



**TURUN
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen
tiedekunta

Rantaviivakartoitus satelliitti- ja ilmakuvista

Esimerkkinä eteläisen Saaristomeren kallioluodot

Inka Jouhikainen

Maantiede

Pro gradu -tutkielma

Laajuus: 30 op

Ohjaajat:

Harri Tolvanen

Tua Nylén

13.3.2024

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu

Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Pro gradu -tutkielma

Pääaine: Maantiede

Tekijä: Inka Jouhikainen

Otsikko: Rantaviivakartoitus satelliitti- ja ilmakuvista – esimerkkinä eteläisen Saaristomeren kallioluodot

Ohjaajat: Harri Tolvanen ja Tua Nylén

Sivumäärä: 62 sivua

Päivämäärä: 13.3.2024

Rantaviiva, eli meren ja maan välinen raja, on yksi karttojen peruselementeistä, ja sen sijainnin tarkka määrittäminen on tärkeää. Rantaviivan sijaintiin vaikuttavat monet eri tekijät, ja rantaviivaa on pitkään käytetty myös korkeuskäyrien referenssitasona. Rantaviivan tutkiminen on yleistynyt 2010-luvulla. Menetelmiä on paljon erilaisia, ja kaukokartoitusaineston käyttö on ollut tutkimuksissa yleistä. Tämän pro gradu -tutkielman tavoitteena on selvittää satelliitti- ja ilmakuvien hyödyntämisen mahdollisuudet Saaristomeren rantaviivakartoituksessa. Tutkielman näkökulma on erityisesti merikartoille sopivien rantaviivojen luominen. Rajattu tutkimusalue sijaitsee eteläisellä Saaristomerellä, ja kartoitettavat kohteet ovat kallioluotoja.

Aineistoksi valitsin avoimesti saatavan Sentinel-2-kuvan (spatiaalinen resoluutio 10 m) sekä Maanmittauslaitoksen tuottamat ilmakuvat (spatiaalinen resoluutio 0,5 m) tutkimusalueelta. Rantaviivaa kartoittaessa täytyy ottaa huomioon vedenkorkeus, joten hyödynsin satelliittikuvan valinnassa myös Ilmatieteen laitoksen vedenkorkeustietoja Ahvenanmaalla sijaitsevalta Föglön mittausasemalta. Valitsin lopulta kuvaksi 23.4.2020 kuvatun Sentinel-2B-kuvan, ja kuvausajankohdan aikaan teoreettinen keskivesi on ollut -9 millimetriä.

Nelikanavaiselle ilmakuvulle tehtiin ohjattu luokittelu satunnaismetsä eli Random Forest -algoritilla. Tulos muutettiin rasterista polygoniksi, ja siitä viivaksi. Satelliittikuvasta rantaviiva tehtiin laskemalla normalisoitu vesi-indeksi (NDWI), josta määriteltiin rantaviiva raja-arvolla 0. Molempien luokittelujen pohjalta muodostettu viivatiedosto oli geometrialtaan eheää ja rantaviiva muodostui tutkimusalueen kaikille luodoille. Tuloksia verrattiin manuaalisesti digitoituun referenssirantaviivaan, jolla paikannettiin tulosten virheet. Virhe-etäisyyden keskiarvo oli ilmakuvan tuloksilla 8,25 metriä ja maksimietäisyys 47,56 metriä. Satelliittikuvan tuloksilla vastaavat arvot olivat 20,42 metriä ja 98,09 metriä. Tuloksia vertailtiin myös merikartoissa hyödynnettävään MML:n rantaviivaan. Ilmakuvan luokittelun tulokset olivat sijainniltaan lähempänä MML:n rantaviivaa. Myös MML:n rantaviivaa verrattiin referenssirantaviivaan, ja virhe-etäisyys oli keskimäärin 5,75 metriä, ja maksimivirhe oli 74,03 metriä. MML:n rantaviivan ja referenssirantaviivan välinen virhe-etäisyys on siis pienempi kuin tutkielmassa tuotettujen rantaviivojen, mutta poikkeavien arvojen suuruus viittaa yksittäisiin sijaintivirheisiin.

MML:n rantaviivat ovat sijainniltaan tarkempia kuin tutkielmassa tuotetut rantaviivat. Ilmakuvasta tuotettua rantaviivaa voisi hyödyntää esimerkiksi MML:n rantaviivojen virheiden paikantamiseen ja korjaamiseen. Satelliittikuvasta tuotetun luokittelun tuloksia voisi teoriassa käyttää pienimittakaavaisilla merikartoilla, mutta suurimittakaavaisille merikartoille rantaviivan sijaintitarkkuus ei riitä.

Avainsanat: kaukokartoitus, ohjattu luokittelu, normalisoitu vesi-indeksi, rantaviivatutkimus, merikartta, kartoitus

Master's thesis

Subject: Geography

Author: Inka Jouhikainen

Title: Shoreline extraction from satellite and aerial imagery - Case study from the southern Archipelago Sea, Finland

Supervisors: Harri Tolvanen and Tua Nylén

Number of pages: 62 pages

Date: 13.3.2024

The definition of a shoreline is the boundary between sea and land area. It provides important information on maps, and therefore defining an accurate shoreline location, is important. Studies of shoreline mapping have increased especially during the 2010's. There are many different methods, and the use of remote sensing images has been popular in studies. The aim of this thesis is to examine the usage of satellite and aerial imagery for extracting shoreline in the Archipelago Sea. The study area is in the southern Archipelago Sea, and the land areas are rock islets. This thesis focuses on shoreline extraction for the purposes of nautical charts.

The used datasets are Sentinel-2 imagery (10 m spatial resolution) and aerial imagery (0,5 m spatial resolution) by the National land survey of Finland (NLS). When mapping the shoreline, sea levels need to be taken into consideration. This affected the selection of Sentinel-2 image used. I chose water level data collected from the Föglö measuring station, located in Åland. I chose the Sentinel-2B image taken on the 23rd of April in 2020, when the mean water was measured at -9 millimeters.

The three-band aerial image classification was done with random forest (RF) algorithm. The classification results were converted from raster to polygon, from which the shoreline was extracted. For the satellite data, a normalized water index (NDWI) was calculated, and the shoreline was extracted with the threshold value of 0. To examine general errors in the shoreline position, the results were compared to a manually digitized reference shoreline. Shorelines extracted from both aerial and satellite images were geometrically intact and the shoreline was formed for all the islets across the study area. The average distance to the reference shoreline was 8,25 meters in the aerial image results, with the maximum error of 47,56 meters. The equivalent distances for satellite image results were 20,42 meters and 98,09 meters. Both results were also compared to the shoreline used in the Finnish nautical charts, provided by NLS. The aerial image results were closer to NLS shoreline than the satellite image results. The shoreline provided by NLS was also compared to the reference shoreline, which showed that there are some deviant values in the NLS shoreline. The average error distance between the NLS shoreline and the reference shoreline was 5,75 meters, with deviant values up to 74,03 meters. The distance error was smaller between the NLS shoreline, and the reference shoreline, compared to the shorelines made in this thesis. However, the deviant values indicate that there are some errors in the location of the NLS shoreline.

The results showed that the location of shorelines made by NLS is more accurate than the shorelines made in the thesis. However, the results made from aerial images could be used for locating and fixing the errors in the shorelines made by NLS. The results of satellite image classification could theoretically be used in small-scale nautical charts, but the precision of the shoreline is not good enough for large-scale nautical charts. The results of aerial classification could theoretically be used in nautical charts.

Key words: remote sensing, supervised classification, normalized water index, shoreline extraction, shoreline study, nautical charts, land survey

Sisällysluettelo

1	Johdanto	5
2	Teoriataustoitus	8
2.1	Merikartoitus	8
2.2	Kaukokartoitus	11
2.3	Rantaviivatutkimus	16
3	Tutkimusalue	20
3.1	Saaristomeri	20
3.2	Tutkimusalueen rajaus	21
4	Aineistot ja menetelmät	24
4.1	MML:n rantaviiva ja vedenkorkeustiedot	24
4.2	Sentinel-2	24
4.3	Ilmakuvat	26
4.4	Kuvaluokittelu ja rantaviivan luominen	26
4.5	Referenssirantaviiva ja virhe-etäisyys	30
5	Tulokset	33
5.1	Rantaviiva satelliittikuvasta	33
5.2	Rantaviiva ilmakuvasta	35
5.3	Virhe-etäisyydet referenssirantaviivaan	37
5.4	Etäisyys MML:n rantaviivaan	42
6	Keskustelu	46
6.1	Aineistojen keskinäinen vertailu	46
6.2	Rantaviivan kartoitustarkkuus	47
6.3	Virhe-etäisyyksien vertailu	48
6.4	Vertailu MML:n rantaviivaan	50
6.5	Merikarttakelpoisuus, epävarmuustekijät ja jatkokehitys	51
7	Yhteenveto	53
	Lähteet	55

1 Johdanto

Rantaviiva määritellään veden ja maan välisenä rajana, jonka sijainti muuttuu eri olosuhteiden ja ilmiöiden, kuten vuoroveden, aaltojen, eroosion ja sedimentin kasaantumisen vaikutuksesta (Davidson-Arnott ym. 2019; Yasir ym. 2020; Liu ym. 2022; Alcaras ym. 2023). Rantaviiva on kartoissa yksi topologian peruselementeistä (Sun ym. 2023). Rantaviivan sijainnin määrittely sekä rantaviivatutkimus on yleisesti tärkeää, sillä ihminen hyödyntää rannikkoalueita paljon, esimerkiksi 40 prosenttia maailman väestöstä asuu rannikkoalueella (Lubchenco & Haugan 2023). Rannikkokaupungiksi määritellään kaupungit, jotka sijaitsevat enintään 100 kilometrin päässä rannikosta (Barragán & de Andrés 2015). Ilmastonmuutos vaikuttaa rantaviivan sijainnin muuttumiseen, esimerkiksi kovien myrskyjen myötä tulvat yleistyvät ja rannikkoeroosio voimistuu (Alcaras ym. 2023; Laino & Iglesias 2023). Näin ollen rantaviivan tutkiminen on tärkeää, jotta rannikkoalueita voidaan hyödyntää turvallisesti, mutta myös kestävästi (Sun ym. 2023). Rantaviivan sijaintiin vaikuttaa lisäksi merenpinnan nousu, sekä Suomessa maankohoaminen (vedenkorkeusvaihtelut Suomen rannikolla 2021).

Vuonna 2022 Suomen ulkomaankaupasta yli 90 prosenttia tapahtui meriteitse, viennistä osuus oli 94 prosenttia ja tuonnista 91 prosenttia (ulkomaankaupan kuljetukset 2023). Merikarttojen ajantasaisuus on siis tärkeää niin turvallisen merenkulun, kuin sujuvan kauppaliikenteen kannalta. Suomalaisissa merikartoissa käytetään Maanmittauslaitoksen (MML) tuottamaa aineistoa, joka yksinkertaistetaan Traficomien käyttöön sopivammaksi. Suomessa rantaviivat tuotetaan ilmakuvista, ja kuvaus on koko valtion tasolla kattavaa. Kansainvälisessä rantaviivatutkimuksessa on hyödynnetty ilmakuvia noin 1920-luvulta asti, mutta nykyään myös satelliittiaineiston käyttö on yleistynyt kuvien resoluutioiden parantuessa (Al Mansoori & Al-Marzouqi 2016).

Satelliittikuvien hyödyntämisen myötä tutkimusmenetelmistä on tullut nopeampia ja halvempia. Satelliittikuvien hyödyntämistä on arvokasta tutkia, sillä maapallolla on paljon ilmakehuvaamiselle haasteellisia alueita, ja resurssit kuvaamiseen voivat olla rajalliset. Satelliittiaineistoa hyödynnetään erityisesti syrjäisten, pinta-alaltaan suurien tai ihmiselle vaikeakulkuisten ja vaarallisten alueiden kartoittamiseen (Jakovljevic ym. 2019). Satelliitit tuottavat dataa jatkuvasti, ja aineistoa on avoimesti saatavilla. Rantaviivakartoituksessa on monia huomioon otettavia tekijöitä, kuten datan saatavuus ja erottuvuuskyky, sekä kartoittajan omat tulkinnat datasta (Sekovski ym. 2014).

Datan avoimuus on yksi paikkatietoalan merkittävimmistä tulevaisuuden muutoksista, ja sen merkitys kasvaa jatkuvasti (Pettit ym. 2020). Avoin data määritellään Pettitin ym. (2020) mukaan datana, joka on ilmaiseksi kaikille hyödynnettävissä. Esimerkiksi Copernicus- ja Landsat-satelliittiohjelmat tarjoavat käyttäjille täysin avointa satelliittiaineistoa (Jakovljevic ym. 2019). Avoimen satelliittiaineiston hyötyjä on Jakovljevicin ym. (2019) mukaan muun muassa pitkäaikainen ja jatkuva saatavuus, koko Maan kattavuus sekä kuvien hyödyntäminen nopeasti ja ilmaiseksi. Viimeisin on tärkeää erityisesti kriisien kartoittamisessa. Avoimen datan lisäksi myös avoimen lähdekoodin ohjelmistojen ja pilvipalveluiden käyttö yleistyy yhä enemmän tulevaisuudessa. Taustalla muutoksessa ovat globaalit trendit, kuten digitaalinen vallankumous ja massadata, eli erittäin suurten ja jatkuvien aineistojen hyödyntäminen tietotekniikan avulla (Pettit ym. 2020).

Erytyisesti Saaristomeri on maailmanlaajuisella tasolla hyvin ainutlaatuinen, ja kartoitettavaa rantaviivaa on alueen kokoon suhteutettuna hyvin paljon. Suomessa rantaviivatutkimusta ei ole paljoakaan tehty, minkä vuoksi tämän kaltainen tutkielma tuo lisätietoa siitä, toimivatko kansainvälisesti käytetyt menetelmät ja aineistot myös Saaristomeren kaltaisilla vesialueilla. Saaristomeri eroaa morfologian lisäksi myös veden ominaisuuksiltaan maailman muista vesialueista. Veden eri ominaisuudet, kuten sameus, vaikuttavat heijastusarvoihin, ja näin ollen Itämeren kartoittamisen tulokset voivat erota kirkkaan veden alueilla tehdyistä tutkimuksista. Myös veden korkea klorofylliarvo ja ravinteiden määrä muuttaa veden heijastumista (Jakovljevic ym. 2019).

Pro gradu –tutkielman tavoitteena on tutkia, miten ohjatun luokittelun menetelmä sekä monikanavaindeksiin perustuva raja-arvomenetelmä soveltuvat rantaviivakartoitukseen, erityisesti merikartoituksen näkökulmasta. Tutkimusalueeksi on valittu eteläiseltä Saaristomereltä kallioluotoja, joiden rantaviivan yksityiskohdissa on vaihtelua. Tutkielman toisena tavoitteena on luoda kyseisille luodoille uudet rantaviivat. Traficom hyödyntää merikartoissa MML:n maastotietokannasta saatavia rantaviivoja, ja muokkaa ne merikartoituksen käyttöön sopiviksi. Tutkimuksessa selvitetään myös, eroavatko MML:n rantaviivat tutkielmassa tehdyistä rantaviivoista. Tutkimuskysymykset ovat seuraavanlaiset:

1. Kuinka tarkasti kallioluotojen rantaviivaa pystytään kartoittamaan ohjatulla luokittelulla sekä monikanavaindeksiin perustuvalla raja-arvomenetelmällä satelliitti- ja ilmakuvista?

2. Minkälaisilla alueilla satelliitti- ja ilmakuvista automaattisesti tuotettujen rantaviivojen virhe-etäisyydet verrattuna manuaalisesti digitoituun rantaviivaan ovat suuria ja mistä nämä virheet johtuvat?
3. Kuinka paljon merikarttakäytössä oleva rantaviiva eroaa tutkielmassa satelliitti- ja ilmakuvista tuotetuista rantaviivoista? Entä ilmakuvasta manuaalisesti digitoidusta rantaviivasta?

2 Teoriataustoitus

2.1 Merikartoitus

Merikartat ovat tärkeä osa turvallista merenkulkua, sillä ne auttavat merenkulkijaa navigoimaan vesialueella (Costantino ym. 2020). Itämerellä navigointi ilman merikarttaa on lähes mahdotonta sekä vaarallista, sillä viimeisin jäätiköityminen on vaikuttanut paljon pohjan muodostumiin, ja eri kulutus- ja kasaantumismuodostumat tekevät pohjasta hyvin vaihtelevaa (Kuosa ym. 2023; merenpohjan ominaispiirteet s.a.). Syvyys voi siis vaihdella pienelläkin alueella paljon, ja pohjan muodostumia ei pysty havaitsemaan pinnalta. Rantaviivan sijaintitietojen ajantasaisuus vaikuttaa myös turvalliseen merenkulkuun, sillä maa-alueiden etäisyyden arvioiminen on vesillä haastavaa. Sijaintitietojen oikeellisuus vaikuttaa myös merikarttojen luotettavuuteen. Merellä kulkevan on siis pystyttävä luottamaan siihen, että merikarttojen tiedot pitävät paikkaansa.

Merikartalle tyypillisiä piirteitä ovat muun muassa syvyystiedot, liikenneväylät sekä meri- ja maamerkit (Strang 2009). Painetut merikartat ovat Mercatorin projektiossa, sillä kyseinen projektio on oikeakulmainen. Tällöin kartan leveys- ja pituuspiirit ovat suorina, joten kohteiden välinen kulma on oikein. Poikkeuksena on kuitenkin osa sisävesiltä tehdyistä viitta-, purjehdus- ja veneilykartoista, joissa saattaa olla Gauss-Krügerin projektio käytössä.

Ensimmäiset suomalaiset merikartat julkaistiin vuonna 1919 sen aikaisen Merenkulkuhallitukseen kuuluvan Merikarttalaitoksen toimesta (Strang 2009). Strangin (2009) mukaan ensimmäiset merikartat tehtiin suoraan venäläisten karttojen pohjalta kääntämällä nimistö suomeksi ja ruotsiksi sekä muuttamalla mittakaava metrijärjestelmään. Venäläisten merikarttojen mittakaava oli 1:72 000, mutta jo 1920-luvulla suomalaisissa merikartoissa käytettiin 1:50 000 mittakaavaa, joka on vieläkin käytössä. Mittakaavamuutoksessa kesti kymmeniä vuosia, ja viimeiset muutokset saatiin valmiiksi vasta 1990-luvulla (Strang 2009). Mittakaavan lisäksi merikartoissa on muuttunut myös käytettävä koordinaattijärjestelmä. Suomen merikarttoja alettiin muuttamaan kansainvälisten standardien mukaisiksi 2000-luvulla. Ennen muutosta merikartat piirrettiin KKK-koordinaattijärjestelmään, josta siirryttiin kansainväliseen WGS-84-järjestelmään (Mäkinen 2007). Kansainväliseen koordinaattijärjestelmään siirtyminen oli tärkeää, jotta navigointi kansainvälisillä vesillä on mahdollista. KKK- ja WGS-84-koordinaattijärjestelmissä on pohjoiseteläsuunnassa noin 10–70 metrin ero ja itä-länsisuunnassa noin 160–180 metrin ero

(Mäkinen 2007). Koska muun muassa Ruotsin ja Viron merikartat ovat kansainvälisen järjestelmän mukaiset, olisi Itämerellä navigointi ollut hyvin haastavaa ilman järjestelmän muutosta. WGS-84-järjestelmä on myös yhteensopiva veneilykäyttöön tarkoitettujen GPS-navigointilaitteiden kanssa, joten navigointi on yksinkertaisempaa ilman koordinaattitasojen muutosta (Mäkinen 2007).

Nykyään Suomen merikarttojen julkaisemisesta vastaa liikenne- ja viestintävirasto Traficom. Traficom julkaisee painettuja merikarttoja sekä elektronisia merikarttoja (ENC). ENC-kartoille tuotetaan vektorimuotoista merikartta-aineistoa, ja sen käyttötarkoitus on pääasiassa ammattimerenkulkuun, esimerkiksi rahtialuksille, joissa on käytössä elektronisen kartan lukuun tarkoitettu ECDIS-laitteisto (Mäkinen 2007; merikartat 2024 s.a.). ENC-aineistosta vastaa norjalainen ENC-jakelukeskus Primar. Koska merialueet ovat monelle valtiolle kuuluvia, pitää merikarttoja laatiessa ottaa huomioon kansainväliset säädökset. Painettujen merikarttojen säädökset tulevat kansainvälisestä INT-kaaviosta, jossa määritellään muun muassa kuvaustavat.

Painettujen merikarttojen mittakaavatasot vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaan. Esimerkiksi avomeripurjehdukseen tarkoitettu yleiskartta on mittakaavatasossa 1:50 000, kun taas esimerkiksi satama-alueilla haastavammassa ympäristössä käytetään satamakarttaa, jonka mittakaava vaihtelee 1:10 000–1: 25 000. Yleis- ja satamakartan lisäksi Suomessa julkaistaan painettuina karttoina rannikko- ja veneilykarttoja, sekä merikarttasarjoja (merikartat 2024 s.a.). Merikarttojen ajantasaisuus on erittäin tärkeä osa turvallista merenkulkua, minkä vuoksi Traficom julkaisee kolme kertaa kuukaudessa Tiedoksiantoja merenkulkijoille lehden. Jokaiseen painettuun karttaan merkitään Tiedoksiantoja merenkulkijoille -julkaisun numero sekä päiväys, mihin korjaukset on huomioitu (merikartat 2024 s.a.).

Merenkulkuun ja merikartoitukseen vaikuttavat monet eri tahot. Yhdistyneiden kansakuntien alainen kansainvälinen merenkulkujärjestö (IMO) on yksi näistä. IMO:n päätavoitteena on kehittää ja hyväksyä merenkulun kansainvälisiä sääntöjä ja määräyksiä, ja näiden avulla taata turvallinen ja tehokas meriliikenne (Barnes 2023). IMO määrittelee myös ohjeistukset merikarttojen käyttöön ja valmistamiseen. IMO:n tärkeimpiä sopimuksia ovat muun muassa merenkulun ympäristönsuojelu MARPOL-yleissopimus sekä kansainvälisen meriturvallisuuden SOLAS-yleissopimus. Valtioiden merikarttalaitosten toimintaa puolestaan koordinoi kansainvälinen merikartoitusjärjestö (IHO). IHO luo konkreettisia määräyksiä ja standardeja muun muassa merikarttojen sisältöön ja karttasymboliikkaan liittyen (Mäkinen

2007). ENC-kartat noudattavat myös IHO:n kansainvälisiä S-57 standardeja (merikartat 2024 s.a.). IHO koostuu komissioista ja työryhmistä, esimerkiksi hydrografisten palveluiden ja standardien komitea vastaa järjestön säädösten muutoksista (regulations of the IHO for international (INT) charts 2021). IHO:n työ liittyy vahvasti turvalliseen merenkulkuun, sillä merikarttojen on oltava helposti ymmärrettäviä (Mäkinen 2007). IHO määrittelee myös rantaviivan kuvauksen merikartoissa. Esimerkiksi rantaviivan yleistämiseen on määritelmät, joiden tarkoituksena on turvallinen merenkulku ja selkeä esitystapa (Skopeliti ym. 2021). Skopeliti ym (2021) selittävät myös, että ohjeistuksissa on suositeltu vektorien yksinkertaistamista, sillä näin poistetaan epäoleellinen tieto. Myös verteksien vähentäminen kuuluu rantaviivan yleistämisen työvaiheisiin, kunhan rantaviivan muoto ei muutu verteksien poistamisesta (Skopeliti ym. 2021).

Merikarttojen valmistamiseen käytetään merenmittausaineistosta saatavia syvyystietoja (merikartoitusaineistot 2022). Syvyystiedot ovat pistepilvenä, joka kattaa koko mittaus- ja väyläalueen. Pistetiheys riippuu käytetystä mittausmenetelmästä, Traficomilla olevat syvyystiedot on mitattu usein kaikuharauksella tai monikeilauksella, mutta myös linjaluotauksella mitattuja aineistoja on tehty. Linjaluotausaineistoa yhdistetään usein monikeilausaineiston kanssa, jotta saadaan selkeämpi kuva syvyystiedoista. Kaikuharaus, monikeilaus ja linjaluotaus ovat kaikki aktiivisen kaukokartoituksen menetelmiä.

Mittausmenetelmät voidaan jakaa akustisiin ja optisiin menetelmiin. Akustisten menetelmien mittaustekniikka perustuu äänisignaalin kulkeman matkan aikaan, kun taas optiset menetelmät perustuvat valopulssin kulkeman matkan aikaan (vesiväylätutkimuksen yleisohjeet 2013).

Kaikuharauksessa merenpohjasta saadaan tietoa äänisignaalin avulla (Kautonen 2011).

Mittaus perustuu aikaan, joka signaalilla kestää mittalaitteesta pohjaan ja takaisin.

Kaikuharausantureita asetetaan alukseen köliin nähden poikittain riviin, niin että anturien lähettämät mittauskeilat eli pulssit menevät limittäin ja näin peittävät alueen kokonaan (Kautonen 2011). Kaikuharauksella mitattu aineisto on tiheää, sillä sen pistetiheys on alle kaksi metriä (merikartoitusaineistot 2022). Monikeilaus eli monikanavainen kaikuluotaus on merenmittauksen tarkoituksiin luotu mittausmenetelmä, jonka toiminta perustuu myös akustiseen mittaustekniikkaan. Monikeilauksen vahvuus on koko mittausalueen peittävyys alle kahden metrin pistetiheydellä. Tämä on mahdollista monikeilauksen kaikujen viuhkamaisen kuvion vuoksi (vesiväylätutkimuksen yleisohjeet 2013). Monikeilauksessa äänipulssi palaa kohteesta useaan keilaan (Herava 2021). Monikeilauksen tuloksena saadaan tiheää, kolmiulotteista pistepilviaineistoa, sillä jokainen mittauspiste saa kolmiulotteisen

koordinaatin. Monikeilaus on merenmittauskeinoista nopein, sillä voidaan saada jopa 25 000 syvyyspistettä sekunnissa.

2.2 Kaukokartoitus

Kaukokartoitus määritellään tiedon keräämisenä kohteesta ilman fyysistä kosketusta. Kartoitus tehdään mittalaitteiden eli instrumenttien avulla, jotka ovat kiinni esimerkiksi satelliitissa tai lentokoneessa. Kaukokartoitus voi olla joko passiivista tai aktiivista, erona on mittalaitteen havainnoivan säteilyn lähde, eli tuleeko se suoraan kohteesta (passiivinen) vai lähettääkö mittalaite sen itse (aktiivinen) (Musa ym. 2015). Esimerkiksi kamerat ovat passiivisia instrumentteja, kun taas laser- tai mikroaaltotutka aktiivisia (Hatunen s.a). Havainnointi perustuu sähkömagneettiseen säteilyyn, jota erilaiset kohteet heijastavat eri tavoin (Lavender & Lavender 2015). Tämä johtuu aineksen sähköisistä, fysikaalisista, kemiallisista ja geometrisistä ominaisuuksista (Hatunen s.a). Mittalaitteet suunnitellaan rekisteröimään tiettyjä kanavia, eli aallonpituusalueita, aineiston käyttötarkoituksen mukaan. Sekä kanavien lukumäärä, että aallonpituusalue voivat vaihdella paljon.

Sähkömagneettinen säteily määritellään energiana, joka liikkuu sekä aaltolina että valohiukkasina eli fotoneina materiaalin ja tilan läpi (Lavender & Lavender 2015). Sähkömagneettinen spektri muodostuu säteilyn vaihteluvälistä. Kaukokartoituksen näkökulmasta spektrin tärkeimmät osat ovat Lavenderin ja Lavenderin (2015) mukaan näkyvä valo sekä infrapunasäteily. Näkyvän valon spektriin kuuluvat ihmissilmälle näkyvät aallonpituudet, eli sininen, punainen ja vihreä valo, jotka mitataan nanometreissä. Nämä kaikki sijoittuvat noin 400 ja 700 nanometrin välille, sinisen ollessa lyhytaaltoisimmassa päässä ja punaisen pisimmässä. Ihmissilmälle näkymätön infrapunaspektri sen sijaan mitataan mikrometreinä, sillä sen aallonpituus on pidempi (Lavender & Lavender 2015). Kun aallonpituus kasvaa, taajuus sen sijaan pienenee, minkä vuoksi infrapunaspektrillä taajuus on pienempi kuin näkyvän valon spektrillä. Infrapunaspektri on vielä jaettuna kolmeen osioon aallonpituuden mukaan. Näistä lyhytaaltoisin on lähi-infrapuna (NIR) yli 0,7 mikrometrin aallonpituudella, jota seuraa lyhytaaltainen infrapuna (SWIR) 0,9–1,7 mikrometrin spektrillä, ja viimeisenä lämpötilan kartoituksessa käytetty lämpöinfrapuna (TIR) 4–14 mikrometrin spektrillä (Lavender & Lavender 2015).

Passiivisen kaukokartoitusaineiston laatutekijöitä voi arvioida sen resoluutioiden avulla. Resoluutio, eli erotuskyky, voidaan jakaa neljään eri luokkaan: spatiaalinen, spektraalinen, temporaalinen ja radiometrinen resoluutio. Spatiaalisella erotuskyvyllä, toisin sanoen

maastoerotuskyvyllä, tarkoitetaan satelliittikuvissa pienimmän erottuvan kohteen kokoa (Hatunen s.a). Spektraalinen erotuskyky tarkoittaa eri aallonpituusalueiden havainnointia, eli aallonpituuskanavien määrää ja leveyttä. Satelliitti-instrumenteissa on paljon eroja kanavien määrässä, yleinen määrä on noin 5–10, mutta esimerkiksi NASA:n vuonna 2000 laukaisemassa Hyperion-satelliitissa oli satoja kanavia (tietopaketti kaukokartoituksesta s.a; Hyperion 2010). Tarkalla spektraalisella erotuskyvyllä pystytään tulkitsemaan kohteen heijastusominaisuuksia yksityiskohtaisemmin, ja se saavutetaan kapealla taajuuskaistalla (Ikola 1999). Spektraalinen erotuskyky ja radiometrinen erotuskyky liittyvät toisiinsa, sillä tarkka radiometrinen erotuskyky tarvitsee laajan taajuuskaistan (Ikola 1999). Radiometrinen erotuskyky tarkoittaa kohteesta heijastuneen säteilyn tallentamista, eli kuinka voimakkaita eri säteilyt ovat ja pystyykö niitä erottamaan toisistaan. Temporaalinen erotuskyky tarkoittaa saman alueen kuvaamista ajallisesti, eli esimerkiksi sitä, kuinka usein satelliitti kulkee tietyn alueen yli.

Euroopan Unionin alainen, Euroopan komission hallinnoima, Copernicus-hanke on maanseurantaohjelma, jonka tarkoituksena on saada kattavaa tietoa Maasta eurooppalaisille (Copernicus lyhyesti s.a). Copernicus-hanke on mahdollistanut lähes reaaliaikaisen kaukokartoitusdatan saavutettavuuden, ja dataa hyödynnetään moniin eri tarkoituksiin. Hankkeeseen kuuluu kuusi eri palvelua, jotka mahdollistavat käyttäjälle datasta kerätyn informaation hyödyntämisen helposti (Copernicus lyhyesti s.a). Palveluiden teemoina ovat ilmakehä, meriympäristö, maakartoitus, ilmastonmuutos, turvallisuus ja hätätilanteet. Copernicus-hanke on suunniteltu erityisesti ympäristöalan päättäjien ja viranomaisten käyttöön, mutta avointa dataa pystyy kuitenkin hyödyntämään kuka tahansa. Data kerätään Sentinel-satelliiteilla, mutta myös *in situ*-järjestelmien avulla (Copernicus lyhyesti s.a). Tällaisia ovat esimerkiksi maa-asemiin liitetyt mittalaitteistot. Sentinel-satelliitteja hankkeessa on yhteensä kuusi kappaletta, mutta tässä tutkielmassa hyödynnetään Sentinel-2 satelliittien kuvia.

Sentinel-2 satelliittiohjelma koostuu kahdesta satelliitista, Sentinel-2A ja Sentinel-2B, jotka kiertävät maata aurinkosynkronisella kiertoradalla 180 asteen kulmassa toisistaan 786 kilometrin etäisyydellä maanpinnasta (Sentinel-2 s.a). Aurinkosynkronisella kiertoradalla tarkoitetaan kiertorataa, jossa satelliitit kiertävät Maata suhteessa Aurinkoon, eli satelliitti kulkee saman alueen yli aina samaan aikaan (Li 2021). Sentinel-2:n temporaalinen resoluutio on päiväntasaajalla yhdellä satelliitilla 10 päivää ja kahdella viisi, mutta Suomen leveysasteella väli on lyhyempi. Data on käytettävissä muutaman päivän päästä

kuvaushetkestä (Sentinel-2 s.a). Sentinel-2 satelliittien toiminto perustuu monikanavasensoreihin (MSI), jotka mittaavat maan pinnasta heijastuvaa auringonvaloa (Sentinel-2 s.a). Sentinel-2 satelliiteissa on yhteensä 13 kanavaa, joiden spatiaalinen resoluutio vaihtelee 10 ja 60 metrin välillä (taulukko 1). Sentinel-2 mission yksi päätarkoituksista on tuottaa ajantasaista, korkean resoluution omaavia monispektraalisia satelliittikuvia (Drusch ym. 2012). Muita tavoitteita on Druschin ym. (2012) mukaan kuvien jatkuvuuden tehostaminen ja mahdollisuus hyödyntää kuvia myös tulevaisissa operatiivisissa tuotteissa, kuten maankäytön muutoksien tarkastelussa.

Taulukko 1. Sentinel-2 kanavien ominaisuudet. Lähde Copernicus.

Kanava	Resoluutio	Aallonpituusalue	Selite
1	60 m	443 nm	Ultra sininen
2	10 m	490 nm	Sininen
3	10 m	560 nm	Vihreä
4	10 m	665 nm	Punainen
5	20 m	705 nm	Näkyvä ja lähi-infrapuna eli VNIR
6	20 m	740 nm	Näkyvä ja lähi-infrapuna eli VNIR
7	20 m	783 nm	Näkyvä ja lähi-infrapuna eli VNIR
8	10 m	842 nm	Näkyvä ja lähi-infrapuna eli VNIR
8a	20 m	865 nm	Näkyvä ja lähi-infrapuna eli VNIR
9	60 m	940 nm	Lyhyen aallonpituusalueen infrapuna eli SWIR
10	60 m	1375 nm	Lyhyen aallonpituusalueen infrapuna eli SWIR
11	20 m	1610 nm	Lyhyen aallonpituusalueen infrapuna eli SWIR
12	20 m	2190 nm	Lyhyen aallonpituusalueen infrapuna eli SWIR

Yksi satelliiteilla tehtävän kaukokartoituksen hyödyistä on aineiston jatkuvuus, eli alueista saadaan ajantasaista tietoa jatkuvalla syötteellä. Esimerkiksi veden lämpötilaa voidaan mitata koko päivän, kuukauden tai vuoden ajalta, ilman ihmisen tekemää työtä. Satelliiteilla pystytään kuvaamaan myös laajoja alueita lentokonetta tai dronea nopeammin.

Rantaviivatutkimuksen näkökulmasta passiivisen kaukokartoitusaineiston hyötynä on muun muassa helppous niin ajallisesti kuin rahallisesti, eli tutkimuksesta on tullut halvempaa (Al Mansoori & Al-Marzouqi 2016). Tämä koskee nimenomaan käyttäjää, sillä osa satelliittiaineistosta on ilmaiseksi vapaasti käytettävissä. McAllisterin ym. (2022) mukaan satelliittikuvia pystytään kuitenkin hyödyntämään vain tietyn tyyppisten rantaviivojen

kartoittamisessa. Yksi näistä on visuaalisesti selkeästi erottuva rannikko, kuten kallion ja veden raja.

Apostolopoulosin ja Nikolakopoulosin (2021) mukaan rantaviivatutkimuksen rahoitus on ollut vähäistä, joten avoimella datalla voi olla suurikin merkitys tiedon saantiin. Tarve avoimiin satelliittiaineistoihin tiedostettiin jo 1990-luvulla, ja vuonna 2003 luotiin kansainvälinen organisaatio GEO (group on earth observation), jonka yksi tarkoituksista on parantaa datan saatavuutta kansainvälisesti (Borowitz 2017). Kuitenkin vielä vuonna 2016 alle puolet maailman julkisin varoin tuotetusta satelliittidatasta oli Borowitzin (2017) mukaan avoimesti saatavilla. Satelliittikuvien hyödyntämiseen liittyy myös haasteista, esimerkiksi erilaiset sääolosuhteet kuten pilvisuus, varsinkin jos halutaan tutkia tiettyä aluetta pidemmältä ajanjaksolta. Myös ilmakehän eri kerrokset saattavat muuttaa esimerkiksi säteilyn voimakkuutta, suuntaa ja spektristä jakaumaa (Hatunen s.a). Ilmakehän aiheuttamia virheitä pystyy kuitenkin muokkaamaan aineiston prosessointivaiheessa. Esimerkiksi tutkittaessa maanpäällisen kohteen ajallista vaihtelua ilmakehän vaikutusten korjaaminen on tärkeää, jotta kuvien radiometrinen skaala on sama (Song ym. 2001).

Teknologian kehittymisen myötä myös aktiivinen kaukokartoitus on yleistynyt tutkimuksissa. Aktiivisen kaukokartoituksen hyöty on muun muassa aineiston tuottajalle aiheutuvat pienemmät kustannukset (Wang ym. 2023). Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että esimerkiksi LiDAR-kuvaustekniikalla olisi halpaa tuottaa aineistoa, vaan tutkimuksissa käytetään pääosin valtioiden tuottamaa avoimena saatavilla olevia aineistoja (Wang ym. 2023). Aktiivisella kaukokartoituksella aineistoa pystytään keräämään myös erilaisissa sääolosuhteissa, kuin passiivisella. Toinen aktiivisen kaukokartoituksen keino on hyödyntää tutkia, kuten SAR-tutkaa, jolloin pilvisuus ei ole ongelmana aineiston saamiseen, sillä tutkan lähettämä signaali pystyy läpäisemään pilvipeitteen (Musa ym. 2015; Zhang ym. 2022). Esimerkiksi Zhang ym. (2022) hyödynsivät Sentinel-1-satelliitin SAR-kuvia digitaalisen korkeusmallin luomisessa.

Passiivisessa kaukokartoituksessa tarvitaan tarpeeksi elektromagneettista säteilyä aineiston keruussa, poikkeuksena kohteen lämpösäteilyn mittaaminen (Wang ym. 2023). Aktiivisen kaukokartoituksen menetelmillä pystytään tuottamaan myös kolmiulotteista pistepilvidataa, joka voi tuoda paljon lisäarvoa esimerkiksi rannikkoalueita kartoittaessa (Wang ym. 2023). Aktiiviseen kaukokartoitukseen tarvittava välineistön hankinta voi olla kuitenkin haastavaa, ja laitteet ovat usein painavia. Esimerkiksi Wang ym. (2023) mainitsevat merenmittauksessakin hyödynnettävän CZMIL-laitteiston painavan noin 360 kiloa, ja laitteiston käyttöön tarvitsee

tietynlaisen ilma-aluksen. Kuvaamiseen ja tuloksiin vaikuttavat myös sääolosuhteet. Tiedon keruu aktiivisen kaukokartoituksen menetelmin ei siis aina ole yksinkertaista, riippuen käytetystä tekniikasta. Datan laatuun vaikuttaa myös mittausvirheet, joita esiintyy aktiivisen kaukokartoituksen aineistoissa (Wang ym. 2023). Musa ym. (2015) mainitsevat esimerkkinä haasteen SAR-tutkan hyödyntämisestä vesialueiden kartoittamisessa. SAR-tutkan avulla pystytään kartoittamaan vesialueita Musan ym. (2015) mukaan erinomaisesti, mutta kuvaamista haittaavat tekijät, kuten tuuli tai kasvillisuus, voivat aiheuttaa takaisinsirontaa. Tämä puolestaan vaikuttaa kuvauksen tuloksiin negatiivisesti. Zhangin ym. (2022) tutkimuksen yhtenä haasteena oli puolestaan SAR-kuvien rajallinen määrä ennen vuotta 2019. Tämän vuoksi SAR-kuvien hyödyntämismahdollisuudet ovat vielä rajalliset, sillä esimerkiksi ajallista vaihtelua voi olla haastavaa tutkia

Ilmakuvauksella on tuotettu aineistoa 1920-luvulta lähtien, tehden siitä vanhimman kaukokartoitusmenetelmän (Gens 2010). Peittävyydeltään laadukasta aineistoa alettiin kuitenkin Andersin ja Byrnesin (1991) mukaan saamaan vasta 1930-luvulla. Suomessakin ilmakuvia on ollut saatavilla 1930-luvulta asti, riippuen alueesta (Maanmittauslaitoksen ilmakekuva s.a). Rantaviiva on määritelty ilmakuvista aikaisemmin manuaalisesti, joka on työläs sekä kartoittajasta riippuvainen prosessi (Dai ym. 2019). Rantaviivakartoitus ilmakekuvasta helpottui erityisesti kuvaustekniikan digitalisoitumisen vuoksi (Gens 2010). Gensin (2010) mukaan ilmakekuvia hyödynnetään vielä erityisesti rantaviivan muutosta tutkittaessa. Suomessa ilmakekuvauksesta vastaa MML, ja se toteutetaan Kansallisen ilmakekuvahjelman mukaisesti (Laserkeilaus ja ilmakekuvaus s.a). Ohjelman rahoittamisessa ovat mukana MML, Suomen metsäkeskus, Metsähallitus, Ruokavirasto sekä Suomen ympäristökeskus, ja yhteistyössä ovat lisäksi mukana Maa- ja metsätalousministeriö, Ympäristöministeriö ja Puolustusministeriö. Suomessa kuvaukset toteutetaan kolmen vuoden välein, lukuun ottamatta pohjoisinta Lappia, aina keväisin ja kesäisin. Ilmakekuvia käytetään ortokuvien, eli mittatarkkojen kuvien, luomiseen, ja niitä hyödynnetään muun muassa kartoituskäyttöön (Maanmittauslaitoksen ilmakekuva s.a).

Suomen topografiaa on kartoitettu stereokartoituksella 1950-luvulta asti. Suomen rantaviivaa kuvaava aineisto perustuu pääosin eri aikakausien stereokuvauksiin. Stereokartoitus perustuu siihen, että korkeuseroja voidaan tulkita vertaamalla kahdesta kuvakulmasta otettuja kuvia toisiinsa. Stereofotogrammetriassa eli kaksikuvamittauksessa kohteelle lasketaan kolmiulotteiset xyz-koordinaatit ilmakekuvasta stereokartoituskoneella tai nykyään

fotogrammetriaan tarkoitettulla ohjelmistolla. Tämän tavoitteena on pelkistää ilmakuvien tieto ihmiselle helpommin ymmärrettävään ja tulkittavaan muotoon.

2.3 Rantaviivatutkimus

Rantaviivatutkimuksen aiheet ja näkökulmat ovat muuttuneet koko 2000-luvun ajan. Sun ym. (2023) kävivät tutkimuksessaan läpi eri ajanjaksoina julkaistujen rantaviivatutkimuksien avainsanoja. Tuloksista käy ilmi muun muassa ilmastonmuutoksen vaikutuksen huomioiminen, sillä vuoden 2014–2017 tyypillisimpiä rantaviivatutkimukseen liittyviä avainsanoja oli esimerkiksi “luokittelu”, “vaikutukset”, “merenpinnan korkeus” ja “paikkatieto”. Saman ajanjakson aikana satelliittien ja koneoppimisen hyödyntäminen luokittelussa alkoi olla suosittua (Sun ym. 2023). Teknologian kehitys näkyy myös tutkimusaiheissa, sillä vuosina 2018–2022 koneoppimisen keinot, kuten neuroverkostot yleistyivät Sunin ym. (2023) mukaan tutkimuksissa.

Kaukokartoitusmenetelmien käyttö on yleistynyt rantaviivatutkimuksissa erityisesti 2010-luvulla. Esimerkiksi Grigio ym. (2005) käyttivät Landsat-5 aineistoa tutkiakseen Guamaren rantaviivan ajallista muutosta. Alueella oli tehty useampiakin rantaviivatutkimuksia ilma- ja satelliittikuvista digitaalisten kuvaprosessointimenetelmien avulla, mutta paikkatiedon hyödyntäminen oli 2000-luvun alussa vielä uutta (Grigio ym. 2005). Vaikka kaukokartoituksen kuvaustekniikka kehittyikin nopeasti 2000-luvulla, kaukokartoituksen hyödyntäminen rantaviivakartoituksessa oli vuosikymmen alussa vielä vähäistä (Gens 2007). Tätä tukee Apostolopoulosin ja Nikolakopoulosin (2021) tutkimus, jossa kerrotaan rantaviivatutkimuksen yleistyneen merkittävästi vasta 2010-luvulla. Tutkimuksessa analysoitiin yhteensä 138 rantaviivatutkimusta, joista 70 prosenttia oli julkaistu aikavälillä 2013–2019. Rantaviivatutkimuksen yleistymiseen on vaikuttanut sekä kasvanut mielenkiinto rantaeroosioon, ja sen myötä noussut huoli rantaviivan muutoksista, mutta myös datan avoimuuden yleistyminen sekä aineiston resoluution parantuminen (Apostolopoulos & Nikolakopoulos 2021). Tämän lisäksi tietokoneiden prosessointikyvyn parantuminen on vaikuttanut huomattavasti kaukokartoitusaineiston hyödyntämiseen (Ma ym. 2015). Myös aktiivisia kaukokartoitusmenetelmiä, kuten laserkeilausta (LiDAR) on alettu hyödyntämään rantaviivatutkimuksissa (Alcaras ym. 2023; Wang ym. 2023). Vesialueita kartoittaessa kaukokartoitusaineiston pohjalta, on hyvä pitää mielessä, että matalikot, vesialueen koko, muoto ja kemialliset ominaisuudet vaikuttavat tulosten tarkkuuteen (Jakovljevic ym. 2018).

Rantaviivakartoituksen menetelmiä on nykyään paljon. Esimerkiksi normalisoitua kasvillisuusindeksiä (NDVI), normalisoitua vesi-indeksiä (NDWI), muokattua normalisoitua vesi-indeksiä (MNDWI) ja automaattista veden määrittelyn indeksiä (AWEI) on hyödynnetty rantaviivan paikantamiseen, mutta näistä NDWI on yleisemmin käytetty (Grigio ym. 2005; Sekovski ym. 2014; Al Mansoori & Al-Marzouqi 2016; Dai ym. 2019; Apostolopoulos & Nikolakopoulos 2021). NDWI on Stuart McFeetersin kehittämä menetelmä, jonka tarkoituksena on mallintaa vesialueita ja tehdä niistä helposti tulkittavia kaukokartoitusaineistossa (McFeeters 1996; Özelkan 2020; Costantino 2020). Özelkanin (2020) mukaan indeksi on nykyään yksi käytetyimmistä menetelmistä, kun kartoitetaan avoimia vesialueita. Myös Apostolopoulosin ja Nikolakopoulosin (2021) tulokset tukivat tätä, sillä 138:sta analysoidusta tutkimuksesta lähes 38 prosenttia hyödynsi NDWI:tä, kun taas esimerkiksi NDVI:n ja MNDWI:n käyttöprosentit jäivät alle 14 prosenttiin. NDWI hyödyntää vihreää ja lähi-infra (NIR) kanavaa seuraavalla kaavalla:

$$\text{NDWI} = (\text{vihreä} - \text{NIR}) \div (\text{vihreä} + \text{NIR})$$

Laskun tuloksena on rasteritiedosto, jossa pikselit saavat arvon väliltä -1 ja 1, positiivisten arvojen kuvaten vettä ja nollan tai negatiivisten arvojen kuvaten maa-alueita (Costantino 2020). Indeksiä on tutkimuksissa hyödynnetty eri spatiaalisen resoluution kuvissa, kuten 10 metrin ja 60 metrin kuvissa (Özelkan 2020). Tutkimuksissa on huomattu indeksien toimivuudessa eroja, sillä validien tulosten saaminen on riippuvaista kuvatus veden ominaisuuksista, kuten väristä ja syvyydestä (Özelkan 2020).

Al Mansoori & Al-Marzouqi (2016) käyvät tutkimuksessaan läpi automaattisia menetelmiä, joita on käytetty aikaisemmissa rantaviivatutkimuksissa. He jakavat menetelmät neljään eri kategoriaan: kanavien raja-arvon lähestymistapa, luokittelumenetelmät, rajan tunnistamisen menetelmät sekä fuusio lähestymistapa. Kanavien raja-arvon lähestymistavassa raja-arvo saadaan joko mukautuvalla- tai kokeilumetodilla, mutta usein tutkimuksissa käytetään myös vakiintunutta teoriapohjaista raja-arvoa, esimerkiksi NDWI:n yhteydessä arvoa nolla. Tutkimuksissa on Al Mansoorin & Al-Marzouqin (2016) mukaan yritetty hyödyntää myös histogrammin raja-arvoja, mutta tämä menetelmä yksinään on todistettu luokittelevan alueet virheellisesti. Raja-arvon lähestymistapaa käytetään laajalti rantaviivatutkimuksissa, sillä sitä on helppo hyödyntää. Luokittelumenetelmässä kuva jaotellaan vesi- ja maa-alueisiin heijastusarvojen perusteella, ja näiden alueiden raja osoittaa rantaviivan. Rajan tunnistamisen menetelmässä kuvasta havaitaan kuvioden reunaviivat kuvaprosessoinnin työkaluilla. Nämä

viivat edustavat rantaviivaa. Fuusio lähestymistavassa yhdistetään eri dataa monesta lähteestä, esimerkiksi LIDAR- ja SAR-aineistoa, ja näiden avulla havaitaan rantaviiva. Myös tekoälyn hyödyntämismahdollisuuksia on testattu rantaviivan kartoittamisessa. Vaikka tekoälyn avulla on onnistuttu saamaan tarkkoja ja pienillä koealueilla hyvin valideja tuloksia, on sen hyödyntämisessä myös haasteita, kuten algoritmien kouluttamisen kesto (Al Mansoori & Al-Marzouqi 2016).

Ohjattua ja ohjaamatonta luokittelua on käytetty aikaisemmissa rantaviivatutkimuksissa (McAllister ym. 2022; Sun ym. 2023). Ohjatun luokittelun tarkoituksena on luokitella kuvan pikselit tukialueiden avulla. Tukialueita varten valitaan manuaalisesti 10–100 pikseliä jokaista luokkaa kohden (Parviainen 2011). Tukialueiden on tärkeää olla selkeitä, esimerkiksi keskeltä kalliota eikä rannan läheltä. Yleensä luokittelumenetelmissä hyödynnetään useampaa kanavaa, esimerkiksi kaikkia Sentinel-2-kuvan kanavia. Ohjattu luokittelu perustuu pikselien heijastusarvoon, eli algoritmi vertaa jokaisen pikselin heijastusarvoa tukialueiden heijastusarvoihin ja tekee luokittelun tämän perusteella. Esimerkiksi Sekovskin ym. (2014) tutkimuksessa käytettiin alle 10 metrin spatiaalisen resoluution satelliittikuvia maan ja meren välisen rajan kartoittamiseen. Tutkimusmenetelminä olivat sekä ohjattu että ohjaamaton luokittelu. Ohjatun luokittelun hyödyntäminen rantaviivatutkimuksissa on yleistynyt viimeisten vuosikymmenten aikana (Sekovski ym. 2014). Sun ym. (2023) käyvät tutkimuksessaan läpi rantaviivakartoituksen menetelmiä, ja yksi suosituista menetelmistä on ollut luokittelumenetelmät. Yksi tämän menetelmän hyödyistä on sen yksinkertaisuus.

Random Forest (RF) eli satunnaismetsäalgoritmia on hyödynnetty kaukokartoituksessa 2010-luvun puolivälistä asti, mutta alkuun sen hyödyntämismahdollisuuksia ei vielä täysin tiedetty (Kulkarni & Lowe 2016). Nykyään algoritmi on kuitenkin yksi käytetyimmistä maanpeitteen ja -käytön ohjatun luokittelun menetelmistä (Phan ym. 2020). Luokittelun onnistumiseen vaikuttaa moni eri asia, kuten valittu aineisto, tutkimusalueen maankäyttömuodot sekä prosessointi- ja luokittelutavan valinta (Kulkarni & Lowe 2016). RF-algoritmia on käytetty myös aikaisemmissa rantaviivatutkimuksissa. Esimerkiksi Liu ym. (2020) käyttivät RF-algoritmia Nunivak-saaren rantaviivan kartoittamisessa.

RF-algoritmin toimivuutta satelliittikuvien luokittelussa on myös arvioitu. Esimerkiksi Rodriguez-Galiano ym. (2012) arvioivat RF-algoritmia maanpeitteiden luokittelussa, ja pitivät algoritmia toimivana myös heterogeenisten alueiden luokittelussa. RF-algoritmi on myös

helppokäyttöinen, sillä se muun muassa vaatii käyttäjää määrittelemään vain kaksi muuttujaa (Rodriguez-Galiano ym. 2012).

3 Tutkimusalue

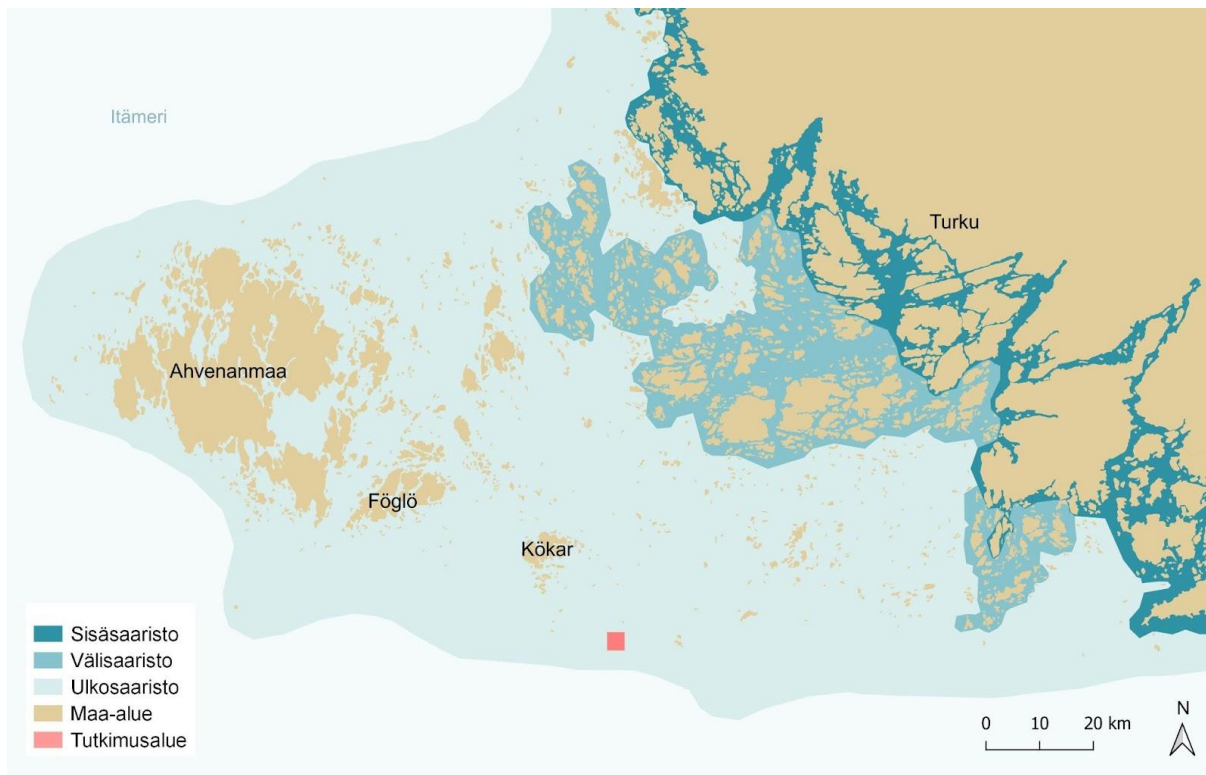
3.1 Saaristomeri

Saaristomeri kattaa merialueen Ahvenanmeren ja Suomen rannikon välissä (Myrberg ym. 2006). Se on maailmanlaajuisesti ainutlaatuinen alue, josta suurin osa kuuluu Unescon biosfäärialueeseen sekä Saaristomeren kansallispuistoon (Nummela ym. 2019). Saaristomeren kokonaispinta-ala on noin 8 300 neliökilometriä, ja tästä noin 2 000 neliökilometriä on maa- aluetta. Saarien lukumäärä on eri lähteiden mukaan noin 20 000–50 000, riippuen todennäköisesti kartoitusmittakaavasta. Saaristomeren keskisyvyys on noin 23 metriä, syvimmän kohdan ollessa 146 metriä (Nummela ym. 2019; Kuosa ym. 2023). Syvyydessä on paljon vaihtelua sisäsaariston ja ulkosaariston välillä, ja rannikolla syvyys on usein alle kymmenessä metrissä.

Rannikkovesien luokittelu on määritelty vesipuitedirektiivissä, ja luokittelu perustuu ominaisuuksiin, kuten suolapitoisuuteen, aallokkoon, maantieteelliseen sijaintiin sekä jääpeitteiseen aikaan (valtioneuvoston asetus vesienhoidon järjestämisestä 2006/1040). Saaristomeri on jaoteltu kolmeen eri alueeseen: sisäsaaristoon, välisaaristoon ja ulkosaaristoon (kuva 1). Sisäsaaristossa saaret ovat suuria ja väliin jäävät salmet ovat kapeampia, eli maisemasta suurin osa on maa- aluetta (Nummela ym. 2019; Kuosa ym. 2023). Välisaaristossa maisema muuttuu niin, että merta ja maata on näkyvissä suhteessa yhtä paljon, eli sisäsaaristoon verrattuna saaret ovat pinta-alaltaan pienempiä ja salmet suurempia. Ulkosaaristossa maisema puolestaan on pääosin merta, jossa on kallioluotoja. Nummelan ym. (2019) mukaan suurin osa Saaristomerestä on kallioperää, joka on vanhaa peruskalliota, mutta välisaaristossa on myös jonkin verran moreenirantaa esimerkiksi Paraisten ja Nauvon alueella. Lähellä rannikkoa on peruskallion lisäksi myös savi- ja silttirantaa, tällaisia alueita löytyy esimerkiksi Turusta ja Taivassalosta.

Saaristomeren vyöhykkeisyyteen vaikuttaa vahvasti rannikkoprosessit sekä jääkauden jälkeinen maankohoaminen (Kuosaa ym. 2023). Erityisesti aallokko ja veden virtaukset aiheuttavat eroosiota ja näin muokkaavat maa-alueita (Davidson-Arnott ym. 2019). Ulkosaaristossa tuuli on voimakkaampaa ja aallokko suurempaa kuin suojaisemmassa sisäsaaristossa, joten rannikkoprosessit vaikuttavat alueen maisemaan vahvemmin kuin mantereen lähellä. Rannikkoprosessien vaikutus liittyy myös pohja-aineksen kuljetukseen,

minkä vuoksi ulkosaariston luodot ovat kivikkoisia, kun taas lähempänä manteretta on muun muassa moreenirantaa.



Kuva 1. Saariston vyöhykkeet sekä tutkimusalueen sijainti Saaristomerellä (Saaristoluokitus 2021).

3.2 Tutkimusalueen rajaus

Tutkimusalue kattaa noin 20 neliökilometrin kokoisen alueen eteläiseltä Saaristomereltä, joten alue kuuluu luokittelussa ulkosaaristoon (kuva 1, kuva 2). Kartoitettavat kohteet ovat siis kallioluotoja. Koska kalliorantojen muutos on hitaampaa kuin muutosherkkien rantojen, kartoitusajankohdalla ei ole suurta merkitystä ja eri aikoina kuvatut aineistot ovat vertailukelpoisia keskenään, kun eroa on esimerkiksi muutama vuosi. Tämä mahdollistaa eri ajankohtina kuvattujen satelliitti- ja ilmakuvien hyödyntämisen aineistoina.



Kuva 2. Rajattu tutkimusalue eteläiseltä Saaristomereltä. Ilmakuva ladattu Maanmittauslaitoksen avoimien aineistojen tiedostopalvelusta.

Tutkimusalueen rajaukseen vaikutti tässä tutkielmassa pääasiassa kaksi asiaa: sijainti eteläiseltä Saaristomereltä, sekä pilvettömien satelliittikuvien saatavuus. Alueeseen haluttiin myös eri kokoisia ja muotoisia luotoja, jotta luokittelua varten rantaviivassa olisi vaihtelevuutta. Tutkimusalueen koko otettiin myös huomioon, sillä luokittelun tuloksia verrattiin manuaalisesti digitoituun rantaviivaan. Näin ollen digitoitavaa rantaviivaa ei saanut olla liikaa, jotta työmäärä pysyi kohtuullisena. Tutkimusalue valittiin käymällä läpi luotoryhmiä satelliitti- ja ilmakuvista. Lopulta aluerajaukseksi valittiin Kökarin ja Utön välillä sijaitsevat Västra ja Östra Mörskärin saaret ja niiden läheiset luodot, sillä alue täytti kaikki halutut kriteerit (kuva 2). Merikartoissa tutkimusalue sisältyy numeron 27 rannikkokartan alueelle. Kyseinen painettu kartta on 1:50 000 mittakaavassa.

Tutkimusalueen käytössä olevan maastotietokantaan kuuluvan rantaviiva-aineiston ajantasaisuudessa on MML:n metatietojen mukaan eroavaisuuksia. Ongelmana metatiedoissa on kuitenkin se, että vaikka muokkaustiedot ovat avointa dataa, siitä ei käy ilmi mitä on muokattu. Osan rantaviivan tietoja on muokattu vuonna 2021 ja osan 2007. Tämä antaa hieman osviittaa aineiston ajantasaisuudesta.

4 Aineistot ja menetelmät

4.1 MML:n rantaviiva ja vedenkorkeustiedot

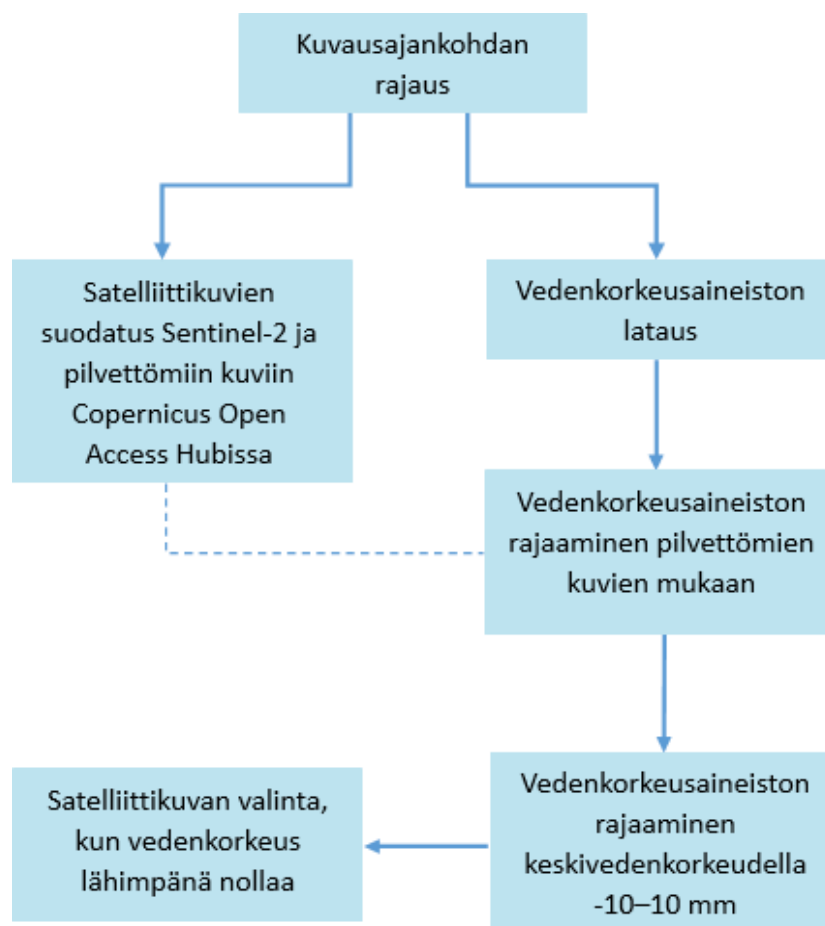
Suomalaisten merikarttojen rantaviivana hyödynnetään MML:n maastotietokannan Maastokuvion reuna -kohdetta. Kohde on määriteltyä maastotietokohdeluettelossa luonnonmaaston kuviona tai maankäyttökuviota alueellisesti rajoittavana reunana (Maanmittauslaitoksen maastotietokohteet 2016). Merikarttaprosessissa aineisto ladataan maastotietokannasta ja sille tehdään yksinkertaistaminen, jotta rantaviiva on kansainvälisten standardien mukainen. Yksinkertaistamisprosessiin kuuluu muun muassa verteksien vähentäminen ja viivan yksinkertaistaminen. Tutkielmassa “MML:n rantaviiva” tarkoittaa merikartoilla hyödynnettävää rantaviivaa, eli Maanmittauksen tuottamaa aineistoa, mille on tehty aikaisemmin mainittu yksinkertaistaminen. Aineisto on saatu liikenne- ja viestintävirasto Traficomilta. MML:n rantaviiva ei ole välttämättä täysin identtinen nykyisten merikarttojen rantaviivan kanssa, sillä uudet rantaviivat on luotu vuoden 2023 aikana laajamittaista rantaviivojen uudistamisprosessia varten. Tutkielman tuloksia verrataan siis rantaviivaan, mikä on tulevaisuudessa merikartoilla.

Vedenkorkeusaineistoa hyödynnettiin satelliittikuvan valinnassa, ja aineisto ladattiin Ilmatieteen laitokselta, Föglön havaintoasemalta. Asema sijaitsee noin 50 kilometrin päässä tutkimusalueelta Ahvenanmaan saaristossa (kuva 1). Ilmatieteen laitoksen säähavainnot ovat avointa dataa ja ladattavissa ilmaiseksi viraston sivuilta. Ladattu aineisto sisälsi vedenkorkeustiedot jokaisen päivän jokaiselta tasatunnilta, ja aikaväliksi asetettiin vuosien 2018–2022 kesäkuukaudet, eli huhtikuusta elokuuhun.

4.2 Sentinel-2

Sentinel-kuvien tarkastelu ja lataus tehtiin tässä tutkielmassa Copernicus Open Access Hubissa. On kuitenkin hyvä huomioida, että kyseinen sivusto korvattiin vuoden 2023 lopussa, ja jatkossa Sentinel-aineisto on saatavilla Copernicus Data Space Ecosystem -sivustolta. Tutkielmassa hyödynnettävän satelliittikuvan valintaprosessi alkoi kuvausajankohdan valinnalla (kuva 3). Vaihtoehtoina tarkasteltiin kuvia, jotka oli otettu vuosien 2018–2022 kesäkuukausina, huhtikuusta elokuuhun. Kuukaudet rajattiin sen vuoksi, että kesällä pilvisyyttä on vähemmän kuin muina vuodenaikoina, ja talvella puolestaan mahdollinen jääpeite voi haitata kartoittamista. Kuvausajankohdan rajaamisen jälkeen satelliittikuvat rajattiin vain pilvettämiin kuviin.

Kuvan valinnassa piti ottaa huomioon myös vedenkorkeus, sillä se vaikuttaa rantaviivan sijaintiin. Tarkoituksena oli löytää pilvetön satelliittikuva ajankohdalta, jolloin vedenkorkeus teoreettiseen keskiveteen nähden olisi nolla. Tällaista ei kuitenkaan löytynyt vuosien 2018–2022 kesäkuukausilta, joten vedenkorkeuden skaala laajennettiin välille -10 ja 10 millimetriä. Havaintoaseman mittaustuloksista suodatettiin pois kaikki ajankohdat, kun satelliittikuvissa oli pilviä, sekä ajankohdat, jolloin vedenkorkeus oli alle -10 tai yli 10 millimetriä. Vedenkorkeuden osalta sopivia ajankohtia vertailtiin satelliittikuvan kuvausajankohtaan, mikä oli noin kello yhdeltä päivällä. Lopulta potentiaalisia kuvia jäi kolme kappaletta, ja kuvaksi valikoitui 23.4.2020 otettu Sentinel-2B-kuva. Lopulliseen valintaan vaikutti kuvan selkeys, eli missä saaret ja luodot näkyivät hyvin ilman sääolosuhteiden aiheuttamia häiriöitä, kuten aallokkoa.



Kuva 3. Vuokaavio satelliittikuvan valintaprosessista.

Tutkimusalue sijaitsee kokonaisuudessaan yhden Sentinel-2 ruudun alueella, joten useamman satelliittikuvan yhdistäminen mosaiikiksi ei ollut tässä työssä tarpeellista. Aineiston metatiedot ovat seuraavanlaiset:

- Kuvatunnus:
S2B_MSIL2A_20200423T100549_N0214_R022_T34VEM_20200423T144611
- Kuvasajankohta: 23.4.2020 kello 10.05.49.042 UTC+0
- Instrumentti: Multispectral instrument (MSI)
- Satelliitin nimi: Sentinel-2
- Satelliitin numero: B

4.3 Ilmakuvat

Tutkielman toisena aineistona hyödynnettiin MML:n kuvaamia ilmakuvia tutkimusalueelta. Kuvat ovat avoimesti saatavilla ja ne ladattiin MML:n Avoimien aineistojen tiedostopalvelusta. On hyvä kuitenkin huomioida, että kyseinen palvelu suljettiin vuoden 2023 keväällä, ja kuvien lataustoiminto siirtyi MML:n Karttapaikka-palveluun. Tutkielmassa käytettävien ilmakuvien metatiedot ovat seuraavanlaiset:

- Karttalehtitunnukset: K3241C ja K3232D
- Koordinaatisto: etrs-tm35fin
- Tiedostomuoto: JPEG2000
- Kuvausvuosi: 2022
- Ortokuvatunnukset: orto/etrs-tm35fin/mara_v_25000_50/2022/K32/10m/1/K3241C ja orto/etrs-tm35fin/mara_v_25000_50/2022/K32/10m/1/K3232D
- Tiedostoversio: 1
- Ortokorjaukseen käytetty korkeusmalli: 10 metriä
- Pikselikoko: 0,5 metriä
- Kanavat: punainen, vihreä, sininen ja lähi-infrapuna

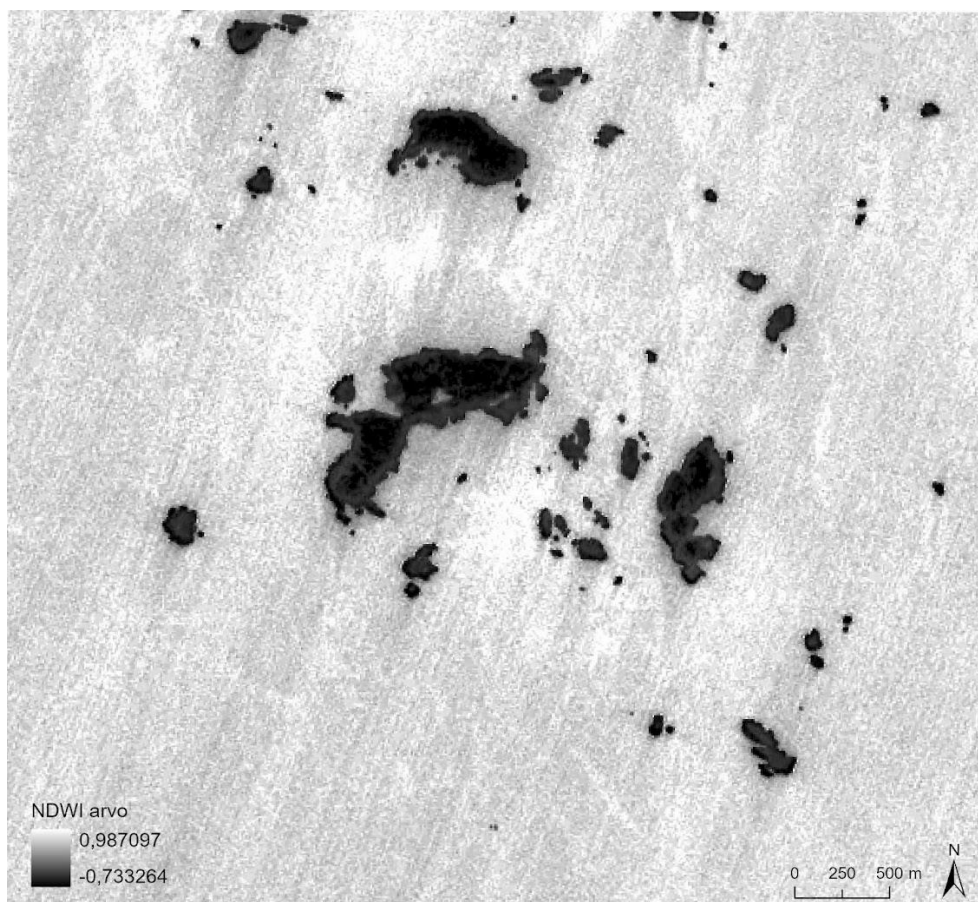
4.4 Kuvaluokittelu ja rantaviivan luominen

Tutkielmassa pikselien luokittelumenetelminä käytettiin aikaisemmissa tutkimuksissa onnistuneeksi todettua normalisoitua vesi-indeksiä (NDWI) satelliittikuvan luokittelussa, sekä ohjattua luokittelua RF-algoritmillä ilmakuvan luokittelussa. Ohjattuun luokitteluun tarvittavat tukialueet kerättiin QGIS-ohjelmistolla (versio 3.28.0), satelliittikuvan luokittelu tehtiin ArcGIS Pro –ohjelmistolla (versio 3.2.0), ja ilmakuvan luokittelu SNAP-ohjelmistolla (versio 9.0.0). Rantaviivan luonti rasteritasoista tehtiin ArcGIS Pro –ohjelmistoilla.

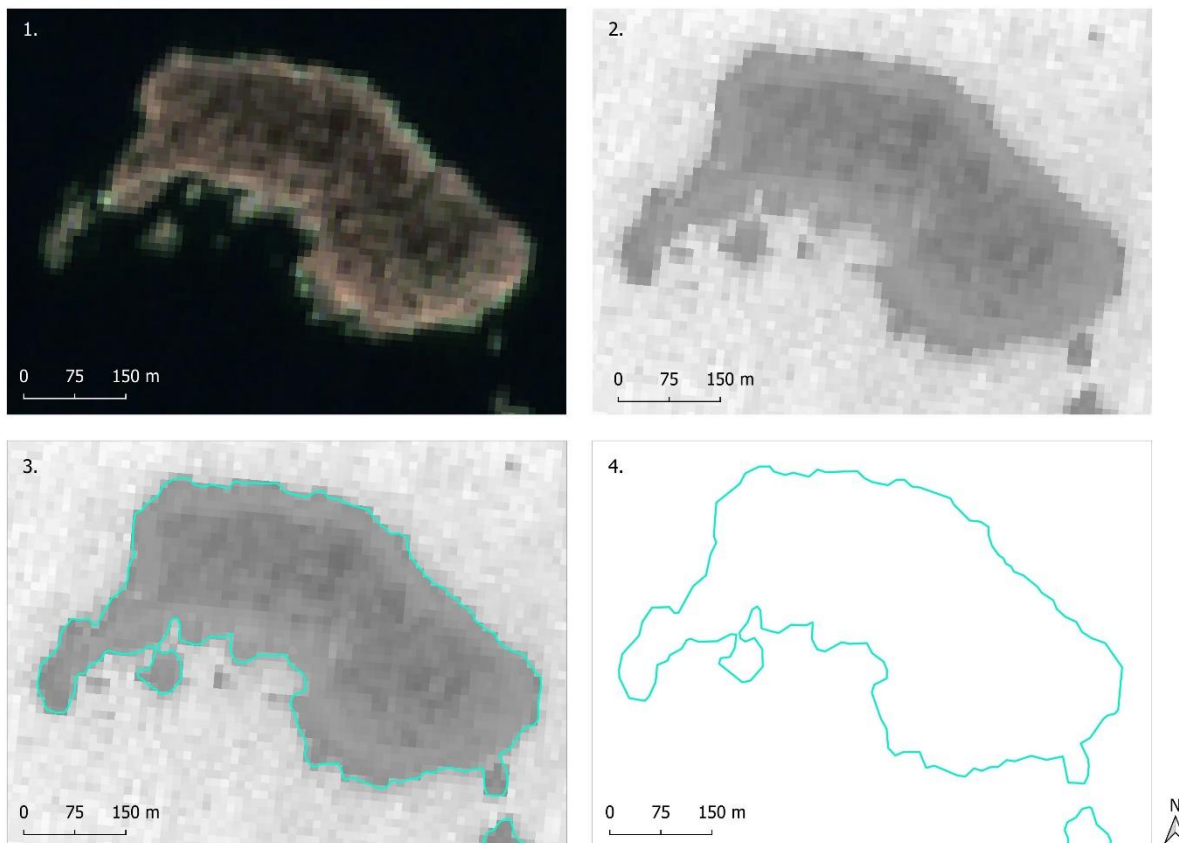
Satelliittikuvan luokittelu alkoi valitun satelliittikuvien lataamisella ja rajaamisella tutkimusalueen mukaan, jotta kuvan käsittely on helpompaa ja tehokkaampaa. Satelliittikuva avattiin ArcGIS Pro -ohjelmistossa, ja aineistolle laskettiin NDWI Raster Calculator -työkalulla seuraavalla kaavalla:

$$(B03 - B08) \div (B03 + B08)$$

NDWI:n tuloksena oli rasteritiedosto, jossa pikselit saivat arvon välillä -0,73–0,98 (kuva 4). Rantaviiva luotiin raja-arvon 0 perusteella korkeuskäyrien määrittämiseen tarkoitetulla spatiaalisen analyysin Contour-työkalulla, jossa syötetasona oli NDWI-taso ja Base Contour -arvona 0. Menetelmä soveltuu korkeuskäyrien määrittämisen lisäksi hyvin muihinkin tarkoituksiin, joissa jatkuvan muuttujan rasteriaineistosta lasketaan samanarvonkäyrä. Jotta rantaviiva on visuaalisesti toimivampi sekä merikarttoihin sopivaa, tehtiin siitä yksinkertaisempi versio (kuva 5). Tähän käytettiin Simplify Line -työkalua, jossa yksinkertaistusalgoritmiksi valittiin Douglas-Peucker ja yksinkertaistusarvoksi 2 metriä, sillä tämä menetelmä on sama kuin merikarttojen rantaviivoilla.



Kuva 4. Sentinel-2-kuvasta laskettu NDWI tutkimusalueelta.



Kuva 5. Esimerkki satelliittikuvan ja NDWI:n pohjalta tehdyn rantaviivan työvaiheista ja yksinkertaistamisesta Sundskärin saarella. Ensimmäinen vaihe kuvastaa alkuperäistä satelliittikuvaa, toinen vaihe laskettua NDWI:tä, kolmas raja-arvolla 0 määritellyä rantaviivaa, ja neljäs lopullista yksinkertaistettua rantaviivaa.

Ilmakuvasta tehty luokittelu alkoi ilmakuvien latauksella sekä yhdistämisellä, sillä tutkimusalueen kattamiseksi tarvittiin kaksi ilmakuvaa. Yhdistäminen tehtiin QGIS-ohjelmistossa GDAL Yhdistä-rasterityökalulla, ja tämän jälkeen kuva rajattiin vielä tutkimusalueen rajauksen mukaan. Tutkielmassa käytettiin ilmakuvan punaista, sinistä ja vihreää kanavaa. Tämän jälkeen kerättiin tukialueet, joita oli yhteensä 159 kappaletta. Näistä 83 oli maa-alueelta ja 76 vesialueelta. Tämän jälkeen tukialueet sekä yhdistetty ja rajattu ilmakuva avattiin SNAP-ohjelmistossa luokittelua varten. Lopuksi tehtiin ohjattu luokittelu Random Forest Classifier –työkalulla, jossa testiotoksien (number of training samples) määrä jätettiin suositelluksi 5000 ja päätospuiden (number of decision trees) määräksi asetettiin 100. Päätospuiden määrällä pystyy vaikuttamaan luokittelun tuloksiin, ja sopivaa määrää voi testilla. Tässä tutkielmassa ei koettu tarvetta nostaa puiden määrää suuremmaksi.

Ohjatun luokittelun tulos on rasteritiedosto, jossa pikselit ovat luokiteltuna joko maa- tai vesialueeksi. Luokittelussa maa-alue saa arvon 0 ja vesi arvon 1. Ilmakuvan tarkan

spatiaalisen resoluution vuoksi merialueen aallokko näkyi kuvassa selkeästi, ja valkoiset aallonharjat luokittuivat pieniksi maa-alueiksi (kuva 6). Tämän vuoksi ennen rantaviivan luontia rasteri suodatettiin GDAL Seulo pienet alueet pois -rasterianalyysityökalulla, jossa syötetasoksi valittiin ohjatun luokittelun rasteritaso ja kynnyksarvoksi 30. Kynnyksarvo määriteltiin tässä työssä eri arvoja testaamalla, ja arvolla 30 sai paljon virheitä suodatettua niin, että alueet eivät muuttuneet liikaa. Rasterin suodattamisen jälkeen rantaviiva pystyttiin luomaan.



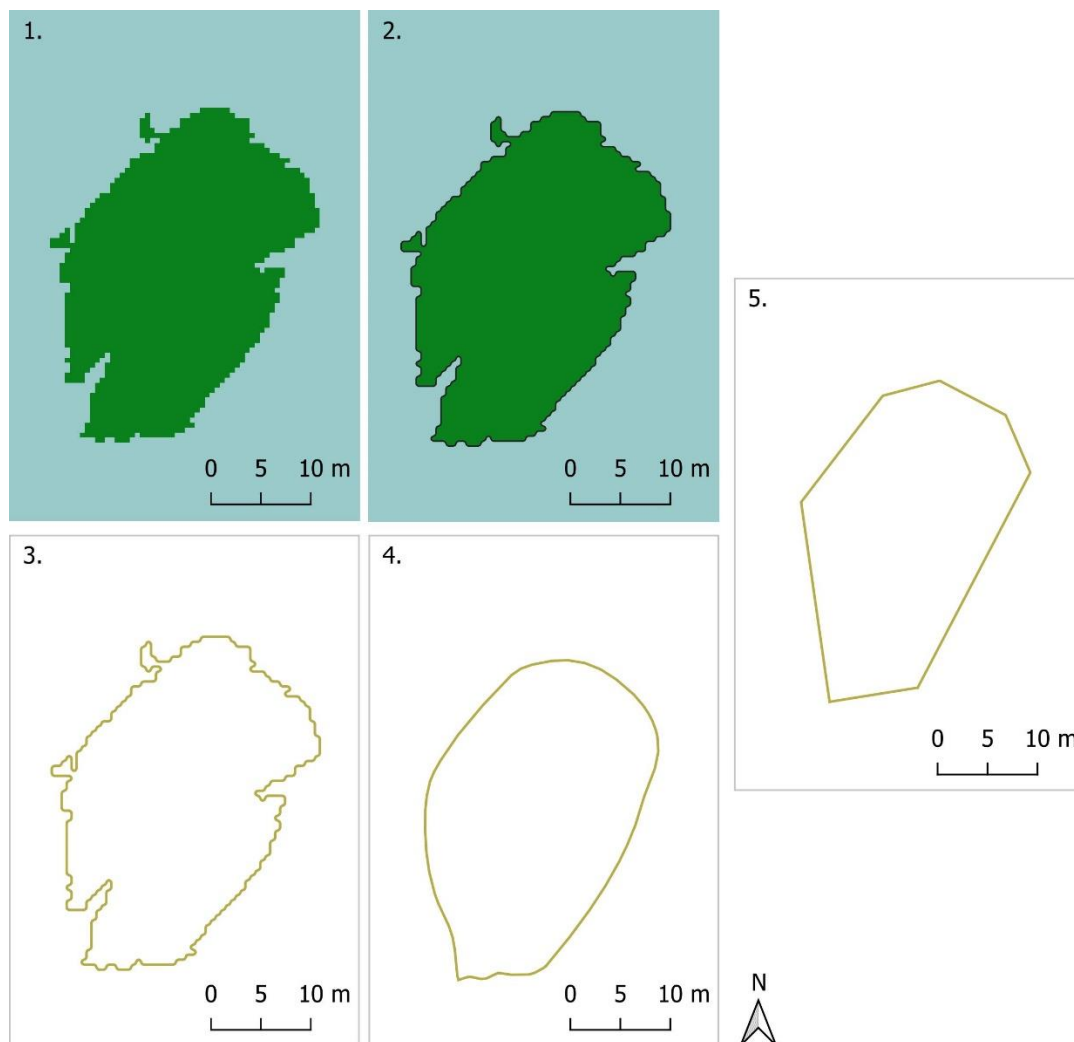
Kuva 6. Esimerkki aallokon aiheuttamista virheistä ilmakuvan luokittelussa.

Rasteritiedoston muuttaminen viivaksi tehtiin kokonaisuudessaan ArcGIS Pro -ohjelmistolla. Alkuun rasteritaso muutettiin polygoniksi spatiaalisen analyysin Contour-työkalulla, jossa määriteltiin Contour Interval -arvoksi 0,5 ja valittiin Contour-tyypiksi Contour Polygon. Tuloksen polygonitiedosto muutettiin vielä viivaksi Polygon To Line -tiedonhallintatyökalulla. Ilmakuvan spatiaalisen resoluution vuoksi viivatiedosto oli hyvin yksityiskohtainen, joten ennen yksinkertaistamista viivaa vielä tasoitettiin. Tasoitus tehtiin Smooth Line -kartografiatyökalulla, jossa valittiin PAEK (polynomial approximation with exponential kernel) -algoritmi 50 metrin yksinkertaistusarvolla (smoothing tolerance). Kyseinen algoritmi perustuu verteksien painotetun keskiarvon laskuun (How smooth line and smooth polygon work, s.a). Määritelty yksinkertaistusarvo vaikuttaa siihen, kuinka

yksinkertaistettu tuloksesta tulee. Mitä suurempi arvo, sitä yksinkertaisempi tulos.

Yksinkertaistusarvon valinta tehtiin kokeilemalla eri arvoja, kunnes tulos vaikutti sopivalta.

Tasoituksen jälkeen viivalle tehtiin yksinkertaistus samalla tavalla kuin satelliittikuvan rantaviivalle.



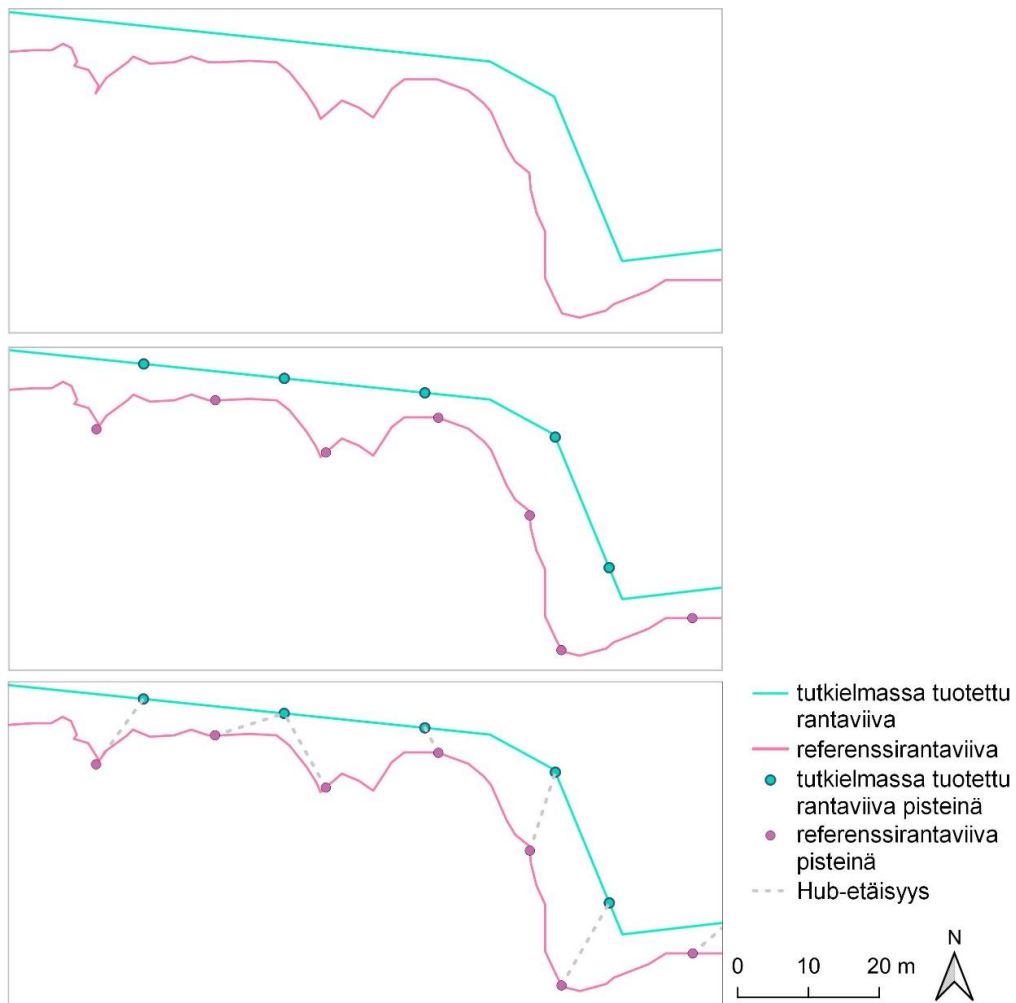
Kuva 7. Esimerkki rantaviivan työvaiheista ja yksinkertaistamisesta. Ensimmäinen vaihe kuvastaa ohjatun luokittelun tulosta suodatuksen jälkeen, toisessa vaiheessa rasteritaso on muutettu polygoniksi, kolmannessa polygoni on muutettu viivaksi, ja neljännessä viiva on tasoitettu 50 metrin arvolla. Viidennessä vaiheessa viiva on vielä yksinkertaistettu Douglas-Peucker -menetelmällä 2 metrin arvolla.

4.5 Referenssirantaviiva ja virhe-etäisyys

Tulosten vertailua ja validointia varten tarvittiin vielä erillinen rantaviiva kuvaamaan maan ja veden välisen rajan todellista sijaintia. Tutkielmassa referenssinä käytetään ilmakuvasta manuaalisesti digitoitua rantaviivaa, johon viitataan tekstissä termillä “referenssirantaviiva”. Vertailu referenssirantaviivaan kertoo tulosten sijaintivirheistä. Jos ero on lähellä nollaa, referenssirantaviiva ja tutkielmassa tuotettu rantaviiva ovat sijainniltaan lähellä toisiaan, eli

tuloksen rantaviiva on sijainniltaan oikeassa kohdassa. Jos erot taas ovat suuria, on tuloksessa sijaintivirheitä. Digitointi tehtiin QGIS-ohjelmistossa MML:n ilmakuvan pohjalta. Digitointi tehtiin mittakaavan 1:750–1:6000 skaalalla, riippuen rantaviivan selkeydestä. Digitointiin määriteltiin skaala, sillä lähennys ja loitonnuks vaikuttavat siihen, missä rantaviivan sijainnin tulkintaan. Manuaalisesti digitoidussa aineistossa on kuitenkin hyvä ottaa huomioon, että se ei kuvaa virheettömästi absoluuttista totuutta, sillä digitoinnin täytyy tehdä omia subjektiivisia kuvatulkinnoja. Kaikilla alueilla rantaviivan sijainnin määrittely ei ollut helppoa muun muassa aaltojen vuoksi.

Referenssirantaviivaa verrattiin tutkielmassa tuotettuihin rantaviivoihin sekä merikarttakäytössä olevaan MML:n rantaviivaan laskemalla etäisyydet näiden viivojen välillä. Tähän viivojen etäisyyteen referenssirantaviivaan viitataan tekstissä termillä “virhe-etäisyys”. Virhe-etäisyyden laskemista varten sekä referenssirantaviiva että vertailtavat rantaviivat muutettiin pisteiksi QGIS-ohjelmiston Points Along Geometry -vektorigeometriatyökalulla, jossa määriteltiin kahden pisteen väliseksi etäisyydeksi 20 metriä, eli pisteet sijaitsevat viivalla 20 metrin välein (kuva 8). Tämän jälkeen pistetasojen välinen etäisyys laskettiin Distance To Nearest Hub (line to hub) -vektorianalyysityökalulla (kuva 8). Työkalussa määriteltiin syötetasoksi referenssirantaviivan pistetaso, kohde-hub-tasoksi verrattavan rantaviivan pistetaso ja mittayksiköksi metrit. Tulokset tarkistettiin manuaalisesti, sillä muutamassa kohtaa työkalu laski etäisyyden virheellisesti eri luotojen välille. Tällaiset virhelaskut oli kuitenkin helppo huomata tuloksista, sillä näissä etäisyys oli yli 300 metriä. Virheitä ei ollut montaa, joten ne poistettiin manuaalisesti. Distance To Nearest Hub (line to hub) -työkalu luo uuden Hub-etäisyys-tason, jonka attribuuttitaulukossa on etäisyysarake. Tämä vietiin Exceliin, jossa luotiin etäisyyden vaihtelevuutta ja hajontaa havainnollistavat jana-laatikkokuvat (boxplot). Tämän lisäksi laskettiin molempien aineistojen virhe-etäisyyksien keskiarvo sekä eri virhe-etäisyysluokkien prosentuaaliset osuudet.



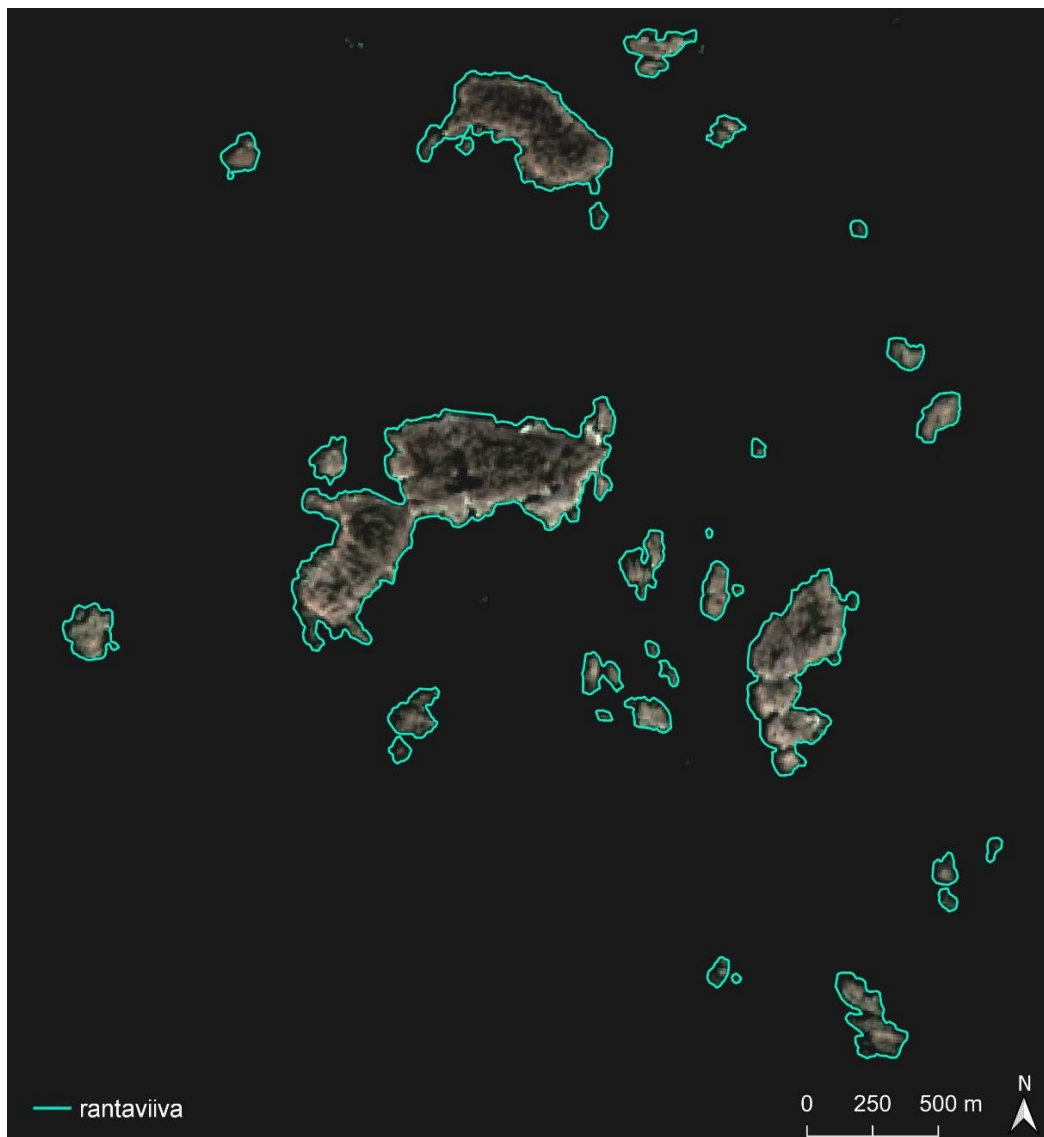
Kuva 8. Esimerkki virhe-etäisyyden laskemisesta.

5 Tulokset

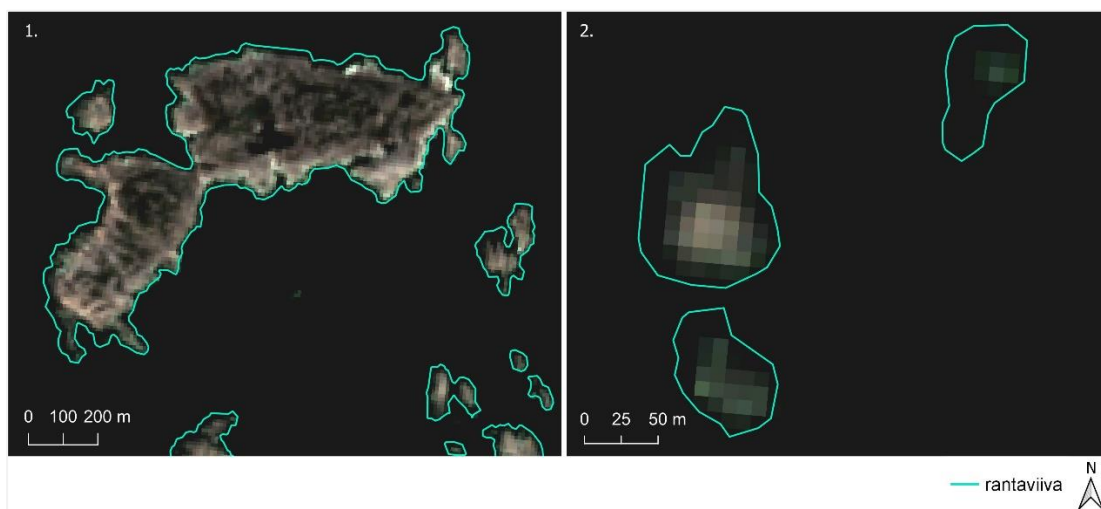
5.1 Rantaviiva satelliittikuvasta

Rantaviivan muodostaminen raja-arvomenetelmällä onnistui satelliittikuvasta, sillä rantaviiva on yhtenäinen ja yleisesti luotojen mukainen niin pinta-alaltaan suuremmilla, kun myös pienemmillä maa-alueilla (kuva 9, kuva 10). Rantaviiva on myös geometrialtaan eheä, eli viivat eivät risteä toisiaan ja alueissa ei ole aukkoja. Rantaviivan muodostaminen NDWI:n perusteella oli helppoa ja työmäärältään pientä.

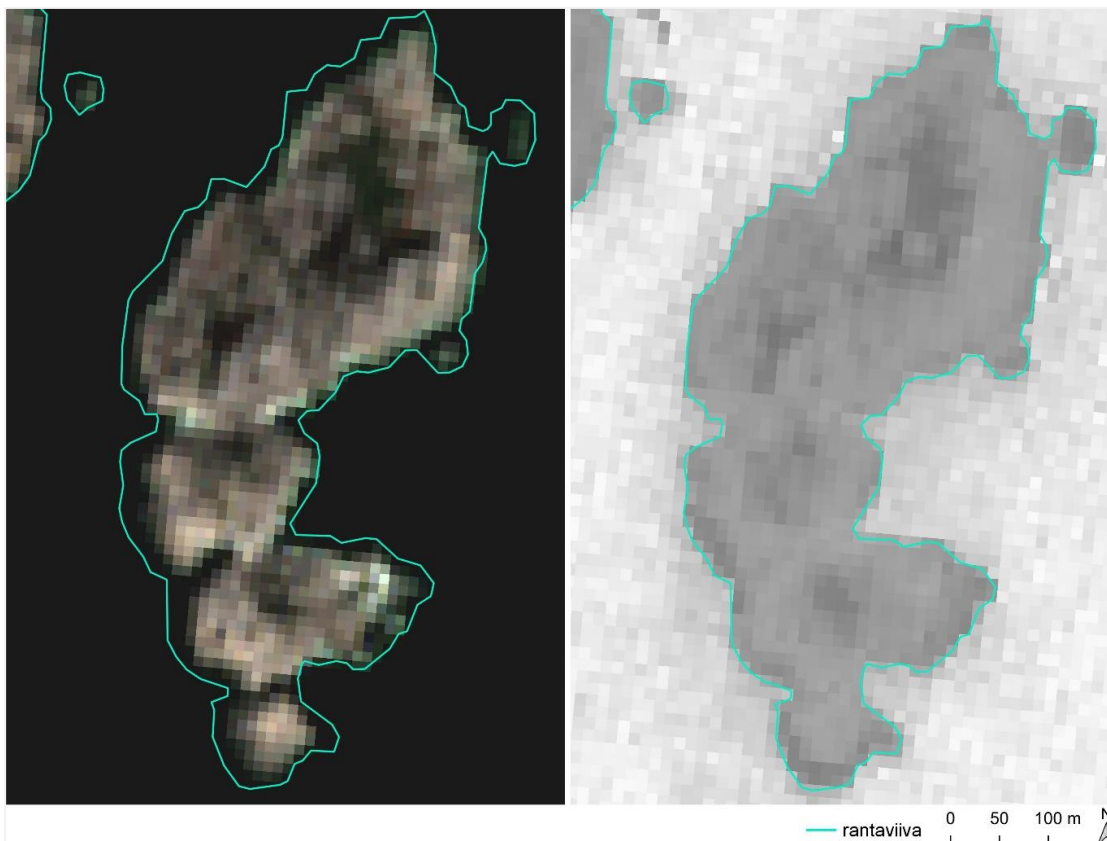
Tulokset eivät ole kuitenkaan virheettömät. Yleisimpiä virheitä luokittelussa kävi alueilla, joissa rantaviiva on rikkonainen. NDWI:n perusteella tuotettu rantaviiva esimerkiksi yksinkertaistaa Östra Mörskärin rannikon muotoa (kuva 11). Sijainniltaan hyvin lähekkäin olevat luodot, tai suuremman maa-alueen lähellä olevat pienet luodot ovat myös yhdistyneet NDWI:n myötä yhdeksi maa-alueeksi, ja näin ollen jakavat saman rantaviivan.



Kuva 9. Satelliittikuvasta tuotettu rantaviiva tutkimusalueella.



Kuva 10. Esimerkkejä onnistuneista rantaviivoista Sentinel-aineistosta. Vasemmanpuoleinen kuva (1) esittää pinta-alaltaan suuremman, Västra Mörskärin, rantaviivaa, ja oikeanpuoleinen kuva (2) tutkimusalueella olevien pienempien luotojen rantaviivaa.

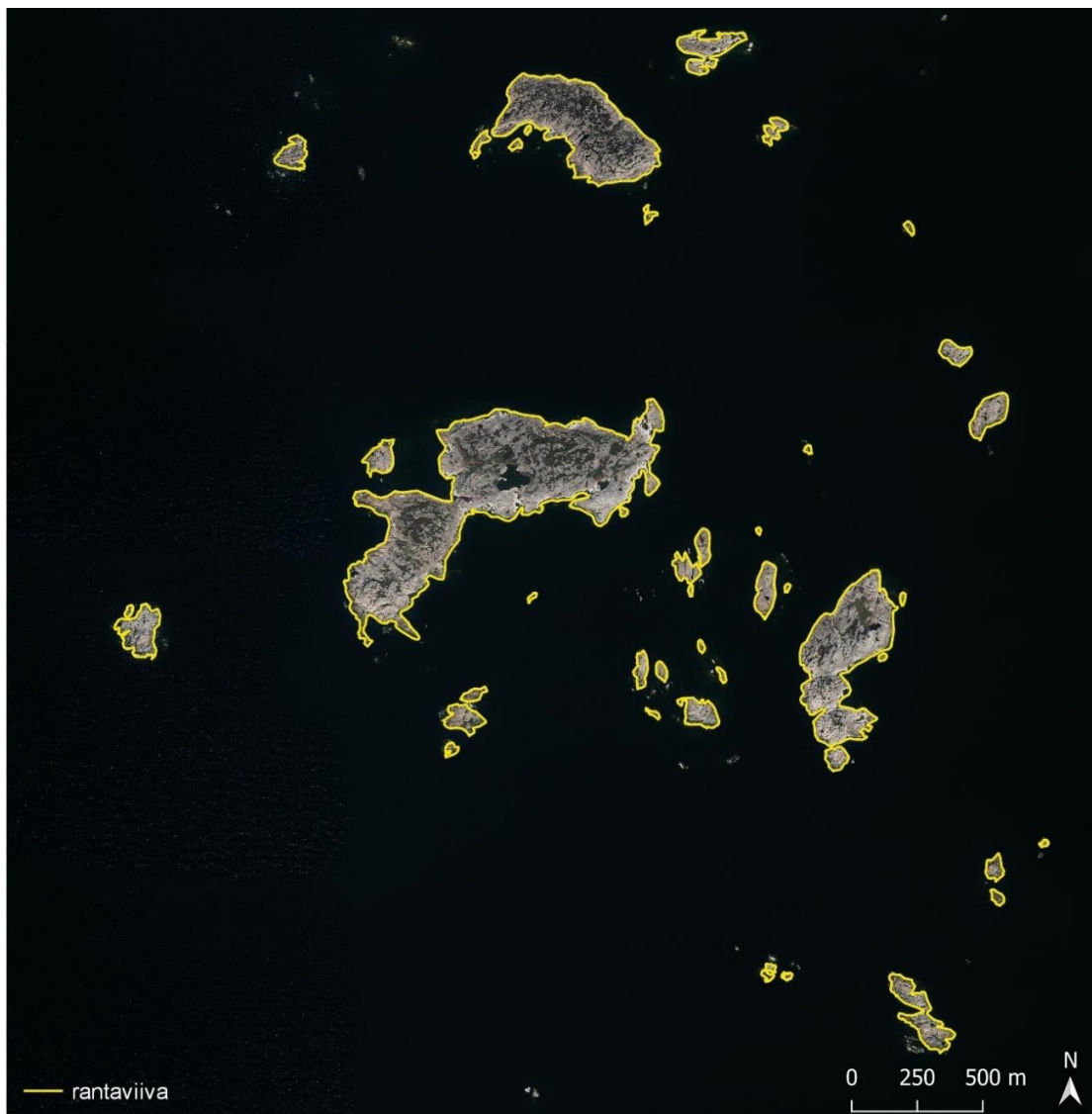


Kuva 11. Esimerkki satelliittikuvan luokittelun virheistä Östrå Mörskärin rantaviivassa. Vasemmanpuoleisessa kuvassa havaintona, kuinka yksityiskohtaisempi ranta luokituu väärin.

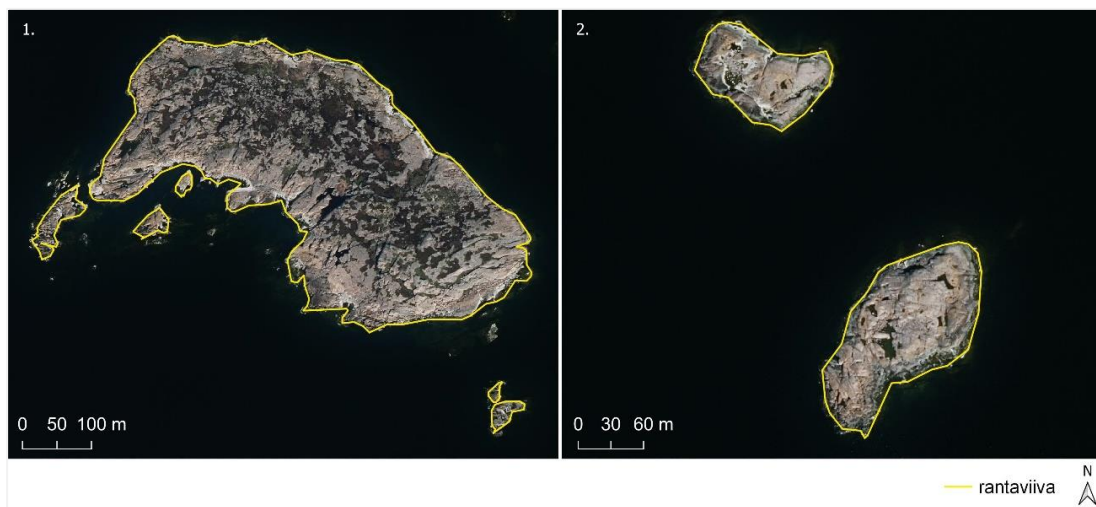
5.2 Rantaviiva ilmakuvaista

Ilmakuvan luokittelu on yleisesti tarkasteltuna onnistunut, sillä rantaviiva kattaa kaikki tutkimusalueen luodot ja on geometrialtaan eheää (kuva 12, kuva 13). Rantaviivan muodostamisessa oli enemmän työvaiheita kuin NDWI:n pohjalta rantaviivan muodostaminen, mikä johtuu tarkemmasta spatiaalisesta resoluutiosta.

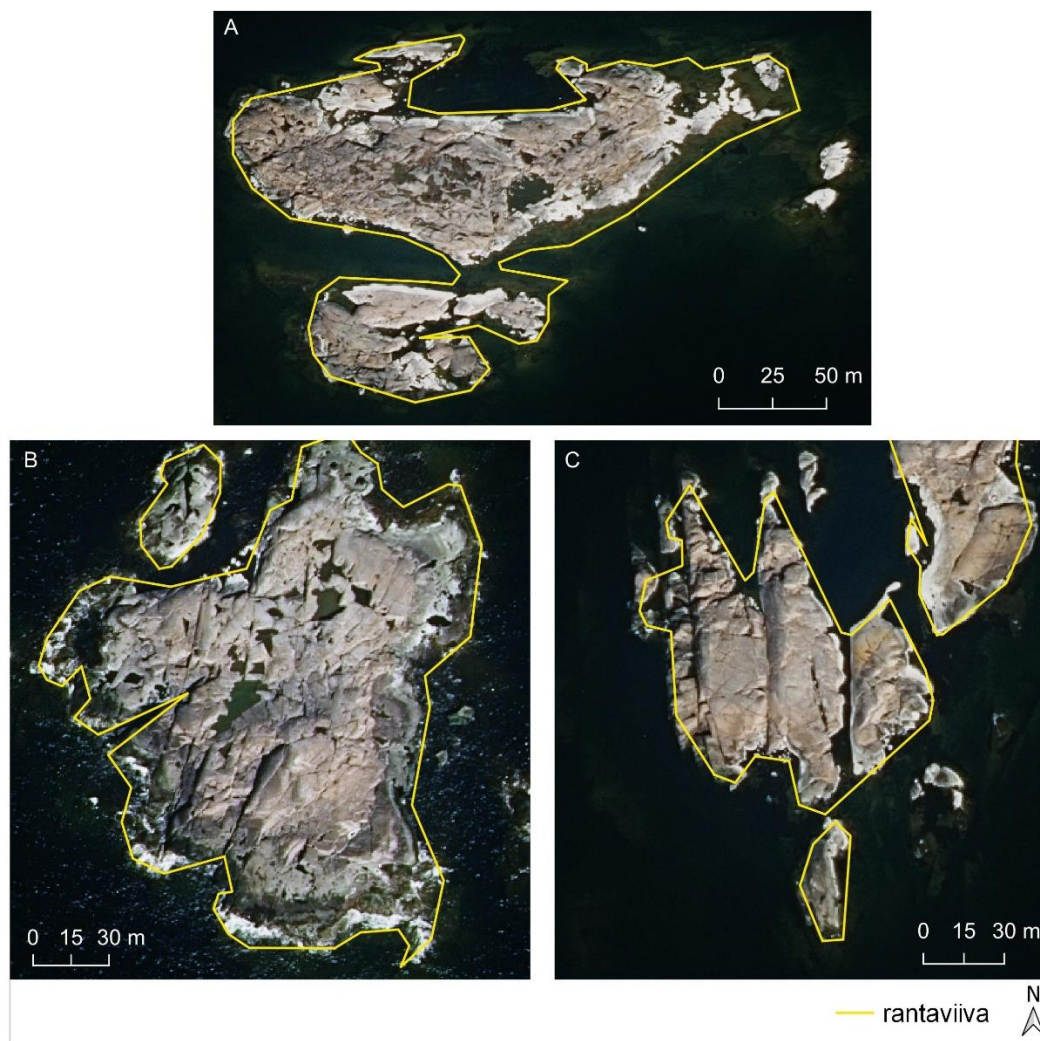
Tuloksissa on kuitenkin muutamia erilaisia virheitä, missä rantaviiva ei sijoitu maa- ja vesialueen rajalle. Suurin osa virheistä johtuu rantaan osuvista aalloista, sillä veden heijastusarvo on tällaisilla alueilla erilainen kuin muilla vesialueilla. Aallokon lisäksi virheitä oli myös matalien vesialueiden luokittelussa sekä hyvin rikkonaisen rantaviivan omaavilla luodoilla (kuva 14).



Kuva 12. Ilmakuvasta tuotettu rantaviiva tutkimusalueella.



Kuva 13. Esimerkkejä onnistuneista rantaviivoista ilmakuva-aineistosta. Vasen kuva (1) esittää pinta-alaltaan suuremman, Sundskär saaren, rantaviivaa, ja oikea kuva (2) tutkimusalueella olevien pienempien luotojen rantaviivaa.



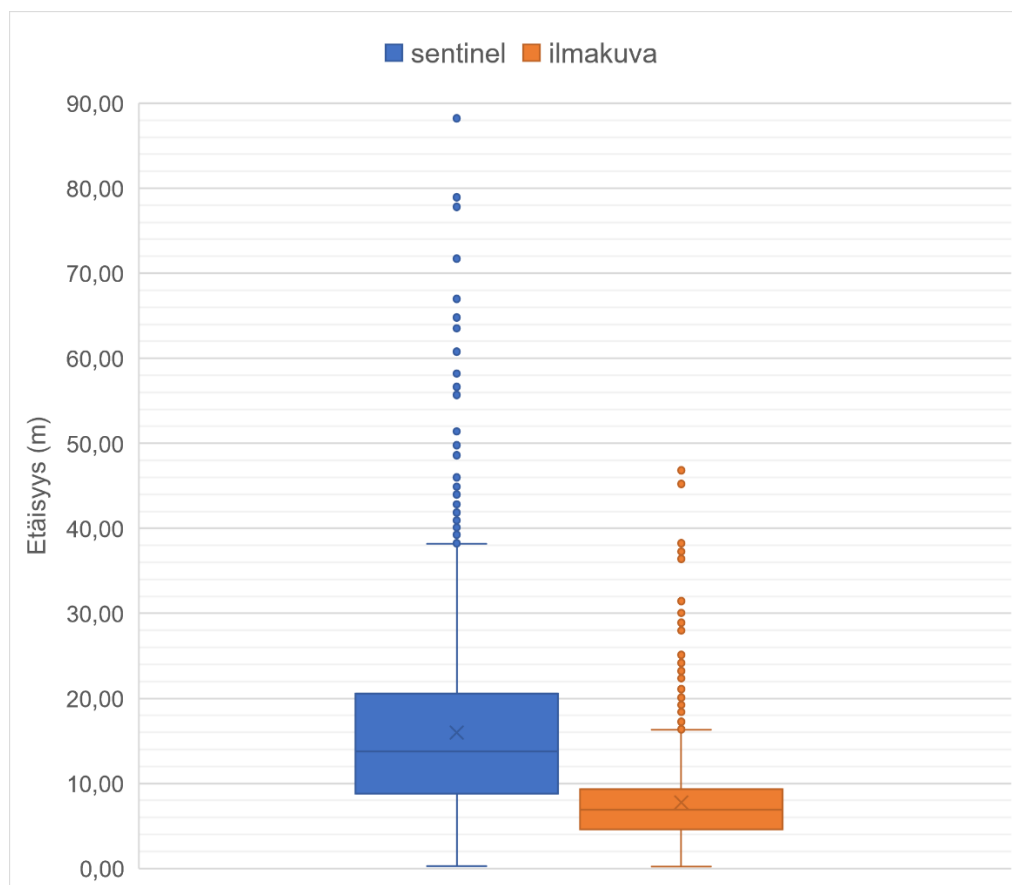
Kuva 14. Esimerkkejä ilmakuvasta tuotetun rantaviivan virheistä. Kuva A kuvaa matalikkojen aiheuttamia virheitä Norra Sundkläppin saarella, kuva B aallokon aiheuttamia virheitä Kankhäran saarella ja kuva C rikkonaisen rantaviivan virheitä.

5.3 Virhe-etäisyydet referenssirantaviivaan

Satelliittikuvasta tuotetun rantaviivan virhe-etäisyyden keskiarvo on 15,97 metriä ja mediaani 13,76 metriä, kun taas ilmakuvasta tuotetun rantaviivan virhe-etäisyyden keskiarvo on noin puolet pienempi, 7,76 metriä ja mediaani 6,92 metriä (taulukko 2). Satelliittikuvasta tuotetun rantaviivan vaihteluväli on ilmakuvaa suurempi, 0,25–88,23 metriä, jossa eniten arvoja on välillä 8,78–20,56 metriä (taulukko 2, kuva 15). Ilmakuvasta tuotetun rantaviivan vaihteluväli on puolestaan 0,19–46,84 metriä, ja eniten arvoja on välillä 4,61–9,30 metriä. Tuloksissa on myös jonkin verran poikkeavia arvoja, joista suurin on satelliittiaineiston tuloksissa 88,23 metriä ja ilmakuvan 46,84 metriä. Molemmissa tuloksissa pienin etäisyys referenssirantaviivaan on noin 20 senttiä.

Taulukko 2. Tulosten virhe-etäisyyksien tilastolliset tunnusluvut.

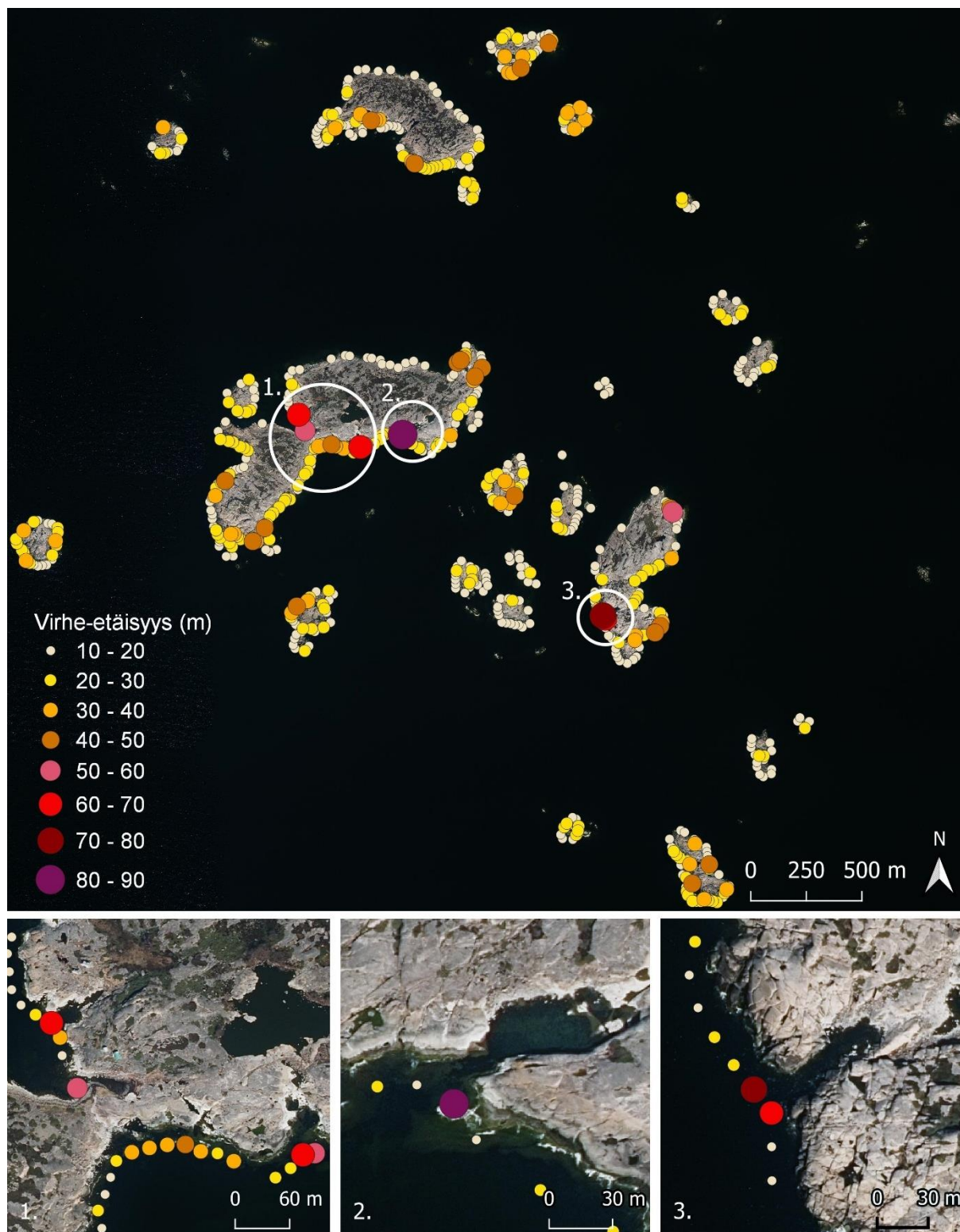
Aineisto	keskiarvo (m)	mediaani (m)	Vaihteluväli (m) ilman poikkeavia arvoja	Suurin poikkeava arvo (m)
Sentinel-2 (NDWI)	15,97	13,76	0,25–38,18	88,23
Ilmakuva (RF)	7,76	6,92	0,19–16,33	46,84



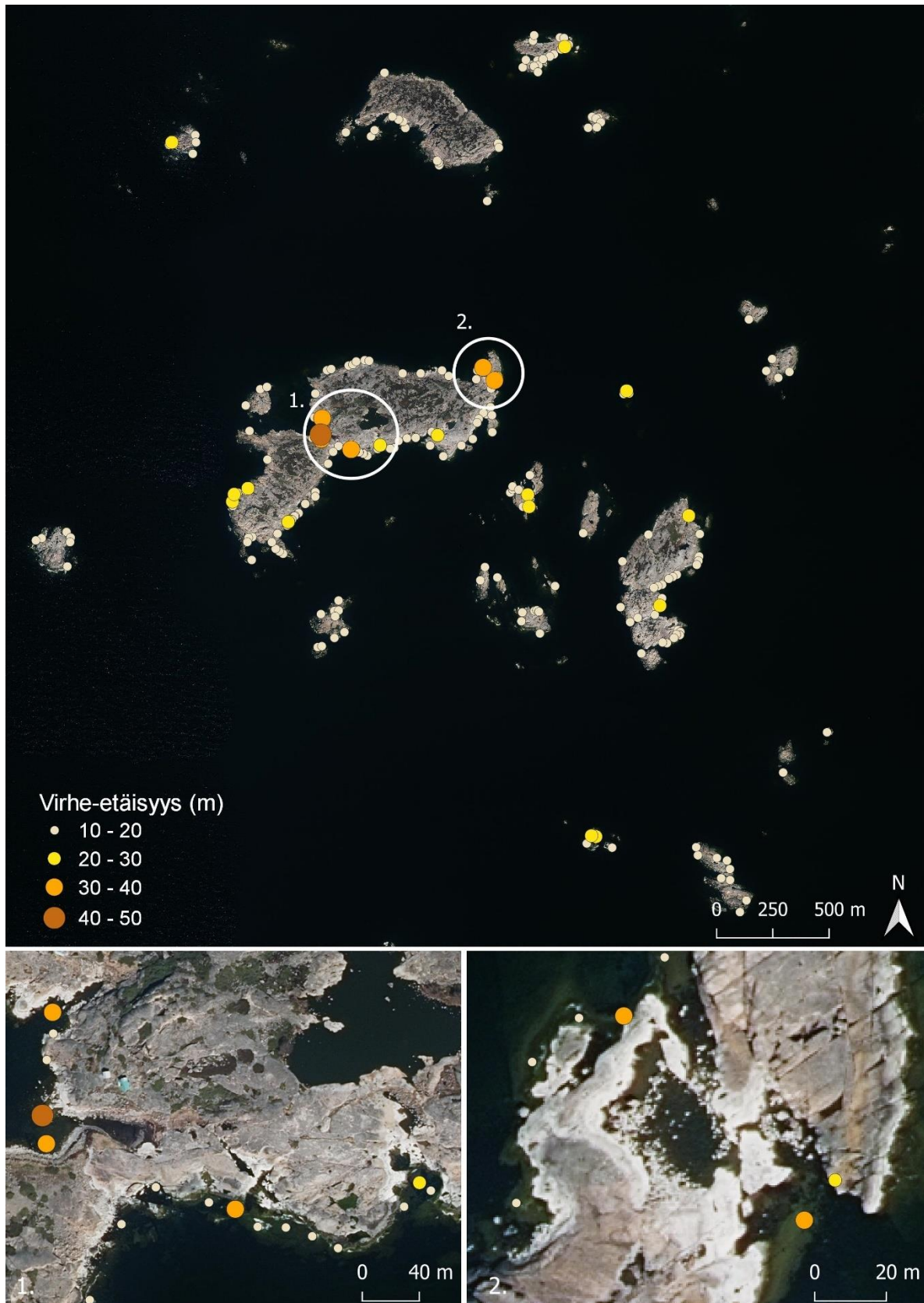
Kuva 15. Kaavio tutkielmassa tuotettujen rantaviivojen ja referenssirantaviivan välisistä etäisyyksistä. Laatikko esittää tulosten ala- ja yläneljänneksen, viiva mediaaniarvon ja janojen päät pienimmän ja suurimman arvon. Yksittäiset pisteet ovat poikkeavia arvoja.

Satelliittikuvasta tuotetun rantaviivan suurimmat virhe-etäisyydet sijaitsevat Västra ja Östra Mörskärin saarilla (kuva 16). Suuria, 40–50 metrin, virhe-etäisyyksiä on myös Sundskärin sekä Norra ja Södra Sundkläppenin saarilla tutkimusalueen pohjoisosassa. Virhe-etäisyyksiä on paljon joka puolella tutkimusaluetta, ja alueella on vain yksi pieni luoto, jossa virhe-etäisyys on koko luodolla alle 20 metriä. Tämä eroaa ilmakuvasta tuotetun rantaviivan tuloksista. Ilmakuvasta tuotetun rantaviivan tuloksissa on myös jonkin verran poikkeavia arvoja, joista suurimmat sijaitsevat Västra Mörskärin samalla alueella kuin satelliittikuvan

suuret virhe-etäisyydet (kuva 17). Tällä alueella rantaviiva on hyvin rikkonaista. Virhe-etäisyyksien alueellinen sijoittuminen on pääasiassa Västra ja Östra Mörskärin saarilla, mutta 10–20 metrin virhe-etäisyyksiä on myös joka puolella tutkimusaluetta. Lähes kaikilla alueilla, joissa ilmakuva tuotetun rantaviivan virhe-etäisyys on suuri, myös satelliittikuvasta tuotetun rantaviivan virhe-etäisyys on suuri. Virhe-etäisyydet ovat huomattavasti pienempiä ilmakuva tuotetulla rantaviivalla, mikä johtuu satelliittikuvan ja ilmakuvan spatiaalisen resoluution eroista. Koska referenssirantaviiva digitoitiin ilmakuva pohjalta, on ilmakuva tuotetun rantaviivan virhe-etäisyydet siihen pienemmät.

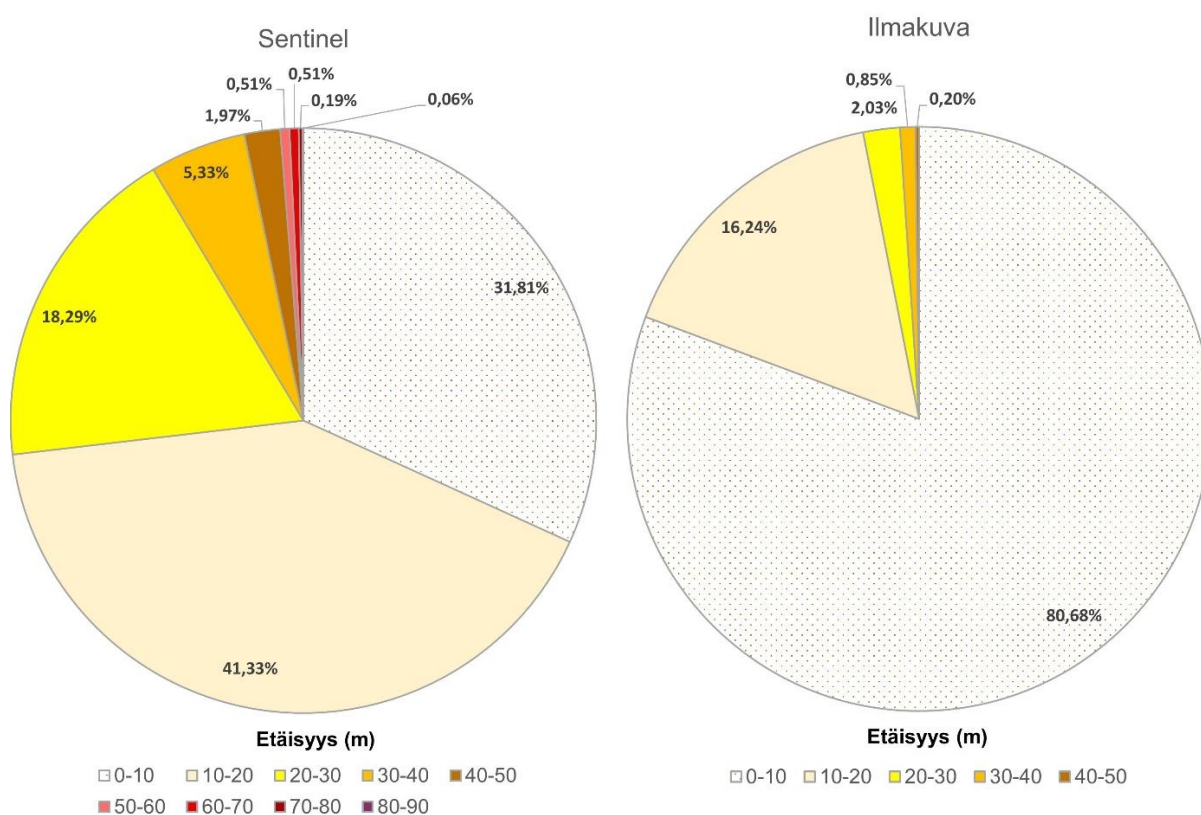


Kuva 16. Satelliittikuvan virhe-etäisyyksien alueellinen sijoittuminen. Suurimmat erot sijaitsevat ympyröidyillä alueilla Norra Sundkläppenin (1) sekä Västra ja Östra Mörskärin (2 ja 3) saarilla.



Kuva 17. Ilmakuvan tulosten virhe-etäisyyksien alueellinen sijoittuminen. Suurimmat virhe-etäisyydet sijaitsevat Västra Mörskärin alueella (1 ja 2).

Virhe-etäisyyksien eroja voi tarkastella myös luokkien prosentuaalisten osuuksien perusteella. Esimerkiksi satelliittikuvasta tuotetusta rantaviivasta noin 30 prosenttia on alle 10 metrin etäisyydellä referenssirantaviivasta, kun taas vastaava luku ilmakuvas-
 ta tuotetusta rantaviivasta on noin 80 prosenttia (kuva 18). Suurin osa satelliittikuvasta tuotetun rantaviivan virhe-etäisyyksistä on välillä 10–20 metriä, johon kuuluu 41,33 prosenttia virhe-etäisyyksistä. Toiseksi suurin luokka on 20–30 metriä 18,29 prosentilla, ja yli 30 metrin virhe-etäisyydet kattavat noin 8 prosenttia kaikista satelliittikuvan tulosten virhe-etäisyyksistä. Sen sijaan ilmakuvas-
 ta tuotetun rantaviivan tuloksista yli 20 metrin virhe-etäisyydet kattavat noin kolme prosenttia kaikista virhe-etäisyyksistä (kuva 18).

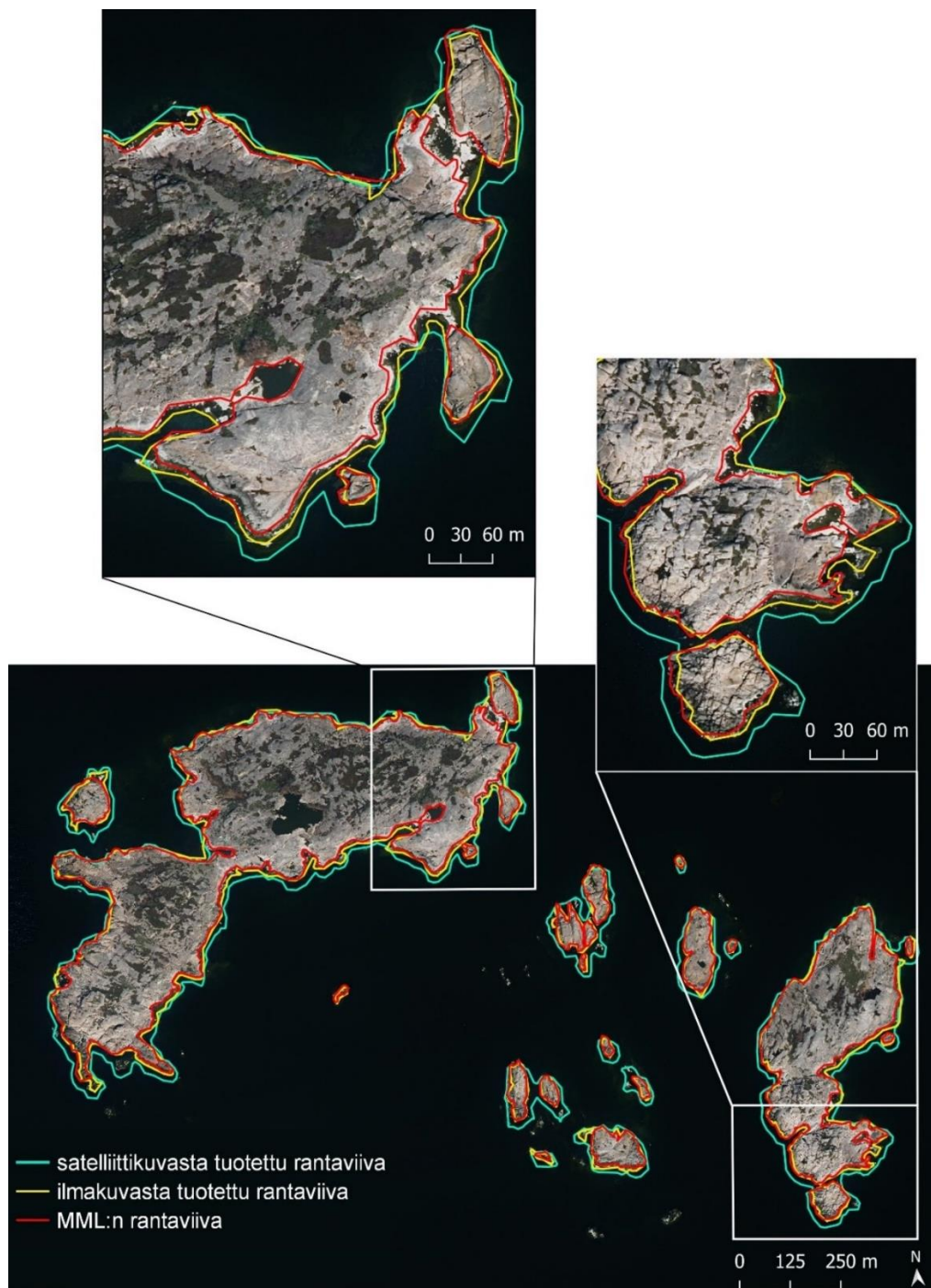


Kuva 18. Ympyrädiagrammit virhe-etäisyyksien prosentuaalisista osuuksista. Vasemmanpuoleinen diagrammi esittää satelliittikuvan virhe-etäisyyksien prosentiosuudet ja oikeanpuoleinen diagrammi ilmakuvan.

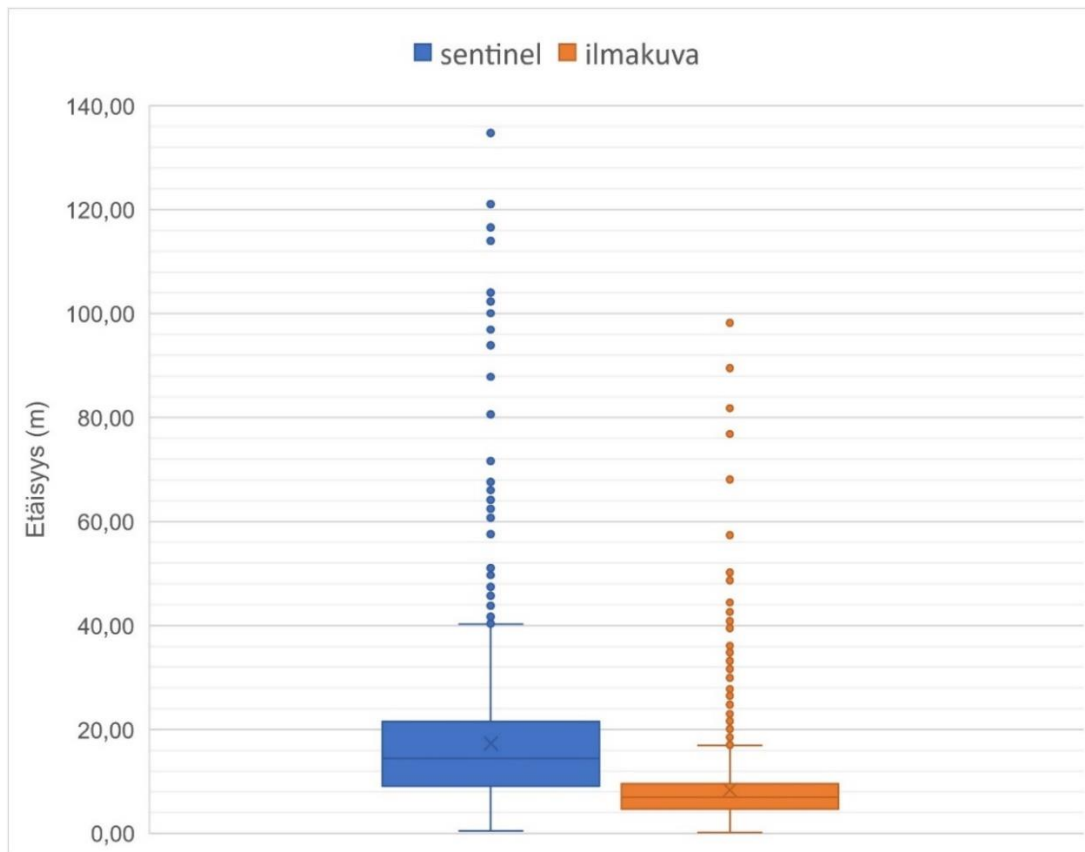
5.4 Etäisyys MML:n rantaviivaan

Tutkielman tuloksia vertailtiin merikartoilla käytettävään MML:n rantaviivaan. Vertailussa käy ilmi, että ilmakuvas-
 ta tuotetun rantaviivan ero MML:n rantaviivaan on pienempi, kuin satelliittikuvasta tuotetun rantaviivan (kuva 19, kuva 20). Etäisyyden keskiarvo on satelliittikuvasta tuotetulla rantaviivalla 17,31 metriä ja ilmakuvas-
 ta tuotetulla rantaviivalla

8,38 metriä. MML:n rantaviiva ja ilmakuvasta tuotettu rantaviiva ovat sijainniltaan lähellä toisiaan, suurimmat erot sijaitsevat Västra Mörskärin itäosassa (kuva 19). Tutkielmassa tuotettujen rantaviivojen etäisyydet MML:n rantaviivaan ovat pääasiassa noin 0–20 metriä, sillä satelliittikuvan vaihteluvälillä eniten arvoja on välillä 9,06–21,54 metriä ja ilmakuvalla välillä 4,71–9,59 metriä (kuva 20). Molemmissa on kuitenkin myös poikkeavia arvoja. Poikkeavat arvot ovat suurempia satelliittikuvasta tuotetussa rantaviivoissa, suurimman ollessa 134,75 metriä. Ilmakuvasta tuotetun rantaviivan vastaava luku on 98,23 metriä.

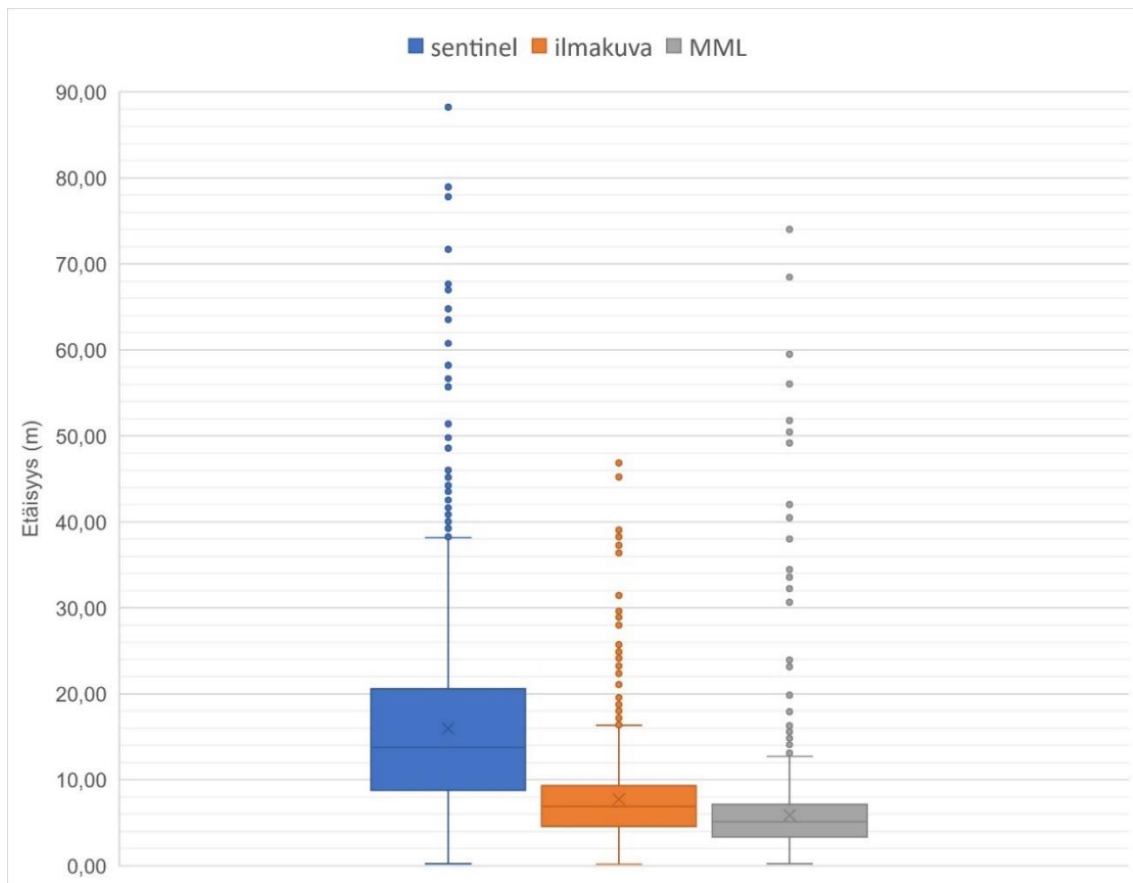


Kuva 19. Esimerkki MML:n rantaviivasta verrattuna tutkielman tuloksiin.



Kuva 20. Tutkielmassa tuotettujen rantaviivojen etäisyys MML:n rantaviivaan.

Tutkielmassa verrattiin vielä lopuksi MML:n rantaviivan etäisyyttä referenssirantaviivaan, mikä antaa lisätietoa MML:n rantaviivan sijaintitarkkuudesta. Tuloksista käy ilmi, että etäisyys referenssirantaviivaan on MML:n rantaviivalla pienempi, kuin tutkielmassa tuotetuilla rantaviivoilla (kuva 21). Suurin osa arvoista sijaitsee välillä 3,35–7,13 metriä, ja etäisyyden keskiarvo on 5,90 metriä ja mediaani 5,13 metriä (kuva 21). Poikkeavia arvoja on kuitenkin paljon, suurimman arvon ollessa noin 75 metriä. Suurin poikkeava arvo sijaitsee Västra Mörskärin itäosassa, samalla alueella kuin satelliittikuvan tulosten suurin virhe-etäisyys. Poikkeavia arvoja on enemmän kuin ilmakuvaista tuotetulla rantaviivalla, mutta suurin osa arvoista sijaitsee kuitenkin lähempänä referenssirantaviivaa. Esimerkiksi etäisyyden prosentiosuuksia laskiessa kävi ilmi, että alle kymmenen metrin etäisyydellä referenssirantaviivasta on 94,30 prosenttia MML:n rantaviivasta, mikä on melkein 15 prosenttia enemmän kuin ilmakuvaista tuotetulla rantaviivalla.



Kuva 21. Tutkielmassa tuotettujen rantaviivojen sekä MML:n rantaviivan virhe-etäisyys referenssirantaviivaan.

6 Keskustelu

6.1 Aineistojen keskinäinen vertailu

Molemmissa aineistoissa ja menetelmissä on sekä vahvuuksia että heikkouksia. Satelliittikuvan yksi hyödyistä on luokittelun yksinkertaisuus. NDWI:n laskeminen on valmiilla kaavalla helppoa, ja raja-arvon määrittely sen pohjalta toimivaa. Tuloksia ei tarvinnut korjata manuaalisesti, toisin kuin ilmakuvan tuloksia. Tulokset olivat siis käyttökelpoiset heti, mikä vaikutti muun muassa työnopeuteen. Costantino ym. (2020) raportoivat samanlaisista tuloksista tutkimuksessaan, jossa vertailtiin NDWI:n ja MNDWI:n tasojen hyödyntämistä rantaviivan automaattisessa kartoittamisessa. He mainitsivat menetelmän vahvuudeksi erityisesti työn nopeuden ja hyvän tarkkuuden.

Satelliittiaineiston toinen hyöty ilmakehuvaan verrattuna on mahdollisuus kartoittaa suuria alueita pienillä kustannuksilla (Bishop-Taylor ym. 2021; Angelini ym. 2023). Teoriassa NDWI:n laskeminen koko Suomen alueelle satelliittiaineiston pohjalta olisi mahdollista ilman suuria työmääriä. Suurien alueiden kartoituksen lisäksi satelliittikuvien hyöty ilmakehuviin verrattuna on se, että kartoittaja pystyy valitsemaan kuvausajankohdan ja näin mahdollisesti vaikuttaa tulosten laatuun. Esimerkiksi Tarmizi ym. (2014) valitsivat tutkimuksessaan satelliittikuvan ajankohtana, kun vuorovesi ei ollut korkeimmillaan rantaviivan sijaintitarkkuuden parantamisen vuoksi. Lyhytaikaisia vedenkorkeusvaihteluja, esimerkiksi vuoroveden tai aallokon vaikutuksia, on myös korjattu vedenkorkeusaineiston avulla laskemalla rantaviivalle mediaaniarvo (Sagar ym. 2017; Bishop-Taylor ym. 2021). Satelliittiaineiston avulla pystyy myös tutkimaan rantaviivan ajallista vaihtelua helposti, sillä aineiston temporaalinen resoluutio on hyvä. Yksi rantaviivan sijaintiin eniten vaikuttava tekijä on vuorovesi, ja sen huomioiminen onkin rantaviivatutkimuksissa todettu haastavaksi (Bishop-Taylor ym. 2021). Vaikka Suomessa vuorovesi ei vaikuta rantaviivan kartoittamiseen, on hyvä huomioida sen olevan kansainvälisissä tutkimuksissa yksi vaikuttavimmista tekijöistä.

Avoimesti saatavilla olevien satelliittiaineistojen yksi haasteista on rajoitettu spatiaalinen resoluutio (Bishop-Taylor ym. 2021). Ilmakuvien resoluutio on paljon korkeampi kuin Sentinel-kuvien, eli ilmakuvien luokittelun tuloksetkin ovat yksityiskohtaisempia. Esimerkiksi lahtien poukammat eivät välttämättä erotu satelliittikuvissa. Liu ym. (2022) hyödynsivät eri spatiaalisen resoluution, mukaan lukien Sentinel-2, satelliittikuvia

rantatyyppien luokittelussa, ja ehdottavatkin käyttämään harkintaa aineistoa valittaessa, jos tarkoituksena on saada yksityiskohtaisia tuloksia. Donchyts ym. (2016) kokeilivat tutkimuksessaan 30 metrin spatiaalisen resoluution Landsat-8 aineiston käyttöä vesimaskin luomisessa. Yksi suurimmista ongelmista oli pienempien vesialueiden, kuten jokien, havaitseminen. Samankaltaista ongelmaa havaittiin myös tutkielmassa rikkonaisen rannan kartoittamisessa. Saaristomerellä myös sisäsaariston kapeat salmet voisivat tuottaa haasteita kartoituksessa. Satelliittikuvan luokittelussa olevat virheet johtuvatkin pääsääntöisesti aineiston resoluutiosta, mutta myös NDWI:n luokittelun erheistä, kuten Östra Mörskärin rikkonaisen rannan yksinkertaistamisesta. Toisaalta merikartoituksen kannalta on hyvä pitää mielessä merikarttojen mittakaava. Pienimittakaavaisilla kartoilla, kuten yleiskartalla, ei ole tarvettakaan erittäin yksityiskohtaiselle aineistolle, sillä rantaviivojen pitää olla visuaalisesti yksinkertaisia. Koska tutkimusalue sijaitsee ulkosaaristossa, ei alueelta ole tarvetta luoda suurimittakaavaista merikarttaa. Sijaintierojen merkitys kasvaa kuitenkin elektronisilla ENC-kartoilla, joissa käyttäjä pystyy muuttamaan mittakaavaa.

Ilmakuvasta tuotettu rantaviiva on yksityiskohtaisempaa kuin satelliittikuvasta jo mainitun spatiaalisen resoluution eron vuoksi. RF-algoritmin käyttö oli tutkielmassa yksinkertaista, sillä algoritmin käytössä tarvitsee määritellä vain kaksi arvoa ja tuloksiin pystyy hieman vaikuttamaan päätöspuiden määrää muuttamalla. RF-algoritmia on hyödynnetty aikaisemmissa tutkimuksissa paljon, yhdeksi suurimmaksi syyksi on esitetty algoritmin yksinkertaisuus (Boateng 2020). Algoritmi oli toimiva pienellä tutkimusalueella, mutta Boatengin ym. (2020) tutkimuksessa mainitaan RF-algoritmin heikkoudeksi hitaus suurien aineistojen luokittelussa. RF-algoritmi ei siis välttämättä olisi paras luokittelukeino koko Suomen kokoisella alueella. RF-algoritmillla on myös todettu ylisovittamisen (overfit) haasteita (Boateng ym. 2020).

6.2 Rantaviivan kartoitustarkkuus

Ensimmäinen tutkimuskysymys oli, kuinka tarkasti rantaviivaa pystyy kartoittamaan eri spatiaalisen resoluution aineistoista. Virhe-etäisyyksiä tarkastellessa käy ilmi, että pienemmän spatiaalisen resoluution aineistolla tarkkuus on parempi, sillä noin 80 prosenttia virhe-etäisyyksistä on alle 10 metriä, kun vastaava luku satelliittikuvasta tuotetulla rantaviivalla on noin 30 prosenttia. Etäisyyksien hajonta on satelliittikuvan tuloksissa myös huomattavasti suurempaa kuin ilmakuvan tuloksissa, ja suurin virhe-etäisyys on lähes 90 metriä. Suuret virhe-etäisyydet ovat kuitenkin yksittäisiä virheitä, esimerkiksi yli 60 metrin virhe-etäisyydet

kattavat alle kaksi prosenttia satelliittikuvan tuloksista. Ilmakuvan tuloksissakin on virheluokitteluja, mutta ne sijaitsevat lähempänä referenssirantaviivaa, noin 97 prosenttia alle 20 metrin etäisyydellä. Virhe-etäisyyksien keskiarvot eroavat 12,17 metrillä. Pienellä mittakaavalla, esimerkiksi 1:50 000, tarkastellessa tutkielmassa tuotettujen rantaviivojen sijainnissa ei kuitenkaan näy suuria eroja. Tulosten keskinäinen vertailu on kuitenkin haastavaa, sillä sijainnissa on selkeää eroa pelkästään spatiaalisen resoluution erojen vuoksi.

Virhe-etäisyydet ovat tutkielmassa hieman suurempia verrattuna aikaisempiin tutkimuksiin. Angelini ym. (2023) testasivat tutkimuksessaan eri rantaviivakartoituksen menetelmiä, ja tulosten vertailu ja laadun arviointi toteutettiin virhe-etäisyyden laskemisella. Sentinel-2 kuvasta NDWI:n avulla tehty rantaviiva sijaitsi keskimäärin 6,97 metrin etäisyydellä referenssirantaviivasta, maksimietäisyyden ollessa 20,59 metriä (Angelini ym. 2023). RF-algoritmillä toteutetut luokittelujen virhe-etäisyyden keskiarvot olivat 9,00 ja 4,95 metriä, suurimpien arvojen ollessa 25,86 ja 20,32 metriä. Tutkimuksessa eri menetelmillä tuotettujen rantaviivojen välinen ero on pienempi kuin tässä tutkielmassa. Erot voivat johtua esimerkiksi kartoitettavan rantaviivan laadusta, sillä Angelinin ym. (2023) tutkimusalue oli suora hiekkaranta. Costantinon ym. (2020) tutkimuksessa NDWI:n avulla tuotetun rantaviivan virhe-etäisyyden keskiarvot olivat kolmella eri tutkimusalueella 4,52, -5,18 ja 8,66 metriä, suurimpien arvojen ollessa 20–24 metrin välillä. Tutkimusalueiden rantaviivoissa oli vaihtelua, ja virhe-etäisyys oli suurempi tutkimusalueilla, joissa rantaviiva oli monimutkaisempaa. On siis mahdollista, että tässä tutkielmassa tuotettujen rantaviivojen virhe-etäisyys on suurempi kuin aikaisemmissa tutkimuksissa tutkimusalueen rantaviivan rikkonaisuuden vuoksi.

6.3 Virhe-etäisyyksien vertailu

Toinen tutkimuskysymys oli, minkälaisilla alueilla satelliitti- ja ilmakuva tuotettujen rantaviivojen virhe-etäisyydet ovat suuria ja mistä nämä virheet johtuvat. Ilmakuvan luokitteluun vaikutti paljon aallokko. Rantaan iskeytyvät aallot näkyvät ilmakuvaissa valkoisina, jolloin niiden heijastuspinta on erilainen kuin muun vesialueen. Tämä vaikuttaa luokitteluun niin, että algoritmi tulkitsee aallon maa-alueeksi, mikä puolestaan vaikuttaa tulosten luotettavuuteen. Myös tutkimusalueen avoimella vesialueella aaltojen harjat luokittuivat virheellisesti pieniksi maa-alueiksi. Tutkielmassa lisättiin ilmakuvan tukialueiden määrää, mutta se ei poistanut aallokon aiheuttamia haasteita. Suuri osa virheistä suodatettiin automaattisesti pois, mutta osa täytyi korjata manuaalisesti, mikä puolestaan kasvatti

työmäärää. Tällaisia virheitä on kuitenkin aikaisemmissa tutkimuksissa korjattu lisäämällä alkuperäiseen luokitteluun uusi luokka haastaville kohteille. Vos ym. (2019) luokittelivat tutkimuksessaan erikseen “white-water” -luokan, joka kuvasi rantaan iskeytyviä aaltoja. Myös Minghelli ym. (2020) hyödynsivät tutkimuksessaan samaa tekniikkaa, ja luokittelivat rannan valkoiset aallot omana “foam” luokkana. Samassa tutkimuksessa luokiteltiin maa- ja vesialueet aluksi vain kahdella luokalla, ja tuloksissa aaltojen valkoiset alueet olivat luokituneet virheellisesti maa-alueiksi samankaltaisen spektraalisen heijastusarvon vuoksi (Minghelli ym. 2020). Kolmannen luokan käyttäminen voisi myös auttaa muiden haastavien alueiden, kuten matalikkojen oikein luokittelussa, sillä alueet voisi luokittelun jälkeen yhdistää vesialueeseen.

Aallokon vaikutus tuloksissa esiintyy tässä tutkielmassa vain ilmakuvasi tuloksissa. Tämä on kuitenkin riippuvainen käytetystä satelliittikuvasta, esimerkiksi Minghelli ym. (2020) mainitsevat maa-alueeseen osuvan aallon olevan ongelma korkean spatiaalisen resoluution (alle 20 metrin) satelliittikuvissa. Aaltojen vaikutusta ei pystytä poistamaan yksittäisistä kuvista, mutta teknologian kehitys mahdollistaa korkean resoluution videokuvauksen satelliiteilla (Vos ym. 2019). Tulevaisuudessa tällaista aineistoa voisi hyödyntää myös rantaviivan kartoittamiseen, sillä videosta saisi poimittua keskiarvoa esittäviä kuvia (time average) mutta haasteena voi olla aineiston saatavuus (Vos ym. 2019). Aallokon aiheuttamia haasteita voikin vähentää yhdistämällä useampia satelliittikuvia.

Aallokon lisäksi ilmakuvasi virheluokitteluja aiheutti matalat vesialueet. Samankaltaisia virheluokitteluja on havaittu myös aikaisemmissa rantaviivatutkimuksissa. Esimerkiksi Liu ym. (2022) mainitsevat tutkimuksessaan virheluokittelujen syyksi muun muassa vuoroveden, tuulen ja aaltojen vaikutukset. Myös matalien vesialueiden luokittelussa oli Liun ym. (2022) mukaan virheitä. Andres ja Byrnes (1991) ovat myös luokitelleet eri tekijöitä, jotka vaikuttavat rantaviivan sijaintiin ja näin vaikeuttavat kartoitusta. Näitä ovat aalto- ja virtausprosessit, vedenkorkeuden vaihtelut, sedimentti, rannikkogeologia ja -morfologia sekä ihmistoiminta. Tässä tutkielmassa matalat vesialueet eivät aiheuttaneet virheitä satelliittikuvasta tuotetussa rantaviivassa, sillä NDWI luokitteli matalikot onnistuneesti vesialueiksi.

Molemmissa aineistoissa oli myös haasteita hyvin rikkonaisen rannan luokittelussa, ja esimerkiksi luotojen väliset kapeat vesialueet esiintyivät molemmissa tuloksissa maa-alueina. Tulosten virhe-etäisyydet olivat myös suurimpia nimenomaan rikkonaisen rannan alueilla.

Rikkonainen rantaviiva aiheutti siis suurimmat virheluokittelut. Monet aikaisemmista rantaviivatutkimuksista kattavat suuremman tutkimusalueen, kuin tämä tutkielma, ja kartoitettava rantaviiva on myös yksinkertaisempaa. Näin ollen vertailu aikaisempiin tutkimuksiin on haastavaa, sillä tutkimusalueiden ominaisuuksissa on eroja. Kuitenkin tutkimus, jossa Leu (2017) kartoitti satelliittikuvista Taiwanin edustalla sijaitsevan Penghun saariston rantaviivaa ja saarien pinta-alaa, on joissakin määrin verrattavissa tämän tutkielman tuloksiin. Tutkimuksen tuloksissa huomaa olevan samankaltaisia haasteita rikkonaisen rannan kanssa, vaikka tulokset ovat suurimmaksi osin tarkempia.

6.4 Vertailu MML:n rantaviivaan

Viimeinen tutkimuskysymys liittyi tutkielman tulosten sekä referenssirantaviivan ja merikartoilla hyödynnettävän MML:n rantaviivan eroihin. Vertailusta käy ilmi muutamia asioita. Ilmakuvasta tuotettu rantaviiva ja MML:n rantaviiva ovat sijainniltaan lähellä toisiaan, ja erot johtuvat pääasiassa RF-algoritmin luokitteluvirheistä. Pieniä eroavaisuuksia johtuu myös viivan yksinkertaistamisesta. Satelliittikuvasta tuotetun rantaviivan ja MML:n rantaviivan välillä on suurempia eroja, suurimman virhe-etäisyyden ollessa lähes 140 metriä. Tämä ero johtuu jälleen aineistojen välisestä spatiaalisen resoluution erosta.

Referenssirantaviivan ja MML:n rantaviivan välinen virhe-etäisyys on pieni. MML:n rantaviivat ovat käyttökelpoisia merikartoitukseen, mutta on hyvä huomioida, että sekään ei ole täysin virheetöntä dataa. MML:n rantaviivan suurin poikkeava arvo on melkein 75 metriä, kun taas ilmakuvasta tuotetun rantaviivan suurin poikkeava arvo on noin 47 metriä. Yli 30 metrin virhe-etäisyyksiä on MML:n rantaviivasta kuitenkin vain noin 1,5 prosenttia, mikä viittaisi aineistossa olevan vain yksittäisiä sijaintivirheitä. MML:n rantaviiva on myös yksityiskohtaisempaa, kuin tutkielmassa tuotetut rantaviivat. Esimerkiksi lahden poukamat ja rikkonaiset rantaviivat erottuvat hyvin MML aineistossa, ja aallokon haasteet eivät tule ilmi MML:n rantaviivassa. On kuitenkin mahdollista, että aallokon aiheuttamat virheet on korjattu MML:n puolesta aineiston prosessointivaiheessa, jos virheitä on ollut.

Vertailu referenssirantaviivaan tuo siis ilmi MML:n rantaviivan sijaintivirheitä. Ilmakuvasta tuotettua rantaviivaa voisi hyödyntää näiden virheiden paikantamiseen ja korjaamiseen, mutta menetelmä vaatisi jonkin verran jatkotutkimusta ja automatisointia työmäärän vuoksi. MML:n rantaviivat ovat kuitenkin tarkempia kuin tutkielmassa tuotetut rantaviivat, mutta virheiden löytäminen olisi tarpeellista merikartoituskäytössä. On kuitenkin hyvä huomioida, että merikartoilla käytettäviä rantaviivoja muokataan hieman, eli ne eivät ole täysin samanlaisia

kuin alkuperäiset MML:n maastotietokannan rantaviivat. Merikartoilla käytettävistä rantaviivoista vähennetään muun muassa verteksejä ja rantaviivaa myös yksinkertaistetaan. On siis mahdollista, että tämä yksinkertaistaminen vaikuttaa virhe-etäisyyksiin, mutta asiaan ei tässä tutkielmassa perehdytty.

6.5 Merikarttakelpoisuus, epävarmuustekijät ja jatkokehitys

Tutkielman tulokset ovat teoriassa hyödynnettävissä merikartoituskäyttöön. Varsinkin NDWI tuo hyvin ilmi pieniäkin maa-alueita, huomiona kuitenkin aineiston resoluutio, ja menetelmää voisi mahdollisesti hyödyntää koko Suomenkin alueella muun muassa kartoista puuttuvien saarten ja luotojen paikantamiseen. Pienienkin maa-alueiden puuttuminen merikartoista olisi tärkeää korjata turvallisen merenkulun vuoksi. Satelliittikuvasta tuotettu rantaviiva on eheää dataa, jota voisi teoriassa hyödyntää yleiskarttatasolla painetuissa merikartoissa. Tulokset eivät kuitenkaan ole tarpeeksi yksityiskohtaisia suurempien mittakaavojen, esimerkiksi 1:10 000 kartoille ja näin ollen niiden käyttö elektronisilla ENC-kartoillakaan ei olisi järkevää. Alueilla, joissa rantaviiva ei ole yhtä pienipiirteistä kuin Saaristomerellä, voisi satelliittikuvan hyödyntämismahdollisuudet olla paremmat.

Ilmakuvasta tuotettua rantaviivaa voisi teoriassa hyödyntää merikartoituksessa, sillä tulokset ovat yksityiskohtaisempia kuin satelliittikuvan tulokset. Tulokset eivät myöskään eroa paljoa MML:n rantaviivoista, mitä käytetään suomalaisilla merikartoilla. Ilmakuvan luokittelussa on kuitenkin jonkin verran manuaalista korjaustyötä, joten sen mahdollinen hyödyntäminen merikartoilla veisi enemmän aikaa, kun esimerkiksi MML:n rantaviivojen, ellei korjaustyötä automatisoisi. Ilmakuvien luokittelu vaatisi myös jonkin verran jatkokehitystä, jotta virheluokittelut saisi korjattua.

Tutkielmaan liittyy muutamia epävarmuustekijöitä, jotka on hyvä ottaa huomioon. Ensinnäkin, varsinaiselta tutkimusalueella ei ole saatavilla tarkkaa vedenkorkeustietoa, sillä lähin mitta-asema sijaitsee noin 50 kilometrin päässä. Tutkielmassa käytetty tieto on kerätty Ahvenanmaalta, joten on mahdollista, että vedenkorkeus ei ole ollut sama tutkimusalueella, kun mittausalueella. Vedenkorkeus vaikuttaa rantaviivan sijaintiin, ja näin ollen ei ole varmuutta mikä vedenkorkeus on todellisuudessa tutkimusalueella ollut. Suomessa ei kuitenkaan ole esimerkiksi voimakasta vuorovesi-ilmiötä, mikä vaikuttaisi suuresti rantaviivan sijaintiin. Näin ollen vedenkorkeuden mittaustulokset Ahvenanmaalta ovat tässä tutkielmassa riittävät. Toiseksi, digitoidussa rantaviivassa aina mahdollisuus virheisiin, sillä se on manuaalisesti tehty ja riippuvainen käytettävästä aineistosta ja digitoijan kokemuksesta

(Apostolopoulos ja Nikolakopoulos 2021). Virheelliset kuvatulkinnat ovat siis mahdollisia, eli digitoinnissa on voinut käydä virheitä kohdissa, joissa rantaviivan sijainti ei ole selkeästi nähtävissä. Esimerkiksi aaltojen tyrskyt ja kivikkoiset alueet vaikeuttavat kuvatulkintaa. Digitoijan on täytynyt tehdä omia tulkintoja, jotka voivat erota toisen henkilön tekemistä tulkinnoista. On siis muistettava, että eroavaisuuksien tarkastelu on suuntaa antavaa, ei absoluuttinen totuus. Kolmanneksi, tutkielmassa on testattu vain yhden ohjatun luokittelun algoritmia rantaviivakartoituksessa. Tuloksissa saattaisi olla siis eroavaisuuksia, jos käytössä olisi toinen algoritmi tai RF-algoritmin asetuksia muuttaisi.

Tutkielmassa hyödynnettiin RF-algoritmia sen yksinkertaisuuden vuoksi, mutta jatkotutkimusta voisi tehdä esimerkiksi eri algoritmien vertailusta. Muun muassa support vector machine (SVM) algoritmia on hyödynnetty rantaviivan kartoittamisessa (Apostolopoulos & Nikolakopoulos 2021). Myös pilvipalveluiden ja -teknologian hyödyntäminen ja tutkiminen olisi todennäköisesti hyödyllistä. Tulevaisuudessa erilaisten tutkien, kuten SAR-tutkan hyödyntäminen kaukokartoituksessa yleistyvät, ja niiden hyödyntämistä rantaviivakartoituksessakin on jo tutkittu (Modava & Akbarizadeh 2016). SAR-kuvien tuloksissa on kuitenkin Modavan ja Akbarizadehin (2016) mukaan virheitä muun muassa tuulisilla ja aallokkoisilla merialueilla. Teknologian kehittyessä kaukokartoitusala kehittyi nopeasti, ja uusia menetelmiä ja aineistoja tulee käyttöön. Esimerkiksi Lv ym. (2023) testasivat tutkimuksessaan syväoppimisen käyttöä rantaviivan automaattisessa kartoittamisessa tarkkan resoluution kuvista. Tutkimuksen tarkoituksena on muun muassa vähentää rantaviivakartoitukseen liittyvää manuaalista työmäärää. Vaikka tulosten tarkkuudessa on vielä parannettavaa, on tutkimus hyvä esimerkki uusien menetelmien hyödyntämisestä kaukokartoitusala.

Tulevaisuudessa avoimen datan merkitys kasvaa, joten niiden hyödyntämismahdollisuuksia on arvokasta tutkia. Korkean resoluution satelliittikuvat ovat vielä tänä päivänä harvoin avointa dataa, mutta nykyään avoimena saatavien satelliittiaineistojen määrä on kasvanut (Manetu 2023). Kaukokartoitusalan tulevaisuuteen liittyy yhä isompien datasettien käsittely sekä pilvipalveluiden hyödyntäminen analysoinnissa (Amani ym. 2020; Sun ym. 2023). Pilvipalveluja pystyisi todennäköisesti hyödyntämään rantaviivakartoituksessakin, kun tarkoituksena on luoda rantaviivaa suurille alueille kerralla.

7 Yhteenveto

Tämän tutkielman tarkoitus oli testata kansainvälisissä rantaviivatutkimuksissa käytettyjä menetelmiä Suomen kontekstissa. Tutkielma toi tietoa rantaviivakartoitukseen vaikuttavista tekijöistä sekä haasteista, erityisesti merikartoituksen näkökulmasta. Suurin osa aikaisemmista rantaviivatutkimuksista on tehty pääasiassa ympäristö- ja ilmastovaikutusten näkökulmasta, mutta merikartoituksen näkökulmasta tietoa ei oikeastaan ole saatavilla. Merikartoituksen käytössä esimerkiksi sijaintitarkkuuden merkitys kasvaa. Tutkielman tavoitteena oli luoda tutkimusalueen kallioluodoille rantaviivat käyttämällä aikaisemmin onnistuneiksi todettuja menetelmiä. Tutkielmassa tuotettuja rantaviivoja verrattiin myös uusille merikartoille tulevaan MML:n rantaviivaan, mikä tuo lisäarvoa myös kyseisen aineiston laadusta. Tätä tietoa voidaan hyödyntää esimerkiksi merikarttojen rantaviivan uusimisprosessin suunnittelussa.

Tutkielman tuloksista kävi ilmi ilmakuvasta tuotetun rantaviivan olevan yksityiskohtaisempaa, kuin satelliittikuvasta tuotetun rantaviivan. Virhe-etäisyys on molempien aineistojen tuloksissa suurempi alueilla, joissa rantaviiva on rikkonaista. Tämän lisäksi ilmakuvasta tuotetun rantaviivan virheisiin vaikutti myös kallioihin osuvat aallot. On myös hyvä huomioida aaltojen aiheuttamien haasteiden olevan mahdollisia myös satelliittikuvasta kartoittaessa, jos aaltojen tyrskyt ovat tarpeeksi suuria. Aaltojen ja rikkonaisen rantaviivan lisäksi virheitä aiheutti myös matalikot sekä rannikon lähellä sijaitsevat luodot ja kivet, jotka yhdistyivät luokittelussa maa-alueeseen.

MML:n rantaviiva ja ilmakuvasta tuotettu rantaviiva ovat sijainniltaan lähekkäin toisiaan. Satelliittikuvasta tuotettua rantaviivaa on haastavaa verrata MML:n rantaviivaan, sillä sijaintieroon vaikuttaa eniten aineistojen spatiaalisen resoluution erot. Kaikkia kolmea rantaviivaa verratessa referenssirantaviivaan, kävi kuitenkin ilmi myös MML:n rantaviivassa olevan jonkin verran virheitä. Virhe-etäisyys on pienempi kuin tutkielmassa tuotetuissa rantaviivoissa, keskimäärin noin 5 metriä. Yllättävää oli kuitenkin poikkeavien arvojen olevan MML:n rantaviivalla suurempia kuin tutkielmassa ilmakuvasta tuotetulla rantaviivalla. Tällaisten yksittäisten virheiden paikantaminen on tärkeää aineiston laadun parantamisen kannalta.

Yhteenvedon voi mainita, että ohjattu luokittelu sekä raja-arvomenetelmä ovat toimivia rantaviivan sijaintia määriteltäessä. Aineiston valinnalla voidaan vaikuttaa tulosten tarkkuuteen, ja valinnassa täytyy ottaa huomioon muun muassa käyttötarkoitus. Satelliittiaineiston hyödyntäminen on yksinkertaista ja työmäärältään pienempi, mutta tulosten tarkkuus on myös heikompi. Merikartoitusikätyössä ilmakuvien hyödyntäminen on järkevämpää, sillä rantaviivan sijainnin tarkkuus on tärkeää turvallisen merenkulun kannalta. NDWI:tä voisi kuitenkin hyödyntää MML:n rantaviivojen tarkistamisessa, esimerkiksi puuttuvien luotojen paikantamisessa, mikä myös vaikuttaisi merenkulun turvallisuuteen. Nykyistä MML:n tuottamien rantaviivojen hyödyntämistä merikartoilla ei ole tämän tutkielman tulosten perusteella järkevää muuttaa, mutta aineistosta löytyvät virheet voisi olla tarpeellista korjata. Myös virheellisten rantaviivojen paikantaminen olisi tärkeää muun muassa merikarttojen laadun ja luotettavuuden vuoksi. Aiheesta voisi tehdä jatkotutkimusta vielä eri luokittelualgoritmien soveltuvuudesta sekä mahdollisesti prosessin automatisoinnista.

Lähteet

- Alcaras, E., Parente, C. & Vallario, A. (2023) Accuracy evaluation for coastline extraction from Pléiades imagery based on NDWI and IHS pan-sharpening application. *Applied Geomatics* 15 595–605. <https://doi.org/10.1007/s12518-021-00411-1>
- Al Mansoori, S. & Al-Marzouqi, F. (2016) Coastline extraction using satellite imagery and image processing techniques. *International Journal of Current Engineering and Technology* 6(4) 1245–1251. <https://www.researchgate.net/publication/305656580_Coastline_Extraction_using_Satellite_Imagery_and_Image_Processing_Techniques>
- Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., Moghaddam, S. H. A., Mahdavi, S., Ghahremanloo, M., Parsian, S., Wu, Q. & Brisco, B. (2020) Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: a comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 13 5326–5350. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3021052>
- Anders, F.J. & Byrnes, M.R. (1991) Accuracy of shoreline change rates as determined from maps and aerial photographs. *Shore and Beach* 59(1) 17–26. <https://www.researchgate.net/publication/284041608_Accuracy_of_shoreline_change_rates_as_determined_from_maps_and_aerial_photographs>
- Angelini, R., Angelats, E., Ribas, F., Masiero, A. & Mugnai, F. (2023) A review and test of shoreline extraction techniques. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 48 17–24. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-17-2023>
- Apostolopoulos, D. & Nikolakopoulos, K. (2021) A review and meta-analysis of remote sensing data, GIS methods, materials and indices used for monitoring the coastline evolution over the last twenty years. *European Journal of Remote Sensing* 54(1) 240–265. <https://doi.org/10.1080/22797254.2021.1904293>
- Barnes, J. (2023) *Safer shipping, cleaner seas*. International maritime organization, London.
- Barragán, J. M. & de Andrés, M. (2015) Analysis and trends of the world's coastal cities and agglomerations. *Oceans & Coastal Management* 114 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.004>

- Bishop-Taylor, R., Nanson, R., Sagar, S. & Lymburner, L. (2021) Mapping Australia's dynamic coastline at mean sea level using three decades of Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment* 267. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112734>
- Boateng, E. Y., Otoo, J. & Abaye, D. A. (2020) Basic tenets of classification algorithms k-nearest-neighbor, support vector machine, random forest and neural network: a review. *Journal of Data Analysis and Information Processing* 8(4) 341–357. <https://doi.org/10.4236/jdaip.2020.84020>
- Borowitz, M. (2017) *Open space - the global effort for open access to environmental satellite data*. The MIT Press, London.
- Costantino, D., Pepe, M., Dardanelli, G. & Baiocchi, V. (2020) Using optical satellite and aerial imagery for automatic coastline mapping. *Geographica Technica* 15(2) 171–190. <https://www.researchgate.net/publication/344401371_Using_optical_satellite_and_aerial_imagery_for_automatic_coastline_mapping>
- Copernicus lyhyesti (s.a) Copernicus. 8.12.2022. <<https://www.copernicus.eu/fi/copernicus/copernicus-lyhyesti>>
- Dai, C., Howat, I. M., Larour, E. & Husby, E. (2019). Coastline extraction from repeat high resolution satellite imagery. *Remote Sensing of Environment* 229 260–270. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.010>
- Davidson-Arnott, R., Bauer, B. & Houser, C. (2019) *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. 2p. Cambridge university press, Cambridge.
- Donchyts, G., Schellekens, J., Winsemius, H., Eisemann, E. & Van de Giesen, N. (2016) A 30 m resolution surface water mask including estimation of positional and thematic differences using Landsat 8, SRTM and OpenStreetMap: A case study in the Murray-Darling Basin, Australia. *Remote Sensing* 8(5). <https://doi.org/10.3390/rs8050386>
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Collin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Marchese, F. & Bargellini, P. (2012) Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment* 120 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Gens, R. (2010) Remote sensing of coastlines: detection, extraction and monitoring. *International Journal of Remote Sensing* 31(7) 1819–1836. <https://doi.org/10.1080/01431160902926673>
- Grigio, A., Amaro, V.E., Vital, H. & Diodato, M.A. (2005) A method for coastline evolution

- analysis using GIS and remote sensing. *Journal of Coastal Research* 42 412–421.
<<http://www.jstor.org/stable/25737010>>
- Hatunen, S. (s.a.) Kaukokartoitus. Kartta.nyt - Helsingin yliopiston kriittisen geomedialukutaidon tutkimustiimin tiedotuskanava. 21.10.2022.
<<https://blog.edu.turku.fi/karttanyt/kartat/paikkatieto/kaukokartoitus/>>
- Herava, J. (2021) Vedenalaisten havaintojen yleistarkastusraportointi yhdistetystä moni- ja laserkeilausaineistosta. Insinööriyö. LAB-ammattikorkeakoulu.
<<https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2021112822190>>
- How smooth line and smooth polygon work (s.a) Esri. 7.12.2023.
<<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/cartography/how-smooth-line-and-smooth-polygon-work.htm>>
- Hyperion (2010) NASA earth observatory. 12.6.2023.
<<https://earthobservatory.nasa.gov/features/EO1Tenth/page3.php>>
- Ikola, T. (1999) Satelliittidatoista ja niiden tarkkuudesta. Seminaariesitelmä. ”
<<https://foto.aalto.fi/opetus/270/esitelmät/1999/TimoIkola/SEMINA.A.htm>>
- Jakovljevic, G., Govedarica, M. & Álvarez-Taboada, F. (2019) Waterbody mapping: a comparison of remotely sensed and GIS open data success. *International Journal of Remote Sensing* 40(8) 2936–2964. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1538584>
- Kautonen, J. (2011) Rakentamisen mittaukset Vuosaaren satamatyömaalla. Insinööriyö. Metropolia ammattikorkeakoulu.
- Kulkarni, A. D. & Lowe, B. (2016) Random Forest algorithm for land cover classification. Computer science faculty publications and presentations. Paper 1. University of Texas at Tyler. <http://hdl.handle.net/10950/341>
- Kuosa, H., Järvinen, E., Kotilainen, A., Tuomi, L., Norkko, J., Jilbert, T., Puttonen, I., Kaartokallio, H. & Puntila-Dodd, R. (2023) Vaikuttavaa merentutkimuksen yhteistyötä Saaristomeren parhaaksi. Vesiensuojelun tehostamisohjelma, Suomen ympäristökeskus.
- Laatuvaatimukset (2020) Maanmittauslaitos. 19.9.2023.
<<https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/peruspaikkatietojentuotanto/kansallinen-maastotietokanta/tietomallit>>
- Laserkeilaus ja ilmakuvauus (s.a) Maanmittauslaitos. 20.9.2023.
<<https://www.maanmittauslaitos.fi/laserkeilaus-ja-ilmakuvaus>>
- Lavender, S. & Lavender, A. (2015) *Practical handbook of remote sensing*. Taylor & Francis, Boca Raton.

- Laino, E. & Iglesias, G. (2023) Extreme climate change hazards and impacts on European coastal cities: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 184. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113587>
- Leu, L.-G. (2017) Spot imagery analyses on coastline mapping and islet area estimation for Penghu archipelago. *Journal of Maritime Science and Technology* 25(5) 617–623. <https://doi.org/10.6119/JMST-017-0928-1>
- Li, J. (2021) *Satellite remote sensing technologies*. Springer, Singapore.
- Liu, C., Li, J., Tang, Q., Qi, J. & Zhou, X. (2022) Classifying the Nunivak Island coastline using the random forest integration of the Sentinel-2 and ICESat-2 data. *Land* 11(2). <https://doi.org/10.3390/land11020240>
- Lubchenco, J. & Haugan, P. M. (2023) Coastal development: resilience, restoration and infrastructure requirements. Teoksessa Lubchenco, J. & Haugan, P. M. (toim.) *The blue compendium*. 213–277. Springer, Cham.
- Lv, Z., Nunez, K., Brewer, E. & Runfola, D. (2023) pyShore: A deep learning toolkit for shoreline structure mapping with high-resolution orthographic imagery and convolutional neural networks. *Computers and Geosciences* 171. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105296>
- Maanmittauslaitoksen maastotietokohteet (2016). Maanmittauslaitos. 24.2.2024. <https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/old/maastotietokohteet.pdf>
- Ma, Y., Haiping, W., Wang, L., Huang, B., Ranjan, R., Zomaya, A. & Jie, W. (2015) Remote sensing big data computing: challenges and opportunities. *Future Generation Computer Systems* 51 47–60. <https://doi.org/10.1016/j.future.2014.10.029>
- Manetu, W. M., Mironga, J. M. & Ondiko, J. H. (2023) Remote sensing for land resources: a review on satellites, data availability and applications. *American Journal of Remote Sensing* 10(2) 39–49. <https://doi.org/10.11648/j.ajrs.20221002.12>
- McAllister, E., Payo, A., Novellino, A., Dolphin, T. & Medina-Lopez, E. (2022) Multispectral satellite imagery and machine learning for the extraction of shoreline indicators. *Coastal Engineering* 174. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104102>
- McFeeters, S. K. (1996) The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open area features. *International Journal of Remote Sensing* 17(7) 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Merenpohjan ominaispiirteet (s.a) Suomen ympäristökeskus. 10.6.2023.

- <https://www.ostersjon.fi/fi-FI/Luonto_ja_sen_muutos/Ainutlaatuinen_Itameri/Merenpohjan_ominaispiirteet>
- Merikartat 2024 (s.a). Traficom julkaisu 6. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. 21.1.2024. <https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/Merikartat_net.pdf>
- Merikartoitusaineistot (2022) Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. 17.6.2023. <<https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/paikkatietoaineistot/merikartoitusaineistot>>
- Minghelli, A., Spagnoli, J., Lei, M., Chami, M. & Charmasson, S. (2020) Shoreline extraction from WorldView2 satellite data in the presence of foam pixels using multispectral classification method. *Remote Sensing* 12(16). <https://doi.org/10.3390/rs12162664>
- Modava, M. & Akbarizadeh, G. (2016) Coastline extraction from SAR images using spatial fuzzy clustering and the active contour method. *International Journal of Remote Sensing* 38(2) 355–370. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1266104>
- Musa, Z. N., Popescu, I. & Mynett A. (2015) A review of applications of satellite SAR, optical, altimetry and DEM data for surface water modelling, mapping and parameter estimation. *Hydrology and Earth System Sciences* 19 3755–3769. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3755-2015>
- Myrberg, K., Kuosma, H. & Leppäranta (2006) *Itämeren fysiikka, tila ja tulevaisuus*. Yliopistopaino, Helsinki.
- Mäkinen, J. (2007) *Merikartta kansainvälistyy*. Karttaa tarvitaan aina: Suomen Kartografinen Seura 50 vuotta. <<https://www.kartogra.fi/wp-content/uploads/2014/05/Karttaa-tarvitaan-aina-SKS-50-vuotta.pdf>>
- Nummela, A., Pohja-Mykrä, M., Ijäs, A., Perttula, E., Roslöf, S., Savola, A., Juvonen, T., Lusenius, H., Salminen, P., Jutila, H. & Lindberg, W. (2019). Merialuesuunnittelu: Saaristomeren ja Selkämeren eteläosan suunnittelualan ominaispiirteet. <<https://www.merialuesuunnittelu.fi/wp-content/uploads/2019/12/Nummela-A.-et-al.-2019.-Merialuesuunnittelu-%E2%80%93-Saaristomeren-ja-Selk%C3%A4meren-etel%C3%A4osan-suunnittelualan-ominaispiirteet.pdf>>
- Parviainen, M. (2011) Kaukokartoitus luonnonmaantieteessä. Oulun yliopiston maantieteen opetusjulkaisu.
- Pettit, C., Stimson, B., Barton, J., Goldie, X., Greenwood, P., Lovelace, R. & Eagleson, S. (2020) Open access, open source and cloud computing: a glimpse into the future of GIS. Teoksessa S. Geertman & J. Stillwell (toim.) *Handbook of planning support science*. 56–73. Elgar, Cheltenham.

- Phan, T., Kuch, V. & Lehnert, L. W. (2020) Land cover classification using Google earth engine and random forest classifier - the role of image composition. *Remote Sensing* 12(15). <https://doi.org/10.3390/rs12152411>
- Regulations of the IHO for international (INT) charts (2021) International hydrographic organization. 23.8.2023. < https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-4/S4_V4-9-0_March_2021.pdf>
- Rodriguez-Galiano, V. F., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M. & Rigol-Sanchez, J. P. (2012) An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 67 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002>
- Tarmizi, N., Samad, A. M. & Yusop, S. (2014) Shoreline data extraction from QuickBird satellite image using semi-automatic technique. *IEEE 10th International Colloquium on Signal Processing and its Applications*. <https://doi.org/10.1109/CSPA.2014.6805739>
- Tietopaketti kaukokartoituksesta (s.a). 25.6.2023. <[https://www.i4.ymparisto.fi/i4/fin/tuotteet/Kaukokartoituksen_tietopaketti_\(2004\).pdf](https://www.i4.ymparisto.fi/i4/fin/tuotteet/Kaukokartoituksen_tietopaketti_(2004).pdf)>
- Types of orbits (2020) European space agency. 8.12.2022. <https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits#SSO>
- Saaristoluokitus (2021). Suomen ympäristökeskus. 3.2.2022. <<https://ckan.ymparisto.fi/dataset/saaristoluokitus>>
- Sagar, S., Roberts, D., Bala, B. & Lymburner, L. (2017) Extracting the intertidal extent and topography of the Australian coastline from a 28 year time series of Landsat observations. *Remote Sensing of Environment* 195 153–169. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.04.009>
- Sekovski, I., Stecchi, F., Mancini, F. & Del Rio, L. (2014). Image classification methods applied to shoreline extraction on very high-resolution multispectral imagery. *International Journal of Remote Sensing* 35(10) 3556–3578. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.907939>
- Sentinel-2 (s.a) The European space agency. 8.12.2022. <<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>>
- Skopeliti, A., Tsoulos, L. & Pe'eri, S. (2021) Depth contours and coastline generalization for harbour and approach nautical charts. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 10(4). <https://doi.org/10.3390/ijgi10040197>

- Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M. P. & Macomber, S. M. (2001) Classification and change detection using Landsat tm data: when and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment* 75(2) 230–244. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00169-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00169-3)
- Strang J. (2009) Jan Strangin merikarttatieto. 18.10.2022. <https://www.strang.fi/merikarttatieto/>
- Sun, W., Chen, C., Liu, W., Yang, G., Meng, X., Wang, L. & Ren, K. (2023) Coastline extraction using remote sensing: a review. *GIScience and Remote Sensing* 60(1). <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2243671>
- Ulkomaankaupan kuljetukset (2023) Tulli 13.9.2023. <https://tulli.fi/tilastot/ulkomaankaupan-kuljetukset>
- Valtioneuvoston asetus vesienhoidon järjestämisestä 2006/1040. Annettu Helsingissä 30.11.2006. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2006/20061040?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=vesipuidedirektiivi>>kuosa
- Vedenkorkeusvaihtelut Suomen rannikolla (2021) Ilmatieteen laitos. 10.6.2023. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/teematietoa-vedenkorkeus>
- Vesiväylätutkimusten yleisohjeet (2013) Liikenneviraston ohjeita 18/2013. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2013-18_vesivaylatutkimusten_yleisohjeet_web.pdf
- Vos, K., Harley, M. D., Splinter, K. D., Simmons, J. A. & Turner, I. L. (2019) Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering* 150 160–174. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.004>
- Wang, J., Wang, L., Feng, S., Peng, B., Huang, L., Fathollahi, S. N., Tang, L. & Li, J. (2023) An overview of shoreline mapping by using airborne LiDAR. *Remote Sensing* 15(1). <https://doi.org/10.3390/rs15010253>
- Yasir, M., Sheng, H., Fan, H., Nazir, S., Niang, A. J., Salauddin, M. & Khan, S. (2020) Automatic coastline extraction and changes analysis using remote sensing and GIS technology. *IEEE Access* 8 180156–180170. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3027881>
- Zhang, S., Qing, X., Haoyu, W., Yanyan, K. & Xiaofeng, L. (2022). Automatic waterline extraction and topographic mapping of tidal flats from SAR images based on deep learning. *Geophysical Research Letters* 49(2). <https://doi.org/10.1029/2021GL096007>
- Özelkan, E. (2020) Water body detection analysis using NDWI indices derived from Landsat-8 OLI. *Polish Journal of Environmental Studies* 29(2) 1759–1769.

<https://doi.org/10.15244/pjoes/110447>