



**TURUN
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen
tiedekunta

Tyrskyvyöhykkeen kaukokartoitus CoastSat- algoritmilla

Tuuliolosuhteiden, merivedenkorkeuden ja rannan syvyysolosuhteiden vaikutukset

Suvi Ryttäri

Maantiede

Pro gradu -tutkielma

Laajuus: 30 op

5.12.2024

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu

Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Pro gradu -tutkielma

Pääaine: Maantiede

Tekijä: Suvi Rytteri

Otsikko: Tyrskyvyöhykkeen kaukokartoitus CoastSat-algoritmilla: Tuuliolosuhteiden, merivedenkorkeuden ja rannan syvyysolosuhteiden vaikutukset

Ohjaaja: Harri Tolvanen ja Tua Nylén

Sivumäärä: 75 sivua + liitteet 28 sivua

Päivämäärä: 5.12.2024

Tyrskyvyöhykettä käytetään ranta-alueilla hyvin moneen ja näin se vaikuttaa niin ranta-alueen käyttöön kuin myös sen suunnitteluun. Aallot murtuvat tyrskyvyöhykkeellä luoden tyrskyvyöhykkeestä hyvin dynaamisen alueen. Tyrskyvyöhykkeen kaukokartoitus onkin tärkeää niin ihmistoiminnan kuin myös luonnon näkökulmasta. Tuuli saa aikaan aallot siirtämällä sen energiaa kitkan kautta vedenpintaosiin. Tämän takia tuulen nopeudella ja suunnalla on vaikutusta aaltojen ominaisuuksiin, kuten korkeuteen ja jaksoon. Aallot murtuvat rannassa, kun rannan pohjan madaltuminen saa aikaan aallon kulman jyrkentymisen, vauhdin hidastumisen ja lopulta aallon murtumisen. Rannan syvyysolosuhteilla on siis merkittävä rooli tyrskyvyöhykkeen sijainnin kannalta.

Yyterin sannot ja Kökar poikkeavat toisistaan niin tuulen vaikutuksen kuin myös rannan syvyysolosuhteiden myötä. Näillä alueilla aaltojen murtuminen on erilaista ja näin tyrskyvyöhykkeet poikkeavat toisistaan ominaisuuksiltaan. Tässä tutkimuksessa käytän CoastSat-algoritmia havaitsemaan tyrskyt tyrskyvyöhykkeeltä eri tuuli olosuhteissa ja vedenkorkeuksissa. Yyterin sannot osalta näyttää siltä, että tuulen suunnalla, tuulen nopeudella eikä vedenkorkeudella voida selittää tyrskyvyöhykkeiden pinta-alojen muutoksia. Kuitenkin CoastSat-algoritmin luokittelu epäonnistuu Yyterin sannot monessa tapauksessa luokittelemassa maa-alueita tyrskyiksi. Tämän takia tulokset voivat olla vääristyneitä. Kökarin osalta tuulen nopeudella vaikuttaa olevan enemmän merkitystä tyrskyvyöhykkeen pinta-alojen muutoksiin kuin tuulen suunnalla. Vedenkorkeuden muutokset näyttävät vaikuttavat tyrskyjen kokoon.

Avainsanat: tyrskyvyöhyke, kaukokartoitus, CoastSat, tuulen suunta, tuulen nopeus, vedenkorkeus, Yyterin sannot, Kökar, syvyysolosuhteet

Master's thesis

Subject: Geography

Author: Suvi Rytteri

Title: Remote sensing of surf zone using the CoastSat algorithm: the influence on wind conditions, sea level and coastal bathymetry

Supervisor: Harri Tolvanen and Tua Nylén

Number of pages: 75 pages + appendices 28 pages

Date: 5.12.2024

The surf zone has a significant role in coastal areas, influencing both their usage and planning. Waves break within the surf zone, making it a highly dynamic area. Therefore, remote sensing of the surf zone is essential from both human activity and environmental perspectives. Wind generates waves by transferring its energy through friction to the water surface. For this reason, wind speed and direction affect wave characteristics, such as height and period. Waves break near the shore as the decreasing depth causes the wave angle to steepen, the speed to decrease, and eventually, the wave to break. Thus, seabed depth conditions play a crucial role in determining the location of the surf zone.

Yyterin sannat and Kökar differ in terms of wind effects and seabed depth conditions. These differences result in varying wave-breaking patterns, leading to surf zones with distinct characteristics. In this study, I use the CoastSat algorithm to detect breaking waves in the surf zone under different wind conditions and sea levels. For Yyteri, it appears that changes in surf zone areas cannot be explained by wind direction, wind speed, or changes in sea level. However, the CoastSat algorithm frequently misclassified land areas as breaking waves in Yyteri, potentially distorting the results. In Kökar, wind speed seems to have a greater influence on changes in surf zone areas than wind direction. Additionally, changes in sea level appear to affect the size of breaking waves too in Kökar.

Key words: surf zone, wave breaking, remote sensing, CoastSat, Kökar, Yyterin sannat, wind speed, wind direction, sea level, bathymetry

Sisällysluettelo

1	Johdanto	7
2	Tutkimuksen tausta ja teoreettinen viitekehys	10
2.1	Aalto	10
2.1.1	Muodostuminen	10
2.1.2	Muoto	11
2.1.3	Murtuvat aaltotyypit	12
2.2	Ranta	13
2.2.1	Määritelmä	13
2.2.2	Rantatyypit	14
2.3	Aaltojen käyttäytyminen rannassa	14
2.3.1	Aaltojen saapuminen rantaan	14
2.3.2	Aaltorefraktio ja -diffraktio	15
2.4	Tyrskyvyöhyke	16
2.4.1	Määritelmä	16
2.4.2	Hydrodynamiikka	17
2.4.3	Tyrskyvyöhykkeen leveyteen vaikuttavat tekijät	17
2.4.4	Tyrskyvyöhykkeen virtaukset	18
2.4.5	Sedimentin kulkeutuminen	19
2.5	Tyrskyvyöhykkeen kaukokartoitus	20
2.5.1	Soveltuvat kaukokartoitusmenetelmät	20
2.5.2	Kaukokartoituksen haasteet eri ympäristöissä ja olosuhteissa	21
2.5.3	Tyrskyvyöhykkeen kaukokartoituksen merkitys	22
2.6	Suomen rannikot	23
3	Tutkimusalueet	25
4	Aineistot ja menetelmät	27
4.1	Aineistot	27
4.1.1	Kaukokartoitusaineistot	27
4.1.2	Rannan syvyysolosuhteet	28
4.1.3	Tuuliaineisto	28
4.1.4	Merivedenkorkeustiedot	32
4.2	Menetelmät	34
4.2.1	Tutkimusajanjakso ja työn kulku	34
4.2.2	Satelliittikuva-analyysit	35

4.2.3	Tuuli- ja vedenkorkeusaineistojen yhdistäminen satelliittikuviin	37
5	Tulokset	38
5.1	Tuulen suunnan vaikutus tyrskyvyöhykkeeseen	38
5.2	Tuulen nopeuden vaikutus tyrskyvyöhykkeeseen	44
5.2.1	Heikko tuuli	44
5.2.2	Kohtalainen tuuli	45
5.2.3	Navakka tuuli	47
5.2.4	Kova tuuli	49
5.2.5	Yhteenveto tuulen nopeuden vaikutuksesta	51
5.3	Merivedenkorkeuden vaihtelun vaikutus tyrskyvyöhykkeeseen	53
5.4	Sääolosuhteiden yhteisvaikutus tyrskyvyöhykkeeseen	57
5.5	Rannan syvyysolosuhteiden vaikutus tyrskyvyöhykkeeseen	59
6	Keskustelu	61
6.1	Tuulen ominaisuuksien vaikutus tyrskyvyöhykkeeseen	61
6.2	Merivedenkorkeuden muutosten vaikutus tyrskyvyöhykkeeseen	62
6.3	Syvyysolosuhteiden vaikutus tyrskyvyöhykkeeseen	63
6.4	CoastSat-algoritmin käyttö tyrskyjen luokittelussa	64
6.5	Tutkimuksen epävarmuustekijät sekä jatkotutkimus	66
7	Johtopäätökset	68
	Kiitokset	69
	Lähteet	70
	Liitteet	76

1 Johdanto

Ranta-alueet ovat tärkeitä dynaamisia ympäristöjä niin luonnon kuin myös ihmistoiminnan näkökulmasta (Haslett 2008). Ihmistoiminnan kannalta ranta-alueet ovat suosittua aluetta, jonka takia niiden käyttö on suurta ja jatkuvasti kasvavaa (Hume ym. 2019). Tästä syystä rannikkosuunnittelun on tärkeää olla tehokasa, jotta se pysyy käytön kasvun ja käyttötapojen muutoksen perässä (de Vries ym. 2011). Ranta-alueita muokkaavat muun muassa tyrskyvyöhykkeen virtaukset kuljettamalla sedimenttiä rannalle, rantaa pitkin sekä pois rannalta. Tyrskyvyöhykkeen muuttuva luonne vaikuttaa niin rantavyöhykkeen käyttöön kuin sen turvallisuuteen. Tyrskyvyöhykkeen dynaamisen olemuksen takia sen kaukokartoittaminen eri keinoin onkin tärkeää ranta-alueiden suunnittelun kannalta.

Tuuli saa aikaan aallot siirtämällä energiaa veden pintaosiin kitkan kautta (Davidson-Arnott 2011). Aaltojen syntymiseen vaikuttavat eniten tuulen nopeus, suunta ja pyyhkäisymatka. Kun tuulen nopeus kasvaa, kasvaa myös tuulesta aaltoihin siirtyvän energian määrä. Energian siirtyessä veteen, vesimassan partikkelit alkavat liikkumaan pyöreänä liikkeenä, mikä näkyy veden pinnalla aaltona (Holden 2017). Syntyneet aallot voidaan jakaa jaksottaisiin ja ei-jaksottaisiin aaltoihin niiden muodon perusteella. Jaksottaiset aallot toistavat tiettyä jaksoa edetessään, kun taas ei-jaksottaisten aaltojen jakso on epäsäännöllinen. Jaksottaisista aalloista voidaan mitata aallon ominaisuuksia, kuten etenemisnopeutta, korkeutta, jaksoa ja pituutta. On kuitenkin hyvä muistaa, että luonnossa aallot ovat epäsäännöllisiä ja useita aallon korkeuksia kuin myös pituuksia esiintyy samanaikaisesti.

Rantaan saapuessaan aaltojen eteneminen muuttuu rantavyöhykkeen madaltumisen vuoksi (Holden 2017). Aaltojen liikkeessä syvässä vedessä partikkeleiden liike on symmetristä ja sinifunktion muotoista (Davidson-Arnott 2011). Matalampaan veteen saapuessaan aaltojen muoto alkaa muuttumaan, sillä aallon partikkeleiden liike saavuttaa rannan pohjan. Tällöin aallon etenemisnopeus alkaa hidastumaan ja aallon pituus lyhenemään. Rantaan saapuessaan aallon pohjan vauhti hidastuu, mutta aallon harjan vauhti pysyy edelleen samana (Fuell ym. 2016). Tämä saa aikaan aallon korkeuden kasvun sekä aallon kulman jyrkentymisen ja lopulta aallon murtumisen (Davidson-Arnott 2011).

Aallon murtuminen tapahtuu tyrskyvyöhykkeellä, joka on yksi rannikkoalueeseen kuuluva osa (Davidson-Arnott 2011). Tyrskyvyöhyke on syvimmillään noin kahden aallon korkeuden verran madaltuen rantaa kohden (Feddersen & Trowbridge 2005). Energian vapautumisen

kannalta tyrskyvyöhyke on ranta-alueen tärkein osa (Martins ym. 2017). Vapautunut energia siirtyy rantavedessä kulkeviin virtauksiin, sedimentin kuljetukseen sekä veden muuhun liikkeeseen, kuten roiskeisiin ja murtumisessa syntyvään ääneen. Tyrskyvyöhyke onkin varsin dynaaminen alue (Inch ym. 2014).

Tyrskyvyöhykkeen sijaintia ja laajuutta voidaan kaukokartoittaa monilla eri instrumenteilla. Sen kaukokartoittaminen on tärkeää muun muassa sen rantaa muovaavien hydrodynaamisten ominaisuuksien takia (Sáez ym. 2021). Viime vuosina kaukokartoitusmenetelmien käyttö tyrskyvyöhykkeen tunnistamisessa ja ylipäättään aaltojen ominaisuuksien mallintamisessa on kasvanut (de Vries 2011). Kaukokartoitusmenetelmiä on lukuisia, mikä lisää niiden käytettävyyttä tässä tarkoituksessa. Satelliittikuvat ovat yksi kaukokartoitukseen soveltuva keino niin spatiaalisen kuin myös ajallisen kattavuuden takia (Martins ym. 2017). Satelliittikuvista pystytään hyvin tunnistamaan aaltojen sijainti ja suunta, mutta ei aaltojen geometriaa. LiDAR-skannerin avulla voidaan paikata satelliittikuvien puutteita, kuten aaltojen geometrian tunnistusta. Kuitenkin kaukokartoituksessa on otettava huomioon tyrskyvyöhykkeen jatkuvasti muuttuvat ominaisuudet. Tämän takia yksittäisen hetken tallentuminen satelliittikuvaan ei täysin kuvaa niin dynaamista ilmiötä, mitä tyrskyvyöhyke on.

Tutkimukseni keskittyy tyrskyvyöhykkeiden syntyolosuhteiden tutkimiseen kahdella erityyppisellä Suomen ranta-alueella, Yyterin sannoilla ja Kökarissa. Pää tavoitteenani on selvittää, millaisissa tuuli- ja vedenkorkeusolosuhteissa tyrskyvyöhyke syntyy ja miten sen muodostuminen riippuu rannan syvyysolosuhteista sekä rannikon muodosta. Toisena tavoitteenani on tarkastella, miten valittu tutkimusmenetelmä havaitsee satelliittikuvista tyrskyvyöhykkeet. Validointiaineiston puuttuessa tarkastelen menetelmän soveltuvuutta kvalitatiivisesti. Tutkimuksessa käytän CoastSat-algoritmia, joka on alun perin suunniteltu käytettäväksi hiekkarannoilla rantaviivan muutoksen tutkimiseen (Vos ym. 2019). Muissa tutkimuksissa CoastSat-algoritmia on käytetty valtameriympäristöissä rannoilla, joilla aallot ovat korkeita (Vos ym. 2019; Castelle ym. 2021). Tätä tutkimusta kirjoittaessa ei ole tullut vastaan yhtään tutkimusta, jossa CoastSat-algoritmia olisi hyödynnetty Suomen rannikoilla tai tyrskyvyöhykkeen kaukokartoitukseen. Tässä tutkimuksessa CoastSat-algoritmia käytetään täysin uudella tavalla.

Tavoitteeseen pyrin tarkastelemalla seuraavia tutkimuskysymyksiä:

1. Miten tuulen ominaisuuksien muuttuminen vaikuttaa tyrskyvyöhykkeeseen?
2. Miten merivedenkorkeuden vaihtelu rannassa vaikuttaa tyrskyvyöhykkeeseen?
3. Miten rannan syvyysolosuhteet vaikuttavat tyrskyvyöhykkeeseen?
4. Minkälaisia eroja syntyy tyrskyvyöhykkeen havainnoinnissa CoastSat-algoritmin ja ihmisen tekemän visuaalisen kuvatulkinnan välillä?

2 Tutkimuksen tausta ja teoreettinen viitekehys

2.1 Aalto

2.1.1 Muodostuminen

Aaltoja syntyy monin tavoin, kuten maanjäristysten, tuulen tai gravitaatiovoiman vaikutuksesta (Davidson-Arnott 2011). Tässä tutkimuksessa keskitytään tuulen aikaan saamiin aaltoihin. Tuuli saa aikaan aallot aallonmuodostumisalueella, kun tuulen energia siirtyy veden pintaosiin. Tällöin vesimassan partikkelit alkavat liikkumaan pyöreänä liikkeenä, joka näkyy veden pinnalla aaltona (Holden 2017). Tuulesta vesimassaan siirtyvä energia voidaan jakaa potentiaalienergiaan sekä kineettiseen energiaan (Lin ym. 2008). Potentiaalienergia liittyy aallon muotoon ja näin aallon korkeuden muutoksiin. Kineettinen energia taas liittyy partikkeleiden pyöreään liikkeeseen. Potentiaalienergian sekä kineettisen energian voidaan olettaa olevan yhtä suuret.

Tuulen ominaisuudet, kuten nopeus ja suunta, vaikuttavat aaltojen ominaisuuksiin, sillä aallot liikkuvat siihen suuntaan, johon tuuli puhaltaa (Thorpe 2001). Tuulen nopeus tarkoittaa nopeutta, jolla tuuli puhaltaa (Ilmatieteen laitos 2023). Ilmanpaineen muuttuminen saa aikaan tuulen. Paikan A ja paikan B välinen ilmanpaine-ero taas määrittää tuulen nopeuden. Mitä enemmän ilmanpaine muuttuu lyhyellä matkalla, sitä voimakkaammin tuulee. Tuulen nopeus ilmoitetaan tavallisesti metriä/sekunnissa asteikolla, jonka aikaväli on usein kymmenen minuuttia. Asteikko kuvaa tuulen nopeuden keskiarvoa edellisen kymmenen minuutin ajalta. Tätä keskiarvoa kutsutaan keskituuleksi. Vaikka keskituuli näyttäisi tiettyä lukemaa, tämän kymmenen minuutin aikana puuskat ovat saattaneet olla kovempia kuin itse keskituuli. Puuskat ylittävät kymmenen minuutin keskituulen noin 1,5–2-kertaisena. Toinen aaltoihin vaikuttava ominaisuus on tuulen suunta (Thorpe 2001). Sillä kuvataan suuntaa, josta tuuli puhaltaa (Ilmatieteen laitos 2023). Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi pohjoistuulen vallitessa, tuuli puhaltaa pohjoisesta. Tuulen suuntaa kuvataan 360° asteisella asteikolla, jossa 360° tarkoittaa pohjoistuulta, 90° itätuulta, 180° etelätuulta ja 270° länsituulta.

Tuulen muodostamien aaltojen kokoon vaikuttaa eniten tuulen nopeus, tietyn tuulen nopeuden ajallinen kesto sekä tuulen pyyhkäisymatka (Davidson-Arnott 2011). Kun tuulen nopeus kasvaa, kasvaa veteen siirtyvän energian määrä samalla ja täten myös aallon koko. Toisin sanoen, mitä kovempaa tuulee, sitä korkeammat aallot ovat (Holden 2017). Tuulen puhalluksen

ajallinen kesto määrittää muun muassa aallon korkeuden, sillä, mitä kauemmin tuuli puhaltaa, sitä korkeammaksi aallot kasvavat. Tuulesta voi siirtyä energiaa veteen vain tuulen pyyhkäisymatkalla eli aallonmuodostumisalueella (Davidson-Arnott 2011). Tuulen pyyhkäisymatka määrittää sen, kuinka pitkällä matkalla energiaa siirtyy tuulesta veteen. Pyyhkäisymatkaan vaikuttaa vesistön laajuus, jolloin pienimissä vesistöissä maa-alueet ja suuremmissa vesistöissä taas sääilmiöt vaikuttavat pyyhkäisymatkan kokoon. Kun aallot poistuvat aallonmuodostumisalueelta, alueella puhaltavasta tuulesta ei enää siirry energiaa poistuneisiin aaltoihin. Aaltojen siirtyessä pois aallonmuodostumisalueelta, aalloista syntyy maininki, joka tarkoittaa pitkä aallon harjaisia, matalia aaltoja. Maininki voi liikkua jopa tuhansia kilometrejä tuulettomalla alueella vain vähällä energian häviämällä. Mainingit voivat liikkua myös uusien aallonmuodostusalueiden läpi ilman, että vallitseva tuuli vaikuttaa niiden muotoon tai nopeuteen.

2.1.2 Muoto

Aallot voidaan jakaa jaksottaisiin ja ei-jaksottaisiin aaltoihin niiden muodon perusteella (Hashim ym. 2016). Jaksottaisen aallon muotoa voidaan kuvailla tiettyä jaksoa toistavana aaltoiluna tyynen veden pinnan ylä- ja alapuolella (Davidson-Arnott 2011). Tämä tarkoittaa sitä, että aallot toistavat samaa muotoa tietyssä jaksossa (Holden 2017). Näille jaksottaisille aalloille on kehitetty erilaisia määritelmiä kuvaamaan aallon muotoa. Tuulen synnyttämä aalto on progressiivinen aalto eli aallon muoto etenee aallon edetessä. Aallon etenemistä kuvaa aallon etenemisnopeus (C) (Joodaki ym. 2013). Tähän liittyy aallon pituus sekä aallon jakso. Aallon pituus (L) on kahden aallon harjan välinen horisontaalinen etäisyys. Aallon jakso (T) taas tarkoittaa aikaa, joka kuluu, kun seuraava aallon harja ohittaa tietyn pisteen. Aallon harja tarkoittaa aallon korkeinta kohtaa. Tämän vastakohta on aallon pohja, joka tarkoittaa aallon matalinta kohtaa veden päällä. Näiden avulla voidaan laskea aallon korkeus (H), joka tarkoittaa aallon harjan ja aallon pohjan välistä vertikaalista etäisyyttä.

Kuitenkaan luonnossa aallot eivät ole jaksottaisia, sillä aallokossa esiintyy monia eri aallon korkeuksia sekä jaksoja (Hashim ym. 2016). Ei-jaksottaisillekin aalloille on kehitetty muuttujia kuvaamaan aallokkoa. Yksi näistä muuttujista on merkitsevä aallon korkeus (H_s). Tämä muuttuja kuvaa aaltojen korkeuden keskiarvoa laskettuna alueen korkeimpien aaltojen kolmanneksesta. Keskiarvo saadaan laskettua mittaamalla aaltojen korkeutta tietyn ajanjakson ajan.

2.1.3 Murtuvat aaltotyypit

Merellä aaltotyypit ovat erilaisia kuin rannassa. Tämän tutkimuksen keskittyessä tyrskyvyöhykkeeseen, käydään tässä kappaleessa läpi vain tyrskyvyöhykkeellä esiintyvät eri aaltotyypit. Nämä kolme aaltotyyppiä luokitellaan niiden murtumistavan mukaan (Inch ym. 2014). Aallon murtumistapaan vaikuttaa aallon jyrkkyys sekä rannan kaltevuus lähellä aallon murtumispistettä. Aallon murtumistyyppi pystytään ennustamaan laskennallisilla kaavoilla, jos aallot ovat jaksottaisia. Tämän takia kaavojen hyödyntäminen luonnossa on vaikeaa.

Ensimmäinen tyyppi on hajoavat aallot (spilling waves), joita esiintyy loivilla rannoilla (Inch ym. 2014). Tämänkaltaiset aallot vapauttavat energiaa koko tyrskyvyöhykkeen alueelle, luoden leveän tyrskyvyöhykkeen. Hajoavat aallot murtuvat usein kauempana rannasta (Davidson-Arnott 2011). Hajoavilla aalloilla aallon harja on epävakaata ja vaahtopää havaittavissa. Aallon muoto pysyy samanlaisena matalassa vedessä kuin se oli syvässä vedessä. Aallot, jotka murtuvat hajoamalla, syntyvät usein myrskyjen aikana, jolloin niillä on myös lyhyt jakso. Hajoavia aaltoja voidaan havaita loivilla rannoilla, sillä aaltojen tyyppi muuttuu jyrkillä rannoilla.

Toinen aaltotyyppi on syöksyvät aallot (plunging waves), jotka syntyvät jyrkemmillä rannoilla kuin hajoavat aallot, sillä syöksyvät aallot sisältävät enemmän energiaa (Inch ym. 2014). Syöksyvien aaltojen rannanpuoleinen kulma jyrkkenee miltei vaakatasoon, jonka jälkeen aallonharja taittuu eteen ja alas luoden surffaukseen tyypillisen käytävän. Tyrskyvyöhyke jää kapeaksi tällaisten aaltojen yhteydessä. Syöksyvät aallot murtuvat usein jo kauempana rannasta (Power 2020). Syöksymällä murtuvilla aalloilla on usein pitkä jakso ja näiden aaltojen korkeus kasvaa huomattavasti lähellä murtumispistettä. Tämä saa aikaan edellä mainitun aaltoon muodostuvan käytävän sen murtumisen yhteydessä.

Kolmas tyyppi on ryntäävät aallot (surging waves) (Inch ym. 2014). Näitä aaltoja esiintyy jyrkillä rannoilla, jotka heijastavat aallokon energiaa voimakkaasti. Ryntäävät aallot eivät murru tavanomaisesti vaan ne ikään kuin liukuvat rantaa pitkin. Tämän takia tällaisten aaltojen yhteydessä selvää tyrskyvyöhykettä ei pystytä havaitsemaan. Ryntäävät aallot murtuvat usein vasta rannassa (Power 2020).

Vaikka aallot pystytään luokittelemaan edellä mainittuihin kolmeen luokkaan, tosielämässä aaltojen murtumistyyppit ovat ennemminkin jatkumoa toisilleen (Inch ym. 2014). On tyyppillistä

nähdä samalla tyrskyvyöhykkeellä eri aikaan eri murtumistyyppisiä, jos aaltojen korkeus sekä aaltojen periodi vaihtelee suuresti. Luonnollisen vaihtelun takia on kehitetty Iribarrenin numero mallintamaan aaltojen murtumistyyppi tietyllä rannalla sekä rannan tyrskyvyöhykkeen leveys. Mallintamiseen tarvitaan rannan jyrkkyys, aallon korkeus sekä aallonpituus syvässä vedessä lineaarisen aaltoteorian mukaan laskettuna. Laskukaavasta saadaan arvot; jos arvo on alle 0,4 hajoavat aallot ovat todennäköisimpiä, jos arvo on 0,4–2,0 syöksyvät aallot ovat taas todennäköisempiä ja jos arvo on yli 2,0 ryntäävät aallot ovat todennäköisimpiä (Davidson-Arnott 2011). Pienen luvun saavat aallot tilanteessa, jossa aallon korkeus on suuri, aallon pituus lyhyt ja rantavyöhyke on loiva ja suuret arvot saadaan päinvastaisessa tilanteessa (Holden 2017).

2.2 Ranta

2.2.1 Määritelmä

Rannikkoalue viittaa laajaan alueeseen, joka koostuu meren ja maan vaihtumisalueesta (Siry 2007). Tähän alueeseen vaikuttaa niin maa-alueen kuin myös merialueen morfologia. Tältä alueelta voidaan tunnistaa monta pienempää aluetta. Rannikko (coast) tarkoittaa kasvillisuusrajasta alkavaa sisämaahan päin suuntaavaa aluetta. Ranta (beach) tarkoittaa aluetta, jonka merenpuoleinen raja on laskuveden matalin raja ja maanpuoleinen raja loppuu kasvillisuuden alkuun (Davidson-Arnott 2011). Ranta voidaan jakaa myös pienempiin osiin, eturanta (foreshore) ja takaranta (backshore), aaltojen vaikutuksen mukaan (Siry 2007). Eturanta on merenpuolella ja takaranta maanpuolella. Eturantaan kuuluu huuhtoutumisalue, joka tarkoittaa aluetta, jossa aaltojen huuhtoutuminen tapahtuu. Rantavesialue (nearshore) alkaa eturannan merenpuoleiselta rajalta ja päättyy kun vesi on 20 metriä syvää (USACE 2008). Rantavyöhyke (littoral zone) pitää sisällään rannan sekä rantavesialueen. Kaikista merenpuoleisista alueista ulkovesialue (offshore), joka alkaa rantavyöhykkeen jälkeen.

Tärkein voima, joka muokkaa rantaa on aalloista purkautuva energia (Holden 2017). Muita rantoja muokkaavia tekijöitä on muun muassa vuorovesi ja tuuli. Aallossa oleva energia vapautuu aallon murtuessa tyrskyvyöhykkeellä. Energia kulkeutuu aallon mukana sen huuhtoutuessa huuhtoutumisalueella (Chen ym. 2023). Energian vapautuminen tapahtuu turbulenssin ja kitkan kautta. Aallon ominaisuudet sekä rantavesialueen kaltevuus vaikuttavat vapautuvan energian määrään (Davidson-Arnott 2011). Rannoilla, jotka ovat jyrkkiä ja aallot ovat suhteellisen matalia, aallon murtuminen tapahtuu itse rannalla eikä tyrskyvyöhykkeellä.

Jos ranta taas on loiva ja aallot suhteellisen korkeita, aallon murtuminen tapahtuu kauempana rannasta. Tällöin tyrskyvyöhyke syntyy aallon murtumislinjan ja rannan merenpuoleisen rajan väliin jäävälle alueelle.

2.2.2 Rantatyypit

Rannat voidaan jakaa sen mukaan, kuinka voimakkaasti aallokko heijastuu rannasta takaisin merelle. Voimakkaammin aallokkoa heijastavimmilla rannoilla (reflective beach) suuri osa aaltojen murtumisen seurauksena vapautuneesta energiasta kumpuaa takaisin merelle (Wright 1984). Tyynellä säällä näillä rannoilla sedimentti kulkeutuu rannalle, jolloin rannalla oleva penkere kasvaa. Rantaa kohden suuntautuvan sedimentin kulkeutumisen takia tällaiset rannat ovat usein hyvin jyrkkiä, jolloin tyrskyvyöhyke jää kapeaksi. Heikommin heijastavilla rannoilla (dissipative beach) aaltojen energia siirtyy sedimentin kuljetukseen rantaa kohden, mutta sedimentti ei kuitenkaan kulkeudu rannalle asti. Tämän takia tällaiset rannat ovat usein hyvin loivia pitkälle merelle ja tyrskyvyöhyke on leveä.

Näiden kahden rantatyyppin välissä on neljä muuta aaltojen heijastusluokkaa (intermediate beaches) (Wright 1984). Tällaisilla rannoilla aaltojen hajoamisesta vapautunut energia vapautuu ympäristöön, kuten heikommin heijastavilla rannoilla, mutta ääripäiden väliin jäävien rantojen yläosa on samanlainen jyrkkä, kuten voimakkaammin heijastavilla rannoilla. Kaikilla edellä mainituilla rannoilla aaltojen ominaisuudet saattavat muuttua, jolloin myös rannat saattavat muuttua yhdestä tyyppistä toiseen, esimerkiksi vähemmän heijastavasta voimakkaammin heijastavaan rantatyyppiin.

2.3 Aaltojen käyttäytyminen rannassa

2.3.1 Aaltojen saapuminen rantaan

Aaltojen käyttäytymistä vedessä voidaan mallintaa lineaarisen aaltoteorian (linear wave theory) avulla (Holden 2017). Tämän avulla aaltojen käyttäytymisessä voidaan huomata muutoksia veden syvyyden muuttuessa. Täten aaltojen käyttäytyminen voidaan jakaa kolmeen osaan. Syvässä vedessä aallot ovat sinifunktion (sinusoidal) muotoisia sekä aallon partikkeleiden liike on symmetristä (Davidson-Arnott 2011). Partikkelit liikkuvat pyöreinä muotoina pienentyen koossa aallon pohjaan asti eli siihen syvyyteen asti, johon aallon liike ei enää vaikuta. Kun aallot kulkeutuvat rantaa kohden ja saavuttavat keskisyvän (intermediate) veden, aallon muoto muuttuu. Tämä johtuu siitä, että aallon pohja saavuttaa veden pohjan. Partikkeleiden pyöreä

muoto muuttuu enemmän ellipsin muotoiseksi, jolloin pyöreän muodon halkaisija ei enää vastaa aallon korkeutta. Aallon etenemisnopeus hidastuu ja aallon pituus lyhenee. Matalassa vedessä rannan madaltuminen pakottaa aallon nousemaan ylöspäin ja alaosan hidastumaan samalla kun aallon yläosan vauhti pysyy samana (Fuell ym. 2016). Tämän takia aallon korkeus kasvaa ja aallon kulma jyrkkenee rantaan tultaessa (Davidson-Arnott 2011). Lopulta aallon kulma on liian jyrkkä etenemiseen ja veden korkeus vain hieman yli puolet aallon korkeudesta. Tämä johtaa aallon murtumiseen. Aallon murtuminen tapahtuu tyrskyvyöhykkeellä, mutta aallot murtuvat eri etäisyydeltä rannasta, koska rannan topografia vaikuttaa suuresti aallon murtumiseen (Inch ym. 2014). Tätä edellä kuvattua prosessia kutsutaan englanniksi termillä shoaling. Prosessi on hyvin vahva varsinkin tyrskyvyöhykkeen merenpuoleisella rajalla, jolloin aaltojen voidaan havaita kasvavan yhtäkkisesti (Holden 2017).

Aallon ominaisuudet muuttuvat sen saapuessa rantaan aallon jaksoa lukuun ottamatta (Davidson-Arnott 2011). Aallon jakso pysyy samana niin matalassa vedessä kuin myös syvässä vedessä. Aallon korkeus, pituus ja etenemisnopeus taas muuttuvat. Yksinkertaisessa aallossa etenemisnopeus ja aallon pituus pienenevät aallon murtumispiisteeseen saakka. Aallon korkeus taas kasvaa sen saapuessa rantaan. Aallon korkeuden muuttuessa on kuitenkin syytä ottaa huomioon energian häviäminen rantaan saapumisen yhteydessä. Jos energiaa ei häviä ollenkaan prosessin aikana, aalto kasvattaa korkeuttaan juuri ennen murtumista. Kuitenkin luonnossa energiaa häviää prosessin aikana, jolloin aallon korkeuden kasvaminen muuttuu monimutkaisemmaksi.

Aallon rantaan saapuminen ei luonnossa kuitenkaan ole näin yksinkertainen vaan siihen vaikuttaa monet tekijät (Feddersen & Veron 2005). Tuulen ja aallon suunta eivät välttämättä ole samat, sillä merituuli vaikuttaa aaltojen suuntaan mesoskaalaisten ilmähäilmiöiden lisäksi. Esimerkiksi nämä kaksi tekijää saavat aikaan aaltojen epälineaarisen kasvun rantaan saapumisen aikana. Lisäksi rannan pohjamateriaali sekä rantaviivan muoto vaikuttavat aaltojen murtumiseen (Davidson-Arnott 2011). Kun hiekkarannoilla on suora rantaviiva, aallot murtuvat laajalla alueella samanaikaisesti sillä aallot lähestyvät kohtisuorassa rantaan nähden. Jos rantaviiva taas on hyvin mutkitteleva aallot murtuvat eri aikaan.

2.3.2 Aaltorefraktio ja -diffraktio

Aaltorefraktiota tapahtuu, kun aalto saavuttaa matalan veden ja aallonpohjan vauhti hidastuu (Holden 2017). Veden syvyyden pitää olla alle puolet aallon korkeudesta, jotta refraktiota

tapahtuu (Flinn 1997). Kun aalto on saapunut tarpeeksi matalaan veteen, sen etenemisnopeus hidastuu, sillä syvässä vedessä aalto etenee nopeammin kuin matalassa vedessä (Davidson-Arnott 2011). Tästä syystä aalto käyttäytyy eri veden syvyyksissä eri tavoin. Matalassa vedessä aallonharja suuntautuu kohtisuoraan vedenalaisen topografian mukaisesti, mikä saa aikaan aallon etenemissuunnan muuttumisen.

Rantaviivan ollessa hyvin yksinkertainen, aallot ovat lähes samansuuntaisia vedenalaiseen topografiaan nähden ja täten saapuvat rantaan rannan suuntaisesti (Davidson-Arnott 2011). Tällöin aaltoenergiassa ei synny rannansuuntaista vaihtelua. Rantaviivan ollessa mutkitteleva, aallot kääntyvät rantaviivan mukaan, jolloin myös energia keskittyy eri kohtiin rantaviivaa. Tällöin refraktio on hyvin monimutkainen prosessi, jolloin aalloissa voidaan havaita useita eri aallon korkeuksia (Holden 2017). Rantaviivan muodon lisäksi refraktioon vaikuttaa vedenalainen topografia. Jos pohjan topografia on hyvin epäsäännöllinen, aaltojen koko ja energiamäärä voivat vaihdella hyvin suuresti.

Toinen prosessi, joka vaikuttaa aaltojen etenemissuuntaan on aaltodiffraktio (Burchart ym. 2007). Aaltorefraktion liittyessä veden syvyyteen, aaltodiffraktio liittyy energian jakautumiseen kohtisuorasti aallon etenemissuuntaan nähden. Diffraktiota tapahtuu, kun aaltojen etenemissuunnalla on jokin este, esimerkiksi saari tai aallonmurtaja. Tällöin aaltoenergia siirtyy esteiden suojaisille puolille aiheuttaen aaltojen kasautumisen suojaiselle puolelle. Diffraktiota tapahtuu siis lähinnä syvässä vedessä, sillä se on veden syvyydestä riippumaton prosessi (Flinn 1997). Aaltojen etenemissuunta muuttuu lähinnä esteen leveydeltä eli vain pieneltä alueelta.

2.4 Tyrskyvyöhyke

2.4.1 Määritelmä

Tyrskyvyöhyke (surf zone) tarkoittaa rannan tuntumassa olevaa vyöhykettä, jossa aallot murtuvat (Dally 2005). Tyrskyvyöhyke sijaitsee huuhtoutumisalueen ja sen kohdan välissä, jossa aallot alkavat murtumaan. Tyrskyvyöhyke on osa rantavesialuetta ja kattaa siitä noin puolet. Syvimmillään se on kahden aallon korkeuden verran, kuitenkin madaltuen rantaa kohden (Feddersen & Trowbridge 2005).

Tyrskyvyöhykkeestä voidaan tunnistaa kolme eri aluetta sellaisilla rantavyöhykkeillä, joilla on leveä tyrskyvyöhyke (Davidson-Arnott 2011). Ensimmäinen alue on merenpuoleinen alue,

jossa aaltojen korkeus sekä muoto muuttuu rajusti aaltojen murtumisen seurauksena. Toinen alue on meren ja rannan välissä. Tällä alueella on paraikaa murtuvia aaltoja ja murtumisesta johtuvaa vaahtoa. Tällä alueella aallon korkeuden ja muodon muutokset ovat vähäisiä ja hitaita. Kolmannella alueella vesi kulkeutuu huuhtoutumisalueelle. Aallot ovat tällä viimeisellä alueella hyvin matalat ja vesi huuhtoutuu rantaa pitkin eli murtuminen on tapahtunut jo ennen veden tuloa tälle alueelle.

2.4.2 Hydrodynamiikka

Aaltojen murtumisen yhteydessä niiden energia vapautuu tai muuttaa muotoa (Holden 2017). Tyrskyvyöhyke onkin energian vapautumisen näkökulmasta tärkein rannan alue (Martins ym. 2017). Vapautunut energia siirtyy rantavedessä virtaaviin virtauksiin, sedimentin kuljetukseen sekä veden muuhun liikkeeseen, kuten roiskeisiin, ja murtumisessa syntyvään ääneen. Energian siirtymisen takia tällä vyöhykkeellä onkin havaittavissa vahvoja virtauksia (Wilson 2014). Näiden virtauksien nopeuteen vaikuttaa aaltojen murtumisesta vapautuneen energian määrä. Aaltojen murtumisesta vapautunut energia vaikuttaa myös tyrskyvyöhykkeen hydrodynamiikkaan. Vapautunut energia muuttaa jatkuvasti niin ajallisesti kuin myös spatiaalisesti hydrodynamiikkaa (Inch ym. 2014) ja on näin yksi tärkein tyrskyvyöhykkeen hydrodynaamisista piirteistä (Sáez ym. 2021).

Tyrskyvyöhykkeen hydrodynamiikan mittaukset ovat tärkeitä, sillä niiden avulla voidaan esimerkiksi määrittää mahdollisten myrskyjen vaikutuksia rantaan (Sridevi ym. 2019), mallintaa rantaviivan muutoksia sekä kehittää rannikon hoitosuunnitelmia (Inch ym. 2014). Mittaukset voidaan jakaa kahteen osa-alueeseen, suuntaamattomiin aaltomittauksiin (non-directional wave measurements) sekä suunnattuihin aalto- ja virtausmittauksiin (directional wave and current measurements). Suuntaamattomissa aaltomittauksissa mitataan aallonpinnan korkeutta, jolloin saadaan tietoa aallonkorkeudesta ja -periodista. Mittaukset tehdään tyrskyvyöhykkeen pohjaan asennetuilla paineantureilla. Suunnatuissa aalto- ja virtausmittauksissa tutkitaan taas rantavirtausten ja aaltojen suuntaominaisuuksia. Näitä mittauksia tehdään muun muassa kenttähavainnoilla.

2.4.3 Tyrskyvyöhykkeen leveyteen vaikuttavat tekijät

Tyrskyvyöhyke on hyvin dynaaminen alue ja sen leveyteen ja muihin ominaisuuksiin vaikuttavat vallitseva tuulen suunta ja nopeus ja vuoroveden sekä aaltojen ominaisuuksien

muutokset ja rannan muoto (Inch ym. 2014). Vyöhykkeen dynaamisuudesta esimerkkinä on maatuuli, joka siirtää aaltojen murtumiskohtaa kauemmas rannasta sekä muuttaa aallon murtumissyvyyttä, samalla vaikuttaen tyrskyvyöhykkeen ominaisuuksiin (Feddersen & Veron 2005). Lisäksi tyrskyvyöhykkeiden ominaisuudet vaihtelevat rantavyöhykkeen ominaisuuksien mukaan (Wright 1984). Tyypillisesti, jos ranta on loiva ja sedimenttinä on hiekka tai savi, tyrskyvyöhyke on leveä. Jyrkillä rannoilla, joilla maalaji on karkea hiekka tai sora sekä kalliorannoilla, tyrskyvyöhyke on tyypillisesti huomattavasti kapeampi (Davidson-Arnott 2011). Lisäksi jyrkillä rannoilla hajoavien ja syöksyvien aaltojen yhteydessä tyrskyvyöhyke saattaa jäädä kokonaan välistä. Tällöin aallon murtumisen jälkeen on heti huuhtoutumisalue.

Aaltojen ominaisuuksien vaikutus tyrskyvyöhykkeen leveyteen näkyy muun muassa siten, että mitä korkeammat aallot ovat, sitä leveämpi tyrskyvyöhyke on ja, mitä matalammat aallot ovat, sitä kapeampi tyrskyvyöhyke on (Sridevi 2019). Aaltojen vaikutus tyrskyvyöhykkeen leveyteen nähdään myös aaltorefraktiossa, mikä johtuu murtuvan aallon voimakkuuden ja nopeuden muuttuessa refraktion yhteydessä (Davidson-Arnott 2011).

2.4.4 Tyrskyvyöhykkeen virtaukset

Tyrskyvyöhykkeellä aallon energia joko muuttaa muotoaan tai siirtyy toisaalle aaltojen murtumisen seurauksena (Holden 2017). Suuri osa tästä energiasta muodostaa tyrskyvyöhykkeen virtaukset sekä sedimentin kuljetuksen. Aaltojen energiamäärän kasvaessa myös tyrskyvyöhykkeen virtauksien energiamäärä kasvaa. Tämän takia voimakkaimmat virtaukset havaitaan usein myrskyjen yhteydessä.

Tyrskyvyöhykkeellä havaitaan kolme erilaista virtaustyyppiä. Ensimmäinen näistä on rannan myötäinen virtaustyyppi (longshore current), joka kulkee yhdensuuntaisesti rantaviivan kanssa (Hanes 2022). Virtaukseen vaikuttaa rantaan vinosti saapuvat aallot. Aallon energian kasvaessa virtaus voimistuu sekä silloin, kun aaltojen tulokulma jyrkkenee rantaan nähden. Lisäksi tuuli vaikuttaa virtauksen voimakkuuteen siten, että tuulen puhaltaessa virtauksen suunnan mukaisesti, sen voimakkuus kasvaa.

Toinen virtaustyyppi on paluuvirtaus (bed return flow) (Holden 2017). Aaltojen hajotessa tyrskyvyöhykkeellä ja veden huuhtoutuessa huuhtoutumisalueella, vesi aiheuttaa virtauksen rantaa kohden (Davidson-Arnott 2011). Tätä rantaan päin kohdistuvaa virtausta tasapainottaa merta kohti kohdistuva virtaus. Rantaa kohden tapahtuva veden huuhtoutuminen tapahtuu

veden yläosassa ja veden alaosassa taas tapahtuu merta kohden suuntautuva paluuvirtaus (Holden 2017).

Kolmas virtaustyyppi on repivä virtaus (rip current), joka on voimakas ja kapea virtaus (Castelle 2016). Nämä virtaukset kulkeutuvat kapeina virtoina tyrskyvyöhykkeen läpi. Virtaukset ovat hyvin komplekseja, sillä niiden välissä vesi virtaa eri suuntaan. Tämä tekee repivistä virtauksista hyvin vaarallisia muun muassa uimareille.

Tyrskyvyöhykkeellä syntyvät virtaukset ovat voimakkuudeltaan erilaisia (Holden 2017). Rannan suuntaisen virtauksen voimakkuus voi olla jopa 1 m/s^{-1} , kun taas paluuvirtausten voimakkuus on suurimmillaan vain 0.5 m/s^{-1} . Useimmiten paluuvirtausten voimakkuus on 0.1 m/s^{-1} – 0.3 m/s^{-1} . Repivät virtaukset ovat virtauksista kaikista vahvimpia ja niiden voimakkuus voi olla jopa 2 m/s^{-1} . Tavallisesti niiden voimakkuus kuitenkin on 0.5 m/s^{-1} – 1 m/s^{-1} . Repivän virtauksen tapauksessa vuorovedellä on myös merkitystä, sillä ne voimistuvat laskuveden aikaan.

2.4.5 Sedimentin kulkeutuminen

Osa murtuvien aaltojen energiasta siirtyy tyrskyvyöhykkeellä sedimentin kuljetukseen (Davidson-Arnott 2011). Rannanmyötäiset ja repivät virtaukset ovat molemmat tarpeeksi voimakkaita muokkaamaan tyrskyvyöhykettä sedimentin kulutuksen ja kuljetuksen kautta. Tyrskyvyöhykkeen virtauksien aiheuttamaa sedimentin kuljetusta kutsutaan rantavyöhykesiirroksi (littoral drift). Se kuljettaa vuosittain kymmenestä tuhannesta sataan tuhanteen kuutiometriä sedimenttiä. Virtauksien lisäksi murtuvista aalloista johtuva liike kuljettaa sedimenttiä tyrskyvyöhykkeelle ja pois sieltä. Tyrskyvyöhykkeellä tuulen sekä vuoroveden aiheuttamat virtaukset voivat myös kuljettaa sedimenttiä, mutta niiden rooli on hyvin pieni (Davidson-Arnott ym. 2019).

Sedimentin kuljetuksen määrään vaikuttaa monia tekijä (Davidson-Arnott ym. 2019). Vallitsevien tuulten sekä aaltojen ominaisuudet vaikuttavat suuresti sedimentin kuljetuksen määrään, sillä sedimentin kulkeutumisen määrä määräytyy aalloista vapautuvan energian mukaan. Täten, mitä kovemmat vallitsevat tuulet, ja näin, mitä voimakkaammat aallot ovat, sitä enemmän sedimenttiä kulkeutuu. Tuulen ja aaltojen ominaisuuksien lisäksi rantatyyppi vaikuttaa sedimentin kuljetuksen määrään (Hesp 2016). Suurin määrä sedimenttiä kulkeutuu

aallokkoa heikommin heijastavilla rannoilla, kun taas voimakkaammin heijastavilla rannoilla sedimentin kulkeutuminen on vähäisempää.

2.5 Tyrskyvyöhykkeen kaukokartoitus

2.5.1 Soveltuvat kaukokartoitusmenetelmät

Aaltojen murtumisen kaukokartoitus on tärkeää, sillä aaltojen murtumisen hydrodynamikalla on suuria vaikutuksia rantavyöhykkeeseen (Sáez ym. 2021). Murtuvat aallot aiheuttavat rannoilla esimerkiksi eroosiota sekä muita haasteita, joita voidaan mallintaa kaukokartoituksella (De Vries ym. 2011). Rannikkoalueiden hallinta, merenkulun ala sekä rannikkoalueiden turvallisuus perustuvat erilaisiin mittauksiin, joista kaukokartoitus on yksi tärkeä osa. Ilman kaukokartoitusta on mahdotonta ymmärtää murtuvien aaltojen hydrodynamikan vaikutusta rantavyöhykkeeseen sekä myös tarkemmin rannan olosuhteisiin.

Satelliittikuvat soveltuvat aaltojen kaukokartoitukseen varsin hyvin, sillä niiden spatiaalinen ja ajallinen kattavuus on varsin laaja sekä niiden spatiaalinen resoluutio on hyvin korkea (Martins ym. 2017). Satelliittikuvilla voidaankin siis varsin tehokkaasti tunnistaa aaltojen sijainti ja suunta, mutta aallon geometriaa kuvista ei pysty tunnistamaan. Tähän ongelmaan on ajateltu LiDAR-skannerien tuovan ratkaisun. Niiden avulla on voitu tyrskyvyöhykkeellä tunnistaa aaltojen geometriakin varsin tarkasti. Aalloista on saatu skannattua niiden korkeus, kallistus (skewness) sekä niiden epäsymmetria. Näin pystytään määrittämään tarkka aallonmurtumisen kohta tyrskyvyöhykkeellä. Tämä on huomattava asia, sillä tyrskyvyöhykkeen merenpuoleisen rajan määrittäminen on tärkeää energian muuntumisen näkökulmasta.

Kaukokartoitusinstrumenttien optista- sekä mikroaaltotekniikkaa voidaan hyödyntää tunnistettaessa murtuvia aaltoja tyrskyvyöhykkeeltä (Catalan ym. 2011). Optinen- ja mikroaaltotekniikka perustuvat eri aallonpituuksien heijastusarvoihin eli kohteet heijastavat signaalia eri tavoin ja näin saavat eri heijastusarvot. Optinen- ja mikroaaltotekniikka eroavat toisistaan niiden hyödyntämällä aallonpituuksilla. Optisessa tekniikassa käytetään muun muassa näkyvän valon sekä lähi-infrapun aallon pituuksia (Optical remote sensing s.a.). Tässä tekniikassa haittapuolena on kuitenkin pilvien tuomat näköesteet. Mikroaalloja hyödyntävässä teknologiassa taas käytetään 1 cm – 1 m aallonpituuksia (Microwave remote sensing s.a.). Tunnetuin mikroaaltotekniikkaa hyödyntävä instrumentti on SAR-sensori, joka saa kuvattua kohteita pilvipeitteestä huolimatta.

Optisessa kaukokartoituksessa aaltojen murtumisen pystyy havaitsemaan murtumisesta aiheutuvasta valkoisesta vaahdosta (Catalan ym. 2011). Tutkimuksissa, joissa tyrskyvyöhykkeen aaltojen heijastavuutta on tutkittu, on huomattu, että vaahdolla on suuri albedo ja näin ollen myös korkea heijastavuus. Täten murtuvien aaltojen sijainti pystytään erottamaan muusta vesialueesta, sillä muu vesialue ei heijasta yhtä paljon kuin vahto. Kuitenkin murtumisesta johtuva aalto tuottaa vaikeuksia tunnistaa aallon tarkkaa murtumispaikkaa sekä ajankohtaa, sillä kuvista ei pysty erottamaan onko vahto peräisin aallonharjasta, eli ei vielä murtuneesta aallosta, vai jo murtuneesta aallosta.

Mikroaaltotekniikkaa hyödyntävässä kaukokartoituksessa takaisinheijastuminen perustuu joko Braggin sirontaan tai yhdistettyyn pintateoriaan (composite surface theory, CST) (Catalan ym. 2011). Kuitenkin monessa tapauksessa takaisinheijastuminen ei vastaa kumpaakaan edellä mainittua mallia eli joukossa on poikkeavuuksia. Ne on huomattu johtuvan murtuvista aalloista, minkä takia näitä poikkeavuuksia käytetään murtuvien aaltojen tunnistamiseen kuvista.

Kaukokartoitusinstrumenteilla, jotka hyödyntävät sähkömagneettisen säteilyn eri aallonpituuksia on aallon murtumisen tunnistuksessa etuina muun muassa laaja spatiaalinen kattavuus sekä korkea näytteenottotiheys (Sáez ym. 2021). Haittapuolena taas on mahdollisuus altistua virhesignaaleille, kuten aallon murtumisesta aiheutuva jälkivahto tai jyrkistyvien aaltojen huono näkyvyys kuvissa. Kuitenkin tästä haittapuolesta on mahdollisuus päästä eroon yhdistämällä sensoreita keskenään, jolloin kahden eri sähkömagneettisen aallonpituuden sensorit yhdistetään ja asetetaan tietyt kynnsarvot. Näin aallon murtumisen eri vaiheet saadaan erotettua toisistaan.

Aallon murtumiskohta tyrskyvyöhykkeellä voidaan määrittää esimerkiksi GVM-metodilla (Martins ym. 2017). Siinä LiDAR-kuvista erotetaan hyvin pienet muutokset murtuneen aallon etureunassa ja tämän avulla lasketaan paikka, jossa aalto murtuu. Tässä mallissa tarkastellaan vedenpinnan tasaisuutta sekä spatiaalista gradienttia. Muutokset näissä muuttujissa kertovat lopulta aallon murtumisen paikan tyrskyvyöhykkeellä.

2.5.2 Kaukokartoituksen haasteet eri ympäristöissä ja olosuhteissa

Yleisesti tyrskyvyöhykkeen kaukokartoitus on vaikeaa tyrskyvyöhykkeen dynaamisen olemuksen takia (Martins ym. 2017). Aaltojen geometria muuttuu hyvin nopeasti aallon murtuessa sekä aallon murtumiskohta siirtyy muun muassa veden korkeuden muuttuessa. Nämä

ominaisuudet vaikeuttavat tyrskyvyöhykkeen kaukokartoitusta. Nykyään kaukokartoitus dataa saadaan suuremmalla frekvenssillä, mutta satelliitit silti kuvaavat vain yhden tilanteen hyvin dynaamisesta tyrskyvyöhykkeestä (De Vries ym. 2011).

Optisessa kaukokartoituksessa ympäristöolosuhteet sekä instrumentin ominaisuudet vaikuttavat suuresti satelliittikuvien laatuun ja näin murtuvien aaltojen tunnistukseen (Catalan ym. 2011). Koska optisessa kaukokartoituksessa kohteet tunnistetaan heijastusarvojen perusteella, auringon kulman muutokset sekä pilvipeite vaikuttavat tuloksiin. Kohteiden heijastusarvojen laskeminen ei onnistu pilvipeitteen läpi, sillä signaali ei läpäise sitä. Heijastusarvojen vääristymiä aiheuttaa myös murtuvista aalloista syntyvä vaahdon määrä, sillä vahto voi pysyä rannassa usean murtuvan aallon ajan ja näin vääristää heijastavuuksia. Instrumentin ominaisuuksista taas muun muassa kameran kulma sekä sulkiijan nopeus vaikuttavat kaukokartoituksen tuloksiin.

Mikroaaltoteknologiassa havaitut poikkeavuudet takaisinheijastuksessa liittyvät murtuvien aaltojen tunnistukseen (Catalan ym. 2011). Kun kuviin asetetaan tietyt raja-arvot, poikkeavuuksia ilmenee entistä enemmän. Tämä johtuu siitä, että murtuvien aaltojen sekä murtumattomien jyrkkien aaltojen heijastusarvot yhdistyvät. Lisäksi mikroaaltojen käytössä on ongelmana se, että takaisinheijastuspoikkeavuuksia on tutkittu lähinnä syvän veden aalloissa, joten mallia ei välttämättä pysty soveltamaan suoraan tyrskyvyöhykkeen aaltoihin murtumisen dynamiikan muutosten takia.

2.5.3 Tyrskyvyöhykkeen kaukokartoituksen merkitys

Ranta-alueet ovat suosittua aluetta ja niiden käyttö kasvaa enenemissä määrin jatkuvasti (Hume ym. 2019). Tämä luo kasvavaa painetta ranta-alueiden parempaan suunnitteluun sekä hallintaan. Rantojen eroosio sekä tulviminen myrskyjen aikana ovat esimerkkejä, minkä takia rantojen käyttöä pitää pystyä suunnittelemana tehokkaammin (de Vries ym. 2011). Tyrskyvyöhyke on rannan energian vapautumisen kannalta tärkein alue, joten se muokkaa rantaa niin aaltojen kuin myös virtausten kautta (Martins ym. 2017). Tyrskyvyöhykkeen aaltojen ominaisuuksien muuttuessa myös vapautuvan energian määrä muuttuu. Tyrskyvyöhykkeen dynaamisen olemuksen takia sen mallintaminen eri keinon onkin tärkeää ranta-alueiden suunnittelun kannalta.

Ranta-alueiden ja tyrskyvyöhykkeen käytön lisääntymisen kautta aaltojen ominaisuuksien määrittäminen ja tyrskyjen tunnistaminen hyödyttää myös ranta-alueiden turvallisuuden parantamista (de Vries ym. 2011). Aalloista vapautuu murtuessaan energiaa tyrskyvyöhykkeellä, mikä saa aikaan tyrskyvyöhykkeen virtaukset (Holden 2017). Aaltojen ominaisuuksien muuttuessa myös niistä vapautuvan energian määrä muuttuu. Tästä seuraa myös tyrskyvyöhykkeen virtausten voimakkuuden muutokset. Nämä virtaukset saattavat olla turvallisuusriski tyrskyvyöhykkeellä (Kennedy ym. 2013).

Pitkän aikavälin kontekstissa tyrskyvyöhykkeen kaukokartoituksesta on hyötyä esimerkiksi eroosion näkökulmasta (Hume ym. 2019). Tyrskyvyöhykkeellä tapahtuu merkittävää sedimentin kulkeutumista sekä kasautumista, riippuen rantatyypistä sekä murtuvista aalloista vapautuvan energian määrästä (Longo ym. 2002). Sedimentin liikkumisen myötä eroosiota tapahtuu niin rannoilla kuin myös tyrskyvyöhykkeen alueella. Lisäksi sedimentin liikkuminen muokkaa rantoja siten, että rantatyypikin saattaa muuttua ajan kuluessa. Tyrskyvyöhykkeen kaukokartoitus onkin tämän seuraamiseen hyvä työkalu, sillä esimerkiksi satelliittikuvien kautta saadaan sopivalla intervallilla kuvia, jotta muutosta voidaan seurata.

2.6 Suomen rannikot

Suomen rannikon suora pituus on 1100 kilometriä, mutta saaret mukaan lukien rantaviivan pituus on 46 000 kilometriä (Ympäristöministeriö 2006). Suomen rannikkoalueelle tyypillinen piirre onkin rantaviivan vaihtelevuus saarien, lahtien ja niemien takia. Suomen rannikkoalueen leveys vaihtelee suuresti eri puolilla maata, sen ollessa levein Saaristomerellä ja kapein taas Selkämeren saarettomalla rannikolla. Suurin osa rannikosta on kalliorantaa, jota esiintyy koko Suomen rannikkoalueella (Labuz 2015). Saaristomerellä ja pienissä määrin Pohjanlahdella sekä Suomenlahdella taas esiintyy hiekkakerrostumia. Moreenirantoja esiintyy itäisellä Suomenlahdella ja matalikkoja Helsingin edustalla ja Porin läheisyydessä.

Suomen eteläinen rannikkoalue Suomenlahdella on hyvin vaihtelevaa koostuen saarista, niemistä ja lahdista (Vallius 2015). Merenpohja on myös hyvin vaihtelevaa syvyydeltään. Tämä on johtanut monen pienen vesialueen muodostumiseen, jotka erottuvat toisistaan juuri saarien, niemien ja lahtien takia. Tämä vaikuttaa sedimentin kuljetukseen ja lähellä pohjaa kulkeviin virtauksiin. Sedimentin kulkeutuminen vaihtelee paikan mukaan muun muassa kulkeutumistavan ja määrän mukaan. Matalassa vedessä sedimentin kasautuminen on suurempaa kuin syvässä vedessä. Pohjanlahti taas on kokonaisuudessaan matala merialue.

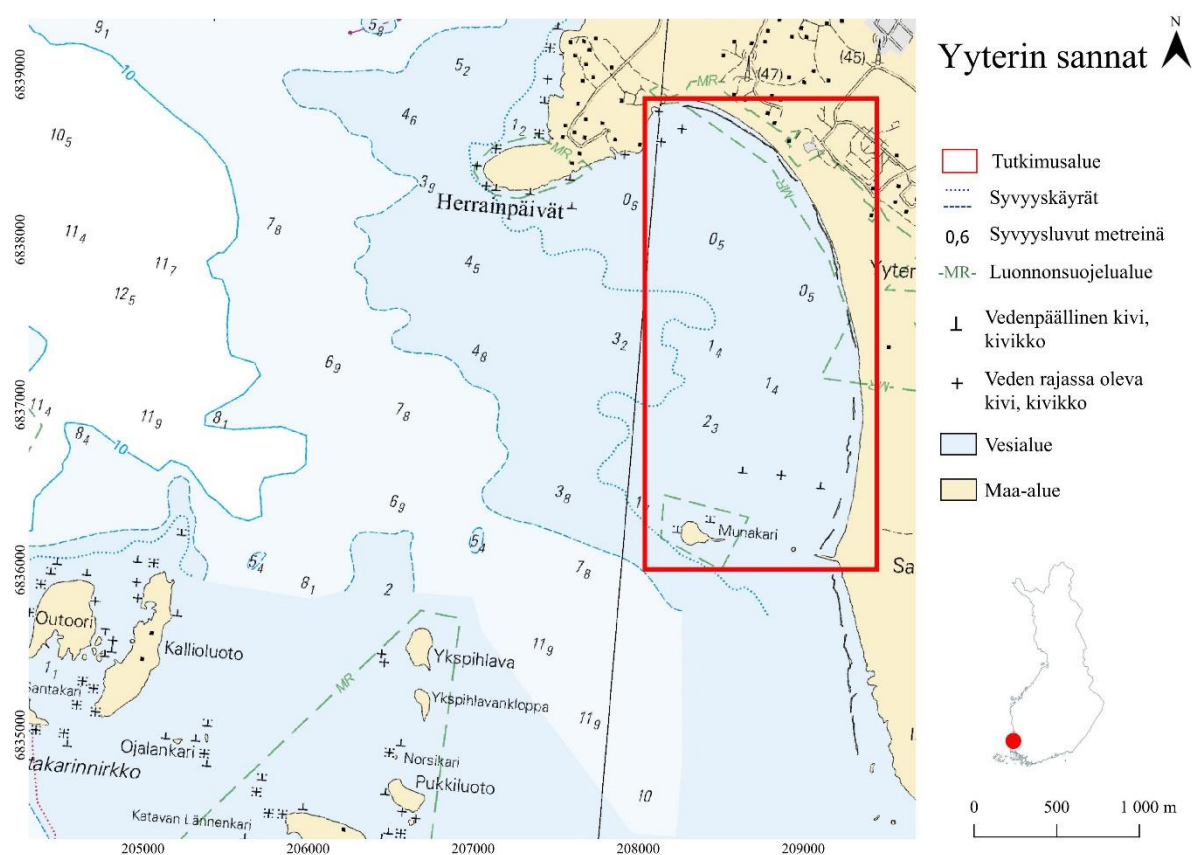
Pohjanlahden pohjoisin osa on koko Pohjanlahden matalin merialue (Szaniawska 2017). Sen keskisyvyys on 42 metriä ja maksimisyvyys on 141 metriä. Meren pohja on tasaista. Noin viidenkymmenen metrin syvyyteen maalajina on hiekka ja sen jälkeen savi, jonka päällä on eri kokoisia kiviä. Etelämmässä taas suurin syvyys on 294 metriä. Nämä kaksi merialuetta erottaa toisistaan Merenkurkku. Etelässä merenpohjassa on eri syvyisiä painaumia.

Suomen rannikoilla on sen monimutkaisen rantaviivan lisäksi myös muita erityispiirteitä. Ensimmäinen on Suomen rannikkojen muuttuvaa ilmettä määrittelevä maankohoaminen (Ympäristöministeriö 2006). Maa kohoaa Merenkurkun ja Perämeren rannikoilla noin kahdeksan millimetriä ja Suomenlahdella noin kaksi millimetriä vuodessa. Tämä johtaa rantaviivan siirtymiseen ja uusien maa-alueiden paljastumiseen. Onkin havaittu, että maankohoamisen vuoksi Pohjanlahdella rantakasvillisuuden sukkessio on varsin nopeaa, sillä niiden pitää muuttuvan ympäristön vuoksi kehittyä jatkuvasti. Toinen Suomen rannikoiden erityispiirre on vuorovesi-ilmiön puuttuminen, lukuun ottamatta Strömman kanavaa (Ryabchuk 2011). Suomen rannikkoalueita ei vuoroveden lasku ja nousu pääse siis muokkaamaan.

Itämeri, ja näin myös Suomen merialueet, on hankala merialue tutkia aaltojen näkökulmasta, sillä rantaviiva on monimutkainen ja tuulten ominaisuudet vaihtelevat spatio-temporaalisesti hyvin suuresti (Hünicke ym. 2015). Lisäksi Itämeren jäätyminen talvisin vaikuttaa vallitseviin aaltoihin. Itämeri on myös hyvin matala meri. Kun tämän yhdistää muuttuviin tuuliolosuhteisiin, odottamattoman korkeita aallonkorkeuksia voidaan havaita. Tämä johtuu siitä, että aaltoenergia keskittyy tiettyyn paikkaan. Suurilta osin Itämeren aallokko on tasaista ja matalaa. Avomerellä aallon korkeudet ovat suurimmaksi osaksi metrin luokkaa ja suurissa lahdissa 0,6–0,8 metriä ja suojaisissa pienemmissä lahdissa 0,5 metriä. Rantavyöhykkeellä aallon korkeudet ovat 10–20 prosenttia pienemmät edellä mainittuihin aallon korkeuksiin verrattuna. Saaristomerellä aallon korkeudet ovat 0,5 metrin, Pohjanlahdella 0,5–0,8 metrin ja Suomenlahdella 0,5–0,7 metrin luokkaa. Itämerellä tavataan myös ajoittain hyvin korkeita aallon korkeuksia myrskyjen yhteydessä. Tällöin jopa hyvinkin suojaisat lahdet saattavat kokea korkeita aaltoja, kun myrskyä tietystä suunnasta. Aaltojen tyypillinen periodi rannikkoalueella on 2–4 sekuntia ja avomerellä 3–5 sekuntia. Maininkeja ei juurikaan esiinny.

3 Tutkimusalueet

Valitsin ensimmäiseksi tutkimusalueeksi Yyterin sannat, joka sijaitsee Porissa, Yyterinniemen lounaisrannikolla Selkämeren rannalla (Nylén 2009) (kuva 1). Ranta-alue kuuluu Preivikinlahden Natura 2000 -alueeseen. Itse Yyterin sannat on noin kolmen kilometrin pituinen ja 3,75 neliökilometrin laajuinen alue. Yyterin santojen edessä avautuva Preivikinlahti on hyvin matala ja avoin merialue. Merikartan perusteella Yyterin santojen vedenalaiset pinnanmuodot ovat hyvin loivat, minkä takia rannasta noin 500 metrin päässä on yhä alle metrin syvää ja kilometrinkin päässä on vain muutama metri syvää (kuva 1). Yyterin sannoille puhaltaa länsi- ja lounaistuulet, mutta aaltojen energia hupenee jo kaukana matalalla ulapalla.

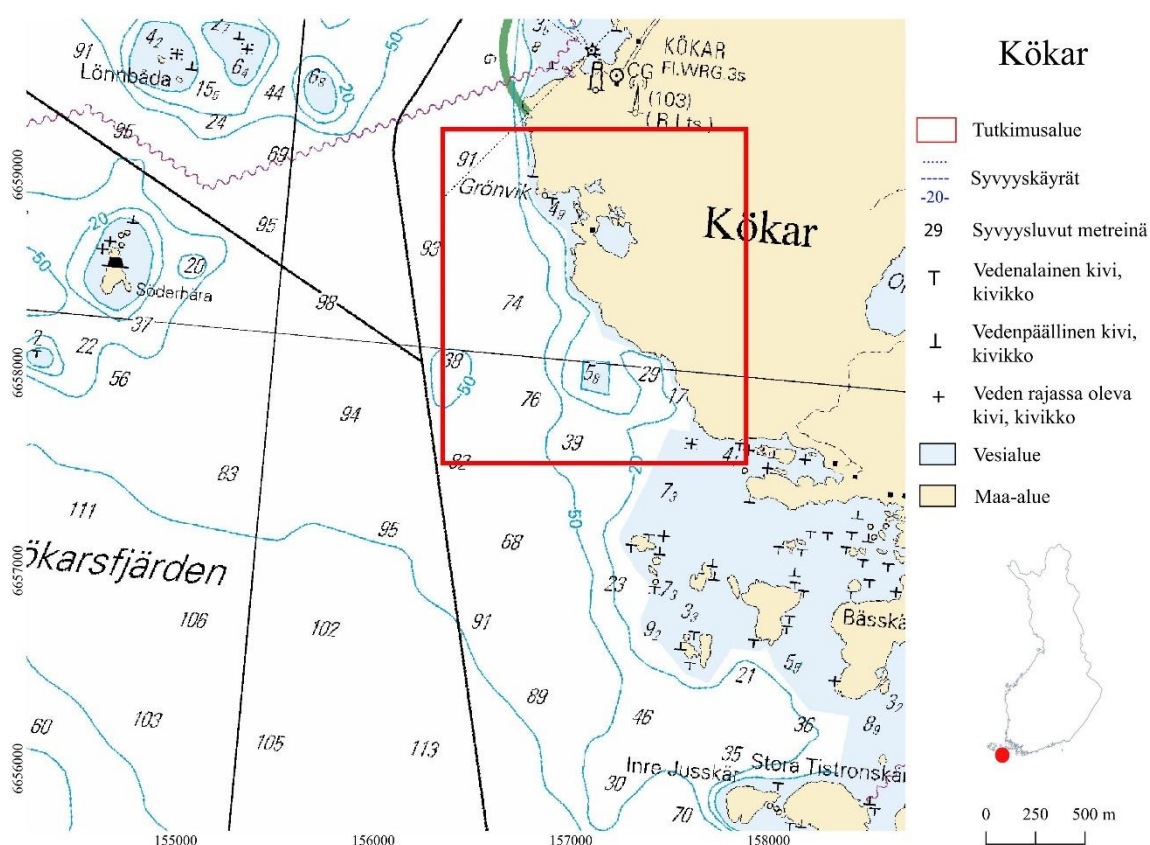


Kuva 1. Yyterin santojen tutkimusalue ja sen edustan vedensyvyysolosuhteet. Pohjakartta: Merikartta F-osio (Merenkurkku) Liikenne – ja viestintävirasto Traficom Creatice Commons 4.0 Nimeä -lisenssi CC 4.0 BY, aineisto ladattu Traficomien katselu- ja latauspalvelusta 8.11.2024.

Yyterin santojen aluetta on syytä suojella sen erityisiin luontoarvoihin kuuluvan dyyniluonnon takia (Nylén 2009). Koko Yyteri kuuluu Natura 2000 mukaiseen luontodirektiiviin. Yyterin dyynit ovat Suomen mittakaavassa harvinaisia, sillä Suomen rannikoilla dyynejä on vain 1300 hehtaaria. Yyterin dyyneissä oleva hiekka-aines on peräisin Yyterin luona sijaitsevasta merenalaisesta harjumuodostumasta. Tämän lisäksi dyynien syntymistä on edesauttanut Yyterin santojen

loivapiirteisyys ja rannan avoimuus länteen eli vallitsevien tuulten suuntaan. Yyterin santojen alueella on tunnistettu seitsemän eri dyyniluontoon liittyvää luontotyyppiä. Nämä kaikki luontotyypit on liitetty Natura 2000 -verkoston suojelukseseen.

Toiseksi tutkimusalueeksi valitsin Kökarin, joka sijaitsee Saaristomerellä Ahvenanmaalta kaakkoon (kuva 2). Se on Ahvenenmaan saariston kaikista ulommaisina saariryhmä ja koostuu pääsaaresta sekä lukuisista pienemmistä saarista ja luodoista. Tutkimuksessa keskityn Kökarin länsipuolella sijaitsevaan, lounaaseen päin avautuvaan ranta-alueeseen (kuva 2). Tällä alueella ranta on hyvin jyrkkä, jo hyvin lähellä rantaa 20 metriä syvää. Tästä eteenpäin ranta syvenee hyvin paljon, hyvin nopeasti ja jo alle 250 metrin päässä rannasta on 50 metriä syvää. Samalla ranta-alueella on kuitenkin myös muutamia matalampia kohtia, joista matalin on vähän alle kuuden metrin syvyinen. Tutkimusalue on myös hyvin kivikkoista.



Kuva 2. Kökarin tutkimusalue ja sen edustan vedensyvyysolosuhteet. Pohjakartta: Merikartta C-osio (Ahvenanmaa) Liikenne – ja viestintävirasto Traficom Creatice Commons 4.0 Nimeä -lisenssi CC 4.0 BY, aineisto ladattu Traficom:n katselu- ja latauspalvelusta 8.11.2024.

Valitsemalla kaksi rannan syvyysolosuhteiltaan erilaista rantaa, saadaan kattavampi kuva tyrskvyöhykkeen käyttäytymisestä, kun tuulen ominaisuudet sekä vedenkorkeus vaihtelevat. Yyterin sannot ja Kökar ovat toisiinsa verrattuna syvyysolosuhteiltaan aivan erilaiset.

4 Aineistot ja menetelmät

4.1 Aineistot

4.1.1 Kaukokartoitusaineistot

Käytin tyrskyvyöhykkeen tutkimiseen Sentinel-2 Level-1C MSI -satelliittikuvia (Multi-spectral instrument) karttalehdiltä 34VEP (Yyterin sannat) ja 34VDM (Kökar) (liite 1 ja 2). Päädyin käyttämään näitä Sentinel-2-satelliittikuvia niiden ajallisen kuin myös niiden spatiaalisen ja temporaalisen resoluution takia. Level-1C-kuvat tuote soveltuu muun muassa meri- ja rannikkoalueiden tutkimiseen, minkä takia se soveltuu tähän tutkimukseen hyvin (Sentinel-2 s.a.). CoastSat-algoritmin kautta voidaan valita myös Landsat-satelliittien kuvia, mutta niiden resoluution ollessa 30 metriä, en valinnut niitä mukaan aineistoon. Landsat-satelliittikuvien resoluutio on liian karkea tunnistamaan tyrskyt tämän tutkimuksen vaatimalla tavalla.

Sentinel-2-satelliittikuvien ajallinen kattavuus alkaa vuodesta 2015 ja jatkuu edelleen (Vos ym. 2019). Sentinel-2 satelliitteja on kaksi samalla kiertoradalla, jotta ajallinen resoluutio saadaan mahdollisimman pieneksi (S2 Mission s.a.). Satelliitit kulkevat saman kohdan yli viiden päivän välein. Yhteensä satelliiteissa olevia kanavia on kolmesta, joista neljä tuottaa 10 metrin resoluution kuvia, kuusi 20 metrin resoluution kuvia ja kolme 60 metrin resoluution kuvia. Satelliittien kuvat ovat 290 kilometrin levyiseltä alueelta.

Käyttämäni Level-1C-satelliittikuvat ovat keskiresoluutioisia ortokorjattuja kuvia (Sentinel-2 s.a.). Satelliittikuvat ovat ilmakehän yläosan reflektanssikuvia (Top-of-Atmosphere, TOA), sillä CoastSat-algoritmiin on sisällytetty tämä valinta automaattisesti (Vos ym. 2019). TOA-kuvat ovat kalibroituja, jotta niitä voidaan vertailla toisista satelliiteista saataviin kuviin. Valitsemieni satelliittikuvien resoluutio on 10 metriä. Satelliittikuvien päivämäärät vaihtelevat vuosittain, mutta kuvien otto ajankohta on kaikissa kuvissa molemmissa kohteissa kello 10.00–10.20 välillä. Satelliittikuvien koordinaattijärjestelmä on WGS84.

Saatavilla olevia satelliittikuvia jokaisen vuoden osalta molemmista kohteista on kaiken kaikkiaan 50–70 kappaletta. Näissä satelliittikuvissa on mukana kuvat, joissa tyrskyvyöhyke näkyy, mutta myös sellaisia kuvia, joissa se ei näy tai kuvat ovat muuten epäsoivia esimerkiksi pilvipiteen takia. Tutkimuksen kannalta sopivia satelliittikuvia on Yyterin sannoilta yhteensä

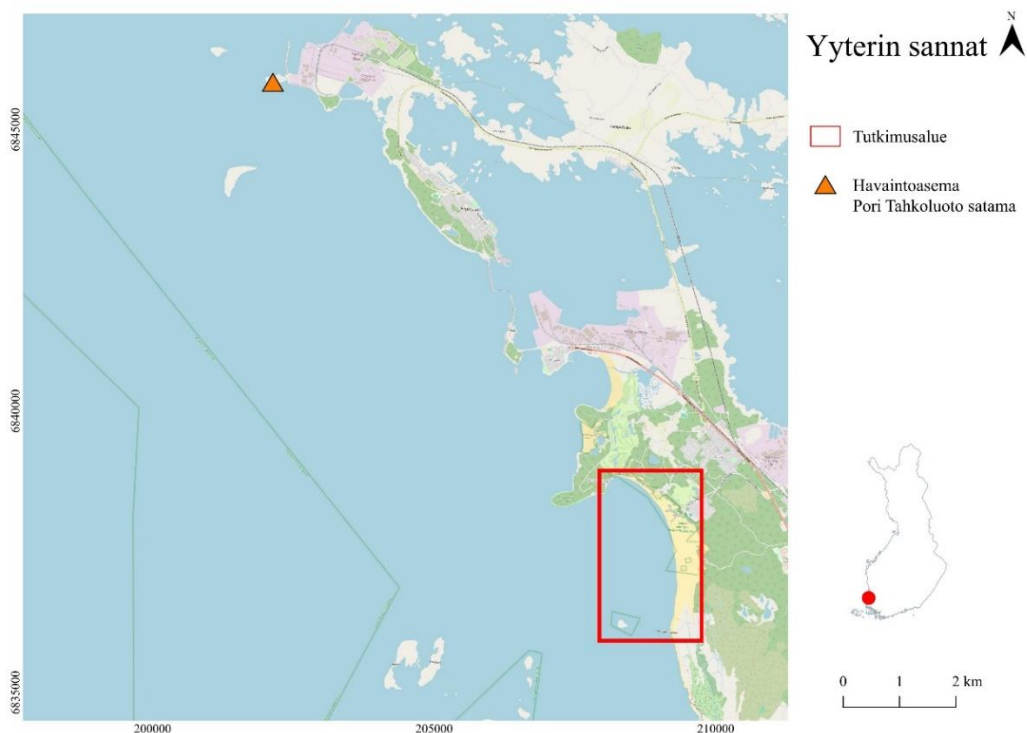
19 kappaletta ja Kökarista 29 kappaletta (liite 4 ja 5). Nämä satelliittikuvat muodostavat tutkimuksen satelliittikuva-aineiston.

4.1.2 Rannan syvyysolosuhteet

Käytin rannan syvyysolosuhteiden tarkasteluun Sailmate-palvelun tarjoamia ilmaisia merikarttoja. Rannan syvyysolosuhteiden selvittäminen oli tärkeää sopivien tutkimuskohteiden valitsemisen kannalta, sillä tarkoituksenani oli valita kaksi syvyysolosuhteiltaan toisistaan poikkeavaa kohdetta. Sailmate-palvelu on sovelluspohjainen ja vaatii tilin luomisen. Palvelun merikartat ovat rasterimuodossa, ja ne ovat muuntamattomia kopioita Liikenne- ja viestintävirasto Traficomin julkaisemista painetuista merikartoista (Nautics Sailmate käyttöehdot s.a.). Kartat päivittyvät palvelussa sitä mukaan, kun Liikenne- ja viestintävirasto Traficom julkaisee uusia merikarttoja. Koordinaattijärjestelmä kartoissa on EUREF-FIN, joka perustuu kansainvälisen merenkulun standardin mukaiseen WGS84-koordinaattijärjestelmään (Suomalaiset merikartat s.a.). Syvyudet ovat ilmoitettu metreinä. Elektronisten merikarttojen tuotanto noudattaa kansainvälistä standardia S-57, joka määrittelee elektronisten merikarttojen aineistojen teknisen toteutuksen. Yyterin sannat kuuluu merikarttasarja F-osioon (Merenkurkku) ja Kökar taas C-osioon (Ahvenenmaa). F-osio on vuoden 2023 painos ja C-osio taas vuoden 2015 painos.

4.1.3 Tuuliaineisto

Latasin tuuliaineiston koko tutkimusajanjaksolta (1.5.–31.12.) jokaiselta vuodelta (2017, 2018, 2019, 2020, 2021) hetkellishavaintoina Ilmatieteen laitoksen latauspalvelusta. Aineisto ladataan Excel-muotoisena taulukkona. Valitsin suureiksi keskituulen nopeuden sekä tuulen suunnan. Tutkimuksen kannalta nämä tuulihavainnot ovat oleellisia, sillä aallokon ominaisuudet muuttuvat tuulen ominaisuuksien muuttuessa. Havainnot voidaan ladata sekä UTC-ajassa, että myös paikallisessa ajassa. Tässä tutkimuksessa havainnot ladataan UTC-ajassa kahdelta eri havaintoasemalta, sillä satelliittikuvien ajankohdat ovat ilmoitettu UTC-ajassa. Valitsin havaintoasemiksi ”Pori Tahkoluoto satama” sekä ”Parainen Utö”, sillä molemmat sijaitsevat tutkimusalueiden läheisyydessä. ”Pori Tahkoluoto satama” -havaintoasema sijaitsee Yyterin sannoilta luoteeseen (kuva 3) ja ”Parainen Utö” -havaintoasema taas sijaitsee Kökarista kaakkoon (kuva 4).



Kuva 3. Havaintoasema ”Pori Tahkoluoto satama” suhteessa Yyterin santoihin. Pohjakartta: OpenStreetMap Creative Commons Nimeä-Jaa Samoin 2.0 -lisenssi CC BY-SA 2.0, Havaintoasema: Ilmatieteen laitos, Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen -lisenssi CC BY 4.0.



Kuva 4. Havaintoasema ”Parainen Utö” suhteessa Kökariin. Pohjakartta: OpenStreetMap Creative Commons Nimeä-Jaa Samoin 2.0 -lisenssi CC BY-SA 2.0, Havaintoasema: Ilmatieteen laitos, Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen -lisenssi CC BY 4.0.

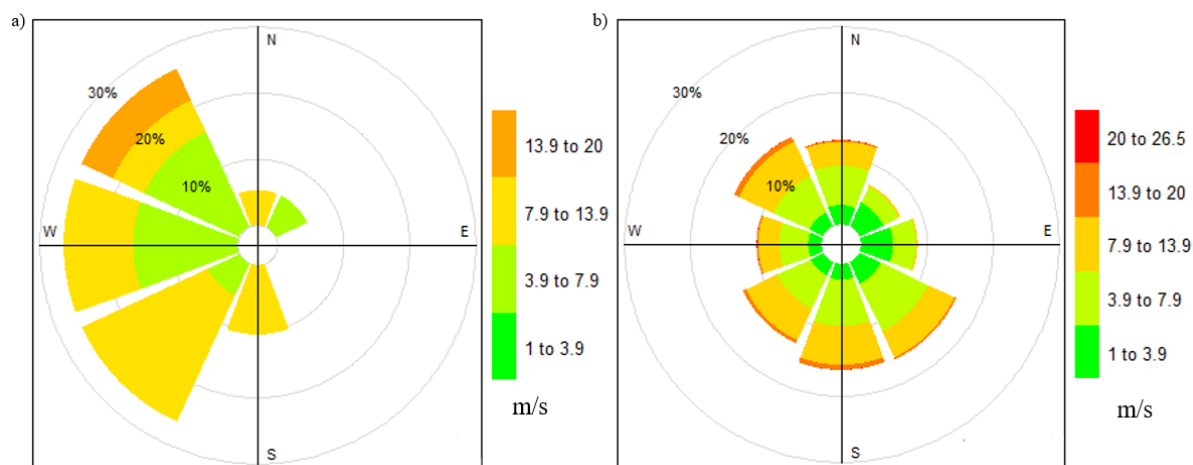
Keskituulen nopeus tarkoittaa tuulen nopeuden keskiarvoa edeltävän kymmenen minuutin ajalta (Ilmatieteen laitos 2023). Nopeus ilmoitetaan metriä/sekunnissa. Tuulen nopeuksien luokitteluun käytän Ilmatieteen laitoksen sivuilta löytyvää valmista luokittelua (taulukko

1). Tämän tutkimuksen luokitteluun valitsin tutkimuksen kannalta oleellimmat tuulen nopeudet ja jätin pois tyynen sään sekä myrskylukemien luokat.

Taulukko 1. Tuulen nopeuksien luokittelu. Lähde: Ilmatieteen laitos 2023.

Tuulen nopeus	Määritelmä
1–3 m/s	Heikkoa tuulta
4–7 m/s	Kohtalaista tuulta
8–13 m/s	Navakkaa tuulta
14–20 m/s	Kovaa tuulta

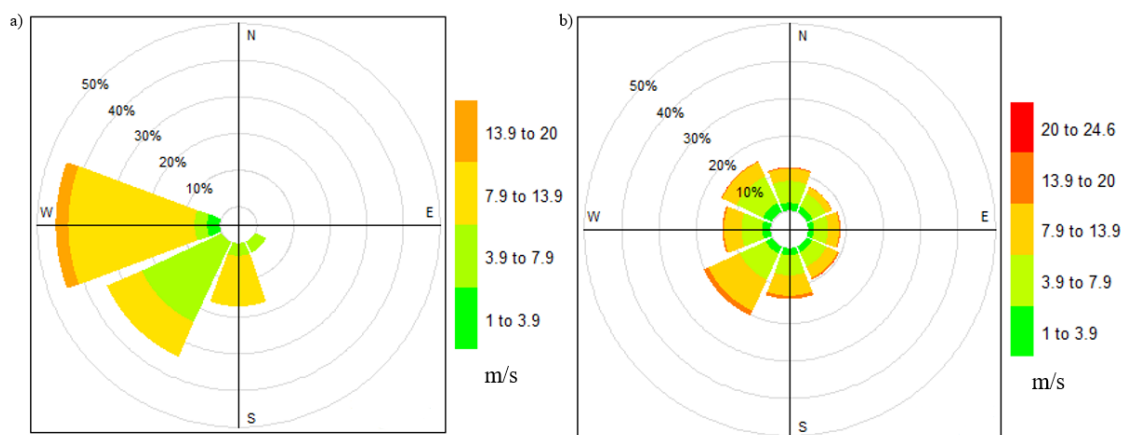
Satelliittikuvien ottohetkellä tuulen nopeudet vaihtelivat Yyterissä 4,4 m/s ja 16,5 m/s välillä (kuva 5 a). Prosentuaalisesti eniten tuulee navakasti (7,9 m/s – 13,9 m/s) ja toiseksi eniten kohtalaisesti (3,9 m/s – 7,9 m/s). Muutamissa ajankohdissa on mitattu myös kovaa tuulta (13,9 m/s - 20 m/s). Yyterissä ei yhdenkään kuvan ottohetkellä ollut heikkoa tuulta (1 m/s – 3,9 m/s). Tämä kertoo sen, että tuulen voimakkuuden pitää olla vähintään kohtalainen, jotta tyrskyt näkyvät Yyterissä. Yleisesti vuosien 2017–2022 aikana eniten on tuullut kohtalaisella nopeudella (3,9 m/s – 7,9 m/s) ja toiseksi eniten navakasti (7,9 m/s – 13,9 m/s) (kuva 5 b). Satelliittikuvien tuulen nopeudet painottuvat selkeästi eri nopeuksiin kuin kokonaiskuvassa. Heikkoja tuulia on prosentuaalisesti paljon, kun taas satelliittikuvien tuulissa niitä ei esiinny ollenkaan. Prosentuaalisesti navakoita tuulia vaikuttaa olevan suhteessa saman verran.



Kuva 5 a ja b. Tuulen nopeuksien prosenttiosuudet jaoteltuna tuulen suuntiin Yyterin sannoilla. A) Valittujen satelliittikuvien aikana vallinnut tuulen nopeus yhdistettynä tuulen suuntiin. Eniten tulee kohtalaisella nopeudella. Tuuli ei puhaltanut heikosti yhdenkään satelliittikuvan ottohetkellä eli tyrskyjä ei synny heikolla tuulella. Idästä ja koillisesta tuullessa ei myöskään synny tyrskyjä. B) Yleisesti vuosien 2017–2022 aikana vallinneet tuulen nopeudet yhdistettynä tuulen suuntiin. Eniten tuulee kohtalaisella nopeudella. Suurimmaksi osaksi tuulee kaakosta sekä etelästä. Aineisto: Ilmatieteen laitos, tuulen suunta, keskituulen nopeus, Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen -lisenssi (CC BY 4.0).

Kökarissa tuulen nopeuksien vaihtelu oli 4 m/s ja 14,7 m/s välillä (kuva 6 a). Prosentuaalisesti eniten tuulee navakasti (7,9 m/s – 13,9 m/s) ja toiseksi eniten taas tuulee kohtalaisesti (3,9 m/s

– 7,9). Muutamissa ajankohdissa havaittiin heikkoa tuulta (1 m/s – 3,9 m/s) sekä kovaa tuulta (13,9 m/s – 20 m/s). Kökarissa tyrskyjä muodostuu siis jokaisen neljän tuuliluokan nopeudella. Yleisesti vuosien 2017–2022 aikana on tuullut suunnilleen yhtä paljon kohtalaisesti (3,9 m/s – 7,9 m/s) kuin myös navakasti (7,9 m/s – 13,9 m/s) (kuva 6 b). Heikkoa tuulta on esiintynyt huomattavasti enemmän kokonaiskuvassa kuin satelliittikuvien ottohetkellä.



Kuva 6 a ja b. Tuulen nopeuksien prosentiosuudet jaoteltuna tuulen suuntiin Kökarissa. A) Valittujen satelliittikuvien aikana vallinnut tuulen nopeus yhdistettynä tuulen suuntiin. Eniten tulee navakasti lännestä. Jokaisen tuulen nopeusluokan tuulia esiintyi satelliittikuvien ottohetkellä eli tyrskyjä syntyi jokaisella tuulen nopeudella. Luode-itä väliä ei tuullut ollenkaan eli tyrskyjä ei synny, kun tuulee näistä suunnista. B) Yleisesti vuosien 2017–2022 aikana vallinneet tuulen nopeudet yhdistettynä tuulen suuntiin. Eniten tuulee kohtalaisella ja navakalla nopeudella. Suurimmaksi osaksi tuulee lounaasta. Aineisto: Ilmatieteen laitos, tuulen suunta, keskituulen nopeus, Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen -lisenssi (CC BY 4.0).

Tuulen suunnan keskiarvo tarkoittaa tuulen suunnan keskiarvoa edeltävän kymmenen minuutin ajalta (Ilmatieteen laitos 2023). Tuulen suunta ilmoitetaan 360 asteina, jossa $360^{\circ}/360^{\circ}$ tarkoittaa, että tuuli puhaltaa pohjoisesta kohti etelää ja $0^{\circ}/360^{\circ}$ tarkoittaa tyyntä. Muut tuulensuunnat ovat asteikolla 1–359 astetta. Tuulen suunnat ovat luokiteltu Ilmatieteenlaitoksen sivuilta löytyvän luokittelun mukaan (taulukko 2).

Taulukko 2. Tuulen suunnat ilmansuuntina ja niiden määritelmät asteina. Lähde: Ilmatieteen laitos 2023.

Ilmansuunta	Asteet
N	337,5°-22,5° (huom. 0/360 tarkoittaa tyyntä)
NE	22,5°-67,5°
E	67,5°-122,5°
SE	122,5°-157,5°
S	157,5°-202,5°
SW	202,5°-247,5°
W	247,5°-302,5°
NW	302,5°-337,5°

Yyterissä tuulee kaikista muista ilmansuunnista paitsi idästä ja kaakosta satelliittikuvien ottohetkellä (kuva 5 a). Kaikista ilmansuunnista eniten tuulee lounas-länsi-luode välillä. Suurimmaksi osaksi tuulee lännestä kohtalaisella nopeudella. Luoteesta tuulee kaikista voimakkaiden. Lisäksi luoteesta tuulee kohtalaisesti sekä navakasti. Etelä-länsi välillä tuulee navakasti prosentuaalisesti eniten. Pohjoisesta ja koillisestakin tuulee Yyteriin, mutta määrällisesti hyvin vähän. Tyrskyjä ei synny Yyterin sannoille, kun tuulee idästä tai kaakosta. Kokonaiskuvassa tuulee joka ilmansuunnasta, mutta eniten tuulee kaakosta sekä etelästä. Yyteriin siis tuulee kaakosta useasti, mutta nämä tuulet eivät synnytä tyrskyjä. Vähiten tuulee koillisesta, idästä sekä lännestä. Vaikka lännestä tuulee kokonaiskuvassa vähän, länsituulet kuitenkin muodostavat tyrskyjä Yyterin.

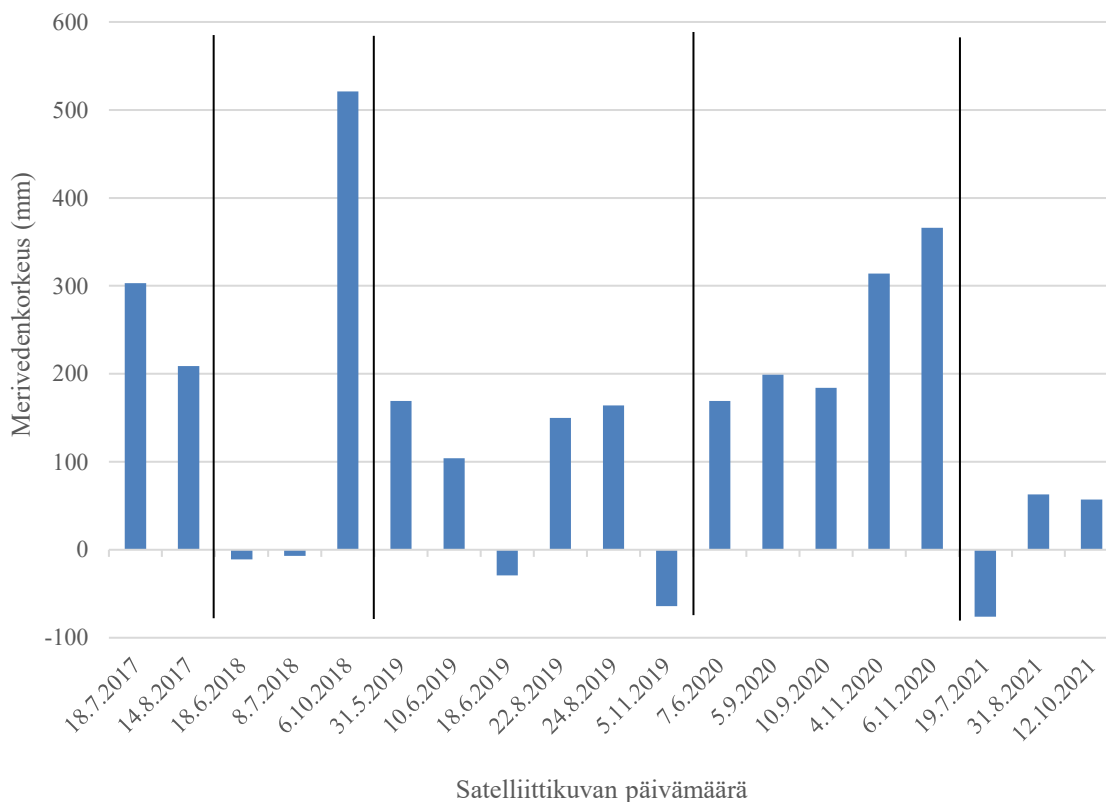
Kökarissa tuulee satelliittikuvien ottohetkellä kaakosta, etelästä, lounaasta sekä lännestä (kuva 6 b). Muista ilmansuunnista tuullessa tyrskyjä ei synny Kökariin. Vaihteluväli on siis suppeampi kuin Yyterin sannoilla. Huomattavasti eniten tuulee lännestä, jossa havaitaan kaikkien tuulen nopeusluokkien lukemia. Tyrskyjä siis esiintyy heikollakin tuulella, jos tuulee lännestä. Prosentuaalisesti suurin osa länsituulista on navakoita tuulia. Toiseksi eniten tuulee lounaasta kohtalaisesti sekä navakasti. Etelästä taas tuulee kohtalaisesti sekä navakasti, mutta prosentuaalisesti vähän. Kaakosta tuulee kohtalaisella nopeudella, mutta prosentuaalisesti hyvin vähän. Tuulen voimakkuuden täytyy olla vähintään kohtalainen, jotta tyrskyjä syntyy, kun tuuli puhaltaa kaakosta, etelästä tai lounaasta. Kokonaiskuvassa tuulee joka ilmansuunnasta, mutta huomattavasti eniten lounaasta jokaisella tuulen nopeudella (kuva 6 b). Vähiten taas tuulee kaakosta. Lännestä tuulee kokonaiskuvassa melko vähän, kun taas satelliittikuvien lukemissa hyvinkin paljon. Lännestä ei siis tuule kovin usein, mutta länsituuli silti muodostaa tyrskyjä Kökariin.

4.1.4 Merivedenkorkeustiedot

Tutkimuksessa käytän Ilmatieteen laitoksen latauspalvelusta ladattavissa olevia merivedenkorkeustietoja. Korkeudet perustuvat N2000-korkeusjärjestelmään, jossa nolla kohta on aina sama (Ilmatieteen laitos 2024). Itse N2000-korkeusjärjestelmä perustuu Suomen kolmanteen tarkkavaaitukseen, joka tehtiin vuosina 1978–2006. Aiempaan vaaitukseen nähden uudet korkeudet poikkeavat 13–43 senttimetriä. Muutos johtuu suurilta osin neljänkymmenen vuoden aikana tapahtuneesta maannoususta. Merivedenkorkeudet ovat saatavilla jokaiselta päivältä minuutin välein. Mittaustarkkuus on alle yhden senttimetrin (Ilmatieteen laitos 2022).

Latasin havainnot Ilmatieteen laitoksen latauspalvelusta merihavainnot-välilehdeltä. Valitsin korkeusjärjestelmäksi N2000-järjestelmän. Ajaksi valitsin UTC-ajan. Havaintopaikat olivat ”Pori Mäntyluoto Kallo” ja ”Föglö Degerby”. Latasin havainnot tietyn kuvanottoajankohdan päivältä, sillä havaintojen suuren määrän vuoksi lataaminen koko tutkimusajankohdalta ei ollut mahdollista. Molemmissa kohteissa vuoden 2017 mittaukset ovat 15 minuutin välein ja muiden vuosien minuutin välein.

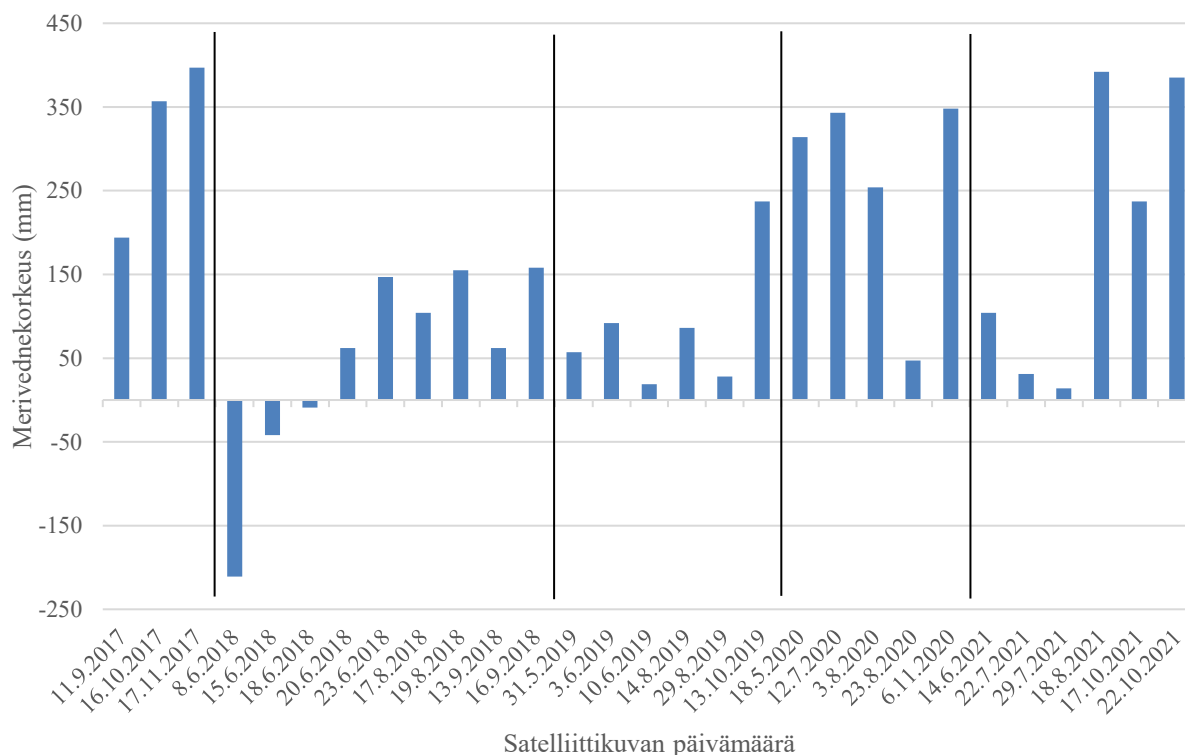
Yyterin sannoilla merivedenkorkeudet vaihtelevat noin -100 millimetrin ja hieman yli 500 millimetrin välillä (kuva 7). Suurin vedenkorkeus on 6.10.2018, jolloin se oli 521 mm korkeammalla kuin nollakohta. Matalimmallaan merivedenkorkeus taas oli 19.7.2021, jolloin se oli -76 mm matalammalla kuin nollakohta. Suurilta osin merivedenkorkeus on nollan ja 200 mm välillä.



Kuva 7. Yyterin santojen merivedenkorkeuden vaihtelu valittujen satelliittikuvien välillä. Vuodet on erotettu mustilla pystyviivoilla. Aineisto: Ilmatieteen laitoksen avoin data, meriveden korkeushavainnot, Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen -lisenssi (CC BY 4.0).

Kökarissa merivedenkorkeudet vaihtelevat hieman alle -250 mm ja hieman alle 450 mm välillä (kuva 8). Korkeimmillaan vesi oli 17.11.2017, jolloin se oli 397 mm korkeammalla

nollakohtaan verrattuna. Matalimmillaan vesi oli 8.6.2018, jolloin se oli -211 mm matalammalla kuin nollakohta. Suurelta osin merivedenkorkeudet ovat 0 mm ja 150 mm välillä.

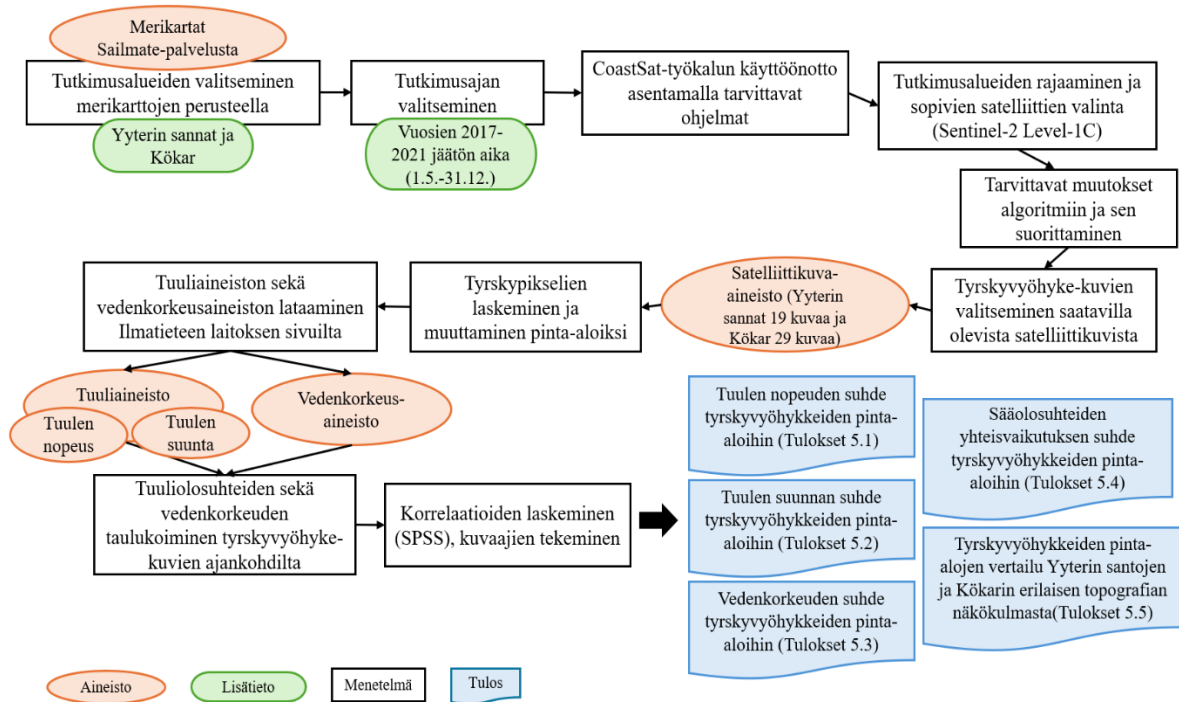


Kuva 8. Kökarin merivedenkorkeuden vaihtelu valittujen satelliittikuvien välillä. Vuodet on erotettu mustilla pystyviivoilla. Aineisto: Ilmatieteen laitoksen avoin data, meriveden korkeushavainnot, Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen -lisenssi (CC BY 4.0).

4.2 Menetelmät

4.2.1 Tutkimusajanjakso ja työn kulku

Tutkimusalueen valinnan jälkeen määritin sopivan tutkimusajanjakson (kuva 9). Täksi valitsin vuosien 2017–2021 jättömän ajan eli 1.5.–31.12., sillä aikaisimmillaan tutkimusalueilla jääpeite alkaa tammikuussa ja myöhäisimmillään jääpeite on lähtenyt huhtikuun aikana (Baltic Sea Ice Services s.a). Merialueiden pitää olla jäättömiä, jotta tyrskyt voidaan havaita. Tutkimusvuosien valintaani vaikutti Sentinel-2-satelliittikuvien saatavuus ja tältä ajanjaksolta onkin saatavilla runsaasti kuvia, mikä tukee ajanjakson valintaa.



Kuva 9. Tutkimuksen työvaiheet kohta kohdalta.

4.2.2 Satelliittikuva-analyysit

Tyrskyvyöhykkeen havainnointiin käytän vuonna 2018 julkaistua CoastSat-algoritmia, joka on Python-pohjainen avoimen lähdekoodin työkalu (Vos ym. 2019). Se on saatavilla ja ladattavissa GitHubista. CoastSat-algoritmi käyttää kolmen kanavan monikanavakuvia satelliittikuvien luokittelussa (Vos ym. 2019). Nämä kanavat ovat näkyvä valo, lähi-infrapuna sekä lyhytaaltoinen infrapuna. Näiden spatiaalinen resoluutio vaihtelee siten, että näkyvän valon kanavan sekä lähi-infrapun kanavan resoluutio on 10 metriä ja lyhytaaltoisen infrapun kanavan resoluutio on 20 metriä. Algoritmillä on mahdollista tuottaa aikasarjoja rantaviivan muuttumisesta maailmanlaajuisesti vapaasti saatavilla olevista satelliittikuvista. Rantaviivan muutosten havaitsemisen lisäksi algoritmi tunnistaa ”white water” alueet eli aaltojen murtumisen ja näin myös tyrskyvyöhykkeen. Tämän takia työkalu on sopiva tähän tutkimukseen sekä valituille tutkimusalueille.

CoastSat-algoritmi otetaan käyttöön valmiiden, sen latauksessa mukana tulevien ohjeiden mukaan. Latasin ensin ohjeiden mukaisesti Anaconda Powershell Prompt -komentoriviohjelman. Tämän kautta pääsin käyttämään Jupyter Notebook -ohjelmistoa ladattujen materiaalien avaamiseen. Materiaaleista löytyi valmiiksi laadittu Python-koodi, joka

hakee satelliittikuvat Google Earth Enginestä. Jotta satelliittikuvien hakeminen onnistuu, pitää autentikoida oma Google-tili Google Cloud SDK shell -ohjelman kautta.

Autentikoinnin jälkeen ensimmäinen vaihe on määrittää itse haluama alue joko koordinaateilla tai tuomalla valmis polygoni algoritmiin. Tässä tutkimuksessa määritin itse koordinaatit (kuva 1 ja 2). Sain koordinaatit rajaamalla halutun alueen Google Earth Engine -ohjelmassa. Tämän jälkeen syötin algoritmiin halutun ajanjakson. Lisäksi valitsin ne satelliitit, joiden kuvia halusin hakea. Tämän jälkeen päätin nimen kohteelle ja uuden kansion nimen, johon algoritmi tallentaa kaiken materiaalin. Algoritmi luo kansion automaattisesti ladattujen materiaalien sekaan eli pelkkä kansion nimi riittää. Käyttäjä pystyy myös määrittämään reunaehdot muun muassa pilvisyydelle sekä koordinaattijärjestelmän. Tässä tutkimuksessa käytin jo valmiina olleita arvoja, mutta koordinaattijärjestelmän muutin EPSG:3067 (ETRS89 / TM35FIN).

Tämän jälkeen suoritin algoritmin ja sain nähtäville saatavilla olevien satelliittikuvien määrän. Satelliittikuvat latautuvat edellä määritettyyn kansioon sellaisenaan. Tämän jälkeen CoastSat-algoritmi vaatii referenssi rantaviivan digitoimisen yhteen satelliittikuvaan. Digitointi tehdään satelliittikuvaan manuaalisesti ohjelman ohjeiden mukaisesti. Rantaviivan digitoimisen jälkeen sain nähtäville satelliittikuvat, joihin alueiden luokittelu on suoritettu. Algoritmi luokittelee alueet maa-alueeksi (sand), vesialueeksi (water) ja tyrskyiksi (white water). Näistä satelliittikuvista valitsin ne kuvat, jotka halusin säilyttää ja poistaa. Tutkielman kannalta mielekästä on poistaa kuvat, joissa näkyy luokittelua haittaavia pilviä sekä kuvat, joissa ei näy tyrskyvyöhykettä ollenkaan. Kaikissa valituissa satelliittikuvissa siis erottuu tyrskyvyöhyke. Valitut kuvat tallentuvat edellä määritettyyn kansioon. Kuvat tallentuvat kuvapareina, jossa toisella puolella on Sentinel-2-satelliittikuva ja toisella puolella luokiteltu kuva. Prosessi toistetaan alusta asti jokaiselle vuodelle ja molemmille tutkimusalueille. Lopuksi laitoin satelliittikuvat taulukkoon aikajärjestyksessä.

Laskin jokaisesta CoastSat-algoritmin luokittelemasta kuvasta tyrskyvyöhykkeen pikselien määrän R-Studioossa. Pikselien laskeminen perustuu koodiin, joka laskee ”white water” -alueen värin mukaan. Pikselit ovat väritään vaalean sinisiä (#4f81bd), jolloin koodi tunnistaa jokaisesta kuvasta määritetyn väriset pikselit. Ennen pikselien tunnistamista rajasin luokitellut kuvat siten, että voin tuoda kuvapareista vain CoastSat-algoritmin luokittelman kuvan R-Studioon. Koodin suorittamisen jälkeen sain jokaisen kuvan pikselien määrän. Testasin Kolmogorov-Smirnov ja Shapiro-Wilk-testeillä pikselien normaalijakautuneisuuden, jotta voin myöhemässä vaiheessa laskea korrelaatioita. Pikselit eivät ole kummankaan tutkimusalueen

osalta normaalijakautuneita. Lopuksi muutin pikselit hehtaareiksi, jotta saan tyrskyvyöhykkeen pinta-alan jokaiselle satelliittikuvalle.

4.2.3 Tuuli- ja vedenkorkeusaineistojen yhdistäminen satelliittikuviin

Vertasin valittujen kuvien ajankohtia tuuliaineistoon ja otin aineistosta aina tietyn ajankohdan suureet ylös taulukkoon satelliittikuvien yhteyteen. Tämän jälkeen luokittelin taulukossa olevat päivät erikseen tuulen nopeuksien ja tuulen suunnan perusteella. Tuulen nopeuksissa valitsin jokaiseen tuulen nopeusluokkaan molemmista kohteista yhden ajankohdan esimerkkikuvapariksi. Ensimmäiseen luokkaan ei Yyterin sannoilta ollut saatavilla satelliittikuvaa, mutta jokaiseen muuhun luokkaan oli molemmista kohteista saatavilla satelliittikuva. Kuvapareissa on suurin piirtein sama tuulen nopeus, jotta kohteiden vertailu on mielekästä. Tämän jälkeen jaoin kuvat tuulen suuntien perusteella. Molemmista tutkimusalueista otin tuuliruusun perusteella ne tuulen suunnat, joista tuulee eniten. Tutkimusalueen satelliittikuvien välillä on suurin piirtein sama tuulen nopeus, jotta nopeus ei muuta havaittavien tyrskyjen määrää. Tarkoituksena oli siis havaita vain tuulen suunnan vaikutusta tyrskyjen syntyyn.

Tuuliaineistoon vertaamisen lisäksi tyrskyvyöhykehavaintoja verrattiin myös hetkelliseen merivedenkorkeuteen. Satelliittikuvien ajankohdalta kirjasin ylös hetkellisen merivedenkorkeuden ja vertasin merivedenkorkeutta eri tuuliolosuhteisiin siten, että tuulen suunta ja nopeus ovat suurin piirtein samat. Tämä mahdollistaa merivedenkorkeuden vaikutuksen huomioimisen mahdollisimman vähällä tuulen ominaisuuksien muuttumisella.

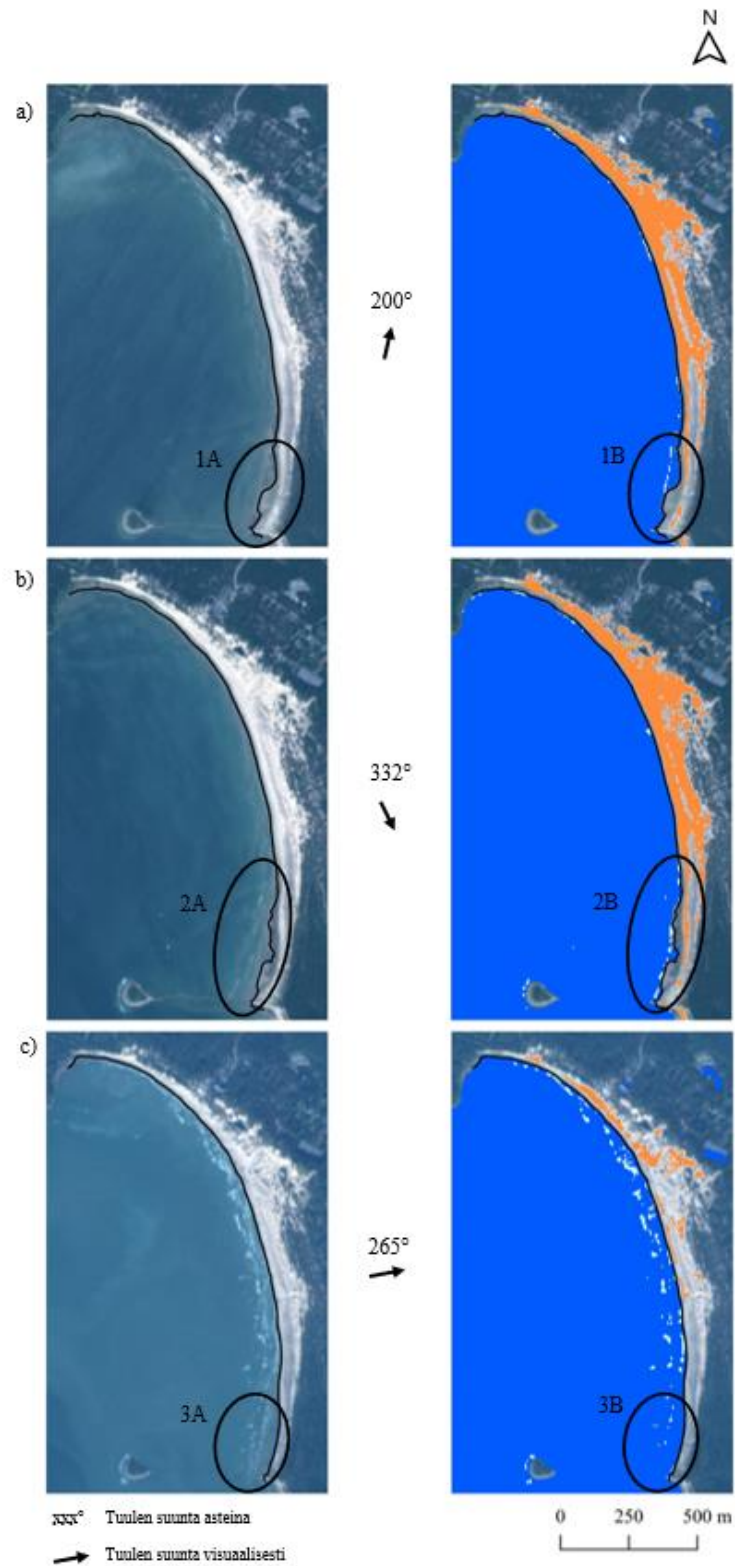
Näiden vaiheiden jälkeen tarkistin tuulen nopeus-, tuulen suunta- ja merivedenkorkeusaineiston normaalijakautuneisuuden molempien tutkimusalueiden osalta Kolmogorov-Smirnov- ja Shapiro-Wilk-testien avulla (liite 3). Tuulen suunta -aineisto on molempien tutkimusalueiden osalta normaalijakautunut Kolmogorov-Smirnov-testin, mutta ei Shapiro-Wilk-testin osalta. Tuulen suunta- ja merivedenkorkeusaineistot ovat molempien testien osalta sekä molempien tutkimusalueiden osalta normaalijakautuneet. Kaikkien normaalijakautuneisuustestien perusteella valitsin Spearmanin korrelaation, koska kaikki aineistot eivät olleet normaalijakautuneita. Laskin jokaisesta aineistosta korrelaatiokertoimet sekä R^2 -selitysasteen SPSS-ohjelmistolla. Lopuksi tein kuvaajat tulososioon.

5 Tulokset

5.1 Tuulen suunnan vaikutus tyrskyvyöhykkeeseen

Yyterissä ja Kökarissa tyrskyjä muodostuu rantaa kohti suuntautuvilla tuulilla. Yyterin tapauksessa tuuli pääsee puhaltamaan täysin avoimesti Yyterin sannoille lännestä sekä lounaasta. Lounaassa tosin on muutama saari, joilla on jonkin asteinen vaikutus lounaistuulten muodostamien tyrskyjen kokoon (kuva 1). Luoteistuulten esteenä on osittain Yyterin santojen kaareva pohjoispääty (kuva 3), mutta silti luoteistuulet saavat aikaan kohtalaisillakin tuulilla tyrskyjä. Maa-alue on esteenä pohjois-kaakko-välin tuulille. Tästä huolimatta tyrskyjä muodostuu pohjois- sekä koillistuulilla. Kökarissa lounais-, länsi- ja luoteistuulet pääsevät puhaltamaan täysin avoimesti rannalle. Tästä huolimatta luoteistuulet eivät saa aikaan tyrskyjä Kökariin. Länsituulet muodostavat eniten tyrskyjä, kun taas kaakkoistuulet vähiten. Maa-alue on esteenä pohjoisessa, koillisessa, idässä sekä kaakossa. Näistä pohjois-, koillis- eikä itätuulet muodosta ollenkaan tyrskyjä Kökarissa.

Yyterissä tuullessa etelästä (200°) tyrskyjä näkyy rannassa vain kevyesti keskivaiheilla sekä pohjoispäädyssä (kuva 10 a). Tyrskyvyöhyke on yhtenäinen rantaviivan keskivaiheille asti alkaen pohjoispäädystä. Lisäksi tyrskyvyöhyke on hyvin kapea. Tuulen suunnan kääntyessä luoteeseen (332°), tyrskyjä muodostuu eteläpäätyyn hyvin hailakasti (kuva 10 b). Tyrskyvyöhyke on eteläpäädyssä kapea sekä yhtenäinen. Lisäksi eteläpään edustalla olevan pienen saaren merenpuolelle muodostuu tyrskyjä. Etelä- ja lounaistuulilla rannan kaarevuus mahdollisesti vaikuttaa tuulen kykyyn siirtää energiaa vesimassaan. Etelätuulella tuuli ei pääse vaikuttamaan rannan eteläpään vesimassaan, kun taas lounaistuulella pohjoispään vesimassa jää ilman tuulen vaikutusta. Länsituulella (265°), tyrskyjä syntyy koko rantaviivan pituudelta huomattava määrä (kuva 10 c). Tyrskyvyöhyke on leveämpi kuin edellisissä esimerkeissä. Tyrskyvyöhyke on yhtenäinen koko rantaviivan pituudelta eli tuuli vaikuttaa koko rantaviivan pituudelta vesimassaan. Lisäksi pienen saaren edustalla on havaittavissa tyrskyjä.

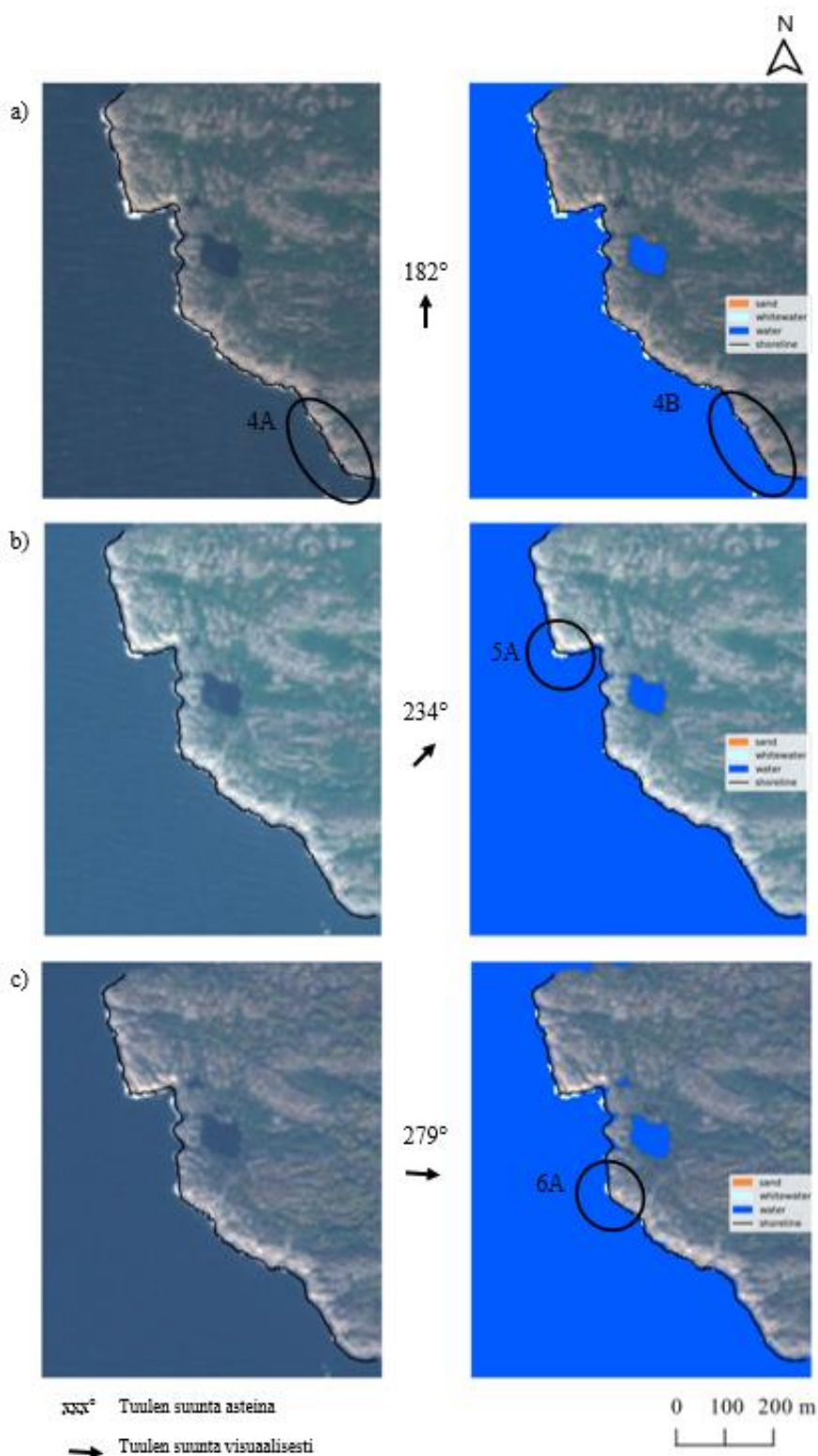


Kuva 10. Esimerkkikuvapari tyrskyjen syntymisestä eri tuulen suunnilla Yterin sannoilla. Vasemmalla puolella Sentinel-2 satelliittikuva ja oikealla CoastSat-algoritmin luokitteleva kuva. Mustat ympyrät merkitsevät vertailun kannalta kiinnostavia kohteita. A) Etelätuulella (200°) tyrskyjä syntyy haaleasti rantaviivan keskivaiheille. Luokitelussa kuvassa tyrskyjä on luokiteltu rannan eteläpäättyyn virheellisesti. B) Luoteistuulella (332°) tyrskyjä syntyy rannan eteläpäättyyn. Tyrskyjä on luokiteltu myös eteläpäättyyn, mutta sijainniltaan virheellisesti. C) Länsituulella (265°) tyrskyjä syntyy koko rantaviivan pituudelle. Luokitelussa kuvassa tyrskyjä on luokiteltu kaikkialle muualle rantaviivalla paitsi eteläpäättyyn.

Yterissä CoastSat-algoritmi on luokitellut muutamia tyrskyjä eteläpäätyyn etelä- sekä luoteistuulella, mutta ne kaikki ovat virheellisiä. Etelätuulella satelliittikuvassa tyrskyjä ei eteläpäädyssä näy ollenkaan (ympyrä 1A), mutta CoastSat-algoritmi on luokitellut (ympyrä 1B) tyrskyjä eteläpäätyyn. Sama ilmiö tapahtuu luoteistuulella (ympyrä 2A ja 2B). Näyttäisi siltä, että molemmissa tapauksissa algoritmi on luokitellut maa-aluetta tyrskyiksi. Todellisia tyrskyjä ei ole kummassakaan tapauksessa luokiteltu ollenkaan. Luoteistuulella pienen saaren edustalle syntyvät tyrskyt ovat luokiteltu tyrskypikseleiksi oikein. Länsituulilla taas algoritmi on luokitellut tyrskyjä oikein koko rantaviivan pituudelta, mutta osa tyrskyistä jää kokonaan luokittelematta. Varsinkin rannan eteläpäädyssä näkyy satelliittikuvassa tyrskyjä (ympyrä 3A), mutta niitä ei ole luokiteltu tyrskyiksi (ympyrä 3B). Pienen saaren edustan tyrskyt on luokiteltu sijainniltaan sekä kooltaan oikein.

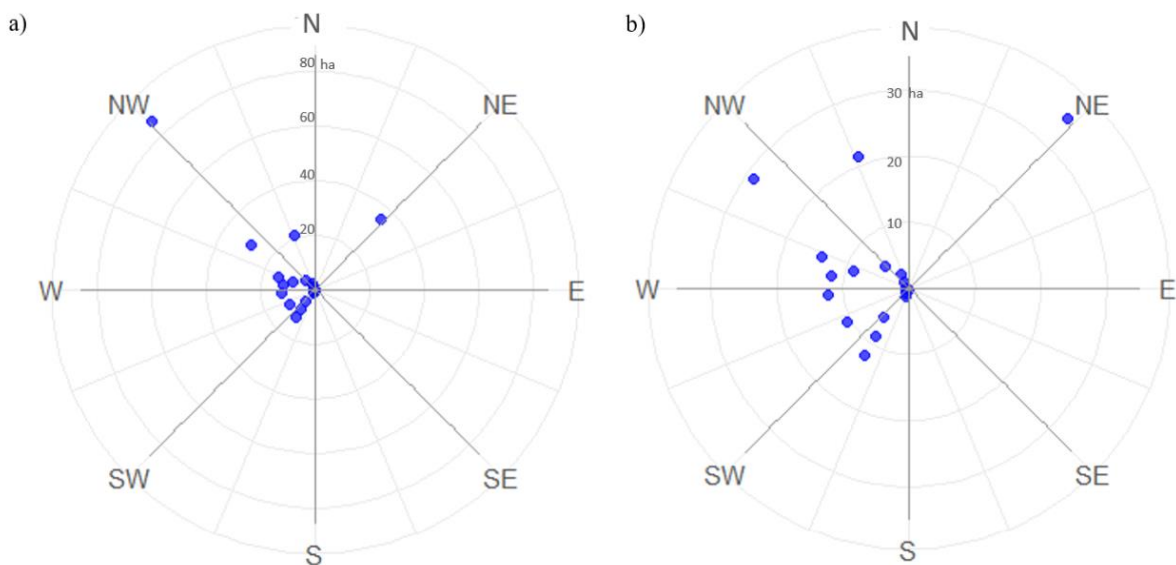
Kökarissa etelätuulella (182°) tyrskyjä on nähtävissä paljon satelliittikuvasta (kuva 11 a). Tyrskyjä on koko rantaviivan pituudelta, mutta eniten niitä on niemen kärjessä sekä pienessä poukamassa. Tyrskyvyöhyke on kapea ja yhtenäinen. Tuulen kääntyessä lounaaseen (234°), tyrskyjen määrä vähenee selvästi etelätuuleen verrattuna (kuva 11 b). Tyrskyjä on eniten edelleen niemen kärjessä, mutta poukamassa tyrskyjä on havaittavissa vain heikosti. Tyrskyvyöhyke on yhä kapea, mutta edelleen paikoitellen havaittavissa. Rantaviivan keskivaiheilla on kaikki havaittavissa olevat tyrskyt. Länsituulella (279°) tyrskyjen määrä kasvaa lounaistuuleen verrattaessa (kuva 11 b). Kuitenkin taas etelätuuleen verrattaessa tyrskyjä on selvästi vähemmän. Tyrskyt keskittyvät rantaviivan keskivaiheille niemen kärkeen sekä poukamaan. Tyrskyvyöhyke voidaan tältä alueelta nähdä selkeästi, muualta ei ollenkaan.

Etelätuulella luokittelu on havainnut Kökarissa tyrskyt suhteellisen hyvin sijainniltaan sekä kooltaan. Kaikki isoimmat tyrskyt ovat luokiteltu oikein, mutta pieniä tyrskyjä on jäänyt luokittelematta, eniten rannan eteläpäädyssä. Satelliittikuvassa rannan eteläpäädyssä (ympyrä 4A) näkyy kahdessa kohtaa selkeästi tyrskyjä, luokittelu on näistä ylemmän tyrskyn luokitellut osittain, mutta suurimmaksi osaksi kaikki tyrskyt ovat jääneet luokittelematta (ympyrä 4B). Lounaistuulella luokittelu on havainnut niemen kärjen tyrskyt (ympyrä 5A) sekä muutaman yksittäisen tyrskyn, mutta suurin osa on jäänyt pois luokittelusta. Niemen kärjenkin tyrskyt ovat luokittelussa selvästi pienemmät kuin satelliittikuvassa. Tyrskyjä on luokitellussa kuvassa siis huomattavasti vähemmän kuin satelliittikuvassa. Länsituulella luokittelu on tunnistanut tyrskyjä rannan keskivaiheilla (ympyrä 6A), mutta luokitellut tyrskyt ovat kooltaan pienemmät kuin satelliittikuvassa. Muualtakin rantaviivalta osa tyrskyistä on pienentynyt kooltaan luokittelussa tai jäänyt kokonaan luokittelun ulkopuolelle.



Kuva 11. Esimerkkikuvapari tyrskyjen syntymisen vertailusta eri tuulen suunnilla Kökarissa. Vasemmalla puolella Sentinel-2 satelliittikuva, oikealla taas CoastSat-algoritmin luokitteleva kuva. Mustat ympyrät havainnollistavat vertailun kannalta kiinnostavia kohteita. A) Etelätuulella (182°) tyrskyjä syntyy kaikkialle pitkin rantaviivaa. Luokittelussa kuvassa tyrskyjä on luokiteltu kaikkialle muualle paitsi eteläpäättyyn. B) Lounaistuulella (234°) tyrskyjä syntyy rantaviivan keskivaiheille. Tyrskyjä on luokiteltu vain niemenkärkeen siitä huolimatta, että tyrskyjä on pitkin rantaviivaa. C) Länsituulella (279°) tyrskyjä syntyy rantaviivan keskivaiheille asti. Luokittelussa kuvassa tyrskyjä on luokiteltu sijainniltaan ja kooltaan oikein.

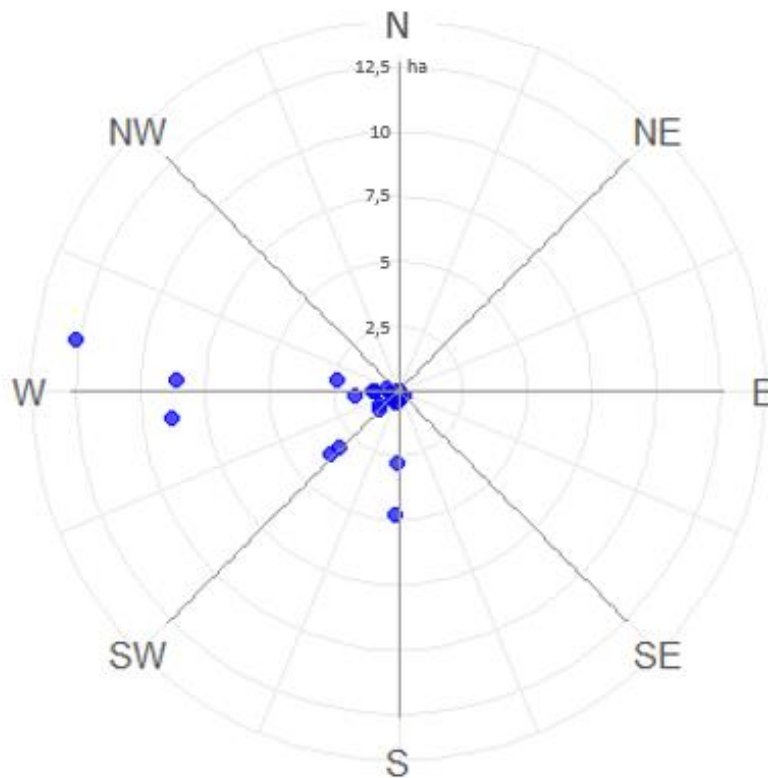
Yyterissä tyrskyjen pinta-aloista havaitaan kolme eri luokkaa, pienet pinta-alat, keskikokoiset pinta-alat ja hyvin suuret pinta-alat. Pienet sekä keskikokoiset pinta-alat ovat kooltaan alle 20 hehtaaria (kuva 12 a) ja suuret pinta-alat tätä suuremmat. Pienet pinta-alat ovat rykelmänä nollan tuntumassa. Tällöin on tuullut etelä-pohjoinen väliltä. Keskikokoiset pinta-alat ovat noin 5–15 hehtaarin kokoisia (kuva 12 b). Nämä jakautuvat lounais-, länsi- ja luoteistuulien välille. Suuret pinta-alat ovat yli 20 hehtaaria ja näistä yksi on poikkeava arvo, yli 80 hehtaaria (kuva 12 a). Tämän yli 80 hehtaarin pinta-alan aikana vallitsi luoteistuuli. Kolme muuta yli 20 hehtaarin arvoa ovat noin 21, 30 ja 35 hehtaarin paikkeilla (kuva 12 b). Tällöin tuuli luoteen ja pohjoisen välistä (noin 21 ha), luoteesta (noin 30 ha) sekä koillisesta (noin 35 ha).



Kuva 12 a ja b. Yyterin santojen luokiteltujen tyrskyjen pinta-alat suhteutettuna ilmansuuntiin. A) Kaikki luokiteltujen tyrskyjen pinta-alat. Kuvaajassa nähdään, että pinta-alat ovat rykelmänä alle 20 hehtaarin ja nollan välillä. Muutama yli 20 hehtaarin pinta-alaa on myös ja lisäksi poikkeava arvo, 80 hehtaaria. B) Luokiteltujen tyrskyjen pinta-ala ilman poikkeavaa 80 hehtaarin arvoa. Pienempien arvojen todellinen pinta-ala on helpommin tulkittavissa. Suurin osa pinta-aloista on alle 15 hehtaarin.

Yyterissä suurimmat tyrskyjen pinta-alat muodostuvat luoteistuulilla, mutta länsi- sekä lounaistuulilla muodostuu myös huomattavan kokoisia tyrskyjä. Nämä tuulet tuulevat suoraan Yyterin sannoille ilman sen suurempia esteitä. Huomattavaa on, että länsituulet eivät saaneet aikaan suurempia tyrskyjä, vaikka ne tuulevat suoraan Yyterin sannoille. Luoteistuuli, joka muodosti suuria tyrskyjä, tuulee niemen kärjen takaa. Esteestä huolimatta luoteistuulet saivat aikaan suurimmat tyrskyjen pinta-alat. Kuitenkin näillä kaikilla ilmansuunnilla havaitaan myös pieniä tyrskyjen pinta-aloja. Kakkoistuulet tulevat Yyterin sannoille maalta päin, mutta tästä huolimatta kaakkoistuuli on saanut aikaan pinta-alaltaan suuria tyrskyjä. Vaikuttaa siltä, että itsessään tuulen suunta ei Yyterissä riitä selittämään tyrskyjen pinta-alojen kokoa, mutta se voi olla yksi vaikuttava tekijä.

Kökarissa voidaan jakaa luokiteltujen tyrskyjen pinta-alat alle viiden hehtaarin ja yli 7,5 hehtaarin pinta-aloihin (kuva 13). Alle viiden hehtaarin pinta-alat havaitaan etelä-, lounais- ja länsituulilla. Suurimmat tyrskyt tässä luokassa muodostuvat etelätuulilla, mutta eniten tässä luokassa tyrskyjä taas muodostuu lounais- ja länsituulilla. Yli 7,5 hehtaarin tyrskyt ovat kaikki länsituulten aikana. Tällöin tyrskyjen pinta-alassa päästään jopa 12,5 hehtaariin. Huomattavaa on, että nolla hehtaarin pinta-aloja on kaksi, jolloin tuuli lounaasta ja lännestä. Kökarissa siis suurimmat pinta-alat, mutta myös toinen nolla pinta-aloista syntyy länsituulen aikaan. Länsituulet kuitenkin saavuttavat Kökarin esteettä. Lounaistuulet saavuttavat Kökarin myös ilman esteitä, joten on huomattavaa, että niiden aikana tyrskyjen pinta-alat jäävät vähäisiksi. Voidaankin todeta, että Kökarissa myöskään tuulen suunta ei ole yksinään avaintekijä tyrskyjen pinta-alojen koon vaihtelun selittämiseen.



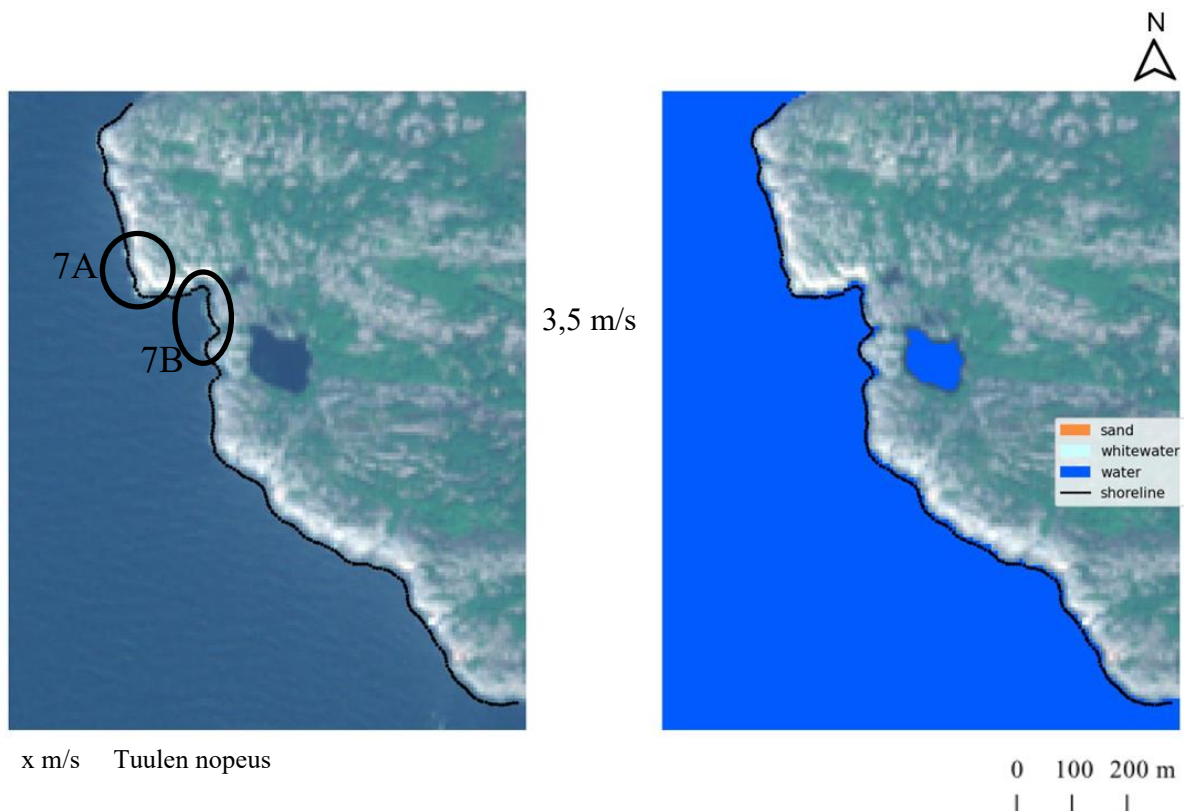
Kuva 13. Kökarin luokiteltujen tyrskyjen pinta-alat suhteutettuna tuulen suuntiin. Pisteet sijoittuvat etelä-lounas-länsi välille. Suurimmat pinta-alat havaitaan länsituulten aikaan. Suurin arvo on noin 12,5 hehtaaria

5.2 Tuulen nopeuden vaikutus tyrskyvyöhykkeeseen

5.2.1 Heikko tuuli

Heikolla tuulella (1–3 m/s) Kökarissa erottuu muutama tyrsky satelliittikuvassa (kuva 14). Tyrskyt ovat niemen kärjessä (ympyrä 7A) sekä pienessä poukamassa (ympyrä 7B). Tyrskyvyöhyke on hyvin kapea, sillä tyrskyt ovat aivan rantaviivan läheisyydessä. Lisäksi tyrskyjä on vain muutamassa kohdassa erillään toisistaan eli tyrskyvyöhyke ei ole yhtenäinen. CoastSat-algoritmi ei ole havainnut tyrskyjä lainkaan, minkä takia tyrskypikseleitä ei ole luokitellussa kuvassa. Heikko tuuli muodostaa siis liian pienet tyrskyt sekä liian kapean tyrskyvyöhykkeen, jotta CoastSat-algoritmi luokittelisi tyrskyt oikein Kökarissa.

Yyterin sannoilla heikolla tuulella tyrskyjä ei näy ollenkaan satelliittikuvissa. Heikko tuuli ei siis saa aikaan tyrskyjä.

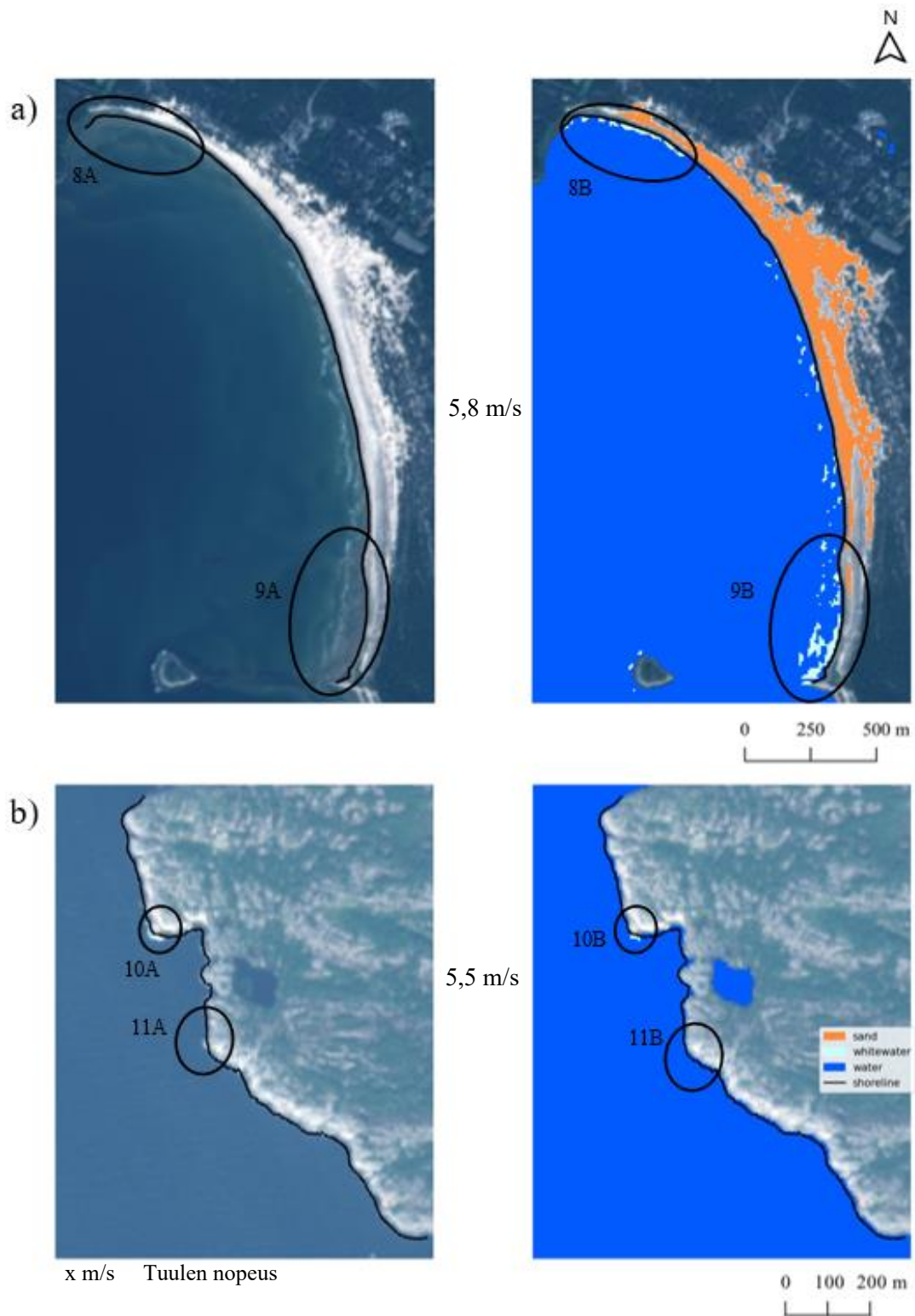


Kuva 14. Esimerkkikuvapari tyrskyistä heikon tuulen (1–3 m/s) luokassa Kökarissa. Vasemmalla Sentinel-2 satelliittikuva ja vasemmalla CoastSat-algoritmin luokittelema kuva. Kuvan tilanteessa tuulen nopeus on 3,5 m/s. Satelliittikuvassa tyrskyjä näkyy kahdessa kohdassa (ympyrät 7A ja 7B), mutta luokitellussa kuvassa tyrskyjä ei ole luokiteltu ollenkaan.

5.2.2 Kohtalainen tuuli

Kohtalaisella tuulella (4–7 m/s) Yyterissä sekä Kökarissa tyrskyjä erottuu satelliittikuvista (kuva 15 a ja b). Yyterissä tyrskyjä on satelliittikuvassa yhtenäisesti rantaviivan puolesta välistä rannan eteläpäätä kohden tasaisesti eli tyrskyvyöhyke on havaittavissa tältä matkalta (kuva 15 a). Tyrskyt ovat rantaviivan lähetyvillä, joten tyrskyvyöhyke on kapea. Levein kohta tyrskyvyöhykkeessä on rannan eteläpäädyssä (kuva 15 a, ympyrä 9A). Kökarissa taas tyrskyjä on kahdessa kohtaa, niemen kärjessä (kuva 15 b, ympyrä 10A) ja etelämmässä aivan rantaviivalla (kuva 15 b, ympyrä 11A). Tyrskyt ovat aivan rantaviivassa kiinni, minkä takia tyrskyvyöhyke nähdään hyvin kapeana. Leveintä tyrskyvyöhykkeen kohtaa on mahdotonta määrittää satelliittikuvasta, sillä yhtenäistä tyrskyvyöhykettä ei voida havaita.

Luokitellussa kuvassa Yyterissä, tyrskyjä erottuu koko rantaviivan matkalta muutamia aukkoja lukuun ottamatta (kuva 15 a). Eniten luokiteltuja tyrskyjä on rannan eteläpäädyssä (ympyrä 9B). Luokittelu on siis tunnistanut eteläpäätyn liikaa tyrskyjä ja jättänyt monia aukkoja matkalle. Satelliittikuvassa tyrskyjä ei näy pohjoispäädyssä (ympyrä 8A) ollenkaan, mutta luokitellussa kuvassa tälle alueella on luokiteltu tyrskyjä (ympyrä 8B). Kökarissa taas tyrskyjä on luokiteltu vain niemenkärkeen ja siihenkin liian vähän (ympyrä 10B). Etelämmässä satelliittikuvassa (ympyrä 11A) näkyy tyrskyjä, mutta luokitellussa kuvassa niitä ei ole ollenkaan kyseisessä kohdassa (ympyrä 11B). Kohtalaisilla tuulilla molemmilla tutkimusalueilla CoastSat-algoritmin on mahdollista luokitella tyrskyjä, mutta algoritmi ei suoriudu luokittelusta täysin onnistuneesti.

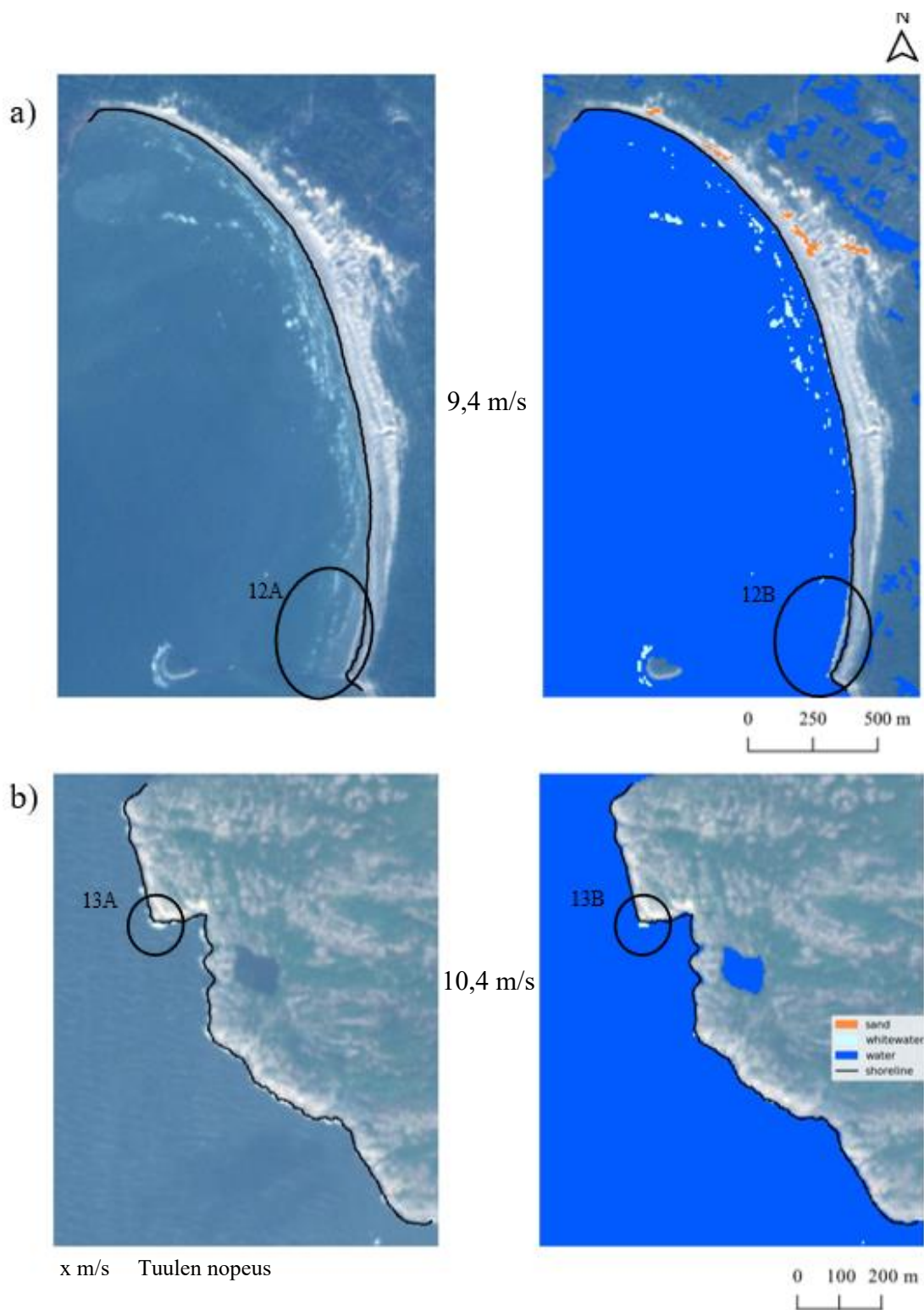


Kuva 15 a ja b. Esimerkkikuvapari osoittaa tyrskyjen syntymisen Yyterin sannoilla sekä Kökarissa kohtalaisen tuulen nopeuden (4–7 m/s) luokassa. Vasemmalla on Sentinel-2 satelliittikuva ja vasemmalla CoastSat-algoritmin luokittelema kuva. A) Tyrskyt näkyvät Yyterin sannoilla melkein koko rantaviivan pituisena vyöhykkeenä leventyen rantaviivan eteläpäätä kohden. Tuulen nopeus on 5,8 m/s sekunnissa kuvan tilanteessa. Luokiteltu kuva on tunnistanut tyrskyt suhteellisen hyvin, kuitenkin liioitellen pohjois- sekä eteläpäädyn (ympyrät 1 ja 2) tyrskyjen määrän. B) Kökarissa tyrskyt näkyvät niemen kärjessä (ympyrä 1) sekä etelämmässä (ympyrä 2). Tuulen nopeus on 5,5 m/s kuvan tilanteessa. Luokitellussa kuvassa melkein kaikki tyrskyt ovat jääneet luokittelun ulkopuolelle.

5.2.3 Navakka tuuli

Navakalla tuulella (8–13 m/s) tyrskyjä on Yyterissä sekä Kökarissa nähtävissä satelliittikuvasta enemmän kuin edellisissä luokissa (kuva 16 a ja b). Yyterissä tyrskyjä on koko rantaviivan pituudelta (kuva 16 a). Edellisessä luokassa tyrskyt olivat Yyterissä melkein kiinni rantaviivassa (kuva 15 a), kun taas nyt tyrskyjä nähdään jo kauempana rantaviivasta (kuva 16 a). Tyrskyvyöhyke on siis leventynyt ja se on yhtenäinen koko rantaviivan pituudelta. Levein kohta on rannan keskivaiheilla (kuva 16 a). Lisäksi Yyterissä rannan eteläpäädyssä sijaitsevan pienen saaren avomerren puolella on tyrskyjä havaittavissa. Kökarissa tyrskyjä nähdään satelliittikuvasta koko rantaviivan pituudelta (kuva 16 b). Tyrskyvyöhyke on siis yhtenäinen. Tyrskyvyöhyke on rantaviivassa kiinni, joten tyrskyvyöhyke ei ole leventynyt, vaikka tuulen nopeus on kasvanut. Kuitenkin tyrskyjen määrä on kasvanut. Niemen kärjessä on suurimmat tyrskyt (kuva 16 b) ja pienempiä tyrskyjä on niin rantaviivan pohjois- kuin myös eteläpäädyssä.

CoastSat-algoritmin luokittelu on luokitellut Yyterissä osan tyrskyistä, mutta jättänyt suurimman osan luokittelematta. Luokitellut tyrskyt keskittyvät rantaviivan keskivaiheille ja yksittäisiä luokiteltuja tyrskyjä on pohjois- ja eteläpäädyissä. Tyrskyjä on jäänyt paljon luokittelun ulkopuolelle, vaikka tyrskyjen määrä on lisääntynyt ja tyrskyvyöhyke leventynyt. Eniten tyrskyjä on jäänyt luokittelematta rannan eteläpäädyssä, jossa tyrskyvyöhyke näkyy satelliittikuvassa suhteellisen leveänä (ympyrä 12A). Luokittelu ei kuitenkaan ole luokittelut yhtäkään tyrskyä eteläpäädyyn (ympyrä 12B). Pienen saaren tyrskyt ovat kuitenkin luokiteltu oikein. Kökarissa luokittelu on tunnistanut vain niemen kärjessä olevat tyrskyt (ympyrä 13B), tyrskyjen lisääntymisestä huolimatta. Niemen kärjenkin tyrskyt ovat luokiteltu hyvin pienenä alueena, vaikka tyrskyt ovat satelliittikuvassa suhteellisen isot (ympyrä 13A). Kohtalaisella tuulella tyrskyjä on siis paljonkin havaittavissa, mutta jostain syystä CoastSat-algoritmi suoriutui heikommin tyrskyjen tunnistuksesta kuin edellisissä luokissa. Maa-alueita ei kuitenkaan näytä olevan luokiteltu virheellisesti tyrskyiksi kummallakaan tutkimusalueella.

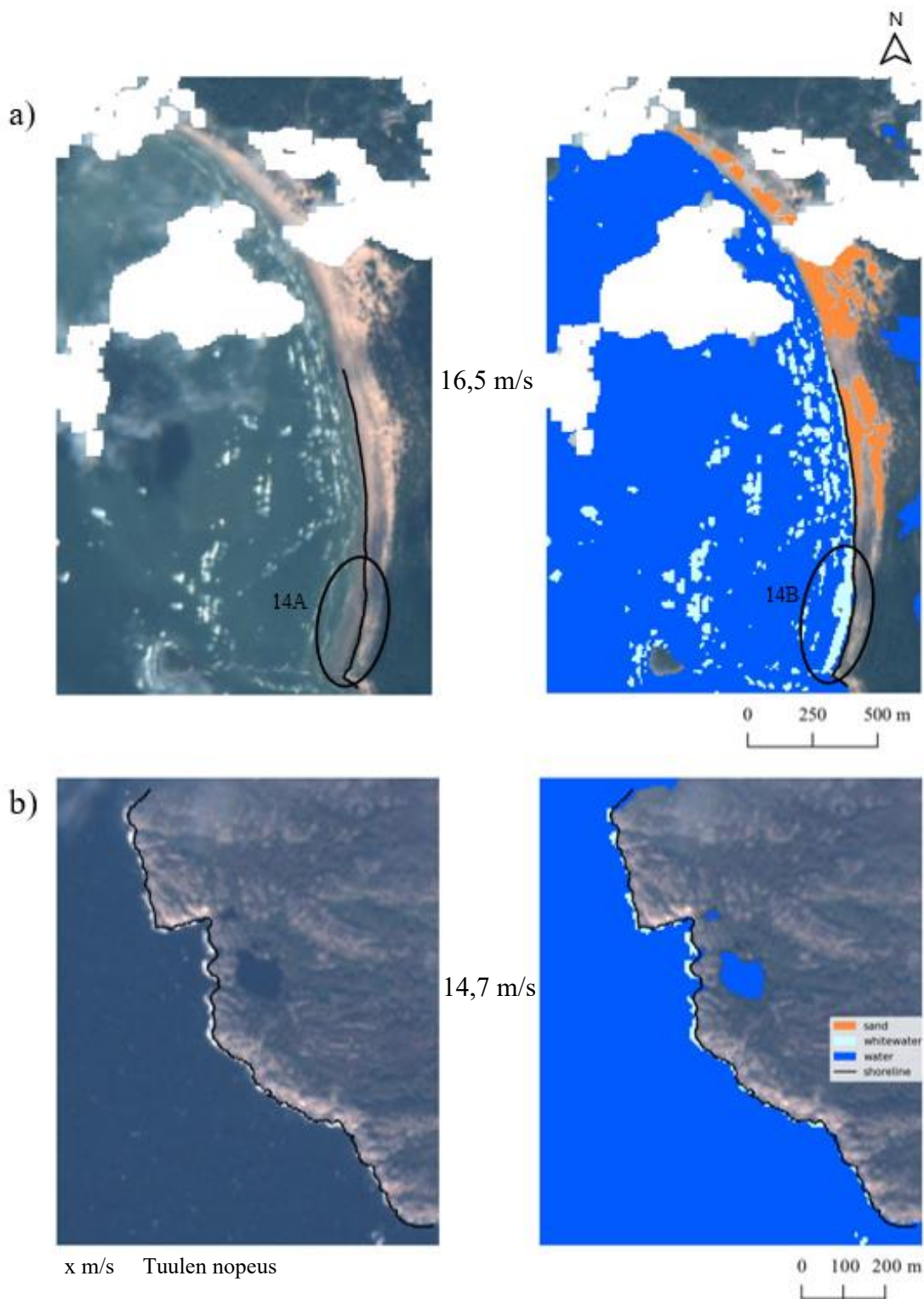


Kuva 16 a ja b. Esimerkkikuvapari osoittaa tyrskyjen syntymisen Yyterin sannoilla ja Kökarissa navakan tuulen nopeuden (8–13 m/s) luokassa. Vasemmalla on Sentinel-2 satelliittikuva ja vasemmalla CoastSat-algoritmin luokitteleva kuva. A) Tyrskyt näkyvät Yyterin sannoilla koko rantaviivan pituisena leveänä vyöhykkeenä. Tuulen nopeus on 9,4 m/s sekunnissa kuvan tilanteessa. Luokiteltu kuva ei ole tunnistanut tyrskyjä juurikaan. Tyrskyjä jää tunnistamatta koko rantaviivan matkalta, eniten pohjois- ja eteläpäädyistä. B) Kökarissa tyrskyt näkyvät koko rantaviivan pituudelta ja suurimmat tyrskyt ovat niemen kärjessä (ympyrä 1). Tuulen nopeus on 10,4 m/s kuvan tilanteessa. Luokitellussa kuvassa tyrskyjä on vain niemen kärjessä. Tyrskyjen tunnistus ei ole onnistunut.

5.2.4 Kova tuuli

Kovalla tuulella (14–20 m/s) Yyterissä sekä Kökarissa on hyvin paljon tyrskyjä havaittavissa satelliittikuvista (kuva 17 a). Yyterin satelliittikuvassa on jonkin verran pilviä, mutta tyrskyt ovat silti nähtävissä (kuva 17 a). Tyrskyjä on koko rantaviivan pituudelta, keskittyen kuitenkin rantaviivan puolesta välistä rannan eteläpäätyyn asti. Tyrskyvyöhyke on siis yhtenäinen. Pienen saaren ympärillä on tyrskyjä huomattavasti enemmän kuin edellisen luokan kuvissa. Tyrskyjä näkyy myös kaukana rantaviivasta eli tyrskyvyöhyke on leventynyt huomattavasti edelliseen luokkaan verrattuna (kuva 17 a). Kökarissa tyrskyjä on nähtävissä koko rantaviivan pituudelta, keskittyen pohjoispäätyyn sekä rantaviivan keskivaiheille (kuva 17 b). Tyrskyvyöhyke on yhtenäinen myös Kökarissa. Tyrskyt ovat edelleen rantaviivassa kiinni eli tyrskyvyöhyke ei ole kuitenkaan leventynyt. Tyrskyjen koko on kuitenkin selkeästi kasvanut, sillä valkoinen alue on suurentunut kaikkialla rantaviivalla (kuva 17 b).

Luokittelu on onnistunut kovalla tuulella melko hyvin molemmilla tutkimusalueilla. Yyterissä tyrskyjä on luokiteltu tyrskyiksi paljon ja oikeellisesti. Kuitenkin eteläpäädyssä satelliittikuvassa (ympyrä 14A) näkyy alue, jossa ei ole tyrskyjä ollenkaan. Kuitenkin luokitellussa kuvassa alueella on paljon luokiteltuja tyrskyjä (ympyrä 14B). Rantaviivaa on siis luokiteltu virheellisesti tyrskyiksi. Kökarissa luokittelu on tunnistanut kaikki kuvassa näkyvät tyrskyt koko rantaviivan pituudelta. Tyrskyjen koko ja sijainti ovat molemmat oikein. Kovan tuulen puhaltaessa tyrskyjen luokittelu on onnistuneinta verrattuna muihin tuulen nopeusluokkiin.

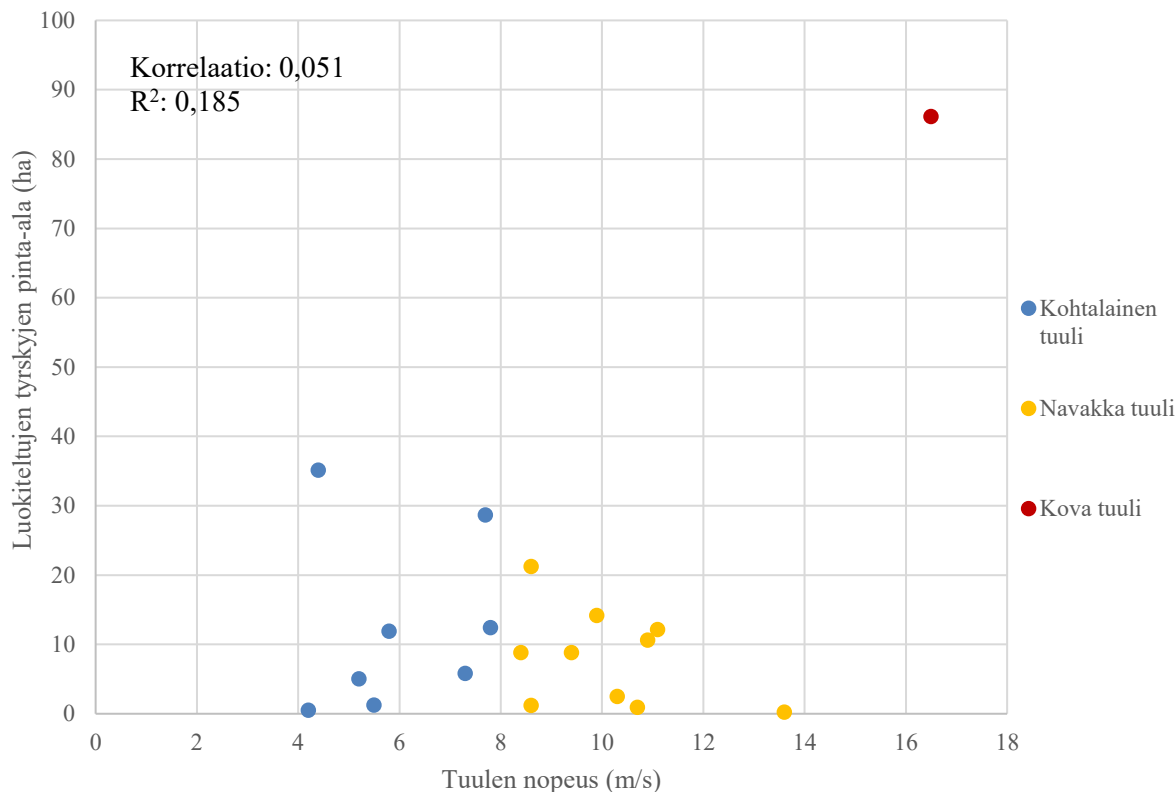


Kuva 17 a ja b. Esimerkkikuvapari osoittaa tyrskyjen synnyin Yterin sannoilla ja Kökarissa kovan tuulen nopeuden (14–20 m/s) luokassa. Vasemmalla on Sentinel-2 satelliittikuva ja oikealla CoastSat-algoritmin luokitteleva kuva. A) Esimerkkikuvassa on paljon pilviä, jotka haittaavat osan alueen tyrskyjen tunnistusta. Tästä huolimatta tyrskyjä näkyy satelliittikuvassa paljon. Tyrskyvyöhyke on yhtenäinen koko rantaviivan pituudelta sekä hyvin leveä. Luokitellussa kuvassa Tyrskyjen luokittelu on oikeellista, eteläpäädyn maa-alueen luokittelua lukuun ottamatta. Tuulen nopeus on 16,5 m/s kuvaparin tilanteessa. B) Kökarissa on tyrskyjä koko rantaviivan pituudelta yhtenäisesti. Tyrskyvyöhyke on edelleen kapea. Luokitellussa kuvassa tyrskyjen luokittelu on oikeellista niin kooltaan kuin sijainneiltakin. Tuulen nopeus on 14,7 m/s kuvaparin tilanteessa.

5.2.5 Yhteenveto tuulen nopeuden vaikutuksesta

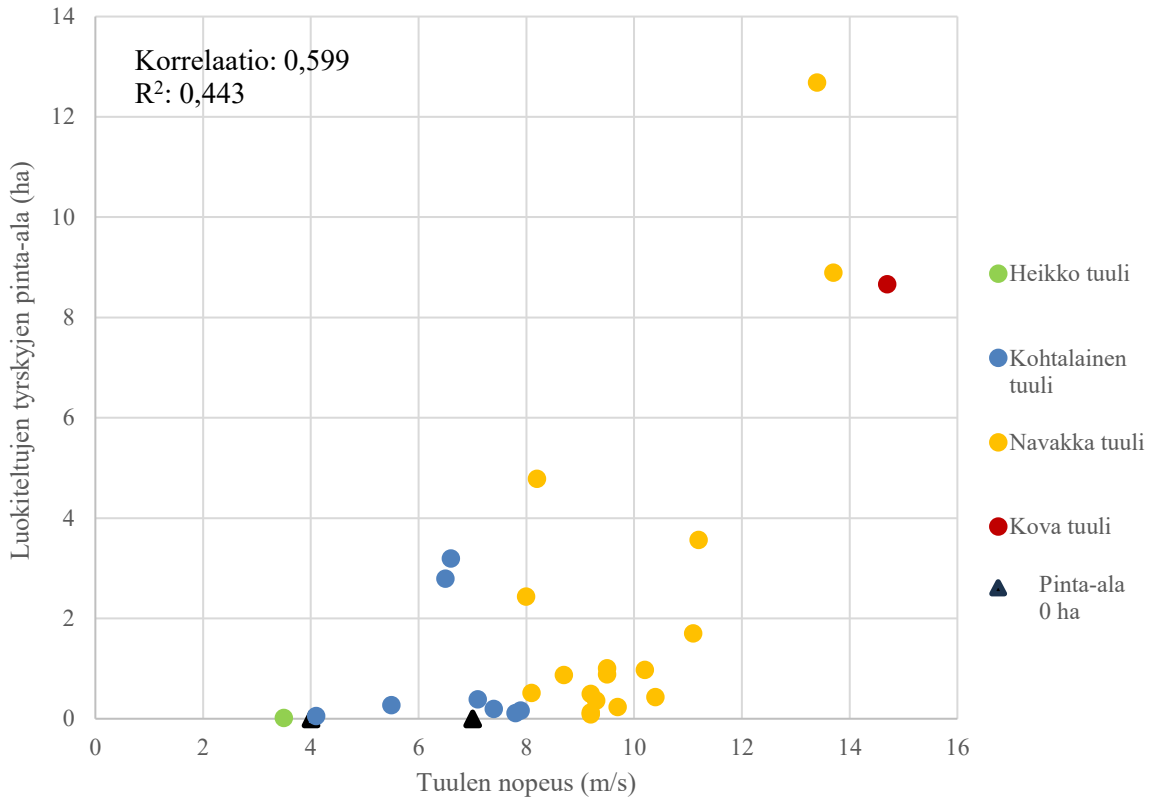
Yyterissä CoastSat-algoritmi havainnoi ja luokittelee tyrskyjä huomattavasti enemmän kuin Kökarissa. Tyrskyvyöhykkeen leveys saattaa olla vaikuttava tekijä, sillä Yyterissä tyrskyvyöhyke on leveämpi kuin Kökarissa. Kökarissa tyrskyvyöhyke keskittyy aivan rantaviivan tuntumaan, mikä saattaa vaikeuttaa CoastSat-algoritmin maa-alueiden ja tyrskyjen erotuskykyä. Huomattava asia on, että kohtalaisesta tuulesta siirtyessä navakkaan tuuleen, Yyterissä tapahtui selkeä luokittelutuloksen heikentyminen. Tyrskyjä näkyi satelliittikuvissa enemmän navakan tuulen luokassa kuin kohtalaisen tuulen luokassa, joten luokittelutuloksen heikentyminen on odottamatonta. Maa-alueiden sekoittuminen tyrskyiksi Yyterissä oli odotettavissa, sillä Yyteri on hyvin matala ranta-alue. Kuitenkin yllättävän paljon maa-aluetta CoastSat-algoritmi luokitteli tyrskyiksi. Kökarissa taas selkeitäkin tyrskyjä jäi pois luokittelusta, mikä oli myös odottamatonta. Tyrskyjen sijainti selkeästi vaikutti tyrskyjen tunnistukseen, sillä CoastSat-algoritmillä oli selkeästi vaikeuksia erottaa maa-alueet tyrskyistä. Vasta kovan tuulen luokassa rantaviivan eteläpäädyssä tyrskyjen luokittelu onnistui.

Yyterin sannoilla CoastSat-algoritmi on luokitellut tyrskyjä jokaisessa tapauksessa (kuva 18). Kaikkia tuulen nopeuksia tarkastellessa tyrskyjen pinta-alat ovat pääsääntöisesti alle 40 hehtaarin. Kovalla tuulella pinta-ala nousee melkein 90 hehtaariin. Eri tuuliluokkia tarkasteltaessa huomataan, että kohtalaisella tuulella pinta-alat jäävät alle 13 hehtaarin, lukuun ottamatta kahta poikkeavaa arvoa, jotka ovat kolmenkymmenen hehtaarin paikkeilla. Navakalla tuulella taas kaikki pinta-alat ovat alle 25 hehtaarin eikä poikkeavia arvoja ole. Sekä kohtalaisella, että navakalla tuulella huomataan ilmiö, jossa suurin piirtein samalla tuulen nopeudella pinta-alat eroavat toisistaan huomattavasti. Tuulen nopeuden ollessa 8 m/s jommallakummalla puolella, ilmiö korostuu. Tällöin pinta-alat vaihtelevat hieman yli nollasta hehtaarista melkein 30 hehtaariin. Luokiteltujen tyrskypikselien ja tuulen nopeuden välinen korrelaatio on 0,051 eli hyvin heikko. Lisäksi R^2 on 0,185 eli tuulen nopeuden vaihtelu ei selitä luokiteltujen tyrskyjen pinta-alan kasvua.



Kuva 18. Tuulen nopeuden (m/s) ja luokiteltujen tyrskyjen pinta-alan (ha) yhteys toisiinsa Yyterin sannoilla. Heikkoja tuulia ei ole lainkaan.

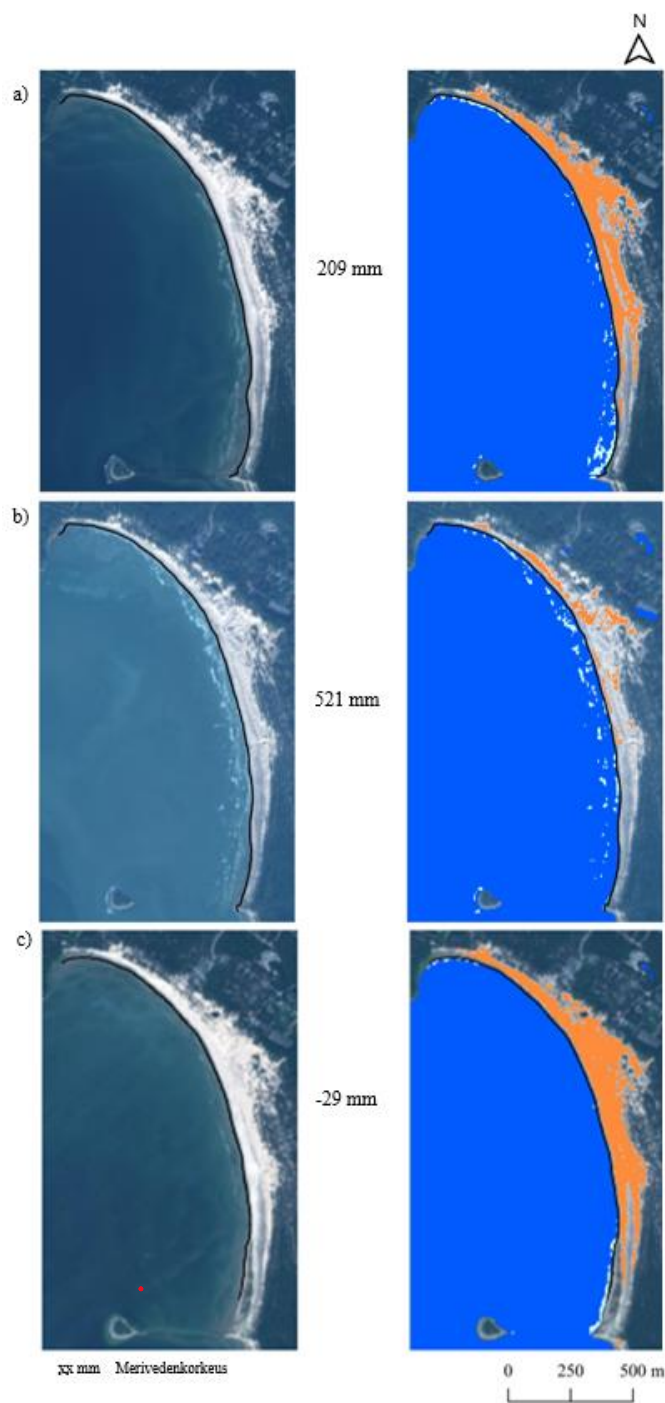
Kökarissa CoastSat-algoritmi luokittelee tyrskyjä kaikilla tuulen nopeuksilla paitsi kahdella kohtalaisen tuulen nopeudella (kuva 19). Tuulen nopeuksilla 4 m/s ja 7 m/s CoastSat ei ole havainnut yhtään tyrskyä, jotka se voisi luokitella tyrskyiksi, näiden pinta-ala on siis nolla hehtaaria. Suurin pinta-ala (3,19 ha) on luokiteltu tuulen nopeudelle 6,6 m/s. Myös 6,5 m/s tuulen nopeudella on huomattavan suuri pinta-ala (2,79 ha). Kaikilla muilla tuulen nopeuksilla tyrskyjen pinta-ala jää alle 0,4 ha. Korrelaatiokerroin Yyterissä tuulen nopeuden ja pinta-alojen välillä on 0,051 ja R²-selitysaste on 0,185. Tuulen nopeuden ja pinta-alojen välillä ei siis ole korrelaatiota eikä tuulen nopeudella voida selittää pinta-alojen muutosta. Myös Kökarissa on havaittavissa sama ilmiö kuin Yyterin sannoilla eli läheisellä tuulen nopeudella pinta-alojen koko muuttuu selvästi. Tuulen nopeuksien 7 m/s ja 7,1 m/s välillä pinta-alojen koko muuttuu 0,38 hehtaarin verran. Korrelaatiokerroin Kökarissa tuulen nopeuden ja pinta-alojen välillä on 0,599 eli korrelaatiota on muuttujien välillä. R²-selitysaste on 0,443 eli tuulen nopeuden vaihtelu selittää jonkin verran pinta-alojen muuttumista Kökarissa.



Kuva 19. Tuulen nopeuden (m/s) ja luokiteltujen tyrskyjen pinta-alan (ha) yhteys toisiinsa Kökarissa.

5.3 Merivedenkorkeuden vaihtelun vaikutus tyrskyvyöhykkeeseen

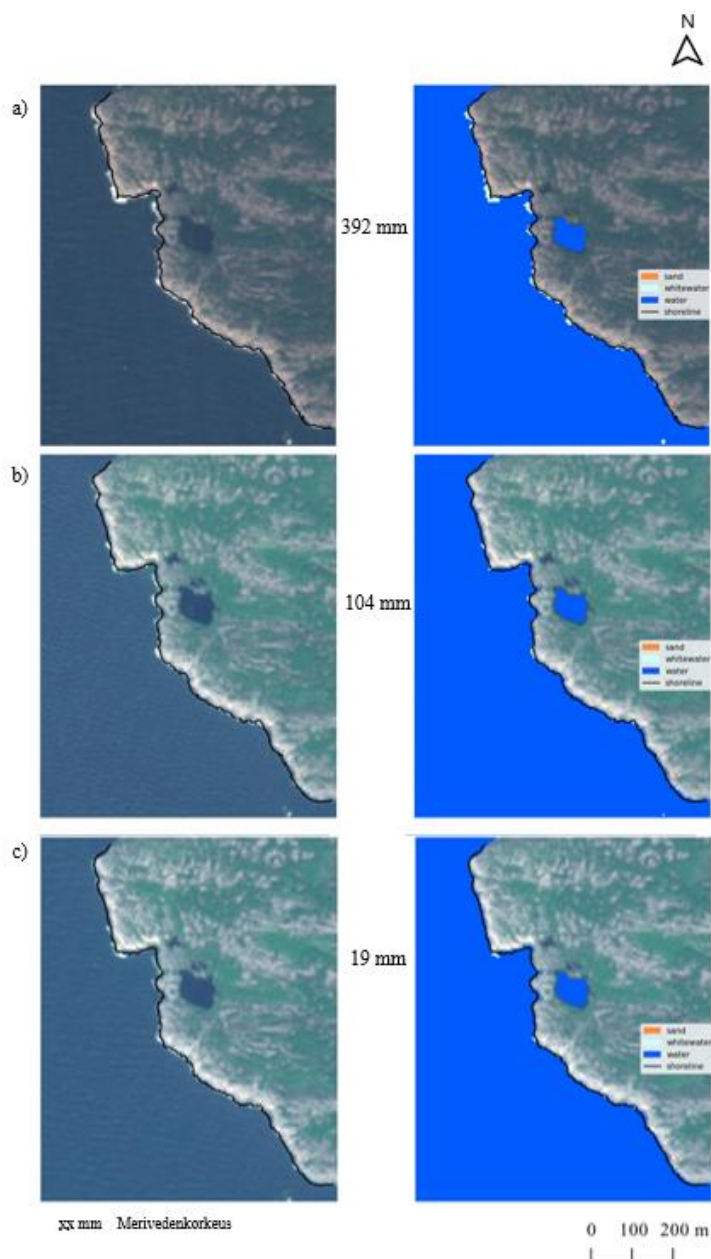
Yyterin näkyvissä olevasta maa-alasta huomaa selkeästi vedenkorkeuden vaihtelun satelliittikuvista (kuva 20). Luokittelussa kuvassa näkyvä rantaviiva myös muuttuu vedenkorkeuden muuttuessa. Tyrskyvyöhykkeen leveys vaihtelee vedenkorkeuden vaihdella siten, että korkeimman vedenkorkeuden tapauksessa tyrskyvyöhyke on levein ja matalimmassa tapauksessa olematon. Tyrskyjen luokittelussa 209 mm sekä -29 mm korkeuksilla on virheitä. Näissä tapauksissa maa-alueita on luokiteltu tyrskyiksi rantaviivan pohjois- ja eteläosassa. Kaikista matalimmassa vedenkorkeuden tilanteessa maa-alueita on luokiteltu tyrskyiksi huomattava määrä rannan eteläpäädyssä. Sama ilmiö huomataan, kun vedenkorkeus on 209 mm, mutta ei yhtä selvästi. Vedenkorkeuden vaihtelut näyttävät vaikuttavan tyrskyjen luokitteluun Yyterin sannoilla merkittävästi.



Kuva 20. Vedenkorkeuden vaihtelun merkityksen vertailu tyrskyjen havaitsemiseen Yuterin sanoilla. Vasemmalla Sentinel-2 satelliittikuva ja oikealla CoastSat-algoritmin luokitteleva kuva. A) Vedenkorkeus 209 mm. Tyrskyjä on havaittavissa rannan keksivaiheilla. Luokitellussa kuvassa rannan eteläpäätyyn on luokiteltu tyrskyjä, vaikka todellisuudessa tyrskyjä ole siellä. B) Vedenkorkeus 521 mm. Tyrskyjä on koko rantaviivan pituudelta. Luokitellussa kuvassa tyrskyjen luokittelu on onnistunut sijainnilta sekä koolta. C) Vedenkorkeus -29 mm. Tyrskyjä ei näy satelliittikuvassa, mutta luokitellussa kuvassa tyrskyjä on luokiteltu rannan eteläpäätyyn.

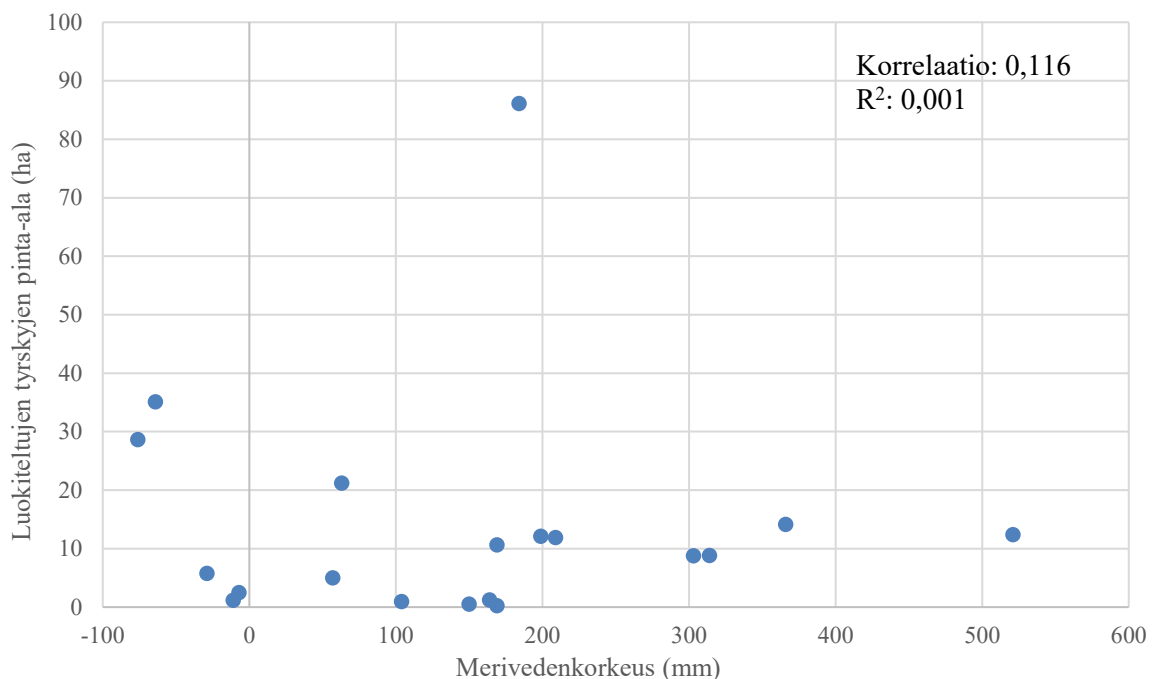
Kökarissa vedenkorkeuden muutokset eivät näy yhtä selkeästi kuin Yuterin sanoilla (kuva 21). Kökarissa ei maa-aluetta näy, mikä vaikuttaa myös vedenkorkeuden vaihtelun havaittavuuteen. Meriveden ollessa hyvin korkealla (392 mm), tyrskyt ovat havaittavissa koko rantaviivan

matkalta. Eniten tässä tapauksessa tyrskyjä on niemen kärjessä ja poukamassa. Vedenkorkeuden ollessa 104 mm, tyrskyt ovat matalammat, mutta näkyvät. Koko rantaviivan matkalla ei ole tyrskyjä, vaan ne sijoittuvat niemen kärkeen sekä poukamaan. Matalimman vedenkorkeuden, 19 mm, tapauksessa tyrskyt ovat kaikista pienimpiä, mutta kuitenkin erottuvia. Tyrskyjä on paikoitellen rantaviivan pituudelta. Tyrskyvyöhykkeen leveys ei vaihtele vedenkorkeuden mukana, vaan tyrskyt esiintyvät yhä aivan rantaviivan tuntumassa.



Kuva 21. Vedenkorkeuden vaihtelun merkityksen vertailu tyrskyjen havaitsemiseen Kökarissa. Vasemmalla Sentinel-2 satelliittikuva ja oikealla CoastSat-algoritmin luokittelemä kuva. A) Vedenkorkeus 392 mm. Tyrskyjä on havaittavissa satelliittikuvassa koko rantaviivan pituudelta. Luokitellussa kuvassa kaikkialle muualle on luokiteltu tyrskyjä paitsi rannan eteläpätyyn. B) Vedenkorkeus 104 mm. Tyrskyjä on rantaviivan keskivaiheelle asti. Luokitellusta kuvasta tyrskyjä on jäänyt melkein kaikki tyrskyt luokittelematta. C) Vedenkorkeus 19 mm. Tyrskyjä näkyy satelliittikuvassa rantaviivan keksivaiheilla. Luokitellussa kuvassa tyrskyjä näkyy vain niemen kärjessä.

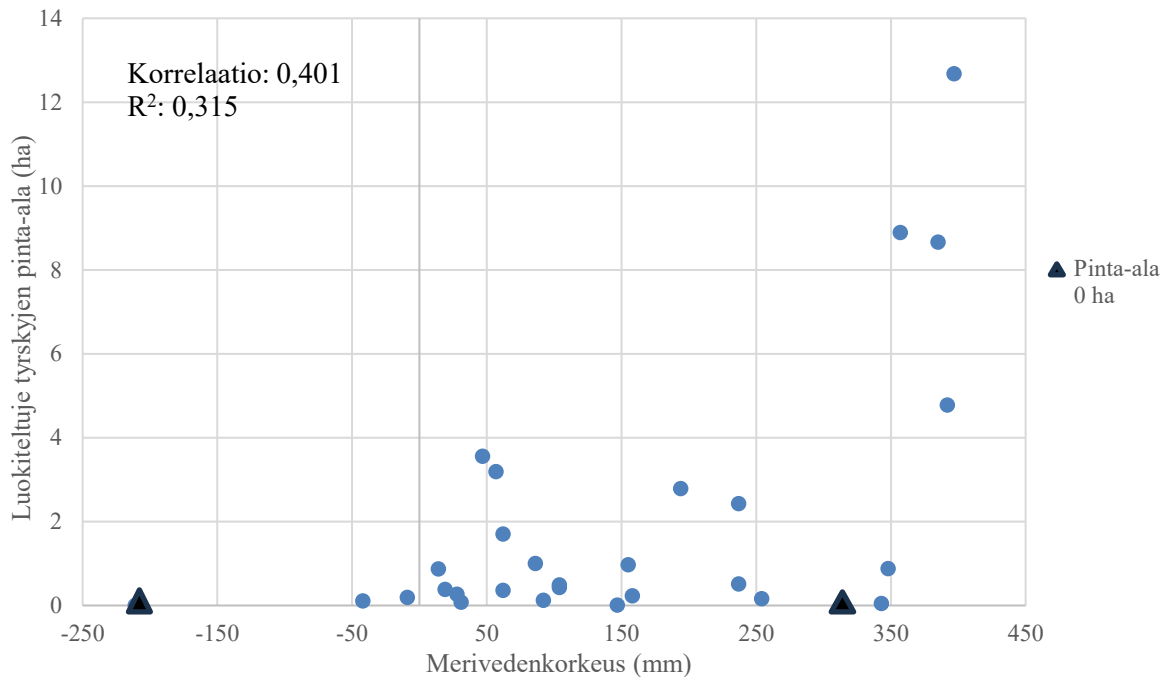
Vedenkorkeuden muuttuessa luokiteltujen tyrskyjen pinta-ala pysyy suhteellisen samana Yyterissä (kuva 22). Vedenkorkeudet vaihtelevat melkein -100 mm ja noin 550 mm välillä. Pisteet ovat hajanaisesti eikä mikään vedenkorkeus Yyterissä vaikuta korostuvan pienillä eikä suurilla pinta-aloilla. Suurimman pinta-alan aikaan vedenkorkeus on ollut noin 200 mm. Noin -100 mm vedenkorkeudella on kaksi pistettä, joiden pinta-ala on noin 30 ja 35 hehtaaria. Yyterin satelliittikuvista huomatiin, että CoastSat-algoritmi luokittelee maa-alueita helposti tyrskyiksi matalilla vedenkorkeuksilla, minkä takia nämä kaksi pinta-alaa saattavat todellisuudessa olla pienemmät. Vedenkorkeuden nousulla tai laskulla ei näytä Yyterin sanoilla olevan yhteyttä luokiteltujen tyrskyjen pinta-alaan. Korrelaatiokerroin on 0,116 eli heikko ja R^2 on 0,001, täten merivedenkorkeuden vaihtelu ei selitä pinta-alojen muutoksia Yyterissä.



Kuva 22. Luokiteltujen tyrskyjen pinta-alat suhteutettuna merivedenkorkeuteen Yyterin sanoilla. Mikään merivedenkorkeus ei erotu joukosta korkeilla pinta-aloilla. Vedenkorkeuden ja luokiteltujen tyrskyjen pinta-alojen välillä ei vaikuta olevan yhteyttä.

Vedenkorkeuden muuttuessa Kökarissa, luokiteltujen tyrskyjen pinta-ala vaikuttaa vaihtelevan hieman (kuva 23). Vedenkorkeuden ollessa alle 0 mm, pinta-alat jäävät nollan tuntumaan. Kaikista matalimmalla vedenkorkeudella (-211 mm) pinta-ala on nolla ha eli CoastSat-algoritmi ei ole tunnistanut tyrskyjä ollenkaan. Toinen tilanne, jossa pinta-ala on 0 ha on vedenkorkeuden ollessa 314 mm. Suurimmat pinta-alat havaitaan vedenkorkeuden ollessa yli 350 mm. Tätä alempien vedenkorkeuksien kesken selkeää yhteyttä pinta-alojen ja vedenkorkeuksien kanssa ei ole havaittavissa. Korrelaatiokerroin on 0,401 eli kohtalainen ja R^2

on 0,315. Voidaan siis sanoa, että Kökarissa vedenkorkeuden vaihtelu selittää osittain pinta-alojen muutoksia.



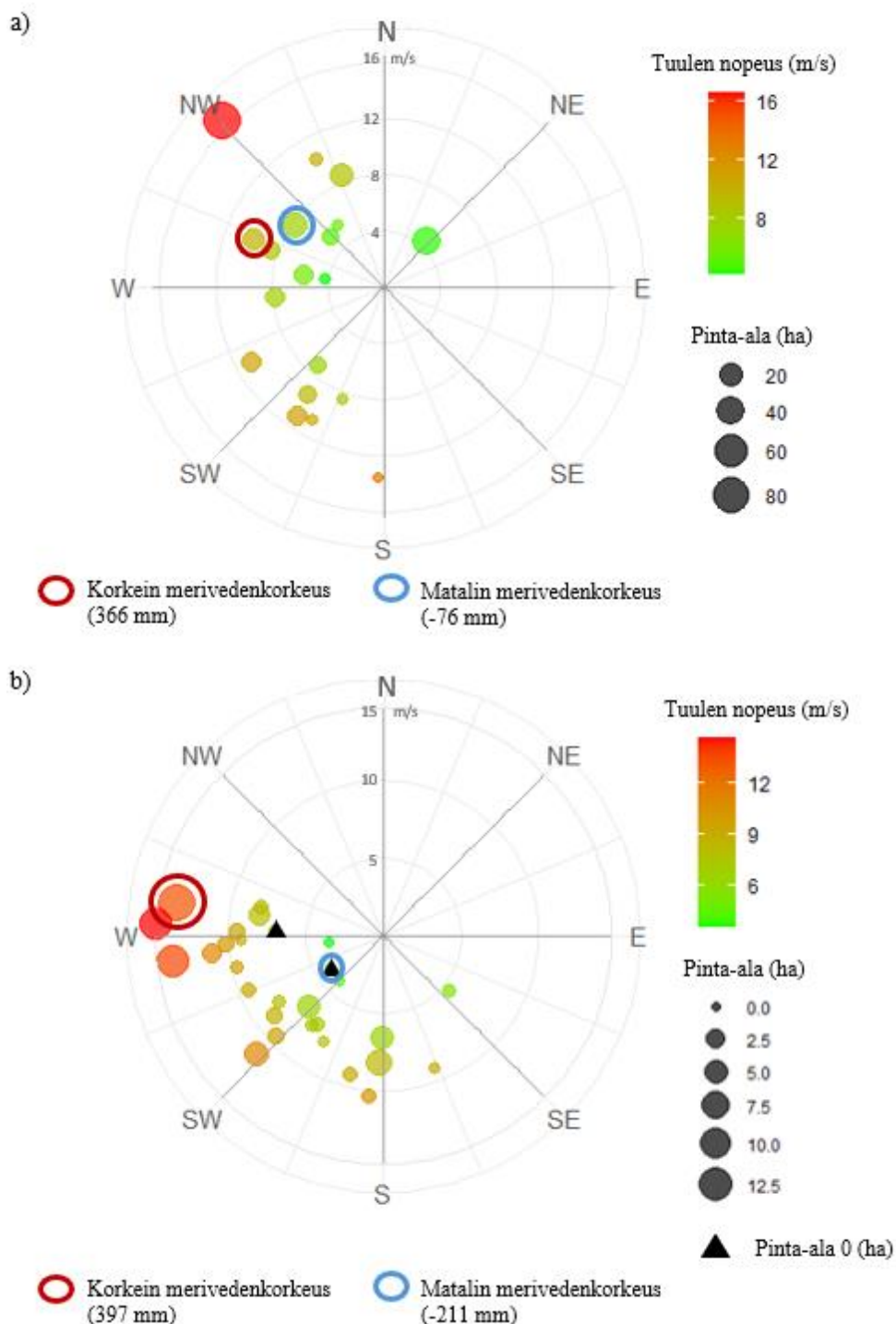
Kuva 23. Luokiteltujen tyrskyjen pinta-alat suhteutettuna merivedenkorkeuteen Kökarissa. Suurimmat pinta-alat ovat yli 250 mm vedenkorkeuksissa. Vedenkorkeuden ja luokiteltujen tyrskyjen pinta-alojen välillä ei muuten näytä olevan yhteyttä.

5.4 Sääolosuhteiden yhteisvaikutus tyrskyvyöhykkeeseen

Yyterissä tuulen nopeuden ja pinta-alojen suhteen ei näy selvää linkkiä (kuva 24 a). Pieniä sekä suuria pinta-aloja on tuulen nopeus skaalan molemmissa päissä. Tämä myös selkeyttää tuulen nopeuden ja pinta-alojen välistä korrelaatiokerrointa (kuva 18). Lisäksi korkein ja matalin vedenkorkeus ovat molemmat hyvin lähellä toisistaan pinta-alan, tuulen nopeuden sekä suunnan puolesta. Tuulen suunnalla eikä tuulen nopeudella vaikuta siis olevan merkitystä vedenkorkeuden kannalta. Tuulen suunnankin suhteen pieniä sekä isoja pinta-aloja on eri tuulen suunnilla eikä yksikään ilmansuunta vaikuta nostavan pinta-aloja. Lounaistuulilla näyttää olevan suurin vaihtelu niin pinta-alojen kuin myös tuulen nopeuksien suhteen. Sääolosuhteiden yhteisvaikutusta ei näytä olevan havaittavissa Yyterin sannoilla.

Kökarissa tuulen nopeuden ja pinta-alojen suhteen näyttää olevan jonkinlainen trendi (kuva 24 b). Mitä nopeampi tuuli on, sitä suurempi pinta-ala myös on suurimassa osin tapauksista. Kuitenkaan tämä ei päde kaikissa tapauksissa. Suurimmalla vedenkorkeudella näyttää tuulevan lujaa lännestä. Tällöin myös pinta-ala on kaikista suurin. Lisäksi muissakin tapauksissa länsituulen ollessa väriskaalan yläpäässä, pinta-alat ovat muita suurempia. Lujan länsituulen

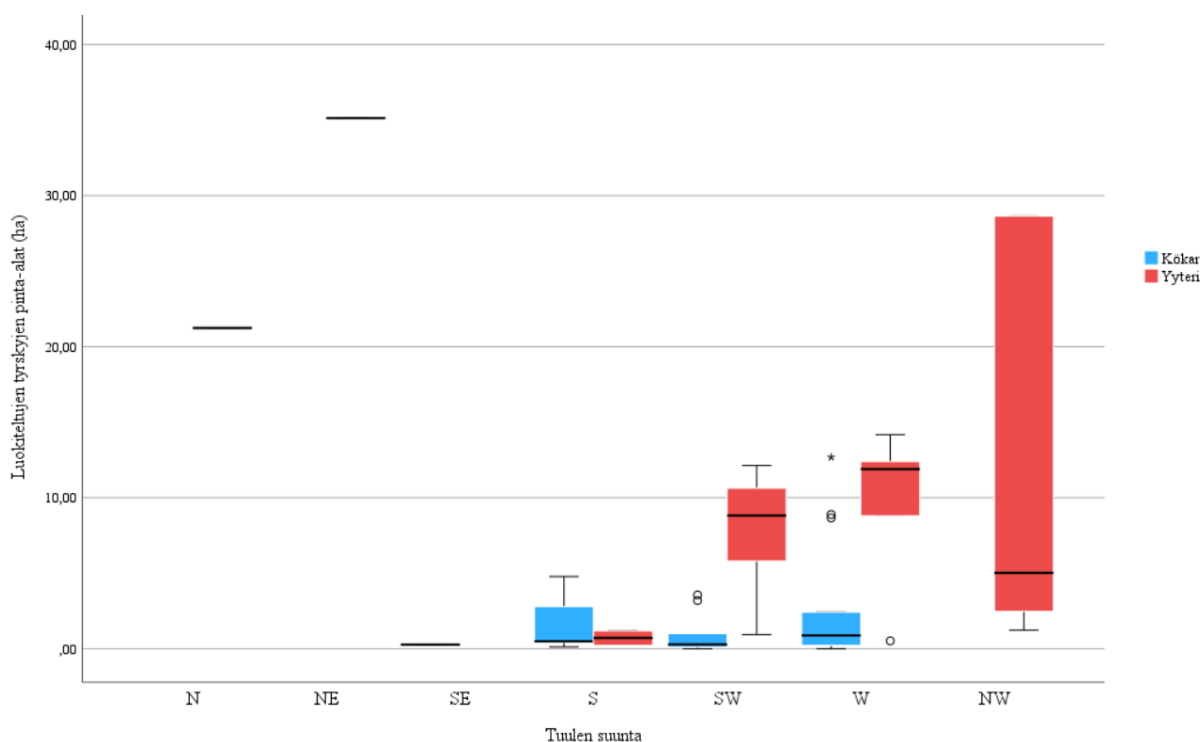
aikana pinta-alat näyttävät kasvavan. Muissa hetkissä, joissa länsituulet ovat heikompia, pinta-alat ovat huomattavasti pienemmät. Kaikista alhaisimman vedenkorkeuden aikana, CoastSat-algoritmi ei ole luokitellut yhtäkään tyrskyä. Tällöin on tuullut lounaasta. Yleisesti tuulen suuntien suhteen mikään ilmansuunta ei erotu länsituulen lisäksi suurilla pinta-aloilla.



Kuva 24 a ja b. Sääolosuhteiden yhteisvaikutuksen tarkastelu Yyterin sannoilla ja Kökarissa. A) Yyterin sannoilla sääolosuhteissa ei ole yhteisvaikutuksen muodostamaa trendiä. B) Kökarista huomataan, että suurimmat luokiteltujen tyrskyjen pinta-alat ovat kovilla länsituulilla. Erityisesti korostuu piste, jolloin on ollut kaikista korkein vedenkorkeus. Näyttää siltä, että tuulen nopeus vaikuttaa luokiteltujen tyrskyjen pinta-aloihin.

5.5 Rannan syvyyssuhteiden vaikutus tyrskyvyöhykkeeseen

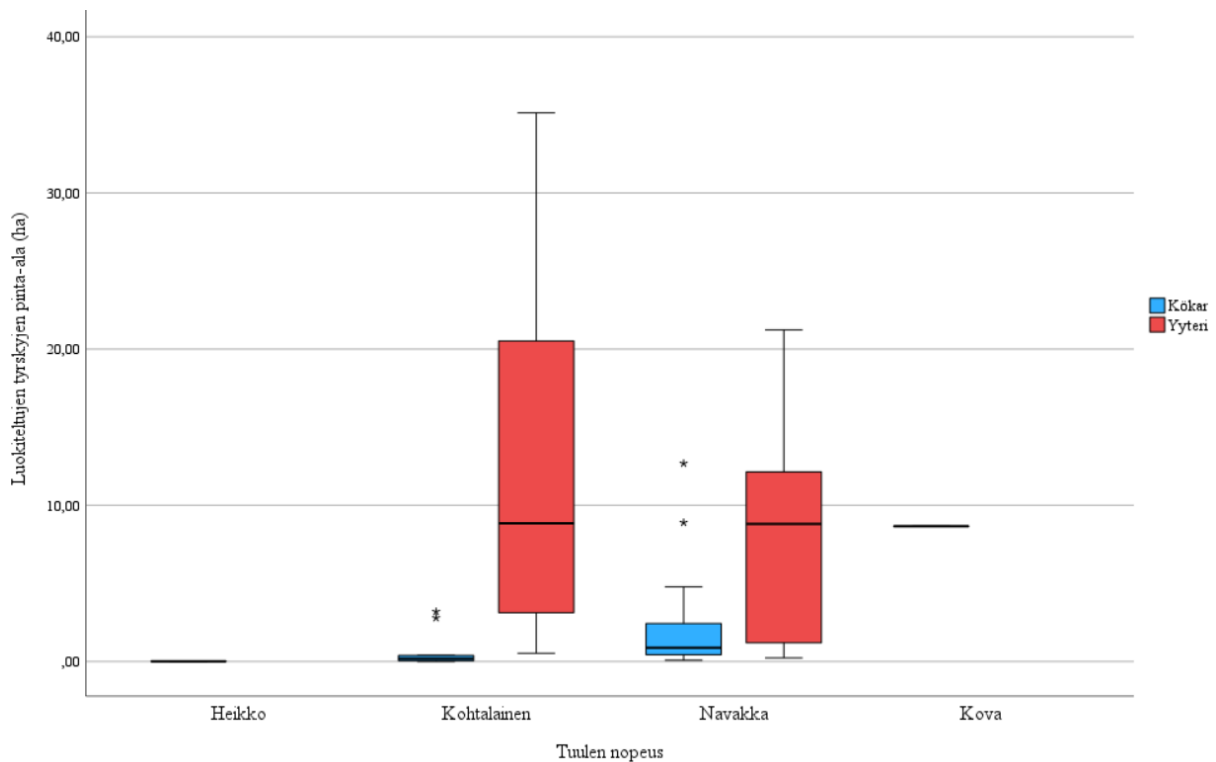
Yyterin sannoilla kuudesta ilmansuunnasta (pohjoinen, koillinen, etelä, lounas, länsi ja luode) tuullessa syntyy tyrskyjä (kuva 25). Näistä viidestä kolme ilmansuuntaa (lounas, länsi ja luode) saavat aikaan tyrskyjä, joiden pinta-ala on suuri. Kökarissa taas tyrskyjä syntyy neljällä ilmansuunnalla (kaakko, etelä, lounas ja länsi). Näistä neljästä kolmella ilmansuunnalla syntyy pinta-alaltaan suuria tyrskyjä (etelä, lounas ja länsi). Rannan syvyyssuhteiden vaikutus huomataan selkeästi, sillä Kökarissa tyrskyjen pinta-alat pysyvät pieninä Yyterin santojen kanssa yhtäläisilläkin tuulen suunnilla. Esimerkiksi länsituulet ovat molemmille tutkimusalueille otollisia tuulia, mutta tästä huolimatta Yyterin sannoilla tyrskyjen pinta-alat ovat suurempia kuin Kökarissa. Syvyyssuhteiden vaikutus huomataan myös siitä, että Kökarin tyrskyjen pinta-alat eivät ole yhdelläkään tuulen suunnalla suuremmat kuin Yyterin sannoilla.



Kuva 25. Yyterin santojen ja Kökarin luokiteltujen tyrskyjen pinta-alat eri tuulen suunnilla. Yyterin sannoilla pinta-alat ovat Kökaria suuremmat. Yyterin santojen luoteistuulen poikkeava pinta-ala 86,13 ha on jätetty pois sen vääristäessä muiden laatikoiden kokoja.

Kökarissa heikko tuuli synnyttää pinta-alaltaan hyvin pienet tyrskyt, kun taas Yyterissä ei ollenkaan (kuva 26). Yyterissä rannan mataluus voi vaikuttaa tähän siten, että tyrskyt eivät jaksa kulkeutua tyrskyvyöhykkeelle saakka pohjan kitkan takia. Kökarissa taas ranta on hyvin syvä, jolloin kitka ei vaikuta. Kohtalaisilla tuulilla Yyterin sannoilla muodostuu paljon tyrskyjä, kun

taas Kökarissa ei. Navakalla tuulella huomataan sama ilmiö. Yyterissä on paljon tyrskyjä, mutta Kökarissa ei. Kovalla tuulella molemmilla tutkimusalueilla on yksi havainto. Yyterin sannoilla tyrskyvyöhyke on leveämpi ja näkyvämpi monissa ajankohdissa kuin Kökarissa (kuva 16 a ja b). Yyterin santojen syvyysolosuhteet mahdollistavat tyrskyvyöhykkeen leventymisen, kun taas Kökarissa aivan rannan tuntumassa on liian syvää tyrskyvyöhykkeen leventymiselle. Kovalla tuulella Yyterissä syntyy hyvin leveä tyrskyvyöhyke, joka näkyy heti tyrskyjen suuressa pinta-alassa (86,13 ha). Kova tuuli saa tyrskyvyöhykkeen levenemään huomattavasti rannan mataluuden takia. Yhdelläkään tuulen nopeudella Kökarin tyrskyjen pinta-alat eivät ole suuremmat kuin Yyterin santojen.



Kuva 26. Yyterin santojen ja Kökarin luokiteltujen tyrskyjen pinta-alojen suhde eri tuulen nopeuksiin. Yyterin sannoilla tyrskyjen pinta-alat ovat huomattavasti suuremmat kuin Kökarissa. Yyterin santojen kovan tuulen poikkeava pinta-ala 86,13 ha on jätetty pois sen vääristäessä muiden laatikoiden kokoja.

6 Keskustelu

6.1 Tuulen ominaisuuksien vaikutus tyrskyvyöhykkeeseen

Tutkimukseni tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että Yyterin sannoilla tyrskyjä muodostavien tuulien suunnan muuttumisella on enemmän merkitystä tyrskyvyöhykkeen muodostumiselle kuin tuulen nopeudella. Yyterin sannoilla suurimmat tyrskyt muodostuvat, kun tuuli puhaltaa luoteesta. Tämä on kiinnostava ilmiö, koska Yyterin santojen pohjoispääty kaartuu siten, että se on luoteistuulien tiellä. Luoteistuulilla tyrskyjä ei voida havaita rannan pohjoispäädystä ollenkaan. Lounaistuulilla nähdään sama ilmiö, mutta päinvastaisesti. Länsituulilla taas tyrskyvyöhyke muodostuu koko rantaviivan pituudelle.

Kökarissa taas tyrskyjä muodostavien tuulien suunnan muuttumisella ei näytä olevan vaikutusta tyrskyjen muodostumiseen. Tyrskyjä syntyy eniten länsituulilla. Tämä saattaa johtua siitä, että lännessä on avointa avomerta, joten aallot saattavat olla korkeammat sieltä tuullessaan. Avomerellä tuulen pyyhkäisymatka on paljon pidempi kuin esimerkiksi saaristoisella alueella, joten näin aallot saavat energiaa enemmän ja kasvattavat kokoaan (Davidson-Arnott 2011). Tämän takia etelästä päin tuullessa tyrskyt saattavat olla näkyvimmit. Hünicke ym. (2015) mukaan aallot ovat avomerellä 10–20 prosenttia suuremmat kuin rantavyöhykkeellä. Etelä- ja lounaistuulilla tyrskyjä muodostuu, mutta pienemmissä määrin kuin länsituulilla. Etelässä päin on saaria, joten näillä saarilla saattaa olla vaikutusta tyrskyjen muodostumiseen. Saaret ovat kuitenkin kauempana kuin Yyterin santojen tapauksessa, minkä takia tyrskyt eivät jää kokonaan muodostumatta. Lounaassa taas ei ole esteitä, minkä takia kohtalaisillakin tuulilla muodostuu pieniä tyrskyjä.

Shabani ym. (2014) tutkimuksessa havaitaan tuulen suunnan olevan merkittävämpi tyrskyjen syntyyn vaikuttava tekijä kuin tuulen nopeus. Yyterin santojen sekä Kökarin tapauksessa sama asia huomattiin tässä tutkimuksessa. Shabani ym. (2014) toteaa tutkimuksessa rantaviivan sijainnin sekä paikallisen topografian vaikuttavan tuuleen ja sitä kautta tyrskyihin. Yyterin sannoilla eikä Kökarissa kummassakaan muodostu tyrskyjä, jos tuulee suoraan maalta. Molemmissa kohteissa yhtenäisimmän tyrskyvyöhykkeen saa aikaan rantaviivaa kohtisuoraan suuntautuvat tuulet. Shabani ym. (2014) huomasi tutkimuksessaan suoraa rantaa kohti suuntautuvien tuulien nostavan aaltojen korkeutta. Tämä saa aikaan näkyvämmän tyrskyvyöhykkeen. Yyterin santojen sekä Kökarin osalta tämä on myös yhtäläinen huomio.

Lisäksi rannan mukaiset tuulet pienentävät tyrskyjen kokoa. Tämä on Kökarissa toinen selittävä tekijä etelätuulien aikana muodostuville pienille tyrskyille.

6.2 Merivedenkorkeuden muutosten vaikutus tyrskyvyöhykkeeseen

Tutkimuksessa huomattiin vedenkorkeuden vaihtelun saattavan vääristää tyrskyjen luokittelun tuloksia. Tämä huomataan varsinkin Yyterin sannoilla, jossa maa-alueita rannan eteläpäädyssä luokitellaan tyrskyiksi vedenkorkeuden ollessa matalalla. Kuitenkin Kökarissa tyrskyjen luokittelutarkkuus kasvaa vedenkorkeuden noustessa. Aagaard (2002) tutkimuksessa havaittiin tyrskyjen kasvavan tyrskyvyöhykkeellä vedenkorkeuden noustessa. Tämä selittää CoastSat-algoritmin luokittelutarkkuuden kasvun. Algoritmi tunnistaa tarkemmin suuremmat tyrskyt kuin pienemmät. Myös Yyterin sannoilla havaitaan tyrskyjen pinta-alan koon muutos satelliittikuvista vedenkorkeuden vaihdellessa.

CoastSat-algoritmissa on otettu huomioon vedenkorkeuden vaihtelut tai pikemminkin vuoroveden aiheuttamat vedenkorkeuden vaihtelut. CoastSat-algoritmissa on kohta vuoroveden aiheuttaman vaihtelun korjaamiselle. Tätä ei kuitenkaan tehty tässä tutkimuksessa, sillä tyrskyjen luokittelu tapahtuu ennen vedenkorkeuden huomioon ottamista. Toisin sanoen vedenkorkeuden muutosten huomioon ottaminen tuskin olisi muuttanut tämän tutkimuksen lopputulosta, sillä virallisesti algoritmi on tarkoitettu rantaviivan muutosten tutkimiseen.

Siinä tapauksessa, että CoastSat-algoritmin vedenkorkeuden vaihtelujen huomioon ottaminen tekisi tyrskyjen luokitteluun muutoksen, näkyisi muutos selvemmin Yyterin sannoilla kuin Kökarissa. Vos ym. (2019) mukaan CoastSatin vedenkorkeuden vaihtelun huomioon ottaminen on hyvin tärkeää rannoilla, jotka ovat syvyysolosuhteiltaan matalia. Yyterin sannot ovat juuri tällainen ranta. Vos ym. (2019) tutkimuksessa on CoastSat-algoritmin validointiin käytetty esimerkkinä Australiassa sijaitsevaa Narrabeen-Collaroy-rantaa, joka kuuluu mikrovuoroveden luokkaan eli vuoroveden vaihtelu on hyvin vähäistä ja rannan kaltevuus on hyvin alhainen. Voidaan siis olettaa, että Yyterin sannot ovat melko lähellä Narrabeen-Collaroy-rantaa. Validoinnin tuloksena saatiin, että CoastSat-algoritmin luokittelemat rantaviivat vastaavat kentällä mitattuja arvoja. Vedenkorkeuden muutosten korjaaminen siis saattaisi vähintään Yyterin sannoten tapauksessa korjata osan tyrskyjen luokitteluvirheistä, jos vedenkorkeuden korjaus tehtäisiin ennen tyrskyjen luokittelua.

6.3 Syvyysolosuhteiden vaikutus tyrskyvyöhykkeeseen

Yyterin sannat on hyvin loivapiirteinen ranta pitkälle merelle. Wrightin (1984) mukaan tällaisilla rannoilla on tyypillisesti leveä tyrskyvyöhyke, joka huomataan tuloksista. Niiden perusteella CoastSat-algoritmin vaikuttaa olevan helpompi tunnistaa tyrskyt leveällä tyrskyvyöhykkeellä kuin kapealla. Kökarissa taas ranta on hyvin jyrkkä ja kallioperäinen, mikä taas Wrightin (1984) mukaan luo kapean tyrskyvyöhykkeen. Tämäkin huomataan tämän tutkimuksen tuloksista. Myös kapean tyrskyvyöhykkeen vaikutus tyrskyjen tunnistukseen huomataan, sillä CoastSat-algoritmi ei tunnista rantaviivassa kiinni olevia tyrskyjä oikein.

Syvyysolosuhteiden merkitys näkyy aaltojen murtumisen sijainnissa Gomes ym. (2016) mukaan. Jos rannassa on paljon syvyysvaihteluita, aallot murtuvat eri kohdissa rantaa. Aaltojen koko myös vaikuttaa niiden murtumiseen (Holden 2017). Korkeammat aallot murtuvat kauempana rannasta, sillä niiden partikkeleiden liike yltää syvemmälle kuin matalimmissa aalloissa. Rannan pohja alkaa siis vaikuttaa korkeisiin aaltoihin aiemmin kuin mataliin aaltoihin. Tämän takia kovilla tuulilla Yyterin sannoilla tyrskyvyöhyke levenee huomattavasti. Yyterin sannat madaltuu huomattavasti rantaviivaa kohden, joten korkeat aallot murtuvat kaukana rantaviivasta.

Gomes ym. (2016) mukaan refraktio on yksi tekijä, joka vaikuttaa aaltojen käyttäytymiseen rannassa ja lopulta aaltojen murtumiseen. Kökar on syvyysolosuhteiltaan hyvin syvä ranta, kun taas Yyterin sannat on hyvin matala. Kökarissa tyrskyvyöhyke on jokaisessa tilanteessa hyvin kapea, aivan rantaviivan tuntumassa. Yyterin sannoilla taas tyrskyvyöhyke levenee sääolosuhteiden mukaan. Syvyyden ollessa suuri lähellä rantaviivaa, refraktio ei pysty vaikuttamaan aaltojen käyttäytymiseen niin paljoa, sillä aaltojen partikkeleiden liike ei yllä pohjaan asti. Liikkeen pitää yltää pohjaan asti, jotta refraktiota voi tapahtua.

Vos ym. (2019) käyttivät Narrabeen-Collaroy-rantaa esimerkkinä CoastSat-algoritmin toimintaa kuvailevassa artikkelissa. Narrabeen-Collaroy-rannalla aallonkorkeudet ovat 1,5 metrin luokkaa (Short ym. 2012) eli korkeammat kuin Yyterin sannoilla tai Kökarissa. Narrabeen-Collaroy-ranta syvenee kilometrin matkalla kuusitoista metriä. Vertailuna Yyterin sannat syvenee noin neljään metriin ja Kökar taas noin 80 metriin. Vos ym. (2019) tutkimuksessa olevassa kuvassa näkyy kapeahko tyrskyvyöhyke rantaviivan tuntumassa. Narrabeen-Collaroy-rannalla huomataan syvyysolosuhteiden merkitys, sillä vaikka aallot ovat

korkeampia kuin Yyterin sannoilla tai Kökarissa, tyrskyvyöhyke on silti aivan rantaviivan tuntumassa.

6.4 CoastSat-algoritmin käyttö tyrskyjen luokittelussa

Tässä tutkimuksessa huomattiin, että Yyterin sannoille sekä Kökariin muodostuu sääolosuhteiden mukaan ominaisuuksiltaan erilaisia tyrskyvyöhykkeitä. Ne saattavat olla kapeita, leveitä, selkeästi erottuvia tai vaatia tarkempaa tarkastelua. Tutkimusalueilla tyrskyt eivät siis ole koko luokaltaan yhtä suuria kuin muualla maailmassa. Tämä vaikuttaa suoraan CoastSat-algoritmin kykyyn tunnistaa tyrskyvyöhyke sekä luokitella tyrskyjä. Ilmiö nousee esiin varsinkin Kökarissa kapean tyrskyvyöhykkeen takia sekä Yyterissä alhaisella tuulen nopeudella. Tyrskyjen erilaisten ominaisuuksien takia CoastSat-algoritmin valmiiksi tarjoamien satelliittikuvien spatiaalinen resoluutio ei välttämättä riitä kuvaamaan niitä riittävän tarkasti. Tässä tutkimuksessa käytetyn Sentinel-2-satelliitin spatiaalinen resoluutio on 10 metriä, mikä saattaa olla tutkimusalueilla esiintyvillä tyrskyillä liian suuri. Doherty ym. (2022) tutkimuksessa kehitettiin CoastSat-algoritmilta uusi versio, jossa hyödynnetään Landsat-5,7,8 ja Sentinel-2-satelliittien sijaista PlanetScope-satelliittia. Sen spatiaalinen resoluutio on kolme metriä, joka saattaa olla Yyterin sannoille sekä Kökariin soveltuvampi. Lisäksi PlanetScope-satelliitin ajallinen resoluutio on yksi päivä eli satelliittikuvia on saatavilla useammin.

Doherty ym. (2022) tutkimuksessa myös verrattiin Landsat-8, Sentinel-2 sekä PlanetScope -satelliittien spatiaalista resoluutiota toisiinsa. Doherty ym. (2022) tutkimuksen kuvista huomataan tyrskyjen erottuvuudessa huomattava ero. Kökarissa tyrskyvyöhykkeen kapeuden takia, tyrskyjen tarkkarajainen erotus on hyvin tärkeää oikeellisten luokittelutulosten saavuttamiseksi. Landsat-8 kuvassa tyrskyvyöhyke on hyvin pikselinen eikä tyrskyvyöhykkeen selvää rajaa pysty erottamaan (Doherty ym. 2022). Sentinel-2 kuvassa taas kuva on huomattavasti tarkempi, mutta silti tyrskyvyöhyke jää epäselväksi. Vos ym. (2019) CoastSat-algoritmia esittelevässä artikkelissa tyrskyt luokittuvat kooltaan liian suureksi, sillä tyrskyjen rajat ovat resoluution takia epäselvät. Doherty ym. (2022) tutkimuksen PlanetScope-kuvassa tyrskyvyöhyke on paljon selvä rajaisempi ja tyrskyt erottuvat huomattavasti paremmin verattuna Sentinel- ja Landsat-kuviin. Yyterin santon ja Kökarin, sekä muun Suomen rannikon tyrskyjen, tarkasteluun PlanetScope-satelliitin tuottamat kuvat ovat tarkemman resoluution takia soveltuvampia.

Truc Vert -rannalle tehtiin CoastSat-algoritmin luokittelu Castelle ym. (2021) tutkimuksessa. Kyseinen ranta on suoraan avoin Atlantille (Sénéchal ym. 2004), jolloin sen aalto-olosuhteet ovat erilaiset kuin Yyterin sannoilla tai Kökarissa. Castelle ym. (2021) tutkimuksen satelliittikuvissa näkyy tyrskyjä koko rantaviivan pituudelta leveänä tyrskyvyöhykkeenä. Luokittelussa tyrskyt myös on tunnistettu koko matkalta sijainniltaan sekä kooltaan oikein. On siis hyvin todennäköistä, että Yyterin sannoilla sekä Kökarissa esiintyvät tyrskyt ovat liian matalia CoastSat-algoritmin luokitteluun. Yyterin sannoilla sekä Kökarissa tyrskyjen vaahtopäät ovat näkyvissä satelliittikuvissa, mutta eivät yhtä selkeästi kuin Truc Vert -rannalla. Tyrskyt eivät Yyterin sannoilla eikä Kökarissa muodostaneet yhtenäistä leveää tyrskyvyöhykettä millään tuulen nopeudella tai tuulen suunnalla. Tyrskyvyöhykkeessä olevat tyhjät aukot saattavat aiheuttaa CoastSat-algoritmilta vaikeuksia erottaa tyrskyt ja vesialue toisistaan.

Tässä tutkimuksessa ilmeni CoastSat-algoritmin heikkoutena tunnistaa maa-alueita tyrskyiksi. Ilmiö esiintyy Yyterin sannoilla ja korostuu varsinkin matalilla merivedenkorkeuksilla. Yyterissä rannan eteläpäädyssä näkyy vedenkorkeuden vaihtelun erot selkeästi, sillä mitä matalammalla vesi on, sitä enemmän maa-aluetta paljastuu esiin. CoastSat-algoritmi on luokitellut monessa tapauksessa huomattavan laajan maa-alueen tyrskyiksi nimenomaan rannan eteläpäädyssä. Tätä ongelmaa ei ole havaittavissa Vos ym. (2019) eikä Castelle ym. (2021) tutkimusten luokitelluista kuvista. Maa-alueen luokittuminen tyrskyiksi vaikuttaa siis olevan tässä tutkimuksessa esiin noussut ongelma, joka saattaa johtua Yyterin santon syvyysolosuhteista. Vos ym. (2019) ja Castelle ym. (2021) tutkimusalueiden rannat ovat syvempiä kuin Yyterin rannat. Tämä saattaa vaikuttaa luokitteluun. Huomionarvoista kuitenkin on, että CoastSat-algoritmi on kehitetty nimenomaan hiekkarannoille, jolloin algoritmin maa-alueen ja tyrskyjen välisen erotuskyvyn olevan hyvä. Tätä ongelmaa ei kuitenkaan välttämättä ole osattu ottaa huomioon, sillä CoastSat-algoritmia ei ole kehitetty tyrskyjen tunnistamiseen.

Tyrskyjen havaitsemiseen on kehitetty muitakin algoritmeja. Yksi näistä on Gartnerin luoma ”White-Water Detection Script” (2019), jossa algoritmi on kohdistettu nimenomaan havaitsemaan tyrskyjä tyrskyvyöhykkeellä satelliittikuvista. CoastSat-algoritmissa tyrskyjen tunnistus taas tapahtuu sivutuotteena. Gartnerin (2019) luoma algoritmi on löydettävissä Sentinel Hubista sekä GitHubista. Tyrskyvyöhykkeen lisäksi tyrskyjä voidaan havaita isoista joista. Gartnerin (2019) mukaan koodia pitäisi pystyä soveltamaan kaikkialle maailmaan kuten myös CoastSat-algoritmia piti. CoastSat-algoritmissa ei ollut mainintaa eri aalto-olosuhteiden

vaikutuksesta tyrskyjen havainnointiin. Gartnerin (2019) algoritmissa taas on maininta, että sen pitäisi toimia myös matalissa aalto-olosuhteissa. Tämä algoritmi siis saattaisi olla soveltuvampi Yyterin santojen sekä Kökarin kontekstiin. Kuitenkin Gartnerin (2019) algoritmissa myös mainitaan, että pilvisellä säällä algoritmi saattaa tunnistaa pilvet virheellisesti tyrskyiksi. Tämä saattaisi tuottaa ongelmia Yyterin sanoille kuin myös Kökariin. Lisäksi Gartnerin (2019) algoritmissa mainitaan, että valkoiset hiekka-alueet saattavat luokitua virheellisesti tyrskyiksi, tämä saattaisi olla ongelma Yyterin sanoilla, sillä hiekka siellä on hyvin valkoista osassa satelliittikuvissa. Gartnerin (2019) luoma algoritmi saattaisi toimia Yyterin sanoilla ja Kökarissa osittain, mutta luokittelu virheitä on mahdollista syntyä yhä.

CoastSat-algoritmin (2019) ja Gartnerin (2019) algoritmin lisäksi on olemassa Surfzone AI, joka aaltojen murtumisen lisäksi tunnistaa vedessä olijat (Surfzone.AI 2024.). Surfzone.AI toimii rannalla olevien kameroiden kautta, joten se eroaa hyvin paljon CoastSat-algoritmistä ja Garnerin (2019) algoritmistä. Tästä huolimatta Surfzone.AI tunnistaa aaltojen ominaisuudet ja aaltojen murtumisen ja tätä kautta tyrskyt rannassa. Lisäksi se mallintaa ennusteita aaltojen murtumisesta. Tämä on siis yksi tapa tunnistaa tyrskyt rannassa ja tätä kautta tehdä muun muassa mallinnuksia esimerkiksi ranta-alueiden suunnittelua varten. Satelliittikuvia ei siis välttämättä tarvitse käyttää tyrskyvyöhykkeen ja tyrskyjen tunnistukseen ja havaitsemiseen. Surfzone.AI tuottaa myös ajantasaisempaa tietoa, sillä se tuottaa dataa jatkuvasti eikä vain kerran muutamassa päivässä kuten satelliitti. On kuitenkin huomioitava, että satelliittikuvien ja maassa olevan kameran tuottamien data ei välttämättä ole vertailukelpoista sillä datan tuottotavat ovat täysin erilaiset.

6.5 Tutkimuksen epävarmuustekijät sekä jatkotutkimus

CoastSat-algoritmi on kehitetty käytettäväksi hiekkarannoilla (Lanza ym. 2022). Yyterin sannat ovat siis käyttötarkoituksen näkökulmasta otollinen tutkimusalue. Kökar taas ei ole käyttötarkoituksen näkökulmasta soveltuva tutkimusalue. Kalliorannoilla rantaviivan muutosta ei tapahdu ajallisesti samassa suhteessa kuin hiekkarannoilla, minkä takia käyttötarkoitus on rajattu vain hiekkarannoille. Kuitenkin epäotollisesta tutkimusalueesta huolimatta CoastSat-algoritmi tunnistoi Kökarissa tyrskyjä samalla tavalla kuin Yyterissä. Lisäksi matalilla hiekkarannoilla tyrskyvyöhykkeet ovat lähtökohtaisesti leveämmät (Wright 1984). Tämänkin takia Yyterin sannat ovat tyrskyvyöhykkeen kaukokartoittamiseen soveltuvampi kohde.

Tyrskyjen pinta-aloissa ja täten niiden suhteessa tuulen suuntiin, tuulen nopeuksiin sekä vedenkorkeuden vaihteluihin on otettava huomioon Coast-Sat-algoritmin luokittelutarkkuus. Luokiteltujen tyrskyjen pinta-alat ovat nimenomaan laskettu luokitelluista kuvista. Tämä on tärkeä huomio, sillä CoastSat-algoritmi ei tunnistanut kaikkia tyrskyjä kooltaan oikein kummallakaan tutkimusalueella. Yyterin sannoilla monessa tilanteessa maa-alueita on luokiteltu tyrskyiksi. Tästä ääripäätapaus on koillistuulen aikaan, jolloin maa-alueita on luokitellut tyrskyiksi, vaikka satelliittikuvassa tyrskyjä ei juurikaan ole (liite 4, kuva 11). Kökarissa taas monessa tapauksessa tyrskyjen pinta-alat jäivät liian pieniksi luokitelluissa kuvissa. Näiden syiden takia tämän tutkimuksen tulokset eivät välttämättä vastaa todellisuutta, koska luokiteltujen tyrskyjen pinta-alat eivät joka tilanteessa vastaa todellisten tyrskyjen pinta-aloja. Tästä huolimatta tämän tutkimuksen tulokset ovat suuntaa antavia ja todellisuudessa esimerkiksi tuulen suunnan ja tyrskyjen pinta-alan välinen korrelaatio saattaa olla vahvempi.

Jatkotutkimuksen kannalta on tärkeää käyttää korkeampi resoluutioisia kuvia, jotta tyrskyjen todelliset rajat ja näin niiden koko erottuvat satelliittikuvista paremmin. Tämä on otettava huomioon varsinkin rannoilla, joilla on kapea tyrskyvyöhyke. Lisäksi jatkotutkimuksissa erilaisia tuloksia voitaisiin saada vaihtamalla CoastSat-algoritmi esimerkiksi Gartnerin (2019) kehittämään algoritmiin, sillä sen päätavoitteena on tunnistaa tyrskyjä. Näillä yhdessä jo saataisiin tarkempia tuloksia tämänkin tutkimuksen tutkimusalueilta.

Toisaalta jatkotutkimuksessa voitaisiin hyödyntää ainoastaan satelliittikuvia ja laskea näistä tyrskyjen pinta-alat. Tällöin tyrskyjen pinta-alat vastaisivat enemmän todellisuutta. Tällöin myös nolla arvon pinta-alat saataisiin pois. Tässä tutkimuksessa Kökarissa CoastSat-algoritmi on kahdessa tapauksessa jättänyt tyrskyt luokittelematta, vaikka satelliittikuvassa niitä näkyy. Tämä saattaa olla kaukokartoituksen liittyvä ongelma, jolloin CoastSat-algoritmi ei yksinkertaisesti ole erottanut kuvasta tyrskyjä. Toisaalta ongelma saattaa olla sääolosuhteista johtuva, jolloin tyrskyjä ei vain ole syntynyt. Tämänkin ongelma ratkeaisi, jos tyrskyjen pinta-ala laskettaisiin suoraan satelliittikuvista.

7 Johtopäätökset

Molemmilla tutkimusalueilla tyrskyjä syntyy vain tietyillä tuulen suunnilla. Maatuuli ei kummallakaan tutkimusalueella saa aikaan tyrskyjä. Yhtenäisimmät tyrskyvyöhykkeet syntyvät molemmilla tutkimusalueilla, kun tuuli puhaltaa kohtisuoraan rantaviivaa kohden. Yyterin sannoilla tuulen suunnan muuttuminen tyrskyjä muodostavien tuulen suuntien välillä ei näytä vaikuttavan luokiteltujen tyrskyjen pinta-aloihin. Suurimpia tyrskyjä näyttää muodostuvan luoteistuulilla. Kökarissa taas suurimmat luokiteltujen tyrskyjen pinta-alat muodostuvat länsituulilla. Tuulen suunnan osalta heikot tuulet eivät saa Yyterin sannoilla aikaan tyrskyjä. Muiden tuulen nopeuksien välillä ei näytä olevan korrelaatiota luokiteltujen tyrskyjen pinta-alojen kanssa. Kökarissa jokaisella neljällä tuulen nopeusluokalla muodostuu tyrskyjä. Tuulen nopeuden ja luokiteltujen tyrskyjen pinta-alojen koon kasvulla näyttää olevan yhteys. Yyterin sannoilla vedenkorkeuden muutoksilla ei vaikuta olevan yhteyttä tyrskyjen pinta-alojen koon vaihteluun. Kökarissa taas näyttää siltä, että korkean vedenkorkeuden aikaan tyrskyjen pinta-alat ovat jonkin verran suurempia. Syvyysolosuhteet vaikuttavat tyrskyvyöhykkeen leveyteen siten, että tuulen nopeuden kasvaessa tyrskyvyöhyke levenee. Syvyyden vaikutus tyrskyvyöhykkeeseen on huomattava tutkimusalueiden välillä. CoastSat-algoritmi ei tunnistanut kaikkia tyrskyjä satelliittikuvista. Useassa eri tilanteessa algoritmi jättää varsinkin Kökarissa huomattavan määrän tyrskyjä luokittelematta. Yyterin sannoilla sama ilmiö on havaittavissa. Tämän lisäksi Yyterin sannoilla maa-aluetta luokituu tyrskyiksi useassa tapauksessa. CoastSat-algoritmin luokittelutarkkuus ei siis ole kovin korkea.

Kiitokset

Kiitän Pro gradu -tutkielmani ohjaajia Harri Tolvasta ja Tua Nyléniä.

Lähteet

- Aagaar, T. (2002) Modulation of Surf zone processes on a barred beach due to changing water levels; Skallingen, Denmark. *Journal of Coastal Research* 18(1), 25-38.
<http://www.jstor.org/stable/4299051>
- Baltic Sea ice services (s.a.) Ice statistics. < <https://www.bsis-ice.de/statistik/Stationindex.html#FI>> 11.10.2024.
- Burchart, H. F., Hawkings, S. J., Zanuttigh, B & Lamberti, A. (2007) Design tools related to engineering. Teoksessa Burchart, H. F., Hawkings, S. J., Zanuttigh, B & Lamberti, A. (toim.) *Environmental design guidelines for low crested coastal structures*, 203-333. Elsevier.
- Castelle, B., Masselink, G., Scott, T., Stokes, C., Konstantinou, A., Marieu, V. & Bujan, S. (2021). Satellite-derived shoreline detection at a high-energy meso-macrotidal beach. *Geomorphology* 383. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107707>
- Castelle, B., Scott, T., Brander, R.W., McCarroll, R.J. (2016) Rip current types, circulation and hazard. *Earth-Science Reviews* 163, 1-21.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.09.008>
- Catalan, P. A., Haller, M. C., Holman, R. A. & Plant, W. J. (2011) Optical and microwave detection of wave breaking in the surf zone. *Transactions on geoscience and remote sensing* 49(6) 1879-1893. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2095864>
- Chen, W., van der Werf, J. & Hulscher, S. (2023) A review of practical models of sand transport in the swash zone. *Earth-Science Reviews* 238(1).
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104355>
- Dally, W. R. (2005) Surf zone processes. Teoksessa Schwartz, M. (toim.) *Encyclopedia of coastal science*, 929-935. Springer Dordrecht.
- Davidson-Arnott, R. (2011) Wave-Dominated Coasts. Teoksessa Wolanski, E. McLusky D. (toim.) *Treatise on estuarine and coastal science*, 73–116. Elsevier.
- Davidson-Arnott, R., Bauer, B. Houser, C. (2019) *Introduction to coastal processes and geomorphology*. 2. p. Cambridge University Press, Cambridge.
- De Vries, S., Hill, D.F., de Schipper, M.A. & Stive, M.J.F. (2011) Remote sensing of surf zone waves using stereo imaging. *Coastal Engineering* 58(3) 239-250.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.10.004>

- Doherty, Y., Harley, M. D., Vos, K. & Splinter K. D. (2022) A Python toolkit to monitor sandy shoreline change using high-resolution PlanetScope cubesats. *Environmental Modelling & Software* 157. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105512>
- Feddersen, F. & Trowbridge, J. H. (2005) The effect of wave breaking on surf-zone turbulence and alongshore currents: A Modeling Study. *Journal of physical oceanography* 35(11) 2187-2203. <https://doi.org/10.1175/JPO2800.1>
- Feddersen, F. & Veron, F. (2005) Wind Effects on Shoaling Wave Shape. *Journal of physical oceanography* 35(7) 1223-1228. <https://doi.org/10.1175/JPO2753.1>
- Flinn, D. (1997) The role of wave diffraction in the formation of St. Ninian's Ayre (Tombolo) in Shetland, Scotland. *Journal of coastal research* 13(1), 202-208. <https://journals.flvc.org/jcr/article/view/80119>
- Fuell, K. K., Wesley, D. & Bol, A. (2016) J2.5 Comet ® Marine and coastal meteorology modules. *UCAR/COMET* 2(5) https://www.researchgate.net/publication/260385743_J25_COMET_R_MARINE_AND_COASTAL_METEOROLOGY_MODULES
- Gartner, M. (2019) White-water detection script. SentinelHub. < https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/white_water/>
- Gomes, E. R., Mulligan, R. P., Brodie, K. L. & McNinch, J. E. (2016) Bathymetric control on the spatial distribution of wave breaking in the surf zone of a natural beach. *Coastal Engineering* 116(2016), 180-194. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.06.012>
- Hanes, D. M. (2022) *Treatise on geomorphology*. 2. p. Academic Press.
- Hashim, R., Roy, C., Motamedi, S., Shamsirband, S. & Petkovic, D. (2016) Selection of climatic parameters affecting wave height prediction using an enhanced Takagi-Sugeno-based fuzzy methodology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60(2016), 246-257. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.098>
- Haslett, S. (2008) *Coastal systems*. 2. p. Routledge.
- Hesp, P. & Smyth, T. (2016) Surfzone-beach-dune interactions: flow and sediment transport across the intertidal beach and backshore. *Journal of Coastal Research* 75(1), 8-12. <https://doi.org/10.2112/SI75-002.1>
- Holden, J. (2017) *An introduction to Physical Geography and the Environment*. 4. p. Pearson, Harlow.
- Hume T. M., Mulchay, N. & Mead, S. T. (2019) An overview of changing usage and management issues in New Zealand's surf zone environment. *Journal of coastal research* 87(SI) 1-12. <https://doi.org/10.2112/SI87-001.1>

- Hünicke, B., Zorita, E., Soomere, t., Madsen, K. S., Johansson, M. & Suursaar, Ü. (2015) Recent Change-Sea level and wind waves. Teoksessa The BACC II author team (toim.) *Second assessment of climate change for the Baltic Sea basin*, 155-185. Springer Cham.
- Ilmatieteen laitos (2022) Vedenkorkeuden mittaaminen. 29.7.2022.
< <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/mareografi>> 12.10.2024.
- Ilmatieteen laitos (2023) Tuulet ja myrskyt. 24.2.2023
<<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tuulet>> 10.9.2024.
- Ilmatieteen laitos (2024) Korkeusjärjestelmät merivedelle Suomessa. 27.6.2024. <
<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/keskivesitaulukot>> 12.10.2024.
- Ilmatieteen laitos (2024) Tuulen nopeus. (CC BY 4.0) <
<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>> 22.10.2024.
- Ilmatieteen laitos (2024) Keskituulen suunta. (CC BY 4.0) <
<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>> 22.10.2024.
- Ilmatieteen laitos (2024) Vedenkorkeus N2000-järjestelmässä. (CC BY 4.0) <
<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>> 22.10.2024.
- Inch, K. (2014) Surf zone hydrodynamics: Measuring waves and currents. Teoksessa Goudie, A. (toim.) *Geomorphological Techniques*, 2-13. British society for geomorphology.
- Joodaki, G., Nahavandchi, H. & Cheng, K. (2013) Ocean wave measurement using GPS buoys. *Journal of Geodetic Science* 3(3) 163-172. <https://doi.org/10.2478/jogs-2013-0023>
- Kennedy, D. M., Sherker, S., Brighton, B., Weir, A. & Woodroffe, C. D. (2013) Rocky coast hazards and public safety: Moving beyond the beach in coastal risk management. *Ocean & Coastal management* 82(September 2013) 1-150.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.06.001>
- Labuz, T. A. (2015) Environmental impacts – Coastal erosion and coastline changes. Teoksessa The BACC II author team (toim.) *Second assessment of climate change for the Baltic Sea basin*, 381-396. Springer Cham.
- Lanza, A., Sullenberg, R. M., Chen, J. G. & Hopkins, J. (2022) Expanding coastsat shoreline detection algorithm to track coastal vegetation and urban characteristics from satellite data. Teoksessa Dan Cox (toim.) *Proceedings of 37th Conference on Coastal Engineering, Sydney, Australia, 2022*. Foreword.
- Liikenne- ja viestintävirasto Traficom (2015) Merikartta C-osio (Merenkurkku). <
<https://julkinen.traficom.fi/rasteripalvelu/wmts?request=getcapabilities>> 8.11.2024.

- Liikenne- ja viestintävirasto Traficom (2023) Merikartta F-osio (Ahvenenmaa). (CC BY 4.0) <<https://julkinen.traficom.fi/rasteripalvelu/wmts?request=getcapabilities>> 8.11.2024.
- Lin, M-Y., Moeng, C-H., Tsai, W-T., Sullivan, P. & Belcher, S. E. (2008) Direct numerical simulation of wind-wave generation process. *Journal of Fluid Mechanics* 616, 1-30. <https://doi.org/10.1017/S0022112008004060>
- Longo, S., Petti, M. & Losada, I. J. (2002) Turbulence in the swash and surf zones: a review. *Coastal Engineering* 45(3-4) 129-147. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00031-5)
- Martins, K., Blenkinsopp, C. E., Power, H. E., Bruder, B., Puleo, J. A. & Bergsma, E. W. J. (2017) High-resolution monitoring of wave transformation in the surf zone using LiDAR scanner array. *Coastal engineering* 128(October 2017), 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.07.007>
- Microwave remote sensing (s.a.) National Research Council of Italy. <http://www.irea.cnr.it/en/index.php?option=com_k2&view=itemlist&layout=category&task=category&id=22&Itemid=139> 27.9.2024.
- Nylén, T. (2009) Yyterin Natura-luontotyypit: Dyyniluonnon tila ja hoitotarpeet. Lounais-Suomen ympäristökeskuksen raportteja 6/2009.
- OpenStreetMap (s.a.) (CC BY 4.)<<https://tile.openstreetmap.org/%7Bz%7D/%7Bx%7D/%7By%7D.png>> 20.9.2024.
- Optical remote sensing (s.a.) National Research Council of Italy. <http://www.irea.cnr.it/en/index.php?option=com_k2&view=itemlist&task=category&id=1&Itemid=161> 27.9.2024.
- Power, H. E. (2020) Breaking waves. Teoksessa Derek W.T. Jackson & Andrew D. Short (toim.) *Sandy Beach Morphodynamics*, 103-130 Elsevier.
- Ryabchuk, D., Kolesov, A., Chubarenko, B., Spiridonov, M. Kurrenoy, D. & Soomere, T. (2011) Coastal erosion process in the eastern Gulf of Finland and their links with geological and hydrometeorological factors. *Boreal environment research* 16(suppl. A) 117-137. https://www.researchgate.net/publication/233945551_Coastal_erosion_processes_in_the_eastern_Gulf_of_Finland_and_their_links_with_geological_and_hydrometeorological_factors
- S2 Mission (s.a.) SentiWiki. <<https://sentiwiki.copernicus.eu/web/?l=en>> 5.11.2024.
- Nautics Sailmate käyttöehdot (s.a.) Sailmate <<https://www.sailmate.com/kayttoehdot>> 5.11.2024

- Sáez, F. J., Catalán, P. A. & Valle, C. (2021) Wave-by-wave nearshore wave breaking identification using U-Net. *Coastal Engineering* 170(December 2021).
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.104021>
- Sentinel-2 (s.a.) The European space agency. <
https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2>
 5.11.2024.
- Shabani, B., Nielsen, P. & Baldock, T. (2014) Direct measurements of wind stress over the surf zone. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119(5), 2949-2973.
<https://doi.org/10.1002/2013JC009585>
- Short, A. D., Trembanis, A. C. Turner, I. L. (2012) Beach oscillation, rotation and the southern oscillation Narrabeen Beach, Australia. Teoksessa Billy L. Edge (toim.) *Coastal Engineering 2000*, 2439-2452 American society of civil engineers.
- Siry, H. (2007) Making decentralized coastal zone management work for the southeast Asian region: comparative perspectives. *Division for ocean affairs and the law of the sea*.
https://www.semanticscholar.org/paper/MAKING-DECENTRALIZED-COASTAL-ZONE-MANAGEMENT-WORK-Siry/d198566449bd26e60e5033eb9fb3a614202c886f?utm_source=direct_link
- Sridevi, T., Surisetty, A. K. & Kumar, R. (2019) Seasonal variability of rip current probability along a wave-dominated coast using high resolution satellites and wave data. *Journal of geomatics* 13(1) 149-155.
https://www.researchgate.net/publication/336103693_Seasonal_variability_of_rip_current_probability_along_a_wave-dominated_coast_using_high_resolution_satellites_and_wave_data
- Surfzone.AI (2024) How does Surfzone AI work. < <https://www.surfzone.ai/how-it-works>>
 5.11.2024.
- Suomalaiset merikartat (s.a.) Traficom Liikenne- ja viestintävirasto. <
<https://www.traficom.fi/fi/asioi-kanssamme/suomalaiset-merikartat?toggle=Suomalaiset%20merikartat>> 5.11.2024
- Szaniawska, A. (2017) The Gulf of Bothnia. Teoksessa Szaniawska, A. (toim.) *Baltic crustaceans*. 27-27. Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56354-1_6
- Thorpe, S.A. (2001) Wave generation by winds. Teoksessa John H. Steele (toim.) *encyclopedia of ocean sciences*, 3191-3193 Academic Press.
- USACE (2008). Coastal Engineering Manual (CEM), volume 1100.

- Vallius, H. (2015) Sediment and carbon accumulation rates off the southern coast of Finland. *Baltica* 28(2) 81-88. <http://dx.doi.org/10.5200/baltica.2015.28.08>
- Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A. & Turner, I. L. (2019) CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling & Software* 122. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>
- Wilson, G. W., Özkan-Haller, H. T., Holman, R. A., Haller, M. C., Honegger, D. A. & Chickadel, C. C. (2014) Surf zone bathymetry and circulation predictions via data assimilation of remote sensing observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 119(3), 1993-2016. <https://doi.org/10.1002/2013JC009213>
- Wright, L. D. Short, A. D. (1984) Morphodynamic Variability of Surf Zones and Beaches: A Synthesis. *Marine Geology* 56(1-4), 93-118. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(84\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90008-2)
- Ympäristöministeriö (2006) *Kestävästi rannikolla: Suomen rannikkostartegia*. Suomen ympäristö 15/2006.

Liitteet

Liite 1. Yyterin santojen satelliittikuvien tiedot.

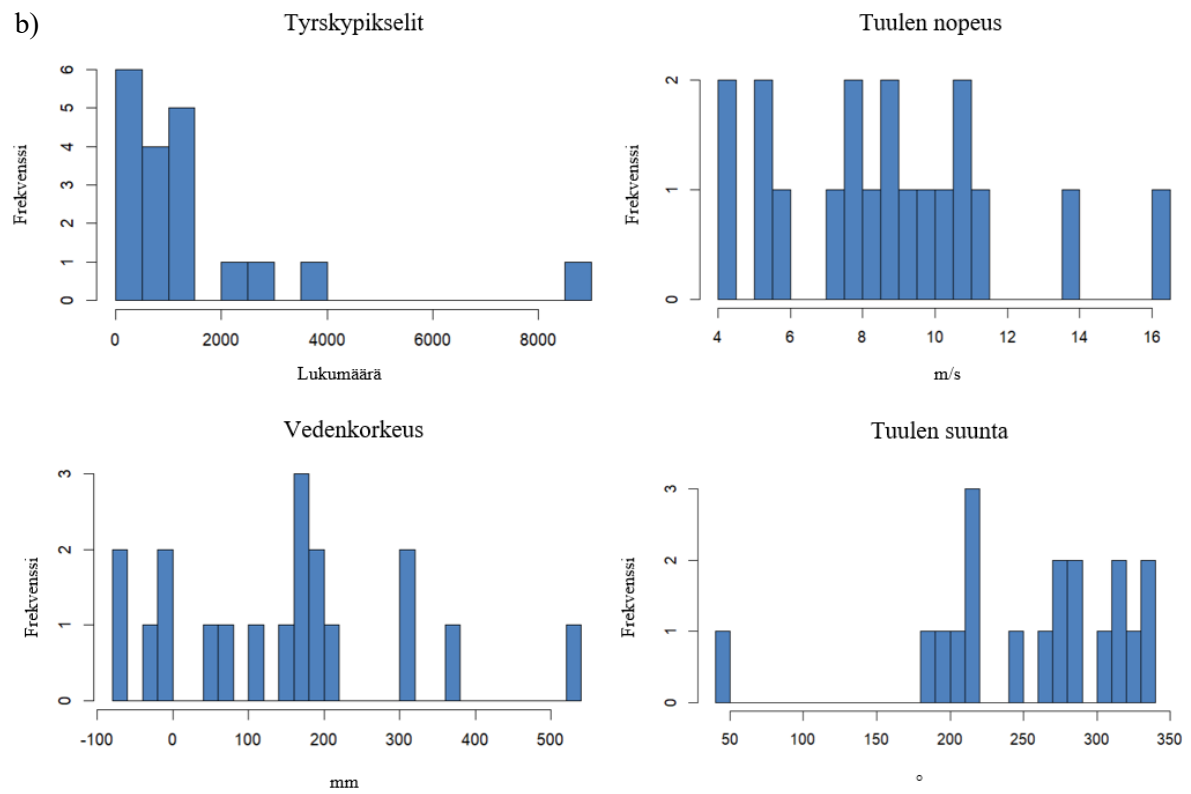
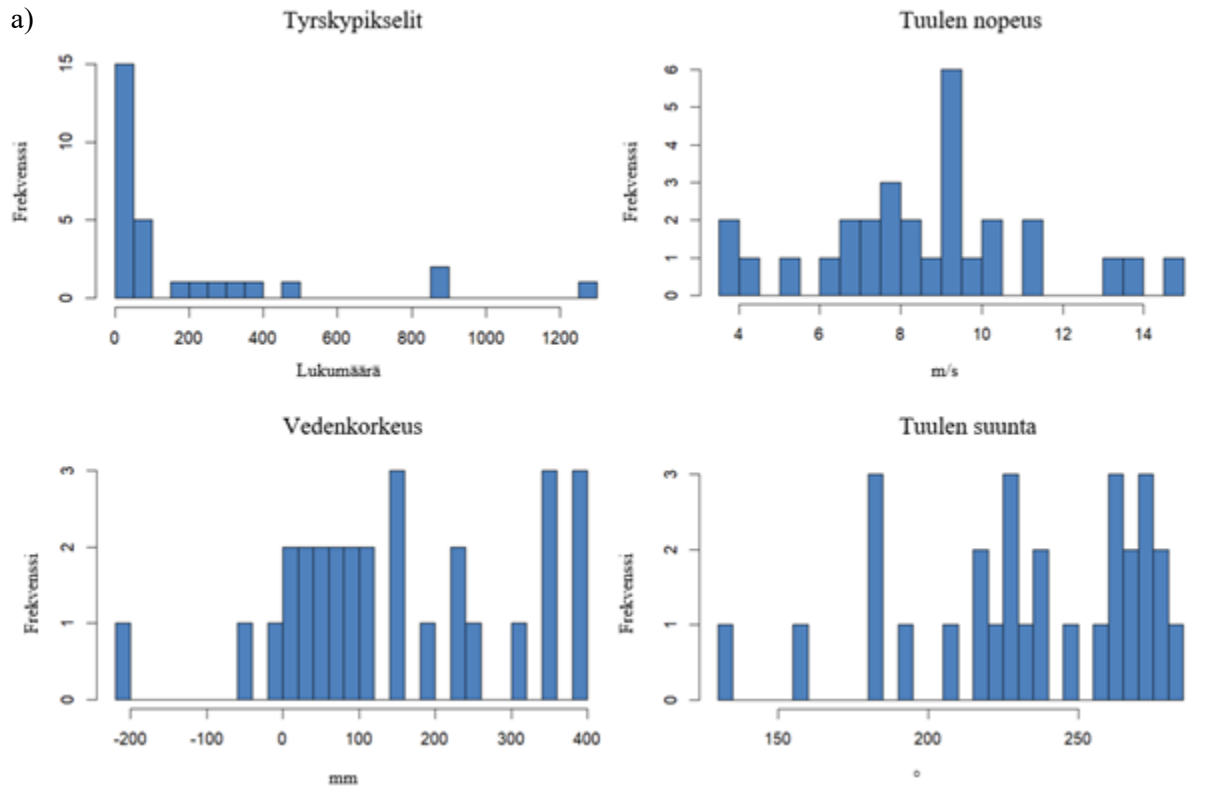
Päivämäärä ja kelloaika	Karttalehti	Pikselien määrä	Tuulen suunta	Tuulen nopeus	Vedenkorkeus
18.7.2017 klo 10.10.24	34VEP	880	288	8,4	303
14.8.2017 klo 10.02.34	34VEP	1189	279	5,8	209
18.6.2018 klo 10.10.24	34VEP	119	200	8,6	-11
8.7.2018 klo 10.10.25	34VEP	247	332	10,3	-7
6.10.2018 klo 10.10.21	34VEP	1240	265	7,8	521
31.5.2019 klo 10.03.30	34VEP	1063	241	10,9	169
10.6.2019 klo 10.03.30	34VEP	94	208	10,7	104
18.6.2019 klo 10.13.33	34VEP	580	220	7,3	-29
22.8.2019 klo 10.13.27	34VEP	52	277	4,2	150
24.8.2019 klo 10.03.33	34VEP	123	323	5,5	164
5.11.2019 klo 10.13.25	34VEP	3513	43	4,4	-64
7.6.2020 klo 10.13.31	34VEP	23	182	13,6	169
5.9.2020 klo 10.13.29	34VEP	1214	214	11,1	199
10.9.2020 klo 10.13.27	34VEP	8613	316	16,5	184
4.11.2020 klo 10.13.30	34VEP	882	215	9,4	314
6.11.2020 klo 10.03.30	34VEP	1417	290	9,9	366
19.7.2021 klo 10.03.31	34VEP	2865	305	7,7	-76
31.8.2021 klo 10.13.26	34VEP	2123	339	8,6	63
12.10.2021 klo 10.03.29		502	313	5,2	57

Liite 2. Kökarin satelliittikuvien tiedot.

Päivämäärä ja kellonaika	Karttalehti	Pikselien määrä	Tuulen suunta	Tuulen nopeus	Vedenkorkeus
181.9.2017 klo 10.10.22	34VDM	279	181	6,5	194
16.10.2017 klo 10.10.10	34VDM	889	263	13,7	357
17.11.2017 klo 10.03.38	34VDM	1268	279	13,4	397
8.6.2018 klo 10.10.24	34VDM	0	240	4	-211
15.6.2018 klo 10.00.26	34VDM	11	209	7,8	-42
18.6.2018 klo 10.10.24	34VDM	19	219	7,4	-9
20.6.2018 klo 10.00.25	34VDM	36	248	9,3	62
23.6.2018 klo 10.11.39	34VDM	1	263	3,5	147
17.8.2018 klo 10.10.24	34VDM	43	185	10,4	104
19.8.2018 klo 10.03.23	34VDM	97	267	10,2	155
13.9.2018 klo 10.00.23	34VDM	170	264	11,1	62
16.9.2018 klo 10.13.31	34VDM	23	258	9,7	158
31.5.2019 klo 10.04.03	34VDM	319	227	6,6	57
3.6.2019 klo 10.14.00	34VDM	12	159	9,2	92
10.6.2019 klo 10.04.03	34VDM	38	216	7,1	19
14.8.2019 klo 10.04.07	34VDM	100	227	9,5	86
29.8.2019 klo 10.04.02	34VDM	27	130	5,5	28
13.10.2019 klo 10.04.02	34VDM	243	279	8	237
18.5.2020 klo 10.14.04	34VDM	0	273	7	314
12.7.2020 klo 10.14.00	34VDM	5	224	4,1	343
3.8.2020 klo 10.04.07	34VDM	16	238	7,9	254
23.8.2020 klo 10.04.06	34VDM	356	227	11,2	47
6.11.2020 klo 10.04.03	34VDM	88	272	9,5	348
14.6.2021 klo 10.04.02	34VDM	49	193	9,2	104
22.7.2021 klo 10.14.02	34VDM	8	268	9,2	31
29.7.2021 klo 10.04.04	34VDM	87	234	8,7	14
18.8.2021 klo 10.04.03	34VDM	478	182	8,2	392
17.10.2021 klo 10.04.06	34VDM	51	283	8,1	237
22.10.2021 klo 10.04.02	34VDM	866	273	14,7	385

Liite 3.

Kökarin (a) ja Yyterin santojen (b) histogrammit.



Liite 4. Tyrskyjen kuvat Yyterin sannoilla

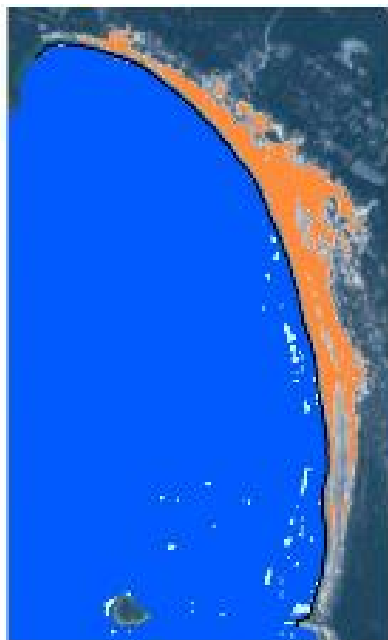
1. 18.7.2017 klo 10.10.24

Tuulen suunta 288

Tuulen nopeus 8,4

Vedenkorkeus 303 mm

Tyrskypikselien määrä 880



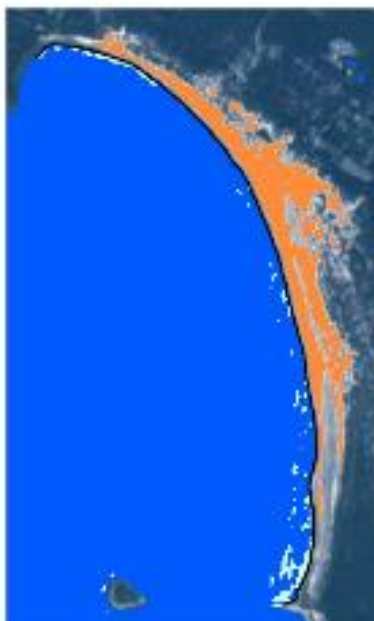
2. 14.8.2017 klo 10.02.34

Tuulen suunta 279

Tuulen nopeus 5,8

Vedenkorkeus 209 mm

Tyrskypikselien määrä 1189



3. 18.6.2018 klo 10.10.24

Tuulen suunta 200

Tuulen nopeus 8,6

Vedenkorkeus -11 mm

Tyrskypixelien määrä 119



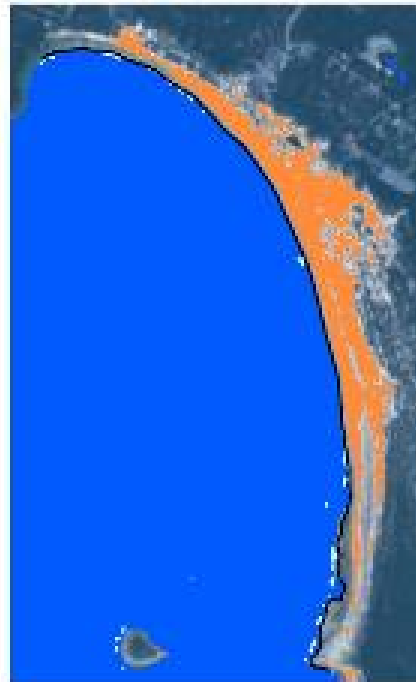
4. 8.7.2018 klo 10.10.25

Tuulen suunta 332

Tuulen nopeus 10,3

Vedenkorkeus -7 mm

Tyrskypixelien määrä 247



5. 6.10.2018 klo 10.10.21

Tuulen suunta 265

Tuulen nopeus 7,8
Vedenkorkeus 521 mm
Tyrskypikselien määrä 1240



6. 31.5.2019 klo 10.03.30

Tuulen nopeus 241
Tuulen nopeus 10,9
Vedenkorkeus 169 mm
Tyrskypikselien määrä 1063



7. 10.6.2019 klo 10.03.30

Tuulen suunta 208

Tuulen nopeus 10,7
Vedenkorkeus 104 mm
Tyrskypikselien määrä 94



8. 18.6.2019 klo 10.13.33

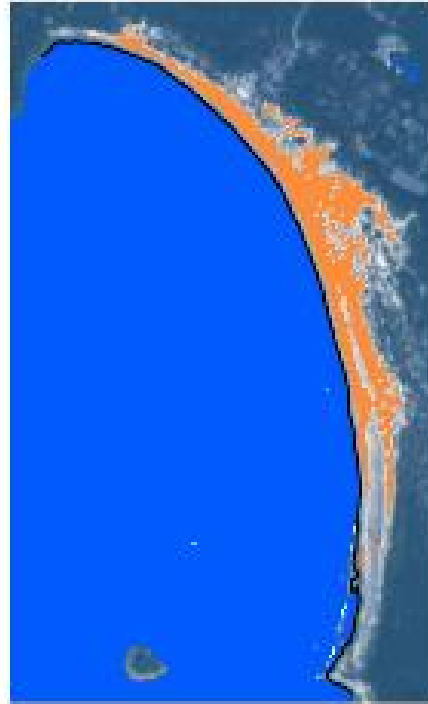
Tuulen suunta 220
Tuulen nopeus 7,3
Vedenkorkeus -29 mm
Tyrskypikselien määrä 580



9. 22.8.2019 klo 10.13.27

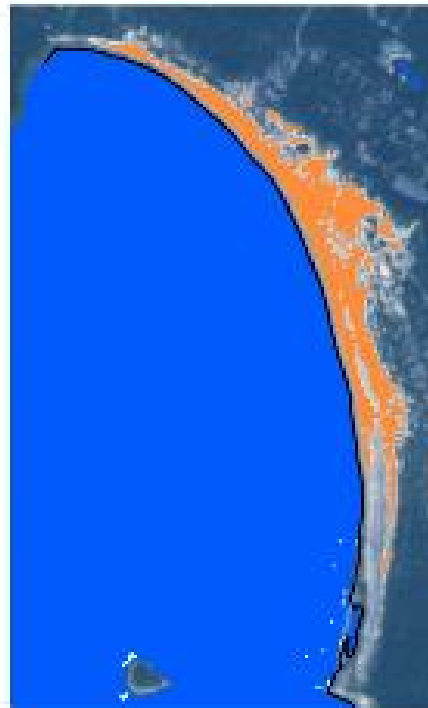
Tuulen suunta 277

Tuulen nopeus 4,2
Vedenkorkeus 150 mm
Tyrskypixelien määrä 52



10. 24.8.2019 klo 10.03.33

Tuulen suunta 323
Tuulen nopeus 5,5
Vedenkorkeus 164 mm
Tyrskypixelien määrä 123



11. 5.11.2019 klo 10.13.25

Tuulen suunta 43
Tuulen nopeus 4,4
Vedenkorkeus -64 mm
Tyrskypixelien määrä 3513



12. 7.6.2020 klo 10.13.31

Tuulen suunta 182
Tuulen nopeus 13,6
Vedenkorkeus 169 mm
Tyrskypixelien määrä 23



13. 5.9.2020 klo 10.13.29

Tuulen suunta 214

Tuulen nopeus 11,1
Vedenkorkeus 199 mm
Tyrskypikselien määrä 1214



14. 10.9.2020 klo 10.13.27

Tuulen suunta 316
Tuulen nopeus 16,5
Vedenkorkeus 184 mm
Tyrskypikselien määrä 8613



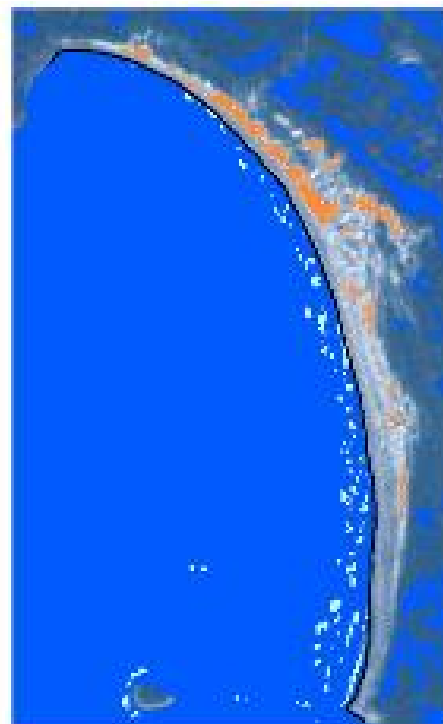
15. 4.11.2020 klo 10.13.30

Tuulen suunta 215

Tuulen nopeus 9,4
Vedenkorkeus 314 mm
Tyrskypixelien määrä 882



16. 6.11.2020 klo 10.03.30
Tuulen suunta 290
Tuulen nopeus 9,9
Vedenkorkeus 366 mm
Tyrskypixelien määrä 1417



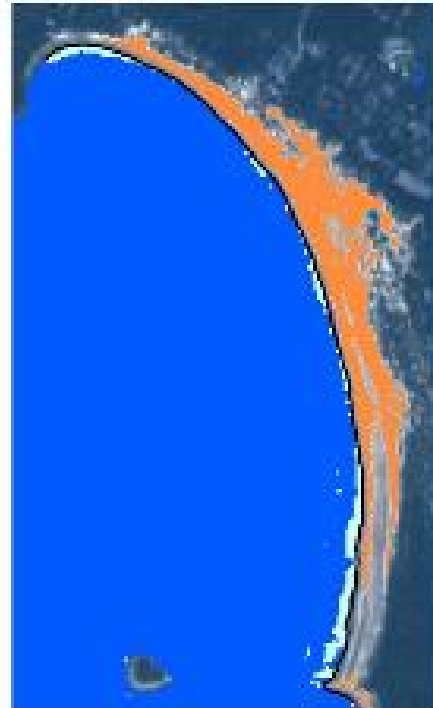
17. 19.7.2021 klo 10.03.31
Tuulen suunta 305

Tuulen nopeus 7,7
Vedenkorkeus -76
Tyrskipixelien määrä 2865



18. 31.8.2021 klo 10.13.26

Tuulen suunta 339
Tuulen nopeus 8,6
Vedenkorkeus 63 mm
Tyrskipixelien määrä 2123



19. 12.10.2021 klo 10.03.29

Tuulen suunta 313

Tuulen nopeus 5,2

Vedenkorkeus 57 mm

Tyrskypixelien määrä 502



Liite 5. Tyrskyjen kuvat Kökarissa

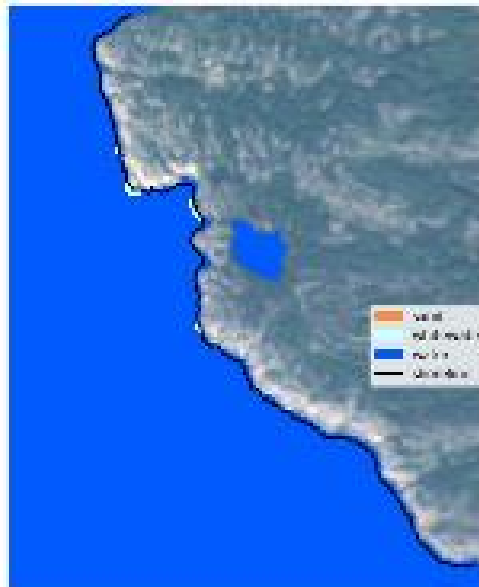
1. 11.9.2017 klo 10.10.22

Tuulen suunta 181

Tuulennopeus 6,5

Vedenkorkeus 194 mm

Tyrskypixelien määrä 279

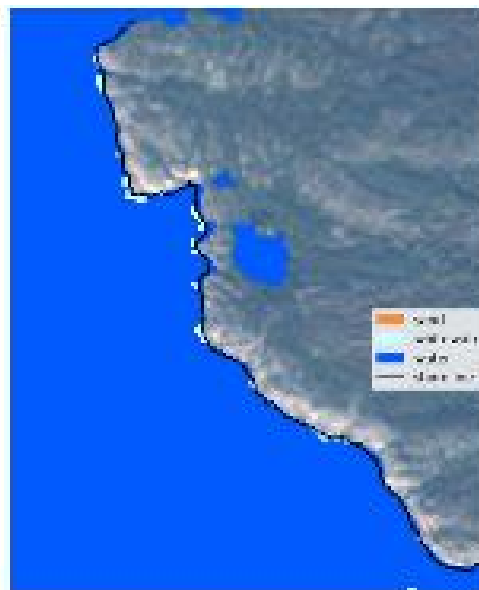
**2. 16.10.2017 klo 10.10.10**

Tuulen suunta 263

Tuulennopeus 13,7

Vedenkorkeus 357 mm

Tyrskypixelien määrä 889



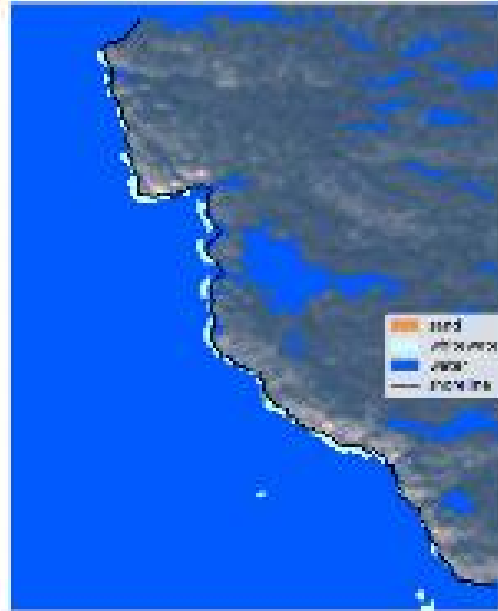
3. 17.11.2017 klo 10.03.38

Tuulen suunta 279

Tuulennopeus 13,4

Vedenkorkeus 397 mm

Tyrskypikselien määrä 1268

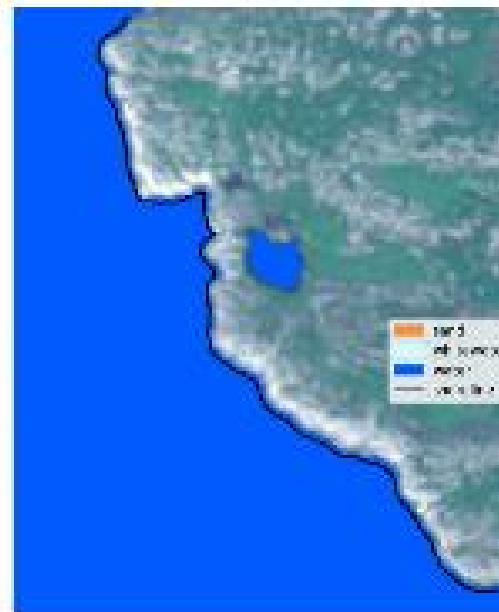
**4. 8.6.2018 klo 10.10.24**

Tuulen suunta 240

Tuulennopeus 4

Vedenkorkeus -211 mm

Tyrskypikselien määrä 0



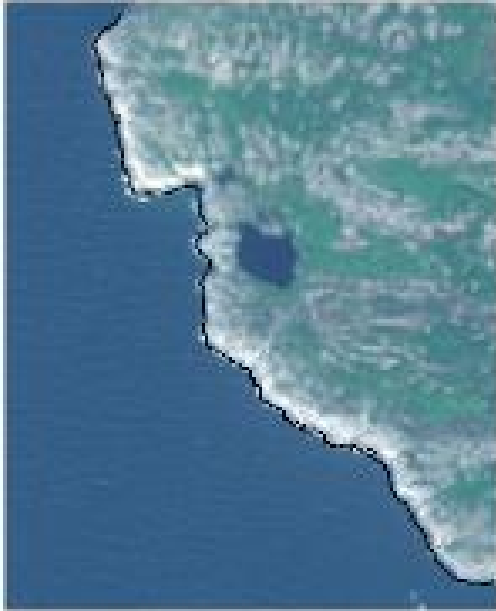
5. 15.6.2018 klo 10.00.26

Tuulen suunta 209

Tuulennopeus 7,8

Vedenkorkeus -42 mm

Tyrskypikselien määrä 11

**6. 18.6.2018 klo 10.10.24**

Tuulensuunta 219

Tuulennopeus 7,4

Vedenkorkeus -9 mm

Tyrskypikselien määrä 19



7. 20.6.2018 klo 10.00.25

Tuulensuunta 248

Tuulennopeus 9,3

Vedenkorkeus 62 mm

Tyrskypikselit 36



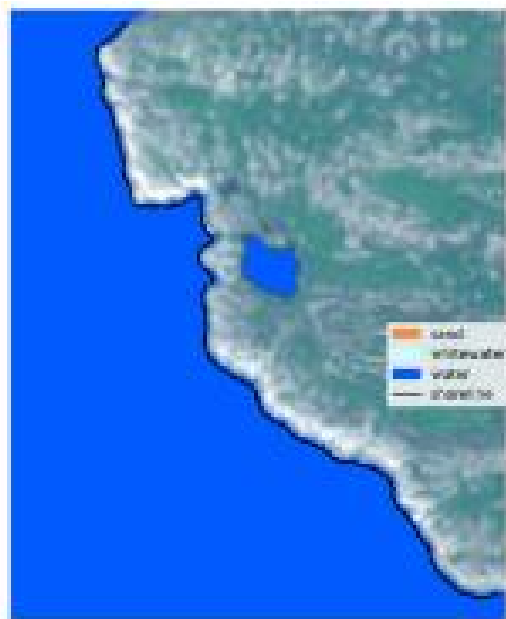
8. 23.6.2018 klo 10.11.39

Tuulensuunta 263

Tuulennopeus 3,5

Vedenkorkeus 147 mm

Tyrskypikselien määrä 1



9. 17.8.2018 klo 10.10.24

Tuulensuunta 185

Tuulennopeus 10,4

Vedenkorkeus 104 mm

Tyrskypikselien määrä 43



10. 19.8.2018 klo 10.03.23

Tuulen suunta 267

Tuulennopeus 10,2

Vedenkorkeus 155 mm

Tyrskypikselien määrä 97



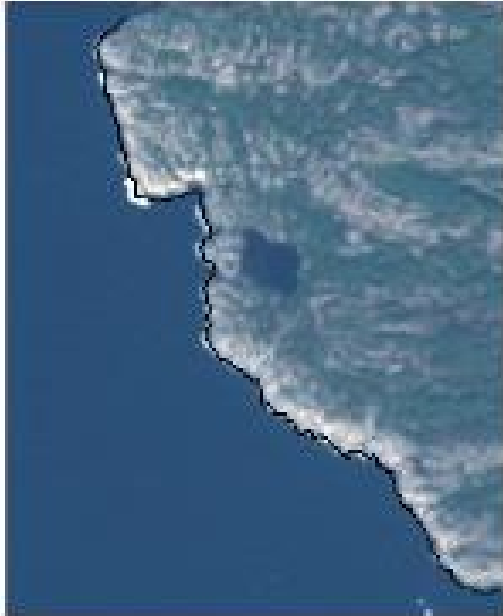
11. 13.9.2018 klo 10.00.23

Tuulen suunta 264

Tuulen nopeus 11,1

Vedenkorkeus 62 mm

Tyrskypikselien määrä 170

**12. 16.9.2018 klo 10.13.31**

Tuulensuunta 258

Tuulen nopeus 9,7

Vedenkorkeus 158 mm

Tyrskypikselien määrä 23



13. 31.5.2019 klo 10.04.03

Tuulen suunta 227

Tuulen nopeus 6,6

Vedenkorkeus 57 mm

Tyrskypikselien määrä 319

**14. 3.6.2019 klo 10.14.00**

Tuulen suunta 159

Tuulen nopeus 9,2

Vedenkorkeus 92 mm

Tyrskypikselien määrä 12



15. 10.6.2019 klo 10.04.03

Tuulen suunta 216

Tuulen nopeus 7,1

Vedenkorkeus 19 mm

Tyrskypikselien määrä 38



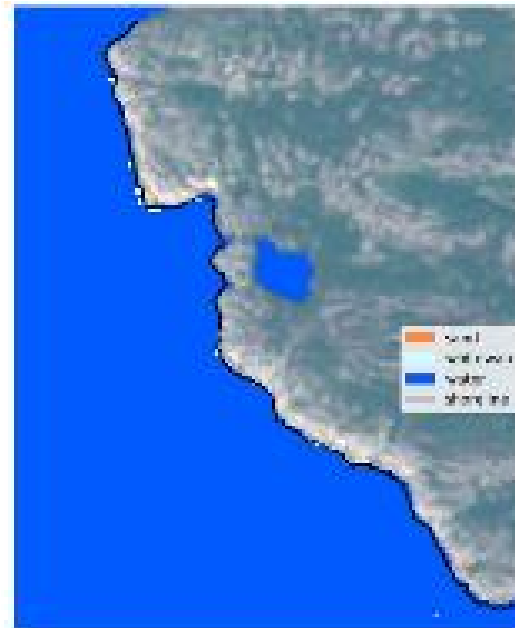
16. 14.8.2019 klo 10.04.07

Tuulen suunta 227

Tuulen nopeus 9,5

Vedenkorkeus 86 mm

Tyrskypikselien määrä 100



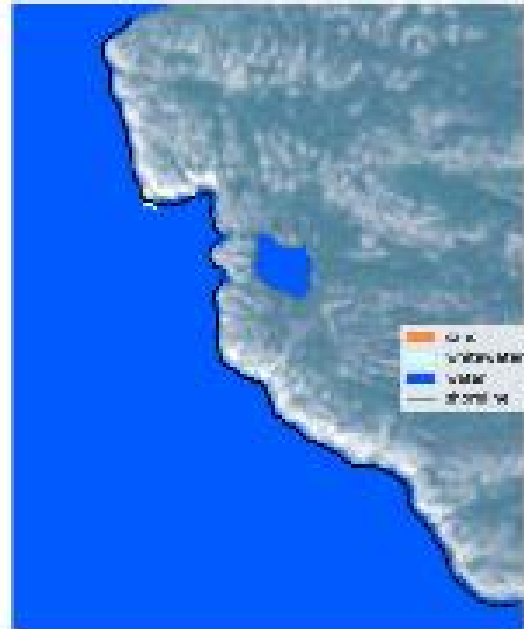
17. 29.8.2019 klo 10.04.02

Tuulen suunta 130

Tuulen nopeus 5,5

Vedenkorkeus 28 mm

Tyrskypikselien määrä 27



18. 13.10.2019 klo 10.04.02

Tuulen suunta 279

Tuulen nopeus 8

Vedenkorkeus 237 mm

Tyrskypikselien määrä 243



19. 18.5.2020 klo 10.14.04

Tuulen suunta 273

Tuulen nopeus 7

Vedenkorkeus 314 mm

Tyrskypixelien määrä 0



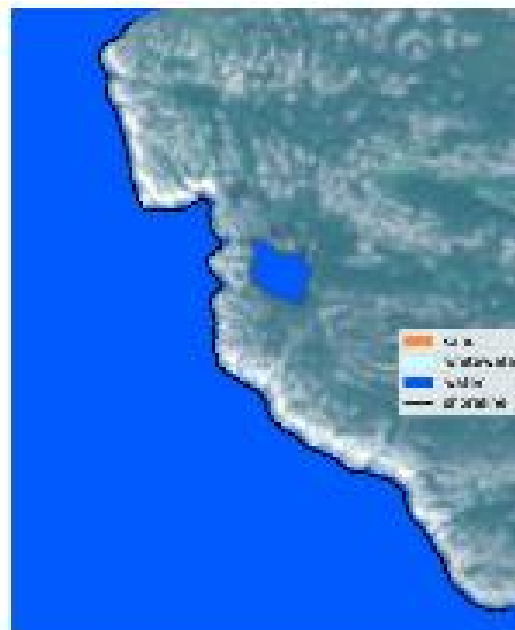
20. 12.7.2020 klo 10.14.00

Tuulen suunta 224

Tuulen nopeus 4,1

Vedenkorkeus 343 mm

Tyrskypixelien määrä 5



21. 3.8.2020 klo 10.04.07

Tuulen suunta 238

Tuulen nopeus 7,9

Vedenkorkeus 254 mm

Tyrskypixelien määrä 16



22. 23.8.2020 klo 10.04.06

Tuulen suunta 227

Tuulen nopeus 11,2

Vedenkorkeus 47 mm

Tyrskypixelien määrä 356



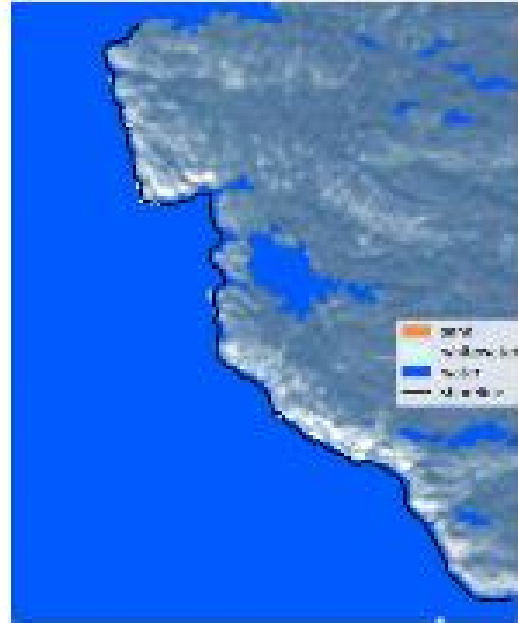
23. 6.11.2020 klo 10.04.03

Tuulen nopeus 272

Tuulen suunta 9,5

Vedenkorkeus 348 mm

Tyrskypikselien määrä 88



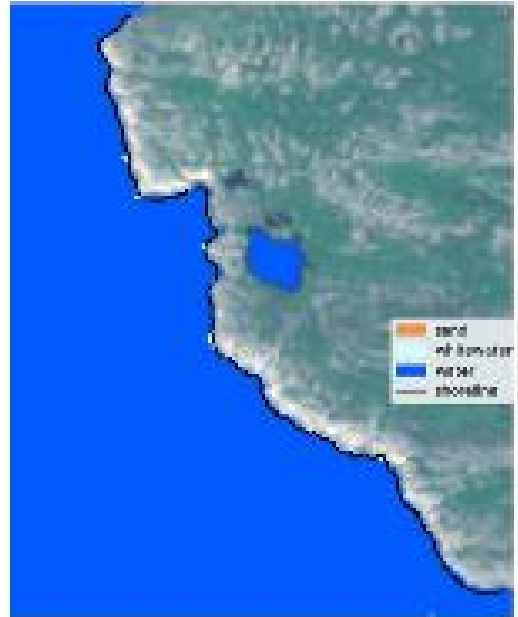
24. 14.6.2021 klo 10.04.02

Tuulen suunta 193

Tuulen nopeus 9,2

Vedenkorkeus 104

Tyrskypikselien määrä 49



25. 22.7.2021 klo 10.14.02

Tuulen suunta 268

Tuulen nopeus 9,2

Vedenkorkeus 31 mm

Tyrskypikselien määrä 8



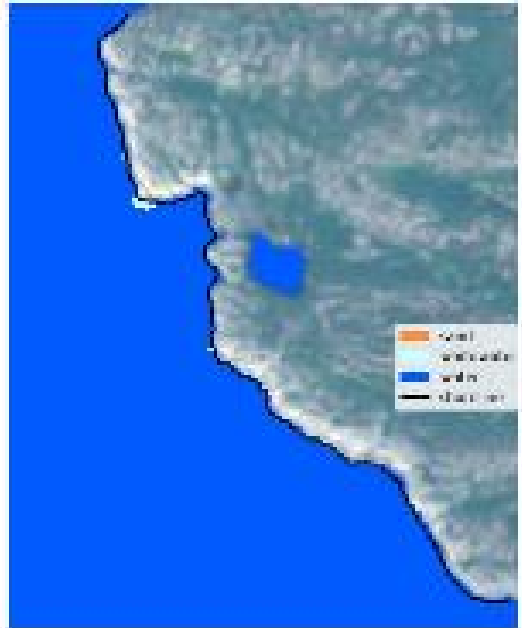
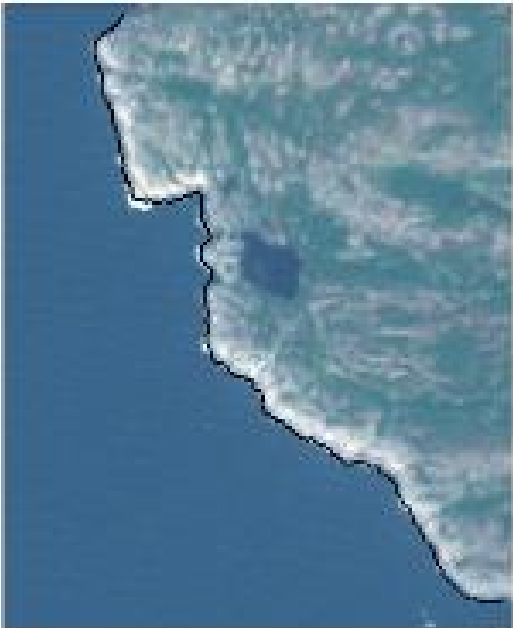
26. 29.7.2021 klo 10.04.04

Tuulen suunta 234

Tuulen nopeus 8,7

Vedenkorkeus 14 mm

Tyrskypikselien määrä 87



27. 18.8.2021 klo 10.04.03

Tuulen suunta 182

Tuulen nopeus 8,2

Vedenkorkeus 392 mm

Tyrskypixelien määrä 478



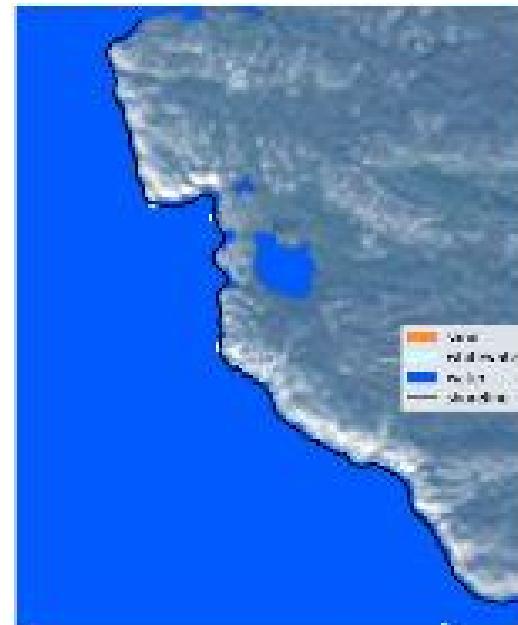
28. 17.10.2021 klo 10.04.06

Tuulen suunta 283

Tuulen nopeus 8,1

Vedenkorkeus 237 mm

Tyrskypixelien määrä 51



29. 22.10.2021 klo 10.04.02

Tuulen suunta 273

Tuulen nopeus 14,7

Vedenkorkeus 385 mm

Tyrskypikselien määrä 866

