



MAAMERI-hanke loppuraportti

Tietoperustan vahvistaminen rannikkovesien tilan parantamiseksi Saaristomeren alueella ”MAAMERI”

Laatijat: Hermann Kaartokallio Riikka & Puntila-Dodd (toim.), Kaarina Lukkari, Harri Kuosa, Petri Ekholm, Olli Malve, Jenni Attila, Sampsa Koponen, Elina Miettunen, Janne Ropponen, Niina Kotamäki (SYKE), Hedi Kanarik, Laura Tuomi, Antti Westerlund (IL), Alf Norkko, Joanna Norkko, Tom Jilbert, Anna Villnäs (HY), Aarno Kotilainen, Anu Kaskela, Sami Jokinen, Maarit Middleton, Joonas Virtasalo (GTK), Jari Hänninen (TY), Mirja Koskinen, Harri Helminen, Irma Puttonen (VarEly), Tiina Salo, Anna Törnroos- Remes Sonja Salovius-Laurén (ÅA), Jari Hänninen, Saija Saarni, Sarianna Salminen (TY), Laura Kauppi (HY), Florian Roth (HY/SU), Christoph Humborg (SU), Eero Asmala (HY/GTK), Aleksandra Lewandowska (HY)

14.12. 2022



Sisältö

Tiivistelmä	4
Johdanto	5
Hankkeen toiminta	6
Hankkeen kulku	6
Hankkeen koordinaatio ja sisäinen viestintä	7
Hankkeen ulkoinen viestintä	7
Ohjausryhmätyöskentely	7
Hankkeen keskeiset tulokset	7
1: Toimenpiteiden vaikutukset vesireiteissä ja fosforin valuma-alueprosessit	8
2: Fosfori rannikko-avomerijatkumoilla jokisuilta alkaen.	9
3: Fosforin käyttö ja varastoituminen eliöiden biomassaan, ravinnesuhteet ja rehevöitymisen ekosysteemivaikutukset.....	10
4: Virtaukset ja vedenvaihto	11
5: Tietoaaineistojen integraatio ja yhteiskäyttö.	12
6: Saaristomerimallin kehittäminen ja mallituotteet vesien- ja merenhoitoon.	13
Tietoaaineistot	15
Tulevaisuuden tietotarpeet	15
Seurantaehdotus	16
Hankkeessa tehty työ ja tulokset työpaketeittain	16
Työpaketti 1: Toimenpiteiden vaikutukset vesireiteissä ja fosforin valuma-alueprosessit.	16
1.1. Seuranta-aineistojen yhdistäminen ja hyödyntäminen	19
1.2. Kipsinlevityksen vaikutukset kuormitukseen	22
1.3. Kipsin vaikutusten arviointi aiempien tutkimusten perusteella	28
Työpaketti 2: Fosfori rannikko-avomerijatkumoilla jokisuilta alkaen.	30
2.1. Rannikkovesistöön maalta kulkeutuvan partikkeliaineksen tutkiminen.....	32
2.2. Partikkeliaineksen kulkeutumis- ja kerrostumisalueiden selvittäminen.....	44
2.3. Sedimentin potentiaalisesti labiiliin fosforin pitoisuuksien alueellinen tarkentaminen.....	45
2.4. Huokosveden fosforipitoisuudet Paimionlahdella	57
Työpaketti 3: Fosforin käyttö ja varastoituminen eliöiden biomassaan, ravinnesuhteet ja rehevöitymisen ekosysteemivaikutukset.....	60
3.1. Planktonlevien fosforin käyttö ja ravinnesuhteet, sinileväkukintojen muodostumisen ja fosforipitoisuuksien välinen yhteys	62
3.3. Pohjaeläimistön ravinnesuhteet rannikko-avomerigradien-teilla.....	69



3.5. Jokikuormituksen eloperäisen aineen hajotuksen vaikutukset ilmastoaktiivisten kaasujen tuottoon ja eliöyhteisöjen monimuotoisuuteen.....	73
Työpaketti 4: Virtaukset ja vedenvaihto	80
Työpaketti 5: Tietoaineistojen integraatio ja yhteiskäyttö	88
5.1. Saaristomerien tarkkan maastoerotuskyvyn satelliittihavainnot osana alueen seuranta- ja mallinnuskokonaisuutta.....	89
5.2. Datafuusio: Vedenlaatuaineistojen yhdistäminen ja interpolaatio	102
5.3. jatkuvatoimiset vedenlaadun poijumittaukset	104
Työpaketti 6: Saaristomerimallin kehittäminen ja mallituotteet vesien- ja merenhoitoon	105
6.1. Saaristomerimallin sisäisen P-kuormituksen arvion parantaminen tarkentuneiden pohja-, SAR- ja P-tietojen osalta.....	107
6.2. Saaristomerimallin sisäisen P-kuormituksen syötteen arvion parantaminen tarkentuneiden pohja-, SAR- ja P-tietojen osalta.....	126
6.3. CLR- ja Saaristomeri-mallien integrointi	127
Liitteet.....	130

Tiivistelmä

MAAMERI-hankkeessa tutkittiin Saaristomeren tilaan vaikuttavia tekijöitä erityisesti valuma-alueelta kulkeutuvan fosforin vaikutuksia ja dynamiikkaa. Hankkeen konkreettisenä tavoitteena oli vähentää vesien- ja merenhoidon rannikkovesien hyvään tilaan kytkeytyvien kuormitusvähennystavoitteiden epävarmuutta Saaristomerellä vahvistamalla Rannikkomallin toimintaedellytyksiä. Lisäksi hankkeen tavoitteena oli täyttää Saaristomeren tilaan liittyviä tietopuutteita ja vahvistaa tietopohjaa Saaristomeren rehevöitymiseen liittyen.

Hankkeen valuma-alueosiossa tehtiin läheistä yhteistyötä KIPSI-hankkeen seurannan kanssa ja seurantaa tehtiin samanaikaisesti kipsin levityksen kanssa. Hankkeessa tehty tutkimus tarkensi huomattavasti kuvaa jokien kuljettaman partikkelimaisen aineksen fosforipitoisuudesta, koostumuksesta sedimentaatiosta ja hajoamisesta etenkin savisamean Paimionjoen jokiväylä- ja avomerijatkumolla.

Jokiveden kuljettamasta kokonaisfosforista partikkelimainen orgaaninen fosfori muodosti yli 80 % sekä Paimion- että Laajoella kesällä 2021. Kipsin lisäys Paimionjoen jokiveteen aiheutti partikkelimaisen aineen sakkautumista sekä keväällä että kesällä. Tulokset osoittavat myös, että merkittävä osa Paimionjoen kuljettamaa savimateriaalia sedimentoituu ja akkumuloituu ylä-estuaarin alueella ja siten laimentaa orgaanisen aineksen pitoisuutta ylä-estuaarin sedimenteissä. Sedimentin huokosveden tutkimukset Paimionlahdella taas vahvistavat, että anaerobiset mineralisaatioprosessit ovat aktiivisia sedimentissä jokisuulta avomerelle asti.

Maameri-hankkeen neljällä MTA Arandan tutkimusmatkalla 2020–2022 analysoitiin ravinnetilannetta vedessä yhteensä 41 yli 25 metriä syvältä näytepisteeltä, joista suurin osa oli uusia. Liuennut epäorgaaninen fosfori DIP muodosti keskimäärin noin 50 % kokonaisfosforista. Hankkeessa tuotettiin myös uutta tietoa ennestään tuntemattomien alueiden merenpohjan maalajeista sekä uusien näytepisteiden sedimentin P:n liukoisuus- ja sitoutumismuodoista. Tulosten mukaan suurimmat happiolosuhteisiin reagoivan P:n pitoisuudet löytyvät sisäsaaristosta, Mynälahden eteläpuolelta ja Kemiön itäpuolelta sekä Kemiön ja Hankoniemen välisestä saaristosta. Tarkentuneet tiedot Saaristomeren sedimenttien maalajeista ja fosforin esiintymismuodoista auttavat tarkentamaan tulevaisuudessa rannikkomallin sisäisen fosforikuormituksen arviota Saaristomerellä.

Jokiveden mukana valuma-alueelta tuleva ravinnekuormitus ja sameus vaikuttavat rannikkoekosysteemiin monin tavoin. Ilmastoaktiivisten kaasujen (CO₂, CH₄ ja N₂O) pitoisuudet olivat yleisesti korkeimpia jokisuulla, ja jokivesi kuljetti kaasuja jopa 10 km etäisyydelle jokisuusta, kun taas korkeat N₂O- pitoisuudet tasaantuivat noin 1 km päässä. Arvioiden perusteella jokisuun kasvihuonekaasujen päästöt ovat noin 80-kertaisia verrattuna uloimpaan avomeripisteeseen.

Jokikuormituksen vaikutuksia (suolapitoisuus, ravinnepitoisuus, sameus ym.) monimuotoisuuteen tarkasteltiin Paimionlahden rannikko-avomerijatkumolla sekä kasvillisuutta (levät ja vesikasvit) että rakkolevän ja rihmalevien joukossa eläviä selkärangattomia eliöitä tutkimalla. Tulosten perusteella jokiperäinen ravinnekuormitus muokkaa sekä kasvi-, levä- että eläinlajistoa Paimionlahden tutkimusjatkumoilla. Ravinnekuorman lisäksi jokivesi alentaa veden suolapitoisuutta ja pohjoisimpana jokisuun lähellä kasvaa pääosin makean veden kasveja, jotka viihtyvät pehmeillä, rehevöityneillä sedimentaatiopohjilla. Merelliset kasvi- ja levälajit rajoittuvat ulkosaaristoon.



Pohjaeläinyhteisöjen lajimäärä, biomassa sekä ravinne- ja hiilipitoisuudet nousevat jokisuulta ulkosaaristoa kohti. Lisäksi tulokset viittaavat aiemmin tiedetyn mukaisesti fosforin lisäksi myös typen merkitykseen kasviplankton tuotantoa rajoittavana ravinteena ulko- ja välisaaristossa.

Saaristomeren monimutkainen batymetria ja rantaviiva ohjaavat virtauksia ja vaikuttavat niiden voimakkuuksiin. Hankkeessa tehtyjen mittausten perusteella Saaristomeren pohjois- ja eteläosan virtausolosuhteet eroavat toisistaan selkeästi. Mittaukset näyttävät virtaussuuntien olevan melko pysyviä. Osa voimakkaista virtauksista syntyy paikallisten voimakkaiden tuulien vaikutuksesta, mutta mukana on myös laajemman skaalan ilmiöiden, kuten esim. Itämeren vedenkorkeusvaihtelun aiheuttamia virtauksia.

Hankkeessa kehitettiin myös kaukokartoitusmenetelmiä. Menetelmät vuosittaisen fosforikarttojen laatimisesta osoittautuivat toimivaksi tavaksi kuvata jokivesien tuomaa ravinnekuormaa Saaristomeren ravinnekuormitukseen. Hankkeessa tuotettiin satelliittihavainnoista tulkittua kokonaisfosforiaineistoa, joka kannattaisi ottaa yhdeksi aineistoksi niille satelliittiseuranta-asemille, joita hankkeen aikana lisättiin.

Hankkeessa tuotettiin myös kattava kuva sameuden ja klorofylli-a:n vaihtelusta Mynä- ja Paimionjoen edustalla ja laajemmin koko Saaristomerellä v. 2019-2021. Työssä koottiin ja harmonisoitiin Saaristomeren sekä erityisesti Mynälahden ja Paimionjoen edustan sameuden ja klorofylli-a:n Vesla-, EO- ja MaaMeri-aineistot SYKE:n DataFuusio-järjestelmään SDFS ja visualisoitiin kartta- ja aikasarjakuviksi.

Hankkeessa tuotettiin myös uutta tarkkaa merenpohjan maalajitietoa Saaristomereltä. Aineistoa hyödynnettiin jo hankkeen aikana mm. sedimenttinäytepaikkojen valinnassa, maalajimallinnuksen taustatietona ja rannikkomallin sisäisen fosforikuormituksen syötteen arvion tarkentamiseen tarvittavien mahdollisesti kiertoon palaavien fosforimuotojen pitoisuuksien alueellisten jakaumien arvioinneissa. Hankkeessa muokattiin myös Coastal Load Response (CLR)-malli toimimaan Saaristomerimallin kanssa samassa palvelinympäristössä ja käynnistymään automaattisesti Saaristomeren alueen FICOS-malliajoja tehdessä

Hankkeessa tehdyn työn perusteella rannikkomallissa käytettävää sisäisen kuormituksen syötteen arviota saadaan tarkennettua Saaristomeren alueelta sekä saatiin lisää tietoa vesimassan ravinteista. Hanke täytti paljon tietoaukkoja Saaristomeren ravinnetilanteesta ja kuormituksen vaikutuksista. Hanke tuotti myös ehdotuksen kipsikäsittelyjen vaikutuksen seurantaan varten ja katsauksen tuleviin tutkimustarpeisiin.

Johdanto

MAAMERI-hanke oli osa Veden vuoro- vesiensuojelun tehostamisohjelman tutkimusosiota. Hanke tutki ravinteiden, erityisesti fosforin kulkeutumista valuma-alueelta Saaristomereen ja sen vaikutuksia ja dynamiikkaa rannikko-avomerijatkumoilla Saaristomeren eri osissa. Hankkeessa parannettiin ymmärrystä Saaristomeren ekosysteemin vasteista maalta tulevan ravinnekuormituksen, erityisesti fosforikuormituksen muutoksiin. Erityisesti kohteena olivat pohjan sedimenttiprosessit, fosforikuormituksen ja eliöstön vuorovaikutus sekä maalta kulkeutuva partikkelimainen aines.



Hankkeessa parannettiin myös vesien- ja merenhoidon toimenpiteiden suunnittelua tukevien työkalujen toimintaedellytyksiä. Hankkeessa kehitettiin edelleen jo käytössä olevia ravinnekuormituksen arviointityökaluja, harmonisoitiin niiden toimintaa ja tuotettiin pohjaa uusien arviointimenetelmien kehittämiseksi mm. tietoaineistojen integraation ja kaukokartoituksen avulla. Hanke pohjautui Saaristomeren tilan parantamiseen tähtäävään aiempaan työhön ja pyrki täydentämään sitä mahdollisimman tehokkaalla ja tarkoituksenmukaisella tavalla.

Hankkeessa tehtiin kenttätutkimuksia eri tutkimusalueilla hyödyntäen, mallinnusta, kaukokartoitusta ja tutkimusaineistojen integraatiota. Hanke perustui laajaan kotimaisten tutkimustoimijoiden ja viranomaisten yhteistyöhön rannikkovesien suojelun tietoperustan vahvistamisessa. Hanketta koordinoi Suomen ympäristökeskus ja siihen osallistuivat Geologian tutkimuskeskus, Ilmatieteenlaitos, Helsingin yliopisto, Turun yliopisto, Varsinais-Suomen Elinkeino-, liikenne ja ympäristökeskus sekä Åbo Akademi. Hankkeessa hyödynnettiin myös laajalti FINMARI tutkimusinfrastruktuuria.

Tässä raportissa kuvataan MAAMERI-hankkeen toteutuneet hanketoimet sekä hankkeen keskeiset tulokset suhteessa hankkeen tavoitteisiin. Koko hankkeen kesto oli 34 kk. Raportti on koostettu hanketoimijoiden yhteistyössä ja se noudattaa pääosin hankesuunnitelman rakennetta.

Hankkeen tuloksia voidaan hyödyntää myös muiden rannikkoalueiden tilan parantamiseen suuntaavien toimenpiteiden suunnittelussa ja tilan paranemisen seuraamisessa esimerkiksi mallijärjestelmän ja kaukokartoitusmenetelmien kehityksen, ja maalta tulevan kuormituksen paremman ymmärtämisen kautta. Ravinteiden kokonaiskuormitusmallin osalta syötteiden ja parametrien tarkentaminen tarkentavat mallin antamia tuloksia ja parantavat mallien toimintaa ja hyödyntämismahdollisuuksia muillakin merialueilla.

Hankkeen toiminta

Hankkeen kulku

Hankesuunnitelman mukaisesti hankkeen alkupuolella painoutuivat kenttämittaukset sekä niihin liittyvät laboratorioanalyytit. Kenttätutkimuksia tehtiin erityisesti osioissa 2 (Fosfori rannikko-avomerijatkumoilla), 3 (Rehevöitymisen ekosysteemivaikutukset ja fosfori eliöstössä) ja 4 (Virtaukset ja vedenvaihto). Hankkeen kenttätutkimukset etenivät suunnitelman mukaisesti ja hanketoimijat ovat yhdessä käyttäneet mta Arandaa sekä kohdennetuilla hankkeen tutkimusmatkoilla että muilla Saaristomerelle suuntautuneilla tutkimusmatkoilla. Geologian tutkimuskeskuksen mta Geomarilta, Helsingin yliopiston mta Augustalta sekä Turun yliopiston mta Aurelialla tehtiin tutkimuksia sisä- ja välisaaristossa jokisuilta avomerelle päin.

Paimionlahti sekä Halikonlahti ovat olleet intensiivisiä tutkimusalueita, joissa myös Åbo Akademi ja Turun yliopiston Saaristomeren tutkimuslaitos ovat tehneet hankesuunnitelman mukaisia kenttätutkimuksia. Hankesuunnitelman mukaiset kenttätutkimukset tapahtuivat kesällä 2020, loppukesällä ja syksyllä 2021 sekä Arandalla vielä keväällä 2022. Kerättyjen näytteiden laboratorioanalyytit jatkuivat syksyyn 2022 saakka.

Hankkeen osioiden 1, 5 ja 6 (valuma-alue prosessit, tietoaineistojen integraatio ja mallien kehittäminen ja mallituotteet) suunniteltu työ oli osin sidottu kenttätöiden aikatauluun sillä



mallinnustyökalujen tietopohjan vahvistaminen edellyttää hankkeen kenttätutkimusten tulosten valmistumista. Mallien kehityksen ja mallituotteiden osalta (6) työ painottui hankkeen loppupuolelle syksystä 2021 vuoden 2022 loppuun. Näissä osioihin sisältyi myös kenttätöiden aikataulusta riippumatonta työtä, joka aloitettiin etenkin osioissa 5 ja 6 hankesuunnitelman mukaisesti.

Hankkeen koordinaatio ja sisäinen viestintä

Hankkeen koordinaatio toimi suunnitellun mukaisesti, hankekokouksia on järjestetty raportointiaikana 6 kpl ja niiden lisäksi lukuisia hanketoimijoiden välisiä työkokouksia. Hanketoimijoiden yhteydenpito on kokouksien lisäksi ollut tiivistä. Hankkeen yhteydenpito ja työskentely on pääosin tapahtunut Teams-alustaa hyödyntäen. Suunniteltuja kokouspäiviä ei hankeaikana voimassa olleiden pandemiarajoitusten vuoksi voitu juurikaan järjestää lähitapaamisina.

Hankkeen koordinaattori on osallistunut säännöllisesti KIPSI-hankkeen ohjausryhmän kokouksiin ja myös esitellyt MAAMERI-hanketta. Hanke tekee yhteistyötä lisäksi KIPSI-hankkeen seurantaosion kanssa sekä mm. Samassa vedessä-hankkeen kanssa. Hanketta on myös esitelty Vesiensuojelun tehostamisohjelman yhteisissä tilaisuuksissa.

Hankkeen ulkoinen viestintä

Hankkeen viestintä on ollut aktiivista ja monipuolista. Hankkeen viestinnällä on pyritty lisäämään tietoisuutta Saaristomeren meriympäristön tilasta ja sen parantamiseksi tehtävästä työstä hankkeessa ja sen ulkopuolella. MAAMERI-hankkeesta on pidetty esitelmää eri yhteyksissä (mm. Itämerihaasteen seminaarissa, FINMARI tutkijapäivillä), hankkeesta on tehty artikkeleita ja haastatteluja lehtiin sekä partnerit ovat viestineet ahkerasti sosiaalisessa mediassa. Hankkeen kaikki viestintätoimet on lueteltu liitteessä 1.

Ohjausryhmätyöskentely

Hankkeen ohjausryhmässä oli Tanja Suni (YM, PJ), Anna Bonde (Ely), Anssi Teppo (Ely), Antton Keto (YM), Laura Höijer (BSAG), Petri Liljaniemi (YM) ja Riikka Knaapi (MMM). Hanketta edustivat Hermann Kaartokallio (Syke) ja Riikka Punttila-Dodd (Syke). Ohjausryhmä kokoontui 4 kertaa. Lisäksi hanke lähetti ohjausryhmälle edistymisraportteja tarpeen mukaan. Ohjausryhmätyöskentely oli hankkeelle antoisaa ja ohjausryhmän ideoiden perusteella hankeviestintää kehitettiin merkittävästi.

Hankkeen keskeiset tulokset

Hankkeen tavoitteena oli parantaa vesien- ja merenhoidon toimenpiteiden vaikuttavuusarvioinnin edellytyksiä Saaristomeren alueella suhteessa vesiensuojelun tehostamisohjelman tavoitteisiin sekä pitemmällä aikavälillä vesien- ja merenhoidon tavoitteisiin. Konkreettisenä tavoitteena oli vähentää vesien- ja merenhoidon rannikkovesien hyvään tilaan kytkeytyvien kuormitusvähennystavoitteiden epävarmuutta Saaristomerellä vahvistamalla Rannikkomallin toimintaedellytyksiä. Hankkeessa tuotettiin merkittävää uutta lähtötietoa Rannikkomallin kehittämiseksi, mm. pohjan laatuun, fosforin pitoisuuksiin ja esiintymismuotoihin sekä virtaus- ja vedenvaihto-olosuhteisiin liittyen. Rannikko (FICOS)- ja kuormitusmalli (Coastal Load Response, CLR) sovitettiin toimimaan samassa



käyttöliittymässä, mikä tuotantokäyttöön tullessaan yksinkertaistaa tiedon tuottamista rannikon vesimuodostumilta. Olemassa olevia seuranta-aineistoja yhdistettiin ja hyödynnettiin mm. Datafuusio-osiossa ja kaukokartoitusta ja uusia seurantamenetelmiä kehitettiin ja hyödynnettiin Saaristomerien tilan seurannassa. Tulevaisuudessa kaukokartoitus- ja datafuusiotuotteiden käyttöä mallien kehittämisessä voidaan tältä pohjalta kehittää edelleen. Hanke tuotti uutta tutkimustietoa vahvistamaan Suomen vesien- ja merenhoidon järjestelmiä, jotta rannikkovesien tila olisi mahdollista parantaa hyväksi kustannustehokkailla toimilla. Hanke antoi edellytyksiä vahvistaa työkalujen ml. Saaristomerimallin tarkkuutta ja käytettävyyttä työkaluna ravinnekuorituksen ja vesiensuojelun tehostamisohjelman toimenpiteiden vaikutusten arvioinnissa tulevaisuudessa.

Hankkeen tähtäimessä oli erityisesti rehevöitymisen torjunta ja siihen liittyvien kuormitusta vähentävien toimien toteuttaminen valuma-alue –avomerijatkumolla Saaristomerien aluetta tapausmerkkinä hyödyntäen. Hankkeen konkreettisenä tavoitteena oli tukea pitkän aikavälin vesien- ja merenhoidon toimenpiteiden vaikuttavuusarviointia. Tätä tavoitetta edistettiin mm. tuottamalla partikkelimaisen fosforin jokikuorituksen kulkeutumisen ja fosforin vapautumisen kuvaus Saaristomerellä sekä tutkimmalla eliöyhteisöjen roolia fosforin varastoinnissa ja uusien biologisten fosforin saatavuutta kuvaavien indikaattorien kehitysedellytyksiä. Hankkeessa tutkittiin laajasti rehevöitymisen ekosysteemivaikutuksia rannikko-avomerijatkumoilla yleensä sekä ravinnekuorituksen ja sameuden vähenemisen vaikutuksia eliöyhteisöihin, erityisesti Paimionjoen rannikko-avomerijatkumolla. Fosforikuorituksen ja leväkukintojen muodostumisen edellytysten yhteyttä tutkittiin myös, erityisesti suhteessa fosforin kiertoon liittyviin mineralisaatio- ja hajoitusprosesseihin pohjilla ja vesipatsaassa. Tutkittu tieto ravinnekuorituksen vaikutusmekanismeista ja yhteydestä meren tilan muutoksiin sekä vaikutuksen ulottumisesta jokisuulta merelle on keskeistä vesien- ja merenhoidon toimenpiteiden vaikutusarvioinnille ja hanke on tuottanut ja tuottaa sitä tulevana vuosina merkittävästi.

Hankkeen työ jakautui hankesuunnitelman mukaisesti kuuteen työpakettiin, joiden keskeiset tulokset on esitelty alla.

1: Toimenpiteiden vaikutukset vesireiteissä ja fosforin valuma-alueprosessit

Hankkeen valuma-alueosiossa tehtiin läheistä yhteistyötä KIPSI-hankkeen seurannan kanssa ja seuranta tehtiin samanaikaisesti kipsin levityksen kanssa. Virtavesien näytteenotto on vaativaa ja valitettavasti suunniteltu vesinäytteenotto ei toivotusti saanut kiinni korkean virtaaman jaksoja ja jatkuvatoimisen anturien tuottama aineisto oli pitkälti hylättävä epäluotettavana. Jatkuvatoimisen seurannan kilpailutus ja laadunvarmistus vaativatkin kehittämistä, jotta tuloksia voidaan käyttää paremmin hyväksi. Tarvasjoella, jossa kipsillä käsiteltiin 21.4 % peltoalasta, sameuden, kiintoaineen, hiukkasmaisen fosforin ja kokonaisfosforin keskimääräiset virtaamaan suhteutetut pitoisuudet pienenevät hieman enemmän kuin vertailualueilla, Savijoen yläosassa ja Paattistenjoella. Tämä saattaa selittyä kipsin peltolevityksellä. Kipsin levitysala muilla seurantakohteilla jäi toistaiseksi niin pieneksi, että vaikutusten havaitseminen oli käytännössä mahdotonta, kun otetaan huomioon vedenlaadun määrittäisiin liittyvät epävarmuudet. Kipsin vaikutusten arvioimiseksi tarvittaisiin jokiseurannan lisäksi valumavesien ja maan fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien seuranta peltolohkotasolla.



2: Fosfori rannikko-avomerijatkumoilla jokisuilta alkaen.

Hankeessa tehty tutkimus tarkensi huomattavasti kuvaa jokien kuljettaman partikkelimaisen aineksen fosforipitoisuudesta, koostumuksesta sedimentaatiosta ja hajoamisesta etenkin savisamean Paimionjoen joki-avomerijatkumolla. Myös Laajoki ja Halikonjoen estuaari olivat tutkimusten kohteina. Saaristomeren vesipatsaan ja pohjien fosforin pitoisuuksia ja esiintymismuotoja (ts. fraktioita) tutkittiin hankekeessa laajasti tutkimusalueiden matkoilla.

Jokiveden kuljettamasta kokonaisfosforista partikkelimainen orgaaninen fosfori muodosti yli 80 % sekä Paimion- että Laajoella kesällä 2021. Paimionjoen partikkelimaisen aineksen fosforipitoisuudet vastasivat rannikon läheisten pohjien pintasedimenttien pitoisuuksia, mutta heikosti sitoutuneen, alumiinioksideihin sitoutuneen ja erityisesti orgaanisen fosforin osuudet olivat pintasedimenttiä korkeampia. Kesällä ja keväällä otetut näytteet olivat fosforin fraktioiden suhteen samantyyppisiä, mutta keväällä hiukkasiin heikosti sitoutuneen ja pelkistyviin raudan oksideihin sitoutuneen sekä apatiittifosforin osuudet olivat suurempia, kun taas kesällä orgaanisen fosforin osuus oli suurempi. Hankekeessa myös tarkasteltiin, miten kipsin lisäys suoraan jokiveteen vaikuttaa partikkelimaiseen ainekseen. Kipsin lisäys Paimionjoen jokiveteen aiheutti partikkelimaisen aineen sakkautumista sekä keväällä että kesällä. Kipsin vaikutus sakkautumiseen oli voimakkainta kevätaikaan. Molekyyliutasolla kipsin lisäys aiheutti liuennun orgaanisen aineen molekyyliainojakauman siirtymistä kohti suurempia molekyyliä.

Paimionlahdelle kohdennettiin intensiivistä sedimenttinäytteenottoa. Tulokset osoittavat, että merkittävä osa Paimionjoen kuljettamaa savimateriaalia sedimentoituu ja akkumuloituu ylä-estuaarin alueella ja siten laimentaa orgaanisen aineksen pitoisuutta ylä-estuaarin sedimenteissä. Joen kuljettama labiili fosfori vaikuttaa ylä-estuaarin sedimentin fosforifraktioihin, kun taas saaristoon päin mentäessä orgaanisen autoktonisen aineksen merkitys kasvaa. Rauta- ja mangaanioksideihin sitoutunut P sekä labiili orgaanisen fosforin pitoisuus yleensä laskee syvyyden myötä joki-avomerijatkumon sedimenteissä. Tämä viittaa siihen, että labiili orgaaninen aines hajoaa hapettomassa mineralisaatiossa sedimentin pinnan alla. Fosforin fraktiot eivät eronneet toisistaan kahden peräkkäisen vuoden välisessä vertailussa viidellä näytepaikalla. Halikonlahdella kokonaisfosforin ja mobiilin fosforin fraktioiden vuo pohjaan vastasi hyvin Saaristomereltä aiemmin raportoituja ja oli yhtenevä sedimenttikeräintutkimuksista Suomen ja Ruotsin saaristoalueilta saatujen tulosten kanssa.

Sedimentin huokosveden tutkimukset Paimionlahdella vahvistavat, että anaerobiset mineralisaatioprosessit ovat aktiivisia sedimentissä jokisuulta avomerelle asti. Tuloksissa huokosveden fosforin pitoisuudet korreloivat paremmin ammonium-typen pitoisuuden kuin liuennun raudan (Fe) pitoisuuden kanssa. Tämä viittaa siihen, että orgaanisen aineksen hajoaminen vaikuttaa enemmän fosforin huokosvesipitoisuuksiin kuin oksidimineraalien pelkistys. Hajoamisen intensiteetti näyttää olevan lateraalisesti heterogeenistä, eikä näytä selkeitä joki-avomerijatkumon suuntaisia trendejä havaittu.

Maameri-hankkeen neljällä MTA Arandan tutkimusmatkalla 2020–2022 analysoitiin ravinnetilannetta vedessä yhteensä 41 yli 25 metriä syvältä näytepisteeltä, joista suurin osa oli uusia. Liuennut epäorgaaninen fosfori DIP muodosti keskimäärin noin 50 % kokonaisfosforista. Partikkelimaisen orgaanisen fosforin suurimmat pitoisuudet löytyivät rannikon tai jokisuun läheltä otetuilta näytepisteiltä tai syvien alueiden resuspensiolle herkän pohjan yläpuolelta. Partikkelimaisen orgaanisen P:n osuus TP:stä oli kaikissa näytteissä keskimäärin noin 18 %. Liuennut orgaaninen fosfori DOP muodosti keskimäärin noin 33 % kokonaisfosforista. DOP-pitoisuus oli yleensä korkeimmillaan



veden pintakerroksissa aina noin 20–40 m syvyyteen asti ja pieni pohjaa kohti. Saaristomeren poikki Utöstä pohjoiseen kulkevalla linjalla Houtskararin, Iniön ja Kustavin länsipuolitse aina Uudenkaupungin tasolle asti (ns. IU-asetat) arvioitiin fosforipitoisuuksien vaihtelua vedessä neljänä vuodenaikana saman vuoden sisällä sekä yhdellä asemalla kolmena vuonna. Kokonaisfosforin ja DIP:in pitoisuudet olivat pääsääntöisesti suurimmillaan syyskuussa ja DOP:in pitoisuudet olivat pienimmillään elokuussa. Vuosien välinen vaihtelu näkyi lähinnä eri muotojen välisissä suhteissa.

Maameri-hankeessa tuotettiin uutta tietoa ennestään tuntemattomien alueiden merenpohjan maalajeista, erityisesti hienojakoisten kertymäpohjien sijainnista sekä 39 rannikon tai avomeren näytepisteen sedimentin P:n liukoisuus- ja sitoutumismuodoista. Tulosten mukaan suurimmat happiolosuhteisiin reagoivan P:n pitoisuudet löytyvät sisäsaaristosta, Mynälähdän eteläpuolelta ja Kemiön itäpuolelta sekä Kemiön ja Hankoniemen välisestä saaristosta. Labiiliin orgaanisen P:n pitoisuudet ovat puolestaan korkeimmillaan Mynälähdän sekä Korppoon ja Nauvon eteläpuolisen välisaariston alueella. Nämä molemmat mahdollisesti kiertoona palaavat P-muodot huomioiden suurimmat rannikkomallin sisäisen kuormituksen syötteen arvioon vaikuttavat P-pitoisuudet löytyvät Mynälähdän eteläpuolisesta saaristosta sekä Kemiön ja Hankoniemen välisestä saaristosta. Lisäksi kartalla erottuvat Kumlingen pohjoispuolen sekä Saaristomeren pohjoisosan suuremmat pitoisuudet.

Verrattaessa uusia tuloksia aiempaan tietoon pelkistyviin raudan oksideihin sitoutuneesta fosforista, havaitaan hankkeessa tuotetun tiedon korostavan Kemiön saaren ja Hankoniemen välisen saariston sekä Kemiön saaren länsipuolen fosforipitoisuuksia. Lisäksi korostuvat Ahvenanmaan koillis-, itä- ja eteläpuoliset alueet. Mahdollisesti kiertoona palaavan orgaanisen P:n alueellisessa jakaumassa puolestaan korostuvat Saaristomeren pohjoisosa, Rymättylän ja Nauvon välinen saaristo sekä Nauvon eteläpuolinen saaristo. Yleensä ottaen mallialueen pohjois- ja eteläreunan sedimenttien tarkentuneet tiedot näkyvät tuloksissa. Tarkentuneet tiedot Saaristomeren merenpohjan maalajeista ja fosforin esiintymismuodoista auttavat tarkentamaan tulevaisuudessa rannikkomallin sisäisen fosforikuormituksen syötteen arviota Saaristomerellä.

3: Fosforin käyttö ja varastoituminen eliöiden biomassaan, ravinnesuhteet ja rehevöitymisen ekosysteemivaikutukset

Jokiveden mukana valuma-alueelta tuleva ravinnekuormitus ja sameus vaikuttavat rannikkoekosysteemiin monin tavoin. Ravinnepitoisuudet pintavedessä koko Paimionlahden joki-avomerijatkumolla kesällä 2020 ja 2021 vaihtelivat vähemmän kuin pohjanläheisessä vedessä mikä saattaa heijastaa aktiivisia pohjan mineralisaatioprosesseja. Sekä kasviplanktonbiomassa että partikkelimainen orgaaninen fosfori olivat korkeampia lähellä jokisuuta kumpanakin vuonna, 2021 pohjanläheinen korkea partikkelimaisen fosforin pitoisuus joillakin näytepisteillä voi viitata aktiiviseen resuspensioon sedimentistä. Sedimentin hapenkulutus Paimionlahden tranksektilla heijasti pohjanläheisen veden happiolosuhteita siten että vähähappisissa oloissa vuonna 2020 myös hapenkulutus väheni. Ravinnevuon sedimentistä veteen oli samankaltaista happiolosuhteista riippumatta lukuun ottamatta lähinnä Paimionjoen suuta sijaitsevaa näytteenottopistettä MM7, jolla lähes hapeton tilanne aiheutti suurentuneen fosfaatin vuon sedimentistä veteen. Tulokset osoittavat, että Paimionjoki kuljettaa kasvihuonekaasuilla kyllästynyttä jokivettä kilometrien etäisyydelle jokisuusta myös kesän matalan virtaaman aikana. Paimionlahden joki-avomerijatkumolla ilmastoaktiivisten kaasujen (CO₂, CH₄ ja N₂O) pitoisuudet olivat yleisesti korkeimpia jokisuulla, ja jokivesi kuljetti liuenneita kaasuja (CO₂, CH₄) jopa 10 km etäisyydelle jokisuusta kun taas korkeat N₂O-pitoisuudet tasaantuivat noin 1 km päässä. Arvioimme jokisuun kasvihuonekaasujen päästöt noin 80-



kertaisiksi (2.79–3.30 g CO₂-ekvivalenttia m² d⁻¹) verrattuna uloimpaan avomeripisteeseen (0.04 g CO₂-ekvivalenttia m² d⁻¹).

Jokikuormituksen vaikutuksia (suolapitoisuus, ravinnepitoisuus, sameus ym.) monimuotoisuuteen tarkasteltiin Paimionlahden rannikko-avomerijatkumolla sekä kasvillisuutta (levät ja vesikasvit) että rakkolevän ja rihmalevien joukossa eläviä selkärangattomia eliöitä tutkimalla. Tulosten perusteella jokiperäinen ravinnekuormitus muokkaa sekä kasvi-, levä- että eläinlajistoa Paimionlahden tutkimusjatkumoilla. Ravinnekuorman lisäksi jokivesi alentaa veden suolapitoisuutta ja pohjoisimpana jokisuun lähellä kasvaa pääosin makean veden kasveja, jotka viihtyvät pehmeillä, rehevöityneillä sedimentaatiopohjilla. Merelliset kasvi- ja levälajit rajoittuvat ulkosaaristoon. Rakkohaurun seassa elävät eläinyhteisöt erosivat sisä-, ulko- ja välisaariston välillä, rihmalevän seassa elävät yhteisöt erosivat sisä- ja väli/ulkosaariston välillä mutta eivät väli- ja ulkosaariston välillä. Rihmaleväyhteisöt erosivat myös tutkimusvuosien (2020 ja 2021) välillä. Suolapitoisuuden vaihtelun, ravinteiden ja samennuksen erillisaikutuksia eliöstöön ei voida aineistosta arvioida, mutta rihmalevän ja pintaveden ravinnepitoisuuden korreloiminen kertoo ravinnekuormituksen vaikutuksista lajistoon. Vieraslaji, saksisiira *Sinelobus vanhaarenia* tavattiin sekä rakkolevä- että rihmaleväfaunasta. Näiden löydösten ja muiden tutkijoiden havaintojen perusteella laadittiin artikkeli lajin levinneisyydestä Suomen rannikkoalueella (Gagnon et al. 2022).

Pohjaeläinyhteisöjen lajimäärä, biomassa sekä ravinne- ja hiilipitoisuudet nousevat jokisuulta ulkosaaristoa kohti. Pohjaeläinten ravinnon saatavuus paranee ulkosaaristoa kohti mentäessä ja olosuhteet sisempänä estuaarissa eivät ole pohjaeläimistölle ihanteelliset. Tulokset osoittavat, että hyvinvoivat pohjaeläinyhteisöt voivat toimia tilapäisinä hiilen sekä ravinteiden sitojina, kun taas huonokuntoiset pohjaeläinyhteisöt eivät sido ravinteita, vaan palauttavat niitä nopeasti kiertoon. Makrolevien ravinnepitoisuuden käyttö indikaattorina tutkittiin ja tulosten mukaan pitoisuus ahdinparrassa heijastaa osittain veden pitkäaikaisia ravinnepitoisuuksia mutta sen käyttö indikaattorina ei voi suoraan korvata vedenlaatumittauksia. Indikaattoritiedolla voidaan kuitenkin täydentää harvakseltaan kerättyä vedenlaatutietoa etenkin laajoilla, dynaamisilla saaristoalueilla.

Hankkeen tulokset viittaavat aiemmin tiedetyn mukaisesti fosforin lisäksi myös typen merkitykseen kasviplanktonituotantoa rajoittavana ravinteena ulko- ja välisaaristossa. Myös vesipatsaassa mikrobien solunulkoiset entsyymien välittämät mikrobihajotusprosessit, voivat olla merkittävä tekijä ravinteiden kierrätyksessä Saaristomerellä. Vapaa solunulkoinen alkalinen fosfataasi vedessä muodosti merkittävän osan orgaanisen fosforin hajotusaktiivisuudesta etenkin kevät aikana.

4: Virtaukset ja vedenvaihto

Saaristomeren monimutkainen batymetria ja rantaviiva ohjaavat virtauksia ja vaikuttavat niiden voimakkuuksiin. Keskimääräiset virtausnopeudet vaihtelevat alueittain ollen 8–16 cm/s noin 5 m syvyydeltä mitatussa, pinnanläheisimmässä kerroksessa. Mittaukset näyttävät virtaussuuntien olevan melko pysyviä, ja voimakkaiden yli 20 cm/s virtausten kesto vaihtelee muutamista tunneista useisiin päiviin. Kapeissa ja syvissä kanjoneissa virtausnopeudet ovat usein avoimia alueita huomattavasti voimakkaampia ja tietyissä olosuhteissa havaittu virtausnopeus ylitti 100 cm/s. Mittauksissa havaittiin myös alueita, joilla pohjanläheiset virtausnopeudet olivat kesän lämpötilakerrostuneisuuden aikaan huomattavasti pienempiä ylemmän kerroksen virtauksiin nähden. Paikoin virtaukset voivat toisaalta olla pohjakerroksessa pintavirtauksia voimakkaampia.



Saaristomeren pohjois- ja eteläosan virtausolosuhteet eroavat toisistaan selkeästi. Etelässä virtauksien suuntajakauma on laajempi ja painottunut itä-länsisuuntiin. Pohjoisosien kapeammissa kanjoneissa virtaukset ovat pääosin etelä-pohjoissuuntaisia. Pohjoisosissa virtausnopeudet ovat myös selvästi eteläosaa voimakkaampia.

Voimakkaiden virtausten osalta analysoitiin niitä synnyttäviä tekijöitä. Osa voimakkaista virtauksista syntyy paikallisten voimakkaiden tuulien vaikutuksesta, mutta mukana on myös laajemman skaalan ilmiöiden, kuten esim. Itämeren vedenkorkeusvaihtelun aiheuttamia virtauksia. Voimakkaiden virtausten syntymekanismien osalta tarvitaan vielä lisää tutkimusta, jossa tarkastellaan dynamiikkaa Saaristomeren aluetta laajemmin.

Paikallisesti ja ajallisesti vaihtelevaa havaintoaineistoa voidaan täydentää hyvin toimivalla virtausmallilla, jolloin saadaan kokonaisvaltaisempi kuva Saaristomeren virtausolosuhteista. Tämän vuoksi hankkeessa käytettiin NEMO-virtausmallia Saaristomeren läpi kulkevan pääaltaan ja Selkämeren vedenvaihdon tutkimiseksi. Mallianalyysin perusteella Saaristomerellä kuljetus oli pintakerroksessa keskimäärin etelään. Pohjakerroksessa kuljetuksen suunta vaihteli Saaristomeren pohjois- ja eteläosien välillä: pohjoisessa kuljetus oli keskimäärin etelään ja etelässä pohjoiseen.

5: Tietoaineistojen integraatio ja yhteiskäyttö.

Hankkeessa kehitettiin kaukokartoitusmenetelmien käyttöä Saaristomeren seurannassa. Satelliittihavaintojen osalta työpaketin päätavoitteet saavutettiin Maamerihankkeen aikana hyvin. Hankkeen aikana kehitetyt menetelmät vuositason fosforikarttojen laatimisesta osoittautuivat toimivaksi tavaksi kuvata jokivesien tuomaa ravinnekuormaa Saaristomeren ravinnekuormitukseen liittyvien olennaisimpien jokien osalta. Hankkeessa keskityttiin erityisesti tuottamaan aineistoja, joiden kautta Paimion-, Uskelan-, Aura- ja Mynäjoen ravinnekuorman vaikutusten havainnoimista voidaan jatkaa alueellisesti ja ajallisesti kattavalla tavalla. Satelliittihavaintojen aineistokoosteissa keskityttiin vuositason tarkasteluihin ja Saaristomeren alueelle lisättiin satelliittihavaintojen asemasijaintoja yhteensä 48 kappaletta tulevaa seuranta varten. Asemat sijoitettiin tuottamaan havaintoja olennaisten jokien vesireiteille. Lisäksi hankkeessa kehitetyt jokivesien vaikutusaluekartat tutkimusjokien suualueilla ovat hyödyllisiä täsmennetyn näytteenoton suunnitteluun ja vaikutusalueiden arviointiin.

Maameri-hankkeen aikana satelliittihavaintojen ja hankkeen eri osa-alueiden mallinnuspakettien yhteistyö jäi kevyemmäksi, kuin mitä hakemusvaiheessa toivottiin. Osin tämä liittyi siihen, että mallien kalibrointiajanjakso (vuodet) eivät olleet samoja, kuin miltä ajanjaksolta satelliittihavaintoja on saatavilla moderneilla instrumenteilla (Copernicus-ohjelman satelliittisarjojen havainnot alkavat pääosin vuodesta 2016). Satelliittihavaintojen ja mallinnukseen liittyvää yhteistyöhön kannattaisi kuitenkin jatkossa varata aikaa ja resursseja, koska yhteistyö jäi vähiin osittain myös ajanpuutteen ja aikataulujen eriaikaisuuden vuoksi pienemmäksi kuin oli tarkoitus. Jatkohankkeessa tähän on hyvät edellytykset, koska aineistoa on hankkeessa kerrytetty runsaasti ja esimerkiksi FICOS-malli on kehittynyt hankkeen aikana. Myös pintalämpötila-aineiston hyödyntäminen mallien lähtötietoina olisi luonteva seuraava askel malliyhteistyössä.

Hankkeessa tuotettiin satelliittihavainnoista tulkittua kokonaisfosforiaineistoa, joka kannattaisi ottaa yhdeksi aineistoksi niille satelliittiseuranta-asemille, joita hankkeen aikana lisättiin (48 kappaletta). Siten voidaan kerryttää jatkossa tietoa kokonaisfosforin vaihtelusta eri vuodenaikoina Saaristomeren eri osissa. Satelliittiseurannan käyttö edellyttää vielä tarkempia vertailuja kokonaisfosforin osalta



asemanäytteenoton (VESLA-asetat ja tutkimuksellinen aineisto) ja satelliittihavainnoista tulkitun kokonaisfosforin välillä. Vuositason tarkasteluissa aineistot vastaavat hyvin toisiaan. Satelliittihavaintoihin perustuvaa tietoaineistoa kannattaa jatkossakin kerryttää Saaristomeren alueella ja suunnitella sen monipuolista hyödyntämistä. Myös jokivesien vaikutusalueiden määrittämiseen suunnattuja linjamaisia aineistoja jokien purkupisteeltä lähtien kannattaa kehittää eteenpäin ja ottaa käyttöön jatkohankkeen aikana.

Tässä osiossa tuotettiin myös kattava kuva sameuden ja klorofylli-a:n vaihtelusta Mynä- ja Paimionjoen edustalla ja laajemmin koko Saaristomerellä v. 2019-2021. Työssä koottiin ja harmonisoitiin Saaristomeren sekä erityisesti Mynälahden ja Paimionjoen edustan sameuden ja klorofylli-a:n Vesla-, EO- ja MaaMeri-aineistot SYKE:n DataFuusio-järjestelmään SDFS ja visualisoitiin kartta- ja aikasarjakuviksi. DataFuusio-järjestelmään kehitettiin myös assimilaatioalgoritmi, jonka avulla havainnot syötetään sameuden kulkeutumismalliin (IL). Aineistoista interpoloitiin päivittäiset vedenlaatukartat ja niiden epävarmuusestimaatit tarkalla resoluutiolla. Sameus vaihtelee kesän aikana voimakkaasti tuuliloista riippuen ja kulkeutuu ajoittain malalta ranta-alueelta kohden sisä- ja ulkosaaristoa (Kihti), ja päinvastoin. Lisäksi tutkittiin mahdollisuutta tarkentaa interpolatio-prosessia assimiloimalla vedenlaatu dataa virtaus-vedenlaatumalliin. Tulosten perusteella saadaan vankka yleiskuva vedenlaadun vertailuolosuhteista ennen kipsikäsittelyä ja luodaan edellytykset vaikutusten pitkäaikaiselle seurannalle ja mallintamiselle.

6: Saaristomerimallin kehittäminen ja mallituotteet vesien- ja merenhoitoon.

Hankkeessa tuotettiin uutta tarkkaa merenpohjan maalajitietoa Saaristomereltä. Aineistoa on hyödynnetty jo hankkeen aikana mm. sedimenttinäytepaikkojen valinnassa, maalajimallinnuksen taustatietona ja rannikkomallin sisäisen fosforikuormituksen syötteen arvion tarkentamiseen tarvittavien mahdollisesti kierto- ja palaavien fosforimuotojen pitoisuuksien alueellisten jakaumien arvioinneissa. Ennen hankkeen toteuttamista tiedot merenpohjan koostumuksesta olivat varsin puutteellisia Saaristomeren alueella, erityisesti sen pohjois- ja länsiosissa. MAAMERI projektin myötä tietoa merenpohjan maalajeista on kartutettu näiltä ”valkoisilta” alueilta, erilaisista sedimentaatioympäristöistä kuten jokisuistoista, suojaisesta sisäsaaristosta, merenpohjan kanjonien alueilta sekä avoimesta ulkosaaristosta. Merenpohjan maalajiaineisto osoittaa Saaristomeren merenpohjan rikkonaisuuden. Merenpohjan laatu ja muut ympäristötekijät voivat vaihdella Saaristomerellä hyvinkin suppealla alueella. Vaikka tietoa Saaristomeren merenpohjan kerrostumista ja niiden koostumuksesta kartutettiin hankkeessa, niin pinta-alallisesti tiedon puutteet ovat vielä suuret. Erityisesti matalien alueiden (0–5 metrin veden syvyys) tiedon puute on edelleen suuri. Merenpohjan geologinen tieto on olennainen osa merenhoidon ja merialueiden kestävä käytön suunnittelua. Meri- ja rannikkoalueiden käyttöpaineiden kasvaessa myös monipuolisen tiedon ja aineistojen tarpeet meriympäristöstä kasvavat.

Hankkeessa laadittiin uusi Saaristomeren maalajimalli on kehitetty yhteistyössä muiden tutkijoiden kanssa. Maameri -projektissa on keskitytty erityisesti maalajiluokitukseen ja sen soveltavuuteen muihin analyyseihin. Määritetyt kolme maalajiluokkaa (orgaanisainepitoiset sedimentit, vanhemmat savet ja kitkamaalajit) kuvastavat erityisesti orgaanisainepitoisen sedimentin määrää ja oletettavasti myös eroja fosforipitoisuudessa. Vastaavaa luokitusta ei ole käytetty alueen maalajimalleissa aiemmin. Temaattisen tarkentumisen lisäksi aineiston spatiaalinen tarkkuus ja kattavuus ovat parantuneet. Aiemmin tarkkaa, 1:20 000/1:100 000, kartoitettua aineistoa oli

saatavilla vain rajatulta alueelta ja karkeampaa 1:1 000 000 koko alueelta. Maameri-projektissa aineistoa työstetty 25 m pikselikoolla ja mallin mittakaava on tarkimmillaan noin 1:100 000. Malli kattaa koko tutkimusalueen ja sen tarkkuus on aineiston perusteella noin 70 % luokkaa. Maalajimallia voi hyödyntää ainakin muissa orgaanisainespitoisen sedimentin tarkasteluissa ja mallinuksissa sekä näytteenotossa.

Hankkeessa tuotettiin myös merkittävästi uutta tietoa kerrostumisnopeuksista Saaristomerellä. Sedimentaationopeustietoa tullaan hyödyntämään tulevaisuudessa tarkentamaan rannikkomallin sisäisen fosforikuormituksen syötteen arvion laatimisessa. Tutkituilla asemilla sedimentaationopeudet olivat suhteellisen suuria, vaihdellen kuitenkin huomattavasti välillä 0.01–1.87 cm/vuosi, keskimääräinen arvo 0,66 cm/vuosi. Työssä tunnistettiin ympäristömuuttujien ja mallinnuksen perusteella orgaanisipitoisiin pohjiin sovelluskelpoiset neljä eri vyöhykettä, jotka edustavat jossain määrin eri maksimaalisia sedimentaationopeuksia: Klusteri 1 sijaitsee pääsääntöisesti ulkomerellä ja syvemmillä vesialueilla ja sedimentaationopeudet vaihtelevat 0–1.47 cm/v välillä (mediaani 0.46). Klusteri 2 rajaa kitkamaalajien vallitsevia matalia alueita ulkosaaristossa, joilta ei ole sedimentaatiopohjien vähäisyyden vuoksi sedimentaationopeushavaintoja. Klusteri 3 on välisaaristossa ja sedimentaationopeus on alhainen, välillä 0.10–1.13 cm/v (mediaani 0.30). Klusteri 4 sijaitsee sisäsaaristossa rannan ja jokisuiden lähellä ja sen sedimentaationopeudet ovat korkeimmat (0.28–1.87 cm/v, mediaani 0.84).

Hanke tuotti myös uutta tietoa merenpohjan sedimenttien koostumuksesta, mm. hiilen, typen ja fosforin sekä haitallisten aineiden esim. raskasmetallien pitoisuuksista sedimenteissä. Myös kokonaisfosfori, -typpi, ja hiili dataa on jo hyödynnetty hankkeen aikana. Haitallisten aineiden kuten raskasmetallien pitoisuudet merenpohjan pintakerrostumissa ovat yleensä laskeneet viime vuosikymmeninä. Useilla alueilla ovat esimerkiksi kadmiumin, lyijyn ja sinkin pitoisuudet syvemmissä sedimenttikerrostumissa kuitenkin edelleen melko suuria. Vaikka merenpohjan sedimenttien sisältämistä haitallisista aineista on suhteellisen hyvä yleiskäsitys, on tietämys puutteellista näiden pilaantuneiden pohjasedimenttien haitallisten aineiden tarkemmista pitoisuuksista, tarkemmasta alueellisesta sijainnista ja laajuudesta.

Hankkeessa muokattiin Coastal Load Response (CLR)-malli toimimaan Saaristomerimallin kanssa samassa palvelinympäristössä ja käynnistymään automaattisesti Saaristomeren alueen FICOS-malliajoja tehdessä. CLR:n laskeman tulokset ovat automaattisesti mukana uusina muuttujina mallin kehitysversion käyttöliittymässä. Mallin perusversioon muuttujat tulevat näkyville lähitulevaisuudessa FICOS-mallin seuraavan isomman päivityksen yhteydessä. CLR-malli pystytään ajamaan sellaisille sisä- ja välisaariston vesimuodostumille, jotka ovat FICOS-ajossa mukana eheinä eli tihentämättöminä, ja joille on simulaatiosta saatavilla kokonaisten vuosien kattavaa syöttödataa.

FICOS-CLR-malliyhdistelmää on hankkeen aikana alustavasti testattu rannikon läheisimmässä vesimuodostumissa. Teknisesti malliyhdistelmä toimii, mutta yhdistelmän kalibrointi ja validointi vaatii vielä työtä tulevaisuudessa tulosten luotettavuuden varmistamiseksi. Erityisesti on tarkasteltava minkä tyyppisissä vesimuodostumissa malliyhdistelmää on järkevä käyttää. Jatkossa voidaan käyttää MAAMERI-hankkeessa tuotettuja satelliittiaineistoja (ravinteista) ja a-klorofyllistä vertailuarvoina CLR:n validoinnissa. Samoin hankkeessa tarkennettujen sedimentaationopeuksien (GTK) käyttö parantaa edelleen mallien luotettavuutta.



Tietoaineistot

Hankkeessa on tuotettu merkittävä määrä uusia tietoaineistoja, jotka joko tallennetaan julkisiin tietokantoihin (SYKE VESLA, VELMU, GTK HAKKU, EMODNet Geology) tai ovat saatavilla SYKEN rajapinnoilta tai TARKKA-palvelusta (satelliittiaineistot) pyynnöstä. Hankkeen tietoaineistoista tallennetaan metadatakuvaukset SYKEN metadatatärjestelmään, josta niiden sisältö- ja saatavuustiedot ovat haettavissa.

Osa aineistoista, esimerkiksi maalajimalli odottaa julkaisulupaa ja osa voidaan toimittaa pyynnöstä tieteellisen julkaisun jälkeen (enintään 2 vuotta hankkeen päättymisestä) tai ne tallennetaan julkisiin kansainvälisiin tietovarantoihin (PANGAEA) julkaisun yhteydessä. Osa pyynnöstä saatavista aineistoista on varsin kookkaita ja siksi vain pyynnöstä toimitettavia.

Tulevaisuuden tietotarpeet

Vaikka MAAMERI-hankkeessa tuotettiin valtava määrä uutta tietoa, hankkeen aikana nousi esiin ja käydyissä keskusteluissa tunnistettiin myös tulevia tutkimustarpeita. Myös muilla rannikkoalueilla on tietopuutteita, joihin voitaisiin vastata hankkeen kaltaisella yhdenmetyllä tutkimustoiminnalla.

- Sedimenttien pintakerroksen fosforin sitoutumis- ja liukoisuusmuotojen vuodenaikaisvaihtelua erityyppisillä ja happiolosuhteiltaan vaihtelevilla pohjilla (tuettuna pohjan yläpuolisen veden, huokosvesien ja fluksien analysoinnilla).
- Matalien pohjien merkitys fosforin sisäisessä kuormituksessa
- Jokivesien kuljettaman partikkeliaineksen fosforin laadun kattavampi alueellinen (eri joet) ja ajallinen (eri vuodenaajat) tutkimus mukaan lukien absorptio-ominaisuuksien tarkastelu partikkelien adsorboiman fosforin vapautumisen ja partikkelien mineralisaation selvittämiseksi.
- Tarvittaisiin enemmän tietoa siitä, miten kipsi vaikuttaa fosforin sitoutumiseen vesistöissä kulkeutuvassa ja sedimentoituvassa aineksessa. Sen avulla voitaisiin arvioida, miten kipsikäsitteily muuttaa eliöille käyttökelpoisen fosforin määrää suhteessa sedimentoituvan fosforin kokonaismäärään.
- Monipuolisempi järjestelmällinen pohjan maalajien näytteenotto ja havainnointi sekä muiden merialueiden sedimenttien fosforin liukoisuus- ja sitoutumismuotojen tutkiminen pahimpien tietoaaukkojen täyttämiseksi ja Rannikkomallin sisäisen kuormituksen syötearvion mahdollistamiseksi: Selkämeri, Merenkurkku, Perämeri.
- Satelliittihavainnoinnin kehittäminen maalta tulevan sameus- ja fosforikuormituksen jatkuvassa seurannassa sekä entistä tiiviimpi yhteistyö satelliittihavainnoinnin ja mallien kehitystyön välillä.
- Saaristomeren ja muiden Suomen rannikkoalueiden kuormitusarvioiden kannalta on tärkeää, että nykyisten virtausmallisysteemien jatkuvaan ylläpitoon ja päivityksiin varataan riittävästi resursseja. Saaristomeren mallinnuksessa seuraavat tärkeimmät kehityskohteet



ovat NEMO-virtausmallin laskentahilan ja syvyystietojen tarkistus väli- ja sisäsaaristossa, pohjakerroksen ja veden kerrostuneisuuden kuvauksen kehittäminen sekä mallin reunaehtojen päivitys, kun tiheämmän resoluution uusanalyysi on saatavilla. Virtausmallin kehitystarpeiden lisäksi NEMO-virtauskenttien käyttöönotto Saaristomeren FICOS-mallissa edellyttää kehitystyötä myös FICOS-mallin osalta. Saaristomereltä olisi tarpeen saada jatkuvia virtausmittauksia alueen läpi kulkevista syvistä kanavista.

Seurantaehdotus

Hankkeessa työskennelleet asiantuntijat tekivät Ympäristöministeriön pyynnöstä Saaristomerelle ehdotuksen seurannasta, [jolla millä](#) kipsikäsittelyn vaikutuksia voi [talsiindeaan mitata tarkkaille](#) tulevien vuosien aikana. Ehdotuksessa todetaan, että ensimmäiset kipsikäsittelyn vaikutukset todennäköisesti näkyvät jokiseurannassa sameuden vähenemisenä. Lisäksi sisäsaariston sameuden väheneminen voi heijastua pohjan kasvillisuudessa ja fosforikuormituksen väheneminen klorofyllin sekä sinileväkukintojen vähenemisenä.

Seurantaa ehdotetaan painotettavan jokien intensiiviseurantaan sekä kaukokartoitusmenetelmiin, joita on kehitetty MAAMERI-hankkeessa (työpaketti 5). Jokiseurannan automaattimenetelmien ja rannikkoseurannan tiheää mittaustietoa tuottavien läpivirtausmittausten kehittäminen voisivat keskipitkällä aikavälillä parantaa maalta tulevan kuormituksen seurantaa. [Laajemmin](#) todettiin, että matalien rantojen ja pohjien vedenlaadun, pohjaympäristön ja luonnon monimuotoisuuden seuranta on hyvin puutteellista ja juuri näillä alueilla veden laadun paraneminen todennäköisesti näkyy. Matalille rannoille pitäisikin lisätä [makrofyyttien, pohjaeläimistön sekä sedimentin ravinnetilanteen](#) seurantaa. [Avomerialueille ehdotetaan tutkittavaksi mahdollisuutta perustaa säännöllinen seuranta- asema Airstolle sekä kehittää sedimenttien ravinnetilanteen ja sisäisen kuormituksen seurantaa.](#)

Hankkeessa tehty työ ja tulokset työpaketeittain

Hankesuunnitelman mukaisesti hankkeen työ jaettiin työpaketteihin, minkä välillä tehtiin yhteistyötä hanke- ja työkokouksissa sekä tarvittaessa muulla yhteydenpidolla. Työpakettien puitteissa tehty työ sekä keskeiset tulokset esitetään seuraavassa. On huomattava, että tulosten tieteellinen julkaisu ja jatkojalostus tulee jatkumaan pitkään hankkeen päättymisen jälkeen.

Työpaketti 1: Toimenpiteiden vaikutukset vesireiteissä ja fosforin valuma-alueprosessit.

Irma Puttonen (VarELY), Petri Ekholm (SYKE), Maria Kämäri (SYKE)

Johdanto

Saaristomeren valuma-alueen maatalous on Suomen ainoa HELCOMin suurten kuormittajien hot spot -listalla jäljellä oleva kohde. Saaristomereen päätyvän kuorman vähentämiseksi on tehty



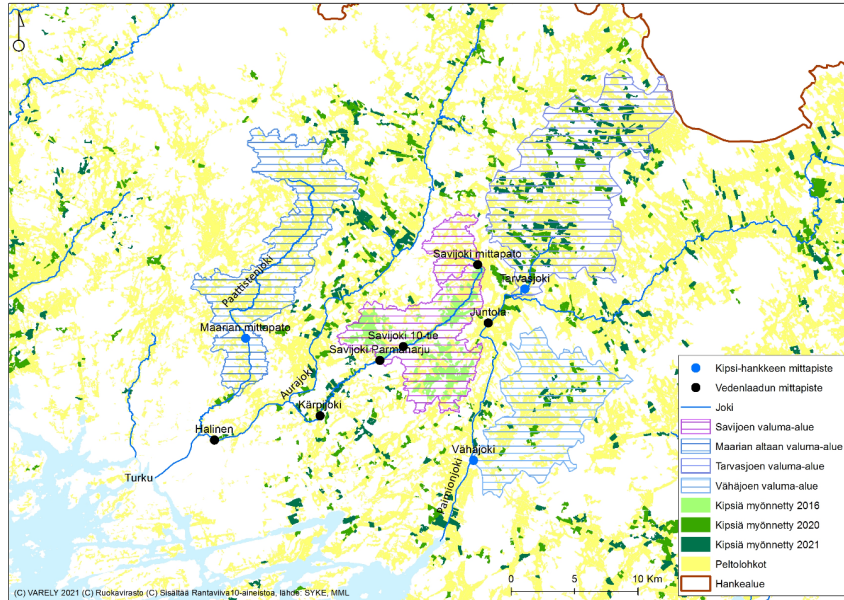
erilaisia ravinnepäästöjen vähentämiseen tähtäviä toimenpiteitä, mutta toisin kuin muihin merialueisiimme päätyvä kuormitus, Saaristomereen kulkeutuvan fosforin määrä ei ole vähentynyt.

Tässä osiossa tutkittiin ja ennakoitiin valuma-alueella tehtävien toimenpiteiden vaikutusta vesistökuormitukseen ja sen pidättymiseen valuma-alueella käyttäen hyväksi esim. kipsikokeilujen aineistoa. Työssä toteutettiin ravinnekuormituksen ositus ja muutokset lähteeltä mereen ottamalla huomioon muun muassa vuodenaikaisuus. Toimet koordinoitiin muissa hankkeissa, erityisesti KIPSI-hankkeessa toteutettavien toimenpiteiden vaikutuksen arvioinnin kanssa ja tiedot yhdistettiin hankesuunnitelman mukaisesti seurantaverkon ja aiempien tutkimushankkeiden (mm. SAVE ja SAVE2) tuottamaan tietoon.

Peltojen kipsikäsitteilyä maatalouden fosforikuormituksen vähentämiseksi on aiemmin tutkittu valuma-alueittakaavassa TraP-hankkeessa (Novel gypsum-based products for farm scale phosphorus trapping) Vantaanjoen Nummenpäässä (Ekholm ym. 2012), Savijoen valuma-alueella SAVE-hankkeessa (Saaristomeren vedenlaadun parantaminen peltojen kipsikäsitteilyllä) ja sitä seuranneessa SAVE2-hankkeessa (Ekholm ym. 2022) sekä Vantaanjoen peltojen kipsihankkeessa (Vantaanjoen ja Helsingin seudun vesiensuojeluyhdistys 2020). Tulosten mukaan kipsin peltolevitys voi vähentää merkittävästi pelloilta vesistöön tulevaa fosforikuormitusta ja eroosiota. Myös orgaanisen hiilen huuhtouma vähenee kipsin vaikutuksesta.

Varsinais-Suomen ELY-keskuksen hallinnoima KIPSI-hanke käynnistettiin vuonna 2020 Saaristomeren valuma-alueella. Kipsiä levitettiin Saaristomeren valuma-alueella noin 7 445 ha vuoden 2020 aikana sekä 8 152 ha vuoden 2021 aikana. Kipsiä levitettiin Saaristomeren valuma-alueelle kaikkiaan siis noin 15 597 ha vuoden 2021 loppuun mennessä (Kuva 1.1).

Alueen vedenlaatutulosten tarkastelua ja tulkintaa on tehty Varsinais-Suomen ELY-keskuksen ja Suomen ympäristökeskuksen välisenä yhteistyönä KIPSI- ja MAAMERI-hankkeissa. Sekä KIPSI- että MAAMERI-hanke kuuluvat ympäristöministeriön Vesiensuojelun tehostamisohjelmaan (<https://ym.fi/vedenvuoro/>). Vedenlaadun tarkasteluun valittiin kaksi intensiivisesti seurattua kipsikäsitteilyn piirissä oleva valuma-alue ja kaksi kipsikäsitteilyn ulkopuolella olevaa vertailualueita. Lisäksi vedenlaatua tarkasteltiin tiheästi seuratuissa jokivesissä (Taulukko 1.1).



Kuva 1.1. Kipsin peltolevitys KIPSI-hankkeessa v. 2020–2021.

Kipsinlevityksen osuudet seurannassa olevien alueiden peltopinta-aloista vaihtelivat 0–21,4 % välillä (Taulukko 1.1). Eniten kipsiä peltopinta-alaan nähden levitettiin Tarvasjoella, missä levitysmäärä nousi 1 454 hehtaariin (21,4 % peltoalasta) vuoden 2021 loppuun mennessä. Paattistenjoella ja Savijoen mittapadon valuma-alueella sijaitsevat pellot olivat tukikelpoisen alueen ulkopuolella, mistä johtuen alueille ei levitetty lainkaan kipsiä. Paattistenjoen ja Savijoen mittapadon seuranta-asemat toimivat vertailualueina kipsinlevityksen vaikutusten seurannassa.

Taulukko 1.1. Kipsin levitysalaa seurannassa olevien jokien valuma-alueilla.

Nimi	Valuma-alueen pinta-ala (ha)	Peltoala (ha)	Pelto-%	Kipsiä levitetty 30.10.20 mennessä (ha)	Kipsiä levitetty 30.10.21 mennessä (ha)	Levitysalan osuus peltopinta-alasta (%) 2020	Levitysalan osuus peltopinta-alasta (%) 2021
Tarvasjoki	14 388	6 786	47 %	544	1 454	8,0 %	21,4 %
Vähäjoki	7 554	2 712	36 %	157	244	5,8 %	9,0 %
Paimionjoki, Isosilta	98 142	41 348	42 %	1 513	3 150	3,7 %	7,6 %
Paimionjoki, Juntola	94 479	39 800	42 %	1 455	3 056	3,7 %	7,7 %
Aurajoki, Halinen	75 591	27 088	36 %	1 523	2 932	5,6 %	10,8 %



Uskela, viljavarasto	51 700	22 872	44 %	626	1 341	2,7 %	5,9 %
Perniö, Vettenranta	40 709	12 422	31 %	540	808	4,3 %	6,5 %
Vertailualueet							
Paattistenjoki	7 612	3 128	41 %	0	0	0,0 %	0,0 %
Savijoki, Mittapato	1 497	567	38 %	0	0	0,0 %	0,0 %

Keskeiset tulokset ja johtopäätökset

Useat tekijät vaikuttavat ravinteiden huuhtoutumiseen maaperästä vesistöihin. Kaikki tarkastelussa olevat valuma-alueet olivat suhteellisen suuria, ja niiden ominaisuudet poikkesivat jonkin verran toisistaan, eikä kaikkia vedenlaadun vaihteluun vaikuttavia tekijöitä välttämättä edes tunneta. Siksi on ensiarvoisen tärkeää, että vedenlaadun seuranta, niin perinteisillä vesinäytteillä kuin jatkuvatöimillä mittalaitteilla, on tehty mahdollisimman huolellisesti. Valitettavasti tämä ei toteutunut KIPSI-hankkeen seurannassa: vesinäytteiden otto ei toivotusti saanut kiinni runsasvetisiä jaksoja ja jatkuvatöimisen anturien tuottama aineisto oli pitkälti hylättävä epäluotettavana. Jatkuvatöimisen seurannan kilpailutus ja laadunvarmistus vaativatkin kehittämistä, jotta tuloksia voidaan käyttää paremmin hyväksi. Myös vesinäyteaineistossa ilmeni epämääräisyyksiä. Esimerkiksi vesinäytteiden perusteella sulfaattipitoisuus odotetusti nousi kipsikäsittelyillä kohteilla, mutta sähköjohtavuus ei, mikä on teoreettisesti mahdotonta.

Tarvasjoella, jossa kipsillä käsiteltiin 21,4 % peltoalasta, sameuden, kiintoaineen, hiukkasmaisen fosforin ja kokonaisfosforin keskimääräiset virtaamaan suhteutetut pitoisuudet pienenevät hieman enemmän kuin vertailualueilla, Savijoen yläosassa ja Paattistenjoella. Tämä saattaa selittyä kipsin peltolevityksellä. Kipsin levitysala muilla seurantakohteilla jäi toistaiseksi niin pieneksi, että vaikutusten havaitseminen oli käytännössä mahdotonta, kun otetaan huomioon vedenlaadun määrittäisiin liittyvät epävarmuudet.

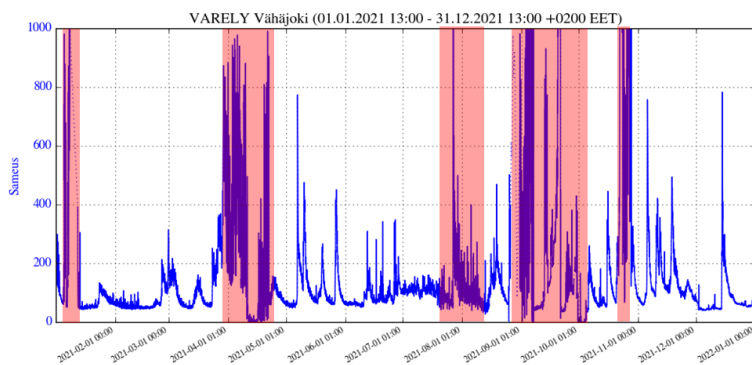
Kipsin vaikutusten arvioimiseksi tarvittaisiin jokiseurannan lisäksi valumavesien ja maan fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien seuranta peltolohkotasolla. Lisäksi tarvittaisiin tietoa siitä, miten kipsi vaikuttaa fosforin sitoutumiseen vesistöissä kulkeutuvassa ja sedimentoituvassa aineksessa. Sen avulla voitaisiin arvioida, miten kipsikäsittely muuttaa eliöille käyttökelpoisen fosforin määrää suhteessa sedimentoituvan fosforin kokonaismäärään. Vaikuttaako käsittely rannikkosedimentteihin päätyvän fosforin sitoutumismuotoihin ja edelleen kiertoon mahdollisesti palaavan ja toisaalta hautautuvan fosforin määrään? Tämä olisi hyvä lisätä vaikutusten seurantaan muutamilla edustavilla alueilla rannikolla.

Kuvaus hankkeen aikana tehdystä työstä ja tulokset

1.1. Seuranta-aineistojen yhdistäminen ja hyödyntäminen

KIPSI-hanke asensi jatkuvatoimiset vedenlaadun seurantalaitteet maaliskuussa 2020 Paimionjoen sivujokiin Vähäjokeen ja Tarvasjokeen sekä Paattistenjokeen, jossa kipsiä ei levitetty lainkaan. Kaikilla kolmella asemalla mitattiin kerran tunnissa sameutta, lämpötilaa, sähköjohtavuutta ja pinnankorkeutta. Pinnankorkeudesta määritettiin virtaama purkautumiskäyrän avulla. Tiedot tallentuivat EHP:n datapalveluun.

Jatkuvatoimisten vedenlaatumittausten laadussa esiintyi vakavia ongelmia, erityisesti sameudessa- ja sähköjohtavuudessa. Savisten viljelymaiden halki virtaavien jokien vesi on sameaa, mikä aiheuttaa antureiden likaantumista ja häiriöitä mittaustuloksiin, ellei antureita puhdisteta säännöllisesti. Sähköjohtavuusanturissa ei ollut automaattista puhdistusta. Sameus anturissa oli harjapuhdistin, mutta sameuden nousutilanteissa toistui usein, että mittaus muuttui epävakaaksi (Kuva 1.2). Jäi epäselväksi, vaikuttiko mahdollisesti sensoreiden asennustapa siihen, että sameusmittaus alkoi usein virtaaman noustessa heilua epätavallisesti. On myös mahdollista, että suurilla sameuksilla NEP5000 antureiden mittausalue (0–1000 NTU) ei ollut kohteissa riittävä. Lisäksi talvella sensorit jäättyivät asennusputkiinsa siten, että niitä ei saatu kuukausiin huollettua tai puhdistettua. Toistuvien laatuongelmien takia mittaustuloksista ei saatu muodostettua luotettavia jatkuvia aikasarjoja. Jatkuvatoimisten anturien toimittajalla ei ollut riittävää ymmärrystä kohteen ominaisuuksista tai halua ongelmien korjaamiseen.



Kuva 1.2. Vähäjoen jatkuvatoimisesta sameusmittauksesta suuri osa kevään ja syksyn osalta vuonna 2021 on epäluotettavaa.

KIPSI-hanke otti kohteista myös vesinäytteitä, joista määritettiin laaja valikoima vedenlaatua kuvaavia muuttujia akreditoituihin menetelmin (Taulukko 1.2). Vesinäytteiden tulokset tallennettiin ympäristöhallinnon avoimeen Hertta-tietokantaan. Lisäksi lähteenä käytettiin Varsinais-Suomen ELY-keskuksen vedenlaadun seuranta-aineistoa sekä velvoitetarkkailuaineistoja. Virtaamatietoja saatiin ELY-keskuksen ja Suomen ympäristökeskuksen tuottamista virtaamamittauksista, jotka tallennettiin ympäristöhallinnon tietokantoihin.

Vesinäytteet

Vedenlaadun havaintopaikat sijoittuvat Saaristomeren valuma-alueella pääosin Aurajoen ja Paimionjoen valuma-alueille (Kuva 1.3).



Kuva 1.3. Vedenlaadun seuranta-asetat.

Aineistosta arvioitiin erityisesti Tarvasjoen ja Vähäjoen vedenlaadun muutoksia vuosina 2020–2022 suhteessa Paattistenjoen vertailualueeseen sekä suhteessa muihin alueen vedenlaadun havaintopaikkoihin. Hiukkasmainen fosfori (PP) laskettiin vähentämällä kokonaisfosforin pitoisuudesta liuenneen kokonaisfosforin pitoisuus (PP=TP-TDP).

Laboratoriomääritysten tuloksista tarkasteltiin kipsin peltovetyksen vaikutusta valuma-alueen vedenlaatuun ja jokien kuljettaman kiintoaine- ja ravinnekuorman keskittyen erityisesti kevät- ja syyskausiin. Laboratoriomääritysten avulla validoitiin jatkuvatoimisten vedenlaatumittareiden tuottamat havainnot ja todennettiin jatkuvatoimisen mittauksen laatua.

Taulukko 1.2. Vesinäytteistä laboratoriossa määritetyt suuret ja määrittämenetelmät.

Suure	Lyhenne	Esikäsittely	Menetelmä	Yksikkö
Kokonaisfosfori	TP	Hajotus K2S2O8	Spektrometria, FIA, kolorimetrinen	µg/l
Liuennut kokonaisfosfori	TDP	Suodatus, polykarbonaatti 0,4 µm Hajotus K2S2O8	Spektrometria, FIA, kolorimetrinen	µg/l
Liuennut fosfaattifosfori	DIP	Suodatus, polykarbonaatti 0,4 µm	Spektrometria, FIA, kolorimetrinen	µg/l

Sameus	TURB		Nefelometrinen	FNU
Kiintoaine	SS	Suodatus, polykarbonaatti 0,4 µm	Gravimetrinen hehkutushäviö	mg/l
pH	pH	pH	Elektrometrinen ioniselektiivinen tai	
Sähkönjohtavuus	COND		Konduktometrinen, 25 °C	mS/m
Sulfaatti	SO4	Suodatus	Ionokromatografia	mg/l
Orgaaninen kokonaishiili	TOC		Infrapunaspektrometria	mg/l
Liukoinen org. hiili	DOC	Suodatus	Infrapunaspektrometria	mg/l
Kokonaistyyppi, luonnonvedet	TN	Hajotus K2S2O8-H3BO3	Spektrometria, FIA, kolorimetrinen	µg/l
Nitraatti- ja nitriittitypen summa	NO2,3		Spektrometria, FIA, kolorimetrinen	µg/l
Kalsium	Ca		Spektrometria, Induktiivinen plasma	mg/l
Magnesium	Mg		Spektrometria, Induktiivinen plasma	mg/l
Kalium	K		Spektrometria, Induktiivinen plasma	mg/l
Natrium	Na		Spektrometria, Induktiivinen plasma	mg/l
Kloridi	Cl	Suodatus	Ionokromatografia	mg/l

Jatkuvatoiminen vedenlaadun ja hydrologian seuranta

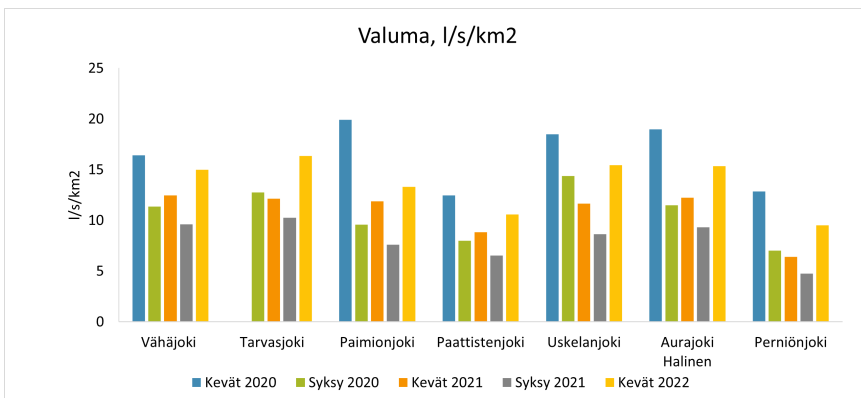
Jatkuvatoiminen mittaus tuotti vedenlaatuaineistoa tiheämmällä aikaresoluutiolla verrattuna vesinäytteisiin. Toisaalta mittauksissa esiintyi poikkeavia tuloksia, ja yhtenäistä luotettavaa aikasarjaa sameudesta ei saatu alun perin suunnitelluilta vuosijakoilta. Laatutarkastelun perusteella määritettiin lyhyehköt jaksot, jolloin luotettavaksi arvioitua mitattua vedenlaatudataa oli saatavissa vertailuasemalta Paattistenjoessa ja vähintään toiselta kipsikäsittelyalueelta eli Tarvasjoelta tai Vähäjoelta. Jatkuvatoimisen mittauksen perusteella ei havaittu vähenemää sameudessa Tarvasjoella suhteessa vertailualueeseen. Vuosina 2020–2021 Tarvasjoen mitattu sameus oli ajoittain korkeampi ja ajoittain matalampi kuin Paattistenjoella. Jatkuvatoimisessa mittauksessa esiintyneiden ongelmien vuoksi jatkossa esitetyt tulokset perustuvat vesinäytteistä tehtyihin laboratorioanalyysiin yhdistettynä hydrologisen seurannan tuloksiin.

1.2. Kipsinlevityksen vaikutukset kuormitukseen

Jokien mereen kuljettama ravinnekuorma riippuu vedessä liuenneena ja hiukkasten mukana olevien ravinteiden pitoisuudesta sekä virtaamasta. Savimailla huuhtoumien ja virtaaman kasvaessa erityisesti hiukkasmaisen fosforin pitoisuus kasvaa. Valumalla tarkoitetaan joen kuljettamaa vesimäärää joen valuma-alueen pinta-alayksikköä kohti. Valuman vaihtelu on huomioitava arvioitaessa jokien mereen kuljettamaa ravinnekuormitusta (Kuva 1.4). Vesinäytteenottohetkien keskiarvo oli pienempi kuin jatkuvan seurannan mukainen keskiarvo eri jaksoina (Taulukko 1.3). Näytteenotto ei siis onnistunut saamaan kiinni valuntapiikkejä. Keväisin valumat olivat keskimäärin suurempia kuin syksyllä.

Taulukko 1.3. Paattistenjoen eli vertailualueen keskivaluma, näytteenottohetkien keskivaluma ja näytteenottomäärä.

Kausi	Keskivaluma, (l/s/km ²)	Näytteenottohetkien keskivaluma, (l/s/km ²)	Näytteet (lkm)
2020	11.9	9.9	26
2021	8.0	7.1	26
1.9.2020–31.5.2021	10.2	7.8	31
1.9.2021–31.5.2022	13.4	8.9	20



Kuva 1.4 Näytteenottopäivien keskimääräinen valuma kevät- ja syysjaksoina seurantajoissa.

Kipsin vaikutusta tarkasteltiin syys- (1.9.–31.12.) ja kevät- (1.1.–31.5.) jaksoina. Kipsin levitysalueella sijaitsevien Tarvasjoen ja Vähäjoen tuloksia verrattiin Paattistenjokeen. Vedenlaadun muutoksiin vaikuttavat useat paikalliset tekijät. Luotettavamman arvon saamiseksi kipsinlevityksen vaikutuksesta Tarvasjoen ja Vähäjoen seuranta-asemien tuloksia verrattiin Paattistenjoen lisäksi myös muihin KIPSI-hankkeen tehostetun vedenlaadunseuranta-asemien tuloksiin.

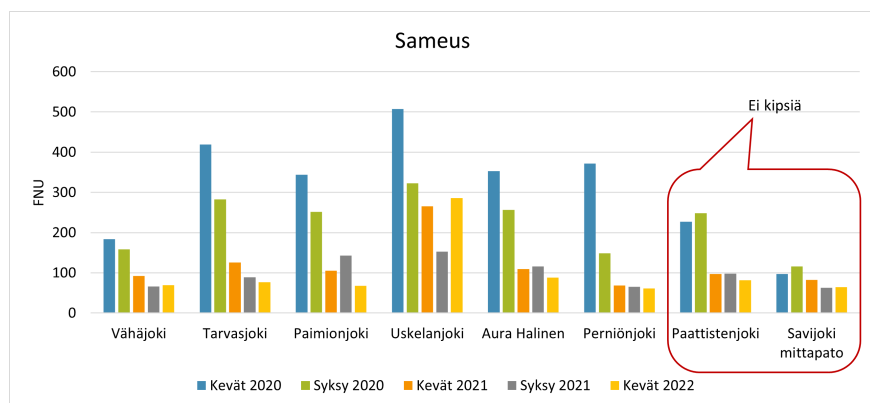
Sameus ja kiintoaine

Veden sameus ja kiintoainepitoisuus laski kevään 2020 tasosta kaikilla seuranta-aseilla (Kuvat 1.4 ja 1.5). Talvi 2019–2020 oli hyvin leuto ja sateinen, maa oli sula läpi talven ja runsaat sateet aiheuttivat talviaikaista eroosiota, minkä vuoksi vesi oli tavallista sameampaa. Sameuden

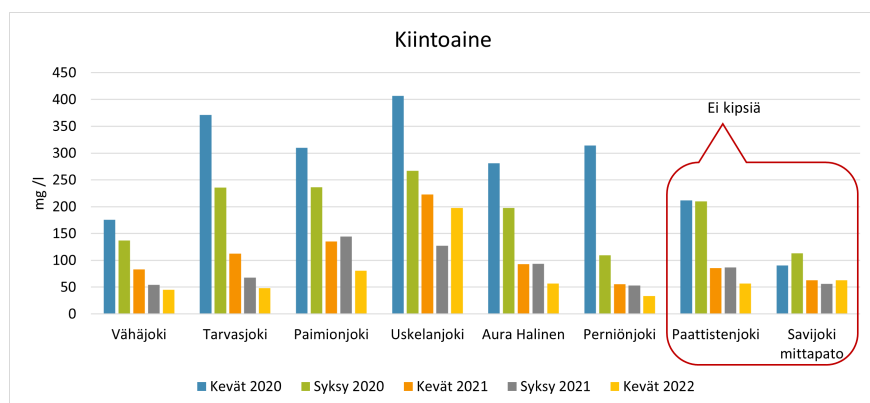
virtaamapainotettu keskiarvo väheni kevään 2020 tasosta kevään 2021 tasoon Tarvasjoessa 70 %, Vähäjoessa 50 % ja Paimionjoessa 42 %. Vertailualueiden joissa sameus väheni samana ajanjaksona Savijoen yläosassa 22 % ja Paattistenjoessa 16 %.

Kiintoainepitoisuuden vähenemä keväästä 2020 kevääseen 2021 oli Tarvasjoessa 70 %, Vähäjoessa 52 % ja Paimionjoessa 40 %. Vertailualueiden jokien kiintoainepitoisuus väheni Savijoen yläosassa 30 % ja Paattistenjoessa 60 %. Tarvasjoella prosentuaalinen vähenemä oli suurin, mutta toisaalta vertailualueella Paattistenjoessa vähenemä oli lähes yhtä suuri.

Sameuden tai kiintoainepitoisuuden muutoksessa keväiden 2021 ja 2022 osalta ei ollut huomattavaa eroa kipsi- ja vertailualueiden välillä (Kuvat 1.5 ja 1.6).



Kuva 1.5. Sameuden virtaamapainotettujen keskiarvojen vaihtelu kevät- ja syyskausittain. Kevään havainnot ovat tammi-toukokuun väliseltä ajalta ja syksyn syys-joulukuun väliseltä ajalta. Kevät 2020 on tilanne ennen kipsin peltoleivityksen aloittamista.

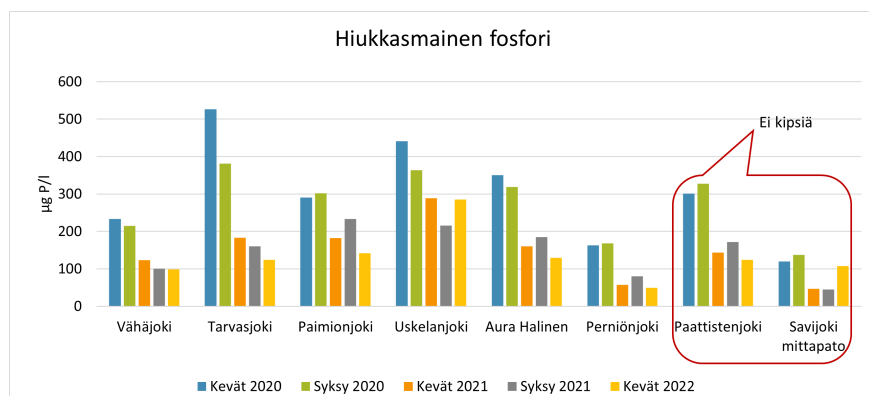


Kuva 1.6. Kiintoainepitoisuuden vaihtelu suhteutettuna virtaamaan kevät- ja syyskausittain.

Hiukkasmainen fosfori

Hiukkasmaisen fosforin virtaamapainotettu keskimääräinen pitoisuus on vähentynyt kaikissa, joissa tarkasteltaessa kevät- ja syysjaksoja. Vähemmän on selkein Tarvasjoessa (kuva 1.7).

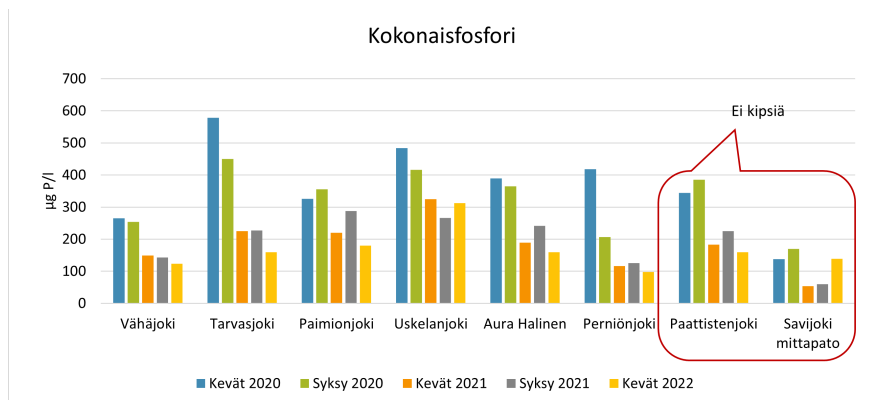
Lisäksivuosisatolla hiukkasmaisen fosforin keskipitoisuus on tilastollisesti merkittävästi pienentynyt vuonna 2021 verrattuna vuoteen 2020 Tarvasjoella ANOVA ($F=11.80$, $p<0.0011$) ja Vähäjoella ($F=5.97$, $p<0.018$). Pitoisuus pieni myös Paattistenjoessa, mutta vähemmän.



Kuva 1.7. Hiukkasmaisen fosforin pitoisuuden vaihtelu ($\mu\text{g P/l}$, virtaamapainotettu keskiarvo) vesinäytteiden laboratoriomäärityksistä 2020–2022.

Kokonaisfosfori

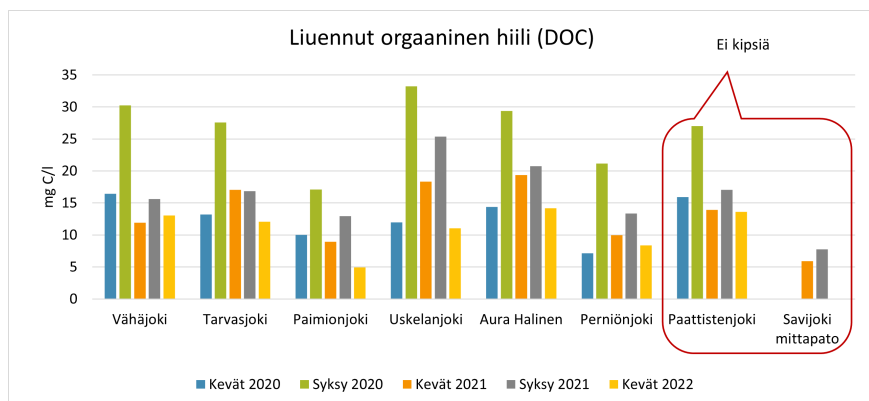
Tarvasjoen kokonaisfosforipitoisuus on kipsin levityksen jälkeen pienentynyt hieman enemmän kuin vertailuasemilla Paattistenjoessa ja Savijoessa (Kuva 1.8).



Kuva 1.8. Keskimääräisen kokonaisfosforipitoisuuden vaihtelu suhteutettuna virtaamaan vedenlaadun seuranta-asetilla viitenä eri ajanjaksona.

Liennut orgaaninen hiili (DOC)

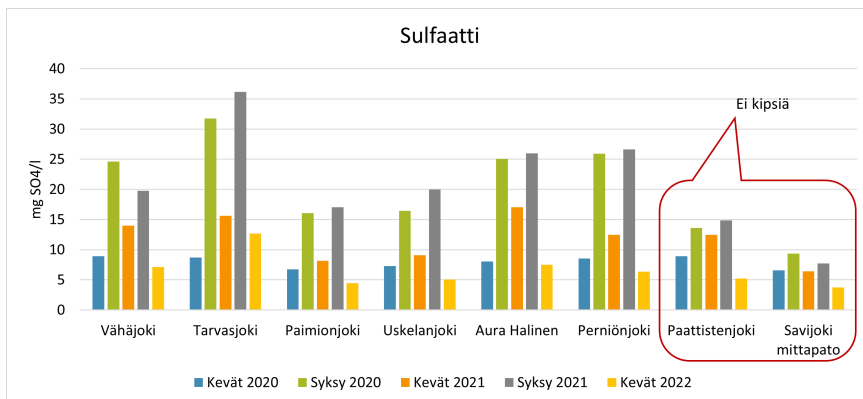
Liunneen orgaanisen hiilen muutoksessa ei havaittu selvää eroa kipsinlevitysalueen jokien vesinäytteissä verrattuna Paattistenjokeen (kuva 1.9). Eroa ei havaittu myöskään orgaanisen hiilen kokonaismäärän muutoksissa.



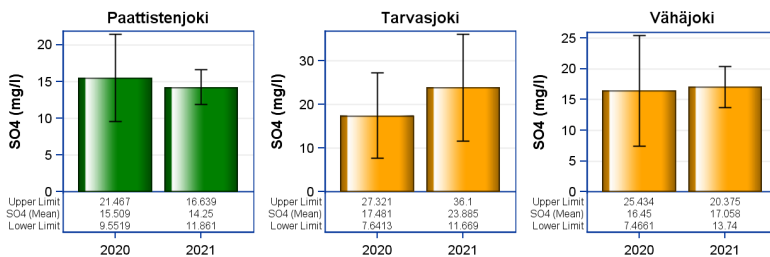
Kuva 1.9. Liunneen orgaanisen hiilen virtaamapainotettujen keskiarvojen vaihtelu vedenlaadun seuranta-asetilla. Savijoen mittapadon seuranta-asetalta ei ole liunneen orgaanisen hiilen havaintoja vuoden 2020 aikana eikä kevätkaudella 2022.

Sulfaatti ja magnesium

Kipsin levitys nosti sulfaattipitoisuutta Tarvasjoessa, erityisesti syksyllä 2021 (Kuva 1.10) ja pitoisuuden nousu erottui myös vuositasolla (Kuva 1.11). Sulfaattipitoisuus nousi kipsinlevityksen jälkeen suhteellisesti enemmän kaikissa kipsin levitysalueiden joissa kuin vertailualueiden joissa.

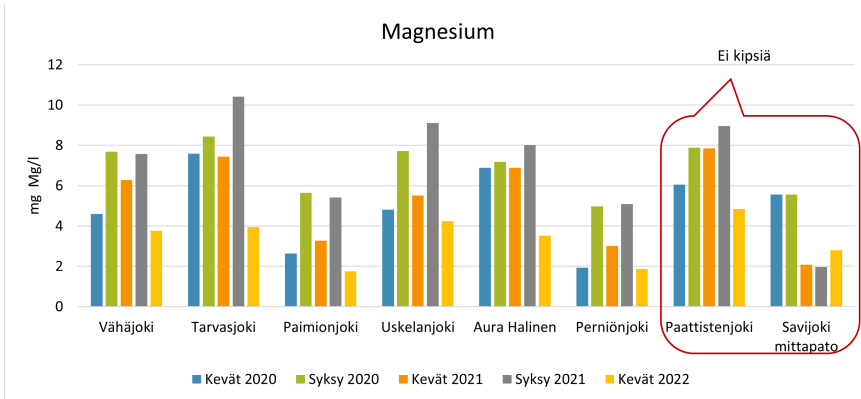


Kuva 1.10. Veden keskimääräisen sulfaattipitoisuuden (mg/l SO₄) vaihtelu suhteutettuna virtaamaan tammi-toukokuussa (Kevät) ja syys-joulukuussa (Syksy) 2020–2022.



Kuva 1.11. Sulfaattipitoisuuden vuosikeskiarvo ja sen 95 % luottamusrajat. Paattistenjoella ei levitetty kipsiä.

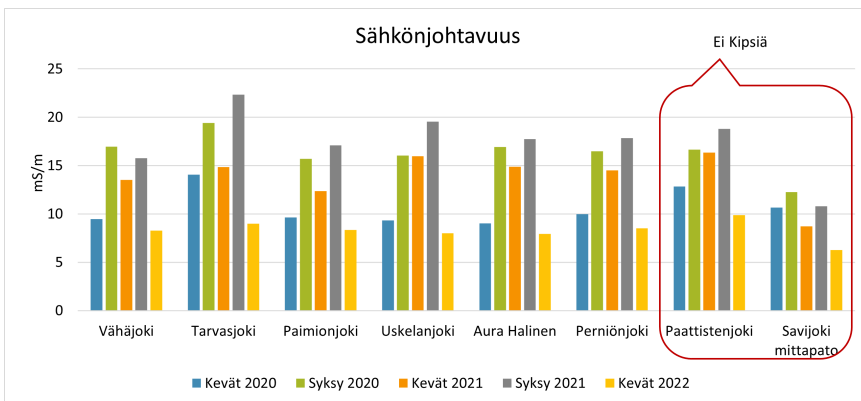
Kipsi voi lisätä maaperästä magnesiumin huuhtoutumista, minkä vuoksi kipsiä ei suositella pelloille, joiden magnesiumtaso on alhainen. Magnesiumpitoisuus ei näkynyt kipsinlevitysalueen jokien vesinäytteissä kohonneen (Kuva 1.12). Tarkemman kuvan saamiseksi kipsin vaikutuksesta maaperän magnesiumtasoon pitäisi analysoida maaperän magnesiumtaso ennen ja jälkeen kipsin levityksen.



Kuva 1.12. Veden keskimääräisen magnesiumipitoisuuden vaihtelu suhteutettuna virtaamaan (mg Mg/l) seuranta-asetilla kevät- ja syyskausilla 2020–22.

Sähkönjohtavuus

Kipsinlevitys näkyy valuma-alueen vesistöissä kohonneena sähkönjohtavuutena, jos pelloille levitetyn kipsin sulfaatti, kalsium tai muut ionit huuhtoutuvat vesistöihin. Sähkönjohtavuudessa ei kuitenkaan ole havaittavissa selkeää poikkeamaa kipsinlevitysalueiden jokien vesissä verrattuna vertailualueiden jokiin (Kuva 1.13).



Kuva 1.13. Sähkönjohtavuuden vaihtelu suhteutettuna virtaamaan vedenlaadun seuranta-asetilla viitenä eri ajanjaksona.

1.3. Kipsin vaikutusten arviointi aiempien tutkimusten perusteella



Saaristomeren valuma-alueen pelloilta (2738 km²) päätyy mereen kokonaisfosforia keskimäärin 384 tonnia vuosittain (Vemala-malli). Jotta valuma-alueen maatalous saataisiin pois HELCOMin suurten kuormittajien listalta, kuormitusta tulisi vähentää 100 tonnilla vuodessa. Kuinka suuri peltoala pitäisi käsitellä kipsillä, jotta tähän tavoitteeseen yllettäisiin? Tätä arvioidaan aiempien tutkimusten valossa seuraavasti.

Savijoen kipsipilotissa arvioitiin, että kipsikäsitteily vähensi keskimäärin 30 % vuosien 2016–2021 keskimääräisestä kokonaisfosforikuormasta, kun verrattiin kipsikäsiteltyjen ja käsittelemättömien peltojen laskennallisia huuhtoumia. Mikäli Saaristomeren koko valuma-alueella kipsin teho olisi sama, ja pellot olisivat yhtä kuormittavia kuin Savijoella (Ekholm ym. 2022), 100 t/v vähennys edellyttäisi, että noin 40 % (eli 1110 km²) Saaristomeren valuma-alueen peltoalasta käsiteltäisiin kipsillä.

Savijoen pellot ovat kuitenkin hyvin kuormittavia (noin 200 kg P/km²/y) verrattuna keskimääräiseen Saaristomeren peltojen kuormittavuuteen (noin 140 kg P/km²/y, Vemala-malli). Jos lähtökuormituksena käytetään Saaristomeren peltojen keskimääräistä kuormittavuutta, ja kipsin oletetaan vähentävän kuormitusta 30 %, tarvittava kipsinlevitysala olisi 79 % Saaristomeren valuma-alueen peltopinta-alasta. Tätä arviota voidaan pitää maksimialana, joka tarvittaisiin 100 tonnin vähenemään kokonaisfosforikuormituksessa.

Minimalaa voidaan arvioida olettamalla, että peltojen lähtökuormitus on Savijoen tasoa, mutta kipsin tuottama vähentymä on 50 %, mikä vastaa TraP-hankkeen Nummenpään valuma-aluepilotissa arvioitua reduktiota (Ekholm ym. 2012). Tällöin tarvittava kipsin levitysala, jotta päästäisiin kuormitusvähentymään 100 t/v, olisi vain noin 700 km² (26 % peltoalasta). Käytännössä tämä edellyttäisi, että kipsinlevitys onnistuttaisiin kohdentamaan kaikkein kuormittavimmille lohkoille.

Joka tapauksessa kipsillä on potentiaalia yksinomaisenakin vesienpuhdistusmenetelmänä merkittäviin ravinnekuormituksen vähennyksiin, mikäli kipsillä käsitellään nykyistä huomattavasti laajempi ala, ja kipsikäsitteily kohdennetaan eroosioherkille ja fosforitilaltaan korkeille lohkoille.

Taulukossa 1.4 esitetään arvio, millaisia vähennyksiä kipsinlevitys on voinut tuottaa tässä raportissa käsiteltävissä seuranta-kohteissa. Levitysala on käytetty alaa, joka on käsitelty kipsillä ennen syysä 2022. Kipsikäsitteilyn aikaansaamana kuormitusvähennyksenä on käytetty 50 % kokonaisfosforista, sillä kipsin vaikutus käsittelyn jälkeisenä ensimmäisenä ja toisena vuotena on voimakkaampi kuin myöhempinä vuosina (Ekholm ym. 2022).

Taulukko 1.4. Arvio kipsikäsitteilyn tuottamasta vähennyksestä kokonaisfosforikuormituksesta KIPSI-hankkeessa vuosina 2020–2021, paitsi koko hankealueen kohdalla, jolla mukana on vuosi 2022.

Alue	Kuormitus-arvio ¹ Ilman kipsiä	Pinta-ala	Peltoala	Käsittelyala		Kipsin tuottama vähennys (50 %)	
				km ²	% pelloista	t/v	% kuormituksesta
	t/v	km ²	km ²	km ²	% pelloista	t/v	% kuormituksesta

29



Aurajoki. Halinen	51.2	756	271	29.3	10.8	2.1	4.0
Paimionjoki. Juntola	68.1	945	398	30.6	7.7	2.1	3.1
Paimionjoki. Isosilta	71.2	981	413	31.5	7.6	2.2	3.1
Tarvasjoki	9.4	144	67.9	14.5	21.4	1.0	10.8
Vähäjoki	5.6	75.5	27.1	2.4	9.0	0.2	3.1
Uskelanjoki. Viljavarasto	39.5	517	229	13	5.9	0.9	2.4
Perniönjoki. Vettenranta	21.7	407	124	8	6.5	0.6	2.6
Koko alue	452		2738	250	9.1	16.2	3.6

¹ Vemala-malli (vuodet 2012–2021).

Seurantakohteissa kipsillä käsitellyn peltoalan osuus vaihteli Uskelanjoen 5.9 prosentista Tarvasjoen 21.4 prosenttiin. Vertailun vuoksi mainittakoon, että Savijoen pilotissa kipsillä käsiteltiin 43 % pelloista, TraP-hankkeen Nummenpäässä 90 % pelloista ja Vantaanjoen kipsihankkeen seuranta-alueella Lepsämäntjoella noin 40 % pelloista. Suurin muutos (10.8 %) arvioidusta kokonaiskuormituksesta on odotettavissa Tarvasjoella. Tarvasjokea lukuun ottamatta seurannalla tuskin saadaan kiinni kipsin vaikutusta, varsinkin kun seuranta-aineistoon perustuva arvio kuormituksesta teknisten ongelmien vuoksi perustui pitkälti vesinäytteisiin.

Kipsin vaikutus liuenneeseen fosforiin on sen verran vähäinen, että millään seurantakohteella tuskin on havaittavissa ainevirtaamissa muutosta, tosin myös liuenneen fosforin reduktio heti kipsikäsitteilyn jälkeen voi olla huomattava. Liuenneessa orgaanisessa hiilessä muutosta voidaan kuitenkin havaita.

Viitteet:

Työpaketti 2: Fosfori rannikko-avomerijatkumoilla jokisuilta alkaen.

Hänninen J. , Saarni S., Salminen S. TY, Elovaara S. Zhao L., Thomas D. HY, Asmala E, Virtasalo J, Jilbert T., Lukkari, K., Puttonen, I.

Johdanto

Tässä osiossa tutkittiin rannikkovesistöön maalta kulkeutuvan partikkeliaineksen laatua ja kertymistä Saaristomeren pohjille jokisuilta avoimelle Saaristomerelle. Muiden tutkimusosioiden kanssa selvitettiin kenttätutkimuksien avulla valuma-alueelta ja sisäsaaristosta tulevan kuormituksen vaikutusalueita. Tarkempina tutkimuskohteina olivat Paimionjoen, Aurajoen ja Mynäjoen-Laajoen rannikko-avomerijatkumot. Rannikko-avomerijatkumoilla selvitettiin fosforin kiertoa sedimentin ja veden välillä hapellisen/hapeton skaaloilla. Osiossa tehtiin Saaristomeren heterogeenisten pohjien



sekä niiden fosforitilanteen tarkennettu kartoitus (39 uutta näytepistettä rannikolta ja avomereltä), sekä tutkittiin sedimentaationopeuksia ja fosforin hautautumista ajoittamalla tärkeimpien akkumulaatiopohjien sedimenttinäytteitä.

Keskeiset tulokset ja johtopäätökset

Työpaketin tavoitteena oli arvioida maalta tulevan partikkeliaineksen laatua ja kertymistä pohjille. Hankkeessa keskityttiin laskemaan kokonaisfosforin ja mobiilin fosforin fraktioiden vuota pohjaan erityisesti Halikonlahden alueella. Korkeimmat vuot tunnistettiin Falkinselän alueella ja se heijastanee näytteenottoaikan luonnetta, jossa pieni sedimentaatioalue kerää ainesta laajalta matalalta alueelta (kuva 3.). Havaitut pitoisuudet vastasivat hyvin Saaristomereltä aiemmin raportoituja (Puttonen ym., 2014) ja ovat samankaltaisia sedimenttikeräintutkimuksista Suomen ja Ruotsin saaristoalueilta saatujen tulosten kanssa (Malmaeus ym., 2019).

Partikkelimainen orgaaninen fosfori muodosti noin 80 % jokiveden kokonaisfosforista sekä Paimion-että Laajoella keväällä 2021. Paimionjoen partikkeliaineksestä tutkitun fosforin pitoisuudet vastasivat rannikon pintasedimentin pitoisuuksia, mutta heikosti sitoutuneen, alumiinioksideihin sitoutuneen ja erityisesti orgaanisen fosforin osuudet olivat pintasedimenttiä korkeampia. Kesällä ja keväällä otetut näytteet olivat fosforin fraktioiden suhteen samantyyppisiä, mutta keväällä hiukkasiin heikosti sitoutuneen ja pelkistyyviin raudan oksideihin sitoutuneen sekä apatiittifosforin osuudet olivat suurempia, kun taas kesällä orgaanisen fosforin osuus oli suurempi.

Maameri-hankkeen neljällä MTA Arandan tutkimusmatkalla 2020–2022 analysoitiin ravinnetilannetta vedessä yhteensä 41 yli 25 metriä syvältä näytepisteeltä (kuva 1), joista suurin osa oli uusia. Liuennut epäorgaaninen fosfori DIP muodosti keskimäärin noin 50 % kokonaisfosforista. Partikkelimaista orgaanisen fosforin suurimmat pitoisuudet löytyivät rannikon tai jokisuun läheltä otetuilta näytepisteiltä tai syvien alueiden resuspensiolle herkän pohjan yläpuolelta. Partikkelimaisen orgaanisen P:n osuus TP:stä oli kaikissa näytteissä keskimäärin noin 18 %. Liuennut orgaaninen fosfori DOP muodosti keskimäärin noin 33 % kokonaisfosforista. DOP-pitoisuus oli yleensä korkeimmillaan veden pintakerroksissa aina noin 20–40 m syvyyteen asti ja pieneni pohjaa kohti. Saaristomeren poikki Utöstä pohjoiseen kulkevalla linjalla Houtskarın, Iniön ja Kustavin länsipuolitse aina Uudenkaupungin tasolle asti (ns. IU-asemat) arvioitiin fosforipitoisuuksien vaihtelua vedessä neljänä vuodeaikana saman vuoden sisällä sekä yhdellä asemalla kolmena vuonna. Kokonaisfosforin ja DIP:in pitoisuudet olivat pääsääntöisesti suurimmillaan syyskuussa ja DOP:in pitoisuudet olivat pienimmillään elokuussa. Vuosien välistä vaihtelua esiintyi lähinnä eri fraktioiden välisissä suhteissa.

Hankkeessa myös tarkasteltiin, miten kipsin lisäys suoraan jokiveteen vaikuttaa partikkelimaiseen ainekseen. Kipsin lisäys jokiveteen aiheutti partikkelimaisen aineen sakkautumista sekä keväällä että kesällä. Kipsin vaikutus sakkautumiseen oli voimakkainta kevät aikaan. Molekyylitasolla kipsin lisäys aiheutti liunneen orgaanisen aineen molekyylipainojakauman siirtymistä kohti suurempia molekyyliä.

Paimionlahdelle kohdennettiin intensiivistä sedimenttinäytteenottoa. Tulokset osoittavat, että fosforin fraktioiden kokonais- ja suhteelliset pitoisuudet vaihtelevat sekä syvyyden mukaan sedimentin patsaassa, että (jokisuu-avomeri jatkumoa pitkin). Tulokset osoittavat, että merkittävä



osa Paimionjoen kuljettamaa savimateriaalia sedimentoituu ja akkumuloituu ylä-estuaarin alueella ja siten laimentaa orgaanisen aineksen pitoisuutta ylä-estuaarin sedimenteissä. Joen kuljettama labiili fosfori vaikuttaa ylä-estuaarin sedimentin fosforifraktioihin, kun taas saaristoon päin mentäessä orgaanisen autoktonisen aineksen merkitys kasvaa. Rauta- ja mangaanioksideihin sitoutunut P sekä labiili orgaanisen fosforin pitoisuus yleensä laskee syvyyden myötä joki-avomerijatkumon sedimenteissä. Tämä viittaa siihen, että labiili orgaaninen aines hajoaa hapettomassa mineralisaatiossa sedimentin pinnan alla. Fosforin fraktiot eivät eronneet toisistaan kahden peräkkäisen vuoden välisessä vertailussa viidellä näytepaikalla. Huokosvesitulokset vahvistavat, että anaerobiset mineralisaatioprosessit ovat aktiivisia sedimentissä kaikilla Paimionlahden joki-avomerijatkumon näytteenottoaikoissa. Tuloksissa huokosveden fosforin inventaariot korreloivat paremmin ammonium-typen inventaarioihin kuin liunneen raudan (Fe) inventaarioihin. Tämä viittaa siihen, että orgaanisen aineksen hajoaminen vaikuttaa enemmän fosforin huokosvesipitoisuuksiin kuin oksidimineraalien pelkistys. Hajoamisen intensiteetti näyttää olevan lateraalisesti heterogeenistä, eikä näytä selkeitä joki-avomerijatkumon suuntaisia trendejä havaittu.

Maameri-hankkeessa tuotettiin uutta tietoa ennestään tuntemattomien alueiden merenpohjan maalajeista, erityisesti hienojakoisten kertymäpohjien sijainnista sekä 39 rannikon tai avomeren näytepisteen sedimentin P:n liukoisuus- ja sitoutumismuodoista. Tulosten mukaan suurimmat happiolosuhteisiin reagoivan P:n pitoisuudet löytyvät sisäsaaristosta, Mynälähdän eteläpuolelta ja Kemiön itäpuolelta sekä Kemiön ja Hankoniemen välisestä saaristosta. Labiilin orgaanisen P:n pitoisuudet ovat puolestaan korkeimmillaan Mynälähdän sekä Korppoon ja Nauvon eteläpuolisen välisaariston alueella. Nämä molemmat mahdollisesti kiertoon palaavat P-muodot huomioiden suurimmat rannikkomallin sisäisen kuormituksen syötteen arvioon vaikuttavat P-pitoisuudet löytyvät Mynälähdän eteläpuolisesta saaristosta sekä Kemiön ja Hankoniemen välisestä saaristosta. Lisäksi kartalla erottuvat Kumlingen pohjoispuolen sekä Saaristomeren pohjoisosan suuremmat pitoisuudet. Verrattuna uusia tuloksia aiempaan tietoon pelkistyyiin raudan oksideihin sitoutuneesta fosforista, havaitaan hankkeessa tuotetun tiedon korostavan Kemiön saaren ja Hankoniemen välisen saariston sekä Kemiön saaren länsipuolen fosforipitoisuuksia. Lisäksi korostuvat Ahvenanmaan koillis-, itä- ja eteläpuoliset alueet. Mahdollisesti kiertoon palaavan orgaanisen fosforin alueellisessa jakaumassa puolestaan korostuvat tarkentuneen tiedon valossa Saaristomeren pohjoisosa, Rymättylän ja Nauvon välinen saaristo sekä Nauvon eteläpuolinen saaristo. Yleensä ottaen mallialueen pohjois- ja eteläreunan sedimenttien tarkentuneet tiedot näkyvät tuloksissa. Tarkentuneet tiedot Saaristomeren sedimenttien maalajeista ja fosforin esiintymismuodoista auttavat tarkentamaan tulevaisuudessa rannikkomallin sisäisen fosforikuormituksen syötteen arviota Saaristomerellä.

2.1. Rannikkovesistöön maalta kulkeutuvan partikkeliaineksen tutkiminen

2.1.1 Partikkelien pitoisuus ja kokojakauma Paimionjoen estuaarissa

Johdanto

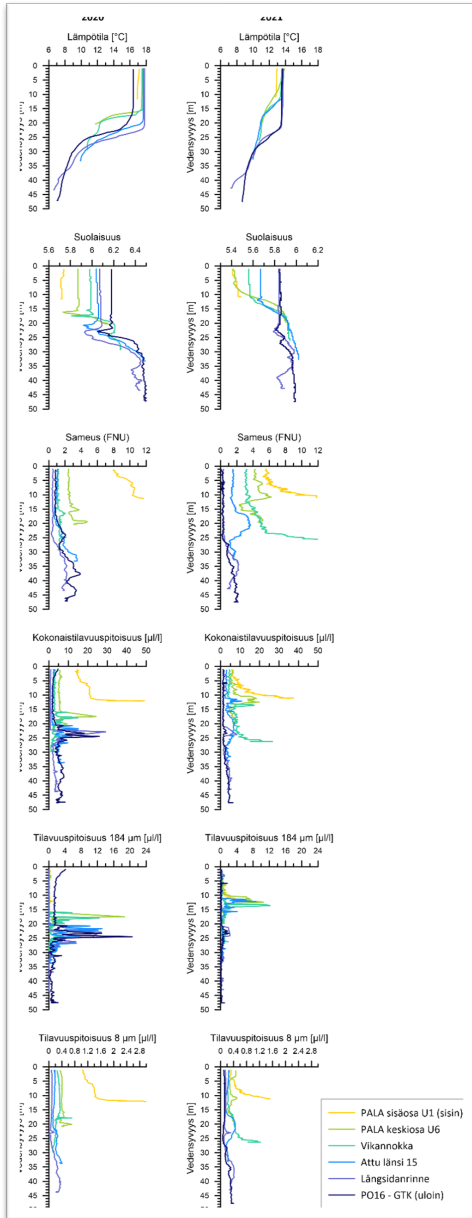
Jokien kuljettama kiintoaines on keskeinen tekijä maalta merelle kulkeutuvassa ainekuormassa. Kiintoaines koostuu hyvin erityyppisistä partikkeleista, joiden mukana jokisuistoihin ja niiden kautta avomerelle kulkeutuu huomattavia määriä mm. eloperäistä ja mineraaliainesta sekä rehevöittäviä



ravinteita. Partikkelien fyysiset ominaisuudet, kuten tiheys ja koko, pitkälti määrittävät niiden kulkeutumisen jokisuusta eteenpäin. Tiheät, esim. mineraalipitoiset partikkelit vajoavat nopeasti pohjaan, kun taas vähemmän tiheät, esim. eloperäiset partikkelit kulkeutuvat pintaveden mukana. Rannikon virtaus- ja syvyysolosuhteista riippuu, miten pitkälle avomerelle jokiperäiset partikkelit kulkeutuvat, ja toisaalta mihin pohjalle vajoavat partikkelit pysyvästi kerrostuvat. Partikkelien määrää on perinteisesti mitattu turbiditeetti- eli sameusmittauksilla, joka kertoo vedessä olevien partikkelien pitoisuuden. Uudet sensorit ovat mahdollistaneet kuitenkin partikkelien tarkemman analysoinnin, kuten kokojakauman määrittämisen. Kokojakauman avulla on mahdollista arvioida partikkelien alkuperää ja ominaisuuksia. Liukoisesta aineksesta suolaveden vaikutuksesta saostuvat rauta- ja alumiinihydroksidipartikkelit sekä sedimentistä peräisin olevat mineraalipartikkelit ovat tyypillisesti suhteellisen pieniä (<10 µm), kun taas eloperäinen aines voi muodostaa satojen mikrometrien kokoisia partikkeliagregaatteja.

Työn toteutus

Mittasimme Paimionjoen estuaarissa partikkelien pitoisuutta ja kokojakaamaa syyskuussa 2020 ja 2021 t/a Augustalla. Mittasimme samanaikaisesti syvyyttä, suolaisuutta ja sameutta monikanavasensorilla (EXO2, YSI, Yellow Springs, Ohio) sekä partikkelikokojakaamaa ja -tilavuuspitoisuutta laserdiffraktometrillä (LISST-100X type B, Sequoia Scientific, Bellevue, Washington). Partikkelien tilavuuspitoisuus (µl/l) määritettiin 32 kokoluokalle välillä 1,25–250 µm. Mittaukset tehtiin syvyysprofiileina koko vesipatsaasta. Laserdiffraktioon perustuvat mittaukset ovat herkkiä veden tiheyden jyrkille vaihteluille (nk. *schlieren*-ilmiö), joten mittaustuloksissa on huomioitu harppauskerroksessa suolaisuuskerrrostuneisuuden myötä tapahtuva tiheyden muutos. Molemmat mittalaitteet kalibroitiin valmistajien ohjeiden mukaisesti, ja mittaustaajuus syvyysprofiileissa oli 1 Hz.





Kuva 2.1. Syvyysprofiilit mitatuista suureista (lämpötila, suolaisuus, sameus, partikkelien kokonaistilavuuskonsentraatio, suurten partikkelien tilavuuskonsentraatio ja pienten partikkelien tilavuuskonsentraatio) Paimionlahdella vuosina 2020 ja 2021. Mittausasemien sijainnit on osoitettu kuvassa 2.8. MM10: Pala sisäosa U1, MM7: Pala keskiosa U6, MM6: Vikannokka, MM5: Attu länsi 15, MM1: Längsidarinne and MM27: PO16-GTK.

Tulokset ja tulosten tarkastelu

Päälyysvesikerroksen paksuus oli suurempi vuonna 2020, ollen 16 m sisäosissa ja 25 m ulko-osissa 2020 ja 12 m sisäosissa ja 22 m ulko-osissa 2021. Yleisesti ottaen lämpötilan ja suolaisuuden kerrostuneisuus olivat voimakkaasti yhteydessä toisiinsa. Lämpötila vaihteli välillä 7–18 °C vuonna 2020 ja 8–14 °C vuonna 2021. Suolaisuus vaihteli välillä 5.7–6.5 vuonna 2020 ja 5.4–6.0 vuonna 2021 (Kuva 2.1).

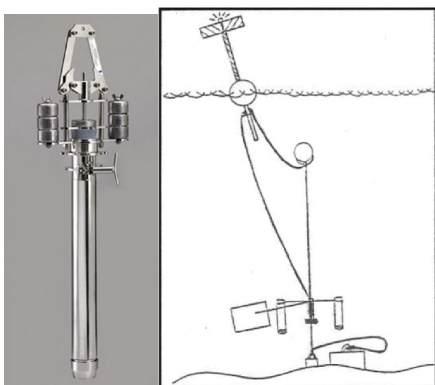
Pintaveden sameus oli suurinta lähinnä jokisuuta olevilla asemilla ja väheni kohti avomerta. Sisäaemilla sameuden voimakas kasvu pohjan läheisyydessä osoitti partikkelien kulkeutumista pohjanläheisessä avomerelle suuntautuvassa virtauksessa. Ulommilla asemilla suurimmat sameudet havaittiin alusvedessä eri syvyyksillä. Kokonaispartikkelipitoisuus suurelta osin noudatti sameuden jakaumaa, mikä osoittaa näiden muuttujien välisen voimakkaan yhteyden.

Suurikokoiset, oletettavasti pääosin eloperäisestä aineksesta koostuvat partikkeliaggregaatit (184 µm kokoluokka) keskittyvät voimakkaiden tiheysmuutosten vyöhykkeille (harppauskerrokset) 12–25 m vedensyvyydessä. Tällainen eloperäisten partikkeliaggregaattien kertyminen heijastaa niiden pientä tiheyseroa meriveteen verrattuna, mikä johtaa aineksen hitaaseen vajoamiseen ja kertymiseen tiheyden rajapinnoille. Pienempien, pääosin mineraaliaineksesta koostuvien partikkelien (8 µm kokoluokka) pitoisuudet olivat korkeimmat pohjan läheisyydessä (Kuva 2.1). Tämä osoittaa jokiperäisen aineksen kulkeutumista ja merenpohjan aineksen resuspensiota pohjavirtauksessa. Partikkeliaineksen pystyjakauma osoittaa, että meriympäristössä merkittävä osa joen tuomasta kiintoaineksesta kulkeutuu harppauskerroksen ja pohjan myötäisten virtausten mukana. Tämä ilmiö tarkoittaa, että merkittävä osa maalta merelle kulkeutuvasta aineksesta jää havaitsematta kaukokartoitusmenetelmillä.

2.1.2. Vajoavan partikkeliaineksen tutkimukset Halikonlahdella

Johdanto

Sedimenttikeräimiä hyödynnetään laajasti sedimentologisissa vesistötutkimuksissa. Sedimenttikeräimet mahdollistavat kiinteän aineen ja erilaisten hiukkasten sekä haitallisten aineiden sedimentoitumisen seurannan ja mallinnuksen erilaisissa vesiympäristöissä sekä myös kipsin ja biohiilen käytön vaikutusten ja ravinnekuormituksen seurannan. Metrin etäisyydelle pohjan yläpuolelle asennetut kaksiputkiset sedimenttikeräimet tunnetulla pinta-alalla keräävät edustavasti vesipatsaasta pohjalle kertyvää ainetta. (Kuva 1).



Kuva 2.2. Käytetty kaksiputkinen sedimenttikeräin sekä Kajak-sedimenttinoudin.

Keräimen ajastettu tyhjennys mahdollistaa paikallisen sedimentaationopeuden arvioinnin hiukkasina aikayksikköä ja pinta-alaa kohden. Pohjanläheisiä sedimenttikeräimiä voidaan käyttää pitkäaikaisseurannassa mm. syventämään ymmärrystä hiukkasten kulkeutumisesta ja sedimentaatiosta, tukemaan ympäristönsuojelua sekä

asettamaan kynnsarvoja ja seuraamaan niiden toteutumista esim. mikromuoveille.

Pohjanläheisiä sedimenttikeräimiä on käytetty Halikonlahdella mittaamaan sedimentaationopeuksia ja tuottamaan tietoa sedimenttiprosesseista vuodesta 2018 lähtien. Keräimiä ankkuroitiin 11 kappaletta Halikonlahdelle sekä kaksi kappaletta kontrollialueelle Seilin saaren lähistölle. (Kuva 2.).

Keräimet 1–6 ja 14 keräsivät näytteitä kasvukauden aikana vuosina 2020 (6.5.–23.9.) ja 2021 (23.6.–21.9.). Lisäksi keräimet 8–11 keräsivät näytteitä talvikaudella 2020–2021 (28.9. 2020 – 7.5.2021). Keräin 5 menetettiin, keräin 7 jäi asentamatta materiaalin eroosion vuoksi ja keräintä 12 ei logistisista syistä saatu nostettua. Keräinseuranta Halikonlahdella jatkuu edelleen ja tulokset julkaistaan kokonaisuutena vuoden 2023 jälkeen seurannan valmistuttua.



Kuva 2.3 Keräinten sijainnit Halikonlahdella ja Seilin vertailualueella.

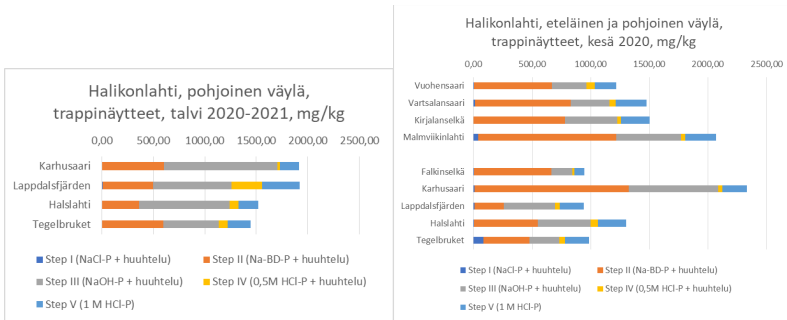
Raportoimme tässä keräinseurannan tuloksia vuosilta 2019–2021. Fosforipitoisuudet keräinnäytteiden eri fraktioista kasvukauden aikana määritettiin sekä Halikonlahden että Seilin näytteistä. Lisäksi pitoisuudet määritettiin kolmesta Kajak-sedimenttinoutimen näytteestä 0–1, 1–2 and 14–15 cm syvyyksiltä (kuva 1). Fosforin määrittäminen tehtiin neljästä eri fraktiosta Lukkarin ym. (2007) mukaan siten että labiili jae jäi määrittämättä. Fraktiot I (löyhästi sitoutunut) ja II (redox-sensitiivinen) sisällytettiin mobiiliin fosforiin. Fraktiot III (Al- oksideihin ja pelkistymättömiin Fe-oksideihin sitoutunut P) IV (Apatiitti ja muu epäorgaaninen P) sekä IV (refraktorinen orgaaninen P) laskettiin pysyviksi ja hautautuviksi.

Kokonaisfosforin (P_{tot}) ja labiilin fosforin pitoisuudet keräimissä vaihtelivat huomattavasti näytepaikkojen, vuodenaikojen ja vuosien välillä 2019–2021 (Taulukot 1 ja 2). Asemilla 1 ja 2 lähinnä Uskelan- ja Salonjoen suualueita kokonaisfosforin pitoisuus vaihteli välillä 1200–1500 mg kg⁻¹, kasvukauden aikana vuonna 2020. Kasvukauden aikana vuonna 2021 pitoisuudet olivat hieman korkeampia, noin 1600 mg kg⁻¹.

Lahden pohjoisosassa (keräimet 8–11) kokonaisfosforin pitoisuudet vaihtelivat pääosin välillä 1000–1200 mg kg⁻¹ molempina kasvukausina lukuun ottamatta keräintä 8, jonka pitoisuus oli poikkeuksellisen korkea ensimmäisellä kasvukaudella (2300 mg kg⁻¹). Mobiilit fosforin fraktiot käsittivät 56 % keräimessä 8, 27 % keräimessä 9, 42 % keräimessä 10 ja 48 % keräimessä 11. Kokonaisfosforin pitoisuudet ja fraktion II vallitsevuus vastaa aiempien samalla alueella vuosina 2018–2019 tehtyjen mittausten tuloksia (julkaisematon aineisto). Fraktion II suuri osuus viittaa resuspensoituneen tai maalta kulkeutuvan aineksen suureen osuuteen.

Taulukko 2.1. Vuodenaikaiset kokonaisfosforin fraktiot Halikonlahdella kesä- ja talvikausina 2019–2021.

GS2020	Paikka	Step II (Na- Step I (NaCl- P + huuhtelu)		Step III BD-P + huuhtelu)	Step III (NaOH-P + huuhtelu)	Step IV (0,5M HCl-P + huuhtelu)	Step V (1 M HCl-P)	Summa
		Hal-31	Vuohensaari	6,14	664,55	294,75	68,40	
Hal-32	Vartsalansaari	13,67	816,88	328,89	56,07	260,65	1476,16	
Hal-33	Kirjalanselkä	1,62	778,23	445,03	34,94	243,65	1503,47	
Hal-34	Malmviikinlahti	40,81	1177,98	551,10	35,99	265,68	2071,56	
Hal-35	Falkinselkä	3,61	659,51	179,35	20,09	82,41	944,98	
Hal-36	Karhusaari	8,26	1318,15	760,42	36,53	209,77	2333,13	
Hal-37	Lappdalsfjärden	9,48	249,46	435,61	41,93	206,38	942,87	
Hal-38	Halslahti	3,73	543,07	453,71	62,35	238,71	1301,57	
Hal-39	Tegelbruket	84,07	392,70	254,20	49,88	204,60	985,46	
WS2020-2021		Step I (NaCl- P + huuhtelu)	Step II (Na- BD-P + huuhtelu)	Step III (NaOH-P + huuhtelu)	Step III (NaOH-P + huuhtelu)	Step IV (0,5M HCl-P + huuhtelu)	Step V (1 M HCl-P)	Summa
521-8	Karhusaari	0,00	600,54	1103,08	22,98	188,55	1915,14	
521-9	Lappdalsfjärden	6,38	489,85	763,77	296,45	364,85	1921,29	
521-10	Halslahti	0,00	364,25	875,22	86,11	194,25	1519,84	
521-11	Tegelbruket	0,00	596,46	539,59	88,48	217,74	1442,27	

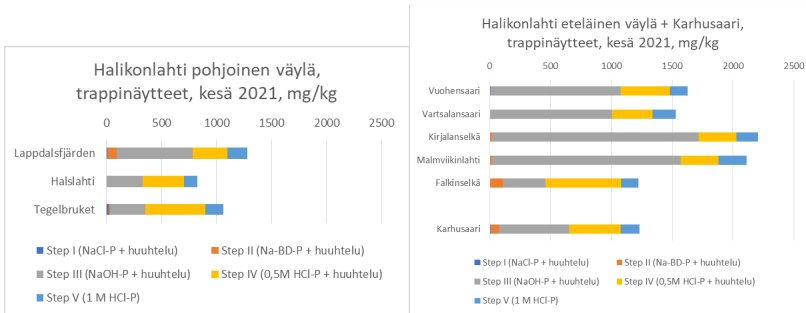


Keräimen 8 poikkeuksellisen korkea fosforipitoisuus laski samalle tasolle muiden keräinten kanssa (noin 1200 mg kg⁻¹). Mobiilin fosforifraktion osuus laski selkeästi kasvukaudella 2021 ja oli vain 5 %, 7 %, 1 % ja 3 % keräimissä 8, 9, 10 ja 11. Kokonaisfosforin pitoisuus pysyi kuitenkin samalla tasolla kuin edellisellä vuonna, lukuun ottamatta keräintä 8. Fraktio II vaikutti sekoittuneen Fraktioon III kanssa joten kyseessä on mahdollisesti ongelma näytteiden analysoinnissa. Havaitut huomattavat muutokset olivat odottamattomia ja analyysit pitää toistaa ennen lopullisia johtopäätöksiä. Talven 2020–2021 aikana kokonaisfosforin pitoisuudet olivat kasvukausia korkeampia, lähes 2000 mg kg⁻¹ keräimissä 8 ja 9 sekä noin 1500 mg kg⁻¹ keräimissä 10 ja 11.

Lahden eteläisessä haarassa kokonaisfosforin pitoisuudet olivat molempina kasvukausina lähellä toisiaan 1000–2100 mg kg⁻¹ ja mobiilin P:n osuus 50–60 %. (2020) laski vain 1–9 % vuonna 2021, myös vaatien tulosten uudelleentarkastelua. Keräimiä asennettiin myös Häverön ja Päiväluodon sedimentaatioaltaisiin vuosina 2019–2021. Häverössä, joka on saarien ympäröimä sekä maatalouden ja kalastuksen vaikutuksen alainen, pitoisuudet olivat jonkin verran korkeampia (1200–1800 mg kg⁻¹) kuin avoimemmassa Päiväluodossa (1150–1500 mg kg⁻¹).

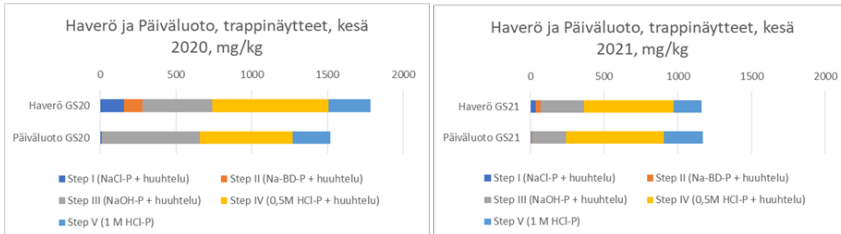
Taulukko 2.2. Kokonaisfosforin pitoisuudet ja fraktiot keräinnäytteissä vuonna 2021 Halikonlahdella ja 2019–2021 Seilin vertailualueella.

GS2021	Paikka	Step II (Na-BD-P + huuhtelu)		Step III (NaOH-P + huuhtelu)	Step IV (0,5M HCl-P + huuhtelu)	Step V (1 M HCl-P)	Summa
		Step I (NaCl-P + huuhtelu)	Step II (Na-BD-P + huuhtelu)	Step III (NaOH-P + huuhtelu)	Step IV (0,5M HCl-P + huuhtelu)	Step V (1 M HCl-P)	
HAL-45-1	Vuohensaari	8,04	0,00	1065,36	407,66	146,78	1627,84
HAL-46-2	Vartsalansaari	3,26	0,00	999,75	333,68	193,32	1530,01
HAL-47-3	Kirjalanselkä	3,05	14,23	1698,35	309,91	181,33	2206,88
HAL-48-4	Malmviikinlahti	2,94	13,68	1551,80	314,28	227,96	2110,66
HAL-49-6	Falkinselkä	3,87	108,31	346,84	623,06	141,53	1223,61
HAL-50-8	Karhusaari	10,16	63,12	581,71	420,92	154,64	1230,55
GS2021	Paikka	Step I (NaCl-P + huuhtelu)	Step II (Na-BD-P + huuhtelu)	Step III (NaOH-P + huuhtelu)	Step IV (0,5M HCl-P + huuhtelu)	Step V (1 M HCl-P)	Summa
HAL-51-9	Lappdalsfjärden	7,21	83,95	689,45	316,24	181,00	1277,85
HAL-52-10	Halslahti	3,69	0,00	326,88	374,64	118,03	823,25
HAL-53-11	Tegelbruket	17,77	16,56	318,10	546,09	162,25	1060,77



		Step I (NaCl- P + huuhtelu)	Step II (Na- BD-P + huuhtelu)	Step III (NaOH-P + huuhtelu)	Step IV (0,5M HCl-P + huuhtelu)	Step V (1 M HCl-P)	Summa
GS2020							
SEI-C-13	Haverö GS20	155,79	123,92	460,05	765,03	277,59	1782,39
SEI-D-14	Päiväluoto GS20	7,21	0,00	648,81	613,99	246,82	1516,83

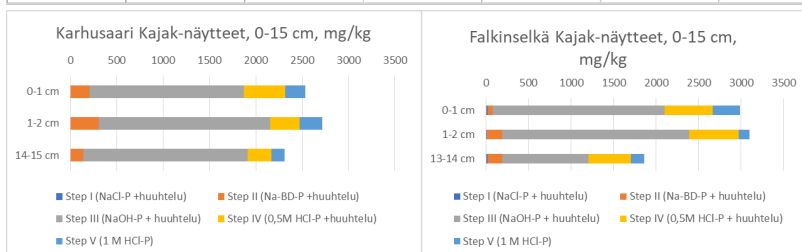
		Step I (NaCl- P + huuhtelu)	Step II (Na- BD-P + huuhtelu)	Step III (NaOH-P + huuhtelu)	Step IV (0,5M HCl-P + huuhtelu)	Step V (1 M HCl-P)	Summa
GS2021							
HAL-E-13	Haverö GS21	34,41	35,63	295,31	605,00	192,02	1162,37
HAL-F-14	Päiväluoto GS21	7,70	3,85	229,24	665,89	263,71	1170,40



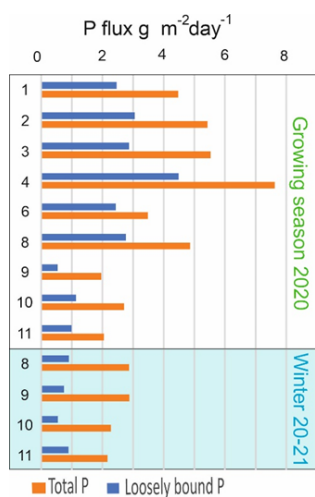
Kajak-näytteissä suurin osa fosforista oli muodossa NaOH-TP kaikilla syvyyksillä. Kokosnaisfosforin pitoisuus oli matalampi kaikissa näytteissä 14–15 cm syvyydessä kuin ylimässä kahdessa senttimetrissä.

Taulukko 2.3. Kajak-näytteet Karhusaaren (keräin 8) ja Falkinselän (keräin 4) alueilta.

	Step I (NaCl- P + huuhtelu)	Step II (Na- BD-P + huuhtelu)	Step III (NaOH-P + huuhtelu)	Step IV (0,5M HCl-P + huuhtelu)	Step V (1 M HCl-P)	Summa	
Karhusaari							
0-1 cm		3,59	204,07	1661,45	449,24	212,85	2531,19
1-2 cm		2,94	304,78	1845,55	321,03	242,02	2716,32
14-15 cm		2,83	137,75	1768,20	257,28	142,38	2308,44
Falkinselkä	Step I (NaCl-P	Step II (Na-BD-P	Step III (NaOH-P	Step IV (0,5M	Step V (1 M HCl-P)		
0-1 cm		14,82	61,18	2024,61	562,26	324,90	2987,78
1-2 cm		10,06	178,53	2204,67	581,28	122,47	3097,00
13-14 cm		17,65	168,01	1015,01	501,23	161,19	1863,10



Laskimme kokonaisfosforin ja mobiilin fosforin fraktioiden vuota pohjaan Halikonlahden alueella. Korkeimmat vuot Falkinselän alueella voivat heijastaa näytteenottoaikan luonnetta, jossa pieni sedimentaatioalue kerää ainesta laajalta matalalta alueelta (kuva 3.). Havaitut pitoisuudet vastasivat hyvin Saaristomereltä aiemmin raportoituja (Puttonen ym., 2014) ja ovat samankaltaisia sedimenttikeräintutkimuksista Suomen ja Ruotsin saaristoalueilta saatujen tulosten kanssa (Malmaeus ym., 2019).



Kuva 2.3. Kokonaisfosforin ja mobiilien fraktioiden laskennalliset vuot keräimestä 4 (Falkinselkä).

2.1.3 Rannikkovesistöön kulkeutuvan partikkeliaineksen fosforipitoisuus ja fosforin kemiallinen koostumus

Työn kuvaus

Rannikkovesistöön maalta kulkeutuvan partikkeliaineksen kvalitatiivista tutkimista varten otettiin Paimionjoesta ja Laajoesta (kuva 1) näytteet kesäkuussa 2021 sekä Paimionjoen partikkeliaineksestä lisäksi huhtikuussa 2022. Suodatettujen ja



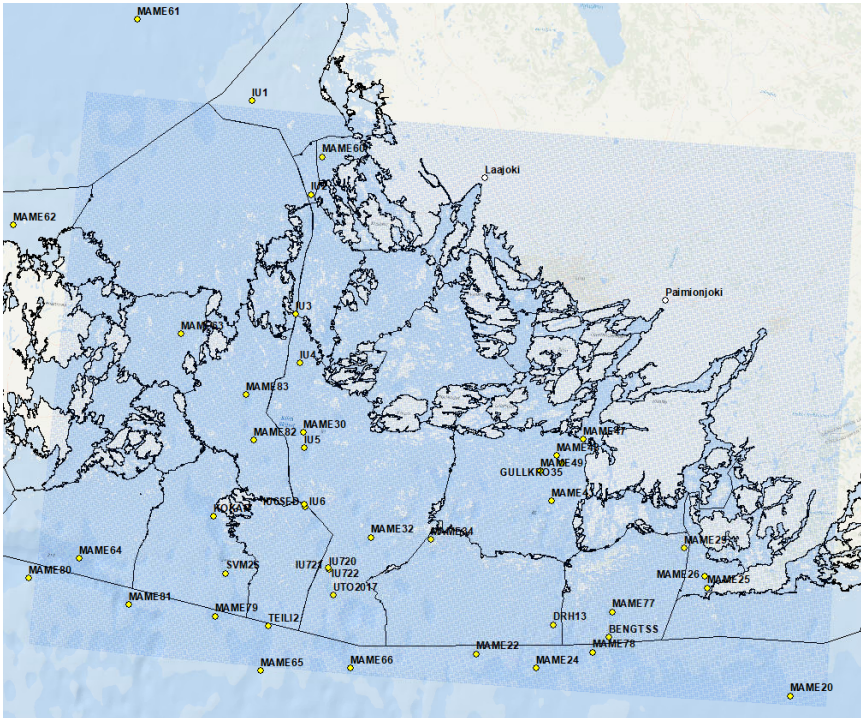
suodattamattomien vesinäytteiden analyysien perusteella huhtikuussa 2021 Paimionjoen veden liukoinen (DIP) ja kokonaisfosforipitoisuus (TP) olivat selvästi korkeampia (0.88 ja $8.34 \mu\text{mol l}^{-1}$) kuin Laajoen (0.11 ja $1.98 \mu\text{mol l}^{-1}$), mutta kummassakin joessa liukoisen jakeen ($0,4 \mu\text{m}$ suodatettu osa) sisältämä P muodosti vain noin 15 % veden TP:stä. Partikkelimaisen orgaanisen P:n osuus oli jokivesissä keskimäärin noin 80 % TP:stä.

Paimionjoen vedestä kesäkuussa 2021 ja huhtikuussa 2022 laskeutetusta partikkeliaineksestä analysoitiin P:n eri liukoisuus- ja sitoutumismuotoja samalla menetelmällä kuin sedimentinäytteistä. Näyttemateriaalia oli niukasti, mutta tulosten perusteella niiden TP-pitoisuus (noin $40 \mu\text{mol g}^{-1}$) oli samaa luokkaa kuin rannikonlähteisten matalien alueiden sedimenttien pintakerroksissa. Jokivedestä laskeutetun partikkeliaineksen P:n kemiallinen koostumus poikkesi kuitenkin pintasedimenttien koostumuksesta siten, että jokivedestä kerättyssä aineksessa oli enemmän orgaanista P:a (noin 60% kokonaisfosforista) labiiliin orgaanisen P:n ollessa suurin yksittäinen P-muoto. Jokiveden partikkeliaineksestä oli myös enemmän adsorboitunutta, heikosti sitoutunutta P:a sekä alumiinin oksihydroksideihin sitoutunutta P:a, kuin sedimenttien pintakerroksissa. Näistä ensin mainittu on helposti vapautuvaa ja jälkimäinen viittaa maalta kulkeutuneisiin sekundäärimineraaleihin, jotka kuljettavat P:a mukanaan. Kesä- ja huhtikuussa otetut partikkeliainesnäytteet olivat P:n eri liukoisuus- ja sitoutumismuotojen suhteen hyvin samantyyppisiä, mutta huhtikuun näytteessä oli hieman enemmän heikosti sitoutunutta ja pelkistyviin raudan oksihydroksideihin sitoutunutta P:a ja kesäkuun näytteessä puolestaan enemmän orgaanista P:ta. Huhtikuun näytteen suurempi apatiittifosforin osuus viittaa myös voimakkaampaan mineraaliaineksen kulkeutumiseen.

2.1.3 Partikkelimainen ja liuennut fosfori avoimella Saaristomerellä

Työn kuvaus ja tulosten tarkastelu

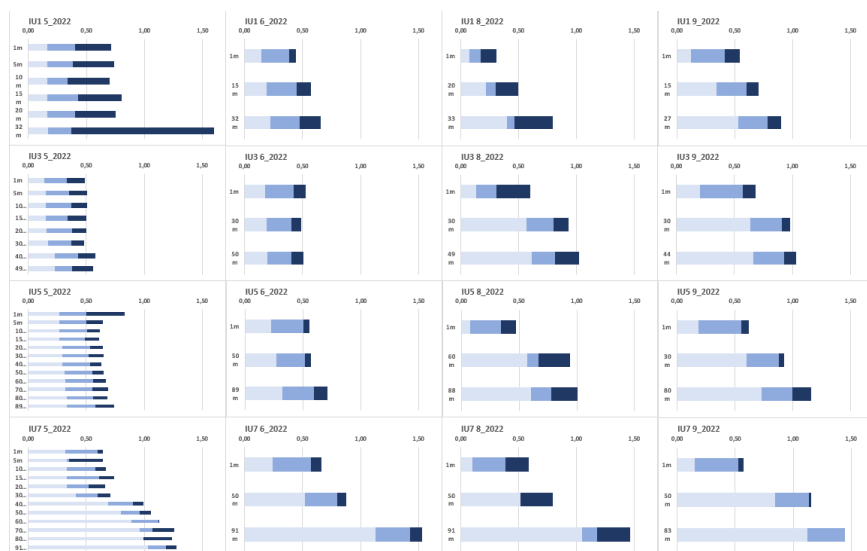
Maameri-hankkeen neljällä MTA Arandan tutkimusmatkalla 2020–2022 otettiin vesinäytteitä ja analysoitiin useiden vesikerrosten, tai vähintään pohjavesikerroksen (1 m pohjan yläpuolelta), ravinteet ja hydrografia yhteensä 41 näytepisteeltä (kuva 1), joista suurin osa oli uusia. Lisäksi vesinäytteitä saatiin Ilmatieteenlaitoksen tutkimusmatkoilta. Näitä tuloksia voidaan hyödyntää tulevaisuudessa mallinnuksen tarpeisiin ja ne tallennetaan Herttaan. Näytepisteiden syvyys vaihteli 27–214 m ja pohjavesikerroksen suolaisuus 5.67–10.83. Pohjavesikerroksen liuennut happi oli enimmillään 9.17 ml l^{-1} ja kahdella mallialueen eteläreunalla sijainneella näytepisteellä (MAME22 ja 20) oli rikkivetyä (26.1 ja $36.1 \mu\text{mol l}^{-1}$). Näiden hapettomien pohjien yläpuolisesta vesikerroksesta mitattiin myös korkeimmat ammoniumpitoisuudet (26.7 ja $9.9 \mu\text{mol l}^{-1}$) sekä korkeat liuenneen epäorgaanisen (7.5 ja $4.7 \mu\text{mol l}^{-1}$) ja kokonaisfosforin pitoisuudet (7.6 ja $5.0 \mu\text{mol l}^{-1}$). Myös silikaatin pitoisuus (3.4 – $70.8 \mu\text{mol l}^{-1}$) oli korkein hapettomien pohjien yläpuolisessa vedessä. Vesinäytteiden nitriitin ja nitraatin summa oli puolestaan korkeimmillaan Bengtskärin lähistöllä ($10.5 \mu\text{mol l}^{-1}$) ja kokonaistyyppi (15.0 – $40.9 \mu\text{mol l}^{-1}$) heikkohappisten alueiden lisäksi Gullkronan selällä.



Kuva 2.4. MTA Arandan neljän Maameri-hankkeen tutkimusmatkan vesinäytepisteet, joilta analysoitiin vesimassan tai vähintään pohjavesikerroksen ravinteet ja hydrografia (keltaiset pisteet) sekä Paimionjoen ja Laajoen vesinäytepisteet (valkoiset pisteet). Kuvan karttapohjalla (Esri) on varjostettuna rannikkomallin mallialue ja vesimuodostumien rajat.

Maalta rannikkovesistöön kulkeutuvasta P:sta saatiin tietoa myös MTA Arandan tutkimusmatkoilta analysoimalla eri vesikerroksista otetuista vesinäytteistä liukoinen epäorgaaninen (DIP) ja orgaaninen (DOP) sekä partikkelimainen orgaaninen ja kokonaisfosfori (TP). DIP sekä TP vaihtelivat määritysrajan alittavasta pitoisuudesta aina 7.14 ja 7.25 $\mu\text{mol l}^{-1}$ asti DIP:n muodostaessa keskimäärin noin 50 % TP:stä kaikissa vesinäytteissä. P-pitoisuudet olivat pääasiassa suurimpia syvien heikkohappisten akkumulaatiopohjien yläpuolisessa vedessä ja alhaisempia hapellisilla alueilla ja veden pintakerroksissa. Partikkelimaista orgaanista P:a analysoitiin enimmillään 1.79 $\mu\text{mol l}^{-1}$ ja sen suurimmat pitoisuudet löytyivät rannikon tai jokisuun läheltä otetuilta näytepisteiltä tai syvien alueiden resuspensiolle herkän pohjan yläpuolelta. Partikkelimaisen orgaanisen P:n osuus TP:stä oli kaikissa näytteissä keskimäärin noin 18 %. DOP, jota voidaan osin käyttää ravinteena etenkin, jos suoraan käyttökelpoista DIP:iä on niukasti, vaihteli määritysrajan alittavasta pitoisuudesta 0.67 $\mu\text{mol l}^{-1}$:aan ja muodosti keskimäärin noin 33 % TP:stä. DOP-pitoisuus oli yleensä korkeimmillaan veden pintakerroksissa aina noin 20–40 m syvyyteen asti ja pieneni pohjaa kohti. Matalilla, vesimassaltaan sekoittuneilla alueilla DOP-pitoisuudet olivat tasaisemmat eri syvyyksissä.

Keväällä ja syksyllä toteutetuilla MTA Arandan tutkimusmatkoilla vierailtiin eri näytepisteillä eikä siten voitu tutkia vuodenaikaisvaihtelua esim. sedimentin pintakerroksen P:ssä. Jonkin verran ajallista vaihtelua saatiin kuitenkin veden eri syvyyskerrosten P:lle, jota analysoitiin muutamilta pisteiltä 2–3 peräkkäisenä vuonna tai samalla tuotavalla kaudella neljänä eri ajankohtana. Nämä näytepisteet sijaitsevat Saaristomeren poikki Utöstä pohjoiseen kulkevalla linjalla Houtskararin, Iniön ja Kustavin länsipuolitse aina Uudenkaupungin tasolle asti (ns. IU-asemat) ja näytteenotot toteutettiin joko Maameri-hankkeen tutkimusmatkoilla tai SYKE:n merikeskuksen seurantamatkoilla. Asemilta IU1, IU3, IU5 ja IU7 touko-, kesä-, elo- ja syyskuussa 2022 otetuissa vesinäytteissä TP, erityisesti DIP, pääsääntöisesti kasvoi pinnasta pohjaa kohti ja Saaristomeren pohjoisosasta (IU1) etelää ja Utötä (IU7) kohti. Poikkeuksena aseman IU1 partikkelimaisen orgaanisen P:n osuus oli suuri toukokuussa otetuissa näytteissä, mikä on voinut johtua osin partikkelilaineen sekoittumisesta matalan aseman merenpohjasta. DIP:n tavoin partikkelimaisen orgaanisen P:n pitoisuus yleensä kasvoi pohjaa kohti, kun taas DOP:n pitoisuudet pienenevät. Näytteenoton ajankohta näkyi tuloksissa siten, että TP:n ja DIP:n pitoisuudet olivat pääsääntöisesti suurimmillaan syyskuussa ja DOP:n pitoisuudet olivat pienimmillään elokuussa (kuva 2). Linjan eteläisimmältä näytepisteeltä, IU7:lta, otettiin lisäksi vesinäytteet kolmena peräkkäisenä syksynä ja havaittiin hienoista vaihtelua eri vuosien välillä: DIP ja TP olivat elokuussa 2021 korkeampia, erityisesti 40 metrin ja sen alapuolella kuin elo-syyskuussa 2020 tai 2021, kun taas DOP:n osuus koko vesimassassa oli suurempi syyskuussa 2020 verrattuna seuraaviin kahteen syksyyn.



Kuva 2.5. Vesimassan TP:n jakaantuminen DIP:iin (vaaleansininen), DOP:iin (keskisininen) ja partikkelimaiseen orgaaniseen (tummansininen) P:iin Saaristomeren pohjoisosasta (IU1) etelään Utön lähelle (IU7) kulkevalla linjalla (ylhäältä alas) touko-, kesä- elo- ja syyskuussa 2022 (vasemmalta oikealle).

2.2. Partikkeliaineksen kulkeutumis- ja kerrostumisalueiden selvittäminen

2.2.1 Kipsilisäyksen vaikutus jokiveden liuenneen orgaanisen aineen flokkulaatioon Paimionjoella

Johdanto

Selvitimme kokeellisesti peltojen kipsikäsittelyn seurauksena vesistöihin päätyvän kipsin vaikutuksia liuenneen orgaanisen aineen flokkulaatioon Paimionjoella. Flokkulaatioissa vedessä olevat orgaaniset molekyylit aggregoituvat suuremmiksi partikkeleiksi veden ionivahvuuden kasvaessa (Gregory, 1989). Luonnonvesissä flokkulaatiota tapahtuu erityisesti jokisuistoissa, joissa makea jokivesi sekoittuu ionivahvuudeltaan suurempaan meriveteen. Flokkulaatio tehostaa paikallista orgaanisen hiilen kulutusta, koska heterotrofiset bakteerit hyödyntävät tehokkaasti flokkuloituneita partikkeleita, eivätkä suuremmat partikkelit välttämättä kulkeudu niin pitkälle kuin pienemmät molekyylit.

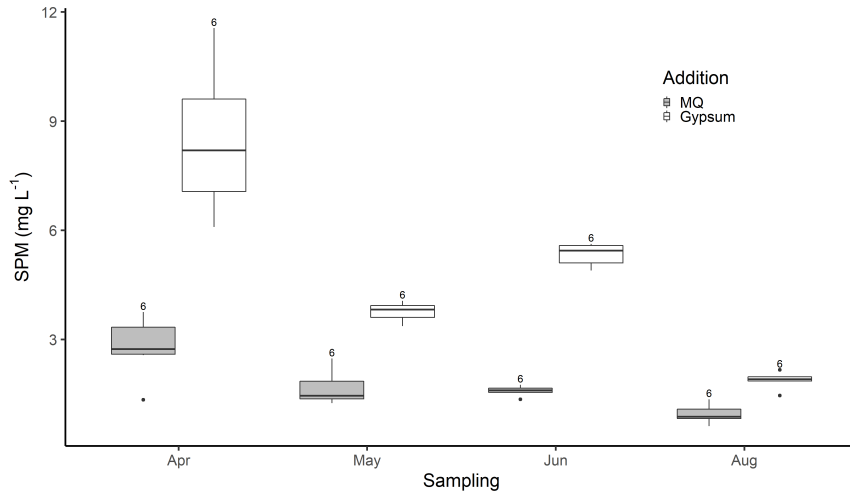
Peltojen kipsikäsittely saattaa paikoittain nostaa lähivesistöjen kalsium- ja sulfaatti-ionien pitoisuuksia, mikä voi aiheuttaa flokkulaatiota. Pyrimme selvittämään kipsin aiheuttaman flokkulaation (1) voimakkuutta, eli vaikutuksia jokiveden orgaanisen aineen partikkelikokoon, (2) seurauksia liuenneen orgaanisen aineen määrään ja koostumukseen, sekä (3) vaikutuksia mikrobiologiseen hiilen kiertoon.

Työn kuvaus

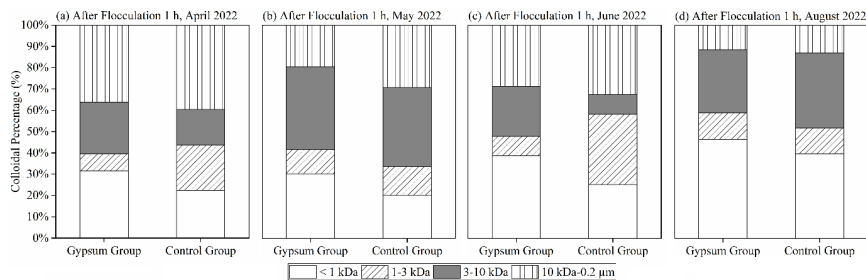
Keräsimme jokivettä Paimionjoen alajuoksulta (60°25'18.2"N 22°39'15.8"E) neljä kertaa keväällä ja kesällä 2022. Vesi suodatettiin (0,2 µm) partikkeliaineksen poistamiseksi. Suodatettuihin näytteisiin lisättiin 10 % tilavuudesta joko 15 mM kipsiliuosta tai milliQ-vettä (verrokinäytteet), jonka jälkeen molempien käsittelyjen näytteitä sekoitettiin tunnin ajan flokkulaattorilla (Velp Scientifica FC6S). Flokkulaation jälkeen mitattiin partikkeliaineksen määrä, partikulaarisen ja liuenneen orgaanisen hiilen pitoisuudet, liuenneiden orgaanisten molekyylien kokojakauma, liuenneen orgaanisen aineen optiset ominaisuudet sekä flokkulaatioon mahdollisesti vaikuttavien alkuaineiden pitoisuudet. Lisäksi flokkuloiduista näytteistä otettiin alanäytteet, joita inkuboitiin 15 päivän ajan, ja seurattiin flokkulaation vaikutusta mikrobiologiseen hiilen kiertoon (respiraatio, bakteeritiheys, liuenneen orgaanisen hiilen pitoisuus ja optiset ominaisuudet).

Alustavat tulokset

Flokkulaattorisekoituksen aikana kipsikäsiteltyihin näytteisiin muodostui enemmän partikkeliaineita kuin verrokinäytteisiin (Kuva 1). Liuenneiden orgaanisten molekyylien suhteellisessa kokojakaumassa näkyi siirtymää suurempiin kokoluokkiin kipsikäsitellyissä näytteissä (Kuva 2).



Kuva 2.6. Flokkulaation seurauksena muodostunut partikkeliaineksen määrä kipsikäsitellynäytteissä (valkoiset laatikot) ja verrokinäytteissä (harmaat laatikot). Numerot laatikoiden päällä kertovat näytteiden määrän.



Kuva 2.7. Liuenneiden orgaanisten molekyylien suhteellinen kokojakauma.

2.3. Sedimentin potentiaalisesti labiilin fosforin pitoisuuksien alueellinen tarkentaminen

2.3.1. Tutkimukset Paimionlahden joki-avomerijatkumola ja fosforin fraktiot sedimentissä

Työn toteutus

Paimionlahden intensiivitutkimusten näytteenottoasemat

Helsingin yliopiston ja GTK:n toteuttaman Paimionlahden intensiivitutkimuksen näytepisteitä oli yhteensä 28 (Kuva 2.8) ja niillä käytiin MTA Augustalla Helsingin yliopiston ja GTK:n yhteismatkalla syyskuussa 2020. Näytepisteitä valittiin 12 vesi-, sedimentti- ja pohjaeläinnäytteenottoa varten. Vesinäytteistä määritettiin lämpötila, suolapitoisuus, happi sekä liukoiset- ja kokonaisravinteet. Lisäksi vesinäytteistä määritettiin perustuotanto (plankton, chl *a*, feofytiini), liukoiset kiintoaineet ja DOM. Sedimenttinäytteistä mitattiin orgaaninen hiili, typpi ja fosforipitoisuus ylimmästä sedimenttikerrostumasta (Taulukko 2.4). Vuonna 2021 näytteenotto tehtiin uudestaan yhdeksällä näytepisteellä (Kuva 2.8, Taulukko 2.4).



Kuva 2.8. Paimionlahden pohjaeläin, sedimentti ja vesinäytteiden sijainnit vuonna 2020. Yhdeksällä näytepisteellä käytiin myös vuonna 2021; MM10, MM7, MM19, MM6, MM5, MM23, MM1, MM2 ja MM27 (Taulukko 2.4).

Psennerin *ym.* (1984) menetelmästä. Aiemmin tehdyt kokeet osoittavat kuitenkin, että Ruttenbergin **CDB-P:n ja Res-P:n summa** on lähellä Psennerin *reaktiivistä fosforia* ($\text{NH}_4\text{Cl-rP} + \text{BD-rP} + \text{NaOH-nrP}$, Puttonen *ym.* 2014), siis tulokset ovat vertailukelpoisia. Molemmat antavat arvion sedimentin *potentiaalisesti labiiliin fosforin* määrästä. Muut sedimenttianalyysit – orgaaninen hiili (C_{org}), kokonaistyppi (N_{tot}), kokonaisalumiini (Al) tehtiin Labtiumissa (TCEA, ICP-OES).

Taulukko 2.5. Sedimentin fosforifraktiointi SEDEX-menetelmän mukaan. Huom: Vaiheen 2–3 ja 3–4 välillä näytteet huuhdeltiin NH_4Cl (1M)- liuoksella poistamaan resorboituneen P:n (mittaus UV/VIS). Huuhtelujen pitoisuudet lisättiin edellisen vaiheen arvoon. 1. Vaiheen tulokset olivat UV/VIS-laitteen määrittäysrajan alapuolella.

Reagenssi	Fraktio	Uutetut P-faasit	Mittausmenetelmä
NH_4Cl , 1M, pH 8	1. $\text{NH}_4\text{Cl-P}$	Kevyesti sorboitunut	UV/VIS
Na-sitraatti (0.3M, Na-ditioniitti (0.1M), Na-bikarbonaatti (1.0M), pH 8	2. CDB-P	Rauta- ja mangaanioksideihin sitoutunut P, labiili orgaaninen P	ICP-MS
Na-asetaatti, 1M, pH 4	3. Na-acet.-P	Hydroksiapatiitti, fluoriapatiitti (Ca-P)	ICP-MS
HCl, 1M, pH 0	4. HCl-P	Muu apatiitti (Ca-P)	ICP-MS
Hehkutus 550°C , 4 t., HCl, 1M, pH 0	5. Res-P	Muu orgaaninen P	ICP-MS

Formatted: Finnish

Tulokset ja tulosten tarkastelu

Paimionlahden tulokset osoittavat, että fosforin fraktioiden kokonais- ja suhteelliset pitoisuudet vaihtelevat sekä syvyyden mukaan sedimentin patsaassa, että lateraalisesti (joki-avomerijatkumoa pitkin).

Vertikaaliset vaihtelut P fraktioissa

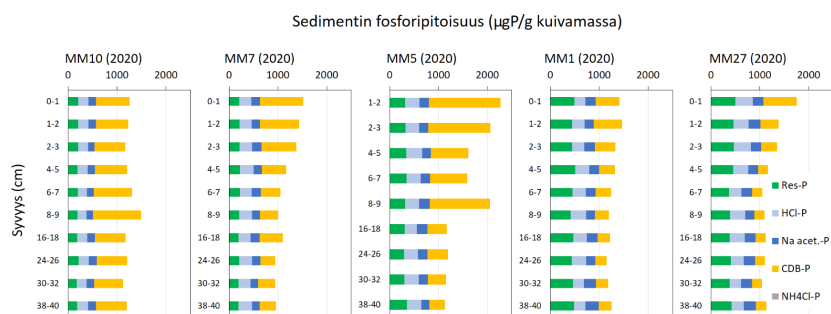
Kaikissa näytteenottopisteissä pintasedimentin (0–2 cm) tärkein P fraktio on CDB-P (n. 500–1500 $\mu\text{gP/g}$, kuva 2.9), eli rauta- ja mangaanioksideihin sitoutunut P sekä labiili orgaaninen P. CDB-P-fraktion pitoisuus yleensä laskee syvyyden myötä sedimentin patsaassa. Tämä ilmiö sopii hyvin teoriaan, että labiili orgaaninen aines hajoaa hapettomassa mineralisaatiossa sedimentin pinnan alla, ja että oksidimineraalien pelkistys liittyy tähän prosessiin (Reed *ym.*, 2011). Fosforia siis vapautetaan sekä orgaanisesta aineksestä että oksidimineraaleista huokosveteen, minkä seurauksena kiinteän faasin kokonaispitoisuudet laskevat syvyyden myötä. Muiden fraktioiden profiilit (mukaan lukien Res-P) toisaalta näyttävät stabiilisemmilta.

Lateraaliset vaihtelut potentiaalisesti labiileissa P-fraktioissa

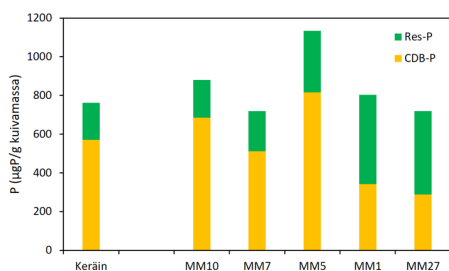
Potentiaalisesti labiilin fosforin kokonaismäärät (keskimääräiset arvot 0–40 cm profiileissa n. 700–1200 µgP/g, **kuva 2.10**) ovat samassa suuruusluokassa kuin aiemmin raportoituja arvoja Saaristomerén alueella (Puttonen ym., 2014). CDB-P:n ja Res-P:n suhteelliset pitoisuudet näyttävät kuitenkin selkeitä trendejä MM10–MM27 joki-avomerijatkumoa pitkin (kuva 2.10). CDB-P:n osuus potentiaalisesti labiilista fosforista on suurempi lähempänä Paimionjoen suuta (MM10), kun taas Res-P:n osuus kasvaa mentäessä kohti saaristoa (MM27). Vaihtelu todennäköisesti johtuu siitä, että ylä-estuaarin sedimentin yleiset kemialliset ominaisuudet eroavat selkeästi niistä saaristoalueella. Ylä-estuaarin sedimentin alumiinipitoisuudet ovat suhteellisen korkeampia, ja orgaanisen aineksen kokonaismäärät suhteellisen alhaisempia saaristoon verrattuna (**kuva 2.11**). Tulokset osoittavat, että merkittävä osa Paimionjoen kuljettamaa savimateriaalia sedimentoituu ja akkumuloi ylä-estuaarin alueella ja siten laimentaa orgaanisen aineksen pitoisuutta ylä-estuaarin sedimenteissä. Joen kuljettaman materiaalin fosforifraktioiden muutosten siis odotetaan vaikuttavan merkittävästi ylä-estuaarin sedimentin fosforidynamiikkaan. MM7-näytteenottoaikan sedimenttikeräimen potentiaalisesti labiilin fosforin fraktioista CDB-P on selkeästi ylimäärin, ja CDB-P:n/Res-P:n suhteellinen jakauma muistuttaa ylä-estuaarin sedimentin vastaavia arvoja (MM10, MM7, **kuva 2.10**). Nämä havainnot tukevat tulkintaa, että joen kuljettama CDB-P vaikuttaa ylä-estuaarin sedimentin P-fraktioihin, kun taas saaristoalueella (MM1, MM27) Res-P:n suurempi osuus osoittaa orgaanisen aineksen vaikutuksen (Taulukko 2.5, kuva 2.10). Sedimentin C/N suhde myös laskee yläestuaarista (n. 9.0–9.5 mol/mol) saaristoon päin (n. 8.6–8.8) osoittaen, että autoktoninen osuus kokonaisorgaanisesta aineksesta kasvaa.

Temporaaliset vaihtelut P fraktioissa

Syyskuussa 2021 GEMAX-sedimentinäytteet otettiin samasta viidestä paikasta MM10, MM7, MM5, MM1, MM27 ja päällimmäis- (0–10 cm) kerrosten fosforin fraktiointi toistettiin SEDEX-menetelmän mukaan (Taulukko 2.5). Tulokset osoittavat, että vuosien 2020 ja 2021 fosforin fraktioiden keskimääräiset pitoisuudet eivät eronneet toisistaan (pairwise Wilcoxon, $p < 0.05$, **kuva 2.12**).



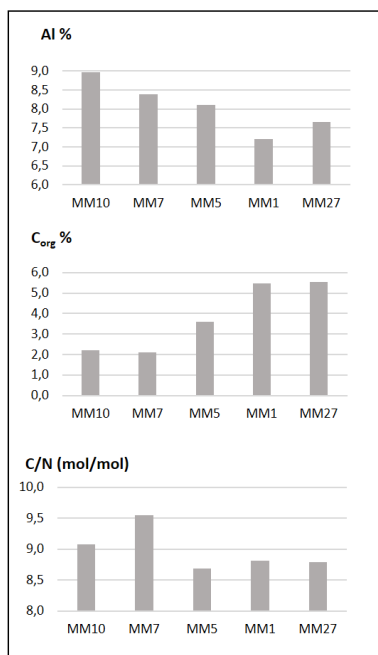
Kuva 2.9. Sedimentin fosforifraktiot (0–40 cm) Paimionlahden joki-avomerijatkumolla syyskuussa 2020 määriteltynä Ruttenbergin (1992) mukaan. $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ -arvot olivat määrittämissä rajoilla.



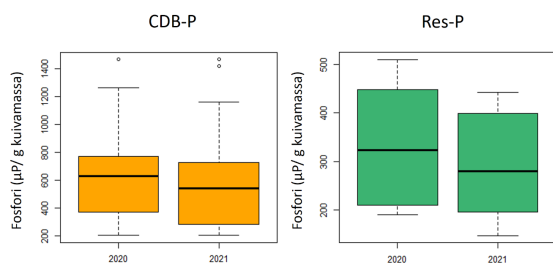
Kuva 2.10. Sedimentin CDB-P ja Res-P-fraaktioiden määrät Paimionlahden joki-avomerijatkumolla syyskuussa 2020 (0–40 cm profiilien keskimääräiset arvot). Fraktioiden summa antaa arvon potentiaalisesti labiilin P:n määrästä.

Kuva

40 cm



2.11. Sedimentin kemialliset ominaisuudet Paimionlahden joki-avomerijatkumolla syyskuussa 2020 (0–profiilien keskimääräiset arvot).



Kuva 2.12. Sedimentin pällimmäis- (0–10 cm) kerrosten fosforin fraktioiden vaihtelu 2020–2021 (kaikki mitatut CDB-P ja Res-P arvot viidestä näytteenotto paikasta Paimionlahden joki-avomerijatkumolla).

2.3.2. Sedimentin potentiaalisesti labiiliin fosforin pitoisuuksien alueellinen tarkentaminen Rannikkomallin tarpeisiin koko Saaristomeren alueella

Työn kuvaus

Rannikkomallin sisäisen P-kuormituksen syötearvion tarkentamiseksi Maameri-hankkeessa otettiin uusia näytteitä sedimentin potentiaalisesti labiiliin eli ajan myötä mahdollisesti kiertoon palaavan P:n (Jensen & Thamdrup, 1993) pitoisuuksien alueellista tarkentamista varten neljältä MTA Arandan ja kahdelta MTA Geomarin tutkimusmatkalta. Näytteenottoalueet valittiin siten, että ne painottuivat hienojakoisen sedimentin kertymäpohjille, joilta ei ole ennestään tietoa sedimentin P:n, tai potentiaalisesti labiiliin P:n pitoisuuksista, tai joiden tiedot ovat puutteelliset. Näytteitä otettiin mm. muutamilta sellaisilta vesimuodostumilta sekä mallialueen eteläreunalta, joilta ei ollut aiempaa tietoa sedimentin P:sta. Varsinkin Saaristomeren pohjoisreunalla oli kuitenkin luotausten mukaan alueittain niin kovia pohjia, etteivät ne soveltuneet sedimenttinäytteenottoon. Näytepisteiden sijainnin ja käytettävissä olleiden taustatietojen perusteella osa niistä valittiin sedimentin P:n eri liukoisuus- ja sitoutumismuotojen määrittämiseen (Lukkari et al. 2007), yhteensä 39 pistettä (kuva 2.13) ja lopuista näytteistä tehtiin karkeampia geokemiallisia analyysejä, mm. P:n ja muiden alkuaineiden kokonaispitoisuus.

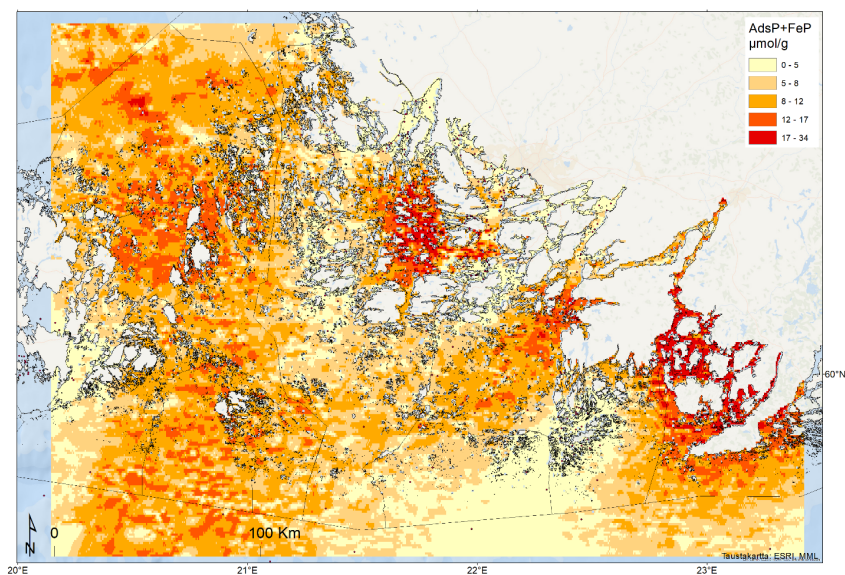
Tulokset ja niiden tarkastelu

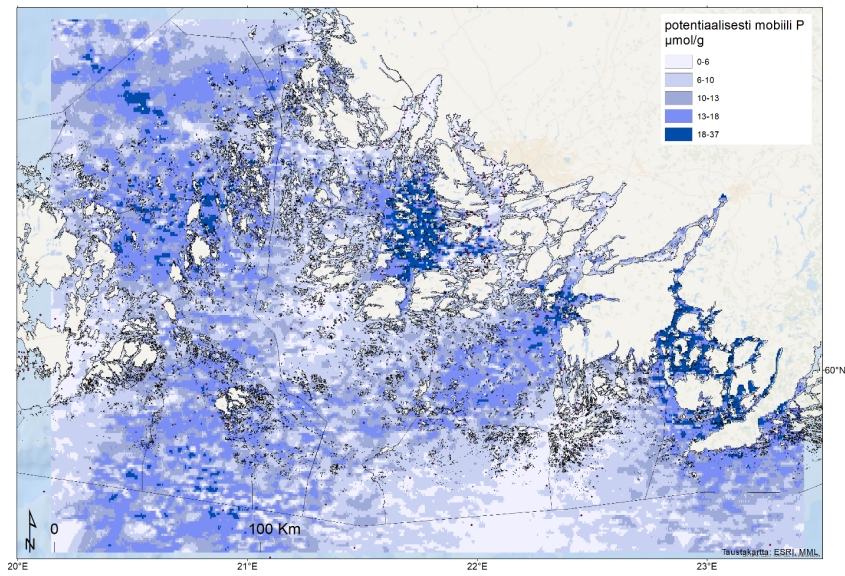
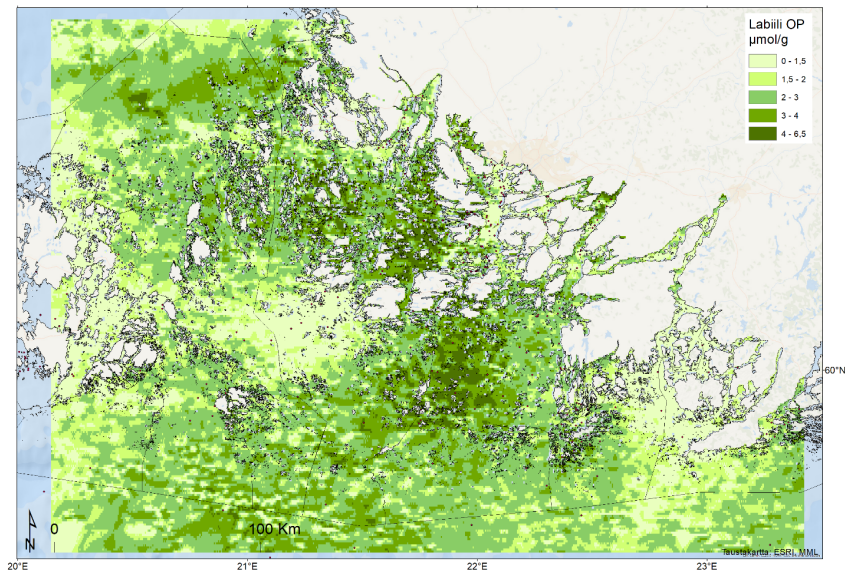
Pintasedimentin P:n kokonaispitoisuus vaihteli 25–90 $\mu\text{mol g}^{-1}$ DW ja siitä oli keskimäärin 38 % orgaanista P:a, josta edelleen noin puolet labiilia orgaanista P:a tai orgaanisen P:n hajoamistuotteita. Pintasedimentin raudan oksihydroksideihin sitoutuneen, happiolosuhteisiin reagoivan P:n pitoisuudet vaihtelivat karkeasti 3–40 $\mu\text{mol g}^{-1}$ DW välillä. Pienimmät pitoisuudet löytyivät avomeren hapettomista sedimenteistä, joista P:a sitovat raudan oksihydroksidit olivat oletettavasti liunneet ja vapauttaneet P:a. Tätä tukivat myös pohjan yläpuolisen vesikerroksen kohonneet fosfaatti- ja alhaiset happipitoisuudet. Näillä alueilla mahdollisesti kiertoon palaavassa sedimentin P:ssa korostuu

labiilin orgaanisen P:n rooli, jota vapautuu vähitellen mineralisaation seurauksena ja joka ei raudan oksihydroksidikerroksen puuttuessa pidäty sedimenttiin, vaan vapautuu pohjan yläpuoliseen veteen. Samoilla heikkohappisilla pohjilla alimman vesikerroksen kohonneet ammoniumpitoisuudet tukivat mineralisaation vaikutusta. Suurimmat raudan oksihydroksideihin sitoutuneen P:n pitoisuudet olivat sisäsaaristossa Paimionjoen ja Aurajoen laskualueella sekä muutamilla syvillä voimakkaan sedimentaation alueilla, joissa virtaus- tai sekoittumisoloista johtuen sedimentin pinta oli pysynyt hapellisena. Pelkistyviin raudan oksihydroksideihin sitoutunut P laski usein voimakkaasti pinnasta noin 15 cm syvyydestä analysoituun taustapitoisuuteen nähden, johtuen pelkistävästä oloista syvemmissä kerroksissa ja sieltä raudan pelkistymisen tai mineralisaation takia vapautuneen fosfaatin kertymisestä hapellisen pinnan sorptiopintoihin. Tämä näkyi myös orgaanisen P:n pitoisuuden alenemisena sedimentin syvämmässä kerroksessa.

Huokosveden liukoinen tai heikosti adsorboitunut P muodosti tyypillisesti kuiva-ainetta kohti laskettuna vain noin 3 % P:n kokonaismäärästä, mutta varsin suuria pitoisuuksia ($7 \mu\text{mol g}^{-1}$) löytyi mm. hapelliselta runsaasti P:a sisältävältä syvältä pohjalta, jossa vapaita sitomisaikoja ei mahdollisesti riittänyt P:n tehokkaampaan sitomiseen. Apatiitti-P ja alumiinin oksihydroksideihin sitoutunut P muodostivat keskimäärin 21 % ja 4 % P:n kokonaismäärästä. Niiden pitoisuudet ovat yleensä melko tasaisia syvyysprofiilissa ja osuudet korostuvat matalilla alueilla jokisuiden lähellä, transportaatio- tai eroosipohjilla sekä syvässä sedimenttikerroksissa, mikä heijastaa näiden P-muotojen immobilia, ravinnekierrosta poistuvaa luonnetta. Maameri-hankkeessa tuotettu uusi tutkimusaineisto sedimentin P:n liukoisuus- ja sitoutumismuodoista Saaristomerellä tullaan julkaisemaan vertaisarvioidussa tieteellisessä julkaisusarjassa.

Kemiallinen uutto erottaa sekä pelkistyviin raudan oksihydroksideihin sitoutunutta, että labiilia orgaanista P:a myös syvästä sedimenttikerroksista, joista P:n ei oleteta vapautuvan ainakaan lyhyellä aikavälillä takaisin kiertoon. Sisäisen kuormituksen syötearviossa huomioidaankin kullakin alueella tyypillisesti hautautuva osa näistä P-muodoista arvioitaessa pinnan potentiaalisesti labiiliin P:n kokonaismäärää. Saaristomeren alueelta aiemmin kootussa sedimentin fosforiaineistossa oli paljon tuloksia ilman hautautuvan taustapitoisuuden arviota, joten näille alueille arvio tehtiin uuden aineiston avulla lähellä tai samantyyppisellä pohjalla sijaitsevan näytepisteen taustapitoisuuksien mukaan. Kuvassa 4 on esitetty alueelliset interpolaatiot sedimentin pinnan pelkistyviin raudan oksihydroksideihin sitoutuneesta (ylin kuva) sekä labiilista orgaanisesta P:sta (keskimmäinen kuva) hautautuvan taustapitoisuuden vähentämisen jälkeen, sekä näiden summana potentiaalisesti labiili P (alin kuva).





Kuva 2.14. *Sedimentin pinnan a) adsorboituneen ja pelkistyviin raudan oksihydroksideihin sitoutuneen, b) potentiaalisesti labiilin orgaanisen ja c) potentiaalisesti labiilin P:n pitoisuuksien ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{DW}$) interpolaatiot mallialueen hienojakoisilla pohjilla (taustapitoisuuden vähentämisen jälkeen) Maameri-hankkeessa tuotetun sekä aiemman käytettävissä olleen aineiston pohjalta.*

Kuvan 2.14 interpolaatioiden mukaan suurimmat adsorboituneen ja pelkistyviin raudan oksihydroksideihin sitoutuneen eli happiolosuhteisiin reagoivan P:n pitoisuudet löytyvät sisäsaaristosta, Mynälahden eteläpuolelta ja Kemiön itäpuolelta sekä Kemiön ja Hankoniemen välisestä saaristosta. Labiilin orgaanisen P:n pitoisuudet ovat puolestaan korkeimmillaan Mynälahden sekä Korppoon ja Nauvon eteläpuolisen välisaariston alueella. Nämä molemmat mahdollisesti kiertoon palaavat P-muodot huomioiden suurimmat mallin sisäisen kuormituksen syötearvioon vaikuttavat P-pitoisuudet löytyvät Mynälahden eteläpuolisesta saaristosta sekä Kemiön ja Hankoniemen välisestä saaristosta. Lisäksi kartalla erottuvat Kumlingen pohjoispuolen sekä Saaristomeren pohjoisosan suuremmat pitoisuudet.

Verrattaessa Maameri-hankkeessa tuotetun uuden tiedon mukaista arviota sedimentin pelkistyviin raudan oksihydroksideihin sitoutuvan P:n alueellisesta jakaumasta Saaristomerimalli-hankkeen loppuraportissa (2015) esitettyyn havaitaan tarkentuneen tiedon korostavan Kemiön saaren ja Hankoniemen välisen saariston sekä Kemiön saaren länsipuolen pitoisuuksia. Lisäksi korostuvat Ahvenanmaan koillis-, itä- ja eteläpuoliset alueet. Mahdollisesti kiertoon palaavan orgaanisen P:n alueellisessa jakaumassa puolestaan korostuvat tarkentuneen tiedon valossa Saaristomeren pohjoisosa, Rymättylän ja Nauvon välinen saaristo sekä Nauvon eteläpuolinen saaristo. Yleensä ottaen mallialueen pohjois- ja eteläreunan sedimenttien tarkentuneet tiedot näkyvät tuloksissa.

Maameri-hankkeessa tuotettu uusi tieto ennestään tuntemattomien alueiden merenpohjan maalajeista, erityisesti hienojakoisten kertymäpohjien sijainnista sekä sedimentin P:n liukoisuus- ja sitoutumismuodoista auttaa tarkentamaan rannikkomallin sisäisen P-kuormituksen syötearviota Saaristomerellä. Vastaavaa tietoa on kuitenkin hyvin niukasti muilta Suomen rannikkoalueilta, erityisesti Selkämeren, Merenkurkun ja Perämeren alueilta, joten vastaavat kartoitukset ja mallinnuksen tarvitseman tiedon tuottaminen olisivat erittäin tärkeitä näilläkin merialueilla. Saaristomeren alueelta jäi myös puuttumaan tietoa hyvin matalien alueiden sedimenteistä, eivätkä ne ole mukana maalajimallissa. Näilläkin voi kuitenkin esiintyä ajoittain hapettomuutta, mikä korostaa niiden merkitystä paikallisessa P-kuormituksessa. Lisäksi tarvittaisiin vielä tietoa sedimentin pintakerroksen mahdollisesti kiertoon palaavien P-muotojen ajallisesta vaihtelusta eri vuodenaikoina, jotta mallin syötearvion ajallista jakaumaa voitaisiin tarkentaa todellisen mitta-aineiston mukaiseksi kirjallisuuteen perustuvan arvion sijasta. Tämän selvittämisessä huokosvesien ja ravinnevöiden tutkiminen yhdessä P:n liukoisuus- ja sitoutumismuotojen analysoinnin kanssa tukisivat johtopäätöksiä. Maameri-hankkeessa toteutettu jokiveden kuljettaman partikkeliaineksen P:n laadullinen tutkiminen jäi resurssipulan takia pienelle painotukselle. Tämän tarkempi ajallinen ja alueellinen selvittäminen yhdistettynä satelliittihavaintoihin auttaisi arvioimaan, mihin partikkeliaineksen mukana tuleva P-kuormitus päättyy ja missä se vapautuu levien käyttöön.

2.4. Huokosveden fosforipitoisuudet Paimionlahdella

Johdanto ja työn kuvaus

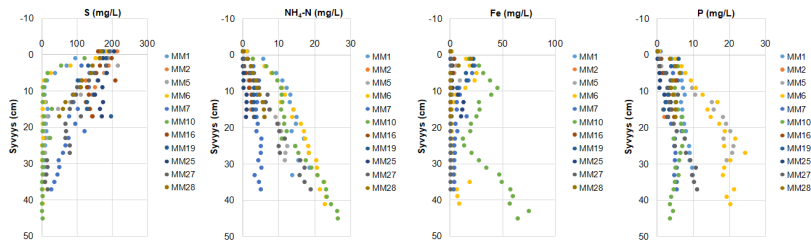
Sedimentin huokosveden ravinnepitoisuuksia tutkittiin Paimionlahden joki-avomerijatkumolla. Huokosvesiprofiilit otettiin Rhizon-menetelmällä 11 näytteenotto paikasta vuonna 2020 ja 9 näytteenotto paikasta vuonna 2021. Näytteitä otettiin 2 cm-resoluutiolla (0–20 cm tai 0–40 cm). Ammoniumtyypen (NH₄-N) pitoisuudet mitattiin Tvärminnen eläintieteellisen aseman laboratoriossa spektrofotometrillä. Muut parametrit – rikki (S), rauta (Fe), fosfori (P) – mitattiin Labtiumissa (ICP-OES-laitteella).

Tulokset ja tulosten tarkastelu

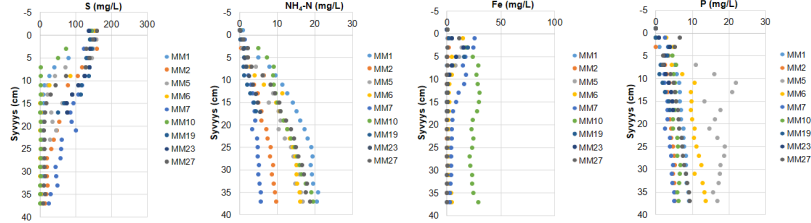
Huokosvesitulokset vahvistavat, että anaerobiset mineralisaatioprosessit ovat aktiivisia sedimentissä kaikilla näytteenotto paikoilla (kuva 2.15). Huokosveden rikin (S) pitoisuus laskee sedimentin pinnalta alaspäin osoittaen sulfaatin pelkistystä liittyen orgaanisen aineksen hajoamiseen (Reed *ym.* 2011). Samalla ammoniumtyypen pitoisuudet nousevat, sillä ammoniumtyyppi vapautuu hajoavasta orgaanisesta aineksestä. Paikoissa, joissa hajoamisen aktiivisuus on intensiivisempi, rikin inventaario (integroitu kokonaismäärä päällimmäis- 0–10 cm kerroksen huokosvedessä) on siis alhaisempi, kun taas ammoniumtyypen inventaario on korkeampi (esim. MM1, MM6, MM10, kuva 2.16). Toisaalta jos hajoaminen on hidas, tilanne on päinvastoin (esim. MM25). Vuosien 2020–2021 väliset erot S ja NH₄-N profiileissa ovat pieniä (kuva 2.15).

Huokosveden fosforipitoisuuksien tiedetään osoittavan prosessit, jotka vapauttavat fosforia kiinteästä faasista (Jilbert *ym.* 2011) ja niiden suhteet muihin huokosvesiparametreihin voivat auttaa tulkitsemaan eri prosessien merkittävyyttä. Paimionlahden tuloksissa huokosveden fosforin inventaariot korreloivat paremmin ammonium-typen inventaarioihin kuin liuenneen raudan (Fe) inventaarioihin. Tämä viittaa siihen, että orgaanisen aineksen hajoaminen vaikuttaa enemmän fosforin huokosvesipitoisuuksiin kuin oksidimineraalien pelkistys. Hyvä esimerkki on ero MM1 ja MM10-paikkojen välillä. Fosforin ja ammoniumtyypen inventaariot ovat molemmissa paikoissa suhteellisen korkeita ja vertailukelpoisia, kun taas Fe inventaariot eroavat kovasti. Ylä-estuaarin (MM10) Fe inventaario on sarjan korkein, kun taas välisaariston (MM1) Fe inventaario on lähellä nollaa. Huomattavaa kuitenkin on, että paikat, jotka näyttävät korkeimmat P ja NH₄-N inventaariot (MM1, MM6, MM10), jakautuvat läpi joki-avomerijatkumon. Hajoamisen intensiteetti näyttää siis olevan lateraalisesti heterogeenistä, eikä näytä selkeitä trendejä joki-avomerijatkumoa pitkin.

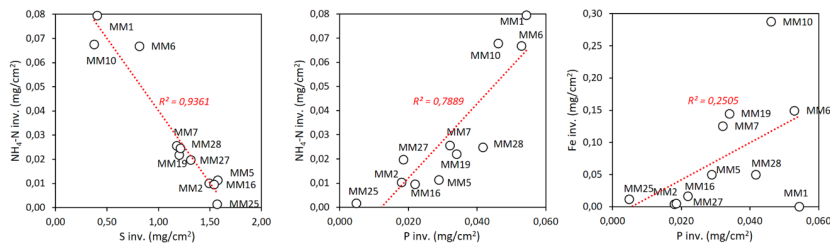
2020



2021



Kuva 2.15. Huokosvesiprofiilit Paimionlahden joki-avomerijatkumolla vuonna 2020–2021.



Kuva 2.16. Huokosveden parametrien inventaarit (0–10 cm) Paimionlahden joki-avomerijatkumolla vuonna 2020.

Viitteet:

Gregory, J. (1989). Fundamentals of flocculation. *Critical Reviews in Environmental Control*, 19(3), 185–230. <https://doi.org/10.1080/10643388909388365>

Henriksson, M. ja Myllyvirta, T. 2006. Suomen rannikkoalueiden luokittelu rehevöitymisriskin perusteella. Itä-Uudenmaan ja Porvoonjoen vesien- ja ilmansuojeluyhdistys r.y. 84 s.

- Jensen, H.S. and Thamdrup, B. 1993. Iron-bound phosphorus in marine sediments as measured by bicarbonate-dithionite extraction. *Hydrobiologia*, 253:47-59.
- Jilbert, T., Slomp, C. P., Gustafsson, B. G., & Boer, W. (2011). Beyond the Fe-P-redox connection: preferential regeneration of phosphorus from organic matter as a key control on Baltic Sea nutrient cycles. *Biogeosciences*, 8(6), 1699-1720.
- Lukkari, K., Hartikainen, H., Leivuori, M., 2007. Fractionation of sediment phosphorus revisited. I: Fractionation steps and their biogeochemical basis. *Limnol. Oceanogr. Methods* 5, 433–444. <https://doi.org/10.4319/lom.2007.5.433>
- Lukkari, K., Leivuori, M. and Hartikainen, H. 2008. Vertical distribution and chemical character of sediment phosphorus in two shallow estuaries in the Baltic Sea. *Biogeochemistry*, 90: 171-191.
- Lukkari, K., Leivuori, M., and Kotilainen, A. 2009a. The chemical character and behaviour of phosphorus in poorly oxygenated sediments from open sea to organic-rich inner bay in the Baltic Sea. *Biogeochemistry*, 96: 25-48.
- Lukkari, K., Leivuori, M., Vallius, H. and Kotilainen, A. 2009b. The chemical character and burial of phosphorus in shallow coastal sediments in the northeastern Baltic Sea. *Biogeochemistry*, 94: 141-162.
- Malmaeus, M., Puttonen, I., Kohonen, T., Karlsson, M., Lukkari, K., Mattila, J., 2019. Variations in the amount and composition of phosphorus in settling particles in the northern Baltic Sea archipelagos. *Boreal Environ. Res.* 24, 63–77.
- Psenner, R. V., Pucsko, R., & Sager, M. (1984). Die Fraktionierung organischer und anorganischer Phosphorverbindungen von Sedimenten—Versuch einer Definition ökologisch wichtiger Fraktionen. *Archiv für Hydrobiologie*, 10, 115-155.
- Puttonen, I., Mattila, J., Jonsson, P., Karlsson, O. M., Kohonen, T., Kotilainen, A., Lukkari, K., Malmaeus, J. M. & Rydin, E. (2014). Distribution and estimated release of sediment phosphorus in the northern Baltic Sea archipelagos. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 145, 9-21 <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.04.010>
- Reed, D. C., Slomp, C. P., & Gustafsson, B. G. (2011). Sedimentary phosphorus dynamics and the evolution of bottom-water hypoxia: A coupled benthic–pelagic model of a coastal system. *Limnology and Oceanography*, 56(3), 1075-1092.
- Ruttenberg, K. C. (1992). Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. *Limnology and oceanography*, 37(7), 1460-1482.
- Virtasalo, J. J., Kohonen, T., Vuorinen, I. and Huttula, T. 2005. Sea bottom anoxia in the Archipelago Sea, northern Baltic Sea – Implications for phosphorus remineralization at the sediment surface. *Marine Geology*, 224: 103-122.

Työpaketti 3: Fosforin käyttö ja varastoituminen eliöiden biomassaan, ravinnesuhteet ja rehevöitymisen ekosysteemivaikutukset

Salo T., Törnroos-Remes A. & Salovius-Laurén S. (ÅA), Villnäs A., Kauppi L., Lewandowska A., Roth F., Humborg C., Norkko J., Norkko A, (HY).

Johdanto

Tässä osiossa tutkittiin eliöstön kautta kiertävän fosforin eri aspekteja. Eliöihin fosfori sitoutuu joko planktonlevien tai suurempien levien perustuotannossa ja varastoituu lyhyemmäksi tai pidemmäksi aikaa eliöryhmästä riippuen. Eliöstö myös siirtää fosforia vedestä pohjille mm. leväkukintojen sedimentaation kautta. Leväkukintojen muodostumisen ja fosforin pitoisuuksien ja ravinnesuhteiden merkitystä tutkittiin sekä rannikko-avomerijatkumoilla että MTA Arandan tutkimusmatkoilla. Lisäksi tutkittiin rehevöitymisen ekosysteemivaikutuksia, erityisesti jokisamennuksen vaikutuksia rannikkojatkumoilla.

Keskeiset tulokset ja johtopäätökset

Jokiveden mukana valuma-alueelta tuleva ravinnekuormitus ja sameus vaikuttaa rannikkoekosysteemiin monin tavoin. Tulokset viittaavat typen merkitykseen

kasviplanktontuotantoa rajoittavana ravinteena ulko- ja välisaaristossa. Mikrobin solunulkoiset entsyymit ovat ilmeisen tärkeitä mikrobihajotusprosesseissa, jotka voivat olla merkittävä tekijä ravinteiden kierrätyksessä Saaristomerellä. Vapaa solunulkoisen alkalinen fosfataasi vedessä muodosti merkittävän osan orgaanisen fosforin hajotusaktiivisuudesta etenkin kevätaikana (Kuva 3). Solunulkoisten entsyymien merkitys typpipitoisten yhdisteiden hajotuksessa lisääntyi syvemmissä vesikerroksissa, kun taas hiilipitoisen orgaanisen aineen hajotus tapahtui pääosin soluihin sitoutuneilla entsyymeillä.

Ravinnepitoisuudet pintavedessä koko Paimionlahden joki-avomerijatkumolla kesällä 2020 ja 2021 vaihtelivat vähemmän kuin pohjanläheisessä vedessä mikä saattaa heijastaa aktiivisia pohjan mineralisaatiprosesseja. Sekä kasviplanktonbiomassa että partikkelimainen orgaaninen fosfori olivat korkeampia lähellä jokisuuta kumpanakin vuonna, 2021 pohjanläheinen korkea partikkelimaisen fosforin pitoisuus joillakin näytepisteillä voi viitata aktiiviseen resuspensioon sedimentistä. Kokonaisravinnesuhteet vedessä viittaavat typpiravinnerajoitteiseen kasviplanktontuotantoon joki-avomerijatkumolla kesäaikana.

Tulokset osoittavat, että ahdinparran ravinnepitoisuus heijastaa maantieteellisiä ja ajallisia eroja veden ravinnepitoisuuksissa 0–3 edeltävän kuukauden aikana. Ravinnepitoisuuksien lisäksi kuitenkin myös muut ympäristötekijät vaikuttavat levien ravinnepitoisuuteen etenkin äärisääolojen aikana, joten levien ravinnepitoisuuden käyttö indikaattorina ei suoraan korvaa vedenlaatutietoja. Indikaattoritiedoilla voidaan kuitenkin täydentää harvakseltaan kerättyä vedenlaatutietoa etenkin laajoilla, dynaamisilla saaristoalueilla. Pintaveden ja ahdinparran ravinteiden vaihtelua olisikin hyvä seurata useampana vuonna, jotta vuosien, sadannan ja kipsikäsittelyn vaikutuksia rannikko-



avomerijatkumon ravinnepitoisuuksiin ja ahdinparran käyttöä indikaattorina voitaisiin arvioida vieläkin tarkemmin.

Pohjaeläinyhteisöjen lajimäärä, biomassa sekä ravinne- ja hiilipitoisuudet nousevat jokisuulta ulkosaaristoa kohti. Pohjaeläinten ravinnon saatavuus paranee ulkosaaristoa kohti mentäessä ja olosuhteet sisempänä estuaarissa eivät ole pohjaeläimistöille ihanteelliset. Tulokset osoittavat, että hyvinvoivat pohjaeläinyhteisöt voivat toimia tilapäisinä hiilen sekä ravinteiden sitoijina, kun taas huonokuntoiset pohjaeläinyhteisöt eivät sido ravinteita, vaan palauttavat niitä nopeasti kiertoon. Sedimentin hapenkulutus trunksektilla heijasti pohjanläheisen veden happiolosuhteita siten että vähähappisissa oloissa vuonna 2020 myös hapenkulutus väheni. Ravinnevuoto sedimentistä veteen oli samankaltaista happiolosuhteista riippumatta lukuun ottamatta lähinnä Paimionjoen suuta sijaitsevaa näytteenottopistettä MM7, jolla lähes hapeton tilanne aiheutti suurentuneen fosfaatin vuon sedimentistä veteen.

Tulokset osoittavat, että Paimionjoki kuljettaa kasvihuonekaasuilla kyllästynyttä jokivettä kilometrien etäisyydelle jokisuusta myös kesän matalan virtaaman aikana. Paimionlahden jokivettä avomerijatkumon ilmastoaktiivisten kaasujen (CO₂, CH₄ ja N₂O) pitoisuudet olivat yleisesti korkeimpia jokisuulla ja jokivesi kuljetti CO₂ ja CH₄ jopa 10 km etäisyydelle jokisuusta kun taas korkeat N₂O- pitoisuudet tasaantuivat noin 1 km päässä. Arvioimme jokisuun kasvihuonekaasujen päästöt noin 80-kertaisiksi (2.79–3.30 g CO₂-ekvivalenttia m² d⁻¹ verrattuna uloimpaan avomeripisteeseen (0.04 g CO₂-ekvivalenttia m² d⁻¹).

Jokikuormituksen vaikutuksia (suolapitoisuus, ravinnepitoisuus, sameus ym.) monimuotoisuuteen tarkasteltiin Paimionlahden rannikko-avomerijatkumoilla sekä kasvillisuutta (levät ja vesikasvit) että rakkolevän ja rihmalevien joukossa eläviä selkärangattomia eliöitä tutkimalla. Tulosten perusteella jokiperäinen ravinnekuormitus muokkaa sekä kasvi-, levä- että eläinlajistoa Paimionlahden tutkimusjatkumolla. Ravinnekuorman lisäksi jokivesi alentaa veden secchi syvyyttä ja suolapitoisuutta ja pohjoisimpana jokisuun lähellä kasvaa pääosin makean veden kasveja, jotka viihtyvät pehmeillä, rehevöityneillä sedimentaatiopohjilla. Merelliset kasvi- ja levälajit rajoittuvat pääsääntöisesti ulkosaaristoon. Rakkohaurun seassa elävät eläinyhteisöt erosivat sisä- ulko ja välisaariston välillä, rihmalevän seassa elävät yhteisöt erosivat sisä- ja väli/ulkosaariston välillä mutta eivät väli- ja ulkosaariston välillä. Rihmaleväyhteisöt erosivat myös vuosien 2020 ja 2021 välillä. Suolapitoisuuden vaihtelun, ravinteiden ja samennuksen erillisvaikutuksia eliöstöön ei voida aineistosta arvioida. Tulokaslaji *Sinelobus vanhaarenia* tavattiin sekä rakkolevä- että rihmaleväfaunasta. Näiden löydösten ja muiden tutkijoiden havaintojen perusteella laadittiin artikkeli lajin levinneisyydestä Suomen rannikkoalueella (Gagnon et al. 2022). Tutkimusaineistojen perusteella ravinnekuorman vähentäminen on oleellista luonnon monimuotoisuuden kannalta. Tutkimustulosten valossa on erittäin huolestuttavaa, että etenkin ulkosaariston ravinnekuormitusta ollaan monin paikoin lisäämässä arvokkaiden elinympäristöjen lähellä uusien kalaviljelylaitosten myötä.

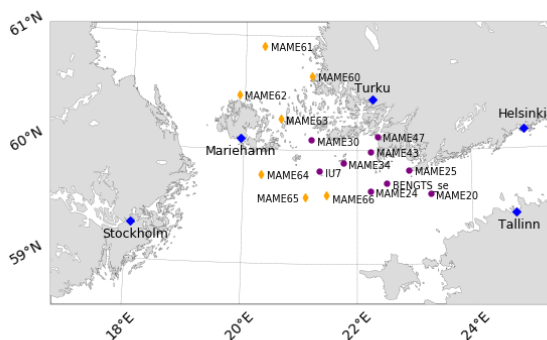
3.1. Planktonlevien fosforin käyttö ja ravinnesuhteet, sinileväkukintojen muodostumisen ja fosforipitoisuuksien välinen yhteys

3.1.1. Mikrobien orgaanisen aineen hajotuksen vuodenaikainen, alueellinen ja ajallinen vaihtelu Saaristomerellä.

Johdanto ja työn kuvaus

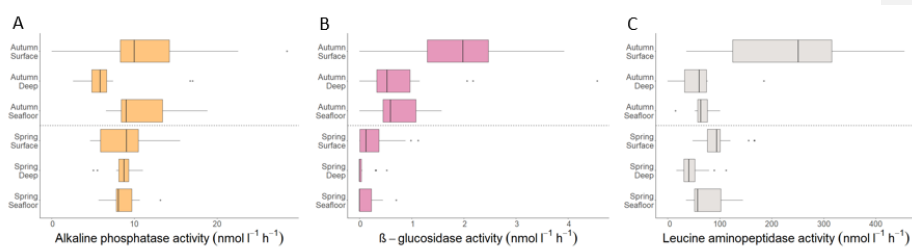
Mikrobit ovat osa Saaristomeressä olevasta fosforista sitoutuneena orgaanisiin molekyyliin, joka ei ole helposti saatavassa muodossa planktonlevien kasvuun. Orgaanisiin yhdisteisiin sitoutunut fosfori kiertyy takaisin levien käyttöön mikrobien hajotustoiminnan seurauksena. Hajotustoiminnan aktiivisuus, alueellinen jakautuminen ja vuodenaikaisuus eivät ole Saaristomerellä tunnettuja.

Mikrobien orgaanisen aineen hajotustoiminta tapahtuu entsyymien välityksellä. Entsyymit ovat joko sitoutuneena soluihin niiden pinnalla tai ne eritetään solunulkoisiksi entsyymeiksi ympäristöön. Hajotettavan aineen ja mikrobiyhteisöjen monimuotoisuuden vuoksi on todennäköistä, että mikrobien solunulkoiset entsyymit vaihtelevat Saaristomeren eri osissa. Tutkimme kolmen fluoresoivan mallisubstraatin avulla mikrobien solunulkoisten entsyymien välityksellä tapahtuvien orgaanisen hiilen (DOC) ja siihen sitoutuneiden ravinteiden (liuennut orgaaninen typpi DON ja liuennut orgaaninen fosfori DOP) hajotus- ja muutosprosessien vaihtelua eri syvyyksissä, alueilla ja vuodenaikoina Saaristomerellä. Mittaukset tehtiin Arandan tutkimusmatkoilta **kuvan 1** mukaisissa sijainneissa.



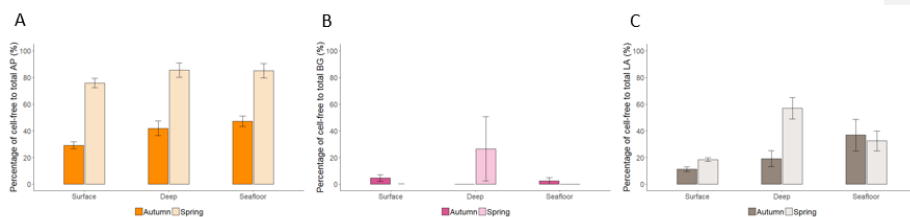
Kuva 3.1. Solunulkoisten entsyymien aktiivisuutta mitattiin syksyn 2020 (violettit ympyrät) ja kevään 2021 (oranssit vinoneliöt) Maameri-tutkimusmatkoilla.

Typipitoisen proteiinin hajutusnopeudet olivat kertaluokkaa hiilen (DOC) ja fosforin (DOP) hajutusnopeudet korkeampia kaikissa vesikerroksissa kumpanakin vuodenaikana, mikä viittaa mikrobiyhteisöjen voimakkaaseen typpirajoitteisuuteen (**Kuva 2**). Yleisesti orgaanisen aineen hajutusnopeus oli suurinta syksyllä pintakerroksessa mutta havaittu suuri vaihtelu johtuu todennäköisimmin lämpötilan, toisenvaraisten bakteerien tiheyden ja orgaanisen aineen laadun yhteisvaikutuksesta tutkimusalueen eri osissa.



Kuva 3.2. Alkalisen fosfaatin (A), β-glukosidaasin (B) ja Leusiini-aminopeptidaasin (C) hajutusnopeudet. Huomaa vaihtelevat asteikot eri kuvissa.

Tulokset viittaavat solunulkoisten entsyymien tärkeyteen mikrobihajutusprosesseissa, jotka voivat olla merkittävä tekijä ravinteiden kierrätyksessä Saaristomerellä. Vapaa solunulkoinen alkalinen fosfaatti vedessä muodosti merkittävän osan orgaanisen fosforin hajutusaktiivisuudesta etenkin kevätaikana (**Kuva 3**). Solunulkoisten entsyymien merkitys tyypipitoisten yhdisteiden hajotuksessa lisääntyi syvemmissä vesikerroksissa, kun taas hiilipitoisen orgaanisen aineen hajotus tapahtui pääosin soluihin sitoutuneilla entsyymeillä.



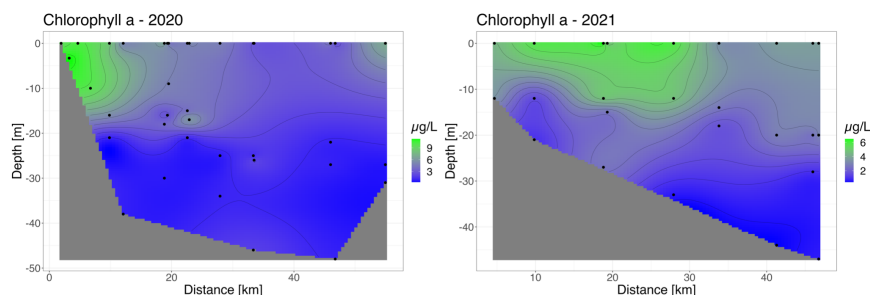
Kuva 3.3. Solunulkoisten entsyymien hajostustoiminnan osuus kokonaisaktiivisuudesta: Alkalinen fosfaatti (A), β-glukosidaasi (B) ja Leusiini-aminopeptidaasi (C).

Itämeren alueen ennustettu lämpeneminen tulee todennäköisesti kiihdyttämään mikrobiprosesseja, mukaan lukien entsyymaattiset prosessit ja orgaanisen aineen hajotusprosessien mittaaminen *in situ* voi tuottaa perustavanlaatuisen tärkeää tietoa eloperäisen aineen biogeokemiallisista kierroista muuttuvassa Itämeressä.

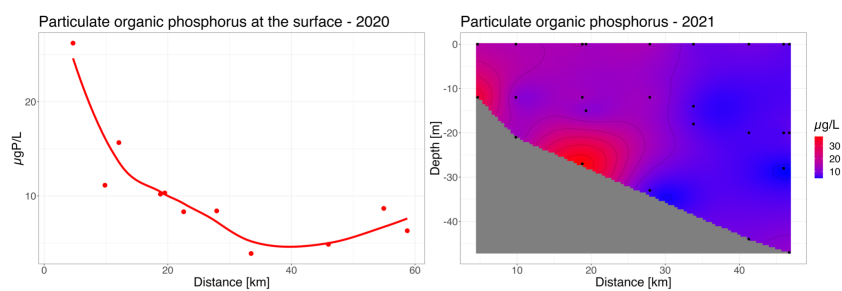
3.1.2. Ravinnesuhteet ja leväbiomassa Paimionlahden joki-avomerijatkumolla

Johdanto ja työn kuvaus

Paimionlahden joki-avomerijatkumolla tutkittiin kasviplanktonin biomassa, partikkelimaisen fosforin ja ravinnesuhteita MTA Augustan tutkimusmatkojen yhteydessä vuosina 2020 ja 2021. Kasviplanktonbiomassa klorofylli-a pitoisuutena mitattuna väheni joki-avomerijatkumon ulompia asemia kohti (kuva 3.4). Kasviplanktonbiomassaa seuraten partikkelimaisen orgaanisen fosforin (POP) pitoisuus oli korkeampi lähempänä jokisuuta (Kuva 3.5). Kohonneet POP-pitoisuudet pohjan lähellä voivat indikoida partikkelimaisen fosforin paikallista vapautumista sedimentistä. Luenneiden tyyppien ja fosforin jakauma joki-avomerijatkumolla vaihteli tutkimusvuosien välillä (Kuva 3.6).

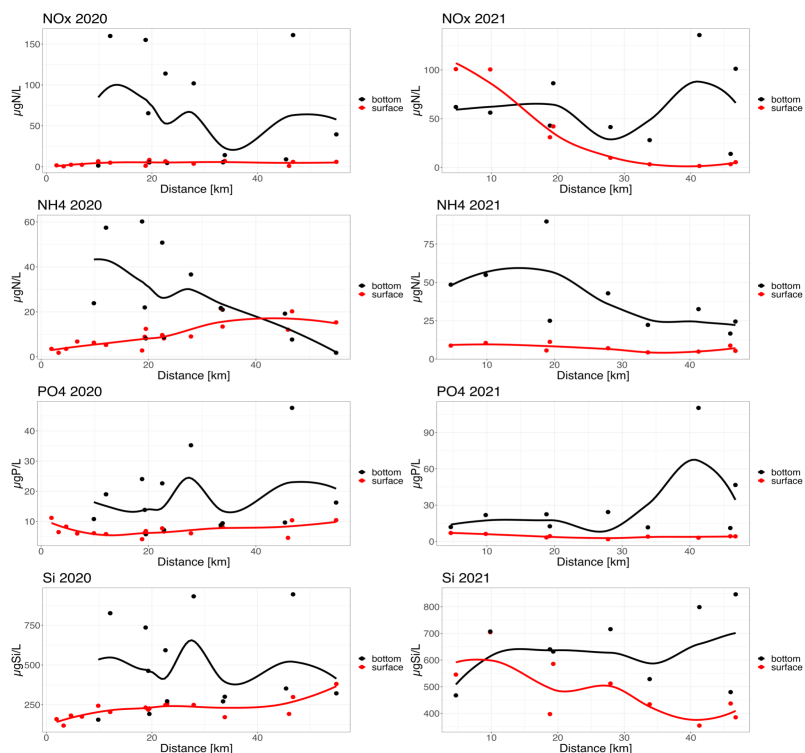


Kuva 3.4. Klorofylli-a pitoisuudet Paimionlahden joki-avomerijatkumolla jokisuulta ulkosaaristoon. Mustat pisteet osoittavat näytepisteitä, aineisto on interpoloitu multilevel B-spline approksimaatiolla.



Kuva 3.5. Partikkelimaisen orgaanisen fosforin (POP) pitoisuudet Paimionlahden joki-avomerijatkumolla jokisuulta ulkosaaristoon pintavedessä (2020) ja koko vesipatsaan syvyydeltä

(2021). Mustat pisteet osoittavat näytepisteitä, aineisto on interpoloitu multilevel B-spline approksimaatiolla.



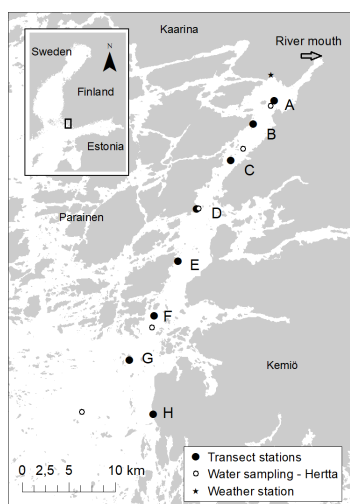
Kuva 3.6. Liuenneiden epäorgaanisten ravinteiden pitoisuudet (NO_x , NO_2 & NO_3 summana, NH_4 , PO_4 sekä Si) Paimionlahden joki-avomerijatkumolla jokisuulta ulkosaaristoon pintavedessä (punainen) ja pohjan läheisessä vedessä (musta).

3.2. Rihmalevät fosforipitoisuuden indikaattoreina rannikko-avomerijatkumoilla

Johdanto ja työn kuvaus

Rihmalevien ravinnepitoisuuden soveltuvuutta rannikkovesien fosforipitoisuuden indikaattoriksi testattiin kahtena peräkkäisenä vuonna 2020–2021 ”Paimionlahden rannikko-avomerijatkumolla Paimionlahden sisäosista ulkosaaristoon (Kuva 3.7). Näytteitä kerättiin kahdesta eri rihmalevälajista. Heinäkuussa 2020 sekä kesä- ja heinäkuussa 2021 kerättiin ahdinpartaa (*Cladophora glomerata*). Heinäkuussa 2020 kerättiin lisäksi suolilevää (*Ulva intestinalis*). Näytteet otettiin aina samoista

paikoista, kahdeksalta eri etäisyydeltä Paimionjokisuulta (Kuva 3.71). Uloimmalla paikalla etäisyys jokisuuhun on niin suuri, että jokikuormituksen vaikutusten eliöstöön on olematonta tai hyvin vähäistä. Levät kerättiin pintavedestä (syvyys n. 0.5 m), kuljetettiin laboratorioon viileässä ja pakastettiin myöhempää analysointia varten. Laboratoriossa levänäytteet (n=1–3 per laji per asema) sulatettiin, eläimet ja muu ylimääräinen materiaali poistettiin ja levämateriaali kuivattiin (48 h 60°C). Homogenisoidusta levämateriaalista analysoitiin kokonaisfosforipitoisuus (ICP-US). Tutkimusalueelta tehdyt pintaveden (syvyys 1 m) vedenlaatumittaukset (maalis- ja heinäkuu 2020 ja maaliskuu 2021) kerättiin Hertta-palvelimelta (Kuva 3.71). Lisäksi vedenlaatu analysoitiin samalta syvyydeltä touko-, kesä- ja heinäkuussa 2021 jokaiselta jatkumon levänäytenäytepisteestä kerätyistä näytteistä.



Kuva 3.7. Kartta rihmalevien ja vedenlaatumittausten keruupisteistä (mustat pisteet) sekä vedenlaatonäytteiden näytepisteet (Hertta; avoimet symbolit) Paimionjoki-jatkumolla vuosina 2020–2021. Jokisuu (ravinteiden pääasiallinen lähde jatkumolle) on osoitettu nuolella. (Kuva: Salo & Salovius-Lauren, 2022).

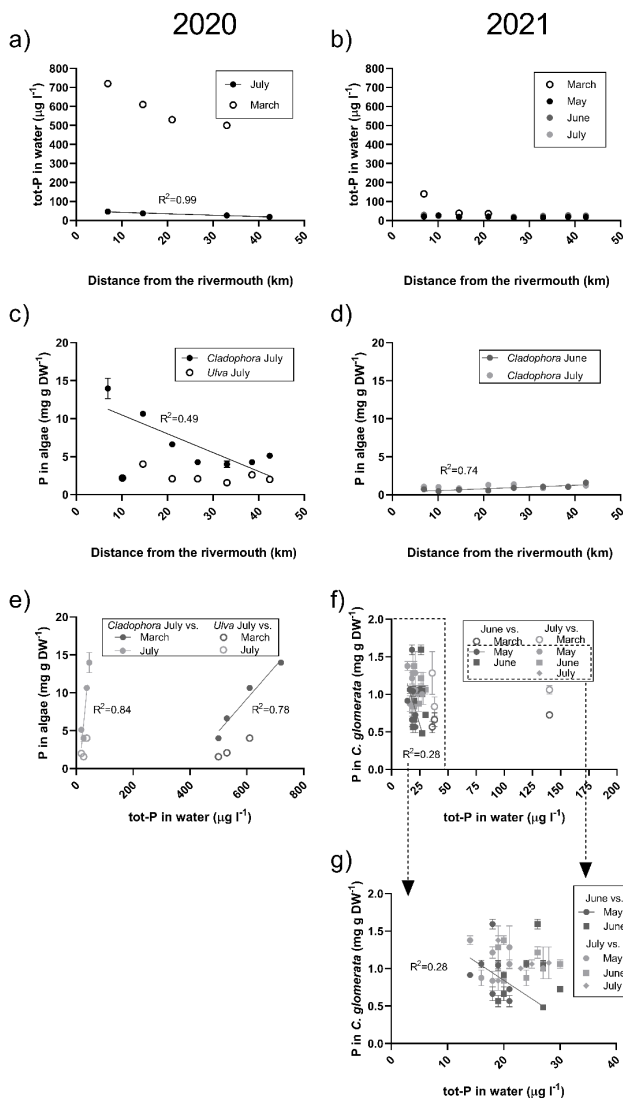
Pintaveden fosforipitoisuudet vähenivät gradientilla sisäsaaristosta ulkosaaristoon sekä keväällä 2020 ja 2021 että kesällä 2020 (Kuva 3.8a-b). Keväällä 2020 pitoisuudet olivat yli kolminkertaiset verrattuna kevääseen 2021. Rihmalevien kokonaisfosforipitoisuudet riippuivat jokisuun läheisyyden lisäksi levälajista ja ajankohdasta: vuonna 2020 ahdinparran kokonaisfosforipitoisuudet vähenivät etäisyyden jokisuulle kasvaessa (Kuva 3.8c), kun taas vuonna 2021 levän kokonaisfosforipitoisuus kasvoi hieman etäisyyden kasvaessa (Kuva 3.8d). Suolilevän fosforipitoisuudet eivät seuranneet mitään selvää trendiä, ja olivat kokonaisuudessaan matalammat kuin ahdinparran (Kuva 3.8c). Ahdinparran kokonaisfosforipitoisuus heijasti hyvin veden fosforipitoisuuksia edellisen 0–3 kuukauden ajalta vuonna 2020 (Kuva 3.8e), jolloin veden ravinnepitoisuudet olivat korkeat etenkin keväällä. Vuonna 2021 pintaveden ravinnepitoisuus oli huomattavasti matalampi, ja levämässän



kokonaisfosfori kesäkuussa heijasti negatiivisesti pintaveden ravinnepitoisuutta toukokuussa (Kuva 3.8f-g). Vuonna 2021 matalampien ravinnepitoisuuksien lisäksi veden pintalämpötila nousi korkeaksi (>25°C) sisäsaaristossa, mikä todennäköisesti vaikutti rihmalevien kasvunopeuteen ja siten myös ravinteiden määrään levämassassa sisäsaaristossa kesällä 2021 (Salo & Salovius-Laurén, 2022).

Tutkimuksessa huomattiin vedenlaadun (suolapitoisuus, näkösyvyys) vaihtelevan gradientin puolivälissä muuta gradienttia enemmän. Tämä voi johtua Halikonlahden kuormituksen vaikutuksesta, mikä lisää ravinnekuormituksen vaikutusten arvioinnin monimutkaisuutta alueella.

Tulokset osoittavat, että ahdinparran ravinnepitoisuus heijastaa maantieteellisiä ja ajallisia eroja veden ravinnepitoisuuksissa 0–3 edeltävän kuukauden aikana. Ravinnepitoisuuksien lisäksi kuitenkin myös muut ympäristötekijät vaikuttavat levien ravinnepitoisuuteen etenkin äärisääolojen aikana, joten levien ravinnepitoisuuden käyttö indikaattorina ei suoraan korvaa vedenlaatumittauksia. Indikaattoritiedolla voidaan kuitenkin täydentää harvakseltaan kerättyä vedenlaatutietoa etenkin laajoilla, dynaamisilla saaristoalueilla. Pintaveden ja ahdinparran ravinteiden vaihtelua olisikin hyvä seurata useampana vuonna, jotta vuosien, sadannan ja kipsikäsittelyn vaikutuksia gradientin ravinnepitoisuuksiin ja ahdinparran käyttöä indikaattorina voitaisiin arvioida vieläkin tarkemmin.



Kuva 3.8. Pintaveden (1 m) fosfori- ja fosfaattipitoisuudet keväällä ja kesällä a) 2020 ja b) 2021, c) rihmalevien kokonaisfosforipitoisuudet ahdinparrassa (*Cladophora glomerata*; suljetut symbolit) ja suolilevässä (*Ulva intestinalis*; avoimet symbolit) vuonna 2020 ja d) ahdinparran kokonaisfosforipitoisuus vuonna 2021, sekä rihmalevien kokonaisfosforipitoisuus vasteena



pintaveden fosforipitoisuuksiin edeltävien kuukausien aikana vuosina e) 2020 ja f-g) 2021. (Kuva: Salo & Salovius-Laurén, 2022)

3.3. Pohjaeläimistön ravinnesuhteet rannikko-avomerigradienteilla

3.3.1. Jokikuormituksen vaikutukset pohjaeläinten monimuotoisuuteen

Johdanto

Pohjaeläimet ovat hyviä ympäristön tilan indikaattoreita eläinten pitkäikäisyyden, paikallaan pysymisen sekä niiden useiden erilaisten biologisten ominaisuuksien vuoksi. Pohjaeläimet ovat herkkiä rehevöitymiselle koska rehevöityminen muuttaa niiden pääravintoaineen, orgaanisen aineksen, määrää ja laatua. Maltillinen orgaanisen aineksen lisääntyminen saattaa hyödyttää ravinnon takia rajoittuneita pohjaeläinlajeja, ja se voidaan todeta eläinten määrän sekä biomassan nousuna. Liiallinen orgaaninen aines kuitenkin heikentää pohjahabitaattien laatua laskemalla pohjan läheisen veden happipitoisuutta. Jos happipitoisuus laskee, suurten ja pitkäikäisten pohjaeläinlajien määrä ja biomassa laskee, kun taas pienemmät ja kestävämmät lajit pärjäävät paremmin. Pohjan muuttuessa täysin hapettomaksi, sedimentistä vapautuu veteen myrkyllistä rikkivetyä ja pohjaeläinyhteisöt kuolevat (Pearson & Rosenberg 1978).

Työn kuvaus

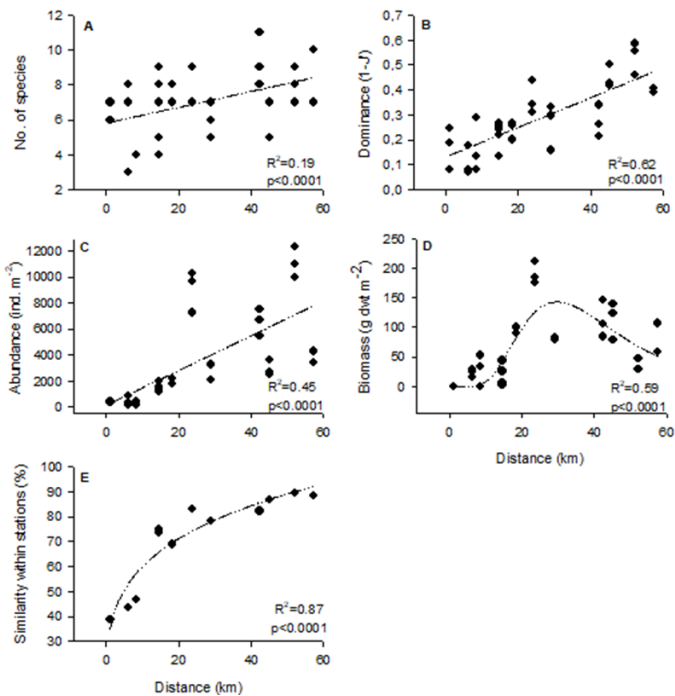
Pohjaeläinyhteisön monimuotoisuuden ja yhteisöjen rakenteessa tapahtuvien muutosten arvioimiseksi sisäsaaristo-ulkosaaristo –gradientilla Paimiolahdella, keräsimme pohjaeläinnäytteitä 12:lla näytteenottopisteellä vuonna 2020 MTA Augustalla. Näytteitä kerättiin uudestaan seitsemällä näytteenottopisteellä vuonna 2021. Pohjaeläinnäytteet otettiin box corer-näytteenottimella (pinta-ala 400 cm², 0.5 mm silmäkoko) ja jokaisesta pisteestä otettiin kolme rinnakkaisnäytettä. Näytteistä tunnistettiin kaikki eläimet alimmalle mahdolliselle tasolle, sekä laskettiin yksilömäärät ja määritettiin kuivapaino (g).

Tulokset ja tulosten tarkastelu

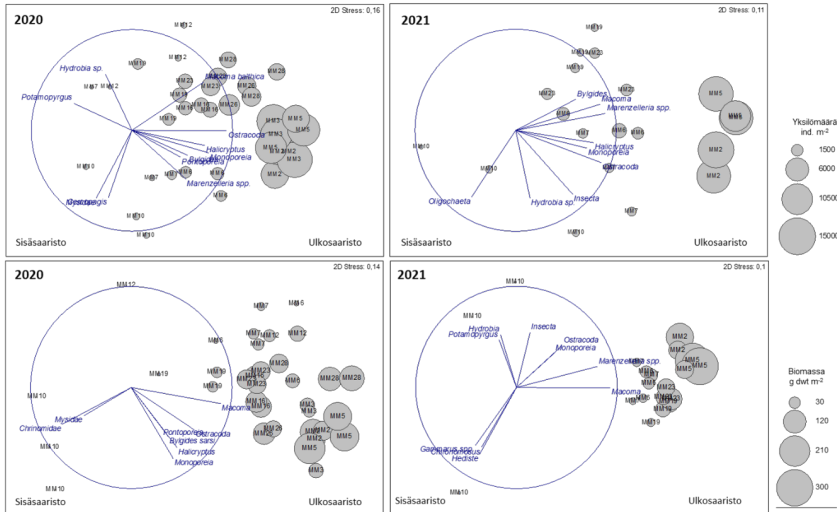
Vuonna 2020 pohjaeläinten laji- sekä yksilömäärät nousivat sisäsaariston näytepisteistä ulomille näytepisteille (Kuva 3.9 A,C). Uloimmilla näytepisteillä valtalajeina olivat liejusimpukka *Macoma balthica*, liejuputkimatosuku *Marenzelleria*, valkokatka *Monoporeia affinis* sekä raakkuäyriäiset (Ostracoda) (Kuva 3.10). Tämä nosti dominanssi-indeksiä ja eliöyhteisön samankaltaisuutta uloimpien asemien välillä sisäsaaristoon verrattaessa (Kuva 3.9 B,E). Samankaltainen havainto pohjaeläinten määrissä todettiin vuonna 2021 (Kuva 3.10), jolloin enimmäislajimäärä (13 lajia) ja suurin yksilömäärä (13 800 yksilöä m⁻²) havaittiin uloimmalla näytepisteellä (MM2) verrattuna sisimpään näytepisteeseen (MM10), jossa enimmäislajimäärä oli 3 ja suurin yksilömäärä 200 yksilöä m⁻². Pohjaeläinbiomassa oli korkein näytteenottolinjan keskiosassa (Kuva 3.9 D). Molempina näytteenottovuosina suurin biomassa havaittiin näytteenottopisteellä MM5 (Kuva 3.10).

Yleisesti ottaen pohjaeläinyhteisöjen lajimäärät ja yksilömäärät nousevat pohjan läheisen veden suolapitoisuuden ja happimäärän noustessa, eli kuljettaessa sisemmiltä asemilta kohti ulkosaaristoa (Kuva 3.13, 3.12a), kun taas perustuotanto (pintaveden Chl-*a*) laskee ulospäin kuljettaessa (Kuva

3.4). Tästä huolimatta uloimmilta asemilta mitattiin korkeammat sedimentin orgaanisen hiilen pitoisuudet sekä hieman matalampi C:N suhde, verrattuna sisempiin näytepisteisiin (Kuva 2.11) indikoiden pohjaeläinten parempaa ravinnon saatavuutta uloimmilla alueilla. Tämän näkyy ulommilla näytepisteillä myös pohjaeläinyhteisöjen korkeampana monimuotoisuutena. Sitä vastoin alhaiset laji- ja yksilömäärät sisemmillä näytepisteillä viittaavat siihen, että pohjaeläinyhteistöt eivät siedä Paimionlahden sisempien alueiden ympäristöolosuhteita.



Kuva 3.9. Pohjaeläinlajien lukumäärä (A), dominanssi (B; $1-J'$), yksilömäärä (C; yksilöitä m^{-2}), biomassa (D; $g\ dwt\ m^{-2}$) ja pohjaeläinyhteisöjen samankaltaisuus replikaattien välillä (E; SIMPER, %) kasvaa Paimionlahdella sisäsaaristosta ulkosaaristoon siirryttäessä. Data vuodelta 2020.



Kuva 3.10. Non-metric multidimensional scaling (nMDS) havainnollistaa eliöyhteisöjen rakennetta yksilömäärän (ylemmät kaaviot) ja biomassan (alemmat kaaviot) perusteella vuosina 2020 ja 2021. Kaaviot perustuvat Bray-Curtis similariteettiin, joka on laskettu neliöjuuritransformoidusta datasta dominanssivaikutuksen vähentämiseksi. Ympyröiden koko edustaa yhteisön kokonaisuusilömäärää tai biomassaa yhdessä näytteessä, kun taas viivat osoittavat suunnan, jota kohti lajien merkitys kasvaa.

3.3.2. Pohjaeläimistön ravinnesuhteet rannikko-avomerigradieniteilla ja sedimentin ravinnevuot

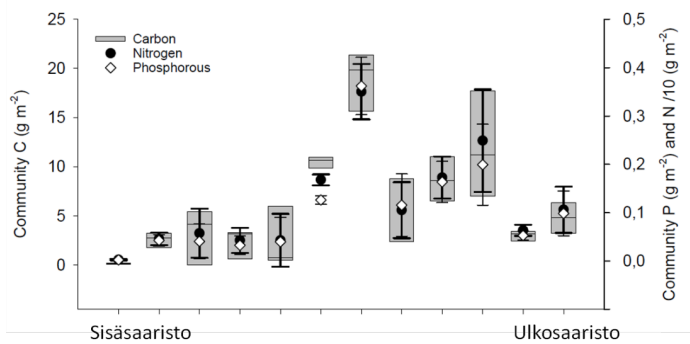
Johdanto

Pohjaeläimet muokkaavat rannikon suodattavaa vaikutusta varastoimalla hiiltä sekä ravinteita biomassaansa (Villnäs et al. 2019, Scheffold ja Hense 2020). Pohjaeläimet myös muokkaavat sedimenttiä, mikä vaikuttaa ravinteiden kiertoon sekä voi parantaa sedimentin happipitoisuutta (Kristensen 2000).

Työn kuvaus ja tulokset

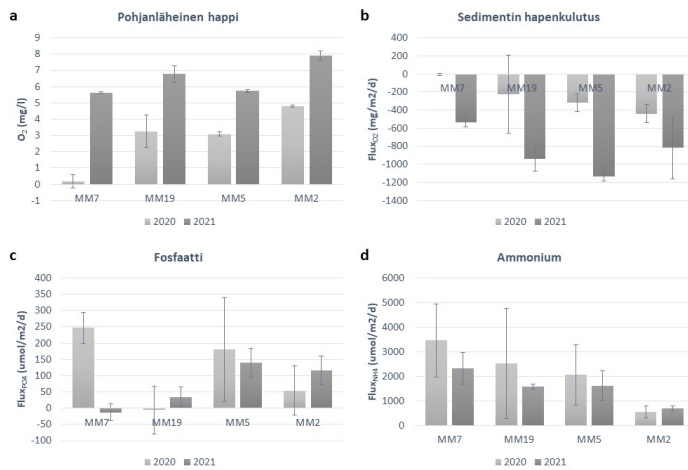
Vuoden 2020 näytteistä mitattiin runsaimpien lajien kehon (kuiva-)painon lisäksi kudosten hiili(C)-, typpi(N)- ja fosfori(P)pitoisuus (Jyväskylän Yliopisto, Suomi) ja laskettiin eliöyhteisön C, N ja P-varannot gradientin varrella. Yleisesti ottaen lajien, kuten simpukoiden, monisukasmatojen sekä makkaramatojen pehmytkudos sisältää n. 41 % hiiltä, 9 % typpeä sekä 0.8 % fosforia, kun taas kitiinikuoristen lajien, kuten kilkin (*Saduria entomon*) pitoisuudet ovat alhaisemmat. Näin ollen, pohjaeläinyhteisön biomassatuloksia myötäillen, myös pohjaeläinyhteisön hiili- ja ravinnepitoisuudet

nousevat ulkosaaristoa kohden mennessä (Kuva 3.11). Pienimmät hiili- ja ravinnepitoisuudet mitattiin näytepisteellä MM10 ($< 1 \text{ g C m}^{-2}$, $< 0.1 \text{ g N m}^{-2}$ and $< 0.01 \text{ g P m}^{-2}$), ja huomattavan korkeat pitoisuudet näytepisteellä MM5 (keskiarvot 19 g C m^{-2} , 3.5 g N m^{-2} and 0.36 g P m^{-2}). Tulokset osoittavat, että hyvinvoivat pohjaeläinyhteisöt voivat toimia tilapäisinä hiilen sekä ravinteiden sitoijina, kun taas huonokuntoiset pohjaeläinyhteisöt eivät sido ravinteita, vaan palauttavat niitä nopeasti kiertoon.



Kuva 3.11. Pohjaeläinyhteisöjen hiili-, typpi- ja fosforipitoisuudet Paimionlahdella, sisä-ulkosaaristogradientilla. Simpukoiden kuoret eivät ole mukana laskuissa. Hiili (g m^{-2}) on ensisijaisella y-akselilla, kun taas typpi ($\text{N}; /10 \text{ g m}^{-2}$) ja fosfori ($\text{P}; \text{g m}^{-2}$) ovat toissijaisella y-akselilla.

Sedimentin hapenkulutusta ja ravinnevirtoja tutkittiin 2020 ja 2021 yhteensä neljällä näytteenottopisteellä sisä-ulkosaaristogradientilla (Kuva 3.12). Kaikki pisteet sijaittivat 22–28 metrin syvyydessä, paitsi piste MM19, jonka syvyys oli 16.7 m. Sedimentin hapenkulutus oli pienempi tutkituilla pisteillä vuonna 2020, kuin vuonna 2021. Fosfaatti- ja ammoniumvirtojen osalta vuosien välillä ei ollut merkittäviä eroja, paitsi lähimpänä Paimionjokea sijaitsevalla pisteellä MM7, jossa fosfaattivirta vuonna 2020 oli huomattavasti korkeampi verrattuna vuoteen 2021. Hapenkulutuksen erot johtuvat pohjanläheisen veden happiolosuhteista, jotka vuonna 2020 olivat huomattavasti huonommat kuin vuonna 2021. Lähimpänä Paimionjokea sijaitseva piste MM7 oli vuonna 2020 lähes hapeton, mistä johtui myös suuri fosfaattivirta sedimentistä pohjaveteen. Pohjaveden happiolosuhteiden rooli ravinteiden kierrossa korostui vähähappisena vuonna 2020, kun taas vuonna 2021 ravinteiden kiertoon vaikuttivat enemmän pohjaeläinten, erityisesti raakkuäyriäisten ja liejusimpukan, lukumääriä.



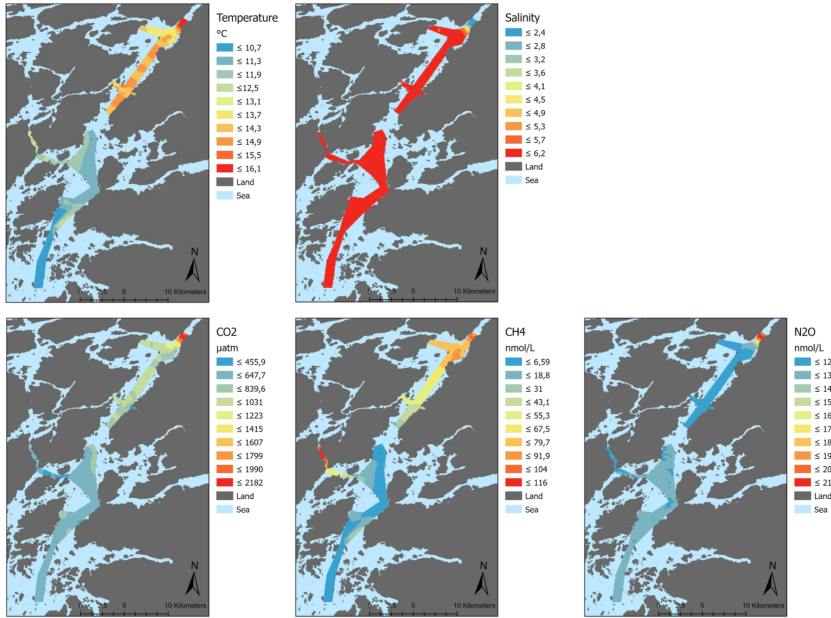
Kuva 3.12. Kuvassa a) pohjanläheisen vesimassan happiolosuhteet, b) sedimentin hapenkulutus, c) fosfaattivirta ja d) ammoniumvirta sedimentin ja vesipatsaan välillä vuosina 2020 ja 2021 sisäsaaristo-ulkosaaristogradientilla (järjestyksessä sisimmästä uloimpaan MM7, MM19, MM5, MM2).

3.5. Jokikuormituksen eloperäisen aineen hajotuksen vaikutukset ilmastoaktiivisten kaasujen tuottoon ja eliöyhteisöjen monimuotoisuuteen

3.5.1. Kasvihuonekaasujen pitoisuuden vaihtelu rannikko-avomerigradientilla

Johdanto

Rannikkovedet vastaanottavat ravinteita ja orgaanista ainetta sekä valuma-alueelta että mereltä ja yhdistävät maa-alueiden, vesireittien, meren ja ilmakehän biogeokemialliset kierrot. Maa-meri jatkumoilla tyypeä ja hiiltä prosessoidaan, osa hautautuu sedimentteihin, osa kulkeutuu merelle ja osa päätyy kaasumaisena ilmakehään. Biogeokemiallisissa kierroissa syntyy ilmastoaktiivivia kasvihuonekaasuja (GHG) kuten hiilidioksidia (CO₂), metaania (CH₄) ja typpioksiduulia (N₂O), jotka ovat tärkeitä ilmastoon ja ilmakehän kemian muokkaajia. Tutkittua tietoa kasvihuonekaasujen tuoton ja hajotuksen alueellisesta jakaumasta Saaristomerren rannikkovesissä sekä niiden vaikutuksesta säteilypakotteeseen tarvitaan. Tutkimme >30 km pitkällä Paimionlahden joki-avomerijatkumolla samanaikaisesti kolmen kaasun (CO₂, CH₄ ja N₂O) alueellista jakaumaa ainutlaatuista vedenalaista mittausmenetelmää käyttäen.

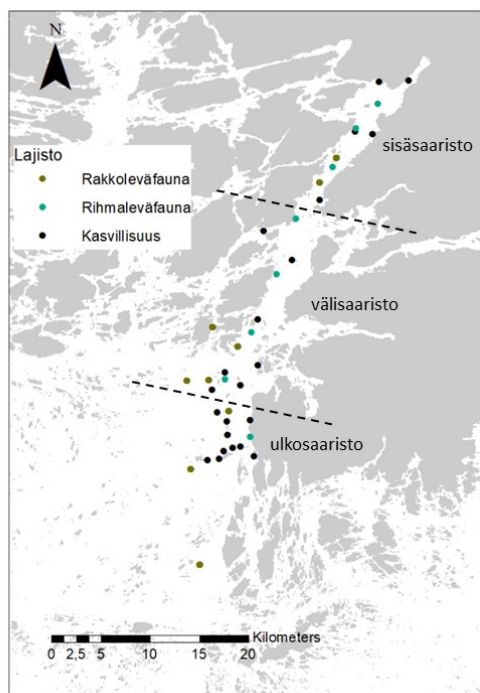


Kuva 3.13. Lämpötila, suolapitoisuus sekä liuenneiden (CO₂, CH₄, N₂O) kaasujen pitoisuudet pintavedessä Paimionlahden trasektilla. Kartat on tuottanut Märta Brunberg Maanmittauslaitoksen topografisen tietokannan aineistosta 11/2022 (<https://www.maanmittauslaitos.fi/en/opendata-licence-cc40>).

Pintaveden lämpötilassa ja suolaisuudessa oli selkeä gradientti makeammasta ja lämpimämmästä vedestä estuaarissa kylmempään ja suolaisempaan ulkosaaristossa (Kuva 3.13). Kasvihuonekaasujen pitoisuuksien vaihtelu pintavedessä oli myös huomattavaa. GHG-pitoisuudet olivat yleisesti korkeimpia jokisuulla ja CO₂, CH₄ ja N₂O pitoisuudet olivat 5-, 10-, ja 2-kertaisesti ylikyllästyneitä suhteessa ilmakehäpitoisuuksiin. CO₂- ja CH₄ -kyllästynyt jokivesi kuljetti kaasuja jopa 10 km etäisyydelle jokisuusta, kun taas korkeat N₂O- pitoisuudet tasaantuivat noin 1 km päässä (Kuva 3.13). Käyttäen kaasuspesifejä lämpenemispotentiaaleja 100 vuoden aikaskaalalle arvioimme jokisuun kasvihuonekaasujen päästöjen vaihteluväliksi 2.79–3.30 g CO₂-ekvivalenttia m² d⁻¹ mikä on yli 80 kertaa joki-avomerijatkumon ulointa pistettä korkeampi (0.04 g CO₂-ekvivalenttia m² d⁻¹). Kasvihuonekaasujen päästöjen oletetaan vaihtelevan vuodenajan ja jokivirtaaman mukana. Tulokset osoittavat, että Paimionjoen kuljettaa kasvihuonekaasuilla kyllästynyttä jokivettä kilometrien etäisyydelle jokisuusta myös kesän matalan virtaaman aikana. Yleisesti tulokset auttavat kattamaan Suomen saaristoalueiden kasvihuonekaasujen päästöjä koskevia tietopuutteita.

3.5.2. Jokikuormituksen vaikutus eliöyhteisöjen monimuotoisuuteen rannikko-avomerigradientilla Johdanto

Jokikuormituksen vaikutuksia (suolapitoisuus, ravinnepitoisuus, sameus ym.) monimuotoisuuteen tarkasteltiin rannikko-avomerijatkumolla sekä kasvillisuutta (levät ja vesikasvit) että rakkolevän ja rihmalevien joukossa eläviä selkärangattomia eliöitä tutkimalla. Koska jokikuormituksen vaikutus vähenee etäisyyden kasvaessa, jaettiin tarkasteltu maantieteellinen gradientti sisä-, väli- ja ulkosaaristoon. Ulkosaaristossa jokikuormituksen vaikutuksen pitäisi olla olematon tai hyvin vähäinen.



Kuva 3.14. Eri näytteenotuspisteet Paimionlahti-jatkumolla sisä-, väli- ja ulkosaaristossa. Mustat pisteet kuvaavat VELMU-ohjelman kasvillisuuden sukellusinventointipisteitä, ruskeat pisteet rakkoleväfaunan näytteenottoaikoja ja vihreät pisteet rihmaleväfaunan näytteenottoaikoja.

Työn toteutus

Kasvillisuuden monimuotoisuus

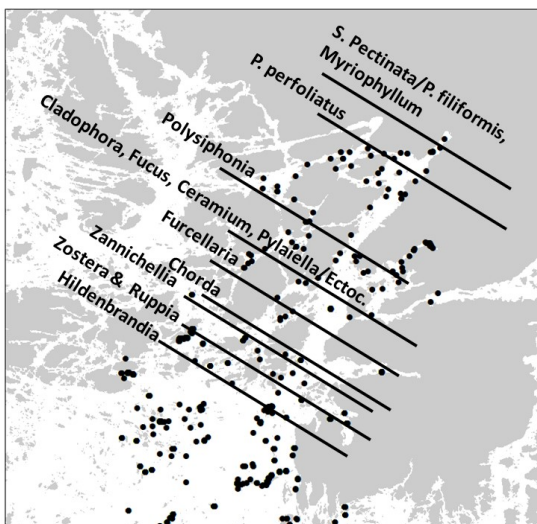
Velmun kasvillisuuskartoituspisteistä (aineisto kerätty 2009–2019) valittiin ne matalat (syvyys ≤ 5 m) pisteet, jotka oli toteutettu sukeltamalla (mahdollistaen tarkan lajinmäärityksen) ja jotka sijoittuivat Paimionlahden rannikko-avomerijatkumolle sisäsaaristosta ulkosaaristoon (yhteensä 22 tutkimuspistettä; Kuva 3.14). Kasvillisuushavainnot aineistossa on ilmoitettu peittävyysarvioina (vaihteluväli 0–1, 0=0 % peittävyys ja 1=100 % peittävyys). Ennen analyysijä data transformoitiin lisäämällä +1 jokaiseen havaintoon ja ottamalla

jokaisesta arvosta neliöjuuri, jotta aineisto täytti analyysivaatimukset. Yleisimpien kasvi- ja levälajien havaintoja tarkasteltiin lisäksi Velmun kasvillisuuskartoitusaineiston (sukellus ja videokartoitus) matalilta pisteiltä (syvyys ≤ 5 m).

Sisäsaaristossa kasvillisuuden lajikirjo oli hyvin matala ja tutkimuspisteillä raportoitiin 0–1 lajia (0.8 ± 0.2 lajia (keskiarvo \pm SE)). Välisaaristossa lajimäärä yksittäisellä tutkimuspisteellä vaihteli 0–6 lajin välillä (keskiarvo 2.8 ± 1.0 lajia) ja ulkosaaristossa 0–7 lajin välillä (keskiarvo 2.8 ± 0.6 lajia). Kasvillisuusyhteisöt eivät kuitenkaan eronneet saariston eri vyöhykkeillä monimuuttuja-analyysissä tarkasteltuna (ANOSIM: $R^2 = -0.056$, $p = 0.66$). Lajisto on ylipäättään melko vähäistä sisäsaaristossa aivan pintavettä syvemmillä, ja esimerkiksi avinlaji rakkolevä kasvaa yhä useammin vain todella matalissa rantavesissä (Rinne & Salovius-Laurén 2020).

Eri kasvi- ja levälajien pohjoisimpia esiintyvyyksiä (0–5 m:n syvyydessä) Paimionlahti-jatkumolla tarkastellessa jokikuormituksen vaikutus ja sen aiheuttama vyöhykkeisyys havainnollistuu kuitenkin hyvin (Kuva 3.15). Ravinnekkuorman lisäksi jokivesi alentaa veden suolapitoisuutta ja pohjoisimpana jokisuun lähellä kasvaa pääosin makean veden kasveja, kuten erilaisia vitoja (mm. hapsivita

[*Stuckenia pectinata*], merivita [*Potamogeton filiformis*] ja ahvenvita [*P. perfoliatus*] ja ärviäitä (*Myriophyllum* sp.), jotka viihtyvät pehmeillä, rehevöityneillä sedimentaatiopohjilla. Merelliset kasvi- ja levälajit kuten meriajokas (*Zostera marina*) ja merihapsikka (*Ruppia maritima*) rajoittuvat ulkosaaristoon. VELMU-aineiston perusteella, avainlaji rakkolevä (*Fucus vesiculosus*) ylettyy jatkumon puoliväliin samoille seuduille ahdinparran (*Cladophora glomerata*) kanssa (Kuva 3.15). Maameri-hankkeen puitteissa tehdyssä tutkimuksessa sekä rakkohaurun että ahdinparran on tosin havaittu ulottuvan myös sisäsaaristoon (Kuva 3.14). Esimerkiksi jäätilanne, lämpöaallot ja vedenlaatu vaikuttavat eri lajien levinneisyyteen ja syvyydjakaumaan ja vaihtelu voikin olla osittain vuosittaista vaihtelua lajien kasvupaikoissa. VELMU-aineiston lajihavaintoja ei ole suunniteltu suoraan arvioimaan tiettyjen lajien esiintymistä eri alueilla, ja matalien tutkimuspisteiden (0–2 m) vähäinen määrä vähentää varmasti lajihavaintoja etenkin väli- ja sisäsaaristossa. Aineiston pohjalta tehtyjen mallinnusten mukaan sekä rakkolevää että ahdinpartaa voitaisiinkin tavata myös sisäsaaristossa (lähde: VELMU-karttapalvelu). Monien muiden lajien, kuten meriajokkaan, merihapsikaan ja vitojen mallinnettu esiintymistodennäköisyys sen sijaan täsmää melko hyvin lajihavaintojen kanssa.



Kuva 3.15. Eri levä- ja kasvilajien pohjoisimmat esiintyvyydet Paimionlahti-jatkumolla perustuen VELMU lajihavaintoihin matalilla merenpohjilla (≤ 5 m syvyydessä).

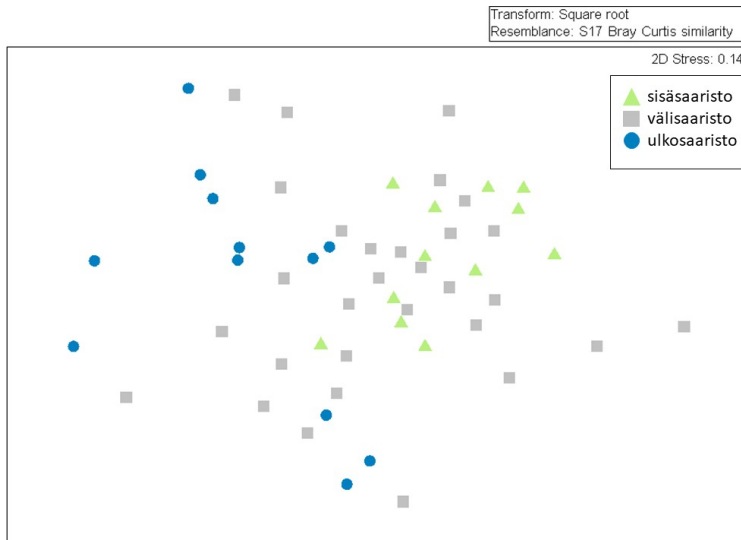
Selkärangattomien eliölajien monimuotoisuus

Kasvillisuuden lomassa eläviä selkärangattomia tarkasteltiin kahdessa eri habitaatissa; rakkolevä- ja rihmalevävyöhykkeellä (Kuva 3.14). Rakkoleväfauna kerättiin kesällä 2020 osana laajempaa rakkolevätkäytöstä (Rinne et al. 2022) ja rihmaleväfauna osana lievien indikaattoritutkimusta heinäkuussa

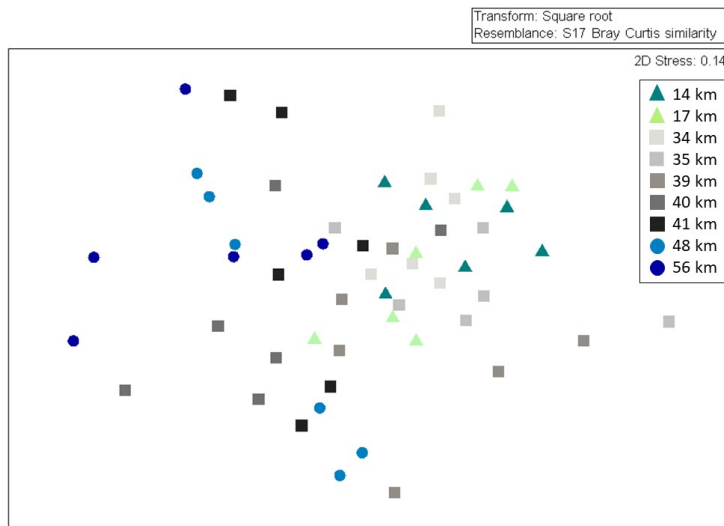
2020 ja 2021 (katso osio 3.2). Rakkoleväfaunaa kerätessä analysoitiin aina kokonaisen rakkoleväpuskan eläimistö 3–6 erillisestä puskasta jokaiselta näytepisteeltä (syvyys: 0.8–1 m). Rihmaleväeläimistö analysoitiin kolmesta eri näytteestä jokaiselta näytepisteeltä (syvyys: 0.5–1 m). Eläinten määrät standardoitiin suhteessa levän kuivapainoon. Vuoden 2021 rihmalevänäytteiden suuren näytteen vuoksi vain osa jokaisesta näytteestä analysoitiin, mikä saattaa heijastua suurempana vaihteluna kyseisen vuoden näytteissä.

Monimuuttuja-analyysin mukaan (ANOSIM) rakkoleväen lomassa elävät eläinyhteisöt erosivat sekä sisä- ja ulkosaariston ($R^2=0.552$, $p=0.001$) että väli- ja ulkosaariston välillä ($R^2=0.226$, $p=0.004$, Kuva 3.16a-b). Eläimistö ei eronnut sisä- ja välisaariston välillä ($R^2=0.008$, $p=0.44$). Erot sisä- ja ulkosaariston sekä väli- ja ulkosaariston välillä johtuivat pääasiassa suuremmista määristä surviaissääsken toukkia, erilaisia katkoja, tulokaslaji *Sinelobus vanhaareni*:a, ja sydänsimpukoita sisä- ja välisaaristossa kuin ulkosaaristossa ja keskimäärin suuremmista määristä sukula- ja

vaeltajakotiloita, leväkotiloita, hoikkaleväsiroja ja sinisimpukkaa ulkosaaristossa kuin sisempänä saaristoa (SIMPER).

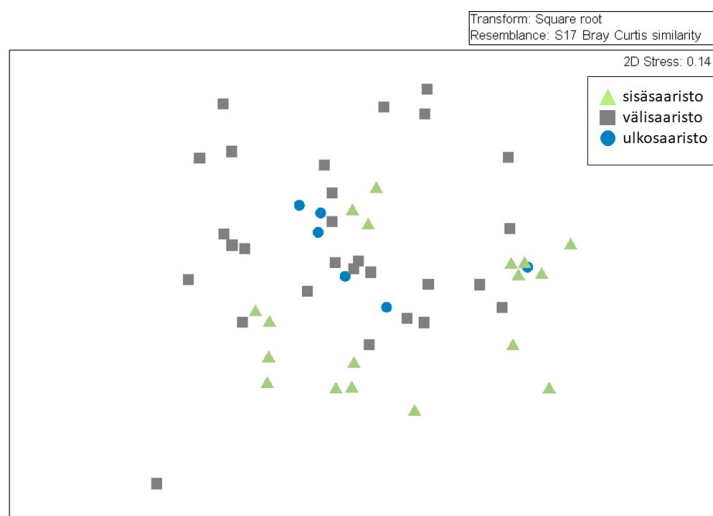


Kuva 3.16a. Rakkoleväfaunayhteisöt Paimionlahtijatkumon sisä-, väli- ja ulkosaaristossa. Data perustuu eri lajien yksilömääriin, jotka on standardoitu rakkolevän kuivapainon mukaan.



Kuva 3.16b. Rakkoleväfaunayhteisöt eri etäisyyksillä (km) Paimionjokisuulta ulkosaaristoon Paimionlahden jatkumolla. Vihreät kolmiot kuvaavat sisäsaariston, harmaat neliöt keskisaariston ja siniset ympyrät ulkosaariston faunayhteisöjä. Data perustuu eri lajien yksilömääriin, jotka on standardoitu rakkolevän painon mukaan.

Monimuuttuja-analyysin mukaan (ANOSIM) rihmalevän lomassa elelevä selkärangattomien lajiyhteisö vaihteli sekä ajallisesti (heinäkuu 2020 vs. heinäkuu 2021: $R^2=0.494$, $p=0.001$) että maantieteellisesti ($R^2=0.29$, $p=0.001$). Maantieteellisesti eroja lajiyhteisö vaihteli sisä- ja välisaariston ($R^2=0.329$, $p=0.001$) ja sisä- ja ulkosaariston välillä ($R^2=0.311$, $p=0.017$, Kuva 3.17). Eläinyhteisöissä ei havaittu eroja väli- ja ulkosaariston välillä ($R^2=0.179$, $p=0.095$). Erot tutkimusvuosien välillä johtuivat pääosin katkojen, sukkula- ja vaeltajakotiloiden, karpäsentoukkien, sydänsimpukoiden ja siirojen suuremmista yksilömääristä vuonna 2020 kuin 2021, kun taas surviaissääskentoukkia tavattiin enemmän vuonna 2021 (SIMPER). Sisä- ja ulkosaariston välillä suurimmat erot johtuivat siirojen, katkojen ja surviaissääskentoukkien suuremmista määristä ulko- kuin sisäsaaristossa ja pienten simpukoiden, sukkula- ja vaeltajakotiloiden sekä sukkulamerietanan suuremmista määristä sisä- kuin ulkosaaristossa (SIMPER). Sisä- ja välisaariston erot johtuivat pääosin katkojen, siirojen, sukkula- ja vaeltajakotiloiden, ja sydänsimpukoiden suuremmista määristä ulkosaaristossa kuin sisäsaaristossa ja surviaissääskentoukkien, karpäsentoukkien ja sukkulamerietanan suuremmista määristä sisäsaaristossa kuin ulkosaaristossa (SIMPER).



Kuva 3.17. Rihmaleväfaunayhteisöt jatkumon sisä-, väli- ja ulkosaaristossa. Data perustuu eri lajien yksilömääriin heinäkuussa 2020 ja 2021. Lajimäärät on standardoitu levän kuivapainon mukaan.

Tutkimusaineistot osoittavat, että ravinnekuormitus muokkaa sekä kasvi, levä että eläinlajistoa tutkimusjatkumolla. Tutkimusaineistojen perusteella ei ole mahdollista arvioida suolapitoisuuden vaihtelun, ravinteiden ja samennuksen erillisaikutuksia eliöstöön, mutta on todennäköistä, että



näiden tekijöiden suorat ja välilliset vaikutukset muovaavat lajistoa yhdessä. Merellinen lajisto kuten meriajokas ja erilaiset siirat ovat yleisempiä kauempana jokisuulta, kun taas rehevämmän ja makeavetisemmän elinympäristön lajit kuten erilaiset vidat, surviaissääskentoukat ja kärpäsentoukat olivat yleisempiä lähempänä jokisuuta.

Tulokaslaji *Sinelobus vanhaareni* tavattiin sekä rakkolevä- että rihmaleväfaunasta. Näiden löydösten ja muiden tutkijoiden havaintojen perusteella laadittiin artikkeli lajin levinneisyydestä Suomen rannikkoalueella (Gagnon et al. 2022). Lajia havaittiin eniten sisä- ja välisaaristossa sekä rakkolevä-, rihmalevä- ja meriajokashabitaateista, mutta myös pehmeiden pohjien sedimenttinäytteistä (Gagnon et al. 2022).

Tutkimusaineistojen perusteella ravinnekuorman vähentäminen on oleellista luonnon monimuotoisuuden kannalta. Tutkimustulosten valossa on erittäin huolestuttavaa, että etenkin ulkosaariston ravinnekuormitusta ollaan monin paikoin lisäämässä arvokkaiden elinympäristöjen lähellä uusien kalaviljelylaitosten myötä.

Viitteet:

- Gagnon K, Herlevi H, Wikström J, Nordström MC, Salo T, Salovius-Laurén S, Rinne H (2022) Distribution and ecology of the recently introduced tanaidacean crustacean *Sinelobus vanhaareni* Bamber, 2014 in the northern Baltic Sea. *Aquatic Invasions* 17:57-71. Doi: 10.3391/ai.2022.17.1.04
- Kristensen, E. (2000). Organic matter diagenesis at the oxic/anoxic interface in coastal marine sediments, with emphasis on the role of burrowing animals. *Hydrobiologia* 426: 1–24.
- Pearson, T. H. and Rosenberg, R. (1978). Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr. Mar. Biol.* 16: 229–311.
- Rinne H, Salovius-Laurén S (2020) The status of brown macroalgae *Fucus* spp. and its relation to environmental variation in the Finnish marine area, northern Baltic Sea. *Ambio* 49:118–129. Doi: 10.1007/s13280-019-01175-0
- Rinne H, Blanc J-F, Salo T, Nordström MC, Salmela N, Salovius-Laurén S (2022) Variation in *Fucus vesiculosus* associated fauna along a eutrophication gradient. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 275: 107976
- Salo T, Salovius-Laurén S (2022) Green algae as bioindicators for long-term nutrient pollution along a coastal eutrophication gradient. *Ecological Indicators* 140: 109034
- Scheffold, M. I. E., & Hense, I. (2020). Quantifying contemporary organic carbon stocks of the Baltic Sea ecosystem. *Frontiers in Marine Science*, 7, 571956.
- Villnäs, A., Janas, U., Josefson, A.B., Kendzierska, H., Nygård, H., Norkko, J., Norkko, A. (2019). Changes in macrofaunal biological traits across estuarine gradients: implications for the coastal nutrient filter. *Marine Ecology Progress Series* 622: 31–48.

Työpaketti 4: Virtaukset ja vedenvaihto

Miettunen, E., (SYKE), Tuomi, L., Kanarik, H., Westerlund A., (IL)

Johdanto

Saaristomeren virtausolosuhteita ja vedenvaihtoa on tutkittu perustuen virtausmittauksiin ja -mallinnukseen. Saaristomerellä vuodesta 2004 lähtien tehtyjen virtausmittausten, mukaan lukien hankkeen aikana tehdyt mittaukset, aineistot on laaturkastettu ja niiden perusteella on analysoitu Saaristomeren virtausolosuhteita. Analyysin alueellista ja ajallista kattavuutta on täydennetty Ahvenanmeren ja Saaristomeren kattavan NEMO-virtausmallin tuloksilla. Tässä osiossa esitämme analyysin keskeiset tulokset ja arvioimme tulevaisuuden kehitystarpeet sekä havaintoverkoston että virtausmallinnuksen osalta. Lisäksi kuvaamme erityisesti hankkeen aikana kerätyn aineiston tuomat jatkotutkimusmahdollisuudet.

Keskeiset tulokset ja johtopäätökset virtausanalyysistä ja vedenvaihdosta

Saaristomeren monimutkainen batymetria ja rantaviiva ohjaavat virtauksia ja vaikuttavat niiden voimakkuuksiin. Keskimääräiset virtausnopeudet vaihtelevat alueittain ollen 8–16 cm/s noin 5 m syvyydeltä mitatussa, pinnanläheisimmässä kerroksessa. Mittaukset näyttävät virtaussuuntien olevan melko pysyviä, ja voimakkaiden yli 20 cm/s virtausten kesto vaihtelee muutamista tunneista useisiin päiviin. Kapeissa ja syvissä kanjoneissa virtausnopeudet ovat usein avoimia alueita huomattavasti voimakkaampia ja tietyissä olosuhteissa havaittu virtausnopeus ylitti 100 cm/s. Mittauksissa havaittiin myös alueita, joilla pohjanläheiset virtausnopeudet olivat kesän lämpötilakerrostuneisuuden aikaan huomattavasti pienempiä ylemmän kerroksen virtauksiin nähden. Paikoin virtaukset voivat toisaalta olla pohjakerroksessa pintavirtauksia voimakkaampia.

Saaristomeren pohjois- ja eteläosan virtausolosuhteet eroavat toisistaan selkeästi. Etelässä virtauksien suuntajakauma on laajempi ja painottunut itä-länsisuuntiin. Pohjoisosien kapeammissa kanjoneissa virtaukset ovat pääosin etelä-pohjoissuuntaisia. Pohjoisosissa virtausnopeudet ovat myös selvästi eteläosaa voimakkaampia.

Voimakkaiden virtausten osalta analysoitiin niitä synnyttäviä tekijöitä. Osa voimakkaista virtauksista syntyy paikallisten voimakkaiden tuulien vaikutuksesta, mutta mukana on myös laajemman skaalan ilmiöiden, kuten esim. Itämeren vedenkorkeusvaihtelun aiheuttamia virtauksia. Voimakkaiden virtausten syntymekanismien osalta tarvitaan vielä lisää tutkimusta, jossa tarkastellaan dynamiikkaa Saaristomeren aluetta laajemmin.

Paikallisesti ja ajallisesti vaihtelevaa havaintoaineistoa voidaan täydentää hyvin toimivalla virtausmallilla, jolloin saadaan kokonaisvaltaisempi kuva Saaristomeren virtausolosuhteista. Tämän vuoksi hankkeessa käytettiin NEMO-virtausmallia Saaristomeren läpi kulkevan Pääaltaan ja Selkämeren vedenvaihdon tutkimiseksi. Mallianalyysin perusteella Saaristomerellä kuljetus oli pintakerroksessa keskimäärin etelään. Pohjakerroksessa kuljetuksen suunta vaihteli Saaristomeren pohjois- ja eteläosien välillä: pohjoisessa virtaus oli keskimäärin etelään ja etelässä pohjoiseen.

Tulevaisuuden kehitystarpeet

Havaintoverkoston kehittäminen

Saaristomerellä, Utön havaintopistettä lukuun ottamatta, virtausmittauksia on tehty vain osana tutkimuskampanjoita. Mittausjaksot ovat olleet lyhyitä, korkeitaan vuoden mittaisia ja usein

kattaneet vain kesäajan, jolloin virtaukset ovat tyypillisesti heikompia, kun syksy- ja talviaikaan. Saaristomeren virtausdynamiikan sekä Itämeren pääaltaan ja Selkämeren väliseen vedenvaihtoon liittyvien prosessien parempaa kuvaamista varten olisi tarpeen saada jatkuvia mittauksia Saaristomeren läpi kulkevista kanavista niin alueen pohjois-, keski- kuin eteläosistakin. Virtaushavaintojen lisäksi säännöllisiä hydrografiamittauksia tarvitaan myös ulkosaaristosta ja näiden olisi hyvä olla samanaikaisia virtausmittausten kanssa. Osa vedenvaihdon kannalta tärkeitä kanjoneista sijaitsee alueilla, joille isommilla tutkimusaluksilla, kuten esim. Arandalla, on hankalaa tai mahdotonta päästä turvallisesti. Yhteistyö ja koordinointi Saaristomerellä tehtävien tutkimuskampanjoiden ja rutiinimittausten ja eri tahojen tarpeiden osalta on jatkossa tärkeää.

Virtausmallinnuksen kehittäminen

Saaristomeren ja muiden Suomen rannikkoalueiden kuormitusarvioiden kannalta on tärkeää, että nykyisten mallisysteemien ylläpitoon ja päivityksiin on varattu riittävästi resursseja. Kansainvälisissä mallikonsortioissa tehty kehitys esimerkiksi mallien parametrisaatioiden suhteen pitäisi pysyä huomioimaan myös rannikkosovelluksissa. Lisäksi mallien laskentahilat, batymetriatiedot sekä reunaehdot tarvitsevat päivityksiä tietojen tarkentuessa sekä uusien koko Itämeren kattavien mallitulosten tullessa saataville.

Tärkeimmiksi lähivuosien kehityskohteiksi on Ahvenanmeren-Saaristomeren NEMO-virtausmallin osalta tunnistettu seuraavat:

- 1) Mallin laskentahilan ja batymetrian tarkistus ja muokkaus väli- ja sisäsaaristossa (mallihilaa kannattaa tarkentaa nyt jo saatavissa olevien syvyystietojen perusteella, koska mallin tähänastisessa kehityksessä on keskitytty pääasiassa ulkosaaristoon)
- 2) Reunaehtojen päivitys sitten, kun 1 NM -resoluution Itämeren uusanalyysi on saatavilla CMEMS-palvelusta
- 3) Pohjakerroksen kuvauksen kehittäminen
- 4) Kerrostuneisuuden kuvauksen kehittäminen

Batymetrian ja reunaehtojen päivityksen (kohdat 1–2) jälkeen Ahvenanmeren-Saaristomeren NEMO-mallilla on mahdollista tuottaa virtauskenttiä rannikkomallijärjestelmän tarpeisiin. NEMO-virtauskenttien käyttö Saaristomeren FICOS-mallissa vaatii kuitenkin myös FICOS-mallin kehitystyötä. Siksi niiden käyttöönotto kannattaa sisällyttää suurempaan Saaristomeren FICOS-mallin päivitykseen.

Jos tarkan resoluution alueellisia rannikkomalleja halutaan soveltaa pitkien (kymmenien vuosien) simulaatioiden tekemiseen esimerkiksi ilmastonmuutostutkimuksessa, tarvitaan mallin syötteiksi laadukasta pakote- ja reunaehdotdataa. Esimerkiksi tällä hetkellä käytettävissä olevat tarkimmat koko Itämeren alueen kattavat ilmastonmuutoskenaariot on tehty 2 NM -resoluution malleilla, eikä tämä ole riittävä resoluutio tarkempien alueellisten mallien reunaehdoiksi. Myös syötteenä käytettävän alueellisen ilmastomallin erottelukyvyn ja tarkkuuden pitää olla riittävä rannikkoalueen ja saariston prosessien kuvaukseen. Lisäksi tarvitaan tarkempien rannikkomallien jatkokehitystä ja validointia pitkissä simulaatioissa oleellisten prosessien osalta. Pitkien simulaatioiden laskentaresurssien tarve on myös huomattava.

Virtausmallinnuksen kehitystarpeita on käsitelty tarkemmin erillisessä mallivalidaatioreportissa [\(viite\)](#).

4.1. Saaristomeren vedenvaihdon tarkempi kuvaus havaintodataan perustuen

Saaristomerellä analysoitiin virtauksia kymmenestä eri mittauspisteestä (Taulukko 4.1 ja Kuva 4.1). Aineistossa on sekä aiempina vuosina, että hankkeen aikana tehtyjä mittauksia. Hankkeen aikaisten

mittausten sijainnit arvioitiin vedenvaihdon kannalta olennaisiksi aikaisempiin havaintoihin sekä virtausmallinnuksiin perustuvien tutkimusten pohjalta (Tuomi et al. 2018, Miettunen et al. 2020). Virtausmittausten lisäksi alueelta kerättiin laajasti muuta sää- ja oseanografista havaintoaineistoa (mm. tuulen nopeus ja suunta sekä vedenkorkeus) analyysijä varten.

Taulukko 4.1 Projektin aikana tarkistettujen ja analysoidut ADCP virtausmittaukset, niiden ajankohta ja sijainti. Tähdellä merkityillä asemilla suoritettiin mittauksia hankkeen rahoituksella. Sijainnit on esitetty myös Kuvassa 4.1

Asema	Mittausjakso	Sijainti
Fölskär	11.5. – 11.10.2004 25.4. – 25.9.2006	59° 47.466' N, 20° 55.596' E
Söderkobb	25.4. – 25.9.2006	59° 57.150' N, 21° 12.170' E
Norrskäret	25.4. – 25.9.2006	60° 39.000' N, 20° 12.600' E
Lövsjär	18.6. – 13.11.2013	60° 13.183' N, 21° 42.800' E
Norra Bredan	6.9.2016 – 22.2.2017	60° 44.358' N, 20° 36.852' E
Norrgrundet *	6.9.2016 – 16.10.2018 20.5. – 3.12.2021	60° 34.752' N, 21° 08.046' E
Utö	26.7.2017 – 27.6.2018	59° 45.510' N, 21° 22.146' E
Kihti	19.11.2019 – 23.5.2020	60° 04.872' N, 21° 03.000' E
Gustaf Dalen *	14.10.2020 – 6.9.2022	60° 04.399' N, 20° 58.600' E
Gloskär *	20.5.2021 – 2.6.2022	60° 19.690' N, 21° 07.063' E

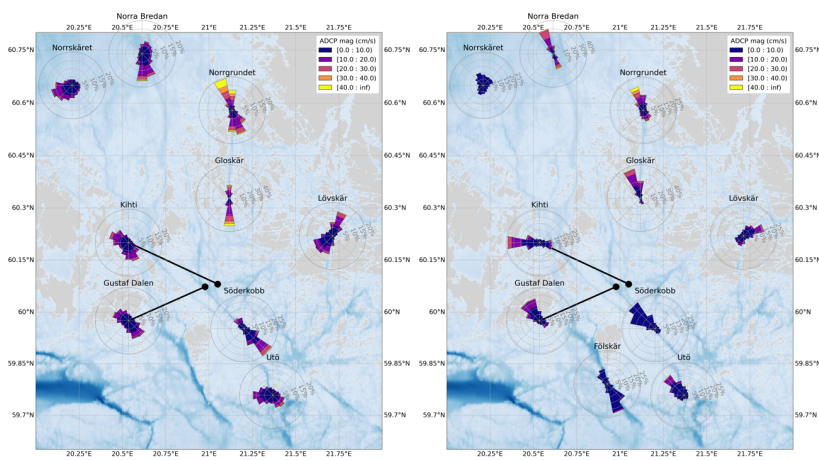
Virtausnopeuksien osalta alueet, joilla mittauksia tehtiin, voidaan luokitella kahteen ryhmään: avoimemman alueen virtausmittauksiin ja kapeassa pitkässä kanjonissa sijainneisiin (Norrgrundet ja Gloskär) mittauksiin. Virtausnopeudet Saaristomerellä ovat avoimilla alueilla keskimäärin 8 cm/s pinnan läheisimmässä kerroksessa (noin 5 m syvyydellä) ja 7 cm/s pohjan läheisimmässä kerroksessa (noin 5 m pohjasta). Norrgrundetin ja Gloskärin keskimääräinen virtausnopeus oli 16 cm/s pinnan ja 11 cm/s pohjan läheisimmässä kerroksessa. Kanjonissa pohjoiseen suuntautuvat virtaukset ovat pidempikestoisia ja voimakkaampia pohjoisemmassa Norrgrundetin pisteessä. Vastaavasti etelään suuntautuvat virtaukset ovat voimakkaampia Gloskärissa.

Voimakkaimmat virtaukset ovat yksittäisten myrsky- tai kovien tuulien tilanteiden ajamia ja ovat voimakkuuksiltaan moninkertaisia keskimääräisiin nopeuksiin verrattuna. Vaikka Saaristomeren mittaukset ovat tehty erittäin vaihtelevina ajanjaksoina ja eri alueilla, kaikilla pisteillä on mitattu vähintään 40 cm/s virtauksia. Voimakkaimmat virtaukset on mitattu Norrgrundetissa, jossa suurin nopeus oli 115 cm/s. Voimakkaimmat virtausnopeudet avoimella alueella olivat suuruudeltaan 55–56 cm/s (mitattiin Utössä ja Gustaf Dalenissa eri ajankohtina).

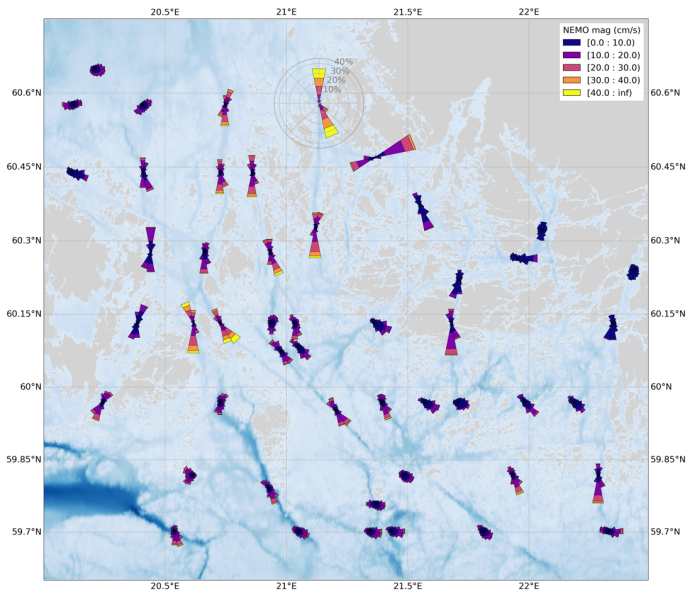
Voimakkaiden, yli 20 cm/s, virtausten esiintyessä virtaussuunta on myös suhteellisen pysyvä. Esimerkiksi Gustaf Dalenissa virtaukset pysyivät yhtäjaksoisesti yli 20 cm/s keskimäärin 6 h tunnin ajan ja pisin yhtäjaksoinen pohjoiseen suuntautuva virtaus kesti 42 h (alkaen 31.1.2022) ja etelään suuntautuva 31 h (alkaen 28.12.2020), joista jälkimmäisen aikana korkein mitattu nopeus oli 55 cm/s. Yli 20 cm/s virtaukset ovat alueella harvinaisia, niitä esiintyi vain 3 % ajasta kahden vuoden mittauksissa ja niistä noin 60 % suuntautui etelään. Vastaavasti kapeassa kanjonissa sijaitsevassa Norrgrundetissa 20 cm/s virtauksia esiintyi jopa 29 % mittausajasta ja niiden keskimääräinen kesto oli 10 h ja pitkäkestoisin laskutavasta riippuen 4–6 vuorokautta (alkaen 28.7.2018). Erityisesti pitkäkestoisten voimakkaiden virtausten osalta tarvitaan lisää tutkimusta niitä synnyttävistä tekijöistä. Alueen kanavissa on mitattu myös edestakaisin heilahtelevia voimakkaita virtauksia,

jotka liittyvät mm. voimakkaasti rannikon suuntaan kulkevien virtausten paluuvirtauksiin, kuten havaittiin esimerkiksi tutkimuksessa Lövsjärin havaintopisteellä (Kanarik ym. 2018).

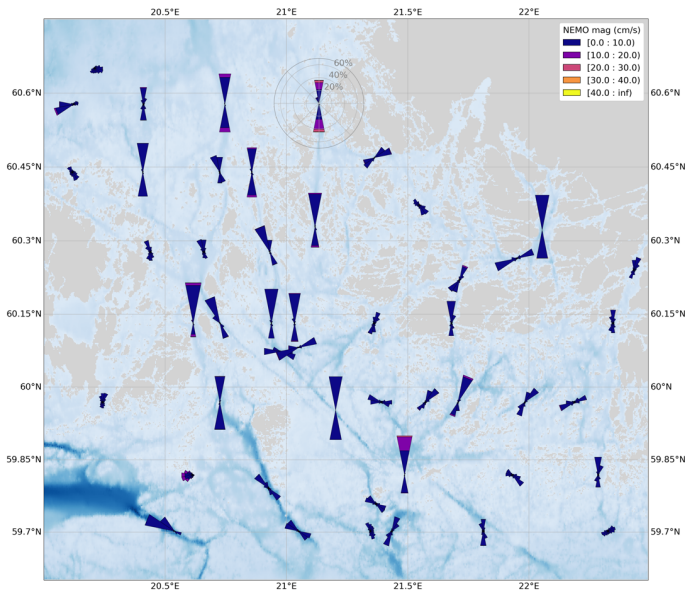
Saaristomeri on suhteellisen matala merialue ja vesipatsas on kauttaaltaan sekoittunut suuren osan vuodesta. Kesäajan lämpötilakerrostuneisuuden aikana pinta- ja pohjakerroksen virtausteokset ja -suunnat voivat erota toisistaan huomattavasti. Esimerkiksi Norrgrundetin havaintopisteellä, jossa mitattiin voimakkaita virtauksia, pohjakerroksen nopeudet olivat todella pieniä kesäaikana.



Kuva 4.1 Saaristomeren pinta- (vasemmalla) ja pohjakerroksen (oikealla) virtaussuunnat perustuen virtaushavaintoihin. Fölskärrin osalta pintakerroksen havainnot on jätetty kuvasta pois, sillä niistä puuttui 65 %. Mittaukset on tehty eri asemilla eri aikoina ja eri mittaisina jaksoina (ks. Taulukko 4.1), joten kuvat eivät esitä yksittäistä virtausilannetta. Virtausruusut esittävät virtauksen menosuuntaa. (Taustakartta: EMODnet Bathymetry Consortium, 2020)



Kuva 4.2 Virtaussuunnat Saaristomerellä pintakerroksessa (ylin 5 m kerros) perustuen NEMO-mallisimulaatioon vuosille 2013–2017. Virtausuusut esittävät virtauksen menosuuntaa. Kaikissa ruusuissa on samat akselit, joten kuvan luettavuuden vuoksi ne on piirretty vain yhteen ruusuun. (Taustakartta: EMODnet Bathymetry Consortium, 2020)



Kuva 4.3. Virtaussuunnat Saaristomerellä pohjakerroksessa (alin 5 m kerros) perustuen NEMO-mallisimulaatioon vuosille 2013–2017. Virtausruusut esittävät virtauksen menosuuntaa. Kaikissa ruusuissa on samat akselit, joten kuvan luettavuuden vuoksi ne on piirretty vain yhteen ruusuun. (Taustakartta: EMODnet Bathymetry Consortium, 2020).

Koska virtaushavaintoja on suhteellisen vähän ja mittaukset on tehty eri asemilla eri aikoina ja eri mittaisina jaksoina, Saaristomerän virtausolosuhteita ja veden kulkeutumista Saaristomerän läpi pohjois-eteläsuunnassa on analysoitu myös käyttäen NEMO-virtausmallin tuloksia vuosille 2013–2017. Virtausmalli kattaa Ahvenanmerän ja Saaristomerän alueen 0.25 merimailin (noin 450 m) resoluutiolla. Vertikaalisuunnassa mallin resoluutio on 1 m noin 100 m syvyydelle asti ja tästä syvemmällä karkeampi. Malli käyttää avoimilla reunoilla Itämerän pääaltaalla ja Selkämerellä koko Itämerän kattavan NEMO-mallin tuottamia reunaehtoja. Malli pystyy tuottamaan hyvin alueen virtausdynamiikan pääpiirteet; mallin kuvaus ja validaatio on esitetty tässä työpaketissa tuotetussa mallivalidaatioraportissa (VITE). Lisäksi tarkempi mallikuvaus on esitetty julkaisussa Westerlund et al. (2022).

Saaristomerän virtausolosuhteissa, virtausten voimakkuudessa ja suunnassa, on sekä paikallista että ajallista vaihtelua, eikä yksi, esimerkiksi koko mallijakson yli laskettu keskimääräinen virtauskenttä kuvaa alueen virtausolosuhteita. Paremman kuvan alueen virtausdynamiikasta saa virtausruusuista, jotka kuvaavat nopeus- ja suuntajakaumaa yksittäisillä mallin laskentapisteillä (Kuvat 4.2 ja 4.3). Virtausruusujen sijainneiksi valittiin mallihilasta ADCP-virtausmittausten sijaintien lisäksi pisteitä eri puolilta Saaristomerta sekä syvistä kanjoneista, kapeista salmista, että avoimmemmilta alueilta.

Pintakerroksessa (ylin 5 m kerros; Kuva 4.2) voimakkaimmat mallinnetut virtausnopeudet nähdään Saaristomerän pohjois- ja keskiosissa Kihdin ja Teillin alueella kapeissa kanavissa/salmista, joissa virtaus on voimakkaasti suuntautunut kanavan suuntaisesti. Virtaussuunnat kanavissa vaihtelevat pohjoisen ja etelän (tai luoteen ja kaakon) välillä, mutta etelään suuntautuvia virtauksia on

pääsääntöisesti enemmän kuin pohjoiseen suuntautuvia. Avoimemmilla alueilla ulkosaaristossa, alueen luoteiskulmassa ja Saaristomeren eteläosissa sekä välisaaristossa virtaussuunnissa on enemmän hajontaa ja virtausnopeudet ovat matalampia.

Pohjanläheiset virtaukset ovat voimakkaammin batymetrian suuntaamia kuin pintavirtaukset (alin 5 m kerros; Kuva 4.3). Saaristomeren eteläosassa pohjoiseen suuntautuvat virtaukset dominoivat, mutta pohjoisosassa etelään ja pohjoiseen suuntautuvat virtaukset ovat yhtä yleisiä. Niillä sijainneilla, joilla mallituloksia on voitu verrata havaintoihin, tulokset näyttävät, että sekä pinta- että pohjakerroksen virtaukset ovat mallissa voimakkaammin suuntautuneita kuin havaitut virtaukset.

Virtausmalliaineistoa on käytetty myös Ahvenanmeren ja Saaristomeren kautta tapahtuvan pääaltaan ja Selkämeren vedenvaihdon analysointiin. Ahvenanmeren osalta tulokset on julkaistu (Westerlund et al. 2022), mutta Saaristomeren osalta analyysi on vielä kesken. Alustavien tulosten mukaan Saaristomerellä pintakerroksessa (20 m yläpuolella) keskimääräinen kuljetus (engl. *transport*) on etelään päin, kun taas alemmassa kerroksessa (20 m alapuolella) kuljetus on alueen pohjoisosassa etelään ja eteläosassa pohjoiseen päin. Kuljetuksen suunnissa on sekä vuosien että vuodenaikojen välistä vaihtelua johtuen tuuliolosuhteiden ja jokivalumien määrän vaihteluista, ja pohjoiseen suuntautuvia kulkeutumistilanteita voi esiintyä pintakerroksessa erityisesti syksyisin ja talvisin. Koska Saaristomeri on suhteellisen matala, suuri osa kuljetuksesta tapahtuu pintakerroksessa. Syvemmissä kerroksissa tapahtuu kuljetusta Saaristomeren läpi lähinnä ulkosaariston läpi kulkevissa kapeissa kanjoneissa.

Hankkeen aikana tehdyiltä tutkimusmatkoilta, erityisesti IL:n syyskuun 2022 Arandan matkalta, on saatu uusia hydrografiahavaintoja eri puolilta Saaristomerta. Aineistoa ei ole ehditty analysoida tämän hankkeen aikana, mutta sitä tullaan käyttämään jatkotutkimuksissa ja mahdollisissa jatkohankkeissa sekä alueen vedenvaihdon tutkimuksessa että mallikehityksessä ja -validaatiossa.

Tässä työpaketissa tehdystä Saaristomeren virtaus- ja vedenvaihtotutkimuksesta on tekeillä kaksi artikkelikäsikirjoitusta, jotka valmistuvat keväällä 2023 (havaintoaineiston analyysistä Kanarik et al. in prep; mallianalysistä Miettunen et al. in prep).

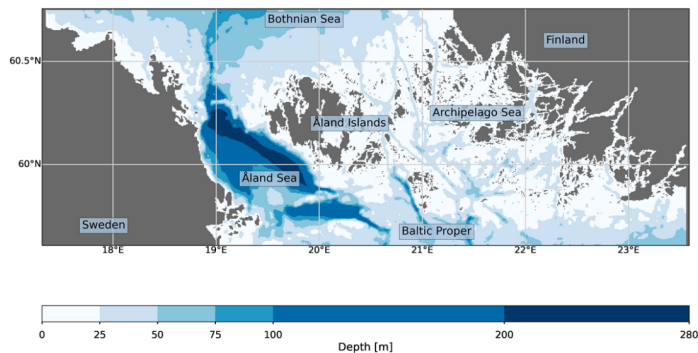
4.2. Saaristomerimallin tarkkuus virtausolosuhteiden kuvauksessa

Saaristomeri on alueena haastava mallintaa sen tuhansien eri kokoisten saarien, rikkonaisen rantaviivan ja jyrkkien batymetriavaihteluiden johdosta. Saaristomeren alueella on käytössä kaksi virtausmallia: vanhempi COHERENS-malli (Tuomi et al. 2018) sekä edellä mainittu uudempi, myös Ahvenanmeren kattava NEMO-malli (Westerlund et al. 2022). Saaristomeren mallinnuksessa on siirrytty käyttämään NEMO-mallikoodia, koska se on yleisesti Itämerellä käytetty virtausmalli, sillä on laaja kansainvälinen kehitysyhteisö ja se on käytössä IL:n operatiivisissa meriennusteissa.

Tässä työpaketissa näitä kahta eri virtausmallia vertailtiin toisiinsa ja niiden tuloksia validoitiin käyttäen lämpötila- ja suolaisuushavaintoja Brändöstä, Seilistä ja Utöstä. Lisäksi NEMO-virtausmallin laskemia virtauksia validoitiin vertaamalla niitä ADCP-virtausmittauksiin Norrgrundetista, Lövsjäristä ja Utöstä. Tässä hankkeessa mallin validatio rajoittui profiilimittauksiin (hydrografiaan ja virtauksiin). Alun perin suunniteltua satelliittiaineiston käyttöä mallin validointiin ei ollut mahdollisuutta toteuttaa, sillä mallilaskelmat ja tarkan resoluution satelliittidata olivat eri ajanjaksoilta. Satelliittiaineiston käyttömahdollisuuksia tutkitaan tulevaisuudessa, kun mallinnsjaksoa jatketaan kattamaan niitä vuosia, joilta tarkkaa satelliittiaineistoa on saatavilla. Virtausmallivalidaatiosta on laadittu erillinen raportti (Viite); alla on lyhyesti raportin päätulokset.

Validaation perusteella NEMO-virtausmallin toiminta Saaristomeren alueella on pääsääntöisesti hyvää. Erityisesti lämpötilan kerrostuneisuudenmalli kuvaa paremmin kuin COHERENS-virtausmalli. Tämä vaikuttaa muun muassa pystysuuntaiseen sekoittumiseen ja matalien alueiden pohjan lämpötiloihin kesän lämpötilakerrostuneisuuden aikana. NEMO-mallin nykyisessä konfiguraatiossa suolaisuudessa on bias, joka johtuu käytössä olevan reunaehdon epätarkkuudesta.

Virtausvalidaation perusteella malli tunnistaa hyvin alueelle tyypilliset virtausten voimakkuudet. Vertailua varten oli käytössä mallista 6 h keskiarvoina talletetut virtaukset, joten mallin kykyä simuloida maksimivirtauksia ei voitu tässä tarkastella. Virtausten suuntajakauman malli tuottaa pääasiassa hyvin, kun huomioidaan, että suorakulmaisista laskentaruuduista koostuva mallihila rajoittaa jonkin verran sitä, miten realistisesti kapeiden kanavien suunta voidaan mallissa kuvata. Malli pystyy kuvaamaan myös havaitun kesäajan lämpötilakerrostuneisuuden vaikutuksen virtauksiin.



Kuva 4.4. Virtausmallinnuksen alue ja mallin laskentahilan batymetria.

Viitteet:

EMODnet Bathymetry Consortium (2020). EMODnet Digital Bathymetry (DTM 2020). EMODnet Bathymetry Consortium <https://doi.org/10.12770/bb6a87dd-e579-4036-abe1-e649cea9881a>

Kanarik, H., Tuomi, L., Alenius, P., Lensu, M., Miettunen, E., and Hietala, R.: Evaluating Strong Currents at a Fairway in the Finnish Archipelago Sea, *Journal of Marine Science and Engineering*, 6, <https://doi.org/10.3390/jmse6040122>, 2018.

Miettunen E., Tuomi L., Myrberg K.: Water exchange between the inner and outer archipelago areas of the Finnish Archipelago Sea in the Baltic Sea. *Ocean Dynamics*, 70, pp. 1421–1437, <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01407-y>, 2020.

Tuomi, L., Miettunen, E., Alenius, P., Myrberg, K.: Evaluating hydrography, circulation and transports in a coastal archipelago using a high-resolution 3d hydrodynamic model. *Journal of Marine Systems*, 180:24–36. <https://doi.org/10.1016/j.imarsys.2017.12.006>, 2018.



Westerlund, A., Miettunen, E., Tuomi, L., Alenius, P.: Refined estimates of water transport through the Åland Sea in the Baltic Sea, *Ocean Sci.*, 18, 89–108, <https://doi.org/10.5194/os-18-89-2022>, 2022.

Työpaketti 5: Tietoaineistojen integraatio ja yhteiskäyttö

(Kirjoittaja 1... Attila J. ... Malve O. SYKE, Hänninen J. TY)

Johdanto

Meriympäristössä tapahtuvien muutosten seuranta laajoilla alueilla ja riittävän tiheällä ajallisella otannalla on haastavaa konventionaalisilla seurantamenetelmillä. Aineistojen parempi integraatio ja yhteismitallistaminen on tärkeää. Uusien seurantamenetelmien ja paikkatiedon hyödyntäminen ovat mahdollisia lähestymistapoja. Tässä osiossa yhdistettiin esim. kaukokartoitukseen perustuvaa havainnointia muuhun havaintotietoon sekä tuotetaan saatavilla olevia tietoaineistoja yhdistäviä koosteita mallinnuksen edellytysten parantamiseksi ja tietopohjan vahvistamiseksi.

Keskeiset tulokset ja johtopäätökset

Satelliittihavaintojen osalta työpaketin päätavoitteet saavutettiin Maamerihankkeen aikana hyvin. Hankkeen aikana kehitetyt menetelmät vuositason fosforikarttojen laatimisesta osoittautuivat toimivaksi tavaksi kuvata jokivesien tuomaa ravinnekuormaa Saaristomeren ravinnekuormitukseen liittyvien olennaisimpien jokien osalta. Hankkeessa keskityttiin erityisesti tuottamaan aineistoja, joiden kautta Paimion-, Uskelan-, Aura- ja Mynäjoen ravinnekuorman vaikutusten havainnoimista voidaan jatkaa alueellisesti ja ajallisesti kattavalla tavalla. Hankkeen aikana osa tavoitteista määriteltiin uudelleen, ja satelliittihavaintojen aineistokoosteissa keskityttiin partnereiden toimimiin vuositason tarkasteluihin (hankesuunnitelman viikkotason aineistojen sijaan). Lisäksi Saaristomeren alueelle lisättiin satelliittihavaintojen asemasijainteja yhteensä 48 kappaletta tulevaa seuranta varten. Asemat sijoitettiin tuottamaan havaintoja olennaisten jokien vesireiteille. Lisäksi hankkeessa kehitetyt jokivesien vaikutusaluekartat tutkimusjokien suualueilla ovat hyödyllisiä täsmennetyntäytteenoton suunnitteluun ja vaikutusalueiden arviointiin.

Maameri-hankkeen aikana satelliittihavaintojen ja hankkeen eri osa-alueiden mallinnuspakettien yhteistyö jäi kevyemmäksi, kuin mitä hakemusvaiheessa toivottiin. Osin tämä liittyi siihen, että mallien kalibrointiajanjakso (vuodet) eivät olleet samoja, kuin miltä ajanjaksolta satelliittihavaintoja on saatavilla moderneilla instrumenteilla (Copernicus-ohjelman satelliittisarjojen havainnot alkavat pääosin vuodesta 2016). Satelliittihavaintojen ja mallinnukseen liittyvää yhteistyöhön kannattaisi kuitenkin jatkossa varata aikaa ja resursseja, koska yhteistyö jäi vähiin osittain myös ajanpuutteen ja aikataulujen eriaikaisuuden vuoksi pienemmäksi kuin oli tarkoitus. Jatkohankkeessa tähän on hyvät edellytykset, koska aineistoa on hankkeessa kerrytetty runsaasti ja esimerkiksi FICOS-malli on kehittynyt hankkeen aikana. Myös pintalämpötila-aineiston hyödyntäminen mallien lähtötietoina olisi luonteva seuraava askel malliyhteistyössä.

Satelliittihavainnoista tulkittu kokonaisfosforiaineisto kannattaisi ottaa yhdeksi aineistoksi niille satelliittiseuranta-asemille, joita hankkeen aikana lisättiin (48 kappaletta). Siten voidaan kerryttää jatkossa tietoa kokonaisfosforin vaihtelusta eri vuodenaikoina Saaristomeren eri puolilla. Sitä ennen pitää tehdä tarkemmat vertailut kokonaisfosforin osalta asemanäytteenoton (VESLA-asemat ja tutkimuksellinen aineisto) ja satelliittihavainnoista tulkittu kokonaisfosforin välillä. Vuositason tarkasteluissa aineistot vastaavat hyvin toisiaan. Satelliittihavaintoihin perustuvaa tietoaineistoa kannattaa jatkuvuusiakin kerryttää Saaristomeren alueella ja suunnitella sen hyödyntämistä

monipuolisesti. Myös jokivesien vaikutusalueiden määrittämiseen suunnattuja linjamaisia aineistoja jokien purkupisteeltä lähtien kannattaa kehittää eteenpäin ja ottaa käyttöön jatkohankkeen aikana.

Tässä osiossa tuotettiin myös kattava kuva sameuden ja klorofylli-a:n vaihtelusta Mynä- ja Paimionjoen edustalla ja laajemmin koko Saaristomerellä v. 2019-2021. Työssä koottiin ja harmonisoitiin Saaristomeren sekä erityisesti Mynälahden ja Paimionjoen edustan sameuden ja klorofylli-a:n Vesla-, EO- ja MaaMeri-aineistot SYKE:n DataFuusio-järjestelmään SDFS (Gunia ym., <https://www.syke.fi/hankkeet/multidata>). Havainnot interpoloitiin päivittäin 60*60 m hilaverkkoon, joka kattaa Saaristomeren alueen ja visualisoitiin kartta- ja aikasarja kuviksi käyttäen SDFS-järjestelmää. Tulosten tarkkuus ja suhde lähtöaineistoihin on arvioitu. DataFuusio-järjestelmään kehitettiin assimilaatio-algoritmi, jonka avulla havainnot syötetään sameuden kulkeutumismalliin (Marko Laine / IL), interpolaation tarkentamiseksi ja luotettavuuden parantamiseksi silloin, kun havainnoita on harvakseltaan, pitkien etäisyyksien päässä toisistaan.

Aineistoista interpoloitiin päivittäiset vedenlaatukartat ja niiden epävarmuusestimaatit tarkalla resoluutiolla. Sameus vaihtelee kesän aikana voimakkaasti tuulioloista riippuen ja kulkeutuu ajoittain malalta ranta-alueelta kohden sisä- ja ulkosaaristoa (Kihti), ja päinvastoin. Lisäksi tutkittiin mahdollisuutta tarkentaa interpolaatio-prosessia assimiloimalla vedenlaatu dataa virtaus-vedenlaatumalliin. Tulosten perusteella saadaan vankka yleiskuva vedenlaadun vertailuolosuhteista ennen kipsikäsittelyä ja luodaan edellytykset vaikutusten pitkäaikaiselle seurannalle ja mallintamiselle.

5.1. Saaristomeren tarkan maastoerotuskyvyn satelliittihavainnot osana alueen seuranta- ja mallinnuskokonaisuutta

Maameri-hankkeen aikana on edistetty satelliittihavaintojen hyödyntämistä Saaristomeren alueella. Hankkeen keskeiset tulokset satelliittihavaintojen osalta liittyvät jokivesien vaikutusalueiden tarkentamiseen ja vuosittaisten fosforikarttojen kehittämiseen. Lisäksi hankkeen aikana on otettu käyttöön tarkan maastoerotuskyvyn pintalämpötilahavainnot kahden eri satelliitti-instrumentin havainnoista ja täydennetty satelliittihavaintoasemia Saaristomeren alueelle.

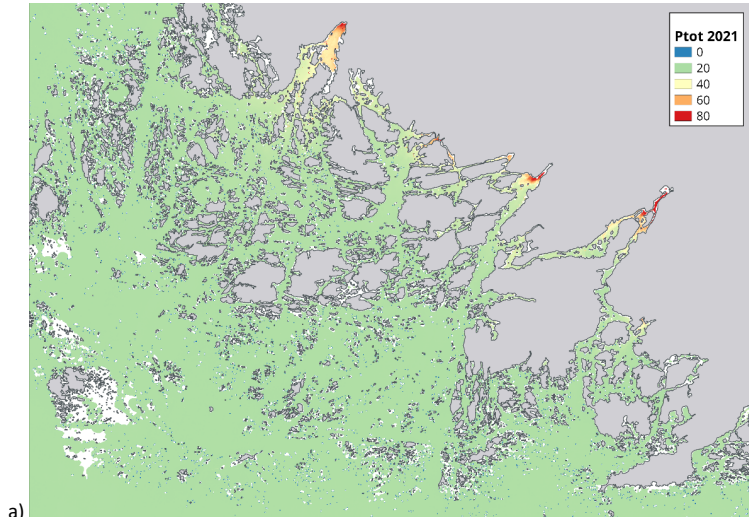
Saaristomeren osalta satelliittiaineistojen hyötynä on erityisesti alueellisen pienipiirteisen vaihtelun havainnointi sekä ajallinen ja alueellinen kattavuus. Hankkeessa pääpainona oli tarkan maastoerotuskyvyn aineistojen hyödyntäminen Saaristomereen laskevien jokien vaikutusalueiden määrittämiseen. Erityisesti huomioitiin jokien vaikutusalueet ja jokivesien kulkureitit rannikon lähellä. Hankkeessa toteutettiin ja vietiin jatkokäyttöön seuraavat aineistot

5.1.1. Kokonaisfosforin alueittaista vaihtelua kuvaavat vuosittaiset kartat

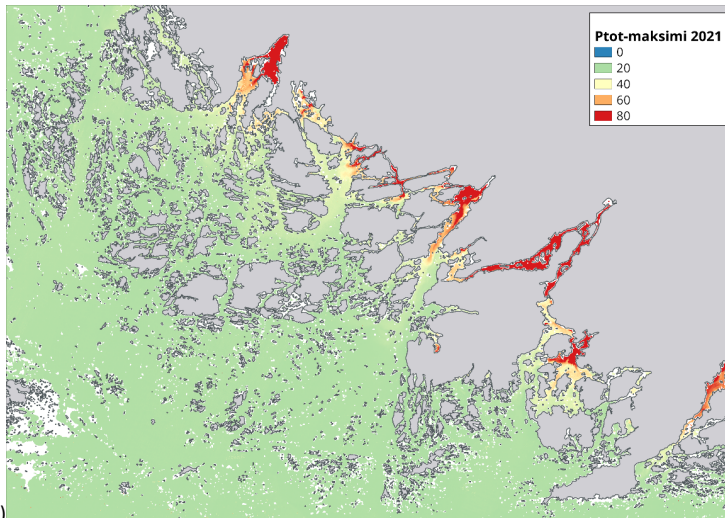
Ravinteiden kulkua pintavesikerroksessa arvioitiin työstämällä vuosittaiset kartat kokonaisfosfori (Ptot) havaintojen maksimi- ja keskimääräisestä tasosta (Kuva 5.1) vuosien 2019–2022 osalta. Tarkempi menetelmäkuvaus on kuvatekstissä alla.

Deleted: Kuva 5.1

Formatted: Font: Not Bold, Font color: Auto, Finnish



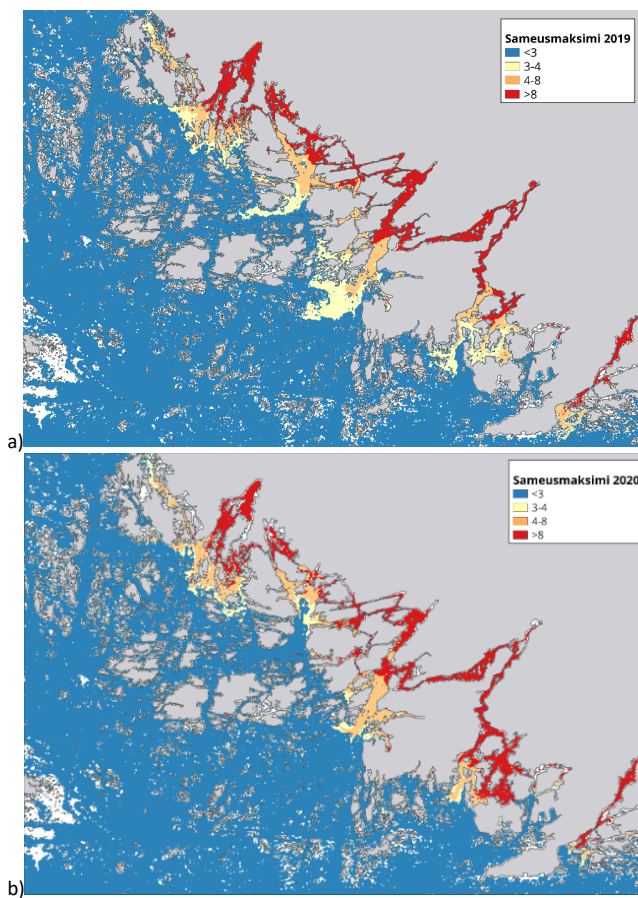
a)



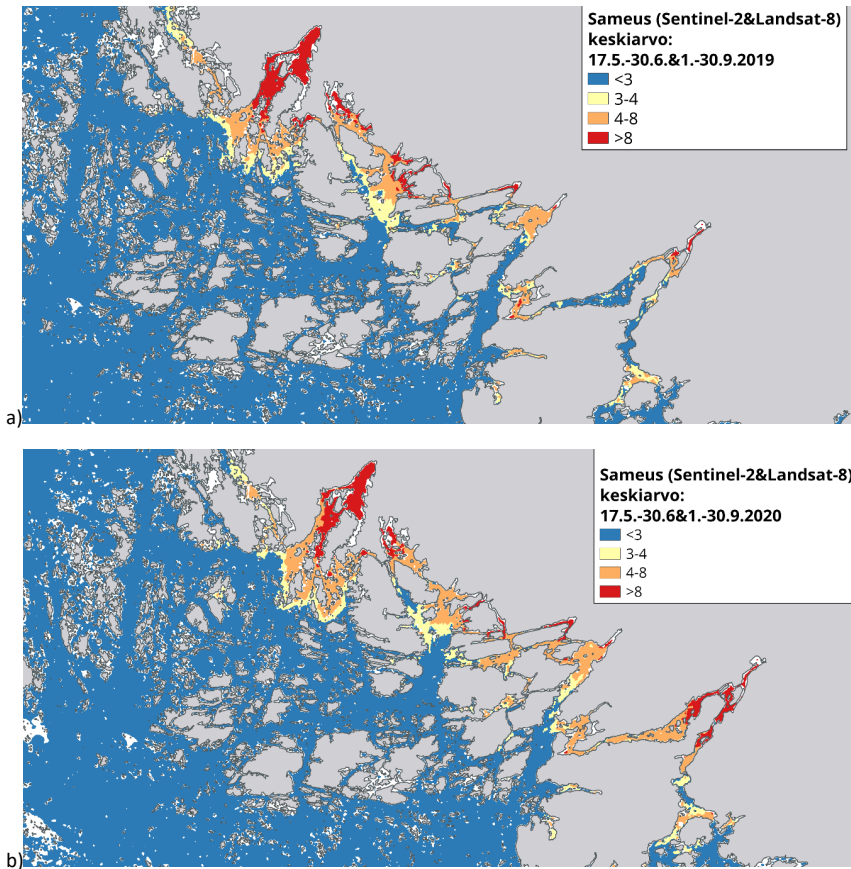
b)

Kuva 5.1. Kooste kokonaisfosforin (Ptot) määrästä satelliittihavainnoista arvioituna vuoden 2021 a) keskimääräisen tason mukaan b) keväisen sulamisajan havainnoista koostettuna. Hankkeen aikana työstettiin aineistot vuosien 2019–2022 osalta. Aineistot ovat saatavilla [TARKKA-](#) ja [TARKKA+](#)-palvelujen kautta ja luettavissa [SYKEN rajapinnoilta](#). Vuosittaiset kokonaisfosforikartat työstettiin sameushavainnoista muunnoskaavalla $P_{tot} = 1.82 \text{sameus} + 20.13$, jossa sameus [FNU] on kussakin kartan vesialueelle sijoittuvassa pikselissä). Yhtälö on muodostettu vuosien 2010–2019 huhti-lokakuun havaintojen perusteella hyödyntäen pintakerroksen asemanäytteenottoa (0–5 m). Sameuden ja kokonaisfosforin välinen vastaavuus on hyvä ($r^2 = 0.85$, $N=9139$).

Jokivesien vaikutusaluekartat tutkimusjokien sualueilla ovat hyödyllisiä täsmennetyä näytteenoton suunnitteluun ja vaikutusalueiden arviointiin. Maameri-hankkeen aikana jokivesien vaikutusalueista laadittiin kooste vuosittaisista keskimääräisistä vaikutusalueista (sameus), vuosilta 2018–2022. Lisäksi täydennettiin jo aiemmassa hankkeessa kehitettyjä vuosittaisen jokivesien kevätajan maksimihavaintoihin perustuvia vaikutusaluekarttoja vuosien 2020–2022 osalta.



Kuva 5.2. Jokivesien vaikutusaluekartat määritettynä vuosittaisten sameushavaintojen maksimiarvoista. Kartoilla havainnollistetaan jokivesien vaikutuksen ulottumista rannikkovesiin ääritilanteissa. Havaintoesimerkit vuosien a) 2019 ja b) 2020 osalta. Hankkeen aikana vastaavat aineistot työstettiin, siten, että aineisto kattaa nyt vuodet 2018–2022.

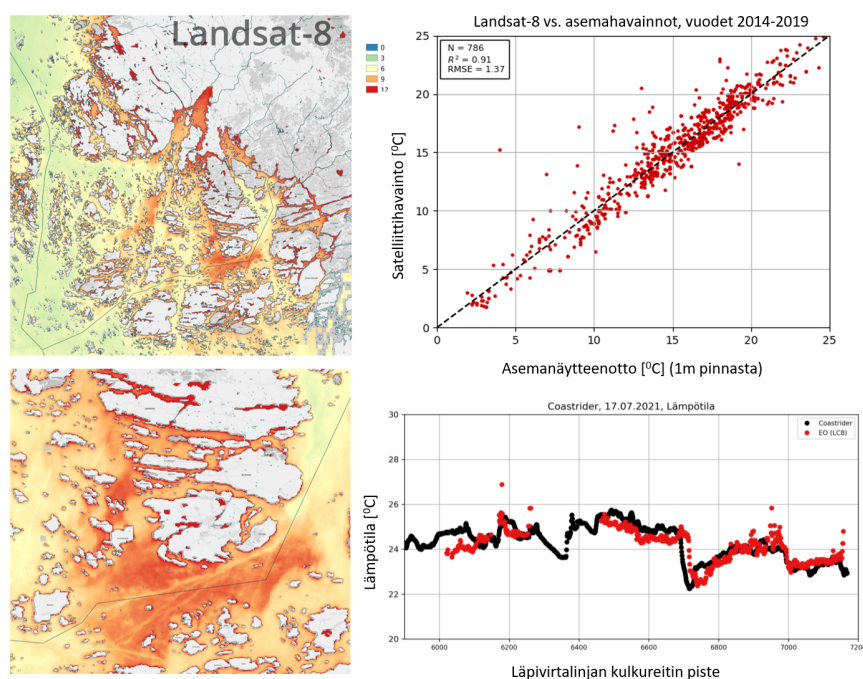


Kuva 5.3. Jokivesien vaikutusaluekartat määritettynä vuosittaisten sameushavaintojen keskimääräisestä tasosta vuosina a) 2018, b) 2019, c) 2020, d) 2021. Vuosittainen ajanjakso (17.5.–30.6. ja 1.–30.9.) on valittu siten, että kevään sulamisaika on ohi. Lisäksi sinilevääjän havainnot on jätetty pois. Kartoilla havainnollistetaan jokivesien vaikutuksen ulottumista rannikkovesiin ääritilanteissa.

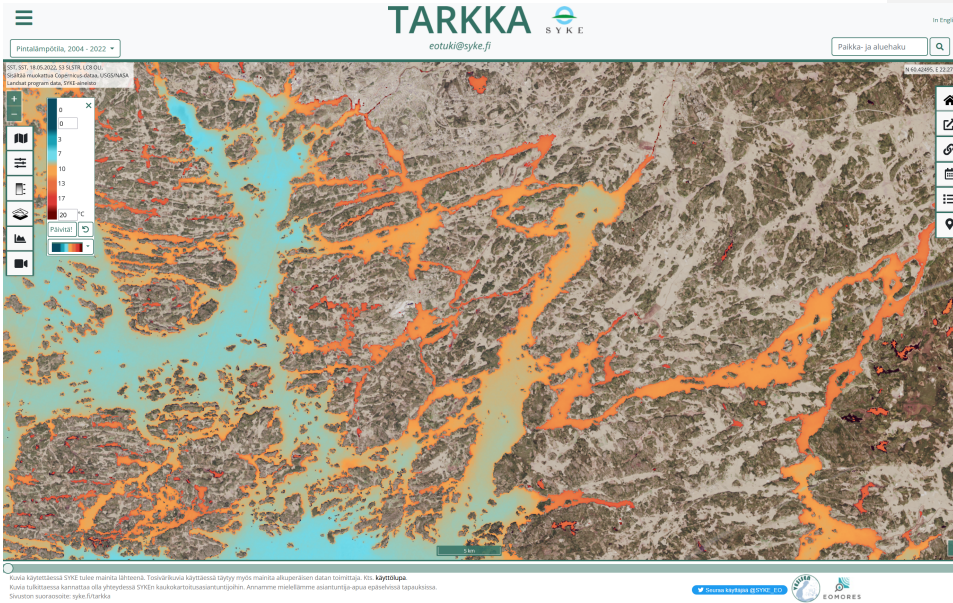
5.1.2. Pinalämpötila-aineiston kehittäminen ja vieminen tuotantoon kahdelta eri satelliittinstrumentilta

Satelliittihavainnoista tulkittuja pinalämpötila-aineistoja voidaan hyödyntää muun muassa mallinnustarpeisiin virtausoloja ja vedenvaihtoa selvitetessä. Maameri-hankkeen aikana toteutettiin tarkan maastoerotuskyvyn (100 m) pinalämpötilahavaintojen menetelmän käyttöönotto ja siihen liittyvät tarkkuusarviot rannikon pintaveden asemanäytteenottoon ja

läpivirtahavaintoihin nähden (**Error! Reference source not found.**). Aineiston otettiin osaksi TARKKA-palvelun aineistoja ja koko tarkan pintalämpötila-aineistojen historiallisen ajanjakson (2013->) täydennettiin SYKEN avoimille rajapinnoille pilvettömien havaintojen osalta. Aineistoja kertyy jatkossa kahdelta eri satelliitin havainnoista. Vuoden 2022 alussa USGS otti käyttöön myös Landsat-9-satelliitin, jossa on vastaava lämpötilan havainnointiin soveltuva instrumentti (TIRS).



Kuva 5.4. Vasen: havainnekuva Landsat-satelliittisarjan mahdollisuuksista havaita lämpötilavaihtelua. Vasen yläkulma: yleisnäkymä Saaristomerén alueelta. Vasen alakulma: yksityiskohta havaintojen tarkkuudesta vesireitin varrelta Airistosta länteen (Omenaistenaukko). Oikea yläkulma: Satelliitin havaitsema pintaveden lämpötila verrattuna VESLA-asemanäytteenottoon vuosien 2014–2019 osalta. Oikea alakulma: Vertailu rannikon vesireittejä kulkevan läpivirtamittauslaitteiston havaintojen kanssa (17.7.2021).



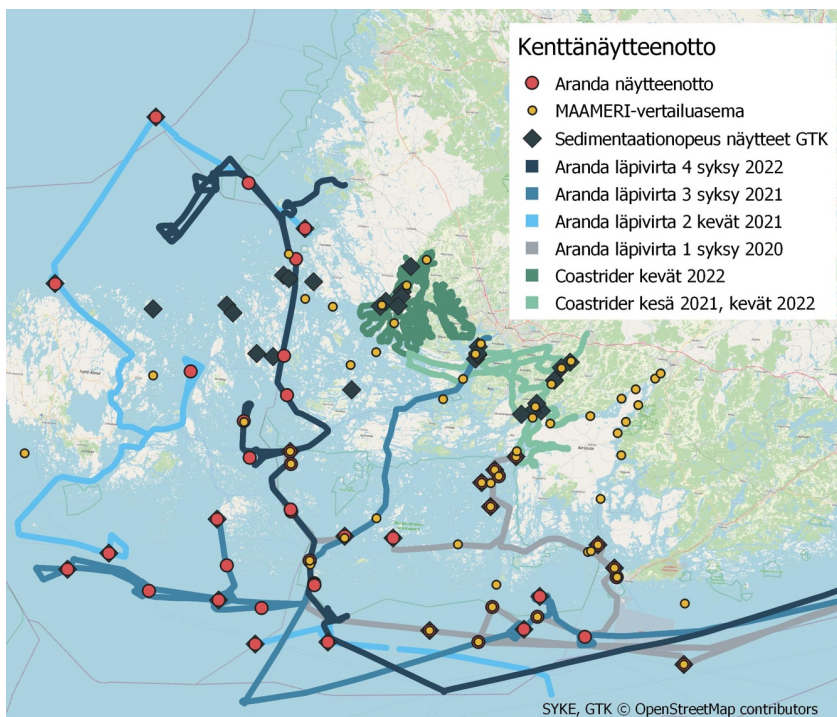
Kuva 5.5. Pintaveden lämpötilavaihtelut Saaristomeren itäosista, näkymä TARKKA-palvelun kautta SYKEN rajapintapalvelun-aineistosta, joka on avoimesti saatavilla. Havainto on tehty 18.5.2022 Landsat8-satelliitin TIRS-instrumentilla, joka havainnoi lämpötiloja 100 m maastoerotuskyvyllä.

5.1.3 Satelliittihavaintojen työstäminen hankkeen näytteenottapaikoilta

Hankkeen aikana satelliittihavaintoja on kerrytetty samoilta alueilta ja ajanjaksoilta muun näytteenoton kanssa. (Kuva 5.6). Samanaikainen mittausaineisto satelliittihavaintojen kanssa on tärkeää tuotteiden kehittämisen ja validoinnin kannalta. Mittausaineistoja tuotettiin mta Arandan tutkimusmatkoilta veden sameudesta sekä klorofylli-a pitoisuudesta yhteensä neljältä matkalta (kuva 5.6) sekä rannikon läheltä Coastrider-läpivirtausmittauksista kahtena eri ajankohtana.

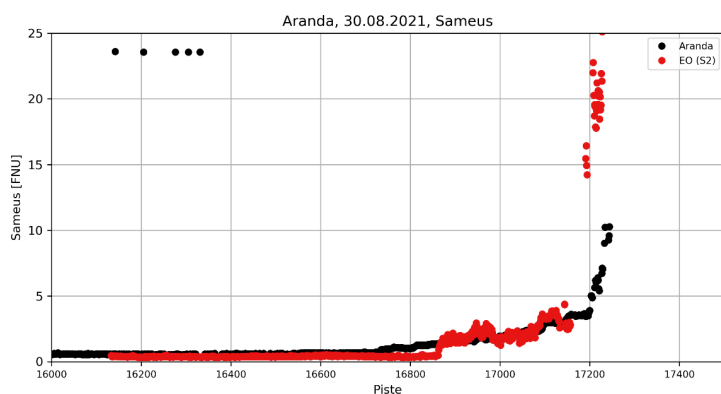
Deleted: Kuva 5.6

Formatted: Font: Not Bold, Not Italic, Font color: Auto

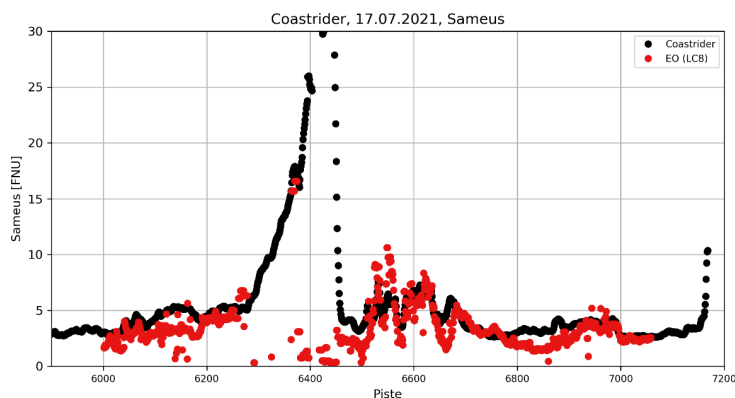


Kuva 5.6. Hankkeen kenttänäytteenotto, jota hyödynnettiin satelliittihavaintojen laadunvarmennuksessa. (Arandan ja Coastrider-järjestelmän mittausmatkat tuottivat ajallisesti ja alueellisesti kattavaa läpivirtamittausaineistoa hankkeen aikana yhteensä 8 kampanjan verran).

a)



b)



Kuva 5.7. Havainnekuvat hankkeen aikana mitattujen läpivirtahavaintojen keskinäisistä vastaavuuksista sameuden osalta a) Arandan mittauskampanja 30.8.2021 b) Coastrider-mittauskampanja 17.7.2021.

5.1.4 Täydennykset TARKKA-palvelujen satelliittihavaintoasemiin Saaristomerellä

Maameri-hankkeen aikana SYKE täydensi Saaristomerellä alueelle 48 uutta satelliittihavaintoasemaa, joiden kautta kerrytetään satelliittiaineistojen aikasarjaa myös hankkeen jälkeen. Satelliittihavaintoja kertyy jatkossa Saaristomerellä erityisesti pintalämpötilan, sameuden, a-klorofyllin osalta. Lisäksi osalle asemista havaintoja saadaan myös näkösyvyydestä ja humuksesta (Taulukko 5.1). Täydennetyissä asemasijainneissa (Kuva 5.7) huomioitiin erityisesti jokivesien vaikutusalueit hankkeessa olennaisten Paimio-, Uskela-, Aura- ja Mynäjokien osalta. Aineistoja voi seurata ja ladata käyttöön TARKKA ja TARKKA+ palvelujen kautta. Aineisto tallentuu SYKEssä STATUS-DB-tietokantaan.

Deleted: Taulukko 5.1

Formatted: Font: Not Bold, Font color: Auto, Finnish

Deleted: Kuva 5.7

Formatted: Font: Not Bold, Not Italic, Font color: Auto

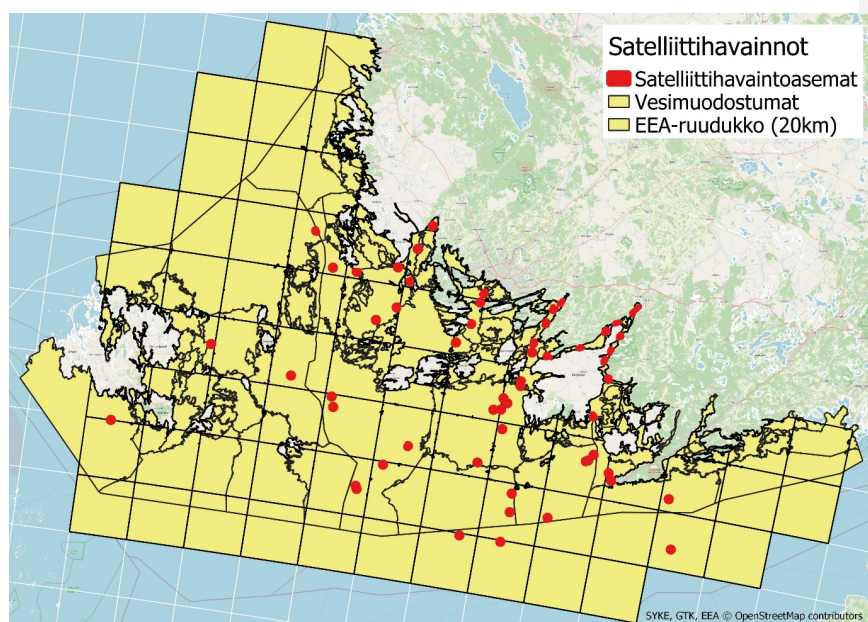
Asemakohtaisten aineistojen lisäksi STATUS-tietokantaan tallennetaan jatkuvatoimisesti vastaavaa satelliittihavaintoihin perustuvaa tilastotietoa rannikon vesimuodostumilta (Saaristomerellä alueita 119). Lisäksi tietokantaan tallennetaan vastaavat tiedot myös 20 km ruutujaolla, joka kattaa Itämeren avomerialueet. Saaristomerellä näitä kertyy yhteensä 77 (Kuva 5.7).

Deleted: Kuva 5.7

Formatted: Font: Not Bold, Not Italic, Font color: Auto

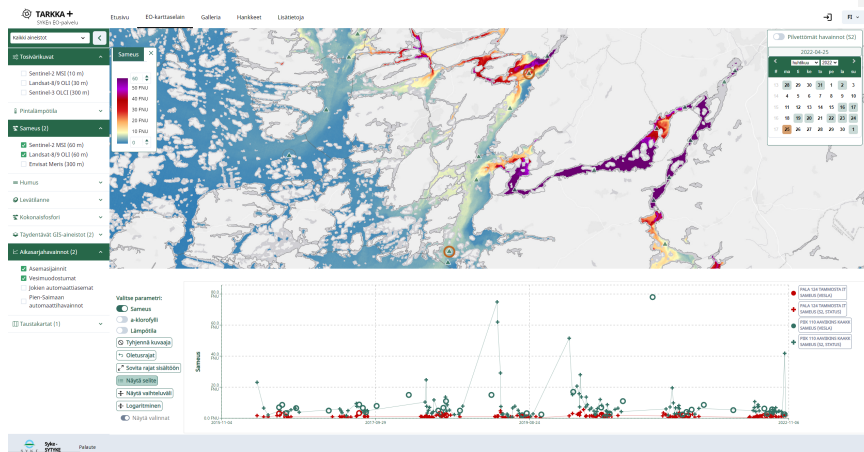
Taulukko 5.1 Satelliittihavainnoista kertyvä asemasijaintikohtainen aineisto TARKKA-palvelussa Saaristomerellä alueen osalta. Havaintojen lukumäärä vuositasolla on laskettu keskiarvona ko. aineiston havainnoista kaikilta havaintovuosilta. Asemien havaintomäärässä saattaa olla vaihtelua aseman sijaintiin liittyen (osa asemista sijaitsee kapeissa vesireiteissä, jotka ovat hankalammin tulkittavissa). Havaintojen kokonaislukumäärä on laskettu huomioimalla kaikki asemat ja havaintovuodet.

Suure	Asemien lukumäärä	Havaintojen lukumäärä vuositasolla	Havaintojen kokonaislukumäärä	Havaintovuodet
Lämpötila	51	39	38004	2004–2022
a-klorofylli	59	20	9267	2015–2022
Sameus	59	24	11348	2015–2022
Humus	59	24	11590	2015–2022
Näkösyyvyys	58	25	11596	2015–2022



Kuva 5.7. Saaristomerellä olevat jatkuvatoimiset satelliittihavaintoasemat TARKKA-palvelussa (yhteensä 59). Maameri-hankkeen aikana asemasijainteja lisättiin 48 kpl. Osalle asemansijainneista kertyy havaintoja myös ympäristöhallinnon kenttänyttienotosta. Osa

asemista on Maameri-hankkeen partnereiden toivomia sijainteja, jotka liittyvät muuhun seurantaan, kuten sedimenttikeräinasemat Kemiönsaaren molemmin puolin).

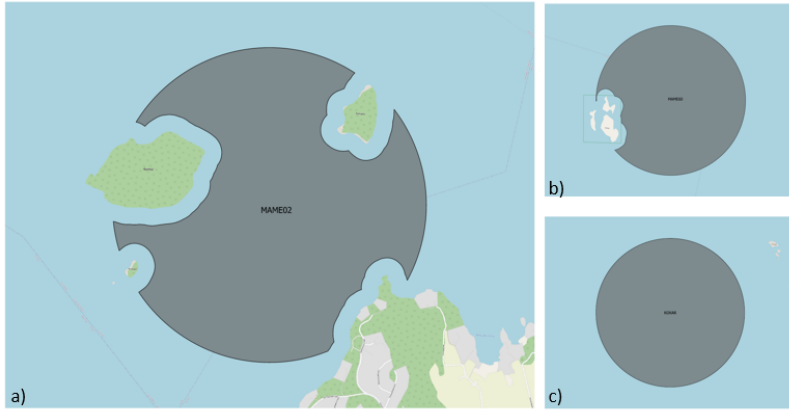


Kuva 5.8. Esimerkinä satelliittihavaintojen aikasarjan ja VESLA-asemanäytteenoton vastaavuudesta kahden satelliittihavaintoaseman osalta. Näkymä TARKKA+-palvelusta, joka otetaan käyttöön vuoden 2023 aikana.

5.1.5. Maameri-hankkeen partnerien käyttöön työstetyt ajalliset koosteet & tilastot

Maamerihankkeen näytteenottoasemien ympäriltä työstettiin erillinen tilastoaineisto, joka sisältää vuositasolla (vuodet 2016–2021) tilastoa sameuden ja klorofyllin vaihteluista aseman lähialueilta. Asemakohtaista vuosi- ja kuukausitason tilastoa kerrytettiin yhteensä 61 näytteenottoapaikan ympäriltä. Lisäksi kunkin aseman osalta laadittiin havainnekartta, joka kuvaa sitä aluetta asemanäytteenotto pistein ympäriltä, josta satelliittihavainnot on koostettu. Sameushavainnot koostettiin kuukausittain (kuukaudet maaliskuu–lokakuu) ja vuosittain koosteena kesäajalta (kesä–elokuun havainnot). Aineisto sisältää keskimääräiset sameus- ja a-klorofyllihavainnot, vaihteluvälin ajanjakson havainnoissa (P25–P75 välillä), sekä havaintojen lukumäärän.

b)

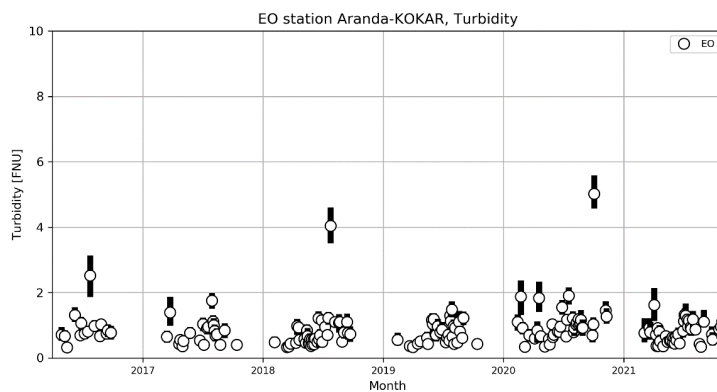
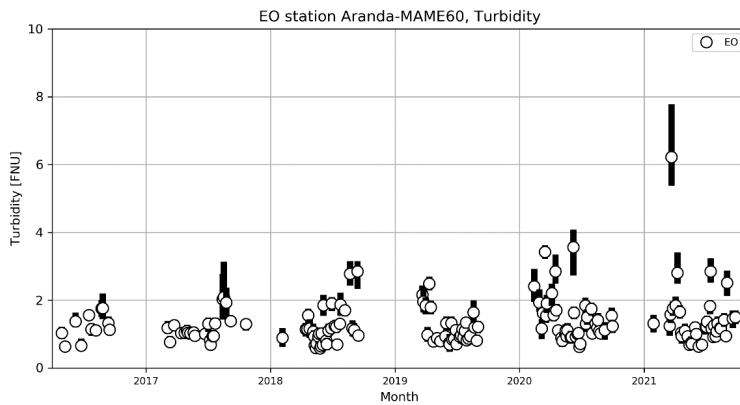


Kuva 5.9. Satelliittihavaintojen tilastotietojen poiminta-alue-*rajaus havainnollistettuna kolmen aseman ympäriltä a) GTKn sedimentinäytteenottoon liittyvä asema MAME02 ja Arandan mittakampanjoissa käytetty asema b) MAME 60 ja c) Kökar. Taulukko alla havainnollistaa vuositaso-
lukemia esimerkkiasemien osalta.*

Taulukko 5.2. Vuositasolla koostettujen sameushavaintojen vaihtelusta kolmen hankkeen näytteenottoaseman osalta. Vuonna 2016 oli saatavilla vähemmän havaintoja, koska satelliitti-
instrumentteja oli käytettävissä kaksi.

Aseman nimi	Vuosi	Kesän mediaanihavainto	P75	P25	N
GTK-MAME02	2016	3.51	5.16	1.88	2
GTK-MAME02	2017	4.76	10.64	1.02	7
GTK-MAME02	2018	3.92	14.41	1.27	12
GTK-MAME02	2019	2.8	8.49	0.69	9
GTK-MAME02	2020	4.6	12.51	2.06	13
GTK-MAME02	2021	3.6	8.84	1.11	11
Aranda-MAME60	2016	1.37	2.11	0.59	7
Aranda-MAME60	2017	1.15	3.04	0.62	10
Aranda-MAME60	2018	1.21	3.06	0.62	15
Aranda-MAME60	2019	0.92	1.9	0.57	19
Aranda-MAME60	2020	1.135	3.99	0.58	18
Aranda-MAME60	2021	1.18	3.15	0.58	19
Aranda-Kökar	2016	0.98	3.04	0.59	9
Aranda-Kökar	2017	0.87	1.89	0.36	12
Aranda-Kökar	2018	0.7	4.52	0.39	17
Aranda-Kökar	2019	0.79	1.64	0.39	21
Aranda-Kökar	2020	1.01	2.07	0.59	19

Aranda-Kökar	2021	0.88	1.58	0.32	20
--------------	------	------	------	------	----



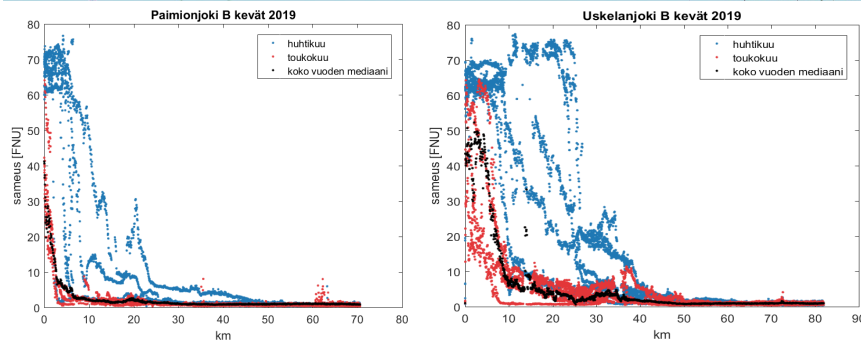
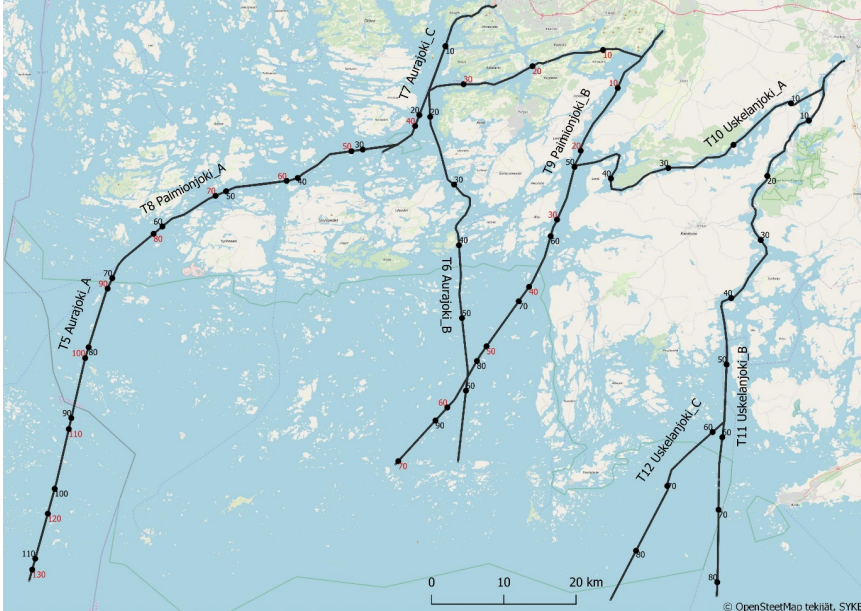
Kuva 5.11. Sameusvaihtelut aikasarjoina Maameri-hankkeen näytteenottoasemia ympäröiviltä alueilta (aluerajaus kuvassa 5.10.) vuosien 2016–2021 ajalta a) Aranda Mame-60 b) Aranda Kökar.

5.1.6. Jokivesien vaikutusalue määrityksiin soveltuvat linja-aineistot

Hankkeen aikana työstettiin myös jokien purkupisteestä lähtien jokiveden vaikutusalueita määrittäviä linjoja (Kuva 5.10). Saaristomerellä vesireiteiltä kertyvää aineistoa on Aurajoen, Paimionjoen ja Uskelanjoen vaikutusalueilta.

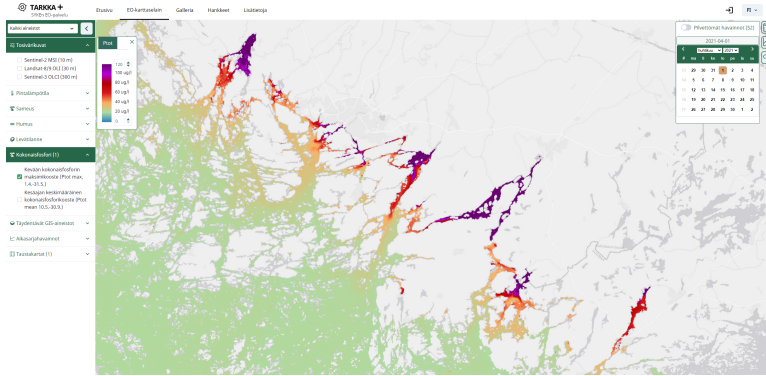
Deleted: Kuva 5.10

Formatted: Font: Not Bold, Font color: Auto, Finnish



Kuva 5.10. Havainnekuva satelliittihavainnoista tehdystä a) kulkureiteistä jokien purkupisteeltä avomerelle. b) Havaintoesimerkki Paimionjoen jokiveden kevätajan eri kuukausien vaikutuksesta verrattuna c) vastaava kuin b, mutta Uskelanjoen vesireitti B. Saaristomeren alueella vesireiteiltä kertyvää aineistoa on Aurajoen, Paimionjoen ja Uskelanjoen vaikutusalueilta.

5.1.7 Aineistojen saatavuus ja yhteenvedo julkaistuista kartta-aineistoista



Taulukko 5.3. Maameri-hankkeen aikana kehitetyt ja käyttöönotetut satelliittihavaintoaineistot, niiden maastoerotuskyky ja saatavuus. Aineistot ovat saatavilla TARKKA- ja TARKKA+-palvelujen kautta ja luettavissa [SYKEn rajapinnoilta](#). Uusien aineistojen osalta metadata- ja rajapintaosoitekuvaukset päivittyvät osin vuoden 2023 alussa.

Aineisto	Vuodet	maastoerotuskyky	Formaatti
Vuosikoosteet (kartat)			
Kokonaisfosforikartat vuoden maksimijanjakso	2018–2022	60 m	Geotiff ja Png
Kokonaisfosforikartat vuoden keskimääräinen taso	2019–2022	60 m	Geotiff ja png
Jokivesien vuosittainen maksimialue vaikutusalue (sameus)	2018–2022	60 m	Geotiff ja png
Jokivesien vuosittainen keskimääräinen vaikutusalue (sameus)	2018–2022	60 m	Geotiff ja png
Päivittäiset aineistot (kartat pilvettömiltä alueilta)			
pintalämpötilahavainnot	2013–2022	100 m	Geotiff
sameus	2013–2022	60 m	Geotiff

5.2. Datafuusio: Vedenlaatuaineistojen yhdistäminen ja interpolaatio

Johdanto ja työn kuvaus

SDFS-systeemin tila-avaruusmallissa tarkasteltavan ilmiön spatiaalinen riippuvuus kuvataan tilastollisen korrelaatiofunktion avulla. Ilmiön ajallista evoluutiota mallinnetaan autoregressiivisellä mallilla, jossa seuraavan ajanhetken ennuste riippuu lineaarisesti edellisestä tilasta. Kun havaintoja on riittävästi, on tämä yksinkertainen malli riittävän hyvä interpoloimaan puuttuva tieto havaintohetkien ja paikkojen välille. Mallia voidaan kuitenkin yleistää sisältämään hyvinkin tarkasti kuvattuja fysikaalisia riippuvuuksia systeemin tilasta ja ilmiön vaikuttavista ulkoisista tekijöistä. Projektissa kehitettiin ja testattiin SDFS-mallin yleistyksiä: trendimallia, jossa mallin keskimääräisen tilan lisäksi estimoidaan keskimääräistä ajallista tendenssiä. Tämä ns. integroitu satunnaiskulkumalli tuottaa sileämpiä estimoitteja kuin SDFS-mallin autoregressiivinen satunnaiskulkumalli (*random walk model*). Mallia kutsutaan myöhemmin DLM-malliksi, sillä se perustuu dynaamisen lineaarisen mallin (DLM) sovitukseen (Wikle, 2011). Autoregressiivisen SDFS ja DLM-trendimallin eroa havainnollistetaan kuvissa **Error! Reference source not found.** ja **Error! Reference source not found.**, jossa nähdään miten interpolaatio havaintoajajhetkien välillä on sileämpää DLM-mallissa. Lisäksi testattiin linearisoitua advektiomallia, jossa malliin otetaan syötteenä pintavirtaaman u- ja v-komponentit ja jossa kullakin ajanhetkellä mallin tilasuureita viedään ajassa eteenpäin virtaaman osoittamaan suuntaan. Kuvassa **Error! Reference source not found.** on tästä esimerkki. Koska virtaama-aineistoa ei ollut saatavilla kuin yhdeltä Maameri-projektin tarkasteluvuodelta ja koska advektiomallin kehitystyö oli odotettua aikaavievempää, voidaan nyt tehtyä työtä pitää proof-of-concept -tyyppisenä kokeiluna, joka vaatisi jatkokehitystä.

Tulokset ja niiden tarkastelu

Malleja testattiin Mynälahden alueella ja satelliittiaineistona käytettiin SYKE:n rajapinnasta ladattua Sentinel-2-sameusdataa vuosille 2017–2021. ARCHS/Coherens -virtaama-analyysi oli työtä tehtäessä saatavina vuosille 2013–2017, joten ainoa käytettävissä oleva yhteinen vuosi virtaama- ja sameusaineistolle oli 2017, joista jälkimmäistä oli kuitenkin vain suhteellisen harvasti saatavilla (**Error! Reference source not found.**). Kuvassa **Error! Reference source not found.** on esimerkki spatiotemporaalisesta datafuusiosovituksista kolmena ajankohtana 2021-07-04, 2021-07-08 ja 2021-07-12, joista ensimmäisessä ja viimeisessä on kattava satelliittihavainto (oikeanpuoleiset karttakuvat). Keskimmaisella rivillä oleva kuva päivältä 2021-07-08 näyttää miten paikallisesti ja ajallisesti interpoloitu malli sovituu näiden kahden päivän väliin, kun havaintoja ei ole. Esimerkkiakasarjoissa käytetty piste (21.618505°, 60.493948°) on merkitty karttoihin tähdellä (*).

Tehty selvitystyö osoitti datafuusiomallin hyödyllisyyden aineistojen yhtenäistämässä. Käytetyt mallit tarvitsevat riittävän kattavan havaintoaineiston, jotta ne voivat tuottaa realistisia interpolaatioita alueille, joissa havaintoja ei ole. Satelliittikaukokartoitus tuottaa potentiaalisesti hyvinkin käyttökelpoista dataa, mutta vedenlaadun kaukokartoituksessa pilvipeitteen aiheuttamat katkokset datassa voivat olla merkittäviä. Pelkkä havaintodata yksinään ei riitä laadukkaaseen analyysiin, vaan tarvitaan myös tietoa ilmiöiden spatiaalisesta ja temporaalisesta korrelaatorakenteesta. Yksinkertaiset empiiriset tila-avaruusmallit eivät pysty mallintamaan monimutkaisia syyseuraussuhteita. Mutta jos syöteaineistojen ja mallin rakenteen epävarmuudet on realistisesti kuvattu, saadaan datafuusiomallin tuloksista ja sen tuottamista epävarmuusarvioista hyödyllistä tietoa siitä mihin suuntaan malleja tulisi kehittää ja minkälaista lisäinformaatiota tarvitaan. Seuranta-aineistojen mallintamisessa suuri haaste on myös mallitulosten verifiointi. Koska tarkasteltavissa ilmiöissä ja niistä saatavissa havainnoissa on voimakkaita ajallisia ja paikallisia korrelaatioita, eivät perinteiset ristiinvaldointimenetelmät ole tehokkaita. Tämä seikka kaipaa myös jatkoselvitystä.

Viitteet:

Gunia, M., Laine, M., Malve, O., Kallio, K., Kervinen, M., Anttila, S., Kotamäki, N., Siivola, E., Kettunen, J., Kauranne, T. 2022. Data fusion system for monitoring water quality: Application to chlorophyll-a in Baltic Sea coast. *Environmental Modelling & Software*. Volume 155, ISSN 1364-8152, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105465>.

Cressie, N., Wike, C. K. 2011. *Statistics for Spatio-Temporal Data*. Wiley.

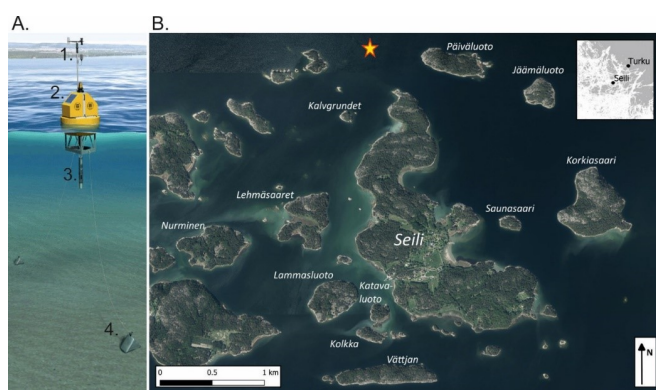
5.3. Jatkuvatoimiset vedenlaadun poijumittaukset

Johdanto

Meriympäristössä tapahtuvien muutosten seuranta laajoilla alueilla ja riittävän tiheällä ajallisella otannalla on haastavaa konventionaalisilla seurantamenetelmillä. Aineistojen parempi integraatio ja yhteismitallistaminen on tärkeää. Uusien seurantamenetelmien ja paikkatiedon hyödyntäminen ovat mahdollisia lähestymistapoja. Tässä osiossa yhdistetään esim. kaukokartoitukseen perustuvaa havainnointia muuhun havaintotietoon sekä tuotetaan saatavilla olevia tietoaineistoja yhdistäviä koosteita mallinnuksen edellytysten parantamiseksi ja tietopohjan vahvistamiseksi.

Työn toteutus ja tulokset

Työssä tuotettiin hankkeen aikana jatkuvatoimista vedenlaatumittausaineistoa Seilin saaren lähistölle sijoitetulla automaattisella mittauspoijulla. Finland. Poijujärjestelmä on YSI 6952 poijualusta sekä YSI 6000 monikanavainen luotain (YSI Inc. 2012). poiju mittaa veden suolapitoisuutta (PSU), lämpötilaa (°C), liuennutta happea (O₂ mg/l ja kyllästys %), sameutta (NTU), klorofylli-a (fluoresenssi, muunnettuna eg/l) sekä sinilevien määrää (BGA; fykosyaniinin fluoresenssi, muunnettuna soluja/ml) (Kuva 5.14).



Kuva 5.14. A) yleiskuva mittauspoijusta ja B) Seilin automaattisen mittauspoijun sijainti (merkitty tähdellä). 1.= sääasema, 2.= laitealusta aurinkokennoille, vinsille ja telemetrialaitteistolle. 3. = CTD-



laitteisto 4. = ankkurointi. Poijun kuva julkaistaan YSI inc.:in luvalla. Kartta on muokattu Maanmittauslaitoksen aineistosta 2004–2008, lisenssi CCBY-4.0.

Seilin mittausaseman pääasiallinen tehtävä oli tarjota vertailuaineistoa Saaristomeren eri osista kerätyille mittaustiedolle. Poijun tekninen kuvaus ja aikasarja-aineiston esimerkkejä voi tarkastella Seilin ympäristönseurannan sivuilla osoitteessa <https://saaristomeri.utu.fi/home/>, sivua ylläpitävät Saaristomeren tutkimuslaitos, Turun yliopisto ja Turun ammattikorkeakoulu (Seili Environmental monitoring programme 2020). Veden syvyys tutkimuspaikalla on noin 50 metriä.

Poiju tuottaa yksityiskohtaista tiheän frekvenssin mittaustietoa vedenlaadusta, kerrostuneisuudesta ja veden ominaisuuksien vuodenaikaisesta ja vuosien välisestä vaihtelusta. Mittauksia tehdään profiileina 2–40 metrin syvyydessä automaattisen vinssin avulla neljästi vuorokaudessa 0.5 sekunnin mittaustiheydellä. Data lähetetään kahdesti päivässä GSM-yhteydellä ja profiileja voi tarkastella ja ladata verkossa osoitteessa https://saaristomeri.utu.fi/odas_en/. (Loisa ym. 2017). Lyhyen (tunti-päivä-viikko) ja pitkän (kuukausi-vuosi) aikavälin mittausten yhdistäminen auttaa hahmottamaan trendejä ja toisteita joita muuten ei ole mahdollista havaita. Poiju on ollut jatkuvasti toiminnassa vuodesta 2006 vuosittain alkukeväästä myöhäisyksyyn.

Seilin ympäristönseurannasta vastaa Turun ammattikorkeakoulu läheisessä yhteistyössä Turun yliopiston Saaristomeren tutkimuslaitoksen sekä FINMARI-konsortion kumppaneiden kanssa. Poijuaineiston visualisoinnista vastaa Saaristomeren tutkimuslaitos Seili Environmental monitoring programme 2020). Poijumittausten tuloksia on julkaistu äskettäin tarkemmin (Hänninen ym. 2022).

Viitteet:

Hänninen, J., Mäkinen, K., Nordhausen, K., Laaksonlaita, J., Loisa, O. & Virta, J. 2022. "Seili-index" for the prediction of chlorophyll- α levels in the Archipelago Sea, SW Finland, the northern Baltic Sea. *Environmental Modeling & Assessment*. 27: 571-584. doi: 10.1007/s10666-022-09822-9.

Loisa, O., Körber, J., Laaksonlaita, J. & Kääriä, J. 2017. High-resolution monitoring of stratification patterns in the Archipelago Sea, Northern Baltic Sea, using an autonomous moored vertical profiling system. *Proceedings of IEEE/MTS OCEANS 2017 – Anchorage, Alaska, USA*.

Seili Environmental monitoring programme 2020. Odas profiling buoy datasets. Turku University/ Turku University of Applied sciences, Turku. https://saaristomeri.utu.fi/odas_en/.

Työpaketti 6: Saaristomerimallin kehittäminen ja mallituotteet vesien- ja merenhoitoon

Kotilainen, A., Jokinen, S., Kaskela, A., Virtasalo, J., Middleton, M., (GTK), Ropponen J., Kotamäki N., Malve O., (SYKE).

Johdanto

Tässä osioissa parannettiin Saaristomerimallin luotettavuuden ja tarkkuuden edellytyksiä vesiensuojelutoimenpiteiden vaikutusten arvioimiseksi tulevaisuudessa. Kokoavassa työkokonaisuudessa hyödynnettiin tässä ja aiemmissa hankkeissa saatuja tutkimustuloksia saaristomerimallin kehittämiseksi ja tulosten tarkkuuden parantamiseksi.



Keskeiset tulokset ja johtopäätökset

MAAMERI projektissa tuotettiin uutta tarkkaa merenpohjan maalajitietoa Saaristomereltä. Aineistoa on hyödynnetty MAAMERI projektissa mm. sedimenttinäytepaikkojen valinnassa, maalajimallinnuksen taustatietona, ja rannikkomallin sisäisen P-kuormituksen syötteen arvion laatimisessa. Ennen MAAMERI projektia tiedot merenpohjan koostumuksesta olivat vähäisiä Saaristomeren alueella, erityisesti sen pohjois- ja länsiosissa. MAAMERI projektin myötä tietoa merenpohjan maalajeista on kartutettu näiltä ”valkoisilta” alueilta, erilaisista sedimentaatioympäristöistä kuten jokisuistoista, suojaisesta sisäsaaristosta, merenpohjan kanjonien alueilta sekä avoimesta ulkosaaristosta. Merenpohjan maalajiaineisto osoittaa Saaristomeren merenpohjan rikkonaisuuden. Merenpohjan laatu ja muut ympäristökijät voivat vaihdella Saaristomerellä hyvinkin pienellä matkalla. Vaikka tietoa Saaristomeren merenpohjan kerrostumista ja niiden koostumuksesta karttui, niin pinta-alallisesti tiedon puutteet ovat vielä suuret. Erityisesti matalien alueiden (0–5 metrin veden syvyys) tiedon puute on edelleen suuri. Merenpohjan geologinen tieto on olennainen osa merenhoidon ja merialueiden kestävän käytön suunnittelua. Meri- ja rannikkoalueiden käyttöpaineiden kasvaessa myös monipuolisen tiedon ja aineistojen tarpeet meriympäristöstä kasvavat.

MAAMERI projektin myötä myös tietoa kerrostumisnopeuksista Saaristomerellä on kartutettu huomattavasti. Tietoa sedimentaationopeudesta tullaan myös hyödyntämään mm. rannikkomallin sisäisen P-kuormituksen syötteen arvioinnissa. Tutkituilla asemilla sedimentaationopeudet olivat suhteellisen suuria, vaihdellen kuitenkin paljon välillä 0.01–1.87 cm/vuosi, keskimääräinen arvo 0,66 cm/vuosi.

MAAMERI projekti tuotti myös uutta tietoa merenpohjan sedimenttien koostumuksesta, mm. hiilen, typen ja fosforin sekä haitallisten aineiden esim. raskasmetallien pitoisuuksista sedimenteissä. Myös kokonaisfosfori, -typpi, ja hiili dataa on jo hyödynnetty MAAMERI projektissa sisäisen P-kuormituksen arvioinneissa. Haitallisten aineiden kuten raskasmetallien pitoisuudet merenpohjan pintakerrostumissa ovat yleensä laskeneet viime vuosikymmeninä. Useilla alueilla on kuitenkin merenpohjan pinnan alla, syvemmällä kerrostumissa, esimerkiksi kadmiumin, lyijyn ja sinkin pitoisuudet edelleen suhteellisen suuria. Vaikka merenpohjan sedimenttien sisältämistä haitallisista aineista on suhteellisen hyvä yleiskäsitys, on tietämys puutteellista näiden pilaantuneiden pohjasedimenttien haitallisten aineiden tarkemmista pitoisuuksista, tarkemmasta alueellisesta sijainnista ja laajuudesta.

Maalajimalli on kehitetty yhteistyössä muiden tutkijoiden kanssa. Maameri -projektissa on keskitytty erityisesti maalajiluokitukseen ja sen soveltavuuteen muihin analyysiin. Määritetyt kolme maalajiluokkaa (orgaanisainepitoiset sedimentit, vanhemmat savet ja kitkamaalajit) kuvastavat erityisesti orgaanisainepitoisen sedimentin määrää ja oletettavasti myös eroja fosforipitoisuudessa. Vastaavaa luokitusta ei ole käytetty alueen maalajimalleissa aiemmin. Temaattisen tarkentumisen lisäksi aineiston spatiaalinen tarkkuus ja kattavuus ovat parantuneet. Aiemmin tarkkaa, 1:20 000/1:100 000, kartoitettua aineistoa oli saatavilla vain rajatulta alueelta ja karkeampaa 1:1 000 000 koko alueelta. Maameri-projektissa aineistoa työstetty 25 m pikselikoolla ja mallin mittakaava on tarkimmillaan noin 1:100 000. Malli kattaa koko tutkimusalueen ja sen tarkkuus on aineiston

perusteella noin 70 % luokkaa. Maalajimallia voi hyödyntää ainakin muissa orgaanisainespitoisen sedimentin tarkasteluissa ja mallinuksissa sekä näytteenotossa.

Työssä tunnistettiin ympäristömuuttujien ja mallinnuksen perusteella neljä eri vyöhykettä, jotka edustavat jossain määrin eri sedimentaationopeuksia: Klusteri 1 sijaitsee pääsääntöisesti ulkomerellä ja syvemmällä vesialueilla ja sedimentaationopeudet vaihtelevat 0–1.47 cm/v välillä (mediaani 0.46). Klusteri 2 näyttäisi rajaavan kitkamaalajien vallitsevia matalia alueita ulkosaaristossa, joilta ei ole sedimentaatiopohjien vähäisyyden vuoksi sedimentaationopeushavaintoja. Klusteri 3 on välisaaristossa ja sedimentaationopeus on alhainen, välillä 0.10–1.13 cm/v (mediaani 0.30). Klusteri 4 sijaitsee sisäsaaristossa rannan ja jokisuiden lähellä ja sen sedimentaationopeudet ovat korkeimmat (0.28–1.87 cm/v, mediaani 0.84). On huomattava, että sedimentaationopeusarvio liittyy lähinnä vain orgaanisainespitoisiin pohjiin, eikä sitä pidä soveltaa koko alueelle (esim. kitkamaalajipohjille). Sedimentaationopeuksia on pyritty havaitsemaan edustavilta pohjilta, jolloin ne eivät anna täysin realistista kuvaa keskimääräisestä sedimentaationopeudesta koko alueella. Nämä arvot edustavat usein paikallista maksimi/suurta sedimentaationopeutta.

Hankkeessa muokattiin Coastal Load Response (CLR)-malli toimimaan Saaristomerimallin kanssa samassa palvelinympäristössä ja käynnistymään automaattisesti Saaristomeren alueen FICOS-malliajoja tehdessä. CLR:n laskeman tulokset ovat automaattisesti mukana uusina muuttujina mallin kehitysversion käyttöliittymässä. Mallin perusversioon muuttujat tulevat näkyville lähitulevaisuudessa FICOS-mallin seuraavan isomman päivityksen yhteydessä. CLR-malli pystytään ajamaan sellaisille sisä- ja välisaariston vesimuodostumille, jotka ovat FICOS-ajossa mukana eheinä eli tihentämättöminä, ja joille on simulaatiosta saatavilla kokonaisten vuosien kattavaa syöttödataa.

FICOS-CLR-malliyhdistelmää on hankkeen aikana alustavasti testattu rannikon läheisimmissä vesimuodostumissa. Teknisesti malliyhdistelmä toimii, mutta yhdistelmän kalibrointi ja validointi vaatii vielä työtä tulevaisuudessa. Erityisesti on tarkasteltava minkä tyyppisissä vesimuodostumissa malliyhdistelmää on järkevä käyttää. Jatkossa voidaan käyttää MAAMERI-hankkeessa tuotettuja satelliittiaineistoja (ravinteista) ja a-klorofyllistä vertailuarvoina CLR:n validoinnissa. Samoin hankkeessa tarkennettujen sedimentaationopeuksien (GTK) käyttö parantaa edelleen mallien luotettavuutta.

6.1. Saaristomerimallin sisäisen P-kuormituksen arvion parantaminen tarkentuneiden pohja-, SAR- ja P-tietojen osalta

6.1.1. Merenpohjan geologiset tutkimukset (Aarno Kotilainen, Sami Jokinen, Anu Kaskela, Joonas Virtasalo, GTK)

Johdanto

Tehtävässä tuotettiin uutta tietoa syvyydestä ja merenpohjan maalajeista valituilta avainalueilta Saaristomereltä. Tarkat tiedot merenpohjan koostumuksesta ovat olleet vähäisiä Saaristomeren alueella, erityisesti sen pohjois- ja länsiosissa. Tietoa tuotettiin erityisesti orgaanisainespitoisten



sedimenttien esiintymisestä ja niiden koostumuksesta, jota hyödynnetään rannikomallin sisäisen P-kuormituksen syötearvion laatimisessa käytettävien potentiaalisesti mobiilien fosforin esiintymismuotojen alueellisessa kartoittamisessa.

Kenttätöyt

MAAMERI tutkimusalueen geologiset tutkimukset toteutettiin Saaristomerellä kesällä 2020 ja 2021. Tavoitteena oli saada tietoa syvyydestä ja merenpohjan maalajeista valituilta avainalueilta, sekä näytteitä sedimenttitutkimuksiin.

Tietoa merenpohjan geologiasta saatiin käyttämällä erilaisia akustis-seismisiä tutkimus- ja sedimenttinäytteenottomenetelmiä. Akustis-seismiset aineistot kerättiin tutkimusalus Geomarilla ja sedimenttinäytteet Aranda, Geomari, Augusta ja Aurelia tutkimusaluksilla. Tutkimusaluksen paikannukseen käytettiin DGPS (Differential Global Positioning System) satelliittipaikannusjärjestelmää. DGPS-järjestelmän paikannustarkkuus on noin ± 2 m. Paikkatiedon ja luotausaineistojen keruu suoritettiin digitaalisena Meridata MDCS 5.2 (Marine Geophysical Data Acquisition Software, Oy Meridata Finland Ltd) järjestelmällä. Näytteenoton aikana tutkimusalus Geomarin paikallaan pitämiseen käytettiin tietokoneavusteista DP (Dynamic Position) – järjestelmää.

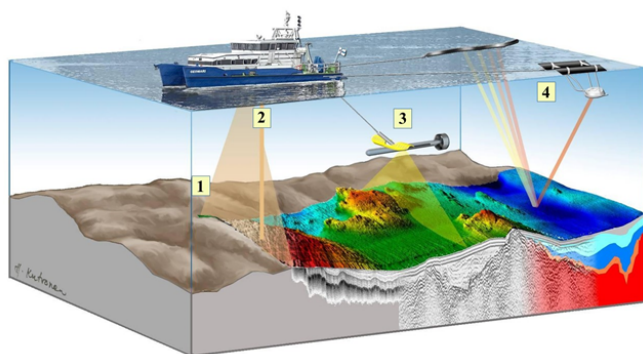
Merenpohjan akustis-seismiset luotaukset – GTK

Merenpohjan luotauksissa käytettiin kaikuluotausta, monikeilakaikuluotausta, viistokaikuluotausta sekä reflektioseismistä luotausta (Kuva 6.1.). Näitä laitteita käytettiin samanaikaisesti. Ennen luotauksen aloittamista suoritettiin jokaisella tutkimusalueella ensin vesipatsaan äänennopeus- ja lämpötilaprofiilien mittaussuunnitelma Reson SVP 15T -mittalaitteella. Akustiset-seismiset tutkimukset suoritettiin noin 5 solmun nopeudella ennalta määrättyjä luotauslinjoja pitkin.

Kaikuluotauksessa käytettiin **sedimenttikaikuluotainta** (Pinger/MeriData, 28 kHz:n anturi ja Chirp/Meridata, 4 kHz anturi), jonka avulla on mahdollista selvittää vesisyvyys, pohjan topografia, pehmeiden sedimenttikerrosten paksuudet sekä eri-ikäisten pehmeiden sedimenttien (savien) sisäarakenteita (jopa noin kymmenen senttimetrin kokoluokkaa olevat rakenteet pystytään havaitsemaan). **Monikeilakaikuluotaimella** (Kongsberg Geoswath 4) saadaan yhdellä luotausajolla selville veden syvyys ja pohjan topografia vähintään 3 x veden syvyyden verran aluksen molemmilta puolilta (esim. jos vettä 10 m, niin saadaan 60 m leveä kaistale merenpohjaa). Monikeilakaikuluotauksella saadaan tietoa veden syvyyden ja pohjan topografian lisäksi myös pohjan koostumuksesta ja karkeudesta. **Viistokaikuluotaimella** (side scan sonar) (Edgetech 4205) saadaan ilmavalokuvaa muistuttava varjokuva merenpohjasta aluksen kulkureitin molemmilta puolilta. Viistokaikuluotauksen avulla saadaan tietoa pohjan karkeudesta (esim. kivisyys), pohjan maalajeista ajolinjan sivuilta ja pohjan topografiasta. Viistokaikuluotaimen kuvasta erottuu mm. erinäisiä merenpohjan muotoja, lohkaraisuus, eroosio- ja sedimentaatiorakenteita sekä ihmistoiminnan jälkiä (esim. ruoppaus-, ankkurointi- ja pohjatruolijäljet, sekä kaapelit ja hyltyt). Kohteet, jotka ovat koholla pohjasta, jättävät taakseen valkoisen akustisen varjon. Kuoppien etuosaan heijastuu vaalea varjo ja kuopan takareuna aiheuttaa puolestaan voimakkaan kaiun. Kohteen korkeus on mahdollista laskea akustisen varjon pituuden avulla. Veden kerrostuneisuus saattaa häiritä luotausta, sillä ne aiheuttavat tiheyseroja ja signaalin taittumista jo vesikerroksessa.

Relektioseismisellä luotauksella (SIG Pulse S1) saadaan tietoa karkeiden maalajien (hiekkä, sora ja

moreeni) kerrospaksuuksista ja sisärakenteista. Sillä saadaan tietoa myös kallioperän pinnasta ja sen topografiasta.



Kuva 6.1. Merenpohjan geologisessa tutkimuksessa, tutkimusalus Geomarilla, käytettäviä akustiseismisiä tutkimusmenetelmiä. 1) monikeilakaikuluotain (Kongsberg Geoswath 4), 2) sedimenttikaikuluotain (Pinger/MeriData MD 28 kHz and Chirp/Massa TR-61A 3.5–8 kHz transmitters), 3) viistokaikuluotain (Edgetech 4205), ja 4) reflektioseisminen luotain (SIG Pulse S1). Kuva: Harri Kutvonen, GTK.

Sedimenttinäytteenotto

Merenpohjan luotaustietojen/tulkintojen varmistus tehtiin sedimenttinäytteenoton ja vedenalaisten kamerahavaintojen avulla. Sedimenttinäytteitä kerättiin myös mm. ympäristögeokemiallisia analyysejä varten.

Sopivimpien näytteenottoapaikkojen ja käytettävien sedimenttinäytteenottomien (*engl. corers*) valinta perustui akustisten luotausprofiilien alustaviin tulkintoihin ja vedenalaisella videokameralla tehtyyn merenpohjan tarkastukseen.

Sedimenttinäytteenotto suoritettiin GEMAX- ja "box corer" -tyyppisillä noutimilla. Box corer noutimen sisälaatikon, eli niin sanotun "boxin", mitat ovat: 184 mm (leveys) x 183 mm (pituus) x 255 mm (korkeus). Merenpohjan videokuvaukseen käytettiin kahdella valolla varustettua riiputettavaa Intova -pohjakameraa. Videokuvaa tallennettiin tietokoneen kovalevylle. Videokamera laskettiin halutulla paikalla merenpohjaan ja merenpohjaa kuvattiin muutaman minuutin ajan aluksen pysyessä paikalla DP järjestelmän avulla.

Näytteen sedimentologinen kuvaus ja digitaalinen valokuvaus tehtiin välittömästi, kun näyte oli nostettu laivan kannelle. Havainnot kirjattiin pintanäytelomakkeelle, jotka myöhemmässä vaiheessa kirjoitettiin puhtaiksi sähköiseen muotoon. Geokemiallisia ja muita analyysejä varten valitut GEMAX – pintasedimenttinäytteet viipaloitiin 1 cm paksuiksi osanäytteiksi muovipusseihin. Lisäksi kustakin



sedimenttinäytteestä kerättiin alin ~5 cm (vain GEMAX-näytteet). Box corer pintanäytteistä otettiin halutun paksuiset osanäytteet (mm. raekoko-, ja geokemiallisiin-analyysiin). Osanäytteet säilöttiin kylmiöön.

Kenttätietojen käsittely

Syvyysmalli

Monikeilakaikuluotain aineistot kerättiin ja käsiteltiin Hypack-ohjelmistolla, ja visualisoitiin Fledermaus-ohjelmistolla. Syvyysmallit interpoloitiin monikeilakaikuluotain aineistoista (5 m), 25 metrin rasterikoossa detaljitutkimusalueille.

Akustis-seismiset profiilit ja viistokaikuluotain tiedot käsiteltiin MDCS/MDPS ohjelmistopakettilla (OY Meridata Finland Ltd).

Pintasedimenttien ajoitukset ja sedimentaationopeuksien arviot perustuvat tässä työssä sedimenttinäytesarjojen ¹³⁷Cs mittauksiin (esim. Kankaanpää et al., 1997; Mattila et al., 2006; Ilus, 2007; Zaborska et al., 2014; Moros et al., 2017; Kotilainen et al., 2021). Häiriintymättömissä (esim. bioturboitumattomissa) Itämeren sedimenteissä ¹³⁷Cs: n aktiivisuuspitoisuuksien voimakas nousu sedimenteissä/sedimenttisarjassa vastaa huhtikuun 1986 Tšernobylin ydinvoimalaonnettomuuden laskeumaa. ¹³⁷Cs aktiivisuus sedimenttinäytteissä mitattiin (60 min) Geologian tutkimuskeskuksen nelituumaisella NAI/TI-ilmaisella varustetulla EG&G Ortec ACETM-2K -gammaspetrometrillä.

Geokemiallisissa analyyseissä käytettiin erilaisia menetelmiä (esim. ICP-MS, ICP-OES). Sedimenttien raekokojakauma analysoitiin seulomalla ja sedigraphilla. Laboratoriossa, näytteet punnittiin märkäpainon mukaan, kylmäkuivattiin, ja punnittiin uudestaan kuivapainon mukaan. Kaikki näytteet seulottiin <2 mm, jotta niistä voitiin poistaa 2 mm suuremmat kappaleet (kasvi- ja eläinjännökset, FeMn-saostumat). Näytteet käsiteltiin fluorivetyhapolla-perkloorihappoliuoksella. Alkuainepitoisuudet (mm. raskasmetallit) analysoitiin näytteen liuoksista käyttäen induktiivisesti kytkettyä plasma-massaspektrometriä (ICP-MS) ja induktiivisesti kytkettyä plasman-optista emissiospektroskopiaa (ICP-OES). Sedimenttinäytteiden hiili- ja typpipitoisuudet analysoitiin Leco CHN-600 -instrumentilla. Elohopea mitattiin HG-analysointilaitteella pyrolyyttisen uuttamisen avulla (US EPA Method 7473). Geokemialliset analyysit tehtiin Eurofins Labtium Oy:n laboratorioissa.

Merenpohjan geologinen/maalajitiedon tulkinta

Geologiset (maalaji) kartat tuotettiin akustis-seismisten luotustietojen ja sedimenttinäytteiden perusteella. Maalajikarttojen tulkinnassa hyödynnettiin myös syvyysmallia.

Sedimenttikaikuluotaimen ja seismisen luotaimen profiilitietueet käsiteltiin ja muunnettiin muotoon, joka soveltuu käytettyyn tulkintajärjestelmään. Viistokaikuluotaimen tuottamat tiedot muunnettiin georeferoiduiksi rasteritiedostoiksi, joista muokattiin merenpohjan pinnan akustista vastetta edustava mosaiikki.

Akustis-seismiset profiilit tulkittiin Meridata MDPS -ohjelmistolla. Profiilit tulkittiin kerrostumien akustisten ominaisuuksien perusteella (esim., huokoisuus, irtotiheys). Tulkinnassa digitointiin eri geologisten yksiköiden väliset rajat ja eroteltiin seuraavat geologiset yksiköt (maalajiluokat): kallioperä, moreeni, hiekka ja sora, sekasedimentti (glasiakvaattinen), siltinen/hiekkainen savi (rytmiittit, lustosavi), sulfidisavi, liejusavi, nykyisin kerrostuva lieju/liejusavi.

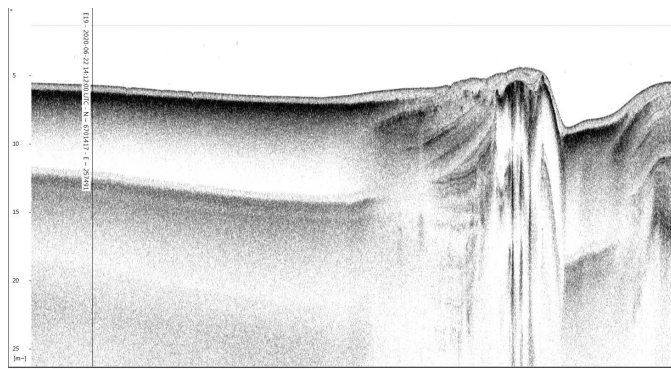
Tulkitut profiilit muutettiin ns. "maalajinauhoiksi", jotka edustavat merenpohjan maalajityyppiä, ja ne vietiin kartoitushjelmaan (Esri ArcGIS -ohjelmisto). Merenpohjan maalajien jakautuminen hahmoteltiin manuaalisesti maalajinauhoista ja sedimenttinäytteistä, viistokaikuluotaus ja/tai monikeilakaikuluotaus mosaikkien ja tarkan syvyystiedon avustuksella.

Merenpohjan maalajikartta kuvaa merenpohjan maalajia pääosin noin yhden metrin syvyyteen merenpohjan pinnasta.

Tulokset

Luotaukset ja näytteenotto

MAAMERI tutkimusmatkojen aikana (kesällä 2020 ja 2021) tutkimusalue Geomarilla kerättiin akustisseismistä merenpohjan luotausaineistoa (Kuva 6.2.) Saaristomereltä, yhdeksältä alueelta (Paimionlahti, Airisto, Mynälahti, Vuosnainen, Jurmo, Ängholm, Lappo, Porsskär, Väderskär), yhteensä 860 luotausinjakilometriä. Lisäksi kaikuluotausaineistoa kerättiin osasta näytepisteitä ja videokuvapaikoilta. Ajoituksia ja geokemiallisia tutkimuksia varten sedimenttinäytteitä kerättiin t/a Arandalla ja t/a Geomarilla 48 asemalta, 5.5–179 metrin veden syvyyksiltä, ja t/a Augustalla yhdeksältä asemalta.

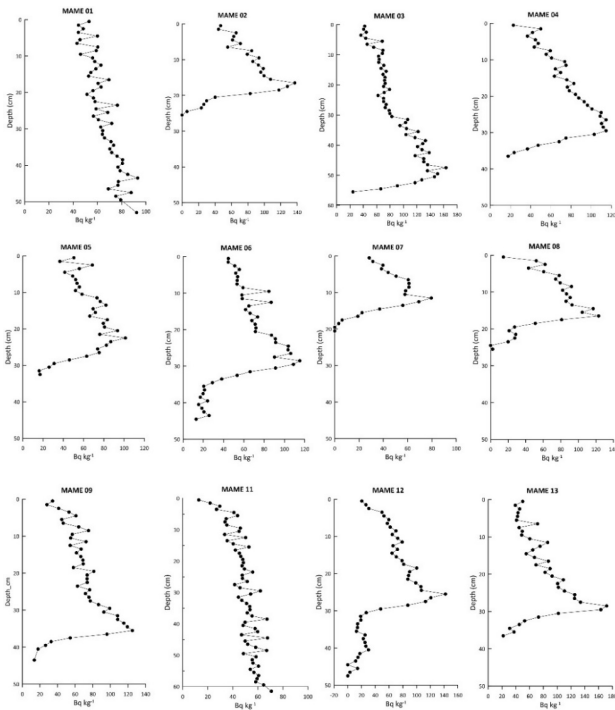


Kuva 6.2. Sedimenttikaikuluotainprofiili Paimionlahdelta

Ajoitukset ja sedimentaationopeus

Sedimentaationopeuksia tutkittiin yhteensä 48:lta t/a Arandalla ja t/a Geomarilla otetuilta asemilta Saaristomerellä, sekä lisäksi yhdeksältä t/a Augustan asemalta.

Useimmissa tutkituista paikoista (38 asemaa) sedimenttinäytesarjojen syvemmissä osissa ¹³⁷Cs-aktiivisuuspitoisuus lähestyi nollaa. Tyypillisesti ¹³⁷Cs profiilit osoittavat sedimenttisarjassa terävän tai suhteellisen jyrkän ylöspäin nousun (sedimentin pintaa kohti), joka muodostaa maksimi ¹³⁷Cs arvon (Kuva 6.3.). Arvot laskevat sitten vähitellen kohti sedimentin pintaa. Useimmat sedimenttinäytesarjat osoittivat selvästi nämä ¹³⁷Cs: n aktiivisuuspitoisuuden maksimit.



Kuva 6.3. ^{137}Cs aktiivisuuspitoisuus (Bq kg^{-1}) vs. syvyys (cm) valikoiduista sedimentinäytesarjoista Saaristomereltä.

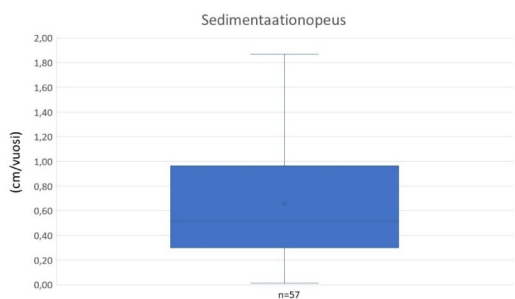
Viidessä sedimentinäytesarjassa ^{137}Cs :n aktiivisuuspitoisuus kasvoi näytteen alaosaan kohden (esim. MAME 01 ja MAME 11, kuva 6.3.). Luultavasti näissä tapauksissa ^{137}Cs maksimi sijaitsee syvemmällä merenpohjan kerrostumissa, eikä sitä tavoitettu tässä näytesarjassa.

Sedimenttiprofiilien ^{137}Cs -jakaumien muoto muistuttaa tyypillistä ^{137}Cs profiilia mitattuna häiriöttömistä Itämeren sedimenteistä ja osoittaa suhteellisen jatkuvaa viimeaikaista kerrostumista merenpohjalle. ^{137}Cs :n arvot lähestyvät nollaa useimmista asemista kerättyjen sedimentinäytesarjojen syvemmässä osissa. Tämä osoittaa, että sedimentinäytesarjassa on nuorempia/viimeaikaisia sedimenttejä sekä vanhempia sedimenttejä, jotka ovat kerrostuneet ennen ydinaseiden testausta (eli ennen atomipommin aikaa, eli ennen vuotta 1945 AD). Suhteellisen jyrkkä, alhaalta ylöspäin kohoava trendi sedimenttiprofiilissa kohti ^{137}Cs -maksimia osoittaa nopeaa, erillistä tapahtumaa, ja edustaa luultavimmin Tšernobylin laskeumaa 1986.

^{137}Cs maksimin syvyydet sedimentinäytesarjoissa osoittavat suhteellisen korkeita sedimentaationopeuksia. Tšernobylin (vuoden 1986) jälkeinen lineaarinen sedimentaationopeus

vaihteli tutkituilla asemilla välillä 0.01–1.87 cm/vuosi, keskimääräinen arvo 0.66 cm/vuosi (Kuva 6.4.).

Suurimpia sedimentaationopeuksia, yli 1 cm/vuosi, tavattiin tyypillisimmin Paimionjoen ja Mynäjoen/Laajoen jokisuistoissa sekä Airistolla. Paikoin myös ulkosaaristossa kuten Kökarin syvänteessä sekä Ahvenanmeren reuna-alueilla sedimentaationopeudet ylittivät 1 cm/vuosi.



Kuva 6.4. Sedimentaationopeudet (cm/vuosi) Saaristomeren 57:llä MAAMERI asemalla. Sedimenttinäytesarjojen lukumäärä on 57.

Sedimentaationopeustietoa hyödynnetään mm. rannikkomallin sisäisen P-kuormituksen syötteen arvon laatimisessa. Ennen MAAMERI projektia tiedot sedimentaationopeuksista Saaristomeren alueella olivat suhteellisen vähäisiä. MAAMERI projektin myötä tietämystä ja tietoa kerrostumisnopeuksista on kartutettu huomattavasti.

Sedimentaationopeus tiedot tallennetaan EMODnet Geology portaaliin (<https://www.emodnet-geology.eu/data-products/>), josta ne ovat vapaasti saatavilla.

Merenpohjan maalajijainestot

Merenpohjan maalajikarttoja tuotettiin yhdeksältä (Paimionlahti, Airisto, Mynälahti, Vuosnainen, Jurmo, Ängholm, Lappo, Porsskär, Väderskär) alueelta. Nämä kartat on tuotettu ~1:20 000 mittakaavassa, mutta kartat on mahdollista julkaista lupa-asioiden vuoksi epätarkemmassa mittakaavassa 1:100 000 (Puolustusvoimat/Pääesikunta; lupapäätös AP10925, 4273/15.05.00/2018, 14.6.2019).

Maalajijainesteissa erotettiin kallioperän yläpuolella seitsemän sedimenttiyksikköä; (1) moreeni, (2) hiekka ja sora, (3) glasiakvaattinen sekasedimentti, (4) glasiaalinen savi ja siltti, eli lustosavi, (5) sulfidisavet, (6) murtovesivaiheen liejusavi, ja (7) resentti, eli nykyisin kerrostuva, orgaanisaines pitoinen liejusavi/savilieju.



Merenpohjan maalajaineisto osoittaa Saaristomeren merenpohjan rikkonaisuuden, joka on todettu monessa aikaisemmassakin tutkimuksessa (esim. Kaskela ja Kotilainen, 2017). Aineksen eroosio, kuljetus ja kerrostuminen merenpohjalla vaihtelevat niin ajassa kuin paikassakin. Merenpohjan laatu ja muut ympäristötekijät voivat vaihdella hyvinkin pienellä matkalla. Maalajaineistoissa näkyy selkeästi nykyiset kerrostumisalueet, joissa pehmeät lieju-/liejusavipohjat peittävät ison osan merenpohjasta. Näitä kerrostumisohjia on erityisesti jokisuistoissa, kuten Paimionlahdella sekä Mynäjoen/Laajoen jokisuistoissa, sekä sisäsaariston suojaisilla alueilla. Tarkasteltaessa merenpohjan pintamaalajien koostumusta koko Saaristomeren pohjista hieman alle 20 % on pehmeitä liejupohjia. Kovia pohjia, kuten kalliota, moreenia sekä hiekkaa ja soraa esiintyy tai on paljastuneina merenpohjan pinnalla pääasiassa 60 metriä matalammilla alueilla. Hyvin matalilla, avoimilla alueilla, alle 10 metrissä, ne käsittävät yli 50 % merenpohjasta. Yli 60 metriä syvemmällä alueilla merenpohjan pintamaalajina on pääasiassa pehmeitä maalajeja (Kaskela & Rinne, 2018). MAAMERI tutkimusalueilla, ulkosaaristossa kuten Väderskärin ja Porsskärin alueella, kalliopaljastumat peittävät suuren osan merenpohjasta. Eroosio/kulutus -pohjia esiintyy myös Saaristomerta halkovien kanjonien pohjilla, kuten Jurmo-Kihti kanjonissa. Näillä alueilla onkin mitattu hyvin suuria virtausnopeuksia (yli 100 cm/s). Merenpohjan pinta koostuukin tässä syvänteessä pääosin kovista savipohjista ja kalliosta. Saaristomeren pohjista on noin viidesosan alueella paljastuneena kova savi, joka on jääkauden aikana, mannerjään edustalle, jäärjärven pohjalle kerrostunutta lasiaalisavea. Kun tällainen vanha savi on paljastuneena merenpohjalla, on sen pinnalla tyypillisesti hiekkaa.

MAAMERI projektissa tuotettua uutta tarkkaa maalajitietoa on jo hyödynnetty MAAMERI projektissa mm. maalajimallinnuksen taustatietona. Maalajitietoa on hyödynnetty myös sedimenttinäytepaikkojen valinnassa. Suomen merialueiden pinta-alasta on kartoitettu geologisesti vasta vajaa viidennes aluesuunnittelun tarpeisiin riittävällä tarkkuudella. Ennen MAAMERI projektia tiedot merenpohjan koostumuksesta olivat vähäisiä myös Saaristomeren alueella, erityisesti sen pohjois- ja länsiosissa. MAAMERI projektin myötä tietämystä/tietoa merenpohjan maalajeista on kartutettu näiltä uusilta "valkoisilta" alueilta, erilaisista sedimentaatioympäristöistä. Merenpohjan geologinen tieto on olennainen osa merenhoidon ja merialueiden kestäväen käytön suunnittelua.

Merenpohjan maalajikartat/-tiedot tallennetaan GTK:n Hakku portaaliin (<https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>) sekä EMODnet Geology portaaliin (<https://www.emodnet-geology.eu/data-products/>), joista ne ovat vapaasti saatavilla.

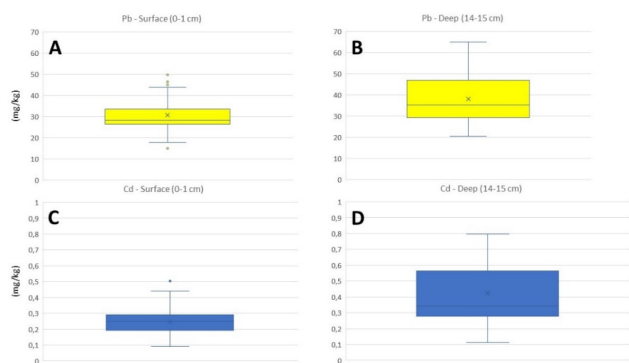
Sedimenttien geokemia

Sedimenttitutkimuksissa selvitettiin fosforin, typen, hiilen ja mm. raskasmetallien pitoisuuksia Saaristomeren pohjakerrostumissa. 48 sedimenttinäytesarjasta tutkittiin syvyydet 0–1 cm ja 1–2 cm, sekä valituista näytesarjoista syvyydet 14–15 cm (30 kpl) ja syvemmältä (11 kpl). Lisäksi neljältä asemalta tutkittiin koko näytesarja (n. 50 cm).

Esitämme tässä raportissa kadmiumin (Cd) ja lyijyn (Pb) pitoisuudet sedimenttinäytesarjojen pintakerroksessa (0–1 cm) ja syvämmässä kerroksessa (14–15 cm) (Kuva X5). Mynälähdän sedimenttinäytesarjan MAME 13 (MGGN-2020-9) lyijy- (Pb), sinkki- (Zn) ja kadmium- (Cd) pitoisuusprofiilit on esitetty kuvassa 6.6.

Sekä Cd- että Pb- pitoisuudet ovat sedimentin pintakerroksessa pienempiä kuin syvemmillä sedimentissä (Kuva 6.5.). Pintakerroksen Pb -pitoisuus vaihtelee välillä 15.1–49.8 mg/kg. Pb-pitoisuudet ylittävät Swedish Sediment Quality Criteria:n (SQC) luokan 2 (*Slight Contamination*) arvot asemilla MAME 19, MAME 30, MAME 32, MAME 34, MAME 43, MAME 47, MAME 48, MAME 61, MAME 64, MAME 67, MAME 68, MAME 69, MAME 70 ja MAME 74. SQC luokan 3 (*Significant Contamination*) arvot ylittyvät kahdella asemalla (MAME 29 ja MAME 49). Syvemmillä sedimenttinäytesarjassa (14–15 cm) Pb -pitoisuus vaihtelee välillä 20.5–65 mg/kg, ja pitoisuudet ylittävät SQC luokan 2 (*Slight Contamination*) arvot 12 asemalla. SQC luokan 3 (*Significant Contamination*) Pb-arvot ylittyvät kahdeksalla asemalla (MAME 30, MAME 60, MAME 61, MAME 65, MAME 66, MAME 68, MAME 69 ja MAME 75).

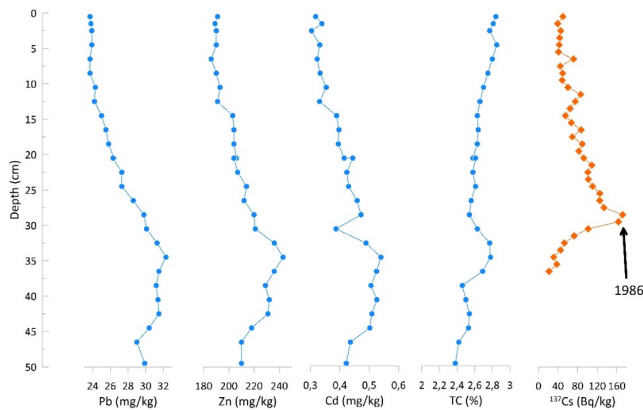
Pintakerroksen Cd -pitoisuus vaihtelee välillä 0.091–0.503 mg/kg. Cd-pitoisuudet ylittävät SQC luokan 2 (*Slight Contamination*) arvot asemilla MAME 04, MAME 05, MAME 06, MAME 07, MAME 14, MAME 15, MAME 16, MAME 17, MAME 18, MAME 19, MAME 29, MAME 30, MAME 32, MAME 34, MAME 43, MAME 49, MAME 60, MAME 61, MAME 64, MAME 65, MAME 66, MAME 67, MAME 68, MAME 70, MAME 72, MAME 74, MAME 75, MAME 77, MAME 78, MAME 79 ja Kökar. SQC luokan 3 (*Significant Contamination*) Cd-arvot ylittyvät asemalla MAME 69. Syvemmillä sedimenttinäytesarjassa (14–15 cm) Cd -pitoisuus vaihtelee välillä 0.113–0.795 mg/kg, ja pitoisuudet ylittävät SQC luokan 2 (*Slight Contamination*) arvot 17 asemalla. SQC luokan 3 (*Significant Contamination*) Cd-arvot ylittyvät 12 asemalla (MAME 30, MAME 16, MAME 19, MAME 60, MAME 64, MAME 65, MAME 66, MAME 67, MAME 68, MAME 69, MAME 72 ja MAME 75).



Kuva 6.5. Lyijyn (Pb) ja kadmiumin pitoisuudet (mg/kg) Saaristomeren pintasedimenteissä (0–1 cm) (A ja C), sekä syvemmillä sedimenttisarjassa (n. 14–15 cm) (B ja D).

Mynälahden sedimenttinäytesarjan MAME 13 (MGGN-2020-9) lyijy- (Pb), sinkki- (Zn) ja kadmium- (Cd) pitoisuudet osoittavat suhteellisen samanlaista kehitystä (Kuva 6.6.). Pitoisuudet nousevat sedimenttinäytteen alaosasta kohti maksimiarvoja, jotka ovat noin 34–35 cm:n syvyydellä. Maksimiarvojen yläpuolella pitoisuudet pienenevät kohti sedimenttisarjan pintaa (nykypäivää).

Samankaltainen pintaa kohti laskeva trendi nähdään lähes jokaisella tutkitulla asemalla, verrattaessa pintanäytteiden ja syvemmältä sedimenttisarjasta otettujen näytteiden pitoisuuksia. Näytesarjan ¹³⁷Cs-aktiivisuuspitoisuudet viittaavat siihen, että MAME 13 sedimenttinäytesarjan Pb-, Zn-, ja Cd-maksimipitoisuudet edustavat 1970-luvulla tapahtunutta raskasmetalli kuormitusta. Zn-pitoisuudet ylittävät sedimenttisarjassa SQC luokan 3 (*Significant Contamination*) arvon koko näytesarjan matkalla, ja näytesarjan alaosan Zn-pitoisuudet, syvyyksillä 14 – 51 cm, ylittävät jopa SQC luokan 4 (*Large Contamination*) arvon (>195 mg/kg).



Kuva 6.6. Lyijyn (Pb), sinkin (Zn), ja kadmiumin (Cd) pitoisuudet (mg/kg), sekä kokonaishiilen määrä (TC, %) ja ¹³⁷Cs aktiivisuuspitoisuus (Bq/kg) MAME 13 (MGGN-2020-9) sedimenttinäytesarjassa Mynälahden alueelta. ¹³⁷Cs profiiliin on myös merkitty vuoden 1986 Tsernobylin ydinvoimalaonnettomuudesta johtunut radioaktiivinen laskeuma, ja sen aiheuttama ”piikki” ¹³⁷Cs profiilissa.

MAAMERI projekti tuotti uutta tietoa ja ymmärrystä Saaristomeren merenpohjan kerrostumista ja niiden koostumuksesta, mm. hiilen, typen ja fosforin sekä haitallisten aineiden esim. raskasmetallien pitoisuuksista sedimenteissä.

Haitallisten aineiden, kuten raskasmetallien, kohonnut pitoisuus näkyy merenpohjan sedimenteissä Saaristomerelläkin. Haitallisten aineiden kuten raskasmetallien pitoisuudet merenpohjan pintakerrostumissa ovat yleensä laskeneet viime vuosikymmeninä. Useilla alueilla, kuitenkin, merenpohjan pinnan alla, syvemmällä kerrostumissa on esimerkiksi kadmiumin, lyijyn ja sinkin pitoisuudet edelleen suhteellisen suuria.

Tiedot merenpohjan sedimenttien sisältämistä haitallisista aineista ovat välttämättömiä, kun arvioidaan merialueiden käyttöön ja rakentamiseen liittyviä riskejä. Merenpohjan rakentaminen, kuten ruoppaus alueilla, joilla sedimentit sisältävät suuria pitoisuuksia haitallisia aineita, voivat vapauttaa nämä epäpuhtaudet uudelleen liikkeelle.



MAAMERI projektissa tuotettua kokonaisfosfori-, -typpi, ja hiili aineistoja tullaan hyödyntämään mm. rannikomallin sisäisen P-kuormituksen syötearvion laatimisessa. Aineistot ovat vapaasti saatavilla PANGAEA-tietokannassa, aineistoista tehtävän julkaisun valmistuttua

Viitteet:

- Ilus, E., 2007. The Chernobyl accident and the Baltic Sea. *Boreal Env. Res.*, 12, 1–10.
- Kankaanpää, H., Vallius, H., Sandman, O., Niemistö, L., 1997. Determination of recent sedimentation in the Gulf of Finland using ¹³⁷Cs. *Oceanologica Acta*, 20, 823–836.
- Kaskela, A.M., Kotilainen, A.T., 2017. Seabed geodiversity in a glaciated shelf area, the Baltic Sea. *Geomorphology* 295, 419–435.
- Kaskela, A., Rinne, H., 2018. Vedenalaisten Natura-luontotyyppien mallinnus Suomen merialueella. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimustyöraportti 6/2018, 36 sivua, 14 kuvaa, 12 taulukkoa ja 1 liite.
- Kotilainen, A.T., Kotilainen, M.M., Vartti, V.-P., Hutri, K.-L., Virtasalo, J.J., 2021. Chernobyl still with us: ¹³⁷Caesium activity contents in seabed sediments from the Gulf of Bothnia, northern Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*. 172. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112924>
- Mattila, J., Kankaanpää, H., Ilus, E., 2006. Estimation of recent sediment accumulation rates in the Baltic Sea using artificial radionuclides ¹³⁷Cs and ^{239,240}Pu as time markers. *Boreal Environment Research* 11, 95–107.
- Moros, M., Andersen, T. J., Schulz-Bull, D., Häusler, K., Bunke, D., Snowball, I., Kotilainen, A., Zillen, L., Jensen, J. B., Kabel, K., Hand, I., Leipe, T., Loughheed, B. C., Wagner, B., Arz, H. W., 2017. Towards an event stratigraphy for Baltic Sea sediments deposited since AD 1900: approaches and challenges. *Boreas*, Vol. 46, pp. 129–142. [10.1111/bor.12193](https://doi.org/10.1111/bor.12193). ISSN 0300-9483
- Zaborska, A., Winogradow, A., Pempkowiak, J., 2014. Caesium-137 distribution, inventories and accumulation history in the Baltic Sea sediments. *Journal of Environmental Radioactivity* 127, 11–25.

6.1.2. Maalajimallin kehittäminen (Anu Kaskela, Maarit Middleton, Aarno Kotilainen, GTK)

Johdanto

Tehtävässä tarkennettiin tietoa merenpohjan maalajeista ja niiden esiintymisestä Saaristomeren alueella mallintamalla. Tavoitteena oli tuottaa koko tutkimusalueen kattavaa lisätietoa erityisesti hienoaineista sisältävien sedimenttien esiintymisestä, jota voisi hyödyntää rannikomallin sisäisen P-kuormituksen syöteen arvioinnissa tarvittavien potentiaalisesti mobiilien fosforin esiintymismuotojen alueellisen jakauman arvioinnissa. Aiemmin koko alueen kattavia maalajiaineistoja on ollut saatavilla vain karkeassa mittakaavassa (1:1 000 000) (esim. Kaskela et al., 2019), joissa pienpiirteiset, matalilla rannikonläheisillä alueilla olevat sedimentaatioalueet eivät erotu. Lisäksi näissä käytetty maalajiluokitus ei ole täysin tarkoitukseen sopiva. Tarkempia 1:20 000/1:100 000 merigeologiaa aineistoja on saatavilla vain rajatuilta alueilta.

Kuvaus hankkeen aikana tehdystä työstä ja tulokset

Maalajimalliin liittyvät analyysit on tehty ArcGIS -ympäristössä (ArcMap ja ArcGIS Pro) ellei toisin todeta. Koordinaatisto oli Euref FIN TM35N.

Aineistot- selitettävä muuttuja

Merenpohjan maalajimallia kehitettiin FICOS-mallin alueelle Saaristomerellä (Kuva 6.7). Mallinnettavat maalajiluokat määritettiin yhteistyössä Maameri -hankkeen geologien ja sedimenttigeokemian asiantuntijoiden kesken. Asiantuntijakeskustelujen perusteella päätettiin mallintaa kolme maalajiluokkaa, joiden oletetaan edustavan erilaisia P-pitoisuuksia:

- Orgaanisainespitoiset maalajit (org. aines oletettavasti yli > 2 %; GTK, 2005), sisältävät erilaiset liejut ja liejusavet sekä merigeologisten karttojen luokat resentistä liejusavesta Litorina sedimenttiin. Näissä on suurin fosfori -pitoisuus.
- Vanhemmat savet, sisältävät vähemmän orgaanista aineista (org. aines oletettavasti < 2 %; GTK, 2005) ollen erilaisia savia. Nämä käsittävät merigeologisten karttojen luokat sulfidi- ja glasiaalisavi. Näissä on vähän fosforia.
- Kitkamaalajit sisältävät maalajit hiekasta kalliioon. Myös merigeologisten karttojen sekasedimentti on luokiteltu kitkamaalajiksi. Tässä luokassa on hyvin vähän tai ei ollenkaan fosforia.

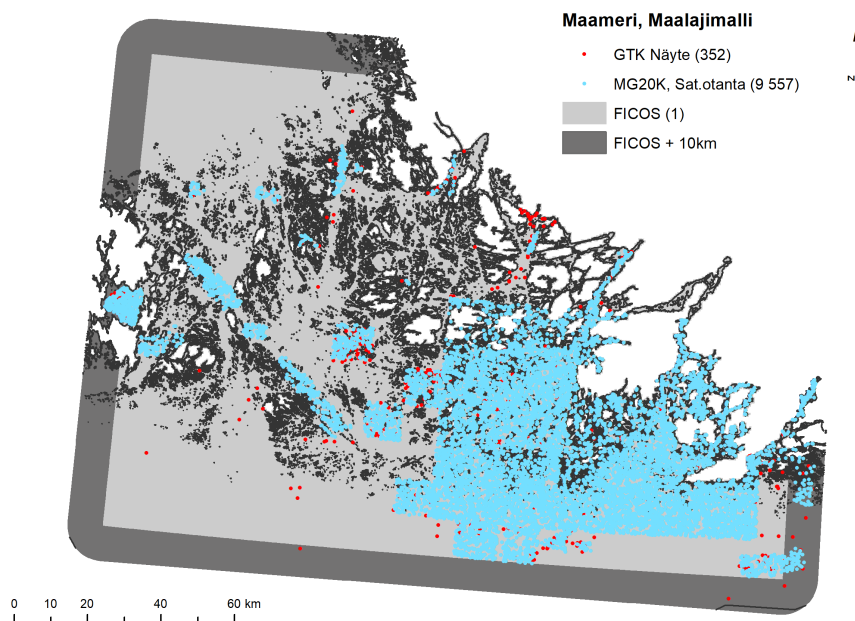
Tutkimusalueelle osuvat GTK:n merigeologiset näytteet käytiin läpi ja luokiteltiin yo. luokkiin. Tarkastelussa otettiin huomioon kaikki näyteaineisto, jossa on hyödynnetty DGPS paikannusta. Mallinnuksen autokorrelaation minimoimiseksi määritimme, että näytteiden välisen etäisyyden tulisi olla vähintään 200 m. Lopputuloksena meillä oli yht. 352 näytettä tutkimusalueelta. Näyteaineisto on vinoutunut pehmeille pohjille (taulu 1). Vinoumaa selittää se, että aineisto on koottu tarvelähtöisesti ja usein on haettu edustavaa (sedimentaatio)pohjaa tiettyä tutkimuskysymystä varten. Lisäksi kovilta pohjilta on hankalampi ottaa näyteitä kuin pehmeiltä.

Maalajiaineiston kattavuuden parantamiseksi täydensimme aineistoa merigeologisen 1:20 000 kartta-aineiston (MG20k aineisto) perusteella. MG20k aineisto luokiteltiin yo. tavoiteluokkiin. Maalajitulkin on usein epävarmempi maalajien vaihtumiskohdilla ja määritimme 50 m puskurin polygonien rajoille. Jäljelle jääneelle alueelle arvoimme satunnaisesti n. 3500 pistettä per maalajiluokka 200 m etäisyydellä. Yhdistimme nämä edellä kuvattuun GTK:n näyteaineistoon ja lopputuloksena meillä oli n. 10 000 näytettä suhteellisen tasaisesti jakautuneena kolmelle maalajityypille (Taulu 1, kuva 6.7.). Molemmassa aineistoissa, varsinaisissa näytepisteissä sekä MG20k perusteella arvotuissa pisteissä, on huomioitu Maameri-projektissa tuotetut merigeologiset aineistot (v. 2021).

Taulukko 1. Näytehavainnot maalajiluokittain. GTK:n varsinainen näyteaineisto ja merigeologisesta 1:20 000 aineistosta (MG 20k) tuotettu näyteaineisto on erotettu vasemmanpuoleisessa sarakkeessa. Aineistosta on poistettu havainnot, joissa selittävällä muuttujalla ei ollut arvoa.

	Kitkamaalajit		Vanhemmat savet		Orgaanisaines-pitoiset savet		Yht.	
	kpl	%	kpl	%	kpl	%	kpl	%
Varsinaiset näytteet	38	11 %	125	36 %	189	54 %	352	4 %

MG20k satunnaisotanta	2952	31 %	3376	35 %	3229	34 %	9557	96 %
Yhteensä	2990	30 %	3501	35 %	3418	34 %	9909	



Kuva 6.7. Maalajimallinnuksessa käytetyt havaintopisteet FICOS-mallin laskenta-alueella Saaristomerellä. Rantaviiva10 -aineisto/ Lähde: SYKE, MML.

Aineistot – Selittävät muuttujat

Maalajien esiintymistä tarkasteltiin suhteessa merenpohjan ympäristöä ja sen dynamiikkaa kuvaaviin muuttujiin (Taulukko 2). Kaikki aineistot olivat rasterimuodossa 25 m pikselikoossa, ja pikselit on täsmätty keskenään. Kaikki muuttujat on skaalattu välille 0–100. Sedimenttihakainnoille poimittiin ympäristömuuttujien arvot. Mallinnukseen on otettu mukaan vain ne selittävät muuttujat, joissa sedimenttipisteille poimittujen muuttujien arvojen vaihteluväli oli vähintään 40 % koko alueen vaihtelusta.

Taulukko 2. Maalajimallinnuksessa käytetyt selittävät muuttujat. Osa muuttujista on saatu valmiina, osa on tehty projektissa. Projektissa tehdyt laskennat on suoritettu ArcGIS -ympäristössä, ellei toisin mainita.

Selittävä muuttuja	Selitys	Aineistoviite tai metodi
Syvyys	Syvyys (m)	Tolvanen, H., 2010; Rinne et al., 2014

	Kaltevuus (°)	Merenpohjan kaltevuus	Slope-työkalu, syvyys
	Aspekti (°)	Kaltevuuden suunta	Aspect-työkalu, syvyys
	Bathymetric Position Index (BPI)	Tuottaa arvion pikselin topografisesta sijainnista suhteessa sen naapureihin (ylempänä, alempana, sama taso). Laskettu säteillä: 250 m, 500 m, 1 km, 2,5 km, 5 km, 10 km	Benthic terrain modeler - työkalu, (Walbridge et al., 2018), syvyys
	Pohjanmuodot (Structures), luokiteltu	BPI500m ja BPI5km luokiteltuna painaumiin (<-50), tasaisiin (-50<x<50) ja kohoumiin (> 50) ja yhdistettynä 9 pohjanmuotoluokkaan.	Benthic terrain modeler - työkalu, (Walbridge et al., 2018), syvyys, kts. esim. Kaskela & Kotilainen, Submitted
	Roughness (°)	Syvyyden keskijajonta, laskettu säteillä: 250 m, 500 m, 1 km, 2,5 km, 5 km	Standard deviation-työkalu, syvyys
Hydrologiset muuttujat	Flow direction (°)	Kertoo missä suunnassa pikseliä alempana oleva naapuripikseli on (virtaussuunta).	Hydrologia työkalut, syvyys
	Basin/Allas, luokiteltu	Hydrologia -työkaluilla määritetyt laskennalliset vedenalaiset valuma-alueet.	Hydrologia työkalut, syvyys
	Akkumulaatio, luokiteltu	Hydrologia -työkaluilla määritetty teoreettinen virtausakkumulaatio kuhunkin pikseliin.	Hydrologia työkalut, syvyys
	Etäisyys uomaan (m)	Etäisyys lähimpään uomaan. Uomat on laskettu Hydrologia- työkaluilla hyödyntäen "stream/river network:ia", jossa stream order >=4.	Hydrologia työkalut, syvyys& Euclidean distance - työkalu
	Suunta uomaan (°)	Suunta lähimpään uomaan. Uomat on laskettu Hydrologia- työkaluilla hyödyntäen "stream/river network:ia", jossa stream order >=4.	Hydrologia työkalut, syvyys & Euclidean direction - työkalu
Rantamuuttujat	Etäisyys jokeen (m)	Etäisyys lähimpään jokeen.	Euclidean distance -työkalu, jokiaineisto (Vesipuiderektiivin mukaiset vesimuodostumat, lähde: SYKE, ELY-keskukset)
	Etäisyys rantaan (m)	Etäisyys lähimpään rantaan	Euclidean distance - työkalu, rantaviiva10 (Lähde: SYKE, MML)
	Rannan tiheys	Rantaviivan tiheys laskettuna 2 km ja 5 m säteellä	Line Density -työkalu, rantaviiva10 (Lähde: SYKE, MML)

	Saaristoisuus (%)	Meri/maa suhde 2 km, 5 km, 10 km säteellä	Rantaviiva10 (Lähde: SYKE, MML)
VELMU-muuttujat	Topografinen suojaisuus indeksi	Huomioi aallonsuunnat ja saarten suojaisuusvaikutuksen	Virtanen et al., 2019
	Syvyyden huomioiva avoimuus indeksi, jatkuva	Fetch + ka tuulen nopeus + syvyys	Virtanen et al., 2018
	Syvyyden huomioiva avoimuus indeksi, luokiteltu	Fetch + ka tuulen nopeus + syvyys luokiteltuna	Virtanen et al., 2018
	Terrain Ruggedness	Kuvaa merenpohjan topografista vaihtelua, vector ruggedness (VRM).	Virtanen et al., 2019
	Turbiditeetti (FNU)	Turbiditeetti perustuu Sentinel kuviin v 2016–2020 , joista on laskettu keskiarvot ja aineisto on ulotettu jatkamaan rannikolle.	Virtanen et al., accepted
	Happimalli (%)	Neljä muuttujaa (FH2, FH46, OH2, OH46), jotka kertovat alueiden hapettomuusalttiudesta. Tässä kuvastaa alueiden sulkeutuneisuutta ja veden vaihtuvuutta.	Virtanen et al., 2019

Mallinnus

Mallinnus tehtiin ArcGIS Pro:n Forest-based Classification and Regression -työkalulla. Random Forest -menetelmä hyödyntää ns. bagging -menetelmää ja satunnaista muuttujien valintaa. Malli tekee useita päätöspuita (trees), joihin on valittu satunnaisesti x:stä muuttujasta n muuttujaa ($x > n$). Päätöspuut voivat olla keskenään erilaisia tuottaen erilaisia luokitteluja. Lopputuloksena saadaan paitsi malli enemmistöpäätöksellä, myös mallin tarkkuusarvio (OOB) ja lista merkitsevistä muuttujista. Random Forest:n etuja on, että siihen ei liity muuttujien normaalijakaumaoletusta eikä muuttujien keskinäinen korrelaatio ole teoreettinen ongelma.

Maalajimalli on tässä määritetty 1000 puun perusteella ja kuusi muuttujaa on otettu kuhunkin puuhun mukaan (työkalun oletusarvo). Mallinnuksessa 80 % näytehavainnoista on käytetty mallintamiseen ja 20 % validointiin.

Lopuksi yhdistimme saadun mallin GTK MG20k aineistoon ja laskimme tämän maalajiaineiston perusteella ym. kolmen maalajiluokan peittävyudet (%) suhteessa merenpohjaan (FICOS-mallin alueella).

Tulokset ja niiden tarkastelu

Maameri maalajimalli osoittaa, että Saaristomeren merenpohja on hyvin mosaikkimainen. Mallin mukaan tutkimusalueella on eniten kitkamaalajipohjia (40 %), toiseksi eniten on

orgaanisainespitoisia maalajeja (35 %) ja vähiten vanhempia savia (25 %). Kitkamaalajeihin kuuluvat erilaiset riutat, moreenit ja hiekkamuodostumat, joita tiedetään Saaristomerellä olevan runsaasti (esim. Kaskela & Rinne, 2018). Mallin perusteella kitkamaalajeja on etenkin ulkosaariston matalikoilla ja siirryttäessä Saaristomereltä kohti Selkämeriä. Orgaanisainespitoisia savia on erityisesti sisäsaaristossa saarten ja kallioriuottojen välisissä altaissa sekä ulkomeren syvissä altaissa. Vanhemmat savet esiintyvät usein kitkamaalajien tai saarten yhteydessä, esiintyen niiden reunoilla tai välissä. Malli on tarkentunut aiemmasta koko tutkimusalueen kattavasta 1 M merenpohjan maalajimallista huomattavasti erityisesti sisämerellä. Maalajimallia on työstetty eteenpäin 25 m pikselikoolla, joka aiemman kokemuksen (esim. EMODnet harmonisointi) perusteella vastaa noin 1:100 000 mittakaavaa. On huomattava, että todellinen spatiaalinen mittakaava riippuu kuitenkin myös taustamuuttujien tarkkuudesta. Mallien epätarkkuus korostuu erityisesti ulkomerialueella, josta on vähemmän tarkkaa aineistoa saatavilla.

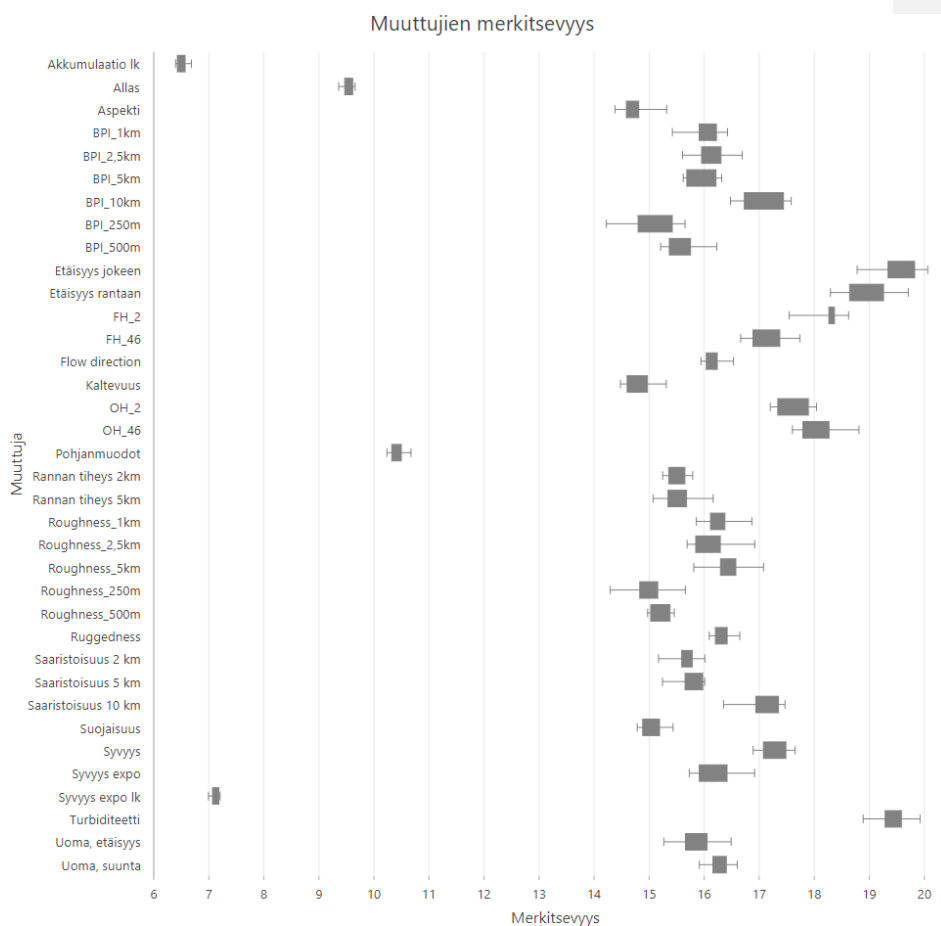
Random Forest poimii satunnaisesti ennalta sovitun määrän havaintoja ja muuttujia yhteen puuhun. Tällöin ulkopuolelle jää joukko havaintoja, joita ei käytetä puun tekemiseen. Ulkopuolelle jäävien havaintojen perusteella voidaan laskea ns. "Out of Bag" -virhe (OOB) (ennustevirhe), joka kertoo puiden perusteella virheellisesti ennustettujen havaintojen prosenttiosuuden jokaiselle luokalle erikseen sekä arvion ennustevirheestä koko mallille (Means squared error, MSE). Koko mallin MSE on 30 %. Sekä kitkamaalajien että orgaanisainespitoisten savien kohdalla ennustevirhe on alle 30 %, vanhoissa savissa ennustevirhe on yli 40 % (Taulu 3).

Maalajimalli validoitiin 20 % havainnoista (Taulu 3). Kokonaistarkkuus (*engl. Overall accuracy*) kertoo, kuinka usein havainnot luokitteivat oikein. Parhaiten malli ennustaa kitkamaalajeja sekä orgaanisainespitoisia savia (> 80 %). Tässä, kuten OOB-arviossa, vanhat savet luokitteivat huonoiten, mutta silti yli 70 % näistäkin havainnoista luokitteui oikein. Herkkyys (*engl. sensitivity*) kuvastaa, kuinka usein tietty maalaji luokitteui oikein. Kitkamaalajit ja orgaanisainespitoiset savet luokitteivat yli 75 % oikein. Vanhat savet luokitteivat enemmän myös muihin maalajiluokkiin (herkkyys < 60 %).

Taulu 3. Maalajimallin luotettavuutta ja tarkkuuta kuvaavia vertailulukuja. Validointiin jätettiin 20 % näytteistä. Näistä laskettiin tarkkuus (kuinka moni havainnoista luokitteui oikein) ja herkkyys (kuinka hyvin maalajit luokitteivat).

	OOB	Tarkkuus	Herkkyys
1. Kitkamaalajit	24 %	85 %	76 %
2. Vanhemmat savet	44 %	73 %	56 %
3. Orgaanisainespitoiset savet	21 %	82 %	80 %

Random forest -työkalu tuottaa myös listauksen merkitsevistä muuttujista (Kuva 6.8.). Analyysin perusteella turbiditeetti, etäisyydet jokeen ja rantaan nousevat merkitsevimmiksi muuttujiksi. Myös happimallin muuttujat ovat tärkeitä. Näiden ajatellaan tässä kuvaavan virtausolosuhteita ja veden vaihtuvuutta. Myös pohjan rikkonaisuutta ja pienpiirteisyyttä kuvastavat muuttujat ovat merkitsevimpien joukossa (esim. BPI, roughness).



Kuva 6.8. Box plot kuvaaja selittävien muuttujien merkitsevyydestä suhteessa maalajimalliin. Pylväät perustuvat 10 validointilaskennan tuloksiin.

Jatkossa tarvittaisiin tarkempaa aineistoa (erityisesti syvyys) ulkomerialueilta. Lisäksi osa potentiaalisiksi selittäviksi muuttujiksi arvioiduista aineistoista olivat liian karkeita tai eivät kattaneet koko aluetta (erityisesti rannan läheiset alueet) ja rajautuivat sen takia pois tarkasteluista. Maalajihavainnot ovat suuntautuneet pehmeille pohjille ja niiden tarkastelu perustui visuaaliseen havaintoon, sillä tarkkoja raekokomäärityksiä on vain osasta näytteitä. Maalajimallin validoinnin perusteella vanhempia savia on ollut kahta muuta maalajiluokkaa vaikeampi mallintaa, tämä voi johtua esim. luokan hankalasta määrittävyydestä tai riittämättömistä taustamuuttujista. Kannustamme monipuolisempaan näytteenottoon ja pohjamaalajihavainnointiin, jotta aineisto olisi soveltuvampaa myös tilastoanalyysiin.

6.1.3. Sedimentaationopeus mallinnus Saaristomerellä (Anu Kaskela, Aarno Kotilainen, GTK)

Johdanto

Tavoitteena oli tarkastella sedimentaationopeuksia Saaristomerellä ja kehittää mallintamalla niiden yleistettävyyttä koko alueelle. Tuloksena olevia keskiarvoisia sedimentaationopeuksia tullaan hyödyntämään mm. rannikomallin sisäisen P-kuormituksen syötearvion laatimisessa. Hankesuunnitelman mukaan tiedot sedimentaationopeuksista olisivat perustuneet vain sedimenttinäytteistä mitattuihin arvoihin. Tutkimuksen aikana kuitenkin huomattiin sedimentaationopeuksien erittäin suuri spatiaalinen vaihtelu, jolloin päätettiin tuottaa projektissa myös sedimentaationopeusmalli, joka kattaisi koko MAAMERI tutkimusalueen. Tuloksia on mahdollista hyödyntää myös muissa laskelmissa. Analyysit on tehty ArcGIS -ympäristössä (ArcMap ja ArcGIS Pro) ellei toisin todeta. Koordinaatisto oli Euref FIN TM35N.

Kuvaus hankkeen aikana tehdystä työstä ja tulokset

Aineistot - Selitettävä muuttuja

Sedimentaationopeuksia tarkasteltiin FICOS-mallin kattamalla alueella Saaristomerellä (Kuva 6.9.). Tässä mallinnustyössä käytettiin tutkimusalueelta olemassa olevista sedimentaationopeus tuloksista yht. 46 havaintoa. Havaintojen sedimentaationopeuksien vaihteluväli oli 0.01–1.87 cm/v, keskiarvon ollessa 0.68 cm/v ja mediaanin 0.5 cm/v.

Aineistot - Selittävät muuttujat

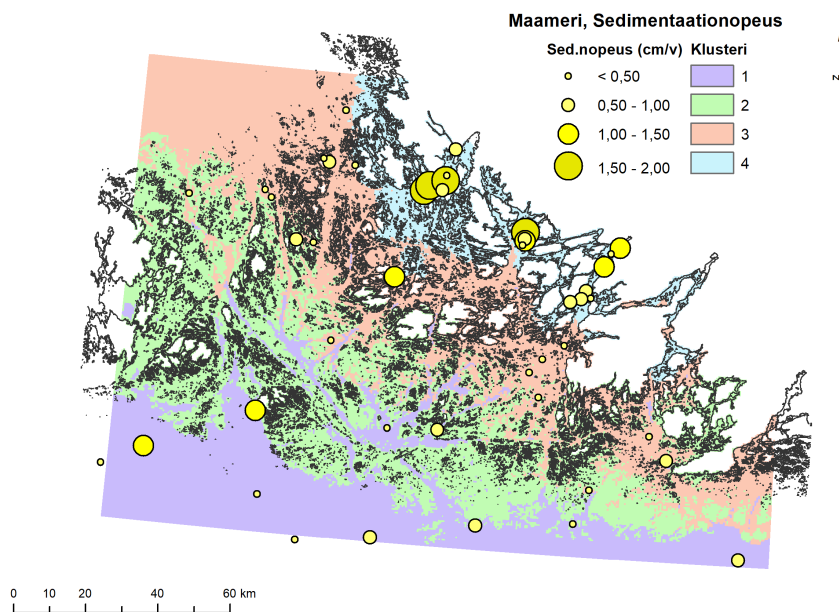
Muuttujat on esitelty taulussa 2. Lisäksi huomioimme Jokivaikutus aineiston (Virtanen et al., 2018), joka ei soveltunut maalajimallinnukseen, koska maalajitarkastelussa aineiston vaihteluväli jäi alle 40 %.

Tilastollinen analyysi ja mallinnus

Saaristomeren sedimentaatioalueita tarkasteltiin suhteessa merkitseviin ympäristömuuttujiin. Ideana oli löytää ympäristömuuttujajhdistelmistä ryhmiä, jotka kertoisivat Saaristomeren sedimentaatio-olosuhteista. Ryhmittely toteutettiin klusteroinnilla ArcGIS Pro -työkaluilla. Näitä tilastollisesti määritettyjä sedimentaatioympäristöjä verrattiin lopuksi varsinaisten havaintojen sedimentaationopeuksiin ja määritimme keskiarvoisen sedimentaationopeuden kullekin sedimentaatioklusterille.

Työ aloitettiin vertaamalla sedimentaationopeuksia ympäristömuuttujiin regressioanalyysin avulla. Jatkotarkasteluun poimimme merkitsevimmät muuttujat, jotka eivät korreloineet keskenään eli turbiditeetti-, BPI200- ja jokivaikutusaineistot. Syvyys ei noussut esiin regressioanalyysissä, mutta otimme myös sen mukaan tarkasteluihin, koska arvioimme, että sillä olisi merkitystä sedimentaatio-olosuhteisiin. Selittävät muuttujat muunnettiin vastaamaan normaalijakaumaa mahdollisimman hyvin, joko logaritmi- tai neliöjuurimuunnoksella.

Ympäristömuuttujat luokiteltiin niissä esiintyvien tilastollisten ryhmien perusteella käyttäen ArcGIS Pro:n Iso Cluster- ja Maximum likelihood -työkaluja. Testasimme ryhmittelyä eri klusterimäärillä (3–5). Klusterointi neljään luokkaan oli mielestämme aluetta parhaiten kuvaava (kuva 6.9.). Lopuksi näitä neljää luokkaa verrattiin sedimentaationopeusarvoihin ja klusterin sedimentaationopeusarvoksi määritettiin kunkin klusterin mediaaniarvo (Taulu 4). Klustereihin 1, 3 ja 4 osui havaintoja 14–17. Poikkeuksena on luokka/klusteri 2, johon ei osunut yhtään havaintoa. Tämän luokan sedimentaationopeus (0.1 cm/v) perustuu asiantuntija-arvioon. FICOS-hilalle on poimittu siihen osuva klusteri ja sen sedimentaationopeusarvio. Aineisto toimitettiin eteenpäin MAAMERI-partnereille jatkokäsittelyä varten. Sedimentaationopeusarvio liittyy lähinnä vain orgaanisainespitoisiin pohjiin, eikä sitä pidä soveltaa koko alueelle (esim. kitkamaalajipohjille).



Kuva 6.9. Sedimenttinopeushavainnot ja sedimentaatioklusterit Saaristomerellä. Klusterit on esitetty FICOS-mallin laskentahilan mukaisissa ruuduissa.

Sedimentaationopeus (cm/v)	Klusteri			
	1	2	3	4
Havaintoja	14 kpl	0 kpl	15 kpl	17 kpl
Min	0,01		0,10	0,28
Max	1,47		1,13	1,87
Keskiarvo	0,59		0,4	1,00
Mediaani	0,46		0,3	0,84

Taulukko 4. Sedimentaationopeushavaintojen (cm/vuosi) arvot klustereissa. Klusterille määritettiin

arvoksi sen mediaaniarvo. Klusteriin 2 ei osunut yhtään havaintoa.

Tulosten tarkastelu

Ympäristömuuttujien tilastollisella tarkastelulla luokiteltiin Saaristomeri neljään alueeseen. Alueet muodostavat vyöhykkeitä sisäsaaristosta ulkosaaristoon (Kuva 6.9). Verrattaessa näitä alueita sedimenttinopeushavaintoihin, huomattiin, että klusterit edustavat jossain määrin erilaisia sedimentaationopeuksia (Taulu 4). Klusteri 1 sijaitsee pääsääntöisesti ulkomerellä ja syvemmillä vesialueilla. Sedimentaationopeudet vaihtelevat tässä ulkomerialueen klusterissa 0–1.47 cm/v välillä. Klusteri 2 näyttäisi rajaavan matalia alueita ulkosaaristossa. Alueella on paljon kitkamaalajeja, mikä todennäköisesti on johtanut siihen, että alueelta ei ole yhtään sedimentaationopeushavaintoa (alueella on siis hyvin vähän pehmeitä kerrostumispohjia). Klusteri 3 on välisaaristossa. Tässä luokassa on tilastollisten keskilukujen mukaan alhaisimmat sedimentaationopeudet. Klusteri 4 sijaitsee sisäsaaristossa, rannan ja mm. jokien lähellä. Klusterissa 4 on sekä keskilukujen että maksimiarvon perusteella suurimmat sedimentaationopeusarvot.

On huomattava, että sedimentaationopeusarvio liittyy lähinnä vain orgaanisainepitoisiin pohjiin, eikä sitä pidä soveltaa koko alueelle (esim. kitkamaalajipohjille). Sedimentaationopeuksia on pyritty havaitsemaan edustavilta pohjilta, jolloin ne eivät anna täysin realistista kuvaa keskimääräisestä sedimentaationopeudesta koko alueella. Nämä arvot edustavat usein paikallista maksimi/suurta sedimentaationopeutta.

6.2. Saaristomerimallin sisäisen P-kuormituksen syötteen arvion parantaminen tarkentuneiden pohja-, SAR- ja P-tietojen osalta

Johdanto ja työn kuvaus

Hankkeessa tuotettu uusi tieto sedimentin fosforin mahdollisesti ravinnekiertoon palaavista muodoista auttaa tarkentamaan Rannikkomallin sisäisen fosforikuormituksen syötearviota, koska tietoa on saatu useilta alueilta, joiden maalajia tai fosforipitoisuutta ei ole aiemmin tunnettu. Tässä auttaa erityisesti myös hienojakoisen aineksen kertymäalueiden alueellinen tarkentuminen, mikä rajaa tarkemmin alueet, joille sisäisen kuormituksen syötearviota lasketaan. Lisäksi hankkeessa tuotettiin uutta tietoa Saaristomeren sedimentaationopeuksista, jotka tarkentavat hieman alueellisesti mallin sisäisen P-kuormituksen syötearvion laskemisessa aiemmin koko merialueelle käytettyä yhtenäistä sedimentaationopeutta. Laskelmia tarkentavat myös mallin hilaruutujen pinta-alojen jakaminen pohjatyyppiin mukaan, minkä mahdollistaa tarkempi maalajiluokittelu. Lisäksi syötearvion laskelmien tekoon on saatu päivitetty versio Velmun happimallista Saaristomerelle.

Osa hankkeessa tuotetusta aineistosta saatiin käyttöön varsin myöhään, osin koronapandemian takia viivästyneiden kenttätöiden ja analyysien takia, joten uusien syötearvioiden laskelmien valmistumiseen ja niiden testaamiseen mallissa ei tämän hankejakson aikana riittänyt aikaa. Ensimmäisten syötearvioiden laskeminen uuden aineiston pohjalta ehdittiin kuitenkin aloittaa loppuraportin laatimisen vaiheessa. Näitä tullaan työstämään jatkossa huomioimalla Velmu-kartoituksen tuottama visuaalinen havainto mutapohjien sijainnista niillä matalilla alueilla, joita

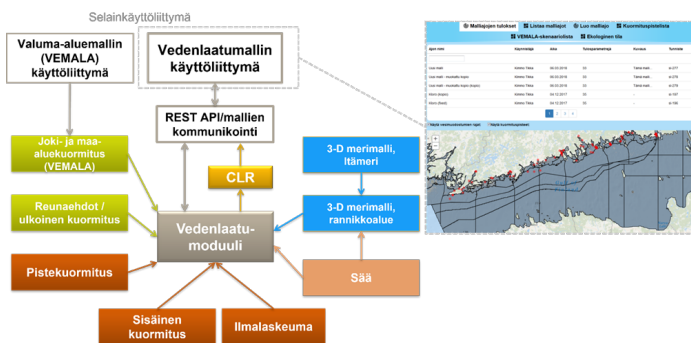
hankkeessa tuotettu maalajimalli ei kata. Yhtenä tärkeänä kehitystarpeena hankkeessa havaittiinkin matalien, erityisesti ajoittain hapettomiksi menevien rannikkoalueiden ja niiden fosforipitoisuuksien kartoittaminen.

6.3. CLR- ja Saaristomeri-mallien integrointi

Johdanto ja työn kuvaus

SYKEssä on kehitetty vesien- ja merenhoidon suunnittelun tueksi matemaattisia malleja jo pitkään. Rannikkovesien osalta FICOS-mallijärjestelmää (Finnish Coastal Nutrient Load Model) käytetään vesien- ja merenhoidon toimenpiteiden suunnittelussa, meren tilan seurannan tukena ja erilaisten ihmistoimintojen vesistövaikutusten arvioinnissa. Lisäksi se soveltuu työkaluksi lupapäätösten valmisteluun. Rannikon läheiset, jokivesivaikutteiset, ja osin suljetut vesialueet jäävät usein FICOS-mallin hydrodynamiikan katvealueiksi, eivätkä näin ollen ole luotettavasti mallinnettavissa. Tällaiset vesimuodostumat voidaan mallintaa tilastollismekanistisella Coastal Load Response (CLR) -mallilla. CLR-mallin avulla voidaan arvioida vesimuodostuman ravinnekuormituksen vaikutus ja hyvään tilaan tarvittava kuormituksen vähennystarve. Lisäksi CLR tuottaa kokonaisravinteiden ja a-klorofyllin tilaluokituksen todennäköisyydet annetuilla kuormitusyötteillä. CLR:n tehokasta käyttöä on rajoittanut sen hankala käytettävyys ja resurssien puute, koska malliajot on jouduttu tekemään SYKEssä tilaustyönä tai erilaisissa hankkeissa yksi vesimuodostuma kerrallaan.

MAAMERI-hankkeessa tavoitteena oli edistää mallien yhteiskäyttöä viemällä CLR-malli osaksi FICOSin käyttöjärjestelmää ja laskemalla kestävät kuormitustasot Saaristomerimallin taseiden perusteella (Kuva 6.10).



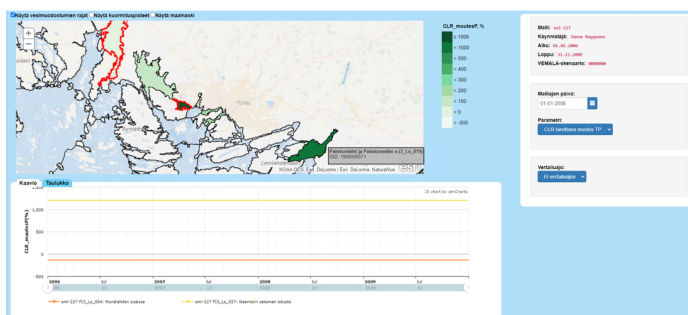
Kuva 6.10. Kuvateksti puuttuu!!!

Tulosten tarkastelu

Hankkeen aikana CLR-malli on muokattu toimimaan FICOSin kanssa samassa palvelinympäristössä ja käynnistymään automaattisesti Saaristomerien alueen FICOS-malliajoja tehdessä. CLR:n laskeman

tulokset ovat automaattisesti mukana uusina muuttujina mallin käyttöliittymässä, joskin raportin kirjoitushetkellä vielä vain mallin kehitysversiossa. Mallin perusversioon muuttujat tulevat näkyville lähitulevaisuudessa FICOS-mallin seuraavan isomman päivityksen yhteydessä. CLR-malli pystytään ajamaan sellaisille sisä- ja välisaariston vesimuodostumille, jotka ovat FICOS-ajossa mukana eheinä eli tihentämättöminä, ja joille on simulaatiosta saatavilla kokonaisten vuosien kattavaa syöttödataa.

FICOS-CLR-malliyhdistelmää on hankkeen aikana alustavasti testattu rannikon läheisimmissä vesimuodostumissa. Teknisesti malliyhdistelmä toimii (Kuva 6.11), mutta yhdistelmän kalibrointi ja validointi vaatii vielä työtä tulevaisuudessa. Erityisesti on tarkasteltava minkä tyyppisissä vesimuodostumissa malliyhdistelmää on järkevä käyttää. Jatkossa voidaan käyttää MAAMERI-hankkeessa tuotettuja satelliittiaineistoja (ravinteista) ja a-klorofyllistä vertailuarvoina CLR:n validoinnissa. Samoin hankkeessa tarkennettujen sedimentaationopeuksien (GTK) käyttö parantaa edelleen mallien luotettavuutta.



Kuva 6.11. Esimerkki CLR-tuloksesta FICOS-järjestelmässä.

Viitteet:

GTK, 2005. Haavisto-Hyvärinen, M. ja Kutvonen, H. 2005. Maaperäkartan käyttöopas. Verkkojulkaisu. Geologian tutkimuskeskus, 2005. ISBN 951-690-924-8. Saatavilla (18.11.22): <http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/index.htm>

Kaskela, A.M. and Kotilainen, A.T. *Submitted*. Geodiversity of the Finnish Archipelago Sea.

Kaskela, A.M., Kotilainen, A.T., Alanen, U., Cooper, R., Green, S., Guinan, J., van Heteren, S., Kihlman, S., Van Lancker, V., Stevenson, A., the EMODnet Geology Partners. 2019. Picking Up the Pieces—Harmonising and Collating Seabed Substrate Data for European Maritime Areas. *Geosciences* 9, 84. <https://doi.org/10.3390/geosciences9020084>.

Kaskela, A. & Rinne, H. 2018. Vedenalaisten Natura-luontotyyppien mallinnus Suomen merialueella. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimustyöraportti 6/2018, 36 sivua, 14 kuvaa, 12 taulukkoa ja 1 liite.

Rinne, H., Kaskela, A., Downie, A-L., Tolvanen, H., von Numers, M., Mattila, J. 2014. Predicting the occurrence of rocky reefs in a heterogeneous archipelago area with limited data. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 138: 90-100.



Tolvanen, H. 2010. Short metadata for FINMARINET Bathymetric Model (20 m).

Walbridge, S.; Slocum, N.; Pobuda, M.; Wright, D.J. 2018. Unified Geomorphological Analysis Workflows with Benthic Terrain Modeler. *Geosciences*, 8, 94. doi:10.3390/geosciences8030094

Virtanen, E. A., Viitasalo, M., Lappalainen, J., and Moilanen, A. 2018. Evaluation, Gap Analysis, and Potential Expansion of the Finnish Marine Protected Area Network, *Front. Mar. Sci.*, 5, 1–19, <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00402>.

Virtanen, E. A., Norkko, A., Nyström Sandman, A., and Viitasalo, M. 2019. Identifying areas prone to coastal hypoxia – the role of topography, *Biogeosciences*, 16, 3183–3195, <https://doi.org/10.5194/bg-16-3183-2019>.



Liitteet

Liite 1

Hankkeen viestintä-

taulukko



Luokka	Luokan nimi	Luokan kuvaus	Luokan sisältö	Luokan laajuus	Luokan laajuus
1	1.1	1.1.1	1.1.1.1	1.1.1.1	1.1.1.1
2	2.1	2.1.1	2.1.1.1	2.1.1.1	2.1.1.1
3	3.1	3.1.1	3.1.1.1	3.1.1.1	3.1.1.1
4	4.1	4.1.1	4.1.1.1	4.1.1.1	4.1.1.1
5	5.1	5.1.1	5.1.1.1	5.1.1.1	5.1.1.1
6	6.1	6.1.1	6.1.1.1	6.1.1.1	6.1.1.1
7	7.1	7.1.1	7.1.1.1	7.1.1.1	7.1.1.1
8	8.1	8.1.1	8.1.1.1	8.1.1.1	8.1.1.1
9	9.1	9.1.1	9.1.1.1	9.1.1.1	9.1.1.1
10	10.1	10.1.1	10.1.1.1	10.1.1.1	10.1.1.1
11	11.1	11.1.1	11.1.1.1	11.1.1.1	11.1.1.1
12	12.1	12.1.1	12.1.1.1	12.1.1.1	12.1.1.1
13	13.1	13.1.1	13.1.1.1	13.1.1.1	13.1.1.1
14	14.1	14.1.1	14.1.1.1	14.1.1.1	14.1.1.1
15	15.1	15.1.1	15.1.1.1	15.1.1.1	15.1.1.1
16	16.1	16.1.1	16.1.1.1	16.1.1.1	16.1.1.1
17	17.1	17.1.1	17.1.1.1	17.1.1.1	17.1.1.1
18	18.1	18.1.1	18.1.1.1	18.1.1.1	18.1.1.1
19	19.1	19.1.1	19.1.1.1	19.1.1.1	19.1.1.1
20	20.1	20.1.1	20.1.1.1	20.1.1.1	20.1.1.1
21	21.1	21.1.1	21.1.1.1	21.1.1.1	21.1.1.1
22	22.1	22.1.1	22.1.1.1	22.1.1.1	22.1.1.1
23	23.1	23.1.1	23.1.1.1	23.1.1.1	23.1.1.1
24	24.1	24.1.1	24.1.1.1	24.1.1.1	24.1.1.1
25	25.1	25.1.1	25.1.1.1	25.1.1.1	25.1.1.1
26	26.1	26.1.1	26.1.1.1	26.1.1.1	26.1.1.1
27	27.1	27.1.1	27.1.1.1	27.1.1.1	27.1.1.1
28	28.1	28.1.1	28.1.1.1	28.1.1.1	28.1.1.1
29	29.1	29.1.1	29.1.1.1	29.1.1.1	29.1.1.1
30	30.1	30.1.1	30.1.1.1	30.1.1.1	30.1.1.1
31	31.1	31.1.1	31.1.1.1	31.1.1.1	31.1.1.1
32	32.1	32.1.1	32.1.1.1	32.1.1.1	32.1.1.1
33	33.1	33.1.1	33.1.1.1	33.1.1.1	33.1.1.1
34	34.1	34.1.1	34.1.1.1	34.1.1.1	34.1.1.1
35	35.1	35.1.1	35.1.1.1	35.1.1.1	35.1.1.1
36	36.1	36.1.1	36.1.1.1	36.1.1.1	36.1.1.1
37	37.1	37.1.1	37.1.1.1	37.1.1.1	37.1.1.1
38	38.1	38.1.1	38.1.1.1	38.1.1.1	38.1.1.1
39	39.1	39.1.1	39.1.1.1	39.1.1.1	39.1.1.1
40	40.1	40.1.1	40.1.1.1	40.1.1.1	40.1.1.1
41	41.1	41.1.1	41.1.1.1	41.1.1.1	41.1.1.1
42	42.1	42.1.1	42.1.1.1	42.1.1.1	42.1.1.1
43	43.1	43.1.1	43.1.1.1	43.1.1.1	43.1.1.1
44	44.1	44.1.1	44.1.1.1	44.1.1.1	44.1.1.1
45	45.1	45.1.1	45.1.1.1	45.1.1.1	45.1.1.1
46	46.1	46.1.1	46.1.1.1	46.1.1.1	46.1.1.1
47	47.1	47.1.1	47.1.1.1	47.1.1.1	47.1.1.1
48	48.1	48.1.1	48.1.1.1	48.1.1.1	48.1.1.1
49	49.1	49.1.1	49.1.1.1	49.1.1.1	49.1.1.1
50	50.1	50.1.1	50.1.1.1	50.1.1.1	50.1.1.1
51	51.1	51.1.1	51.1.1.1	51.1.1.1	51.1.1.1
52	52.1	52.1.1	52.1.1.1	52.1.1.1	52.1.1.1
53	53.1	53.1.1	53.1.1.1	53.1.1.1	53.1.1.1
54	54.1	54.1.1	54.1.1.1	54.1.1.1	54.1.1.1
55	55.1	55.1.1	55.1.1.1	55.1.1.1	55.1.1.1
56	56.1	56.1.1	56.1.1.1	56.1.1.1	56.1.1.1
57	57.1	57.1.1	57.1.1.1	57.1.1.1	57.1.1.1
58	58.1	58.1.1	58.1.1.1	58.1.1.1	58.1.1.1
59	59.1	59.1.1	59.1.1.1	59.1.1.1	59.1.1.1
60	60.1	60.1.1	60.1.1.1	60.1.1.1	60.1.1.1
61	61.1	61.1.1	61.1.1.1	61.1.1.1	61.1.1.1
62	62.1	62.1.1	62.1.1.1	62.1.1.1	62.1.1.1
63	63.1	63.1.1	63.1.1.1	63.1.1.1	63.1.1.1
64	64.1	64.1.1	64.1.1.1	64.1.1.1	64.1.1.1
65	65.1	65.1.1	65.1.1.1	65.1.1.1	65.1.1.1
66	66.1	66.1.1	66.1.1.1	66.1.1.1	66.1.1.1
67	67.1	67.1.1	67.1.1.1	67.1.1.1	67.1.1.1
68	68.1	68.1.1	68.1.1.1	68.1.1.1	68.1.1.1
69	69.1	69.1.1	69.1.1.1	69.1.1.1	69.1.1.1
70	70.1	70.1.1	70.1.1.1	70.1.1.1	70.1.1.1
71	71.1	71.1.1	71.1.1.1	71.1.1.1	71.1.1.1
72	72.1	72.1.1	72.1.1.1	72.1.1.1	72.1.1.1
73	73.1	73.1.1	73.1.1.1	73.1.1.1	73.1.1.1
74	74.1	74.1.1	74.1.1.1	74.1.1.1	74.1.1.1
75	75.1	75.1.1	75.1.1.1	75.1.1.1	75.1.1.1
76	76.1	76.1.1	76.1.1.1	76.1.1.1	76.1.1.1
77	77.1	77.1.1	77.1.1.1	77.1.1.1	77.1.1.1
78	78.1	78.1.1	78.1.1.1	78.1.1.1	78.1.1.1
79	79.1	79.1.1	79.1.1.1	79.1.1.1	79.1.1.1
80	80.1	80.1.1	80.1.1.1	80.1.1.1	80.1.1.1
81	81.1	81.1.1	81.1.1.1	81.1.1.1	81.1.1.1
82	82.1	82.1.1	82.1.1.1	82.1.1.1	82.1.1.1
83	83.1	83.1.1	83.1.1.1	83.1.1.1	83.1.1.1
84	84.1	84.1.1	84.1.1.1	84.1.1.1	84.1.1.1
85	85.1	85.1.1	85.1.1.1	85.1.1.1	85.1.1.1
86	86.1	86.1.1	86.1.1.1	86.1.1.1	86.1.1.1
87	87.1	87.1.1	87.1.1.1	87.1.1.1	87.1.1.1
88	88.1	88.1.1	88.1.1.1	88.1.1.1	88.1.1.1
89	89.1	89.1.1	89.1.1.1	89.1.1.1	89.1.1.1
90	90.1	90.1.1	90.1.1.1	90.1.1.1	90.1.1.1
91	91.1	91.1.1	91.1.1.1	91.1.1.1	91.1.1.1
92	92.1	92.1.1	92.1.1.1	92.1.1.1	92.1.1.1
93	93.1	93.1.1	93.1.1.1	93.1.1.1	93.1.1.1
94	94.1	94.1.1	94.1.1.1	94.1.1.1	94.1.1.1
95	95.1	95.1.1	95.1.1.1	95.1.1.1	95.1.1.1
96	96.1	96.1.1	96.1.1.1	96.1.1.1	96.1.1.1
97	97.1	97.1.1	97.1.1.1	97.1.1.1	97.1.1.1
98	98.1	98.1.1	98.1.1.1	98.1.1.1	98.1.1.1
99	99.1	99.1.1	99.1.1.1	99.1.1.1	99.1.1.1
100	100.1	100.1.1	100.1.1.1	100.1.1.1	100.1.1.1

