



ITÄMEREN SINILEVÄN ESTIMOINTI SAMEUSDATAN AVULLA

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

Laskennallisen tekniikan kandidaatintyö

2022

Taru Haimi

Tarkastaja: Lassi Roininen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Engineering Science
Laskennallinen tekniikka

Taru Haimi

Itämeren sinilevän estimointi sameusdatan avulla

Kandidaatintyö

2022

18 sivua, 2 kuvaa

Tarkastaja: Lassi Roininen

Avainsanat: Itämeri, kaukokartoitus, Sentinel-2, sinilevä, turbiditeetti

Itämeri on hyvin ainutlaatuinen biodiversiteetti ja sosioekonomisesti tärkeä alue, jota ilmastonmuutoksen vaikutukset uhkaavat merkittävästi. Kaukokartoituksen menetelmillä voidaan seurata Itämeren tilaa kattavasti, ja tehtyjä havaintoja voidaan käyttää ympäristön hyvinvoinnin arvioimiseen.

Tässä kandidaatintyössä laaditaan yleiskuvaus siitä, miten Sentinel-2-satelliittiohjelman satelliiteilla kerätään dataa Maasta ja miten kyseistä dataa käsitellään järjestelmän viidellä eri tasolla. Lisäksi satelliittihavainnoista jatkojalostettavaa vedenlaatumuuttujaa turbiditeettia mallinnetaan Matérn-kenttien avulla, ja Matérn-kenttien parametrien ajallista käyttäytymistä havainnollistetaan. Turbiditeetti kuvaa veden sameutta, ja sitä voidaan hyödyntää vesistön sinilevän määrän estimoimiseen.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

ℓ	Matérn-kentän pituusparametri
ν	Matérn-kentän sileysparametri
BOA	Bottom-Of-Atmosphere
C2RCC	Case 2 Regional CoastColour
GML	Geography Markup Language
GRI	Global Reference Image
ISP	Instrument Source Packet
MCMC	Markov Chain Monte Carlo
MSI	Multispectral instrument
PQL	Preliminary Quicklook
TOA	Top-Of-Atmosphere
VNIR	Visible and Near Infra Red
SWIR	Short Wave Infra Red

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	2
Symboli- ja lyhenneluettelo	3
1 Johdanto	5
1.1 Itämeri ja sinilevä	5
1.2 Työn tavoitteet	6
1.3 Työn rakenne	6
2 Sentinel-2-ohjelma	7
2.1 Copernicus-ohjelma	7
2.2 Satelliittiohjelma	7
2.3 Satelliitti-instrumentin toiminta	8
3 Sentinel-2-satelliitin data	10
3.1 Datatasot ja datatuotteet	10
3.2 Datan käsittely datatasoilla	11
3.2.1 Taso 0	11
3.2.2 Taso 1A	11
3.2.3 Taso 1B	12
3.2.4 Taso 1C	12
3.2.5 Taso 2A	13
4 Itämeren sinilevän mallintaminen	14
4.1 Turbiditeetti vedenlaadun mittarina	14
4.2 Vedenlaadun spatiotemporaalinen mallintaminen	14
4.3 Esimerkki Saaristomereltä	15
5 Yhteenveto	17
Lähteet	18

1 Johdanto

1.1 Itämeri ja sinilevä

Itämeri on hyvin ainutlaatuinen biodiversiteetti. Se on maailman suurin murtovesialue ja toiseksi suurin sisämeri, johon suolaista vettä virtaa Pohjanmerestä kapeiden ja matalien Tanskan salmien kautta. Itämerellä on itseään yli neljä kertaa suurempi valuma-alue, jossa on runsaasti jokia, soita ja maaperän turvetta. Muihin merialueisiin verrattuna se on kuitenkin pieni ja matala - keskimääräiseltä syvyydeltään 54 metriä ja pinta-alaltaan 393 000 km² (Attila 2019). Rannikkoalueet, erityisesti Suomessa, ovat myös erittäin matalia. Mataluuden lisäksi yksi Itämeren tunnuspiirteistä on sen poikkeuksellisen hajanaiset rannikot ja saaristot erityisesti Suomen lounaisrannikolla sekä Ruotsissa Tukholman saaristoalueella. Itämerelle on myös tyypillistä kausittainen jääpeite pääasiassa meren pohjoisilla rannikkoalueilla.

Biologisten ja geologisten ominaisuuksiensa lisäksi Itämeri on sosioekonomisesti tärkeä alue sitä ympäröiville maille. Osalle Itämeren tarjoamista mahdollisuuksista voidaan määrittää rahallinen arvo suoraan tai välillisesti, kuten elinkeinotoiminta ja kalastus, merenpohjasta louhittavat luonnonvarat sekä kasvillisuuden kyky sitoa hiiltä. Itämeren rannikko- ja saaristoalueet ovat lisäksi suosittuja virkistytymisalueita varsinkin kesäisin niin yksityiskäytössä kuin turismin kannalta.

Mataluuden ja pienen vedenvaihtuvuuden takia Itämeri on erityisen herkkä ilmastonmuutoksen vaikutuksille, kuten lisääntyvälle rehevöitymiselle, meriveden lämpötilan nousulle, avainlajien häviämismiselle ja merenpinnan nousulle (*Itämeri* 2022). Vastaavanlaisia uhkia kohtaa myös Yhdysvaltojen itärannikolla sijaitseva Chesapeakenlahti, joka on myös erityislaatuinen matala murtovesialue (Harding et al. 2016). Nämä molemmat vesistöt kuuluvat maailman saastuneimpien merialueiden joukkoon.

Fyysiset olosuhteet ja jokia pitkin mereen kulkeutuvat ravinteet aiheuttavat vesistön rehevöitymistä. Kasviplanktonien määrä Itämerellä vaihtelee kausittain, ja sinileväkukinnot ovat tyypillisiä heinä-elokuussa erityisesti varsinaisen Itämeren ja Suomenlahden alueilla, mutta joinain vuosina niitä esiintyy myös Pohjanlahdella asti. Sinileväkukinnot muodostuvat vedenpinnalle ja ovat parhaiten havaittavissa tyynellä säällä. Osa sinilevälajeista on myrkyllisiä ja voi aiheuttaa ihmisille haitallisia oireita sekä olla hengenvaarallisia eläimille.

Kaukokartoituksella tarkoitetaan satelliittien avulla suoritettavaa ympäristön seuranta. Satelliittihavainnot mahdollistavat tarkan ja nopean tiedon keräämisen laajoilta alueilta. Tehtyjä havaintoja hyödynnetään niin nykyhetken tilannekatsauksen laatimisessa kuin myös ympäristön hyvinvoinnin arvioinnissa. Koska Itämeri on niin tärkeä alue sekä ympäristön monimuotoisuuden säilyttämisen että sosioekonomisen hyvinvoinnin ylläpitämisen takia, sitä seurataankin erityisen aktiivisesti, jotta sen nykyhetken tilaan ja siihen kohdistuviin ilmastomuutoksen vaikutuksiin voidaan reagoida mahdollisimman tehokkaasti.

1.2 Työn tavoitteet

Kandidaatintyössä laaditaan yleiskuvaus kaukokartoitukseen perustuvasta ympäristön monitorointijärjestelmästä. Työn tarkoituksena on tutkia, millaista dataa satelliitista saadaan, millaisiin datatasoihin järjestelmä jakautuu ja miten ne ovat yhteydessä toisiinsa. Näiden lisäksi työssä käsitellään yleisellä tasolla järjestelmän datanprosessointiin liittyviä matemaattisia menetelmiä ja algoritmeja. Työn tavoitteena on myös selvittää, miten Itämeren sinilevätilannetta seurataan ja tutkitaan ympäristön kaukokartoitusjärjestelmällä, erityisesti turbiditeettidatan avulla.

Ympäristön monitorointijärjestelmän käsittely rajataan yleiselle tasolle ja koskemaan ainoastaan Copernicus-ohjelman Sentinel-2-satelliittiohjelmaa sekä sen tiedonkeräysjärjestelmää. Satelliitin tuottamasta datasta tutkitaan vain vuoden 2021 turbiditeettia sinilevän määrän estimoimiseksi Turun saaristossa sijaitsevan Pakinaisten alueella.

1.3 Työn rakenne

Tämä kandidaatin työ sisältää kolme päälukua johdannon ja yhteenvedon lisäksi. Luvussa 2 esitellään Copernicus- ja Sentinel-2-ohjelmat sekä kuvataan MSI-satelliitin toimintaperiaatteita. Luvussa 3 käsitellään tarkemmin Sentinel-2-satelliittien datankeräysjärjestelmän datatasoja, datatuotteita ja datan prosessointiin käytettäviä menetelmiä. Luvussa 4 esitellään Sentinel-2-satelliitista saatavan turbiditeettidatan käyttöä Itämeren tilan seurannassa, ja veden sameutta mallinnetaan Matérn-kenttien avulla. Lopuksi pohditaan lyhyesti mahdollisia jatkotutkimuksia.

2 Sentinel-2-ohjelma

Kaikki tässä ja seuraavassa luvussa käsiteltävät tekniset tiedot koskien Sentinel-2-satelliittijärjestelmää perustuvat *Sentinel-2 User Handbook* (2015) -dokumentaatioon ja *Sentinel Online* (2022) -verkkosivustoon, eikä niitä enää tästä eteenpäin mainita erikseen lähteinä.

2.1 Copernicus-ohjelma

Copernicus-ohjelma on maanseurantaohjelma, jota toteuttavat yhteistyössä Euroopan unioni ja sen jäsenvaltiot, Euroopan keskipitkien sääennusteiden keskus, Euroopan sääsatelliittijärjestö, Euroopan avaruusjärjestö ESA, EU:n virastot sekä Mercator Océan. Ohjelman tarkoituksena on kerätä maailmanlaajuisesti lähes reaaliaikaista dataa, jota saadaan niin satelliitti- kuin in situ -havainnoilla. Copernicus-ohjelman keskeisimpiä teemoja ovat ilmastonmuutos, maa- ja merialueiden seuranta, hätätilanteiden hallinta sekä turvallisuus. (*Copernicus* 2022.) ESA on kehittänyt Sentinel-satelliittisarjan tarkoituksenaan korvata vanhoja Maan havainnointijärjestelmiä ilman datankeräyksen ja meneillään olevien tutkimuksien katkeamista.

Tällä hetkellä kuusi Sentinel-ohjelmaa on käynnistetty, ja seitsemäs ohjelma on parhailaan käynnistymässä. Jokainen Sentinel-ohjelma keskittyy erilaiseen Maanseurannan näkökulmaan. Ensimmäisen ohjelman tavoitteena on maa- ja merialueiden monitorointi. Seuraavat ohjelmat, Sentinel-2 ja Sentinel-3, keskittyvät näihin erikseen. Sentinel-4- ja Sentinel-5-ohjelmien tavoitteena on ilmanlaadun seuranta. Sentinel-5P-ohjelma keskittyy ilmakehän monitorointiin. Uusin satelliittiohjelma, Sentinel-6, keskittyy merenpinnan korkeuden mittaamiseen.

2.2 Satelliittiohjelma

Sentinel-2-satelliittiohjelma keskittyy erityisesti seuraamaan maan pinnan vaihtelua tukien Copernicus-ohjelman tavoitteita. Monitorointi perustuu kahteen satelliittiin, joista ensimmäinen laukaistiin Maata kiertävälle radalle vuonna 2015 ja toinen 2017. Satelliitit kiertävät Maata noin 786 kilometrin korkeudella napojen kautta samalla aurinkosynkronisella radalla 180° vaihekulmassa toisiinsa nähden. Satelliitin käyttöikä on 7.25 vuotta. Sentinel-2-satelliittien havainnointialue kattaa systemaattisesti kaikkien mannermaiden maanpinnan ja sisävedet 56° eteläisen ja 82.8° pohjoisen leveyspiirien väliltä. Maakar-

toituksen lisäksi kuvaus kattaa kaikki sisämeret, Euroopan unionin saaret, kaikki yli 100 km² suuruiset saaret ja rannikkovesialueet 20 kilometriin asti rannikosta. Näiden lisäksi satelliiteilla voidaan kerätä dataa esimerkiksi Copernicus-palvelimelle tehtyjen palvelupyyntöjen perusteella.

Sentinel-2-satelliittiohjelmalla on kolme päätavoitetta. Ensinnäkin ohjelman tarkoituksena on tarjota systemaattista, maailmanlaajuista ja korkearesoluutioista monispektrikuvantamista korkealla uudelleenkäyntitaajuudella. Ohjelmalla taataan myös jatkuvuus SPOT-satelliittisarjan ja USGS LANDSAT Thematic Mapper -instrumentin tarjoamalle monispektrikuvantamiselle. Lisäksi ohjelma tarjoaa havaintotietoja seuraavan sukupolven käyttötuotteille kuten maanpeitekartoille, maanmuutosten havaitsemiskartoille ja geofysikaalisille muuttujille. Satelliittidatan pääsovelluskohteet sisältävät maatalouden ja maaekosysteemien seurannan, metsien hallinnan, sisämaiden ja rannikkovesien laadun seurannan sekä katastrofikartoituksen ja kansalaisturvallisuuden ylläpitämisen.

2.3 Satelliitti-instrumentin toiminta

Sentinel-2-satelliitin datankeräys perustuu optiseen monispektri-instrumenttiin (MSI). Keskimääräinen havainnointiaika maa- ja rannikkoalueille on noin 17 minuuttia ja enimmäisaika 32 minuuttia. Teleskoopin optinen rakenne mahdollistaa 290 km:n näkökentän. MSI toimii passiivisesti keräämällä kolmipeilisellä kaukoputkella Maasta heijastuvaa auringonvaloa 13 eri aallonpituusalueelta. Tuleva valonsäde hajotetaan suodattimella ja kohdistetaan instrumentin jompaan kumpaan kahdesta polttotasokokoonpanosta (*focal plane assemblies*) sen perusteella, kuuluuko tuleva valo aallonpituudeltaan VNIR- vai SWIR-alueeseen. Kunkin valonsäteen spektrinen erottelu omille aallonpituuksilleen suoritetaan vastaanottomien päälle asennetuilla nauhasuodattimilla.

Satelliitti-instrumentilla on kaksi havainnointitilaa, joita vaihdellaan säännöllisin väliajoin: tumman signaalin ja aurinkosignaalin kalibrointi. Tumman signaalin kalibrointi on kuvanottoa, kun satelliitti-instrumenti kulkee kiertoradan pimennysvaiheen läpi. Tämä kalibrointi tapahtuu kahden viikon välein. Aurinkosignaalin kalibroinnin kuvanotto tapahtuu, kun instrumentti on kiertoradan päiväosassa. Tämä kalibrointi tehdään neljän viikon välein.

Dataotto (*Data take*) tarkoittaa jatkuvaa kuvan keräämistä yhdellä Sentinel-2-satelliitilla tietyssä MSI-kuvaustilassa. Yhden dataoton enimmäispituus on 15 000 kilometriä. Data nauha (*Data strip*) on dataoton kuvan osa, joka on linkitetty tietylle maa-asemalle satelliiti-

tin kulun aikana. Jos kiertorata kuuluu useammalle kuin yhdelle asemalle, dataotto on yhdistelmä useampia datanauhoja. Yhteen asemaan linkitetyn datanauhan enimmäispituus on noin 5000 kilometriä. Kun satelliitti vaihdetaan toiseen havainnointitilaan, datanauha voi sisältää erillisiä havaintosegmenttejä, jotka on eroteltu rakeiden kokonaislukumäärän aukoilla.

MSI-laitteen resoluutiolle on kolme määritelmää: ajallinen resoluutio, spatiaalinen resoluutio ja radiometrinen resoluutio. Radalla olevan satelliitin ajallinen resoluutio kertoo, kuinka usein samaa sijaintia kuvataan uudelleen. Spatiaalisella resoluutiolla tarkoitetaan satelliittisensoriryhmän yhden anturin kuvaamaa pienintä mahdollista maanpinnan pinta-alaa, mikä kuvassa tarkoittaa yhtä pikseliä. Radiometrisella resoluutiolla mitataan kuvantamisjärjestelmän kykyä tallentaa eri kirkkaustasoja eli kuinka monta sävyä kuvasta voidaan erottaa.

Jokaisen Sentinel-2-satelliitin uudelleenkäyntitaajuus on 10 päivää ja yhdistetyn konstellation uudelleenkäyntitaajuus on 5 päivää samoilla katseluolosuhteilla. Vierekkäisten kiertoratojen päällekkäisyyden vuoksi uudelleenkäyntitaajuus voi olla myös suurempi erilaisilla katseluolosuhteilla.

Sentinel-2-instrumentilla on kolme mahdollista spatiaalista resoluutiota: 10 metriä, 20 metriä ja 60 metriä. 10 metrin spatiaalinen resoluutio sisältää neljä aallonpituusaluetta, jotka kaikki kuuluvat VNIR-alueelle. 20 metrin spatiaalinen resoluutio sisältää kuusi aallonpituusaluetta, joista neljä kuuluu VNIR-alueelle ja kaksi SWIR-alueelle. 60 metrin spatiaalinen resoluutio sisältää kolme kaistaa, joista kaksi kuuluu VNIR-alueelle ja yksi SWIR-alueelle.

Instrumentin radiometrinen resoluutio ilmaisee laitteen kykyä esittää ja erottaa valon intensiteetin tai heijastuksen eroavaisuuksia. Mitä suurempi resoluutio on, sitä tarkempi havaittu kuva tulee olemaan. Radiometrinen resoluutio ilmaistaan bittilukuna ja tyypillisesti 8-16 bittinä. MSI-instrumentin radiometrinen resoluutio on 12 bittiä, mikä mahdollistaa kuvasta havaittavan 0-4096 eri sävyä.

3 Sentinel-2-satelliitin data

3.1 Datatasot ja datatuotteet

Sentinel-2-satelliitin keräämä data jaetaan viiteen tasoon: 0, 1A, 1B, 1C ja 2A. Jokainen näistä tasoista pitää sisällään oman datatuotteensa, joka luo pohjan seuraavan tason tuotteelle. Tasojen 0-1B datatuotteet eivät ole julkisia tuotteita, mutta tasojen 1C ja 2A datatuotteet ovat vapaasti käyttäjien saatavilla. Tuotteiden sisältämä data on suunniteltu sellaiseksi, että käyttäjät voivat itse muokata ja soveltaa sitä.

Sentinel-2-datatuotteella tarkoitetaan hakemistokansiota. Tasosta riippumatta se sisältää kuvadataa, esikatselutietoja, apu- ja lisätietoja, laatuindikaattoritietoja ja metatietoa. Kuvadata on rakeina (*granules*) tai laattoina (*tiles*) GML-JPEG2000-muodossa ja metatieto XML-muodossa. Apu- ja lisätiedot antavat tietoa esimerkiksi satelliittitelemetriasta ja käytetyistä parametreista. Laatuindikaattoritiedot kuvaavat tuotetta suhteessa radiometriin, geometriin ja kuvan ominaisuuksiin. Metatietorakenne kuvailee tuotteen sisällön. Datatuotteet ovat SENTINEL-SAFE-muodossa, joka on suunniteltu toimimaan yleisenä formaattina tietojen arkistointiin ja siirtoon ESA Earth Observation -arkistointitiloissa. Koska kuvat ovat binäärimuodossa ja metatiedot XML-muodossa, SAFE-muoto skaalautuu käytettäväksi kaikille datatasojen datatuotteille.

Kaikkien Sentinel-2-datatasojen MSI-tuotteet sisältävät kiinteän kokoisia kuvarakeita tai -laattoja yhdestä dataotosta. Dataotto esitetään tuotteen sisällä yhden tai useamman datanauhan joukkona, joka vastaa eri maa-asemille linkitettyjä hankintasegmenttejä. Rae on tuotteen pienin jakamaton osa, joka sisältää kaikki 13 spektrikaistaa. Tasojen 0, 1A ja 1B rae on kooltaan $25 \times 23\text{km}^2$. Tasoille 1C ja 2A kuvadataa on käsitelty ja rakeet on yhdistetty $100 \times 100\text{km}^2$ kokoisiksi laatoiksi, jotka ovat joko kokonaan tai osittain peitetty kuvadatalalla. Osittain peitettyt laatat vastaavat niitä, jotka ovat datanauhan reunalla tai ylä-/alaosassa.

3.2 Datan käsittely datatasoilla

3.2.1 Taso 0

Perustaso eli 0-taso pitää sisällään kaiken tiedon, mitä tarvitaan muiden tasojen datatuotteiden kehittämiseen. 0-tason datatuote sisältää tuotetta kuvailevaa metadataa, pakattua raakakuvadataa ISP-muodossa ja relevantteja apulähdepaketteja. Apulähdepaketti sisältää apudataa, jota tarvitaan jatkokäsittelyä varten korkeammille tuotetasoille, erityisesti tietoa, jota tarvitaan geometrisen mallin laskentaan. Apudata sisältää aikakorrelaatiodataa, efemeridi- ja asennedataa sekä lämpödataa.

0-tason datan prosessointi sisältää seuraavat vaiheet: MSI-telemetry-analyysi, ajoittaminen, matalaresoluutioisten kuvien poiminta ja satelliitin lisätelemetry-analyysi. Nämä datan alkukäsittelyn vaiheet suoritetaan reaaliajassa samanaikaisesti datan vastaanoton kanssa. MSI-telemetry-analyysissä yhdistetään pakattu ISP-data kuvarakeiksi ja suoritetaan data-analyysia sekä virheenhavaitsemisfunktioita. Seuraavassa vaiheessa jokaiselle kuvarakeen ISP-osalle tallennetaan tarkka ajankohta, jolloin data on kerätty. Kolmantena vaiheena poimitaan matalaresoluutioiset kuvat pikakatselun generointia varten. Neljäntenä vaiheena satelliitin lisädatalle tehdään satelliitin lisätelemetry-analyysi, jossa verrataan poimittua satelliitin lisädataa bittiarvoihin ja tarkistetaan se suhteessa ennalta määrättyyn hyväksytyyn vaihteluväliin.

0-tason konsolidointiprosessi jakautuu neljään vaiheeseen: katselumallin alustukseen, PQL-käsittelyyn, alustavan pilvimaskin käsittelyyn ja PQL-pakkaukseen. Katselumallin laskenta suoritetaan ajoittamisen, lisätelemetry-analyysin ja lisädatan laskennan jälkeen. Tämän ja matalaresoluutiosten kuvien erottelun pohjalta luodaan PQL. Seuraavaksi luodaan uusi otos PQL:lle ja lasketaan apudataa konsolidoidun 0-tason datatuotteen saamiseksi. Spektrikriteerien perusteella generoidaan pilvimaski PQL:stä. Viimeisenä vaiheena pakataan muodostettu PQL.

3.2.2 Taso 1A

Taso 1A sisältää pakkaamatonta raakakuvadataa, jossa spektrikaistat on karkeasti rekisteröity ja lisädata lisätty. Tason 1A tuote saadaan purkamalla 0-tason raakakuvadata ja kehittämällä sille geometrinen malli mahdollistamaan minkä tahansa kuvan pikselin paikantamisen. Pikselikoordinaatti viittaa jokaisen pikselin keskustaan.

1A-tason prosessointi sisältää 1-tason katselumallin alustuksen, datan purkamisen, 1A-tason radiometrisen prosessoinnin ja 1A-tason datan pakkauksen. Alustettua katselumallia käytetään 1B-tason prosessoinnin alustamiseen. Se käyttää Mission Performance Centre Coordinating Centren (MPC/CC) luomia Precise Orbit Determination (POD) -tuotteita. Seuraavana vaiheena käsittelyä puretaan ISP-data. Radiometrinen prosessointi sisältää SWIR-pikselien järjestämisen. 1A-kuvadatan pakkaamiseen käytetään JPEG2000-algoritmia.

3.2.3 Taso 1B

Tason 1B datatuote on radiometrisesti korjattua kuvadataa TOA-säteilyarvoissa ja sensorigeometriassa. Lisäksi tuote sisältää maantieteellisesti jalostetun geometrisen mallin, jota ei sovelleta tällä tasolla vaan käytetään 1C-tason tuotteen kehittämiseen. Tason 1B yksi kuvarae on noin 27 MB kokoinen. 1B-tason pikselikoordinaatti viittaa pikselin keskusta.

Tason 1B algoritmeilla jalostetaan 1A-esiastetuotetta 1B-tason tuotteen luomiseksi. Prosessiin kuuluu radiometristen korjausten tekeminen ja fyysisen geometrisen katselumallin jalostaminen. Nämä kaksi operaatiota on ketjutettu, ja ne voidaan aktivoida tarpeen mukaan jokaiselle kaistalle. Radiometrinen käsittely sisältää muun muassa tumman signaalin korjauksen, pikselivasteen epäyhtenäisyyden korjauksen, ristivaikutuksen korjaamisen, viallisten pikselien tunnistamisen, dekonvoluution ja kohinan poiston. Geometrinen malli lasketaan käyttämällä GRI:n tarjoamia Ground Control -pisteitä. Mallin muodostukseen kuuluu Image-GRI rekisteröintiä varten yleisen geometrian laskenta (*Common Grid Computation*) ja uudelleenotanta (*Resampling on Common Grid*), solmukohtien kerääminen (*Tie-Points Collection*) ja suodattaminen (*Tie-Points Filtering*) sekä spatiotriangulaatio (*Spatiotriangulation*). Lopuksi kuvadata pakataan JPEG2000-algoritmeilla.

3.2.4 Taso 1C

Tason 1C datatuote on ortorektifioitua kuvadataa TOA-heijastuksessa. Kuvat ovat ortokuvia kartografisessa geometriassa eli UTM/WGS84-projektiossa. Lisäksi tuote sisältää pilvi-, maa- ja vesimaskit sekä ECMWF-dataa. Tason yksi kuvalaatta on noin 600 MB kokoinen. Tuotteen pikselikoordinaatit viittaavat pikselin vasempaan yläkulmaan.

Tason 1C datankäsittelyssä kehitetään tason 1C tuote edeltäjätason 1B-tuotteesta uudel-

leennäytteistysalgoritmeilla ja pilvi-, maa- sekä vesimaskien laskennalla. Prosessoinnin ensimmäinen vaihe on kuvalaattojen yhdistäminen. Toisena vaiheena suoritetaan uudelleennäytteistettävien ruudukkojen laskenta (*Resampling Grid Computation*), jossa linkitetään kuvan alkuperäinen geometria kohdegeometriaan ortokuvaksi. Seuraavaksi jokainen ortokuvan spektrikaista uudelleennäytteistetään käyttäen aiemmin laskettuja ruudukkoja ja interpolaatiosuodatinta. Lisäksi lasketaan TOA-heijastussuhde. Lopuksi generoidaan pilvi-, maa ja vesimaskit sekä pakataan kuvadata käyttäen JPEG2000-algoritmia ja GML:ää maantieteellisen kuvadatan koodaamiseksi.

3.2.5 Taso 2A

Taso 2A on korkein Sentinel-2-satelliitin datatasoista, ja sen sisältämä tuote sisältää ortorektifioitua kuvadataa BOA-heijastuksessa. Vastaavasti kuin 1C-tuotteet, myös 2A-tuotteen kuvat ovat ortokuvia UTM/WGS84-projektiossa. Lisäksi tuote sisältää paikkaluokittelukartan. Tason kuvalaatta on kooltaan noin 800 MB.

Tason 2A datatuote kehitetään 1C-tason tuotteista, ja datan käsittelyn sekä tuotteen kehittämisen voi käyttäjä tehdä myös itse Sentinel-2-työkalupaketilla tai Sen2Cor-prosessorin erillisellä versiolla käyttämällä vastaavaa 1C-tason tuotetta. Datan käsittely jakautuu kahteen osaan, paikkaluokittelukarttojen kehittämiseen ja ilmakehän korjaukseen. Paikkaluokittelun algoritmi sisältää neljä vaihetta: pilvien ja lumen havaitsemisen, cirrus-pilven havaitsemisen, pilven varjon havaitsemisen ja luokittelukartan luomisen. Tuloksena saatu paikkaluokittelukartta sisältää yhteensä 12 eri luokkaa. Kaksi luokista kattaa alueet, joista ei ole dataa tai data on viallista. Erityyppisille pilville on neljä luokkaa. Loput kuusi luokkaa ovat varjoille, pilvivarjoille, kasvillisuudelle, maaperälle, vedelle ja lumelle. Ilmakehän korjauksessa 1C-tason TOA-heijastuskuvasta lasketaan BOA-heijastuskuva. Korjauksen laskenta perustuu Atmospheric / Topographic Correction for Satellite Imagery -julkaisussa (Richter et al. 2012) ehdotettuun algoritmiin.

4 Itämeren sinilevän mallintaminen

4.1 Turbiditeetti vedenlaadun mittarina

Vedenlaatua voidaan arvioida viidellä vedenlaatumuuttujalla, joita ovat optisesti aktiiviset aineet (OAS) ja niiden vaikutusten yhdistelmät (Attila 2019). OAS-aineita ovat kasviplankton, värillinen liuonnut orgaaninen aine ja suspendoitunut epäorgaaninen aine. Näiden yhdistelmiä ovat Secchi-syvyys ja turbiditeetti. Kaukokartoitusmenetelmillä kerätystä datasta voidaan erotella ja määrittää nämä vedenlaatumuuttujat halutun vesialueen tilan arvioimiseksi.

Tässä työssä näistä vedenlaatumuuttujista käsitellään vain turbiditeettia sinilevän havaitsemiseksi Itämeren rannikolla. Turbiditeetti kuvaa veden sameutta, joka johtuu vedessä olevasta liukenemattomasta aineesta, kuten maaperän hiukkasista, metalleista ja kasviplanktonista. Turbiditeetin voimakkuus voidaan määrittää mittaamalla joko säteilyvuon vaimenemista vedessä tai hajasäteilyn voimakkuutta (Attila 2019).

Huomioitavaa vesistön sinilevätilanteen arvioinnissa turbiditeetin avulla on, että se ei suoraan kerro sinilevän määrää vedessä. Sen sijaan sinilevä on yksi tekijöistä, joka heikentää veden läpinäkyvyyttä ja tekee vedestä sameaa. Tämä tulee ottaa huomioon vesistön tilan arvioinnissa erityisesti jokien valuma-alueilla, joissa vesistön sameuteen vaikuttaa mahdollisen sinilevän lisäksi merkitsevissä määrin jokivesien mukana kulkeutuvat ravinteet ja muut aineet.

4.2 Vedenlaadun spatiotemporaalinen mallintaminen

Työssä mallinnettava Itämeren sameusdata perustuu Suomen ympäristökeskus SYKEN tarjoamaan avoimeen tietoaaineistoon, jota on kerätty Sentinel-2-satelliitin havainnoista. Data on vapaasti ladattavissa WMS-rajapinnan kautta coverage-tunnisteella EO_HR_WQ_S2_TURB. Turbiditeettidatan estimointiin satelliittihavainnoista käytetään C2RCC-neuroverkkomallia (Brockmann et al. 2016), joka suorittaa spektrin inversion ilmakehän korjaukseksi eli erottelee vedestä lähtevän säteilyn yläilmakehän säteilystä sekä hakee vesistön luontaisia optisia ominaisuuksia.

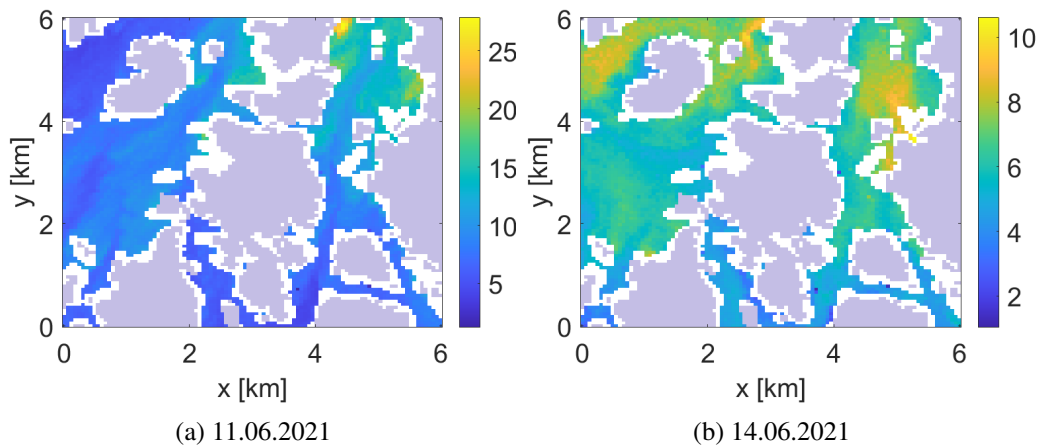
Matérn-satunnaiskentät on tilastollinen mallinnustyökalu, jota käytetään erityisesti geostatiikassa ja Bayesialaisessa tilastollisessa inversiossa. Matérn-kenttä on Gaussin satun-

naiskenttä ja noudattaa siis usean muuttujan Gaussin jakaumaa. Roininen et al. (2014) mukaan Matérn-kentät voidaan esittää stokastisen matriisiyhtälön ratkaisuna. Nämä ovat varsin hyödyllisiä ja laskennallisesti tehokkaita inversio-ongelmissa, joissa on suuri määrä tuntemattomia. Matérn-kenttien ja Gaussin Markovin satunnaiskenttien väliltä löydetyn yhteyden ansiosta (Lindgren et al. 2011) tutkittavaa ilmiötä voidaan mallintaa tehokkaasti, vaikka se onkin laskennallisesti aikaavievää. Matérn-kenttiä voidaan soveltaa erilaisten satelliittimittauksien, kuten veden turbiditeetin, mallintamiseen.

Matérn-kenttien lisäksi satelliittihavainnoja ja niiden soveltamista vedenlaadun seurantaan voidaan tutkia myös muilla matemaattisilla menetelmillä. Esimerkiksi Kalman-suotimeen pohjautuvan suodinlähestymistavan hyperspektridatasta (Voutilainen et al. 2007) on osoitettu sopivan järiveden laadun tutkimiseen.

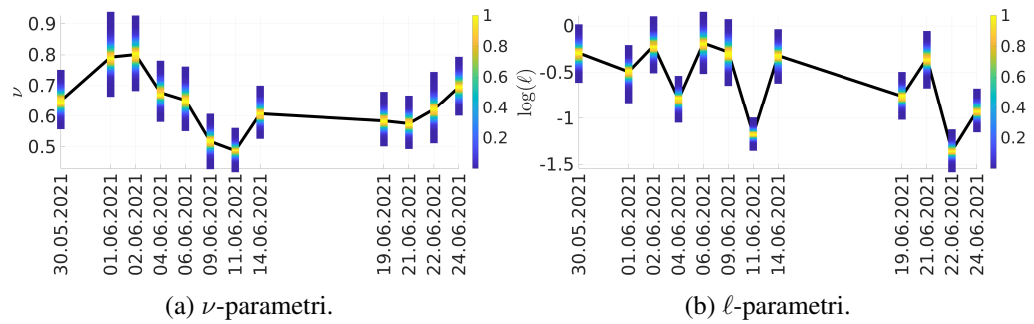
4.3 Esimerkki Saaristomereltä

Tässä työssä satelliittihavainnoista estimoitua turbiditeettidataa tutkitaan Matérn-kenttien avulla. Tarkasteltavaksi alueeksi on valittu Saaristomeren alue läheltä Pakinaista ja ajankohdaksi vuoden 2021 kesä. Kuvissa 1a ja 1b on esitetty saaristoalueen sameus Matérn-kenttinä kahdelta päivältä, 11.6.2021 ja 14.6.2021. Saaduista kentistä estimoidaan MCMC-metodeilla Matérn-kovarianssin parametrit sileyys ν ja pituus ℓ , joilla voidaan mallintaa kyseisten kenttien fyysisiä ominaisuuksia (Salo 2021). Harmaat pikselit esittävät maata ja valkoiset alueita, joista ei ole mittaustuloksia saatavilla. Kentän koko on 101×101 pikseliä, ja yksikkönä on kilometrit.



Kuva 1. Turbiditeetti Pakinaisissa 11.6.2021 ja 14.6.2021.

Kuvat 2a ja 2b esittävät Matérn-kentän sileys- ja pituusparametrien ν ja ℓ muutosta ajan suhteen Pakinaisissa ajanjaksolta 30.05.2021- 24.06.2021. Jokainen tarkasteluun valittu päivä sisältää yli neljätuhatta pikseliä havaintoja. Parametrien estimointia varten otoskooksi on valittu kymmenentuhatta kappaletta. Todennäköisyystiheysestimaatit on laskettu käyttämällä MATLABin ksdensity-funktiota ja normalisoitu jakamalla niiden maksimiarvolla.



Kuva 2. Matérn-kentän parametrit.

5 Yhteenveto

Itämeren tilannetta on seurattava sen arvokkaan biodiversiteetin ja merkittävän yhteiskunnallisen vaikutuksen takia riittävän säännöllisesti sekä laajasti. Tätä tavoitetta tukevat satelliiteilla suoritettavat kaukokartoituksen menetelmät. Satelliittihavainnoista saadaan johdettua erilaisia vedenlaatumuuttujia, joiden avulla vesistön nykytilaa voidaan arvioida. Tässä kandidaatin työssä tutkittiin, miten Sentinel-2-satelliittijärjestelmällä kerätään dataa ja mallinnettiin käytännön esimerkkinä turbiditeettidataa Saaristomereltä.

Sentinel-2-satelliittiohjelma on osa laajaa Euroopan Unionin hallinnoimaa Maanseurantaohjelmaa ja keskittyy maanpinnan kuvantamiseen kattaen maan lisäksi saaret, sisämeret ja rannikkoalueet. Kuvantaminen tapahtuu kahdella MSI-satelliitilla, jotka keräävät passiivisesti Maasta heijastuvaa valoa 13 aallonpituudelta sekä VNIR- että SWIR-alueilta. Sama sijainti kuvataan vähintään viiden päivän välein.

Sentinel-2-satelliitin data jakautuu viiteen tasoon: 0, 1A, 1B, 1C ja 2A. Näistä kolmen ensimmäisen tason datat eivät ole julkisesti saatavilla, ja jälkimmäisten kahden ovat vapaasti käytettävissä. 0-tason data on pakattua raakakuvadataa, jolle suoritetaan MSI-telemetry-analyseja ja kehitetään PQL. 1A-tasolla raakakuvadata puretaan, kehitetään geometrinen malli ja prosessoidaan kuvadataa radiometrisesti. 1B-tason kuvadata on TOA-säteilykuvarakeita sensorigeometriassa. Kuvadatalle suoritetaan radiometrisiä korjauksia ja kehitetään fyysinen geometrinen malli. 1C-tason data on TOA-heijastus-ortokuvia, ja tasolla lasketaan pilvi-, maa- ja vesimaskit. 2A-tason data on BOA-heijastus-ortokuvia, ja tasolla kehitetään maanpeiteluokittelukartat.

Turbiditeetti on yksi vedenlaatumuuttujista, joka voidaan johtaa Sentinel-2:n havainnoista. Turbiditeetti kuvaa veden sameutta, mitä aiheuttaa vedessä olevat liukenemattomat aineet kuten maaperän hiukkaset, metallit ja kasviplankton. Turbiditeetin avulla voidaan siis arvioida veden sinilevätilannetta, mutta se ei suoraan kerro sinilevän määrää vedessä. Tässä työssä vesistön sameutta mallinnettiin Matérn-kenttien avulla. Tutkittavana alueena oli Saaristomerellä sijaitseva Pakinaisen alue.

Jatkotutkimuksia ajatellen satelliittidatan hyödyntämiseen käytettävien menetelmien jatkokehitys on tarpeen. On olemassa menetelmiä ja tilastollisia malleja, joilla voidaan johtaa haluttuja parametrejä, mutta näiden hyödyntäminen, tulkinta ja sitominen fysikaalisiin prosesseihin on vielä kehitystyön alla. Myöskään reaaliaikaista satelliittihavaintojen analyysia ei juurikaan tehdä. Jatkotutkimuksille on siis paljon mahdollisuuksia esimerkiksi koneoppimisaproskimaatioiden ja neuroverkkojen kehittämisen parissa.

Lähteet

- Jenni Attila (2019). “Water quality monitoring and assessment of the Northern Baltic Sea using Earth Observation”. Helsinki: Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Rakennetun ympäristön laitos, s. 93.
- Carsten Brockmann, Roland Doerffer, Marco Peters, Kerstin Stelzer, Sabine Embacher ja Ana Ruescas (2016). “Evolution of the C2RR neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters”. *Living Planet Symposium*. ESA Special Publication 740, s. 54.
- Copernicus* (2022). URL: <https://www.copernicus.eu/fi/copernicus> (viitattu 24.02.2022).
- L.W. Harding, C.L. Gallegos, E.S. Perry, W.D. Miller, J.E. Adolf, M.E. Mallonee ja H.W. Paerl (2016). “Long-Term Trends of Nutrients and Phytoplankton in Chesapeake Bay”. *Estuaries and Coasts* 39, s. 664–681.
- Itämeri* (2022). URL: <https://wwf.fi/ilmastonmuutos-suomessa/itameri/> (viitattu 01.03.2022).
- Finn Lindgren, Johan Lindström ja Håvard Rue (2011). “An explicit link between Gaussian fields and Gaussian Markov random fields: the stochastic partial differential equation approach”. *Royal Statistical Society* 73.4, s. 423–498.
- R. Richter ja D. Schlöpfer (2012). *Atmospheric / Topographic Correction for Satellite Imagery*. ATCOR-2/3 User Guide 8.2.
- Lassi Roininen, Janne Huttunen ja Sari Lasanen (2014). “Whittle-Matérn priors for Bayesian statistical inversion with applications in electrical impedance tomography”. *Inverse Problems and Imaging* 8.2, s. 561–586.
- Aleksi Salo (2021). “Spatiotemporal Matérn field modelling of Baltic Sea turbidity”. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT, School of Engineering Science, Laskennallinen tekniikka, s. 52.
- Sentinel Online* (2022). URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home> (viitattu 10.04.2022).
- Sentinel-2 User Handbook* (2015). ESA Standard Document 1.2.
- Arto Voutilainen, Timo Pyhälähti, Kari Kallio, Jouni Pulliainen, Heikki Haario ja Jari Kaipio (2007). “A filtering approach for estimating lake water quality from remote sensing data”. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 9.1, s. 50–64.