



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Larissa Rimpiläinen

Tutkapohjainen mitoitussateiden muotokirjasto

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 13.3.2017

Valvoja: Professori Harri Koivusalo

Ohjaajat: FT Seppo Pulkkinen, DI Tero Niemi, TkT Teemu
Kokkonen

Tekijä Larissa Rimpiläinen

Työn nimi Tutkapohjainen mitoitussateiden muotokirjasto

Koulutusohjelma Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka

Pääaine Vesi- ja ympäristötekniikka**Koodi** R3005

Työn valvoja Professori Harri Koivusalo

Työn ohjaajat FT Seppo Pulkkinen, DI Tero Niemi, TkT Teemu Kokkonen

Päivämäärä 13.3.2017**Sivumäärä** 49 + 12**Kieli** Suomi

Tiivistelmä

Hydrologisissa tutkimuksissa ollaan usein kiinnostuneita aluesadannasta, jota voidaan arvioida säätutkamittausten perusteella. Tutka mittaa radiosignaalin sirontaa vaikutustilavuudessa, joka voidaan muuntaa sateen intensiteetiksi tietyllä alueella. Tutkamittauksia on tehty jo pitkään, mutta niitä hyödynnetään melko vähän hydrologien keskuudessa. Ongelmana ovat olleet esimerkiksi sadetuotteiden huono laatu ja aineiston suuri määrä. Kaksoispolarisaatiotutkien avulla sadetuotteiden laatua on pystytty parantamaan.

Tulviin pyritään varautumaan mitoitussateiden avulla. Mitoitussade tarkoittaa suurinta vesimäärää, joka hulevesiviemärin täytyy pystyä johtamaan pois välittömästi. Mitoitussateiden tärkeimmät ominaisuudet ovat kesto aika, sateen voimakkuus ja toistuvuus. Toistuvuudella pyritään kuvaamaan sitä, kuinka tavallinen tietty sademäärä tietyssä ajassa on. Mitoitussateissa on jo pitkään pyritty siirtymään tasaisen intensiteetin sadetapahtumista vaihtuvan intensiteetin sadetapahtumiin. Kaupungistumisen myötä hydrologit ovat entistä kiinnostuneempia sateen intensiteetin vaihtelusta pienessä mittakaavassa.

Tässä työssä tavoitteena on kerätä tutkapohjainen mitoitussateiden muotokirjasto ja kehittää menetelmä mitoitussateiden poimimiseen. Muotokirjastolla tarkoitetaan kokonaisuutta vaihtuvaintensiteettisistä sadetapahtumista. Kirjastoon on kerätty otos 5 min - 24 h kestäviä sadetapahtumia, joiden toistuvuus aika on kerran kolmessa vuodessa tai sitä harvinaisempi. Käytetyt sateen intensiteetit perustuvat uuteen kaksoispolarisaatiota hyödyntävään sadetuotteeseen ja tutkimittauksia on tihennetty liikeinterpoloinnin avulla.

Työssä kehitetty mitoitussateiden valinta menetelmä voidaan jakaa kolmeen päävaiheeseen, jotka ovat 1) alustava kertymien laskeminen ja rankkasadetapahtumien etsiminen, 2) valituista rankkasateista toisistaan riippumattomien sadetapahtumien valitseminen ja 3) varsinainen kertymien laskeminen uusien liikeinterpoloitujen sadekenttien avulla. Otos on tarkoitettu kerätä siten, että kerätyt rankkasateet ovat toisistaan riippumattomia. Riippumaton otos on tärkeä tilastotieteen näkökulmasta, sillä sitä voidaan käyttää tilastollisten mallien laskemiseen.

Mitoitussateita kerättiin yhteensä 2147 kpl vuosilta 2013 – 2016. Lyhytkestoisia sadetapahtumia (5 – 60 min) valittiin huomattavasti enemmän kuin pitkäkestoisia (3 – 24 h) sadetapahtumia. Otoksessa on paljon sademäärällisesti erittäin harvinaisia sadetapahtumia. Rankkasateita poimittiin eniten heinäkuulta. Rankkasateet on pyritty poimimaan niin, että ne olisivat toisistaan riippumattomia, mutta riippumattomuutta ei ole testattu. Toistaiseksi kerätty otos on tilastollisesti liian pieni, että sen avulla voitaisiin tutkia Suomen sadeolosuhteita. Jos otoksen keräämistä jatketaan, sen avulla voisi tutkia esimerkiksi harvinaisten sadetapahtumien toistuvuuksia ääriarvoteorian kautta.

Avainsanat Sade, aluesadanta, mitoitussade, säätutkat, rankkasateet



Author Larissa Rimpiläinen		
Title of thesis Selection of radar based design storms		
Degree programme Transportation and Environmental Engineering		
Major Water and Environmental Engineering		Code R3005
Thesis supervisor Prof. Harri Koivusalo		
Thesis advisors PhD Seppo Pulkkinen, M.Sc. (Tech.) Tero Niemi, D.Sc. (Tech.) Teemu Kokkonen		
Date 13.3.2017	Number of pages 49 + 12	Language Finnish

Abstract

Weather radar is an effective way to measure rainfall over large areas, which is often of particular interest to hydrologists. Radar measures the microwave signal backscattering in a sample volume, which can be converted to the rain intensity over a given area. Radars have been used for measuring rainfall for a long time, but hydrologists have not been utilizing the existing radar data that much. Problems have been the poor quality of rain products and large amount of data, which makes it difficult to handle. Use of dual-polarization radars has improved the quality of the rain products.

Design storms are used to determine dimensions of flood routing structures. Design storm describes the maximum amount of water that a drain system needs to be able to lead off immediately. The main characteristics of the design storm are the duration, intensity and frequency. Frequency aims to describe how often a certain amount of rainfall can be experienced in a given time period. For some time now, there has been efforts to use variable rather than constant intensity design storms. Because of urbanization, hydrologists are increasingly interested in variations in the intensity of rainfall on a small scale.

The objective was to collect a selection of design storms and to produce a methodology to sample them. Selection includes design storms with a duration from 5 minutes to 24 hours with a frequency of once every three years or rarer. The rainfall intensities are based on the new rainfall product, which utilizes dual-polarization technique.

The developed method can be divided in three phases. During the first phase rain events with high enough accumulation to make them return period longer than once every three years are selected. During second phase selection is narrowed to only include independent rain events. This is done so that statistical models can be used with the final sampling. In the last phase an optical flow interpolation method has been used to improve the temporal resolution of the measurements.

In total 2147 design storms were selected from years 2013 – 2016. A considerable amount of very rare rainfall amounts were observed. More rain events with a short duration (5 – 60 min) were picked than rain events with a long duration (3 – 24 h). Events of heavy rainfall were mostly picked in July. An effort to select independent rain events has been made, but independence has not been verified. So far, the collected sample is too small to be used to explore extreme rainfall in Finland.

Keywords Rain, areal rainfall, design storm, weather radar, extreme rainfall

Alkusanat

Suomen tutkaverkko on hyvin kattava ja sadantaa on arvioitu säätutkien avulla jo pidemmän aikaa, mutta tutkapohjaisia sadetuotteita ei käytetä kovin paljon. Tutkassa on potentiaalia erityisesti siksi, että se pystyy havaitsemaan sadetta laajoilta alueilta. Rankimman sateen osuminen sademittariin on aina epävarmaa. Säätutkien avulla nämä harvinaisimmat sadetapahtumatkin voidaan havaita sijainnista riippumatta. Tästä on lähtenyt ajatus, että harvinaisimmat sadetapahtumat voitaisiin etsiä tutkimittausten avulla.

Työ on osa EU-rahoitteista OSAPOL (Optimaaliset sademittaukset kaksoispolarisaatiosäätutkalla) -projektia. Projektin tarkoituksena on parantaa tutkapohjaisten sadetuotteiden laatua ja kehittää suunnittelijoita hyödyttäviä sadetuotteita tutkimittauksista. Mitoitussateiden muotokirjasto oli yksi esitetyistä uusista tutkapohjaisista sadetuotteista, jonka tarkoituksena on parantaa tutkimittausten käytettävyyttä ja kehittää mitoituskäytäntöä.

Erityisesti haluan kiittää ohjaajina toimineita Seppo Pulkkista, Tero Niemeä ja Teemu Kokkosta ja valvojana toiminutta Harri Koivusaloa ohjeista ja neuvoista työn aikana. Lisäksi haluan kiittää Ilmatieteen laitoksen Pentti Piristä, Annakaisa von Lerberia, Jarmo Koistista, Elena Saltikoffia, Markus Peuraa, Harri Hohtia sekä Ari-Matti Harria tuesta ja vastauksista loputtomiin kysymyksiin. Haluaisin myös kiittää perhettäni tuesta koulunkäyntiin ja opiskeluun.

Työn rahoitus on tullut Maa- ja vesitekniikan tuki ry:ltä eli kiitos myös heille.

Espoo 13.3.2017

Larissa Rimpiläinen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	
Merkinnät ja lyhenteet	
Johdanto	1
1.1 Sade ja sateen mittaaminen	1
1.2 Mitoitussateet	2
1.3 Työn tavoitteet	3
2 Sateen mittaaminen säätutkilla	7
2.1 Tutkayhtälö	7
2.2 Mittausgeometria	7
2.3 Kaksoispolarisaatio	9
2.4 Signaalin esiprosessointi	11
2.5 Tutkaheijastavuustekijästä vesisateeksi	11
2.6 Virhelähteet	12
2.7 Säätutkapohjainen sadetuote	13
3 Aineistot	15
3.1 Tutkimusalue ja työn rajaus	15
3.2 OSAPOL-sadetuote	16
3.3 Rankkasateiden sademäärät	19
3.4 Olomuototuote	19
3.5 Sadetyyppi	20
4 Menetelmät	22
4.1 Rankkasateiden alustava valitseminen	22
4.2 Riippumattomien mitoitussateiden poimiminen	22
4.3 Liikeinterpolointi ja uusien rankkasateiden valitseminen	25
5 Tulokset	26
6 Tulosten analysointi	33
7 Johtopäätökset	36
8 Lähdeluettelo	38
Liiteluettelo	43
Liitteet	

Merkinnot ja lyhenteet

Merkinnot

a		sateen muuntokaavan vakiokerroin
b		sateen muuntokaavan eksponentti
C_1		tutkavakio
D	[mm]	vesipisaran halkaisija
$ K ^2$		eristekerroin
K_{dp}	[°/km]	ominaisvaihe-ero
P_{rain}		vesisateen todennäköisyys
P_r	[W]	tutkan vastaanottama teho
R	[mm/h]	sateen intensiteetti
RH	[%]	ilman kosteus
r	[m]	etäisyys tutkan antennista
T	[C°]	lämpötila
V	[m ³]	vaikutustilavuus
Z	[mm ⁶ /m ³]	tutkaheijastavuustekijä
φ_{dp}	[°]	signaalin vaihe-ero

Lyhenteet

NOAA	<i>National Severe Storms Laboratory</i>
OSAPOL	optimaaliset sademittaukset kaksoispolarisaatiosäätutkalla
PMI	<i>polarimetric meteo index</i>
RATU	rankkasateet ja taajamatulvat
RIL	Suomen rakennusinsinöörien liitto
VPR	<i>vertical profile of reflectivity</i> (tutkaheijastavuustekijän pystyprofiili)

Johdanto

1.1 Sade ja sateen mittaaminen

Sade syntyy, kun kostea ja lämmin ilma kohoaa ilmakehässä ja jäähtyy. Jäähtynyt ilma ei pysty sitomaan samaa määrää kosteutta kuin lämmin ilma, minkä seurauksena vesihöyry alkaa tiivistyä pilvipisaroiksi ja härmistyä jääkiteiksi. Yleisimmin sade syntyy jääkiteiden kasvaessa niin raskaiksi, että ne alkavat pudota lumisateena. Lumisateen sulaessa lämpimämmässä ilmassa alempana se muuttuu räntä- ja vesisateeksi. Sateen voimakkuus riippuu paljon ilman nousunopeudesta. Mitä nopeammin ilma nousee, sen nopeammin se jäähtyy ja sade on sitä voimakkaampaa. Nousuliikkeen lisäksi sateen intensiteetti riippuu ilmakehässä olevan kosteuden määrästä. (Karttunen et al. 2008.)

Sade voidaan luokitella sen syntyvän mukaan. Yleensä käytetään kolmea päätyyppiä, jotka ovat konvektiiviset sateet, laaja-alaiset rintamasateet ja orografiset eli maaston muodoista johtuvat sateet (Karttunen et al. 2008). Suomessa sateet ovat tyypillisesti konvektiivisia tai laaja-alaisia rintamasateita, sillä maaston muodot eivät riitä orografisen sateen synnyttämiseen. Maaston muodot voivat kuitenkin vaikuttaa sateen alueelliseen jakautumiseen. Sen sijaan meri ja manner vaikuttavat Suomessakin voimakkaasti konvektiivisen sateen syntyalueisiin siten, että syksyllä meri lisää sademääriä meren läheisyydessä ja keväällä vähentää (Aaltonen et al. 2008). Todellisuudessa jakoa eri sadetyyppeihin ei voi tehdä näin karkeasti, vaan esimerkiksi konvektiivista sadetta voi esiintyä laaja-alaisen rintamasateen sisällä.

Konvektiiviset sateet syntyvät kun ilma nousee nopeasti ylöspäin nosteen vaikutuksesta. Nostevoimat käynnistyvät, kun alustan lämpiäminen tai lähestyvä säärintama antaa alkusykäyksen pystyliikkeille epävakaaasti kerrostuneessa ilmassassa. Nousuliike keskittyy suhteellisen pienialaisiin kuurosateisiin, joiden välissä vallitsee heikko laskeva liike. Säärintamien yhteydessä kuurot voivat järjestäytyä nauhamaisiksi muodostelmiksi. Laaja-alaiset rintamasateet muodostuvat, kun ilmassa alkaa kohota hitaasti ylöspäin kaltevaa rintama-pintaa pitkin. Nousuliike on hitaampaa kuin konvektiivisen sateen tapauksessa, joten myös sateen intensiteetti on yleensä pienempi, mutta sadealue on selvästi laaja-alaisempi kuin kuuroissa. (Karttunen et al., 2008.)

Perinteisesti sadetta on mitattu pistemäisesti sademittareilla (Habib et al. 2010). Sademittari kerää sataneen veden astiaan ja kerätty vesimäärä mitataan. Sademittareiden vahvuus on, että ne mittaavat suoraan sadantaa ja ovat tarkkoja yksittäisessä pisteessä (Rahimi et al. 2004). Sademittarilla mitattu sadanta kuvaa huonosti aluesadantaa, sillä jopa muutaman sadan metrin päässä sademittarista hetkellinen pistesadanta ei aina korreloi mitatun sadannan kanssa (Michaélides et al. 2009).

Hydrologisissa tutkimuksissa ollaan usein kiinnostuneita aluesadannasta, eikä pistesadannasta (Wright et al., 2013). Säätitutkilla voidaan mitata sirontaa havaintotilavuudessa ja mitausten perusteella voidaan arvioida aluesadantaa. Havaintotilavuudella tarkoitetaan tutkan lähettäminen mikroaaltojen valaisemaa tilavuutta. Tutkan havaintotilavuuden pinta-ala on lähellä tutkaa muutamia hehtaareja ja kaukana tutkasta noin neliökilometri. Jos sademittareita ja tutkia halutaan vertailla, olisi hyvä käyttää alueellista muunnossuhdetta (*areal reduction relationships*) (Durrans et al. 2002). Yleensä sateen keskimääräinen intensiteetti pienenee pinta-alan kasvaessa.

Tutkamittauksia on tehty jo pitkään, mutta niitä hyödynnetään melko vähän hydrologisissa tutkimuksissa. Ongelmana ovat olleet esimerkiksi sadetuotteiden huono laatu (Fletcher et al. 2013) ja aineiston suuri määrä, mikä tekee siitä vaikean hallita. Kehitystä on kuitenkin tapahtunut ja Yhdysvalloissa sademittareiden mittauksia jopa korjataan tutkamittausten perusteella (Chandrasekar 2016).

1.2 Mitoitussateet

Sateen intensiteetti vaihtelee paljon niin alueellisesti kuin ajallisesti (Morin et al. 2006). Kaupungistumisen myötä hydrologisissa tutkimuksissa ollaan entistä kiinnostuneempia sateen intensiteetin vaihtelusta pienessä mittakaavassa (Wang et al. 2015). Koska kaupunki-alueella on paljon vettä läpäisemätöntä pintaa, tehokkaat hulevesiviemärit ja lyhyet etäisyydet kuivatusverkostoon, reagoivat ne nopeasti sateisiin (Fletcher et al. 2013). Silloin jopa lyhyet ja voimakkaat sadetapahtumat voivat aiheuttaa tulvia.

Tulvat johtuvat yleensä harvinaisista sademääristä tai väärin mitoitetuista hulevesiviemäristä (Einfalt ja Jessen 2002). Viemäreiden suunnittelussa tulviin pyritään varautumaan mitoitussateiden avulla. Mitoitussateita käytetään esimerkiksi hulevesirakenteiden suunnittelussa ja niiden avulla on tarkoitus arvioida millaisen vesimäärän rakenteen tulisi pystyä käsittelemään ilman tulvia tai muita häiriöitä. Mitoitussateiden ominaisuudet määritellään yleensä tilastollisilla menetelmillä (Knighton ja Walter 2016). Mitoitussade on määritelty suurimpana vesimääränä, joka hulevesiviemäriin täytyy pystyä johtamaan pois välittömästi (RIL 2004).

Mitoitussateisiin liittyy kolme keskeistä käsitettä: sateen kesto-aika, rankkuus ja toistuvuus (RIL 2004). Sateen kestoajalla tarkoitetaan mitoitussateen pituutta. Sateen rankkuudella tarkoitetaan sen intensiteettiä. Intensiteetti määritellään yleensä vaakasuoralle pinnalle aikayksikön kuluessa sataneena veden määränä. Se kuvaa sateen voimakkuutta. Intensiteetti esitetään usein yksikössä mm/h tai mm/min. Intensiteetti voi olla joko hetkellinen tai keskimääräinen. Hetkellisellä intensiteetillä tarkoitetaan intensiteettiä tietyssä ajanhetkenä. Keskimääräinen intensiteetti tarkoittaa sademäärää tietyssä ajassa. Esimerkiksi sääatutka mittaa hetkellistä intensiteettiä, mutta sademittari usein kertymää, joka voidaan muuttaa keskimääräiseksi intensiteetiksi.

Toistuvuudella pyritään kuvaamaan sitä, kuinka tavallinen tietty sademäärä tietyssä ajassa on. Toistuvuusajalla tarkoitetaan sellaista ajanjaksoa, jonka kuluessa tilastojen perusteella todennäköisesti sataa mitoitussateen suuruinen tai voimakkaampi sade (RIL 2004). Sademäärien toistuvuudet määritellään yleensä intensiteetti-kesto-toistuvuus-kuvaajien avulla pitkistä sademittaripohjaisista aikasarjoista ja ne ovat tietyille alueelle ominaisia (Durrans 2010). Sademittareita on kuitenkin liian vähän, jotta niillä voitaisiin havainnoida tulvatapahtumia alueellisesti kattavasti (Einfalt ja Jessen 2002). Siksi harvinaiset sateet jäävät helposti huomaamatta. Sääatutkilla voidaan mitata sadetta laajoilta alueilta, jolloin rankkasateet on helpompi havaita. Sateiden toistuvuuksia onkin tutkittu myös tutkapohjaisesti (Durrans 2002; Overeem et al. 2009; Marran ja Morin 2015; Panziera et al. 2016). Suomessa sateiden toistuvuuksia on tutkittu lähinnä sademittareita hyödyntäen (Katajisto 1969; Kilpeläinen et al. 2008). Aaltonen et al. (2008) ovat tutkineet sateiden toistuvuuksia Suomessa hyödyntäen sekä sademittareita että sääatutkia.

Perinteisesti mitoitussateena on käytetty tasaisen intensiteetin sadetapahtumaa (Knighton ja Walter 2016) tai sellaista sadetapahtumaa, missä intensiteetti muuttuu hyvin yksinkertaisella

tavalla (Seed et al. 1999). Varsinkin kaupunkiolosuhteissa tasainen intensiteetti ei välttämättä kuvaa sadetapahtumaa riittävästi, jotta sen avulla voitaisiin arvioida hulevesirakenteiden toimimista (Fletcher et al. 2013). Esimerkiksi Einfalt ja Jessen (2002) huomasivat, että sadetapahtuman aikana sattunut 90 – 120 minuutin erittäin voimakas sade oli yhteydessä kaupunkitulviin Saksassa vuonna 2001, vaikka sadetapahtumat muuten erosivat toisistaan hyvin paljon.

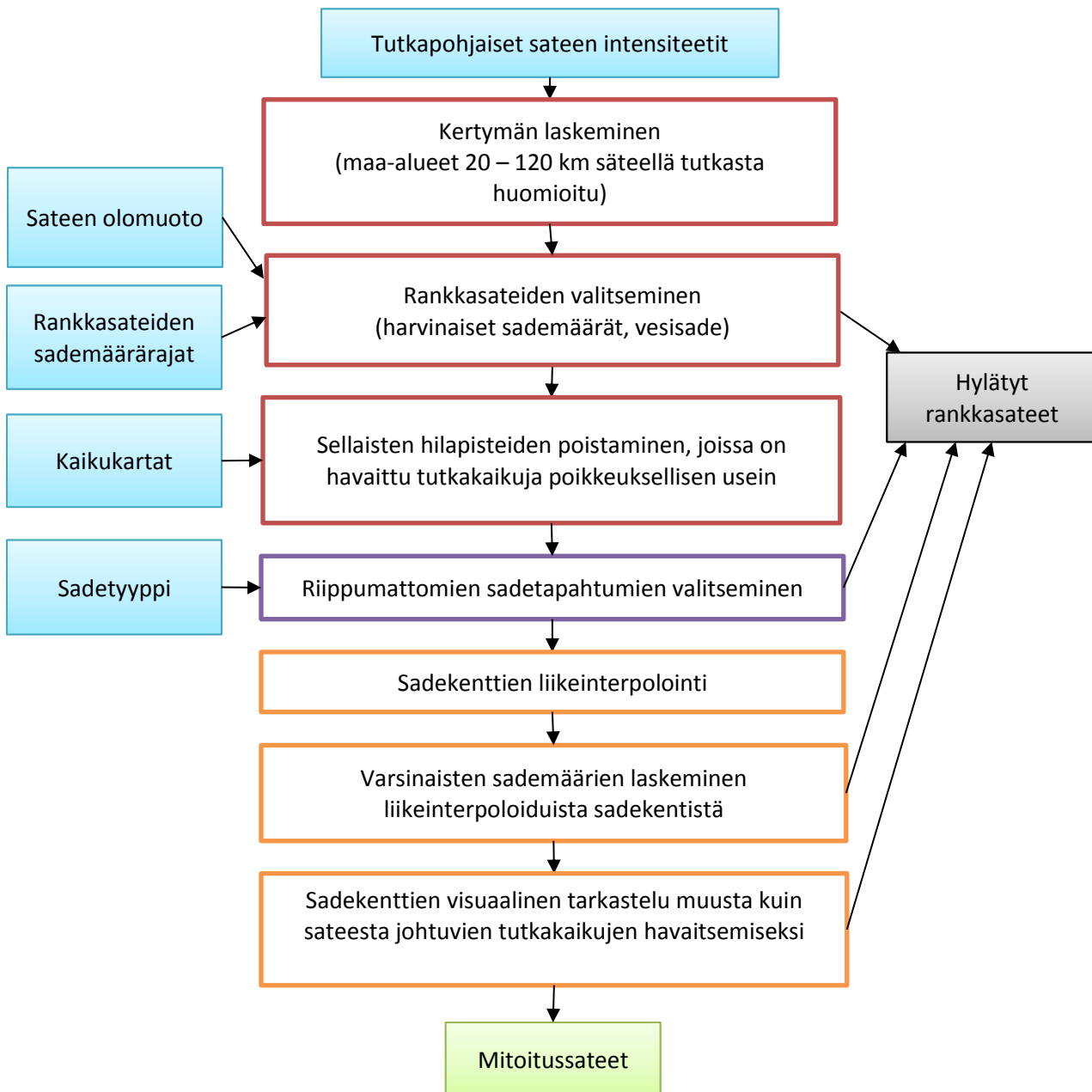
Suomessa hulevesirakenteiden suunnittelussa mitoitussateina käytetään kerran 1 – 3 vuodessa toistuvia 10 – 15 minuutin sademääriä (RIL 2004). Yhteiskunnan kannalta kriittisissä kohteissa, kuten sairaaloissa tai patojen suunnittelussa voidaan käyttää jopa harvemmin toistuvia sadetapahtumia. Myös vesistöihin ja rankkasateisiin voidaan soveltaa erilaisia kriteereitä. Esimerkiksi Alankomaissa mitoitusta tehdään niin, että kaupunkiolosuhteissa pintavesien ei pitäisi aiheuttaa tulvia useammin kuin kerran sadassa vuodessa (Overeem et al. 2009). Suomessa käytetyt sademäärät tietyssä ajassa perustuvat Katajiston (1969) rakennusmääräyskokoelmissa julkaisemiin sateiden toistuvuuksiin. Yleinen ongelma mitoitussateiden käytössä on, ettei käytettyjen sademäärien epävarmuuksia ole otettu huomioon (Overeem et al. 2009; Watt and Marsalek 2016)

Mitoitussateiden konseptia on yritetty muuttaa jo jonkin aikaa (Eicher 1991; Seed et al. 1999; Knighton ja Walter 2016). Sveitsissä Eicher (1991) on jo 1990-luvun alussa tutkinut intensiteetin vaihtelun vaikutusta hulevesirakenteisiin. Hän myös keräsi sademittariaineistosta joukon vaihtuvaintensiteettisiä mitoitussateita. Sittemmin vaihtuvaintensiteettisiä mitoitussateita on pyritty luomaan esimerkiksi erilaisten stokastisten mallien avulla (esim. Seed et al. 1999). Stokastisten mallien käyttö on tällä hetkellä yleisin tapa tehdä vaihtuvaintensiteettisiä mitoitussateita (Watt ja Marsalek 2013).

1.3 Työn tavoitteet

Tämän työn tavoitteena on kerätä tutkapohjainen vaihtuvaintensiteettinen mitoitussateiden muotokirjasto todellisista sadetapahtumista. Työssä tuotetaan myös menetelmä mitoitussateiden keräämiseen. Muotokirjastolla tarkoitetaan kokoelmaa vaihtuvan intensiteetin sadetapahtumista, joiden kertymäaika on viidestä minuutista yhteen vuorokauteen. Kerättyjen mitoitussateiden avulla on mahdollista tutkia hulevesirakenteiden toimintaa parviotannan avulla. Työ on rajattu vuosien 2013 – 2016 tutkimittauksiin toukokuusta lokakuuhun. Työssä kerätään vain vesisadetta sisältäviä sadetapahtumia maa-alueilta 20 – 120 km päässä lähimmästä tutkasta. Työ voidaan jakaa kolmeen päävaiheeseen (kuva 1), jotka ovat 1) alustava kertymien laskeminen ja alustava rankkasadetapahtumien etsiminen, 2) valituista rankkasateista toisistaan riippumattomien sadetapahtumien valitseminen ja 3) varsinainen kertymien laskeminen uusien liikeinterpoloitujen sadekenttien avulla.

Työn ensimmäinen vaihe toteutetaan laskemalla viiden minuutin aika-askelin liukuva kertymä halutuille ajanjaksoille viidestä minuutista vuorokauteen. Kertymistä poimitaan ne sadetapahtumat, joissa sademäärä ylittää kerran kolmessa vuodessa toistuvan tai sitä harvinaisemman sademäärän. Toisessa vaiheessa kerättyistä sadetapahtumista valitaan toisistaan riippumattomat rankkasateet niin, että ensisijaisesti mahdollisimman suuret sademäärät otetaan mukaan otokseen. Kolmannessa vaiheessa valituille ajankohdille lasketaan liikeinterpoloidut sadekentät, joiden avulla lasketaan uudet varsinaiset kertymät. Liikeinterpoloinnin avulla alkuperäiset viiden minuutin välein tehdyt mittaukset tiheennetään minuutin välein tehdyiksi. Kertymät ja hetkelliset intensiteetit tallennetaan mitoitussateiden muotokirjastoksi. Käytetyt menetelmät on esitetty tarkemmin luvussa 4.



Kuva 1. Työn vaiheet mitoitusateiden muotokirjaston keräämiseen. Sinisellä pohjalla olevat laatikot kuvaavat aineistoja, harmaalla pohjalla hylättyjä rankkasateita ja vihreällä pohjalla työn tuloksia. Punaisella ympäröidyt laatikot kuvaavat työn 1. vaihetta, violetilla työn 2. vaihetta ja oranssilla työn 3. vaihetta.

Tutkimuksen tärkein lähtötuote on tutkapohjaisesti mitatut sateen hetkelliset intensiteetit. Intensiteetit on esitetty koko Suomen kattavassa hilassa yksikössä mm/h. Hilan lisäksi tutkimuksessa on käytetty eri toistuvuuksille määritettyjä rankkasateiden sademääräarvoja,

olomuototuotetta sekä tutkapohjaista sadetuotetta, joka antaa todennäköisyyden sateen tyy-
pistä eli onko sade laaja-alainen rintamasade vai konvektiivinen sade. Käytetyt aineistot on
esitelty tarkemmin luvussa 3.

Sadeaineistoja kerätessä tapahtumien riippuvuus aiheuttaa ongelmia. Tilastollisella riippu-
mattomuudella tarkoitetaan otosta sellaisista sadetapahtumista, jotka eivät ole vaikuttaneet
toistensa todennäköisyyksiin (Milton ja Arnold 2003). Jos sadetapahtumat ovat toisistaan
riippuvaisia, se vääristää tilastollisia malleja. Tutkapohjaisesti riippumattomia sadetapahtu-
mia poimittaessa riippuvuuden ongelma korostuu, sillä alueellinen riippuvuus tulee voimak-
kaammin esille. Tämä johtuu siitä, että mittauspisteet ovat hyvin lähellä toisiaan. Kaukana-
kin olevat sadetapahtumat voivat olla riippuvaisia toisistaan. Esimerkiksi kesällä 2016 sama
rajuilma on aiheuttanut tuhoja Helsingissä ja Kotkassa (Hohti 2017).

Muita työn kannalta keskeisiä käsitteitä ovat sadealueet ja sadetapahtumat. Sadealueella tar-
koitetaan sadepilveä tai joukkoa sadepilviä. Sadealueella on alku- ja loppuhetki, eikä se ole
sidoksissa tiettyyn paikkaan, vaan voi liikkua jopa useita satoja kilometrejä. Samaan sade-
alueeseen lasketaan koko sadepilvi ja muut pilvet mihin se on yhteydessä. Samaan sadealu-
eeseen lasketaan siis myös yksittäiset sadealueet, jotka jonain ajanhetkenä voivat näyttää
erillisiltä sadealueilta, mutta jotka jossain vaiheessa joko liittyvät tai erkanevat varsinaisesta
sadealueesta. Sadetapahtuma voidaan ymmärtää monella tavalla. Tässä työssä sadetapahtu-
malla tarkoitetaan tiettyä ajanjaksona yksittäistä sijaintia, jossa on satanut jokin sademäärä.
Yhden sadetapahtuman aikana tarkastellun paikan yli on voinut kulkea useita sadealueita tai
sadetapahtuma voi kuvata esimerkiksi yhtä sadealuetta osittain. Sadetapahtumaan liittyy
olennaisesti sen aikana satanut vesimäärä eli sademäärä.

2 Sateen mittaaminen säätutkilla

2.1 Tutkayhtälö

Säätutka mittaa takaisinsironneen sähkömagneettisen mikroaallon ominaisuuksia. Sironnan määrä riippuu partikkeleiden kokojakaumasta, olomuodosta ja sateen intensiteetistä (Rinehart 2004). Tavallinen pulssitutka toimii niin, että se lähettää tietyn tehoisen sähköimpulssin ja mittaa takaisinsironneen signaalin tehoa. Pulssitutka tarkoittaa, että tutka lähettää radiosignaalin tehopulsseina. Sironna tarkoittaa kappaleesta heijastunutta ja taittunutta tehosignaalia. Vastaanotettu teho riippuu mittaustilavuudessa olevien sironnata aiheuttavien partikkeleiden yhteenlasketusta tutkapoikkipinta-alasta. Tutkan mittaamaa tehoa kuvataan kaavalla (Rinehart 2004)

$$P_r = \frac{C_1 |K|^2 Z}{r^2}, \quad (1)$$

jossa tutkan vastaanottama teho (P_r) [W] riippuu tutkaheijastavuustekijästä (Z), tutkavakiosta (C_1), kappaleen eristekertoimesta ($|K|^2$) sekä mittaustilavuuden etäisyydestä tutkan anteniin (r) [m]. Tutkavakio (C_1) pitää sisällään erilaisia tutkasta ja sen ominaisuuksista riippuvia vakioita, kuten esimerkiksi antennivahvistukseen ja mikroaallon aallonpituuteen liittyvät vakiot. Kappaleen eristekerroin ($|K|^2$) riippuu kappaleen permittiivisyydestä tietyllä aallonpituudella. Esimerkiksi vesipisaroiden eristekerroin voi olla 0,93 ja jäälle 0,197. (Rinehart 2004.)

Tutkaheijastavuustekijä (Z) [mm^6/m^3] määritetään yksittäisten vesipisaroiden halkaisijoiden (D) [mm] kuudennen potenssin summana vaikutustilavuudessa (V) [m^3] (Rinehart 2004):

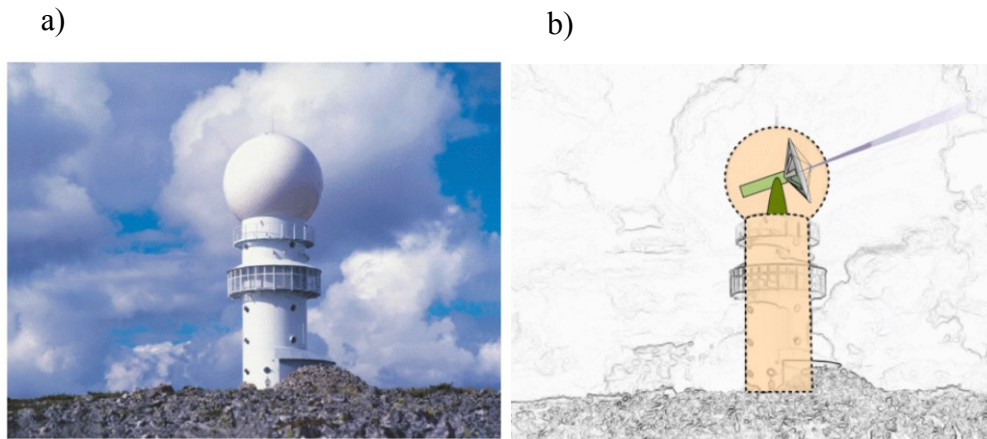
$$Z = \sum \frac{D^6}{V}. \quad (2)$$

Tutkaheijastavuustekijän yhtälöä (2) voidaan käyttää, kun kappaleet ovat huomattavasti pienempiä kuin tutkan aallonpituus, eli kun ollaan *Rayleigh*-sironnan alueella. Säätutkan signaalin aallonpituus on 3 – 10,5 cm riippuen käytettävästä tutkatyypistä (Einfalt et al. 2004). Tutkaheijastavuuden arvo vaihtelee todella paljon. Summan tutkaheijastavuustekijä (Z) voi olla 0,001 mm^6/m^3 , kun rakeille tutkaheijastavuustekijä voi olla jopa 36 000 000 mm^6/m^3 . Suuren vaihtelun vuoksi tutkaheijastavuustekijä ilmoitetaan yleensä logaritmisena suureena dBZ. (Rinehart 2004.)

2.2 Mittausgeometria

Säätutkan keilattava alue käydään läpi vaaka- ja pystytasossa. Pystytason kulmia kutsutaan korkeuskulmiksi ja vaakatason sivuttaiskulmiksi. Sivuttais- ja korkeuskulmia käydään läpi haluttu määrä, esimerkiksi Ilmatieteen laitos käy läpi 9 – 12 korkeuskulmaa mittaustehtävästä riippuen (Ilmatieteen laitos 2017a) ja 360 sivuttaiskulmaa (Saltikoff et al. 2010). Tutka pyrkii lähettämään mahdollisimman kapean keilan tiettyyn suuntaan. Ilmatieteen laitoksen tutkilla keilan leveys on noin 1 ° paitsi Luoston tutkalla, jolla se on 0,7 ° (Saltikoff et al. 2010). Pääkeilan lisäksi antenni aiheuttaa sivukeiloja, jotka voivat aiheuttaa virhekaikuja.

Tutkakeilan mittaustarkkuus määräytyy radiosignaalin impulssin pituuden ja pulssintoistotaajuuden mukaan. Edellisen impulssin täytyy ehtiä kohteeseen ja takaisin ennen kuin seuraava voidaan lähettää. Mittausalkiolla tarkoitetaan impulssin pituudesta riippuvaa matkaa, jonka perusteella tutkan mittaustarkkuus määräytyy. Esimerkiksi Ilmatieteen laitoksen tutkissa mittauskieron pituus on noin 125 m, mutta tutkamittaukset keskiarvoistetaan 500 m matkalta jo tutkan signaaliprosessorissa ennen varsinaista mittaustiedon siirtoa ja tallennusta. Tämä säästää tiedonsiirrossa, mutta keskiarvoistus voi kadottaa tärkeitä yksityiskohtia havaitusta signaalista. Kuvassa 2 on esitetty valokuva säätutkasta ja kaavakuva tutkan antennista, joka heijastaa lähetetyt tutkaimpulssit.



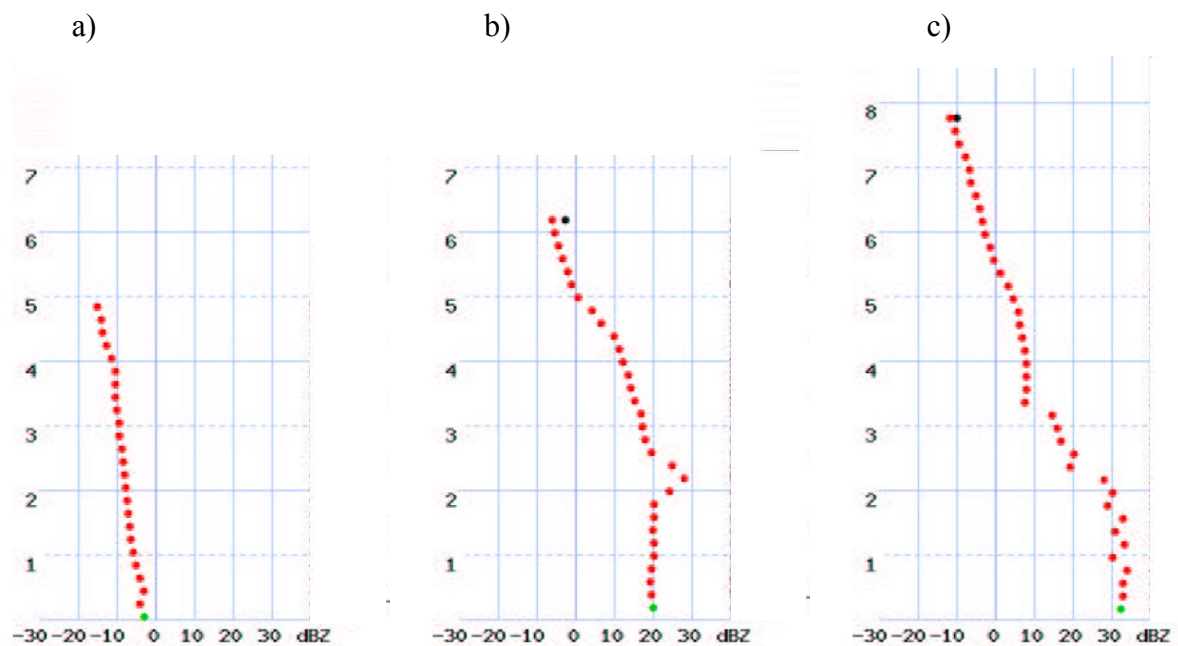
Kuva 2. (a) säätutka ja (b) kaavakuva antennista tutkan sisällä (Ilmatieteen laitos 2017b).

Tutkan mittauserometriassa on hyvä huomioida myös se, että johtuen maan kaarevuudesta tutkasignaali havaitsee asioita lähellä tutkaa kymmenien metrien korkeudessa, kun taas kaukana tutkasta etäisyys maanpintaan voi olla jopa useita kilometrejä. Mitä kauempana maanpinnasta tutkan keila on, sen vaikeampaa sademäärään arvioiminen maanpinnalle on. Korkealla ilmakehässä voidaan havaita sadetta, joka haihtuu ennen osumistaan maanpinnalle ja vastaavasti jokin sadepilvi voi jäädä kokonaan tutkakeilan alapuolelle, jolloin sitä ei havaita ollenkaan. Sen takia, vaikka tutkakeila ylttäisikin monen sadan kilometrin päähän tutkasta, kaukana tutkasta olevia mittauksia ei välttämättä kannata käyttää sadannan arviointiin.

Myös sateen olomuoto ja siihen liittyvä tutkaheijastavuustekijä voi muuttua korkeuden mukaan ilmakehässä. Tätä vaihtelua kuvataan yleensä heijastuvuuden pystyprofiililla (*vertical profile of reflectivity*, VPR). Rännän tutkaheijastavuustekijä on usein suurempi kuin veden tai lumen, kun taas lumen tutkaheijastavuustekijä on hieman pienempi kuin veden. Jotta sateen intensiteetti voitaisiin arvioida oikein, tehdään tutkamittauksille yleensä VPR-korjaus. Käytännössä se tarkoittaa ilmakehässä mitatun tutkaheijastavuustekijän muuttamista vastaamaan heijastuvuutta tietyssä korkeudessa, esimerkiksi maan pinnalla. VPR-korjaus tarvitaan erityisesti silloin, kun tutkan keila osuu sulamiskerrokseen tai sen yläpuolelle. Sulamiskeroksella tarkoitetaan sitä korkeutta, jonka yläpuolella sade on lumena ja alapuolella vetenä. Suomessa se on kesällä tyypillisesti 1 – 2,5 km korkeudessa (Pohjola 2003) ja talvella varsinkin Etelä-Suomessa se voi olla maan pinnalla eli sataa räntää.

Ilmatieteen laitoksen käyttämän VPR-korjaus on toteutettu laskemalla korjaus kahden korkeusprofiilin avulla eli mitatun ja ilmastolliseen keskiarvoon perustuvan. Varsinainen korjaus määritellään yhdistämällä molemmat korjaukset. Korjausten painotus määräytyy sen mukaan, kuinka paljon tutkamittauksia on ollut saatavilla.

Kuvassa 3 on esitetty erilaisia sateen pystyprofiileja ja tutkaheijastavuustekijän muuttumista niissä korkeuden mukaan. Kuvasta 3 b nähdään selvästi sulamiskerros, joka alkaa noin kahden kilometrin korkeudesta. Siinä tutkaheijastavuustekijä kasvaa ensin suuremmaksi kuin vesisateen tutkaheijastavuustekijä ja muuttuu taas pienemmäksi, kun mennään sulamiskerroksen yläpuolelle.

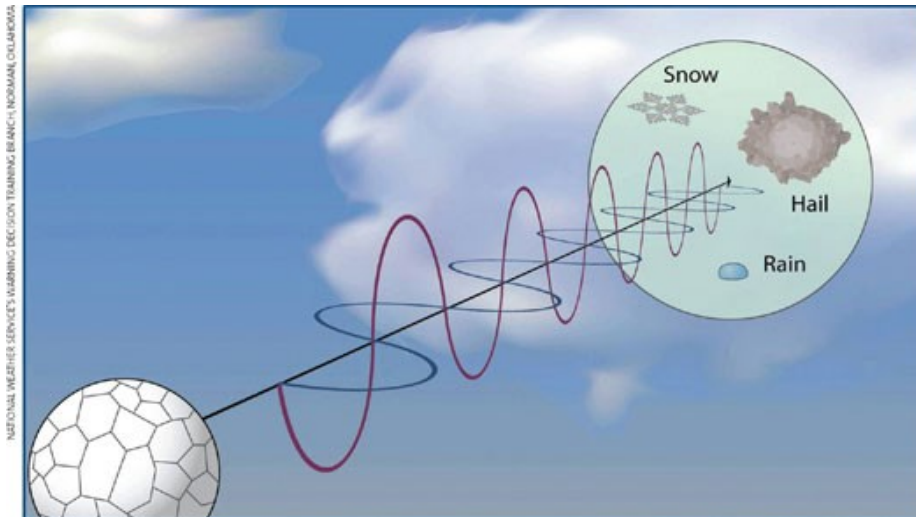


Kuva 3. Tyypilliset tutkaheijastavuustekijäprofiilit (a) lumisateelle, (b) yhtenäiselle vesisateelle ja (c) kuurottaiselle vesisateelle. Kuvaien pystyakseli esittää etäisyyttä maanpinnasta [km] ja vaaka-akseli tutkaheijastavuustekijää [dBZ]. (Pohjola 2003.)

2.3 Kaksoispolarisaatio

Tutkaheijastavuustekijä ei aina kuvaa hyvin sademäärää tai sitä, millainen kohde kaiun aiheuttaa, sillä se kärsii vaimentumisesta ja on herkkä sateen olomuodon muutoksille (Chandrasekar et al. 2013). Siksi on kehitetty muita havainnointimenetelmiä ilmakehän partikkeleiden tunnistamiseen ja sateen intensiteetin arvioimiseen.

Kaksoispolarisaation avulla ilmakehän partikkeleiden muodosta saadaan enemmän tietoa, kuin jos käytettäisiin ainoastaan tutkaheijastavuustekijää. Sähkömagneettisella aallolla on voimakuus ja vaihe. Kaksoispolarisaatiotutkan lähettämä aalto voi värähdellä vertikaalisesti tai horisontaalisesti eli olla polarisoitunut. Seuraamalla toisiinsa nähden kohtisuorasti värähteleviä aaltoja voidaan tutkia sironnan aiheuttaneen kappaleen muotoa. Kaksoispolarisaation toimintaperiaate on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Kaksoispolarisaation toimintaperiaate. Horisontaalisesti värähtelevä aalto on kuvattu sinisellä ja vertikaalisesti värähtelevä violetilla. (NOAA 2014.)

Kaksoispolarisaation avulla voidaan esimerkiksi havainnoida horisontaalisen ja vertikaalisen aallon vaihe-eroa (φ_{dp}), mutta sitä pidetään hyvin epävakana muuttujana (Wang ja Chandrasekar 2009). Vaihe-ero mitataan asteina ja sen yksikäsitteisyysalue on $0 - 360^\circ$. Epävakaas vaihe-eron mittaamisessa johtuu siitä, että eron kasvaessa yli 360° ylitetään yksikäsitteisyyden alue. Vaihe-eron kadottaminen vääristää arviota sateen intensiteetistä. Vaihe-ero voidaan kadottaa esimerkiksi silloin, jos mittausalkiot ovat liian pitkiä.

Vaihe-erosta voidaan johtaa tutkasuure ominaisvaihe-ero (*specific differential phase*, K_{dp}) [$^\circ/\text{km}$]. Se perustuu horisontaalisen ja vertikaalisen aallon vaihe-eron muutoksen havaitsemiseen etäisyyden (r) [km] funktiona. Ominaisvaihe-eroa käytetään erityisesti kovien sateiden tunnistamiseen. Sen laskentakaava on esitetty kaavassa, (Wang ja Chandrasekar 2009)

$$K_{dp}(r) = \frac{1}{2} \frac{d\varphi_{dp}}{dr} \quad (3)$$

jossa $d\varphi_{dp}$ [$^\circ$] on etenevän aallon vaihe-eron muutos ja dr [km] etäisyyden muutos. Tutka mittaa edestakaisin kulkeneen aallon vaihe-eroa. Koska K_{dp} perustuu φ_{dp} :n mittaamiseen, se on epävakaa ja kohinainen muuttuja (Wang ja Chandrasekar 2009). Sen etuna on kuitenkin, ettei se kärsi vaimenemisesta ja sen avulla voidaan tunnistaa rakeet (Chandrasekar et al. 2013). Ominaisvaihe-ero (K_{dp}) voidaan muuntaa vastaamaan sateen intensiteettiä (R) [mm/h] maan pinnalla Suomen olosuhteisiin sovitetulla kaavalla: (Leinonen et al. 2012)

$$R = 21 K_{dp}^{0,72} \quad (4)$$

2.4 Signaalin esiprosessointi

Säätutkan signaaliprosessori luokittelee tutkasignaalia jo ennen kuin mittauksia voidaan käsitellä manuaalisesti. Pääasiallisena syynä on tarve aineiston laadun yhtenäisyydestä operatiivisessa tutkaverkossa (Chandrasekar et al. 2013). Ilmatieteen laitoksen tutkissa signaalin esiprosessointiin liittyviä menetelmiä ovat esimerkiksi kaiku- ja esiluokittelija sekä Doppler-suodatin.

Esiluokittelijan tarkoitus on tunnistaa vesisade, elävistä kohteista aiheutuvat kaiut ja muut kaiut. Luokittelu perustuu erilaisten kaksoispolarisaatiosuureiden vertailuun sumean logiikan mallin avulla (Schuur et al. 2013). Esiluokittelijan avulla muodostetaan PMI (*Polarimetric Meteo Index*) -suodatin, joka leikkaa ei-meteorologiset kaiut pois mittauksista. Menetelmän ongelmana on satunnainen raehavaintojen luokittelu ei-meteorologisten kaikujen luokkaan, jolloin automaattisen luokittelun jälkeen loppukäyttäjää ei voi enää päättää, mitkä kaiut ovat olennaisia ja mitkä eivät. PMI-suodatinta ei käytetä yleisesti Ilmatieteen laitoksen tutkissa, mutta esimerkiksi Vantaan ja Korppoon tutkien alueella ei-meteorologiset kohteet aiheuttavat merkittävää häiriötä ja PMI-suodattimen käyttö parantaa mittaustulosta huomattavasti.

Suomessa käytettävät tutkat ovat Doppler-tutkia eli ne voivat mitata kappaleen säteen suuntaista nopeutta mittaamalla mikroaallon taajuuden muutosta (Rinehart 2004). Esimerkiksi maakaikuja voidaan tunnistaa sen perusteella, että maa ei liiku, joten myöskään aallon taajuus ei muutu. Kaikujen suodattamisesta taajuuden avulla kutsutaan Doppler-suodattimeksi. Doppler-ilmiö tunnistaa vain säteen suuntaisen liikkeen. Jos sade liikkuu säteeseen nähden kohtisuorasti, on vaarana että myös tällaiset kaiut poistetaan. Sen takia seurataan yleensä useampaa aika-askelta, jolloin aidosti staattiset kohteet tulevat paremmin esille. Säätutkamittausten käyttäjällä ei yleensä ole mahdollisuutta päästä käsittelemään Doppler-suodattimella poistettuja mittauksia.

Kaikuluokittelijan tarkoitus on luokitella kaikujen aiheuttajat. Sateen olomuotojen lisäksi kaikuluokittelijan tarkoitus on tunnistaa ei-meteorologiset kohteet. Luokittelu perustuu sumean logiikan malliin (Chandrasekar et al. 2013). Malli koostuu erilaisista säännöistä, joiden perusteella yleensä tunnistetaan kaikujen aiheuttaja. Sumeat mallit on todettu toimiviksi tutkakaikujen luokittelussa, sillä ne osaavat käsitellä signaalin kohinaa ja olomuotojen päällekkäisyyksiä hyvin (Chandrasekar et al. 2013). Kaikuluokittelija ei tee päätöksiä sen suhteen, mikä osa mittauksista tallennetaan jatkokäsittelyä varten, kuten PIM- tai Doppler-suodatin.

2.5 Tutkaheijastavuustekijästä vesisateeksi

Säätutka ei mittaa suoraan todellista sadetta. Tutkaheijastavuustekijä (Z) muunnetaan sateen intensiteetiksi (R) $Z(R)$ -muuntokaavan avulla. Muunnoksen tekeminen ei ole yksiselitteistä, koska pisaroiden koko vaikuttaa paljon mitattuun tutkaheijastavuustekijän arvoon. Esimerkiksi, jos sataa muutamia isoja pisaroita, voi tutkaheijastavuustekijä olla suuri, vaikka sademäärä on pieni. Vastaavasti pieniä pisaroita voi olla paljon, jolloin tutkaheijastavuustekijä on pieni, mutta oikea intensiteetti suurempi. Erilaisilla pisarakokojakaumilla voidaan siis saada sama tutkaheijastavuustekijä, vaikka sademäärät voivat olla erilaisia. Tunnistamalla sateen syntymekanismi voidaan pisaroiden kokojakaumaa arvioida paremmin.

Yleisimmin käytössä oleva tutkaheijastavuustekijän muuntokaava sateeksi on esitetty kaavassa (Rinehart 2004)

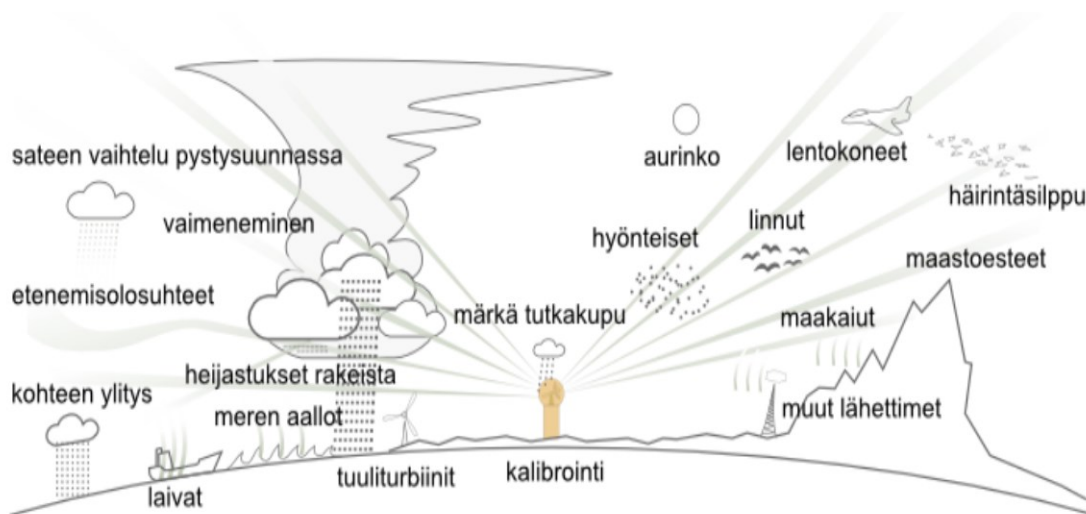
$$Z = aR^b, \quad (5)$$

jossa Z [mm^6/m^3] on tutkaheijastavuustekijä ja R [mm/h] sateen intensiteetti. Lisäksi kaavassa esiintyy kaksi vakiota a ja b . Ne riippuvat pääasiassa pisaroiden kokojakaumasta, joka on kullekin alueelle tyypillinen. Leinonen (2012) on määrittänyt sopivat kertoimet Suomen olosuhteisiin. C-alueen tutkalle Suomen olosuhteisiin parametrille a sopiva arvo on 223 ja parametrille b 1,53.

Sulavien rakeiden ja lumihutaleiden tutkaheijastavuustekijä on suurempi kuin vesisateen, joten ne aiheuttavat usein sateen yliarviointia. Tilanteissa, joissa tutkaheijastavuustekijä on yli 55 dBZ, on vaikutustilavuudessa usein myös rakeita (Rinehart 2004). Ei kuitenkaan tiedetä kuinka suuri osa sateesta on raemuodossa, jolloin sademäärän arvioiminen on vaikeaa. Suomessa sulamiskerros on alhaalla, joten kesälläkin tutkasignaali on usein sulamiskerroksessa tai sen yläpuolella, jolloin se mittaa räntä- tai lumisadetta.

2.6 Virhelähteet

Sääutkaa ei pidetä erityisen tarkkana menetelmänä yksittäisessä pisteessä, koska tutka ei mittaa suoraan sadantaa. Sironnan muuttamiseen sadannaksi liittyy paljon epävarmuustekijöitä (Krajewski ja Smith 2002). Jo aiemmin mainittuja virhelähteitä ovat muun muassa signaalin vaihe-eron kadottaminen, rakeet sekä kaukana tutkasta tutkakeilan nouseminen korkealle maanpinnasta. Lisää virhelähteitä on esitetty kuvassa 5. Osa virhekaiuista voidaan poistaa tarkkailemalla signaalin muita ominaisuuksia kuin tutkaheijastavuustekijää, mutta usein myös häiriökaikuja tulkitaan sateeksi.



Kuva 5. Erilaisia tutkasignaaliin ja sadetuotteen rakentamiseen vaikuttavia ilmiöitä (Ilmatieteen laitos 2017c).

Häiriökaikuja aiheuttavat monenlaiset asiat. Liikkumattomien kohteiden aiheuttamat kaiut voidaan usein poistaa Doppler-suodattimen avulla. Vaikeimpia kohteita ovat liikkuvat kohteet kuten merenpinta, laivat ja tuulivoimalat (Saltikoff 2011). Myös hyönteiset ja linnut voivat vaikuttaa tutkahavaintoon (Einfalt et al. 2004), mutta ne pystytään usein tunnistamaan muotonsa perusteella. Sironnaksi voidaan tulkita myös esimerkiksi vieraan lähettimen aiheuttamia tai auringosta peräisin olevia mikroaaltoja.

Merkittävä tutkaheijastavuustekijään liittyvä virhelähde on signaalin vaimeneminen. Tutkan mittaama kaiku on muutenkin erittäin heikko verrattuna lähtevään signaaliin ja tutkan havaitessa voimakkaan sateen, signaali vaimenee entisestään (Rinehart 2004). Tämä johtuu siitä, että rankka sade on jo heijastanut osan signaalista takaisin, joten sen taakse pääsee vain osa lähetettyä signaalia, jolloin takaisinheijastuvan signaalin teho on vielä entistään pienempi. Mikäli sade on suoraan tutkan yläpuolella, tutkaa suojaava kupu voi kastuessaan aiheuttaa vaimenemista (Kurri ja Huuskonen 2008). Vaimennus ei kuitenkaan peitä esimerkiksi signaalin vaihe-eron muutosta.

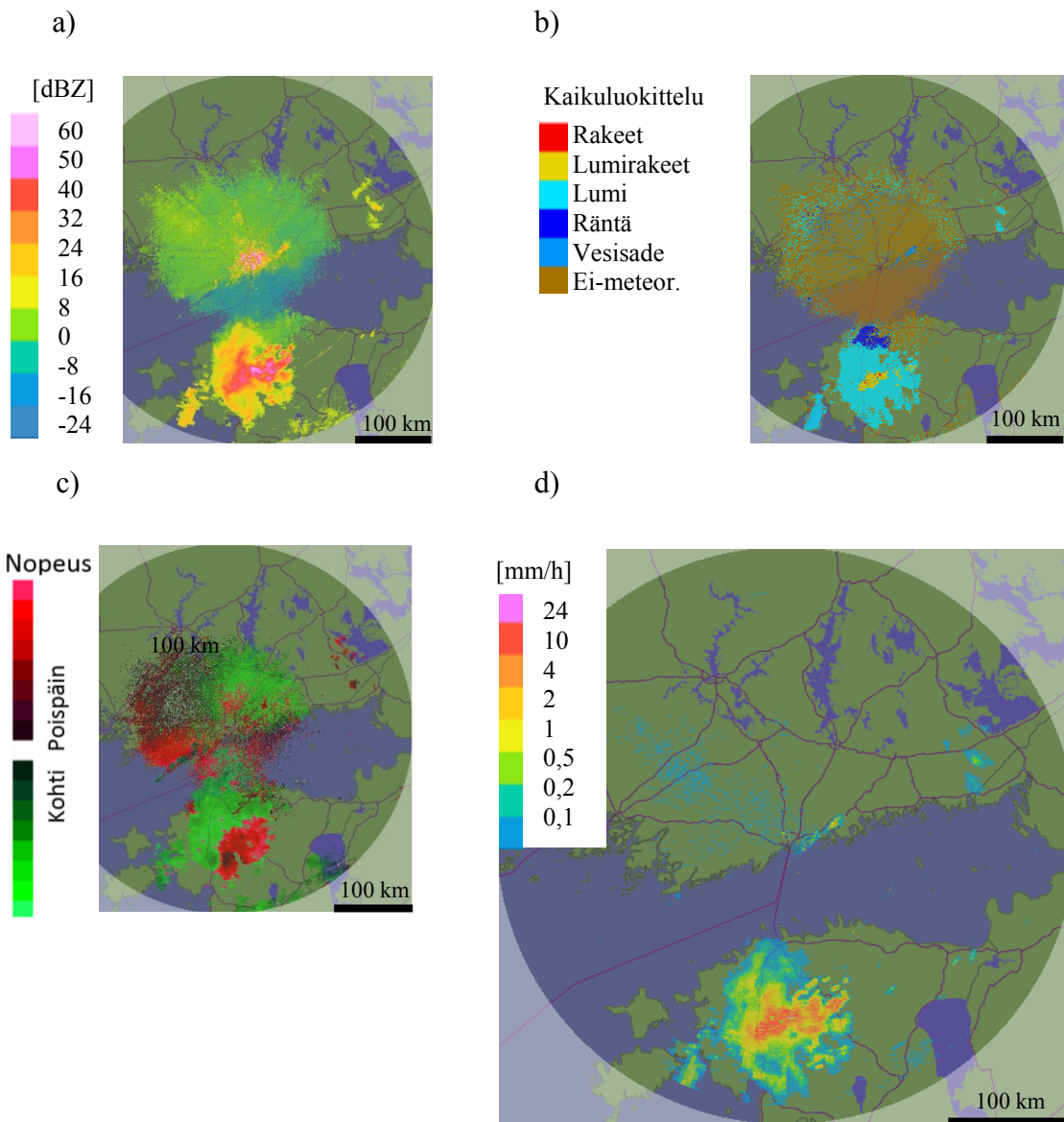
Toinen merkittävä virhekaikujen aiheuttaja on tutkasignaalin epätavallinen taipuminen eli kanavoituminen (Rinehart 2004). Säätila voi vaikuttaa siihen, miten signaali kulkee ilmakehässä. Tämä voi johtaa signaalin taipumiseen maan pinnalle, josta aiheutuu maakaikuja. Maakaiut eivät siis ilmene aina samassa paikassa. Kuten jo mainittu, usein maakaiut pystytään tunnistamaan Doppler-suodattimen avulla, mutta välillä maakaiuillekin havaitaan nopeus, jolloin ne on vaikea poistaa.

2.7 Sääutkajoinen sadetuote

Valmista tulkintaa tutkamittauksista kutsutaan sadetuotteeksi. Sadetuotteessa ilmakehässä mitattu sironta on yleensä muutettu sateeksi maan pinnalla. Sääutka mittaa sirontaa napa-koordinaatistossa, mutta valmis sadetuote esitetään yleensä karteesisessä koordinaatistossa. Jos tehdään useamman tutkan yhdistelmä eli komposiitti, on tärkeää tehdä se saumattomasti. Komposiittien saumat aiheuttavat epäjatkuvuutta ja vaikeuttavat sadealueiden analysointia. Mittausten alueellinen resoluutio on yleensä neliökilometrin luokkaa (Wang et al. 2015) ja tutkamittauksia käytetään yleensä 250 km säteellä tutkasta (Saltikoff et al. 2010).

Mittausten ajallinen resoluutio on yleensä 5 – 10 minuutin luokkaa (Wang et al. 2015) eli se on hyvä esimerkiksi kerran vuorokaudessa tarkistettaviin sademittareihin nähden. Tutkamittauksen avulla voidaan kuitenkin arvioida vain sadannan hetkellistä intensiteettiä. Sadannan intensiteetti voi muuttua lyhyenkin ajan sisällä merkittävästi (Michaelides et al. 2009). Eri-tyisesti lyhyissä ja nopealiikkeisissä sateissa vain hetkellisen intensiteetin mittaaminen ei kuvaa edustavasti todellista sademäärää, sillä sade voi liikkua viiden minuutin aikana pois mittaustilavuudesta.

Kuvassa 6 on esitetty mitattu tutkaheijastavuustekijä, kaikuluokittelijan luokitukset kaiuille, tutkalla mitattu säteensuuntainen nopeuskenttä ja Ilmatieteen laitoksen operatiivinen sadetuote samalta ajanhetkeltä. Kuvasta huomataan, että tutkan ympärillä on havaittu paljon kai-kuja, jotka ovat johtuneet muusta kuin sateesta ja kaikuluokittelija on tunnistanut ne hyvin. Varsinainen isompi sadealue on havaittu Viron puolella ja sen keskuksessa on voinut olla jopa rakeita.



Kuva 6. Kuvissa on esitettyä (a) tutkaheijastuvuustekijä, (b) kaikuluokittelijan luokittelu kaiuille, (c) tutkalla mitattu säteensuuntainen nopeuskenttä sekä (d) valmis Ilmatieteen laitoksen operatiivinen sadetuote.

3 Aineistot

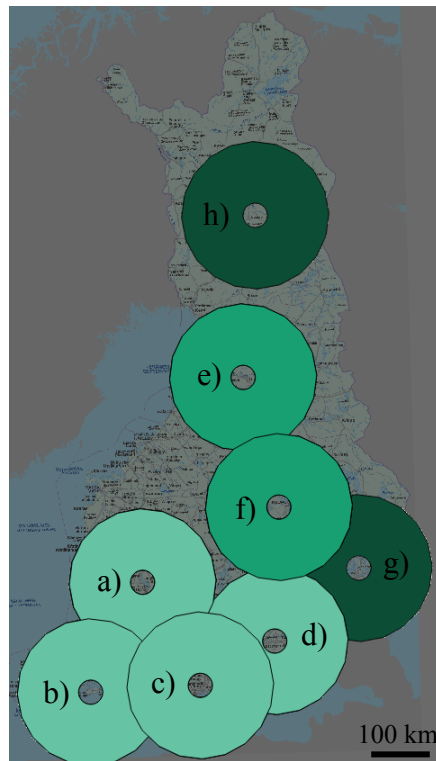
3.1 Tutkimusalue ja työn raja

Tässä työssä on tutkittu vuosina 2013 – 2016 tutkalla mitattuja sadannan intensiteettejä pääasiassa Suomen alueella. Osa havainnoista on tehty Venäjän puolella eli entisen Karjalan alueella. Tämä johtuu siitä, että Anjalankosken ja Kesälahden tutkien 120 km säde ylittää Venäjän puolelle, eikä näitä alueita rajattu erikseen pois. Ilmastollisesti Karjalan ilmasto vastaa Suomen ilmastoa, joten havaintojen pois jättämiselle ei ollut perusteita. Työ on rajattu käsittelemään vesisadetta ja rakeita kesällä ja syksyllä eli toukokuusta lokakuuhun.

Sademääriä on tutkittu pysyvän maantieteellisen sijainnin suhteen eli Eulerisesta näkökulmasta. Se tarkoittaa, että on seurattu sateen intensiteetin kehittymistä yhdessä pisteessä. Silloin yhden hilapisteen yli on voinut kulkea monta erillistä sadealuetta tai kertynyt sademäärä on voinut syntyä yhden sadealueen sisällä. Itse sadealueita ei siis ole seurattu.

Tarkka tutkimusalueen koko vaihtelee vuosittain sen mukaan, kuinka monta kaksoispolariisaatiotutkaa on ollut käytössä. Alueen raja on esitetty kuvassa 7. Kesällä 2013 tutkamittauksia on käytetty neljältä tutkalta eli Anjalankosken, Ikaalisten, Korppoon ja Vantaan tutkilta. Kesällä 2014 mukana on ollut kuusi tutkaa eli edellisten lisäksi mukana ovat Kuopion ja Utajärven tutkat. Kesällä 2015 ja 2016 käytössä olevia tutkia on ollut 8 eli mukaan on otettu vielä Kesälahden ja Luoston tutkat. Petäjäveden tutka on myös ollut operatiivisessa käytössä kesällä 2016, mutta sen ylimpien korkeuskulmien mittaaminen on ollut hieman erilainen kuin muilla tutkilla, joten se on jätetty tutkimuksesta pois.

Tässä työssä mittauksia tarkastellaan vain 20 – 120 km etäisyydellä lähimmästä tutkasta, jotta saataisiin mahdollisimman laadukkaita tutkamittauksia. Kuten on jo aiemmin mainittu, lähellä tutkaa on yleensä niin paljon erilaisia häiriökaikuja, että varsinaista sadetta on vaikea havaita. Kaukana tutkasta tutkasignaali on niin korkealla, ettei se välttämättä kerro sateesta maanpinnalla. Lisäksi merialueet on jätetty pois, koska meriliikenne ja vedenpinta aiheuttavat paljon vaikeasti tunnistettavia häiriökaikuja (Saltikoff 2011).



- a) Ikaalinen
- b) Korppoo
- c) Vantaa
- d) Anjalankoski
- e) Utajärvi
- f) Kuopio
- g) Kesälahti
- h) Luosto

Kuva 7. Tutkimusalueen rajaustus riippuu tarkasteltavasta vuodesta. Vuonna 2013 mukana on ollut vaalean vihreä alue ja vuonna 2014 vaalean vihreä ja keskivihreä. Vuosina 2015 ja 2016 mukana on ollut koko värillinen alue. Kuvassa on myös kerrottu tutkien nimet (a - h). Harmaiden alueiden lisäksi merialueet on jätetty pois tarkastelusta.

3.2 OSAPOL-sadetuote

Tässä työssä sateen hetkelliset intensiteetit saadaan tutkapohjaisesta sadetuotteesta, joka on kehitetty OSAPOL (Optimaaliset sademittaukset kaksoispolarisaatiosäätutkalla) -projektin aikana (Tekes 2015). Sadetuotetta käytetään alustavien kertymien ja liikeinterpoloitujen sadekenttien laskemisessa. OSAPOL-sadetuote eroaa Ilmatieteen laitoksen operatiivisesta sadetuotteesta. Tärkein ero Ilmatieteen laitoksen operatiiviseen sadetuotteeseen on säätutkien kaksoispolarisaatio-ominaisuuksien laajempi käyttöönotto ja mittausgeometrian muuttuminen. Tässä alaluvussa kerrotaan miten OSAPOL-sadetuote on tehty.

Kunkin tutkan mittausalkion tutkaheijastavuustekijä on ensin muunnettu vastaamaan tutkaheijastavuustekijää maanpinnalla VPR-korjauksen avulla. Käytetty VPR-korjaus (Koistinen ja Pohjola 2014) on sama, kuin Ilmatieteen laitoksen operatiivisessa sadetuotteessa. OSAPOL-sadetuotteessa sateen intensiteetti lasketaan neljää korkeuskulmaa käyttäen (Pulkinen 2017). Kussakin hilaruudussa eri korkeuskulmalta saadut sateen intensiteetit keskiarvoistetaan pystysunnassa käyttäen Gaussista painofunktiota.

OSAPOL-tuotteessa sateen intensiteetti on määritelty tutkaheijastavuustekijän (Z) ja kaksoispolarisaatiota hyödyntävän ominaisvaihe-eron (K_{dp}) avulla. Muunnokseen on käytetty kaavoja 4 ja 5 Suomen olosuhteisiin sovitettuina. Sateen intensiteetti on laskettu ominaisvaihe-eron mukaan, jos samanaikaisesti tutkaheijastavuustekijä on suurempi kuin 30 dBZ,

K_{dp} on suurempi kuin 0,3 ja kaikuluokittelijan mukaan tutkamittaus sisältää vettä eli mitauskorkeus on sulamiskerroksen alapuolella. Muulloin sateen intensiteetti on laskettu käyttäen tutkaheijastavuustekijää.

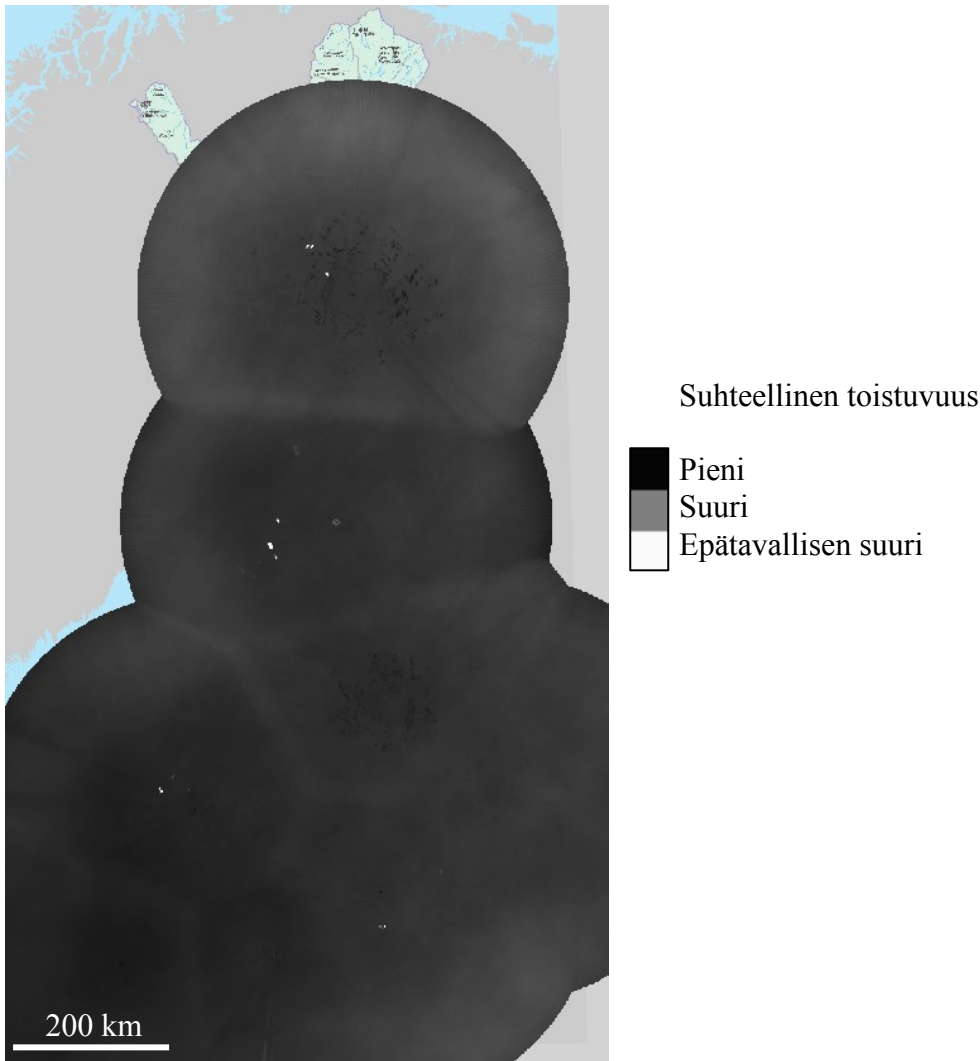
OSAPOL-sadetuotteessa häiriökaikujen poistamiseksi on käytetty neljää eri menetelmää. Signaalin esikäsittelyyn liittyvät menetelmät eli kaikujen esiluokittelu, Doppler-suodatus ja kaikuluokittelu on esitelty tarkemmin luvussa 2. Lisäksi on käytetty sumealla logiikalla toimivaa Rack-ohjelman AnDRe-luokittelijaa (Peura 2015). Vaimennuskorjaus on toteutettu mikroaallon vaihe-eroon pohjautuvalla kaksoispolarisaatioalgoritmillä (Gu et al. 2011).

Sadetuote on esitetty koko Suomen kattavana hilana. Hilanruutujen koko on 1 km x 1 km ja hila on 707 ruutua leveä ja 1276 ruutua korkea. Hilassa on aukkoja silloin, kun tutka on ollut pois päältä esimerkiksi huolto- tai sähkökatkon takia. Aukot on korvattu arvolla 0 silloin kun on laskettu alustavia kertymiä ja puuttuvaa arvoa kuvaavalla ”nan” merkinnällä silloin, kun on laskettu liikeinterpoloidut sadekentät. Muunnos tutkamittauksista maanpintahilaan tehdään laskemalla painotettu keskiarvo kaikista maanpintahilaruudun alueelle osuvista mitausalkioista (Sharif ja Ogden 2014).

OSAPOL-sadetuotteelle on tehty hyvin suppea laatuanalyysi vertaamalla intensiteeteistä laskettuja tunnin sadekertymiä 20 – 120 km etäisyydellä tutkasta sijaitsevien sademittarien antamiin lukemiin (Pulkkinen 2017). Sen perusteella huomattiin, että OSAPOL-sadetuotteen arvioimat sateen intensiteetit eivät ole keskimäärin liian isoja tai pieniä.

Lisäksi sadekentistä on laskettu staattiset kaikukartat (Pulkkinen 2017), joiden avulla voidaan havaita alueet, joissa on mitattu epätavallisen usein tutkakaikuja. Tällaiset alueet voivat johtua esimerkiksi tuulivoimaloista. Kaikukartta kuvaa tietyssä pisteessä suhteellista toistuvuutta tutkaheijastavuustekijälle, joka sateen intensiteetiksi muutettuna ylittää 0,1 mm/h. Suhteellinen toistuvuus tarkoittaa kynnyksen ylittävien havaintojen suhteuttamista kaikkien tutkamittausten lukumäärään tarkastelujakson aikana eli tässä työssä toukokuusta lokakuuhun kullekin vuodelle erikseen.

Kuvassa 8 on esitetty esimerkki vuoden 2016 kaikukartasta. Kuvassa näkyy pistemäisiä valkeita kohteita. Suuri osa näissä pisteissä havaituista kaiuista on todennäköisesti aiheutunut muusta kuin vesisateesta, koska ei ole mitään syytä olettaa, että pienellä alueella sataisi todella paljon useammin kuin keskimäärin. Staattisesta kaikukartasta havaitaan myös, että kynnyksen ylittävän tutkaheijastavuustekijän havaitsemisen todennäköisyys kasvaa etäisyyden tutkalta kasvaessa. Erityisen hyvin tämä näkyy Luoston tutkalla, joka on tutkista pohjoisin (kuva 7 h). Harmaa väri vaalenee, kun tutkakaikuja on havaittu enemmän. Näin ei todellisuudessa pitäisi olla ja virhe saattaa johtua VPR-korjauksen tuottamista virhearvioista suurilla etäisyyksillä (Koistinen ja Pohjola 2014).



Kuva 8. Staattinen kaikukartta vuodelta 2016, missä on otettu huomioon kaiut, jotka sateen intensiteetiksi muunnettuna ylittävät 0,1 mm/h. Musta väri kuvaa alueita, joilla on havaittu harvoin tutkakaikuja ja harmaa alueita, joilla niitä on havaittu usein. Kuvassa näkyvissä valkeissa kohteissa on havaittu erittäin usein tutkakaikuja, joten ne johtuvat todennäköisesti muusta kuin vesisateesta.

Mittausten ajallinen tihentäminen eli liikeinterpolointi on osa OSAPOL-sadetuotetta (Pulkkinen 2017). Liikeinterpolointi tarkoittaa aika-askeleen, josta ei ole mittauksia, hetkellisten intensiteettien laskemista liikekentän avulla. Interpolointi on tehty Optical Flow-menetelmän tuottaman liikekentän avulla (Wang et al. 2015). Sadekenttien interpolointi on erityisen tärkeää nopealiikkeisten konvektiivisten sadealueiden tarkastelussa. Esimerkiksi, jos sade liikkuu nopeudella 10 m/s, mikä on hyvin tyypillinen nopeus konvektiiviselle sateelle (Kilpeläinen 2006), se ehtii viiden minuutin aikana kulkea kolmen kilometrin matkan. Silloin sade voi jäädä havaitsematta useassakin hilaruudussa. Suurimmat intensiteetit saatetaan kuitenkin kadottaa sadekenttiä interpoloidessa, koska interpolointi aiheuttaa aina ääriarvojen tasoittumista.

3.3 Rankkasateiden sademäärät

Tutkimuksessa on kerätty sadetapahtumia, joissa sademäärä ylittää keskimäärin kerran kolmessa vuodessa toistuvan sademäärän. Käytetyt toistuvuusluokat on valittu OSAPOL-projektissa mukana olleiden vesialan yritysten toiveiden mukaan. Näitä sadetapahtumia kutsutaan tässä työssä rankkasateeksi. Rankkasateiden sademäärärajoina käytettiin RATU (rankkasateet ja taajamatulvat) -hankkeessa (Aaltonen et al., 2008) yhden neliökilometrin aluesadannalle määritettyjä sademääriä. RATU-hankkeen rankkasaderajat on esitetty taulukossa 1. Harvinaisuusluokat on tässä työssä määritetty siten, että esimerkiksi kerran kolmessa vuodessa toistuvaan luokaan kuuluvat ne sadetapahtumat, jotka ylittävät kerran kolmessa vuodessa toistuvan sademäärän, mutta alittavat kerran viidessä vuodessa toistuvan sademäärän. Kaikki paitsi kestoluokan pisimmän toistuvuusajan harvinaisuusluokka on tehty tällä periaatteella. Pisimmän toistuvuusajan harvinaisuusluokalle ei ole määritetty ylärajaa.

Taulukko 1. RATU-raportissa määritellyt sademäärät [mm] eripituksille rankkasateille eri toistuvuuksilla.

Kesto	5 min	15 min	30 min	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h
Toistuvuus [a]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
3	5,5	10	13	17	25	31	38	45
5	6,5	11	15	19	27	34	42	50
10	7	14	18	23	32	40	47	60
50	9	19	26	30	45	54	65	79
100	10	20	27	31	49	58	72	94
500	-	-	-	-	67	79	94	115

Yleensä sadetapahtumien harvinaisuutta tutkittaessa käytetään Katajiston (1969) pistesadannalle määritettyjä sademääriä, mutta koska tässä tutkimuksessa on mitattu aluesadantaa sää-tutkilla, on parempi käyttää RATU-hankkeessa aluesadannalle määritettyjä sademääriä. Molemmat tutkimustulokset ovat lähellä toisiaan, kun tarkastellaan usein toistuvia sateita. Esimerkiksi kerran kolmessa vuodessa toistuvan sateen sademäärä on RATU-raportin mukaan 5,5 mm ja Katajiston mukaan 5,7 mm. Harvinaisempia sateita tarkasteltaessa erot ovat jo merkittäviä, koska voimakkaan sateen intensiteetin todennäköisyys pienenee pinta-alan kasvaessa. Esimerkiksi kerran 50 vuodessa toistuvan viiden minuutin sateen sademäärä on RATU-raportin mukaan 9 mm ja Katajiston mukaan 11,8 mm.

3.4 Olomuototuote

Suomen ilmastolle on tyypillistä, että toukokuusta lokakuuhun välillä voi sataa niin lunta, räntää kuin vettäkin. Sateen olomuoto määräytyy ilman kosteudesta ja lämpötilasta. Tyypillisesti sadetta ei havaita, jos ilman kosteus on pienempi kuin 30 %. Yleensä sade tulee lumena, jos lämpötila on nollan alapuolella ja vetenä, jos lämpötila on yli yhden asteen. Mikäli ilman kosteus on pieni, voi lumisade säilyä sulamattomana, vaikka lämpötila olisi jopa viisi astetta nollan yläpuolella. Räntää eli osaksi sulanutta lunta sataa silloin, kun ilman kosteus on korkea ja lämpötila on vähän nollan yläpuolella. (Koistinen ja Saltikoff 1998.)

Jotta voidaan keskittyä vain vesisateeseen, rankkasateelle täytyy määrittää sateen olomuoto. Koistinen ja Saltikoff (1998) ovat tutkineet sateen olomuotoja ja kehittäneet sateen olomuodon tunnistamiseen kaavan. Sateen olomuodon todennäköisyyden (P_{rain}) kaava on

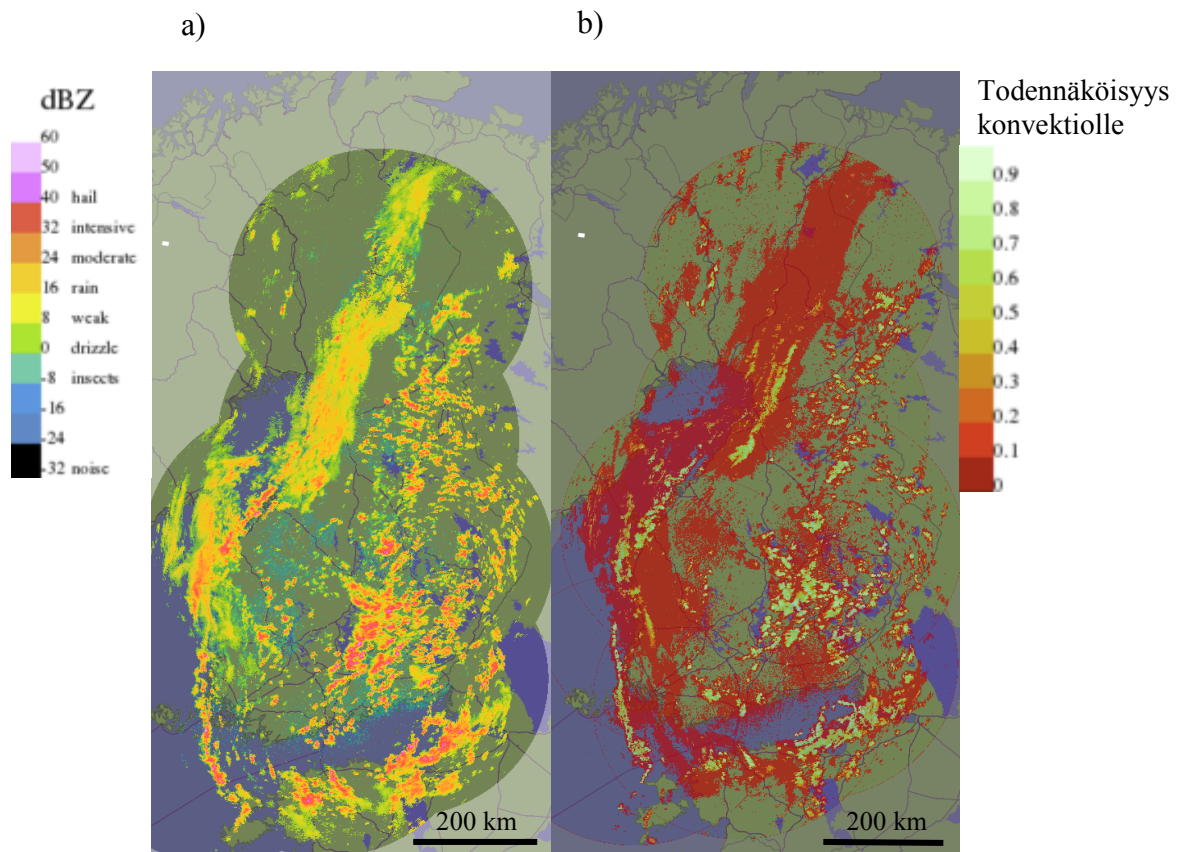
$$P_{rain} = \frac{1}{1 + e^{(22 - 2.7T - 0.20RH)}}, \quad (6)$$

jossa T on lämpötila [$^{\circ}$ C] ja RH ilman kosteus [%] kahden metrin korkeudessa. Olomuototiedot ovat saatavissa 10 km x 10 km hilassa yhden tunnin välein. Ne perustuvat sääasemien mittauksiin ja ne on interpoloitu koko Suomen alueelle cokriging-menetelmän avulla (Pirinen 2017). Kustakin hilaruudusta löytyy siis arvo jokaiselle tunnille, joka kertoo mitä olomuotoa hilaruudun sade todennäköisesti on. Jos vesisateen todennäköisyys on alle 30 %, on sade luokiteltu lumisateeksi. Jos todennäköisyys on 30 – 70 %, on sade luokiteltu rännäksi ja yli 70 % arvolla sade luokitellaan vesisateeksi.

3.5 Sadetyyppi

Sateen tyyppiä hyödynnetään toisistaan riippumattomien rankkasateiden määrittämiseen. Tässä työssä sadetyyppi on määritetty todennäköisyytenä konvektiiviselle sateelle perustuen sääutkapohjaiseen sadetyyppituotteeseen (Peura 2017). Sadetyyppi määräytyy alueen pystyprofiilin, tutkaheijastavuustekijän arvon ja sen huipukkuuden mukaan. Huipukkuudella tarkoitetaan sitä, miten nopeasti tutkaheijastavuustekijä muuttuu ympäristöön nähden. Sadetyyppi lasketaan Ilmatieteen laitoksen operatiivisesta sadetuotteesta eli sen sademääräarvio ei aina vastaa OSAPOL-sadetuotteen sademääräarviota. Siten myös todennäköisyys konvektiiviselle sateelle voi olla hieman erilainen, kuin jos arvio perustuisi OSAPOL-sadetuotteeseen. Sadetyyppituotteeseen ei ole myöskään implementoitu kunnollista häiriökaikujen poistoa eli se voi havaita sadetta sellaisissakin paikoissa, missä ei oikeasti sada (Peura 2017).

Kuvassa 9 on esitetty Ilmatieteen laitoksen sadetuote dBZ-arvona tietyssä ajan hetkenä ja sadetyyppituote samalta ajanhetkeltä. Suurin osa (kuva 9 a) punaisella dBZ-kuvassa näkyvistä soluista on konvektiivista sadetta. Pohjanmaalta lappiin on rintamasateelta vaikuttava sadealue. Myös sen keskiosassa tulkinta-algoritmi antaa konvektiivista sadetta, vaikka näin ei todennäköisesti ole. Voi siis olla, että tuote arvioi sateen liian helposti konvektiiviseksi. Toisaalta kuvasta voidaan myös nähdä, että konvektiivisten sadealueiden reunoja on tulkittu rintamasateiksi. Tämä on sikäli oikea tulkinta, että hiipuvissa kuurosateissa nopea nousuliike on päättynyt.



Kuva 9. Kuvassa on (a) mitattu tutkaheijastavuustekijä ja (b) samalle hetkelle laskettu sadetyyppituote. Värit kuvaavat (a) sateen voimakkuutta ja (b) konvektion todennäköisyyttä.

4 Menetelmät

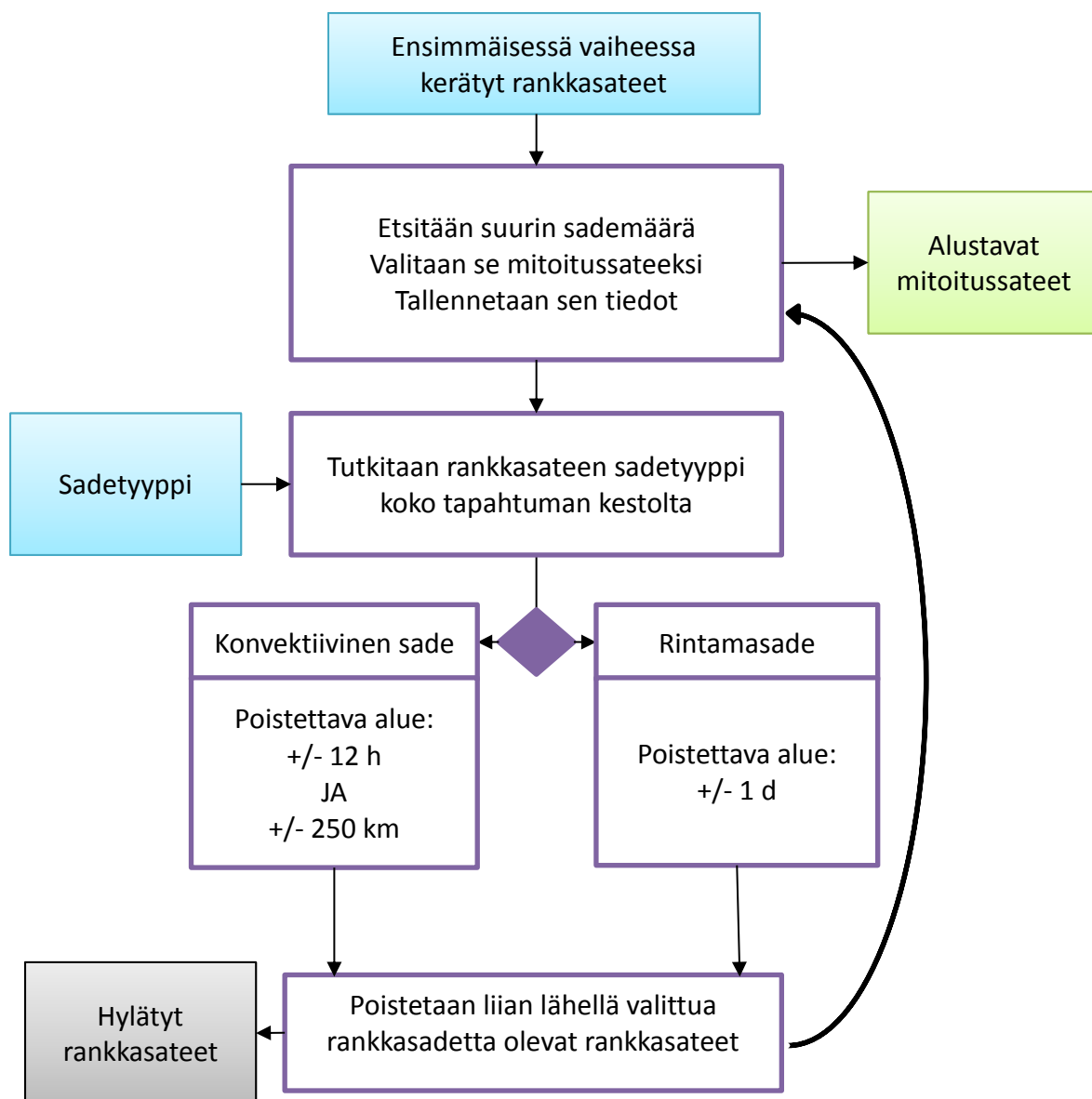
4.1 Rankkasateiden alustava valitseminen

Työn ensimmäisessä vaiheessa karsitaan aineistoa siten, että se on hieman helpommin käsiteltävissä (kuva 1 luvussa 1). Karsiminen tehdään laskemalla ensin tutkalla mitatuista intensiteeteistä viiden minuutin kertymät. Kertymistä valitaan ne sadetapahtumat, joissa ylittyy rankkasateen sademäärä ja jotka ovat vesisadetta. Kertymä on laskettu siten, että ensin viiden minuutin intensiteetit on muunnettu vastaamaan viiden minuutin sademäärää. Sademäärähilajoja on asetettu jonoksi toukokuusta alkaen, kunnes on saavutettu haluttu kesto viidestä minuutista 24 tuntiin. Kun haluttu kesto on saavutettu, niin tuon kertymäajan kertymä on laskettu viiden minuutin sademäärästä. Yhteenlasketusta kertymähilasta on tarkistettu onko siinä rankkasateita eli hilaruutuja, joissa ylittyy rankkasateen sademäärä. Sen jälkeen, kun rankkasateet on löydetty, hilajonosta on poistettu jonon ensimmäinen ja perään on lisätty uusi seuraavan aika-askeleen hila, jolloin tavoiteltu kesto taas täyttyy ja voidaan laskea kertymä ja etsiä rankkasateita uudestaan. Näin kertymän laskemisesta saadaan liukuva, jolloin se ei ole riippuvainen esimerkiksi vuorokauden vaihtumisesta. Rankkasateiden etsimistä jatketaan, kunnes koko vuosi on käyty läpi.

Ennen rankkasateiden tallentamista niiden olomuoto on tarkistettu. Tarkistus tehdään olomuototuotteen avulla katsomalla olomuototuotteen arvo poimittua rankkasadetta vastaavasta kohdasta. Jos yhden viiden minuutin jakson olomuoto on lumi- tai räntäsadetta, rankkasade hylätään. Jos rankkasade on vesisadetta, niin sen sijainti, kesto ja sademäärä tallennetaan. Lisäksi valituista rankkasateista poistetaan tapahtumat, jotka ovat sellaisella alueella, missä tutkaheijastuvuustekijä, joka sateeksi muutettuna ylittää 0,1 mm/h, on havaittu epätavallisen usein. Alueet on etsitty visuaalisen tarkastelun perusteella kaikukartoista, jotka on tuotettu osana OSAPOL-projektia. Kaikukartat on esitelty luvussa 3.2.

4.2 Riippumattomien mitoitussateiden poimiminen

Työn toisessa vaiheessa otoksista tehdään riippumattomat. Toisen vaiheen kulku on esitetty vuokaaviona kuvassa 10. Riippumattomien rankkasateiden valinta tapahtuu käytännössä siten, että edellisessä vaiheessa valitusta rankkasadeotoksesta poimitaan suurimmat sadetapahtumat ”puumaisesti”. Puumainen poimiminen tarkoittaa sitä, että ensin valitaan joukon harvinaisin rankkasade, poistetaan sen lähellä olevat rankkasateet ja valitaan joukosta uudestaan kaikkein harvinaisin rankkasade. Sateen tyyppi, joka haetaan sadetyyppituotteen avulla, määrittää mitkä rankkasateet poistetaan valitun tapahtuman ympäriltä. Rankkasateiden valitsemista ja poistamista toistetaan, kunnes aineistossa ei ole enää yhtään rankkasadetta jäljellä.



Kuva 10. Riippumattomien rankkasateiden valitseminen on tehty puumaisesti eli otoksesta on valittu aina harvinaisin rankkasade, sen lähellä olevat rankkasateet on poistettu ja otoksesta on uudestaan valittu uusi harvinaisin rankkasade. Valitut rankkasateet on tallennettu erikseen. Laatikot sinisellä pohjalla kuvaavat käytettyjä aineistoja, harmaalla pohjalla hylätyjä rankkasateita ja vihreällä mitoitussateita. Violetilla ympyröidyt laatikot kuvaavat työn toisen vaiheen osavaiheita.

Riippumattomien sadetapahtumien poistoon kehitettyä menetelmää ei kirjoittajan tietojen mukaan ole sovellettu muissa säätutkapoljaisissa tutkimuksissa. Sadetapahtumien riippumattomuuden määrittelyminen on vaikeaa, sillä ne voivat olla riippuvia ajan ja sijainnin suhteen. Ongelmana on, ettei tiedetä miten yhden sadealueen poistaminen vaikuttaa toiseen sadealueeseen. Sademittaripohjaisesti riippumattomuutta ei välttämättä määritellä ollenkaan. Yleisimmin sademittaripohjaisissa rankkasadeanalyysissä käytetään vuosimaksimiaikasarjoja ja niihin perustuva menetelmiä (Adlouni ja Ouarda 2010). Vuosimaksimiaikasarjojen

käyttö pohjautuu siihen, että otoksen havainnot ovat niin kaukana toisistaan, etteivät ne voi olla samasta lähteestä. Niissä kultakin vuodelta on valittu harvinaisin tapahtuma ja tapahtumat on koottu aikasarjaksi.

Tutkapohjaisia laadukkaita mittauksia ei usein ole kovin pitkiä tasalaatuisia aikasarjoja, mikä vaikeuttaa riittävän ison otoksen keräämistä. Tutkapohjaisiin aineistoihin on sovellettu vuosimaksimiaikasarjoihin perustuvia menetelmiä siten, että hilapisteille lasketaan tutkamittauksista vuosimaksimeihin perustuva aikasarja (Durrans et al. 2002; Overeem et al. 2009). Menetelmä ei kuitenkaan ota huomioon alueellista riippuvuutta kovin hyvin. Sama sadealue on saattanut aiheuttaa maksimisadannan läheisissä soluissa. Overeem et al. (2009) käyttivät jokaista hilaruutua yksittäisenä mittauspisteenä, kun taas Durrans et al. (2002) valitsivat vain tietyt hilapisteet, joiden etäisyys oli 40 km. Kumpikin menetelmä käyttää liian lähellä sijaitsevia hilapisteitä, jotta ne voitaisiin katsoa toisistaan riippumattomiksi. Lisäksi, jos käytetään 40 km päässä toisistaan olevia hilapisteitä, myös kaikkein harvinaisimmat sadetapahtumat saattavat jäädä huomaamatta, mikäli ne osuvat hilapisteiden väliin.

Tutkapohjaisista mittauksista riippumattomat sadetapahtumat voidaan myös määrittellä oliopohjaisesti. Oliopohjainen sadetapahtumien määrittely tarkoittaa sadealueiden tunnistamista ja seuraamista eli sadealueesta tehdään olio. Oliolla tarkoitetaan yhtenäistä joukkoa hilaruutuja, jossa ylittyy haluttu intensiteetti. Sadeoliolle määritellään alku ja loppu sekä alue, millä se vaikuttaa kullakin ajan hetkellä. Sademittareiden avulla sadealueiden oliopohjainen seuraaminen ei ole ollut mahdollista, sillä sademittariverkko on liian harva. Jokin sadealue voi olla vain muutaman neliökilometrin kokoinen, jolloin sen osuminen sademittariin on hyvin sattumanvaraista. Oliopohjaista sadealueiden tunnistamista on käytetty muun muassa ukkosrajuilmojen seuraamiseen (Rossi et al. 2015). Olioidenkin riippumattomuus on hankala määrittellä, sillä kaksi lähekkään kulkevaa sadeoliota voivat olla meteorologisesti toisistaan riippuvaisia, vaikka ne eivät koskaan liittyneet toisiinsa.

Tässä työssä riippumattomuutta on lähdetty määrittelemään sen mukaan, kuinka pitkään minkäkin tyyppinen säärintama kestää Suomen olosuhteissa. Sateet on jaettu kahteen tyyppiin, laaja-alaiset rintamasateet ja konvektiiviset sateet. Jälkimmäiset ovat usein ryhmityneet jokseenkin kaoottisesti (esim. kuva 9 Kainuussa), mutta voimakkaimmat konvektiiviset sateet esiintyvät yleensä nauhamaisina muodostelmina, joiden pituus voi olla satoja kilometrejä (Punkka 2002). Ne kestävät Suomen olosuhteissa keskimäärin 11 tuntia, mutta voivat maksimissaan kestää yli 40 tuntia. Laaja-alaiset rintamasateet puolestaan kuuluvat synoptisen mittakaavan sääjärjestelmiin eli ovat tavallisesti 100 – 400 km leveitä, mutta voivat olla jopa yli 3000 km pitkiä (Karttunen et al. 2008). Ne voivat kestää useita päiviä.

Laaja-alaisen rintamasateen tapauksessa kaikki rankkasateet koko Suomen alueelta, jotka ovat ajan suhteen lähempänä kuin yhden vuorokauden tapahtuman alusta tai lopusta, katsotaan olevan liian lähellä valittua rankkasadetta. Jos tarkastellaan 24 tunnin rankkasateita, poistetaan rankkasateita kolmen vuorokauden ajalta. Konvektiiviset sateet ovat lyhytkestoisempia ja pienialaisempia kuin laaja-alaiset rintamasateet, joten rankkasateita voidaan poistaa pienemmältä alueelta. Konvektiivisen sateen tapauksessa poistetaankin 250 km säteellä kaikki 12 tuntia ennen tarkasteltavaa tapahtumaa ja 12 tuntia tarkasteltavan tapahtuman jälkeen sattuneet rankkasateet. Tässä työssä oletuksena on, että sadealueen rankin sade, eli poimittu rankkasade, osuu keskelle sadealuetta niin ajallisesti kuin sijainninkin puolesta.

Sateen tyyppi tunnistetaan luvussa 3 esitellyn sadetyyppituotteen avulla. Sopivaksi rajaksi konvektiivisen sateen tunnistamiseen päätettiin 30 % todennäköisyys sen perusteella, että myös intensiteetiltään heikko konvektiivinen sade luokiteltaisiin konvektiiviseksi. Jotta sade määriteltäisiin konvektiiviseksi, täytyy jokaisen hetken rankkasateen aikana olla yli 30 % todennäköisyydellä konvektiivista sadetta, jotta tapaus lasketaan konvektiiviseksi. Jos yksikin aikasarjan arvo alittaa 30 % todennäköisyyden, lasketaan sade laaja-alaiseksi rintamasateeksi. Näin tehdään, koska halutaan varmistua siitä, että laaja-alaisia rintamasateita ei luokitella konvektiivisiksi sateiksi.

4.3 Liikeinterpolointi ja uusien rankkasateiden valitseminen

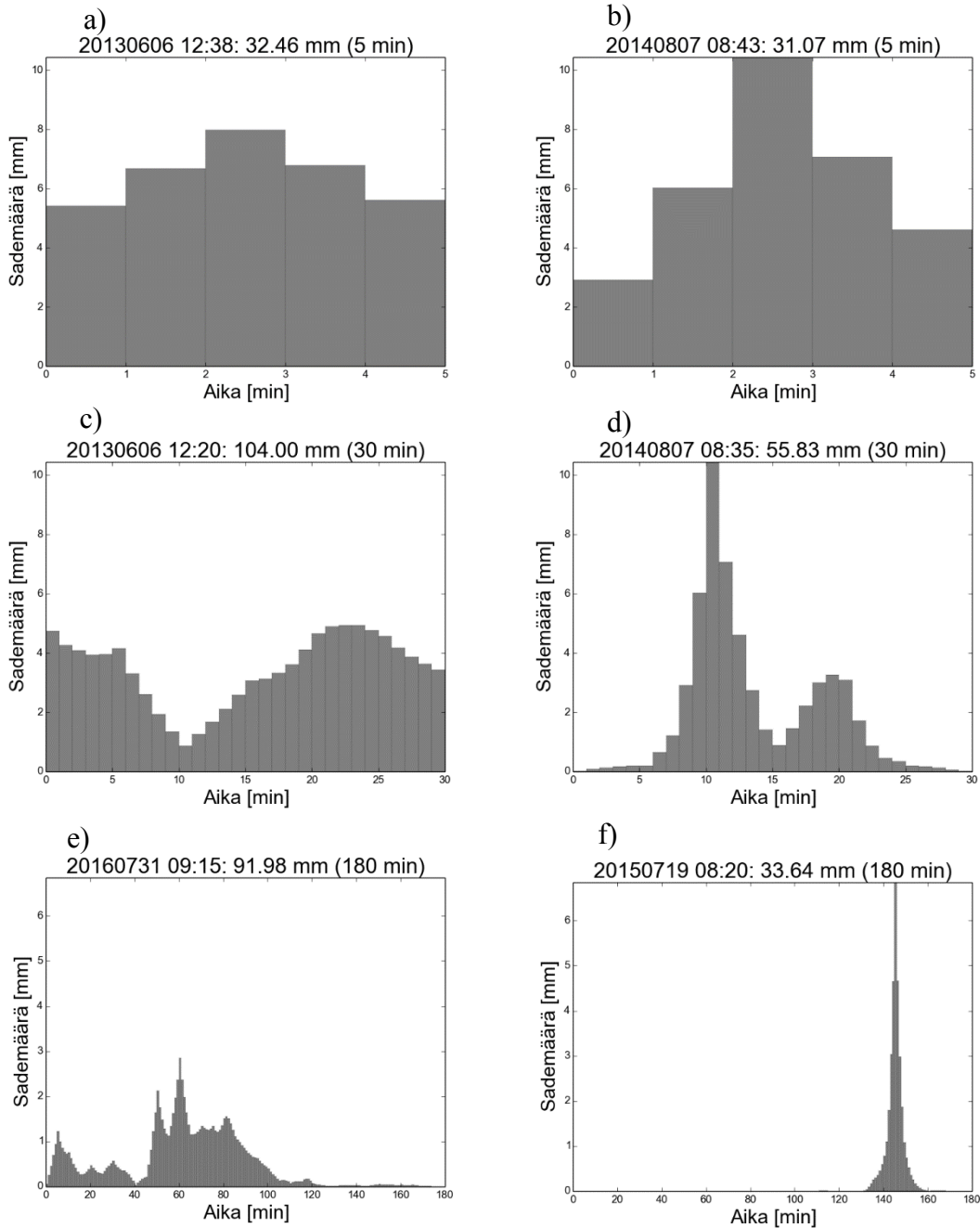
Rankkasateiden valinnan jälkeen, työn viimeisessä vaiheessa, poimituille riippumattomille rankkasateille laskettiin liikeinterpoloidut sadekentät. Liikeinterpoloidut sadekentät on laskettu yhden minuutin välein eli viiden minuutin mittausten väliin on laskettu aina neljä sadekenttää. Liikeinterpolointimenetelmä on esitelty tarkemmin luvussa 3.2. Interpoloitujen sadekenttien avulla jokaiselle pisteelle ja sen ympäristölle on laskettu uudet kertymät. Uusista kertymistä on etsitty uudestaan suurimmat sademäärät 30 km säteellä alkuperäisestä maksimiarvosta, koska maksimiarvon kohta on saattanut muuttua liikeinterpoloinnin myötä. Mitoitussateet on kerätty tallentamalla sademäärä, sijainti ja aikasarja sateen hetkellisistä intensiteeteistä siinä pisteessä, josta on löydetty uusi suurin sademäärä.

Lopuksi osa mitoitussateista on käyty läpi visuaalisen tarkastelun avulla. Tarkoituksena on ollut löytää epätavanomaisesti käyttäytyvät tapahtumat, jotka eivät välttämättä johdu sateesta. Tarkastelussa on pyritty löytämään sellaisia sadealueita, jotka eivät liiku samalla tavalla kuin muut lähellä olevat sadealueet. Valituista mitoitussateista jokaiselta kestolta on aina vähintään 20 sademäärällisesti suurinta tapahtumaa tarkistettu erikseen visuaalisesti tutkakuvia katsomalla.

Lisäksi viiden minuutin rankkasateiden sijainti on tarkistettu myös ajan suhteen. Kun mitoitussateiden hetkelliset intensiteetit oli laskettu, huomattiin kaikkien viiden minuutin rankkasateiden hetkellisten intensiteettien laskevan tapahtuman alusta loppuun, jolloin niissä ei ollut juurikaan vaihtelua. Siksi viisi minuuttia kestäneille rankkasateille on laskettu interpoloidut sadekentät myös alun perin valittua rankkasadetta edeltäneelle viisiminuuttiselle. Lopullinen mitoitussade on valittu siitä kohdasta, missä peräkkäisistä minuuteista on kertynyt suurin sademäärä. Kaikissa muissa luokissa rankkasade alkaa viidellä jaollisesta minuutista, mutta viiden minuutin sateissa rankkasade voi alkaa mistä minuutista vain. Muotokirjaston on tarkoitus olla kokoelma erilaisista sadetapahtumista. Siirtämällä viiden minuutin sateen aikaikkunan paikkaa yksilöllisesti saatiin paljon monipuolisempi otos.

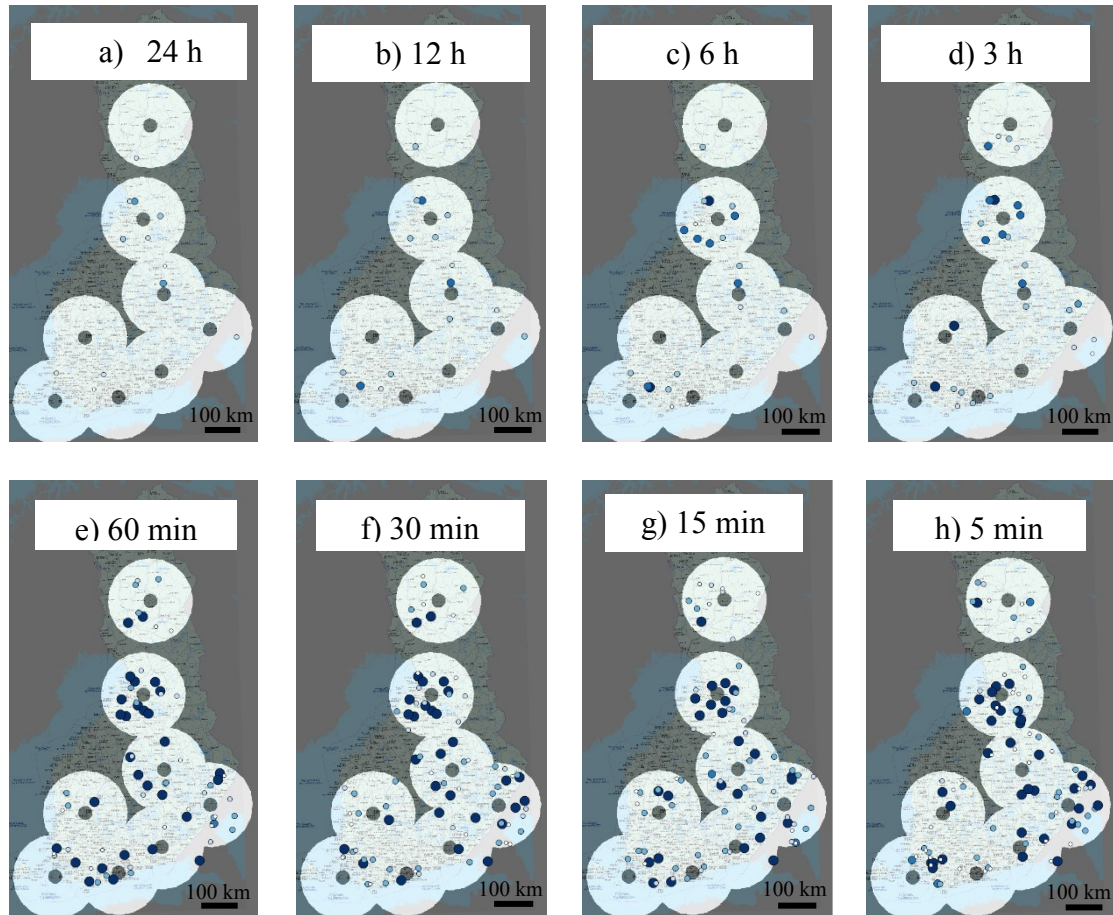
5 Tulokset

Työssä on kerätty kokoelma erilaisia vaihtuvan intensiteetin sadetapahtumia, joissa sademäärä ylittää kerran kolmessa vuodessa toistuvan sademäärän. Mitoitussateista on tallennettu niiden tapahtumisaika, sijainti, sademäärä ja aikasarja sateen hetkellisestä intensiteetistä. Kuvassa 11 on esitetty muutama esimerkki kerätyistä mitoitusateista. Kaikki mitoitusateet tulevat vapaasti saataville Ilmatieteen laitoksen Ilmasto-opaan sivuille (<https://ilmasto-opas.fi/>). Kuvista huomataan, että kertymäaikojen suurimmat sademäärät ovat erittäin isoja, kuten myös suurimmat mitatut hetkelliset intensiteetit.



Kuva 11. Esimerkkejä poimitujen mitoitusateiden aikasarjoista. (a) 5 min, (c) 30 min ja (e) 3 h kertymäjaksojen suurimmat poimitut sademäärät ja (b) 5 min, (d) 30 min ja (f) 3 h kertymäjaksojen ne tapahtumat, joissa on havaittu suurin sateen intensiteetti.

Kuvassa 12 on esitetty valittujen riippumattomien rankkasateiden sijainnit vuonna 2015. Valittujen rankkasateiden sijainnit kaikilta vuosilta löytyvät liitteestä 1. Kuvasta nähdään, että rankkasateita on havaittu tasaisesti ympäri Suomen. Lisäksi kuvasta voidaan huomata, että lyhytkestoisissa rankkasateissa on löydetty huomattavan paljon erittäin harvinaisia sadetapahtumia.



Pitkät sadetapahtumat (a, b, c, d)

- Kerran kolmessa vuodessa
- Kerran viidessä vuodessa
- Kerran kymmenessä vuodessa
- Kerran 50 vuodessa
- Kerran 100 vuodessa
- Kerran 500 vuodessa

Lyhyet sadetapahtumat (e, f, g, h)

- Kerran kolmessa vuodessa
- Kerran viidessä vuodessa
- Kerran kymmenessä vuodessa
- Kerran 50 vuodessa
- Kerran 100 vuodessa

Kuva 12. Valittujen mitoitussateiden sijainnit vuonna 2015 sadetapahtuman keston mukaan luokiteltuna. (a, b, c, d) ovat pitkäkestoiset rankkasateet (3 - 24 h) ja (e, f, g, h) lyhytkestoiset (5 - 60 min). Kuvissa oleva merkki edustaa tapahtuman toistuvuutta (Aaltonen et al. 2008).

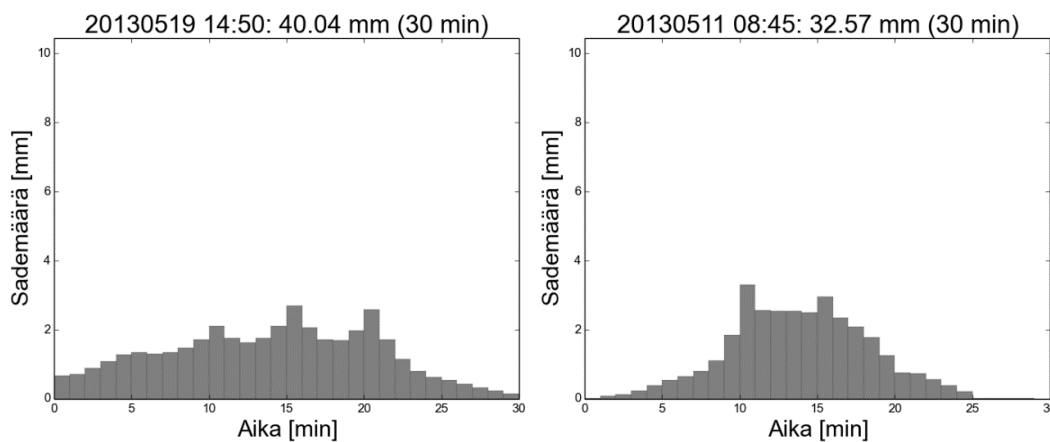
Taulukossa 2 on esitetty valittujen mitoitussateiden määrät kultakin vuodelta. Eniten riippumattomia rankkasateita on löydetty vuonna 2016, mutta 2014 riippumattomia rankkasateita on löydetty lähes yhtä paljon. Vähiten tapahtumia on kerätty 2013, mutta silloin tutkittava alue on ollut myös kaikkein pienin. Parhaiten vertailukelpoisia ovat vuodet 2015 ja 2016,

koska silloin tutkimusalueet ovat olleet saman kokoiset. Lyhytkestoisia sateita on joka vuosi löydetty selvästi enemmän kuin pitkäkestoisia sateita.

Taulukko 2. Valittujen kerran kolmessa vuodessa toistuvien mitoitussateiden määrät kullekin vuodelle.

Vuosi	5 min [kpl]	15 min [kpl]	30 min [kpl]	1 h [kpl]	3 h [kpl]	6 h [kpl]	12 h [kpl]	24 h [kpl]
2013	69	74	73	68	34	28	18	12
2014	143	161	137	91	45	37	34	21
2015	101	87	90	70	29	22	15	12
2016	168	159	119	94	46	39	30	21
Yhteensä	481	481	419	323	154	126	97	66

Liikeinterpoloitujen sadekenttien käyttö pienensi kaikkien rankkasateiden kertymiä. Lyhytkestoissa (5 – 60 min) rankkasateissa kertymä pieneni keskimäriin 5,3 mm ja pitkäkestoissa (3 – 24 h) 6,8 mm. Kuvassa 13 on esitetty kaksi esimerkkiä, joissa liikeinterpolointi saattaa aliarvioida sadetta. Kuvista huomataan, että tutkamittauksen kohdalla (10, 15 min) mitattu intensiteetti on korkeampi kuin tutkamittauksen väliin liikeinterpoloinnin avulla arvioitujen intensiteetit. Liikeinterpolointi ei vaikuttanut huomattavasti rankkasateiden sijaintiin. Keskimäärin yksittäinen rankkasade siirtyi kilometrin ja vain 6 % rankkasateista siirtyi.



Kuva 13. Kaksi esimerkkitapausta, joissa tutkamittaukset näkyvät pieninä huippuina (10, 15 min) ja interpoloidut arvot niiden välissä matalampina arvoja.

Taulukossa 3 on esitetty hylättyjen rankkasateiden määrät luokiteltuna tapahtuman keston ja hylkäysperusteen mukaan. Rankkasateet on hylätty ennen mitoitussateiden varsinaista valitsemista eli ennen taulukossa 2 esitettyä otosta. Suurin osa hylkäyksistä johtui siitä, että liikeinterpoloiduilla sadekentillä laskettu uusi sademäärä ei ylittänyt kerran kolmessa vuodessa toistuvaa sademäärää. Rankkasateita hylättiin myös visuaalisen tarkastelun perusteella. Visuaalisen tarkastelun perusteella hylättyjä ajanjaksoja oli yhteensä kolme ja ne olivat 29.6.2014, 17. - 20.8.2015 ja 10.10.2016. Ajanjakson 17. - 20.8.2015 aikana saatettiin hylätä monta rankkasadetta samasta kestoluokasta. Kolmas peruste rankkasateiden hylkäämiselle oli, ettei kaikkia liikeinterpoloituja sadekenttiä pystytty laskemaan. Eniten rankkasateita hylättiin lyhyistä sateista, mutta niitä oli myös kerätty eniten.

Taulukko 3. Hylättyjen mitoitusasteiden määrät rankkasateen keston ja hylkäysperusteen mukaan luokiteltuna. Hylkäykset on tehty ennen taulukossa 2 esitettyä otosta.

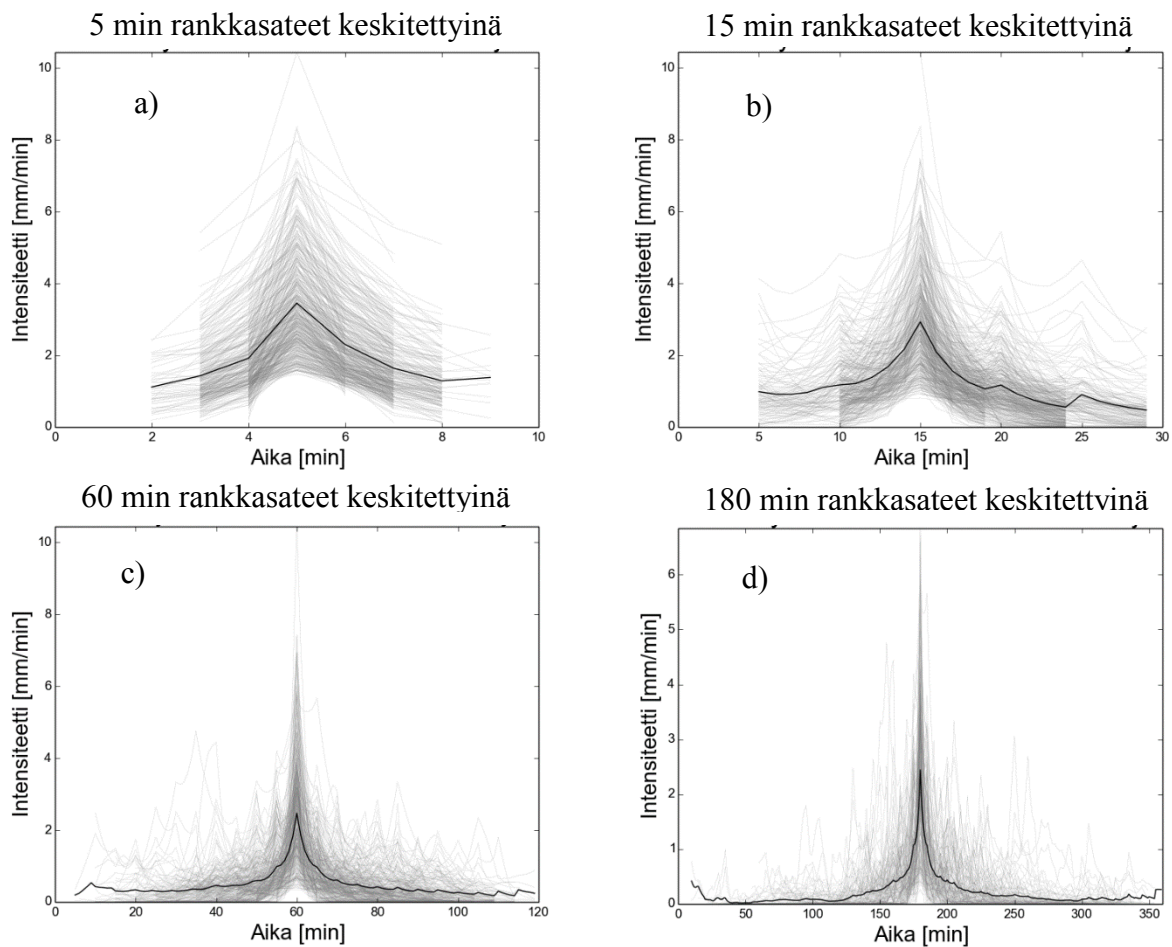
	5 min	15 min	30 min	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h
Hylkäysperuste	[kpl]	[kpl]	[kpl]	[kpl]	[kpl]	[kpl]	[kpl]	[kpl]
Liikeinterpolointi	7	6	10	12	20	28	41	48
Sademäärä	330	140	71	33	23	14	11	7
Visuaalinen tarkastelu	4	4	4	4	5	4	5	3
Yhteensä	341	150	85	49	48	46	57	58

Taulukossa 4 on esitetty poimitut rankkasateet harvinaisuusluokan mukaan. Tunnin kestäneissä ja sitä lyhemmissä rankkasateissa harvinaisempia kuin kerran sadassa vuodessa toistuvia mitoitusasteita oli eniten. Myös kolmen ja kuuden tunnin aikaluokissa harvinaisimpia tapahtumia oli eniten, kun mukaan lasketaan myös harvinaisemmat kuin kerran viidessä sadassa vuodessa toistuvat tapahtumat. Toiseksi pisimmissä kertymäjaksoissa eli 12 h rankkasateissa kerran kymmenessä vuodessa toistuvia sadetapahtumia oli eniten. Pisimmässä kertymäjaksossa eli 24 h rankkasateissa kerran kymmenessä ja viidessä vuodessa toistuvia sadetapahtumia oli eniten. Kerran viidessäkymmenessä vuodessa tapahtuvia sadetapahtumia oli yllättävän vähän kaikissa luokissa.

Taulukko 4. Mitoitusasteiden määrät toistuvuusluokkien mukaan.

	5 min	15 min	30 min	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h
Toistuvuus [a]	[kpl]	[kpl]	[kpl]	[kpl]	[kpl]	[kpl]	[kpl]	[kpl]
3	85	46	52	34	11	13	15	10
5	21	100	62	55	16	11	14	16
10	121	132	120	57	51	44	31	16
50	42	26	7	8	7	4	7	10
100	212	177	178	169	32	30	20	8
500	-	-	-	-	37	24	10	6

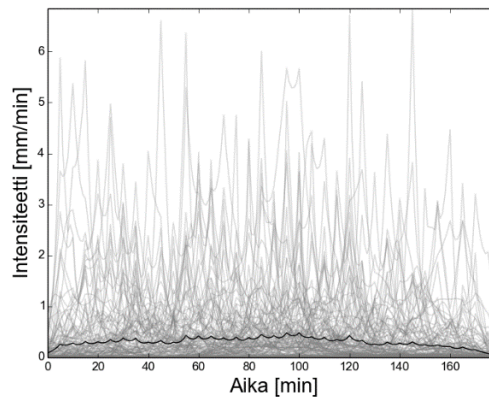
Keskitettyssä keskiarvoaikasarjassa (kuva 14) sateen suurimman intensiteetin ympärille muodostuu selvä huippu. Yksittäisten rankkasateiden keskitetyistä aikasarjoista voimme huomata, että rankkasateissa on jonkin verran suuria intensiteettejä keskelle asetettua suurimman intensiteetin lisäksi. Suurimmat intensiteetit ovat myös selvästi suurempia kuin mitkään muut havaitut intensiteetit, sillä harmaat sivupiikit eivät yllä keskimmäisen huipun tasalle. Keskitetyt keskiarvoaikasarjat lopuille kertymäjaksoille löytyvät liitteestä 2. Kuvaa tarkasteltaessa on hyvä huomioda, että aikasarjat, joista keskiarvo on piirretty, ovat puolet lyhempiä kuin itse keskiarvoaikasarjan kesto. Varsinkin lyhyissä sateissa mitoitusaste alkaa tai päättyy harvoin nolnaan, mikä aiheuttaa sen, että käyrät alkavat ja katkeavat yllättäen.



Kuva 14. (a) viiden minuutin, (b) 15 minuutin, (c) tunnin ja (d) kolmen tunnin rankkasateet keskitettyinä niin, että voimakkain hetkellinen intensiteetti on keskellä. Keskitetyistä kuvaajasta on laskettu keskiarvoaikasarja, joka on puolet pidempi kuin rankkasateet, joista se on laskettu. Yksittäiset mitoitussateet näkyvät kuvassa harmaalla ja keskiarvo mustalla.

Kuvassa 15 on esitetty keskiarvo siten, että kaikki kolmen tunnin mitoitussateet on piirretty samaan kuvaajaan. Yksittäisistä aikasarjoista näkyy, kuinka sateiden intensiteetit ovat jakautuneet tasaisesti pitkin sadetapahtumia. Lisäksi keskiarvoaikasarjassa näkyy sahaava kuvio. Aina viidellä jaollisen minuuttimäärän kohdalla on pieni huippu ja käyrä laskee viisiminuuttisten välissä.

Kaikki 180 min kestäneet rankkasateet



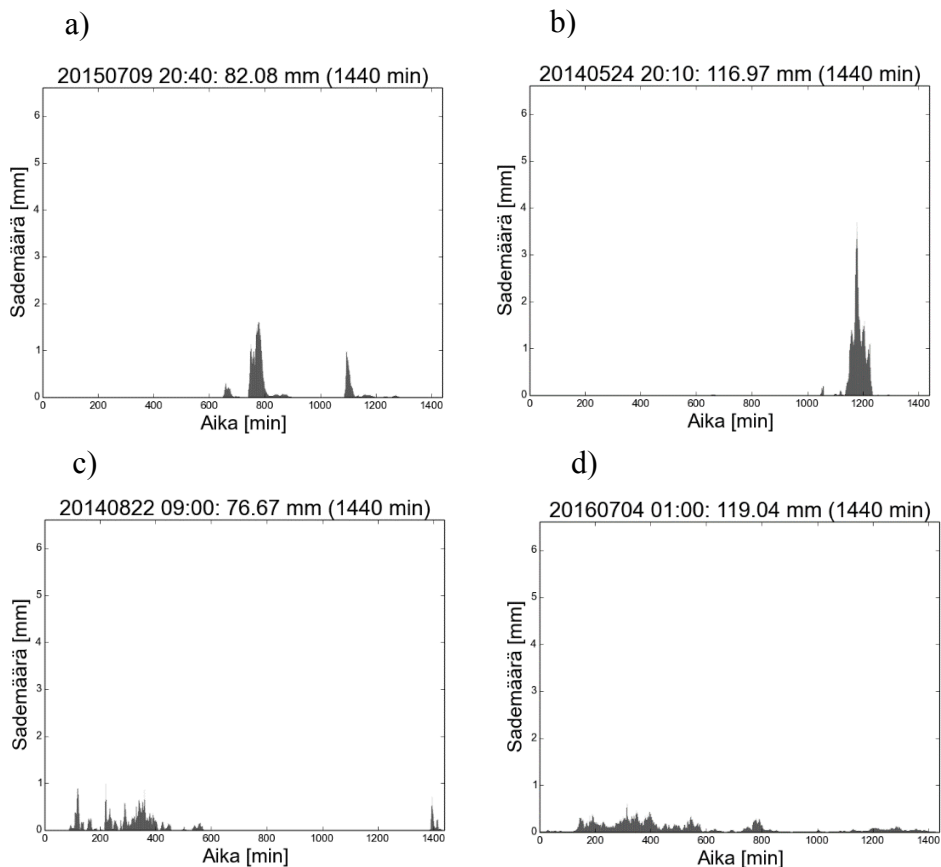
Kuva 15. Kaikki kolmen tunnin sateet piirrettynä yhteen kuvaajaan ja niistä laskettu keskiarvoaikasarja. Yksittäiset rankkasateet näkyvät taustalla harmaalla ja niistä laskettu keskiarvo mustalla.

Suurin osa lyhytkestoisista sateista on tulkittu konvektiivisiksi ja suurin osa pitkäkestoisista laaja-alaisiksi rintamasateiksi. Sadetyyppien prosenttiosuudet kussakin aikaluokassa on esitetty taulukossa 5. Kaikki yli kuuden tunnin sateet on tulkittu laaja-alaisiksi rintamasateiksi. Kolmen tunnin sateissakin vain muutama prosentti tulkittiin konvektiivisiksi. Lyhyissä sateissa tilanne on lähes päinvastainen, vaikka ei yhtä selkeä. Viiden minuutin sateista 3,8 %, viidentoistaminuutin sateista 10,4 % ja kolmenkymmenminuutin sateista 25,1 % on tulkittu laaja-alaisiksi rintamasateiksi. Tunnin sateista laaja-alaisia rintamasateita oli 48,9 % ja konvektiivisia sateita hieman enemmän eli 51,1 %. Visuaalisen tarkastelun perusteella neljä sadetyyppituotteen mukaan laaja-alaisiksi rintamasateiksi luokiteltua rankkasadetta kuudesta-ista johtui laaja-alaisesta rintamasateesta.

Taulukko 5. Laaja-alaisen rintama ja konvektiivisten sateiden määrät [%] kullakin kestolla.

	5 min	15 min	30 min	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h
Sadetyyppi	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Rintama	3,8	10,4	25,1	48,9	94,5	100,0	100,0	100,0
Konvektiivinen	96,2	89,6	74,9	51,1	5,5	0,0	0,0	0,0

Kun tarkastellaan yksittäisiä 24 tunnin sateita, voidaan huomata monen niistä koostuvan pienemmistä, mutta voimakkaista kuuroista. Kuvaan 16 on poimittu esimerkkejä 24 h kestäneistä rankkasateista. Pitkissä sadetapahtumissa oli paljon sellaisia rankkasateita, jotka koostuivat lyhyemmistä sadekuuroista (esim. kuva 16 a, b). Myös joitain pidemmistä sateista koostuneita rankkasateita oli, mutta selvästi vähemmän (esim. kuva 16 c, d).



Kuva 16. Yksittäisiä poimintoja 24 h kestäneistä rankkasateista. Voimakkaammista kuuroista (a, b) koostuneet rankkasateet olivat selvästi yleisempiä kuin pitkäkestoisista sateista (c, d) koostuneet rankkasateet.

Taulukossa 6 on esitetty mitoitussateiden jakautuminen eri kuukausille rankkasateen keston mukaan. Suurin osa havainnoista (yli 30 % kaikissa kestoluokissa) on tehty heinäkuussa. Rankkasateista noin 20 % on poimittu kesäkuussa jokaisessa kestoluokassa ja elokuussa noin 27 %. Lokakuussa on löydetty erittäin vähän rankkasateita ja toukokuussa ja syyskuussa hieman enemmän, mutta silti vähän kesäkuukausiin verrattuna. Suurta vaihtelua kuukausittaisessa ajoittumisessa eri kertymäajoille ei ole havaittavissa.

Taulukko 6. Mitoitussateet kuukausittain [%].

	5 min	15 min	30 min	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h
Kuukausi	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Touko	7.9	6.9	8.1	8.4	9.1	7.1	9.3	7.6
Kesä	20.2	21.8	20.8	21.7	20.8	19.8	20.6	19.7
Heinä	37.2	37.0	35.3	32.5	31.2	34.1	34.0	36.4
Elo	27.7	27.8	27.0	26.3	29.2	27.8	26.8	25.8
Syys	6.9	6.5	8.6	10.5	8.4	8.7	8.2	9.1
Loka	0.2	0.0	0.2	0.6	1.3	2.4	1.0	1.5

6 Tulosten tarkastelu

Perinteisesti mitoitussateina on käytetty tasaisen intensiteetin sadetapahtumia (Knighton ja Walter 2016). Tässä työssä on kerätty vaihtuvaintensiteettinen mitoitussateiden muotokirjasto Suomen olosuhteisiin ja kehitetty menetelmä mitoitussateiden keräämiseksi. Mitoitussateita on löydetty useita satoja erilaisilla sademäärillä ja kestoilla. Tulevaisuudessa voikin olla järkevää käyttää mitoitussateiden parvea esimerkiksi hulevesirakenteiden suunnittelussa. Tämä voi parantaa tulviin varautumista, sillä tasaisen intensiteetin tapahtuma kuvaa huonosti sateen vaihtelua, kuten kuvista 14 ja 15 huomataan. Erityisesti hetkelliset voimakkaat intensiteetit aiheuttavat usein tulvia (Einfalt ja Jessen 2002).

Määrällisesti edes suurin tässä työssä kerätty otos, eli 5 tai 15 minuutin kestoluokkiin kerätyt 481 rankkasadetta, ei ole kovin suuri. Esimerkiksi RATU-hankkeessa on tutkittu vuorokausisateita Suomessa sademittaripohjaisella aineistolla, aineiston koko on ollut 14 000 sademittarivaihtoa ja tutkimusaineiston pituus on ollut monta vuosikymmentä (Aaltonen et al. 2008). Kuitenkin RATU-hankkeessa 80 kaikkein harvinaisimmista 150:stä sadetapahtumasta ovat tapahtuneet kuutena päivänä eli todennäköisesti sama sadealue tai säärintama näkyy useammassa sademittarissa, vaikka yhdestä sademittarista on otettu aineistoon vain jokaisen kuukauden suurin vuorokausisade. Sademittaripohjaisesti ei löydy kattavaa aineistoa vuorokautta lyhemmistä sadetapahtumista (Aaltonen et al. 2008). Tässä työssä on kerätty erityisesti juuri lyhyitä rankkasateita, mutta otos ei ole toistaiseksi riittävän suuri kattavaksi aineistoksi harvinaisista sadetapahtumista.

Kerätty otos, vaikka se olisi huomattavasti suurempi, ei ole tilastollisesti edustava. Tämä johtuu siitä, että yleisemmät kuin kerran kolmessa vuodessa toistuvat sadetapahtumat on hylätty jo heti ensimmäisessä vaiheessa. Lisäksi valintatapa korostaa voimakkaasti kaikkein harvinaisimpia sateita, sillä ne valitaan aina ensisijaisesti. Otos voisi olla verrattavissa vuosimaksimiaikasarjoihin (esim. Overeem et al. 2009), joissa myös vain harvinaisimmat sadetapahtumat otetaan mukaan otokseen. Harvinaisten sadetapahtumien toistuvuutta pyritään arvioimaan vuosimaksimiaikasarjojen kautta ja se voisi olla yksi sovellusmahdollisuus työssä kerätylle aineistolle.

Se, että kerran 50 vuodessa toistuvia rankkasateita löytyi niin vähän, oli yllättävä. Syy siihen voi liittyä esimerkiksi rankkasaderajoihin. Myöskään RATU-hankkeessa, jossa rankkasaderajat on määritelty, tapahtumien riippumattomuutta ei ole otettu kunnolla huomioon. Se voi vääristää laskettuja harvinaisuusluokkia. Lisäksi rankkasaderajat on poimittu kuvaajista visuaalisen tarkastelun avulla, koska numeroarvoja ei ole saatavilla. Tämän takia arvot eivät ole kovin tarkkoja. Jos vertailee kerran 50 ja 100 vuodessa toistuvien sateiden sademäärärajoja (taulukko 1 luvussa 3), voi huomata, että ne ovat hyvin lähellä toisiaan. Voi siis olla, että kerran 50 vuodessa toistuvan tai jonkun muun toistuvuusluokan sademääräraajat on voitu joko arvioida tai poimia väärin. Myös tutkamittausten muunnokseen sademääräksi voi liittyä raja-arvoja, joiden takia tietyn suuruiset sademäärät arvioidaan usein väärin. Tämän todentaminen vaatisi lisätutkimuksia.

Sateiden toistuvuuksia on tutkittu vain vähän tutkapohjaisesti (esim. Durrans et al. 2002; Overeem et al. 2009; Marran ja Morin 2015; Panziera et al. 2016). Näistä suurin osa ei ota sateiden alueellista riippuvuutta huomioon (esim. Durrans et al. 2002; Overeem et al. 2009; Marran ja Morin 2015). Panziera et al. (2016) ovat tutkineet sateiden toistuvuuksia alueittain, jolloin alueellinen riippuvuus tulee otettua huomioon. Riippumaton otos soveltuu paremmin harvinaisten sadetapahtumien toistuvuuksien analysointiin, sillä silloin yksittäiset

sadealueet eivät ole yliedustettuina. Tässä työssä kehitetyssä menetelmässä molemmat, ajallinen ja alueellinen riippuvuus, on otettu huomioon. Sitä, onko riippumattoman otoksen keräämisessä onnistuttu, ei toistaiseksi ole arvioitu. Tämän analysoiminen on jätetty mahdollisiin jatkotutkimuksiin.

Rankkasateiden luokittelu sadetyyppituotteen mukaan on ristiriidassa rankkasateiden visuaalisen tarkastelun kanssa. Visuaalisen tarkastelun aikana huomattiin, että myös pitkäkestoisista sateista moni näytti syntyneen konvektiivisista kuuroista, vaikka ne oli luokiteltu laaja-alaisiksi rintamasateiksi sadetyyppituotteen mukaan. Tämä voi johtua esimerkiksi siitä, että sadetyyppituote tulkitsee konvektiivisten sateiden reuna-alueita laaja-alaisiksi rintamasateiksi, mikä ilmenee kuvassa 9. Sillä on voinut olla vaikutusta erityisesti pitkäkestoisissa rankkasateissa, koska niissä useampi sadealue voi liikkua tarkasteltavan pisteen yli. Pitkäkestoisissa sadetapahtumissa on myös todennäköisempää, että kohdalle osuu ainakin yksi ajanhetki, jolloin häiriökaiut tulkitaan sateeksi. Silloin myös rankkasade tulkitaan laaja-alaiseksi rintamassateeksi. Nykyisin häiriökaikujen poistamista ei ole tehty ollenkaan (Peura 2017), joten ainakin sitä täytyy vielä kehittää. Myös visuaalisessa tarkastelussa voi olla puutteita, koska se on subjektiivinen ja riippuu tarkastelijan kokemuksesta. Kaikki 5 – 15 min rankkasateet luokiteltiin konvektiivisiksi, mikä vaikuttaa myös epätavalliselta. Tämä voi johtua otantatavasta yhdistettynä sadetyyppituotteeseen. Otanta tapa korostaa voimakkaita intensiteettejä ja sadetyyppituote vaikuttaisi luokittelevan ne helposti konvektiivisiksi sateiksi.

Tuloksissa esitetyn kuvan 15 perusteella riippumattomien rankkasateiden valinnassa käytetty oletus, että rankin sade osuu keskelle tapahtumaa, on ollut puutteellinen. Kuvasta voidaan nähdä, että rankkasateiden suurimmat piikit eivät ole jakautuneet erityisesti sadetapahtuman keskelle. Parempi tapa määrittää rankkasateeseen liittyvät sadealueet voisi olla sadealueiden oliopohjainen tunnistus (esim. Rossi et al. 2015). Silloin aineistosta poistettaisiin ainoastaan ne rankkasateet, jotka liittyvät samoihin sadealueisiin kuin kulloinkin tarkasteltava rankkasade eikä sadetyyppiä tarvittaisi ollenkaan. Laskennallisesti tämä olisi erittäin haastavaa, sillä myös kaikkia sadealueesta erkanevia ja siihen liittyviä sadealueita pitäisi seurata. Tässä työssä rankkasateita on karsittu joka tapauksessa ankaran kriteerin mukaan, joten todennäköisesti otos on silti ajallisesti ja alueellisesti riippumaton, mutta oliopohjaisen sadealueiden tunnistamisen avulla otos saattaisi olla suurempi.

Kuvassa 15 keskiarvossa ja kuvassa 13 näkyvä sahauskuvio on silmiinpistävä. Se voi johtua esimerkiksi siitä, että käytetty liikeinterpolointimenetelmä aliarvioi sademääriä. Liikeinterpoloinnin avulla arvioitujen sademäärien keskiarvot ovat selvästi pienempiä kuin viereisistä tutkimuksista lasketut sademäärät. Usein liikeinterpoloidut sadekentät korjataan käyttäen maanpintahavaintoja (Wang et al. 2015; Nielsen et al. 2014) ja voi olla, että se olisi ollut järkevää tässäkin työssä. Ilman liikeinterpolointia erityisesti lyhytkestoiset rankkasateet olisivat myös olleet huomattavasti yksinkertaisempia, joten liikeinterpolointi toi myös lisäarvoa tuloksiin. Sahauskuvio voi myös johtua otoksen pienestä koosta ja siitä, että yksittäiset isot arvot vääristävät tuloksia, mutta siihen nähden kuvio on yllättävän säännöllinen.

Kerätyt rankkasateet vahvistavat käsitystä siitä, että lyhytkestoisissa sateissa on suurempi keskimääräinen intensiteetti kuin pitkäkestoisissa sateissa eli lyhytkestoiset sateet ovat ranskempia kuin pitkäkestoiset sateet (Aaltonen et al. 2008; Kilpeläinen 2008). Voimakkaimmat 24 h sateet syntyvät konvektiivisista kuurosateista (Aaltonen et al. 2008). Siihen nähden visuaalisen tarkastelun tulokset ovat yhtenevät, sillä visuaalisen tarkastelun perusteella suurin

osa rankkasateista on johtunut konvektiivisista sateista, vaikka sadetyyppituote on ristiriidassa tämän kanssa. Aiemmassa tutkimuksessa on havaittu, että rankkasateita esiintyy eniten Jyväskylän seudulla Keski-Suomessa ja vähiten rankkasateita on rannikolla ja Lapissa (Aaltonen et al. 2008). Tässä työssä rankkasateet ovat jakautuneet varsin tasaisesti ympäri Suomea, kuten kuvassa 12 on esitetty. Alueellisia eroja ei ole havaittavissa silmämääräisesti.

Tulokset ovat sikäli linjassa aikaisempien tutkimusten kanssa, että voimakkaat sateet näyttäisivät painottuvan kesäkuukausille (Aaltonen et al., 2008; Kilpeläinen 2008). Tässä työssä erityisesti heinäkuussa on löydetty paljon rankkasateita. RATU-hankkeessa havaittiin, että heinä- ja elokuussa oli eniten voimakkaita sadetapahtumia (Aaltonen et al. 2008). Kilpeläisen (2008) työssä havaittiin, että voimakkaita sadetapahtumia esiintyi eniten elokuussa eli se on hieman ristiriidassa tämän työn kanssa. Tässä työssä on tutkittu sadetta vain neljän vuoden ajalta, joten voi olla, ettei otos ole kovin kattava. Lisäksi tässä työssä on tutkittu koko Suomen sateita, kun Kilpeläisen (2008) työ on keskittynyt Helsingin Kaisaniemeen, minkä takia tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia. RATU-hankkeen keskeinen tulos oli kuitenkin, ettei Suomen sadeolosuhteissa ole suuria maantieteellisiä eroja, joten karkeaa vertailua voi tehdä. Toukokuussa ei RATU-hankkeen mukaan ollut paljon sadetapahtumia, mutta lokakuussa oli. Tässä tutkimuksessa rankkasateita ei ole juuri havaittu lokakuussa, mutta ero voi johtua siitä, että RATU-hankkeessa tarkasteltiin myös yleisempiä sadetapahtumia kuin kerran kolmessa vuodessa toistuvat.

Suurimmat havaitut sademäärät sen sijaan eivät ole linjassa RATU-hankkeen (Aaltonen et al. 2008) tulosten kanssa. Tässä tutkimuksessa erityisesti lyhytkestoisissa sadetapahtumissa erittäin harvinaisia sademääriä havaittiin todella paljon ja ne olivat todella suuria RATU-hankkeessa määritettyihin sademäärärajoihin nähden. RATU-hankkeen mukaan kerran sadassa vuodessa toistuva viiden minuutin sademäärä on 10 mm, kun tässä tutkimuksessa suurin havaittu viiden minuutin sademäärä oli 32 mm (kuva 11 a) ja suurin havaittu minuutin hetkellinen intensiteetti 10 mm/min (kuva 11 b). Tässä työssä esimerkiksi kerran sadassa vuodessa toistuvia viiden minuutin rankkasateita poimittiin yli 200 kpl (taulukko 4), mikä on erittäin paljon suhteessa poimittujen rankkasateiden kokonaismäärään. Myös suurin havaittu puolen tunnin sademäärä eli 104 mm (kuva 11 c) on Suomen vuorokausisateen ennätykseen 198 mm (Kilpeläinen 2006) nähden erittäin suuri. On myös hyvä huomata, että 30 minuutin ennätys sade on 104 mm ja kolmen tunnin vain 92 mm. Tämä johtuu siitä, että kolmen tunnin sateelle 6.6.2013 klo 12:20 ei ole pystytty laskemaan liikeinterpoloituja sadekenttiä koko kertymäajalle, minkä takia kolmen tunnin rankkasade on hylätty.

Yksi mahdollinen syy tämän tutkimuksen ja RATU-hankkeen (Aaltonen et al. 2008) erilaisiin tuloksiin voi olla tutkamittausten tulkintaan liittyvä epävarmuus. Esimerkiksi visuaalisessa tarkastelussa huomattiin todennäköisesti kanavoitumisesta johtuvia maakaikuja, jotka oli tulkittu sateeksi. Jos signaali taipuu samaan aikaan kun havaitaan sadetta, kanavoituminen on vaikea havaita ja sen vaikutusta hetkelliseen intensiteettiin vaikea arvioida. Lisäksi kanavoituminen voi olla hyvin paikallista, jolloin tulosten suhteuttaminen maanpintahavaintoihin ei välttämättä poista virhettä. OSAPOL-sadetuotteen laatua olisi hyvä tutkia perusteellisemmin. Toinen mahdollinen syy on epävarmuus RATU-hankkeen sademäärärajojen määrittämisessä. RATU-hanke on tehty ennen kuin tutkien kaksoispolarisaatiosuureet on otettu käyttöön, minkä takia erityisesti suurien sateen intensiteettien arvioinnissa on ollut epävarmuutta. On kuitenkin epätodennäköistä, että rankkasateiden sademäärärajoissa olisi merkittäviä virhearvioita. Myös sademittareilla havaittuihin ennätysstateisiin liittyy epävarmuutta, sillä Suomen sademittariverkko on hyvin harva.

7 Johtopäätökset

Mitoitussateita käytetään suunnittelun apuvälineenä, ja niiden avulla voidaan varautua tulviin. Perinteisesti mitoitussateina on käytetty tasaisen intensiteetin sadetapahtumia, vaikka ne kuvaavat huonosti yksittäisiä sadetapahtumia, koska sateen intensiteetti vaihtelee paljon tapahtuman sisällä. Tämän diplomityön tuloksena on kerätty ensimmäisen tutkapohjainen vaihtuvaintensiteettinen mitoitussateiden muotokirjasto Suomen olosuhteisiin. Muotokirjasto tulee vapaasti saataville Ilmasto-oppaaseen (<https://ilmasto-opas.fi/>). Kirjastoon kuuluu satoja erilaisia rankkasateita, joita voidaan käyttää mitoituksen työkaluina. Toistaiseksi otos on melko pieni, mutta mikäli aineiston keräämistä jatketaan tulevaisuudessa, voidaan sen avulla tutkia myös harvinaisten sateiden alueellisia toistuvuuksia. Tavallisten sadetapahtumien eli useammin kuin kerran kolmessa vuodessa toistuvien sademäärien analysoimiseen otos ei sovellu, sillä kirjastoon on kerätty ainoastaan harvinaisempia sadetapahtumia.

Mitoitussateet on kerätty säätutkamittauksista. Tämä on tiettävästi ensimmäinen kerta, kun Suomen oloissa testataan kaksoispolarisaatio suureita hyödyntävän sadetuotteen hydrologista käyttökelpoisuutta. Säätutkamittaukset ovat osa OSAPOL-projektia, jonka tarkoituksena on ollut parantaa Ilmatieteen laitoksen sadetuotetta ja luoda uusia, hydrologisissa tutkimuksissa käyttökelpoisia sadetuotteita. Perinteisesti käytetty muunnos säätutkan mittauksesta sateeksi ei ole ollut kovin luotettava ja se on aiheuttanut paljon epävarmuutta sateen intensiteetin arviointiin. Kaksoispolarisaatio-ominaisuuksien avulla tutkamittauksien tulkin-taa voidaan kuitenkin parantaa huomattavasti. Tässä työssä käytetty OSAPOL-sadetuote hyödyntää tutkan kaksoispolarisaatio-suureita. Osa sadetuotteen hetkellisistä intensiteeteistä ja niistä lasketuista sademääristä on erittäin isoja esimerkiksi RATU-hankkeessa määritettyihin aluesadannan toistuvuuksiin nähden. Tämä voi johtua esimerkiksi siitä, että kaikkia häiriökaikuja ei vielä tunnisteta ja ne tulkitaan sateeksi. OSAPOL-sadetuotteen laatua olisi hyvä tutkia tarkemmin.

Sadetapahtumien toistuvuuksia on tutkittu jonkin verran tutkapohjaisesti, mutta monissa tutkimuksissa sadetapahtumien alueellista riippuvuutta ei ole otettu huomioon. Tässä työssä on kehitetty uusi menetelmä, jonka tarkoitus on tehdä otoksesta alueellisesti ja ajallisesti riippumaton. Suomessa tutkimus on ensimmäinen, jossa riippuvuusongelma on yritetty ottaa huomioon. Menetelmän onnistumista riippumattoman otoksen valinnassa ei ole kuitenkaan arvioitu, ja sitä olisikin syytä tarkastella syvemmin tulevaisuudessa. Riippumattomien sadetapahtumien poimimiseksi kehitettyä menetelmää voitaisiin edelleen kehittää, jos siihen yhdistettäisiin oliopohjainen sadealueiden tunnistus.

Työssä käytettyä sadetyypin tunnistamista ja liikeinterpolointimenetelmää pitäisi vielä tutkia tarkemmin. Sadetyypin tunnistus ei toiminut hyvin, koska tapahtumille määritellyt sadetyypit olivat ristiriidassa visuaalisen tarkastelun kanssa. Myös käytetty liikeinterpolointimenetelmä vaikuttaisi aliarvioivan sademääriä. Liikeinterpolointi on kuitenkin ollut myös tarpeellinen, sillä ilman sitä sateiden intensiteetin vaihtelu erityisesti lyhyissä sadetapahtumissa olisi ollut paljon vähäisempää. Työssä laskettuja sademääriä ei kuitenkaan ole vertailtu maanpintahavaintojen kanssa, joten lisätutkimus olisi tarpeen myös liikeinterpoloinnin kanalta.

Kerätty rankkasadeaineisto oli enimmäkseen linjassa rankkasateiden esiintymisajankohdan suhteen muiden Suomen sadeolosuhteita koskeneiden tutkimusten kanssa. Eniten rankkasateita löytyi heinäkuulta, mutta myös kesä- ja elokuulta rankkasateita poimittiin paljon. Eri-

tyisen vähän rankkasateita havaittiin lokakuussa. Lyhytkestoisten sadetapahtumien intensiteetti oli myös keskimäärin korkeampi kuin pitkäkestoisten, kuten aiemmissakin tutkimuksissa on huomattu. Sadetapahtumien alueellisessa jakautumisessa ei havaittu maantieteellisiä eroja. Kerran viidessäkymmenessä vuodessa toistuvia sadetapahtumia kerättiin yllättävän vähän, mutta todennäköisesti se johtuu käytetyistä rankkasaderajoista.

Vaihtuvaintensiteettisten sadetapahtumien käyttöä mitoituksessa on ehdotettu jo pitkään (esimerkiksi Eicher 1991; Seed et al. 1999; Knighton ja Walter 2016). Tämän työn tuloksena kerättyjen mitoitussateiden avulla se on mahdollista ja on mielenkiintoista nähdä, miten niitä tullaan hyödyntämään.

8 Lähdeluettelo

Aaltonen, J., Hohti, H., Jylhä, K., Karvonen, T., Kilpeläinen, T., Koistinen, J., Kotro, J., Kuitunen, T., Ollila, M., Parvio, A., Pulkkinen, S., Silander, J., Tiihonen, T., Tuomenvirta, H., Vajda, A. (2008) Rankkasateet ja taajamatulvat (RATU). Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Vol. 31. S. 123. ISBN 978-952-11-3210-0

Adlouni, S., Ouarda, T. (2010) Frequency Analysis of Extreme Rainfall Events. Teoksessa: Testik, F.Y., Gebremichael, M. (toim.), Rainfall: State of the Science. Washington, DC: American Geophysical Union. Vol. 191. S. 61–77. Doi: 10.1029/GM191

Chandrasekar, V., Keränen, R., Lim, S., Moisseev, D. (2013) Recent advances in classification of observations from dual polarization weather radars. Atmospheric Research. Vol. 119. S. 97-111. Doi: 10.1016/j.atmosres.2011.08.014

Chandrasekar, V. (2016) Professori. Colorado State University. Colorado, Fort Collins, Colorado 80523. Haastattelu 20.12.2016

Durrans, S., Julian, L., Yekta, M. (2002) Estimation of Depth-Area Relationships using Radar-Rainfall Data. Journal of hydrologic engineering. Vol. 7. No. 5 S. 356 – 367. Doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:5(356)

Durrans, S. (2010) Intensity-Duration-Frequency Curves. Teoksessa: Testik, F.Y., Gebremichael, M. (toim.), Rainfall: State of the Science. Washington, DC: American Geophysical Union. Vol. 191. S. 61–77. Doi: 10.1029/GM191

Eicher, C. (1991) Selection of design storms – time resolution considerations. Atmospheric Research. Vol 27. No. 1. S. 23 – 43. Doi: 10.1016/0169-8095(91)90004-G

Einfalt, T., Jessen, M. (2002): Assessment of storm return periods based on radar data. 2. ERAD. Delft, Alankomaat. 18-22.11.2002. Copernicus GmbH. S. 144–149.

Einfalt, T., Arnbjerg-Nielsen, K., Golz, C., Jensen, N.-E., Quirnbach, M., Vaes, G., Vieux, B. (2004) Towards a roadmap for use of radar rainfall data in urban drainage. Journal of Hydrology. Vol. 299. No. 3-4. S. 186–202. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.004

Fletcher, T.D., Andrieu, H., Hamel, P. (2013) Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. Advances in Water Resources. Vol. 51. S. 261–279. Doi: 10.1016/j.advwatres.2012.09.001

Gu, J., Ryzhkov, A., Zhang, P., Neilley, P., Knight, M. (2011) Polarimetric Attenuation Correction in Heavy Rain at C Band. Journal of Applied Meteorology and Climatology. Vol. 51. S. 39-58. Doi:10.1175/2010JAMC2258.1

Habib, E., Lee, G., Kim, D., Ciach, G.J. (2010) Ground-Based Direct Measurement. Teoksessa: Testik, F.Y., Gebremichael, M. (toim.), Rainfall: State of the Science. Washington, DC: American Geophysical Union. Vol. 191. S. 61–77. Doi: 10.1029/GM191

Hohti, H. (2017) Tutkija. Ilmatieteen laitos. Helsinki, Erik Palmenin aukio 1, 00560 Helsinki. Haastattelu 25.1.2017

Ilmatieteen laitos (2017a) Sääutkat. Viitattu: 1.3.2017. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/avoin-data-saatutkat>

Ilmatieteen laitos (2017b) Sääutkat. Viitattu: 1.3.2017. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/saatutkat>

Ilmatieteen laitos (2017c) Tutkassa näkyy muutakin kuin sadetta. Viitattu: 22.2.2017. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/yleisimmat-tutkahairiot>

Karttunen, H., Koistinen, J., Saltikoff, E., Manner, O. (2008) Ilmakehä, sää ja ilmasto. Helsinki: Tähtitieteen yhdistys Ursa. Vol. 107. S. 497. ISBN: 12978-952-5329-61-2

Katajisto, R. (1969) Rankkasateiden voimakkuus ja toistumistiheys Suomessa. Rakennushallituksen tiedotuksia 1969.

Kilpeläinen, T., Tuomenvirta, H., Jylhä, K. (2008) Climatological characteristics of summer precipitation in Helsinki during the period 1951 – 2000. *Boreal Environment Research*. Vol. 13. S. 67 – 80. ISSN 1797-2469

Kilpeläinen, T. (2006) Kesäsateiden ilmastolliset piirteet Helsingin Kaisaniemessä 1951 - 2000. Pro gradu-tutkielma. Helsingin yliopisto, Fysikaalisten tieteiden laitos. Helsinki. 72 s.

Knighton, J., Walter, T. (2016) Critical rainfall statistics for predicting watershed flood responses: rethinking the design storm concept. *Hydraulic Processes*. Vol. 30. S. 3788-3803. Doi: 10.1002/hyp.10888

Koistinen, J., Saltikoff, E. (1998) Experience on customer products of accumulated snow sleet and rain. Teoksessa: Collier C.G. (toim.), *Advanced weather radar systems, COST 75, International seminar*. 1998. Locarno, Sveitsi. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. S. 397 – 406.

Koistinen, J., Pohjola, H. (2014) Estimation of Ground –Level Reflectivity Factor in Operational Weather Radar Networks Using VPR-Based Correction Ensembles. *Journal of applied meteorology and climatology*. Vol. 53. S. 2394 – 2410. Doi: 10.1175/JAMC-D-13-0343.1

Krajewski, W., Smith, J. (2002) Radar hydrology: Rainfall estimation. *Advances in Water Resources*. Vol. 25. No. 8-12. S. 1387–1394. Doi: 10.1016/S0309-1708(02)00062-3

Kurri, M., Huuskonen, A. (2008). Measurements of the Transmission Loss of a Radome at Different Rain Intensities. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. Vol. 25. No. 9. S. 1590–1599. Doi: 10.1175/2008JTECHA1056.1

Leinonen, J., Moisseev, D., Leskinen, M., Petersen, W. (2012) A Climatology of Disdrometer Measurements of Rainfall in Finland over Five Years with Implications for Global Radar Observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. Vol. 51. S. 392-404. Doi: 10.1175/JAMC-D-11-056.1

- Marran, F., Morin, E. (2015) Use of QPE for the derivation of Intensity-Duration-Frequency curves in a range of climatic regimes. *Journal of Hydrology*. Vol. 531. S. 427-440. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.08.064
- Michaelides, S., Levizzani, V., Anagnostou, E., Bauer, P., Kasparis, T., Lane, J.E. (2009) Precipitation: Measurement, remote sensing, climatology and modeling. *Atmospheric Research*. Vol. 94. No. 4. S. 512–533. Doi: 10.1016/j.atmosres.2009.08.017
- Milton, J., Arnold, J. (2003) Introduction to probability and statistics: principles and applications for engineering and the computing sciences. 4. painos. Boston: London: McGraw-Hill, c2003. S. 798. ISBN-10: 007246836X
- Morin, E., Goodrich, D., Maddox, R., Gao, X., Gupta, H., Sorooshian, S., (2006) Spatial patterns in thunderstorm rainfall events and their coupling with watershed hydrological response. *Advances in Water Resources*. Vol. 29. S. 843-860. Doi: 10.1016/j.advwatres.2005.07.014
- Nielsen, J., Thorndahl, S., Rasmussen, M. (2014) A numerical method to generate high temporal resolution precipitation time series by combining weather radar measurements with a nowcast model. *Atmospheric Research*. Vol. 138. S. 1-2. Doi :10.1016/j.atmosres.2013.10.015
- NOAA (*National Severe Storms Laboratory*) (2014) Duap-pol radar technology. Viitattu 23.3.2017. Saatavissa: http://www.nssl.noaa.gov/news/factsheets/Dual-pol_Fact_Sheet_2014.v5.pdf
- Overeem, A., Buishand, A., Holleman, I. (2009) Extreme rainfall analysis and estimation of depth-duration-frequency curves using weather radar. *Water Resources Research*. Vol. 45. S. W10424. Doi: 10.1029/2009WR007869
- Panziera, L., Gabella, M., Zanini, S., Hering, A., Germann, U., and Berne, A. (2016) A radar-based regional extreme rainfall analysis to derive the thresholds for a novel automatic alert system in Switzerland. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*. Vol. 20. S. 2317 – 2332. Doi: 10.5194/hess-20-2317-2016, 2016.
- Peura, M. (2017) Tutkimussovellukset ryhmäpäällikkö. Ilmatieteen laitos. Helsinki, Erik Palmenin aukio 1, 00560 Helsinki. Haastattelu 20.1.2017
- Peura, M. (2015) Anomaly Detection and Removal (AnDRe). Viitattu 2.3.2017. Saatavilla: <http://baltrad.fmi.fi/software/rack/doc/rack/html/andrepag.html>
- Pirinen, P. (2017) Data-analyttikko. Ilmatieteen laitos. Helsinki, Erik Palmenin aukio 1, 00560 Helsinki. Haastattelu 26.2.3017
- Pohjola, H. (2003) Tutkaheijastavuustekijän pystyjakauma Suomessa ja sen vaikutus tutkan sademittauksen tarkkuuteen. Pro gradu-tutkielma. Helsingin yliopisto, Fysikaalisten tieteiden laitos. Helsinki. 55 s.

- Pulkkinen, S. (2017) Tutkija. Ilmatieteen laitos. Helsinki, Erik Palmenin aukio 1, 00560 Helsinki. Haastattelu 20.2.2017
- Punkka, A.-J. (2002) Syvän konvektion luokittelu ja konvektiiviset järjestelmät Suomessa. Pro gradu-tutkielma. Helsingin yliopisto, Fysikaalisten tieteiden laitos. Helsinki. 85 s.
- Rahimi, A.R., Upton, G.J.G., Holt, A.R. (2004) Dual-frequency links - A complement to gauges and radar for the measurement of rain. *Journal of Hydrology*. Vol. 288. No. 1-2. S. 3–12. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2003.11.008
- Rinehart, R. (2004) Radar for meteorologists. USA: Rinehart Publications, Grand Forks. S. 428. ISBN: 0-9658002-1-0
- Saltikoff, E., Huuskonen, A., Hohti, H., Koistinen, J., Järvinen, H. (2010) Quality Assurance in the FMI Doppler Weather Radar Network. *Boreal Environment Research*. Vol. 15. S. 579 – 594. ISSN 1797-2469
- Saltikoff, E. (2011) On the use of weather radar for mesoscale applications in northern conditions. Väitöskirja. Helsingin yliopisto, Fysiikan laitos. Helsinki. 120 s.
- Schuur, T., Ryzhkov, A., Heinselman, P. (2003) Observations and Classification of Echoes with Polarimetric WSR-88D Radar. Rep. NOAA, Norman, Oklahoma: University of Oklahoma.
- Seed, A., Srikanthan, R., Menabde M. (1999) A space time model for design storm rainfall. *Journal of geophysical research*. Vol. 104. No. D24. S. 31 623 – 31 630. Doi: 10.1029/1999JD900767
- Sharif, H., Ogden, F. (2014) Mass-Conserving Remapping of Radar Data onto Two-Dimensional Cartesian Coordinates for Hydrologic Applications. *Journal of Hydrometeorology*. Vol. 15. S. 2190 – 2202. Doi: 10.1175/JHM-D-14-0058.
- Tekes (2015) Julkisen tutkimuksen projekti. Viitattu 10.3.2017. Saatavissa: <http://fmispace.fmi.fi/index.php?id=osapol>
- RIL (Suomen rakennusinsinöörien liitto) (2004) Vesihuolto II. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto. Vol. 124 No. 2. S. 682. ISBN951-758-438-5
- Rossi, P., Chandrasekar, V., Hasu, V., Moisseev, D. (2015) Kalman filtering-based probabilistic nowcasting of object-oriented tracked convective storms. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. Vol. 32. S. 461 – 477. Doi: 10.1175/JTECH-D-14-00184.1
- Wang, Y., Chandrasekar, V. (2009) Algorithm for Estimation of the Specific Differential Phase. *American Meteorological Society*. Vol. 26. S. 2565 – 2578. Doi: 10.1175/2009JTECHA1358.1
- Wang, L., Ochoa-Rodriguez, S., Van Assel, J., Pina, R., Pessemier, M., Kroll, S., Willems, P., Onof, C. (2015): Enhancement of radar rainfall estimates for urban hydrology through

optical flow temporal interpolation and Bayesian gauge-based adjustment. *Journal of Hydrology*. Vol. 531. S. 408-426. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.05.049

Watt, E., Marsalek, J. (2013) Critical review of the evolution of the design storm event concept. NRC Research Press. Vol. 40. S. 105 – 113. Doi :10.1139/cjce-2011-0594

Wright, D., Smith, J., Villarini, G., Baeck, M. (2013) Applications of Radar Based Rainfall Estimates for Urban Flood Studies. *Journal of Water Management Modelling*, R246+06. Doi: 10.14796/JWMM.R246-06.

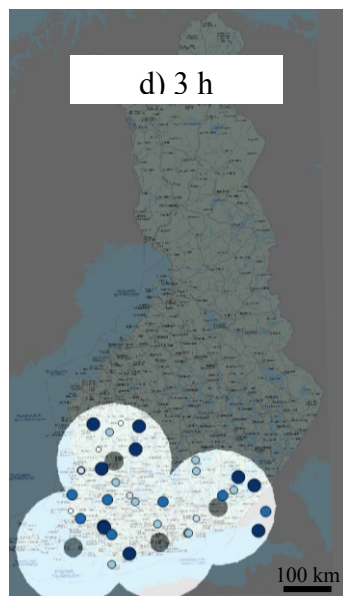
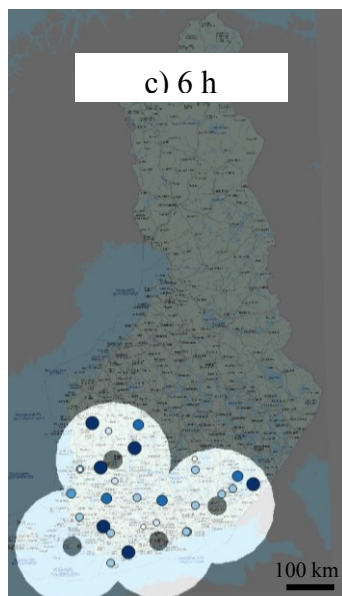
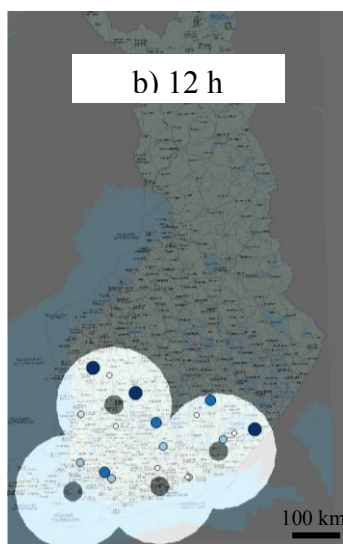
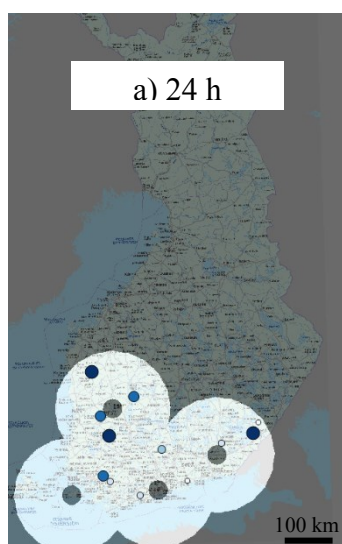
Liiteluettelo

Liite 1. Kerättyjen mitoitussateiden sijainnit vuosille 2013-2016 kestoluokittain. 8 sivua.

Liite 2. Sadetapahtumien keskitetyt keskiarvoaikasarjat kestoluokittain. 4 sivua.

Liite 1. Kerättyjen mitoitussateiden sijainnit vuosille 2013 - 2016 kestoluokittain

Valittujen mitoitussateiden sijainnit vuonna 2013 sadetapahtuman keston mukaan luokiteltuna. (a, b, c, d) ovat pitkäkestoiset rankkasateet (3 - 24 h). Kuvissa oleva merkki edustaa tapahtuman toistuvuutta.



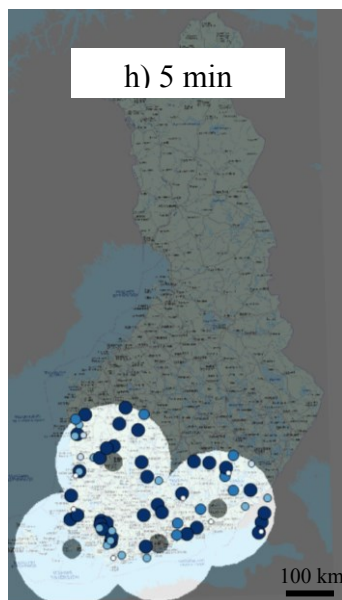
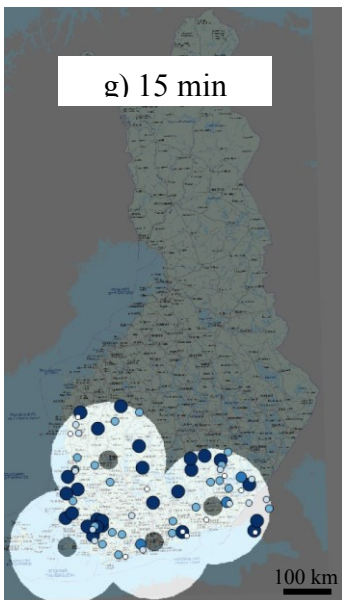
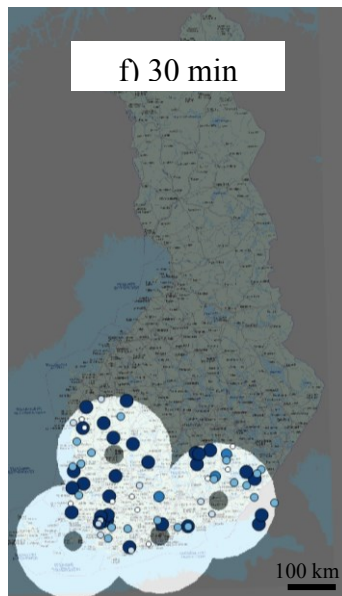
2013

Toistuvuusluokat (pitkät sadetapahtumat)

- Kerran kolmessa vuodessa
- Kerran viidessä vuodessa
- Kerran kymmenessä vuodessa
- Kerran 50 vuodessa
- Kerran 100 vuodessa
- Kerran 500 vuodessa

Valittujen mitoitussateiden sijainnit vuonna 2013 sadetapahtuman keston mukaan luokiteltuna. (e, f, g, h) ovat lyhytkestoiset rankkasateet (5 - 60 min). Kuvissa oleva merkki edustaa tapahtuman toistuvuutta.

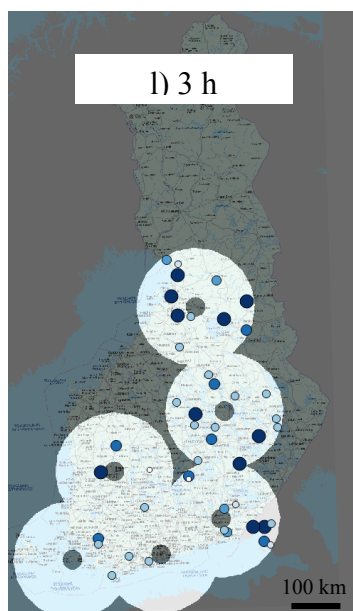
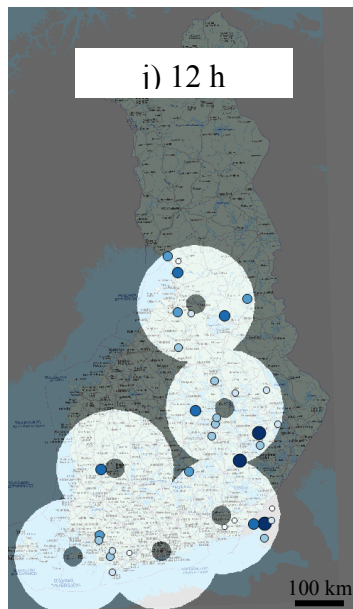
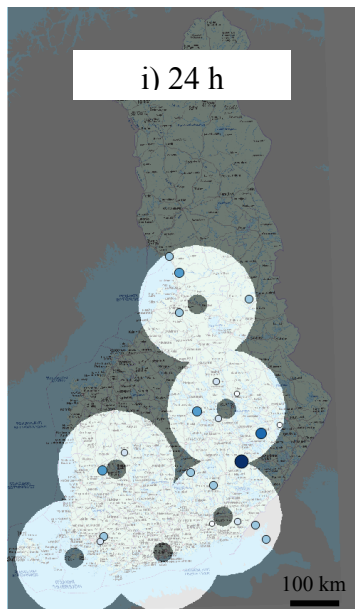
2013



Toistuvuusluokat
(lyhyet sadetapahtumat)

- Kerran kolmessa vuodessa
- Kerran viidessä vuodessa
- Kerran kymmenessä vuodessa
- Kerran 50 vuodessa
- Kerran 100 vuodessa

Valittujen mitoitussateiden sijainnit vuonna 2014 sadetapahtuman keston mukaan luokiteltuna. (i, j, k, l) ovat pitkäkestoiset rankkasateet (3 - 24 h). Kuvissa oleva merkki edustaa tapahtuman toistuvuutta.



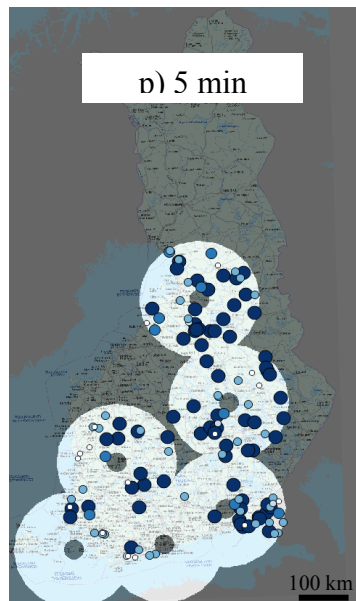
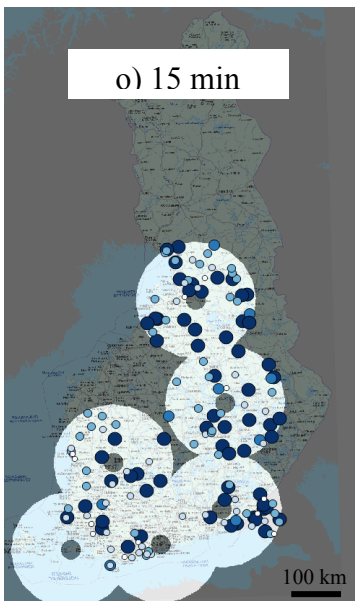
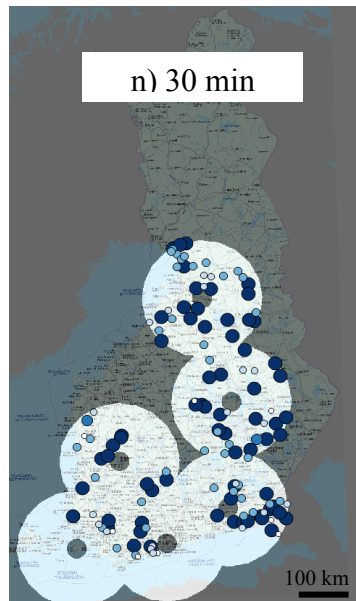
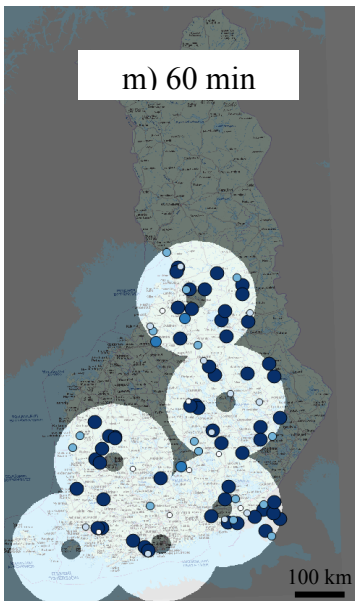
2014

Toistuvuusluokat (pitkät)

- Kerran kolmessa vuodessa
- Kerran viidessä vuodessa
- Kerran kymmenessä vuodessa
- Kerran 50 vuodessa
- Kerran 100 vuodessa
- Kerran 500 vuodessa

Valittujen mitoitusasteiden sijainnit vuonna 2014 sadetapahtuman keston mukaan luokiteltuna. (m, n, o, p) ovat lyhytkestoiset rankkasateet (5 - 60 min). Kuvissa oleva merkki edustaa tapahtuman toistuvuutta.

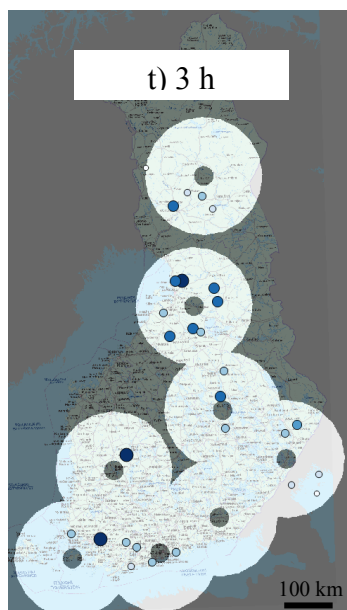
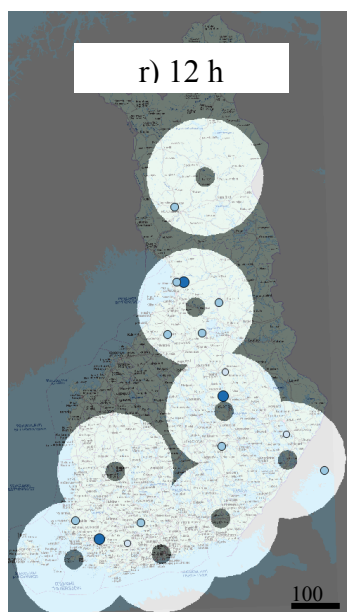
2014



Toistuvuusluokat
(lyhyet sadetapahtumat)

- Kerran kolmessa vuodessa
- Kerran viidessä vuodessa
- Kerran kymmenessä vuodessa
- Kerran 50 vuodessa
- Kerran 100 vuodessa

Valittujen mitoitussateiden sijainnit vuonna 2015 sadetapahtuman keston mukaan luokiteltuna. (q, r, s, t) ovat pitkäkestoiset rankkasateet (3 - 24 h). Kuvissa oleva merkki edustaa tapahtuman toistuvuutta.



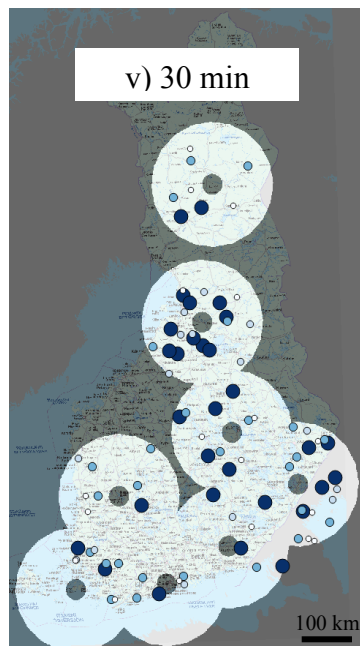
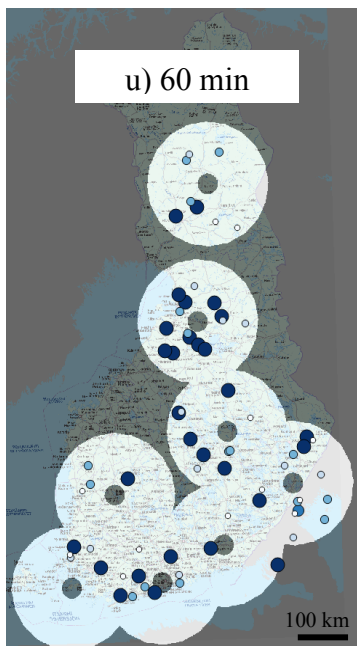
2015

Toistuvuusluokat (pitkät sadetapahtumat)

- Kerran kolmessa vuodessa
- Kerran viidessä vuodessa
- Kerran kymmenessä vuodessa
- Kerran 50 vuodessa
- Kerran 100 vuodessa
- Kerran 500 vuodessa

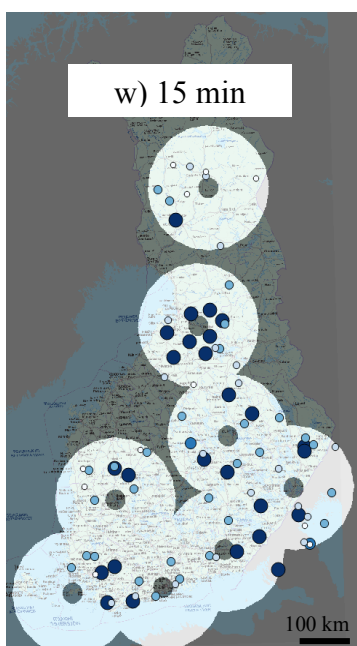
Valittujen mitoitussateiden sijainnit vuonna 2015 sadetapahtuman keston mukaan luokiteltuna. (u, v, w, x) ovat lyhytkestoiset rankkasateet (5 - 60 min). Kuvissa oleva merkki edustaa tapahtuman toistuvuutta.

2015

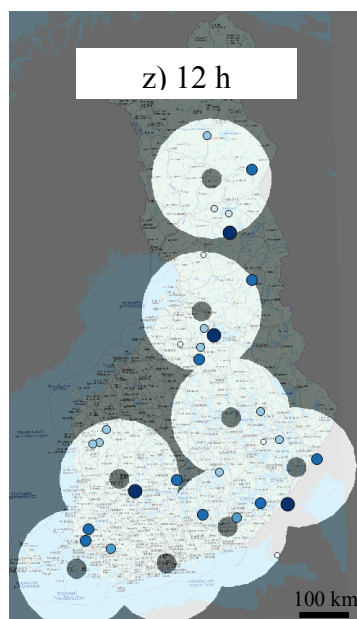


Toistuvuusluokat
(lyhyet sadetapahtumat)

- Kerran kolmessa vuodessa
- Kerran viidessä vuodessa
- Kerran kymmenessä vuodessa
- Kerran 50 vuodessa
- Kerran 100 vuodessa



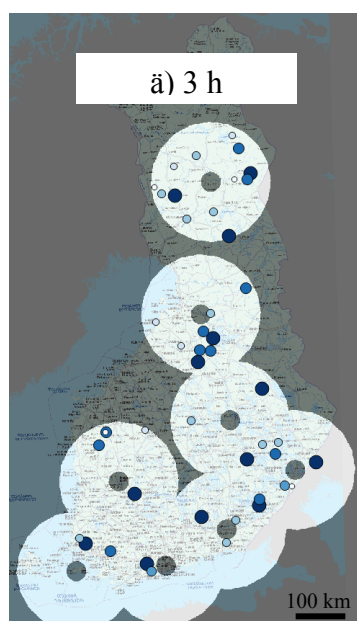
Valittujen mitoitussateiden sijainnit vuonna 2016 sadetapahtuman keston mukaan luokiteltuna. (y, z, å, ä) ovat pitkäkestoiset rankkasateet (3 - 24 h). Kuvissa oleva merkki edustaa tapahtuman toistuvuutta.



2016

Toistuvuusluokat
(pitkät sadetapahtumat)

- Kerran kolmessa vuodessa
- Kerran viidessä vuodessa
- Kerran kymmenessä vuodessa
- Kerran 50 vuodessa
- Kerran 100 vuodessa
- Kerran 500 vuodessa



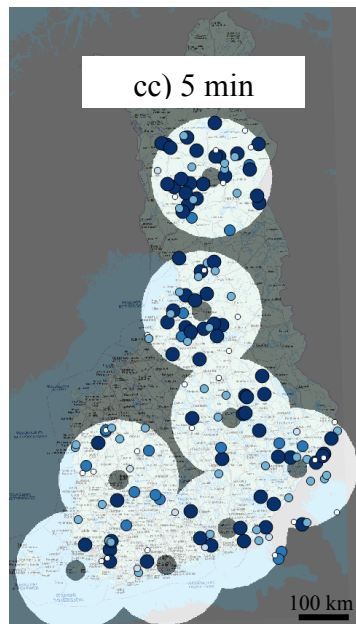
Valittujen mitoitussateiden sijainnit vuonna 2016 sadetapahtuman keston mukaan luokiteltuna. (ö, aa, bb, cc) ovat lyhytkestoiset rankkasateet (5 - 60 min). Kuvissa oleva merkki edustaa tapahtuman toistuvuutta.



2016

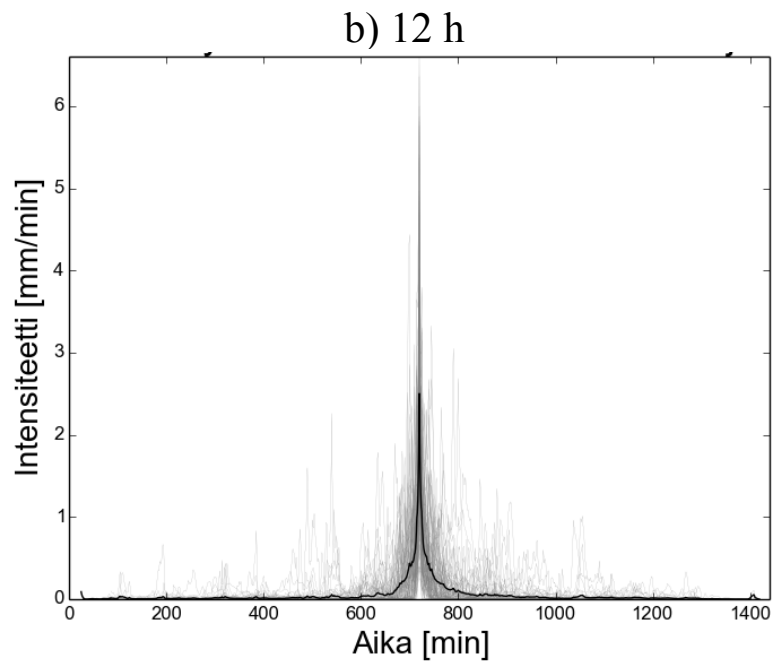
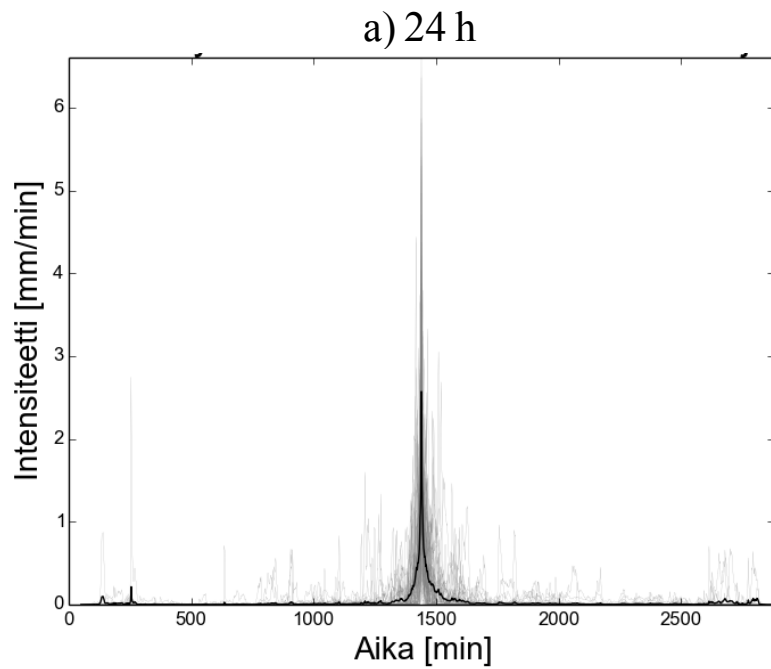
Toistuvuusluokat
(lyhyet sadetapahtumat)

- Kerran kolmessa vuodessa
- Kerran viidessä vuodessa
- Kerran kymmenessä vuodessa
- Kerran 50 vuodessa
- Kerran 100 vuodessa

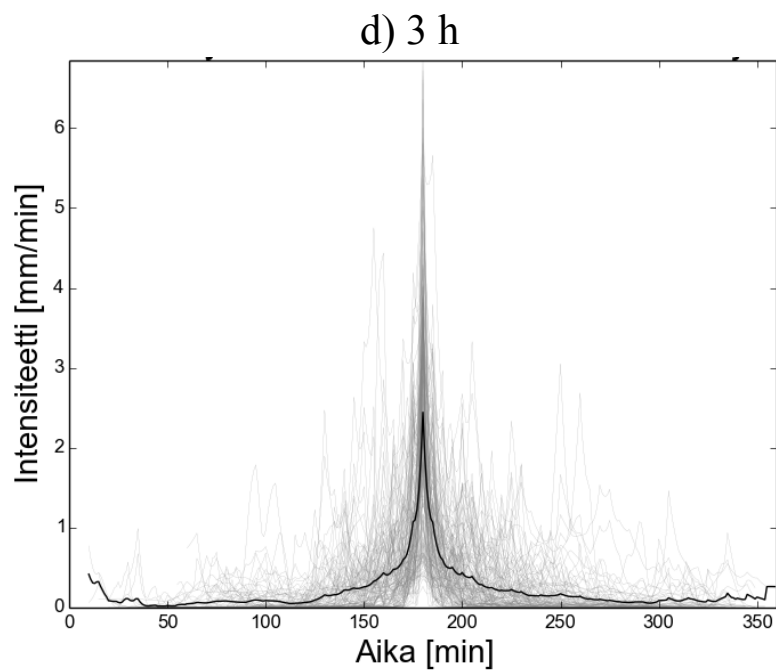
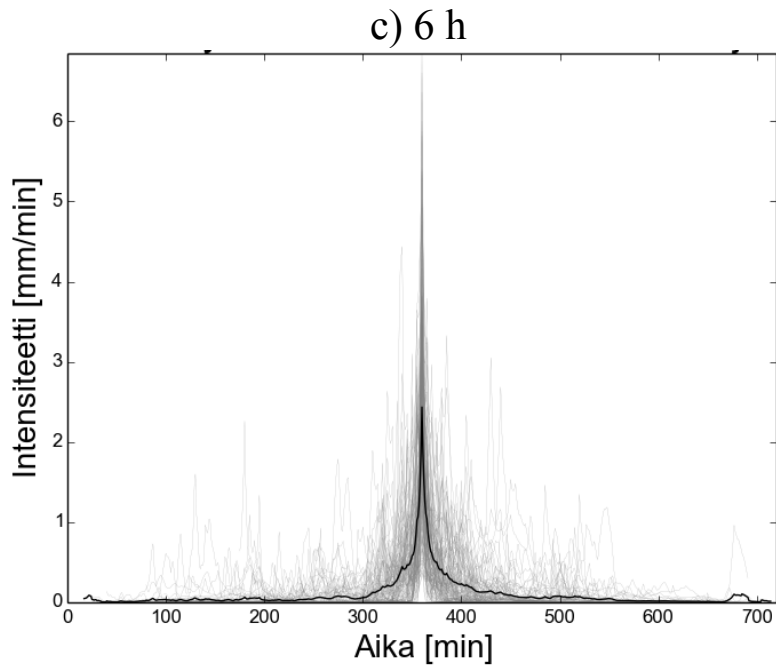


Liite 2. Sadetapahtumien keskitetyt keskiarvoaikasarjat kestoluokittain

(a) 24 h ja (b) 12 h rankkasateet keskitettyinä niin, että voimakkain hetkellinen intensiteetti on keskellä. Keskitetystä kuvaajasta on laskettu keskiarvoaikasarja, joka on puolet pidempi kuin rankkasateet, joista se on laskettu. Yksittäiset mitoitussateet näkyvät kuvassa harmaalla ja keskiarvo mustalla.

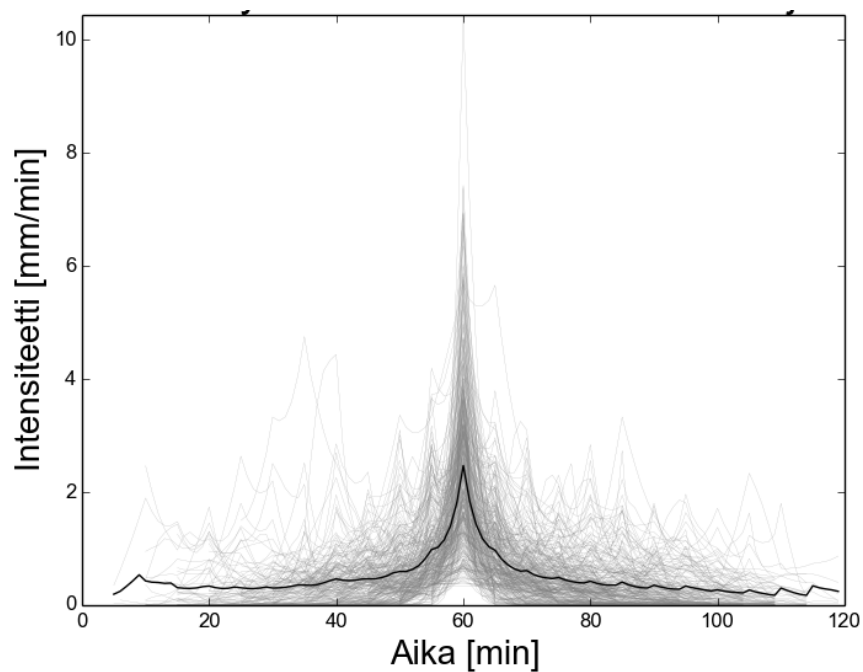


(c) 6 h ja (d) 3 h rankkasateet keskitettyinä niin, että voimakkain hetkellinen intensiteetti on keskellä. Keskitetystä kuvaajasta on laskettu keskiarvoaika-sarja, joka on puolet pidempi kuin rankkasateet, joista se on laskettu. Yksittäiset mitoitussateet näkyvät kuvassa harmaalla ja keskiarvo mustalla.

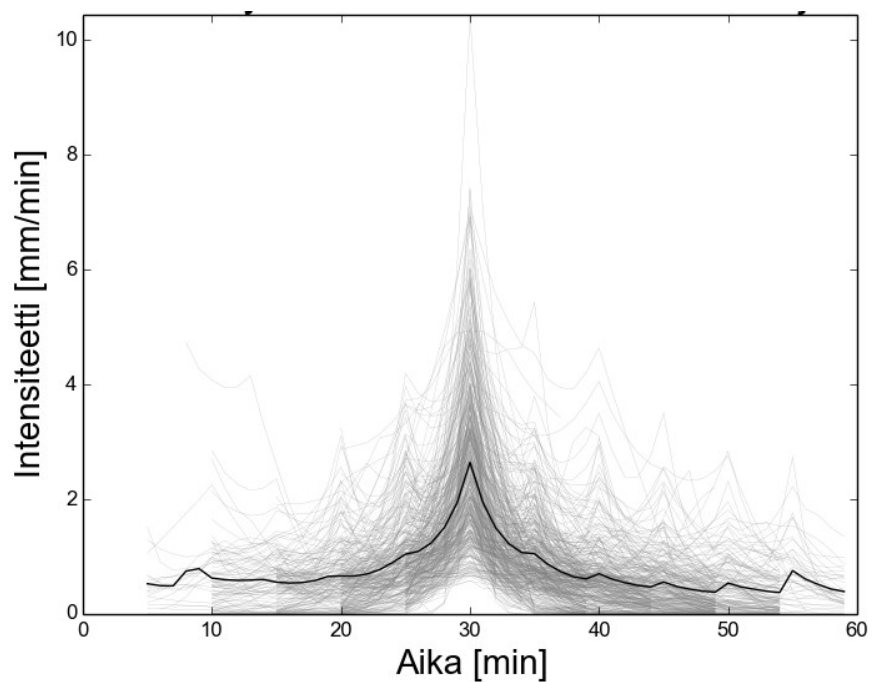


(e) 60 min ja (f) 30 min rankkasateet keskitettyinä niin, että voimakkain hetkellinen intensiteetti on keskellä. Keskitetystä kuvaajasta on laskettu keskiarvoaikasarja, joka on puolet pidempi kuin rankkasateet, joista se on laskettu. Yksittäiset mitoitussateet näkyvät kuvassa harmaalla ja keskiarvo mustalla.

e) 60 min

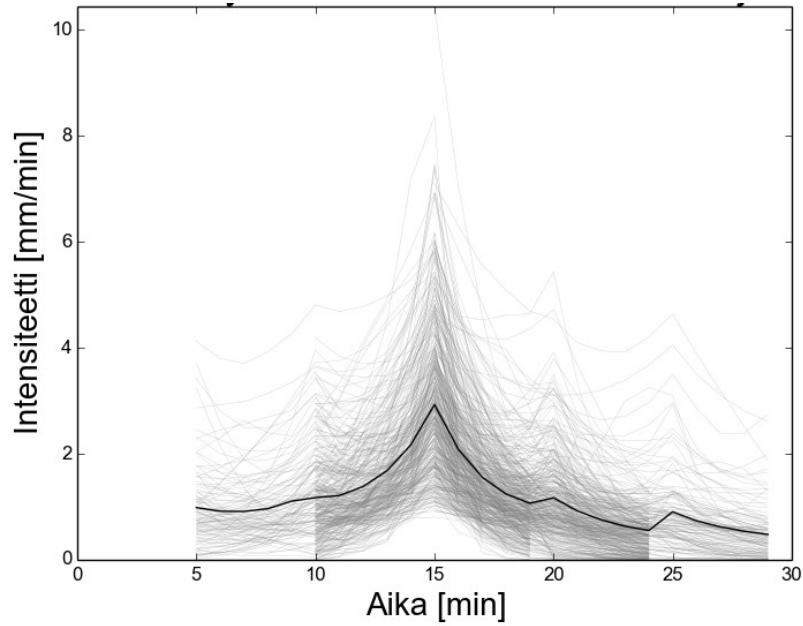


f) 30 min



(g) 15 min ja (h) 5 min rankkasateet keskitettyinä niin, että voimakkain hetkellinen intensiteetti on keskellä. Keskitetystä kuvaajasta on laskettu keskiarvoaikasarja, joka on puolet pidempi kuin rankkasateet, joista se on laskettu. Yksittäiset mitoitussateet näkyvät kuvassa harmaalla ja keskiarvo mustalla.

g) 15 min



h) 5 min

