



Pro gradu -tutkielma  
Meteorologia

**Konvektiivisten sadetilanteiden arviointi  
satelliittimittausten perusteella**

Heikki Sinisalo

8.8.2018

Ohjaajat: TKT Annakaisa von Lerber  
prof. Heikki Järvinen

Tarkastajat: prof. Heikki Järvinen  
TKT Annakaisa von Lerber

HELSINGIN YLIOPISTO  
FYSIKAN LAITOS

PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)  
00014 Helsingin yliopisto

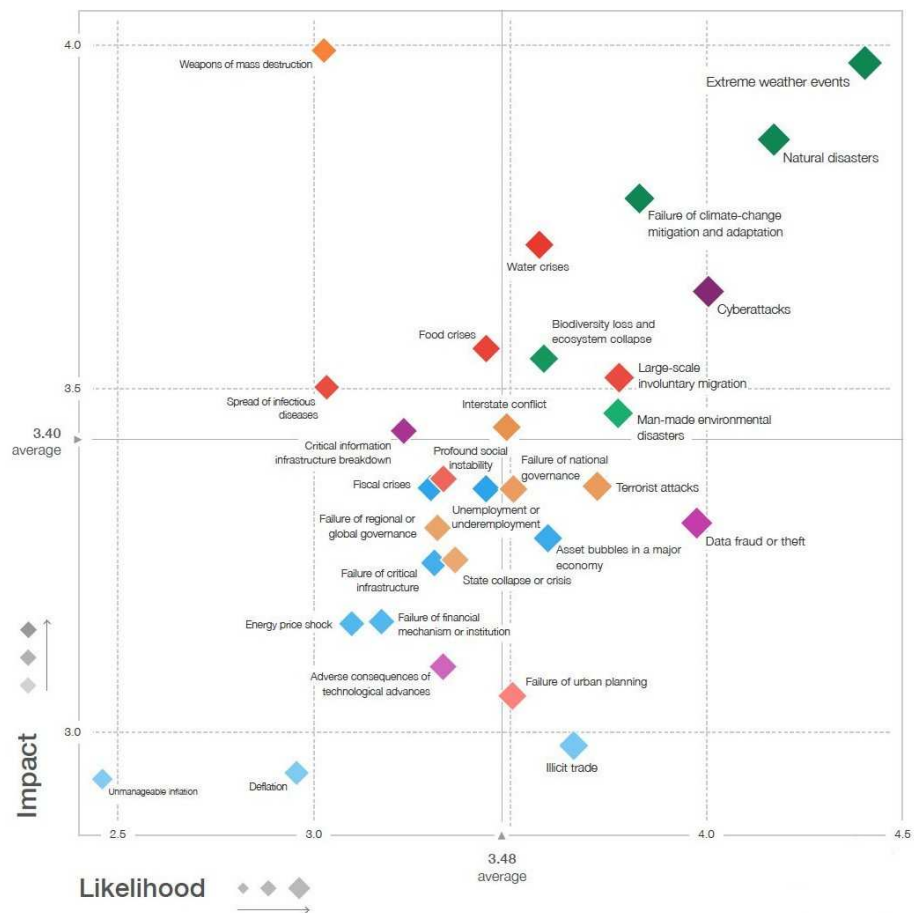
Tiedekunta/Osasto – Fakultet/Sektion – Faculty Matemaattis-luonnontieteellinen		Laitos – Institution – Department Fysiikan laitos	
Tekijä – Författare – Author Heikki Sinisalo			
Työn nimi – Arbetets title – Title Konvektiivisten sadetilanteiden arviointi satelliittimittausten perusteella			
Oppiaine – Läroämne – Subject meteorologia			
Työn laji – Arbetets art - Level pro gradu		Aika – Datum – Month and Year elokuu 2018	Sivumäärä – Sidoantal - Number of Pages 62 s.
Tiivistelmä – Referat – Abstract  <p>Tässä tutkielmassa tarkastellaan geostationäärisen satelliitin mittauksiin perustuvan sadetuote CRR:n (<i>Convective Rainfall Rate</i>) kykyä havaita ja arvioida konvektiivisia sadetilanteita Pohjois-Euroopassa. Aineistona käytetään vuoden 2017 kesäkuukausilta (kesä–elokuu) kerättyä dataa. CRR:n arvioimista sateen intensiteeteistä lasketaan tunnin sadekertymät, joita verrataan sademittareiden avulla korjattuihin, Euroopan laajuisen OPERA-tutkayhdistelmän tuottamiin tunnin kertymiin. Kertymien suhde lasketaan tunti tunnilta OPERA-hilan joka hilapisteessä, ja suhteesta muodostetaan normaalijakautunut vertailusuure <math>F</math>. Lisäksi CRR:n suorituskyvyn arvioimiseen käytetään laadullisia indikaattoreita kuten <i>CSI</i>:tä (<i>Critical Success Index</i>).</p> <p>CRR havaitsi tarkasteluajanjaksolla 30 prosenttia tapauksista, joissa hilapisteen sadekertymä oli yli 1 mm/h. Se keskimäärin yliarvioi kertymiä hieman, joskin tulosten hajonta on suurta (<math>F</math>:n mediaani logaritmisella asteikolla 0,43, hajonta 3,07). CRR:n suorituskyky huonontuu pohjoista kohti, mikä onkin odotettavissa, koska mitä korkeampaa leveyspiiriä tarkastellaan, sitä pienempi on geostationäärisen satelliitin katselukulma Maan pinnan kaareutumisen vuoksi.</p> <p>Tutkielman tuloksia hyödynnetään kehitettäessä Euroopan laajuista yhdistelmäsadetuotetta (PERC, <i>Pan-European Rainfall Composite</i>), joka yhdistää CRR:n tuottaman sadekentän OPERA-tutkasadekenttään ja GLD360-salamanpaikannusverkoston tuottamien salamatietojen avulla laskettuun sadekenttään. PERC on tarkoitettu lähietkiennustamisen tueksi tehtävään sadetilanteen analyysiin, jotta konvektiivisiin sateisiin liittyviin riskeihin, kuten äkkitulviin, voitaisiin varautua nykyistä paremmin.</p> <p>CRR:n suorituskykyä verrataan OPERA-tutkayhdistelmän ja GLD360-salamasadetuotteen suorituskykyyn, jotta PERC:n eri komponenttien käyttöä voitaisiin painottaa optimaalisesti. OPERA-tuotteella on suurempi systemaattinen virhe (mediaani <math>-1,93</math>), mutta hajonta (0,99) on selvästi pienempää kuin CRR:llä. <i>CSI</i>:llä mitattuna OPERA on huomattavasti CRR:ää parempi (0,52 vs. 0,19). GLD360:n tulokset ovat kaikkiaan huonoimpia. Näiden tulosten perusteella todetaan, että PERC:iä muodostettaessa kannattaa hyödyntää OPERA-tutkayhdistelmää silloin, kun se on saatavilla. OPERA-peittoalueen reunoilla ja ulkopuolella, etenkin Euroopan eteläosissa, CRR ja GLD360 voivat kuitenkin täydentää sadetilanteen arviota.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords lähietkiennustaminen, konvektio, sade, sääsatelliitti, säätutka, salamanpaikannus, äkkitulva			
Säilytyspaikka – Förvaringställe - Where deposited Kumpulan tiedekirjasto			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

## SISÄLTÖ

<b>1. JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2. SATEEN MITTAAMINEN KAUKOKARTOITUSMENETELMIN</b>	<b>8</b>
2.1 Säätatelliitit.....	8
2.1.1 Infrapuna- ja näkyvän valon aluetta hyödyntävät menetelmät...	11
2.1.2 Mikroaaltoihin perustuvat menetelmät.....	13
2.1.3 CRR.....	14
2.2 Säättukat.....	15
2.3 Salamanpaikannus ja sateen arviointi.....	19
<b>3. KÄYTETYT DATALÄHTEET</b>	<b>20</b>
3.1 CRR-sadetuote (EUMETSAT).....	22
3.2 OPERA-tutkavarkko (EUMETNET).....	27
3.3 GLD360-salamanpaikannusverkosto (Vaisala).....	30
3.4 Vertailudata (Katalonian teknillinen yliopisto).....	31
<b>4. MENETELMÄT</b>	<b>31</b>
4.1 Ohjelmakoodit ja prosessi yleisesti.....	31
4.2 Tutkittavat suureet.....	35
4.3 Jaottelu laadun mukaan ja korjausmaskit.....	37
4.4 Piirto-ohjelma.....	38
<b>5. TULOKSET</b>	<b>38</b>
5.1 OPERA.....	38
5.2 GLD360.....	40
5.3 CRR.....	41
5.3.1 Näkyvän valon mukaan.....	42
5.3.2 Parallaksikorjauksen jättämät aukot.....	43
5.3.3 Pisteet, joissa osa datasta puuttuu.....	43
5.3.4 CRR-alueen reunamat.....	44
5.3.5 Leveyspiiriin perustuva vertailu.....	44
5.3.6 Korjattu CRR.....	46
5.4 Tapauskuvauksia.....	47
<b>6 JOHTOPÄÄTÖKSET</b>	<b>49</b>
<b>7 YHTEENVETO</b>	<b>54</b>
<b>KIITOKSET</b>	<b>55</b>
<b>KIRJALLISUUSLUETTELO</b>	<b>56</b>
<b>LIITE 1: Käytettyjen python-koodien prosessikaavio</b>	

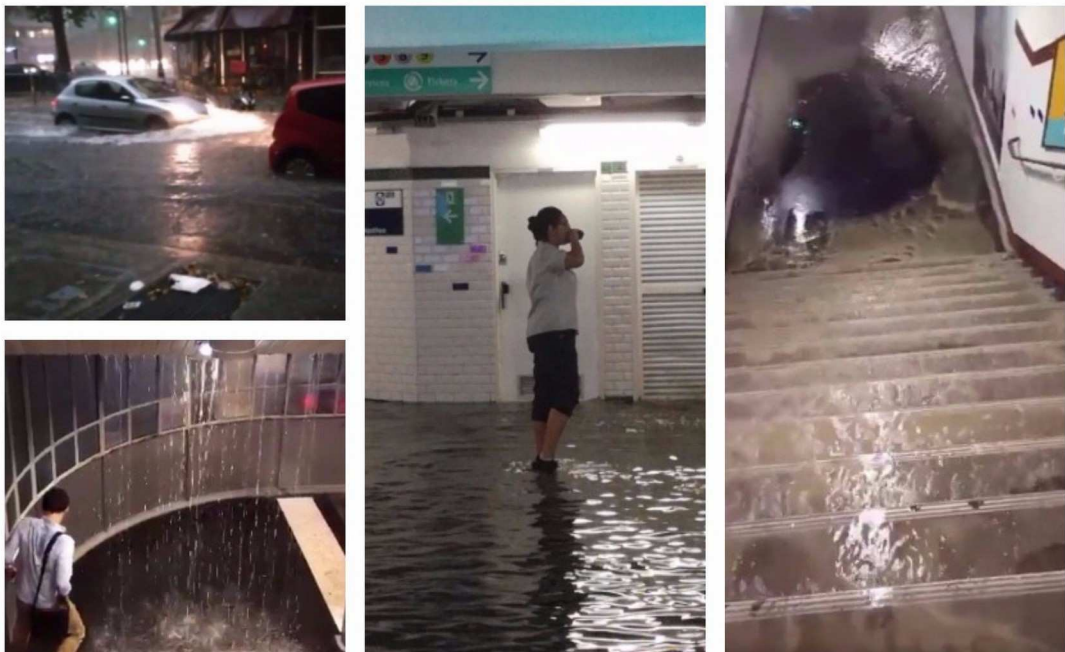
## 1. JOHDANTO

Rankkasateen nostattamat äkkitulvat aiheuttavat kaikista sääilmiöistä eniten yhteiskunnallista vahinkoa (Gourley ym., 2014). Äkkitulvat tuovat ongelmia erityisesti kaupunkiympäristöihin, missä maaperä ei pysty imemään vettä tarpeeksi tehokkaasti – ja missä väestötiheys on suurin. Nykyihmiset ovat lisäksi entistä riippuvaisempia teknisestä infrastruktuurista, joka on altis muidenkin, erityisesti konvektiivisiin rajuilmoihin liittyvien sääilmiöiden aiheuttamille vahingoille (Rossi ym., 2013): ukkospuuskat kaatavat puita talojen ja sähkölinjojen päälle, raekuurot moukaroivat autoja, ja salamaniskut katkovat sähköjä. Tilanne ei helpottune lähitulevaisuudessa, sillä hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin IPCC:n mukaan kaupungistuminen jatkuu ja sään ääri-ilmiöt lisääntyvät tällä vuosisadalla (IPCC, 2014). World Economic Forum (2018) nosti sään ääri-ilmiöt suurimmaksi globaaliksi uhaksi arvioidessaan erilaisia uhkia niiden todennäköisyyden ja vaikuttavuuden perusteella (kuva 1.1).



Kuva 1.1: Globaalit uhat vaikuttavuuden ja todennäköisyyden mukaan. Sään ääri-ilmiöt ovat lähimpänä oikeaa yläkulmaa, eli niiden todennäköisyys ja vaikuttavuus ovat suuret. Vihreä väri viittaa ympäristöuhkiin, sininen taloudellisiin, violetti teknologisiin, oranssi geopolittisiin ja punainen yhteiskunnallisiin uhkiin. (World Economic Forum, 2018)

Sunnuntaina 9. heinäkuuta 2017 Pariisissa koettiin ennätysmäinen rankkasade, kun vettä satoi alle kahdessa tunnissa yli 50 millimetriä. Kadut tulvivat, 20 metroasemaa jouduttiin sulkemaan väliaikaisesti (kuva 1.2), ja Pariisin palolaitos vastasi 1 700 hätäpuheluun. Joillain lähialueilla ylitettiin illan ja yön aikana keskimääräinen kuukauden sadekertymä – ja seuraavana päivänä sade jatkui. Samaan aikaan Wienissä raportoitiin nyrkinkokoisista rakeista, jotka osana ukkosmyrskyä olivat aiheuttamassa Itävallan historian toiseksi pahimpia rajuilman tekemiä vahinkoja. Wienin lentokentällä riehui tornado.



*Kuva 1.2: Rankkasateen aiheuttama tulviminen sulki useita metroasemia Pariisissa heinäkuussa 2017 (Kuva: La Voix du Nord).*

Jotta konvektiivisiin rajuilmoihin voitaisiin varautua ja niiden aiheuttamia vahinkoja ehkäistä nykyistä paremmin, menetelmiä rajuilmojen havainnoimiseksi ja ennustamiseksi kehitetään jatkuvasti. Yksittäisen rajuilman elinkaari voi olla vain kymmeniä minuutteja ja vaikutusalue muutamia kilometrejä, minkä vuoksi rajuilmojen reaaliaikainen havainnoiminen ja niiden kehityksen ennustaminen on hankalaa; esimerkiksi sademittareita on niin harvassa, että mittarit eivät pysty kuvaamaan yksittäistä rajuilmaa hyvin (Rossi, 2015). Siksi suuri osa havainnoista tehdään erilaisilla ilmakehän kaukokartoitusmenetelmillä, jotka hyödyntävät

säätutka- ja satelliittimittauksia. Tutkat ja satelliitit tuottavat havaintoja tiheällä aikavälillä ja hyvällä maantieteellisellä tarkkuudella sekä kattavat kerralla suuren alueen. Lisäksi kaukokartoituksen avulla saadaan usein tietoa rajuilman kolmiulotteisesta rakenteesta, mikä ei ole mahdollista maanpintamittauksin (Rossi, 2015).

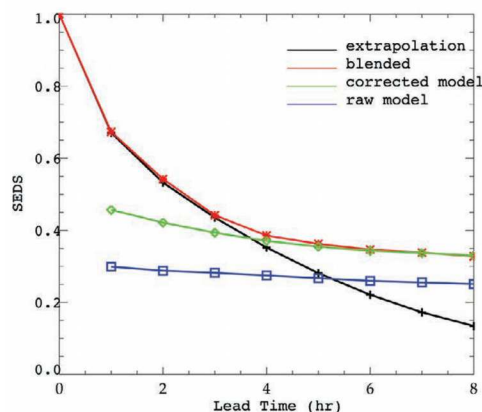
Konvektiivisten rajuilmojen ennakointi edellyttää paikallisia lyhyen aikavälin sääennusteita. Korkeintaan kuuden tunnin päähän ulottuvaa sään ennustamista kutsutaan yleisesti *lähihetkiennustamiseksi* eli *nowcastingiksi* (WMO, 2018). Alun perin termi viittasi vain tutka-, satelliitti- tai havaintodatasta ekstrapoloituihin ennusteisiin; esimerkiksi *optical flow* -menetelmissä (Bechini ja Chandrasekar, 2017) algoritmi vertailee perättäisiä tutkakuvia ja määrittää sadealueille liikevektoreita kuvissa näkyvien sadekenttien perusteella. Nykyisin lähihetkiennustamisen kuitenkin katsotaan sisältävän myös tilastollisia ja heuristisia menetelmiä sekä numeerista ennustamista (Sun ym., 2014). Konvektiivisia rajuilmoja pystytään jo mallintamaan varsin hyvin numeerisesti (esim. Bližňák ym., 2017), ja viime vuosina lähihetkiennustamisessa onkin yhä enemmän alettu käyttää ekstrapolaatioon perustuvien menetelmien ja korkearesoluutioisten numeeristen mallien yhdistelmiä (Sun ym., 2014).

Scheufelen ym. (2014) mukaan tutka- ja satelliittidatasta tehtävään ekstrapolaatioon perustuva lähihetkiennustaminen on osoittautunut hyväksi metodiksi silloin, kun ennusteen aikajänne on lyhyt verrattuna tarkasteltavan ilmiön elinkaareen ja kun sadekentän kehitystä pystytään kuvaamaan pelkän advektion avulla; ekstrapolaatio ei kuitenkaan ota huomioon konvektiivisten prosessien kehitystä, ja siksi ennustevirheet kasvavat nopeasti sitä mukaa, mitä pidemmälle ennuste ulottuu ajassa. Bližňákin ym. (2017) mukaan Keski-Euroopassa voi tehdä kelvollisia ekstrapoloituja ennusteita vain muutaman kymmenen minuutin päähän, mutta ekstrapoloinnin etu suhteessa numeerisiin malleihin on se, että ekstrapolointi on laskennallisesti melko yksinkertaista ja siten nopeata suorittaa.

Konvektiivisia sääilmiöitä on mahdollista kuvata numeerisilla malleilla, joilla on hyvä paikka- ja aikaresoluutio, mutta systeemin alkutilan määrittäminen tarkasti on hankalaa (Scheufele ym., 2014). Siksi numeeriset mallit ovat hyvin lyhyellä ennusteajalla tyypillisesti epäluotettavia ja mukautuvat ympäristöön vasta joidenkin

tuntien kuluttua ennusteen tekohetkestä. Linin ym. (2005) tutkimuksessa numeeriset ennusteet muuttuivat kuudessa tunnissa ekstrapoloimalla tehtyjä ennusteita tarkemmiksi, Sunin ym. (2014) mukaan viidessä tunnissa ja Scheufelen ym. (2014) mukaan 2–5 tunnissa riippuen käytetystä numeerisesta menetelmästä. Tämä tosin ei välttämättä tarkoita, että useiden tuntien päähän ulottuva numeerinenkaan ennuste olisi erityisen hyvä, sillä ekstrapolaatiomenetelmillä tehdyt ennusteet huononevat yleensä jyrkästi ensimmäisten tuntien aikana (Sun ym., 2014).

Malliennusteista voidaan kuitenkin saada hyötyä lyhyenkin ajan ennusteisiin yhdistämällä malleja ekstrapolaatiomenetelmiin. Esimerkiksi Liguorin ja Rico-Ramirezin (2012) hybridimalli ennusti sademäärät kaikilla ennusteajoilla (1–6 tuntia) tarkemmin kuin pelkkä tutkapohjainen ennuste tai pelkkä numeerinen malli. Koberin ym. (2012) ja Sunin ym. (2014) käyttämät hybridimenetelmät olivat kaikilla ennusteajoilla (0–8 tuntia) yhtä tarkkoja tai tarkempia kuin tutkapohjaiset ennusteet (kuva 1.3). Hybridimenetelmiin liittyvä haaste onkin saumattoman siirtymän luominen ekstrapolaatiota painottavasta ennusteesta numeeriseen ennusteeseen.



Kuva 1.3: Esimerkki ekstrapolaatio- ja numeeristen menetelmien yhdistelmän ennustekyvystä (Sun ym., 2014). Mitattava suure on SEDS (symmetric extreme dependency score; Hogan ym., 2009). Punaisella merkitty hybridi on kaikilla ennusteajoilla yhtä tarkka tai tarkempi kuin ekstrapolaatio (musta) ja numeerinen malli (sininen ja vihreä).

Jotta tarkkoja lähietkiennusteita voitaisiin tehdä, tarvitaan aina mahdollisimman hyvä analyysi lähtötilanteesta. Tavallisesti analyysiin käytetään säätutkilla tehtyjä mittauksia. Yksittäinen tutka tai suurempi tutkaverkon osa voi kuitenkin olla teknisistä syistä poissa käytöstä pitkiäkin aikoja (Saltikoff ym., 2017); jos tutkadataa ei ole saatavilla tai se on huonolaatuista, tarvitaan muita lähteitä, kuten satelliittimittauksia ja salamatieta.

Marcosin ym. (2015) mukaan sääsatelliitit ovat hyödyksi sateen arvioimisessa esimerkiksi merialueilla ja vuoristoissa, sillä säätutkien kantama ei yllä kauas

rannikolta eikä niiden signaali läpäise vuoria. Säätatelliitteihin asennetut radiometrit havainnoivat sadetta ja muita ilmakehän ilmiöitä hyödyntämällä näkyvän valon sirontaa ilmakehän ja maanpinnan kohteista sekä eri kohteiden säteilemää tai sirottamaa infrapuna- ja mikroaaltosäteilyä (Tapiador ym., 2012). Sään havainnointiin ja ennustamiseen sekä yleisemmin ilmaston tutkimiseen soveltuvia satelliitteja on Maata kiertävillä radoilla yli 200 (WMO-Sat, 2018). Säätatelliitteja käyttävät esimerkiksi Euroopan säätatelliittijärjestö EUMETSAT, Yhdysvaltain avaruusvirasto NASA ja Kiinan ilmatieteenlaitos.

Viime vuosina on tutkittu myös salamoinnin ja sademäärän välistä suhdetta eri puolilla maailmaa. Salamahavaintoverkostoja on ollut käytössä jo pitkään (Pohjola ja Mäkelä, 2013), ja salamoinnin perusteella on todettu olevan mahdollista arvioida konvektiivisen sateen määrää. Esimerkiksi Pessi ja Businger (2009) tutkivat salama- ja säädataa pohjoisen Tyynenmeren alueelta kolmen vuoden ajalta ja havaitsivat konvektiivisen sateen lisääntyvän sitä mukaa kuin salamointi lisääntyy.

Ilmatieteen laitoksen johtamassa kansainvälisessä SMUFF-projektissa (*Seamless probabilistic multi-source forecasting of heavy rainfall hazards for European flood awareness*, [www.smuff.eu](http://www.smuff.eu)) pyritään parantamaan rankkasateiden aiheuttamien vahinkojen, kuten äkkitulvien, salamoinnin ja maanvyörymien, ennustettavuutta aikavälillä 15 minuutista viiteen päivään. Näin pyritään helpottamaan säähän liittyviin riskeihin varautumista ja niiden hallintaa. Erityishuomiota projektissa kiinnitetään konvektiivisiin rajuilmoihin liittyvien riskien ennustamiseen kaupunki-ympäristössä. Jotta ennuste aika voitaisiin kasvattaa useisiin päiviin, tutka-, satelliitti- ja salamahavaintoihin perustuvat sateen lähihetkiennusteet (0–6 h) pyritään yhdistämään saumattomasti numeeriseen mallinnukseen nojaaviin pitemmän aikavälin ennusteisiin.

Lähihetkiennustamisen erityinen haaste on hydrologisen ennusteen luominen meteorologisen ennusteen perusteella eli sen määrittäminen, millaisia paikallisia tulvia ennustetut sademäärät aiheuttavat (Koistinen ym., 2012). Äkkitulvien ennustamiseen käytetään yleensä malleja, jotka yhdistävät sademäärän ja valuman sekä esimerkiksi maan pintakerroksen kosteuden, joka vaikuttaa siihen, millainen sademäärä riittää nostattamaan tulvan (Modrick ja Georgakakos, 2015). Tällaisten

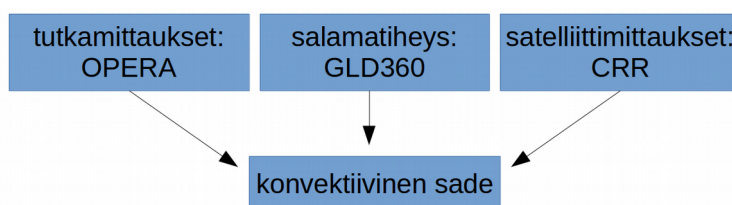


mallien tulee kuitenkin olla hyvin paikallisia, jotta ne pystyvät ottamaan huomioon kunkin valuma-alueen ominaisuudet: vaikka rajuilmaan liittyvä sademäärä pystyttäisiinkin ennustamaan hyvin, saman rajuilman aiheuttamien äkkitulvien ennustettavuus voi vaihdella lähellä toisiaan olevilla alueillakin (Březková ym., 2012). Mahdollisimman hyvä paikallinen sade-ennuste onkin mallien ennustekyvyn kannalta oleellinen tekijä. Mooren ym. (2012) mukaan sademäärän paikallinen havainnointi sademittareilla antaa parhaat lähtökohdat, mutta koska mittareita on tavallisesti harvassa ja ne havainnoivat sadetta vain yhdessä pisteessä, säätutkien ja muiden kaukokartoitusmenetelmien tuoma apu on tarpeen.

Yksi SMUFF-projektin tavoitteista onkin koko Euroopan kattavan, optimoidun sadeanalyysin yhdistelmätuotteen kehittäminen lähihetkiennustamisen tueksi. Koko Euroopan sadetuotteen (PERC, *Pan-European Rainfall Composite*) on määrä yhdistää tutka-, satelliitti- ja salamalähteistä saatua, laaturainotettua sadetietoa. Laatatietoon nojautuen voidaan arvioida, millaisissa tilanteissa säätutkan tuottama sadearvio pitäisi korvata satelliitti- tai salamatietoon perustuvalla analyysillä ja miten näiden kolmen lähteen tuottamia arvioita pitäisi painottaa esimerkiksi Euroopan eri osissa.

PERC:n kehittämiseksi on selvitettävä, kuinka hyvin hetkellistä ja kumulatiivista sademäärää pystytään arvioimaan geostationäärisen satelliitin tekemien mittausten avulla. Käytössä on Euroopan sääsatelliittijärjestö EUMETSAT:n sadetuote CRR (*Convective Rainfall Rate*; Rodríguez ja Marcos, 2013; ks. luku 3.1), joka perustuu nollapituuspiirillä kiertävän satelliitin tekemiin mittauksiin. CRR on kehitetty EUMETSAT:n alla toimivassa NWCSAF:ssa (*Satellite Application Facility on support to Nowcasting and Very Short-Range Forecasting*), jonka toimipaikka on Espanjassa. CRR valikoitui käytettäväksi satelliittituotteeksi, koska sen tuottama data oli helposti saatavilla Ilmatieteen laitoksen arkistosta ja koska sen ajallinen ja maantieteellinen resoluutio ovat hyviä verrattuna muihin saatavilla olleisiin satelliittisadetuotteisiin, kuten EUMETSAT:n hydrologisiin tuotteisiin keskittyneen H-SAF:n (*Satellite Application Facility on Support to Operational Hydrology and Water Management*) PR-OBS-6A:han (H-SAF, 2015).

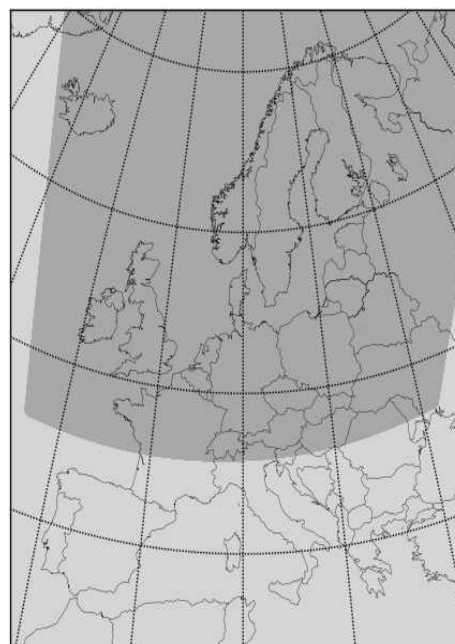
Tässä pro gradu -tutkielmassa selvitetään, kuinka tarkasti satelliittimittauksiin perustuva sadetuote CRR havainnoi konvektiivisia sadealueita ja arvioi konvektion



*Kuva 1.4: Tässä tutkielmassa verrataan satelliittisadetuote CRR:n suorituskykyä OPERA-tutkayhdistelmän ja GLD360-salamasadetuotteen suorituskykyyn.*

liittyvän sateen määrää verrattuna saatavilla oleviin tutka- ja salamasadetuotteisiin (kuva 1.4). Käytettävä tutkatuote on Euroopan ilmatieteenlaitosten yhteistoiminta-alueen EUMETNET:n OPERA-tutkayhdistelmä (luku 3.2), joka on CRR:n pääasiallinen vertailukohde, koska sitä on ajallisen ja maantieteellisen kattavuutensa vuoksi kaavailtu PERC:n tärkeimmäksi komponentiksi. Salamatiiedot saadaan Vaisalan GLD360-verkostosta (luku 3.3), jota on käytetty OPERA-tutkasadekenttien täydentämiseen aiemmissakin projekteissa, joissa Ilmatieteen laitos on ollut mukana.

Tutkittava alue on Pohjois-Eurooppa, jolla tarkoitetaan tässä yhteydessä karkeasti leveyspiirin 46°N pohjoispuolista Euroopan aluetta (kuva 1.5). Tältä alueelta Ilmatieteen laitos arkistoi CRR-dataa huhtikuuhun 2018 asti<sup>1</sup>. Alueen muodon ovat määränneet suunta, josta satelliitti kuvaa, maapallon pinnan kaareutuminen ja OPERA-hila, joka ylittää pohjoisimmillaan noin leveyspiirille 75°N.



*Kuva 1.5: CRR-tuotteen kattama Pohjois-Euroopan alue tummennettuna. Koko kuvan alue vastaa OPERA-hilaa.*

Mitattavana suurena käytetään edeltävän tunnin sadekertymää, koska siihen sopiva vertailudata on helposti saatavilla. Tuloksia on määrä hyödyntää, kun tutka-, salama- ja satelliittituotteiden optimaalisia painokertoimia määritetään PERC:tä varten.

<sup>1</sup> Huhtikuussa 2018 Ilmatieteen laitos alkoi tallentaa CRR-dataa koko Euroopan kattavalta alueelta CRR:n versiopäivityksen yhteydessä. PERC:ssä hyödynnetään uudempaa CRR-versiota kuin tässä tutkielmassa.

Tutkimuksen tarkastelujakso on kesäkuu–elokuu 2017. Tutkittaviksi kuukausiksi valittiin kesäkuukaudet, koska konvektiiviset sateet ovat yleisimpiä kesäisin. Kolmen kuukauden mittaiseen tarkastelujaksoon arveltiin mahtuvan riittävästi konvektiivisia sadetilanteita, jotta dataa saadaan tarpeeksi.

Tarkastelujakson aikana Etelä- ja Keski-Euroopassa koettiin pitkä, Luciferiksi nimetty helleaalto, joka nosti lämpötilan monin paikoin yli 40 asteen. Toisaalta tuona kesänä nähtiin useita hurjia rankkasateita ja niiden aiheuttamia tulvia eri puolilla Eurooppaa. Edellä mainitun Pariisin sade-ennätyksen lisäksi esimerkiksi Berliinin alueella satoi kesäkuun viimeisinä päivinä yli 150 mm yhden vuorokauden aikana. Verkkosivusto Floodlist.com raportoi suuria vahinkoja aiheuttaneista äkkitulvista myös ainakin Brittein saarilla, Italiassa, Sveitsissä, Serbiassa, Turkissa ja Kreikassa.

## **2. SATEEN MITTAAMINEN KAUKOKARTOITUSMENETELMIN**

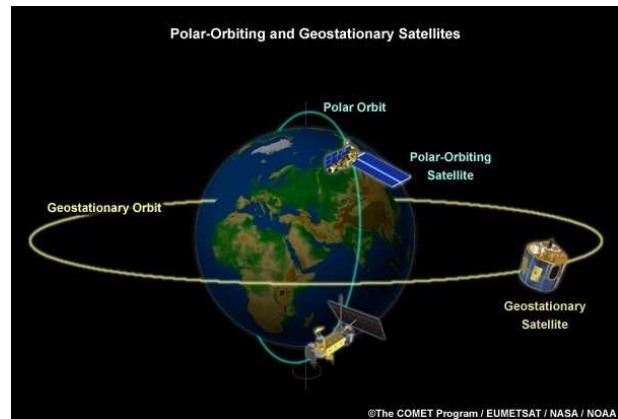
### 2.1 Sääsatelliitit

Meteorologisia laitteita lähetettiin ensimmäisen kerran satelliitin mukana Maan kiertoradalle 1950-luvun lopulla, ja vuonna 1960 Yhdysvalloissa laukaistiin ensimmäinen varsinainen sääsatelliitti, TIROS 1. Kidderin ja Vonder Haarin (1995, s. 6) mukaan sääsatelliittien erääksi suureksi saavutukseksi voidaan mainita, että sen jälkeen kun sääsatelliittitoiminnasta tuli jatkuvaa 1960-luvulla, kaikki trooppiset hirmumyrskyt on pystytty havaitsemaan satelliittien avulla, mikä on helpottanut myrskyihin varautumista eri puolilla trooppista ja subtrooppista vyöhykettä.

Euroopan sääsatelliittijärjestö EUMETSAT laukaisi ensimmäisen sääsatelliittinsa geostationääriselle radalle vuonna 1977. Vuosituhannen vaihteeseen mennessä Meteosat-nimisiä satelliitteja laukaistiin vielä kuusi lisää, ja niistä viimeinen poistui käytöstä keväällä 2017. Vuonna 2004 EUMETSAT kuitenkin laukaisi jo ensimmäisen niin kutsutun toisen sukupolven sääsatelliittinsa, Meteosat-8:n, joka pystyi kuvaamaan näkemäänsä Maan kiekkoa aiempaa tiheämmällä aikavälillä, käyttäen entistä useampia aallonpituuskanavia. Näitä erityisesti lähihetkiennustamisen ja numeerisen säänennustamisen tarpeisiin suunniteltuja toisen sukupolven sääsatelliitteja on nyt geostationäärisellä radalla neljä. Niiden tärkein

tehtävä on auttaa havaitsemaan ja ennustamaan nopeasti kehittyviä sääilmiöitä, kuten konvektiivisia rajuilmoja ja sumua (EUMETSAT, 2018).

Sääsatelliitit kulkevat joko polaarisella tai geostationäärisellä radalla (Kidder ja Vonder Haar, 1995, s. 26–30). Polaarinen rata kulkee molempien napa-alueiden yli, kun taas geostationäärinen rata kulkee päiväntasaajan yläpuolella (kuva 2.1).



*Kuva 2.1: Polaarinen ja geostationäärinen rata. Polaarinen rata ei yleensä kulje aivan napojen ylitse. (Kuva: EUMETSAT)*

Polaarisen satelliitin kiertorata on yleensä muutamien satojen kilometrien korkeudessa, jolloin yksi kierros Maan ympäri kestää noin puolitoista tuntia. Samalla kun satelliitti lentää navalta navalle pohjois–eteläsuunnassa, Maa pyörähtää sen alapuolella. Niinpä polaariselta radalta pystytään kuvaamaan koko planeetan pinta yhden vuorokauden aikana. Osa polaarista satelliiteista on lisäksi aurinkosynkronisia: ne ylittävät saman paikan aina samaan aurinkoaikaan, eli satelliitin sijainti maanpinnan ja auringon välissä on ylityshetkellä aina sama. Tämä luo hyvät edellytykset sää- tai tutkimussatelliittitoiminnalle, koska valaistusolosuhteet pysyvät samanlaisina. Aurinkosynkronisen satelliitin rata kulkee noin 800 kilometrin korkeudessa, ja se siirtyy noin yhden pituusasteen verran päivässä, jotta ylitysajat pysyvät samoina vuoden ympäri Maan kiertäessä Aurinkoa.

Geostationäärinen satelliitti kiertää Maata päiväntasaajan yllä samalla kulmanopeudella, jolla Maa pyörii. Näin satelliitti pysyy Maasta katsottuna paikoillaan eli on koko ajan saman pisteen yläpuolella. Geostationäärisen satelliitin rata sijaitsee 36 000 kilometrin korkeudessa, mikä tarkoittaa, että geostationääriseltä radalta otettujen kuvien horisontaalinen resoluutio ei käytännössä voi olla yhtä hyvä kuin aurinkosynkroniselta radalta otettujen kuvien. Lisäksi Pettyn (1995) mukaan geostationääriseltä radalta tehtyihin mittauksiin perustuvat menetelmät eivät Maan kaareutumisen vuoksi ole erityisen hyödyllisiä korkeilla leveysasteilla, noin 55. leveyspiiriltä navoille.

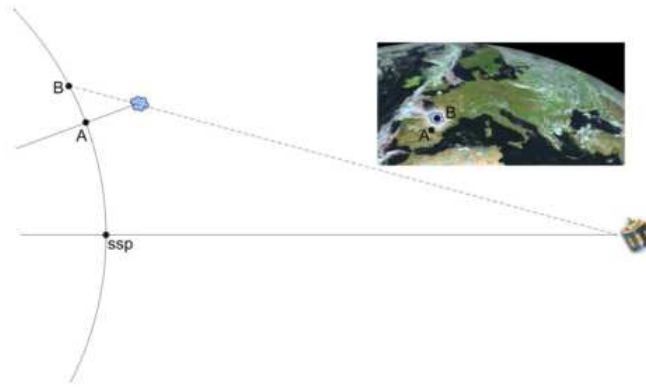
Geostationäärisen satelliitin etu on, että sen avulla laajojen alueiden – esimerkiksi koko Euroopan – sadetilannetta voidaan tarkkailla lähes reaaliajassa. Geostationääriset satelliitit, kuten Meteosat-ohjelman sääsatelliitit, pystyvät 15 minuutin tai osin jopa 5 minuutin aikaresoluutioon (Schmetz ym., 2002). Esimerkiksi NASA:n johtama laaja satelliittiohjelma GPM (*Global Precipitation Measurement*; NASA, 2018a), jonka satelliitit eivät ole geostationäärisiä, tuottaa sadetietoja kolmen tunnin välein, mikä on liian harvoin lähihetkiennustamisen tarpeisiin<sup>2</sup>.

Satelliittimittauksia tehdään passiivisilla tai aktiivisilla mittalaitteilla. Passiiviset laitteet, esimerkiksi mikroaaltotaajuudella toimivat radiometrit, mittaavat ilmakehän ja maanpinnan kohteiden lähettämää sähkömagneettista säteilyä, kun taas aktiiviset laitteet, kuten tutkat tai lidarit, lähettävät sähkömagneettisen pulssin ja havainnoivat sen siroamista ilmakehän ja maanpinnan kohteista. Satelliiteista käsin voidaan tarkkailla esimerkiksi sadetta, pilvisyyttä sekä lyhyt- ja pitkäaaltoisäteilyä sekä luoda ilmakehän kosteuden ja lämpötilan pystyprofiileja numeerisen säänennustamisen tueksi. Sääsatelliittien avulla havainnoidaan myös aerosoleja, otsonia ja muita ilmakehän hiukkasia sekä maanpinnan ominaisuuksia, kuten lumi- ja jääpeitettä sekä kasvillisuutta (Dong ym., 2009).

Satelliittimittauksin tuotettua dataa joudutaan tavallisesti korjaamaan esimerkiksi parallaksikorjauksella (Marcos ja Rodríguez, 2016a). Parallaksikorjaus käytännössä siirtää havaittuja kohteita lähemmäs satelliittia; mitä korkeammalla kohde on maanpinnasta, sitä kauempana olevan maanpinnan pisteen yllä se näyttää satelliitista katsottuna olevan (kuva 2.2). Parallaksikorjaus synnyttää hilaan aukkoja kohteen kaukaisimman reunan taakse – sinne, missä satelliitti-instrumentti alun perin havaitsi kyseisen kohteen. Näistä paikoista ei ole mahdollista tehdä suoria havaintoja. Aukkoja voidaan kuitenkin pyrkiä täyttämään esimerkiksi interpolaatiomenetelmin (Marcos ja Rodríguez, 2016a).

---

<sup>2</sup> Toisin kuin Meteosat, GPM-ohjelma on kuitenkin tarkoitettu ensisijaisesti ennustus- ja ilmastomallien parantamiseen sekä datan keräämiseen ja ymmärryksen lisäämiseen koko hydrologisesta kierrosta (NASA, 2018a).



*Kuva 2.2: Parallaksikorjaus. Satelliitti näkee sade-pilven paikan B yläpuolella, vaikka tosiasiasa pilvi on paikan A yllä (Kuva: Marcos ja Rodríguez, 2016a).*

Sääsatelliiteilla havainnoidaan tyypillisesti ilmakehän vesihöyryä ja pilviä hyödyntämällä näkyvää valoa (aallonpituus 0,4–0,7  $\mu\text{m}$ ), infrapunasäteilyä (0,7  $\mu\text{m}$  – 1 mm) tai mikroaaltosäteilyä (~1 cm – 1 m). Eri aallonpituusalueiden käyttötavat riippuvat sade- ja pilvipisaroiden säteilyominaisuuksista. Mikroaaltoihin perustuvilla menetelmillä voidaan suoraan havainnoida sateen vaikutusta säteilyyn, kun taas infrapuna- ja näkyvän valon alueella tehtäviin mittauksiin perustuva sateen arviointi nojaa epäsuoriin havaintoihin; se tehdään tarkkailemalla esimerkiksi pilvien huippujen ominaisuuksia (Tapiador ym., 2012). Infrapuna- ja näkyvän valon alueen etuna on hyvä horisontaalinen resoluutio, sillä se riippuu aallonpituudesta ja on pitempiaaltoisella mikroaaltoalueella verrattain huono (Levizzani ym., 2001).

### *2.1.1 Infrapuna- ja näkyvän valon aluetta hyödyntävät menetelmät*

Sademäärien arviointi passiivisten infrapunasäteilyä mittaavien laitteiden avulla perustuu empiirisesti tunnettuun yhteyteen korkeiden cumuluspilvien ja rankkasateen välillä: mitä korkeampia ja paksumpia pilvet ovat, sitä todennäköisemmin ne tuottavat sadetta – ja sitä voimakkaampaa syntyvä sade on (esim. Scofield, 1987).

Radiometrien mittauksia tulkittaessa sovelletaan Planckin lakia mustan kappaleen säteilystä (Kidder ja Vonder Haar, 1995; s. 52–55). Kaikki aine, jonka lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella, säteilee. Säteilyn intensiteetti tietyllä aallonpituudella riippuu paitsi aineen lämpötilasta myös sen muista ominaisuuksista;

ideaalista säteilijää kutsutaan mustaksi kappaleeksi. Planckin lain mukaan mustan kappaleen säteilyn intensiteetti lämpötilassa  $T$ , aallonpituudella  $\lambda$  voidaan kirjoittaa

$$B_\lambda(T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}, \quad (1)$$

missä  $c_1 = 1,19 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ ster}^{-1} \text{ cm}^4$  ja  $c_2 = 1,439 \text{ K cm}$  ovat säteilyvakioita, jotka riippuvat Planckin vakiosta, valon nopeudesta ja Boltzmannin vakiosta.

Useimmat luonnolliset kappaleet ja aineet ovat kuitenkin säteilyominaisuuksiltaan ”harmaita”, eli niiden säteilyn intensiteetti on pienempi kuin mustalla kappaleella. Monet sääsatelliittisovellukset hyödyntävät säteilevien kohteiden ominaisuuksista riippuvaa kirkkauslämpötilaa  $T_b = \varepsilon T$ , jossa  $\varepsilon$  on emissiokerroin ja  $T$  kohteen fysikaalinen lämpötila. Mustalle kappaleelle  $\varepsilon = 1$ , harmaalle kappaleelle pienempi – harmaan kappaleen kirkkauslämpötila on siis aina pienempi kuin sen fysikaalinen lämpötila.

Kirkkauslämpötila on lämpötila, joka mustalla kappaleella tulisi olla, jotta sen säteilyn pintakirkkaus olisi sama kuin tarkasteltavan säteilijän. Yhtälöstä 1 voidaan johtaa kirkkauslämpötilan riippuvuus aallonpituudesta  $\lambda$ :

$$T_b = \frac{c_2}{\lambda \ln\left(\frac{c_1}{\lambda^5 B_\lambda} + 1\right)}. \quad (2)$$

Eri aallonpituusalueilla mitattujen kirkkauslämpötilojen välisiä eroja voidaan käyttää havaitsemaan konvektiivisten pilvien huippuja, jotka ulottuvat tropopausiin tai sen yläpuolelle (*overshooting tops*; Schmetz ym., 1997) – tropopausin kohdalla ilman lämpötila alkaa nousta ylöspäin mentäessä, joten korkein huippu ei enää ole kylmin. Näin korkealle ulottuvat pilvet tuottavat suurella todennäköisyydellä voimakasta sadetta (esim. Dworak ym., 2012).

Edellä mainituilla keinoilla saadut tiedot pilvien huipuista on muutettava sademääriksi maanpinnan tasolla. Tätä tehdään erilaisin tilastollisin menetelmin, jotka perustuvat esimerkiksi vertailuun säätutkalla tehtyjen sademittausten tai sademittareilla mitattujen kertymien kanssa. Pilven huipun lämpötilan ja sateen intensiteetin välinen yhteys kuitenkin riippuu vuodenajasta ja paikasta, eikä kaikkialle sopivan muuntoalgoritmin kehittäminen ole mahdollista. Lisäksi kylmimmät, korkeimmat pilven huiput eivät aina osu juuri sen maanpinnan kohdan ylle, jossa sataa kaikkein kovimmin. (Tapiador ym., 2012)

Pilvet saattavat myös olla kerrostuneita siten, että ylempänä oleva pilvi vaimentaa säteilyä niin, ettei mittalaite havaitse alempana olevaa sadepilveä. Ongelmallisia ovat erityisesti korkealla olevat kylmät, ohuet cirruspilvet, jotka eivät tuota sadetta. Niiden erottamiseksi korkeista cumuluspilvistä voidaan käyttää lähi-infrapuna- tai näkyvän valon kanavia, joiden avulla saadaan tietoa esimerkiksi pisaroiden koosta pilven huipulla (Tapiador ym., 2012). Kingin ym. (1995) mukaan näkyvän valon kanavan hyödyntäminen yhdessä infrapunamittausten kanssa parantaa sadearvioita, ja kovien sateiden arviointi pelkän näkyvän valon avulla tehdyistä havainnoista saattaa tuottaa jopa tarkempia tuloksia kuin infrapunasäteilyn käyttö. Näkyvän valon kanavaan tosin liittyy ilmeinen ongelma, että sitä ei voi käyttää kuin päiväsaikaan.

### *2.1.2 Mikroaaltoihin perustuvat menetelmät*

Mikroaltoaletyhyä hyödyntämällä voidaan havainnoida sadepisaroiia suoraan, koska mikroaltoaletyhyellä pilvet vaimentavat säteilyä vähemmän ja pilvi- sekä sadepisarot emittoivat, absorboivat ja sirottavat säteilyä (Tapiador ym., 2012). Mikroaltoaletyhyeradiometri voi mitata ilmakehästä saapuvaa säteilyä, tai tutka voi lähettää mikroaltoaletyhyepulssin ja mitata takaisin siroannutta säteilyä.

Kun Maan pinnan lähettämä pitkäaaltoaletyhye siroaa ilmakehän hydrometeoreista – vedestä, jäästä ja lumesta –, satelliitissa oleva passiivinen mikroaltoaletyhyesensori havaitsee sekä pinnalta lähteneen että ilmakehässä siroannun säteilyn. Mitä tehokkaampi säteilijä pinta on, sitä pienempi osuus mittalaitteen havaitsemasta säteilystä on ilmakehän kohteiden sirottamaa. Koska merenpinta säteilee etenkin matalilla mikroaltoaletyhyeajuuksilla vähemmän kuin maanpinta, tällaista passiivista,



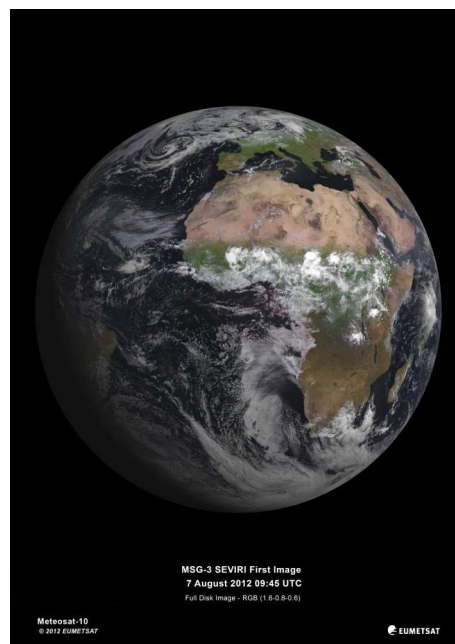
suoraa, Maan pinnan emittoimaan säteilyyn perustuvaa mikroaaltomenetelmää käytetään erityisesti valtamerien yllä tehtävään sateen havainnointiin. Tällainen menetelmä ei kuitenkaan sovellu kovimpien sateiden arvioimiseen, koska hydrometeorien säteilyä vaimentava vaikutus ei kasva loputtomasti, vaikka ilmakehässä olevan veden määrä lisääntyisi. (Tapiador ym., 2012)

Aktiivinen mikroaaltoradiometri satelliitissa toimii samoin kuin maanpinnalla oleva tutka (lisää säätutkista luvussa 2.2). Ensimmäinen avaruuteen lähetetty säätutka laukaistiin Maata kiertävälle radalle vuonna 1997 osana NASA:n TRMM-ohjelmaa (*Tropical Rainfall Measuring Mission*; NASA, 2018b). Se lensi polaarisella kiertoradalla noin 400 kilometrin korkeudessa vuoteen 2015 asti. Aktiivimenetelmiä on hyödynnetty enimmäkseen polaarisisä satelliiteissa. NASA:n suunnitelmissa on kuitenkin ollut laukaista 2020-luvulla geostationääriselle radalle trooppisten hirmumyrskyjen seurantaan suunniteltu tutka, jonka antennin halkaisija olisi peräti 35 metriä (Im ym., 2011).

### 2.1.3 CRR

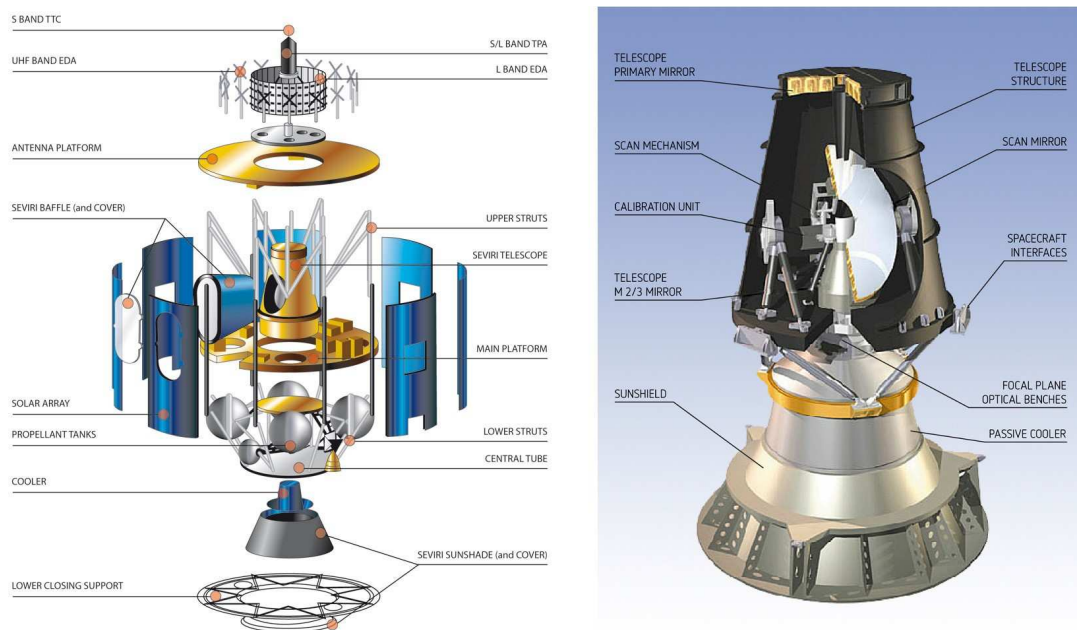
Tässä tutkielmassa tarkasteltu satelliittisade-tuote CRR hyödyntää EUMETSAT:n Meteosat-11-satelliitin tuottamaa dataa. Vuonna 2015 laukaistu Meteosat-11 kiertää Maata nollapituuspiirillä (kuva 2.3). Se on päävastuussa EUMETSAT:n operatiivisesta sääsatelliittitoiminnasta, ja sen arvioidaan jatkavan radallaan ainakin vuoteen 2022 asti (EUMETSAT, 2018).

Meteosat-11:een asennettu kuvaava spektrometri SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*, Schmetz ym., 2002; kuva 2.4) tuottaa 15 minuutin välein kuvan koko näkemästään Maan kiekosta käyttäen 12:ta eri aallonpituusalueilla toimivaa kanavaa. Näistä kaksi on näkyvän valon kanavia (0,6  $\mu\text{m}$  ja 0,8  $\mu\text{m}$ ), joita käytetään



Kuva 2.3: Ensimmäinen kuva Meteosat 11:n näkemästä Maan kiekosta julkaistiin vuonna 2012 (kuva: EUMETSAT).

esimerkiksi pilvien havainnointiin sekä maanpinnan ja kasvipeitteen tarkkailuun. Lähi-infrapunakanava (1,6  $\mu\text{m}$ ) taas auttaa vesi- ja jäätien erottelussa sekä aerosolihavainnoissa. Kahdeksan termaali-infrapuna-alueella (3,9–13,4  $\mu\text{m}$ ) toimivaa kanavaa antavat tietoa vesihöyryn määrästä ja liikkeistä ilmakehässä sekä pilvien, maan ja merenpinnan lämpötiloista. Lisäksi SEVIRI:ssä on näkyvän valon aallonpituudella (n. 0,4–1,1  $\mu\text{m}$ ) toimiva korkean resoluution kanava, joka erottelee näkemäänsä 1 kilometrin tarkkuudella suoraan satelliitin alapuolella; muiden kanavien resoluutio on 3x3 km.



Kuva 2.4: Meteosat-11-satelliitti (vas.) ja SEVIRI-mittalaite (kuva: EUMETSAT).

## 2.2 Säätutkat

Säätutka on aktiivinen mittalaite: se lähettää sähkömagneettisen pulssin, joka siroaa ilmakehässä olevista hydrometeoreista takaisin tutkaan. Takaisin sironneen säteilyn voimakkuuden perusteella määritetään tutkavaste  $Z$ . Tutka keilaa useilla eri korkeuskulmilla ja luo siten kolmiulotteisen otannan ilmakehästä. Maan kaarevuuden vuoksi tutkasignaali nousee sitä korkeammalle, mitä kauemmas tutkasta se etenee.

Säätutkat toimivat mikroaaltoalueella, tavallisesti S-, C- tai X-aallonpituusalueella; S-alueen taajuus on  $\sim 3$  GHz ja vastaava aallonpituus  $\sim 12$  cm, C-alueen  $\sim 6$  GHz ja  $\sim 5$  cm, ja X-alueen  $\sim 10$  GHz ja  $\sim 3$  cm. Kun säätutka havainnoi sadepisaroi- ta, tutkasignaalia sirottavat kappaleet ovat signaalin aallonpituuteen verrattuna pieniä.

Tällöin tutkavaste  $Z$  määritellään yksikkötilavuudessa olevien hydrometeorien halkaisijoiden kuudensien potenssien summana (Rinehart, 1997; s. 89):

$$Z = \sum_{V_c} D_i^6 . \quad (3)$$

$Z$ :n suuren vaihteluvälin vuoksi yleensä käytetään logaritmista muotoa  $\text{dBZ} = 10 \log(Z/Z_0)$ , missä  $Z_0 = 1 \text{ mm}^6 \text{ m}^{-3}$ . Usein tutkavaste myös korvataan ekvivalenttitutkavasteella  $Z_e$ , joka ottaa huomioon sen, että sirottavat kappaleet eivät ole täysin pallonmuotoisia ja että ne voivat sisältää vettä sekä nesteenä että kiinteässä olomuodossa (Rinehart, 1997; s. 94–95).

Tutkavaste muutetaan sateen hetkelliseksi intensiteetiksi laskukaavalla, joka on Marshallin ja Palmerin (1948) mukaan muotoa

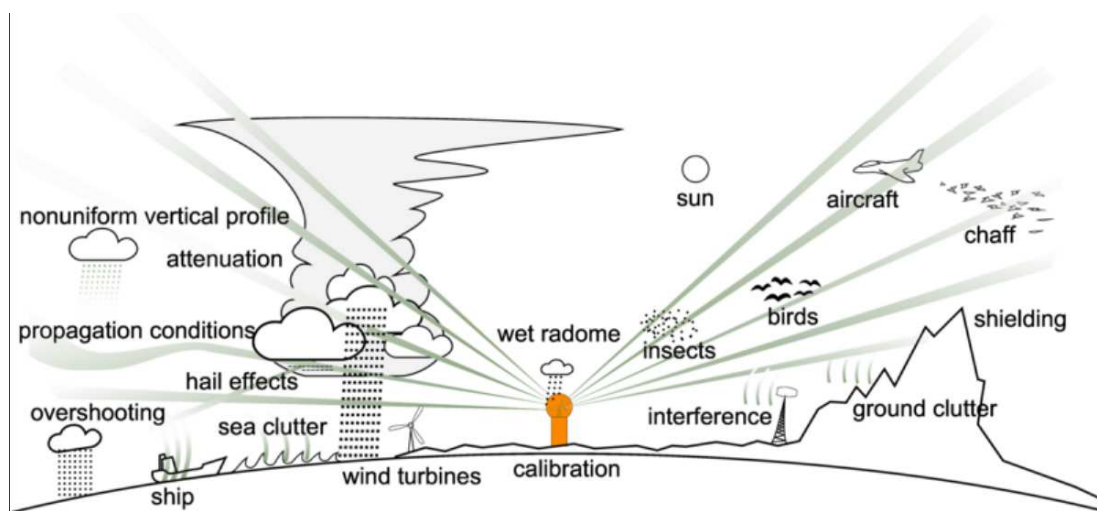
$$Z = a \cdot R^b , \quad (4)$$

missä  $R$  on sateen intensiteetti ( $\text{mm h}^{-1}$ ) ja  $a$  sekä  $b$  ovat empiirisesti määritettäviä vakioita. Vakiot riippuvat sadepisaroiden kokojakaumasta (*drop size distribution*), joka vaihtelee sadetyypin ja maantieteellisen alueen mukaan sekä myös samantyyppisestä sadetilanteesta toiseen samassakin paikassa – ja jopa yksittäisen ukkosmyrskyn sisällä (Battan, 1973; s. 88–97). Tässä tutkielmassa käytetyssä OPERA-yhdistelmätuotteessa sovelletaan usein käytettyä Marshallin ja Palmerin (1948) kaavaa  $Z = 200 \cdot R^{1.6}$ .

Koska tutkavasteen ja sateen intensiteetin välinen suhde on monimutkainen, tutkamittauksia sovitetaan usein sademittareilla tehtyihin havaintoihin, jotta mahdolliset systemaattiset virheet saataisiin korjattua. Austinin (1987) mukaan tutkan ja sademittarien välinen suhdekaan ei ole aivan suoraviivainen: siinä missä tutka mittaa hetkellistä tutkavastetta vähintäänkin tuhansien neliömetrien kokoisen alueen yllä, sademittari kerää kumulatiivista tietoa sateesta vajaan neliömetrin kokoisella alueella maan pinnalla. Lisäksi sateen intensiteetti saattaa vaihdella hyvinkin pienellä alueella, joten tutkan ja sademittarin havainnot eivät välttämättä vastaisi toisiaan, vaikka kaikki virhelähteet pystyttäisiin poistamaan.

Park ym. (2016) havaitsivat OPERA-tutkayhdistelmän aliarvioivan sademääriä Espanjassa ja Suomessa huomattavasti verrattuna SYNOP-verkoston sademittareilla tehtyihin havaintoihin. Parkin ym. (2017) mukaan tämä voi johtua esimerkiksi eroista eri ilmatieteenlaitosten tutkien kalibroinnissa, tutkan suojakuvun aiheuttamasta signaalin vaimentumisesta, signaalin vaimentumisesta ilmakehässä tai saman Z–R-relaation käyttämisestä kaikissa säätilanteissa. Merkittävä virhelähde on myös se, että maanpinnalla koettava sade ei välttämättä vastaa tutkan havainnoista arvioitua sademäärää, kun tutka tekee havaintonsa korkealta maanpinnan yläpuolelta (Koistinen ja Pohjola, 2014).

Kaksoispolarisaatiotekniikkaa hyödyntävät tutkat eli polarimetriset tutkat ovat vähitellen yleistyneet. Ne erottelevat pysty- ja vaakasuuntaiset signaalit toisistaan ja pystyvät siten määrittämään sirottavan kappaleen muodon. Tämä parantaa erityisesti rankkasateiden tunnistamista ja lähietkiennustamista, koska kovissa sateissa pisarat ovat verraten suuria; ilmanvastus litistää suurta pisaraa, jolloin sen vertikaalinen ulottuvuus on horisontaalista ulottuvuutta pienempi (Bringi ja Chandrasekar, 2001; s. 379–380). Kaksoispolarisaatio auttaa myös tunnistamaan sadetyypin, sillä esimerkiksi rakeiden tai lumen polarimetrinen tutkavaste on erilainen kuin vesisateella (Chandrasekar ym., 2013).

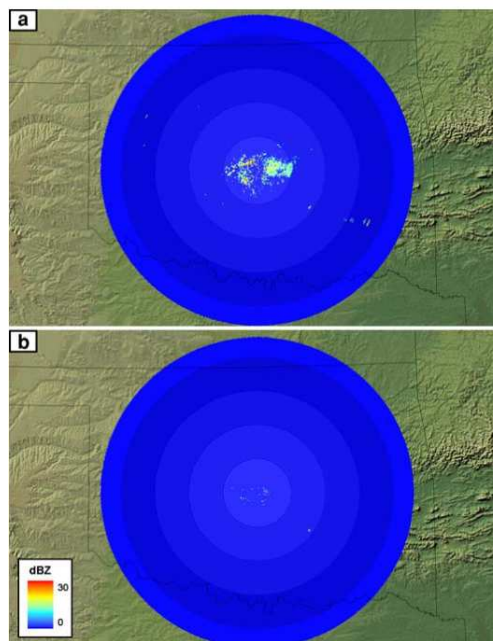


Kuva 2.5: Sääradan häiriölähteitä (kuva: Markus Peura).

Lisäksi kaksoispolarisaatiota käytetään laajalti epämeteorologisten kaikuja eli häiriökaikujen tunnistamiseen (esim. Ye ym., 2015). Tutkakuviin aiheuttavat häiriöitä esimerkiksi maa- ja merikaiut (Villarini ja Krajewski, 2010), tuulivoimalat, saman

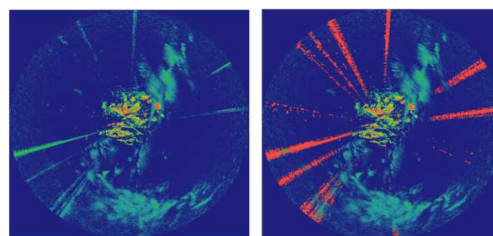
aallonpituusalueen käyttäjät kuten radiolinkit ja langattomat verkot (Huuskonen ym., 2014) sekä hyönteiset, linnut ja lentokoneet (kuva 2.5).

Maakaikuja synnyttävät esimerkiksi lähellä tutkaa olevat rakennukset, puut ja korkeat maastonkohdat (kuva 2.6). Vuoristot taas saattavat estää signaalin kulun kokonaan, jolloin tutka ei havaitse vuoren takana olevaa aluetta lainkaan. Maa- ja merikaikujen syntyminen on mahdollista kaukanakin tutkasta, jos ilmakehä taittaa signaalia sopivalla tavalla ja signaali osuu maanpintaan (Villarini ja Krajewski, 2010).



Kuva 2.6: Tutkakuva a) ennen maakaikujen poistoa ja b) sen jälkeen (kuva: Villarini ja Krajewski, 2010).

Maakaikujen poistamiseksi on kehitelty useita tunnistus- ja suodatusmenetelmiä, mutta Villarinin ja Krajewskin (2010) mukaan suodatuksesta on hankalaa tehdä virheetöntä: todennäköisesti osa maakaikuista jää aina kuvaan ja osa sateen aiheuttamista kaiuista suodattuu pois. Toisaalta maakaikuista voi Rinehartin (1997, s. 193) mukaan olla hyötyäkin: tutut rakennukset ja kukkulat ovat aina samassa paikassa ja tuottavat tutun kaiun, joten jos kaiku muuttuu, jonkin voi epäillä olevan vialla tutkassa.



Kuva 2.7: Langattoman viestiliikenteen aiheuttamia interferenssikuvioita (vas.), jotka voidaan tunnistaa bRopo-moduulin (Peura, 2002) avulla (oik.) (kuva: Scovell ym., 2013).

Sähköiseen viestintään liittyvät laitteet aiheuttavat interferenssiä, joka on helppo tunnistaa tutkakuvista, koska se näkyy suorina säteinä (Peura, 2002; kuva 2.7). Viime vuosikymmeninä häiritsevä viestiliikenne C-taajuusalueella on lisääntynyt. Vaikka lainsäädännöllä voidaan vaikuttaa siihen, millä taajuuksilla nämä laitteet toimivat, Saltikoffin ym. (2016) mukaan on helppo ennustaa niiden aiheuttamien häiriöiden

lisääntyvän entisestään tulevaisuudessa, sillä tähänkin asti suuri osa häiriöistä on johtunut säätutkien käyttämän taajuusalueen luvattomasta käytöstä.

Häiriölähteitä poistettaessa tutkakuvaan jää aina aukko, joka on pyrittävä täyttämään interpoloimalla ympäröivistä havainnoista. Vaikka menetelmät viestiliikenteen aiheuttamien häiriöiden poistamiseksi etenkin kaksoispolarisaatiotekniikan keinoin ovat kehittyneet, Saltikoff ym. (2016) nimeävät sääntelyn parhaaksi tavaksi vastata langattoman tekniikan tuomiin ongelmiin. Heidän mukaansa häiriöiden tunnistamista ja poistamista kuvasta tai tutkasignaalista ei voi pitää toimivana pitkän aikavälin ratkaisuna; jos langattoman viestiliikenteen aiheuttamat häiriöt lisääntyvät, ne peittävät pian alleen niin paljon meteorologista tietoa, että tämän tiedon interpoloiminen paikkoihin, joista häiriökaikuja on poistettu, käy hankalaksi ellei mahdottomaksi.

Tuulivoimaloiden tunnistaminen ja niiden aiheuttamien virheiden korjaaminen on hankalampaa kuin langattoman viestiliikenteen, koska voimalan lavat liikkuvat. Lisäksi tuulivoimalan tuottama maakaiku muuttuu, kun voimalan turbiini kääntyy tuulen suunnan vaihdellessa. Pyörivien lapojen aiheuttamia virheitä tuulikentässä voidaan havaita jopa kymmenien kilometrien päässä tuulivoimalan takana (Huuskonen ym., 2014). Kaksoispolarisaatiotutkia hyödyntäviä menetelmiä on kuitenkin kehitetty tuulivoimaloiden aiheuttamien häiriöiden vähentämiseksi (esim. Seo ym., 2015). Suodatusalgoritmien ohella on ehdotettu myös muun muassa häivetekniikan hyödyntämistä: voimaloiden lapoja ja mastoa voitaisiin päällystää tutkasignaalia absorboivalla materiaalilla, mikä tosin tulisi varsin kalliiksi peitettävän pinta-alan suuruuden vuoksi (de la Vega ym., 2013).

### 2.3 Salamankaikun paikannus ja sateen arviointi

Salamointia voidaan pitää mittarina konvektiivisen rajuilman voimakkuudesta (Rossi, 2015), minkä vuoksi salamadata voi tuoda arvokasta tietoa lähitietokäytön tueksi. Erilaisten havainnointijärjestelmien yleistyttyä salamoita onkin tutkittu runsaasti. Maahan asennettavat sensoriverkostot tunnistavat salamoiden aiheuttamia sähkömagneettisia impulsseja jopa tuhansien kilometrien etäisyydeltä, ja kun saman salaman havaitsee usea sensori, salamat voidaan paikantaa vertaamalla

signaalien saapumisaikoja ja tulosuuntia (Pohjola ja Mäkelä, 2013). Myös satelliittipohjaisia optisia menetelmiä salamoinnin havainnoimiseen on käytetty (Rossi, 2015), ja vuonna 2021 laukaistavaksi suunniteltuun kolmannen sukupolven geostationääriseen sääsatelliittiin on tulossa lähihetkiennustamisen tarpeisiin suunniteltu salamantunnistin (EUMETSAT, 2017).

Salamanpaikannustiedoista voidaan määrittää salamoinnin ajallinen tiheys halutulla alueella. Salamatiheyden avulla taas voidaan arvioida sademäärää, jos sekä salamatiheydestä että sademäärästä on olemassa riittävän pitkän ajan kattava vertailuaineisto. Esimerkiksi PMM-menetelmää (*probability matching method*; Calheiros ja Zawadzki, 1987) hyödyntämällä suurimmat havaitut salamatiheydet voidaan muuttaa suurimmiksi sademääriksi, jotka esimerkiksi tutka on havainnut vertailuaineistoa kerättyä.

Salamatietoa onkin jo hyödynnetty numeerisessa lähihetkiennustamisessa (esim. Giannaros ym., 2016). Kohnin ym. (2011) mukaan myös pelkkään salamatietoon perustuvaa rajuilma-analyysia ja lähihetkiennustamista tulisi kehittää, koska helppokäyttöinen salamadata yksinkertaistaa ennustemalleja, on käytettävissä reaaliaikaisesti ja ulottuu alueille, joilla ei ole tutkapeittoa. Hyvällä salamaennusteella voidaan lisäksi vähentää säähän liittyviä riskejä, sillä maasalama itsessäänkin on vaarallinen ilmiö.

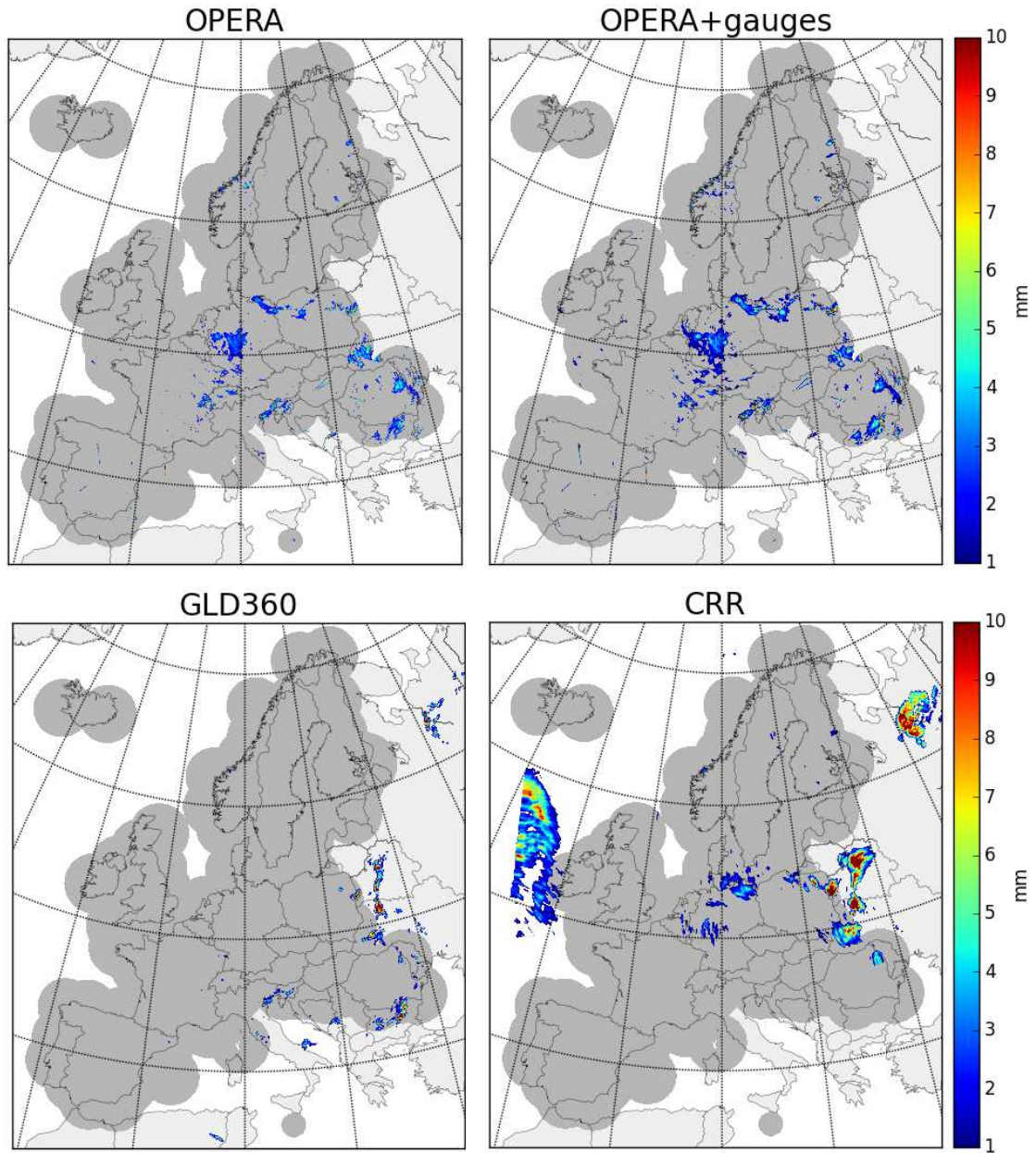
Christianin ym. (2003) mukaan salamointi on Euroopan alueella keskimäärin vilkkainta Välimerellä ja Kaakkois-Euroopassa, mutta kaikkiaan Eurooppa ei ole konvektiivisesti yhtä aktiivista aluetta kuin tropiikki tai Pohjois-Amerikka. Höllerin ym. (2009) mukaan keskileveysasteiden konvektio voi kuitenkin synnyttää yhtä paljon tai jopa enemmän salamoita kuin voimakas trooppinen konvektio. Suomessa keskikesän konvektio on Punkan (2002) mukaan likimain yhtä voimakasta kuin Yhdysvaltojen keskilännessä.

### **3. KÄYTETYT DATALÄHTEET**

Tässä luvussa esitellään tutkielmassa käytetyt neljä tuotetta: CRR-satelliittisadetuote, OPERA-tutkayhdistelmä, GLD360-salamahavaintoverkosto ja vertailutuotteena



toimiva sademittareilla sovitettu OPERA. Kuva 3.1 esittää kunkin tuotteen havainnoista lasketun edeltävän tunnin sadekertymän yksittäiseltä tunnilta heinäkuulta 2017. Kuvasta on suodatettu alle 1 mm:n kertymät, koska tutkitaan erityisesti konvektiivisiin tapahtumiin liittyviä sateita.



Kuva 3.1: Edeltävän tunnin sadekertymä (yli 1 mm) 25.7.2017 klo 17 UTC eri lähteistä. Tummennettuna OPERA-tutkapeittoalue.

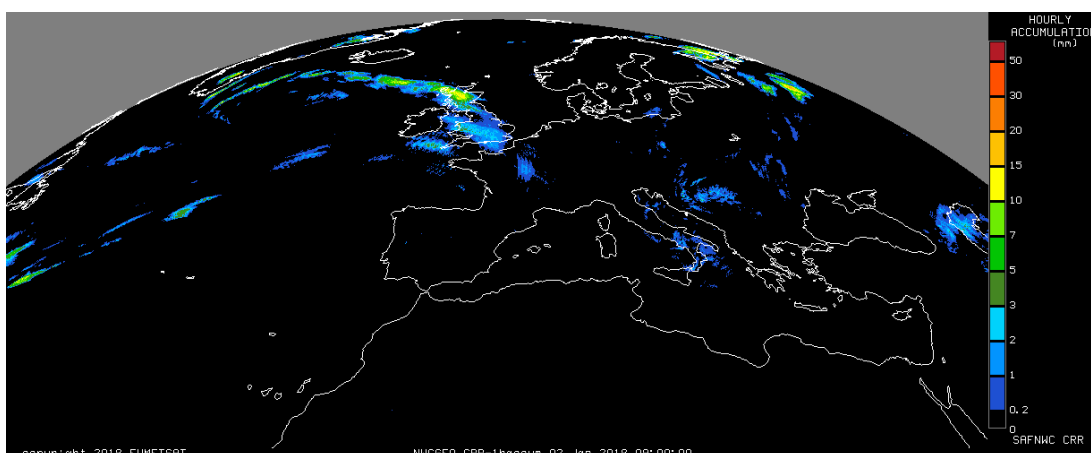
Kuvasta 3.1 nähdään, että eri tuotteiden arvioimat sateet vastaavat vain osin toisiaan. OPERA:n (ylh. vas.) ja OPERA+sademittarien (ylh. oik.) kuvat näyttävät samankaltaisilta, koska molemmissa sadetta on havainnoitu säätutkalla. Sateiden voimakkuudessa tosin näyttää olevan eroa. CRR (alh. oik.) taas näyttää havaitsevan



vain osan Keski-Euroopan sateista, jotka voidaan havaita myös OPERA-kuvissa, mutta toisaalta CRR näkee OPERA-alueen ulkopuolella hyvin runsaita kertymiä, joita OPERA-tuotteet eivät voi havaita. Esimerkiksi Valko-Venäjällä Minskin alueella satoi kyseisenä päivänä ennätysmäärä vettä – 77 mm kymmenessä tunnissa. CRR:n lisäksi Valko-Venäjän sadealue näkyy salamatietoihin perustuvassa GLD360-kuvassa (alh. vas.). OPERA-alueen länsipuolella Atlantilla taas nähdään CRR-kuvassa suuri voimakas sadealue, jollaisella voi länsivirtausten vallitessa olla suuri vaikutus Brittein saarten säähän.

### 3.1 CRR-sadetuote (EUMETSAT)

Satelliittisadetuote *Convective Rainfall Rate* (CRR; Marcos ja Rodríguez, 2016a; kuva 3.2) määrittää konvektioon liittyvän sateen intensiteetin ja edeltävän tunnin sadekertymän Euroopassa. CRR hyödyntää kolmea SEVIRI-mittalaitteen infrapuna- ja näkyvän valon mittauskanavaa: 10.8IR, 6.2WV ja 0.6VIS<sup>3</sup>.



Kuva 3.2: Konvektioon liittyvän sateen edeltävän tunnin kertymä Euroopassa ja Pohjois-Afrikassa 2.1.2018 klo 9.00 UTC, CRR v2016. (Lähde: EUMETSAT)

CRR laskee sademäärät käyttämällä tutkadatan avulla kalibroituja funktioita. Funktiot on muodostettu vertaamalla satelliittikuvia pikseli pikseliltä tutkadataan ja yhdistämällä satelliittikuvien ominaisuudet tiettyihin tutkan mittaamiin sademääriin. Vuoden 2013 CRR-tuote kalibroitiin Espanjan, Unkarin ja BALTRAD-verkon tutkien avulla (Rodríguez ja Marcos, 2013).

<sup>3</sup> IR viittaa infrapunaan, WV vesihöyryyn (*water vapour*), joka tulee näkyväksi 6,2  $\mu\text{m}$ :n aallonpituudella, ja VIS näkyvään valoon.

Koska näkyvän valon kanava (0.6VIS) on käytössä vain päiväsaikaan, CRR sisältää sekä kahden että kolmen muuttujan funktion, joista jälkimmäistä ei voi käyttää, kun päivänvalo ei ole. Kahden muuttujan funktion muuttujat ovat kanavan 10.8IR mittaama kirkkauslämpötila ja sen ero kanavan 6.2WV mittaamaan kirkkauslämpötilaan. Kolmen muuttujan funktiossa käytetään lisäksi 0.6VIS-kanavan kuvia: pilven optisen paksuuden oletetaan olevan sitä suurempi, mitä kirkkaampana pilvi näkyy kuvassa eli mitä enemmän se heijastaa auringonvaloa. Suuren optisen paksuuden taas oletetaan vastaavan suurta sateen intensiteettiä. Marcosin (2016) mukaan näkyvän valon kanavan käyttö on tarpeen, sillä kolmen muuttujan funktio antaa yleisesti parempia tuloksia kuin kahden muuttujan funktio.

Funktiot tuottavat 15 minuutin välein sateen hetkellisen intensiteetin (mm/h), josta CRR laskee edeltävän tunnin sadekertymän integroimalla puolisuunnikkasääntöä käyttäen. Tässä tutkielmassa tunnin kertymä kuitenkin lasketaan itse 1 minuutin aikaresoluutioon interpoloiduista intensiteeteistä (ks. luku 4.1). Yksittäistä ajanhetkeä edustava CRR-tiedosto sisältää intensiteetin ja tunnin kertymän lisäksi muun muassa tietoa siitä, mitä korjauksia kunkin hilapisteen datalle on tehty ja mitä dataa hilapisteestä mahdollisesti puuttuu. Tiedosto ilmestyy Ilmatieteen laitoksen palvelimelle noin 15 minuuttia edustamansa ajanhetken jälkeen.

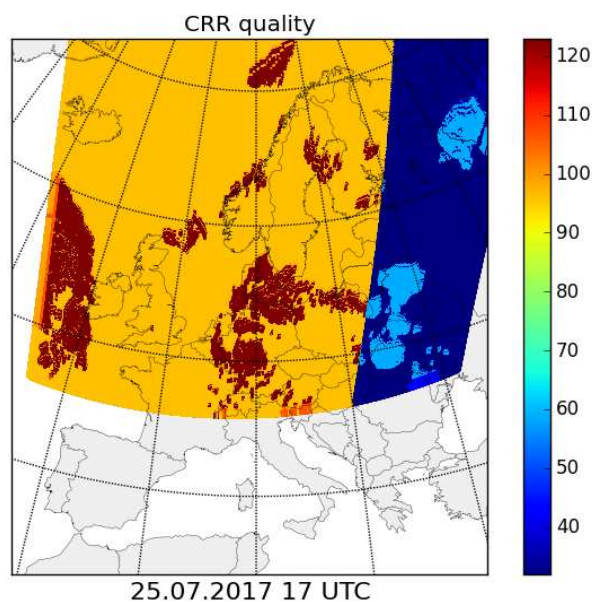
Koska CRR keskittyy nimenomaan konvektioon liittyvään sateeseen, joka on tavallisesti voimakkaampaa kuin rintamiin liittyvä jatkuva sade, käyttäjä voi pyrkiä suodattamaan jatkuvan sateen pois tuloksista käyttämällä itse määrittelemäänsä kynnyksarvoa, esimerkiksi 3 mm/h (Rodríguez ja Marcos, 2013). Tuotteessa on myös algoritmi, joka täydentää laskettua sadekenttää salamadatasta arvioidulla sadekentällä – tämä tosin vaatii kalibrointia kulloinkin käytetyn salamahavaintoverkoston mukaan, sillä salama-algoritmi perustuu Espanjan ilmatieteenlaitoksen AEMET:n havaintoverkoston, joka kattaa vain Espanjan alueen (Rodríguez ja Marcos, 2013). Tästä syystä tämä ominaisuus ei ole lähtökohtaisesti käytössä NWCSAF:n toimittamassa CRR-datassa. Lisätietoa salamahavaintoihin perustuvasta sademäärän arvioinnista esitetään kappaleessa 2.3.

CRR ei erottele sateen olomuotoa (Marcos ja Rodríguez, 2016a), joka on tärkeä etenkin Pohjois-Euroopan alueella. Tuotteen käytettävyyteen liittyy pohjoisessa

muitakin ongelmia, sillä geostationäärisen satelliitin kuvatessa etäisiä leveyspiirejä, esimerkiksi Suomea (60–70 °N), havainnointikulma kasvaa suureksi paitsi etäisyyden myös maan pinnan kaareutumisen vuoksi. Rodríguez ja Marcos (2013) ovatkin havainneet, että mitä korkeampaa leveyspiiriä tarkastellaan, sitä himmeämpinä kaikkein kovimpia sateita tuottavien pilvien huiput näkyvät 0.6VIS-kanavan kuvissa. Tämä johtuu auringonvalon vähäisemmästä määrästä korkeilla leveysasteilla. CRR:n kolmen muuttujan funktio ottaa ongelman huomioon korjausalgoritmilla, joka tulkitsee kovaksi sateeksi sitä heikomman signaalin mitä korkeammalta leveyspiiriltä se tulee.

CRR sisältää muitakin korjausfunktioita. Korjaukset liittyvät esimerkiksi ilmakehän kosteuteen, maanpinnan muotoihin ja pilvien kasvunopeuteen. Korjauksia laskettaessa CRR hyödyntää numeerista mallia, johon syötetään tietoja esimerkiksi lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta tietyillä painepinnoilla.

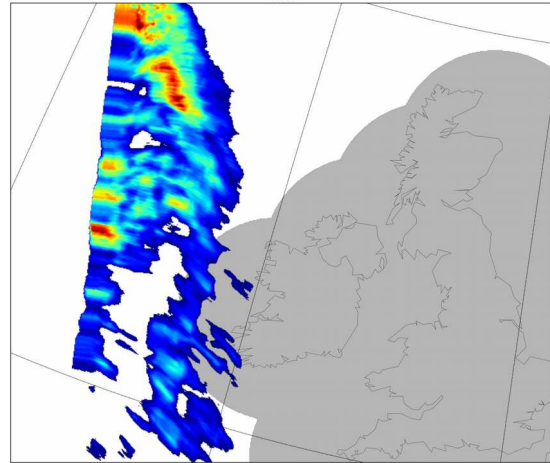
CRR:n 8-bittinen laatukenttä (kuva 3.3) kertoo, mitä korjauksia kullekin pikselille on tehty ja onko pikselin CRR-arvo laskettu kahden vai kolmen muuttujan funktiolla (Rodríguez ja Marcos, 2013). Suurimmassa osassa hilapisteistä laatukentän arvo riippuu käytännössä kahdesta asiasta: vuorokaudenajasta ja siitä, sataako tarkastelupisteessä vai ei; hilapisteissä, joissa CRR tunnistaa sadetta, se tekee säännönmukaisesti tietyt korjaukset (kosteuteen, pilvien kasvuvauhtiin ja huipun lämpötilaan liittyvät korjaukset sekä parallaksikorjauksen ja orografisen korjauksen). Näin ollen laatukentästä on erotettavissa pääasiassa neljänlaisia alueita. Kuvassa 3.3 yön ja päivän välinen raja on selvästi nähtävissä, ja selvästi erottuvat myös sadealueet rajan molemmin puolin.



*Kuva 3.3: CRR:n laatukenttä. 8-bittinen laatuluku saa arvon 123, kun sataa alueilla, joilla käytössä on näkyvän valon kanava (tummanpunainen). Arvo 32 (tumman-sininen) on alueella, jolla näkyvän valon kanava ei ole käytössä ja jolla ei sada.*

Sadealueiden pohjoisreunoille – satelliitista katsottuna kaukaisimmalle reunalle – parallaksikorjaus kuitenkin jättää aukkoja. Nämä aukot CRR täyttää mediaani-filtterillä, jota käyttäessään se ottaa huomioon aukon ympärillä olevien hilapisteiden arvot. Tällaiset hilapisteet erottuvat kuvasta 3.3, joskin heikosti, sadealueen väristä hieman poikkeavana värinä sadealueiden pohjoisreunoilla.

Koko CRR-alueen reunoilla taas nähdään selvemmin noin yhden leveys- tai pituusasteen levyisellä kaistaleella alueita (kuva 3.4.), joihin parallaksikorjaus on tehty mutta orografinen korjaus on tekemättä. Nämä reuna-alueiden sadekertymät näyttävät kuvissa epäfysikaalisina, venytetyn näköisinä muotoina. Esimerkiksi kuvan 3.4 tapauksessa, meren yllä, sadearvion ei luulisi olevan riippuvainen orografisesta



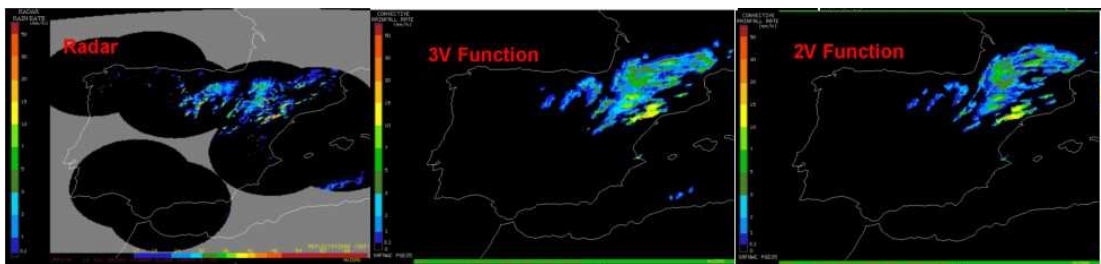
*Kuva 3.4: CRR-alueen länsireunalla olevan sadealueen läntisin osa näyttää venytetyltä.*

korjauksesta. Koska kuvassa nähtävän kaltainen venyminen toistuu säännömukaisesti CRR-alueen reunoilla olevalla kapealla kaistaleella, se johtuu todennäköisesti siitä, miten CRR:n algoritmi käsittelee laskenta-alueen reunoja.

Laatukentän lisäksi CRR sisältää dataflag-kentän, joka kertoo mahdollisista puutteista hilapisteiden datassa. 8-bittinen dataflag-kenttä merkitsee esimerkiksi pikselit, joiden arvoa laskettaessa kaikkea dataa ei ole ollut saatavilla tai on tapahtunut matemaattinen virhe.

Suuri osa dataflag- ja laatuindikaattorien biteistä liittyy edeltävän tunnin kertymän laskemisessa käytettävään dataan, joten kyseiset bitit eivät sisällä tämän tutkielman kannalta relevanttia tietoa. Lisäksi osa molempien kenttien biteistä on peruja vanhoista CRR-versioista, ja ne ovat muuttuneet tarpeettomiksi tuotetta päivitettäessä. CRR:n sisäistä laatua voi kuitenkin arvioida näiden kenttien avulla. Niiden hyödyntämistä tässä tutkielmassa käsitellään luvussa 4.3.

Uusin CRR-versio julkaistiin vuonna 2016. Tässä tutkielmassa käytetään vuoden 2013 versiota, koska se oli Ilmatieteen laitoksella esioperatiivisessa käytössä kevääseen 2018 saakka ja sen tuottamaa dataa on arkistoitu tarkasteluajanjaksolta. Uudempi versio ei kuitenkaan poikkea merkittävästi vuoden 2013 versiosta; muuttunut on lähinnä ulos tulevan datan muoto (Marcos ja Rodríguez, 2016a). Yhdistelmäsadetuote PERC:ssä on määrä käyttää uudempaa versiota. Vuoden 2013 versiosta tässä tutkielmassa saadut tulokset ovat kuitenkin vertailukelpoisia sen kanssa, koska algoritmit eivät ole muuttuneet versioiden välillä.



Kuva 3.5: Tutkakuva sekä kahden ja kolmen muuttujan funktioilla lasketut tunnin kertymät 12.7.2008 klo 13.30 UTC (Kuva: Marcos ja Rodríguez, 2013).

Marcos ja Rodríguez (2013) käyttivät CRR:n tuottamien sateen intensiteetin ja edeltävän tunnin sadekertymän validoinnissa vuodelta 2008 valikoituja 78:aa päivää, joina Espanjan alueella oli konvektiivisia sateita. Vertailudatana käytettiin Espanjan säätutkaverkon tuottamia intensiteettejä ja kertymiä (kuva 3.5). Tarkastelussa keskityttiin vain konvektiivisiin alueisiin. Konvektiivinen alue määriteltiin 15x15 pikselin alueeksi sellaisen pikselin ympärillä, jossa pilven huippu oli tutkakuvien perusteella vähintään 6 kilometrin korkeudella ja sateen intensiteetti vähintään 3 mm/h. Taulukko 1 esittää intensiteeteistä lasketut tilastolliset suuret.<sup>4</sup> Taulukossa 2 ovat laadulliset indikaattorit, jotka saatiin määrittelemällä sateisiksi hilapisteet, joissa sateen intensiteetti on 0,2 mm/h tai enemmän. Lisätietoa laadullisista indikaattoreista on luvussa 4.2.

<sup>4</sup> Marcosin ja Rodríguezin (2013) edeltävän tunnin sadekertymälle tekemän validoinnin tuloksia ei esitellä tässä, koska tässä tutkielmassa käytetyt tunnin kertymät on laskettu itse sateen intensiteeteistä. Siten intensiteeteistä saadut tulokset ovat vertailukelpoisempia.

Taulukko 1: Sateen intensiteetin (CRR) tarkkuus. N on tarkasteltujen tapausten määrä, Mean on keskiarvo, ME on keskivirhe (*mean error*), MAE on absoluuttinen keskivirhe (*mean absolute error*) ja RMSE on keskineliövirheen neliöjuuri (*root mean square error*). (Marcos ja Rodríguez, 2013)

	N	Mean (mm/h)	ME (mm/h)	MAE (mm/h)	RMSE (mm/h)
3V-funktio	846153	0,60	0,47	1,18	2,81
2V-funktio	868860	0,63	0,81	1,55	3,19

Taulukko 2: Laadulliset indikaattorit, sateen intensiteetti. CSI on onnistumisindeksi (*critical success index*), FAR on väärin hälytysten osuus (*false alarm rate*), POD on toteutuneen sadetapausten havaitsemisen todennäköisyys (*probability of detection*), ja PC on oikein havaittujen tapausten osuus kaikista (*percentage of corrects*). (Marcos ja Rodríguez, 2013)

	CSI	FAR	POD	PC
3V-funktio	0,46	0,31	0,58	0,65
2V-funktio	0,38	0,45	0,54	0,55

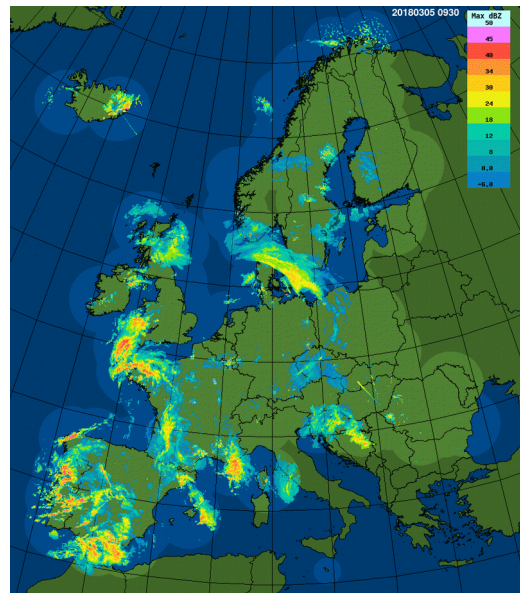
Molemmat taulukot osoittavat päiväsaikaan toimivan kolmen muuttujan funktion tuottavan kahden muuttujan funktiota parempia tuloksia, kuten vähemmän vääriä hälytyksiä (FAR) ja suuremman havaitsemistodennäköisyyden (POD).

Samanlainen, vuoden 2016 versiolle tehty tarkastelu tuotti lähes samanlaiset tilastolliset suureet. Kolmen muuttujan funktion laadullisissa indikaattoreissa tosin oli eroja: CSI 0,48, FAR 0,34 ja POD 0,63 (Marcos, 2016). Tarkastelu tehtiin samoille 78 päivälle kuin yllä, mutta tarkasteltavia tapauksia (N) oli aiemmasta tarkastelusta poikkeava määrä: kolmen muuttujan funktion kohdalla jonkin verran vähemmän, kahden muuttujan funktion kohdalla jonkin verran enemmän. Marcos (2016) ei erittele, miksi näin on.

### 3.2 OPERA-tutkaverkko (EUMETNET)

EUMETNET on Euroopan ilmatieteenlaitosten yhteistoimintaelin, johon kuuluu 31 kansallista ilmatieteenlaitosta. EUMETNET:n verkostoon kuuluu 225 säätutkaa, joista 122 hyödyntää kaksoispolarisaatiotekniikkaa (heinäkuussa 2018). Verkoston tutkista 31 toimii S-alueella (~3 GHz), 178 C-alueella (~6 GHz) ja 16 X-alueella (~10 GHz).

EUMETNET:n OPERA-ohjelman (*Operational Programme for the Exchange of Weather Radar Information*) tarkoitus on kerätä ja yhdistää eurooppalaista säätutkadataa sekä säätutkatoimintaan liittyvää taitotietoa. OPERA:n alla toimiva datakeskus Odyssey kerää dataa runsaan 20 jäsenmaan noin 150 tutkasta – määrä vaihtelee riippuen siitä, minkä tutkien data on kulloinkin saatavilla – ja tuottaa yhdistelmän Euroopan sadetilanteesta (kuva 3.6). Huomionarvoinen yhdistelmä-tuotteen käytettävyyttä rajoittava tekijä on, että esimerkiksi Italia ja osa Balkanin maista eivät ole mukana OPERA-ohjelmassa (Saltikoff ym., 2017).



Kuva 3.6: OPERA-yhdistelmätuote, tutkavaste (dBZ) 5.3.2018 klo 9.30 UTC (kuva: EUMETNET).

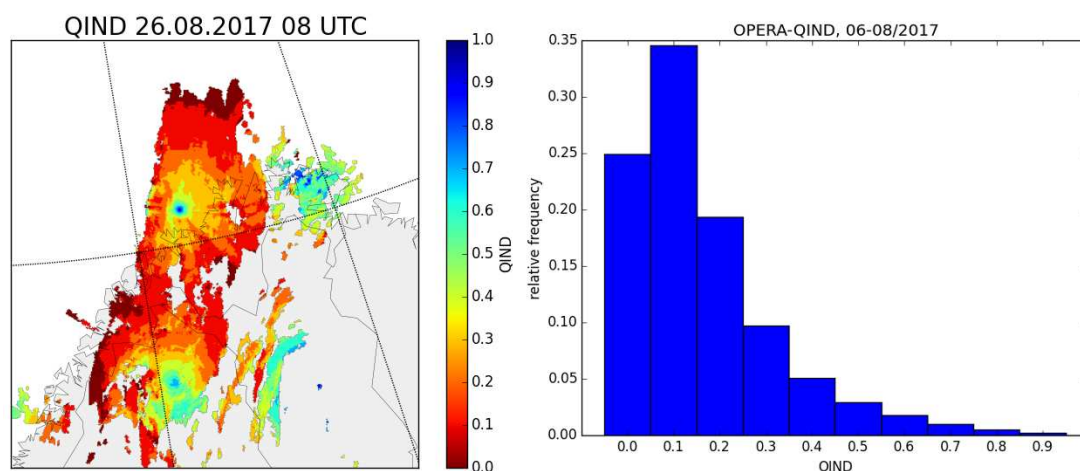
Suurimmassa osassa OPERA-tutkaverkkoa lähin tutka on alle 100 kilometrin etäisyydellä (esimerkiksi Suomessa etäisyydet voivat paikoin olla suurempia; Ilmatieteen laitoksella on Suomessa kymmenen operatiivista säätutkaa). Näillä alueilla matalimmalla korkeuskulmalla lähetetty tutkasignaali kulkee verrattain lähellä maanpintaa, jolloin tutkavaste edustaa hyvin maanpinnan tilannetta (Huuskonen ym., 2014).

Kaksiulotteinen OPERA-yhdistelmätuote sisältää kolme lopputuotetta: sateen hetkellisen intensiteetin, edeltävän tunnin sadekertymän ja tutkavasteen maksimiarvon niistä hilapisteistä, joihin useamman kuin yhden tutkan peittoalue yltää. Yhdistelmä tuotetaan 15 minuutin välein, ja sen horisontaalinen resoluutio on 2x2 kilometriä.

OPERA-sadetuotteissa käytetään Peuran (2002) algoritmeihin pohjautuvaa bRopomoduaalia, jonka sisältämät suodattimet tunnistavat ja poistavat kuvista häiriökaikuja, radioaaltojen luomaa interferenssiä sekä laivoja ja lentokoneita (Scovell ym., 2013). Lisäksi OPERA-tutkayhdistelmässä korjataan signaalin vaimenemista, joka aiheutuu



signaalin tiellä olevista esteistä kuten rakennuksista ja vuorista (*beam blockage*), sekä hyödynnetään NWCSAF:n satelliittipohjaista sadepilventunnistustuote PC:tä (*Precipitating Clouds*, Marcos ja Rodríguez, 2016b). OPERA-tuote valitsee näiden kolmen komponentin tuottamista laatuindekseistä alhaisimman ja yhdistää sen yksinkertaiseen laatu funktioon, joka perustuu hilapisteen etäisyyteen lähimmästä tutkasta ja tutkasignaalin korkeuteen hilapisteessä. Näin saadaan tutkakomposiitin laatuindeksi (*composite quality index*, QIND), joka on määritelty erikseen kullekin hilapisteelle, jossa havaitaan sadetta (kuva 3.7). Laatuindeksin arvo on nollan ja yhden välissä.



Kuva 3.7: Laatuindeksi QIND:n arvo pienenee, kun etäisyys tutkaan kasvaa (vas.). Tarkastelujaksolla (kesä–elokuu 2017) QIND:n arvo oli korkeintaan 0,1 lähes 60 prosentissa hilapisteistä, joissa OPERA-tutkayhdistelmä havaitsi sadetta.

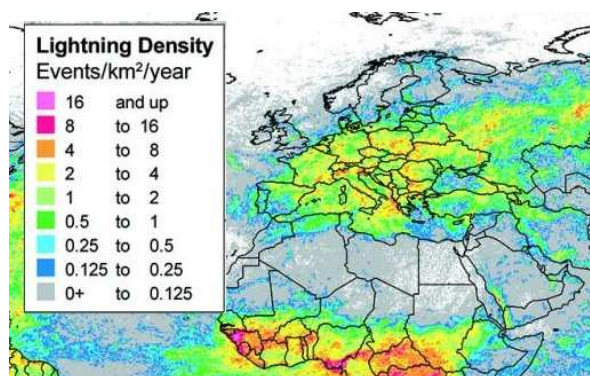
Kuten kuva 3.7 näyttää, QIND:n arvo pienenee nopeasti, kun etäisyys tutkaan kasvaa. Tämän tutkielman kolmikuukautisella tarkastelujaksolla QIND:n arvo oli 0,0 tai 0,1 lähes 60 prosentissa niistä hilapisteistä, joissa OPERA-tutkatuote havaitsi sadetta. Kuvassa 3.7 QIND näyttää putoavan 0,2:een noin 70 kilometrin päässä kahden näkyvän kuvion keskellä olevista tutkista.

OPERA-tuotteissa ei hyödynnetä keskitetysti kaksoispolarisaatiotekniikkaa, joskin joidenkin maiden ilmatieteenlaitosten lähettämä data saattaa sisältää sen avulla tuotettua tietoa (Saltikoff, 2018). Käytännössä OPERA-yhdistelmään jääkin häiriökaikuja esimerkiksi maan pinnan kohteista, langattomista verkoista, tuulivoimaloista sekä lintu- ja hyönteisparvista.



### 3.3 GLD360-salamanpaikannusverkosto (Vaisala)

GLD360 (*Global Lighting Dataset*, kuva 3.8) on Vaisalan luoma ja ylläpitämä, vuonna 2009 käyttöön otettu salamatietopalvelu. Tuote perustuu maailmanlaajuiseen maasalamoita paikantavaan sensori-verkostoon. Verkostoon kuuluvat maanpinnalle asennetut sensorit toimivat radiotaajuuksilla ja havaitsevat salamoita enintään 6 000 kilometrin etäisyydeltä. Ne paikantavat maasalamat muutaman kilometrin tarkkuudella. Sensorien sijainnit ovat salaisia. (Pohjola ja Mäkelä, 2013)



Kuva 3.8: Esimerkkikuva GLD360-tuotteesta (kuva: Vaisala).

Salamanpaikannusjärjestelmien absoluuttista suorituskykyä on Pohjolan ja Mäkelän (2013) mukaan käytännössä mahdotonta selvittää, koska ”totuuden” kertovia havaintoja maahan iskeneistä salamoista ei ole saatavilla. Vertaamalla eri salamanpaikannusjärjestelmien tuottamia tuloksia voidaan heidän mukaansa kuitenkin saada suuntaa antavaa tietoa eri järjestelmien kyvystä. GLD360-verkosto havaitsee maasalamoita vaihtelevalla prosentilla riippuen tutkittavasta alueesta, mutta Vaisalan aiemmin ilmoittamaa 70 prosentin havaitsemistarkkuutta kaikista maasalamoista voidaan Pohjolan ja Mäkelän (2013) mukaan pitää Euroopassa hyvänä arviona<sup>5</sup>.

Vaisala myy GLD360-tuotetta esimerkiksi meteorologien, lentokenttien sekä energiantuotantolaitosten ja energian siirtoon liittyvän infrastruktuurin käyttöön. GLD360-dataa on arkistoituna Ilmatieteen laitoksella tammikuusta 2015 alkaen. Arkistoitu data sisältää tiedot yksittäisten maasalamaniskujen tapahtumahetkestä ja sijainnista, ja arkisto päivittyy lähes reaaliajassa. Vuosina 2016–2017 toteutetussa ERICHA-projektissa (*Integrating a European Rainfall-Induced Hazard Assessment system*, [www.ericcha.eu](http://www.ericcha.eu)), jossa Ilmatieteen laitos oli mukana, GLD360-havainnoista laskettuja sadekenttiä käytettiin täydentämään OPERA-tutkasadekenttiä. Tässä tutkielmassa käytetään samaa menetelmää, ja se esitellään luvussa 4.1.

<sup>5</sup> Myöhemmin Vaisala on arvioinut järjestelmän havaitsevan noin 80 prosenttia kaikista maasalamoista (Vaisala, 2018).

### 3.4 Vertailudata (Katalonian teknillinen yliopisto)

Vertailudatana käytetään Euroopan laajuisen SYNOP-sademittariverkoston avulla korjattua OPERA-dataa, jonka toimittaa Katalonian teknillinen yliopisto (UPC). Park ym. (2017) korjasivat OPERA-tutkadataa hilapisteittäin laskemallaan, päivittäin muuttuvalla korjauskertoimella, joka perustui edeltävien 30 päivän sadekertymiin. SYNOP-asemasta riippuen sademittarit mittasivat yhden, kolmen, kuuden, 12:n tai 24 tunnin kertymiä. Korjauskerrointa laskettaessa otettiin huomioon 160 kilometrin säteellä hilapisteestä sijaitsevat sademittarit niiden etäisyyden avulla painotettuna. Sademittareita tuli olla määrättyllä alueella vähintään kuusi. Korjauskertoimen avulla tutkatuotteen systemaattinen virhe pieneni noin 3–4 dB:stä noin 1–2 dB:hen.

Tässä tutkielmassa käytetyssä vertailudatassa korjauskerroin on laskettu kullekin päivälle samalla menetelmällä, mutta edeltävien 30 päivän sijaan on käytetty seitsemää edeltävää sateista päivää (Park, 2018). Jos edeltävien 180 päivän aikana jonkin sademittarin kohdalla ei satanut seitsemänä päivänä, kyseistä sademittaria ei käytetty korjauskertoimen laskemiseen. Samoin laskelmista puuttuvat sademittarit, joiden kohdalla OPERA-yhdistelmässä on maakaikuja.

Tämä vertailutuote valittiin, koska esimerkiksi usein käytetty SYNOP-sademittariverkosto on ainoaksi vertailukohteeksi liian harva ja sen avulla saavutettava aikaresoluutio liian huono lyhytaikaisten, paikallisten konvektiivisten sadetapahtumien tarkasteluun. Lisäksi haluttiin verrata tutka- ja satelliittipohjaisia menetelmiä toisiinsa, koska niiden keskinäiset erot on tunnettava PERC:tä kehitettäessä.

Valmis vertailudata saadaan UPC:n palvelimelta. Se sisältää sademittarisovitetut 15 minuutin sadekertymät koko OPERA-alueelta.

## **4. MENETELMÄT**

### 4.1 Ohjelmakoodit ja prosessi yleisesti

Tässä tutkielmassa hyödynnetään Ilmatieteen laitoksella luotua python-ohjelmakoodipakettia, jonka on laatinut FT Seppo Pulkkinen. Näiden koodien avulla luodaan aluksi salamasadetuote, jota varten haetaan tarvittava OPERA- ja GLD360-data koko tarkastelujaksolle Ilmatieteen laitoksen arkistosta.

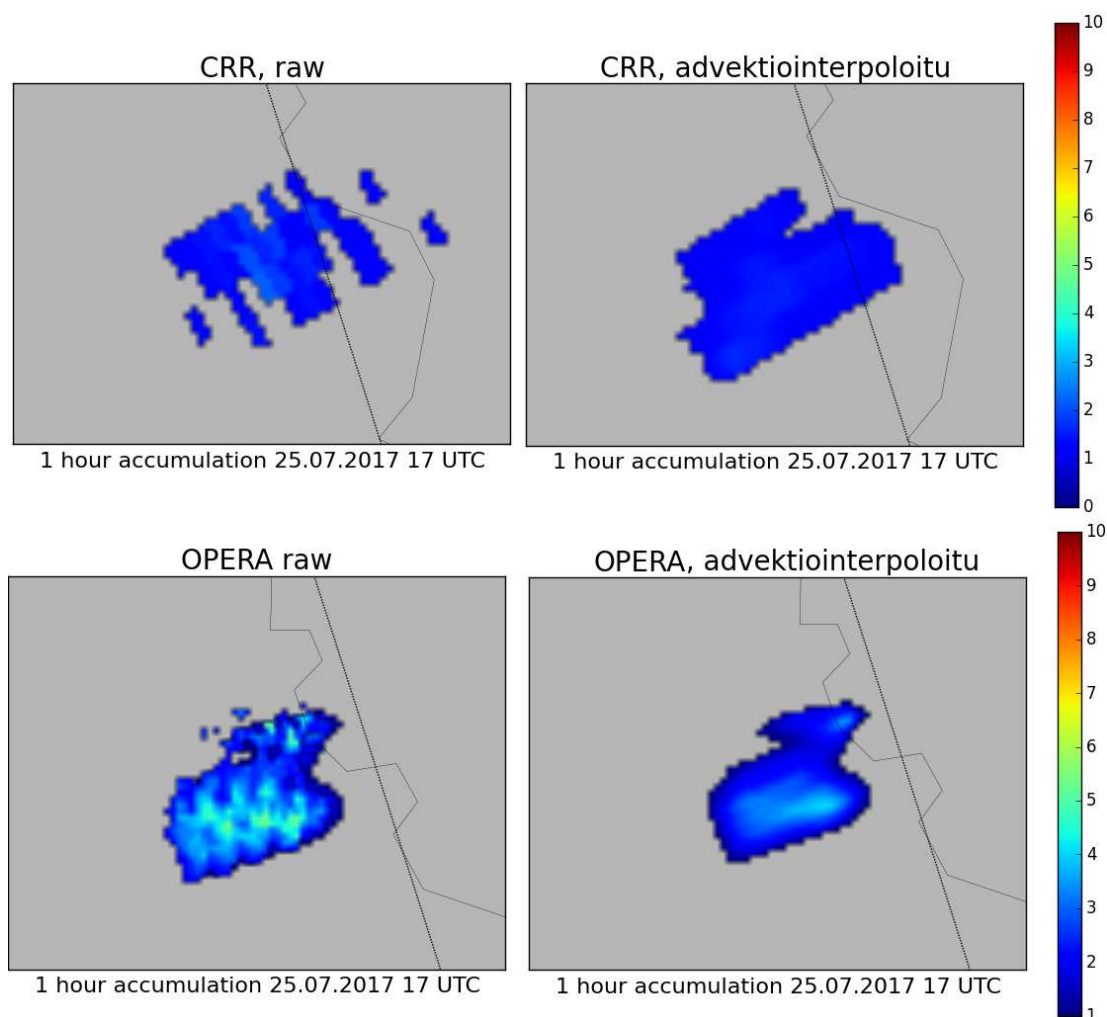
Salamasademääriä laskiessaan koodit yhdistävät OPERA-datan ja GLD360-havainnot toisiinsa PMM-menetelmällä (*probability matching method*, Calheiros ja Zawadzki, 1987). PMM-menetelmä perustuu ajatukseen kahdesta satunnaisuuttujasta, jotka kuvaavat samaa ilmiötä. Tässä tapauksessa muuttujat ovat OPERA-tutkaverkon havainnoima sateen intensiteetti ja salamahavainnoista laskettu paikallinen salamatiheys. PMM-teoria olettaa tällaisten muuttujien tiheysfunktioiden olevan samanmuotoiset, ja siten tiettyä yhden muuttujan arvoa vastaa tietty toisen muuttujan arvo. Lasketut salamatiheydet voidaan näin ollen muuttaa arvioiduiksi paikallisiksi sademääriksi, jos tunnetaan molempien tiheysfunktiot riittävän pitkältä ajalta. Tässä tutkielmassa käytetään tiheysfunktioiden määrittämiseksi dataa yhteensä 18 kuukaudelta (touko–lokakuut 2015–2017).

Aluksi salamatiiedoista lasketaan OPERA-hilaan sovitettua salamatiheydet (käytetään 1 minuutin aikaresoluutiota), minkä jälkeen salamatiheyksistä tehdään histogrammi. Salamatiheyshistogrammista estimoitua kumulatiivista kertymäfunktiota verrataan samalta ajanjaksolta OPERA-tutkasademäärähistogrammista arvioituun kertymäfunktioon. Näin saadaan vertailutaulukko, jonka avulla kukin salamatiheys muutetaan vastaavaksi sademääräksi. Sadekentistä lasketaan tasatunneittain koko OPERA-alueen kattava hilapistekohtainen 60 minuutin sadekertymä, jota käytetään vertailtaessa sadetuotteita toisiinsa.

OPERA- ja CRR-tuotteet sisältävät valmiina paitsi sateen intensiteetin myös edeltävän tunnin sadekertymän. Näitä valmiiksi laskettuja kertymiä ei kuitenkaan tässä tutkielmassa käytetä, koska ne on laskettu 15 minuutin välein tehdyistä sateen intensiteetin mittauksista edeltävän tunnin ajalta. 15 minuutin aikaväli on liian harva edustavien kertymien laskemiseksi; kuvasta 4.1 nähdään, että näin laskettuihin kertymiin syntyy epäfysikaalisia ”kalanruotomaisia” kuvioita. Sekä OPERA- että CRR-dataa on interpoloitava ajassa, jotta sadekertymät saataisiin edustavammiksi.

Interpolointi tehdään advektiointerpoloationa: sadealueen oletetaan liikkuvan vakionopeudella kahden tutkahavainnon välillä ja sateen intensiteetin muuttuvan lineaarisesti aiemman havainnon arvosta myöhemmän havainnon arvoon (esim. Nielsen ym., 2014). Todellisuudessa sateen intensiteetin ja sadealueen koon vaihtelut eivät noudata näin yksinkertaista kaavaa, mikä vääristää tuloksia. Kuitenkin Nielsen

ym. (2014) saivat tunnin sadekertymistä tarkempia tuloksia käyttämällä advektio-interpolaatiota kuin alkuperäistä tutkadataansa, jonka aikaresoluutio oli 10 minuuttia.



*Kuva 4.1: Edeltävän tunnin sadekertymä alkuperäisestä CRR-tiedostosta (ylh. vas.), yhden minuutin aikaresoluutioon interpoloiduista CRR-intensiteeteistä laskettuna (ylh. oik.), suoraan OPERA-tuotteesta (alh. vas.) ja aikainterpoloidusta OPERA-tuotteesta. 15 minuutin välein mitatuista intensiteeteistä lasketuissa kertymissä nähdään epäfysikaalisia kuvioita, joita 1 minuutin aikaresoluutioon interpoloiduista intensiteeteistä lasketuissa kertymissä ei ole.*

Muokkasin OPERA-datan käsittelyyn tarkoitettuista advektiointerpolaatio- ja kertymänlaskukoodista versiot, jotka soveltuvat CRR-datan käsittelyyn. OPERA- ja CRR-intensiteetit interpoloidaan näiden koodien avulla yhden minuutin resoluutioon. Kuten kuvasta 4.1 nähdään, yhden minuutin aikaresoluutioon interpoloiduista intensiteeteistä lasketut kertymäsadekentät näyttävät sileiltä<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> On epäselvää, esittävätkö kuvan 4.1 CRR- ja OPERA-kuvat samaa sadealuetta, sillä CRR-kuvassa se sijaitsee runsaat 50 km etelämmässä kuin OPERA-kuvassa. Kuvat ovat Suomen itärajalta Kainuusta. CRR:n suoriutumista näin pohjoisessa käsitellään lyhyesti luvussa 5.3.5.

Vertailudatan 15 minuutin kertymät yhdistetään vertailua varten 60 minuutin kertymiksi. Tässä tapauksessa kyseessä on pelkkä yhteenlasku koodilla, jonka muokkasin alkuperäisestä kertymänlaskukoodista, sillä vertailudatan 15 minuutin kertymät perustuvat sademittareihin; tunnin kertymien laskemiseen niistä ei liity samanlaista ongelmaa kuin kertymien laskemiseen intensiteeteistä, joiden aika-resoluutio on 15 minuuttia.

Vertailut tehdään OPERA-hilassa (kuva 1.5). OPERA-hila koostuu 1900 x 2200 pikselistä, ja se käyttää Lambertin oikeapintaista tasoprojektiota (*Lambert equal area projection*). CRR-data on sovitettava OPERA-hilaan alkuperäisestä hilastaan (1024 x 384 pikseliä, geostationäärinen projektio). Hilan muunnos ja siihen liittyvät muut laskutoimitukset tehdään alun perin Panu Lahtisen (Ilmatieteen laitos) kirjoittamalla python-koodilla, jota mukautin siten, että se käsittelee yhden tiedoston sijasta kerralla koko annetun, ajanhetken mukaan lajitellun aineiston.

Koska OPERA-hilassa hilapisteet ovat tiheämmässä kuin alkuperäisessä CRR-datassa, CRR-dataa on interpoloitava myös tilassa. Tämä tehdään yllä mainitulla koodilla käyttäen *nearest neighbour* -interpolointia: tarkasteltavan hilapisteen ympäristöstä etsitään datapisteitä, ja hilapisteelle annetaan lähimmän datapisteen CRR-arvo. Lähintä datapistettä etsitään 50 kilometrin säteellä.

OPERA- ja CRR-alueet eivät vastaa toisiaan maantieteellisesti, vaan CRR-alue kattaa vain noin leveyspiirin 46 °N pohjoispuolisen Euroopan. OPERA-hilaan sovitetussa CRR-datassa hilan eteläosa ja kapea läntinen kaistale jäävät tyhjäksi. Tämä näkyy hyvin kuvassa 3.1, jossa muut lähteet havaitsevat sateita etelämmässä kuin CRR.

Kun 60 minuutin sadekertymät on laskettu kullekin tuotteelle ja kaikki ovat samassa hilassa, sadekertymiä voidaan verrata keskenään. Vertailut tehdään laatimallani python-koodilla, jolle annetaan vertailtavaksi haluttu tuote (OPERA, GLD360 tai CRR), tarkastelujakso, tarkasteltavien sadekertymien kynnysarvo (lähtökohtaisesti 1 mm/h) ja muita parametreja, jotka muovaavat vertailun yksityiskohtia. Ohjelma listaa ja lukee Ilmatieteen laitoksen palvelimelle tallennetut kertymätiedostot tavalla, joka on suurilta osin lainattu Seppo Pulkkisen menetelmästä käsitellä ajanhetken mukaan arkistoituja tiedostoja.

Tutkielmassa käytettyjen koodien prosessikaavio on liitteessä 1.

#### 4.2 Tutkittavat suureet

Sadekertymää verrataan toisiinsa käyttämällä suuretta

$$F = 10 \cdot \log_{10}(G/R) \quad , \quad (5)$$

joka on normaalijakautunut. Tässä  $R$  on vertailutuote (tutka+sademittarit) ja  $G$  se tuote, jota vertailutuotteeseen kulloinkin verrataan, eli CRR, OPERA tai GLD360.  $F$  lasketaan joka aika-askelilla jokaiselle hilapisteelle, jossa sekä  $R$ :n että  $G$ :n arvot ylittävät sadekertymälle määrätyn kynnsarvon.

Histogrammi, jossa x-akselilla ovat  $F$ :n arvot ja y-akselilla niiden suhteellinen frekvenssi, on sitä kapeampi, mitä tarkemmin tarkasteltavan tuotteen antamat sadekertymät osuvat yksiin vertailutuotteen kanssa eli mitä pienempi hajonta tuloksissa on. Lisäksi histogrammi paljastaa mahdollisen systemaattisen virheen (*bias*) eli tarkasteltavan tuotteen taipumuksen tuottaa liian pieniä tai liian suuria arvoja vertailutuotteeseen nähden. Tämä ilmenee siten, että histogrammin huippu on jommallakummalla puolella nollaa. Ideaalitalanteessa  $F$ :n arvot siis kerääntyvät nollan molemmille puolille mahdollisimman kapeaksi pyramidiksi.

Vertailussa käytetään apuna  $F$ -suureen mediaania, joka kertoo suuntaa antavasti histogrammin huipun sijainnista. Lisäksi käytetään keskihajontaa:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - F_\mu)^2} \quad , \quad (6)$$

missä  $F_\mu$  on  $F$ :n keskiarvo ajanhetkellä, jonka hajontaa lasketaan. Vertailun lopuksi hajonta lasketaan joka aika-askelen hajontojen keskiarvona. Samoin tehdään mediaanin osalta.

Suorituksen arviointiin käytetään myös sadetapausten luokitteluun perustuvia onnistumisindeksejä, kuten CSI:tä (*Critical Success Index*; Schaefer, 1990). CSI:n

laskemista varten sadetapaukset ja tutkittavan tuotteen tekemät havainnot jaetaan taulukon 3 mukaisesti neljään luokkaan. Jos tarkasteltavan pikselin alueella satoi edeltävän tunnin aikana ja tutkittava sadetuote havaitsi tämän, kyseessä on osuma ( $H$ , *hit*). Jos sadetuote ei havainnut toteutunutta sadetta, tapaus merkitään hudiksi ( $M$ , *miss*). Jos taas tutkittava tuote havaitsee sadetta, vaikka sitä ei vertailusadetuotteen mukaan ollut, merkitään väärä hälytys ( $F$ , *false alarm*). Neljäs luokka on tapauksille, joissa sadetta ei esiintynyt eikä sitä havaittu.

Taulukko 3: aineiston jakaminen luokkiin CSI:n ja muiden indeksien laskemiseksi.

	havaitaan	ei havaita
sataa	$H$	$M$
ei sada	$F$	$N$

CSI tietyltä alueelta ja tietyltä ajanjaksolta lasketaan vertaamalla osumien määrää kaikkien sadetapausten ja havaintojen määrään:

$$CSI = \frac{H}{H+M+F} \quad (7)$$

FAR (*false alarm rate*) taas on väärin hälytysten määrän osuus kaikista havainnoista:

$$FAR = \frac{F}{H+F} \quad (8)$$

POD (*probability of detection*) kuvaa sitä, kuinka suuren osan kaikista sadetapauksista tutkittava sadetuote havaitsi:

$$POD = \frac{H}{H+M} \quad (9)$$

Vertausohjelma laskee joka aika-askelelta osumat, hudit ja väärät hälytykset ja laskee ne suureittain yhteen koko tarkastelujaksolta. Vertailuajon päätteeksi ohjelma laskee näistä kertymistä CSI:n, FAR:n ja POD:n sekä piirtää histogrammin, jossa on taulukoituna tilastolliset luvut. Histogrammin sisältö tallentuu erilliseen tiedostoon.

### 4.3 Jaottelu laadun mukaan ja korjausmaskit

Vertailussa hyödynnetään lisäksi OPERA-yhdistelmän laatuindeksiä (QIND, *quality index*). Se on saatavilla 15 minuutin aikaresoluutiolla alkuperäisistä OPERA-tiedostoista. Käsiteltäessä edeltävän tunnin sadekertymä QIND:n arvoksi valitaan kyseisen tunnin arvoista huonoin, jotta lasketun OPERA-kertymän laatua ei ainakaan yliarvioitaisi. OPERA-tuotteen vertailutuloksia voidaan näin jaotella sen mukaan, kuinka hyvälaatuiseksi tuote on ilmoitettu kussakin hilapisteessä, jossa se havaitsee sadetta.

CRR:n suorituskykyä tarkasteltaessa käytetään hyväksi CRR:n laatu- ja dataflag-kenttiä. Vertailukoodiin voi syöttää korjausmaskeja, jotka poistavat CRR-tuloksista hilapisteitä, joiden datassa on puutteita. Laatukentästä poimitaan tieto siitä, missä hilapisteissä on käytetty näkyvän valon kanavaa. Lisäksi laatukentän avulla erotellaan CRR-alueen reunakaistaleella havaitut sateet. Dataflag-kentästä taas haetaan tieto hilapisteistä, joissa on täytetty parallaksikorjauksen jättämiä aukkoja tai joissa kaikki tarvittavien kanavien tuottama data ei jostain syystä ole saatavilla.

Taulukko 4 esittää menetelmät, joilla mainitut hilapisteet löydetään. Esimerkiksi parallaksikorjauksen jäljiltä täytetty aukko voi saada kaksi eri dataflag-arvoa, koska toisessa aukkoa edustavan bitin arvoon (16) on lisätty CRR:n kertymien laskemiseen liittyvää, tämän tutkielman kannalta epärelevanttia tietoa (128). Reuna-alueiden sateiden laatukentän arvoista toinen edustaa yötä (43) ja toinen päivää (107), jolloin näkyvän valon kanava on käytössä.

Taulukko 4: Virhelähteiden ja erikoistapausten poimiminen CRR:n laatu- ja dataflag-kentistä.

	laatukenttä	dataflag-kenttä
parallaksikorjauksen jättämä aukko		16, 144
reuna-alueen sade	43, 107	
tarvittavaa dataa puuttuu		pariton
näkyvä valo käytössä	$\geq 64$	
matemaattinen virhe		useita arvoja



Matemaattisia virheitä sisältävät hilapisteet voidaan niin ikään suodattaa, mutta koska niitä edustaa dataflag-luvun kolmas bitti (arvo 4), suodatettavia arvoja on peräti 64 kappaletta. Lisäämällä ne vertailuohjelmaan saatiin kuitenkin selville, että tutkittavassa aineistossa ei ollut yhtäkään tällaista hilapistettä.

#### 4.4 Piirto-ohjelma

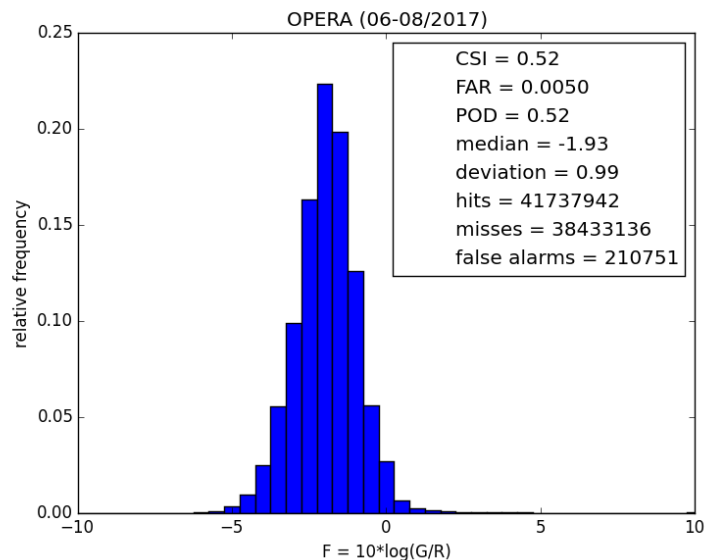
Helpottamaan tulosten visualisointia ja esimerkkien antamista laadin python-koodin, joka piirtää OPERA-hilaan OPERA-peittoalueen ja halutun sadetuotteen tuottaman, kynnyksarvon ylittävän tunnin sadekertymän, CRR:n laatu- tai dataflag-kentän tai OPERA:n laatu-kentän. Tämän piirtokoodin avulla voidaan myös tarkastella osumien, hutien ja väärin hälytysten sijaintia yksittäisellä ajanhetkellä. Koodin toiminta perustuu työkalukirjasto Matplotlibin Basemap-karttapakettiin.

### **5. TULOKSET**

Tässä luvussa käsitellään vertailtavien tuotteiden tulokset suhteessa vertailudataan, sademittarisovitetuun OPERA-tutkadataan. OPERA-tutkayhdistelmän ja GLD360-salamasadetuotteen tulokset esitellään lyhyesti alaluvuissa 5.1 ja 5.2, ja alaluvussa 5.3 on mittavampi selvitys satelliittisadetuote CRR:n tuloksista eri suodattimien mukaan jaoteltuna.

#### 5.1 OPERA

Kuva 5.1 esittää OPERA-tutkayhdistelmän vertailuhistogrammin ja tilastolliset suuret tarkasteluajalta (kesä–elokuu 2017). Noin 2 dB:n suuruinen systemaattinen virhe on selvästi havaittavissa histogrammista; OPERA-tuote aliarvioi sadekertymiä noin 2 dB:n verran suhteessa vertailutuotteeseen – toisin sanoen sademittarisovitus kasvattaa havaittuja sademääriä. Tulos on odotettu, sillä se on linjassa Parkin ym. (2017) tulosten kanssa.

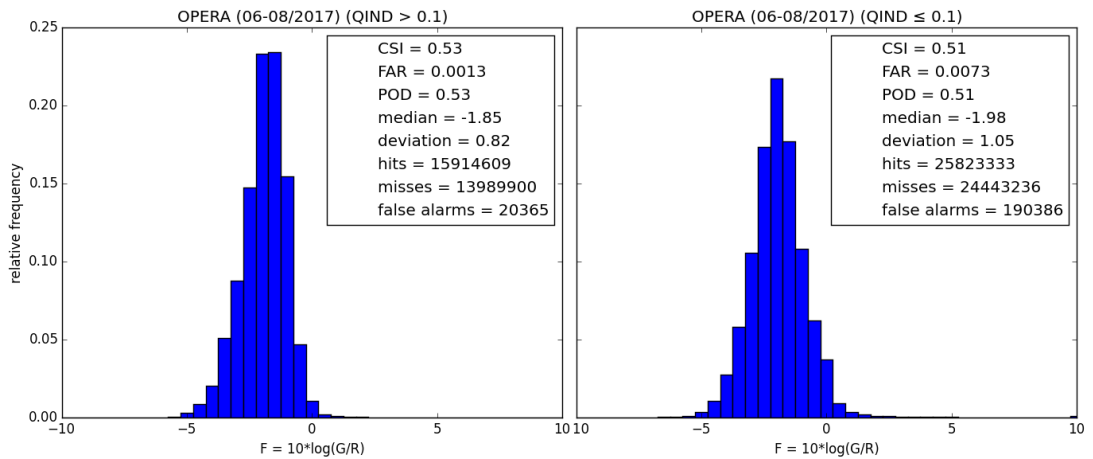


*Kuva 5.1: OPERA-tutkayhdistelmän vertailun tulokset kesä–elokuulta 2017. G merkitsee OPERA-tuotetta ja R vertailutuotetta.*

OPERA:n laatuindeksi QIND:n mukaan jaotellut OPERA-histogrammit ovat kuvassa 5.2. Vasemmalla ovat tulokset hilapisteistä, joissa indeksin arvo<sup>7</sup> on suurempi kuin 0,1, ja oikealla ovat tapaukset, joissa QIND on 0,0 tai 0,1. Tämä on luonteva jako, sillä kun etäisyys tutkaan kasvaa, QIND pienenee niin nopeasti, että tarkastelujaksolla sen arvo oli korkeintaan 0,1 lähes 60 prosentissa hilapisteistä, jotka merkittiin osumiksi (kuva 3.7).

OPERA:n suorituskyky pysyy hyvin samanlaatuisena laatuindeksin arvosta riippumatta, mikä onkin odotettavissa, koska vertailutuote on käytännössä sama tuote. Pienemmän laatuindeksin tapauksissa OPERA poikkeaa vertailudatasta hiukan enemmän (mediaani -1,98 vs. -1,85 dB) ja keskihajonta on suurempi (1,05 vs. 0,82). CSI (0,51 vs. 0,53) ja POD (0,51 vs. 0,53) huononevat hieman, kun QIND on pienempi. Näitä tuloksia voi pitää odotetun suuntaisina, vaikkakin erot ovat pieniä.

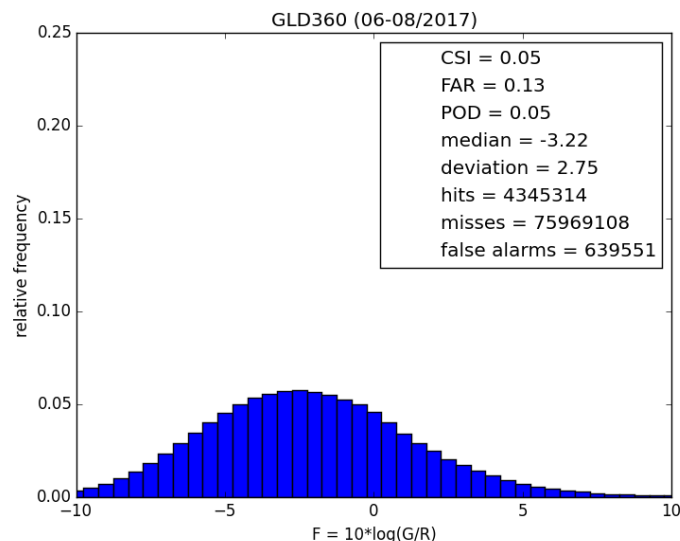
<sup>7</sup> QIND:n mahdolliset arvot ovat 0,0, 0,1, ..., 1,0.



Kuva 5.2: OPERA:n laatuindeksin mukaan jaetut histogrammit tilastollisine lukuineen.

## 5.2 GLD360

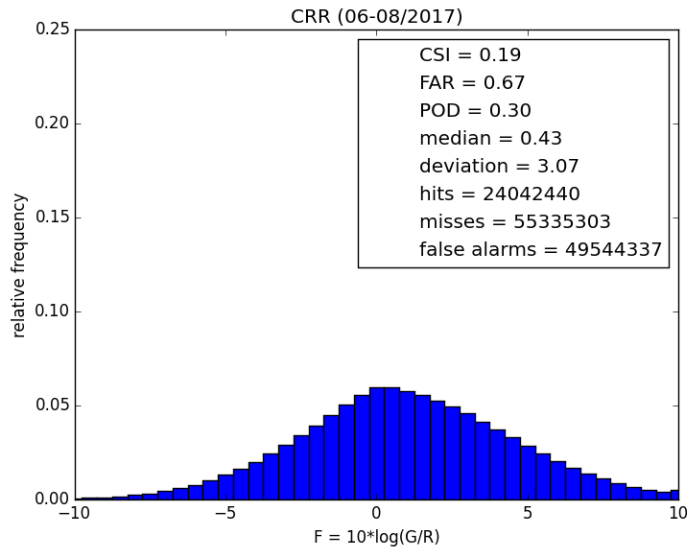
GLD360-salamosateista laskettu vertailuhistogrammi on esitetty kuvassa 5.3. Kuvasta nähdään runsaan 3 dB:n systemaattinen aliarviointi, joka selittyy sillä, että salamosateiden intensiteetit on johdettu OPERA-tutkasateista PMM-menetelmällä – tosin virhe on selvästi suurempi kuin OPERA-yhdistelmän tapauksessa. POD:n arvo 0,05 kertoo, että pelkkien salamatietojen avulla konvektiivisista sadetilanteista havaitaan erittäin vähäinen määrä. Toisaalta äärien hälytystenkin määrä on pieni (FAR 0,13).



Kuva 5.3: GLD360-salamatiedoista laskettujen sateiden vertailuhistogrammi. Alhainen POD kertoo, että 95 prosenttia sadetapauksista jää havaitsematta.

### 5.3 CRR

Tässä luvussa esitellään CRR:n vertailutulokset ensin koko aineistosta ja alaluvuissa eri suodattimien avulla jaoteltuna.



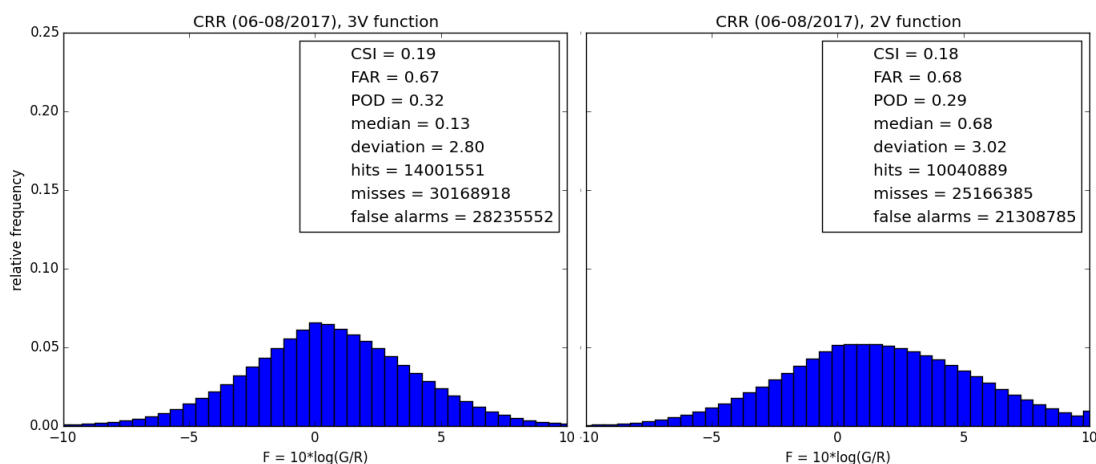
*Kuva 5.4: CRR:n vertailuhistogrammi tarkastelu-  
jaksolta kesä–elokuu 2017. Vertailusuureessa G  
merkitsee CRR:ää ja R vertailutuotetta.*

Kuva 5.4 esittää histogrammin ja tilastolliset luvut CRR:n vertailusta OPERA+sademittarit-tuotteen kanssa. Histogrammi on selvästi matalampi ja leveämpi kuin OPERA:n vastaava histogrammi, eli hajonta on CRR:n tapauksessa paljon suurempaa – CRR:llä 3,07 ja OPERA:lla 0,99. Tämä onkin selvää, koska OPERA:n tapauksessa suurelta osin verrataan tutkayhdistelmätuotetta itseensä. Toisaalta CRR-histogrammin huippu on melko lähellä nollaa (mediaani 0,43), kun taas OPERA:n tuloksissa havaittiin –2 dB:n systemaattinen virhe. Päin vastoin kuin OPERA, CRR näyttää hieman yliarvioivan sademääriä.

CSI:n arvo 0,19 on huomattavasti huonompi kuin OPERA:n 0,52. Värien hälytysten suhteellista määrää mittaava FAR taas on hyvin suuri, 0,67; kaksi kolmasosaa kynnysarvon ylittävistä sadekertymistä, jotka CRR havaitsee OPERA-peittoalueella, on siis sellaisia, joita vertailutuote ei havaitse.

### 5.3.1 Näkyvän valon mukaan

Kuva 5.5 näyttää CRR:n vertailuhistogrammit jaoteltuna sen mukaan, oliko SEVIRI-instrumentin näkyvän valon kanava käytössä vai ei. Vasemmalla nähdään tulokset tapauksista, joissa päivänvalo oli saatavilla (kolmen muuttujan funktio), ja oikealla tapauksista, joissa näkyvän valon kanavaa ei voitu käyttää (kahden muuttujan funktio). Havaitaan, että kaikkia kolmea kanavaa hyödyntävän funktion tuottama CSI on niukasti parempi kuin vain kahta kanavaa hyödyntävän (0,19 vs. 0,18). Toteutuneiden sadetapausten havaitsemisesta kertova luku POD on kolmen muuttujan tapauksessa niin ikään suurempi (0,32 vs. 0,29).



Kuva 5.5: CRR:n vertailuhistogrammit tapauksista, joissa näkyvän valon kanava oli käytössä (vas.) ja joissa se ei ollut käytössä (oik.).

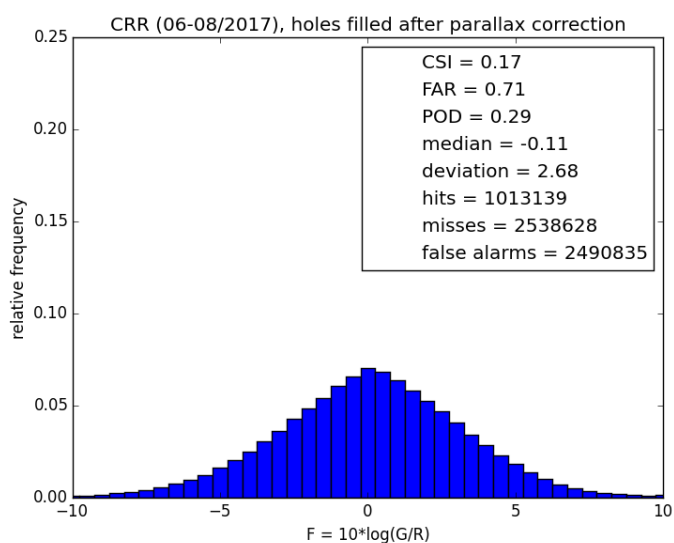
Kahden muuttujan funktio yliarvioi havaittuja sadekertymiä selvästi enemmän (mediaani 0,68) kuin kolmen muuttujan funktio (0,13). Kahden muuttujan funktion tuloksissa on myös hieman enemmän hajontaa (3,02 vs. 2,80). Erikseen tarkasteltuina molemmat funktiot tuottavat hieman pienemmän hajonnan kuin niiden yhdistelmä eli kuvassa 5.4 esitetty koko CRR (3,07). Tämä näyttää johtuvan siitä, että 3V- ja 2V-funktioiden vertailuhistogrammien huiput osuvat toisistaan poikkeaviin paikkoihin.

Näitä tuloksia tarkasteltaessa on hyvä huomata, että kyse ei ole saman aineiston tarkastelusta kahden eri funktion avulla, vaan eri funktiot käsittelevät eri tapauksia. Näkyvän valon kanavaa hyödyntäviä tapauksia on selvästi enemmän kuin niitä, joissa näkyvää valoa ei käytetä (n. 72 miljoonaa vs. n. 42 miljoonaa), koska päivänvalo on kesällä saatavilla suurimman osan ajasta ainakin joissain osissa CRR:n kattamaa

aluetta. Näiden tulosten valossa voidaan todeta, että tarkastelujaksolla CRR tuotti parempia tuloksia päivällä kuin yöllä.

### 5.3.2 Parallaksikorjauksen jättämät aukot

Kuvassa 5.6 on vertailuhistogrammi hilapisteistä, joihin parallaksikorjaus on jättänyt aukon ja joiden sadekertymän CRR on siksi laskenut käyttämällä ympäröivien 3x3 hilapisteen mediaania<sup>8</sup>. Tällaiset hilapistet sijaitsevat tyypillisesti sadealueiden pohjois- ja koillisreunoilla. Poikkeama CSI:ssä ei ole järin suuri verrattuna kaikkiin tapauksiin (0,17 vs. 0,19), mutta näissä aukkopaikoissa CRR näyttää aliarvioivan sadekertymää (mediaani -0,11; kaikille tapauksille se oli 0,43).



*Kuva 5.6: CRR:n vertailuhistogrammi hilapisteistä, joissa algoritmi on täyttänyt parallaksikorjauksen jättämän aukon.*

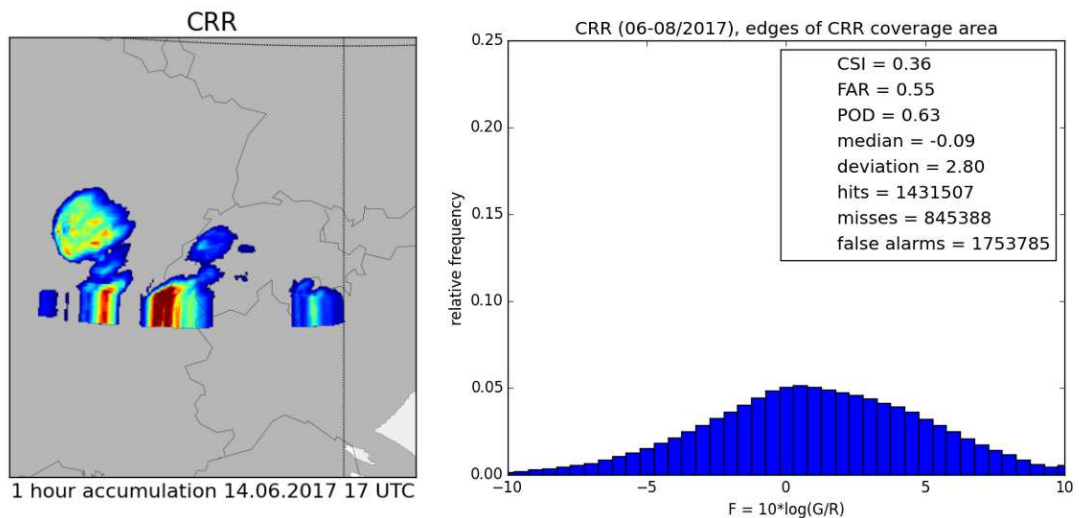
### 5.3.3 Pisteet, joissa osa datasta puuttuu

Jos tuloksista poistetaan tapaukset, joissa kaikki tarvittavien kanavien tuottama data ei syystä tai toisesta ole ollut käytössä, kaikki tässä tutkimuksessa käytettävät tilastolliset luvut pysyvät annetulla tarkkuudella samoina kolmen kuukauden tarkastelujaksolla. Tämä suodatus kuitenkin poistaa tuloksista 0,3 prosenttia osumista, 0,4 prosenttia hudeista ja 0,9 prosenttia vääristä hälytyksistä. Koska väärät hälytykset vähenevät suhteessa eniten, suodatusta voidaan pitää hyödyllisenä.

<sup>8</sup> Ympäröivät hilapistet, joiden kohdalla on niin ikään aukko parallaksikorjauksen jälkeen, eivät ole mukana tässä laskutoimituksessa.

### 5.3.4 CRR-alueen reunamat

CRR-alueen reunoilla, noin yhden leveys- tai pituusasteen levyisellä alueella havaitut sateet erottuvat CRR-kuvista venytetyn näköisinä sadealueina (kuva 5.7). Kuvien perusteella tulosten voisi arvata olevan epäluotettavia, mutta mediaani  $-0,09$  on hyvin lähellä nollaa ja keskihajonta  $2,80$  hieman parempi kuin CRR:n koko aineistolla. Reuna-alueiden CSI taas on huomattavasti parempi,  $0,36$ . CSI:tä näyttävät parantavan sekä hieman pienempi FAR että erityisesti toteutuneiden sadetapausten havaitsemisindeksi POD, joka on näissä tapauksissa merkittävästi korkeampi kuin koko aineistossa ( $0,63$  vs.  $0,30$ ).



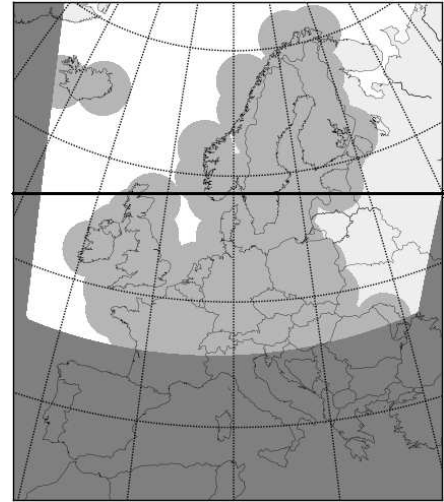
Kuva 5.7: Venytetyn näköisiä sadealueita CRR-alueen etelärajalla (vas.) ja vertailuhistogrammi näistä tapauksista.

Koska kaikki tarkastelu tehdään OPERA-peittoalueella, tässä vertailussa on mukana käytännössä vain tarkastelualueen eteläreunalla sekä Islannin länsirannikon tuntumassa olevia sadealueita. Siten esimerkiksi kuvan 3.4 näyttämä venytetyn näköinen alue Brittein saarten länsipuolisella Atlantilla ei näy tuloksissa. Kyse ei kuitenkaan ole aivan mitättömästä datamäärästä, sillä reuna-alueilta kertyy tarkasteluajana runsaat  $1,4$  miljoonaa osumaa, mikä on noin kuusi prosenttia koko tarkastelualueen osumista.

### 5.3.5 Leveyspiiriin perustuva vertailu

Koska edellisen kappaleen vertailu koski lähinnä kapeaa eteläistä aluetta ja CRR:n tulos siellä näytti paremmalta kuin muissa vertailuissa, seuraavaksi vertaillaan keskenään CRR-alueen etelä- ja pohjoisosissa saatavia tuloksia.

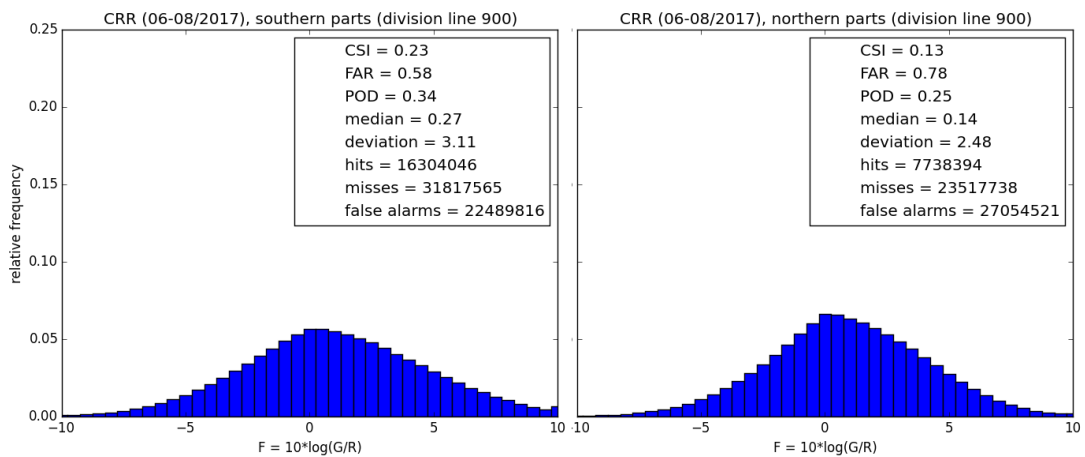
Tarkastelualue katkaistiin OPERA-hilan riviltä 900 (kuva 5.8), karkeasti tarkastelualueen puolivälistä pohjois–etelä-suunnassa. Jakolinjan pohjoispuolelle jäävät Islanti, Norja, suurin osa Ruotsista, Suomi ja Viro sekä Skotlannin pohjoiskärki. Vertailun tulokset ovat kuvassa 5.9.



Kuva 5.8: Maantieteellisen jaottelun jakolinja, rivi 900.

Jakolinjan eteläpuolelle jää runsaat 16 miljoonaa osumaa ja pohjoispuolelle vajaat 8 miljoonaa. Ero tilastollisissa indekseissä on selvä: CSI on etelässä 0,23 ja pohjoisessa 0,13;

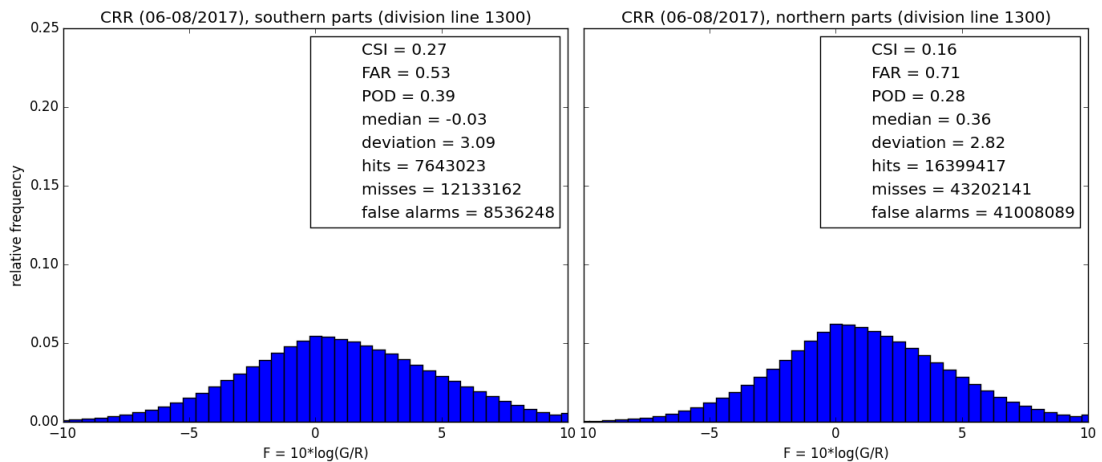
FAR on etelässä 0,58 ja pohjoisessa peräti 0,78. Etelässä hajonta tosin on suurempaa (3,11 vs. 2,48) ja histogrammin huippu kauempana nolasta (mediaani 0,27 vs. 0,14).



Kuva 5.9: CRR:n suorituskky, kun aineisto jaetaan eteläiseen ja pohjoiseen osaan OPERA-hilan riviltä 900 (n. leveyspiiri 58 °N).

Näyttää siltä, että CRR-algoritmi suoriutuu paremmin etelässä kuin pohjoisessa. Tätä havaintoa tukee myös tarkastelu, jossa jakolinja asetetaan etelämmäs, OPERA-hilan riville 1 300, joka vastaa noin leveyspiiriä 49–50 °N. Tällöin CSI kasvaa sekä etelässä (0,27) että pohjoisessa (0,16) (kuva 5.10). Eteläosan CSI ilmeisesti kasvaa siksi, että alueesta rajataan pois pohjoisempina havaittuja ja havaitsematta jääneitä sateita. Pohjoisosan CSI taas kasvaa siksi, että pohjoinen alue saa nyt lisää etelämpänä havaittuja sateita, joiden osalta CSI näyttää olevan suurempi.

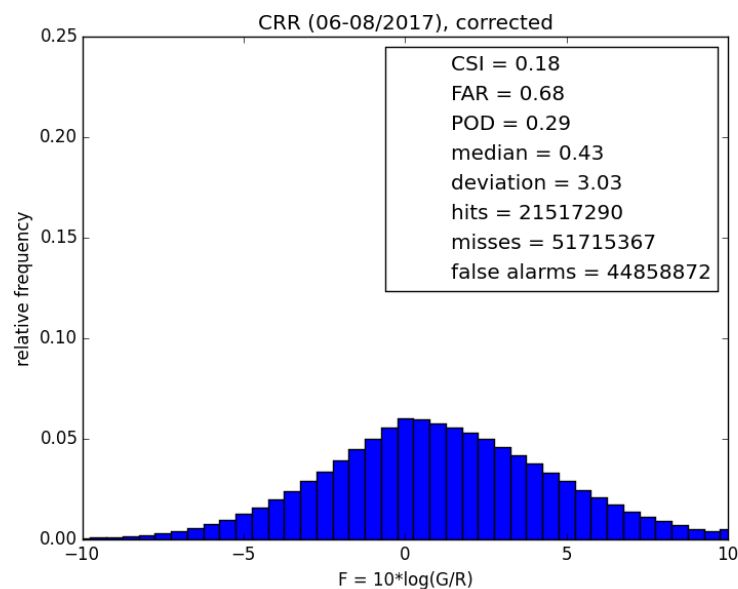




Kuva 5.10: CRR:n suoritus, kun aineisto jaetaan eteläiseen ja pohjoiseen osaan OPERA-hilan riviltä 1 300 (n. leveyspiiri 50 °N).

### 5.3.6 Korjattu CRR

Lopuksi tarkastellaan CRR:n suorituskykyä, kun aineistosta poistetaan selvimpien virhelähteiden vaikutus eli tapaukset, joissa 1) dataa ei ole ollut saatavilla kaikilta tarvittavilta kanavilta, 2) on täytetty parallaksikorjauksen jättämiä aukkoja, tai 3) sadealue on niin lähellä CRR-alueen reunaa, että CRR näyttää venyttävän sitä. Tapaus 3 luokiteltiin tässä tarkastelussa virhelähteeksi epäfysikaalisuutensa vuoksi, huolimatta kappaleessa 5.3.4 nähdystä hyvistä tuloksista. Tulokset on esitetty kuvassa 5.11.



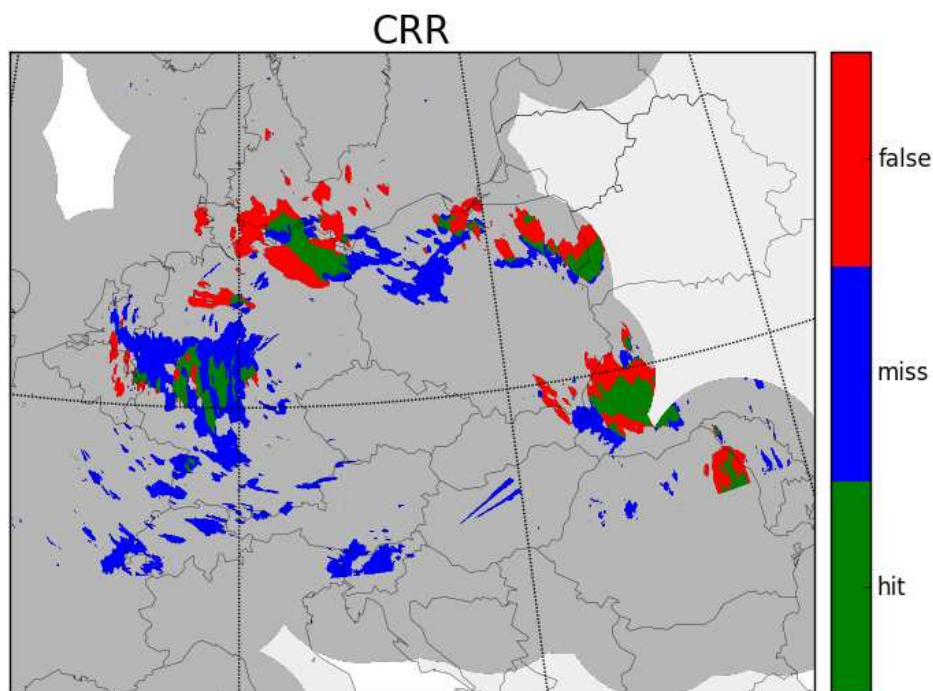
Kuva 5.11: CRR:n vertailuhistogrammi, jota on korjattu parallaksiin, datan puuttumiseen ja reuna-alueiden sateiden poistoon perustuvalla suodatuksella.

Kuvasta nähdään, että tilastolliset luvut huononevat hivenen tarkastelusta, jossa kaikki tapaukset olivat mukana: CSI 0,18 vs. 0,19, POD 0,29 vs. 0,30. Tämän voi arvella johtuvan eteläreunan venytetyistä sadealueista, jotka havaitaan hyvin mutta jotka eivät ole tässä tarkastelussa mukana. Mediaani pysyy kuitenkin ennallaan ja hajonta on niukasti pienempi (3,03 vs. 3,07).

Virhelähteiden suodatus poistaa noin 11 prosenttia osumista, 7 prosenttia hudeista ja 9 prosenttia vääristä hälytyksistä. Valtaosa pois jäävistä osumista on peräisin eteläreunan venytetyistä sadealueista, sillä kuten kappaleessa 5.3.4 todettiin, osumat noilla alueilla vastaavat noin kuutta prosenttia koko tarkastelualueen osumista.

#### 5.4 Tapauskuvauksia

Kuva 5.12 näyttää esimerkin CRR:n osumista, hudeista ja vääristä hälytyksistä yksittäisen tunnin kertymän tapauksessa.

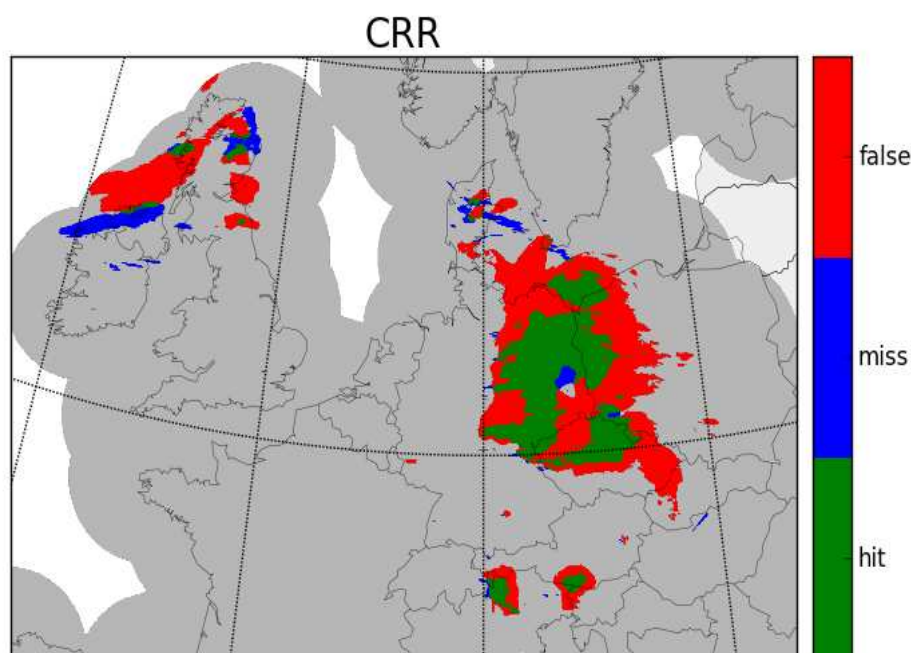


Kuva 5.12: CRR:n osumat, hudit ja väärät hälytykset 25.7.2017 klo 17 UTC. Kyseisen tunnin kertymän kohdalla osumia oli koko CRR-alueella 10 138, huteja 38 186 ja väriä hälytyksiä 11 975. Näistä luvuista laskettuna CSI = 0,17.

Kuvassa nähdään huomattava määrä sinisellä merkittyjä huteja. Hudeiksi kuitenkin kirjautuvat selvästi ei-meteorologisetkin tapaukset, jotka näkyvät vertailudatassa

sadekertyminä. Esimerkiksi kuvassa 5.12 on Unkarin yllä kaksi interferenssiipiikkiä. Tällaiset tapaukset heikentävät CRR:n tuloksia, eikä vertailu tällöin kerro koko totuutta tarkasteltavan tuotteen kyvystä. OPERA-vertailussa nämä tapaukset sen sijaan tulkitaan osumiksi, jos ne näkyvät sekä vertailudatassa että OPERA-datassa. Optimaalisessa tilanteessa tutkakuvissa ei tietenkään olisi mitään epämeteorologisia kaikuja. OPERA:n laatudatan avulla interferenssiipiikkejä ei kuitenkaan pysty erottelemaan.

Kuva 5.13 esittää toisen esimerkin. Marcosin (2016) mukaan CRR usein yliarvioi sadealueen koon, mikä nähdään kuvan 5.13 yksittäisessä tapauksessa hyvin. Saman voi havaita kuvassa 5.12 Koillis-Saksassa ja Länsi-Ukrainassa. Tarkemmin sanottuna CRR havaitsi yli 1 mm/h:n kertymiä laajemmalla alueella kuin vertailutuote; vertailutuotekin kyllä havaitsi kynnyksarvon alittavia sadekertymiä näillä alueilla. Tällainen tulkintaero – tai virhe CRR:n algoritmissa – lisää värien hälytysten määrää ja kasvattaa FAR-indeksiä tuntuvasti.



*Kuva 5.13: CRR:n osumat, hudit ja väärät hälytykset 22.6.2017 klo 22 UTC. CRR yliarvioi sadealueiden koon Keski-Euroopan yllä ja tulkitsee sateen liikkuneen Brittein saarilla pohjoisempaan kuin todellisuudessa tapahtui.*

Kuvassa 5.13 Brittein saarilla olevan sadealueen muodosta taas nähdään hyvin itä-länsi-suuntainen liike. CRR kuitenkin näyttää tulkinneen sadealueen liikkuvan

pohjoisempana kuin missä se todellisuudessa liikkui. Jos oletetaan, että kyse on samasta sadealueesta, alueiden muoto sopii tässäkin tapauksessa Marcosin (2016) havaintoon sadealueiden koosta. Tässä tutkielmassa sadealueita ei kuitenkaan tarkasteltu systemaattisesti tällaisesta näkökulmasta.

## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Taulukko 5 esittää yhteenvedon OPERA-yhdistelmän, GLD360-sadetuotteen ja CRR:n tilastollisista luvuista koko aineistosta ja tärkeimmistä tuotteiden laatu-kenttien perusteella tehdyistä rajauksista.

Taulukko 5: Tulokset OPERA-yhdistelmän, GLD360-tuotteen ja CRR:n vertailuista vertailutuotteen (OPERA+sademittarit) kanssa. Korjatulla CRR:llä tarkoitetaan vertailua, josta on suodatettu virhelähteitä kappaleen 5.3.6 mukaisesti. Etelä-pohjoinen-jaon jakolinja oli OPERA-hilan rivillä 900 (n. 58 °N).

	CSI	POD	FAR	mediaani	hajonta
OPERA	0,52	0,52	0,005	-1,93	0,99
OPERA (QIND > 0,1)	0,53	0,53	0,0013	-1,85	0,82
OPERA (QIND ≤ 0,1)	0,51	0,51	0,0073	-1,98	1,05
GLD360	0,05	0,05	0,13	-3,22	2,75
CRR, kaikki	0,19	0,30	0,67	0,43	3,07
CRR, korjattu	0,18	0,29	0,68	0,43	3,03
CRR, 3V-funktio	0,19	0,32	0,67	0,13	2,80
CRR, 2V-funktio	0,18	0,29	0,68	0,68	3,02
CRR, etelä	0,23	0,34	0,58	0,27	3,11
CRR, pohjoinen	0,13	0,25	0,78	0,14	2,48

OPERA-tuote havaitsee sadetilanteet selvästi parhaiten, mikä onkin odotettua, koska vertailutuote on korjattua OPERA-dataa. OPERA:n kohdalla huomattavaa on kuitenkin -2 dB:n systemaattinen virhe, jollaista CRR:n tuloksissa ei ole – GLD360:llä tämä virhe on vielä suurempi. Silloin, kun CRR havaitsee konvektiivisia sadetilanteita, se siis tekee niihin liittyvästä tunnin sadekertymästä oikeamman suuntaisen arvion kuin OPERA-yhdistelmä tai GLD360-sadetuote, joskin hajonta on CRR:n sadekertymissä moninkertainen OPERA:an nähden.

OPERA-yhdistelmän tuottama CSI:n arvo 0,52 vaikuttaa yllättävän pieneltä. Lukua pienentää se, että tutkayhdistelmä tuottaa valtavan määrän huteja – lähes yhtä paljon kuin osumia. Suurin syy tähän näyttää olevan se, että koska OPERA:n arvioimat sademäärät ovat järjestään pienempiä kuin sademittareilla sovitettu OPERA-sademäärät, ne jäävät usein alle arvon 1 mm/h silloin kun sademittareilla sovitettu kertymä on yli 1 mm/h. Koska alle 1 mm/h kertymät suodattuvat tarkastelusta pois, tuloksena on tällaisessa tapauksessa huti.

Jos tarkastelun kynnyksarvoksi vaihdetaan 0,2 mm/h, OPERA:n tuottamien hutien määrä pienenee selvästi alle puoleen osumien määrästä. Samalla CSI ja POD kasvavat, ja FAR pienenee. Tarkasteltaessa kaikkia sadehavaintoja (kertymä > 0,0 mm/h) huteja ja vääriä hälytyksiä ei tule enää lainkaan, mutta 2 dB:n systemaattinen virhe on edelleen nähtävillä. Nämä havainnot tukevat päätelmää kynnyksarvon vaikutuksesta ja ovat luontevia tuloksia, koska vertailudata on kuitenkin samaa OPERA-dataa, jossa saatuja sademääriä vain on korjattu sademittarien avulla.

Numeroarvot CRR:n tuloksissa (esim. CSI) ovat silmiinpistävästi huonompia kuin Marcosin ja Rodríguezin (2013) Espanjan alueella tekemässä validoinnissa (ks. taulukot 1 ja 2). Tulokset eivät kuitenkaan ole suoraan vertailukelpoisia, koska Marcos ja Rodríguez (2013) käyttivät eri vertailutuotetta ja määrittelivät tutkittavat sadealueet eri tavalla: heidän tutkimuksessaan sadetilanteeksi merkittiin kaikki yli 0,2 mm/h:n intensiteetit, kun taas tässä tutkimuksessa käytettiin edeltävän tunnin sadekertymän kynnyksarvoa (1 mm/h).

Näistä eroista riippumatta voidaan odottaa, että tutkittaessa Espanjan alueelta kerättyä dataa CRR suoriutuisi paremmin kuin tarkasteltaessa Pohjois-Euroopan sateita. CRR hyödyntää leveyspiiriin perustuvaa korjausfunktioita, joka korjaa sademääriä sitä enemmän, mitä pohjoisemmassa se havaitsee sadealueen. Sademäärien arvioiden voi kuitenkin odottaa olevan lähtökohtaisesti sitä epäluotettavampia, mitä suuremmaksi etäisyys satelliittiin kasvaa ja mitä matalammasta kulmasta satelliitti havainnoi sadetta. Tulokset, jotka tässä tutkielmassa saatiin jakamalla CRR-alue etelä-pohjoissuunnassa, sopivat hyvin yksiin tämän ajatuksen kanssa.

Kynnysarvon käyttö muuttaa myös CRR:n tuloksia. Jos kynnysarvoksi valitaankin 0,2 mm/h, CRR:n CSI kasvaa 0,24:ään ja FAR pienenee 0,46:een – hajonta tosin on selvästi aiempaa suurempaa (4,93) ja mediaani entistä enemmän nollan yläpuolella (0,81). Väärien hälytysten väheneminen johtunee siitä, että CRR yliarvioi kertymiä. Siksi se usein arvioi kertymän ylittävän 1 mm/h:n kynnysarvon, kun vertailutuotteen mukaan kertymä on pienempi. Kun kynnysarvoa pienennetään, ongelman vaikutus vähenee.

CRR on kuitenkin suunniteltu nimenomaan konvektiivisen sateen havaitsemiseen, ja siksi kynnysarvon käyttö tuotetta validoitaessa on perusteltua<sup>9</sup>. Huomattavan suuri hajonta pienempää kynnysarvoa käytettäessä viittaakin osaltaan siihen, että CRR:n epätarkkuus lisääntyy, kun tarkastellaan vähäisiä sadekertymiä – konvektiivisissa sateissa tulos on tässä mielessä parempi.

Marcos ja Rodríguez (2013) käyttivät validoinnissaan kynnysarvoa 3 mm/h. Se tuottaa tämän tutkielman tarkastelujaksolla runsaat neljä miljoonaa osumaa, mikä on noin 18 prosenttia kaikista osumista. CSI putoaa tässä vertailussa 0,12:een ja FAR kasvaa 0,82:een. Marcosin (2016) mukaan CRR usein aliarvioi voimakkaimpien sateiden intensiteetin; tällöin näin suurella kynnysarvolla mediaanin odottaisi olevan nollaa pienempi, mitä se ei tämän tutkielman aineistossa kuitenkaan ole (0,16). Suuresta FAR:sta päätellään, että CRR arvioi sadekertymäksi selvästi useammin yli 3 mm/h kuin OPERA+sademittarit. Nämä havainnot kertovat pikemminkin kovan sateen intensiteetin yli- kuin aliarvioimisesta.

Jos kynnysarvoa kasvatetaan arvoon 3 mm/h, GLD360-vertailun mediaani asettuu arvoon -1,90 dB. Se vastaa paremmin OPERA-tuloksia kuin kynnysarvolla 1 mm/h saatu tulos. Koska GLD360-salamasateet on laskettu OPERA-sateiden avulla (ks. luku 4.1), on odotettavissa, että systemaattinen virhe olisi samanlainen kuin OPERA:lla. Tämä tulos kertookin salamasateiden luonteesta: mitä kovemmasta sateesta on kyse, sitä todennäköisemmin siihen voinee odottaa liittyvän salamointia. Kasvattamalla kynnysarvoa GLD360-tulosten POD saadaan niin ikään paranemaan,

---

<sup>9</sup> Koska eri sadetyyppejä ei tässä tutkielmassa eroteltu muilla tavoin kuin kynnysarvon avulla, on mahdollista, että suuri osa tarkastelluista sadetilanteista on muuta kuin konvektiivista sadetta.

joskin vain vähän. Salamasadetuotteen avulla havaitaan siis hyvin vähäinen määrä kaikista tarkastelluista sadetilanteista.

Saatujen tulosten valossa vaikuttaa ilmeiseltä, että PERC:ssä kannattaa painottaa OPERA-tutkayhdistelmää. On tietenkin luontevaa, että OPERA-tuote havaitsee samaan verkkoon pohjaavan vertailutuotteen havaitsemat sateet hyvällä tarkkuudella. OPERA+sademittarit-tuotetta voi kuitenkin pitää parhaana saatavilla olevana kuvauksena lyhytaikaisten, paikallisten konvektiivisten sateiden tuottamista kertymistä, joten CRR:n suorituksen arvioiminen sen avulla on perusteltua.

Pettyn (1995) mukaan geostationääriset satelliitit eivät oletusarvoisesti ole hyödyllisiä kvantitatiivisissa mittauksissa karkeasti 55. leveyspiiriä kauempana päiväntasaajasta. CRR:n suoritus näyttääkin olevan sitä huonompi, mitä pohjoisempana ollaan. Koska PERC:ssä tullaan hyödyntämään CRR:n uutta versiota, josta saatu data ulottuu etelässä Pohjois-Afrikan puolelle eli kattaa koko OPERA-alueen eteläosan, leveyspiiriin riippuvuutta voidaan tutkia PERC:tä kehitettäessä tarkemmin kuin tässä tutkielmassa. Nyt vaikuttaa siltä, että CRR:n käyttö yhdistelmätuotteessa kannattaa tehdä riippuvaiseksi leveyspiiristä.

OPERA-peittoalueen ulkopuolella CRR:stä on hyötyä, koska se voi havaita lähestyviä, voimakkaita sadealueita, jotka vaikuttavat lähietäisyyksien tutka-peittoalueen sisälläkin. Lisäksi käytettävissä olevien tutkien määrä vaihtelee, ja siksi CRR:llä voidaan saada Keski- ja Etelä-Euroopastakin tietoa, jota ei muuten olisi saatavilla.

Lisäksi CRR näyttää arvioivan havaitsemansa sadekertymät yleensä suuremmiksi kuin OPERA-yhdistelmä. Sen voi siis ajatella antavan tutkatuotetta herkemmin varoituksen voimakkaista konvektiivisista sateista. CRR:n kohdalla tulosten hajonta on tosin suurta, joten asia ei ole aivan näin yksioikoinen. Lisäksi kunkin tuotteen systemaattista virhettä voidaan korjata, jos aineistoa on tarpeeksi pitkältä ajalta. Tämän tutkielman nojalla 1,93 dB:n lisääminen OPERA:n arvioimiin sademääriin antaisi sadetilanteesta paremman kuvan kuin -0,43 dB:n korjauksen tekeminen CRR:n arvioihin, koska tutkatuotteen hajonta on pientä. On kuitenkin muistettava, että tutkielmassa käytetty vertailutuote ei edusta absoluuttista totuutta.

Kun tarkastelualueen eteläisimmissäkin osissa CRR:n onnistumisindeksi CSI jäi 0,27:ään, voidaan toki pohtia, onko tuotteesta niin paljon apua, että sitä kannattaa hyödyntää lainkaan siellä, missä muitakin sadeanalyysin lähteitä on tarjolla. Väärien hälytysten suuri määrä kuitenkin heikentää tulosta, ja yksittäisiä kuvia tarkastelemalla voimme huomata, että suuri osa vääristä hälytyksistä syntyy osumien ympärille eli että CRR tulkitsee kynnyksarvon ylittävän sadekertymän ulottuneen laajemmalle alueelle kuin se todellisuudessa ulottui. Vaikka tätä tietoa voisi periaatteessa yrittää hyödyntää, sen merkitystä on kuitenkin luultavasti vaikeaa kvantifioida.

Samoin vertailua voisi tehdä samantapaisesta lähtökohdasta kuin Marcos ja Rodríguez (2013), jotka määrittivät sadealueen vähintään 3x3 hilapisteiden alueeksi, jonka kaikissa hilapisteissä sateen intensiteetti ylittää kynnyksarvon. Tässä tutkielmassa kertymiä vertailtiin hilapiste hilapisteeltä, mikä ei ota huomioon sateen alueellista luonnetta – sade ei ole pistemäinen ilmiö. On lisäksi mahdollista, että kun CRR-data sovitetaan OPERA-hilaan, sateen intensiteetin maksimi osuu interpoloinnin vuoksi hieman eri paikkaan kuin missä se vertailutuotteen mukaan on. Tällöin voi olla, että hyvinkin havaittu sadealue tuottaa huonoja vertailutuloksia.

Korjausmaskien vaikutusta voisi tutkia lisää esimerkiksi selvittämällä, millaisia osumia ne suodattavat. Jos näissä osumapaikoissa CRR:n ja vertailutuotteen sadekertymät poikkeavat erityisen paljon toisistaan, korjausmaskeja tulee käyttää entistä suuremmalla syyllä. Tässä tutkielmassa korjausmaskien avulla saadut tulokset olivat osin nurinkurisia, mikä johtuu suureksi osaksi tarkastelualueen eteläreunalla havaituista, venytetyn näköisistä sadealueista: vaikka ne ovat CRR-kuvissa selvästi epäfysikaalisia, CRR havaitsi kyseiset sateet niin hyvin, että kokonaistulos huononi, kun ne poistettiin aineistosta<sup>10</sup>. Muiden korjausten käyttö kuitenkin esimerkiksi pienensi tulosten hajontaa.

---

10 Uudessa CRR-versiossa peittoalueen rajat ovat kauempana, joten mahdolliset ongelmat reuna-alueiden käsittelyssä eivät ole haitaksi Euroopan sadeanalyysille.



## 7. YHTEENVETO

Tässä tutkielmassa tarkasteltiin Euroopan sääsatelliittijärjestö EUMETSAT:n satelliittisadetuote CRR:n (*Convective Rainfall Rate*) kykyä arvioida konvektioon liittyviä sademääriä Euroopan alueella. CRR:n suorituskykyä verrattiin OPERA-tutkayhdistelmän ja salamahavaintoverkosto GLD360:n avulla luodun salamasadetuotteen suorituskykyyn. Vertailutuotteena käytettiin sademittarisovitettua OPERA-tutkatuotetta, ja tarkastelut tehtiin noin leveyspiirin 46 °N pohjoispuolisella OPERA-peattoalueella. Tarkasteltava ajanjakso oli kesä–elokuu 2017, ja tutkittavana oli edeltävän tunnin sadekertymä.

Tutkielman taustalla on tarve kehittää sadeanalyysituote, joka yhdistää CRR:n, OPERA-tutkayhdistelmän ja GLD360-salamahavainnoista lasketun sadekentän. Tämä koko Euroopan kattava sadetuote (PERC, *Pan-European Rainfall Composite*) on tarkoitettu tukemaan lähietkiennustamista, jota kehittämällä pyritään parantamaan kykyä varautua konvektiivisten sadetilanteiden aiheuttamiin vaaratilanteisiin, kuten äkkitulviin, erityisesti kaupunkiympäristöissä Euroopan eri osissa. Tutkielman tuloksia käytetään hyväksi suunniteltaessa PERC:n optimaalista muodostamista.

CRR-tuote perustuu geostationääriseen Meteosat-11-sääsatelliitin tuottamaan dataan. Se hyödyntää infrapuna- ja näkyvän valon alueen mittauksia ja tuottaa 15 minuutin välein arvion sateen intensiteetistä ja edeltävän tunnin sadekertymästä. CRR:n tuottama tunnin sadekertymä on kuitenkin laskettu 15 minuutin välein arvioiduista intensiteeteistä. Tarkemman tuloksen saamiseksi intensiteettejä interpoloitiin tässä tutkielmassa yhden minuutin aikaresoluutioon, ja tunnin kertymä laskettiin näin saaduista sadekentistä.

Tarkastelu rajattiin sadekertymiin, jotka ylittivät kynnyksarvon 1 mm/h. Näin tehtiin siksi, että tarkoitus oli keskittyä konvektiivisiin sadetilanteisiin. CRR havaitsi tarkasteluajanjaksolla noin 30 prosenttia tapauksista, joissa hilapisteen sadekertymä ylitti kynnyksarvon. Toisaalta CRR teki valtavan määrän havaintoja sadetilanteista, joita vertailudatassa ei ollut – näitä oli peräti kaksi kolmasosaa kaikista CRR:n havaitsemista kynnyksarvon ylittävistä sadekertymistä.

Kynnysarvon käyttö olikin tietyssä mielessä ongelmallista. Ensinnäkään kynnysarvo ei välttämättä suodata kaikkia ei-konvektiivisia sadetilanteita. Toiseksi, koska CRR keskimäärin yliarvioi sadekertymiä hieman, se saattoi tulkita kynnysarvon ylittäväksi kertymän, jonka arvo jäi vertailudatassa kynnysarvon alapuolelle. Näin siis molemmat havaitsivat saman sadetilanteen, mutta CRR arvioi sateen jonkin verran runsaammaksi kuin se todellisuudessa oli; virhe ei ehkä ollut suuri, mutta se kirjautui tuloksiin vääränä hälytyksenä. Sama pätee päinvastaisena OPERA-tuotteeseen: koska se aliarvioi sadekertymiä melko selvästi, monet sadetilanteet kirjautuivat tuloksiin havaitsemattomina tapauksina, vaikka OPERA-yhdistelmä olisikin tosiasiasa havainnut ne; se vain arvioi kertymät pienemmiksi kuin ne todellisuudessa olivat. OPERA-tuote havaitsikin vain hiukan yli puolet kaikista kynnysarvon ylittäneistä kertymistä.

Merkille pantavaa oli, että CRR suoriutui sitä paremmin, mitä eteläisempiä alueita tarkasteltiin. Tämä oli tosin odotettavissakin, sillä Maan pinnan kaareutumisen vuoksi päiväntasaajan yllä lentävän satelliitin on verrattain vaikea havainnoida korkeiden leveyspiirien tapahtumia.

CRR:n systemaattinen virhe oli selvästi pienempi kuin OPERA- ja GLD360-tuotteiden, mutta toisaalta hajonta oli CRR:n tuloksissa suurta. OPERA:n tuloksia voi pitää kokonaisuutena tarkimpina, jos vain systemaattista virhettä korjataan riittävän pitkältä ajalta kerätyn aineiston perusteella. Tulokset puoltavat tutkayhdistelmän käyttöä useimmissa tilanteissa. CRR:lle on silti tarvetta, jos tutkatuotetta ei ole saatavilla esimerkiksi yhden tai useamman tutkan ollessa poissa käytöstä tai kun tarkastellaan alueita koko tutkapeiton ulkopuolella. Vaikka CRR:n antama käsitys Euroopan konvektiivisista sateista ei ole optimaalinen, se on suuntaa antava ja sitä voi hyödyntää Euroopan laajuudessa, kovista sateista varoittavassa tuotteessa.

## **KIITOKSET**

Haluan kiittää Ilmatieteen laitoksen tutkijoita Jarmo Koistinen, Janne Kotro, Panu Lahtinen, Seppo Pulkkinen ja Elena Saltikoff sekä Katalonian teknillisen yliopiston tutkijoita Marc Berenguer ja Shinju Park. Lisäksi haluan kiittää EU:n SMUFF-projektia, jonka alaisuudessa tämä tutkielma on tehty.

## KIRJALLISUUSLUETTELO

- Austin, P. M., 1987: Relation between Measured Radar Reflectivity and Surface Rainfall. *Monthly Weather Review*, **115**, 1053–1070.
- Battan, L. J., 1973: *Radar Observation of the Atmosphere*. The University of Chicago Press, Chicago, Yhdysvallat. 324 s.
- Bechini, R. ja V. Chandrasekar, 2017: An enhanced optical flow technique for radar nowcasting of precipitation and winds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **34(12)**, 2637–2658.
- Bližňák, V., Z. Sokol ja P. Zacharov, 2017: Nowcasting of deep convective clouds and heavy precipitation: Comparison study between NWP model simulation and extrapolation. *Atmospheric Research*, **184**, 24–34.
- Březková, L., P. Novak, M. Salek, H. Kyznarova, M. Jonov, P. Frolik ja Z. Sokol, 2012: Operational use of nowcasting methods for hydrological forecasting by the Czech Hydrometeorological Institute. Teoksessa: R. J. Moore, S. J. Cole ja A. J. Illingworth (toim.): *Weather Radar and Hydrology*. International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Press, Oxford, Iso-Britannia, s. 490–495.
- Bringi, V. N. ja V. Chandrasekar, 2001: *Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and applications*. Cambridge University Press, Cambridge, Iso-Britannia. 636 s.
- Calheiros, R. V. ja I. Zawadzki, 1987: Reflectivity-Rain Rate Relationships for Radar Hydrology in Brazil. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **26(1)**, 118–132.
- Chandrasekar, V., R. Keränen, S. Lim ja D. Moisseev, 2013: Recent advances in classification of observations from dual polarization weather radars. *Atmospheric Research*, **119**, 97–111.
- Christian, H. J., R. J. Blakeslee, D. J. Boccippio, W. L. Boeck, D. E. Buechler, K. T. Driscoll, S. J. Goodman, J. M. Hall, W. J. Koshak, D. M. Mach ja M. F. Stewart, 2003: Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. *Journal of Geophysical Research*, **108(D1)**, ACL-4-1–ACL-4-15.
- de la Vega, D., J. Matthews, L. Norin, L. ja I. Angulo, 2013: Mitigation Techniques to Reduce the Impact of Wind Turbines on Radar Services. *Energies*, **6**, 2859–2873.

- Dong, C., J. Yang, W. Zhang, Z. Yang, N. Lu, J. Shi, P. Zhang, Y. J. Liu ja B. Cai, 2009: An Overview of a New Chinese Weather Satellite FY-3A. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **90(10)**, 1532–1544.
- Dworak, R., K. Bedka, J. Brunner ja W. Feltz, 2012: Comparison between GOES-12 Overshooting-Top Detections, WSR-88D Radar Reflectivity, and Severe Storm Reports. *Weather and Forecasting*, **27(3)**, 684–699.
- EUMETSAT (Euroopan sääsatelliittijärjestö), 2017: Meteosat Third Generation. <<https://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/FutureSatellites/MeteosatThirdGeneration/index.html>>. Viitattu 20.12.2017.
- EUMETSAT (Euroopan sääsatelliittijärjestö), 2018: Meteosat. <<https://www.eumetsat.int/website/home/TechnicalBulletins/Meteosat>>. Viitattu 8.6.2018.
- Giannaros, T. M., V. Kotroni ja K. Lagouvardos, 2016: WRF-LTNGDA: A lightning data assimilation technique implemented in the WRF model for improving precipitation forecasts. *Environmental Modelling and Software*, **76**, 54–68.
- Gourley, J. J., Z. L. Flamig, Y. Hong ja K. W. Howard, 2014: Evaluation of past, present and future tools for radar-based flash-flood prediction in the USA. *Hydrological Sciences Journal*, **59(7)**, 1377–1389.
- H-SAF (Satellite Application Facility on Support to Operational Hydrology and Water Management), 2015: Product User Manual (PUM) for product H15A – PR-OBS-6A. 22 s. URL: <[http://hsaf.meteoam.it/documents/PUM/SAF\\_HSAF\\_PUM-15A\\_1\\_1\\_a.pdf](http://hsaf.meteoam.it/documents/PUM/SAF_HSAF_PUM-15A_1_1_a.pdf)>.
- Hogan, R., E. O’Connor ja A. Illingworth, 2009: Verification of cloud-fraction forecasts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **135(643)**, 1494–1511.
- Höller, H., H.-D. Betz, K. Schmidt, R. V. Calheiros, P. May, E. Houngrinou ja G. Scialom, 2009: Lightning characteristics observed by a VLF/LF lightning detection network (LINET) in Brazil, Australia, Africa and Germany. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, **9(2)**, 6061–6146.
- Huuskonen, A., E. Saltikoff ja I. Holleman, 2014: The operational weather radar network in Europe. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **95(6)**, 897–907.
- Im, E., S. L. Durden, S. Tanelli, H. Fang ja Y. Rahmat-Samii, 2011: NEXRAD-In-Space: A Geostationary Orbiting Doppler Radar for Hurricane Monitoring and Studies. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Yhdysvallat. URL: <<https://trs.jpl.nasa.gov/handle/2014/43747>>.

- IPCC (Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli), 2014: Urban Areas. Teoksessa: *Climate Change 2014 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects: Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report*. Cambridge University Press, Cambridge, Iso-Britannia, s. 535–612.
- Kidder, S. Q. ja T. H. Vonder Haar, 1995: *Satellite Meteorology. An Introduction*. Academic Press, Lontoo, Iso-Britannia. 466 s.
- King, P. W. S., W. D. Hogg ja P. A. Arkin, 1995: The Role of Visible Data in Improving Satellite Rain-Rate Estimates. *Journal of Applied Meteorology*, **34(7)**, 1608–1621.
- Kober, K., G. C. Craig, C. Keil ja A. Dornbrack, 2012: Blending a probabilistic nowcasting method with a high-resolution numerical weather prediction ensemble for convective precipitation forecasts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **138(664)**, 755–768.
- Kohn, M., E. Galanti, C. Price, K. Lagouvardos ja V. Kotroni, 2011: Nowcasting thunderstorms in the Mediterranean region using lightning data. *Atmospheric Research*, **100(4)**, 489–502.
- Koistinen, J., H. Hohti, J. Kauhanen, J. Kilpinen, V. Kurki, T. Lauri, A. Mäkelä, P. Nurmi, P. Pylkkö, P. Rossi ja D. Moiseev, 2012: Probabilistic rainfall warning system with an interactive user interface. Teoksessa: R. J. Moore, S. J. Cole ja A. J. Illingworth (toim.), *Weather Radar and Hydrology*. International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Press, Oxford, Iso-Britannia, s. 394–399.
- Koistinen, J. ja H. Pohjola, 2014: Estimation of Ground-Level Reflectivity Factor in Operational Weather Radar Networks Using VPR-Based Correction Ensembles. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **53(10)**, 2394–2411.
- Levizzani, V., J. Schmetz, H. J. Lutz, J. Kerkmann, P. P. Alberoni ja M. Cervino, 2001: Precipitation estimations from geostationary orbit and prospects for METEOSAT Second Generation. *Meteorological Applications*, **8(1)**, 23–41.
- Liguori, S. ja M. A. Rico-Ramirez, 2012: Quantitative assessment of short-term rainfall forecasts from radar nowcasts and MM5 forecasts. *Hydrological Processes*, **26(25)**, 3842–3857.
- Lin, C., S. Vasić, A. Kilambi, B. Turner ja I. Zawadzki, 2005: Precipitation forecast skill of numerical weather prediction models and radar nowcasts. *Geophysical Research Letters*, **32(14)**, 1–4.
- Marcos, C., 2016: Scientific and Validation Report for the Precipitation Product Processors of the NWC/GEO. NWCSAF. 45 s. URL: <<http://www.nwcsaf.org/>>

*AemetWebContents/ScientificDocumentation/Documentation/GEO/v2016/NWC-CDOP2-GEO-AEMET-SCI-VR-Precipitation\_v1.0.pdf*>.

Marcos, C. ja A. Rodríguez, 2013: Validation Report for “Convective Rainfall Rate” (CRR-PGE05 v4.0). NWCSAF. 21 s. URL: <[http://www.nwcsaf.org/AemetWebContents/ScientificDocumentation/Documentation/MSG/SAF-NWC-CDOP2-INM-SCI-VR-12\\_v1.0.pdf](http://www.nwcsaf.org/AemetWebContents/ScientificDocumentation/Documentation/MSG/SAF-NWC-CDOP2-INM-SCI-VR-12_v1.0.pdf)>.

Marcos, C. ja A. Rodríguez, 2016a: Algorithm Theoretical Basis Document for the Cloud Product Processors of the NWC/GEO. NWCSAF. 63 s. URL: <[http://www.nwcsaf.org/AemetWebContents/ScientificDocumentation/Documentation/GEO/v2016/NWC-CDOP2-GEO-AEMET-SCI-ATBD-Precipitation\\_v1.1.pdf](http://www.nwcsaf.org/AemetWebContents/ScientificDocumentation/Documentation/GEO/v2016/NWC-CDOP2-GEO-AEMET-SCI-ATBD-Precipitation_v1.1.pdf)>.

Marcos, C. ja A. Rodríguez, 2016b: User Manual for the Precipitation Product Processors of the NWC/GEO. NWCSAF. 49 s. URL: <[http://www.nwcsaf.org/AemetWebContents/ScientificDocumentation/Documentation/GEO/v2016/NWC-CDOP2-GEO-AEMET-SCI-UM-Precipitation\\_v1.0.pdf](http://www.nwcsaf.org/AemetWebContents/ScientificDocumentation/Documentation/GEO/v2016/NWC-CDOP2-GEO-AEMET-SCI-UM-Precipitation_v1.0.pdf)>.

Marcos, C., J. M. Sancho ja F. J. Tapiador, 2015: NWC SAF convective precipitation product from MSG: A new day-time method based on cloud top physical properties. *Journal of Mediterranean Meteorology & Climatology*, **12**, 3–11.

Marshall, J. S. ja W. M. Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, **5**, 165–166.

Modrick, T. M. ja K. P. Georgakakos, 2015: The character and causes of flash flood occurrence changes in mountainous small basins of Southern California under projected climatic change. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **3**, 312–336.

Moore, R. J., S. J. Cole ja A. J. Robson, 2012: Weather Radar and Hydrology: a UK Operational Perspective. Teoksessa: R. J. Moore, S. J. Cole ja A. J. Illingworth (toim.), *Weather Radar and Hydrology*. International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Press, Oxford, Iso-Britannia, s. 429–435.

NASA (Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallintovirasto), 2018a: Global Precipitation Measurement Mission. <[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/GPM/overview](https://www.nasa.gov/mission_pages/GPM/overview)>. Viitattu 5.3.2018.

NASA (Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallintovirasto), 2018b: Tropical Rainfall Measuring Mission. <<https://pmm.nasa.gov/TRMM>>. Viitattu 15.6.2018.

Nielsen, J. E., S. Thorndahl ja M. R. Rasmussen, 2014: A numerical method to generate high temporal resolution precipitation time series by combining weather radar measurements with a nowcast model. *Atmospheric Research*, **138**, 1–12.

- Park, S., M. Berenguer, D. Sempere-Torres, J. Tyynelä, S. Pulkkinen ja J. Koistinen, 2016: The quality evaluation of OPERA quantitative precipitation estimates. ERICHA-projektin raportti. 29 s.
- Park, S., M. Berenguer, C. Corral ja D. Sempere-Torres, 2017: Improvement of the flash flood hazard assessment module. ERICHA-projektin raportti. 24 s.
- Park, S., 2018. Henkilökohtainen tiedonanto, sähköposti, 13.6.2018.
- Pessi, A. T. ja S. Businger, 2009: Relationships among lightning, precipitation, and hydrometeor characteristics over the North Pacific Ocean. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **48(4)**, 833–848.
- Petty, G. W., 1995: The status of satellite-based rainfall estimation over land. *Remote Sensing of Environment*, **51(1)**, 125–137.
- Peura, M., 2002: Computer vision methods for anomaly removal. Teoksessa: *Proceedings of the Second European Conference on Radar Meteorology (ERAD02)*. Copernicus, Göttingen, Saksa, s. 312–317.
- Pohjola, H. ja A. Mäkelä, 2013: The comparison of GLD360 and EUCLID lightning location systems in Europe. *Atmospheric Research*, **123**, 117–128.
- Punkka, A.-J., 2002: Syvän konvektion luokittelu ja konvektiiviset järjestelmät Suomessa. Pro gradu -tutkielma, Helsingin yliopisto. 85 s.
- Rinehart, R. E., 1997: Radar for Meteorologists. Rinehart Publications, Grand Forks, Yhdysvallat. 428 s.
- Rodríguez, A. ja C. Marcos, 2013: Algorithm Theoretical Basis Document for “Convective Rainfall Rate” (CRR-PGE05 v4.0). NWCSAF. 36 s.  
URL: <[http://www.nwcsaf.org/AemetWebContents/ScientificDocumentation/Documentation/MSG/SAF-NWC-CDOP2-INM-SCI-ATBD-05\\_v4.0.pdf](http://www.nwcsaf.org/AemetWebContents/ScientificDocumentation/Documentation/MSG/SAF-NWC-CDOP2-INM-SCI-ATBD-05_v4.0.pdf)>.
- Rossi, P. J., 2015: Object-Oriented Analysis and Nowcasting of Convective Storms in Finland. Väitöskirja, Aalto-yliopisto. 477 s.
- Rossi, P. J., V. Hasu, K. Halmevaara, A. Mäkelä, J. Koistinen ja H. Pohjola, 2013: Real-time hazard approximation of long-lasting convective storms using emergency data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **30(3)**, 538–555.
- Saltikoff, E., 2018: Henkilökohtainen tiedonanto, sähköposti, 16.7.2018.
- Saltikoff, E., J. Y. N. Cho, P. Tristant, A. Huuskonen, L. Allmon, R. Cook, E. Becker ja P. Joe, 2016: The threat to weather radars by wireless technology. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **97(7)**, 1159–1167.

- Saltikoff, E., M. Kurri, H. Leijnse, S. Barbosa ja K. Stiansen, 2017: Maintenance keeps radars running. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **98(9)**, 1833–1840.
- Schaefer, J. T., 1990: The Critical Success Index as an Indicator of Warning Skill. *Weather and Forecasting*, **5(4)**, 570–575.
- Scheufele, K., K. Kober, G. C. Craig ja C. Keil, 2014: Combining probabilistic precipitation forecasts from a nowcasting technique with a time-lagged ensemble. *Meteorological Applications*, **21(2)**, 230–240.
- Schmetz, J., P. Pili, S. Tjemkes, D. Just, J. Kerkmann, S. Rota ja A. Ratier, 2002: An introduction to Meteosat Second Generation (MSG). *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83(7)**, 977–992.
- Schmetz, J., S. A. Tjemkes, M. Gube ja L. van de Berg, 1997: Monitoring deep convection and convective overshooting with METEOSAT. *Advances in Space Research*, **19(3)**, 433–441.
- Scofield, R. A., 1987: The NESDIS Operational Convective Precipitation Estimation Technique. *Monthly Weather Review*, **115(8)**, 1773–1792.
- Scovell, R., N. Gaussiat ja M. Mittermaier, 2013: Recent Improvements To the Quality Control of Radar Data for the Opera Data Centre. *Proceedings of the 36th AMS Conference on Radar Meteorology*. Breckenridge, Yhdysvallat.
- Seo, B. C., W. F. Krajewski ja K. V. Mishra, 2015: Using the new dual-polarimetric capability of WSR-88D to eliminate anomalous propagation and wind turbine effects in radar-rainfall. *Atmospheric Research*, **153**, 296–309.
- Sun, J., M. Xue, J. W. Wilson, I. Zawadzki, S. P. Ballard, J. Onvlee-Hooimeyer, P. Joe, D. M. Barker, P. W. Li, P. Golding, M. Xu ja J. Pinto, 2014: Use of NWP for nowcasting convective precipitation: Recent progress and challenges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **95(3)**, 409–426.
- Tapiador, F. J., F. J. Turk, W. Petersen, A. Y. Hou, E. García-Ortega, L. A. T. Machado, C. F. Angelis, P. Salio, C. Kidd, G. J. Huffman ja M. de Castro, 2012: Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications. *Atmospheric Research*, **104**, 70–97.
- Vaisala, 2018: Vaisala Global Lightning Dataset GLD360.  
URL: <<https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/WEA-MET-GLD360%20Datasheet-B210800EN.pdf>>.
- Villarini, G. ja W. F. Krajewski, 2010: Review of the different sources of uncertainty in single polarization radar-based estimates of rainfall. *Surveys in Geophysics*, **31(1)**, 107–129.



- WMO (Maailman ilmatieteen järjestö), 2018: Nowcasting.  
<<http://www.wmo.int/pages/prog/amp/pwsp/Nowcasting.htm>>. Viitattu 28.6.2018.
- WMO-Sat (Maailman ilmatieteen järjestön avaruusohjelma), 2018: List of all satellites. <<http://www.wmo-sat.info/oscar/satellites>>. Viitattu 15.6.2018.
- World Economic Forum, 2018: *The Global Risks Report 2018*. World Economic Forum, Geneve, Sveitsi. 80 s.  
URL: <[http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_GRR18\\_Report.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_GRR18_Report.pdf)>
- Ye, B., G. W. Lee ja H. Park, 2015: Identification and Removal of Non-meteorological Echoes in Dual-polarization Radar Data Based on a Fuzzy Logic Algorithm. *Advances in Atmospheric Sciences*, **32(9)**, 1217–1230.

## LIITE 1: Käytettyjen python-koodien prosessikaavio

Eri sadetuotteiden käsittelyssä käytetyt python-koodit ja niiden tekijät.

### Vertailudata:

unzipper.py	(HS)	purkaa tiedostopaketit ja jakaa kansioihin päivämäärän mukaan
compute_crahi_accum.py	(SP/HS)	yhdistää 15 minuutin kertymät tunnin kertymiksi

### CRR:

crr_unzipper.py	(HS)	purkaa tiedostopaketit ja jakaa kansioihin päivämäärän mukaan
nwcsaf_msg_to_opera.py	(PL/HS)	muuntaa datan CRR-hilasta OPERA-hilaan
compute_advinterp.py	(SP/HS)	interpoloi intensiteettiä 15 minuutin resoluutiosta 1 minuuttiin
compute_crr_accum.py	(SP/HS)	laskee edeltävän tunnin kertymän

### GLD360:

get_gld_data.py	(SP)	hakee ja luettelee salamaniskutiedot tietokannasta
compute_lightning_densities.py	(SP)	laskee salamatiheyden OPERA-hilapisteittäin 1 min resoluutiolla
compute_lightning_density_hist.py	(SP)	laskee histogrammin salamatiheyksistä
compute_rain_hist.py	(SP)	laskee histogrammin OPERA-intensiteeteistä
compute_PMM_lookups.py	(SP)	laatii salamatiheyden ja OPERA-sateen vastaavuustaulukon
compute_PMM_rain_rates.py	(SP)	laskee salamatiheyksiä vastaavan sadekentän OPERA-alueella
compute_precip_accum.py	(SP)	laskee edeltävän tunnin kertymän GLD360-sadekentistä

### OPERA:

compute_advinterp.py	(SP)	interpoloi OPERA-intensiteettiä 15 min resoluutiosta 1 minuuttiin
compute_precip_accum.py	(SP)	laskee edeltävän tunnin kertymän OPERA-sadekentistä

### Kaikille:

compare_to_crahi_product.py	(HS)	laskee tilastolliset suureet ja histogrammin halutuilla korjauksilla
-----------------------------	------	--

### Apuohjelmat:

mapdrawer.py	(HS)	piirtää OPERA-peittoalueen ja halutun sade- tai muun kentän
bitwise.py	(JK)	auttaa tulkitsemaan CRR:n dataflag- ja quality-kenttien lukuarvoja
combinations.py	(HS)	laskee CRR:n dataflag-arvot tilanteissa, joissa on matemaattinen virhe

HS = Heikki Sinisalo, JK = Janne Kotro, PL = Panu Lahtinen, SP = Seppo Pulkkinen