



**TURUN  
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen  
tiedekunta

# **Klorofyllin alueellinen ja ajallinen vaihtelu Saaristomerellä sekä yhteys vedenominaisuuksiin**

Sentinel-2-satelliittikuvien ja Seilin mittausaseman havaintojen vertailu vuoden 2022  
kasvukaudella

Laura Kivirinne

Maantiede  
LuK-tutkielma  
Laajuus: 6 op

30.4.2025

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu  
Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

LuK-tutkielma

**Pääaine:** Maantiede

**Tekijä:** Laura Kivirinne

**Otsikko:** Klorofyllin alueellinen ja ajallinen vaihtelu Saaristomerellä sekä yhteys vedenominaisuuksiin

**Ohjaaja:** Harri Tolvanen

**Sivumäärä:** 35 sivua

**Päivämäärä:** 30.4.2025

---

Itämereen viimeisen sadan vuoden aikana päästetyt ravinteet ovat johtaneet meren rehevöitymiseen ja ympäristön tilan vakavaan heikentymiseen. Vesistöjen tilan suojelussa ja seurannassa on käytetty apuna kaukokartoitusta ja vedenlaadun mittausasemia. Satelliittikuvantamisella voidaan kartoittaa pintavedessä olevan a-klorofyllin määrää, mikä antaa välillistä tietoa vesistön perustuotannosta ja rehevöitymisestä. Tuloksia voidaan hyödyntää ympäristön tilan seurannassa ja rehevöitymisen ehkäisemisessä. Klorofyllin määrään vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa veden lämpötila, säteilyolosuhteet sekä ravinteiden määrä. Tutkimukseni tavoitteena on kartoittaa klorofyllin alueellista ja ajallista vaihtelua yhden kasvukauden aikana Saaristomerellä sekä selvittää veden ominaisuuksien yhteyttä klorofyllipitoisuuksiin.

Aineistoina käytän Suomen ympäristökeskuksen Syken ympäristötiedon hallintajärjestelmä Hertasta ladattuja klorofyllimittauksia Seilin mittausasemalta kasvukaudelta 2022 sekä vedenlaatumittauksia vuosilta 2022–2024. Satelliittikuva-analyysiä varten latsasin vuoden 2022 kasvukauden ajalta neljä kuvaa, jotka käsitelin SNAP-ohjelmiston Case II-tyyppisille merialueille tarkoitettulla C2RCC-prosessorilla. Analysoin Seilin intensiiviasemalta kerättyjä vedenlaatumittauksia tilastollisesti Pearsonin korrelaatiotestin sekä monimuuttujaregression avulla.

Satelliittikuva-analyysin sekä Seilin aseman mittaustulokset ovat samansuuntaisia, mutta satelliittikuvasta lasketut klorofyllipitoisuudet ovat moninkertaisesti *in situ*-dataa pienempiä. Kasvukauden maksimiarvot ovat huhtikuussa, jonka jälkeen pitoisuudet tippuvat kesäkuussa noin puolella ja nousevat uudelleen vasta loppukesästä heinä-elokuussa. Vuosien 2022–2024 vedenlaatutietojen analyyseissä merkittävin klorofyllin kanssa korreloiva muuttuja on fosfori. Veden lämpötilalla ja näkösyvyydellä on negatiivinen ja merkittävä tilastollinen merkitsevyys. Typpi ei ole testien perusteella merkittävä klorofyllin määrään vaikuttava tekijä. Fosforin merkitsevyys kasvaa, kun monimuuttujaregressiomallista poistetaan typpi.

Tutkimus antaa alueellisen näkökulman klorofyllin kartoitukseen ja tunnistaa epäluottamustekijät, jotka voivat vaikuttaa klorofyllin satelliittikuvantamisessa sekä tilastollisissa testeissä. Klorofyllin kaukokartoituksen avulla voidaan paikantaa alueita, joilla meren perustuotanto on suurta. Yhdistettynä kenttämittauksiin ja -havaintoihin voidaan kartoittaa rehevöityneitä, toimenpiteitä tarvitsevia merialueita. Luotettava klorofyllin satelliittikuvantaminen vaatii Saaristomerelle suunniteltujen leväalgoritmien käyttöä. Vedenlaatumittausten analysoinnissa tärkeää on käyttää riittävän pitkiä aikasarjoja, jotta tuloksista voidaan tehdä luotettavia johtopäätöksiä.

---

**Avainsanat:** Saaristomeri, a-klorofylli, vedenlaatu, rehevöityminen, kaukokartoitus, C2RCC-prosessori, monimuuttujaregressio

# Sisällysluettelo

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1</b>   | <b>Johdanto</b>   | <b>5</b>  |
| <b>2</b>   | <b>Tutkimuksen tausta</b>                               | <b>7</b>  |
| <b>2.1</b> | <b>Klorofylli perustuotannon indikaattorina</b>         | <b>7</b>  |
| 2.1.1      | Merten perustuotanto ja kasviplankton                   | 7         |
| 2.1.2      | Klorofylli ja sen mittaaminen kaukokartoitusaineistosta | 8         |
| <b>2.2</b> | <b>Saaristomeren ominaispiireet</b>                     | <b>9</b>  |
| <b>3</b>   | <b>Aineistot ja menetelmät</b>                          | <b>12</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Aineistot</b>  | <b>12</b> |
| 3.1.1      | Satelliittikuvat  | 12        |
| 3.1.2      | Vedenlaatumittaukset                                    | 13        |
| <b>3.2</b> | <b>Menetelmät</b>                                       | <b>14</b> |
| 3.2.1      | Kuvien esikäsittely ja prosessointi                     | 14        |
| 3.2.2      | Kuvien visualisointi ja päällekkäisanalyysi             | 15        |
| 3.2.3      | Tilastolliset menetelmät                                | 16        |
| <b>4</b>   | <b>Tulokset</b>   | <b>17</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Alueellinen vaihtelu</b>                             | <b>17</b> |
| 4.1.1      | Yleiset trendit kasvukaudella                           | 17        |
| 4.1.2      | Alueelliset muutokset eri ajankohtina                   | 18        |
| <b>4.2</b> | <b>Ajalliset muutokset</b>                              | <b>20</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Tilastollisten analyysien tulokset</b>               | <b>21</b> |
| 4.3.1      | Mittausaseman ja satelliittikuvan arvojen vertailu      | 21        |
| 4.3.2      | Vedenominaisuuksien yhteys klorofyllipitoisuuksiin      | 23        |
| <b>5</b>   | <b>Keskustelu</b>                                       | <b>26</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Klorofyllin kaukokartoitus</b>                       | <b>26</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Veden ominaisuuksien yhteys klorofylliin</b>         | <b>28</b> |
| <b>5.3</b> | <b>Johtopäätökset ja jatkotutkimusmahdollisuudet</b>    | <b>29</b> |
|            | <b>Kiitokset</b>  | <b>31</b> |
|            | <b>Lähteet</b>  | <b>32</b> |



## 1 Johdanto

Merten perustuotanto muodostuu kasviplanktoneista sekä muista yhteyttävistä vesikasveista (Holden 2017). Meressä biomassaltaan suurimmat perustuottajat ovat yksisoluiset kasviplanktonlevät, jotka yhteyttävät fotosynteesin avulla ja tarvitsevat lisääntyäkseen auringon säteilyä, ravinteita sekä hiiltä. Kasviplanktonit sisältävät fotosynteesin kannalta välttämätöntä pigmenttiä, a-klorofylliä, jota löytyy kaikista perustuottajista (Boss & Behrenfeld 2010; Soja-Wozniak ym 2014). Klorofyllipitoisuuksia voidaan pitää indikaattorina kasviplanktonin biomassasta (Campbell ym. 2002). Klorofyllipitoisuuksia mittaamalla voidaan luotettavasti arvioida perustuotannon määrää meressä ja sitä käytetään usein veden laadun ja rehevöitymisen arvioinnissa (Boyce ym. 2010; Soja-Wozniak ym 2014). Itämerellä klorofyllin esiintymistä rajoittavat talviaikaan jää, veden alhainen lämpötila sekä vähäinen auringon säteily.

Merissä luonnollisesti tapahtuvaa perustuotantoa voimistaa ihmisen aiheuttama liiallinen ravinnekuormitus, joka johtaa suuriin leväesiintymiin ja vesistön rehevöitymiseen (Holden 2017). Tuottavimpia merialueita ovat kumpuamisrannikot ja suistot, joissa veteen on liunneena suuri määrä ravinteita eikä valon määrä rajoita fotosynteesiä. Itämeren ekosysteemin kannalta tärkeitä ympäristötekijöitä ovat kasviplankton ja ravinteet (Leppäranta & Myrberg 2009). Runsaat ravinnepitoisuudet lisäävät levien ja ylimääräisen orgaanisen aineksen määrää meressä, jolloin hapen kulutus kasvaa. Liian tehokas perustuotanto on voimistanut syvänmeren alueiden happikatoa. Monimutkaisten ympäristöllisten vuorovaikutussuhteiden seurauksesta ylimääräinen perustuotanto johtaa rehevöitymiseen ja merialueiden kuormittumiseen.

Saaristomeri sijaitsee Lounais-Suomen rannikolla ja on osa Itämerta, joka on pieni ja matala murtovesiallas (Leppäranta & Myrberg 2009). Saaristomerelle tyypillistä ovat tuhannet saaret, vaihtelevat rannikon muodot ja meren pohjan mataluus. Veden vaihtuvuus Itämerellä on hidas. Itämeri on ekologisesti herkkä merialue, jota uhkaavat ihmisen toiminnan lisäämä ravinnekuormitus ja ympäristömyrkyt. Liialliset ravinnepitoisuudet ovat lisänneet perustuotannon määrää, joka on johtanut rehevöitymiseen ja pahentanut syvänteiden happikatoa. Saaristomeren fysikaalisessa merentutkimuksessa keskeistä ovat veden optiset ominaisuudet, joihin vaikuttaa CDOM (Leppäranta & Myrberg 2009), eli veteen suspendoituneen kelta-aineksen, kiintoaineksen ja klorofyllin määrä (Myrberg ym. 2006).

Kasviplanktonin määrää voidaan arvioida kaukokartoituksen avulla (Nagamani ym. 2011). Satelliittikuvantamiseen perustuva valtameren värien kaukokartoitus tarjoaa määrällistä tietoa

meriveden ominaisuuksista, kuten a-klorofyllistä, suspendoituneen sedimentin sekä orgaanisen aineen määrästä. Klorofyllitietoja käytetään arvioimaan merten perustuotantoa matemaattisten algoritmien avulla (Campbell ym. 2002). Perustuotantoa mittaavat mallit antavat suuren alueellisen ja ajallisen tarkkuuden sekä globaalisti että rannikkomerillä (Son ym. 2014). Kuitenkin useimmat perustuotantoa mittaavat algoritmit soveltuvat vain kirkkaille avomerialueille. Itämerellä klorofyllin kaukokartoituksen haasteena on muun muassa veteen suspendoitunut kelta-aines (Myrberg ym. 2006). Leväkukintojen kaukokartoitusmahdollisuuksia on tutkittu Itämerellä paljon ja tätä varten on kehitetty Itämerelle omat leväalgoritmit.

Tutkimukseni tavoitteena on tuottaa tietoa klorofyllipitoisuuksien alueellisesta ja ajallisesta vaihtelusta Seiliä ympäröivillä merialueilla Saaristomerellä sekä ymmärrystä siitä, millaiset tekijät vaikuttavat klorofyllin esiintyvyyteen. Tutkimuksessani selvitän klorofyllin yhteyttä pintaveden lämpötilaan, Secchi-syvyyteen ja ravinteisiin tilastollisin menetelmin Seilin mittausaseman havaintojen avulla. Klorofyllipitoisuuksien alueellista ja ajallista jakautumista tarkastelen kaukokartoitusmenetelmin Sentinel-2-satelliittikuvien avulla. Näiden tavoitteiden perusteella olen määritellyt seuraavat tutkimuskysymykset:

- 1) Miten klorofyllipitoisuudet vaihtelevat alueellisesti ja ajallisesti Seiliä ympäröivillä merialueilla Saaristomerellä vuoden 2022 kasvukauden aikana mittausaseman sekä satelliittikuvan havaintojen perusteella?
- 2) Onko Seilin mittausasemalta kerättyjen klorofyllipitoisuuksien, Secchi-syvyyden, pintaveden lämpötilan ja ravinteiden (typpi ja fosfori) välillä yhteyttä?
- 3) Miten luotettavia tuloksia C2RCC-prosessori antaa klorofyllipitoisuuksien mittaamiseksi verrattuna Seilin mittausasemalla kerättyyn dataan?

## 2 Tutkimuksen tausta

### 2.1 Klorofylli perustuotannon indikaattorina

#### 2.1.1 Merten perustuotanto ja kasviplankton

Merten perustuotanto tarkoittaa kasviplanktoneiden ja muiden auringon säteilyn avulla yhteyttävien vesikasvien kasvua ja lisääntymistä (Holden 2017). Nämä yhteyttävät kasvit muodostavat merten ravintoverkon perustan. Kaikki elämä maalla sekä merissä on peräisin yhteyttävistä kasveista.

Biomassaltaan suurin osa vedessä elävistä kasveista on kasviplanktoneita, eli yksisoluisia leviä (Holden 2017). Kasviplanktonit yhteyttävät fotosynteesin avulla ja tarvitsevat lisääntyäkseen riittävästi valoa, ravinteita sekä hiiltä. Plankton tarvitsee kasvaakseen veteen liuenneita ravinteita, kuten nitraattia ja fosfaattia, jotka vapautuvat takaisin veteen planktonin kuollessa. Perustuottajat tarvitsevat myös mikroravinteita, kuten rautaa, kuparia ja sinkkiä. Planktonpopulaation kasvu voi pysähtyä liian vähäisestä ravinteidensaannista. Ravinteita päätyy mereen luonnollisten prosessien, kuten eroosion ja biomassan hajoamisen seurauksena (Holden 2017), mutta myös ihmisen toiminta on lisännyt ravinteiden määrää Itämerellä (Leppäranta & Myrberg 2009).

Levät eivät juurikaan liiku itsenäisesti, vaan ne kulkeutuvat merivirtojen mukana veteen sekoituneina (Holden 2017). Kasviplanktonit lisääntyvät jakautumalla 12–24 tunnin välein. Suotuisat olosuhteet ja kasviplanktoneiden nopea lisääntyminen voivat johtaa laajojen levälautojen syntyyn lyhyessä ajassa. Kaikki kasviplanktonryhmät sisältävät a-klorofylliä sekä muita pigmenttejä soluissaan (Campbell ym. 2002).

Rannikkoalueet ovat yksi perustuotannoltaan tehokkaimmista ekosysteemeistä maapallolla (Ask ym. 2016). Erityisesti runsasravinteiset kumpuamisrannikot ja suistoalueet ovat optimaalisia kasviplanktoneiden lisääntymiselle (Holden 2017). Merissä tapahtuvaa luonnollista perustuotantoa voimistaa ihmisen aiheuttama liiallinen ravinnekuormitus, joka johtaa suuriin leväesiintymiin ja vesistön rehevöitymiseen (Leppäranta & Myrberg 2009). Liiallinen perustuotanto voi voimistaa meren syvänteiden happikatoa.

Kasviplanktonin määrä pohjoisilla ilmastovyöhykkeillä vaihtelee vuodenaikaisesti (Wasmund ym. 1998). Talviaikaan kasviplanktonin kasvua rajoittaa valon saatavuus (Holden 2017). Ai-

kaisin keväällä kasviplankton kasvaa nopeasti lisääntyneen valon määrän ja talven aikana kerääntyneiden ravinteiden takia (Wasmund ym. 1998). Yleisesti on ajateltu, että myöhemmin kasvukaudella kasvua hidastaa ravinteiden vähentyminen (Stramska & Jakacki 2024).

Lisäksi kasviplanktonin kasvu vaihtelee vuosittain ilmastollisen vaihtelun takia (Stramska & Jakacki 2024). Tämä kasviplanktonin kasvun vaihtelu on kuvattu myös Itämerellä (Wasmund ym. 1998). Kasviplanktonkukinnat noudattavat samanlaista kaavaa Itämerellä vuosittain (Campbell ym. 2002). Piileviä ja panssarileviä (tai dinoflagellaatteja) esiintyy keväisin ja syksyisin, kun taas kesäkukinnat muodostuvat syanobakteereista. Kasviplanktonin ajalliseen esiintymiseen voi vaikuttaa ympäristöllisten tekijöiden lisäksi kausiluontoiset muutokset peto-saalis-suhteissa (Boss & Behrenfeld 2010).

Kasviplanktonilla ja ravinteilla on merkittäviä vaikutuksia Itämeren ekosysteemiin (Leppäranta & Myrberg 2009). Runsaat ravinnepitoisuudet lisäävät levien kasvua ja ylimääräisen orgaanisen aineksen määrää. Tämä johtaa kasvavaan hapen kulutukseen ja syvänmeren happikatoon, jonka seurauksena meren pohjaeliöstö kuolee. Pohjan happikato on luonnollisesti merialueilla esiintyvä ilmiö, jota ihmisen toiminta on voimistanut. Pohjan happikato johtaa merialueen sisäiseen kuormittumiseen, kun pohjan sedimenttien sisältämä fosfori vapautuu veteen ja lisää biologista tuotantoa, jolloin happea kuluu yhä enemmän.

### 2.1.2 Klorofylli ja sen mittaaminen kaukokartoitusaineistosta

Klorofylli-a on pigmentti, jota löydetään perustuottajista, kuten kasviplanktonista (Boss & Behrenfeld 2010). Klorofyllipitoisuudet ilmaisevat kasviplanktonin biomassaa (Campbell ym. 2002), ja sitä pidetään luotettavana arvona perustuotannon mittaamiselle (Boyce ym. 2010). Kasvissa oleva klorofyllipigmentti muokkaa auringosta tulevan säteilyenergian kemialliseksi energiaksi, jota kasvit tarvitsevat kasvaakseen (Holden 2017).

Klorofyllipitoisuudet vaihtelevat vuodenaikojen mukaan lauhkeilla ja boreaalisilla ilmasto-työhykkeillä (Stramska & Jakacki 2024). Eri vuosien välillä on eroja kukintojen alkamisajankohdissa ja intensiteetissä, jotka vaihtelevat ilmastollisten olosuhteiden mukaisesti. Alkukevällä kasviplanktonesiintymät kasvavat nopeasti, kun auringon säteilyn määrä lisääntyy ja planktonit hyödyntävät talven aikana veteen kerääntyneitä ravinteita. Myöhemmin kesällä kasviplanktonin biomassan kasvua rajoittavat pienentyneet ravinnepitoisuudet.

Mikäli ympäristölliset olosuhteet ovat suotuisat, kasviplanktonesiintymät saattavat kasvaa niin suuriksi, että ne värjäävät veden ja näkyvät satelliittikuvissa, jolloin puhutaan leväkukinnoista (Holden 2017). Satelliitteihin perustuva valtameren värien kaukokartoitus tarjoaa määrällistä tietoa meriveden ominaisuuksista, kuten a-klorofyllistä, suspendoituneen sedimentin sekä orgaanisen aineen määrästä (Nagamani ym. 2011).

Satelliittien multispektraaliset sensorit pystyvät kartoittamaan klorofyllipitoisuuksia havaitsemalla spektrin muutoksia säteilyssä (Campbell ym. 2002). Satelliitein tehtävät optiset spektrimittaukset antavat tietoa optisesti aktiivisista aineista siinä pintaveden kerroksessa, johon aurion säteilemä valo ulottuu (Leppäranta & Myrberg 2009). Satelliitin avaruudesta havaitsema signaali muodostuu kuvattavan pinnan heijastuksesta sekä pinnan takaisinsironnasta. Aiemmissä tutkimuksissa on havaittu kanavan 620 nm-670 nm olevan sopiva veteen suspendoituneen aineksen havaitsemiseen (Leppäranta & Myrberg 2009). Muualla maailmalla Case II-tyyppin merialueilla klorofyllin mittaamiseksi usein käytetyt alle 500 nm aallonpituudet eivät sovi käytettäväksi Itämerelle, jossa klorofyllin kuvantamista häiritsee CDOM (Attila ym. 2013).

Klorofylliarvoja on raportoitu laajasti tutkimuskirjallisuudessa, joissa menetelminä on käytetty laboratorio- ja kenttätutkimuksia (Jacobsen & Markager 2016). Klorofyllidataa käytetään arvioimaan merten perustuotantoa matemaattisten algoritmien avulla (Campbell ym. 2002). Perustuotantoa mittaavat mallit tarjoavat suuren alueellisen ja ajallisen tarkkuuden globaalisti sekä rannikkomerellä (Son ym. 2014). Kuitenkin useimmat perustuotantoa mittaavat algoritmit ovat soveltuvia vain kirkkaille avomerialueille (Son ym. 2014), ja Itämerellä tehtävää kuvatulkitintaa varten on sovellettava alueelle sopivia leväalgoritmeja (Myrberg ym. 2006). Itämeri luokitellaan ”Case II”-tyypin merialueeksi, jolle ominaista ovat suuret CDOM-pitoisuudet (Attila ym. 2013).

## **2.2 Saaristomeren ominaispiireet**

Itämeri on pieni ja matala murtovesiallas, joka yhdistyy Atlantin valtameriin Tanskan salmien kautta (Leppäranta & Myrberg 2009). Itämeren rannikoiden geomorfologia on vaihtelevaa ja kostuu muun muassa laajoista saaristoista. Itämeren hydrografialle ominaista on veden lämpötilan ja suolaisuuden leveysgradientit (Leppäranta & Myrberg 2009, Suominen ym. 2010b). Keskimääräinen veden suolaisuus on noin 7 ‰ ja suolaisuuden kerrostuminen on voimakasta (Leppäranta & Myrberg 2009). Itämeri jäätyy joka talvi ainakin osittain. Saaristomeri on osa Itämerta ja ulottuu Lounais-Suomen rannikolta Ahvenanmaalle (Leppäranta & Myrberg 2009).

Saaristomeri on meren ja maan mosaiikki, joka koostuu tuhansista saarista. Veden keskisyvyys Saaristomerellä on 19 metriä.

Itämerellä veden vaihtuvuus on hidasta, sillä Tanskan salmien kautta virtaa vain vähän suolaista ja tiheää vettä (Leppäranta & Myrberg 2009). Suolapulssien esiintymiseen vaikuttavat sääolot, jotka kontrolloivat merenpinnan korkeuden eroja Itämeren ja Pohjanmeren välillä. Saaristomerellä veden vaihtuvuuteen vaikuttaa lisäksi sisäsaaristoon laskevat joet, jotka vähentävät meriveden suolapitoisuutta (Leppäranta & Myrberg 2009) ja lisäävät veteen sekoittuneen materiaalin määrää (Tolvanen ym. 2013). Veteen sekoittunut aines koostuu joen virtaaman mukana tulleista epäorgaanisista partikkeleista. Ulkoisessa saariston osassa vesi vaihtuu jatkuvasti ympäröivien vesialueiden kanssa ja suspendoituneesta aineesta suurempi osuus on orgaanista. Saaristomeriden keskiosa on suhteellisen suojainen, kun taas ulkosaaristossa veden vaihtuvuuteen vaikuttavat kovat tuulet.

Itämerellä useat prosessit vaikuttavat meriveden optisiin ominaisuuksiin (Tolvanen ym. 2013). Veden kirkkaus on tärkeä tekijä meriekosysteemeissä, sillä se määrittelee sen pintavesikerroksen paksuuden, johon auringon säteily ulottuu. Auringon säteilyn saavuttava pintakerros määrittelee eufoottisen syvyyden, jossa fotosynteesi on mahdollista. Auringon säteily siis mahdollistaa fotosynteesin ja täten biologiset prosessit vedessä (Leppäranta & Myrberg 2009). Meriekosysteemien toiminnan kannalta veden läpinäkyvyydellä on jopa suurempi merkitys kuin veden lämpötilalla tai ravinteilla (Tolvanen ym. 2013).

Valon säteily imeytyy ja siroaa vedessä (Myrberg ym. 2006). Valon säteilyä taittaa vesi itse, kelta-aines eli liuenneet orgaaniset aineet, kiintoaines ja klorofylli. Näitä kutsutaan yhteisesti nimellä CDOM (engl. *colored dissolved organic matter*) (Leppäranta & Myrberg 2009). Absorption ja sironnan vuoksi säteily vaimenee syvyyden mukaan (Myrberg ym. 2006). Saaristomerelle tyypillisissä sameissa rannikkovesissä valon tunkeutumissyvyys on vain muutamia metrejä, kun taas kirkkaissa vesissä säteily voi ulottua jopa 100 metrin syvyyteen. Veden näkösyvyys määritellään Secchi-levyhavaintojen avulla. Itämerellä Secchi-havaintoja on tehty sadan vuoden ajan. Näistä Secchi-syvyysmittauksista on havaittu veden sameneneminen (Tolvanen ym. 2013). Lounais-Suomen rannikolla meriveden optiset ominaisuudet ovat heikentyneet 50 % vuosien 1930–2007 aikana. Auringon säteilyn läpäisevyys vedessä ja sen heikentyminen voi vaikuttaa merenpohjan eliöstöön sekä biologisiin prosesseihin.

Ihmistoiminta on vaikuttanut Itämeren ekosysteemeihin monien vuosikymmenten ajan (Stramska & Jakacki 2024) ja se on fyysisten ominaisuuksiensa vuoksi hyvin herkkä ja altis

muutoksille (Leppäranta & Myrberg 2009). Itämerta uhkaa rehevöityminen, ympäristömyrkyt, vieraslajit sekä laivaliikenteen aiheuttama eroosio. Verrattuna muihin akvaattisiin ekosysteemeihin Itämeren eliölajit elävät sietokykynsä rajalla. Muutokset ravintoketjuissa tai tietyn avainlajin häviäminen voivat muuttaa koko Itämeren ekosysteemiä.

Liiallinen ravinteiden saanti on aiheuttanut Itämerellä suuria leväkukintoja kesäisin, joka on johtanut meren rehevöitymiseen (Stramska & Jakacki 2024). Rehevöityminen voimistaa muun muassa meren syvänteiden happikatoa, joka itsessään on luonnollinen prosessi (Leppäranta & Myrberg 2009). Rehevöitymisen torjumisessa keskeisintä on ravinteiden pistelähteiden vähentäminen Itämeren valuma-alueella niin rannikolla kuin sisämaassakin.

Tämä tutkimus keskittyy Saaristomerellä Turun saaristoon (kuva 1). Tutkimusalueen keskiössä on Seilin saari ja mittausasema. Tutkimusalue rajautuu pohjoisessa Airismaahan, idässä Sanviikinselän merialueeseen, kaakossa Kemiönsaaren ja lännessä Korppooseen. Tutkimusalueen eteläisimmät merialueet ovat Barskärs fjärden sekä kaakossa Kemiönsaaren edustalla Gullkrona fjärd. Seilin mittausasema sijaitsee Omenaistenaukon ja Airiston merialueiden välissä, Seilin saaren pohjoispäässä.



Kuva 1. A. Tutkimusalueen rajaus, Seilin mittausaseman sijainti sekä analysissä käytetyt paikannimet ja B. tutkimusalueen sijainti Itämerellä (Syke 2025; HELCOM & Open Street Map 2017;2018; MML:n karttapaikka).

### 3 Aineistot ja menetelmät

#### 3.1 Aineistot

##### 3.1.1 Satelliittikuvat

Latasin Copernicus Browser -palvelusta Sentinel-2 Level-1C -ortokuvia neljältä ajankohdalta vuodelta 2022. Copernicus on Euroopan avaruusjärjestön, lyhyemmin ESA:n (engl. *European Space Agency*), hallinnoima ohjelma, jonka sivuilta kuka tahansa voi ladata ilmaiseksi satelliittikuvia. Sentinelin LC1-tuotteista ei ole korjattu ilmakehän yläosan heijastusta (engl. *Top-Of-Atmosphere, TOA*). Valitsin kyseisen tuotteen, sillä myöhemmin käyttämäni C2RCC-prosessori vaatii ilmakehäkorjaamattoman kuvan. Valitsin kuvat ajankohdilta 22.04., 06.06., 21.07. ja 13.08. (taulukko 1). Valitsin satelliittikuvat kasviplanktoneiden kasvukauden mukaan, eli noin huhti-syyskuun ajalta. Kuvien valintaa rajoitti maaliskuussa meressä esiintyvä jääpeite sekä pilvisuus. Kuvissa tutkimusrajauksen sisäpuolella esiintyvät pilvet estävät klorofyllipitoisuuksien laskemisen, joten kuvien valinnassa pilvettömyys oli tärkeä kriteeri.

Valitsin kuvat seuraavin perustein: 1) Kuvat kattavat mahdollisimman laajan alueen Saaristomereltä niin, että Seilin saari ja mittausasema jää suurin piirtein kuvan keskiosaan, 2) Kuvassa näkyy suljetumman sisäsaariston lisäksi vertailun vuoksi avonaisempaa merialuetta Nauvon ja Korppoon eteläpuolelta, 3) Kuvat ovat aluerajauksen sisäpuolelta mahdollisimman pilvettämiä eikä niissä ole jäätä, joka voisi vaikuttaa prosessoinnin lopputulokseen, ja 4) Kuvat vastaavat ajallisesti mahdollisimman tarkasti Hertasta lataamaani vedenlaatu-dataa.

Taulukko 1. Tutkimuksessa käytettyjen satelliittikuvien tiedot (Copernicus Browser).

| Kuvan otto-ajankohta   | Aluetunniste | Kuvausinstrumentti | Prosessointitaso | Pilvipeitteisyys | Kuvan tuottaja |
|------------------------|--------------|--------------------|------------------|------------------|----------------|
| 22.4.2022<br>09:50 UTC | T34VEM       | Sentinel-2 A MSI   | LC1              | 0,000            | ESA            |
| 6.6.2022<br>09:50 UTC  | T34VEM       | Sentinel-2 A MSI   | LC1              | 3,992            | ESA            |
| 21.7.2022<br>09:50 UTC | T34VEM       | Sentinel-2 A MSI   | LC1              | 2,341            | ESA            |
| 13.8.2022<br>09:56 UTC | T34VEM       | Sentinel-2 A MSI   | LC1              | 2,948            | ESA            |

### 3.1.2 Vedenlaatumittaukset

Latastin Ympäristötiedon hallintajärjestelmä Hertasta vedenlaadun mittauksia, jotka ovat avoimen datan lisenssin piirissä. Palvelu on Suomen ympäristökeskus Syken hallinnoima. Latastin Hertta 5.7-järjestelmästä seuraavat veden fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia kuvaavat parametrit: veden lämpötila, Secchi-syvyys (tästä eteenpäin näkösyvyys), kokonaistyyppi- ja kokonaisfosforipitoisuudet sekä a-klorofyllipitoisuus. Lisäksi valitsin ladattaviin muuttujiin saliniteetin eli suolapitoisuuden, jotta pystyin optimoimaan myöhemmin käyttämäni C2RCC-prosessorin Saaristomerelle sopivaksi. En käyttänyt suolapitoisuutta testeissä tai analyyseissa.

Käytin Hertta-vedenlaatatietoja tutkielmassani kahdella tavalla: satelliittikuvista laskettujen klorofylliarvojen vertailukohteeksi sekä kolmen vuoden monimuuttujaregressiossa. Vertailuun käytin vain neljää mittauspäivän dataa vuodelta 2022. Monimuuttujaregressiota varten latastin mittaustulokset kolmelta peräkkäiseltä vuodelta 2022–2024. Poistin vuosilta sellaiset havaintopäivät, joina ei mitattu kaikkia valitsemiani muuttujia. Nämä havainnot sijoittuivat talviaikaan, eli alku- ja loppuvuoteen. Käytettäviä havaintoja jäi 41 päivältä.

Valitsin satelliittikuvien ja Seilin mittaushavaintojen vertailuun tarkasteltaviksi ajankohdiksi vuoden 2022 päivämäärät 19.4, 8.6, 25.7 ja 18.8. Mittauspäivämäärien valintaan vaikutti aiemmin ladatut satelliittikuvat. Jotta levien liikkuminen tuulen ja virtausten mukana vaikuttaisi mahdollisimman vähän datojen vertailukelpoisuuteen, yritin valita mittaustulokset vastaamaan ajallisesti valittuja satelliittikuva. Ajankohtien välille jäi kuitenkin 2–5 päivää. Kaikki tutkielmassa käytettävät mittaustulokset on valittu Seilin mittausasemalta, joka sijaitsee Saaristomereillä (kuva 1). Vertailussa käytettyjen mittaushavaintojen klorofyllimittaukset on tehty eri syvyyksiltä: 0,0–4,0 metriä, 0,0–6,0 metriä ja 0,0–8,0 metriä (taulukko 2).

Taulukko 2. Vedenlaatatiedot Seilin mittausasemalta neljänä eri ajankohtana vuonna 2022 (Ympäristötiedon hallintajärjestelmä Hertta).

| Mittauspäivämäärä | Klorofyllia (µg/l) | Näkösyvyys (m) | Lämpötila (°C) | Kokonaisfosfori (µg/l) | Kokonaistyyppi (µg/l) | Näytesyvyys (m) | Klorofyllin näytesyvyys (m) |
|-------------------|--------------------|----------------|----------------|------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|
| 19.4.             | 13                 | 2              | 3,1            | 29                     | 330                   | 1               | 0,0–4,0                     |
| 8.6.              | 2                  | 3,5            | 13,1           | 13                     | 250                   | 1               | 0,0–8,0                     |
| 25.7.             | 6,1                | 1,5            | 19,9           | 16                     | 400                   | 1               | 0,0–4,0                     |
| 18.8.             | 4                  | 2,5            | 20,6           | 15                     | 320                   | 1               | 0,0–6,0                     |

Lisäksi käytin kartoissa Suomen ympäristökeskuksen aineistoa merisaari10 sekä HELCOMin aineistoja ”Administrative boundaries” ja ”coastline” (taulukko 3). Muokkasin merisaari10-aineistoa niin, että Paraisten Ålönsaaren eteläpuolinen Hyvilempfjärden ei näy kartassa meri-alueena. Muokkasin aineistoja visuaalisesti karttoihini sopiviksi.

Taulukko 3. Aineistotiedot muista kartoissa käytetyistä aineistoista (HELCOM & Syke).

| Aineiston nimi            | Tuotettu              | Aineistotyyppi | Kuvaus  | Avoimuus                                | Tuottaja   |
|---------------------------|-----------------------|----------------|---|---|--|
| Administrative boundaries | 05.12.2017            | ESRI Shapefile | Administrative boundaries of countries inside the Baltic Sea catchment area.  | Avoim (Lähde: HELCOM, Open Street Maps) | HELCOM, Open Street Maps                               |
| Coastline                 | 31.01.2018            | ESRI Shapefile | Baltic Sea coastline.   | Avoim (Lähde: HELCOM, Open Street Maps) | HELCOM, Open Street Maps                               |
| Merisaari10 (Ranta10)     | Ladattu<br>01.03.2025 | ESRI Shapefile | Koko Suomen kattava Ranta10-aineisto perustuu MML:n vuosien 2000–2008 maastotietokannan vaka- ja virtavesikohteisiin. | Avoim (CC BY 4.0)                       | Suomen ympäristökeskus (Syke), Maanmittauslaitos (MML) |

## 3.2 Menetelmät

### 3.2.1 Kuvien esikäsittely ja prosessointi

Rajaamisen jälkeen käytin resampling-toimintoa kuvan kanavien resoluution muuttamiseksi, sillä myöhemmin käyttämäni C2RCC-prosessori vaatii kuvan, jossa kaikkien kanavien resoluutiokoko on sama. Käytin referenssikanavana B1-kanavaa, jonka resoluutio on 60 metriä. Valitsin bilineaarisen upsampling-metodin, joka laskee uuden pikselin arvon neljän ympäröivän pikselin painotetun keskiarvon mukaan. Bilineaarisen interpoloinnin avulla voidaan välttää ääriarvoja, mutta kuvan terävyys ja kontrastisuus heikkenee. Uudet arvot eivät vastaa alkuperäisen kuvan arvoja.

Syötin rajatun kuvan C2RCC-prosessoriin (engl. *atmospheric correction Case 2 Regional Coast Colour*), joka on suunniteltu erityisesti Case II-tyyppisten vesialueiden kartoitusta varten. Käytin prosessoinnissa C2X-Nets-erikoisneuroverkkoa, joka on suunniteltu merialueille, joissa veteen suspendoituneen aineen ja klorofyllin määrä on suuri. Suolapitoisuudeksi asetin 6 ‰

lataamieni vedenlaatutietojen mukaan. Veden lämpötilaksi asetin kyseistä satelliittikuva-ajankohtaa vastaavan Seilin mittausaseman lämpötila-arvon. Ennen ArcGis Pro -ohjelmistoon siirtämistä varmistin, että mukaan tulevat kolme tarvittavaa kanavaa klorofyllipitoisuuksien visualisoimiseksi; *conc\_chl* (engl. *chlorophyll concentration*), *iop\_apig* (engl. *absorption coefficient of phytoplankton pigments at 443nm*) ja *c2rcc\_flags* (engl. *C2RCC quality flags*).

Bilineaarinen interpolointi tai kanavien resoluutiokoon muuttaminen saattoivat vaikuttaa lopputuloksena syntyneisiin arvoihin. Suurin osa kuvien klorofylliarvoista olivat välillä 0–0,5 mg/m<sup>3</sup>, mutta datasta löytyi myös muutamia arvoja, jotka selkeästi poikkesivat keskiarvosta. Näitä poikkeavan suuria klorofylliarvoja oli hyvin vähän, joten niiden poistaminen ei ollut tarpeellista. Itämerellä on mitattu yli 20 mg/m<sup>3</sup> klorofylliarvoja (Zhang ym. 2017) ja tästäkin syystä koin suurten arvojen jättämisen rasteriin perustelluksi. Maskasin kuitenkin luomallani shapefile-polygonilla rasterikuvista Paraisten Älönsaaren eteläpuolisen Hyvilempfjärdenin kokonaan pois, sillä alueen ”punaisuus” eli suuret klorofylliarvot dominoivat kuvaa. Suuriin arvoihin tutkimusalueella saattaa virheellisesti vaikuttaa matalien rantojen pohjakaasvillisuus tai veteen sekoittunut kiinto- ja kelta-aines. Tutkimusalueeni sisäpuolelle jäi useita muitakin matalia lahtia, joissa satelliitin sensorit ovat voineet tulkita merenpohjan, merenpohjan kasvillisuuden tai veteen sekoittuneen aineksen virheellisesti suuriksi klorofylliarvoiksi.

### 3.2.2 Kuvien visualisointi ja päällekkäisanalyysi

ArcGis Pro:ssa muutin kuvien visualisoinnin stretch-muotoon ja valitsin visualisoinnin tyyppiä keskihajonnan (engl. *standard deviation*). Keskihajonta-klassifointimenetelmässä käyttäjä syöttää arvon (oletusarvona 1), jonka mukaan ohjelma käyttää lineaarista venytystä rasterikuvan arvojen välillä. Visualisointimenetelmä korostaa keskiarvon ylä- ja alapuolisia arvoja. Keskihajonta-klassifointi ei kuitenkaan välttämättä anna todenmukaisinta kuvaa alueen klorofyllipitoisuuksista, vaan se korostaa alueellisia eroja. Valitsin kyseisen visualisointimenetelmän, sillä se korostaa parhaimmin klorofyllipitoisuuksien alueellista vaihtelua ja vastaa täten tutkimuskysymykseeni.

Valitsin kartta-asetelmiin liukuvan väriskaalan, jota käytetään yleisesti klorofyllipitoisuuksien visualisoinnissa. Nelikenttäkartassa käytin kaikissa kartoissa samaa visualisointia vertailukelpoisuuden varmistamiseksi. Visualisoinnissa käytin keskihajontana yksikköä 1,5. Tein neljälle kuvalle myös päällekkäisanalyysin laskemalla raster calculator -työkalulla kuvien pikseleiden keskiarvot. Tämän tuloksena sain rasteritason, jossa näkyy neljän ajankohdan yleiset trendit

klorofyllipitoisuuksien alueellisessa jakautuneisuudessa. Muokkasin myös tämän kuvan visualisointia siten, että alueelliset erot näkyisivät mahdollisimman hyvin.

### 3.2.3 Tilastolliset menetelmät

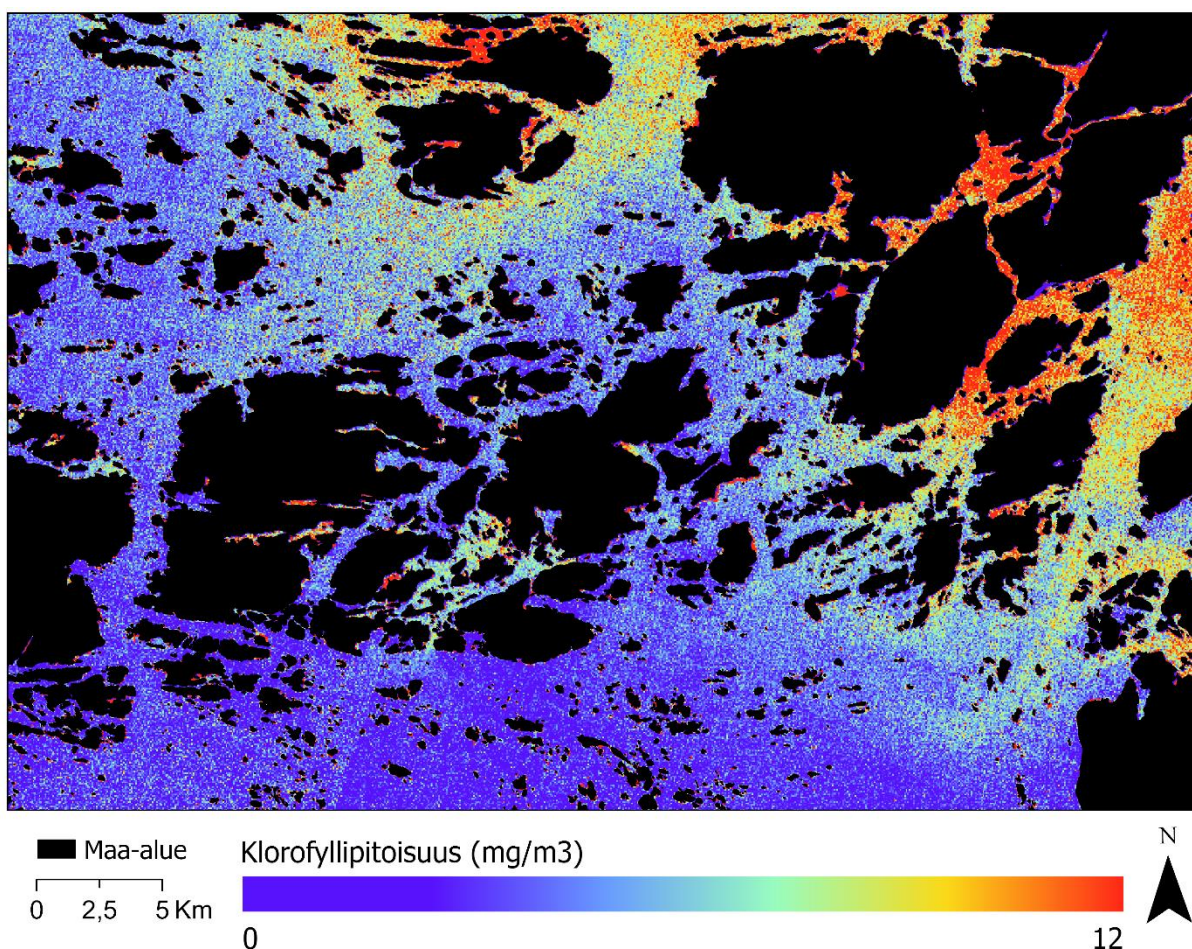
Käytin Hertasta ladattuja mittaushavaintoja korrelaatiotestiin sekä monimuuttujaregressioon. Testeissä käytettyjen 41 havaintopäivän vedenominaisuustiedot ovat vuosilta 2022–2024 maaliskuu-lokakuun ajalta. Testeissä käytettävät muuttujat olivat a-klorofylli, veden lämpötila, näkösyvyys, kokonaisfosfori ja kokonaistyyppi. Suoritin tällä aineistolla IBM SPSS Statistics -laskentaohjelmistossa Pearsonin korrelaatiotestin. Tällä testillä selvitin klorofyllin sekä muiden valitsemiini muuttujien välistä korrelaatiota ja tilastollista merkitsevyyttä. Lisäksi tein ohjelmalla monimuuttujaregression, jossa asetin riippuvaiseksi muuttujaksi a-klorofyllin ja riippumattomiksi muuttujiksi veden lämpötilan, näkösyvyyden, kokonaisfosforin sekä kokonaistyyppin.

## 4 Tulokset

### 4.1 Alueellinen vaihtelu

#### 4.1.1 Yleiset trendit kasvukaudella

Päällekkäisanalyysin avulla havaitaan tutkimusalueella ilmeneviä yleisiä trendejä klorofyllipitoisuuksien alueellisessa vaihtelussa kasvukaudella 2022 (kuva 2). Päällekkäisanalyysin perusteella yleinen trendi on, että suurimmat klorofyllipitoisuudet ovat tutkimusalueen pohjois-, koillis- ja itäosissa. Kyseiset alueet ovat keskimääräisesti matalampia merialueita ja ne sijaitsevat lähempänä mannerta. Saarten välisissä kapeikoissa, salmissa ja lahdissa on suurimpia arvoja. Kaikista matalimmat arvot ovat tutkimusalueen keski-, etelä- ja länsiosissa. Nämä alueet ovat keskimääräisesti syvempiä avomerialueita, joilla tuulen vaikutus on todennäköisesti suurempi. Alueet sijaitsevat myös kauempana mantereesta.



Kuva 2. Vuoden 2022 valittujen neljän satelliittikuvan päällekkäisanalyysin tulos, jossa pikselien arvot on laskettu kuvien pikselien keskiarvona (SYKE 2025).

Suurimpia klorofylliarvoja on Airismaata ja Aaslaluotoa ympäröivillä merialueilla sekä erityisesti saarten välisissä kapeikoissa ja lahdissa (kuva 2). Suuria arvoja on Paraisten kaakkoispuolella Iso-Tervon, Lemlahdensaaren ja Mielisholmenin välisissä salmissa. Suurilla väylillä ja merialueilla, kuten Omenaistenaukolla, Airistolla, Sanviikinselkällä sekä Peimarilla arvot ovat hieman matalampia, mutta erottuvat kuitenkin selkeästi nolla-arvoista. Myös Nauvon saaristossa Högsaran, Lillandetin ja Kirjaisten väliin jäävillä merialueilla on matalia arvoja. Sinisimmät alueet eli ”nolla-arvot” sijaitsevat tutkimusalueen eteläpuolisilla avoimilla merialueilla. Myös tutkimusalueen itäisillä merialueilla Korppoon eteläpuolella klorofyllipitoisuudet ovat pääsääntöisesti pieniä.

#### 4.1.2 Alueelliset muutokset eri ajankohtina

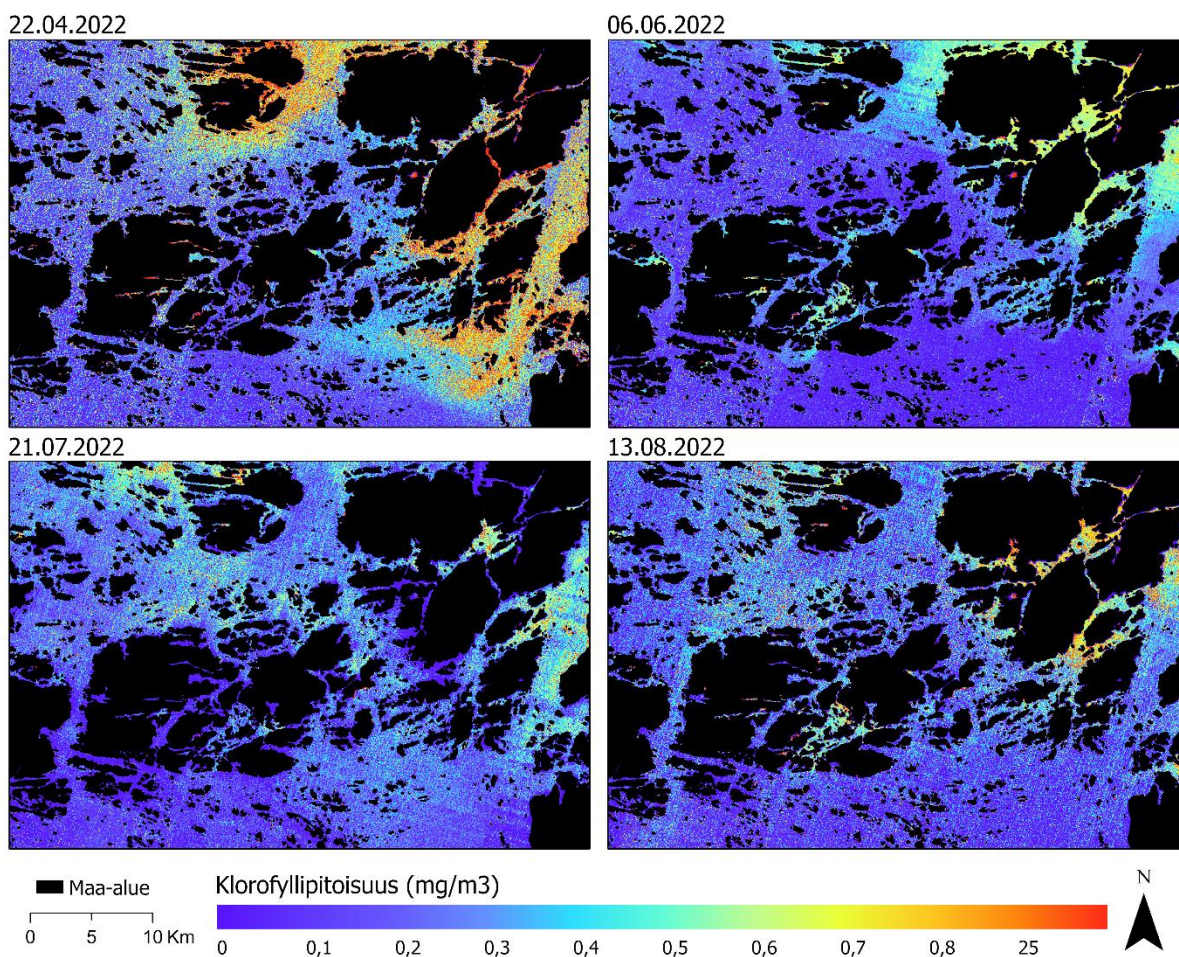
Huhtikuussa klorofyllipitoisuudet ovat vuoden 2022 kasvukaudella suurimmillaan (kuva 3). Klorofyllipitoisuudet, joista voidaan puhua myös levälauttoina, sijoittuvat voimakkaimmin tutkimusalueen pohjoisosaan Aaslaluodon ja Airismaan läheisyyteen sekä Ålönsaaren pohjoispuolelle. Suuria pitoisuuksia on myös Lemlahdensaaren, Iso-Tervon ja Mielisholmin väliin jäävissä kapeissa salmissa. Peimarilla ja Sanviikinselällä havaitaan yli 20 kilometrin mittainen, koillis-lounas-suuntainen levälautta. Suuret pitoisuudet jatkuvat aina Kemiönsaaren Dragsfjärdenin edustalle. Suuria klorofyllipitoisuuksia on myös Attun kaakkois- ja eteläpuolella. Nolla-arvoja on tutkimusalueen etelä- ja länsialueilla avomerialueilla sekä kuvan keskiosissa Nauvon saaristossa.

Kesäkuussa klorofylliarvot ovat matalampia ja leväesiintymät ovat paikallisempia kuin huhtikuussa (kuva 3). Aaslaluoto-Airismaan leväesiintymät ovat pienentyneet ja keskittyneet Iso-Maisaaren ympärille sekä Airiston eteläpään. Suurimmat pitoisuudet ovat keskittyneet Paraisten Ålönsaaren itä- ja pohjoispuolelle sekä Kirjalansaaren, Lielahdensaaren, Lemlahdensaaren ja Iso-Tervon välisiin kapeisiin salmiin. Myös Sanviikinselällä havaitaan leväesiintymä, joka on laajuudeltaan tosin enää vain noin kolmasosa huhtikuun esiintymästä. Matalia arvoja on Nauvon Lillandetin, Högsaron ja Kirjaisen välisillä vesialueilla. Avomerialueilla on hyvin matalia arvoja. Kokonaisuudessaan leväesiintymät ovat paikallisempia ja alueellisesti selkeämmin jakautuneita kuin huhtikuussa.

Heinäkuussa saaristossa ei ole havaittavissa yhtä selkeitä klorofylliesiintymiä kuin aiemmin kasvukaudella ja suuret arvot ovat hajautuneet laajemmalle alueelle (kuva 3). Merkittävänä erona aiempiin kuukausiin verrattaessa on Nauvon ja Paraisten rannikkoalueiden hyvin matalat arvot. Klorofyllipitoisuudet ovat jakautuneet laajemmin merialueilla, kuten Omenaistenaukolla

ja sen luoteispuolella sekä Seilin itäpuolella. Suurempia arvoja on Paraisten Älönsaaren länsipuolella Kirkkoselällä sekä Peimarilla ja Sanviikinselällä.

Elokuussa klorofyllipitoisuuksissa havaitaan kesä- ja heinäkuuta suurempia ja paikallisempia arvoja (kuva 3). Klorofyllipitoisuudet ovat heinäkuun tapaan alueellisesti hajautuneempia kuin kesäkuussa. Arvoissa on havaittavissa myös paikallisia, suurien pitoisuuksien esiintymiä erityisesti lähempänä mannerta. Elokuussa tutkimusalueella korostuu erityisesti Älönsaaren länsi- ja eteläpuoliset kapeat salmet sekä Iso-Tervon ja Attun väliset salmet. Myös Nauvon Lillandetin lounaispuolen suojaisten saaristoalueen suuremmat arvot korostuvat ympäröivistä merialueista. Koko Korppoo-Nauvo-Parainen-saaristoketjun eteläpuolisella merialueella arvot ovat hyvin alhaisia.



Kuva 3. A-klorofyllipitoisuudet (mg/m<sup>3</sup>) neljänä eri kasvukauden ajankohtana Saaristomerellä vuonna 2022 (SYKE 2025).

## 4.2 Ajalliset muutokset

Neljältä ajanhetkeltä otettujen satelliittikuvien välillä on havaittavissa vaihtelua klorofyllipitoisuuksien alueellisessa sekä ajallisessa jakautumisessa tutkimusalueella (kuva 3). Pitoisuudet vaihtelevat absoluuttisilta arvoiltaan vain vähän neljän satelliittikuvan välillä. Kuvasarjan suurimmat klorofyllipitoisuudet ovat huhtikuussa, jonka jälkeen pitoisuudet ovat yleisesti ottaen matalampia, mutta vaihtelevat alueellisesti.

Suurin muutos absoluuttisissa arvoissa havaitaan huhtikuun ja kesäkuun välillä (taulukko 4). Huhtikuun keskiarvo on suurin kaikista tarkastelluista ajankohdista ja se laskee 42 % (-0,116 mg/m<sup>3</sup>) kesäkuuhun mennessä. Mediaani laskee 47 % (-0,095 mg/m<sup>3</sup>). Keskihajonta laskee 26 % (-0,105 mg/m<sup>3</sup>). Keskihajonnan pieneneminen voi tarkoittaa sitä, että arvot ovat kesäkuussa lähempänä sen kuun keskiarvoa ja täten vähemmän hajautuneita. Huhtikuun suuri keskihajonta voi johtua suuremmista ääriarvoista ja suuremmasta hajautuneisuudesta keskiarvon ympärillä. Tätä päätelmää tukee pitoisuuksien maksimi-arvo, joka pienenee huhtikuun ja kesäkuun välillä.

Kesä- ja heinäkuun välillä keskiarvo laskee, mutta muutos on vähäistä (0,003 mg/m<sup>3</sup>) (taulukko 4). Mediaani nousee 0,040 mg/m<sup>3</sup> ja keskihajonta laskee -0,074 mg/m<sup>3</sup>. Keskihajonnan pieneneminen voi viitata arvojen tasaisempaan jakautumiseen ja siihen, että ääriarvojen määrä on pienentynyt. Keskiarvon ja mediaanin suureneminen viittaa suurempiin klorofylliarvoihin. Tämä voi tarkoittaa, että heinäkuussa klorofyllipitoisuudet ovat suurentuneet, mutta jotkin arvoista ovat suurentuneet vain vähän tai pysyneet ennallaan, jolloin muutos ei näy keskiarvossa.

Taulukko 4. Prosessoiduista satelliittikuvista laskettujen a-klorofyllipitoisuuksien (mg/m<sup>3</sup>) tilastolliset tunnusluvut sekä ajankohtien välisen muutoksen vertailu.

| Kuvan otto-<br>ajankohta       | Mak-<br>simi | Keski-<br>arvo | Medi-<br>aani | Keski-<br>hajonta | Keskiarvo,<br>muutos | Mediaani,<br>muutos | Keskihajonta,<br>muutos |
|--------------------------------|--------------|----------------|---------------|-------------------|----------------------|---------------------|-------------------------|
| <b>22.4.2022</b>               | 27,892       | 0,279          | 0,203         | 0,403             | -                    | -                   | -                       |
| <b>6.6.2022</b>                | 26,023       | 0,163          | 0,109         | 0,298             | -0,116               | -0,095              | -0,105                  |
| <b>21.7.2022</b>               | 27,738       | 0,166          | 0,148         | 0,224             | 0,003                | 0,040               | -0,074                  |
| <b>13.8.2022</b>               | 25,441       | 0,187          | 0,130         | 0,338             | 0,021                | -0,018              | 0,113                   |
| <b>Muutos (22.4-<br/>13.8)</b> |              |                |               |                   | -0,092               | -0,073              | -0,066                  |

Heinä- ja elokuun välinen muutos on kesä-heinäkuun muutosta suurempaa (taulukko 4). Keskiarvo ja keskihajonta nousevat, kun taas mediaani laskee. Keskiarvo nousee heinäkuusta 0,021 mg/m<sup>3</sup> ja mediaani pienenee -0,018 mg/m<sup>3</sup>. Keskihajonta nousee 0,113 mg/m<sup>3</sup>, mikä voi tarkoittaa ääriarvojen määrän lisääntymistä ja hajautuneempia arvoja. Keskiarvon nousu voi selittyä ääriarvojen määrän kasvulla, mikä ei kuitenkaan vaikuta mediaania nostavalla tavalla.

Ensimmäisen kuvan huhtikuussa ja viimeisen kuvan elokuussa välillä muutosta tapahtuu keskiarvon suhteen -0,092 mg/m<sup>3</sup>, mediaanin muutos on -0,073 mg/m<sup>3</sup> ja keskihajonnan muutos on -0,066 mg/m<sup>3</sup> (taulukko 4). Keskiarvo ja mediaani laskevat merkittävästi, mutta myös keskihajonta vähenee. Klorofylliarvot laskevat koko tarkasteluajanjaksolla ja ovat alhaisempia kasvukauden loppupuolella elokuussa kuin kasvukauden alussa huhtikuussa. Keskihajonnan väheneminen voi tarkoittaa ääriarvojen määrän vähentymistä huhti- ja elokuun välillä.

### 4.3 Tilastollisten analyysien tulokset

#### 4.3.1 Mittausaseman ja satelliittikuvan arvojen vertailu

Klorofyllipitoisuudet vaihtelevat vuoden 2022 kasvukaudella tarkasteltuina neljänä ajankohdantana kummallakin menetelmällä mitattuna (taulukko 5). Pitoisuudet ovat korkeimmillaan huhtikuussa, jonka jälkeen ne laskevat kummassakin aineistossa alimmilleen kesäkuuhun mennessä. Heinäkuussa arvot suurenevat ja elokuussa jälleen pienenevät, mutta eivät laske yhtä alas kuin kesäkuussa.

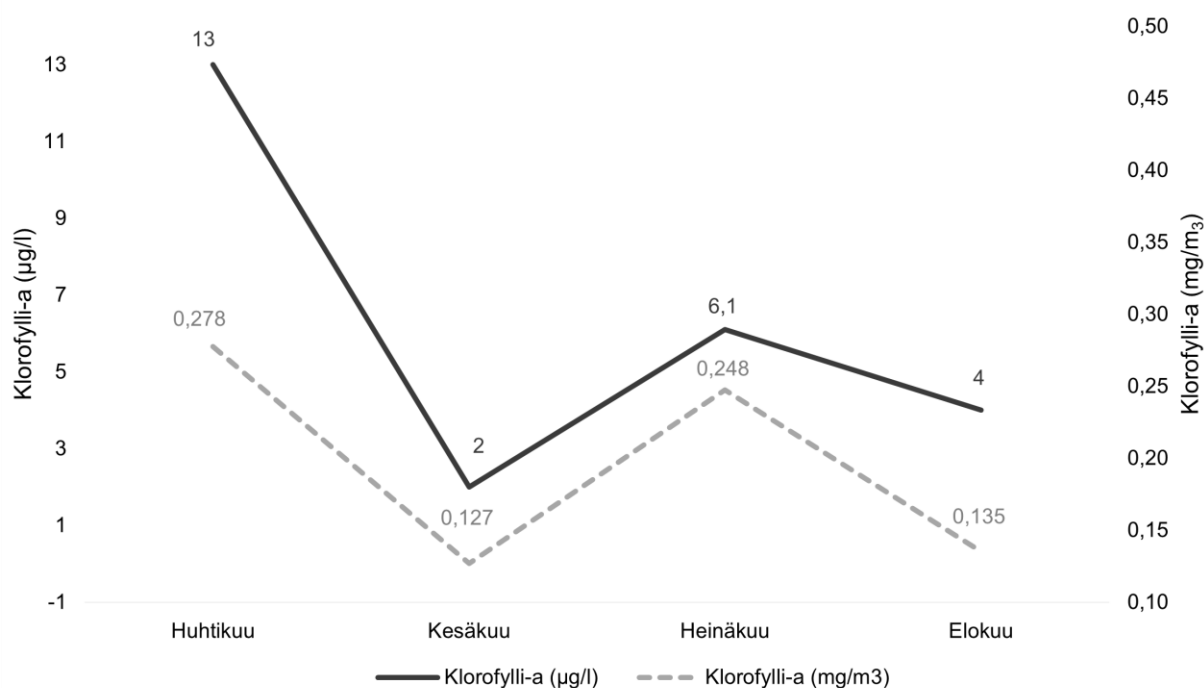
Taulukko 5. Seilin mittausasemalta mitatun Hertta-vedenlaatudatan (a-klorofylli µg/l) ja satelliittikuvasta laskettujen klorofyllipitoisuuksien (a-klorofylli mg/m<sup>3</sup>) vertailu. Satelliittikuvasta laskettu keskiarvo on 3x3 pikselin kokoiselta alueelta mittausaseman ympäriltä. Mittasuureet µg/l ja mg/m<sup>3</sup> ovat suoraan verrattavissa keskenään.

| Hertta-vedenlaatudata      |                     | Satelliittikuvan arvot |                                   | Absoluuttinen ero | Suhteellinen ero (%) |
|----------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------|----------------------|
| Mittauksen pvm.            | Klorofylli-a (µg/l) | Kuvanotto-pvm.         | Klorofylli-a (mg/m <sup>3</sup> ) |                   |                      |
| 19.4.2022                  | 13                  | 22.4.2022              | 0,278                             | 12,7              | 97,9                 |
| 8.6.2022                   | 2                   | 6.6.2022               | 0,127                             | 1,9               | 93,6                 |
| 25.7.2022                  | 6,1                 | 21.7.2022              | 0,248                             | 5,9               | 95,9                 |
| 18.8.2022                  | 4                   | 13.8.2022              | 0,135                             | 3,9               | 96,6                 |
| <b>Keskiarvo</b>           | 6,3                 |                        | 0,197                             | 6,1               | 96,0                 |
| <b>Vaihtelu (yksikköä)</b> | 11                  |                        | 0,151                             |                   | 4,2                  |

Seilin mittausasemalta kerättyjen klorofylliarvojen ja satelliittikuvista laskettujen pikseleiden keskiarvot poikkeavat merkittävästi toisistaan (taulukko 5). Näiden kahden tietosarjan väliset absoluuttiset erot ovat 1,9–12,7 yksikön verran. Eri menetelmin tuotetut datat eroavat suhteellisesti paljon toisistaan, noin 96 % verran. Satelliittikuvasta lasketut klorofyllipitoisuudet ovat siis keskimäärin 96 % pienempiä kuin mittausaseman tulokset.

Myös yksittäisen tietosarjan sisällä klorofyllipitoisuudet vaihtelevat: mittausaseman klorofylliarvot vaihtelevat neljän ajankohdan välillä 2–13  $\mu\text{g/l}$ , eli vaihtelua on 11 yksikön verran ja neljän ajanhetken pitoisuuksien keskiarvo on 6,3  $\mu\text{g/l}$ . Satelliittikuvista mittausaseman ympäristöstä laskettujen pikseleiden klorofylliarvojen vaihteluväli on 0,135–0,278  $\text{mg/m}^3$ , josta vaihtelu on 0,151 yksikön verran ja keskiarvo 0,197  $\text{mg/m}^3$ .

Eri menetelmin tuotettujen aineistojen välinen korrelaatiokerroin on 0,88, joka kertoo suuresta positiivisesta korrelaatiosta datojen välillä. Pitoisuudet aineistojen välillä eroavat absoluuttisina lukuina suuresti toisistaan, mutta pitoisuudet vähenevät ja suurenevat kuukausien välillä samansuuntaisesti (kuva 4). Aineistojen klorofyllipitoisuuksien väliset erot ovat suuria, mutta samansuuntaisia.



Kuva 4. Hertasta ladattujen klorofyllipitoisuuksien (klorofylli-a  $\mu\text{g/l}$ ) ja satelliittikuvasta Seilin mittausaseman ympäristöstä (3x3 alueelta) laskettujen klorofyllipitoisuuksien (klorofylli-a  $\text{mg/m}^3$ ) vertailu. Mittasuureet  $\mu\text{g/l}$  ja  $\text{mg/m}^3$  ovat yhtä suuret eli suoraan verrattavissa keskenään, mutta ne on eritelty kuvassa erillisiksi y-akseleiksi samansuuntaisen muutoksen korostamiseksi.

#### 4.3.2 Vedenominaisuuksien yhteys klorofyllipitoisuuksiin

Seilin mittausaseman klorofylliarvot vaihtelevat 5,3 µg/l verran keskiarvosta 6,5 µg/l ajanjaksoilla 2022–2024 (taulukko 6). Veden lämpötila vaihtelee noin 7:n °C verran keskiarvosta 11,7 °C. Fosforin keskihajonta on 7,7 µg/l keskiarvosta 20 µg/l ja typen keskihajonta 54 µg/l keskiarvosta 326 µg/l. Näkösyvyys vaihtelee 2,6 metrin keskiarvosta noin metrin verran.

Taulukko 6. Tilastolliset tunnusluvut Seilin mittausaseman havainnoista 2022–2024 (N=41).

|                        | Keskiarvo | Keskihajonta |
|------------------------|-----------|--------------|
| Klorofylli-a (µg/l)    | 6,476     | 5,2577       |
| Lämpötila (°C)         | 11,683    | 7,1596       |
| Näkösyvyys (m)         | 2,649     | 0,9266       |
| Kokonaisfosfori (µg/l) | 19,95     | 7,652        |
| Kokonaistyyppi (µg/l)  | 326,1     | 54,078       |

A-klorofylli korreloi merkitsevästi lämpötilan, näkösyvyyden sekä fosforin kanssa (taulukko 7). Vahvin klorofyllin kanssa korreloiva muuttuja on fosfori (,750), jonka korrelaatio on positiivinen ja merkitsevä ( $p < ,001$ ). Toiseksi vahvin korreloiva muuttuja on negatiivisesti korreloiva lämpötila (-,570), joka on tilastollisesti merkitsevä ( $p < ,001$ ). Kolmanneksi vahvin ja negatiivisesti korreloiva muuttuja on näkösyvyys (-,379), joka on tilastollisesti merkitsevä ( $p = 0,015$ ). Typen ja klorofyllin välillä havaitaan ei-merkitsevä, heikko ja positiivinen korrelaatio (0,255).

Taulukko 7. Pearsonin korrelaatiotesti vuosien 2022–2024 vedenlaatumittauksista Seilistä (N=41).

|                        |         | Klorofylli-a (µg/l) | Lämpötila (°C) | Näkösyvyys (m) | Kokonaisfosfori (µg/l) | Kokonaistyyppi (µg/l) |
|------------------------|---------|---------------------|----------------|----------------|------------------------|-----------------------|
| Klorofylli-a (µg/l)    | Pearson | 1                   | -,570**        | -,379*         | ,750**                 | 0,255                 |
|                        | Sig.    |                     | <,001          | 0,015          | <,001                  | 0,108                 |
| Lämpötila (°C)         | Pearson | -,570**             | 1              | -0,236         | -,723**                | -0,272                |
|                        | Sig.    | <,001               |                | 0,137          | <,001                  | 0,086                 |
| Näkösyvyys (m)         | Pearson | -,379*              | -0,236         | 1              | -0,251                 | -0,307                |
|                        | Sig.    | 0,015               | 0,137          |                | 0,113                  | 0,051                 |
| Kokonaisfosfori (µg/l) | Pearson | ,750**              | -,723**        | -0,251         | 1                      | ,323*                 |
|                        | Sig.    | <,001               | <,001          | 0,113          |                        | 0,039                 |
| Kokonaistyyppi (µg/l)  | Pearson | 0,255               | -0,272         | -0,307         | ,323*                  | 1                     |
|                        | Sig.    | 0,108               | 0,086          | 0,051          | 0,039                  |                       |

**Huomioi: \*\*Korrelaatio on merkitsevä tasolla 0,01 (kaksisuuntainen / 2-tailed). \*Korrelaatio on merkitsevä tasolla 0,05 (kaksisuuntainen / 2-tailed). N=41**

Kuten korrelaatiotestissä kävi ilmi, typpi ei tämän aineiston perusteella ole klorofylliä selittävä, tilastollisesti merkitsevä muuttuja ( $p > 0,05$ ). Alkuperäisen monimuuttujaregression lisäksi suoritin toisen analyysin, jossa käytin muuttujina ainoastaan lämpötilaa, näkösyvyyttä ja fosforia.  $R^2$ -luvun mukaan kummassakin mallissa käytetyt muuttujat selittävät noin 65 % klorofyllin vaihtelusta (taulukko 8). Korjattu  $R^2$ -luku (engl. *adjusted R square*) ottaa huomioon regressioanalyysissä käytettyjen muuttujien määrän ja korjaa  $R^2$ -lukua sen mukaan. Kummankin mallin yhtä suuri korjattu  $R^2$ -luku (0,617) kertoo siitä, ettei typen poistaminen muuta selitystasetta. Molemmat mallit ovat siis käyttökelpoisia selittämään klorofyllin vaihtelua.

Estimaatin keskivirhe (engl. *standard error of the estimate*) kertoo havaittujen arvojen hajonnan suhteessa ennustettuihin arvoihin (taulukko 8). Kummassakin mallissa estimaatin keskivirhe on alhainen, eli klorofylli vaihtelee ennustetuista arvoista noin 3,3 yksikköä. Kumpikin malli on siis melko tarkka klorofyllin määrän ennustamisessa. F-testin mukaan kummassakin mallissa on edes jokin muuttuja, joka selittää klorofyllin vaihtelua. Malli 1:sen (17,1) ja malli 2:sen (22,5) ero indikoi sitä, että malli 2 olisi sopivampi klorofyllin ennustamisessa. F-luvun p-arvo ( $<,001$ ) ilmaisee sitä, että kumpikin malli on tilastollisesti merkitsevä ja mallien muuttujat selittävät tilastollisesti merkitsevästi klorofyllin vaihtelua.

Taulukko 8. Kahden regressiomallin vertailu. Malli 1:ssä riippumattomina muuttujina ovat lämpötila, näkösyvyys, fosfori ja typpi. Malli 2:ssa typpi on otettu muuttujista pois (N=41).

|                                       | <b>Malli 1</b> | <b>Malli 2</b> |
|---------------------------------------|----------------|----------------|
| <b><math>R^2</math></b>               | 0,655          | 0,645          |
| <b>Korjattu <math>R^2</math>-luku</b> | 0,617          | 0,617          |
| <b>Estimaatin keskivirhe</b>          | 3,2539         | 3,255          |
| <b>F-testi</b>                        | 17,109         | 22,453         |
| <b>F-testin p-arvo (Sig.)</b>         | $<,001$        | $<,001$        |

Kerroin-taulukossa näkyy klorofylliarvon vasteen määrä, kun jokin riippumaton muuttuja muuttuu yksikön verran muiden muuttujien pysyessä samana (taulukko 9). Alkuperäisessä mallissa tilastollisesti merkittävin muuttuja on näkösyvyys, jolla on klorofylliin negatiivinen vaikutus. Näkösyvyyden kasvaessa metrillä klorofyllin määrä vähenee 2,423 yksikköä. Toiseksi merkitsevin muuttuja on lämpötila, jolla on negatiivinen vaikutus klorofyllin määrään. Jokaista kohoavaa lämpöastetta kohden klorofyllin määrä vähenee 0,324 yksikköä. Fosforin määrän kasvaessa myös klorofylli kasvaa 0,248 yksikköä, eli fosforilla on positiivinen vaste klorofylliin. Fosfori on tilastollisen merkitsevyyden rajalla ja typpi ei ole testissä tilastollisesti merkitsevä. Malli 1:ssä klorofyllin lähtöarvo on 15,3 ( $\mu\text{g/l}$ ), kun kaikki muuttujat saavat arvon 0.

Kun tyyppi otetaan riippumattomista muuttujista pois, mallin kertoimet muuttuvat hieman (taulukko 9). Lämpötilan vaste on pienempi kuin alkuperäisessä mallissa (-0,284). Myös näkösyvyyden vaste on pienempi (-2,133). Fosforin vaste klorofylliin on puolestaan suurempi kuin alkuperäisessä mallissa (0,259). Malli 2:ssä klorofyllin lähtöarvo on 10,3 ( $\mu\text{g/l}$ ), kun kaikki muuttujat saavat arvon 0.

Taulukko 9. Klorofyllin ja vedenominaisuuksien kertoimet eri regressiomallien mukaan (N=41).

| <b>Malli 1</b>   | <b>B</b> | <b>Std. Error</b> | <b>t</b> | <b>Sig.</b> |
|--|----------|-------------------|----------|-------------|
| <b>(Constant)</b>  | 15,292   | 7,306             | 2,093    | 0,043       |
| <b>Lämpötila °C</b>  | -0,324   | 0,139             | -2,335   | 0,025       |
| <b>Näkösyvyys (m)</b>  | -2,423   | 0,788             | -3,074   | 0,004       |
| <b>Kokonaisfosfori (<math>\mu\text{g/l}</math>)</b>                              | 0,248    | 0,125             | 1,979    | 0,056       |
| <b>Kokonaistyyppi (<math>\mu\text{g/l}</math>)</b>                               | -0,011   | 0,011             | -1,013   | 0,318       |
|  |          |                   |          |             |
| <b>Malli 2</b>   | <b>B</b> | <b>Std. Error</b> | <b>t</b> | <b>Sig.</b> |
| <b>(Constant)</b>  | 10,287   | 5,385             | 1,91     | 0,064       |
| <b>Lämpötila °C</b>  | -0,284   | 0,133             | -2,135   | 0,039       |
| <b>Näkösyvyys (m)</b>  | -2,133   | 0,735             | -2,904   | 0,006       |
| <b>Kokonaisfosfori (<math>\mu\text{g/l}</math>)</b>                              | 0,259    | 0,125             | 2,068    | 0,046       |
| <b>Huomioi: Riippuvainen muuttuja: Klorofylli-a (<math>\mu\text{g/l}</math>)</b> |          |                   |          |             |

## 5 Keskustelu

### 5.1 Klorofyllin kaukokartoitus

Klorofyllipitoisuudet vaihtelevat tulosteni perusteella sekä ajallisesti että alueellisesti vuoden 2022 kasvukauden aikana rajaamalla alueella Saaristomerellä. Ajallisessa tarkastelussa havaitaan suuria klorofyllipitoisuuksia kasvukauden alussa huhtikuussa, jonka jälkeen pitoisuudet vähenevät moninkertaisesti. C2RCC-prosessorilla saamani klorofylliarvojen koko vaihteluväli on noin 0–27 mg/m<sup>3</sup> ja suurin osa arvoista on alle 0,5 mg/m<sup>3</sup>. Seilin mittausaseman *in situ* -tuloksiin verrattuna prosessorin tarkkuus on heikko, mutta suhteellisesti erot kuukausien välillä ovat samansuuntaisia. Tuloksiani kasvukauden aikaisesta vaihtelusta tukevat aiemmin aiheesta tehdyt tutkimukset.

Aiemmat tutkimukset osoittavat kasviplanktonin vuodenaikaisen syklisyyden, jonka mukaan pitoisuudet ovat Itämerellä korkeimmillaan keväällä ja kesällä (Zhang ym. 2017; Kahru ym. 2016). Klorofyllipitoisuudet Itämerellä vaihtelevat merkittävästi vuodenaikojen mukaan kevät-kukinnoista (10–120 µg/l) kesän minimiin (1–3 µg/l) (Attila ym. 2013). Heinä-elokuussa pintavedessä kelluvat syanobakteerit kukkivat säännöllisesti, joiden aikana a-klorofyllipitoisuudet vaihtelevat välillä 5–30 µg/l. Perinteisen käsityksen mukaan kevätkukinnat alkavat valon määrän lisääntyessä ja tuulen aiheuttaman sekoittumisen vähentyessä (Boss & Behrenfeld 2010). Pohjois-Atlantilla tehdyissä tutkimuksissa on kuitenkin huomattu, että kasviplanktonin kasvu alkaa jo talvella ja pelkästään valon määrän lisääntyminen ei johda kukintojen muodostumiseen (Boss & Behrenfeld 2010).

Stramskan ja Jakackin (2024) tutkimuksessa on osoitettu, etteivät klassiset mallit klorofyllipitoisuuksien kausittaisesta syklisyydestä päde Itämerellä. Heidän tutkimuksensa mukaan klorofyllipitoisuudet pysyvät suurina kesäkuukausienkin ajan ravinteiden niukkuudesta huolimatta. Tätä on selitetty jatkuvalla ravinnevalumalla maalta jokia pitkin sekä kasviplanktoneilla, jotka kykenevät selviytymään vähäravinteisessä ympäristössä. Omissa tuloksissani näkyy kukintojen moninkertainen pieneneminen kevään levämaksimin jälkeen niin satelliittikuvissa kuin mittaustuloksissakin (taulukko 5). Pitoisuudet laskevat noin 15–45 % kevätmaksimista ja pitoisuudet suurenevat uudelleen kesän lopulla. Tarkastelemani yksittäiset neljä ajanhetkeä vuodelta 2022 yhdeltä mittausasemalta Saaristomerellä eivät kuitenkaan riitä luotettavien johtopäätösten tekemiseen kasviplanktonkukintojen vuosittaisesta tai edes kasvukauden aikaisesta vaihtelusta.

Klorofylliarvojen alueellisessa vaihtelussa on nähtävissä toistuvia trendejä. Alueilla, joissa klorofyllipitoisuudet ovat suuria, näyttäisi olevan yhteistä läheisyys mantereeseen, keskimääräisesti matalampi vedensyvyys sekä suojaisa sijainti. Suuria klorofylliarvoja on kapeikoissa, salmissa ja lahdissa sekä saarten ympäröimillä suojaisilla merialueilla. Matalimmat arvot sijaitsevat tutkimusalueen etelä- ja itäpuolilla avonaisemmilla merialueilla, joissa myös keskimääräinen vedensyvyys on suurempi. Avomerialueiden vähäisiin pitoisuuksiin voivat vaikuttaa myös tuuli- ja virtausolosuhteet. Samankaltaisia huomioita on tehty German Bight -nimisessä poukassa Pohjanmerellä, jossa rannikkoalueiden klorofyllipitoisuudet ovat suuria ja avomerialueiden pienempiä (Amorim ym. 2024).

Klorofyllipitoisuuksien spatiaalista vyöhykkeisyyttä voivat selittää tuuliolosuhteet, kuten tuulen suunta ja sen vaikutus veden virtaukseen (Amorim ym. 2024). Saaristomerellä mitatut klorofyllipitoisuudet ovat yleispiirteittäin suurempia lähellä mannerta ja pienimpiä väli- ja ulkosaaristossa (Suominen ym. 2010). Nämä havainnot klorofyllipitoisuuksista suhteessa rannikon ja saariston muotoihin tukevat tuloksiani. Sitä, missä määrin etäisyys mantereesta, veden syvyys tai tuuli- ja virtausolosuhteet vaikuttavat saatuihin tuloksiin, ei voida kuitenkaan näillä tuloksilla todeta.

Yhdessä tutkimuksessa klorofyllin laskemiseksi kaukokartoitusaineistosta oli käytetty kolmea MERIS Case II -prosessoria, jotka oli optimoitu Pohjois-Itämeren olosuhteisiin (Attila ym. 2013). Tutkimuksessa eri prosessoreilla laskettuja pitoisuuksia verrattiin *in situ* -mittauksiin. A-klorofyllin arvioinnin tarkkuus oli heikko kaikilla käytetyillä prosessoreilla ja tarkkuus heikkeni kevään ja kesän leväkukintojen aikana. Yhden käytetyn prosessorin klorofyllipitoisuuksien vaihtelu oli välillä 0,45–0,47. Nämä tulokset ovat samankaltaisia tässä tutkielmassa saatuihin tuloksiin nähden. Kasviplanktonin biomassa Itämerellä on tyypillisesti vähäinen ja klorofyllipitoisuudet ovat alle  $2 \text{ mg/m}^3$  Perämeren ja Kattegatin alueilla, kun taas suuremmat pitoisuudet (yli  $20 \text{ mg/m}^3$ ) ovat tavallisia rannikkolaguuneissa (Zhang ym. 2017).

Satelliittikuvien tulosten luotettavuutta voi heikentää Itämerelle ominainen kiintoainepitoisuus vedessä. Itämeren alueen satelliittikuvien analysoinnissa on usein virheellisesti tulkittu vedessä näkyvää kelta-ainesta runsaaksi perustuotannoksi ja suuriksi klorofylliarvoiksi (Myrberg ym. 2006). Värillinen veteen liuennut orgaaninen aines (CDOM) vaikuttaa perustuotantoon meriympäristöissä sen fotosynteettisesti aktiivisen säteilyn (PAR) absorptiovaikutuksen vuoksi (Neumann ym. 2021). CDOM on rannikkoalueilla pääsääntöisesti peräisin mantereelta ja vaikuttaa valon absorption alueelliseen ja ajalliseen vaihteluun, mikä on huomioitava meren

biogeokemiallisissa malleissa. Veteen sekoittuneet materiaalit voivat vaikuttaa satelliitin havaitsemaan signaaliin ja sameilta vesialueilta lasketut klorofyllipitoisuudet eivät välttämättä ole tarkkoja (Zhang ym. 2017). Yleensä klorofylliä mittaavat algoritmit yliarvioivat klorofyllipitoisuuksia Itämerellä noin 40–100 % veteen sekoittuneen kiintoaineen vuoksi (Pierson ym. 2008). CDOM:n vaikutus satelliittikuvan havaitsemiin veden optisiin ominaisuuksiin voi näiden tutkimusten valossa selittää näennäisesti suuria klorofyllipitoisuuksia tutkimusalueen koillisosissa lähellä mannerta.

Tulosten tarkkuuteen voi lisäksi vaikuttaa viive kuvien ottoajankohdan sekä mittausaseman näytteenoton välillä. Viive johtuu lähinnä siitä, että Lounais-Suomen rannikolla pilvettömien kuvien löytäminen on haastavaa. Seilin mittausasemalla mittauksia tehdään kasvukaudella noin kahden viikon välein. Olosuhteiden muutokset kuvien ja mittausten välillä vaikuttavat tulosten luotettavuuteen. Seuranta-asemien mittaustulosten käyttö validointitietona kaukokartoitustarkoituksiin on ongelmallista (Attila ym. 2013). Dynaamisissa rannikkovesissä veden ominaisuudet voivat muuttua voimakkaasti pienessä alueellisessa skaalassa ja satelliitin pikselikoko antaa keskiarvon näistä alueellisista muutoksista. Erityisesti klorofyllin kevätesiihtymien aikaan satelliittitietojen vertailua seuranta-asemien tuloksiin on tulkittava varoen.

## 5.2 Veden ominaisuuksien yhteys klorofylliin

Merten perustuotannon keskeisen indikaattorin a-klorofyllin (Boyce ym. 2010) tuotantoon vaikuttavat fotosynteettisesti aktiivisen säteilyn (PAR) saatavuus, veden lämpötila sekä ravinteet (Pallavi ym. 2024; Gasiūnaitė ym. 2005). Tulosteni mukaan a-klorofylli korreloi tarkastelemistani muuttujista merkitsevästi fosforin (.750), lämpötilan (-,570) ja näkösyvyyden (-,379) kanssa. Monimuuttujaregression mukaan näkösyvyys ja lämpötila ovat tilastollisesti merkittävimmät klorofyllin määrää selittävät muuttujat, kun tarkastellaan useiden muuttujien yhteisvaikutusta. Saamani tulokset ovat linjassa Itämeren rannikkoalueilla tehdyn tutkimuksen kanssa, jonka mukaan fosfori on merkittävin kasviplanktonin kasvua rajoittava tekijä ja se vastaa 65 % klorofyllin vaihtelusta (Wilas ym. 2016). Tutkijoiden käyttämän mallin mukaan klorofylli on dominoiva tekijä näkösyvyyden määrittelyssä ja se voi selittää 59 % näkösyvyyden vaihtelusta.

Klorofyllin ja lämpötilan välinen suhde on monimutkainen (Jacobsen & Markager 2016). Runsaravinteisessa ja säteilyltään riittävässä olosuhteissa a-klorofyllin määrä vähenee, kun veden lämpötila kasvaa liian suureksi. Vaste kuitenkin muuttuu, kun ravinteiden määrä on alhainen. Vähäravinteisissa olosuhteissa klorofyllin määrä vähenee, kun lämpötila laskee. Itämerellä teh-

tyjen mittausten perusteella lämpötila on merkittävin kasviplanktonyhteisöihin vaikuttava tekijä (Kudryavtseva ym. 2011). Omissa tuloksissani näkyy, että lämpötila on toiseksi vahvin klorofyllin kanssa korreloiva muuttuja. Tuloksiani lämpötilan negatiivisesta vaikutuksesta klorofyllipitoisuuksiin saattaa selittää valitut mittausajankohdat, joista suurin osa on otettu kasvukauden aikana. Veden lämpötilan suoran positiivisen vaikutuksen klorofyllipitoisuuksiin voivat korvata negatiiviset, epäsuorat vaikutukset ja muut tekijät, kuten ravinteiden saatavuus ja tuuliolosuhteet (Amorim ym. 2024).

Seilin mittausaseman mittaustulokset on otettu 1 metrin syvyydeltä lukuun ottamatta klorofyllipitoisuuksia, jotka on otettu vaihtelevasti 0,0–8,0 metristä. Sekä satelliittikuvien prosessointi että mittausaseman datan kerääminen voivat sisältää epäluottamustekijöitä. Eri menetelmien välinen vertailu on epäluotettavaa, mutta myös mittausaseman eri ajankohtien välinen datanvertailu saattaa sisältää virhelähteitä eriävien mittaussyvyyksien vuoksi.

Lisäksi datan luotettavuutta vähentää lyhyt datasarja. Klorofylliarvoissa on merkittävää vuotuista vaihtelua ja vaihteluun liittyy monia mahdollisia syy-seuraus-vuorovaikutuksia (Stramska & Jakacki 2024). Stramskan ja Jakackin (2024) tutkimuksessa havaintosarja vuosilta 2003–2017 todettiin liian lyhyeksi selvittämään, mitkä syy-seuraussuhteista ovat kaikista merkittävimmät klorofyllin kannalta. On siis selvää, että käyttämäni kolmen vuoden aikasarja on liian lyhyt yleispätevien johtopäätösten tekemiseksi.

### 5.3 Johtopäätökset ja jatkotutkimusmahdollisuudet

Tutkimusaineistoihin ja -menetelmiin liittyy useita virhelähteitä, jotka on hyvä huomioida tuloksia tulkittaessa. Satelliittikuvista C2RCC-prosessorilla lasketut klorofyllipitoisuudet olivat systemaattisesti moninkertaisesti Seilin mittausaseman havaintoja pienempiä. Satelliittikuvien ja näytteenoton klorofyllipitoisuuksien syvyydedustavuus sekä näytteenoton ja satelliitin yllennön välinen ajallinen viive heikentävät tulosten luotettavuutta. Satelliittikuva-arvojen systemaattiset erot *in situ* -mittauksiin verrattuina voivat johtua kuvien esikäsittelystä, kuten kanalien muuttamisesta 60 metrin resoluutioon tai C2RCC-prosessorin sopivuudesta Case II -tyyppisille merialueille. Myös prosessorissa käyttämäni parametrit voivat vaikuttaa lopputulokseen.

Lopullisen kuvan tulkintaa hankaloittavat veden optisten ominaisuuksien vaikutus satelliitin sensorin ottamaan kuvaan. Saaristomerellä kuvan optiikkaan vaikuttavia tekijöitä voivat olla kuvanottohetkellä vallitsevat tuuli- ja virtausolosuhteet, veteen sekoittuneet orgaaniset ja epä-

orgaaniset aineet, merenpohjan ja rantojen kasvillisuus sekä matalan veden aiheuttamat heijastumat. Tulosten tulkinnassa etenkin matalilla ranta-alueilla on tärkeää muistaa kuvien suuri pikselikoko ja muuta kuin klorofylliä heijastavat tekijät.

Klorofyllipitoisuuksien alueellisen esiintyvyyden sekä tarkasteltujen kemiallis-fysikaalisten muuttujien välisten suhteiden syvällisempään analysointiin ja johtopäätöksiä tekemiseen vaadittaisiin kattavampia aineistoja ja aluetietoa, kuin on mahdollista tämän tutkielman sallimissa rajoissa saada. Kasviplanktonesiintymien ajallista vaihtelua tutkittaessa lyhyt mittaustulosten aikasarja heikentää tulosten luotettavuutta, sillä klorofyllipitoisuudet vaihtelevat merkittävästi vuosittain sekä kasvukauden aikana (Stramska & Jakacki 2024). Kolmen vuoden ajalta noin kahden viikon välein mitatut vedenlaatutiedot ja niistä johdetut tulokset ovat siis vain suuntaa antavia.

Saaristomeri on ominaisuuksiltaan erityislaatuinen merialue, jossa klorofyllin kaukokartoituksen haasteena on muun muassa veteen sekoittunut materiaali sekä matalat merialueet. Leväku- kintojen kaukokartoitusmahdollisuuksia on tutkittu Itämerellä paljon, ja tätä varten on kehitetty Itämerelle omat leväalgoritmit (Myrberg ym. 2006). Klorofyllin luotettava kaukokartoitus on paikkakohtaista ja vaatii algoritmin tai mallin, joka on kehitetty kyseisen merialueen ominaisuudet huomioiden (Attila ym. 2013). Klorofylliä mittaavien prosessorien soveltuvuus riippuu paljon vesialueen optisista ominaisuuksista.

Maaailman rannikkoalueet kärsivät voimakkaista, ihmisen toiminnasta aiheutuvista ekologisista ja biologisista stressitekijöistä, kuten saastumisesta ja meriekosysteemien tuhoutumisesta (Vignudelli & Benveniste 2022). Avaruudesta tehtävät havainnot ja niitä tukevat *in situ* -mittaukset tarjoavat tarkkaa ja systemaattista informaatiota rannikoilla tapahtuvista prosesseista. Merialueilla vaikuttavien biogeokemiallisten prosessien ymmärrys on tärkeää meren tilan parantamiseksi (Stramska & Jakacki 2024). Rehevöitymisen taustatekijöiden ja seuraamusten tutkimisen lisäksi olisi mielenkiintoista selvittää veden virtauksen ja sekoittumisen vaikutusta klorofyllin kulkeutumiseen eri saaristovyöhykkeillä, ja miten poikkeukselliset säätilanteet vaikuttavat leväesiintymien alueellisuuteen. Menetelmällisesti olisi mielenkiintoista selvittää, miten paljon eri optiset tekijät vaikuttavat klorofyllin kaukokartoituksessa ja millä tavoilla niiden vaikutusta voitaisiin Saaristomerta kuvattaessa vähentää.

## **Kiitokset**

Kiitän tutkielmani ohjaajaa Harri Tolvasta ammattimaisesta ohjauksesta sekä kannustuksesta tutkielman tekemisen aikana.

## Lähteet

- Amorim, F. de L. L. de, Balkoni, A., Sidorenko, V. & Wiltshire, K. H. (2024) Analyses of sea surface chlorophyll a trends and variability from 1998 to 2020 in the German Bight (North Sea). *Ocean Science* 20(5) 1247–1265. <https://doi.org/10.5194/os-20-1247-2024>
- Ask, J., Rowe, O., Brugel, S., Strömberg, M., Byström, P. & Andersson, A. (2016) Importance of coastal primary production in the northern Baltic Sea. *Ambio* 45(6) 635–648. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0778-5>
- Attila, J., Koponen, S., Kallio, K., Lindfors, A., Kaitala, S. & Ylöstalo, P. (2013) MERIS Case II water processor comparison on coastal sites of the northern Baltic Sea. *Remote Sensing of Environment* 128 138–149. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.07.009>
- Boss, E. & Behrenfeld, M. (2010) In situ evaluation of the initiation of the North Atlantic phytoplankton bloom. *Geophysical Research Letters* 37 (18) <https://doi.org/10.1029/2010GL044174>
- Boyce, D. G., Lewis, M. R. & Worm, B. (2010) Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466(7306) 591–596. <https://doi.org/10.1038/nature09268>
- Campbell, J. & Antoine, D. (2002) Comparison of algorithms for estimating ocean primary production from surface chlorophyll, temperature, and irradiance. *Global Biogeochemical Cycles* 16(3) 9-1-9–15. <https://doi.org/10.1029/2001GB001444>
- Gasiūnaitė, Z. R., Cardoso, A. C., Heiskanen, A.-S., Henriksen, P., Kauppila, P., Olenina, I., Pilkaitytė, R., Purina, I., Razinkovas, A., Sagert, S., Schubert, H. & Wasmund, N. (2005) Seasonality of coastal phytoplankton in the Baltic Sea: Influence of salinity and eutrophication. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 65(1) 239–252. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.05.018>

- Gattuso, J.-P., Gentili, B., Duarte, C. M., Kleypas, J. A., Middelburg, J. J. & Antoine, D. (2006) Light availability in the coastal ocean: Impact on the distribution of benthic photosynthetic organisms and their contribution to primary production. *Biogeosciences* 3(4) 489–513. <https://doi.org/10.5194/bg-3-489-2006>
- Holden, J. (2017) *An introduction to physical geography and the environment*. 4. painos. 67–68. Pearson.
- Jakobsen, H. H. & Markager, S. (2016) Carbon-to-chlorophyll ratio for phytoplankton in temperate coastal waters: Seasonal patterns and relationship to nutrients. *Limnology and Oceanography* 61(5) 1853–1868. <https://doi.org/10.1002/lno.10338>
- Kahru, M., Elmgren, R. & Savchuk, O. P. (2016) Changing seasonality of the Baltic Sea. *Biogeosciences* 13(4) 1009–1018. <https://doi.org/10.5194/bg-13-1009-2016>
- Kudryavtseva, E. A., Pimenov, N. V., Aleksandrov, S. V. & Kudryavtsev, V. M. (2011) Primary production and chlorophyll content in the Southeastern Baltic Sea in 2003–2007. *Oceanology* 51(1) 27–35. <https://doi.org/10.1134/S0001437011010103>
- Leppäranta, M. & Myrberg, K. (2009) *Physical oceanography of the Baltic Sea*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-79703-6>
- Miettunen, E., Tuomi, L. & Myrberg, K. (2020) Water exchange between the inner and outer archipelago areas of the Finnish Archipelago Sea in the Baltic Sea. *Ocean Dynamics* 70(11) 1421–1437. <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01407-y>
- Myrberg, K., Leppäranta, M. & Kuosa, H. (2006) *Itämeren fysiikka, tila ja tulevaisuus*. Yliopistopaino, Helsinki.
- Nagamani, P. V., Shikhakolli, R. & Chauhan, P. (2011) Phytoplankton variability in the Bay of Bengal during winter monsoon using Oceansat-1 ocean colour monitor data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 39(1) 117–126. <https://doi.org/10.1007/s12524-010-0056-0>

- Neumann, T., Koponen, S., Attila, J., Brockmann, C., Kallio, K., Kervinen, M., Mazeran, C., Muller, D., Philipson, P., Thulin, S., Vakeva, S. & Ylostalo, P. (2021). Optical model for the Baltic Sea with an explicit CDOM state variable: A case study with model ERGOM (version 1.2). *Geoscientific Model Development* 14(8) 5049–5062.  
<https://doi.org/10.5194/gmd-14-5049-2021>
- Pallavi, P., Parthasarathy, D., Narayanan, K., Inamdar, A. B. & Budakoti, S. (2024) Examining the principal factors that limits the chlorophyll-a concentration across coastal waters of northern Maharashtra state using a robust generalized additive model. *Regional Studies in Marine Science* 77, 103693-. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103693>
- Pierson, D. C., Kratzer, S., Strömbeck, N. & Håkansson, B. (2008) Relationship between the attenuation of downwelling irradiance at 490 nm with the attenuation of PAR (400 nm–700 nm) in the Baltic Sea. *Remote Sensing of Environment* 112(3) 668–680.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.06.009>
- Soja-Wozniak, M., Bradtke, K. & Krężel, A. (2014) Comparison of satellite chlorophyll algorithms for the Baltic Sea. *Journal of Applied Remote Sensing* 8(1) 083605.  
<https://doi.org/10.1117/1.JRS.8.083605>
- Son, S., Wang, M. & Harding, L. W. (2014) Satellite-measured net primary production in the Chesapeake Bay. *Remote Sensing of Environment* 144 109–119.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.018>
- Soriano-Gonzalez, J., Urrego, E. P., Soria-Perpinya, X., Angelats, E., Alcaraz, C., Delegido, J., Ruiz-Verdu, A., Tenjo, C., Vicente, E. & Moreno, J. (2022) Towards the combination of C2RCC processors for improving water quality retrieval in inland and coastal areas. *Remote Sensing* 14(5) 1124-. <https://doi.org/10.3390/rs14051124>
- Suominen, T., Tolvanen, H. & Kalliola, R. (2010a) Geographical persistence of surface-layer water properties in the Archipelago Sea, SW Finland. *Fennia* 188(2) 179–196.

- Suominen, T., Tolvanen, H. & Kalliola, R. (2010b) Surface layer salinity gradients and flow patterns in the archipelago coast of SW Finland, northern Baltic Sea. *Marine Environmental Research* 69(4) 216–226. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2009.10.009>
- Stramska, M. & Jakacki, J. (2024) Variability of chlorophyll a concentration in surface waters of the open Baltic Sea. *Oceanologia* 66(2) 365–380.  
<https://doi.org/10.1016/j.oceano.2024.02.003>
- Tolvanen, H., Suominen, T. & Kalliola, R. (2013) Annual and long-term water transparency variations and the consequent seafloor illumination dynamics in the Baltic Sea archipelago coast of SW Finland. *Boreal Environment Research* 18(6) 446–458.
- Vignudelli, S. & Benveniste, J. (2022) Coastal waters monitoring using remote sensing technology. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute.  
<https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-1233-4>
- Wasmund, N., Nausch, G. & Matthäus, W. (1998) Phytoplankton spring blooms in the southern Baltic Sea – spatio-temporal development and long-term trends. *Journal of Plankton Research* 20(6) 1099–1117. <https://doi.org/10.1093/plankt/20.6.1099>
- Wilas, J., Daniszewski, P., Cyraniak, E. & Draszawka-Bołzan, B. (2016) Nutrient, chlorophyll, and water clarity relationships in Baltic Sea nearshore coastal waters with comparisons to freshwater lakes Barlinek Gorzów Landscape Park (North-West Poland). *World Scientific News* 57 737–746
- Zhang, D., Lavender, S., Muller, J.-P., Walton, D., Karlson, B. & Kronsell, J. (2017) Determination of phytoplankton abundances (chlorophyll-a) in the optically complex inland water - The Baltic Sea. *The Science of the Total Environment* 601–602 1060–1074.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.245>