



Pro gradu -tutkielma  
Geofysiikka

## Kasviplanktonin kevätukinnan indikaattorit

Sofia Junttila  
9.11.2014

Ohjaajat: Jenni Attila  
Matti Leppäranta  
Tarkastajat: Jenni Attila  
Matti Leppäranta

HELSINGIN YLIOPISTO  
FYSIKAN LAITOS

PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)  
00014 Helsingin yliopisto

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty		Laitos — Institution — Department	
Matemaattis-luonnontieteellinen		Fysiikan laitos	
Tekijä — Författare — Author			
Sofia Junttila			
Työn nimi — Arbetets titel — Title			
Kasviplanktonin kevätkukinnan indikaattorit			
Oppiaine — Läroämne — Subject			
Geofysiikka			
Työn laji — Arbetets art — Level		Aika — Datum — Month and year	
Pro gradu -tutkielma		Marraskuu 2014	
		Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages	
		62	
Tiivistelmä — Referat — Abstract			
<p>Kasviplanktonin määrä ja tuotanto on tärkeä tekijä Itämeren rehevöitymisen arvioinnissa. Kasviplankton reagoi nopeasti, jos veden ravinteiden (erityisesti typen ja fosforin) määrät tai suhteet muuttuvat. Kasviplanktonin kevätkukinta on merkittävä vuosittainen tapahtuma Itämerellä. Kevätkukinnan aikana saavutetaan kasviplanktonin kasvukauden huippu, ja suuri osa vuotuisesta tuotannosta tapahtuu kevätkukinnan aikana. Kevätkukinnan aikana kasviplanktonin määrä vedessä vaihtelee suuresti ajallisesti ja paikallisesti. Kevätkukinnan seurannassa saavutetaan paras ajallinen ja paikallinen kattavuus käyttämällä kaukokartoitusinstrumentteja ja Alg@line-mittauksia.</p> <p>Tässä tutkimuksessa kehitettiin ja testattiin kevätkukinnan indikaattoreita Suomenlahdella ja Saaristomerellä. Kevätkukinnan indikaattoreita ovat kukinnan alku, kesto, huippu eli suurin pitoisuus, huipun ajankohta ja kukinnan intensiteetti. Indikaattorit määriteltiin aluekohtaisesti a-klorofyllipitoisuuden aikasarjoista vuosina 2003-2011. Aikasarjat laskettiin Envisat-MERIS-instrumentin ja Alg@line-laivojen havainnoista.</p> <p>Tulokset osoittivat, että MERIS- ja Alg@line-aineistot soveltuvat kasviplanktonin kevätkukinnan indikaattorien määrittämiseen. Pilvisuus tai jääolot voivat ajoittain estää a-klorofyllin havaitsemisen MERIS-instrumentilla, jolloin Alg@line-mittauksia voidaan käyttää täydentämään havaintoja niillä alueilla, joiden läpi Alg@line-laivat kulkevat.</p> <p>Tuloksien mukaan kasviplanktonin indikaattorit, erityisesti intensiteetti, vaihtelevat eri alueilla paljon. Myös vuosien väliset erot ovat huomattavia. Kahdella tutkimusalueella MERIS- ja Alg@line-aineistoista laskettuja intensiteetti-indeksejä verrattiin toisiinsa ja pyrittiin määrittämään indeksin trendi kullakin alueella. Nousevia trendejä ei havaittu, mikä on Itämeren rehevöitymisen ja ekologisen tilan kannalta hyvä.</p> <p>Kasviplanktonin kevätkukinnan indikaattoreita voidaan tulevaisuudessa käyttää operatiivisesti. MERIS-instrumentin tilalla on mahdollista käyttää muita kaukokartoitusinstrumentteja, jotka soveltuvat a-klorofyllin seurantaan. Tulevan Sentinel 3A -satelliitin mukana oleva OLCI-instrumentti soveltuu parhaiten kevätkukinnan seurantaan Itämerellä. Ennen Sentinel 3A -satelliitin laukaisua käytössä ovat esimerkiksi Aqua MODIS -ja Suomi NPP VIIRS -instrumentit. Alg@line-aineistoa voidaan yhdistää kaukokartoitusaineistoihin, jolloin saadaan mahdollisimman suuri ajallinen ja paikallinen kattavuus.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords			
Kaukokartoitus, a -klorofylli, kevätkukinta, MERIS			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited			
Kumpulan kampuskirjasto			
Muita tietoja — övriga uppgifter — Additional information			

# Sisältö

Lyhenteet	ii
Käsitteet	iv
<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2 Itämeren vedenlaatu</b>	<b>3</b>
2.1 <i>Itämeren ominaispiirteet</i> . . . . .	3
2.2 <i>Itämeren vedenlaatu</i> . . . . .	4
2.2.1 <i>Itämeren kasviplankton</i> . . . . .	5
2.2.2 <i>Kasviplanktonin vuosikierto</i> . . . . .	5
2.3 <i>Rehevöitymisen noidankehä</i> . . . . .	8
2.4 <i>Itämeren vedenlaadun seuranta</i> . . . . .	9
<b>3 Vedenlaadun kaukokartoitus Itämerellä</b>	<b>10</b>
3.1 <i>Kaukokartoituksen perusteet</i> . . . . .	10
3.2 <i>Säteilyn kulku ilmakehässä ja vedessä</i> . . . . .	13
3.3 <i>Itämeren optiset ominaisuudet</i> . . . . .	16
3.3.1 <i>Vesi</i> . . . . .	16
3.3.2 <i>Kasviplankton</i> . . . . .	16
3.3.3 <i>Humus</i> . . . . .	19
3.3.4 <i>Kiintoaine</i> . . . . .	19
3.3.5 <i>Vesien optinen luokittelu</i> . . . . .	19
3.4 <i>Vedenlaadun seurannan välineet</i> . . . . .	20
3.4.1 <i>Envisat-MERIS</i> . . . . .	20
3.4.2 <i>Muut kaukokartoitusinstrumentit</i> . . . . .	22

3.4.3	Alg@line . . . . .	22
3.5	<i>Ekologiset indikaattorit</i> . . . . .	24
3.5.1	Kevätkukinnan indikaattorit . . . . .	25
3.5.2	MARMONI-projekti . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Aineistot ja menetelmät</b>	<b>27</b>
4.1	<i>Tutkimusalueet</i> . . . . .	27
4.2	<i>Kaukokartoitusaineisto</i> . . . . .	28
4.2.1	FUB-proessori . . . . .	29
4.2.2	Kaukokartoitusaineiston esikäsittely . . . . .	33
4.3	<i>Alg@line-aineisto</i> . . . . .	33
4.4	<i>Kevätkukinnan indikaattorien laskenta</i> . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Tulokset</b>	<b>36</b>
5.1	<i>Kevätkukinnan indikaattorit</i> . . . . .	36
5.2	<i>Intensiteetti-indeksien vertailu</i> . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Keskustelu</b>	<b>45</b>
6.1	<i>Menetelmän arviointi</i> . . . . .	45
6.2	<i>Tulevaisuuden näkymät</i> . . . . .	46
6.2.1	Alg@line-aineisto . . . . .	47
<b>7</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>48</b>
	<b>Kiitokset</b>	<b>51</b>
	<b>Kirjallisuutta</b>	<b>52</b>



## Lyhenteet

AMORGOS	Accurate MERIS Ortho-Rectified Geo-location Operational Software
BEAM	Basic ERS & Envisat (A)ATSR and MERIS Toolbox
CDOM	Coloured Dissolved Organic Matter, humus
Chl-a	a-klorofylli
EMI	Estonian Marine Institute
EO	Earth Observations, kaukokartoitus
ESA	European Space Agency
EUTRO-OPER	Making HELCOM Eutrophication Assesment Operational
FUB	Free University Berlin
HELCOM	Helsinki Commission
MARMONI	Innovative approaches for marine biodiversity monitoring and assesment of conservation status of nature values in the Baltic Sea
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer
MODIS	Moderate resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NPP	National Polar-orbiting Partnership
OLCI	Ocean and Land Colour Instrument
SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
SYKE	Suomen ympäristökeskus
VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
VPD	Vesipuitedirektiivi
WDF	Water Framework Directive

## Käsitteet

$A_\lambda$	Absorptiokyky	–
$B_\lambda$	Heijastuskyky, reflektanssi	–
$T_\lambda$	Läpäisykyky	–
$a_\lambda$	Absorptioerroin	$m^{-1}$
$b_\lambda$	Sirontakerroin	$m^{-1}$
$c_\lambda$	Läpäisykerroin	$m^{-1}$
$a_w$	Absorptiospektri puhtaalle merivedelle	$m^{-1}$
$b_{fw}$	Sirontapektri puhtaalle makealle vedelle	$m^{-1}$
$E_0$	Ilmekehän yläpuolinen irradianssi	$Wm^{-2}$
$E$	Ilmakehän alapuolinen irradianssi	$Wm^{-2}$
$L_{kok}$	Instrumentin havaitsema kokonaisradianssi	$Wm^{-2}sr^{-1}$
$L_{ilma}$	Ilmakehästä siroava radianssi	$Wm^{-2}sr^{-1}$
$L_{pinta}$	Veden pinnasta heijastuva radianssi	$Wm^{-2}sr^{-1}$
$L_{pohja}$	Veden pohjasta heijastuva radianssi	$Wm^{-2}sr^{-1}$
$L_{vesi}$	Vesimassasta lähtevä radianssi	$Wm^{-2}sr^{-1}$
$\lambda$	Aallonpituus	nm
$\varphi$	Atsimuuttikulma	°
$\theta$	Zeniittikulma	°
$\alpha$	Säteilyn tulokulma	°
$\beta$	Taitekulma	°
$n$	Taitekerroin	–
$Chl$	<i>a</i> -klorofyllin viikkokeskiarvo	$\mu g/l$
$\Delta t$	Kevätkukinnan kesto	d
<i>Indeksi</i>	Kevätkukinnan intensiteetti-indeksi	$d\mu g/l$

# Luku 1

## Johdanto

Itämeren vedenlaadun suurin ongelma on rehevöityminen, joka näkyy muun muassa veden samenessena, leväkukintojen lisääntymisenä ja meren pohjan happipitoisuuden vähenemisenä. Rehevöitymisen syynä on ravinteiden – erityisesti typen ja fosforin – liiallinen saanti. Ravinnekuormitus on osittain ihmisen aiheuttamaa ulkoista kuormitusta ja osittain Itämeren sisäistä kuormitusta. (HELCOM, 2009)

Vedessä oleva kasviplankton reagoi ravinteiden määrän ja suhteiden muutoksiin nopeasti. Kasviplanktonin määrä ja levinneisyys onkin tärkeä tekijä vedenlaadun seurannassa. (HELCOM, 2009) Kasviplanktonin kevätukinta on merkittävä tapahtuma vedenlaadun ja koko ekosysteemin ravinnonkierron kannalta: suuri osa kasviplanktonin tuotannosta tapahtuu kevätukinnan aikana, jolloin se on tärkeä ravinnonlähde eläinplanktonille. Kukinnan päätyttyä kuollut levämassa vajaa pohjalle, jolloin se ruokkii pohjan eliöstöä, mutta saattaa myös lisätä happikatoa kerrostuneilla alueilla. Hapeton merenpohja taas edistää sedimenttiin sitoutuneen fosforin vapautumista takaisin veteen, mikä mahdollistaa sinilevien määrän kasvua kesäkuukausina. (Raateoja ym., 2008)

Kevätukinta on hyvin dynaaminen tapahtuma, jonka aikana kasviplanktonin määrä vedessä vaihtelee suuresti ajan ja paikan mukaan. Kevätukinnan luotettava seuranta ei useinkaan onnistu perinteisten havaintoasemamittausten eli vesinäytteiden keräyksen avulla. (Rantajärvi ym., 1998) Tämän takia käyttöön on otettu kaukokartoitusinstrumentit ja kauppalaivoihin asennetut automaattiset mittalaitteet. Kasviplanktonin biomassaa arvioidaan mittaamalla veden *a*-klorofyllin

määrää, joka on kasviplanktonin pääasiallinen yhteyttämisspigmentti. (HELCOM, 2009)

Vedenlaadun ja rehevöitymisen arviointia ja seurantaa varten on kehitetty paljon erilaisia indikaattoreita, joka kuvaavat yhdellä tunnusluvulla jotain ekologista ominaisuutta. Esimerkiksi Fleming & Kaitala (2006) ja Platt & Sathyendranath (2008) ovat kehittäneet kasviplanktonin kevätkekintää kuvaavia indikaattoreita ja tunnuslukuja. Kevätkekinnan indikaattoreita ovat kevätkekinnan alku, kesto, suurin pitoisuus eli kekinnan huippu, huipun ajankohta, ja kekinnan intensiteetti.

Tässä Pro Gradu -tutkielmassa kehitetään kasviplanktonin kevätkekinnan indikaattoreita (alku, kesto, huippu, huipun ajankohta, intensiteetti) Suomen rannikovesi- ja avomerialueille Suomenlahdella ja Saaristomerellä. Indikaattorit määritellään *a*-klorofyllipitoisuuden aikasarjoista, jotka on laskettu tutkimusalueille käyttäen kaukokartoitusaineistoa ja kauppalaivojen Alg@line-mittauksia.

Kaukokartoitusaineistosta ja Alg@line-mittauksista laskettuja indikaattoreita vertaillaan toisiinsa ja indikaattoreiden vuosittaisesta vaihtelusta tutkimusalueilla määritetään trendit.

Tässä tutkielmassa ensimmäinen luku esittelee työn taustat ja tavoitteet. Luvussa 2 tutustutaan Itämeren piirteisiin, vedenlaadun ongelmiin ja vedenlaadun seurantaan. Luku 3 sisältää tietoa vedenlaadun kaukokartoituksesta näkyvän valon alueella ja Itämeren optisista ominaisuuksista. Luvussa 3 esitellään myös MERIS-instrumentti, Alg@line-laitteisto ja ekologisten indikaattorien käyttö vedenlaadun seurannassa. Luvussa 4 esitellään tutkimuksessa käytetyt aineistot ja tutkimusmenetelmät. Tulokset esitetään luvussa 5 ja luvussa 6 tuloksia tarkastellaan osana laajempaa kokonaisuutta, arvioidaan käytettyjä menetelmiä ja pohditaan indikaattorien käyttöä tulevaisuudessa. Viimeinen luku on yhteenveto tästä tutkimuksesta.

## Luku 2

### Itämeren vedenlaatu

#### 2.1 Itämeren ominaispiirteet

Itämeri on pieni, matala ja sulkeutunut vesialue, joka on yhteydessä Atlantin valtameriin Tanskan kapeiden salmien kautta. Itämeren pinta-ala on 392 978 km<sup>2</sup> ja keskisyvyys vain 54 metriä. (Myrberg ym., 2006) Veden vaihtuminen Itämeressä on hidasta, koko vesimassan vaihtuminen kestää noin 30–50 vuotta (Myrberg ym., 2006; Raateoja ym., 2008). Valuma-alue on 1 649 550 km<sup>2</sup> eli yli neljää kertaa suurempi kuin itse Itämeri. Valuma-alueella asuu yli 85 miljoonaa ihmistä 14 valtion alueella. (Myrberg ym., 2006)

Kaikissa valuma-alueen maissa on teollisuutta ja maataloutta, joten ravinteiden valuminen Itämereen jokivirtaamien mukana on suurta. Erityisesti maataloudesta aiheutuva typpi- ja fosforikuormitus aiheuttaa rehevöitymistä. HELCOM:n arvion mukaan Itämereen kulkeutui vuosina 2006–2011 keskimäärin 641 000 tonnia typpeä ja 30 200 tonnia fosforia. (HELCOM, 2011)

Itämeren suolaisuus vaihtelee noin nollasta 35 promillesta eri alueilla ja eri syvyyksillä. Itämeri on myös voimakkaasti kerrostunut suolaisuuden suhteen ja monilla alueilla on pysyvä halokliini eli suolaisuuden harppauskerros. Tanskan salmien kautta Itämereen virtaa Pohjanmereltä suolaista vettä, kun taas suuret jokivirtaamat ja sade tuovat mukanaan makeaa vettä erityisesti Itämeren itä- ja pohjoisosiin. Suolainen tiheä vesi vajoaa pohjalle ja makeampi vesi jää pinnalle muodostaen halokliinin. Kerrostuneisuuden voimakkuus vaihtelee eri osissa Itämerta. Eteläisillä

ja keskisillä syvillä alueilla halokliini on usein voimakas ja pysyvä, mutta esimerkiksi Suomenlahdella ja Pohjanlahdella halokliinin on heikohko. (Myrberg ym., 2006)

Voimakas kerrostuneisuus aiheuttaa happikatoa pohjavesissä. Ilmakehästä pintaveteen liukeneva happi kulkeutuu syvempiin kerroksiin sekoittumisen ansiosta, mutta voimakas halokliini estää pohjaan asti uloittuvan sekoittumisen. Itämeren syvissä osissa happitilannetta parantavat niin sanotut suolapulssit eli voimakas Pohjanmereltä tuleva sisäänvirtaus, joka tuo mukanaan suolaista ja hapekasta vettä. (Myrberg ym., 2006)

Näiden ominaispiirteiden takia Itämeren ekologia on herkkä muutoksille, ja samalla Itämeri on laajan valuma-alueen, runsaan asutuksen ja maatalouden päästöjen takia suuren rasituksen kohteena.

## 2.2 Itämeren vedenlaatu

Itämeren vedenlaadun suurin ongelma on rehevöityminen, jolla tarkoitetaan veden orgaanisen aineksen lisääntymistä ja perustuotannon kasvua liiallisen ravinteiden saannin seurauksena (Raateoja ym., 2008; HELCOM, 2009). Rehevöityminen aiheuttaa muun muassa veden samenenemistä ja leväkukintojen määrän kasvua (HELCOM, 2009). Rehevöityminen myös pahentaa entisestään merenpohjien huonoa happitilannetta (Raateoja ym., 2008).

Itämeren rehevöityminen on seurausta ravinnekuormituksesta, joka on osittain ihmisen aiheuttamaa ulkoista kuormitusta ja osittain Itämeren omaa sisäistä ravinnekuormitusta. Rehevöitymisen kannalta merkittävimmät ravinteet ovat typpi ja fosfori, joiden määrä ja keskinäiset suhteet vaikuttavat planktonlevien määrään. (Raateoja ym., 2008)

Ravinteiden määrän kasvu ja muutokset niiden suhteessa lisäävät kasviplanktonin perustuotantoa, mikä kasvattaa biomassaa ja lisää orgaanisen aineksen sedimentoitumista merenpohjaan. Ravinnekuormituksen seurauksia ovat myös haitallisten leväkukintojen lisääntyminen, veden sameneneminen, muutokset kasvillisuudes-

sa ja selkärangattomien yhteisössä, sekä pohjaveden happipitoisuuden väheneminen. Nämä tekijät voivat aiheuttaa pohjassa elävien kalojen ja selkärangattomien kuolemia ja samalla muutoksia koko Itämeren ravintoketjussa. (HELCOM, 2009)

### **2.2.1 Itämeren kasviplankton**

Kasviplankton muodostuu yhteyttämiskykyisistä mikro-organismeista, pääasiassa alkeellisista yksisoluisista planktonlevistä. Myös jotkut yhteyttämiskykyiset bakteerit – esimerkiksi syanobakteeri – kuuluvat kasviplanktoniin. (Tikkanen, 1986) Kasviplankton on vesiympäristössä ravintoketjun perusta, tärkeä ilmakehän hapen tuottaja ja hiilidioksidin sitoja ja siten merkittävä osa koko ekosysteemiä (Raateoja ym., 2008).

Suurikokoiset ja monisoluiset kasvimaaiset levät eivät kuulu kasviplanktoniin, vaan planktonlevät ovat mikroskooppisen pieniä, alkeellisia ja yksisoluisia leviä, jotka keijuvat eli ajelehtivat passiivisesti vesimassassa (Tikkanen, 1986). Kasviplankton reagoi herkästi vesiympäristön fysikaalis-kemiallisiin muutoksiin (Tikkanen, 1986) ja on siksi tärkeä tekijä vedenlaadun seurannassa.

Itämeren tyypillisimmät kasviplanktonilajit ovat piilevä, panssarisiimalevä ja sini-levä eli syanobakteeri. Näitä lajeja esiintyy suurina määrinä Itämeressä ja ne pytyvät muodostamaan leväkukintoja suotuisissa oloissa. Muitakin lajeja Itämeressä esiintyy, mutta niiden lajikohtainen yksilömäärä ei kasva kovinkaan huomattavaksi. (Raateoja ym., 2008) Itämeren murtoveteen sopeutuneita planktonlevälejeja on varsin vähän. Joillekin merellisille lajeille Itämeren suolapitoisuus on liian alhainen, toisaalta osalle makean veden lajeista se on liian korkea. (Tikkanen, 1986)

### **2.2.2 Kasviplanktonin vuosikierto**

Planktonlevät tarvitsevat valoa, hiiltä, vettä ja ravinteita yhteyttääkseen. Myös lämpötila vaikuttaa kasviplanktoniin, mutta se ei ole yhtä merkittävä tekijä kuin valo. (Tikkanen, 1986) Nämä kasvutekijät vaikuttavat kasviplanktonin määrään ja laatuun.

Kasviplanktonin perustuotannon kannalta tärkeimmät ravinteet ovat typpi ja fosfori. Osa planktonlevälajeista ovat selkeästi typpirajoitteisia, toiset fosforirajoittei-

sia, osa molempia. On myös alueellisia eroja: Pohjanlahdella perustuotanto on lähinnä fosforirajoitteista, Tanskan salmissa lähinnä typpirajoitteista. (HELCOM, 2009) Osa planktonlevistä vaatii enemmän valoa ja lämpöä, toiset selviävät vähemmällä. Planktonlevien kukinnalla onkin valon, lämmön ja ravinteiden määrän vaihtelun vuoksi vuotuinen rytmi. (Raateoja ym., 2008)

Talvella planktonlevien tuotanto on lähes pysähdyksissä vähän valon ja kylmyyden takia. Monet planktonlajit viettävät talven erilaisissa lepomuodoissa. Eniten tuotantoa on merijäässä, jossa elää heikkoon valoon sopeutuneita planktonleviä, eläinplanktonia ja bakteereja. Yleisimmät merijäässä toimivat leväryhmät ovat piilevät ja panssarisiimalevät, joita esiintyy myös kasviplanktonin kevätkukinnassa. (Raateoja ym., 2008)

Keväällä pintavesi on yleensä ravinteikasta, koska perustuotanto talvella on ollut minimissään ja ravinteita on siksi kertynyt pintakerrokseen. Lisäksi talviset myrskyt ovat saattaneet sekoittaa vesimassan ja nostaa pohjan ravinteita pintakerrokseen. (Raateoja ym., 2008) Keväällä vesi kerrostuu myös lämpötilan suhteen, kun auringon valo lämmittää pintavettä. Kevyt, lämmin vesi ei sekoitu alempiin kylmiin kerroksiin, vaan muodostuu lämpötilan harppauskerros eli termokliini. (Myrberg ym., 2006)

Lisääntyvä valo käynnistää kasviplanktonin kevätkukinnan, jota ravinteet ja veden termokliini ruokkivat. Termokliinin ansiosta kasviplankton pysyy pinnanläheisissä kerroksissa, joissa on riittävästi valoa yhtättämistä varten. (Raateoja ym., 2008) Kevätkukinta on tyypillisesti hyvin intensiivinen ja nopeasti muuttuva tapahtuma. Kevätkukinta kestää muutaman viikon ja sen aikana saavutetaan kasviplanktonin kasvukauden huippu, mutta huipun ajanjakso on tyypillisesti lyhyt. Suomenlahdella kevätkukinnan huippuaika ajoittuu huhti-toukokuulle, Pohjanlahdella noin kuukautta myöhemmin. (Stipa ym., 2000; Raateoja ym., 2008) Kevätkukinnan huippu saavutetaan yleensä 2-3 viikkoa jäiden lähdön jälkeen. Jos jäät ovat lähteneet myöhään, kevätkukinnan maksimi voi kehittyä aikaisemmin. (Niemi, 1971) Kevätkukinta loppuu, kun ravinteet – typpi tai fosfori – on käytetty loppuun termokliinin ylläpitämästä pintakerroksesta. Suuressa osassa Itämeren saanti rajoittaa kasviplanktonin kevätkukintaa. Perämerellä rajoittava ravinne on fosfori, jonka pitoisuuden ovat siellä pieniä. (Raateoja ym., 2008)



Kevätkukinnalla on suuri merkitys koko ekosysteemin ravinnonkierrolle ja rehevöitymiselle (Stipa ym., 2000). Kevätkukinnan planktonlevät – piilevät ja panssarisiimalevät – ovat suurikokoisia ja painavia, minkä takia ne vajoavat nopeasti pohjaan kukinnan loppuessa. Planktonleviin on sitoutunut kaikki veden pintakerroksen ravinteet, jotka vajoamisen jälkeen päätyvät pohjien eliöyhteisön käyttöön. Kevätkukinta on pohjien eliöille merkittävin vuotuinen ravinnonlähde. (Raateoja ym., 2008)

Kevätkukinnan päätyttyä alkaa niin kutsuttu kesäminimi, jolloin pintavedessä ravinteita on saatavilla niukasti ja planktonlevien määrä on vähäistä. Kesällä selkeä lämpötilakerrostuneisuus estää pohjakerrosten ravinteiden pääsyn ylempiin kerroksiin. Poikkeuksena voimakas kumpuaminen pystyy sekoittamaan vesimassaa ja nostamaan ravinteikasta pohjavettä pintaan planktonlevien käyttöön. (Raateoja ym., 2008)

Loppukesän sinileväkukinta alkaa usein heinäkuussa veden lämpötilan kohotessa ja saattaa kestää syksyyn asti, jos säät ovat suotuisia. Sinileväkukinnan keston ja levien määrään vaikuttavat syksyn ja talven aikainen veden sekoittuminen, kevät-kukinnan voimakkuus ja kesän sääolot. Sinilevät pystyvät sitomaan ilmakehästä veteen liuennutta typpeä, joten tyyppi ei ole kasvua rajoittava ravinne. Sen sijaan sinileväkukinta on riippuvainen fosforivarannoista. Kesäajan pintaveden fosforista suuri osa on kulkeutunut pohjalta pintaveteen voimakkaiden syys- ja talvimyrskyjen sekoitettua vesimassaa. Talven aikana pintaveteen kulkeutunut fosfori ei kuitenkaan päädy täysin sinilevien käyttöön: kasviplanktonin kevät-kukinta käyttää osan pintaveden fosforista. Näin ollen voimakas kevät-kukinta rajoittaa loppukesän sinileväkukinnan voimakkuutta. (Raateoja ym., 2008)

Syksyllä vesi jäähtyy, lämpötilakerrostuneisuus heikkenee ja vesi sekoittuu. Samalla kasviplankton määrä ja tuotanto pienenee valon määrän vähetessä. (Raateoja ym., 2008)

Kasviplanktonin vuosikierto voi hieman poiketa edellä kuvatusta esimerkiksi Pohjanlahdella ja lounaisella Itämerellä. Lounaisella Itämerellä lähellä Tanskan salmia kasvukausi on pidempi kuin varsinaisen Itämeren alueella, koska jäätalvi (aika jolloin jäätä esiintyy) on lyhyt tai sitä ei ole ollenkaan. Kevätmaksimi muodostuu

jo helmi-maaliskuussa ja syksyllä kasviplanktonia on runsaammin ja tuotanto jatkuu pidempään. Pohjanlahdella taas – ja erityisesti Perämerellä – kasviplanktonin määrä ja tuotanto ovat vähäisempiä kuin muualla Itämerellä, johtuen pitkästä jäätalvesta ja alhaisesta fosforipitoisuudesta. (Niemi, 1971)

### 2.3 Rehevöitymisen noidankehä

Itämeren rehevöitymisen noidankehä on ilmiö, jossa ravinnekuormitus ja pohjan happiongelmat lisäävät planktonlevien kasvua, jotka ennestään pahentavat pohjan happitilannetta ja edesauttavat ravinteisen pääsyä veteen. (Raateoja ym., 2008)

Ulkoinen typpikuormitus lisää typpirajoitteisten planktonlevien määrää, esimerkiksi kevätkukinnan lajien määrä kasvaa. Kun kevätkukinta voimistuu, lisääntyy myös pohjaan laskeutuvan eloperäisen aineksen määrä. Pohjan bakteeristo hajottaa vajonneen aineksen kuluttaen happea. Kasvava määrä hajotettavaa eloperäistä ainesta tarkoittaa nopeammin hupenevia happivarastoja. Hapettomassa pohjanläheisessä vedessä alkaa sedimenttiin sitoutunut fosfori vapautua takaisin veteen. Pohjan sedimentistä vapautunut fosfori voi päätyä valoisaan pintakerrokseen ruokimaan planktonlevien kasvua. Vaikka halokliini estää hapen kulkeutumisen pintakerroksesta syvemmälle, se ei kuitenkaan estä kokonaan pohjan fosforin pääsyä pintakerroksiin. (Raateoja ym., 2008)

Mitä laajemmalle Itämeren pohjan happiongelmat ulottuvat, sitä enemmän fosforia vapautuu pohjasta ja kulkeutuu pintakerroksiin. Tällöin fosforirajoitteisten planktonlevien, erityisesti sinilevien, määrä kasvaa. Sinilevät pystyvät sitomaan typpeä ilmakehästä, ja typpeä vapautuu myös muiden levien käyttöön. Kun sinilevien määrä lisääntyy, kasvaa myös typen määrä vedessä, mikä jälleen edistää typpirajoitteisten planktonlevien kasvua ja kevätkukinnan voimakkuutta. (Raateoja ym., 2008)

Rehevöitymisen noidankehän hidastamisessa tai pysäyttämässä tärkein tekijä on Itämeren ulkoisen ravinnekuormituksen – sekä typen että fosforin – vähentäminen (HELCOM, 2009; Raateoja ym., 2008). Tällöin pohjan happitilanne parantunee, fosforin vapautuminen pohjasta vähenee ja planktonlevien kukinta pienenee.

## 2.4 Itämeren vedenlaadun seuranta

Vedenlaadun seurannalla pyritään havaitsemaan vesiympäristössä pitkällä aikavälillä tapahtuvia muutoksia ja estämään vedenlaadun huononeminen. Euroopan Unionin (EU) vesipolitiikan puitedirektiivi (VPD) edellyttää järvien, jokien ja rannikkoalueiden vedenlaadun kattavaa seurantaa ja luokittelua, sekä tuloksien raportointia. (VPD, 2000)

Kasviplankton reagoi nopeasti ravinnepitoisuuksien muutoksiin ja muutokset kasviplanktonin perustuotannossa vaikuttavat koko vesiekosysteemiin. Tämän takia kasviplanktonin määrä ja paikallinen esiintyvyys ovat tärkeitä tekijöitä vedenlaadun arvioinnissa ja seurannassa. (HELCOM, 2009)

Veden *a*-klorofyllipitoisuutta käytetään yleisesti kuvaamaan kasviplanktonin biomassaa, koska *a*-klorofylli on kasviplanktonin tärkein yhtettämiseen käytetty pigmentti (HELCOM, 2009). Kasviplanktonin määrä vedessä vaihtelee kausittain, kuten kappaleessa 2.2.2 todettiin. Ajallinen ja paikallinen vaihtelu on kuitenkin erityisen suurta kevätkukinnan aikana (Rantajärvi ym., 1998). Esimerkiksi Suomenlahden *a*-klorofyllipitoisuuden perustaso on 1–5  $\mu\text{g}/\text{l}$ , mutta kevätkukinnan aikana valtaosa mitatuista pitoisuuksista on välillä 20–40  $\mu\text{g}/\text{l}$ , maksimiarvojen ollessa yli 100  $\mu\text{g}/\text{l}$ . (Vepsäläinen ym., 2005)

Perinteisesti vedenlaadun seuranta on perustunut vesinäytteiden keräykseen havaintoasemilta ja laboratorioanalyysiin. Havaintoasemamittaukset ovat tarkkoja, mutta niiden ajallinen ja paikallinen kattavuus on usein heikko. Mittaukset ovat pistemäisiä eikä niitä tehdä kovinkaan tiheästi. Jotta voimakkaita ja nopeasti muuttuvia tilanteita – kuten kevätkukinta – pystytään seuraamaan luotettavasti, mittaustiheys pitää olla suuri sekä ajallisesti että paikallisesti. (Rantajärvi ym., 1998) Vedenlaadun seurantaa on pyritty parantamaan käyttämällä uusia tutkimusvälineitä, kuten kaukokartoitusinstrumentteja ja laivoihin asennettuja automaattisia mittausteistoja (Pulliainen ym., 2004; Vepsäläinen ym., 2005; Kahru, 1997; Rantajärvi, 2003; Kutser, 2004; Reinart & Kutser, 2006; Koponen, 2006).

## Luku 3

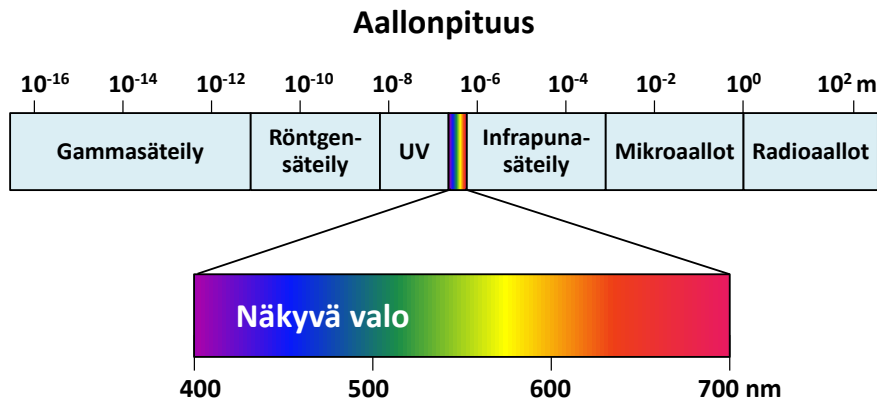
# Vedenlaadun kaukokartoitus Itämerellä

### 3.1 Kaukokartoituksen perusteet

Kaukokartoitus tarkoittaa kohteen ominaisuuksien mittaamista tai tutkimista ilman fyysistä kosketusta kohteeseen (Jensen, 2000). Kaukokartoituksessa mitataan tutkittavan kohteen emittoimaa tai heijastamaa aaltoliikettä, joka kulkee väliaineessa kohteen ja mittalaitteen välillä. Eniten kaukokartoituksessa käytetään sähkömagneettista säteilyä, joissain tapauksissa myös ääniaaltoja. Erilaisia väliaineita ovat esimerkiksi avaruuden tyhjiö, ilmakehä ja vesi. Sekä tutkittavan kohteen että väliaineen ominaisuudet vaikuttavat säteilyn kulkuun. Tärkeimmät säteilyyn vaikuttavat prosessit ovat heijastuminen, sironta eli säteilyn hajaantuminen eri suuntiin, absorptio eli säteilyn imeytyminen kohteeseen ja taittuminen.

Passiivisessa kaukokartoituksessa mittalaite eli instrumentti mittaa kohteen itse emittoimaa säteilyä tai siitä heijastunutta auringon säteilyä. Aktiivisessa kaukokartoituksessa instrumentti lähettää säteilyä kohteeseen ja vastaanottaa heijastuneen säteilyn. Kaukokartoitusinstrumentteja ovat muun muassa spektrometrit, laserit ja kamerat, ja ne sijaitsevat yleensä satelliiteissa, lentokoneissa tai helikoptereissa. (Jensen, 2000)

Sähkömagneettinen säteily voidaan jakaa aallonpituuden mukaan gammasäteilyyn, röntgensäteilyyn, ultraviolettisäteilyyn, näkyvään valoon, infrapunasäteilyyn, mikroaaltoihin ja radioaaltoihin kuvan 3.1 mukaisesti. Kaukokartoituksessa yleisesti käytettyjä aallonpituusalueita ovat näkyvä valo, infrapunasäteily ja mikroaallot (Robinson, 1994).



**Kuva 3.1:** Sähkömagneettisen säteilyn spektri Jensenin (2000) mukaan.

Vedenlaadun kaukokartoitus perustuu auringonsäteilyn ja veden vuorovaikutukseen. Auringonsäteily sisältää kaikkia aallonpituuksia välillä 200 nm – 3  $\mu\text{m}$ , ultraviolettisäteilystä lähi-infrapunasäteilyyn. Auringonsäteilystä vain näkyvä valo ja pienet kaistat ultravioletti- ja infrapunasäteilyä pystyvät tunkeutumaan veteen riittävän syvälle, jotta saadaan tietoa vesimassan ominaisuuksista. Tämän takia vedenlaadun kaukokartoituksessa käytetyin sähkömagneettisen spektrin osa on näkyvä valo eli aallonpituusalue 380–760 nm (Leppäranta & Myrberg, 2009), kun taas pidemmillä aallonpituusalueilla pystytään saamaan tietoa veden pinnasta, esimerkiksi aallokosta. (Robinson, 1994).

Auringonsäteilyn saapumista maahan kuvaa irradianssi  $E_\lambda$ , joka tarkoittaa tietyllä aallonpituudella  $\lambda$  saapuvaa säteilyvuota tiettyä pinta-alaa kohti. Irradianssin yksikkö on  $W/m^2$ . (Jensen, 2000) Maahan saapuvalla säteilyllä on kaksi tulokulma: atsimuuttikulma  $\varphi$  ja zeniittikulma  $\theta$ . Atsimuuttikulma on säteilyn ja horisontaalitasoin välinen kulma, zeniittikulma on pystysuuntainen tulokulma eli zeniitin ja säteilyn suunnan välinen kulma. Kulmat vaihtelevat välillä  $0 \leq \theta \leq \pi$  ja  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ . (Mobley, 1994)

Kaukokartoituksessa tärkeä suure radianssi  $L_\lambda$  on tietyllä aallonpituudella kulkeva säteily, joka lähtee tai saapuu tietylle pinta-alalle tietyssä suunnassa ja tietyllä avaruuskulmalla. Radianssin yksikkö on  $Wm^{-2}sr^{-1}$ . (Jensen, 2000)

Kohteen kykyä vaikuttaa säteilyyn kuvataan suhdeluvuilla, joissa verrataan tietyllä aallonpituudella heijastunutta ja sironnutta, absorboitunutta tai läpäissyttä

säteilyä kappaleeseen saapuneen säteilyyn. Absorptiokyky eli absorptanssi  $A_\lambda$  on siis aallonpituudella  $\lambda$  absorboitunut säteily jaettuna samalla aallonpituudella  $\lambda$  saapuneen säteilyn määrällä. Vastaavasti saadaan heijastuskyky eli reflektanssi  $B_\lambda$  ja läpäisykyky eli transmittanssi  $T_\lambda$ :

$$A_\lambda = \frac{\text{aallonpituudella } \lambda \text{ absorboitunut säteily}}{\text{aallonpituudella } \lambda \text{ saatu säteily}} \quad (3.1a)$$

$$B_\lambda = \frac{\text{aallonpituudella } \lambda \text{ heijastunut säteily}}{\text{aallonpituudella } \lambda \text{ saatu säteily}} \quad (3.1b)$$

$$T_\lambda = \frac{\text{aallonpituudella } \lambda \text{ läpäissyt säteily}}{\text{aallonpituudella } \lambda \text{ saatu säteily}} \quad (3.1c)$$

Energian säilymisen periaatteen takia:

$$A_\lambda + B_\lambda + T_\lambda \equiv 1 \quad (3.2)$$

Näiden suhdelukujen arvot ovat nollan ja yhden välillä, ja ne ovat yksiköttömiä. Yhtälö 3.2 on voimassa vain kun aallonpituus on vakio. (Jensen, 2000)

Aineen optisia ominaisuuksia kuvaavat absorptiokerroin  $a_\lambda$ , sirontakerroin  $b_\lambda$  ja läpäisykerroin  $c_\lambda$ , joiden arvot myös riippuvat aallonpituudesta  $\lambda$ . Absorptiokerroin  $a_\lambda$  ja sirontakerroin  $b_\lambda$  kuvaavat edellä mainittuja absorptiokykyä sekä heijastus- ja sirontakykyä pituusyksikköä kohti:

$$a_\lambda = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{A_\lambda}{\Delta r} \quad (3.3a)$$

$$b_\lambda = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{B_\lambda}{\Delta r} \quad (3.3b)$$

Vaimennuskerroin kuvaa säteilyn kokonaisvaimennusta aineessa ja se saadaan ab-

sorptio- ja sirontekertoimien summasta:

$$c_\lambda = a_\lambda + b_\lambda \quad (3.4)$$

Absorptio-, sironta- ja vaimennuskertoimien yksikkö on 1/m. (Mobley, 1994)

Kulkiessaan optisesti erilaisesta aineesta toiseen säteily taittuu rajapinnassa Snellin lain mukaisesti:

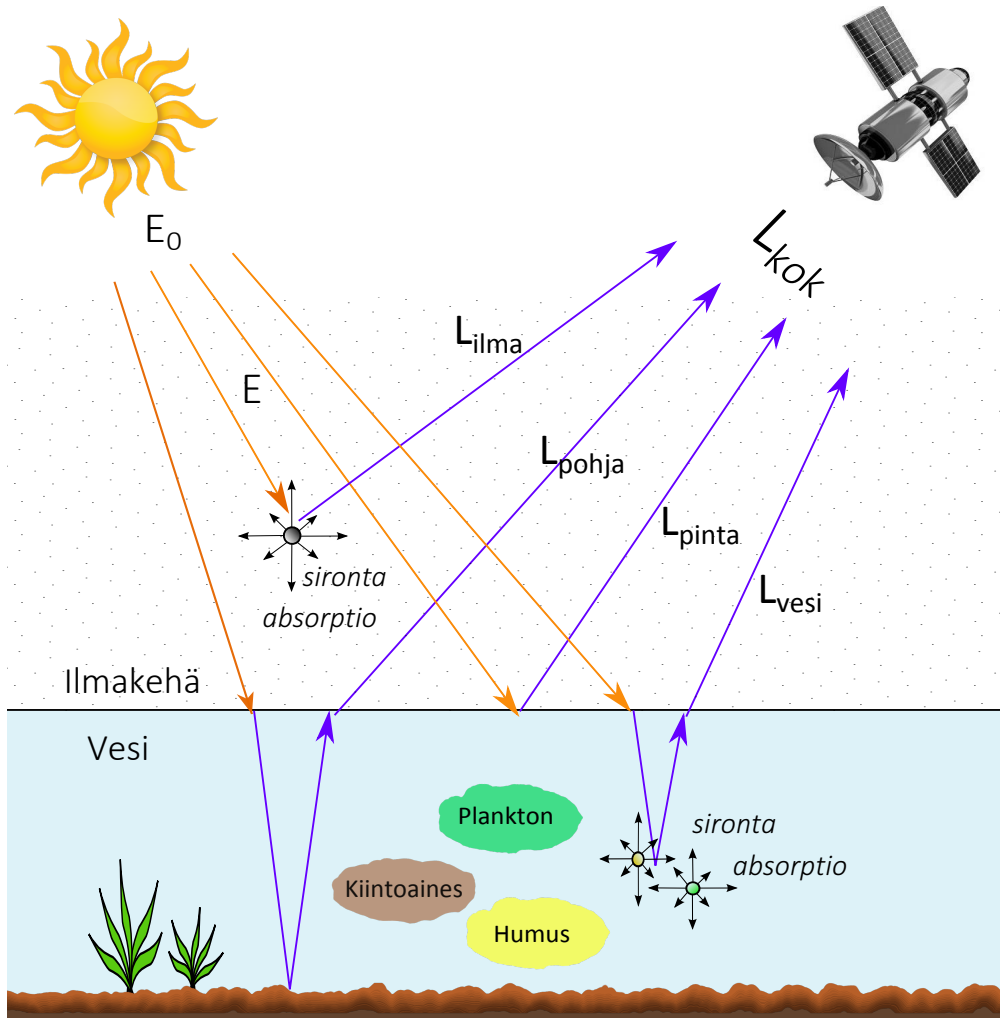
$$\sin \alpha = \frac{n_B}{n_A} \sin \beta \quad (3.5)$$

missä  $\alpha$  on aineesta A aineeseen B tulevan säteilyn tulokulma ja  $\beta$  taitekulma,  $n_A$  ja  $n_B$  ovat aineiden taitekertoimia. Ilmalle  $n = 1$  ja vedelle  $n = 1,33$  (Myrberg ym., 2006). Koska vesi on optisesti ilmaa tiheämpää ainetta, ilmasta veteen kulkeva säteily kääntyy vedessä kohti pinnan normaalia. Vastaavasti vedestä ilmaan kulkeva säteily kääntyy ilmassa pois päin pinnan normaalista. Myös ilmakehässä säteily taittuu kulkiessaan eritiheisten ilmakerrosten läpi. Ilmakehän eri rajapintojen taitesuhteet ( $\frac{n_B}{n_A}$ ) ovat kuitenkin pienempiä kuin ilman ja veden taitesuhde. Ilma on yleensä tiheintä lähellä merenpintaa. (Jensen, 2000)

## 3.2 Säteilyn kulku ilmakehässä ja vedessä

Auringonsäteilyn kulku veteen ja vedestä kaukokartoitusinstrumenttiin on ei ole suoraviivaista, vaan matkalla tapahtuu siroamista, absorboitumista, heijastumista ja taittumista. Kuva 3.2 esittää skemaattisesti ja yksinkertaistetusti näkyvän valon alueella säteilyn kulkua ilmakehässä ja vedessä.

Kuvassa 3.2  $E_0$  on ilmakehän yläpuolinen irradianssi eli Auringosta lähtevä säteilyvuoto. Ilmakehä läpäisee näkyvää valoa melko hyvin, mutta osa säteilystä voi absorboitua tai sirota takaisin avaruuteen (kuvassa  $L_{ilma}$ ) ilmakehän kaasumolekyyleistä, vesihöyrystä tai hiukkasista (Robinson, 1994). Myös pilvet sirottavat, heijastavat ja absorboivat näkyvää valoa hyvin ja estävät näin auringonsäteilyn pääsyä maanpinnalle. (Robinson, 1994)



**Kuva 3.2:** Skemaattinen kuva vedenlaadun kaukokartoituksesta.  $E_0$  on ilmakehän yläpuolinen irradianssi.  $E$  on ilmakehän alapuolinen irradianssi.  $L_{ilma}$  on ilmakehän hiukkasista siroava radianssi.  $L_{pohja}$  on veden pohjasta ilmakehään takaisinsiroava radianssi.  $L_{pinta}$  on veden pinnasta heijastuva radianssi.  $L_{vesi}$  on veden pinnanalaisesta kerroksesta siroava radianssi.  $L_{kok}$  on instrumentin havaitsema kokonaisradianssi.



Kuvassa  $E$  on ilmakehän alapuolinen irradianssi eli se osa auringon irradianssia, joka saapuu maanpinnalle asti. Saapuessa veden ja ilmakehän rajapintaan osa säteilystä heijastuu takaisin ilmakehään ja avaruuteen (kuvassa  $L_{pinta}$ ). Tyynestä vedenpinnasta heijastuva säteily noudattaa Fresnelin peiliheijastuslakia, jonka mukaan tulokulma ja heijastuskulma ovat yhtä suuret (Myrberg ym., 2006). Tasaisen karkeasta vedenpinnasta tapahtuu diffuusi heijastuminen eli valonsäteet heijastuvat moneen eri suuntaan (Jensen, 2000).

Osa irradianssista läpäisee ilman ja veden rajapinnan ja tunkeutuu veteen. Vedessä säteily vuorovaikuttaa veden ja vedessä olevien orgaanisten ja epäorgaanisten aineiden kanssa. Osa säteilystä absorboituu, mutta osa siroaa. Sironneesta säteilystä osa päätyy takaisin ilmakehään ja avaruuteen. Tämä vedestä lähtevä radianssi (kuvassa  $L_{vesi}$ ) kuljettaa mukanaan tietoa vesimassan vedenlaadullisista ominaisuuksista. (Jensen, 2000)

Osa veteen tunkeutuneesta säteilystä voi edetä pohjaan saakka ja heijastua vielä takaisin veden pintaan ja poistua ilmakehään. Tämä pohjasta lähtevä radianssi  $L_{pohja}$  on hyödyllinen tutkittaessa pohjan ominaisuuksia, mutta varsinaisesta vesimassasta on vaikea saada tietoa sen avulla. (Jensen, 2000) Pohjan vaikutus riippuu veden syvyydestä ja kirkkaudesta, veden olevista aineksista ja pohjan laadusta. (IOCCG, 2000) Auringonsäteilyn tunkeutumissyvyys on puhtaassa vedessä noin 100 metriä, sameissa vesissä vain muutamia metrejä. (Myrberg ym., 2006) Näin ollen pohjasta heijastuva radianssi on merkittävä lähinnä kirkkailla ja matalilla vesialueilla.

Vedenlaadun kaukokartoituksessa instrumentin havaitsema kokonaisradianssi  $L_{kok}$  on ilmakehästä ja veden eri kerroksista peräisin olevien radianssien summa:

$$L_{kok} = L_{ilma} + L_{pinta} + L_{vesi} + L_{pohja} \quad (3.6)$$

Vedenlaadun kaukokartoituksessa kiinnostavaa on erottaa pinnanalainen radianssi ( $L_{vesi}$ ) muista eli poistaa ilmakehän vaimennuksen ( $L_{ilma}$ ), pinnan heijastumien ( $L_{pinta}$ ) ja pohjan radianssin ( $L_{pohja}$ ) aiheuttamat vaikutukset. (Jensen, 2000)

### 3.3 Itämeren optiset ominaisuudet

Luonnonvesien optisiin ominaisuuksiin vaikuttavat vesi itse ja vedessä oleva orgaaninen tai epäorgaaninen aines, jotka absorboivat ja sirottavat auringon säteilyä. Näiden optisesti aktiivisten aineiden ja säteilyn välinen vuorovaikutus riippuu vahvasti säteilyn aallonpituudesta, joten säteilyn sironta- ja absorptiospektrien avulla saadaan tietoa veden ominaisuuksista ja vedenlaadusta. Itämeressä tärkeimmät absorboivat aineet ovat veden itsensä lisäksi kasviplanktonin sisältämä klorofylli, humus ja kiintoaine (Myrberg ym., 2006).

#### 3.3.1 Vesi

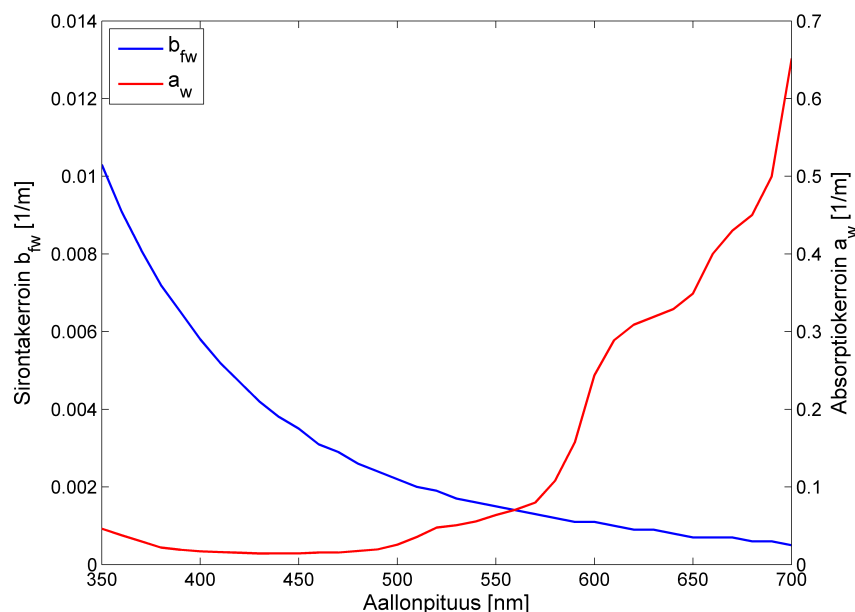
Puhdas vesi absorboi näkyvän valon alueella erityisesti pidempiä aallonpituuksia eli punaista valoa ja sirottaa tehokkaimmin lyhyitä aallonpituuksia eli sinistä valoa. (Pope & Fry, 1997; Smith & Baker, 1981) Kuvassa 3.3 on esitetty Smithin & Bakerin (1981) mittaama absorptiospektri puhtaalle merivedelle ( $a_w$ ) ja sirontapektri puhtaalle makealle vedelle ( $b_{fw}$ ) näkyvän valon alueella. Meriveden liuenneen suolan vaikutus absorptiospektriin on vähäinen näkyvän valon alueella ja voimakkaampi ultraviolett- ja infrapuna-alueilla (IOCCG, 2000), joten kuvassa 3.3 olevan absorptiospektrin  $a_w$  voidaan olettaa kuvaavan myös puhtaan makean ja murtoveden absorptiota.

Puhtaassa vedessä absorptio on huomattavasti suurempi (noin kaksi kertaluokkaa) kuin sironta, joten kuvassa 3.3 on molemmille suureille oma mitta-asteikkonsa.

#### 3.3.2 Kasviplankton

Kuten kappaleessa 2.2 tuli ilmi, kasviplankton on koko vesiympäristön ravintoketjun perusta ja siksi vedenlaadun seurannan kannalta hyvin merkittävä optisesti aktiivinen aines.

Kasviplankton käyttää auringonvaloa yhteyttämiseen ja absorboi siksi voimakkaasti tietyillä näkyvän valon aallonpituuksilla (Robinson, 1994). Kasviplanktonin absorptio- ja sirontaominaisuuksiin vaikuttavat sen sisältämät väripigmentit, joista merkittävin on *a*-klorofylli (chl-a). Kaikki kasviplanktonilajit – niin mikrolevät kuin



**Kuva 3.3:** Puhtaan veden absorptiokerroin  $a_w$  ja sirontakerroin  $b_{fw}$  näkyvän valon alueella Smith & Baker (1981) mukaan.

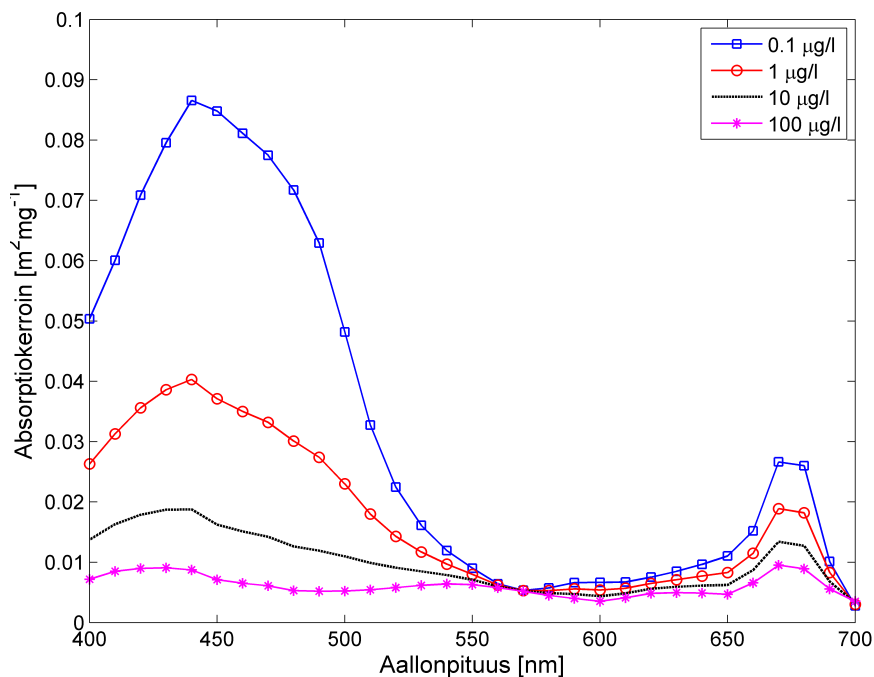
syonobakteeritkin – sisältävät *a*-klorofylliä, joka on vihreä pigmentti. *a*-klorofylli on kasviplanktonin pääsasiallinen yhtettämispigmentti, joten *a*-klorofyllipitoisuus kuvastaa hyvin vedessä olevan kasviplanktonin biomassaa (HELCOM, 2009). Kasviplankton sisältää *a*-klorofyllin lisäksi myös muita väripigmenttejä, kuten *b* - tai *c* -klorofylliä, karotenoideja tai fykobiliineja. Kasviplankton voi näyttää vihreän sijaan keltaiselta, sini-vihreältä, ruskealta tai punaiselta, riippuen eri pigmenttien määrästä. (Weaver & Wrigley, 1994)

Kasviplanktonin absorptiota on tutkittu paljon eri alueilla ja erilaisilla vesillä (Prieur & Sathyendranath, 1981; Bricaud ym., 1983; Sathyendranath ym., 1987; Bricaud ym., 1988; Kirk, 1994; Bricaud ym., 1995; Babin ym., 2003; Seppälä ym., 2005). Näiden tutkimusten perusteella nähdään, että kasviplanktonin absorptio vaihtelee lajin, solujen koon ja muodon, pigmenttikoostumuksen ja ympäristön mukaan. Koska vaihtelut tuloksissa ovat suuria, pitäisi kasviplanktonin optiset ominaisuudet määrittää alueellisesti.

Eri alueiden kasviplanktonilla ja eri kasviplanktonilajien absorptioilla on kuitenkin yhtenäisiä piirteitä, jotka johtuvat *a*-klorofyllin vaikutuksesta. *a*-klorofylli absor-

boi voimakkaasti sinistä valoa aallonpituuskaistalla 430–440 nm ja jonkin verran punaista valoa kaistalla 660–690 nm (Mobley, 1994; Myrberg ym., 2006).

Kasviplanktonin absorptioon vaikuttaa myös *a*-klorofyllin pitoisuus (Prieur & Satyendranath, 1981; Bricaud ym., 1995). Kuvassa 3.4 on kasviplanktonin absorptiospektrejä Bricaudin ym. (1995) analyysin mukaan, kun *a*-klorofyllin pitoisuus on 0.1, 1, 10 ja 100  $\mu\text{g/l}$ . Kuvassa näkyy korkea piikki 440 nm kohdalla varsinkin pienillä pitoisuuksilla ja matalampi huippu 670 nm kohdalla. Matalammalta 670 nm aallonpituuskaistalta voidaan saada tietoa kasviplanktonin absorptiosta erityisesti vesialuilla, joilla on monta veden optisiin ominaisuuksiin vaikuttavaa komponenttia (Arst, 2003). Esimerkiksi humus absorboi voimakkaasti sinisen valon alueella ja voi vaikuttaa kasviplanktonin absorptiospektriin.



**Kuva 3.4:** Kasviplanktonin absorptiospektrit eri klorofyllipitoisuuksille (0.1–100  $\mu\text{g/l}$ ) Bricaudin ym. (1995) tuloksien mukaan.

### 3.3.3 Humus

Humus eli CDOM (coloured, dissolved organic matter) on veteen liuennutta kuollutta eloperäistä aineista. Tämä orgaaninen aines voi olla peräisin vedessä olevista organismeista, kuten kuolleesta kasviplanktonista, tai se voi olla kulkeutunut maalta veteen. Humuspitoisuus on merivesillä yleensä suurempaa rannikoilla ja jokisuistoissa kuin avomerellä (Kirk, 1994). Suuri humuspitoisuus saa veden näyttämään keltaisemmalta, koska humus absorboi voimakkaasti lyhyitä aallonpituuksia näkyvän valon alueella ja absorptio pienenee eksponentiaalisesti pidempiä aallonpituuksia eli punaista valoa kohti (Kirk, 1994; Myrberg ym., 2006). Itämerellä humuksen absorptio vaihtelee alueittain ja absorptio kasvaa mentäessä kohti pohjoista (Attila ym., 2013).

### 3.3.4 Kiintoaine

Kiintoaine on laaja joukko erilaisia epäorgaanisia partikkeleita, jotka vaikuttavat veden väriin ja optisiin ominaisuuksiin. Kiintoaine voi koostua jokien kuljettamasta sedimentistä, pohjasta liuenneesta sedimentistä tai eroosion irrottamasta pohja-aineksestä. Kiintoaineella ei ole tietynlaista absorptiospektriä. Sen sijaan absorptio- ja sirontaominaisuuksiin vaikuttavat kiintoaineen sisältämä materiaali ja partikkelikoko. (Robinson, 1994) Usein kiintoaine kuitenkin absorboi enemmän lyhyitä kuin pitkiä aallonpituuksia. (Myrberg ym., 2006) Kiintoaineen määrä ja laatu vaihtelee alueellisesti paljon, mutta yleensä kiintoaineen määrä on suurin rannikko- ja sisävesillä (IOCCG, 2000).

### 3.3.5 Vesien optinen luokittelu

Morel & Prieur (1977) esitti, että meret voidaan jakaa niiden sisältämien ainesosien suhteiden perusteella kahteen luokkaan: Case 1 ja Case 2. Luokkien määritelmät ovat myöhemmin hioneet muun muassa Gordon & Morel (1983) ja Prieur & Sathyendranath (1981). Case 1 -luokkaan kuuluvissa vesissä kasviplankton on dominoivin osa, kun taas humuksen ja kiintoaineen vaikutus veden optisiin ominaisuuksiin on pientä. Tällaisia vesiä ovat lähinnä valtameret. Järvet ja rannikkovedet

kuuluvat usein Case 2 -vesiin, joissa kasviplantonin lisäksi optisiin ominaisuuksiin vaikuttavat selvästi myös humus ja/tai kiintoaine.

Case 1 -luokka on melko tarkasti määritelty, kun taas Case 2 -luokka voi sisältää laajan joukon optisilta ominaisuuksiltaan erilaisia vesiä. Case 2 -vesissä dominoivin osa voi olla humus tai kiintoaine, kaksi ainetta voi olla yhtä vaikuttavia ja kolmas huomattavasti merkityksettömämpi, tai kaikki kolme ainesta voivat olla hyvin merkittäviä. (IOCCG, 2000) Itämeri kuuluu Case 2 -luokkaan suuren kiintoaine- ja humuspitoisuuden ansiosta (Koponen, 2006).

Vedenlaadun kaukokartoituksen kannalta vesien luokittelu on hyödyllistä. Optisesti monimutkaisilla Case 2 -vesillä satelliitin havaitsema takaisinsironta ei ole aina yksiselitteinen meren ominaisuuksien kanssa ja eri aineiden vaikutusta takaisinsirontaa voi olla vaikea erottaa toisistaan. Case 1 -alueille kehitetyt algoritmit eivät yleensä sovellu Case 2 -vesille, joten paikallisten algoritmien kehittäminen on välttämätöntä. (IOCCG, 2000; Koponen, 2006)

### **3.4 Vedenlaadun seurannan välineet**

Vedenlaadun kaukokartoitukseen parhaiten soveltuvat instrumentit ovat spektrometrejä, jotka mittaavat näkyvää valoa usealla kapealla aallonpituuskanavalla. Kanavien tulee olla valittu siten, että ne mittaavat juuri optisesti aktiivisten aineiden kannalta merkittäviä aallonpituuksia. (Jensen, 2000; Ritchie ym., 2003)

Itämeren vedenlaadun seurantaan soveltuva ja paljon käytetty optinen kaukokartoitusinstrumentti on Envisat-MERIS (Doerffer ym., 1999; Koponen, 2006; Reinart & Kutser, 2006; Kratzer ym., 2008; Attila ym., 2013). Toinen perinteisestä havaintoasemamittauksista poikkeava aineisto on kauppalaivojen avulla kerätty Alg@line-aineisto.

#### **3.4.1 Envisat-MERIS**

Envisat on Euroopan Avaruusjärjestön (European Space Agency, ESA) satelliitti, joka laukaistiin 2002 mukanan kymmenen erilaista instrumenttia. Satelliitin toiminta päättyi yllättäen 8.4.2012.

Vedenlaadun kaukokartoituksen kannalta tärkeä instrumentti Envisat-satelliitissa on MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer). MERIS on radiometri, joka mittaa näkyvää valoa ja lähi-infrapunasäteilyä 15 aallonpituuskanavalla. (ESA, 2014a) Eri kanavien aallonpituusalueet ja käyttökohteet näkyvät taulukossa 3.1.

MERIS-instrumentin maastoerotuskyky (spatiaalinen resoluutio) eli pienimmän havaittavan kohteen koko on 300 metriä. Ajallinen kattavuus (temporaalinen resoluutio) on kolme vuorokautta eli satelliitti on täsmälleen saman pisteen päällä kolmen vuorokauden välein (ESA, 2014a). Havaintoja esimerkiksi Itämeren alueelta saadaan kuitenkin useita kertoja vuorokaudessa.

**Taulukko 3.1:** Envisat-MERIS -instrumentin aallonpituuskanavat ja niiden pääasiallinen käyttötarkoitus. (ESA, 2014a)

Kanavan numero	Kanavan keskus (nm)	Kanavan levys (nm)	Käyttö
1	412.5	10	Humus ja kiintoaine
2	442.5	10	Klorofyllin absorptiomaksimi
3	490	10	Klorofylli ja muut pigmentit
4	510	10	Kiintoaine
5	560	10	Klorofyllin absorption minimi
6	620	10	Kiintoaine
7	665	10	Klorofyllin absorptio ja fluoresenssi
8	681.25	7.5	Klorofyllin fluoresenssiipiikki
9	708.75	10	Ilmakehäkorjaus
10	753.75	7.5	Kasvillisuus, pilvet
11	760.625	3.75	Hapen absorptio
12	778.75	15	Ilmakehäkorjaus
13	865	20	Kasvillisuus
14	885	10	Ilmakehäkorjaus
15	900	10	Vesihöyry, maa

Itämeren vedenlaadun tutkimuksessa ja seurannassa MERIS-instrumenttia on käytetty paljon. Instrumentin maastoerotuskyky on tarpeeksi pieni rannikkoalueiden

seurantaa varten, mutta riittävä suuri havaitsemaan isoja ilmiöitä, esimerkiksi levälauttoja (Doerffer ym., 1999). MERIS:n ajallinen kattavuus on hyvä, sillä päivittäin on mahdollista saada 1-3 kuvaa Itämeren alueelta. Myös aallonpituuskanavat on valittu hyvin vedenlaadun kaukokartoitusta ajatellen: kapeita kanavia on monta ja ne mittaavat *a*-klorofyllin, kiintoaineen ja humuksen kannalta oleellisia aallonpituusalueita. Envisat-satelliitin vielä toimiessa Itämeren vedenlaatua pystyttiin seuraamaan lähes reaaliaikaisesti. Nykyään käytössä on laadukas historiallinen satelliittiaineisto Itämeren vedenlaadusta vuosilta 2003–2011.

### 3.4.2 Muut kaukokartoitusinstrumentit

Itämeren vedenlaadun seurantaan voidaan käyttää MERIS-instrumentin lisäksi muitakin vedenlaadun kaukokartoitukseen soveltuvia instrumentteja. Tulevaisuudessa Sentinel 3A -satelliitin mukana oleva OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) tulee olemaan tärkein instrumentti Itämeren vedenlaadun seurannassa tuottaen vastaavia havaintoja kuin MERIS. Sentinel 3A on Euroopan avaruusjärjestö ESA:n satelliitti, jonka arvioitu laukaisuaika on vuonna 2015. (ESA, 2014b)

MERIS- ja OLCI-instrumenttien välisenä aikana Itämeren vedenlaadun seurantaan soveltuvia instrumentteja ovat Aqua-MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) tai Suomi NPP (National Polar-orbiting Partnership) VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite). Aqua ja Suomi NPP ovat molemmat Yhdysvaltojen ilmali- ja avaruushallinnon (National Aeronautics and Space Administration, NASA) tutkimussatelliitteja. MODIS- ja VIIRS-instrumentit tuottavat *a*-klorofyllimittauksia, mutta heikommalla maastoerotuskyvyllä kuin MERIS tai OLCI. (NASA, 2014a,b)

### 3.4.3 Alg@line

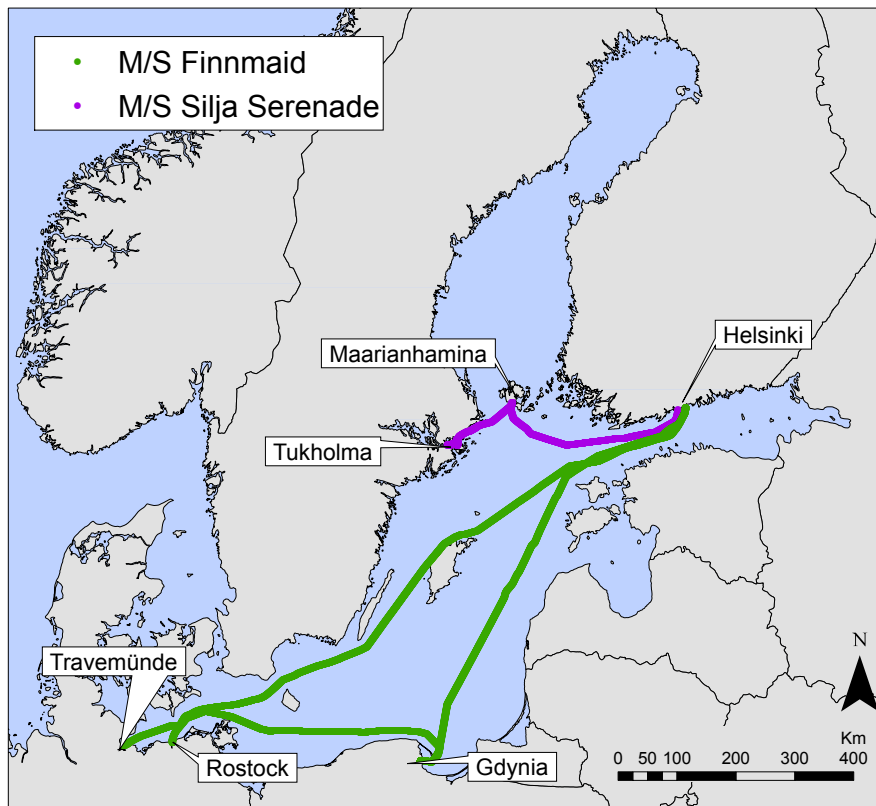
Alg@line on usean tutkimuslaitoksen ja laivayhtiöiden yhteinen projekti, jonka tarkoitus on tehostaa leväseurantaa Itämerellä, erityisesti ulapalla. Alg@line-projekti alkoi 1993 ja siinä ovat mukana SYKE ja monet suomalaiset alueelliset ympäristötoimijat, Viron EMI (Estonian Marine Institute), Ruotsin SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute), ja laivayhtiöistä esimerkiksi Silja Line ja Transfennica Ltd. (Rantajärvi, 2003)



Alg@line-projektin puitteissa Itämerellä liikkuviin matkustaja- ja kauppalaivoihin on asennettu läpivirtausperiaattella toimiva laitteisto, joka automaattisesti kerää tietoa vedenlaadusta. Laivan liikkussa vettä pumpataan noin 5 metrin syvyydestä laitteiston läpi. Laitteiston läpi kulkuvasta vedestä mitataan muun muassa *a*-klorofyllin fluoresenssi sekä veden suolaisuus ja lämpötila. Laivan liikkussa mitauksia tehdään noin 100–200 metrin välein. Automaattimittausten lisäksi laitteisto kerää vesinäytteitä, jotka myöhemmin analysoidaan laboratoriossa. Laboratoriossa määritetään *a*-klorofyllipitoisuus, humuspitoisuus, kasviplanktonin lajisto, veden sameus ja ravinteiden määrä. (Rantajärvi, 2003)

Tämä niin kutsuttu ”ship-of-opportunity” -menetelmä on parantanut Itämeren ulapan ekosysteemin seurantaa. Havaintoasemien ja tutkimusalusten tekemät mitaukset eivät ole tarpeeksi kattavia koko Itämeren seurantaan. Kauppalaivojen automaattimittaukset täydentävät perinteisiä tutkimusmenetelmiä suhteellisen edullisesti, hyvällä ajallisella ja paikallisella kattavuudella. Alg@line-aineistoja käytetään myös kaukokartoitusalgoritmien kalibrointiin ja validointiin. (Rantajärvi, 2003)

Nykyään Itämerellä kulkee useita matkustaja- ja kauppalaivoja mukanaan Alg@line-laitteisto. Suomen rannikovesien kautta kulkevia Alg@line-laivoja ovat muun muassa M/S Silja Serenade ja M/S Finnmaid, joiden *a*-klorofyllimittauksia on käytetty tässä tutkimuksessa. M/S Silja Serenade kulkee reitillä Helsinki – Maarianhamina – Tukholma ja M/S Finnmaid välillä Helsinki – Travemünde ja Helsinki – Rostock – Gdynia. Laivojen reitit on esitetty kuvassa 3.5. Helsingin ja Travemünden välillä ovat aiemmin kulkeneet myös M/S Finnjet (1992–1997) ja M/S Finnpartner (1998–2007). Alg@line-projektissa mukana olevien alusten automaattimittauksia ja erityisesti Helsingin ja Travemünden välillä tehtyjä *a*-klorofyllimittauksia on käytetty Itämeren vedenlaadun tutkimukseen (Rantajärvi ym., 1998; Pulliainen ym., 2004; Vepsäläinen ym., 2005; Fleming & Kaitala, 2006; Lips ym., 2007).



**Kuva 3.5:** Alg@line-laivojoen Silja Serenaden (violetti viiva) ja Finnmaidien (vihreä viiva) reitit vuonna 2010.

### 3.5 Ekologiset indikaattorit

Ekologiset indikaattorit ovat työvälineitä, joiden avulla voidaan arvioida ja seurata ympäristössä tapahtuvia muutoksia pitkällä aikavälillä. Indikaattorien avulla voidaan esimerkiksi arvioida vesialueen rehevöitymisen tasoa ja määrittää alueellisia trendejä. (Ferreira ym., 2011; Platt & Sathyendranath, 2008)

Platt & Sathyendranath (2008) ovat esitelleet ekologisen indikaattorin vaatimuksia: Indikaattorin tulisi kuvastaa jotain ekologista ominaisuutta, joka on helposti ymmärrettävissä ja laajasti käytetty. Tämä ominaisuus pitäisi olla mitattavissa yksiselitteisesti, nopeasti ja edullisesti. Mittausvälin tulisi olla niin tiheä, että päästään käsiksi sekä kausittaiseen että vuosittaiseen vaihteluun. Indikaattorin lasken-

tamenetelmien tulisi soveltua erityyppisille ja –laajuisille alueille. Näiden vaatimusten takia kaukokartoitusmenetelmät ja automaattisiin mittauksiin perustuvat menetelmät soveltuvat hyvin ekologisten indikaattorien kehitykseen.

*a*-klorofylliin perustuvat indikaattorit ovat varsin yleisiä. Kuten aikaisemmin mainittu, *a*-klorofyllipitoisuuksien avulla voidaan arvioida kasviplanktonin biomassan määrää. Kasviplanktonin biomassan kasvu taas on kytköksissä moneen muuhun tekijään, kuten esimerkiksi ravinnekuormitukseen ja vedenalaisen valon määrään. (Ferreira ym., 2011)

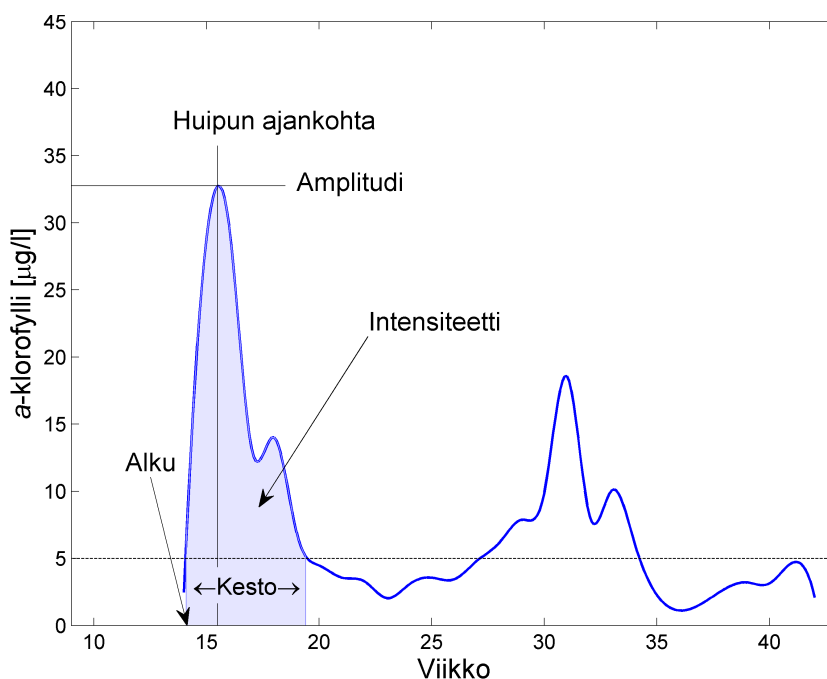
### 3.5.1 Kevätkukinnan indikaattorit

Platt & Sathyendranath (2008) ovat esitelleet neljä indikaattoria, joidena avulla seurataan kasviplanktonin kevätkukinnan vuosittaista ja paikallista vaihtelua. Tietyille alueelle lasketusta *a*-klorofyllipitoisuuden aikasarjasta voidaan määrittää kevätkukinnan alkamisen ajankohta, kukinnan kesto, kukinnan huippu eli suurin pitoisuus, ja huipun ajankohta. Alkamisajankohta ja kukinnan kesto voidaan määrittää *a*-klorofyllipitoisuuden kynnyksarvon avulla. Kynnyksarvo voi olla absoluuttinen eli tietty *a*-klorofyllipitoisuuden arvo, tai suhteellinen eli jokin osuus huipun arvosta.

Fleming & Kaitala (2006) ovat kehittäneet kasviplanktonin kevätkukinnalle intensiteetti-indeksin, joka on kukinnan voimakkuutta kuvaava indikaattori. Intensiiteetti-indeksi lasketaan *a*-klorofyllin aikasarjasta siten, että se on integraali ajalta, joilloin *a*-klorofyllipitoisuuden arvo ylittää kevätkukinnalle määritetyn kynnyksarvon. Fleming & Kaitala ovat laskeneet myös kevätkukinnan keskimääräisen pitoisuuden, huipun pitoisuuden sekä kukinnan alkamisajankohdan ja keston. Kevätkukinnan indikaattorit on esitetty kuvassa 3.6.

### 3.5.2 MARMONI-projekti

MARMONI (Innovative approaches for MARine biodiversity MONItoring and assessment of conservation status of nature values in the Baltic Sea) on Euroopan Unionin LIFE+ Nature & Biodiversity -ohjelman rahoittama hanke, jonka tavoitteena on kehittää työkaluja Itämeren elollisen luonnon monimuotoisuuden eli bio-



**Kuva 3.6:** Kevätkukinnan indikaattorit. Sininen viiva on interpoloitu spline-menetelmällä *a*-klorofyllin viikkokeskiarvoista Upinniemenselältä vuonn 2010. *a*-klorofyllin viikkokeskiarvot on laskettu MERIS-aineistosta. Vaaleansininen alue kuvaa kevätkukinnan ajanjaksoa. Kynnysarvo (5 µg/l) on esitetty katkoviivalla.

diversiteetin seurantaan varten. Projektissa kehitetään meriympäristön biodiversiteettiä kuvaavia indikaattoreita ja testataan uusia seurantamenetelmiä. Indikaattorien avulla seurataan lajien ja meren elinympäristöjen nykytilaa ja arvioidaan meren suojelutoimien tehokkuutta. Indikaattoreista saatua tietoa käytetään myös poliittisessa päätöksenteossa. Projektin toteutetaan Itämerellä Suomen, Ruotsin, Viron ja Latvian läheisillä vesialueilla. (MARMONI, 2014)

MARMONI-projektin puitteissa on kehitetty indikaattoreita kaloille, linnuille, meren pohjan eliöstöille ja pelagisen alueen eliöstöille. Tässä tutkielmassa esitetty kasviplanktonin kevätkukinnan intensiteetti-indeksi -indikaattori on kehitetty MARMONI-projektissa.

## Luku 4

### Aineistot ja menetelmät

#### 4.1 Tutkimusalueet

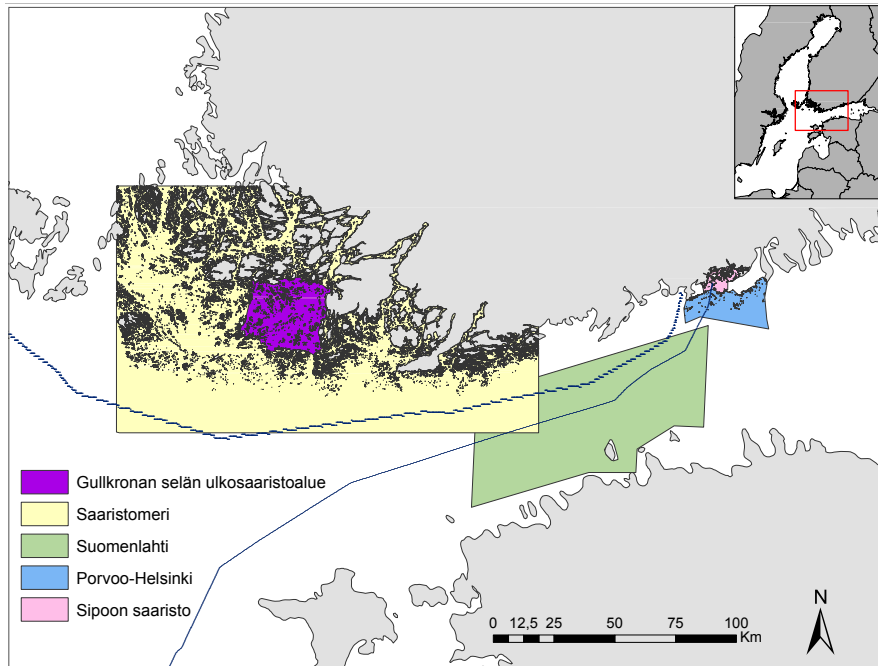
Tutkimusalueiksi on valittu kaksi MARMONI-projektin tutkimusaluetta, Saaristomeren rannikkoalue ja Suomenlahden avomerialue. Lisäksi mukana on kolme vesipuitedirektiivin mukaista rannikkovesimuodostumaa: Porvoo-Helsinki ja Sipoon saaristo Suomenlahdella sekä Gullkronan selän ulkosaaristoalue Saaristomerellä. Kartta tutkimusalueista on kuvassa 4.1.

Saaristomeren tutkimusalue on pinta-alaltaan noin 1 800 000 hehtaaria. Saaristomeren rannikko on hyvin pirstaleinen ja ympäristöltään monimuotoinen. Luontotyyppi vaihtelee sisäsaariston ja ulkosaariston välillä paljon. Alue on laajasti virkistys- ja tutkimuskäytössä. (MARMONI, 2014)

Suomenlahden tutkimusalue on Saaristomeren aluetta pienempi, kooltaan 420 150 hehtaaria. Suomenlahden avomerialue on tiheästi liikennöity ja suuren rasituksen kohteena. Happikato pohjan syvänteissä on varsin yleistä ja alue on altis rehevöitymiselle. (MARMONI, 2014)

Vesipuitedirektiivin mukaiset rannikkovesimuodostumat vaihtelevat koon ja tyyppin mukaan. Kaukokartoituksella ei välttämättä päästä käsiksi pieniin ja sisäisiin vesialuisiin, riippuen instrumentin maastoerotuskyvystä. Sen sijaan isompia ulkoisia alueita pystytään yleensä seuraamaan kaukokartoitusinstrumenttien avulla.

Sipoon saaristo ja Porvoo-Helsinki -vesimuodostumat sijaitsevat vierekkäin Helsingin, Sipoon ja Porvoon edustalla. Alueista pienempi eli Sipoon saaristo (pinta-



**Kuva 4.1:** Tutkimusalueet Suomenlahdella ja Saaristomerellä. Tummat viivat kuvaavat Alg@line-laivojen Silja Serenaden ja Finnmaiden reittejä.

ala 9 446 ha) on tyypiltään Suomenlahden sisäsaaristoa ja isompi Porvoo-Helsinki (42 535 ha) Suomenlahden ulkosaaristoa.

Gullkronan selän ulkosaaristoalue -vesimuodostuma on tyypiltään lounaista ulkosaaristoa ja se sijaitsee Kemiönsaaren ja Paraisten edustalla. Alue on kolmesta VPD-vesimuodostumasta suurin, pinta-alaltaan 82 284 hehtaaria.

## 4.2 Kaukokartoitusaineisto

Kaukokartoitusaineistona käytettiin ESA:n Envisat-MERIS -instrumentin reflektanssimittauksia Itämeren alueelta vuosilta 2003–2011. MERIS-aineisto on prosessoitu SYKessä EOMORE-projektissa. Aineisto on saatu esikäsittelynä gradutyötä varten.

Päivittäiset MERIS-kuvat on prosessoitu käyttäen BEAM (Basic ERS & Envisat (A)ATSR and MERIS Toolbox) -käyttöliittymää ja sen liitännäisosia (Brockmann

Consult, 2014). Kuvien automaattiseen esikäsittelyyn kuuluu radiometrinen korjaus, oikaisu ja pilvitunnistus. Reflektanssit on prosessoitu *a*-klorofyllipitoisuuksiksi käyttäen yhtä BEAM:n liitännäisosaa, FUB (Free University of Berlin) -prosessoria. MERIS-aineiston automaattinen esikäsittely SYKEssä on esitetty kaaviona kuvassa 4.2.

Päivittäiset kuvat on yhdistetty viikkokomposiiteiksi, joista laskettiin *a*-klorofyllin viikkokeskiarvon aikasarjat MARMONI-alueille ja valituille VPD-alueille. Esimerkkejä *a*-klorofyllitulkinnoista on kuvassa 4.3 ja aikasarjoista kuvassa 4.4. Kuvan 4.4 aikasarjoissa olevat käyrät interpoloitiin spline-menetelmällä *a*-klorofyllin viikkokeskiarvoista (kuvassa merkitty tähdillä).

MERIS-aineistoa oli saatavilla Itämeren alueella yleensä huhtikuusta lokakuulle, kattaen viikot 13–44. Näinä kuukausina Suomen rannikkovedet ovat suurimmaksi osaksi sulia ja toisaalta valon määrä on riittävä optiseen kaukokartoitukseen.

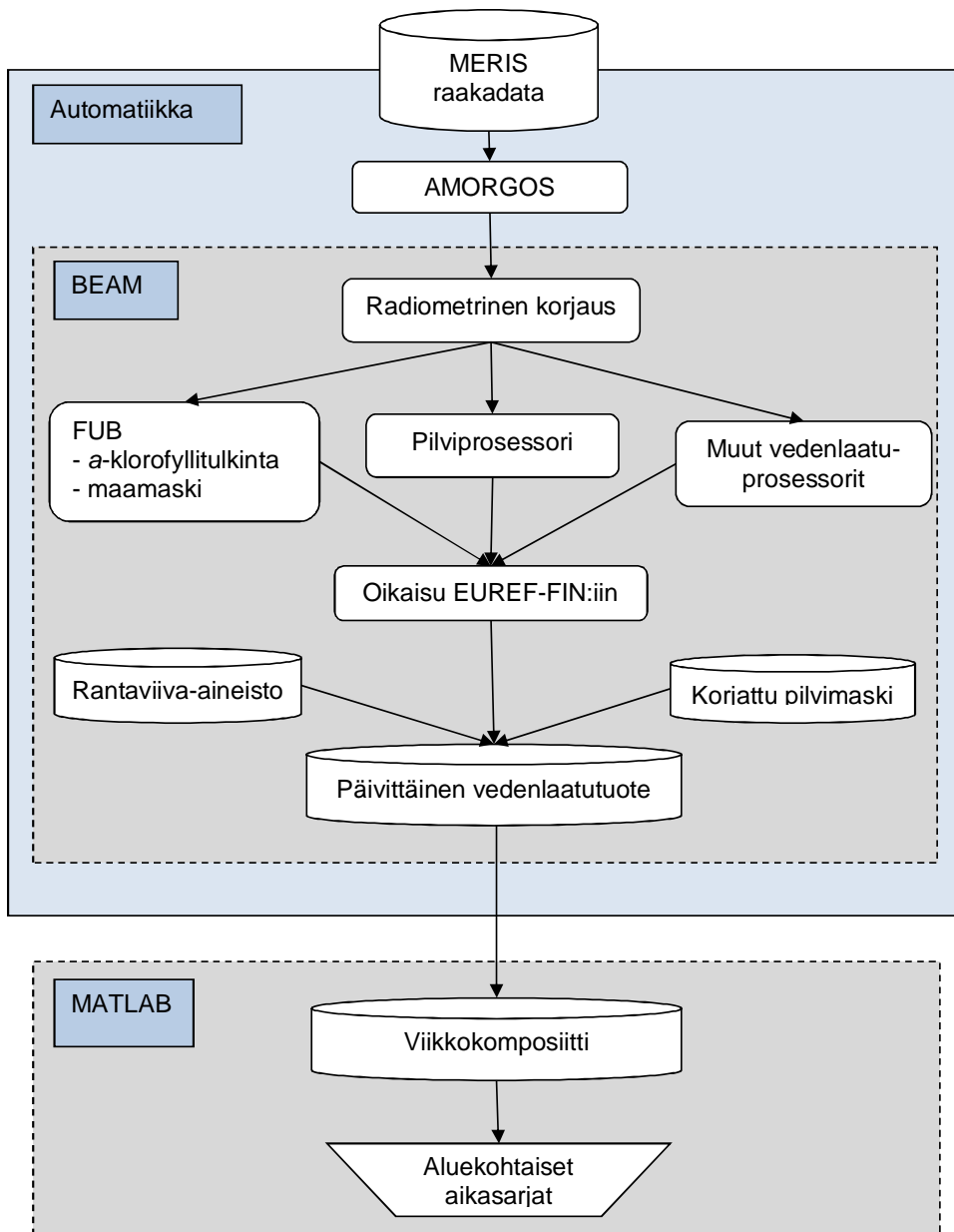
Aikasarjojen, histogrammien ja indikaattoreiden laskemiseen ja kuvien piirtoon käytettiin MATLAB-ohjelmaa (versio R2013a) (MathWorks, 2014).

#### 4.2.1 FUB-prosessori

BEAM-käyttöliittymä sisältää useita vedenlaatuprosessoreita, joiden avulla voidaan määrittää vedenlaadun parametrejä, kuten *a*-klorofyllipitoisuutta tai humuksen määrää. BEAM:n vedenlaatuprosessoreita on vertailtu monessa tutkimuksessa, ja on osoitettu, että FUB-prosessori soveltuu hyvin vedenlaatuparametrien määrittämiseen eri puolilla Itämeren (Kratzer ym., 2008; Vaičiūtė ym., 2012; Attila ym., 2013; Woźniak ym., 2014; Beltrán-Abaunza ym., 2014).

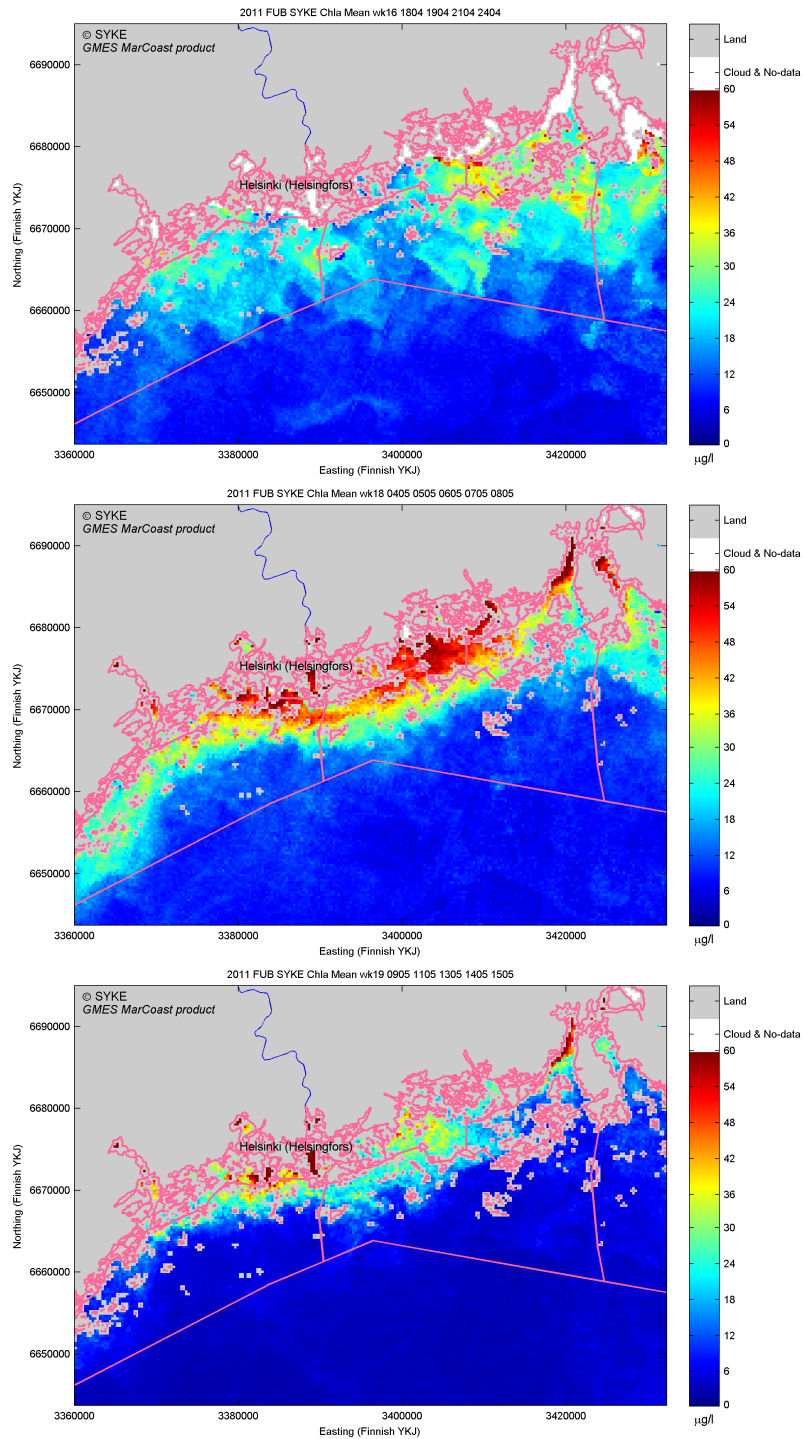
FUB on neuroverkkoihin perustuva bio-optinen prosessori, joka on kehitetty erityisesti optisesti monimutkaisia Case 2 -vesiä varten (Schroeder ym., 2007a,b). FUB hyödyntää neljää erillistä neuroverkkoa, joista yksi tekee ilmekehäkorjauksen ja kolme muuta määrittävät vedenlaatuparametrit radianssin arvoista.

MERIS-aineistolle tehtiin ilmakehäkorjaus ja määritettiin *a*-klorofyllipitoisuus FUB-prosessorilla.

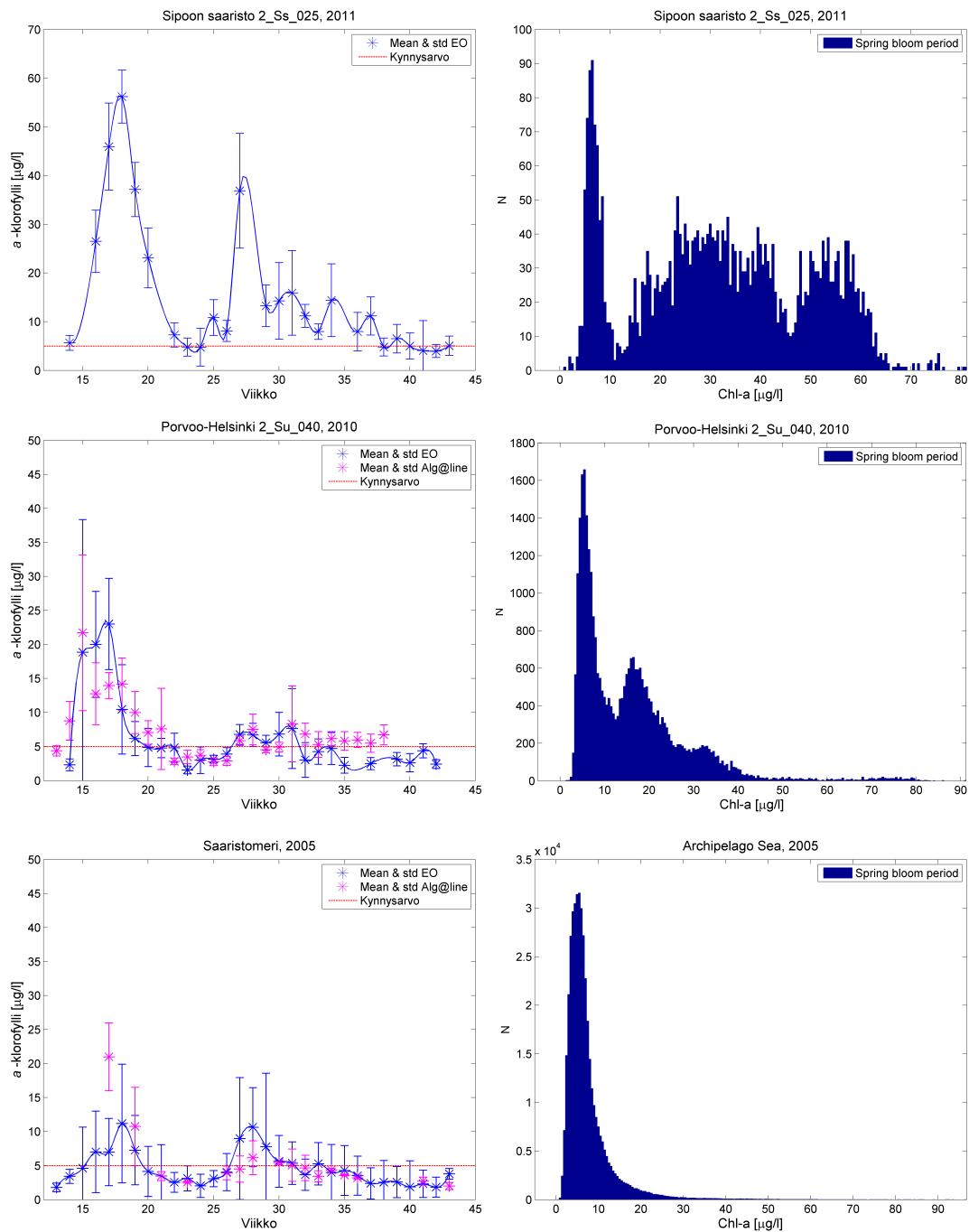


**Kuva 4.2:** MERIS-aineistojen prosessointiketju SYKEssä.





**Kuva 4.3:** Veden a-klorofyllipitoisuus Helsingin edustalla keväällä 2011. Ylimpänä viikkokeskiarvo viikolta 16 (18.-24.4.), keskellä viikko 18 (2.-8.5.) ja alimpana viikko 19 (9.-15.5.). Havainnot perustuvat MERIS-instrumentin mittauksiin. Harmaa väri kuvaa maata ja valkoinen pilveä. Vaaleanpunaiset viivat ovat VPD-alueiden rajoja.



**Kuva 4.4:** Vasemmalla ylhäällä on MERIS-aineistosta laskettu a-klorofyllin viikkokeskiarvo ja keskihajonta (EO, siniset tähdet ja pystyviivat) VPD-alueella Loviisa-Porvoo vuonna 2008. Sininen viiva on spline-interpolointi viikkokeskiarvoista. Punainen viiva kuvaa kevätukinnan kynnyksarvoa. Vasemmalla keskellä (VPD-alue Porvoo-Helsinki vuonna 2010) ja alhaalla (MARMONI-alue Saaristomeri vuonna 2011) on vastaavat a-klorofyllin aikasarjat, joihin on yhdistetty satelliittihavainnot (EO) ja Alg@line-mittaukset. Oikealla ovat kyseisten alueiden satelliittiaineistosta lasketun a-klorofyllipitoisuuden jakaumat kevätukinnan aikana. N on havaintojen lukumäärä.

### 4.2.2 Kaukokartoitusaineiston esikäsittely

Kaukokartoitusaineistojen esikäsittely on osa automattiikkaa SYKEssä. Esikäsitelyssä aineiston alkuperäinen sijainti on täydennetään AMORGOS (Accurate MERIS Ortho-Rectified Geo-location Operational Software) –ohjelmistolla, ja kuvat oikaistaan EUREF-FIN -koordinaatistoon. Pilvitunnistuksessa aineistolle tehdään ensin pilvitodennäköisyys BEAM:n MERIS pilviprosessorilla, joka antaa pikselikohtaisen todennäköisyyden välillä 0–1. Automaattinen pilvimaski saadaan kahden kynnyksarvon avulla: pilvitodennäköisyys on vähintään 0,2 ja aallonpituuksien 760,6 nm ja 620 nm radianssien suhde vähintään 0,18. Jälkimmäinen kriteeri estää sen, että erittäin sameat vesialueet tulkitaan virheellisesti pilveksi. Pilvien varjot voivat aiheuttaa vääristymiä vedenlaatutuotteisiin, joten virhearvojen estämiseksi pilveksi tulkittuja alueita laajennetaan kahden pikselin verran joka suuntaan. Alle 50 pikselin kokoiset aukot pilvissä täytetään automaattisesti. Päivittäisille kuville automaattisesti tehdyt pilvimaskit tarkastetaan ja tarvittaessa korjataan manuaalisesti.

Kuvista poistetaan myös maa-alueet. FUB-prosessori antaa myös maamaskin, jota täydennetään rantaviiva-aineistolla. Vektorimuotoinen rantaviiva-aineisto on muutettun rasteriaineistoksi, jolla on 300 metrin pikselikoko.

## 4.3 Alg@line-aineisto

Alg@line-mittalaitteet tekevät mittauksia yleensä ympäri vuoden, joten Alg@line-aineistoa voidaan käyttää esimerkiksi pilvisyydestä johtuvien aukkojen täydentämiseen MERIS-aineistossa. Alg@line-aineistosta käytössä oli M/S Silja Serenaden *a*-klorofyllimittaukset vuosilta 1998–2011, joista laskettiin *a*-klorofyllin aikasarjat MARMONI-alueille. M/S Finnmaiden *a*-klorofyllimittauksista vuodelta 2010 laskettiin aikasarjat kahdelle VPD-alueelle: Sipoon saaristo ja Porvoo-Helsinki.

Referenssiaineistona käytössä oli läntisen Suomenlahden kevätkukinnan intensiteetti-indeksin aikasarja vuosilta 1992–2008. Aikasarjan ovat tehneet Vivi Fleming-Lehtinen HELCOM:sta ja Seppo Kaitala SYKEstä. Tulokset vuosilta 1992–2004 on esitelty aiemmin (Fleming & Kaitala, 2006). Intensiteetti-indeksit on laskettu M/S

Finnjetin, M/S Finnpartnerin ja M/S Finnmaiden mittauksista välillä Helsinki – Traveünde.

#### 4.4 Kevätkukinnan indikattorien laskenta

Kasviplanktonin kevätkukinnan indikaattorit määriteltiin alue- ja vuosikohtaisesti *a*-klorofyllin viikkokeskiarvon aikasarjoista. Kevätkukinnalle asetettiin kaksi kynnyksarvoa: *a*-klorofyllipitoisuus ja aika. *a*-klorofyllipitoisuuden kiinteä kynnyksarvo on 5  $\mu\text{g/l}$ . Sama arvo on yleisesti käytössä Suomenlahdella, myös Flemingin ja Kaitalan (2006) artikkelissa. Kevätkukinnalle asetettiin myös aikaraja, joka on viikko 22. Kevätkukinta katsottiin päättyneeksi viikkoon 22, vaikka *a*-klorofyllipitoisuus olisi ollut vielä sen jälkeen yli 5  $\mu\text{g/l}$ . Varsinkin pienillä sisäisillä vesialueille *a*-klorofyllipitoisuus saattaa pysyä yli 5  $\mu\text{g/l}$  koko kauden, jolloin kevätkukinnan ajanjaksoa ei pystytä määrittelemään pelkästään *a*-klorofyllin pitoisuuden perusteella. Viikko 22 osuu touko–kesäkuun vaihteeseen, jolloin Suomenlahden kevätkukinta on tyypillisesti ohi. Kevätkukinnan ajanjaksoksi määritettiin siis se aika, jolloin alueen *a*-klorofyllin viikkokeskiarvo on vähintään 5  $\mu\text{g/l}$  ja viikon numero korkeintaan 22.

Kevätkukinnan alku on ensimmäinen viikko, jolloin viikkokeskiarvo on yli 5  $\mu\text{g/l}$ . Kukinnan kesto on kevätkukinnan ajanjakson pituus viikkoina. Kesto määritettiin myös päivissä (kertomalla viikkojen määrä seitsemällä), jotta tulokset ovat vertailukelpoisia referenssiaineiston kanssa. Aikasarjasta määritettiin huippu eli kevätkukinnan ajanjakson korkein viikkokeskiarvo ja huipun ajankohta eli kyseisen viikon numero. Huippuviikolta laskettiin myös korkein yksittäisen pikselin arvo, joka saattoi olla monta kertaa suurempi kuin alueen viikkokeskiarvo (ks. kuva 4.4). Kevätkukinnan intensiteti-indeksi laskettiin seuraavasti:

$$Indeksi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Chl_i \cdot \Delta t, \quad (4.1)$$

jossa  $Chl$  on *a*-klorofyllin viikkokeskiarvo,  $n$  on kevätkukinnan viikkojen lukumäärä ja  $\Delta t$  on kevätkukinnan kesto päivinä.

Kevätkukinnan ajanjaksolta piirrettiin myös histogrammi, josta näkyy *a*-klorofyllipitoisuuden jakauma (ks. kuva 4.4). Histogrammiin otettiin mukaan kaikki *a*-klorofyllin arvot kevätkukinnan ajalta.

## Luku 5

### Tulokset

#### 5.1 Kevätkukinnan indikaattorit

MERIS-aineistosta lasketut kasviplanktonin kevätkukinnan indikaattorit vahvistavat, että kevätkukinnassa on suurta alueellista ja vuosittaista vaihtelua (ks. taulukot 5.1 – 5.5).

Suurimmat intensiteetti-indeksit esiintyivät Sipoon saaristossa ja Porvoo-Helsinki -alueella. Sipoon saaristossa indeksi oli pienimmillään 151 ja suurimmillaan 1787. Porvoo-Helsingissä indeksi vaihteli välillä 231–786. Gullkronan selän ulkosaaristoalueella ja isoilla Suomenlahden ja Saaristomeren tutkimusalueilla indeksin arvot olivat pienempiä, pääosin alle 200. Kevätkukinnan kesto oli myös pisin Sipoon saaristossa ja Porvoo-Helsinki -alueella, keskimäärin noin kuusi viikkoa. Muilla alueilla kesto oli useimmiten 3–4 viikkoa. Huipun ajankohdassa on vuosien välistä vaihtelua joka alueella, mutta useimmiten huippu osuu viikkojen 16–17 välille eli huhtikuun loppupuolelle.

Kaikilla alueilla esiintyi *a*-klorofyllin viikkokeskiarvoa huomattavasti suurempia maksimiarvoja. Gullkronan selän ulkosaaristoalueella maksimiarvot pysyivät kaikkina vuosina alle 60  $\mu\text{g}/\text{l}$ , mutta muilla alueilla suurimmat havaitut arvot olivat lähellä 100  $\mu\text{g}/\text{l}$  ainakin osalla vuosista.

Alueiden väridiagrammeista (kuva 5.2) näkyy, että läheskään joka vuosi kukinnan alkua ei havaita pilvien tai jääolojen takia. Kun havaintoja ei ole kaikilta kevätviiikoilta, kyseisen vuoden intensiteetti-indeksi saattaa todellisuudessa olla laskettua indeksia suurempi, alku laskettua aikaisempi ja kesto pidempi. Erityisesti vuonna

2003 MERIS-aineistoa on niukasti kevätviikoilta, mikä näkyy suhteellisen pienissä intensiteetti-indeksin arvoissa. Esimerkiksi Sipoon saaristosta havaintoja on vain kahdelta viikolta kevätkukinnan lopulta.

Suomenlahden, Porvoo-Helsingin ja Sipoon saariston intensiteetti-indeksien aikasarjoista (kuvat 5.3 – 5.4) näkyy, että vuosina 2004 ja erityisesti 2005 kevätkukinta on ollut voimakasta, mutta vuonna 2006 kukinta on ollut selvästi heikompa. Vuodesta 2006 vuoteen 2011 on taas havaittavissa kevätkukinnan intensiteetin kasvua. Saaristomeren tutkimusalueella ja Gullkronan selän ulkosaaristoalueella ei aivan vastaavaa käyttäytymistä havaittu. Varsinkaan Gullkronan selän ulkosaaristoalueella kevätkukinnan intensiteetissä ei ole yhtä suurta vaihtelua kuin Suomenlahden alueilla.

**Taulukko 5.1:** Kevätkukinnan indikaattorit (intensiteetti-indeksi, huipun viikkokeskiarvo, huipun ajankohta, huipun maksimiarvo, alkuviikko ja kesto) MARMONI-projektin tutkimusalueella Suomenlahdella vuosina 2003–2011.

Vuosi	Intensiteetti-indeksi	Huipun ka ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	Huipun viikko	Suurin arvo ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	Alkuviikko	Kesto (vko)	Kesto (d)
2003	38	5,4	19	39,5	19	1	7
2004	176	7,6	16	61,9	15	4	28
2005	356	10,7	19	77,6	15	6	42
2006	95	8,4	16	75,9	16	2	14
2007	126	6,9	18	69,0	14	3	21
2008	175	7,8	17	49,9	16	4	28
2009	135	7,6	16	82,7	16	3	21
2010	152	7,5	17	58,2	15	3	21
2011	153	7,7	16	88,8	16	3	21

**Taulukko 5.2:** Kevätkukinnan indikaattorit MARMONI-projektin tutkimusalueella Saaristomerellä vuosina 2003–2011.

Vuosi	Intensiteetti-indeksi	Huipun ka ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	Huipun viikko	Suurin arvo ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	Alkuviikko	Kesto (vko)	Kesto (d)
2003	–	–	–	–	–	–	–
2004	179	8,1	18	87,7	15	4	28
2005	227	11,2	18	96,8	16	4	28
2006	86	6,1	16	91,0	16	2	14
2007	154	5,9	16	88,9	14	4	28
2008	205	8,3	17	92,6	14	4	28
2009	82	6,0	17	93,0	16	2	14
2010	168	6,6	16	99,7	15	4	28
2011	121	6,6	17	99,9	16	3	21

**Taulukko 5.3:** Kevätkukinnan indikaattorit VPD-alueella Sipoon saaristo vuosina 2003–2011.

Vuosi	Intensiteetti-indeksi	Huipun ka ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	Huipun viikko	Suurin arvo ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	Alkuviikko	Kesto (vko)	Kesto (d)
2003	151	14,3	21	31,0	21	2	14
2004	1551	63,5	18	98,4	16	7	49
2005	1787	50,5	15	52,3	15	8	56
2006	565	31,8	16	97,2	16	4	28
2007	649	21,7	15	42,8	14	7	49
2008	1082	32,8	17	68,0	14	8	56
2009	763	23,2	16	52,7	16	7	49
2010	1496	76,1	15	87,4	15	8	56
2011	1413	56,2	18	81,1	14	7	49

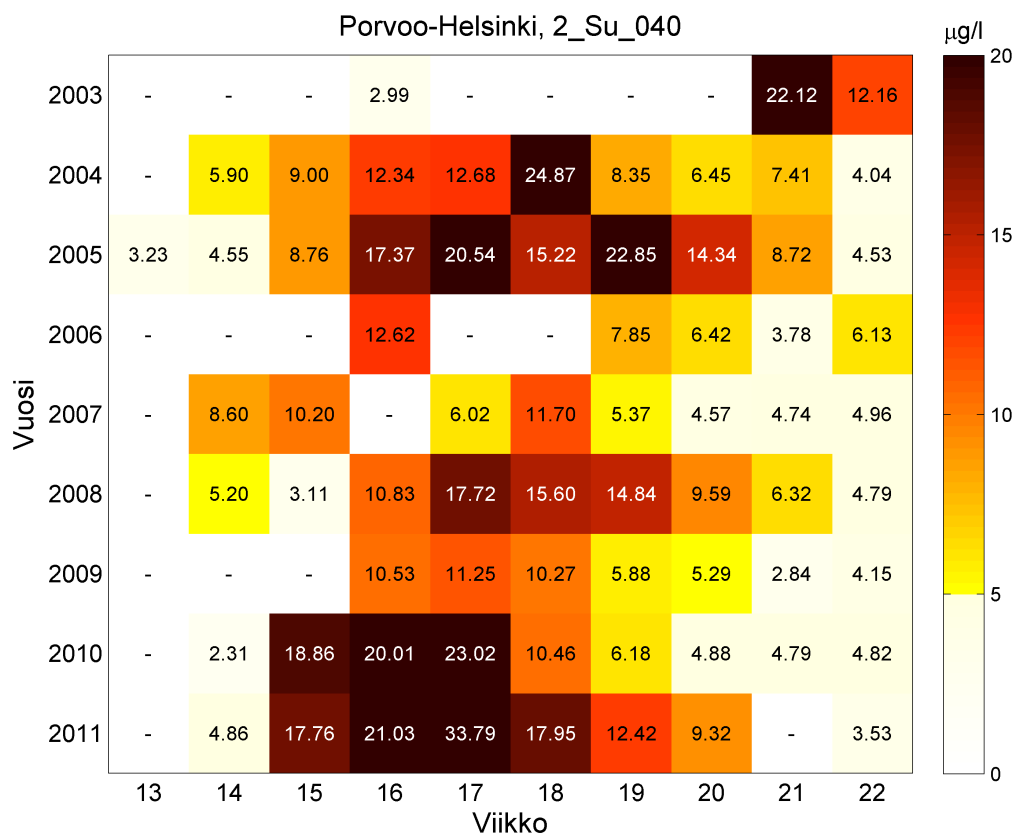


**Taulukko 5.4:** Kevätkukinnan indikaattorit VPD-alueella Porvoo-Helsinki vuosina 2003–2011.

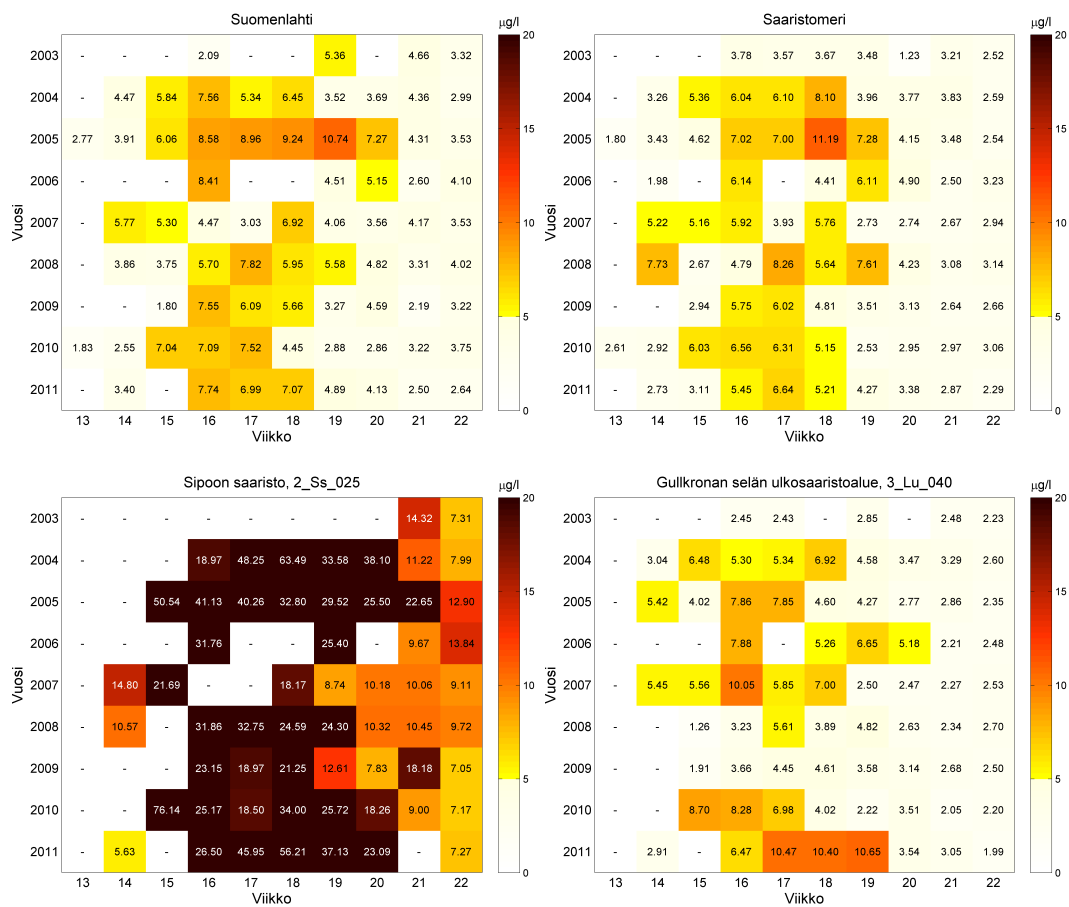
Vuosi	Intensiteetti- indeksi	Huipun ka ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	Huipun viikko	Suurin arvo ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	Alku- viikko	Kesto (vko)	Kesto (d)
2003	240	22,1	21	98,4	21	2	14
2004	609	24,9	18	81,7	14	8	56
2005	755	22,8	19	66,0	15	7	49
2006	231	12,6	16	68,0	16	4	28
2007	293	11,7	18	31,7	14	5	35
2008	561	17,7	17	48,5	14	7	49
2009	303	11,3	17	30,3	16	5	35
2010	550	23,0	17	43,9	15	5	35
2011	786	33,8	17	90,0	15	6	42

**Taulukko 5.5:** Kevätkukinnan indikaattorit Gullkronan selän ulkosaaristoalueella vuosina 2003–2011.

Vuosi	Intensiteetti- indeksi	Huipun ka ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	Huipun viikko	Suurin arvo ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )	Alku- viikko	Kesto (vko)	Kesto (d)
2003	–	–	–	–	–	–	–
2004	168	6,9	18	36,6	15	4	28
2005	148	7,9	16	48,3	14	3	21
2006	175	7,9	16	59,2	16	4	28
2007	237	10,0	16	46,7	14	5	35
2008	39	5,6	17	25,9	17	1	7
2009	–	–	–	–	–	–	–
2010	168	8,7	15	28,2	15	3	21
2011	266	10,7	19	45,0	16	4	28



**Kuva 5.1:** MERIS-aineistosta laskettu *a*-klorofyllin viikkokeskiarvo Porvoo-Helsinki -alueella vuosina 2003–2011. Kevätkukinnan indikaattorien laskennassa käytetään mittauksia viikoilta 13–22. Viiva tarkoittaa, että alueelta ei ole havaintoja kyseisellä viikolla.



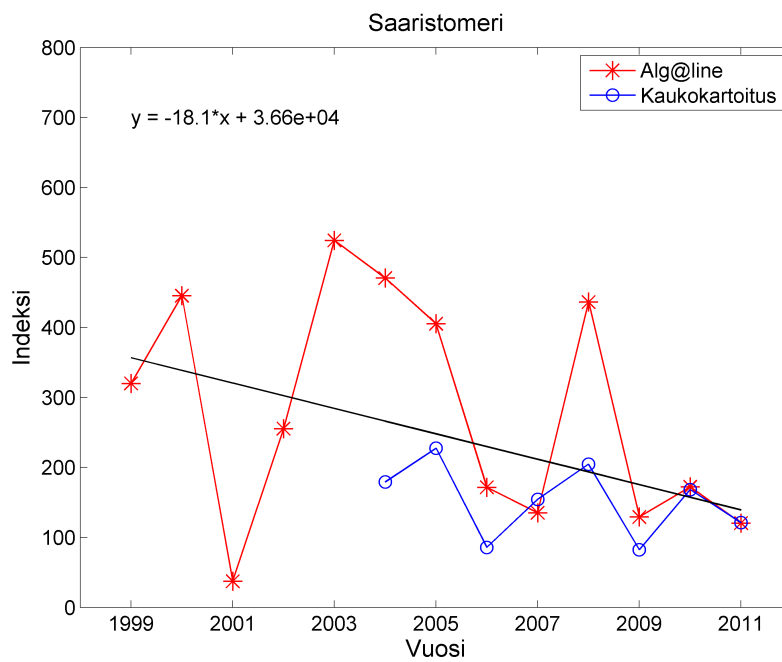
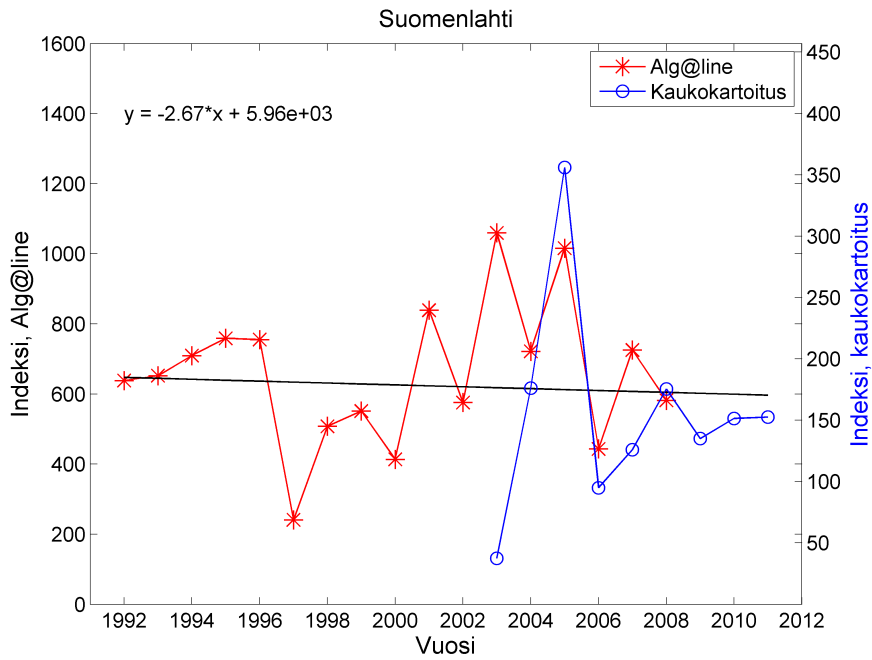
**Kuva 5.2:** MERIS-aineistosta laskettu a-klorofyllin viikkokeskiarvo Suomenlahden (ylhäällä vasemmalla) ja Saaristomerellä (ylhäällä oikealla) tutkimusalueilla, Sipoon saaristossa (alhaalla vasemmalla) ja Gullkronan selän ulkosaaristoalueella (alhaalla oikealla) vuosina 2003–2011.

## 5.2 Intensiteetti-indeksien vertailu

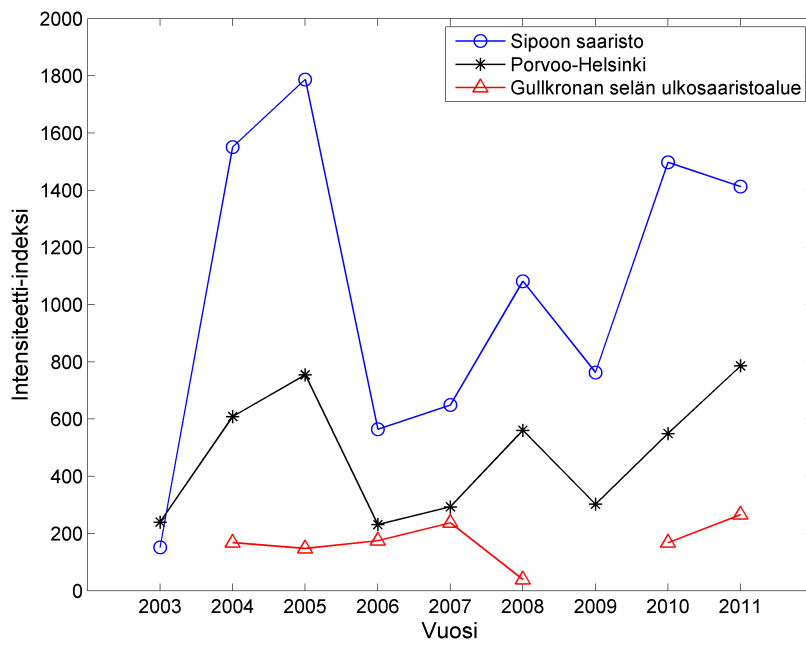
Suomenlahden ja Saaristomeren MERIS-aineistosta laskettuja intensiteetti-indeksejä verrattiin Alg@line-aineistosta laskettuihin indekseihin (kuva 5.3) ja aineistoja yhdistämällä pyrittiin määrittämään kevätkukinnan intensiteetin trendi kyseisillä alueilla. MARMONI-projektissa kevätkukinnan intensiteetti-indeksille asetettiin trendiin perustuva tavoite: kevätkukinnan intensiteetti-indeksin trendin ei tulisi olla nouseva eli kasviplanktonin kevätkukinnan biomassan ei tulisi kasvaa. Alueen ekologista tilaa voidaan arvioida sen perusteella, toteutuuko tavoite.

Suomenlahden alueella (kuvan 5.3 ylempi aikasarja) MERIS-aineistosta lasketuilla indekseillä on eri mitta-asteikko kuin Alg@line-aineiston indekseillä. Alg@line-mittaukset on kerätty erilaiselta alueelta kuin MERIS-havainnot ja ne sisältävät myös Suomen rannikon läheisiä mittauksia, kun taas MARMONI-projektin Suomenlahden tutkimusalue on pääosin avomerialuetta (ks. kuva 4.1). Tämän takia Alg@line-pohjaiset intensiteetti-indeksin arvot ovat huomattavasti suurempia. Jotta aineistot olisivat vertailukelpoisia trendiä määritettäessä, kaukokartoitusaineistosta lasketut intensiteetti-indeksit skaalattiin samalle tasolle Alg@line-pohjaisten indeksien kanssa. Saaristomerellä sen sijaan (ks. kuvan 5.3 alempi aikasarja) MERIS- ja Alg@line-mittaukset ovat samalta alueelta, joten skaalausta ei ole tarvinnut tehdä.

Suomenlahden tutkimusalueella kevätkukinnan intensiteetissä ei havaittu selkeää nousevaa tai laskevaa trendiä. Saaristomerellä havaitaan lievä laskeva trendi. Molemmissa alueilla päästää siten MARMONI-projektissa asetettuun tavoitteeseen.



**Kuva 5.3:** Keväkukinnan intensiteetti-indeksit Suomenlahdella ja Saaristomerellä. Punaiset merkit ja viivat kuvaavat Alg@line-mittauksia ja siniset MERIS-mittauksia. Musta viiva on ai-neistoon tehty lineaarinen sovitus.



**Kuva 5.4:** Intensiteetti-indeksit vuosina 2003–2011 Sipoon saaristossa (siniset merkit ja viiva) ja Porvoo-Helsinki -alueella (musta) ja Gullkronan selän ulkosaaristoalueella (punainen).

## Luku 6

### Keskustelu

#### 6.1 Menetelmän arviointi

Tässä tutkielmassa kehitettiin kasviplanktonin kevätkukinnan indikaattoreita viidellä tutkimusalueella käyttäen Envisat-MERIS -instrumentin ja Alg@line-laitteiston *a*-klorofyllihavaintoja. Tulosten perusteella voidaan todeta, että kyseinen menetelmä toimii hyvin ainakin Suomenlahden ja Saaristomeren tutkimusalueilla. VPD- ja MARMONI-alueille lasketuista *a*-klorofyllin viikkokeskiarvon aikasarjoista voidaan määrittää kevätkukinnan alkuviikko, kesto, huipun pitoisuus ja ajan kohta, sekä intensiteetti-indeksi.

Menetelmän ongelmana ovat pilvisuus ja jääolot, jotka ajoittain estävät *a*-klorofyllin havainnoinnin kaukokartoitusinstrumentin avulla. Alg@line-laivojen automaattiset *a*-klorofyllimittaukset voivat täydentää havaintoja niillä alueilla, jotka osuvat laivojen reiteille.

Menetelmää testattiin myös Suomen rannikkovesillä Pohjanlahdella, Ruotsin rannikkoalueilla sekä Riianlahdella ja Etelä-Ruotsin Hanö-lahdella. Alustavien tulosten perusteella Suomenlahdella käytetyt indikaattorien kynnyksarvot (aika ja *a*-klorofyllipitoisuus) eivät välttämättä toimi muualla Itämerellä, vaan kynnyksarvot vaativat aluekohtaista muokkausta. Kuten kappaleessa 2.2.2 todettu, Suomenlahdella kasviplanktonin kevätkukinta osuu yleensä huhti-toukokuulle, ja kukinta on suhteellisen voimakasta. Sen sijaan Pohjanlahdella kevätkukinta voi alkaa jopa kuukautta myöhemmin kuin Suomenlahdella, eikä kukinta ole yhtä intensiivistä. Toisaalta eteläisellä Itämerellä ei välttämättä kevätkukinta pystytä seuraamaan

kaukokartoitusinstrumenttien avulla. Kevätkukinta alkaa eteläisellä Itämerellä jo helmi-maaliskuussa, jolloin valon määrä on liian pieni optiseen kaukokartoitukseen. Nämä alueelliset erot kasviplanktonin kevätkukinnan ajankohdassa ja voimakkuudessa on syytä ottaa huomioon, kun indikaattoreita käytetään Itämeren muilla aluilla.

Tässä tutkimuksessa käytetty *a*-klorofyllipitoisuuden kynnyksarvo kevätkukinnalle oli 5  $\mu\text{g}/\text{l}$ . Joillakin Suomenlahden pienillä ja sisäisillä VPD-alueilla *a*-klorofyllipitoisuuden viikkokeskiarvo saattaa olla yli 5  $\mu\text{g}/\text{l}$  myös kesäminimin aikaan. Tällaisille alueille kevätkukinnan kynnyksarvo 5  $\mu\text{g}/\text{l}$  saattaa olla liian matala. Tällöin sopiva kynnyksarvo voidaan määrittää suhteellisesti *a*-klorofyllin aikasarjasta, kuten kappaleessa 3.5.1 kerrottiin.

Tässä tutkimuksessa indikaattorit laskettiin aluekohtaisista *a*-klorofyllin viikkokeskiarvoista. Tulevaisuuden indikaattorityössä viikkokomposiiteista voidaan siirtyä päiväkohtaisiin havaintoihin, jolloin ajallinen tarkkuus paranee. Viikkohavainnoista määritetyt kukinnan alku ja kesto ovat melko karkeita arvioita. Käyttämällä päiväkohtaisia *a*-klorofyllihavaintoja kevätkukinnan ajankohta voi tarkentua huomattavasti.

## 6.2 Tulevaisuuden näkymät

Kevätkukinnan indikaattorit ovat valmiita operatiiviseen käyttöön. Kevätkukinnan intensiteetti-indeksistä tulee Itämeren suojelukomission HELCOM:n (Helsinki Commission) virallinen indikaattori EUTRO-OPER (Making HELCOM Eutrophication Assessments Operational) -projektissa.

HELCOM on hallitusten välinen organisaatio, jonka tehtävänä on valvoa Itämeren merellisen ympäristön suojelua. EUTRO-OPER -projektissa tavoitteena on tuottaa laadukkaita Itämeren rehevyytason arvioita säännöllisesti, ja lopulta antaa uusi arvio Itämeren rehevyytäsosta vuosina 2007–2011. Projektissa pyritään myös parantamaan olemassa olevia rehevöitymisen indikaattoreita käyttämällä kaukokartoitus- ja ship-of-opportunity -aineistoja. (HELCOM, 2014)



Envisat-satelliitin toiminnan päätyttyä vuonna 2012 MERIS-instrumentin voi korvata muilla vedenlaadun seurantaan soveltuvilla instrumenteilla, jotka esiteltiin kappaleessa 3.4.2. Tulevaisuudessa Sentinel 3A -satelliitin OLCI tulee olemaan tärkein instrumentti vedenlaadun seurannassa. Alg@line-laivoja liikkuu nykyään Itämerellä useita, joten myös tulevaisuudessa Alg@line-mittaukset voivat täydentää kaukokartoitusinstrumenttien havaintoja.

### 6.2.1 Alg@line-aineisto

Tässä tutkielmassa Alg@line-laivojen *a*-klorofyllimittauksia hyödynnettiin kevät-kukinnan intensiteetti-indeksin pitkän aikavälin tarkastelussa. Lisäksi *a*-klorofyllin aikasarjoihin yhdistettiin sekä MERIS-havainnot että Alg@line-mittaukset aina kun mahdollista.

Aikasarjakuvista (ks. kuva 4.4) nähdään, että Alg@line- ja MERIS-havainnot saattavat poiketa toisistaan jonkin verran. Erot voivat johtua etenkin keväällä kevät-kukinnan alueellisesta vaihtelusta tutkimusalueiden sisällä: MERIS-mittauksissa on mukana koko alueen kaikki pilvettömät havainnot kultakin viikolta, sen sijaan Alg@line-laivat kulkevat vain tiettyä reittiä, eivätkä kata koko tutkimusaluetta.

Eroista huolimatta Alg@line-aineistoa voidaan käyttää täydentämään kaukokartoitusaineistoja. Keväällä kevät-kukinnan alkua ei aina pystytä havaitsemaan kaukokartoitusinstrumenteilla jääolojen tai pilvisyyden takia. Silloin voidaan käyttää Alg@line-mittauksia arvioimaan kevät-kukinnan alkua.

Tulevaisuudessa Alg@line-mittauksia voidaan käyttää myös intensiteetti-indeksin laskemisessa. Esimerkiksi vuonna 2003 keväältä on varsin vähän MERIS-havaintoja (ks. kuva 5.1 ja 5.2), jolloin myös intensiteetti-indeksi jäi suhteellisen pieneksi (ks. taulukot 5.1 – 5.5). Tämän kaltaisina vuosina Alg@line-mittauksia voidaan käyttää täydentämään puuttuvia kaukokartoitushavaintoja, jolloin kevät-kukinnan intensiteetistä saadaan todenmukaisempi kuva.

## Luku 7

### Yhteenveto

Rehevöityminen on yksi Itämeren suurimmista ongelmista tänä päivänä. Liiallinen ravinteiden pääsy veteen aiheuttaa rehevöitymistä, mikä näkyy muun muassa veden sameutena ja leväkukintojen määrän kasvuna. Rehevöityminen voi aiheuttaa muutoksia koko ekosysteemin rakenteessa ja toiminnassa, ja heikentää ekosysteemin stabiiliutta. Itämeri on matala ja sulkeutunut vesialue, jossa veden vaihtuminen on hidasta. Samalla Itämeri on suuren rasituksen kohteena: Itämerellä on laaja valuma-alue, jossa on paljon asutusta ja maataloutta. Näiden piirteiden takia Itämeri on altis rehevöitymiselle.

Rehevöitymisen seurannassa ja arvioinnissa tärkeä tekijä on kasviplanktonin määrä ja tuotanto. Kasviplankton on koko ravintoketjun perusta, ja se reagoi nopeasti muutoksiin ravinteiden määrissä ja suhteissa. Kasviplanktonin tuotannosta suuri osa tapahtuu kevätkukinnan aikana. Kevätkukinta on hyvin dynaaminen tapahtuma, jonka aikana kasviplanktonin määrän ajalliset ja paikalliset vaihtelut ovat suuria.

Kasviplanktonin määrää arvioidaan tyypillisesti *a*-klorofyllipitoisuuden perusteella, sillä *a*-klorofylli on kasviplanktonin pääasiallinen yhteyttämisspigmentti. Perinteisten vesinäytteiden ohella kasviplanktonia – ja Itämeren vedenlaatua ylipäänsä – seurataan kaukokartoitussatelliittien ja kauppalaivoihin asennettujen automaattisten Alg@line-mittalaitteiden avulla.

Tässä tutkielmassa on kehitetty ja testattu erilaisia kasviplanktonin kevätkukinnan indikaattoreita Suomenlahdella ja Saaristomerellä. Kevätkukinnan indikaattorit

ovat kukinnan alku, kesto, huippu eli suurin pitoisuus, huipun ajankohta ja kukinnan intensiteetti. Indikaattorit määriteltiin aluekohtaisesti *a*-klorofyllipitoisuuden aikasarjoista vuosina 2003—2011. Aikasarjat laskettiin Envisat-MERIS -instrumentin ja Alg@line-laivojen havainnoista.

Tulokset osoittivat, että MERIS-instrumentti ja Alg@line-laivojen mittaukset soveltuvat kasviplanktonin kevät-kukinnan seurantaan. MERIS-instrumentilla voidaan kattaa Suomen rannikko- ja avomerialueet lähes kokonaan. Instrumentin maastoerotuskyky on 300 metriä, joten aivan rannikon läheisiä ja pieniä vesimuodostumia ei pystytä seuraamaan. Pilvien ja jääolojen takia MERIS-instrumentin havaintoja ei ollut aina saatavilla. Tällaisissa tilanteissa Alg@line-mittauksia voidaan käyttää täydentämään tai korvaamaan satelliittihavaintoja alueilla, jotka osuvat laivojen reiteille.

Tuloksista nähtiin, että kevät-kukinnan intensiteetti vaihtelee paljon alueittain, mutta myös vuosien välinen vaihtelu on suurta. Suurimmat kevät-kukinnan intensiteetti-indeksit esiintyivät pienillä sisäsaariston alueilla. Näillä alueilla *a*-klorofyllipitoisuuden viikkokeskiarvot olivat suurimmat, samoin kukinnan kesto. Suuremmilla ja ulkoisemmilla alueilla *a*-klorofyllin pitoisuudet olivat lievempiä ja kukinnan kesto lyhyempi.

Suomenlahden ja Saaristomeren kahdelta isolta tutkimusalueelta verrattiin MERIS-aineistosta laskettuja intensiteetti-indeksejä Alg@line-mittauksista laskettuihin indekseihin ja yhdistetystä aineistosta pyrittiin määrittämään kasviplanktonin kevät-kukinnan intensiteetti-indeksille trendi. Alg@line-mittauksia on kerätty jo 1990-luvulta lähtien, kun taas MERIS-havainnot alkavat vuodesta 2003. Itämeren hyvän ekologisen tilan kannalta toivottavaa on, että kevät-kukinnan intensiteetissä ei näkyisi kasvavaa trendiä. Suomenlahden tutkimusalueella ei havaittu selkeää trendiä, mutta Saaristomerellä havaittiin lievä laskeva trendi. Lyhyemmän aikavälin tarkastelulla Suomenlahden tutkimusalueilla havaittiin nousevaa trendiä vuosien 2006—2011 välillä. Myös vuosi 2005 erottuu selkeästi muista vuosista suuren intensiivi-indeksin vuoksi.

Alustavat tulokset Suomen rannikkovesiltä Pohjanlahdelta, Ruotsin rannikkoalueilta ja Riianlahdelta osoittavat, että kyseinen menetelmä indikaattorien las-

kemiseen soveltuu erityisesti Suomenlahdelle, jossa kevätkukinta on voimakasta. Muille alueille käytettäessä menetelmä vaatii aluekohtaista muuntelua.

Kasviplanktonin kevätkukinnan indikaattoreita voidaan tulevaisuudessa käyttää operatiivisesti. MERIS-instrumentin tilalla on mahdollista käyttää muita kaukokartoitusinstrumentteja, jotka soveltuvat a-klorofyllin seurantaan. Paras instrumentti kevätkukinnan indikaattorien laskentaan tulevaisuudessa tulee olemaan ESA:n Sentinel 3A OLCI-instrumentti. Viikohavaintojen sijaan voidaan käyttää päiväkohtaisia havaintoja ja parantaa siten ajallista tarkkuutta. Alg@line-aineistoa voidaan yhdistää kaukokartoitusaineistoihin, jolloin saadaan mahdollisimman suuri ajallinen ja paikallinen kattavuus.

## Kiitokset

Kiitokset Jenni Attilalle mahdollisuudesta osallistua MARMONI-projektiin, sekä indikaattorityön ja pro gradu -tutkielmani ohjauksesta, kommentoinnista ja tarkastuksesta. Kiitos Vivi Fleming-Lehtiselle ja Seppo Kaitalalle Alg@line-aineistoista, sekä yleisestä tuesta ja neuvoista indikaattorityössä. Kiitokset Hanna Alasalmelle ja Mikko Kerviselle teknisestä tuesta ja kaikille SYKEN GEO-yksikön jäsenille keskusteluista, tuesta ja mukavasta työyhteisöstä.

Kiitos Matti Leppärannalle pro gradu -työn kommentoinnista ja tarkastuksesta, sekä ohjauksesta koko yliopisto-opiskelun ajalta.

## Kirjallisuutta

- Arst, H. (2003). *Optical properties and remote sensing of multicomponental water bodies*. Springer, Berlin.
- 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.
- Babin, M., Stramski, D., Ferrari, G. M., Claustre, H., Bricaud, A., Obolensky, G., & Hoepffner, N. (2003). Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *Journal of Geophysical Research*, 108(C7).
- Beltrán-Abaunza, J. M., Kratzer, S., & Brockmann, C. (2014). Evaluation of MERIS products from Baltic Sea coastal waters rich in CDOM. *Ocean Science*, 10:377–396.
- Bricaud, A., Babin, M., Claustre, H., & Morel, A. (1995). Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. *Journal of Geophysical Research*, 100(C7):13321–13332.
- Bricaud, A., Bédhomme, A.-L., & Morel, A. (1988). Optical properties of diverse phytoplanktonic species: experimental results and theoretical interpretation. *Journal of Plankton Research*, 10(5):851–873.
- Bricaud, A., Morel, A., & Prieur, L. (1983). Optical efficiency factors of some phytoplankters. *Limnology and Oceanography*, 28(5):816–832.
- Brockmann Consult (2014). The BEAM – Earth Observation Toolbox and Development Platform. <http://www.brockmann-consult.de/cms/web/beam/documentation>.
- Doerffer, R., Sørensen, K., & Aiken, J. (1999). MERIS potential for coastal zone applications. *International Journal of Remote Sensing*, 20(9):1809–1818.

- ESA (2014a). Meris – Earth Online – ESA. <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/envisat/instruments/meris>. Earth Online - ESA. Viitattu 7.7.2014.
- ESA (2014b). Sentinel-3 – Earth Online – ESA. <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-future-missions/sentinel-3>. Earth Online - ESA. Viitattu 6.10.2014.
- Ferreira, J. G., Andersen, J. H., Borja, A., Bricker, S. B., Camp, J., da Silva, M. C., Garcés, E., Heiskanen, A.-S., Humborg, C., Ignatiades, L., Lancelot, C., Menesguen, A., Tett, P., Hoepffner, N., & Claussen, U. (2011). Overview of eutrophication indicators to assess environmental status within the European Marine Strategy Framework Directive. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93(2):117 – 131.
- Fleming, V. & Kaitala, S. (2006). Phytoplankton spring bloom intensity index for the Baltic Sea estimated for the years 1992 to 2004. *Hydrobiologia*, 554:57–65.
- Gordon, H. R. & Morel, A. (1983). *Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery: A Review*. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies,. Springer-Verlag, New York.
- HELCOM (2009). *Eutrophication in the Baltic Sea – An integrated thematic assessment of the effects of nutrient enrichment and eutrophication in the Baltic Sea region*. Baltic Sea environment proceedings No. 115B. Helsinki Commission, Helsinki.
- HELCOM (2011). *The fifth Baltic Sea pollution load compilation (PLC-5)*. Baltic Sea environment proceedings No. 128. Helsinki Commission, Helsinki.
- HELCOM (2014). HELCOM – EUTRO-OPER. <http://helcom.fi/helcom-at-work/projects/eutro-oper/>. HELCOM – Baltic Marine Environment Protection Commission. Viitattu 15.10.2014.
- IOCCG (2000). *Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters*. Sathyendranath, S. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group No. 3. IOCCG, Dartmouth, Canada.
- Jensen, J. R. (2000). *Remote sensing of the environment : An Earth resource perspective*. Prentice Hall, Upper Saddle River (NJ).
- Kahru, M. (1997). *Monitoring algal blooms: New techniques for detecting large-scale environmental change*, chapter 3: Using satellites to monitoring large-scale

- environmental change: A case study of cyanobacteria blooms in the Baltic Sea, pp 43–61. Springer Verlag.
- Kirk, J. T. O. (1994). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, 2nd edition.
- Koponen, S. (2006). *Remote sensing of water quality for Finnish lakes and coastal areas*. PhD thesis, Helsinki University of Technology.
- Kratzer, S., Brockmann, C., & Moore, G. (2008). Using MERIS full resolution data to monitor coastal waters — A case study from Himmerfjärden, a fjord-like bay in the northwestern Baltic Sea. *Remote Sensing of Environment*, 112:2284–2300.
- Kutser, T. (2004). Quantitative detection of chlorophyll in cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. *Limnology and Oceanography*, 49(6):2179–2189.
- Leppäranta, M. & Myrberg, K. (2009). *Physical oceanography of the Baltic Sea*. Springer/Praxis Pub., Berlin.
- Lips, I., Lips, U., Fleming, V., Kaitala, S., & Jaanus, A. (2007). Use of Ferry-box measurements for the Baltic Sea environment assessment. *Environmental Research, Engineering and Management*, 41(3):3–8.
- MARMONI (2014). <http://marmoni.balticseaportal.net>. MARMONI project website. Online. Viitattu 20.7.2014.
- MathWorks (2014). MATLAB – The Language of Technical Computing. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
- Mobley, C. D. (1994). *Light and water : Radiative transfer in natural waters*. Academic Press, San Diego.
- Morel, A. & Prieur, L. (1977). Analysis of variations in ocean color. *Limnology and oceanography*, 22(4):709–722.
- Myrberg, K., Leppäranta, M., & Kuosa, H. (2006). *Itämeren fysiikka, tila ja tulevaisuus*. Yliopistopaino, Helsinki.
- NASA (2014a). Aqua project science. [http://aqua.nasa.gov/about/instrument\\_modis\\_science.php](http://aqua.nasa.gov/about/instrument_modis_science.php). NASA – National Aeronautics and Space Administration. Viitattu 6.10.2014.
- NASA (2014b). Polar Orbiting Missions – Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS). <http://npp.gsfc.nasa.gov/viirs.html>. NASA – National Aeronautics and Space Administration. Viitattu 6.10.2014.
- Niemi, Å. (1971). Itämeren planktonista. *Luonnon tutkija*, pp 92–105.



- Platt, T. & Sathyendranath, S. (2008). Ecological indicators for the pelagic zone of the ocean from remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 112:3426–3436.
- Pope, R. M. & Fry, E. S. (1997). Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. *Applied Optics*, 36(33):8710–8723.
- Prieur, L. & Sathyendranath, S. (1981). An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials. *Limnology and Oceanography*, 26(4):671–689.
- Pulliainen, J., Vepsäläinen, J., Kaitala, S., Hallikainen, M., Kallio, K., Fleming, V., & Maunula, P. (2004). Regional water quality mapping through the assimilation of spaceborne remote sensing data to ship-based transect observations. *Journal of Geophysical Research*, 109(C12009).
- Raateoja, M., Myrberg, K., Flinkman, J., & Vainio, J. (2008). *Kotimeri : Itämeri ympärillä*. Edita, Helsinki.
- Rantajarvi, E., editor (2003). *Alg@line in 2003: 10 years of innovative plankton monitoring and research and operational information service in the Baltic Sea*. Number 48 in MERI – Report Series of the Finnish Institute of Marine Research. Finnish Institute of Marine Research, Helsinki.
- Rantajarvi, E., Olsonen, R., Hällfors, S., Leppänen, J.-M., & Raateoja, M. (1998). Effect of sampling frequency on detection of natural variability in phytoplankton: unattended high-frequency measurements on board ferries in the Baltic Sea. *Journal of Marine Science*, 55:697–704.
- Reinart, A. & Kutser, T. (2006). Comparison of different satellite sensors in detecting cyanobacterial bloom events in the Baltic Sea. *Remote Sensing of Environment*, 102:74–85.
- Ritchie, J. C., Zimba, P. V., & Everitt, J. H. (2003). Remote sensing techniques to assess water quality. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69(6):695–704.
- Robinson, I. S. (1994). *Satellite oceanography : An introduction for oceanographers and remote-sensing scientists*. John Wiley, Chichester.
- Sathyendranath, S., Lazzara, L., & Prieur, L. (1987). Variations in the spectral values of specific absorption of phytoplankton. *Limnology and Oceanography*, 32(2):403–415.

- Schroeder, T., Behnert, I., Schaale, M., Fisher, J., & Doeffler, R. (2007a). Atmospheric correction algorithm for MERIS above Case-2 waters. *International Journal of Remote Sensing*, 28:1269–1486.
- Schroeder, T., Schaale, M., & Fisher, J. (2007b). Retrieval of atmospheric and oceanic properties from MERIS measurements: A new Case-2 water processor for BEAM. *International Journal of Remote Sensing*, 28:5627–5632.
- Seppälä, J., Ylöstalo, P., & Kuosa, H. (2005). Spectral absorption and fluorescence characteristics of phytoplankton in different size fractions across a salinity gradient in the Baltic Sea. *International Journal of Remote Sensing*, 26(2):387–414.
- Smith, R. C. & Baker, K. S. (1981). Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm). *Applied Optics*, 20(2):177–184.
- Stipa, T., Seppälä, J., Tamminen, T., & Kuosa, H. (2000). Itämeren kevätkukinta. [http://itameriportaali.fi/fi/tietoa/elama/elioryhmat/kasvit/fi\\_FI/Itameren\\_kevatkukinta/](http://itameriportaali.fi/fi/tietoa/elama/elioryhmat/kasvit/fi_FI/Itameren_kevatkukinta/). Itämeriportaali. Online. Viitattu 24.1.2014.
- Tikkanen, T. (1986). *Kasviplanktonopas*. Suomen luonnonsuojelun tuki, Helsinki.
- Vaičiūtė, D., Bresciani, M., & Bučas, M. (2012). Validation of MERIS bio-optical products with in situ data in the turbid Lithuanian Baltic Sea coastal waters. *Journal of Applied Remote Sensing*, 6(1):063568–1 – 063568–20.
- Vepsäläinen, J., Pyhälähti, T., Rantajarvi, E., Kallio, K., Pertola, S., Stipa, T., Kiirikki, M., Pulliainen, J., & Seppälä, J. (2005). The combined use of optical remote sensing data and unattended flow-through fluorometer measurements in the Baltic Sea. *International Journal of Remote Sensing*, 26(2):261 – 282.
- VPD (2000). Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2000/60/EY. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:32000L0060&from=FI>. EUR-Lex. Online. Viitattu 17.7.2014.
- Weaver, E. C. & Wrigley, R. C. (1994). Factors affecting the identification of phytoplankton groups by means of remote sensing. Technical report, NASA.
- Woźniak, M., Bradtke, K. M., & Kręż el, A. (2014). Comparison of satellite chlorophyll a algorithms for the Baltic Sea. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1):083605–1 – 083605–15.