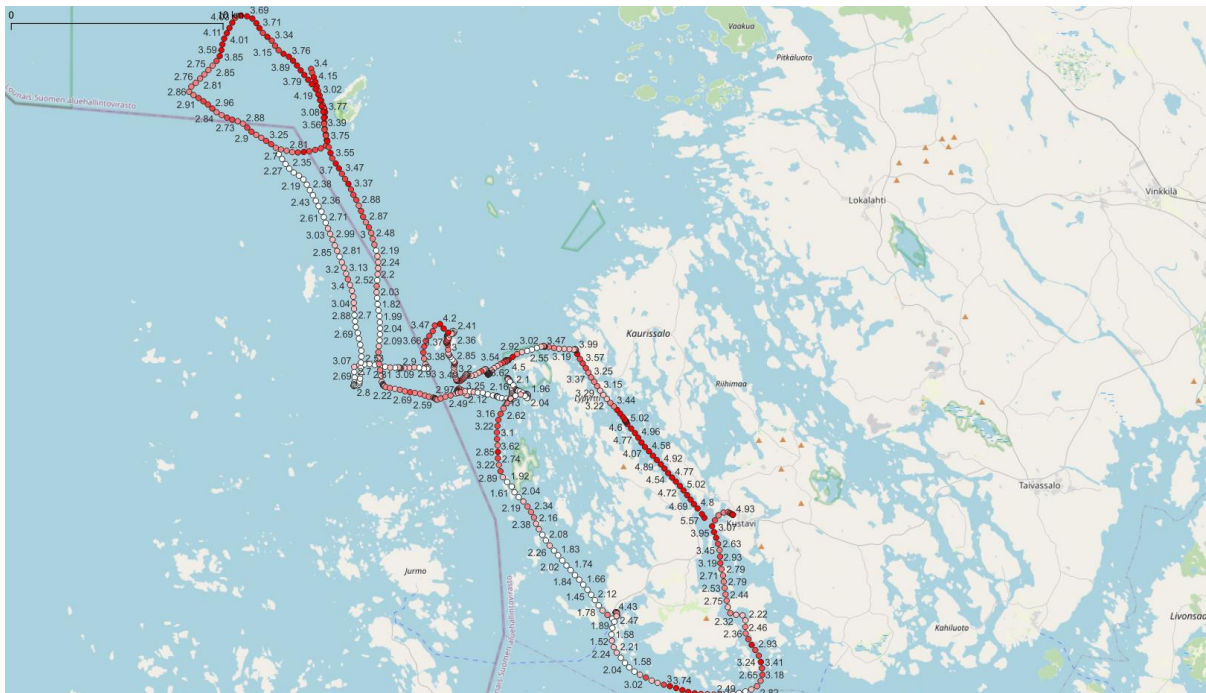
12.8.2022. A-klorofylli.



12.8.2022. Sameus.



12.8.2022. Fykosyaniini.

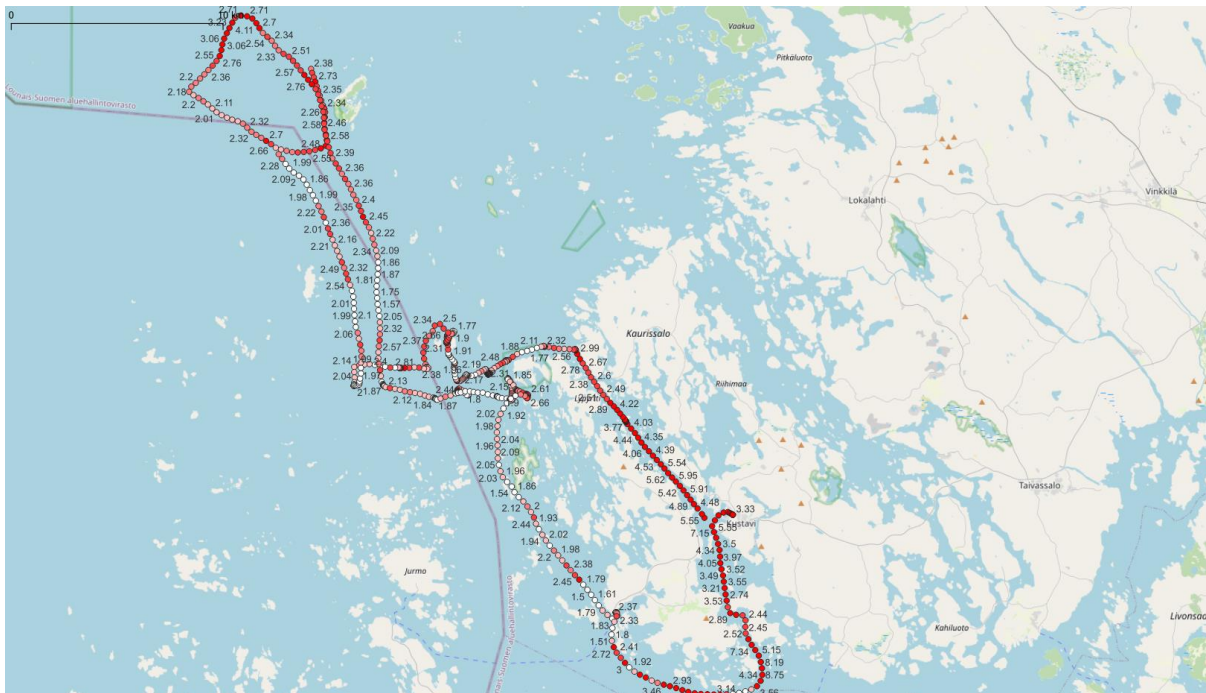


18.8.2022. A-klorofylli.

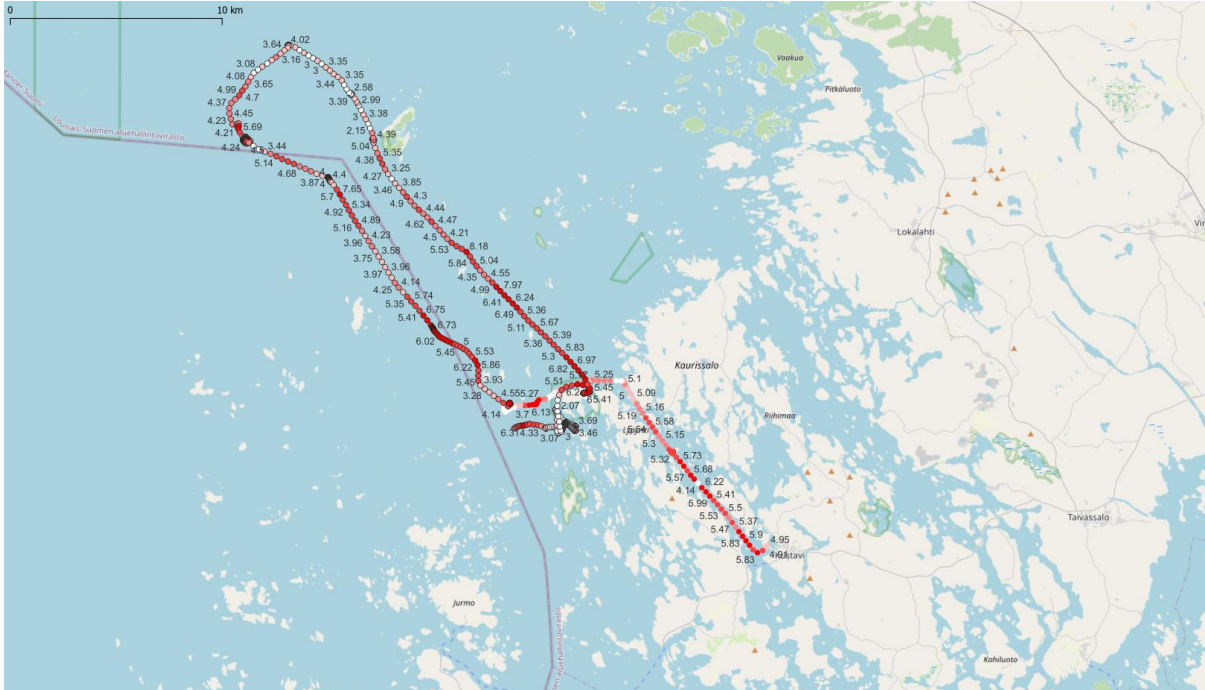
Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 122/2023



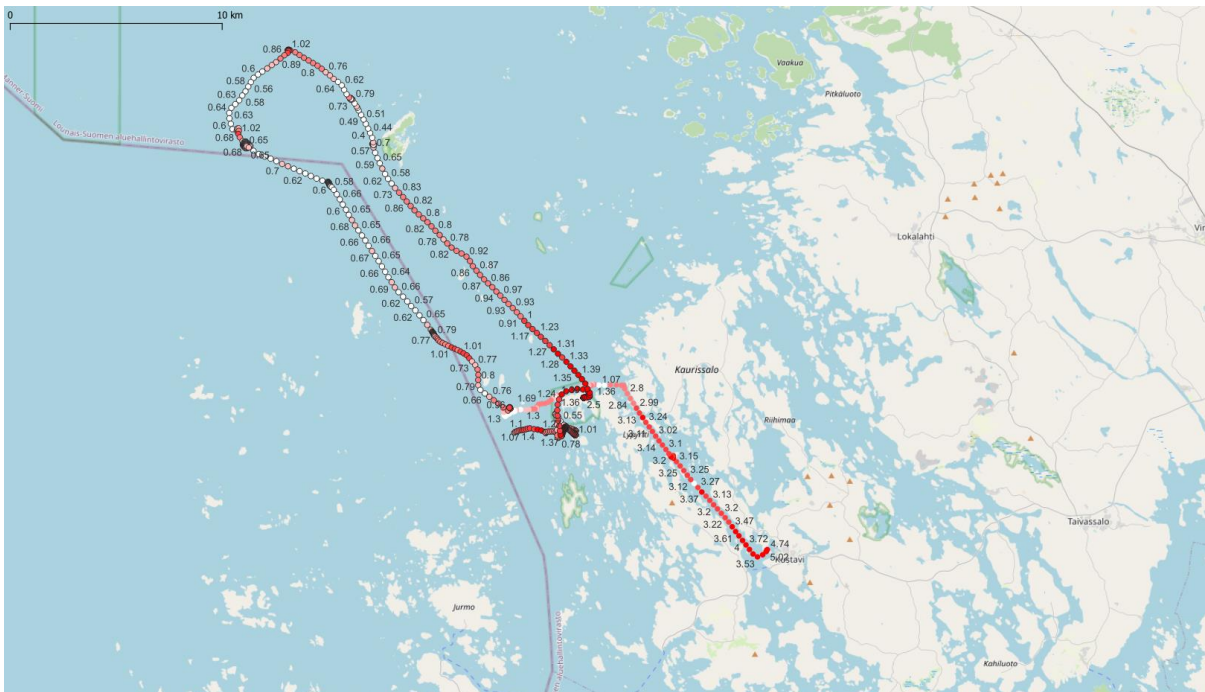
18.8.2022. Sameus.



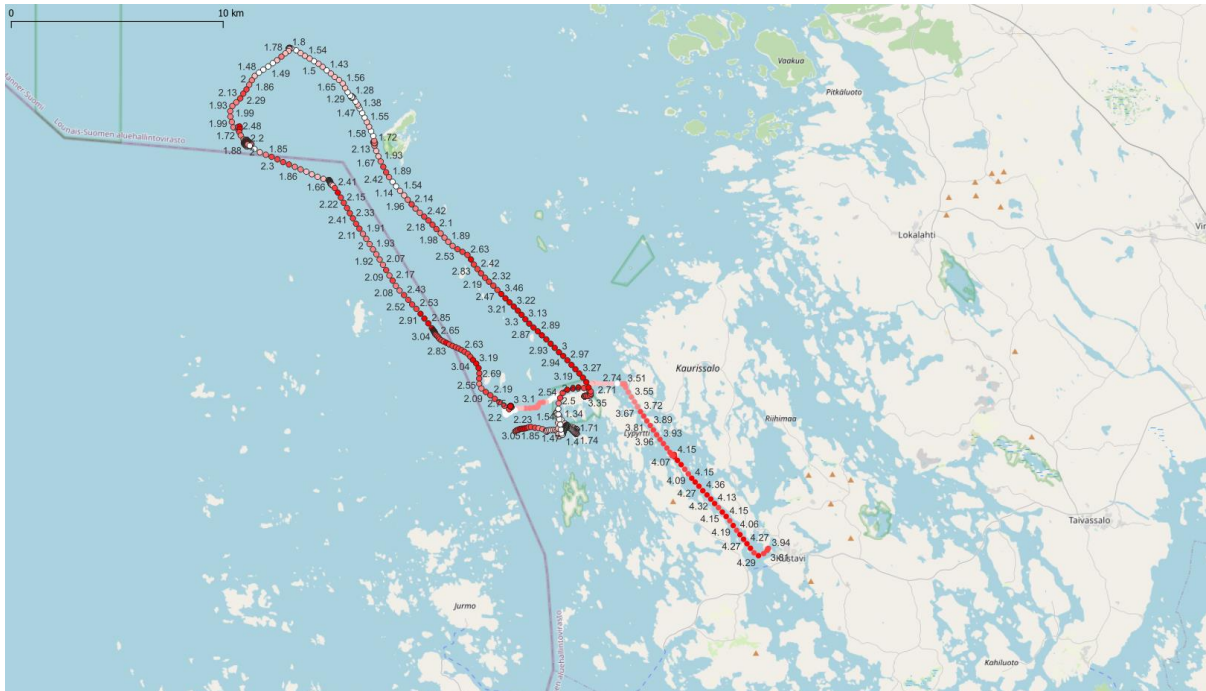
18.8.2022. Fykosyaniini.



5.9.2022. A-klorofylli.



5.9.2022. Sameus.



5.9.2022. Fykosyaniini.

Liite 6. Vesinäytteiden laboratoriomääritysten ja EXO-laitteiden vertailutulokset. Näytteistä on määritetty sameus ja a-klorofylli (Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy).

Taulukko. Katanpään eteläpuolisen poijun 1 EXO:n arvoja vertailtuna laboratorioarvoihin.

| Mittauspaikka | Syvyys (m) | Päivämäärä | Sameus (FNU) EXO | Sameus (FNU) lab | A-klor (µg/l) EXO | A-klor (µg/l) lab |
|-----------------------|------------|------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Räiskäriutta | 0 | 3.8.2022 | 1,3 | 1,2 | 2,2 | 2,8 |
| Isokihiluoto | 0 | 3.8.2022 | 0,9 | 1,0 | 1,8 | 1,9 |
| Isokihiluoto | 8 | 3.8.2022 | 1,2 | 1,5 | 2,0 | 2,1 |
| Fiskskar | 0 | 3.8.2022 | 0,7 | 1,1 | 2,3 | 2,4 |
| Fiskskar | 12 | 3.8.2022 | 0,9 | 0,9 | 1,6 | 1,7 |
| Kaaskeri | 0 | 3.8.2022 | 1,8 | 2,0 | 2,5 | 2,8 |
| Kaaskeri | 4 | 3.8.2022 | - | - | 2,5 | 2,8 |
| Katanpää, etelä | 12 | 3.8.2022 | 1,1 | 1,1 | 1,7 | 1,6 |
| Virtausmittari (Syke) | 0,5 | 5.9.2022 | 1,06 | 1,2 | 3,7 | 3,4 |
| Isokari | 0,5 | 5.9.2022 | 0,87 | 0,9 | 5,0 | 3,9 |
| Isokari-Loukeenkari | 0,5 | 5.9.2022 | 0,91 | 1,1 | 6,3 | 6,1 |

Taulukko. Ahvenanmaan puoleisen poiju 2 EXO:n arvoja vertailtuna laboratorioarvoihin.

| Mittauspaikka | Syvyys (m) | Päivämäärä | Sameus (FNU) EXO | Sameus (FNU) lab | A-klor (µg/l) EXO | A-klor (µg/l) lab |
|-----------------|------------|------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Räiskäriutta | 0 | 3.8.2022 | 0,9 | 1,2 | 2,9 | 2,8 |
| Isokihiluoto | 0 | 3.8.2022 | 1,2 | 1,0 | 2,6 | 1,9 |
| Isokihiluoto | 8 | 3.8.2022 | 0,9 | 1,5 | 2,6 | 2,1 |
| Fiskskar | 0 | 3.8.2022 | 0,6 | 1,1 | 3,3 | 2,4 |
| Fiskskar | 12 | 3.8.2022 | 0,9 | 0,9 | 2,4 | 1,7 |
| Kaaskeri | 0 | 3.8.2022 | - | 2,0 | 3,3 | 2,8 |
| Kaaskeri | 4 | 3.8.2022 | 1,8 | 2,3 | 3,4 | 2,8 |
| Katanpää, etelä | 12 | 3.8.2022 | 1,5 | 1,1 | 2,4 | 1,6 |

Taulukko. ProfilointiEXO:n arvoja vertailtuna laboratorioarvoihin.

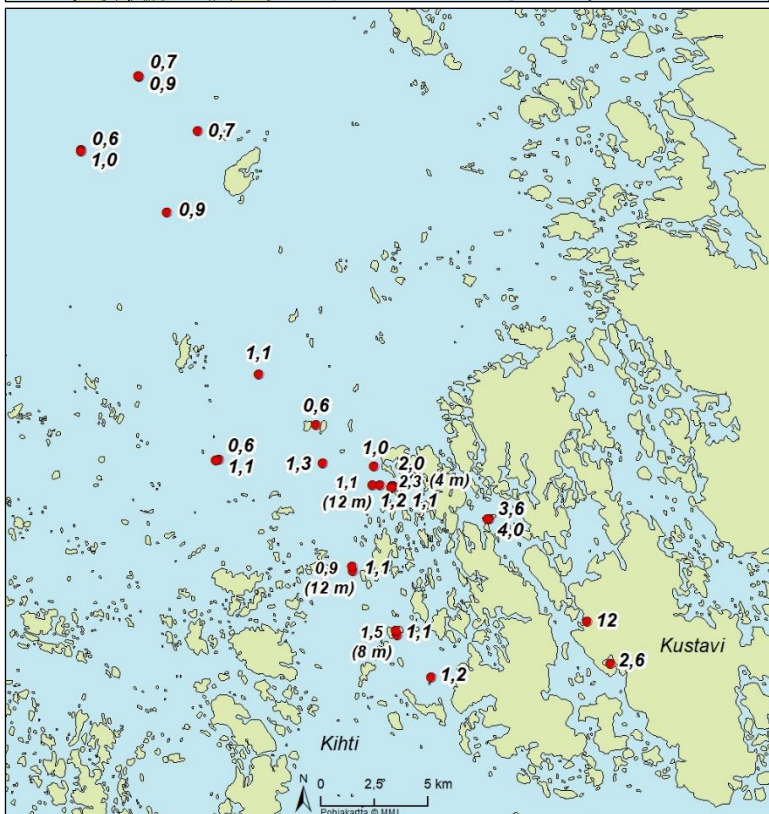
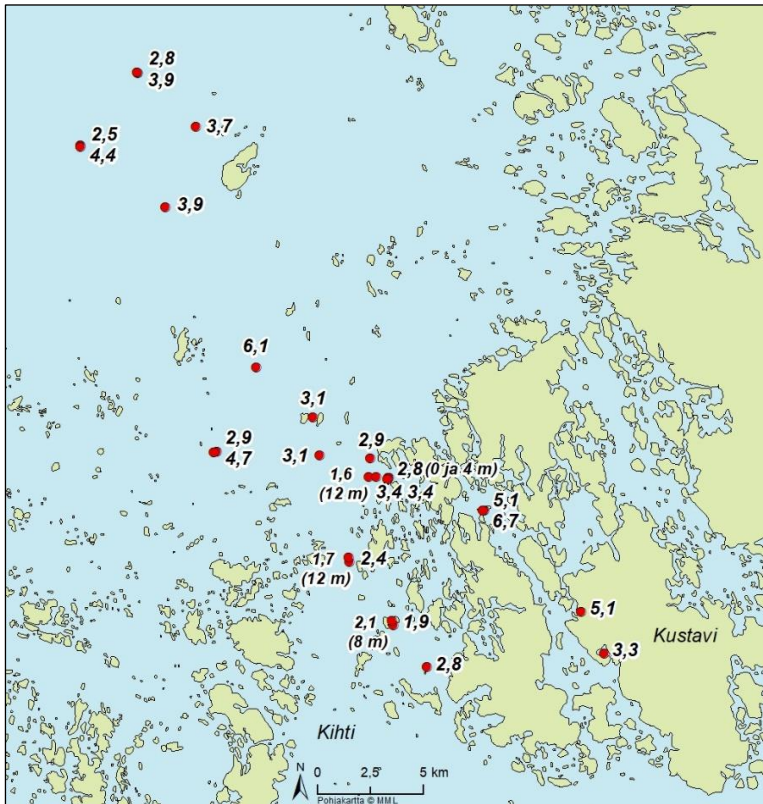
| Mittauspaikka | Syvyys (m) | Päivämäärä | Sameus (FNU) EXO | Sameus (FNU) lab | A-klor (µg/l) EXO | A-klor (µg/l) lab |
|-----------------------|------------|------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Räiskäriutta | 0 | 3.8.2022 | 1,7 | 1,2 | 2,8 | 2,8 |
| Isokihiluoto | 0 | 3.8.2022 | 1,9 | 1,0 | 2,5 | 1,9 |
| Isokihiluoto | 8 | 3.8.2022 | 1,1 | 1,5 | 2,5 | 2,1 |
| Fiskskar | 0 | 3.8.2022 | 0,8 | 1,1 | 3,2 | 2,4 |
| Fiskskar | 12 | 3.8.2022 | 0,9 | 0,9 | 2,3 | 1,7 |
| Kaaskeri | 0 | 3.8.2022 | 1,9 | 2,0 | 3,2 | 2,8 |
| Kaaskeri | 4 | 3.8.2022 | 2,5 | 2,3 | 3,3 | 2,8 |
| Katanpää, etelä | 12 | 3.8.2022 | 1,0 | 1,1 | 2,3 | 1,6 |
| Virtausmittari (Syke) | 0,5 | 5.9.2022 | 0,8 | 1,2 | 3,8 | 3,4 |
| Isokari | 0,5 | 5.9.2022 | 0,7 | 0,9 | 4,7 | 3,9 |
| Isokari-Loukeenkari | 0,5 | 5.9.2022 | 0,8 | 1,1 | 7,2 | 6,1 |
| Lootholma | 0,5 | 5.9.2022 | 1,8 | 2,6 | 4,0 | 3,3 |
| Veneranta | 0,5 | 5.9.2022 | 7,4 | 12 | 5,9 | 5,1 |

Liite 7. Laboratorio-määrittämiä 3.8.–5.9.2022 Kustavista ja Saaristomeren pohjoispuolelta

Taulukko. Laboratorio-määrittämiä 3.8.–5.9.2022 Kustavista ja Saaristomeren pohjoispuolelta (määrittämiä: Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy).

| Paikka | Syvyys (m) | Pvm | Aika | °C | Sameus (FNU) | A-klor (µg/l) | Lat | Long | KokN (µg/l) | KokP (µg/l) |
|-----------------------|------------|---------|-------|------|--------------|---------------|---------|---------|-------------|-------------|
| Räiskäriutta | 0 | 3.8.22 | 8:46 | 18,0 | 1,2 | 2,8 | 60,5212 | 21,2186 | | |
| Isokihtiluoto | 0 | 3.8.22 | 8:52 | 18,0 | 1,0 | 1,9 | 60,5376 | 21,1869 | | |
| Isokihtiluoto | 8 | 3.8.22 | 8:55 | 17,6 | 1,5 | 2,1 | 60,5393 | 21,1853 | | |
| Fiskskar | 0 | 3.8.22 | 9:17 | 17,8 | 1,1 | 2,4 | 60,5625 | 21,1439 | | |
| Fiskskar | 12 | 3.8.22 | 9:19 | 17,1 | 0,9 | 1,7 | 60,5646 | 21,1434 | | |
| Kaaskeri | 0 | 3.8.22 | 9:57 | 18,5 | 2,0 | 2,8 | 60,5996 | 21,1713 | | |
| Kaaskeri | 4 | 3.8.22 | 10:00 | 18,6 | 2,3 | 2,8 | 60,5995 | 21,1712 | | |
| Katanpää, etelä | 12 | 3.8.22 | 9:45 | 17,8 | 1,1 | 1,6 | 60,5994 | 21,1704 | | |
| profil(0) | 0,5 | 18.8.22 | 9:35 | 21,5 | 3,6 | 5,1 | 60,5894 | 21,2561 | | |
| profil() | 0,5 | 18.8.22 | 10:45 | 20,6 | 1,3 | 3,1 | 60,6063 | 21,1106 | | |
| profil(10) | 0,5 | 18.8.22 | 11:00 | 20,8 | 0,6 | 3,1 | 60,6223 | 21,1018 | | |
| profil(14) | 0,5 | 18.8.22 | 11:30 | 21,1 | 0,6 | 2,9 | 60,6040 | 21,0218 | | |
| profil(15), Isokari B | 0,5 | 18.8.22 | 12:02 | 20,2 | 0,6 | 2,5 | 60,7276 | 20,8807 | 320 | 15 |
| profil(16), Isokari A | 0,5 | 18.8.22 | 12:15 | 20,5 | 0,7 | 2,8 | 60,7603 | 20,9242 | 310 | 14 |
| profil(17), Isokari N | 0,5 | 18.8.22 | 12:25 | 20,8 | 0,7 | 3,7 | 60,7400 | 20,9783 | 310 | 15 |
| profil(24), poiju | 0,5 | 18.8.22 | 14:17 | 21,6 | 1,0 | 2,9 | 60,6070 | 21,1544 | | |
| profil(0) | 0,5 | 5.9.22 | 8:50 | | 4 | 6,7 | 60,5891 | 21,2544 | | |
| profil(14) | 0,5 | 5.9.22 | 10:30 | | 1,1 | 4,7 | 60,6036 | 21,0194 | | |
| profil(27) | 0,5 | 5.9.22 | 11:46 | | 1,1 | 3,4 | 60,5990 | 21,1707 | | |
| virtausmittari | 0,5 | 5.9.22 | 12:34 | | 1,2 | 3,4 | 60,5995 | 21,1604 | | |
| Isokari A | 0,5 | 5.9.22 | 13:59 | | 0,9 | 3,9 | 60,7607 | 20,9238 | 270 | 15 |
| Isokari B | 0,5 | 5.9.22 | 14:13 | | 1 | 4,4 | 60,7272 | 20,8805 | 280 | 16 |
| Isokari | 0,5 | 5.9.22 | 14:58 | | 0,9 | 3,9 | 60,7049 | 20,9589 | 340 | 28 |
| Iso-Loukeenkari | 0,5 | 5.9.22 | 15:31 | | 1,1 | 6,1 | 60,6410 | 21,0493 | | |
| Lootholm | 0,5 | 5.9.22 | 17:28 | | 2,6 | 3,3 | 60,5335 | 21,3689 | | |
| Veneranta | 0,5 | 5.9.22 | 17:44 | | 12 | 5,1 | 60,5501 | 21,3465 | | |

Laboratoriossa määritettyjä a-klorofylli -arvoja ($\mu\text{g/l}$) (ylempi kuva) ja sameusarvoja (FNU) (alempi kuva) (3.8–5.9.2022). Mittaukset ovat pääosin pintavedestä (0 m) ja osin myös syvem-
mältä (4–12 m). Lab-määritykset: Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy.





**Löydät meidät
verkosta**

luke.fi

