

Pro gradu –tutkielma
Meteorologia

KESÄSATEIDEN ILMASTOLLISET PIIRTEET HELSINGIN KAISANIEMESSÄ 1951–2000

Tiina Kilpeläinen

Ohjaaja: Heikki Tuomenvirta, Hannu Savijärvi

Tarkastajat: Hannu Savijärvi, Heikki Tuomenvirta

HELSINGIN YLIOPISTO
FYSIKAALISTEN TIETEIDEN LAITOS
PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)
00014 Helsingin yliopisto



Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty		Laitos Institution – Department	
Matemaattis-luonnontieteellinen		Fysikaalisten tieteiden laitos	
Tekijä Författare – Author			
Tiina Kilpeläinen			
Työn nimi Arbetets titel – Title			
Kesäsateiden ilmastolliset piirteet Helsingin Kaisaniemessä 1951–2000			
Oppiaine Läröämne – Subject			
Meteorologia			
Työn laji Arbetets art – Level		Aika Datum – Month and year	Sivumäärä Sidoantal – Number of pages
Pro gradu		Syyskuu 2006	75 sivua
Tiivistelmä Referat – Abstract			
<p>Tämä työ perustuu vuosina 1951–2000 toukokuusta syyskuuhun Helsingin Kaisaniemen mittausasemalla kerättyyn piirtävän sademittarin aineistoon. Työssä esitellään sadantaan vaikuttavia tekijöitä Helsingin Kaisaniemessä ja pohditaan alueen ilmastollista edustavuutta. Työn pääpaino on aineiston laadun arvioinnissa ja Helsingin Kaisaniemen kesäsateiden ilmastollisten piirteiden kuvaamisessa mahdollisimman monipuolisesti.</p> <p>Piirtävän sademittarin digitalisoitu aineisto osoittautui laadultaan hyväksi, ja aineistosta laskettujen vuorokausisadesummien todettiin korreloivan hyvin saman mittausaseman sadekeräysastioiden vuorokausisadesummien kanssa. Sadannan piirteitä voidaan kuvata useilla tilastollisilla jakaumilla. Tässä työssä kahden eksponenttijakauman summa osoittautui parhaiten kuvaamaan sateen ja sateettomien jaksojen kestoja sekä sadetapahtumien sadesummia. Sateen intensiteetin ääriarvot sovitettiin yleistettyyn ääriarvojakaumaan, ja jaksomaksimimenetelmällä rankoilta sateille laskettiin toistumisaikoja. Tulokseksi saatiin, että Helsingin Kaisaniemessä sataa kerran 50 vuodessa 1.78 mm/min 10 minuutin ajan, 1.53 mm/min 15 minuutin ajan, 0.95 mm/min 30 minuutin ajan ja 0.52 mm/min 60 minuutin ajan. 56 hetkellisesti rankimmasta sateesta muodostettu sateen teoreettinen ajallinen muoto on lähes symmetrinen rankimman hetken suhteen, mutta yksittäisten rankkojen sateiden ajallisen muodon todettiin vaihtelevan paljon.</p> <p>Tämän työn tulosten perusteella voidaan todeta, että toukokuussa sateet ovat Helsingin Kaisaniemessä intensiteetiltään heikkoja ja pitkäkestoisia. Kesäkuussa konvektiiviset sateet yleistyvät etenkin iltapäivällä. Heinäkuussa ja elokuussa sateet ovat rankkoja ja lyhytkestoisia, ja elokuussa sademäärän sekä intensiteetin vuorokausivaihtelu on suurimmillaan. Syyskuussa sateen osuus kokonaisuudesta on kesäkuukausista suurin ja intensiteetin vuorokausivaihtelu on vähäistä. Meri vaikuttaa Helsingin Kaisaniemen sateisiin etenkin alkukesällä. Kaupungin kasvun vaikutuksia ei tuloksista voitu erottaa. Vuosikymmenten välillä esiintyy suuria eroja etenkin sadetapahtumien kestossa ja lukumäärässä, mutta selviä merkkejä ilmastonmuutoksesta ei löytynyt. Helsingin Kaisaniemessä sataa kesällä keskimäärin 4.5 % kokonaisuudesta. Yksi sadetapahtuma kestää keskimäärin 60 minuuttia ja sateeton jakso keskimäärin 21 tuntia. Sateen intensiteetti on koko kesän aikana keskimäärin 0.020 mm/min.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords			
Sadanta, piirtävä sademittari, tilastollinen jakauma, Helsinki Kaisaniemi			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Kumpulan tiedekirjasto			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

SISÄLLYS

1. JOHDANTO	1
2. SADANNAN TEORIAA JA TUTKIMUKSIA	2
2.1 SATEEN INTENSITEETTI JA SADETAPAHTUMAT	2
2.2 SADETYYPIT	3
2.3 SADEALUEIDEN KOKO JA LIIKE	4
2.4 SADANNAN HAVAINNOINTI	4
2.5 RANKAT SATEET JA SADE-ENNÄTYKSIÄ	6
2.6 SADANNAN ANALYSOINTI TILASTOMATEMAATTISIN MENETELMIN	7
2.6.1 Tilastolliset jakaumat	7
2.6.2 Ääriarvojakaumista toistumisaikoihin	8
2.7 AIKAISEMPIA TUTKIMUKSIA	12
2.7.1 Kotimaisia tutkimuksia piirtävillä sademittareilla	12
2.7.2 Ulkomaisia tutkimuksia piirtävillä sademittareilla	13
2.7.3 Vertailu tutkimustuloksiin	16
3. ILMASTO HELSINGIN KAISANIEMESSÄ	17
3.1 KAISANIEMEN MITTAUSASEMA	17
3.2 ALUEELLINEN EDUSTAVUUS	18
3.3 PAIKALLISTEN TEKIJÖIDEN VAIKUTUS SADANTAAN	20
3.3.1 Rannikon vaikutus	20
3.3.2 Kaupunki-ilmasto	22
4. SADANNAN MITTAUS	23
4.1 PIIRTÄVÄ SADEMITTARI	23
4.2 KERÄYSASTIAT	24
4.3 VIRHEET	25
4.3.1 Sadannan mittaukseen liittyvät virheet	25
4.3.2 Digitalisointi	28
4.3.3 Kokonaisvirhe	28
5. TUTKIMUSAINEISTO	29
5.1 AINEISTON KATTAVUUS	29
5.2 SADEMITTARIHAVAINTOJEN VERTAILU	30
6. SADANNAN ILMASTOLLISET PIIRTEET	35
6.1 SADETAPAHTUMIEN MÄÄRÄ	35
6.2 SATEEN KESTO	36
6.2.1 Keskimääräinen kesto	36
6.2.2 Keston todennäköisyyksiä ja ennätyksiä	39
6.3 SATEETTOMAT JAKSOT	42
6.3.1 Keskimääräinen kesto	42
6.3.2 Keston todennäköisyyksiä ja ennätyksiä	43
6.4 SADESUMMA	45
6.4.1 Keskimääräinen sadesumma	45
6.4.2 Todennäköisyyksiä ja ennätyksiä	46
6.4.3 Vuorokausivaihtelu	48

6.5 SATEEN INTENSITEETTI	52
6.5.1 Keskimääräinen intensiteetti.....	52
6.5.2 Vuorokausivaihtelu	53
6.5.3 Rankkojen sateiden määrä	58
6.5.4 Rankkojen sateiden ajallinen muoto	60
6.5.5 Toistumisajat.....	62
6.6 ILMASTOLLISET PIIRTEET KUUKAUSITTAIN.....	67
7. YHTEENVETO	70
KIITOKSET	72
KIRJALLISUUSVIITTEET	73

1. Johdanto

Sateen mittaamisella on pitkät perinteet. Tiedetään, että jo 400 eKr. tehtiin Intiassa sadehavainnoja, joita käytettiin verotusperusteena (Mustonen, 1986). Nykyään sadehavainnoilla on edelleen yhteiskunnallista merkitystä esimerkiksi kaupunkisuunnittelussa. Sadannan hetkellinen alueellinen ja ajallinen vaihtelu on satunnaista. Sadannan ilmastollisten piirteiden ja ääri-ilmiöiden tunteminen on silti välttämätöntä monissa hydrologisissa mitoitustehtävissä. Sadannan ilmastollisia piirteitä on useimmiten tilastoitu vuorokauden sadesummiin perustuen (esim. Alalammi, 1987 ja Drebs et al. 2002), mutta sateen vuorokautisesta vaihtelusta, intensiteetistä ja etenkin rankkasateista on Suomessa hyvin vähän tutkimustietoa.

Useiden vuosikymmenien ajan on Suomessa muutamilla mittausasemilla mitattu sadantaa myös piirtävillä sademittareilla. Piirtävä sademittari rekisteröi sateen intensiteettiä jatkuvasti, mikä mahdollistaa myös lyhytaikaisten vaihteluiden tutkimisen. Pitkäaikaisesta aineistosta on mahdollista saada edustava kuva mittauspaikan sadannan ilmastollisista piirteistä. Nykyään sadannan tutkimus on yhä enemmän painottunut sadetutkamittauksiin. Sadetutkalla on ylivoimainen ajallinen erotuskyky ja alueellinen kattavuus, mutta pitkäaikaisen ilmaston tutkimukseen ei tutka-aineistoa ole saatavilla.

Tämä tutkimus perustuu Helsingin Kaisaniemen piirtävän sademittarin sadehavaintoihin 50 vuoden ajalta. Kaisaniemen mittausasema sijaitsee aivan Helsingin keskustassa. Tutkimuksessa selvitetään sadannan piirteitä alueella, jonka läheisyydessä asuu noin puoli miljoonaa ihmistä. Lähtökohtana tutkimukselle oli selvittää, onko piirtävän sademittarin digitalisoitu aineisto käyttökelpoista sekä laadukasta ja mitä kaikkea aineistosta voidaan saada selville. Kokemuksia voidaan hyödyntää tulevaisuudessa, kun myös muiden sadehavaintoasemien aineistoa muutetaan digitaaliseen muotoon. Helsingin Kaisaniemen sadannan ilmastollisia yleispiirteitä selvitetään tässä työssä mahdollisimman monipuolisesti, ja monia piirteitä pyritään kuvaamaan myös matemaattistilastollisin menetelmin. Tässä työssä esitellään muun muassa sateen keston, sadesumman ja sateen intensiteetin ominaisuuksia ja selvitetään, onko vuosikymmenten aikana tapahtunut muutoksia. Rankkoihin sateisiin paneudutaan selvittämällä erityisesti niiden ajallista muotoa ja toistumisaikoja. Tämä työ tehtiin osana Ilmatieteen laitoksen, Suomen Ympäristökeskuksen

ja Teknillisen korkeakoulun yhteistä RATU -hanketta, jossa tutkitaan rankkasateita ja taajamatulvia Suomessa.

2. Sadannan teoriaa ja tutkimuksia

2.1 Sateen intensiteetti ja sadetapahtumat

Sateen intensiteetillä tarkoitetaan vaakasuoralle pinnalle aikayksikön kuluessa kertyvän veden määrää, toisin sanoen sateen intensiteetti on nestemäisen veden vuo vaakasuoralle pinnalle (Puhakka, 1995). Se voidaan esittää sademäärän aikaderivaattana kaavan 2.1 mukaisesti.

$$I = \frac{dR}{dT} \quad (2.1)$$

Intensiteetti on hetkellinen suure, mutta useimmiten se määritellään tietyn aikavälin keskimääräisenä intensiteettinä. Sateen intensiteetin yksikkönä käytetään usein mm/min tai mm/h, jolloin intensiteetillä tarkoitetaan vaakasuoralle pinnalle kertyvän vesikerroksen paksuutta aikayksikköä kohden. Vaihtoehtoisina yksikköinä voidaan käyttää myös esimerkiksi $l \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ tai $g \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Monilla mittausasemilla sademäärää mitataan kerran vuorokaudessa, ja silloin yksikkönä käytetään mm/vrk. Sateen intensiteetti riippuu pisaroiden kokojakaumasta sekä pisaroiden putoamisnopeudesta, ja intensiteetin ajallinen sekä paikallinen vaihtelu on suurta. Suomen olosuhteissa sateen intensiteetin suuruusluokka on välillä 10^{-3} –5 mm/min.

Sadetapahtumaksi määritellään yhtäjaksoinen sadanta, joka tulee vaakasuoralle pinnalle. Sadetapahtumaa edeltää ja seuraa sateeton jakso, joka voi olla kestoltaan muutamasta minuutista useisiin viikkoihin. Jokaisella sadetapahtumalla on kesto, joka vaihtelee suuresti sadetapahtumasta toiseen. Sadetapahtuman keston aikana kertynyttä vesikerroksen paksuutta kutsutaan sadetapahtuman sadesummaksi, ja se ilmaistaan usein yksikössä mm.

Tässä tutkimuksessa sateeksi on määritelty intensiteetiltään vähintään 0.0016 mm/min sade, jossa sadetapahtuman sadesummaksi kertyy vähintään 0.1 mm. Erillisten sadetapahtumien aikarajana on käytetty vähintään 5 minuutin sateetonta jaksoa. Määritelmät perustuvat käytetyn mittalaitteen tarkkuuteen. Yhteneväisyyden vuoksi kaikki intensiteetit on tässä työssä ilmaistu yksikössä mm/min. Kaikki kellonajat on esitetty paikallisessa ajassa.

2.2 Sadetyypit

Ilmakehän dynamiikan näkökulmasta sade on lähes aina seurausta vesihöyrypitoisen ilman nousevasta liikkeestä. Pystyliike säätelee sateen kolmiulotteista jakaumaa, kestoja ja intensiteettiä. Pystyliike, ja sen seurauksena myös sade, liittyvät oleellisesti kolmeen epävakaisuusmekanismiin, jotka ovat hydrostaattinen ehdollinen epävakaisuus, symmetrinen epävakaisuus ja barokliininen epävakaisuus (Puhakka, 1995).

Nousevan liikkeen aiheuttajan perusteella voidaan sade jakaa kolmeen perustyyppiin:

1. Laaja-alainen rintamasade
2. Konvektiivinen kuurosade
3. Orografinen sade

Laaja-alainen rintamasade syntyy barokliinisen epävakaisuuden seurauksena. Syntyneiden barokliinisten häiriöiden nousevan liikkeen alueet ovat suuruusluokaltaan synoptisia. Barokliinisen epävakaisuuden aiheuttamien rintamien yhteydessä ilma joutuu pakotettuun liikkeeseen pitkin kaltevaa rintamapintaa. Lämpimässä rintamassa nousuliike on hidasta, ja sade on laaja-alaista sekä suhteellisen tasaista. Kylmään rintamaan liittyvä sade on lämpimän rintaman sateeseen verrattuna rankempaa, alueellisesti suppeampaa ja lyhytkestoisempaa. Synoptista suuruusluokkaa pienempiä mutta konvektiivisten häiriöiden suuruusluokkaa suurempia häiriöitä syntyy symmetrisen epävakaisuuden seurauksena. Symmetrisen epävakaisuuden oletetaan olevan merkittävin laaja-alaisen barokliinisen sadealueen yksityiskohtia muokkaava tekijä (Puhakka, 1995).

Konvektiivinen kuurosade on ehdollisen hydrostaattisen epävakaisuuden synnyttämää. Maanpinnan lähellä oleva lämmennyt ilma kohoaa ylöspäin ja jäähtyy kuiva-adiabaattisesti. Lopulta tiivistymisen kautta seuraa sadetta. Konvektiivinen nousuvirtaus on nopeaa, ja konvektiivinen kuurosade on suhteellisen rankkaa. Koska konvektiopilvet ovat horisontaalisessa suunnassa suhteellisen pieniä, on sade alueellisesti suppea-alaista ja lyhytkestoista. Konvektiivisissa sateissa on suuria eroja sateen partikkelijakaumissa ja intensiteeteissä pilven eri osien välillä (Puhakka, 1995).

Orografinen sade on poikkeus, koska se ei liity oleellisesti epävakaisuuden vapautumiseen ilmakehässä. Orografinen sade syntyy, kun liikkuva ilmamassa joutuu pakotettuun

nousuliikkeeseen maastoesteen vuoksi. Suomessa korkeuserot ovat pieniä, joten orografisia sateita ei suoranaisesti esiinny, mutta pienikin maaston nousu voi vaikuttaa sateen alueelliseen jakaumaan.

2.3 Sadealueiden koko ja liike

Sadanta vaihtelee suuresti sekä ajallisesti että paikallisesti, siten että jo alle kilometrin etäisyydellä ja minuutin ajassa voi sadannassa esiintyä suuria vaihteluita. Sadealueiden laajuus ja kesto riippuvat sateen syntytavasta kuten luvussa 2.2 todettiin. Koistinen (1985) selvitti Helsingissä vuosina 1977–1978 tehtyjen tutkahavaintojen perusteella sadelaikkujen keskimääräistä kokoa. Rintamiin liittyvät sadealueet olivat pinta-alaltaan keskimäärin 120–200 km². Kylmän ilmassa sadekuurojen keskimääräinen pinta-ala oli 56 km² ja lämpimän ilmassa sadekuurojen keskimääräinen pinta-ala oli 25 km². Kaurola et al. (1989) esittivät, että Helsinkiä ympäröivällä 250 kilometrin säteellä rintamien vaikutusaika on kesällä 11–15 tuntia. Yksittäisessä mittauspisteessä rintama vaikuttaa huomattavasti lyhyemmän aikaa. Rintaman liikkeen keskimääräiseksi nopeudeksi Helsingin lähialueilla on arvioitu noin 8 m/s.

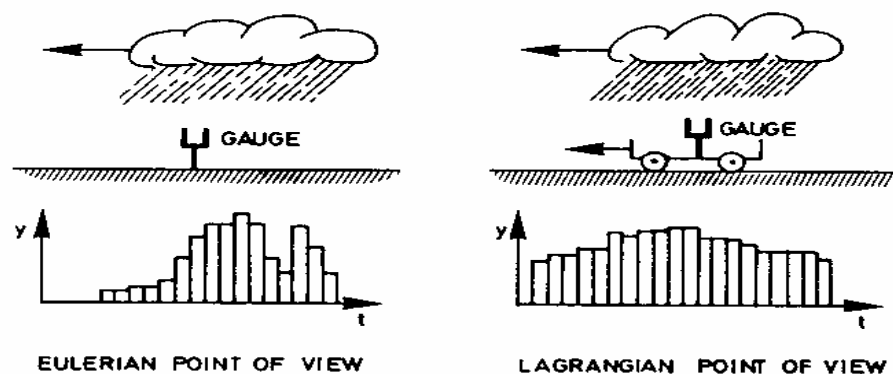
Austin ja Houze (1972) tutkivat konvektiivisten sadesolujen kokoa New Englandin alueella Yhdysvalloissa ja saivat tulokseksi 2–30 km². Jos konvektiivisten sadesolujen oletetaan olevan muodoltaan pyöreitä, ovat ne siten halkaisijaltaan muutaman kilometrin mittaisia. Konvektiivisen sadesolun eliniän on arvioitu olevan noin 10–60 minuuttia (Hobbs ja Locatelli, 1978). Sadesolu liikkuu elinaikanaan arviolta 6–26 km ennen kun se häviää (Niemczynowicz 1991). Sadesolujen liikettä on tutkittu useissa tutkimuksissa. Hobbs ja Locatelli (1978) esittivät, että sadesolun liikenopeus on 2–25 m/s. Niemczynowiczin (1991) mukaan konvektiivisten sadesolujen liikenopeus ja etenkin liikesuunta korreloivat hyvin 600 hPa:n tuulen nopeuden ja suunnan kanssa. Niemczynowicz esitti Ruotsin Lundissa tehtyjen mittausten perusteella, että konvektiivisten sadesolujen keskimääräinen etenemisnopeus on 10 m/s. Yhden sadesolun kulkemiseen mittauspisteen ylitse 10 m/s nopeudella kuluu noin 3–10 minuuttia.

2.4 Sadannan havainnointi

Sadantaa voidaan havainnoida kahdesta eri näkökulmasta, jotka on esitetty kuvassa 2.1. Kuvassa vasemmalla on havainnollistettu staattinen näkökulma, jota usein kutsutaan

Eulerian-perspektiiviksi. Kuvassa oikealla on havainnollistettu dynaaminen näkökulma, jota kutsutaan myös Lagrange-perspektiiviksi. Lagrange-perspektiivissä havaitsija seuraa liikkuvaa sadesolua sen reitillä. Lagrange-perspektiivissä sadesolulla on havaittava suunta ja nopeus, ja näkökulmasta voidaan havainnoida myös sadesolun kehitystä sekä heikkenemistä ajan funktiona (Niemczynowicz, 1991). Lagrange-lähestymistapaa oli lähes mahdotonta soveltaa ennen säätutkan olemassaoloa, mutta nykyään säätutkan avulla voidaan sadejärjestelmää seurata liikkuvassa koordinaatistossa.

Eulerian-perspektiiviä on perinteisesti käytetty sadannan mittauksessa. Pistearvoa mitattaessa Eulerian-perspektiivissä sademittari on kiinteästi sijoitettu yhteen mittauspisteeseen, ja sadejärjestelmät liikkuvat mittauspisteen ylitse. Keräysastialla tai rekisteröivällä sademittarilla saadaan selville sateen ajallinen vaihtelu tietyssä mittauspisteessä. Sademittarin aikasarjaan vaikuttavat sadejärjestelmän koko, kehitysvaiheet, paikallinen vaihtelu, liikenopeus ja liikesuunta. Näitä vaikutuksia on mahdotonta erotella Eulerian-perspektiivissä, joten yhden mittauspisteen havainnoista ei voida tehdä yksiselitteisiä päätelmiä sadejärjestelmän rakenteesta. Pieni hitaasti liikkuva sadesolu voi Eulerian-perspektiivin mittauksissa saada aikaan samanlaisen mittaustuloksen kuin nopeasti liikkuva laaja-alainen sadealue. Sadejärjestelmät voivat myös ylittää mittauspisteen joko vain sivuten tai suoraan mittauspisteen ylitse, mikä vaikuttaa havaittuun sadantaan. Sadannan ajallista vaihtelua mittauspisteessä kuvataan usein hyetograafilla, jossa vaaka-akselilla on aika ja pystyakselilla on sateen intensiteetti. Sateen muoto, eli jakauman muoto hyetograafilla, vaihtelee suuresti sadetapahtumasta toiseen.



Kuva 2.1 Sadannan aikasarja vasemmalla Eulerian-perspektiivissä (pistemittaus) ja oikealla Lagrange-perpektiivissä (liikkuva mittaus) (Niemczynowicz, 1991).

2.5 Rankat sateet ja sade-ennätyksiä

Intensiteetiltään voimakkaita sadekuuroja kehittyi, kun koko troposfääri on epävakaana. Runsas sade lyhyessä ajassa aiheuttaa usein tulvimista etenkin taajamissa, koska vesi ei pääse imeytymään ja kulkeutumaan luonnollisesti. Rankimmat sateet ajoittuvat kesään, jolloin ilma on lämmintä ja se voi sisältää paljon kosteutta (Liljequist, 1962). Suotuisissa olosuhteissa voi pilviin sitoutua suuria vesimääriä, jotka satavat maahan suurina pisaroina lyhyen ajan kuluessa.

Simojoen (1944) tutkimuksessa esitettiin jo 1920-luvulla määritetyt intensiteettirajat sateen rankkuudelle. Myös Rantakrans (1967) määritteli sateen rankkuuden intensiteettirajat. Rantakransin määritelmässä rajat rankalle sateelle ovat Simojoen esittämiä rajoja selvästi alhaisemmat. Molemmissa raja-arvoasteikoissa sateen rankkuus riippuu oleellisesti kestoajasta, siten että pidemmällä kestoajoilla rankoiksi määriteltyjen sateiden keskimääräinen intensiteetti on selvästi pienempi. Rantakransin rankan sateen määritelmä, jota sovelletaan vielä nykyäänkin Ilmatieteen laitoksella, on esitetty taulukossa 2.1. Määritelmän raja-arvot rankaksi luokiteltavalle sateelle soveltuvat Suomen etelä- ja keskiosan sateisiin. Raja-arvot on pyritty asettamaan siten, että vuosittain tietyssä mittauspisteessä esiintyisi rankkasade ainakin yhden kerran. Rankkojen sateiden tutkimukseen liittyy oleellisesti myös toistumisajan käsite, jota käsitellään tarkemmin luvussa 2.6.2.

Taulukko 2.1 Raja-arvot rankalle sateelle keston mukaan (Rantakrans, 1967).

kesto	sadesumma [mm]	kesto	sadesumma [mm]	kesto	sadesumma [mm]
5 min	2.5	2 h	8	14 h	14.3
10 min	3.5	3 h	9	15 h	14.6
15 min	4.5	4 h	9.6	16 h	15
20min	5	5 h	10.2	17 h	15.3
25min	5.3	6 h	11	18 h	15.8
30min	5.5	7 h	11.5	19 h	16.2
35 min	5.8	8 h	12	20 h	16.6
40min	6.1	9 h	12.4	21 h	17
45 min	6.3	10 h	12.8	22 h	17.5
50 min	6.5	11 h	13.2	23 h	18
55 min	6.8	12 h	13.5	24 h	18.5
1 h	7	13 h	13.9		

Yli 100 mm suuriset vuorokausisademäärät ovat Suomen ilmasto-oloissa hyvin harvinaisia. Suomen vuorokausisademäärän ennätys, 198 mm, mitattiin Espoon Lahnuksessa 21. heinäkuuta 1944. Helsingin Kaisaniemen mittausaseman suurin vuorokausisademäärä, 79.3 mm, mitattiin 24. heinäkuuta vuonna 1993. Suomen rankin sade vuorokaudessa ja sitä lyhyemmässä ajassa on noin 10 prosenttia maailman rankimmista arvoista. Hetkellisten intensiteettien ennätyksiä ei ole Suomessa koottu. Ruotsissa Tukholman alueella 56 vuoden aikana (ajanjaksolla 1908–1963) suurin mitattu 10 minuutin keski-intensiteetti oli 2.77 mm/min, 15 minuutin keski-intensiteetti 1.88 mm/min, 30 minuutin keski-intensiteetti 1.26 mm/min ja 60 minuutin keski-intensiteetti 0.92 mm/min (Modén ja Nyberg, 1965).

2.6 Sadannan analysointi tilastomatemattisin menetelmin

2.6.1 Tilastolliset jakaumat

Sadanta on stokastinen prosessi, ja sadetapahtumat esiintyvät hyvin epäsäännöllisesti. Myös sadetapahtuman kesto ja rankkuus ovat satunnaismuuttujia. Sadantaa voidaan kuvata kuitenkin tilastollisilla jakaumilla, jotka Mustosen (1986) mukaan voidaan jakaa seuraaviin tyyppisiin:

1. Sadetapahtumien esiintymistiheyden jakauma
2. Sadetapahtumien kestoajkojen jakauma
3. Sateettomien jaksojen kestoajkojen jakauma
4. Sademäärien jakauma

Mustosen määrittelemien jakaumien lisäksi myös sateen intensiteetin todennäköisyysjakauma liittyy oleellisesti sadannan tilastolliseen kuvaamiseen.

Poisson-jakaumaa pidetään sopivana kuvaamaan satunnaisia tapahtumia, kuten sadetapahtumien esiintymistä (Tattelman ja Knight, 1988). Sadetapahtumien esiintymistä kuvaava tiheysfunktio voidaan esittää kaavan 2.2 mukaisesti (Mustonen, 1986):

$$p_t(n) = \frac{(kt)^n e^{-kt}}{n!} \quad (2.2)$$

missä $n = 0, 1, 2, \dots$, $p_t(n)$ on todennäköisyys, että n tapahtumaa alkaa aikavälillä $[0, t]$ ja k on jakauman parametri. Poisson-jakaumasta seuraa, että sekä sadetapahtumien esiintymisen odotusarvo että varianssi ovat kt .

Peräkkäisten sadetapahtumien alkamishetkien välinen aika T on todettu eksponentiaalisesti jakautuneeksi, ja sitä kuvaa kaavan 2.3 tiheysfunktio (Mustonen, 1986):

$$f_T(t_a) = ke^{-kt_a} \quad (2.3)$$

missä t_a on alkamisajankohta ja k on jakauman parametri. Eksponenttijakaumasta seuraa, että alkamishetkien välisen ajan T odotusarvo on $1/k$ ja varianssi $1/k^2$. Koska T on sateen kestoajan t_s ja sitä seuraavan sateettoman jakson kestoajan t_k summa, ovat myös sateen kesto aika ja sateettoman jakson kesto aika jakautuneet eksponentiaalisesti, ja niitä voidaan kuvata kaavan 2.3 funktiolla käyttämällä t_a :n sijasta t_s :ta tai t_k :ta.

Yksittäisten sadetapahtumien sademäärien p on todettu noudattavan tyydyttävästi gammajakaumaa erilaisissa ilmasto-oloissa, ja jakauman tiheysfunktio voidaan esittää kaavan 2.4 mukaisesti (Mustonen, 1986):

$$f_p(p) = \frac{l(lp)^{s-1} e^{-lp}}{\Gamma(s)} \quad (2.4)$$

missä l sekä s ovat jakauman parametrit ja $\Gamma(s)$ on gammafunktio. Sademäärien odotusarvo on s/l ja s/l^2 .

Sateen intensiteetin todennäköisyysjakaumaa kuvataan usein lognormaalijakaumalla. Sateen intensiteetin kasvaessa pienenee esiintymistodennäköisyys voimakkaasti. Lognormaalijakauman on todettu sopivan melko huonosti yhteen havaitun jakauman kanssa suurilla intensiteeteillä (Kedem et al., 1994). Kun muuttujan x , esimerkiksi sateen intensiteetin, luonnolliset logaritmit ovat normaalisti jakautuneet parametrein $\mu_n, \sigma_n \sim N(\mu_n, \sigma_n)$ voidaan lognormaalijakauman tiheysfunktio esittää kaavan 2.5 mukaisesti (Mustonen, 1986).

$$f(x) = \frac{1}{\mu_n \sigma_n \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_n)^2}{2\sigma_n^2}\right] \quad (2.5)$$

2.6.2 Ääriarvojakaumista toistumisaikoihin

Kun satunnaismuuttujan aikasarjasta poimitaan suurin (tai pienin) arvo jokaiselta määrätyltä aikaväliltä, muodostuu ääriarvomuuttujia. Maksimiarvon poimintaa voidaan kuvata kaavalla 2.6:

$$\max(x_1, x_2, \dots, x_T) \quad (2.6)$$

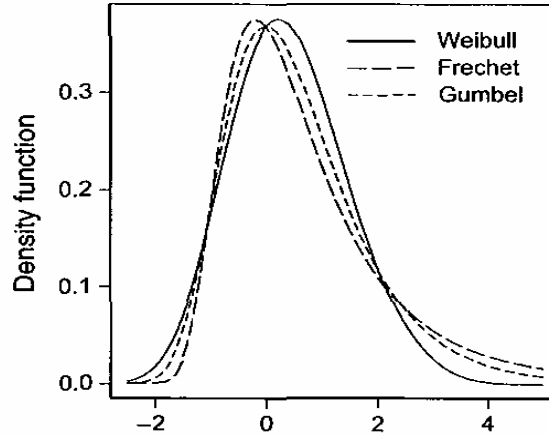
missä x_1, x_2, \dots, x_T kuvaa havaintoaineistoa (Katz et al., 2005). Tätä menetelmää kutsutaan usein jaksomaksimimenetelmäksi (englanniksi Block maxima). Tilastomatematiikassa on johdettu useita ääriarvomuuttujia kuvaavia jakaumia. Ääriarvojakauman arvojen oletetaan yleensä olevan riippumattomia ja yhtäläisesti jakautuneita. Ääriarvojen on todettu noudattavan yleistä ääriarvojakaumaa (GEV-jakauma). Jakauma voidaan kuvata kaavan 2.7 mukaisesti (Katz et al., 2005):

$$F(x; \mu, \sigma, \xi) = \begin{cases} \exp\{-[1 + \xi(x - \mu)/\sigma]^{-1/\xi}\}, & \xi \neq 0 \\ 1 + \xi(x - \mu)/\sigma > 0 \\ \exp\{-\exp[-(x - \mu)/\sigma]\} & \xi = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

missä μ on sijaintiparametri, $\sigma > 0$ on skaalaparametri ja ξ on muotoparametri. Jakauman parametrit voidaan määrittää numeerisesti suurimman todennäköisyyden menetelmällä, jota useat ääriarvojen laskentaohjelmistot käyttävät. Sijaintiparametri μ kuvaa jakauman keskittymiskohtaa, ja se on verrattavissa esimerkiksi tunnetumman normaalijakauman keskiarvoon. Skaalaparametri σ kuvaa jakauman levittäytymistä, ja se on verrattavissa esimerkiksi normaalijakauman keskihajontaan. Muotoparametrissa ξ riippuen GEV-jakauma voidaan jakaa kolmeen mahdolliseen tyyppiin (Katz et al., 2005):

1. $\xi = 0$, Gumbel-jakauma
2. $\xi > 0$, Fréchet-jakauma
3. $\xi < 0$, Weibull-jakauma

Gumbel-jakauman häntä pienenee suhteellisen nopeasti jakauman yläpäässä, joten jakaumalla on lyhyt häntä. Fréchet-jakauman häntä pienenee hitaammin kuin Gumbel-jakauma, ja sillä on todettu olevan pitkä häntä. Weibull-jakaumalla on yläpäässä ponnahtava ja äärellinen häntä. Kuvassa 2.2 on esitetty 1.–3. tyyppin GEV-jakaumien todennäköisyysfunktioita.

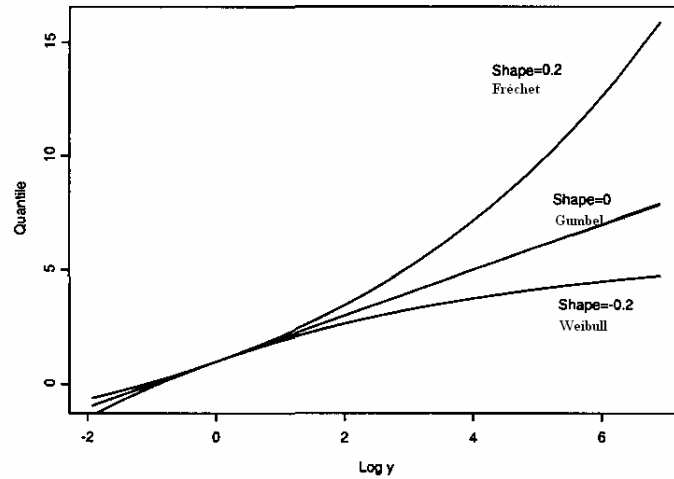


Kuva 2.2 Yleistetyin ääriarvojakauman (GEV-jakauman) kolmen jakaumatyyppin todennäköisyystiheysfunktiot, kun $\mu=0$ ja $\sigma=1$. Yhtenäisellä viivalla Weibull-jakauma muotoparametrilla $\xi=-0.2$, lyhyellä katkoviivalla Gumbel-jakauma $\xi=0$ ja pitkällä katkoviivalla Fréchet-jakauma $\xi=0.2$ (Katz, 2005).

Ääriarvojakaumasta voidaan selvittää tapausten, kuten rankan sateen, toistumisaikoja. Toistumisaika ilmaistaan useimmiten vuosina, ja sillä tarkoitetaan aikaa, jonka aikana ilmiö esiintyy todennäköisesti yhden kerran, esimerkiksi kerran 100 vuodessa. Toistumisaika $1/p$ on suoraan $(1-p)$ -fraktiili ääriarvojakaumasta. Esimerkiksi vuosittaisista maksimeista muodostetussa ääriarvojakaumassa $p=0.01$ vastaa 100 vuoden toistumisaikaa. Toistumistaso, joka ylittyy kerran $1/p$ vuodessa, saadaan yleistetyin ääriarvojakauman lausekkeesta ja voidaan esittää kaavan 2.8 muodossa:

$$F^{-1}(1-p; \mu, \sigma, \xi) = \begin{cases} \mu - (\sigma / \xi) \{1 - [-\ln(1-p)]^{-\xi}\} & \xi \neq 0 \\ \mu - \sigma \ln[-\ln(1-p)] & \xi = 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

missä $0 < p < 1$ (Coles, 2001). Toistumisaika on lineaarinen μ :n ja σ :n suhteen, mutta epälineaarinen ξ :n suhteen. Muotoparametrin ξ vaikutus toistumisaikoihin on kuvattu kuvassa 2.3, josta nähdään, että Gumbel-jakauman toistumisaika on lineaarinen logaritmisella asteikolla, mutta Fréchet- ja Weibull-jakaumien toistumisajan kuvaajat kaartuvat muotoparametrin määräämään suuntaan. Fréchet-jakaumaa noudattavat suureet saavat äärettömän suuria arvoja pitkällä toistumisajoilla. Weibull-jakaumaa noudattavien suureiden toistumisajat lähestyvät jotain raja-arvoa.



Kuva 2.3 Ääriarvojakauman muotoparametrin vaikutus toistumisaikoihin. Vaaka-akselilla on toistumisajan logaritmi, pystyakselilla on toistumistaso. Ylimpänä Fréchet-jakauma $\xi = 0.2$, keskellä Gumbel-jakauma $\xi = 0$ ja alimpana Weibull-jakauma $\xi = -0.2$ (Coles, 2001).

Yleistetyssä ääriarvojakaumassa oletetaan suureen riippumattomuus ja yhtäläinen jakautuminen. Sadanta ei ole ajassa riippumaton ja yhtäläisesti jakaantunut (Buishand, 1984). Sadetapahtumat ja suuret intensiteetit esiintyvät usein ryppäissä, ja sadannalla on usein vuosittainen ja vuorokautinen vaihtelu. Katz et al. (2005) esitti, että riippumattomuuden oletus ei ole välttämätöntä yleistetyssä ääriarvojakaumassa, ja vuosittaisia tai vuorokautisia vaihteluita ei ole tarpeen poistaa ennen jakauman sovittamista, jos ajan t sijasta käytetään kovarianttia z_t .

Yleistetyn ääriarvojakauman etuna on, että subjektiivista jakauman valintaa ei tarvita, vaan sopivin jakaumatyyppi määräytyy tutkittavan aineiston perusteella (Coles, 2001). Jaksomaksimimenetelmän etuna on, että sen soveltamiseen tarvitaan aineistosta vain maksimi-arvot. Haittana menetelmälle kuitenkin on, että se ei välttämättä hyödynnä kaikkea käytössä olevaa aineistoa. Vaihtoehtoisena menetelmänä käytetään usein koko aineistoa hyödyntävää POT-menetelmää. Menetelmässä koko aineistosta poimitaan arvot, jotka ylittävät asetetun kynnyksarvon. Kynnyksarvon ylittävät arvot kuuluvat yleistettyyn Pareto-jakaumaan, jonka määräävät sijainti-, skaala- ja muotoparametrit. Kuten yleistetty ääriarvojakaumakin, myös yleistetty Pareto-jakauma jakautuu muotoparametrin etumerkin perusteella kolmeen tyyppiin. POT-menetelmä on kohtuullisen herkkä kynnyksarvon asettamiselle, ja sopivan kynnyksarvon valitseminen on menetelmää sovellettaessa ongelmallista (Gilleland et al., 2005).

2.7 Aikaisempia tutkimuksia

2.7.1 Kotimaisia tutkimuksia piirtävillä sademittareilla

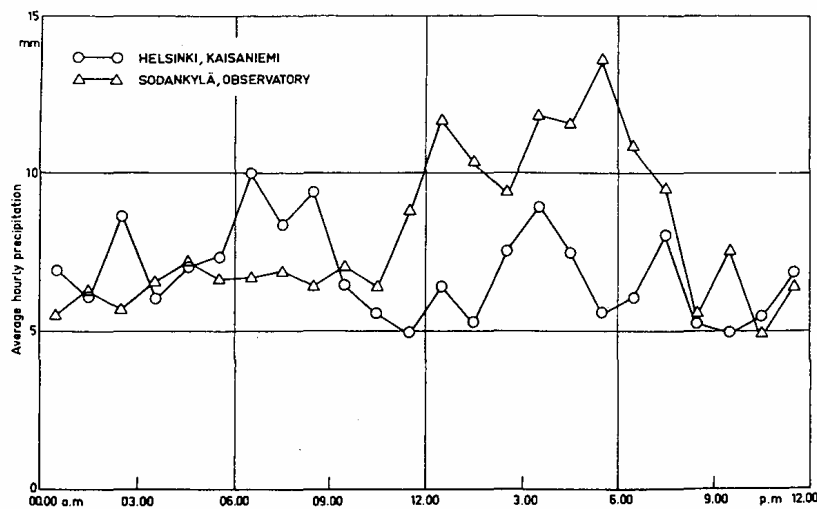
Sateen intensiteettiä on tutkittu Suomessa 1900-luvulla useaan kertaan piirtävien sademittareiden aineistoon perustuen. Simojoki (1944) julkaisi ensimmäisen pitkäaikaisiin ja säännöllisiin havaintoihin perustuvan tutkimuksen, joka käsitteli erityisesti sateen intensiteettiä. Simojoen tutkimus perustui vuosina 1924–1941 kymmeneltä Ilmatieteen laitoksen havaintoasemalta piirtävistä sademittareista kerättyyn aineistoon. Simojoen tutkimuksessa selvisi, että 1 mm sadekertymän satamiseen kuluu Helsingissä heinä-elokuussa keskimäärin aikaa noin 40 minuuttia ja toukokuussa, kesäkuussa sekä syyskuussa 60–80 minuuttia. Tutkimus osoitti myös, että intensiteetin vuorokausivaihtelun iltapäivämaksimi on Helsingissä muita tutkimuspaikkakuntia heikompi. Sateen rankkuuden todettiin olevan Suomessa melko tasaisesti jakautunut, eikä Suomea voida yksiselitteisesti jakaa eri rankkuusvyöhykkeisiin. Rantakrans (1967) tutki kesäsateiden rankkuutta Helsingissä ja Sodankylässä piirtävien sademittareiden aineistoon perustuen. Tulokseksi saadut sateen rankkuuden, kestoajan ja sademäärän keskimääräiset kuukausiarvot on esitetty taulukossa 2.2. Sateen intensiteetin vuorokautista vaihtelua tutkittaessa selvisi, että Helsingissä on melko selkeä intensiteetin maksimi heinä-elokuussa iltapäivän tunteina ja kesä-heinäkuussa keskimääräinen intensiteetti on myös aamuyöllä suhteellisen suuri.

Taulukko 2.2 Sateen intensiteetin, sateen kestoajan ja sademäärän keskimääräiset kuukausiarvot Helsingissä ja Sodankylässä vuosina 1924–1965 (Rantakrans, 1967).

	Helsinki					Sodankylä		
	V	VI	VII	VIII	IX	VI	VII	VIII
I (mm/min)	0.0159	0.0212	0.0299	0.0276	0.0204	0.0216	0.0244	0.0219
T (min)	2347	2127	1883	2531	3124	2493	2847	3256
T (t)	39.1	35.4	31.4	42.2	52.1	41.5	47.5	54.3
R (mm)	37.2	45.0	56.4	69.8	63.7	54.0	69.4	71.3

Ruso (1969) käytti graafista menetelmää soveltaessaan Gumbel-jakaumaa sateen 10 minuutin intensiteettien toistumisaikojen selvittämiseen. Aineistona tutkimuksessa käytettiin 43 vuoden havaintoja Helsingistä ja 34 vuoden havaintoja Revonlahdelta. Aineistosta poimittiin vuosittaiset intensiteettimaksimit. Tuloksena saatiin, että 10 minuutin keskimääräinen intensiteetti on kerran 50 vuodessa Helsingissä 1.64 mm/min ja kerran 100 vuodessa 1.83 mm/min. Kuusisto (1980) tutki ajanjakson 1961–1975 rankkoja sateita

Suomessa. Myös Kuusiston tutkimuksessa käytettiin Gumbel-jakaumaa toistumisaikojen tutkimiseen. Tulokseksi saatiin, että Helsingissä sataa 8.5 mm/min minuutin ajan ja 0.85 mm/min tunnin ajan kerran 100 vuodessa. On otettava huomioon, että tutkimuksessa käytettiin mittausaineistoa vain 15 vuoden ajalta, joten pitkien aikojen toistumisarvoissa on suuri epävarmuus. Kuusisto käsitteli tutkimuksessaan myös sateen vuorokausivaihtelua. Tuntisadesummien vuorokausivaihtelu Helsingissä ja Sodankylässä on esitetty kuvassa 2.4. Kuvasta nähdään, että eniten Helsingissä sataa aamulla kello 06 ja 09 välillä. Vuorokausivaihtelu Helsingissä on huomattavasti Sodankylän vaihtelua vähäisempää.



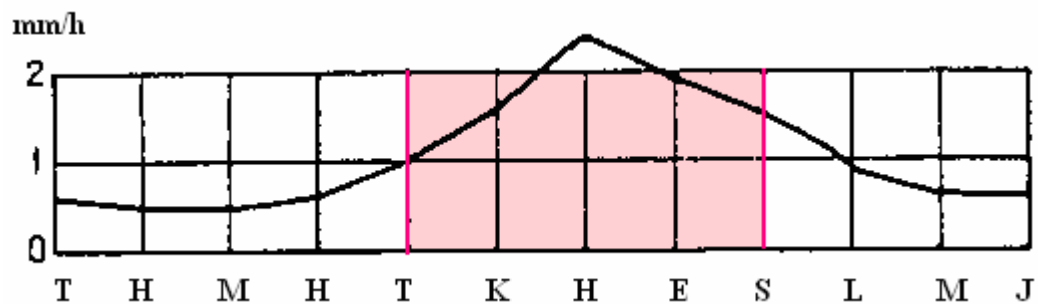
Kuva 2.4 Kuukauden sademäärän vuorokausivaihtelu Helsingissä ja Sodankylässä kesä-elokuussa ajanjaksolla 1961–1975 (Kuusisto, 1980). Vaaka-akselilla on kellonaika ja pystyakselilla on keskimääräinen tunnin sadesumma.

Ylä-Soininmäki (1982) teki kolmen paikkakunnan (Helsinki, Joensuu ja Sodankylä) sadehavaintoihin ajanjaksolta 1964–1973 perustuvan tutkimuksen sateen rankkuudesta vesihuoltoteknisestä näkökulmasta. Tutkimuksessa sadetapahtumat jaoteltiin eri kesto- sekä rankkuusryhmiin, ja tilastollisista keskiarvosateista muodostettiin tyyppisateita, joilla on sovellusarvoa vesihuoltotekniikassa. Kaurola et al. (1989) arvioivat yhteenvetona useista aikaisemmista tutkimuksista, että kesällä yksittäisessä pisteessä Etelä-Suomessa sataa noin 10 % ajasta. Sadekuurojen osuus sadeajasta on noin 20 %, joten kuurosateiden esiintymisen todennäköisyys on arviolta 2 %.

2.7.2 Ulkomaisia tutkimuksia piirtävillä sademittareilla

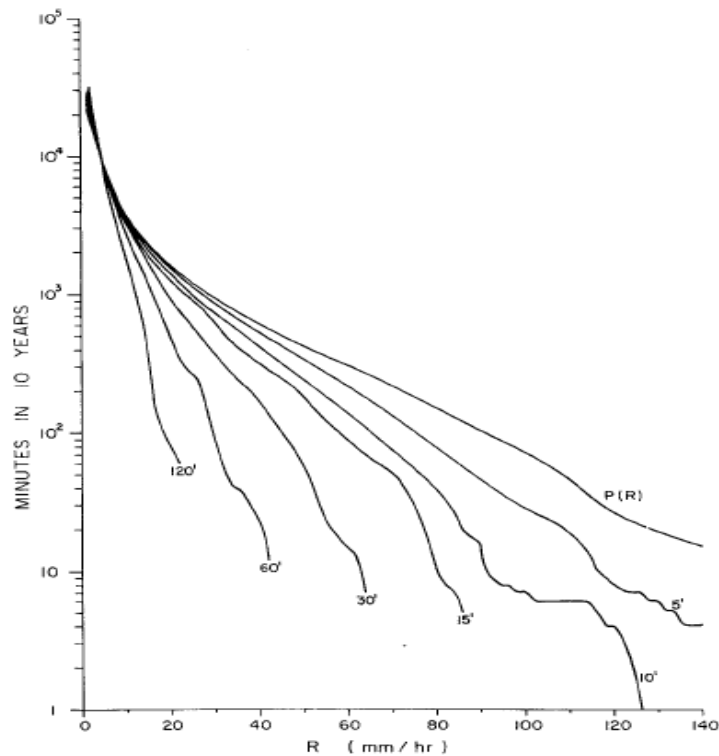
Ruotsissa Modén ja Nyberg (1965) ovat tutkineet sadannan klimatologiaa Tukholman alueella usealta mittausasemalta vuosina 1908–1962 kerätyn aineiston perusteella. Tutkimuksen mukaan Tukholman alueella sateen keskimääräinen intensiteetti oli suurin

heinäkuussa, kuten kuvasta 2.5 nähdään. Tukholman alueella sateen keston osuus kokonaisajasta on toukokuussa 5 %, kesä- ja heinäkuussa 4 % ja elo- ja syyskuussa 6 %. Tutkimuksessa todettiin, että sateen suhteellinen osuus kokonaisajasta vaihtelee paljon vuosittain. Myös sateen intensiteetit vaihtelevat paljon vuosittain. Suurin tutkimusjaksolla esiintynyt 10 minuutin intensiteetin vuosittainen maksimi oli 2.77 mm/min ja pienin 10 minuutin intensiteetin vuosimaksimi oli 0.34 mm/min. Dahlström (1979) tutki piirtävän sademittarin aineistosta sateen intensiteettiä ja sen toistumisaikoja usealla Ruotsin paikkakunnalla. Tutkimuksessa hahmoteltiin myös intensiteetin alueellista jakaumaa Ruotsissa, mutta paikallisten tekijöiden vaikutus intensiteettiin todettiin mahdottomaksi kuvata kvantitatiivisesti.



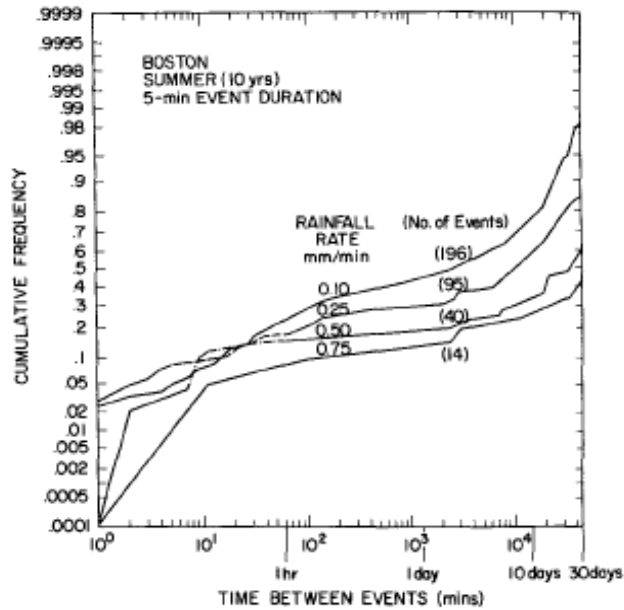
Kuva 2.5 Keskimääräisen intensiteetin (huom. yksikkönä mm/h) vuodenaikaisvaihtelu Tukholmassa vuosina 1956–1960 (mukailtu Modén ja Nyberg, 1965). Kesäkuukaudet on rajattu punaisella.

Kanadalaisessa tutkimuksessa (Drufuca ja Zawadki, 1975) selvitettiin sadannan tilastollisia piirteitä vuosien 1961–1971 aikana kerätyn aineiston perusteella. Kuvasta 2.6 ilmenee yksi tutkimuksen merkittävistä tuloksista, eli hetkellisten ja 5–120 minuutin intensiteettien kumulatiiviset jakaumat. Kuvan käyrät ilmaisevat todennäköisyyden tapaukselle, että sateen intensiteetti ylittää x-akselilla olevan arvon. Kuvasta 2.6 havaitaan, että keskimääräinen intensiteetti pienenee voimakkaasti ajan kasvaessa.



Kuva 2.6 Sateen rankkuuden kumulatiivinen jakauma 5–120 minuutin keskimääräisillä intensiteeteillä Kanadassa (Drufuca ja Zawadki, 1975). $P(R)$ -käyrä on hetkellinen intensiteetti. Käyrät edustavat todennäköisyyttä, että sateen intensiteetti ylittää vaakaakselilla olevan arvon. Todennäköisyydet pystyakselilla on ilmaistu minuutteina 10 vuodessa.

Esimerkkinä sateen keston tutkimuksesta voidaan mainita Tattelmanin ja Knightin (1987) tutkimus, joka perustuu Yhdysvalloissa kerättyyn 10 vuoden aineistoon. 5 minuutin intensiteeteille asetettiin kynnyksarvoja ja selvitettiin, kuinka kauan kului kunnes saman kynnyksarvon ylittävä intensiteetti jälleen havaittiin. Bostonin kesäsateita koskevat tulokset on esitetty kuvassa 2.7.



Kuva 2.7 5 minuutin intensiteetin esiintymisen kumulatiivinen frekvenssi Bostonissa intensiteetin raja-arvoilla 0.10–0.75 mm/min. Vaaka-akselilla oleva tapahtumien välinen aika ilmaisee, kuinka kauan aikaa kului, kunnes saman kynnysarvon ylittävä intensiteetti jälleen havaittiin. Pystyakselilla on kumulatiivinen frekvenssi (Tattelman ja Knight, 1987).

2.7.3 Vertailu tutkimustuksiin

Viimeaikoina sadannan tutkimus on painottunut yhä enemmän sadetutkimuksiin. Sadetutkimaus on hetkellinen aluesadannan mittausta. Tutkimuksilla on ylivoimainen alueellinen resoluutio, johon ei tiheälläkään sademittariverkostolla pystytä. Tutkimusten verifiointi on vaikeaa, koska hetkellisen aluesadannan yhteensovittaminen sademittareiden tietyn aikavälin pistemittauksiin ei ole yksiselitteistä. Useissa tutkimuksissa (esim. Barnston ja Thomas, 1983, Ulbrich ja Miller, 2001) on testauksen myötä todettu, että sademittarin mittauksilla ja korjatuilla tutkimuksilla on kuitenkin hyvä yhteensopivuus.

Inkinen (2003) tutki Suomen kesäsateiden intensiteettiä perustuen kesä-elokuiden tutkahavaintoaineistoon vuosilta 2000–2002. Sadehavainnoiksi luokiteltiin 6.17 % havainnoista, kun aineistoa käytettiin Lappia lukuun ottamatta koko Suomesta. Sateen intensiteetin teoreettisena todennäköisyysjakaumana käytettiin kaavan 2.5 lognormaalijakaumaa. Tutkimuksessa verrattiin tutkalla mitattuja sateen intensiteettejä Vaisalan FD12P-sademittareiden intensiteettimittauksiin kolmelta mittausasemalta. Johtopäätöksenä oli, että tutkahavaintoja voidaan pitää luotettavina $I < 0.45$ mm/min intensiteettiin asti. Jos lognormaalijakauman oletetaan olevan sopiva teoreettinen jakauma, osoittautuvat tutkahavainnot luotettaviksi aina 8.33 mm/min intensiteettiin saakka. FD12P-

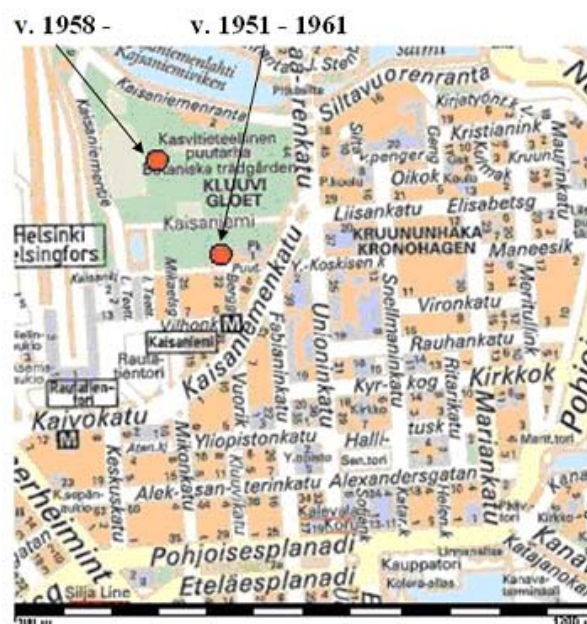
sademittareiden todettiin aliarvioivan suuria intensiteettejä. On mahdollista, että myös piirtävät sademittarit vastaavasti aliarvioivat suuria intensiteettejä.

3. Ilmasto Helsingin Kaisaniemessä

3.1 Kaisaniemen mittausasema

Helsingin Kaisaniemen mittausasema sijaitsee Helsingin ydinkeskustassa (60° 10' 30''N, 24° 56' 52''E). Aseman korkeus merenpinnasta on 4.0 m. Korkeustaso alueella on pääosin 0–20 metriä merenpinnan yläpuolella, läheiset kalliomäet ovat korkeudeltaan 20–40 metriä. Meri sijaitsee lähimmillään 1–3 kilometrin päässä mittausasemasta 70°–240° suuntasektorissa. Meren osuus pinta-alasta 10 kilometrin säteellä on 44 %. Aseman ympäristö on tiiviisti rakennettua taajama-aluetta. Puusto on kasvanut huomattavasti aseman läheisyydessä vuosikymmenten aikana.

Kaisaniemen mittausasema on ollut toiminnassa vuodesta 1844 lähtien, ja se on Suomen vanhin mittausasema. Tutkimusjakson vuosina 1951–1958 Kaisaniemen mittausasema sijaitsi Ilmatieteellisen keskuslaitoksen yhteydessä. Vuonna 1958 Kaisaniemen kasvitieteelliseen puutarhaan, 200 metrin päähän aikaisemmasta asemasta, perustettiin mittausasema. Vuosina 1958–1961 molemmat asemat olivat toiminnassa, kunnes mittaustoiminta siirtyi kokonaan kasvitieteelliseen puutarhaan. Kuvan 3.1 kartassa näkyy molempien mittausasemien sijainti. Kuvassa 3.2 on mittausaseman ympäristö vuonna 1950 ja vuonna 2006.



Kuva 3.1 Helsingin Kaisaniemen mittausaseman sijainti vuodesta 1951 alkaen.



Kuva 3.2 Vasemmalla Helsingin Kaisaniemen mittausasema vuonna 1950 Ilmatieteen keskuslaitoksen yhteydessä. Oikealla mittausasema Kaisaniemen kasvitieteellisessä puutarhassa vuonna 2006.

Tämän tutkimuksen aineisto on piirtävästä sademittarista, joka oli ensin sijoitettu Ilmatieteellisen keskuslaitoksen yhteyteen, kunnes mittalaite siirrettiin kasvitieteellisen puutarhan yhteyteen toukokuussa 1959. Molempien lähekkäisten asemien ollessa käytössä Heino (1994) vertaili niiden kuukausittaisia sadekeräysastioiden sadesummaa. Kesäkuukausina asemien väliset sademäärien erot olivat $-12 - +31$ % (negatiivinen luku tarkoittaa pienempiä arvoja kasvitieteellisen puiston mittausasemalla, positiivinen vastaavasti suurempia). Erot ovat yllättävän suuria, mutta korjausta paikanvaihdoksen vaikutukseen on hyvin vaikea määrittää (Heino, 1994).

3.2 Alueellinen edustavuus

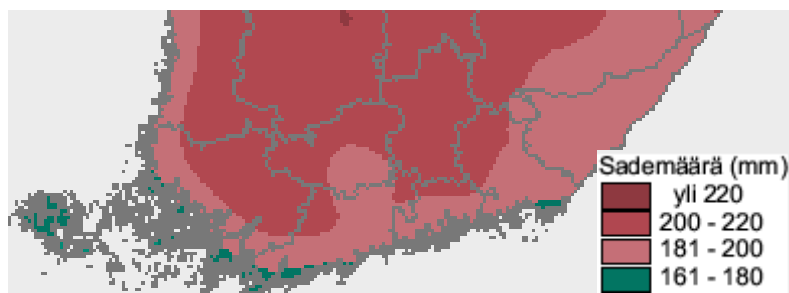
Helsingin Kaisaniemi kuuluu ilmastolliselta pääalueeltaan hemiboreaali- eli tammimetsävyöhykkeeseen. Ilmastollinen alialue on etelärannikko. Kaisaniemen mittausaseman ilmasto edustaa Helsingin keskustan suurien puistoalueiden ilmastoa. Taulukossa 3.1 on esitetty keskimääräisiä ilmastollisten suureiden arvoja Kaisaniemen mittausasemalla kaudella 1971–2000 kesäkuukausina ja koko vuoden aikana.

Taulukko 3.1 Tilasto ilmastollisista suureista Helsingin Kaisaniemen mittausasemalla kaudella 1971–2000 (Drebs et al., 2002)

	Lämpötila [°C]			Suht. kost. [%]	Sademäärä [mm]			Sadepäivät [kpl]		
	vrk ka	vrk ylin ka	vrk alin ka	vrk ka	kk ka	kk suurin	kk pienin	≥ 0.1 mm	≥ 1.0 mm	≥ 10.0 mm
toukokuu	9.9	14	6	62	32	67.9	3.9	10	6	1
kesäkuu	14.8	18.7	11	65	49	135.5	14.8	13	8	1
heinäkuu	17.2	20.9	13.7	68	62	135.9	1.8	13	8	2
elokuu	15.8	19.3	12.6	73	78	173.5	1.2	16	11	2
syyskuu	10.9	13.9	8.1	78	66	145.1	16.3	16	10	2
koko vuosi	5.6	8.6	2.6	–	642	–	–	192	109	17

Helsingin Kaisaniemen ilmaston alueellista edustavuutta selvitetiin vertaamalla taulukon 3.1 arvoja muiden läheisten mittausasemien arvoihin samalla vertailukaudella. Keskilämpötila Kaisaniemessä on lähellä muiden Etelä-Suomen asemien keskilämpötiloja. Alkukesästä keskimääräinen ylin lämpötila on Kaisaniemessä suhteellisen alhainen verrattuna lähellä sijaitseviin sisämaan asemien ylimpiin lämpötiloihin, koska kylmän meren läheisyys vaikuttaa viilentävästi. Myöhemmin kesällä erot ylimmässä lämpötilassa tasoittuvat. Keskimääräiset alimmat lämpötilat ovat rannikolla korkeammat kuin sisämaassa, mutta Kaisaniemen mittausaseman alava sijainti alentaa keskimääräisiä alimpia lämpötiloja etenkin selkeinä ja heikkotuulisina öinä. Suhteellisen kosteuden vuorokausikeskiarvo on Kaisaniemessä melko tyypillinen Etelä-Suomen alueelle.

Sademäärä on yleisesti ottaen hyvin paikallisesti vaihteleva suure. Kuvassa 3.3 näkyy sademäärän alueellinen jakauma Suomen eteläosassa kesä-elokuussa vertailukaudella 1971–2000. Alueellisen jakauman määrittämisessä on käytetty tasoitusta 30 km tarkkuudella. Kuvasta 3.3 nähdään, että rannikolla sademäärä on selvästi pienempi kuin sisämaassa. Syyskuussa jakauma on jo lähes päinvastainen ja suurimmat sademäärät sijoittuvat rannikkovyöhykkeelle, koska suhteellisen lämmen meri lisää sademäärää rannikolla. Todettakoon, että Kaisaniemen mittausasema on ilmastollisesti melko edustava, mutta sadannan alueellisen ja ajallisen vaihtelevuuden johdosta yhden mittausaseman tuloksia ei voida yleistää laajalle alueelle.



Kuva 3.3 Kesä-elokuun sademäärän keskimääräinen alueellinen jakauma Suomen eteläosassa vertailukaudella 1971–2000 (Ilmatieteen laitos).

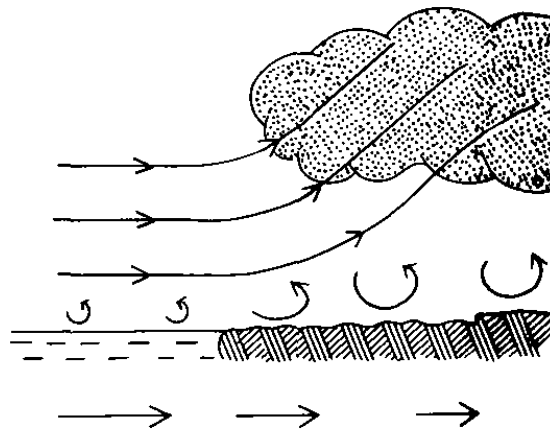
3.3 Paikallisten tekijöiden vaikutus sadantaan

Suomen olosuhteissa sadantaan vaikuttavia paikallisia tekijöitä ovat meri, järvet, orografia sekä kaupungit. Helsingin Kaisaniemen sadannan piirteisiin vaikuttaa eniten meri, mutta myös kaupungistumisella arvellaan olevan pieni vaikutus. Kesällä sadepilvet ovat niin korkealla, että Suomen maastonmuodot eivät vaikuta paljon sadannan jakaumaan (Alalammi, 1987).

3.3.1 Rannikon vaikutus

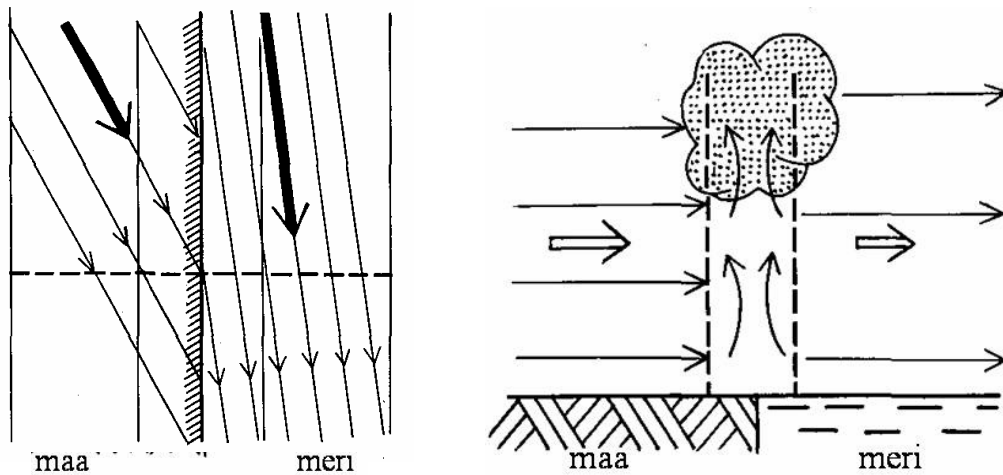
Meri voi ajoittain vaikuttaa rintamiin liittyviin sadekuuroihin joko laukaisemalla niitä tai estämällä niiden syntymisen kokonaan. Kun meri on alkukesästä etenkin päivisin maata kylmempi, kylmän meren ylle virtaava ilma muuttuu vakaammaksi ja konvektio heikkenee. Alkukesästä rannikolla sademäärä on sisämaata pienempi. Loppukesästä etenkin öisin meri on lämpimämpi kuin maa. Lämpimän meren ylle virtaava ilma muuttuu epävakaisemmaksi, joten sadekuurot voimistuvat ja yleistyvät rannikon tuntumassa.

Rannikolla havaitaan myös rannikkoefektiksi kutsuttava ilmiö. Rannikkoefektillä tarkoitetaan ilmiötä, jossa ilma joutuu nousevaan liikkeeseen, koska maalla alustan kitka on suurempi kuin merellä. Tuulenoisuus on meren päällä suurempi kuin maan päällä samalla korkeudella. Kun tuuli puhaltaa mereltä, nopeammin liikkuva ilma nousee, kun se kohtaa maan päällä olevan hitaammin liikkuvan ilman. Ilmiön periaate on esitetty kuvassa 3.4. Kesäisin tiivistymiskorkeus on korkealla, joten välttämättä nousevan liikkeen seurauksena ei muodostu pilviä ja sadetta. Kun tiivistymiskorkeus on matalalla, rannikolla tai rannikon läheisillä maa-alueilla sademäärä kasvaa.



Kuva 3.4 Rannikkoefekti, kun tuuli puhaltaa mereltä (Liljequist, 1962).

Kun tuuli puhaltaa rannikon suuntaisesti, siten että maa on tuulen suuntaan katsottuna oikealla, ilma kohoaa syntyvän rannikkokonvergenssin seurauksena. Periaate on esitetty kuvassa 3.5. Meren yllä tuulen suunta poikkeaa vain 0° – 15° isobaareista, mutta maan yllä poikkeama on 20° – 40° suuremman kitkan johdosta (Liljequist, 1962). Rannikkokonvergenssin alueella rantaviivan suuntaisen tuulen yhteydessä sademäärän maksimi esiintyy useimmiten rannikkoalueella.



Kuva 3.5 Rannikkoefekti, kun tuuli puhaltaa rannikon suuntaisesti (Liljequist, 1962).

Rannikkoefektin vaikutus sademäärään on voimakkain noin 20 km päässä rannikolta sisämaahan päin (Mustonen, 1986). Aivan rannikon tuntumassa rannikkoefekti on pienempi. Sisämaassa rannikkoefektin vaikutus lakkaa noin 50 kilometrin päässä rantaviivasta. Helsingin Kaisaniemi on myös rannikkoefektin vaikutusalueella, mutta ilmiön aiheuttama lisääntynyt sademäärä on merkittävin tutkimusajankohdan ulkopuolella, eli loka-huhtikuussa.

3.3.2 Kaupunki-ilmasto

Kaisaniemen mittausasema sijaitsee aivan Helsingin kaupungin keskustan tuntumassa. Ihmisen muokkaamassa ympäristössä on myös erityinen ilmasto. Useissa tutkimuksissa (esim. Heino, 1979, Landsberg, 1981) on tutkittu kaupungistumisen vaikutusta ilmastoon. Kaupunkien ilmastoon vaikuttavat neljä fysikaalista mekanismia (Mustonen, 1986):

1. Pintojen päällystäminen muuttaa lämpötiloutta.
2. Rakenteet muuttavat ilman virtausta ja lisäävät turbulenssia.
3. Kaupunki emittoi lämpöä, vesihöyryä ja hiukkasjakoisia epäpuhtauksia ilmakehään.
4. Ilman vesihöyrytasapaino muuttuu.

Kaupungeissa ilman lämpötilan on todettu olevan korkeampi kuin taajaman ulkopuolisilla alueilla. Ilmiötä kutsutaan lämpösaarekevaikutukseksi. Ilmiötä on tutkittu myös Helsingissä, mutta kaupungin sijainti rannikolla vaikeuttaa vertailua taajaman ulkopuolisiin alueisiin. Meren läheisyys vaikuttaa Helsingin lämpötilaan eri aikaan vuorokaudesta ja vuodesta eri tavalla. Heino (1979) mukaan lämpösaarekevaikutuksella on 0.4–0.8 °C lämmittävä vaikutus Helsingin vuoden keskilämpötiloihin ja noin 1 °C asteen lämmittävä vaikutus vuoden päivittäisiin alimpiin lämpötiloihin. Vuoden päivittäisiin korkeimpiin lämpötiloihin kaupunki vaikuttaa lämmittävästi 0.1–0.2 °C. Lämpötilan vuorokausivaihtelu Helsingissä on noin 1 °C vähäisempää kuin taajaman ulkopuolella.

Kaupunkialueilla haihtuminen on vähäisempää kuin taajaman ulkopuolella, ja seurauksena on, että ilma on kuivempaa kaupungeissa. Kaupunkien korkeampi lämpötila vaikuttaa suhteelliseen kosteuteen. Heino (1979) mukaan vuositasolla suhteellinen kosteus on vain hieman alhaisempi kaupungeissa. Helsingissä on havaittu 5 % suhteellisen kosteuden aleneminen 1900-luvun alusta 1980-luvulle, mutta osa muutoksesta voi tosin johtua mittalaitteiden ja menetelmien muuttumisesta.

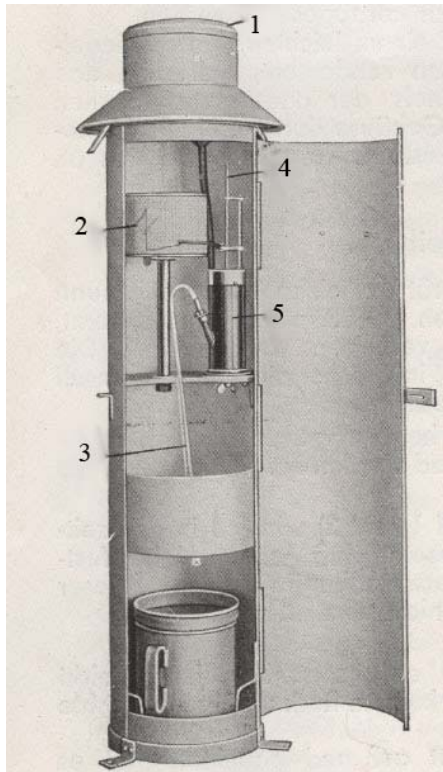
Yleisesti ottaen sateen todennäköisyys on lisääntynyt kaupungeissa, koska ilmassa on enemmän tiivistymis- sekä jäätymisytimiä ja turbulenssi sekä korkeammasta lämpötilasta johtuva konvektio ovat lisääntyneet. Landsbergin (1981) mukaan kaupunki-ilmastossa sademäärä on lisääntynyt 5–15 %. Myös sadepäivien, jolloin sataa alle 5 mm, määrä on lisääntynyt noin 10 %. Suomessa kaupunkien vaikutusta sadantaan ei ole selvästi havaittu.

Heinon (1979) tutkimuksen mukaan Helsingin alueella meren vaikutus on pääasiallinen sademäärän eroihin vaikuttava tekijä, joten kaupungin vaikutus sademäärään on kyseenalaista. Heino teki johtopäätöksen, että Helsingin kaupunki-ilmastossa sademäärät voivat mahdollisesti olla hieman suurempia, mutta selviä eroja taajaman ulkopuolisiin alueisiin on vaikea löytää. Myöskään Jyväskylässä ei kaupungin vaikutusta sademääriin ole voitu erottaa (Heino, 1979). McDonald ja Green (1960) tutkivat Yhdysvaltojen sadeaineistoa ja totesivat, että kaupunkien sadeaineistossa ei välttämättä havaita suurempia ajallisia muutoksia ja epäjatkuvuuksia kuin taajamien ulkopuolisessa sadeaineistossa.

4. Sadannan mittaus

4.1 Piirtävä sademittari

Tässä tutkimuksessa käsitellään Helsingin Kaisaniemen mittausaseman piirtävän sademittarin aineistoa. Kaisaniemessä käytettiin koko tutkimusjakson ajan Fuessin valmistamaa uimurilappoperiaatteella toimivaa piirtävää sademittaria. Sen keräyspinta-ala on 200 cm². Keräysastian korkeus maanpinnasta on 1.2 m, ja siihen ei ole liitetty tuulisuojusta. Piirtävä sademittari rekisteröi sadantaa jatkuvasti, joten siitä saadaan vuorokausisadesummaa mittaavista sadekeräysastioista poiketen tietoa myös sateen ajallisesta jakaumasta. Fuessin piirtävässä sademittarissa keräysastiaan kertynyt sadevesi kulkeutuu uimurisäiliöön. Uimurisäiliön täytyminen kohottaa uimuria, jonka tankoon on kiinnitetty kynä. Sademittarin kellokoneisto pyörittää piirturiliuskaa, jolle kynä piirtää sadeveden kertymistä kuvaavaa viivaa. Kun uimuri saavuttaa yläasentonsa, tyhjentyy uimurisäiliö imujuoksuttimen kautta ja samalla kynä palautuu piirturiliuskan alareunaan. Kuvassa 4.1 on esitetty Fuessin piirtävän sademittarin rakenne.



1. Keräysastia
2. Piirturirumpu ja kellokoneisto
3. Imujuoksutin
4. Uimuriputki
5. Uimurisäiliö

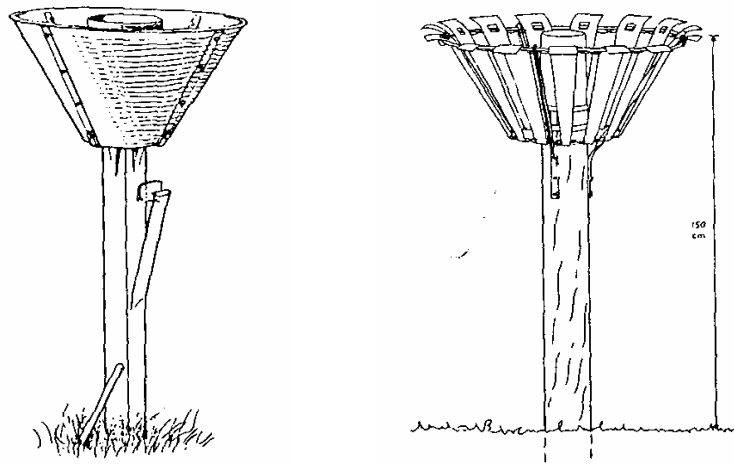
Kuva 4.1 Fuessin piirtävän sademittarin rakenne.

Piirtävä sademittari kykenee mittaamaan luotettavasti vain vesisadetta, joten mittalaite on käytössä vain kesäkuukausina. Kaisaniemessä piirtävä sademittari on otettu käyttöön vuosittain pääsääntöisesti toukokuun ensimmäisenä päivänä, jolloin havaintokausi alkaa. Ennen vuosittaista asennusta mittari on kalibroitu. Havaintokauden aikana havainnontekijä on tehnyt piirtävän mittarin havainnon kerran vuorokaudessa, eli aamuisin kello 08. Havainnon yhteydessä piirturiliuska on vaihdettu, ja maanantaisin myös piirtävän sademittarin kellokoneisto on vedetty. Havaintokauden lopussa, eli lokakuun 1. päivän aamuna piirtävä sademittari on huollettu talvikuntoon. Huollon yhteydessä havaintokauden ulkopuolella piirtävän sademittarin kellokoneisto on tarpeen mukaan vaihdettu.

4.2 Keräysastiat

Tavallisimmin sateen mittaamiseen on käytetty metallista keräysastiaa, jolla mitataan vuorokauden sadesummaa. Havaintovuorokausi määritellään alkavan kello 08 aamulla. Helsingin Kaisaniemen mittausasemalla käytettiin tutkimusjakson aikana kahta eri sadekeräysastiaa. Vuodesta 1951 vuoteen 1980 asti käytössä oli Wildin sademittari, joka oli varustettu Nipherin tuulisuojuksella (kuvassa 4.2 vasemmalla). Wildin mittarin korkeus maanpinnasta on 1.5 m ja keräyspinta-ala on 500 cm². Vuonna 1980 joulukuussa siirryttiin

Tretjakov-malliseen mittariin (Kuvassa 4.2 oikealla). Syynä sademittarin vaihtoon oli, että Tretjakov-mallinen mittari kykenee mittaamaan kuivaa lumisadetta Wildin mittarimallia paremmin. Tretjakovin sademittarin korkeus on sama kuin Wildin mittarin, eli 1.5 m. Keräysastian aukon ala, 200 cm², on huomattavasti pienempi kuin Wildin mittarissa ja vastaa Fuessin piirtävän sademittarin aukon alaa. Suurin ero Wildin ja Tretjakovin mittareiden välillä on tuulusuojus, joka on Wildin mittarissa yhtenäinen ja Tretjakovin mittarissa säleinen. 1990-luvun alussa Tretjakovin keräysastian pintamateriaali muutettiin tefloniksi, jotta tartuntavirhe pienenesi. Mittareiden keskinäisiä eroja käsitellään enemmän luvussa 5.2.



Kuva 4.2 Wildin keräysastia (1951–1980) vasemmalla ja Tretjakovin keräysastia (1980–2000) oikealla (Mustonen, 1986).

4.3 Virheet

4.3.1 Sadannan mittaukseen liittyvät virheet

Sadannan mittaaminen tarkasti on ongelmallista ja epätarkkaa. Suurimmat ongelmat liittyvät kuivan lumisateen mittaamiseen, mutta myös vesisateen mittaamisessa ilmenee epätarkkuutta. Sademittarin virheyhtälö voidaan esittää useiden osatekijöiden summana kaavan 4.1 mukaisesti (Mustonen, 1986):

$$P = P_m + \Delta P_e + \Delta P_w + \Delta P_s + \Delta P_a + \Delta P_p + \Delta P_d + \Delta P_r \quad (4.1)$$

missä

- P = todellinen sadanta
- P_m = mitattu sadanta
- ΔP_e = haihtumisvirhe
- ΔP_w = tartuntavirhe

ΔP_s = roiskuntavirhe

ΔP_a = tuulivirhe

ΔP_p = mittarin sopimattomasta sijainnista aiheutuva virhe

ΔP_d = mittarin omat virheet

ΔP_r = satunnaisvirheet

Rasmussen et. al. (1978) tutkivat haihtumisvirhettä laboratorio-oloissa Hellmann-mallisella sadeastialla, jollainen on myös Kaisaniemen piirtävässä sademittarissa. Kun lämpötila, suhteellinen kosteus ja tuuletus olivat haihtumiselle otollisia, oli haihtuminen sadeastiasta 0.01 mm/vrk. Haihtumisvirheen suuruus on siis pienempi kuin sademittareiden mittaustarkkuus, joten se voidaan jättää huomioimatta sademäärissä.

Tartuntavirhettä esiintyy, kun sadevesi kaadetaan keräysastiasta mittalasiin. Osa vedestä jää astian seinämiin, minkä seurauksena mitattu sademäärä on pienempi kuin todellinen sademäärä. Tartuntavirheen suuruus riippuu keräysastian sisäpinnan alan suhteesta keräysaukon alaan, materiaalista, pintojen puhtaudesta sekä sademäärästä. Tretjakovin sademittariin vaihdettiin vuonna 1991–1992 teflonpinnoitteinen sadeastia. Teflon-pinnoite vähentää hieman tartuntavirhettä. Wildin tartuntavirhe on todettu olevan karkeasti 0.05–0.1 mm/vrk ja Tretjakovin tartuntavirhe on 0.08–0.25 mm/vrk (Solantie ja Junila, 1995). Wildin ja Tretjakovin tartuntavirheet ovat pieniä ja myös keskenään samaa suuruusluokkaa. Fuessin tartuntavirheen voidaan olettaa olevan korkeintaan samaa suuruusluokkaa, mutta todennäköisesti se on pienempi erilaisesta tyhjennystavasta johtuen.

Roiskumisvirhe on seurausta puista tai lähiympäristön kohteista roiskuvasta vedestä. Kaisaniemen mittausaseman puut ovat kauden 1951–2000 aikana kasvaneet selvästi, mikä lisää lähivuosisikymmenien roiskumisvirheen osuutta verrattuna aikaisempiin vuosikymmeniin. Rankalla sateella voi roiskumista tapahtua myös sademittarista pois, kun isot pisarat kimpoavat. Rankkasateella piirtävä sademittari voi myös tulvia, koska imujuoksutin ei vedä riittävästi. On kuitenkin osoitettu, että roiskumisvirhe on yleensä ottaen merkityksetön (Allerup et. al., 1980).

Tuulivirhettä esiintyy, kun mittari synnyttää yläpuolelleen turbulenssia, joka jakaa sadannan pysty- ja vaakasuoraan komponenttiin (Mustonen, 1986). Kovalla tuulella voi sataa enemmän pystyprojektiolle kuin vaakaprojektiolle, jolloin keräysastian seinämät estävät

veden kerääntymisen keräysastiaan. Sadannan mittaus edustaa lähinnä vain sadannan pystykomponenttia. Tuulivirhettä on tutkittu runsaasti. Solantie ja Junila (1995) esittivät tuulivirheestä aiheutuvat korjauskertoimet Wildin ja Tretjakovin mittareille. Merkittäviä tuulivirheeseen vaikuttavia tekijöitä ovat sateen olomuoto, sadepartikkeleiden kokojakauma ja tuulen nopeus. Tuulivirhe on merkittäväntä lumisateella ja hyvin pienipisaraisessa tihkusateessa. Kesäsateissa pisarakoko on yleensä kohtuullisen suuri, joten tuuli ei häiritse mittauksia merkittävästi ja korjauskertoimet ovat hyvin pieniä. Olennaisesti tuulivirheeseen ja yleiseen mittaustarkkuuteen liittyvä tekijä on sademittarin sijoituspaikka. Paikan tulee olla suojassa tuulelta, mutta myöskään mittarin lähellä ei saa olla esteitä, jotka voisivat aiheuttaa turbulenssia ja paikallista kiihtyvyyttä tai varjostaa sademittaria tietyiltä tuulensuunnilta. Kaisaniemen mittausasema on suojainen, joten tuulen vaikutus mittauksiin vesisateella on vähäinen. Jakson 1951–2000 aikana puusto on aseman ympärillä kasvanut, mikä on entisestään vähentänyt avoimuutta vuosikymmenten kuluessa.

Mittalaitteen vaurioituminen tai esimerkiksi keräysaukon pinta-alan muuttuminen ovat itse mittariin liittyviä virheitä. Erityisesti piirtävässä sademittarissa esiintyy ajoittain teknisiä vikoja. Rantakrans (1967) arvioi, että piirtävän sademittarin kellokoneisto jättää yleisimmin 5–30 minuuttia vuorokaudessa. Tässä tutkimuksessa mahdollinen kellokoneiston jättämisestä aiheutuva virhe on oletettu lineaariseksi. Rankkojen sateiden yhteydessä myös piirturin hitaus aiheuttaa virhettä. Kun vettä tulee lyhyessä ajassa paljon, tyhjentyä uimurikammio monta kertaa, ja piirtojälki muuttuu epätarkaksi ja joskus myös virheellisesti vinoksi.

Satunnaisvirheiden suuruuden arviointi on vaikeaa, ja niiden löytäminen perustuu lähinnä sademittareiden tai sadeasemien keskinäiseen vertailuun. Luvussa 5.2 on vertailtu Kaisaniemen piirtävän sademittarin tuloksia sadekeräysastian mittaamaan sademäärään. Satunnaisia virheitä aiheuttavia ilmiöitä ovat muun muassa keräysastiaan joutuneet roskat. Esimerkkinä yhdestä Kaisaniemen mittausasemalla ajoittain esiintyneestä satunnaisvirheestä ovat muutamat 60-luvun piirturiliuskat, joihin havainnontekijä on kirjoittanut huomautuksen: ”puutarhaa kasteltu keinotekoisesti”. Vastaavanlaisia satunnaisia virhetekijöitä on varmasti esiintynyt useita 50 vuoden mittaisen tutkimusjakson aikana.

4.3.2 Digitalisointi

Jotta piirtävän sademittarin suuren aineiston käsittely olisi huomattavasti helpompaa, piirturiliuskat digitalisoitiin Ilmatieteen laitoksella. Aineisto digitalisoitiin sateen intensiteetin muutospisteiden mukaan lukijalaitteen avulla. Tietokoneohjelmiston avulla aineisto muutettiin tiedostoiksi, joissa sateen intensiteetti on esitetty 1 minuutin ja 0.1 mm erotuskyvyllä. Digitalisoiminen aiheutti aineistoon useita virheitä. Ajan ja arvojen lukeminen piirturiliuskoista on melko epätarkkaa, ja kokemusten perusteella on todettu, että lukijalaitteen avulla saadaan aineisto luettua noin 5 minuutin tarkkuudella. Digitalisoinnin seurauksena yli kolme tuntia kestäville sateettomilla jaksoilla digitaaliseen aineistoon tuli usein virheellisiä 0.1–0.3 mm sademääriä. Digitalisoitaessa piirturiliuskoissa kohtia, joissa kynä oli siirtynyt piirturiliuskan alareunaan, tuli siirtymäkohtiin satunnaisesti virheellinen minuutista muutama minuuttiin kestävä nollassadejakso. Lisäksi digitalisointiohjelmiston vian takia kuun alussa ja lopussa esiintyneet sateettomat vuorokaudet olivat jääneet tiedostoista pois. Edellä mainittuja digitalisointivirheitä on pyritty korjaamaan jälkikäteen mahdollisimman paljon, mutta on todennäköistä, että aineistossa edelleen on satunnaisia digitalisoinnista johtuvia virheitä.

4.3.3 Kokonaisvirhe

Edellisissä luvuissa tuli esille, että digitalisoidussa sadeaineistossa esiintyy monenlaisia virheitä. Se ei kuitenkaan tarkoita, että aineisto olisi käyttökelvotonta. Tuloksia analysoitaessa on kuitenkin pidettävä mielessä mahdolliset virheet ja aineiston rajallinen erotuskyky. Vaikka tutkimusjakson aineisto digitalisoitiin 1 minuutin ja 0.1 mm tarkkuudella, on aineistoa syytä tarkastella hieman karkeammassa tarkkuudessa. Digitalisoitujen piirturiliuskojen ajan erotuskyvyn maksimina on yleisesti pidetty 5 minuuttia (Eicher, 1991). Tässäkin tutkimuksessa erotuskyky asetettiin 5 minuuttiin, mikä tasoittaa minuuttikohtaisia piikkejä aineistossa. Kun tarkastellaan pitempien ajanjaksojen sademäärää, esimerkiksi tunnin ajalta, jää lukemataarkkuudesta aiheutuva virhe hyvin pieneksi. Sademäärän virheiden voidaan arvioida olevan yleisesti kohtuullisen pieniä. Rankoissa sateissa virheen osuus on usein keskimääräistä suurempi, mikä johtuu edellä mainituista mittausteknisistä ja digitalisointiin liittyvistä seikoista.

5. Tutkimusaineisto

5.1 Aineiston kattavuus

Tässä tutkimuksessa on käytetty aineistoa vuodesta 1951 alkaen vuoteen 2000 asti. 50 vuoden mittainen tutkimusjakso rajoittuu toukokuun alusta syyskuun loppuun, eli vuosittain viiden kuukauden ajalle. Aineisto edustaa näin ollen hyvin Helsingin keskustan kesäsateita. Suuri osa tutkimuskauden ulkopuolella esiintyvistä sateista oli kiinteän olomuodon sateita, mutta osa vuosittaisista vesisateista on silti jäänyt tutkimuskauden ulkopuolelle. Kesäkuukausina on vastaavasti esiintynyt kiinteän olomuodon sateita, kuten esimerkiksi raekuuroja.

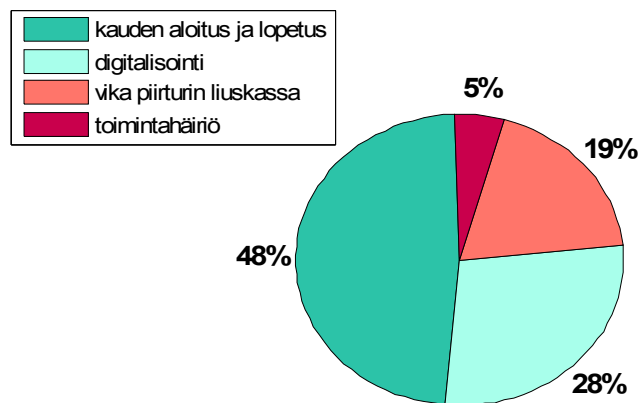
50 vuoden aikana on kesäkuukausina yhteensä 7650 havaintovuorokautta. Pieni osuus havaintovuorokausien aineistosta puuttuu tai on käyttökelvotonta. Puuttuvan aineiston osuus koko aineistosta on 135 havaintovuorokautta, eli 2.2 % kaikista havaintovuorokausista. Taulukossa 5.1 on esitetty havaintoaineistosta puuttuvien vuorokausien jakautuminen eri kuukausille ja vuosikymmenille ajanjaksolla 1951–2000. Taulukosta 5.1 nähdään, että eniten havaintovuorokausien aineistoa puuttuu toukokuulta ja syyskuulta. Aineiston puuttuminen on jakautunut melko tasaisesti eri vuosikymmenille. Hieman muita vuosikymmeniä enemmän aineistoa puuttuu 50-luvulta, jolloin esiintyi eniten mittalaiteteknisiä ongelmia.

Taulukko 5.1 Tutkimusjakson puuttuvien havaintovuorokausien lukumäärä ja prosentuaalinen osuus eri vuosikymmeninä ja kuukausina.

	1951–1960	1961–1970	1971–1980	1981–1990	1991–2000	1951–2000
toukokuu (1550 vrk)	10	5	7	6	12	40 (2.6 %)
kesäkuu (1500 vrk)	5	5	3	2	2	17 (1.1 %)
heinäkuu (1550 vrk)	3	1	1	2	1	8 (0.5 %)
elokuu (1550 vrk)	9	3	1	1	2	17 (1.1 %)
syyskuu (1500 vrk)	10	10	11	10	12	53 (3.5 %)
yhteensä (7650 vrk)	37 (2.4 %)	24 (1.6 %)	23 (1.5 %)	21 (1.4 %)	30 (2.0 %)	135 (2.2 %)

Kuvassa 5.1 on eritelty aineiston puuttumisen syyt. Selvästi suurin yksittäinen syy havaintovuorokausien aineiston puuttumiselle on mittauskauden aloitus tai lopetus (48 %). Toisin sanoen toukokuun ensimmäiset ja syyskuun viimeiset havaintovuorokaudet puuttuvat, koska mittaukset ovat aloitettu tai lopetettu kauden ollessa käynnissä. Syy selittää

myös taulukon 5.1 muita kuukausia suuremmat määrät puuttuvia havaintovuorokausia toukokuussa ja syyskuussa. Myös tapa, jolla aineisto digitalisoitiin, vaikutti osaltaan siihen, että pieni osuus kauden alun ja lopun havaintovuorokausien aineistoa jäi digitaalisesta aineistosta pois. Digitalisoinnin ongelmat kesken havaintokautta ovat puuttumisen syynä 28 %:ssa tapauksista. Itse mittalaitteessa ja piirturin liuskoissa esiintyneet häiriöt ovat puuttumisen syynä 24 %:ssa tapauksista. Mittalaitteen toimintahäiriöön syynä oli useimmiten se, että kellokoneisto oli jäänyt vetämättä. Liuskojen ongelmat liittyvät niiden puuttumiseen kokonaan tai epäselviin merkintöihin.



Kuva 5.1 Aineiston puuttumisen syyt eriteltyinä.

Koska havaintovuorokausista osan aineistoa puuttuu, aineistoon tulee ajallisia katkoksia. Schillingin (1991) mukaan ei katkoksilla ole vaikutusta sadannan ääriarvoihin, jos ne eivät todistettavasti ajoitu ajankohtiin, jolloin sateen intensiteetti oli hyvin suuri. Keskimääräisiin arvoihin havaintovuorokausien puuttumisella on hyvin pieni vaikutus. Schilling esitti myös, että puuttuvien ajankohtien sadantaa ei voida merkitä nolllaksi, koska se vääristää aineistoa. Oikeanlainen tapa on käsitellä puuttuvat tiedot puuttuvina, eli jättää ne analyysissä huomioimatta. Näin on tehty myös tämän tutkimuksen aineistolle, eikä puuttuvia sadehavaintoja ole keinotekoisesti asetettu nolllaksi. Ajalliset katkokset kuitenkin vääristävät sateen ja kuivien jaksojen kestoja. Jos katkos on keskellä sadetapahtumaa, muuttuu yksittäinen sadetapahtuma kahdeksi erilliseksi sadetapahtumaksi ja vastaavasti kuivat jaksot voivat jakautua kahteen lyhyempään kuivaan jaksoon.

5.2 Sademittarihavaintojen vertailu

Jotta Fuessin piirtävän sademittarin luotettavuutta voidaan arvioida, on syytä vertailla sen mittaustuloksia toiseen samalla havaintoasemalla sijainneeseen sademittariin. Rantakrans

(1967) vertaili tutkielmassaan Kaisaniemen ja Sodankylän piirtävän Fuessin sademittarin havaintoja Wildin sademittarin havaintoihin kaudella 1924–1965. Rantakransin tulokset mittareiden osoittamien sademäärien kuukausikeskiarvojen erotuksesta on esitetty taulukossa 5.2. Rantakransin johtopäätöksenä oli, että kaikissa tapauksissa piirtävän sademittarin vuorokausisademäärät olivat pienempiä kuin Wildin keräysastian sademäärät. Vuoden 1980 joulukuussa Wildin sademittarit vaihdettiin Tretjakovin sademittareihin. Fuessin piirtävän sademittarin havaintoja pitkältä ajanjaksolta ei tiedettävästi ole ennen tätä tutkimusta vertailtu Tretjakovin sademittarin tuloksiin.

Taulukko 5.2 Wildin sademittarin ja Fuessin piirtävän sademittarin kuukausisadesummien keskiarvojen erotus kaudelta 1924–1965 (Rantakrans, 1967). R_W on Wildin mittarin osoittama kuukausisadesummien keskiarvo, R_F on Fuessin piirtävän sademittarin osoittama kuukausisadesummien keskiarvo.

	$R_W - R_F$ [mm]					$100 * (R_W - R_F) / R_F$ [%]				
	V	VI	VII	VIII	IX	V	VI	VII	VIII	IX
Helsinki	4	2.2	2.8	3.6	4.5	10.7	4.9	5	5.2	7.1
Sodankylä	-	2.8	2	3.7	-	-	5.2	2.9	5.2	-

Tässä tutkimuksessa laskettiin vastaavalla tavalla kuin Rantakransin (1967) tutkimuksessa sademittareiden välinen kuukausisadesummien keskiarvojen erotus. Tulokset on esitetty taulukossa 5.3. Kun vertaillaan taulukon 5.3 esittämiä tuloksia aiemmin tehdyn tutkimuksen tuloksiin taulukossa 5.2, havaitaan, että taulukon 5.2 esittämät mittauserot ovat selvästi suurempia. Todennäköinen selitys tuloksien eroon on mittausaseman avoimuuden muutos. Koska piirtävässä sademittarissa ei ole tuulisuojusta toisin kuin sadekeräysastioissa, mittaa se vähemmän sadetta. Rantakransin tutkimusjaksolla 1924–1965 mittausasema oli avoimempi ja tuulivirhe lisäsi mittalaitteiden välisiä eroja enemmän kuin tällä tutkimusjaksolla.

Taulukon 5.3 tuloksista havaitaan, että mittareiden havainnot eroavat toisistaan muutamalla prosentilla. On huomattava, että piirtävän sademittarin sademäärät eivät ole täysin vertailukelpoisia keräysastioiden sademäärien kanssa, koska mittalaitteet eivät sijainneet täsmälleen samassa paikassa. Muutamankin metrin säteellä voi paikallinen virtauskenttä ja ympäristön (esim. muut mittalaitteet ja puut) vaikutus olla erilainen. Koko kesän jaksolla Wildin keräysastia havaitsi hieman piirtävää sademittaria suurempia sademääriä, mutta yksittäisistä kuukausista kesä- ja heinäkuussa piirtävä sademittari mittasi enemmän sadetta. Tretjakovin keräysastia mittasi jokaisena kesäkuukautena vähemmän kuin piirtävä

sademittari. Solantien ja Junilan (1995) mukaan Tretjakovin keräysastian tartuntavirhe on suurempi ja tuulivirhe pienempi kuin Wildin keräysastian. Suojaisella mittausasemalla, kuten Helsingin Kaisaniemessä, tartuntavirheellä on suurempi merkitys kesäsateissa. Keskipäivällä suuripisaraisissa ja suhteellisen runsaissa sateissa tartuntavirheen osuus pienenee, mutta myös tuulivirhe pienenee entisestään. Taulukosta 5.3 näkyy, että etenkin Tretjakovin keräysastian tulosten suhteellinen ero piirtävän sademittarin tuloksiin on suurimmillaan alkukesästä, jolloin sademäärät ja sadepisarat ovat usein melko pieniä. Wildin keräysastian mittaukset ovat lähimpänä todellisia sademääriä, koska keskimäärin Wildin mittari mittasi suurimmat sademäärät. Piirtävän sademittarin tuloksia voidaan pitää hyvinä, vaikka tuulisuojuksen puuttuminen pienentää vähän havaittuja sademääriä. Tretjakovin keräysastian tarkkuutta heikentää suurehko tarttumisvirhe.

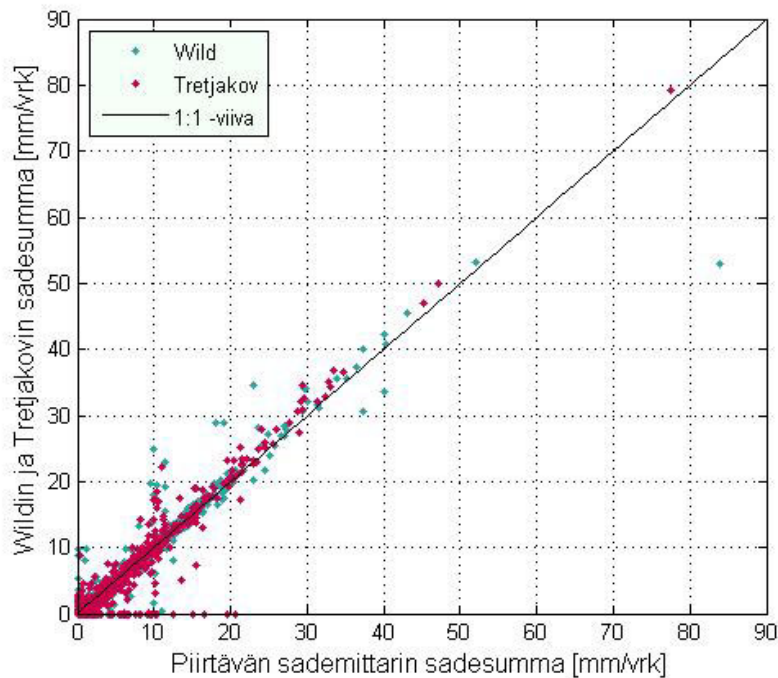
Taulukko 5.3 Wildin sekä Tretjakovin sademittarin ja piirtävän Fuessin sademittarin kuukausisadesummien keskiarvojen erotus kaudella 1951–2000. R_{WT} on Wildin tai Tretjakovin mittarin osoittama kuukausisadesummien keskiarvo, R_F on Fuessin piirtävän sademittarin osoittama kuukausisadesummien keskiarvo.

	$R_{WT}-R_F$ [mm]					
	V	VI	VII	VIII	IX	V-IX
Wild (1951-1980)	0.71	-1.08	-1.12	1.13	1.75	0.28
Tretjakov (1981-2000)	-1.38	-2.46	-2.6	-0.4	-0.64	-1.5
molemmat (1951-2000)	-0.13	-1.63	-1.71	0.52	0.79	-0.43

	$100*(R_{WT}-R_F)/R_F$ [%]					
	V	VI	VII	VIII	IX	V-IX
Wild (1951-1980)	2.4	-2.7	-1.9	1.6	2.6	0.4
Tretjakov (1981-2000)	-4.3	-5.2	-4.1	-0.5	-1	-3
molemmat (1951-2000)	-0.3	-3.7	-2.8	0.8	1.2	-1

Mittareiden vuorokausisadesummille laskettiin korrelaatio. Wildin ja Fuessin mittareiden vuorokausisadesummien väliseksi korrelaatioksi saatiin 0.974. Tretjakovin ja Fuessin mittareiden väliseksi korrelaatioksi saatiin 0.966. Molemmat korrelaatiot ovat vahvoja. Tilastollisella testauksella, kuten t-testillä, voidaan testata, miten merkitseviä poikkeamat mittareilla ovat. T-testin mukaan nollahypoteesia ”piirtävän sademittarin ja keräysastian vuorokausisadesummien erot ovat merkittäviä” ei voida kumota 5 % merkitsevyytasolla kummankaan vertailumittarin, Wildin tai Tretjakovin, kohdalla. Näin ollen mittauserot piirtävän sademittarin ja sadekeräysastioiden välillä eivät ole yleisesti merkitseviä. Kuvassa 5.2 on vertailtu Fuessin piirtävän sademittarin aineistosta laskettuja vuorokausisadesummia ja Wildin sekä Tretjakovin vuorokausisadesummia. Kuvasta näkyy myös, miten mittauserot

jakautuvat eri vuorokausisadesummien arvoille. 95 %:ssa havainnoista sadesummien poikkeama piirtävän sademittarin ja sadekeräysastian välillä on vähemmän kuin ± 1 mm/vrk.



Kuva 5.2 Piirtävän Fuessin sademittarin vuorokausisadesummien vertailu Wildin ja Tretjakovin vuorokausisadesummiin.

Kuvan 5.2 havaintopisteet ovat asettuneet pääsääntöisesti 1:1-viivan lähelle, mikä kuvastaa mittareiden yhdenmukaisia tuloksia. Kuvasta 5.2 on kuitenkin nähtävissä, että pisteet ovat pienillä sadannan arvoilla muodostuneet ikään kuin nuoleksi, jonka kärki on nollakohdassa. Nuolen kärki muodostuu tilanteista, joissa toinen vertailumittareista on näyttänyt nolaa, ja toinen on mitannut usean millimetrin sadesummaa, jossakin tapauksissa jopa 20 mm sadesummaa. Tapauksia, joissa piirtävä sademittari havaitsi vähintään 2 mm/vrk ja sadekeräysastia korkeintaan 0.1 mm/vrk, on yhteensä 56. 22 tapauksessa sadekeräysastia mittasi vastaavasti enemmän. Useimmat tapauksista ovat esiintyneet vuosien 1980 ja 2000 välillä, siis nimenomaan Tretjakovin mittarin ollessa käytössä. Luvussa 4.3 esitellyistä sademittauksiin liittyvistä ongelmista, kuten haihtumisvirheestä, tartuntavirheestä, roiskumisvirheestä, tuulivirheestä ja mittarin sijainnista aiheutuvien vaikutusten todettiin olevan kohtuullisen pieniä, joten niiden avulla ei voida selittää yli 2 mm eroja mittareiden välillä. Mittarin omat virheet ja satunnaisvirheet puolestaan voivat olla selityksenä nuolenkärjelle. On todennäköistä, että piirtävässä sadepiirturissa esiintyi teknistä vikaa, kun se sadepäivinä rekisteröi 0 mm sadesummaa. Toisaalta myöskään sadekeräysastioiden sadesummaa ei voida pitää täysin luotettavina. On mahdollista, että tutkimusjakson aikana

keräysastia on tyhjentynyt tai täyttynyt satunnaisten virhetekijöiden vaikutuksesta, joiden syytä ei voida selvittää. Kuvasta 5.2 nähdään myös, että suhteellisen paljon mittauspisteitä on keskittynyt piirtävän sademittarin 10 mm:n kohdalle. Kyse voi olla sattumasta, mutta on myös mahdollista, että syynä on piirtävän sademittarin tekninen ongelma. Normaalisti sademäärän ylittäessä yli 10 mm uimurikammio tyhjentyy ja kynä palaa piirturiliuskan alareunaan. Mekanismi on voinut jumiutua, mikä voi selittää 10 mm:n vuorokausisadesummien yleisyyden.

Pieni osuus kuvassa 5.2 havaittavista mittalaitteiden tulosten eroista johtuu 1960-luvun vaihteen mittausaseman paikanvaihdoksesta. Vuodesta 1958 vuoteen 1961 Kaisaniemessä sijaitsi kaksi mittausasemaa, toinen Ilmatieteen keskuslaitoksen yhteydessä, ja toinen kasvitieteellisen puutarhan yhteydessä. Piirtävä sademittari sijaitsi vuonna 1960 jo kasvitieteellisessä puutarhassa, kun taas vertailussa käytetty keräysastian aineisto on Ilmatieteen keskuslaitoksen mittausasemalta. Kuvasta 5.2 erottuu rankin sade, joka on sijoittunut kauaksi 1:1–viivalta. Rankin sade ajoittui 25. päivälle heinäkuuta vuonna 1960, jolloin piirtävän sademittarin mittaama sateen vuorokausisadesumma oli 83.9 mm. Vertailussa käytetyn Wildin keräysastian mittaama vuorokauden sadesumma samana päivänä oli 31 mm vähemmän, eli 52.9 mm. Rankassa sateessa oli pienellä alueella suuria paikallisia vaihteluita, ja mittausasemien sijaitseminen hieman etäällä toisistaan aiheutti suuren eron tuloksiin. Kaisaniemen kasvitieteellisen puutarhan mittausasemalla sijainnut keräysastiaan kertyi samana vuorokautena 85.5 mm/vrk. Se on 1.6 mm/vrk enemmän kuin piirtävän sademittarin sadesumma ja siis huomattavasti lähempänä piirtävän mittarin rekisteröimää sadesummaa.

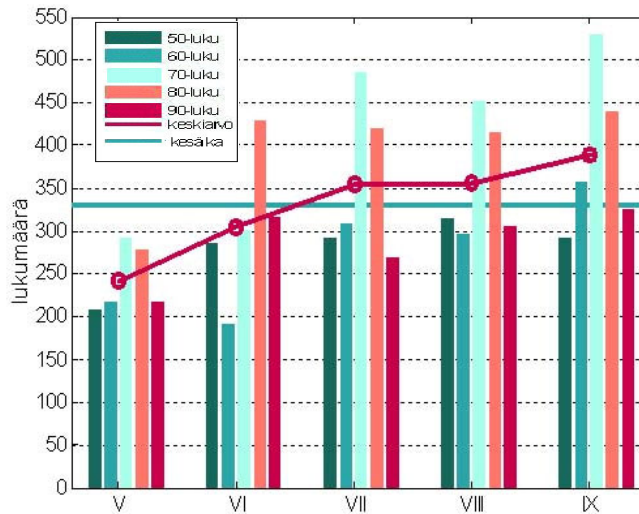
Piirtävään sademittariin verrattuna Wildin keräysastia havaitsi keskimäärin vähän suurempia vuorokausisadesummaa, Tretjakovin keräysastia sen sijaan havaitsi keskimäärin piirtävää sademittaria pienempiä vuorokausisadesummaa. Vertailun tuloksista voidaan päätellä, että yleisesti ottaen piirtävän sademittarin aineistoa voidaan pitää laadultaan hyvänä. Yksittäisissä tapauksissa piirtävän sademittarin havainto voi erota melko suurestikin keräysastioiden havainnoista, mutta keskimäärin mittalaitteiden tulokset ovat yhdenmukaisia. Piirtävän sademittarin aineistoa voidaan siis pitää kohtuullisen luotettavana ilmastollisten piirteiden analysoimiseen.

6. Sadannan ilmastolliset piirteet

6.1 Sadetapahtumien määrä

Meteorologisesta näkökulmasta pistemittauksen sadanta voidaan jakaa erillisiin sadetapahtumiin, kun niitä erottaa sateeton jakso. 50 vuoden tutkimusjaksolla sadetapahtumia, joiden välillä oli vähintään viiden minuutin sateeton jakso, oli yhteensä 8381 kappaletta. Vesiteknillisestä näkökulmasta sadetapahtuman määritelmä ei ole paras mahdollinen, koska lyhyen tauon aikana maasto ei ehdi kuivua. Jos valitaan sadetapahtumien välisen sateettoman jakson kestoksi vaihtoehtoisesti vähintään yksi tunti, soveltuvat tulokset paremmin teknillisiin sovelluksiin. Vähintään tunnin sateettoman jakson erottamia sadetapahtumia oli tutkimusjaksolla yhteensä 5204 kappaletta.

Kuvassa 6.1 on sadetapahtumien lukumäärä eri kesäkuukausina ja vuosikymmeninä. Pystyakselin luku osoittaa, kuinka monta sadetapahtumaa on ajoittunut kyseisen vuosikymmenen tietylle kuukaudelle. Kuvassa näkyy myös vuosikymmenten keskiarvo eri kuukausina. Määritelmänä on käytetty vähintään 5 minuutin sateetonta jaksoa, joka erottaa sadetapahtumat toisistaan. Kuvasta 6.1 nähdään, että kuukausikeskiarvokäyrä nousee loppukesää kohti. Vähiten sadetapahtumia on toukokuussa, jolloin myös hajonta eri vuosikymmenien välillä on pienintä. Kesäkuussa hajonta on toukokuuta selvästi suurempaa. Heinäkuussa ja elokuussa on keskimäärin yhtä paljon sadetapahtumia. Syyskuussa sadetapahtumia on kesäkuukausista eniten. Sadetapahtumien määrä on verrannollinen taulukon 3.1 sademäärän kuukausiarvoihin ja sadepäivien lukumäärään. Erona taulukkoon on syyskuu, jolloin kuukausisademäärä on Kaisaniemessä pienempi kuin elokuussa, mutta sadetapahtumia on silloin enemmän. Sade on rankempaa elokuussa kuin syyskuussa, joten pienemmästä määrästä sadetapahtumia voi kertyä suurempia sademääriä. Eniten sadetapahtumia oli 70- ja 80-luvuilla, jolloin sadetapahtumia oli keskimääräistä enemmän etenkin loppukesällä. 90-luvulla sadetapahtumia oli keskimääräistä vähemmän. Sadetapahtumien lukumäärä vaihtelee luontaisesti eikä siinä voida havaita vuosikymmenten kuluessa selviä muutoksen merkkejä.



Kuva 6.1 Sadetapahtumien lukumäärä eri kesäkuukausina ja vuosikymmeninä. Pylväs kuvaa koko vuosikymmenellä esiintyneiden sadetapahtumien yhteismäärää. Punaisella viivalla on esitetty kuukausikohtaiset keskiarvot, turkoosilla viivalla on esitetty kaikkien kesäkuukausien keskiarvo 50 vuoden ajalta.

6.2 Sateen kesto

6.2.1 Keskimääräinen kesto

50 vuoden aikana Helsingin Kaisaniemessä satoi touko-syyskuussa yhteensä 8206 tuntia eli 341.9 vuorokautta. Kuvassa 6.2 on esitetty sateen keskimääräiset kuukausittaiset kestot. Kuukausittaiset keskikestot ovat kaikkina kesäkuukausina hieman pienempiä kuin taulukossa 2.2 esitetyt aikaisemman tutkimuksen tulokset. Tulosten välinen ero voi viitata muutokseen sadannan kuukausittaisessa kestossa vuosisadan kuluessa, mutta on todennäköistä, että osa erosta johtuu aineiston erilaisesta käsittelytavasta. Kuvasta 6.2 nähdään, että kesäkuukausista toukokuussa sataa keskimäärin vähiten aikaa, noin 25 tuntia. Syyskuussa sataa selvästi eniten, noin 45 tuntia. Touko-syyskuun aikana sataa yhteensä keskimäärin noin 160 tuntia vuosittain. Taulukosta 3.1 nähdään, että sadepäiviä on toukokuussa keskimäärin 10, kesä- ja heinäkuussa 13 sekä elo- ja syyskuussa 16.



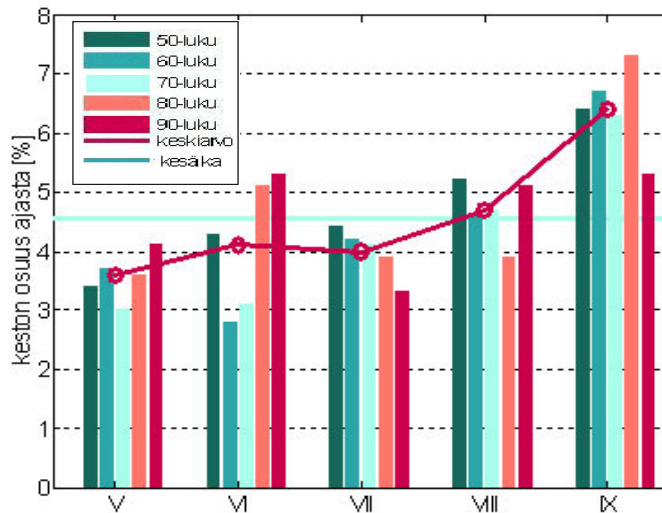
Kuva 6.2 Sateen keskimääräinen yhteiskesto tunneissa kesäkuukausina.

Yksittäisen sadetapahtuman kesto koko 50 vuoden jaksolla oli keskimäärin 59.5 minuuttia. Kuvassa 6.3 on esillä sadetapausten keskimääräinen kesto eri kuukausina ja vuosikymmeninä. Kuvasta nähdään selvästi, että kuukausikeskiarvo saa v-muodon, siten että sadetapahtuman keskimääräinen kesto on lyhimmillään heinäkuussa ja pisimmillään toukokuussa sekä syyskuussa. Selityksenä v-muodolle ovat hallitsevan sadetyypin kuukausivaihtelut. Heinäkuussa esiintyy eniten konvektiivisia sateita, joiden kesto on rintamasateisiin verrattuna lyhyt. Toukokuussa ja syyskuussa rintamasateet muodostavat suuremman osuuden sadannasta ja yksittäisten sadetapahtumien kesto on pisimmillään. Kuten kuvasta 6.1 nähtiin, toukokuussa on kuitenkin vähemmän sadetapahtumia kuin syyskuussa, joten sen seurauksena sateen kokonaiskesto on toukokuussa huomattavasti syyskuuta pienempi. 50-luvulla sadetapahtumat olivat hieman muiden vuosikymmenten sadetapauksia pitkäkestoisimpia. 70- ja 80-luvuilla sadetapahtumat olivat keskimäärin lyhytkestoisimpia. Jo aiemmin tuli ilmi, että 70- ja 80-luvuilla oli myös eniten sadetapahtumia, joten silloin satoi muita vuosikymmeniä useampia kertoja lyhyempiä jaksoja kerrallaan, ja todennäköisesti konvektiivista sadetta esiintyi keskimääräistä enemmän. Keskimääräisessä kestossa ei ole tapahtunut merkittäviä muutoksia vuosikymmenten kuluessa.



Kuva 6.3 Sadetapahtuman keskimääräinen kesto eri kesäkuukausina ja vuosikymmeninä. Punainen viiva kuvaa kuukausikeskiarvoa, turkoosilla viivalla on esitetty kaikkien kesäkuukausien keskiarvo 50 vuoden ajalta.

Tämän tutkimuksen mukaan kesällä Helsingin Kaisaniemessä sataa keskimäärin 4.5 % kokonaisajasta. Jos sateen kesto jaetaan tasaisesti jokaiselle kesän päivälle, sataa päivittäin keskimäärin 1 tunnin ja 5 minuutin ajan. Inkisen (2003) tutkimuksessa 6.17 % kesän tutkahavainnoista Suomessa todettiin sadehavainnoiksi. Tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia, koska toinen perustuu pistemittaukseen ja toinen alueelliseen mittaukseen. Yleisesti ottaen Kaisaniemessä sateen keston osuus kokonaisajasta on jonkin verran pienempi kuin keskimäärin Suomessa, mikä johtuu mittausaseman sijainnista rannikon läheisyydessä. Alkukesällä viileä meri vähentää rannikolla sademäärää ja myös sateen osuutta ajasta. Kuvassa 6.4 on esitetty sateen keston osuus kokonaisajasta eri kesäkuukausina ja vuosikymmeninä. Kuvasta 6.4 nähdään, että alkukesällä sateen osuus on noin 4 %. Loppukesällä lämmin meri lisää rannikolla sademääriä ja sateen kesto. Syyskuussa sataa keskimäärin 6 % ajasta. Tulokset ovat hyvin lähellä luvussa 2.7.2 mainittuja sateen osuuden tuloksia Tukholmasta. Sateen keston osuus vaihteli vuosikymmenten välillä eniten kesäkuussa ja vähiten heinäkuussa.



Kuva 6.4 Sateen keston osuus kokonaisajasta eri kesäkuukausina ja vuosikymmeninä. Punainen viiva kuvaa kuukausikeskiarvoa, turkoosilla viivalla on esitetty kaikkien kesäkuukausien keskiarvo 50 vuoden ajalta.

6.2.2 Keston todennäköisyyksiä ja ennätyksiä

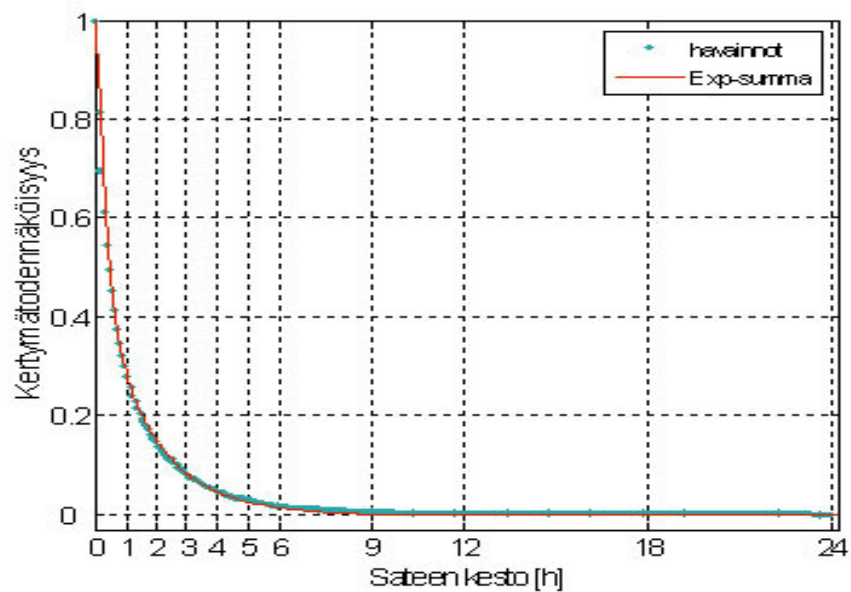
Sadetapahtuman keston on teoreettisesti arvioitu noudattavan kaavan 2.3 eksponenttijakaumaa. Eksponenttijakauman sopivuutta tutkittiin Kaisaniemen sadeaineistoon. Eksponenttijakauman todettiin kuvaavan tilastollisesti sadetapahtumien kestoja hyvin, ja jakauman selitysasteeksi saatiin 0.9746. Eksponenttijakauman heikkoutena on, että se aliarvioi kertymäfunktion arvoja 2–5 tunnin kestoissa sateissa. Parempi sopivuus aineistoon saatiin, kun käytettiin kahden eksponenttijakauman summaa, jolloin selitysasteeksi saatiin 0.9994. Kuvassa 6.5 on eksponenttijakaumien summan sovitus aineistoon. Eksponenttijakaumien summan yhtälö Kaisaniemen aineistoon sovitettuna saa vakioineen kaavan 6.1 muodon:

$$f(x) = 0.6849 \cdot \exp(-0.0575 \cdot x) + 0.4901 \cdot \exp(-0.009857 \cdot x), \text{ kun } x \geq 5 \quad (6.1)$$

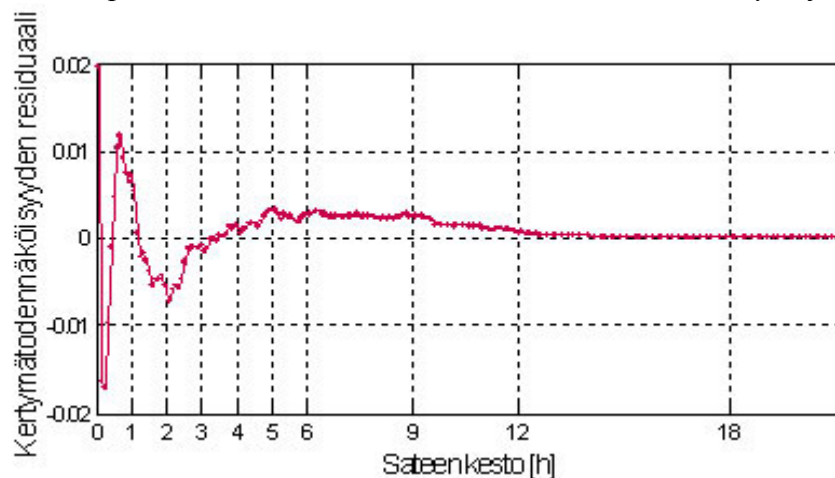
missä x on aika minuuteissa. Yhtälöstä saadaan selville, kuinka suuri osuus sadetapahtumista kestää vähintään x minuuttia. Kuvasta 6.6 nähdään käyrän sovituksen residuaalit, eli havaittujen arvojen ja sovitetun jakauman arvojen erotukset. Alle tunnin kestoissa sateilla residuaalit ovat suhteellisen suuria, ja havaittu sekä teoreettinen kertymätodennäköisyys eroavat toisistaan pari prosenttia. Havaitun jakauman kertymätodennäköisyys 5 minuutin kestoille sateille on 1, mutta teoreettisen jakauman kertymätodennäköisyys on 0.98. Pitkäkestoissa sateilla residuaali on pieni, ja havaitut

sekä teoreettiset arvot ovat hyvin lähellä toisiaan. Kahden eksponenttijakauman summa osoittautui yllättävän yhteensopivaksi teoreettiseksi jakaumaksi Helsingin Kaisaniemen havaintoaineistolle.

Kuvassa 6.5 on esillä sateen keston kertymätodennäköisyys. Kuvasta nähdään selvästi, että lyhytkestoiset sadetapahtumat ovat selvästi yleisempiä kuin pitkäkestoiset. Vain puolet sadetapahtumista Helsingin Kaisaniemessä kestää yli puoli tuntia. Yli kuusi tuntia sadetapahtumista kestää noin 1.4 %. Yli 12 tuntia kestävien sateiden osuus on hyvin pieni. Sadetapahtumien keston teoreettiseen jakaumaan perustuvia todennäköisyyksiä on selvyuden vuoksi listattu myös taulukkoon 6.1.



Kuva 6.5 Sadetapahtuman kestoajan kertymätodennäköisyys havaintoihin ja kaavan 6.1 teoreettiseen jakaumaan perustuen. Pysty akselin kertymätodennäköisyys ilmaisee, kuinka suuri osuus sadetapahtumista kestää vähintään vaak-akselilla esitetyn ajan verran.



Kuva 6.6 Sadetapahtuman kestoajan residuaalit, eli erot havaittujen arvojen ja kaavan 6.1 jakauman välillä.

Taulukko 6.1 Sateen keston todennäköisyyksiä teoreettiseen jakaumaan perustuen.

Kesto vähintään	Todennäköisyys	Kesto vähintään	Todennäköisyys
	[%]		[%]
10 min	82.95	2 h	15.09
15 min	71.18	3 h	8.31
20 min	61.93	4 h	4.60
25 min	54.57	5 h	2.55
30 min	48.67	6 h	1.41
35 min	43.86	8 h	0.43
40 min	39.91	10 h	0.13
45 min	36.60	12 h	0.04
50 min	33.80	14 h	0.012
55 min	31.40	16 h	0.004
1 h	29.30	18 h	0.001
1 h 30 min	20.57	20 h	0.0004

50 vuoden ajanjaksolla esiintyi yhteensä 8 tapausta, jolloin sade kesti yhtäjaksoisesti yli 12 tuntia. Nämä tapaukset on listattu taulukkoon 6.2. Yhtäjaksoisesti pisimpään kestänyt sade kesti 21 h 20 min, ja se esiintyi syyskuussa vuonna 1960. Hetkellinen intensiteetti oli pisimmässä sateessa suuri, mutta keskimääräinen intensiteetti oli suhteellisen pieni. Keskimääräiseltä intensiteetiltään voimakkain yli 12 tunnin kestoinen sade esiintyi heinäkuussa 1993, jolloin myös sadesumma oli huomattavasti muita yli 12 tunnin kestoisia sateita suurempi.

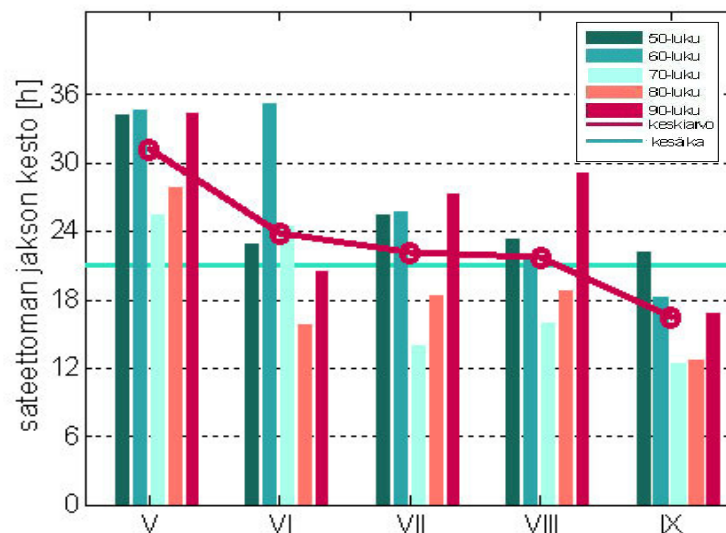
Taulukko 6.2 Yli 12 tuntia yhtenäisesti kestäneet sateet vuosina 1951–2000

alkamispäivämäärä	alkamisaika	kesto	sadesumma	keski-intensiteetti	maksimi-intensiteetti
			[mm]	[mm/min]	[mm/min]
25.9.1960	klo 10.36	21 h 20 min	13.3	0.010	0.217
2.6.1959	klo 14.51	16 h 50 min	10.5	0.010	0.057
14.5.1995	klo 01.31	14 h 30 min	22.9	0.027	0.060
20.9.1951	klo 07.05	14 h	13.5	0.020	0.110
21.7.1993	klo 18.27	12 h 40 min	45.3	0.060	0.200
24.9.1957	klo 8.53	12 h 30 min	11.2	0.015	0.170
22.6.1997	klo 18.24	13 h 15 min	22.9	0.031	0.177
18.8.1952	klo 21.26	12 h 5 min	12.5	0.017	0.236

6.3 Sateettomat jaksot

6.3.1 Keskimääräinen kesto

Yhtenäisten sateettomien jaksoiden keskimääräinen pituus oli tutkimusjakson aikana 1278 minuuttia eli 21 tuntia 18 minuuttia. Sateettomien jaksoiden vuosikymmenten välinen keskihajonta on suuri, noin 51 tuntia. Kuvassa 6.7 on esitetty sateettomien jaksoiden keskimääräinen kesto eri kuukausina ja vuosikymmeninä. Sateettomien jaksoiden kesto on pisin toukokuussa, ja se lyhenee loppukesää kohti. Kuvan 6.7 kuukausikeskiarvokäyrän muoto on lähes peilikuva kuvan 6.4 sateen suhteellisen keston kuukausikeskiarvoille. Sateella ja sateettomalla ajalla on tietenkin riippuvuus, koska vain toinen voi esiintyä kerrallaan. Toukokuussa sateen osuus on pienempi, joten on johdonmukaista, että myös sateettomat jaksot ovat pidempiä. Syyskuussa sateettomat jaksot jäävät usein lyhyeksi, koska sateen osuus kokonaisajasta on kesäkuukausista suurin. Sateettomien jaksoiden kuukausikeskiarvoja verrattaessa kuvan 6.3 sadetapahtumien keskimääräisen keston kuukausikeskiarvoihin vastaavanlaista yhteyttä ei havaita. Kuvasta 6.7 erottuvat 70- ja 80-luvut, jolloin sateettomat jaksot olivat lyhimpiä. Suhteellisen suuri määrä sadetapahtumia lyhensi sateettomia jaksoja kyseisinä vuosikymmeninä. Sateettomien jaksoiden kestoissa ei havaita selvää muutosta vuosikymmenten kuluessa.



Kuva 6.7 Sateettomien jaksoiden keskimääräinen kesto eri kesäkuukausina ja vuosikymmeninä. Punainen viiva kuvaa kuukausikeskiarvoa, turkoosilla viivalla on esitetty kaikkien kesäkuukausien keskiarvo 50 vuoden ajalta.

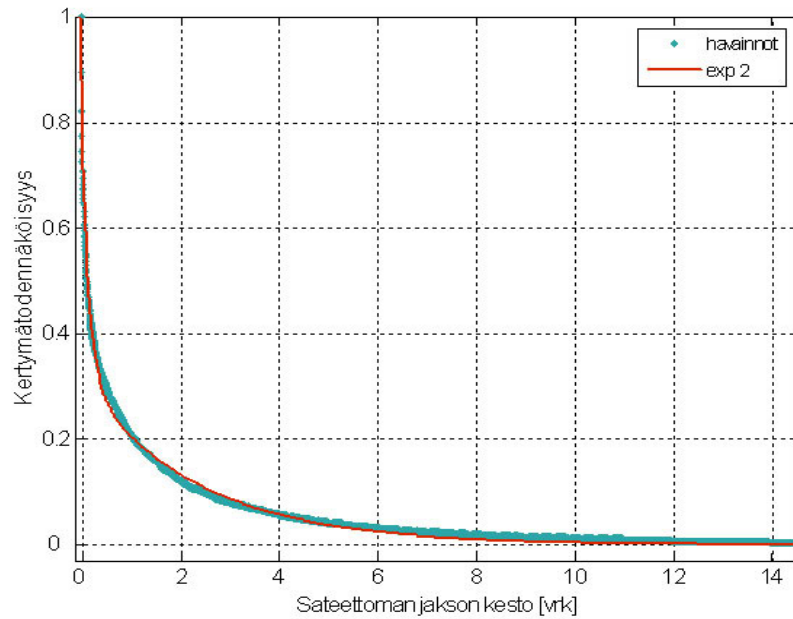
6.3.2 Keston todennäköisyyksiä ja ennätyksiä

Luvussa 6.2.2 sovitettiin sadetapahtumien kestoille eksponenttijakaumia. Myös sateettomien jaksojen keston arvioidaan noudattavan kaavan 2.3 mukaista eksponenttijakaumaa tarpeeksi suurissa otoksissa. Eksponenttijakauman todettiin kuvaavan Helsingin Kaisaniemen sateettomia jaksoja melko hyvin, selitysteella 0.9399. Eksponenttijakauma kuvaa kuitenkin etenkin lyhytkestoisia sateettomia jaksoja vain kohtuullisesti. Kahden eksponenttijakauman summa osoittautui kuvaamaan selvästi paremmin myös sateettomia jaksoja. Havaintojen jakauma ja kahden eksponenttijakauman summa ovat esitettyinä kuvassa 6.8. Helsingin Kaisaniemen aineistosta muodostettu eksponenttifunktioiden summa saa vakioineen kaavan 6.2 muodon:

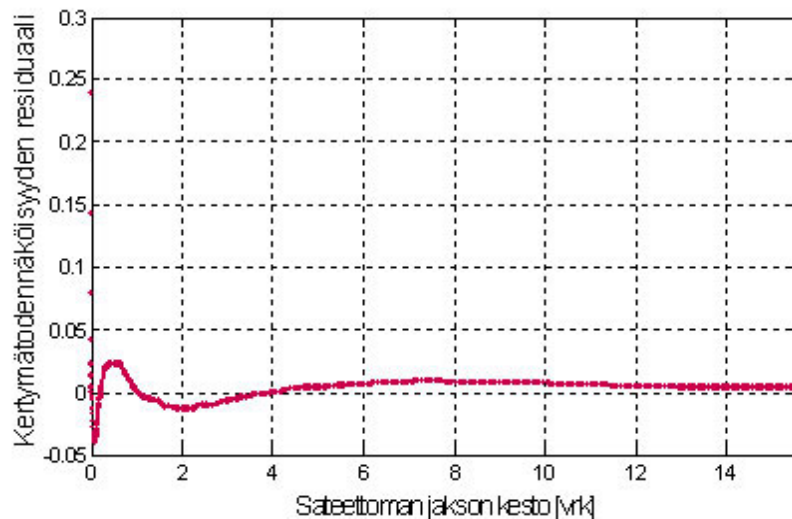
$$f(x) = 0.4569 \cdot \exp(-0.004374 \cdot x) + 0.3149 \cdot \exp(-0.0002956 \cdot x), \text{ kun } x \geq 5 \quad (6.2)$$

missä x on sateettoman jakson kesto minuutteina. Jakauman selityste on 0.9914. Selitysteettä voidaan pitää erittäin hyvänä, mutta se ei tosin ole aivan yhtä hyvä kuin sadetapahtumien kestoille saatu selityste. Kuvassa 6.9 on esitetty jakauman residuaalit. Residuaaleista nähdään, että 5–15 minuutin kestoilla teoreettisen jakauman sopivuus havaintoihin on huono, ja ero on pahimmillaan 20 %. Yli vuorokauden kestäville sateettomilla jaksoilla residuaali on pieni.

Noin puolessa tapauksissa sateeton jakso kestää 3 tuntia tai sitä lyhyemmän ajan. 80 % sateettomista jaksoista kestää alle vuorokauden. Sateettomien jaksojen todennäköisyyksiä on listattu taulukossa 6.3. Suuri osa sateettomista jaksoista sadetapahtumien välillä on lyhyitä, mikä osaltaan todistaa, että sadetapahtumat esiintyvät yleensä ryppäissä. On siis todennäköisempää, että pistemittauspaikan ylitse kulkee useampia peräkkäisiä sadekuuroja tai hajanainen sadealue kuin yksittäinen sadekuuro tai yksi täysin yhtenäinen sadealue.



Kuva 6.8 Sateettoman jakson kestoajan kertymätodennäköisyys havaintoihin ja kaavan 6.2 teoreettiseen jakaumaan perustuen. Pystyakselin kertymätodennäköisyys ilmaisee, kuinka suuri osuus sateettomista jaksoista kestää vähintään vaaka-akselilla esitetyn ajan verran.



Kuva 6.9 Sateettomien jaksojen kestoajan residuaalit, eli erot havaittujen arvojen ja kaavan 6.2 jakauman välillä.

Taulukko 6.3 Sateettomien jaksojen kestojen todennäköisyyksiä teoreettisen jakauman perustuen.

Kesto vähintään	Todennäköisyys [%]
0.5 h	71.28
1 h	66.08
3 h	50.65
6 h	37.77
12 h	27.41

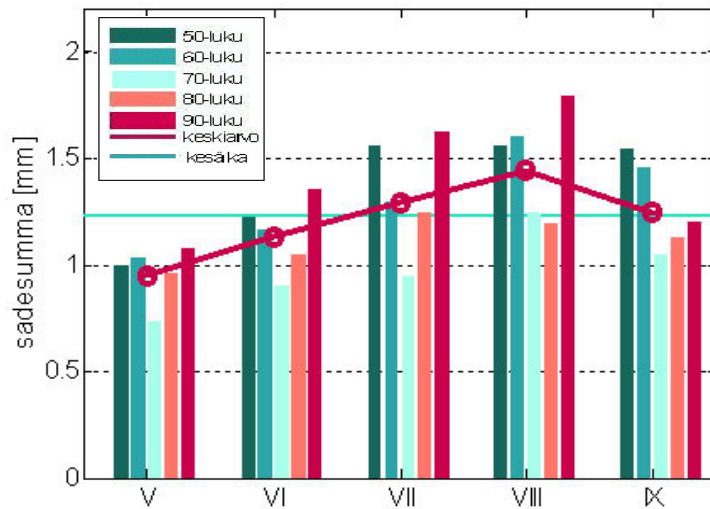
Kesto vähintään	Todennäköisyys [%]
24 h	20.66
7 vrk	1.60
14 vrk	0.08
21 vrk	0.004
28 vrk	0.0002

Pisin yhtäjaksoinen sateeton jakso mitattiin piirtävällä sademittarilla vuonna 1960, jolloin sateetonta oli yhteensä 32 vrk 22 tuntia. Keräysastia, joka tosin sijaitsi silloin 200 metrin etäisyydellä piirtävästä sademittarista Ilmatieteen keskuslaitoksen yhteydessä, havaitsi samaan aikaan vain 24 vuorokauden yhtenäisen sateettoman jakson, koska yhtenä havaintovuorokautena havaittu 0.1 mm sadesumma katkaisi jakson. Yli 30 vuorokautta pidempiä sateettomia jaksoja kesäkuukausien aikana jaksolla 1951–2000 oli piirtävän sademittarin havaintojen mukaan 4.

6.4 Sadesumma

6.4.1 Keskimääräinen sadesumma

Sadetapahtuman sadesumma riippuu monista tekijöistä, kuten esimerkiksi sadetyypistä. Konvektiiviset sateet ovat suuripisaraisia ja intensiteetiltään voimakkaampia kuin rintamasateet. Sadesummaan vaikuttaa myös sadetapahtuman kesto. Mitä pidempikestoinen sadetapahtuma on, sitä enemmän sadetta ehtii kertyä sen aikana. Kuvassa 6.10 on esitetty sadetapahtuman keskimääräisen sadesumman vaihtelu kuukausittain ja vuosikymmenittäin. Keskimäärin pienimmät sadesummat kertyvät toukokuun sateissa, jolloin pienipisaraiset rintamasateet hallitsevat. Suurimmat sadesummat kertyvät elokuun konvektion hallitsemissa sateissa. Heinäkuussa ja syyskuussa keskimääräinen sadesumma on suurin piirtein yhtä suuri, vaikka heinäkuussa konvektiivisten sateiden osuus on suurempi kuin syyskuussa. Syynä syyskuun suurehkoon sadesummaan ovat pitkäkestoiset sateet, joissa yhden sadetapahtuman aikana ehtii kertyä melko suuria sadesummia. 50- ja 90-luvuilla sadetapahtumien sadesummat olivat suurimmillaan. Kyseisinä vuosikymmeninä myös sadetapahtumien kesto oli pidempi kuin muina vuosikymmeninä, joten sadesummien suuruus johtuu suureksi osaksi tapahtumien pitkäkestoisuudesta. Sadesummissa ei vuosikymmenten kuluessa havaita ilmastonmuutokseen viittaavia merkkejä.



Kuva 6.10 Sadetapahtuman keskimääräinen sadesumma eri kesäkuukausina ja vuosikymmeninä. Punainen viiva kuvaa kuukausikeskiarvoa, turkoosilla viivalla on esitetty kaikkien kesäkuukausien keskiarvo 50 vuoden ajalta.

6.4.2 Todennäköisyyksiä ja ennätyksiä

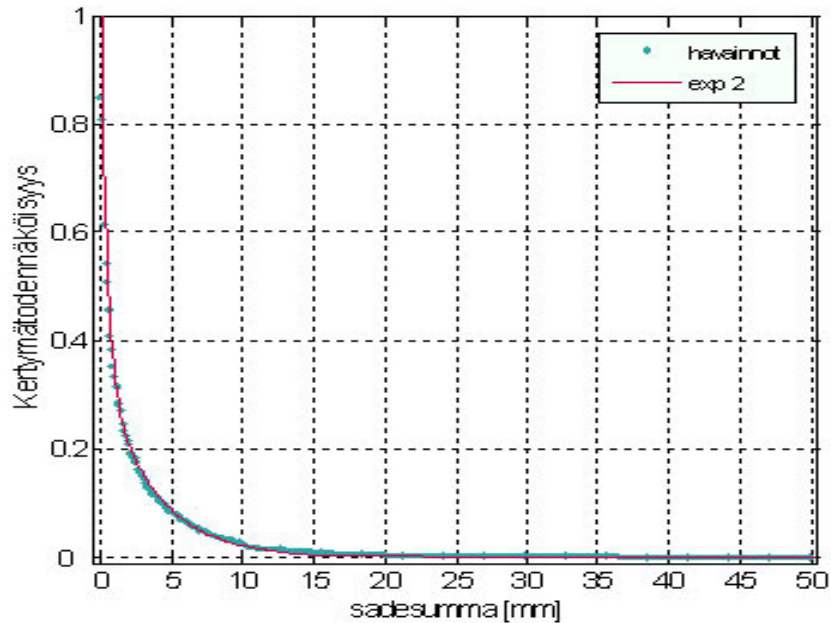
Luvussa 2.6.1 mainittiin, että usein yksittäisten sadetapahtumien sadantojen on todettu noudattavan tyydyttävästi kaavan 2.4 mukaista gammajakaumaa. Tässä tutkimuksessa gammajakauman sijaan sadetapahtumien sadesummille sovitettiin kahden ekponenttijakauman summa, kuten aiemmin tehtiin jo sadetapahtumien ja sateettomien jaksojen kestoille. Kahden eksponenttifunktion summan sovitus havaintoihin on esillä kuvassa 6.11. Jakauma saa vakioiden kanssa kaavan 6.3 mukaisen muodon:

$$f(x) = 0.8228 \cdot \exp(-2.339 \cdot x) + 0.3623 \cdot \exp(-0.2805 \cdot x), \quad x \geq 0.1 \quad (6.3)$$

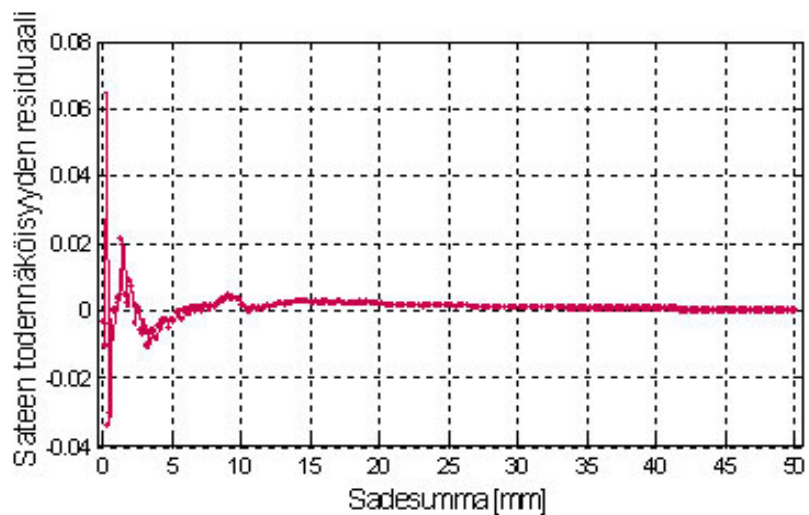
missä x on sadesumma yksikössä mm. Jakauman selitysaste on 0.9980. Kuvassa 6.12 on esitetty jakauman sopivuutta havaintoihin kuvaavat residuaalit. Pienillä sadesumman arvoilla residuaalit ovat muutaman prosentin suuruusluokkaa, ja yli 5 mm sadetapahtumissa residuaalit ovat hyvin pieniä. Voidaan todeta, että ekponenttijakaumien summa on Kaisaniemen aineistolle sopiva jakauma kuvaamaan sadetapahtumien sadesummia. Ei ole varmaa, soveltuuko samankaltainen jakauma myös Suomen muiden mittausasemien sadesummille yhtä hyvin, mutta voidaan olettaa, että sopivuus on muillakin mittausasemilla vähintään melko hyvä.

Sadetapahtumien sadesumma jää useimmiten melko pieneksi. Kuvasta 6.11 nähdään, että ekponenttijakauman luonteen mukaisesti sadetapahtumien määrän käyrä romahtaa alas

nopeasti sadesumman kasvaessa. 65 %:ssa sadetapahtumista sadesumma on 1 mm tai vähemmän. Yli 10 mm sadesummaa kertyy vain vajaassa 3 %:ssa sadetapahtuksista. Todennäköisyydet ovat nähtävissä kuvasta 6.11, mutta selvyuden vuoksi teoreettiseen jakaumaan perustuvia arvoja on listattu myös taulukkoon 6.4.



Kuva 6.11 Sadetapahtuman sadesumman kertymätodennäköisyys havaintoihin ja kaavan 6.3 teoreettiseen jakaumaan perustuen. Pystyakselin kertymätodennäköisyys ilmaisee, kuinka suuressa osuudessa sadetapahtumia sadesumma on vähintään vaaka-akselin osoittaman arvon verran.



Kuva 6.12 Sadetapahtumien sadesummien residuaalit, eli erot havaittujen arvojen ja kaavan 6.3 jakauman välillä.

Taulukko 6.4 Sadetapahtuman sadesumman todennäköisyyksiä teoreettiseen jakaumaan perustuen.

Sadesumma [mm]	Todennäköisyys [%]	Sadesumma [mm]	Todennäköisyys [%]
0.3	74.10	5	8.91
0.5	57.04	10	2.19
1	35.30	15	0.54
2	21.44	20	0.13

50 vuoden jaksolla esiintyneet Kaisaniemen kymmenen suurinta sadetapahtuman sadesummaa ovat esillä taulukossa 6.5. Suurin yksittäisen sadetapahtuman sadesumma mitattiin heinäkuussa 1993, jolloin vajaan 13 tunnin aikana satoi yli 45 mm. Ennätys sadetapahtuman keskimääräinen intensiteetti oli pieni, mutta sateen pitkäkestoisuuden johdosta sadesumma oli suuri. Ennätystaulukon sadetapahtumien kestot vaihtelevat suuresti. 50-luvun sadetapahtumista yksikään ei päässyt 10 suurimman sadesumman taulukkoon. Eniten ennätystapauksia oli 60-luvulla.

Taulukko 6.5 Suurimmat sadesummat yksittäisissä sadetapauksissa.

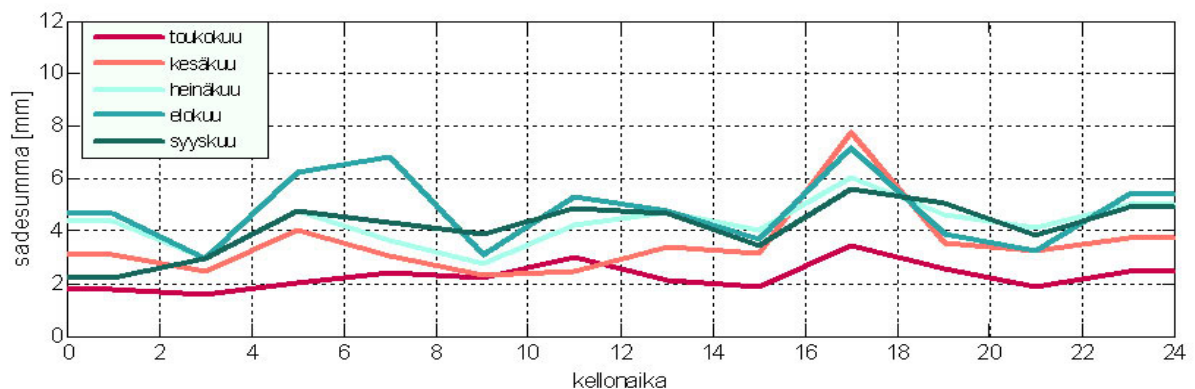
sadesumma [mm]	kesto	keski-intensiteetti [mm/min]	alkamispäivämäärä
45.3	12 h 40 min	0.0746	21.7.1993
43.0	8 h	0.1323	11.8.1972
41.6	1 h 30 min	0.6412	25.8.1967
39.0	2 h 45 min	0.6646	26.7.1960
37.1	1 h 30 min	0.8582	25.7.1960
36.5	11 h 30 min	0.0544	24.9.1987
33.7	2 h 50 min	0.2774	9.7.1996
33.6	9 h 30 min	0.0699	7.8.1987
31.6	3 h 55 min	0.5178	29.9.1965
31.6	8 h 50 min	0.0660	21.8.1989

6.4.3 Vuorokausivaihtelu

Aineistosta selvitetiin sadesumman jakautumista vuorokauden sisällä jakamalla vuorokausi kahden tunnin mittaisiin osiin siten, että parilliset tunnit olivat rajana. Aineistosta tutkittiin, kuinka paljon kuukauden sademäärästä kertyi kyseisen kahden tunnin aikana. Tulokset on esitetty kuvassa 6.13. Kuusisto (1980) havaitsi, että Helsingissä satoi kesä-elokuussa eniten

aamulla klo 06 ja 09 välillä, toinen maksimi havaittiin iltapäivällä noin klo 16 aikaan. Kuvan 6.13 esittämien tulosten mukaan aamun maksimi on ajoittunut aikaisemmaksi, mutta iltapäivämaksimi on suurin piirtein samaan aikaan kuin Kuusiston tutkimuksessa. Aamun sadesumman maksimi voimistuu kesän edetessä, ja on selvästi voimakkain elokuussa. Kuusisto (1980) ei tutkimuksessaan ottanut kantaa aamumaksimien syihin. Simojoki (1944) havaitsi aamumaksimien Sodankylän, Revonlahden ja Ilmajoen mittausasemilla, mutta ei Helsingin mittausasemalla. Helsingin Kaisaniemessä meri on usein loppukesällä lämpimämpi kuin maa, etenkin öisin. On mahdollista, että lämpimän meren ylle virtaava ilma muuttuu epävakaisemmaksi ja sadekuurot yleistyvät varhain aamulla. Toukokuussa aamun maksimia ei vielä havaita, sen sijaan pieni iltapäivämaksimi havaitaan jo silloin. Iltapäivämaksimi on voimakkain kesäkuussa ja elokuussa. Meren läheisyys tasoittaa vuorokausivaihtelua ja maksimit eivät ole voimakkaita. Sisämaassa iltapäivämaksimien on todettu erottuvan paljon selvemmin. Koko kesän sadesumman minimi ajoittuu aamuyön klo 02 ja 04 välille.

Toukokuussa vuorokausivaihtelu on hyvin vähäistä, koska konvektiivisia sateita esiintyy vain vähän. Myös syyskuussa vuorokautinen vaihtelu on suhteellisen pientä, mutta sademäärät ovat toukokuuta suurempia koko vuorokauden ajan. Syyskuussa sadesummalla on kolme pientä maksimia: klo 04–06, 10–12 ja 16–18. Kesä-, heinä- ja elokuussa konvektiiviset sateet voimistavat vuorokausivaihtelua. Kesäkuussa on selvä iltapäivämaksimi klo 16–18, ja pienempi aamumaksimi klo 04–06. Vähäisintä sateita on kesäkuussa klo 08–12. Heinäkuussa on neljä vuorokausimaksimia: klo 04–06, 12–14, 16–18 ja 22–02. Heinäkuun maksimeista voimakkain on iltapäivämaksimi. Elokkuussa aamuyön maksimi on iltapäivämaksimia voimakkaampi. Elokkuussa sataa vähiten klo 02–04 ja 08–10.



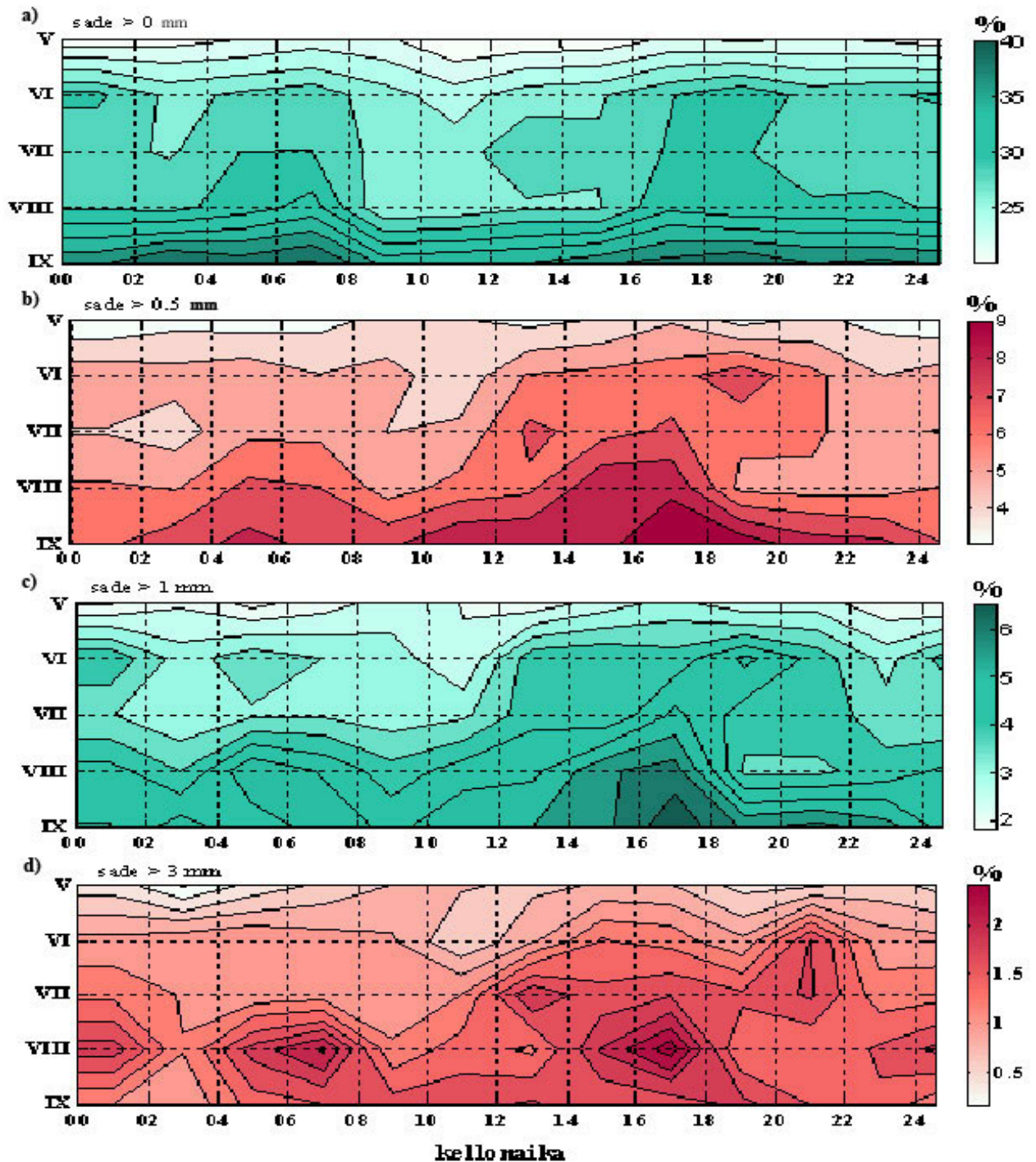
Kuva 6.13 Keskimääräisen kuukausisadesumman vuorokausivaihtelu. Vaaka-akselilla on kellonaika, pystyakselilla on kahden tunnin sadesumma.

Sadesumman vuorokautista jakautumista selvitetiin tarkemmin asettamalla raja-arvoja sadesummalle ja tutkimalla, kuinka suuressa osassa aineistoa raja-arvo ylittyi. Raja-arvon ylittävien tapausten määrä voidaan tulkita tapausten esiintymistodennäköisyytenä, koska tutkimusaineisto on riittävän suuri. Tulokset näkyvät kuvassa 6.14. Todennäköisyyksiä tarkasteltiin kahden tunnin mittaisille jaksoille, joten kuvaa 6.14 ei kannata tulkita liian yksityiskohtaisesti. Kuvassa 6.14 a) raja-arvona on käytetty 0 mm, eli siitä nähdään todennäköisyys sille, että kyseisten kahden tunnin aikana ylipäätään sataa. Muina raja-arvoina käytettiin 0.5 mm, 1 mm ja 3 mm, ja ne ilmaisevat todennäköisyyden sille, että kyseisten kahden tunnin aikana sataa vähintään raja-arvon verran. Kuvan 6.14 tarkoituksena on havainnollistaa, miten sateen todennäköisyys muuttuu eri kuukausina vuorokauden aikana, ja milloin todennäköisesti sadesumma on suuri.

Kuvasta 6.14 a) nähdään, että sade on kesällä todennäköisintä aamulla kello 04–08 ja illalla klo 16–20. Klo 08–12 sade on kaikkina kesäkuukausina epätodennäköisintä. Todennäköisyys sateelle kasvaa loppukesää kohti selvästi. Toukokuussa todennäköisyys sateelle on noin 20 %, loppukesällä todennäköisyys on yli 30 %. Kun raja-arvona käytettiin 0.5 mm, että todennäköisyydet laskevat alle 10 %:iin. Kaikista todennäköisin ajankohta yli 0.5 mm sateille on syyskuussa klo 16–20. Yli 1 mm sadesumman todennäköisyys on 2–6 %. Yli 1 mm sateet ajoittuvat läpi kesän todennäköisimmin iltapäivälle, mutta etenkin kesäkuussa myös klo 00–02 niiden esiintymistodennäköisyys on suhteellisen suuri. Elokuussa 1 mm sateita esiintyy melko paljon myös klo 04–06 ja syyskuussa klo 06–08. Kun raja-arvona käytettiin 3 mm, saatiin aineistosta eroteltua suurimmat sademäärät. Suurien sademäärien todennäköisyys on pienimmillään toukokuussa, ja se kasvaa elokuuhun asti, kunnes syyskuussa todennäköisyys jälleen laskee. Kuvasta 6.14 d) erottuu selvästi elokuun kolme maksimia: klo 00–02, 06–08 ja 16–18, joista iltapäivämaksimi on voimakkain. Heinäkuussa runsaita sateita esiintyy todennäköisimmin klo 12–14 ja 20–22.

Yhteenvetona kuvasta 6.14 voidaan todeta, että toukokuussa sateen todennäköisyys on kaikilla sadesumman raja-arvoilla kesäkuukausista pienin. Kesäkuussa sade on todennäköisintä aamulla ja myöhään iltapäivällä. Kesäkuun runsaimmat sateet esiintyvät todennäköisimmin iltapäivällä. Kesäkuussa sade kaikilla raja-arvoilla on epätodennäköisintä klo 08–12. Heinäkuussa sade on kesäkuun lailla todennäköisintä aamulla ja myöhään iltapäivällä, runsaimmat sateet esiintyvät todennäköisimmin klo 12–14 ja 20–22. Elokuussa runsaat sateet ovat todennäköisempiä kuin muina kesäkuukausina ja runsailla sateilla on

kolme selvää maksimia. Pienemmillä raja-arvoilla maksimit eivät erotu yhtä hyvin. Syyskuussa runsaat sateet ovat harvinaisempia kuin elokuussa, mutta syyskuussa etenkin yli 0.5–3 mm sadesummat ovat muita kesäkuukausia yleisempiä.



Kuva 6.14 Sateen todennäköisyyden vuorokausivaihtelu eri kesäkuukausina. Asteikon arvo ilmaisee todennäköisyyden, että kahden tunnin sadesumma on vähintään raja-arvon verran. a)-kuvassa sadesumman raja-arvona on käytetty 0 mm, b)-kuvassa 0.5 mm, c)-kuvassa 1 mm ja d)-kuvassa 3 mm (huomaa kuvien eri asteikot).

6.5 Sateen intensiteetti

6.5.1 Keskimääräinen intensiteetti

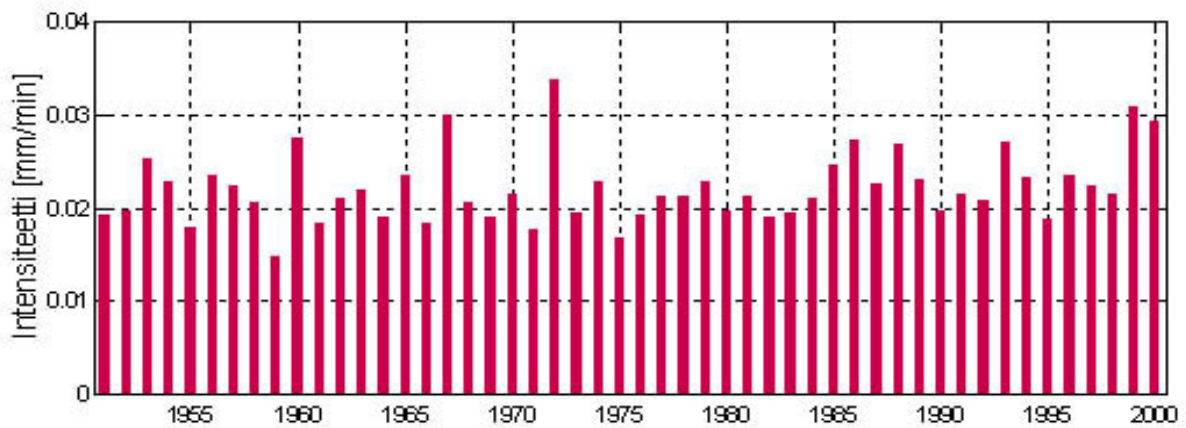
Sateen intensiteettiä tutkittiin Kaisaniemen aineistosta laskemalla eri kuukausille ja vuosikymmenille keskimääräiset sateen intensiteetit. Sateettomat jaksot jätettiin tarkastelun ulkopuolelle, joten ne eivät vaikuta keskimääräiseen intensiteettiin. Sateen intensiteetin tarkastelu ei ole sidottu sadetapahtuman käsitteeseen, vaan sateita tarkastellaan kokonaisuutena. Kuvassa 6.15 on esitetty keskimääräisen sateen intensiteetin vaihtelu eri kesäkuukausina ja vuosikymmeninä, ja kuvasta tulevat selvästi esille heinä- ja elokuun rankimmat sateet. Etenkin heinäkuussa myös vuosikymmentenvälinen vaihtelu on suurta. Ei ole yllättävää, että sateen intensiteetti on pienin toukokuussa, koska silloin ei esiinny paljon konvektiivisia sateita. Kesäkuussa ja syyskuussa keskimääräinen intensiteetti on suunnilleen yhtä suuri. Keskimäärin rankimpia sateita esiintyi 90-luvun heinäkuussa. Tulokset ovat lähellä Rantakransin (1967) tulokseksi saamia intensiteettejä, jotka esitettiin taulukossa 2.2.



Kuva 6.15 Keskimääräisen sateen intensiteetin vaihtelu eri kesäkuukausina ja vuosikymmeninä. Punainen viiva kuvaa kuukausikeskiarvoa, turkoosilla viivalla on esitetty kaikkien kesäkuukausien keskiarvo 50 vuoden ajalta.

Sateen intensiteetin vuosittaista vaihtelua tutkimalla haluttiin selvittää tarkemmin, onko keskimääräisessä intensiteetissä tapahtunut muutoksia vuosien 50 vuoden aikana. Kuvassa 6.16 on esillä kaikkien kesien keskimääräiset intensiteetit 50 vuoden ajalta. Keskimääräinen intensiteetti vaihtelee vuosittain satunnaisesti. Jälkimmäisen 25 vuoden aikana vuosien välinen vaihtelu on alkupuoliskoa hieman vähäisempää. Aikasarjan trendi on hieman nouseva, mutta t-testin mukaan ei kuitenkaan merkitsevästi nouseva merkitsevyydellä.

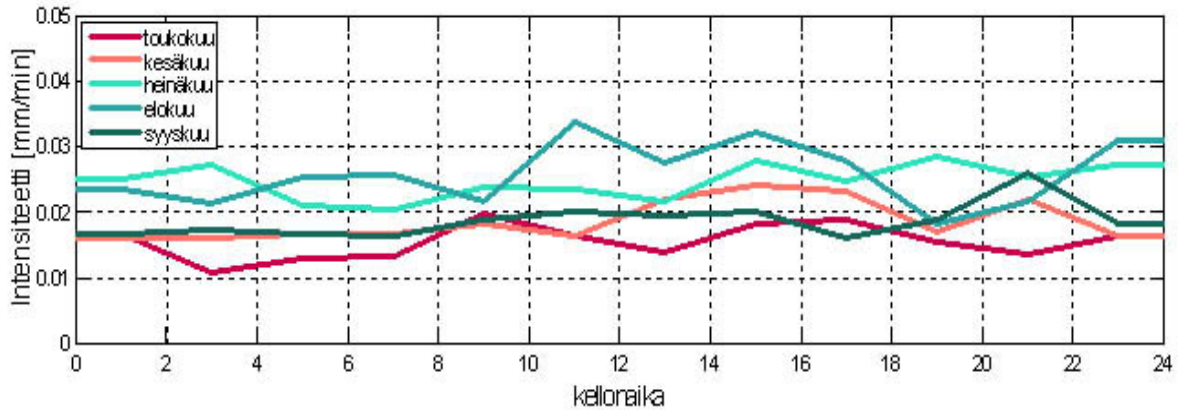
0.05. Myöskään hajonta ei ole jälkimmäisen 25 vuoden aikana tilastollisesti merkittävästi vähäisempää.



Kuva 6.16 Koko kesän keskimääräisen sateen intensiteetin vaihtelu vuosittain.

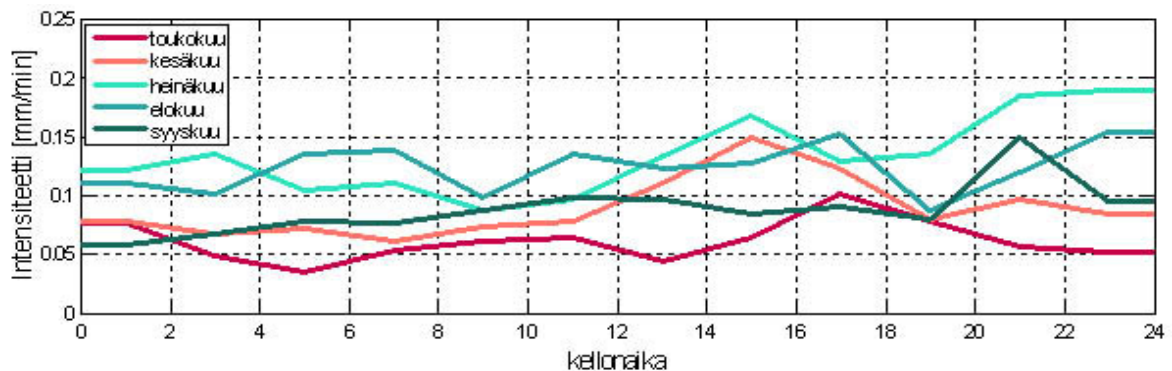
6.5.2 Vuorokausivaihtelu

Sateen keskimääräisen intensiteetin vuorokausivaihtelua tutkittiin kahden tunnin jaksoissa. Kaikista kahden tunnin aikana esiintyneistä sateista laskettiin keskimääräinen intensiteetti. Tulokset näkyvät kuvassa 6.17. Suurimman osan vuorokaudesta intensiteetti on suurin elokuussa. Etenkin klo 10 ja 18 välillä ovat elokuun sateet selvästi muiden kesäkuukausien sateita rankempia. Klo 02–04, 08–10 ja 18–20 sade on rankinta heinäkuussa, ja klo 20–22 sade on rankinta syyskuussa. Syyskuun sateiden vuorokauden keskimääräinen intensiteetti on suhteellisen pieni, kuten kuvasta 6.15 tuli ilmi, mutta konvektiivisten sateiden vähyys muina kuukausina klo 20–22 on todennäköinen syy siihen, että syyskuu nousee maksimiksi. Kesä-, heinä- ja elokuussa erottuu heikko iltapäivämaksimi. Touko- ja syyskuussa iltapäivämaksimia ei havaita. Sadesummalla on kuvan 6.13 mukaan elokuussa selvä maksimi aamulla klo 04-08, intensiteeteissa ei havaita samaan aikaan maksimia. Kuvasta 6.14, että sade on todennäköisintä aamulla klo 06-08, joten elokuun aamun suuri sadesumma kertyy useasti esiintyvistä intensiteetiltään kohtalaisista sateista.



Kuva 6.17 Sateen keskimääräisen intensiteetin vuorokausivaihtelu eri kesäkuukausina. Vaaka-akselilla on kellonaika, pystyakselilla on keskimääräinen sateen intensiteetti kahden tunnin ajalta.

Keskimääräisen intensiteetin lisäksi tutkittiin myös maksimi-intensiteetin vuorokautista vaihtelua Kaisaniemessä. Aineistoa käsiteltiin kahden tunnin jaksoissa, ja jokaiselta havaintopäivältä otettiin kyseisen kahden tunnin jakson maksimi-intensiteetti, mikäli aikavälillä satoi. Päivittäisille maksimi-intensiteeteille laskettiin keskiarvot. Tulokset näkyvät kuvassa 6.18. Myös maksimi-intensiteetti saavuttaa suurimmat arvonsa yleisimmin iltapäivällä. Toukokuussa myös maksimi-intensiteetin vuorokausivaihtelu on pientä. Kesäkuussa maksimi-intensiteetin iltapäivämaksimi on selvempi kuin keskimääräisen intensiteetin maksimi. Heinä-, elo- ja syyskuun maksimi-intensiteetin käyrät ovat pääpiirteiltään samanmuotoisia keskimääräisen intensiteetin käyrien kanssa, mutta maksimi-intensiteetin vuorokausivaihtelu on suurempaa.



Kuva 6.18 Sateen maksimi-intensiteetin vuorokausivaihtelu eri kesäkuukausina. Vaaka-akselilla on kellonaika, pystyakselilla on keskimääräinen sateen maksimi-intensiteetti kahden tunnin ajalta.

Luvussa 6.4.3 käsiteltiin sadesummien todennäköisyyksien tutkimista asettamalla raja-arvoja sadesummille. Samaan tapaan tutkittiin myös sateen intensiteettien todennäköisyyksiä. Aineistosta selvitettiin kahden tunnin jaksojen sateen keskimääräinen intensiteetti eri vuorokauden aikoina. Sateen keskimääräisen intensiteetin raja-arvoiksi asetettiin 0.01 mm/min ja 0.08 mm/min. Noin 55 % jaksojen aikana esiintyneistä sateista ylitti alemman raja-arvon, mutta ylempi raja-arvo karsi mukaan vain intensiteetiltään suurimmat sateet, noin 5 % kaikista sateista. Esiintymistodennäköisyydet selvitettiin laskemalla, kuinka suuressa osassa aineistoa raja-arvo ylittyi. Intensiteetin todennäköisyyksistä saadaan selville, milloin sateet ovat keskimäärin rankkoja, vaikka niiden lyhytkestoisuuden vuoksi kertyvä sadesumma ei aina ole suuri. Näin ollen sadesumman ja intensiteetin todennäköisyyksien vuorokausivaihtelu voivat olla hyvin erilaisia. Sadesumman todennäköisyyksiä tutkittiin kuukausitasolla, mutta intensiteetin vuorokausivaihtelua haluttiin tutkia paremmalla ajallisella erotuskyvyllä, joten kuukaudet jaettiin kolmeen osaan taulukon 6.6 mukaisesti. Päivätasolla tarkastelu ei olisi järkevää, mutta kuukausien jakaminen kolmeen osaan takaa vielä tuloksia, joista ilmastollisia piirteitä voidaan tarkastella.

Kuvassa 6.19 on esitetty todennäköisyyksiä tapauksille, joissa kahden tunnin aikana sateen keskimääräinen intensiteetti on vähintään 0.01 mm/min. Kuvasta erottuvat tumman punaisella ajanjaksot, jolloin rajan ylittävä sade on kaikista todennäköisintä. Nuo ajanjaksot esiintyvät pääasiassa elokuussa ja syyskuussa iltapäivällä, mutta selvänä poikkeuksena on kesäkuun lopun iltapäivämaksimi. Mielenkiintoinen tulos on myös se, että aamuyöllä todennäköisimmät raja-arvon ylitykset esiintyvät heinä-, elo- ja syyskuun viimeisellä kolmanneksella, mutta kuun kahtena ensimmäisenä kolmanneksena raja-arvon ylityksen todennäköisyys on aamuyöllä melko pieni. Mikään meteorologinen ilmiö ei selitä sitä. Heinäkuu III erottaa kesä-heinäkuun ja loppukesän iltapäivämaksimit toisistaan, koska silloin iltapäivämaksimi puuttuu kokonaan ja maksimi on myöhään illalla. Juuri heinäkuussa iltapäiväkuurojen pitäisi olla todennäköisiä, joten heinäkuu III:n tulos on ristiriitainen heinäkuun yleisen tilanteen kanssa.

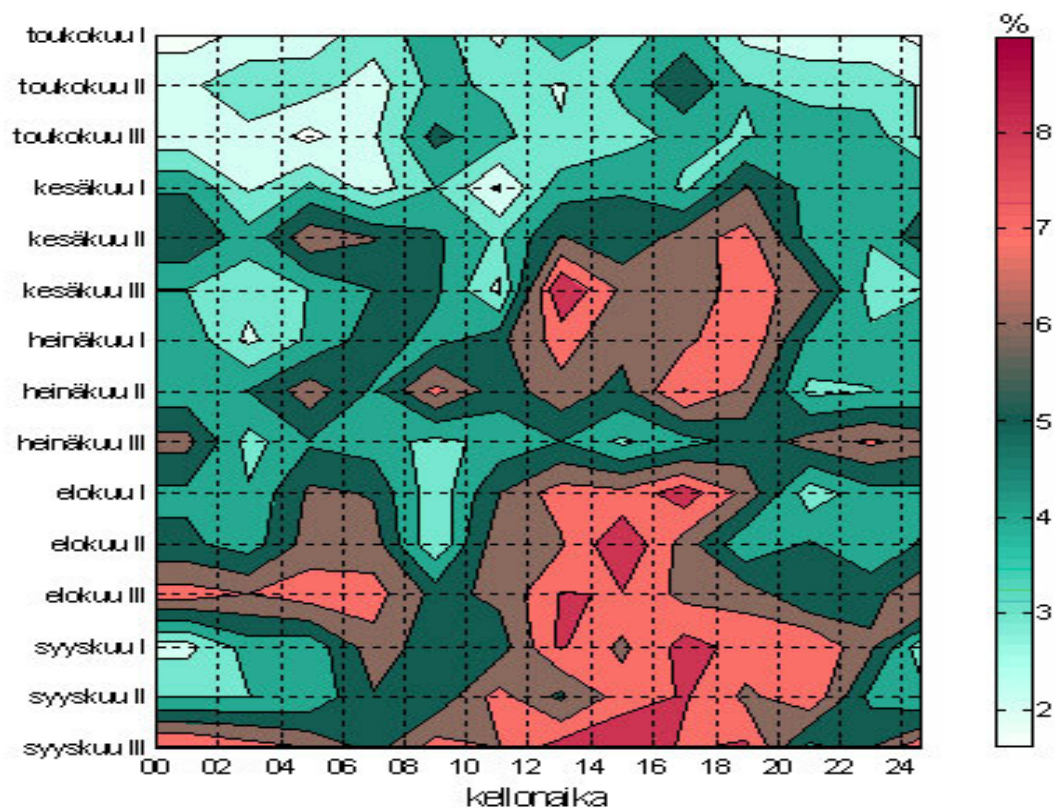
Kuvassa 6.20 on esillä todennäköisyydet intensiteeteille, kun sateen keskimääräisen intensiteetin raja-arvona on käytetty 0.08 mm/min. Kuvaan 6.19 verrattuna kuvassa 6.20 erottuu laajahko valkea alue, jolloin todennäköisyys on lähellä nollaa. Siitä ei kuitenkaan voida vetää johtopäätöstä, että yleisesti 0.08 mm/min ylittäviä keskimääräisiä intensiteettejä

ei esimerkiksi toukokuussa voi esiintyä lainkaan. Tuloksesta sen sijaan voidaan päätellä, että 50 vuoden mittaisella tutkimusjaksolla rankat sateet olivat toukokuussa hyvin harvinaisia. Kuvasta 6.20 erottuu kolme selvää maksimia, joista voimakkain on elokuussa klo 12–16. Kaksi muuta ovat heinä-elokuun vaihteessa klo 12–16 ja heinäkuun puolessavälissä klo 8–10. Kaikki yli 1 %:n todennäköisyydet rajautuvat kesäkuun lopun ja elokuun lopun välille. Edellä mainittiin, että yli 0.01 mm/min intensiteettien todennäköisyys oli suhteellisen pieni heinäkuun lopulla. Myös 0.08 mm/min raja-arvolla havaitaan suhteellisen pieniä todennäköisyyksiä heinäkuun lopulla, ja vastaavasti todennäköisimmin raja-arvo ylittyy klo 22–24. Kuukauden sisäiset erot ovat rankoilla sateilla myös suuria. Esimerkiksi heinäkuun puolessa välissä havaitaan kello 8–10 suhteellisesti todennäköisimmin rankkoja sateita, mutta heinäkuun lopulla rankat sateet samaan kellon aikaan ovat harvinaisia.

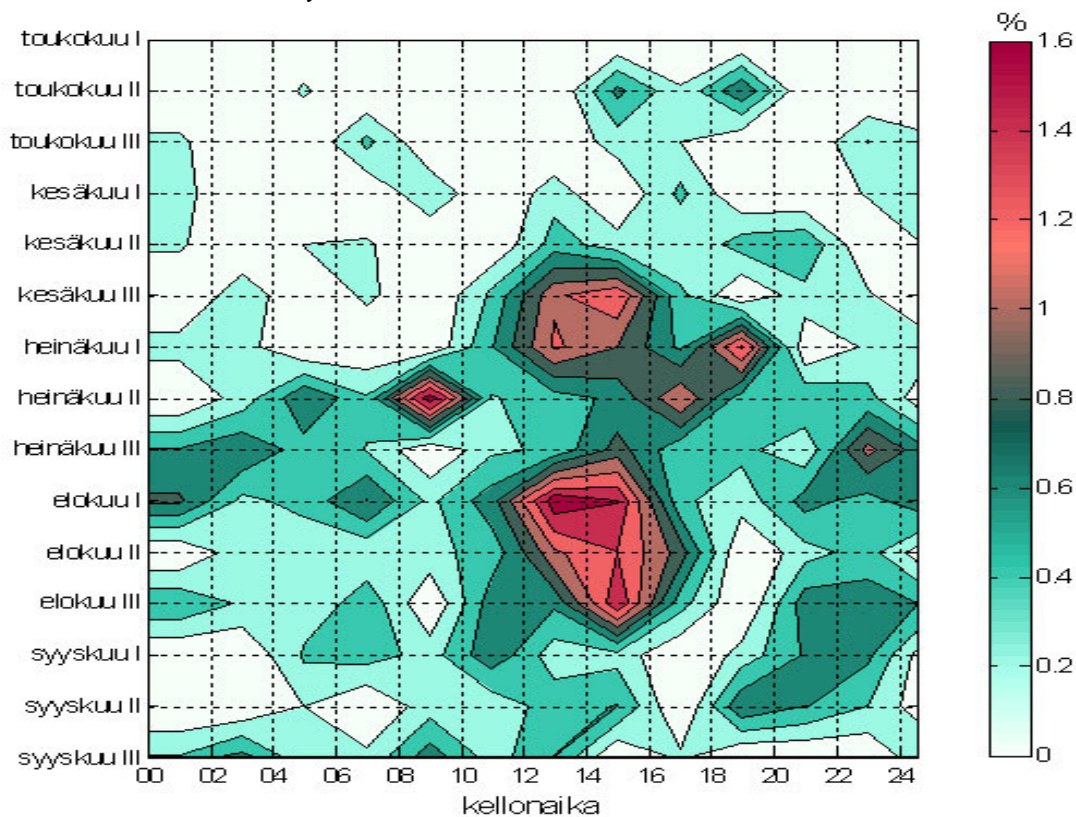
Voidaan vetää johtopäätös, että sateen intensiteetin todennäköisyydet eivät jakaudu tasaisesti alle kuukauden mittaisilla jaksoilla, ja todennäköisyyksissä voi esiintyä suuriakin ajallisia vaihteluita. Kuukausiarvot antavat yleiskuvan tilanteesta, mutta niiden avulla ei saa kunnollista tietoa ajallisesta hienorakenteesta. Kuukauden jakaminen kolmeen osaan tuo lisäinformaatiota sateen intensiteetin todennäköisyyksistä, mutta luotettavan yleiskuvan saamiseksi olisi hyvä analysoida aineistoa vieläkin pidemmältä tutkimusjaksolta, jotta välttyttäisiin aineiston hälyltä.

Taulukko 6.6 Kesäkauden jaottelu jaksoihin kuvissa 6.19–6.20.

jaksot	pvm	jaksot	pvm	jaksot	pvm	jaksot	pvm	jaksot	pvm
toukokuu I	1.-10.5.	kesäkuu I	1.-10.6.	heinäkuu I	1.-10.7.	elokuu I	1.-10.8.	syyskuu I	1.-10.9.
toukokuu II	11.-20.5.	kesäkuu II	11.-20.6.	heinäkuu II	11.-20.7.	elokuu II	11.-20.8.	syyskuu II	11.-20.9.
toukokuu III	21.-31.5.	kesäkuu III	21.-30.6.	heinäkuu III	21.-31.7.	elokuu III	21.-31.8.	syyskuu III	21.-30.9.



Kuva 6.19 Sateen intensiteetin todennäköisyyden vuorokausivaihtelu. Väriasteikko osoittaa todennäköisyyden, että kahden tunnin keskimääräinen intensiteetti ylittää raja-arvon 0.01 mm/min. Sateeton aika ei sisälly intensiteetteihin.

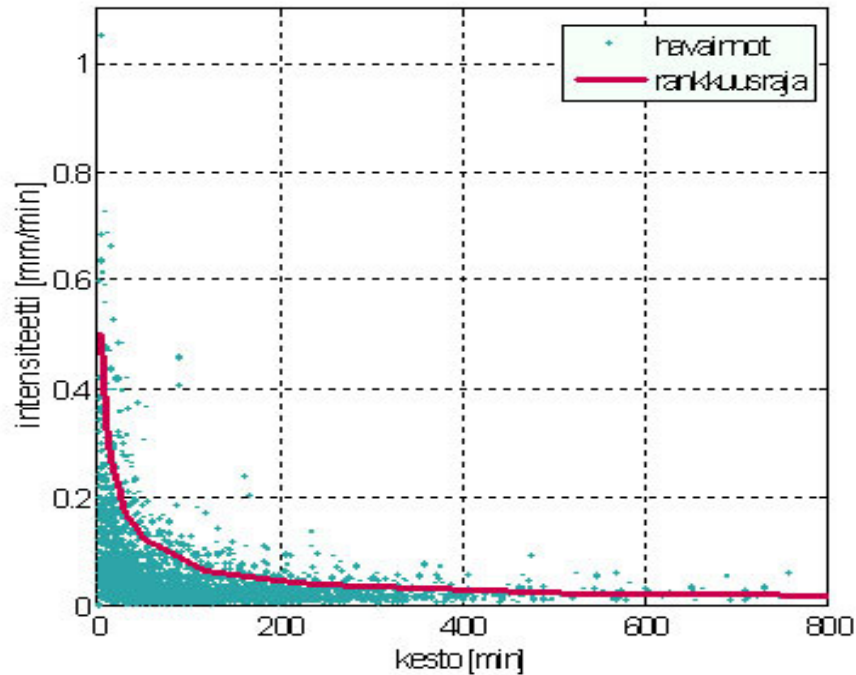


Kuva 6.20 Intensiteetiltään rankkojen sateiden todennäköisyyden vuorokausivaihtelu. Väriasteikko osoittaa todennäköisyyden, että kahden tunnin keskimääräinen intensiteetti ylittää raja-arvon 0.08 mm/min. Sateeton aika ei sisälly intensiteetteihin.

6.5.3 Rankkojen sateiden määrä

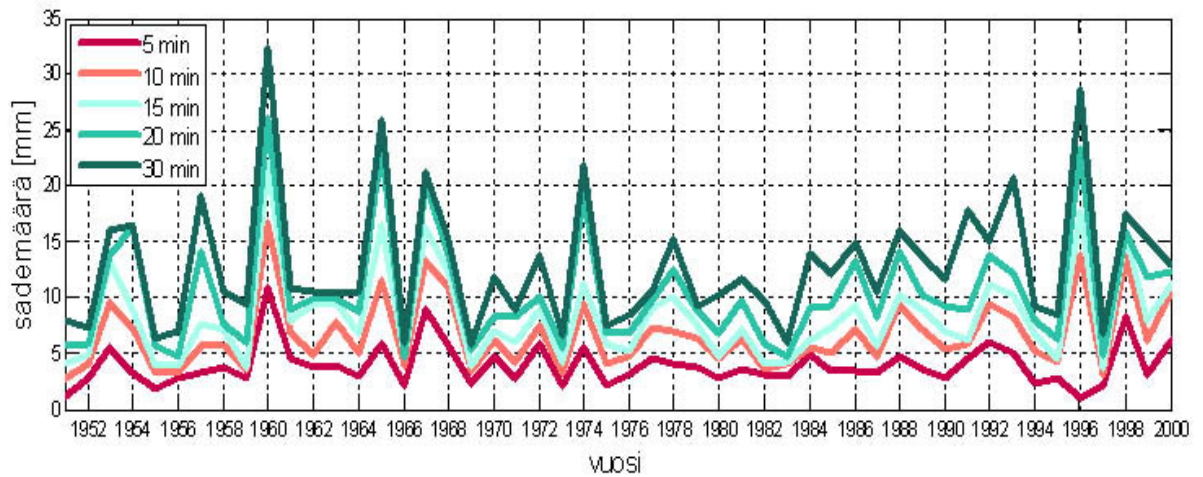
Etenkin kaupunkihydrologian näkökulmasta rankat sateet ovat kaikista mielenkiintoisimpia, koska ne voivat aiheuttaa monenlaisia ongelmia, jos niihin ei ole osattu varautua. Helsingin Kaisaniemessä runsainten sateiden yhteydessä esiintyy silloin tällöin kaupunkitulvia. Ongelmallista on, että rankkojen sateiden tutkimiseen piirtävän sademittarin aineistosta liittyy tavallista suurempi epätarkkuus. Mittalaite on usein liian hidas ja epätarkka, kun vettä tulee lyhyessä ajassa paljon. Piirtävän sademittarin aineistosta on mahdollista kuitenkin arvioida rankkojen sateiden ominaisuuksia, mutta tuloksia tulkittaessa on niiden suurehko epätarkkuus pidettävä mielessä.

Kun sadantaa tarkastellaan sadetapahtumina, voidaan jokaiselle sadetapahtumalle laskea keskimääräinen intensiteetti. Sadetapahtumien keskimääräiset intensiteetit on esitetty kuvassa 6.21 sadetapahtuman keston mukaan jaoteltuina. Lyhyillä kestoilla havaitaan selvästi suurempia keskimääräisiä sateen intensiteettejä kuin pitkillä. Mittausvirheen osuus on suurempi rankoilla lyhytkestoisilla sadetapahtumilla kuin muillasadetapahtumilla. Yli 0.2 mm/min keskimääräisiä intensiteettejä esiintyy vain harvoin yli tunnin mittaisissa sadetapahtumissa. Luvussa 2.5 esiteltiin määritelmiä rankoille sateille. Tässä tutkimuksessa sovellettiin taulukossa 2.1 esitettyä Rantakransin määritelmää sateen rankkuudelle, ja määritelmän raja-arvot esitettiin taulukossa 2.1. Määritelmään pohjautuva raja-arvojakauma rankkuudelle on myös liitetty kuvaan 6.21. Sadetapahtumista 334 kappaletta, eli noin 3 %, ylittää keskimääräisellä intensiteetillään rankkuusrajan. Vuosittain rankkoja sadetapahtumia esiintyi 0–18 kertaa, keskimäärin 7 kertaa vuodessa. Lähes 60 % rankoista sadetapahtumista ajoittui heinä-elokuulle. On syytä korostaa, että tässä yhteydessä tarkasteltiin sadetapahtumia kokonaisuutena, eikä sadetapahtuman sisäisiä intensiteetin arvoja otettu huomioon. Monissa tapauksissa sadetapahtuman aikana voi sataa lyhyen aikaa rankasti, mutta kokonaisuudessaan sadetapahtuma ei ole rankka. Rantakransin (1967) määritelmä soveltuu rajaamaan Helsingin Kaisaniemen sadetapahtumissa sopivan määrän rankaksi, mutta jos intensiteettejä tarkastellaan sadetapahtumista riippumattomina, määritelmä asettaa rankkuusrajan liian alhaalle.



Kuva 6.21 Sadetapahtumien keskimääräinen intensiteetti. Punainen viiva kuvaa Rantakransin (1967) määritelmän mukaan sovitettua raja-arvokäyrää rankoille sateille.

Jokaisen 50 havaintovuoden rankimmat sateet koottiin aikasarjaksi. Kuvan 6.22 aikasarjassa on esitetty vuoden suurin 5–60 minuutin aikana kertynyt sadesumma. Kuvasta nähdään, että 5 minuutin sadesumma korreloi todella hyvin 60 minuutin sadesumman kanssa. Vuosittaisten maksimien arvot eivät ole muuttuneet merkittävästi 50 vuoden aikana, joten ei voida vetää johtopäätöksiä, että rankat sateet olisivat voimistuneet tai heikentyneet vuosisadan loppua kohti. Vuosittainen vaihtelu on koko jaksolla suurta, mutta 70-luvun puoliväistä 90-luvun puoliväliin asti se oli hieman vähäisempää kuin muulloin. Suurin sadesumma mitattiin kaikilla viidellä kuvan 6.22 esittämällä kestolla vuonna 1960, jolloin 5 minuutissa satoi 10.7 mm, 10 minuutissa 16.7 mm, 15 minuutissa 22 mm, 30 minuutissa 26.0 mm ja 60 minuutissa 32.3 mm. Sadesummat ovat pienempiä kuin luvussa 2.5 mainituissa Tukholman ennätysateissa.



Kuva 6.22 5–60 minuutin aikana kertyneen sademäärän maksimi-arvot vuosina 1951–2000.

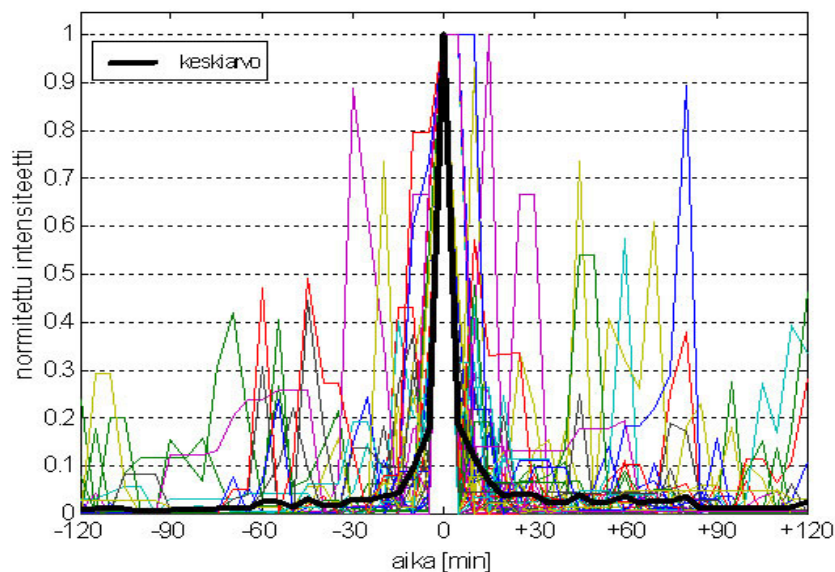
6.5.4 Rankkojen sateiden ajallinen muoto

Pistemittauksessa sateen ajallinen muoto on jakautunut satunnaisesti johtuen sadannan satunnaisesta luonteesta ja sadealueen satunnaisesta liikkumisesta mittauspisteen yli. Sateen ajallista muotoa ei ole Suomessa aiemmin tutkittu, ja myös ulkomaisia tutkimuksia on hyvin vähän. Kaisaniemen aineistosta haluttiin selvittää, onko sateiden muodossa yhteneväisyyksiä. Koska kaikkien sadetapahtumien vertailu on vaikeaa sateen satunnaisen ajallisen muodon vuoksi, valittiin ajallisen muodon tutkimukseen mukaan vain rankimpia tapauksia. Tutkittaviksi sateiksi valittiin sateet, joissa 5 minuutin intensiteetti ylitti 0.6 mm/min. Mukaan karsiutui 56 hetkellisesti rankinta tapausta 50 vuoden ajalta. Rankat sateet keskitettiin rankimman kohdan mukaan, ja ajalle asetettiin raja-arvoiksi kaksi tuntia intensiteetin huippukohdan ennen ja jälkeen. Sateet normitettiin siten, että suurin intensiteetti vastaa arvoa 1.

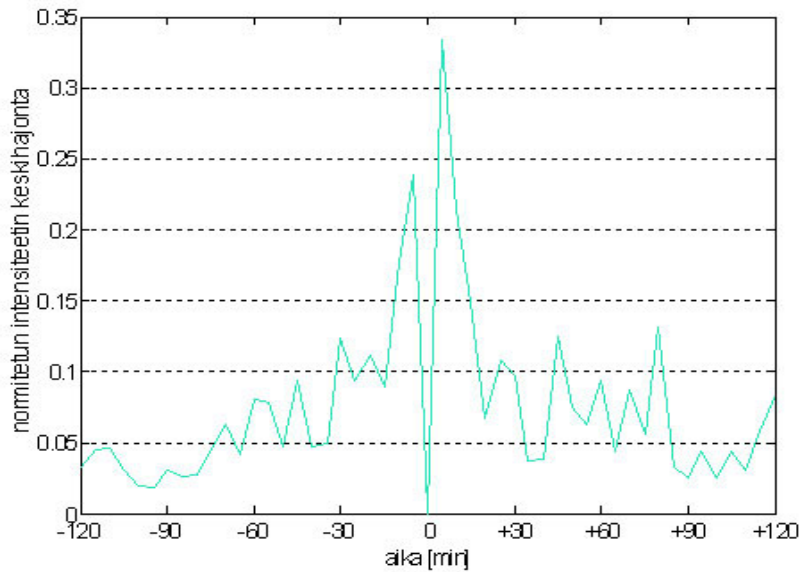
Kuvassa 6.23 on esitetty 56 rankimman tapauksen sateen ajallinen jakauma. Yksittäiset jakaumat eroavat toisistaan paljon. Muutamissa tapauksissa sateen intensiteetillä on monta lähes yhtä voimakasta maksimia. Useammin muut maksimit esiintyvät 5–30 minuuttia päämaksimin jälkeen. Muutamassa tapauksessa jo ennen päämaksimia esiintyi intensiteetiltään voimakkaita sateita. Melko yleisesti päämaksimia edeltää ja seuraa jakso, jossa intensiteetit ovat vain murto-osan päämaksimin intensiteetistä. Kuvaan 6.23 on mustalla piirretty 56 tapauksesta laskettu keskiarvokäyrä rankan sateen muodolle. Keskiarvon perusteella noin 30 minuuttia ennen päämaksimia sateen intensiteetti alkaa kasvaa. Aluksi kasvu on hidasta, mutta 15 minuuttia ennen huippua se nopeutuu. Intensiteettimaksimin jälkeen sateen intensiteetti pienenee heti nopeasti, ja sen jälkeen

pieneneminen hidastuu ja jatkuu tasaisena 20 minuuttia päämaksimin jälkeen. Päämaksimin jälkeen sateen intensiteetti on keskimäärin hieman korkeampi kuin ennen päämaksimia. Rankan sateen keskimääräinen muoto ei ole täysin symmetrinen päämaksimin suhteen. Kuvan 6.23 yleistetty muoto rankalle sateelle on täysin teoreettinen, eikä sillä voida ennustaa yksittäisten rankkojen sateiden ajallista muotoa.

Kuvassa 6.24 on esitetty kuvan 6.23 tapausten välinen keskihajonta. Keskihajonta on normitetuille arvoille nolla päämaksimin kohdalla. Keskihajonta on suurempi heti päämaksimin jälkeen kuin juuri ennen päämaksimia. Päämaksimin jälkeen esiintyy siis useammin melko rankkoja sateita kuin ennen päämaksimia. 40–60 minuuttia päämaksimin jälkeen hajonta on jonkin verran suurempaa kuin 40–60 minuuttia ennen päämaksimia. Myös keskihajonnan suuruus on merkki siitä, että luonnossa yksittäiset rankat sateet eivät käyttäydy kuvan 6.23 keskiarvokäyrän mukaisesti. Rankalle sateelle muodostettua muotoa voidaan pitää karkeana mallina sateen muodosta. Jos tutkimusta olisi laajennettu kaikkiin sateisiin, olisi sateen muodolle ollut vieläkin vaikeampi ollut saada yleistettyä muotoa. Sateen muoto vaihtelee satunnaisesti sadetyypistä, sateen liikkeestä ja muista tekijöistä riippuen. Sateen muodon laajemmassa tutkimuksessa olisi tarpeen lajitella sateet aliluokkiin, koska muuten keskihajonta kasvaa hyvin suureksi ja ajallinen muoto ei tule hyvin esiin. Sateen vaihteleva kesto asettaa myös haasteen sateen muodon järkevälle vertailulle ja yleistämiselle.



Kuva 6.23 56 hetkellisesti rankimman sateen normeerattu ajallinen muoto. Vaaka-akselilla on aika, ja sen nollakohta on suurimman hetkellisen intensiteetin kohdalla. Pystyakselilla on maksimiarvoon 1 normeerattu intensiteetti. Musta viiva kuvaa kaikkien tapausten keskiarvoa.



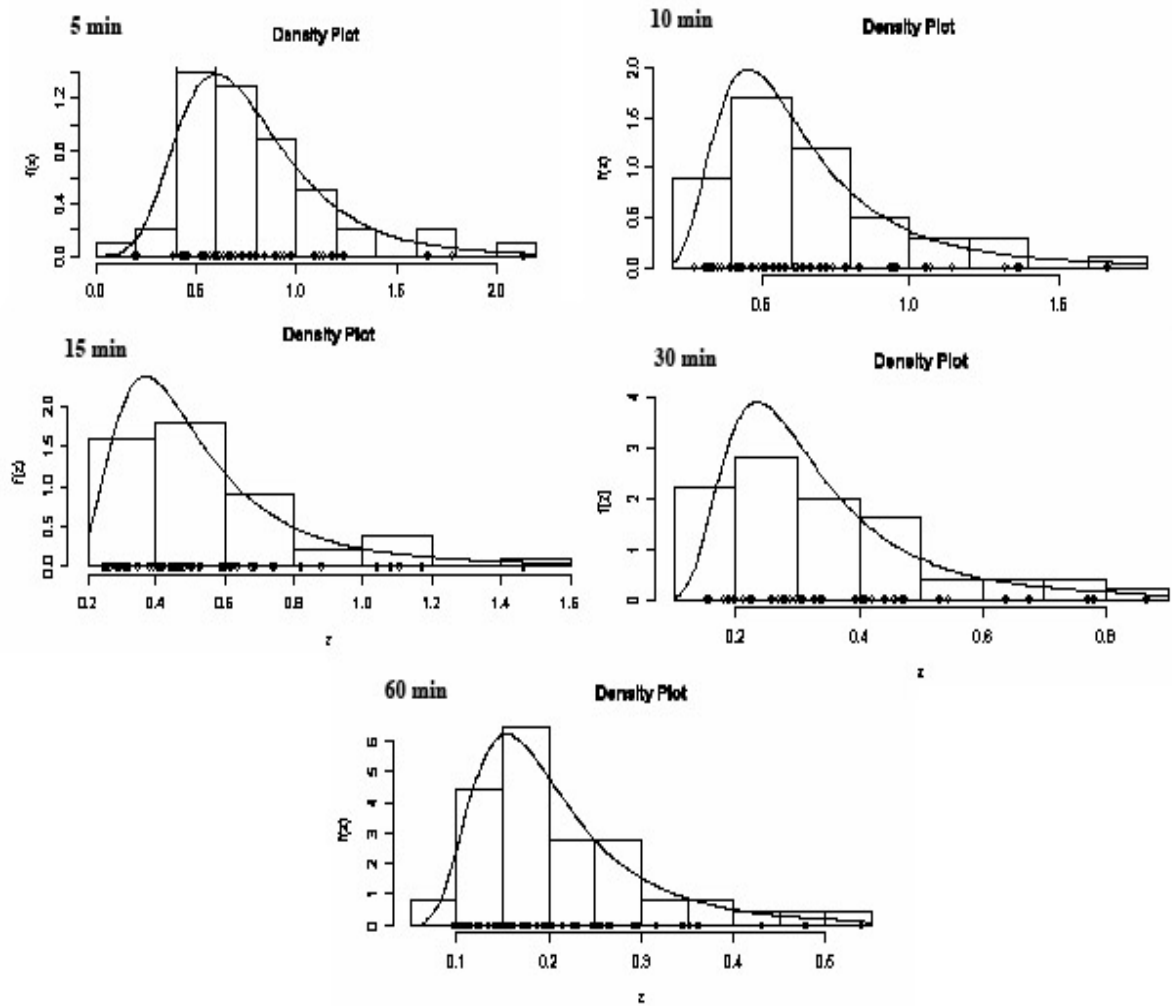
Kuva 6.24 56 hetkellisesti rankimman sateen normeeratun ajallisen muodon keskihajonta. Vaaka-akselilla on aika, ja sen nollakohta on suurimman hetkellisen intensiteetin kohdalla.

6.5.5 Toistumisajat

Toistumisaikojen teoriaa esiteltiin luvussa 2.6.2. Aikaisemmissa tutkimuksissa (esim. Ruso, 1969 ja Kuusisto, 1980) on sateen intensiteetille laskettu toistumisaikoja, mutta aiemmat laskelmat perustuvat lyhyemmän jakson aineistoon kuin tässä tutkimuksessa. Helsingin Kaisaniemen 50 vuoden aineistosta laskettiin toistumisajat jaksomaksimimenetelmällä. Aineistosta poimittiin vuosittaiset intensiteetin 5, 10, 15, 30 ja 60 minuutin maksimit, joten kullekin intensiteetille saatiin 50 jakauman arvoa. Menetelmää sovellettiin vuosittaisiin maksimeihin, koska silloin ääriarvojakaumasta tulee riippumaton ja yhtäläisesti jakautunut eikä kuukausittaisia vaihteluita tarvitse ottaa huomioon. Ääriarvoihin sovitettiin kaavan 2.7 mukaiset ääriarvojakaumat Extremes Toolkit –ohjelmalla, joka määrittää ääriarvojakauman parametrit suurimman todennäköisyyden menetelmällä. Jakauman tyyppi määräytyy aineiston ääriarvojen perusteella, eikä jakauman subjektiivinen valinta Extremes Toolkit –ohjelmassa ole mahdollista. Toistumisajat saatiin suoraan ääriarvojakauman fraktiileista kaavan 2.8 mukaisesti. Jaksomaksimimenetelmän heikkoutena on, että se hyödyntää vain hyvin pienen osan käytettävissä olevasta Kaisaniemen aineistosta, eli vain yhden arvon joka vuodelta. 5 minuutin intensiteeteille sovellettiin vaihtoehtoisesti myös luvussa 2.6.2 mainittua POT-menetelmää, jossa hyödynnetään koko aineistoa. POT-menetelmässä intensiteetin liukuvien arvojen käyttö on kyseenalaista, koska arvojen välillä on selvä riippuvuus. POT-menetelmällä saadut tulokset eivät olleet fysikaalisesti järkeviä, koska

aineisto ei ole täysin riippumaton ja yhtäläisesti jakautunut. Jaksomaksimimenetelmä todettiin siten aineistoon sopivammaksi.

Kuvassa 6.25 on yleistetyn ääriarvojakauman todennäköisyystiheysfunktiot 5–60 minuutin intensiteeteille. Kuvan käyrät näyttävän noudattavan melko hyvin histogrammien muotoja. Käyrän sopivuus histogrammiin on huonoin 15 ja 30 minuutin intensiteeteillä. 5 minuutin jakaumassa on selvästi lyhin oikealle suuntautuva häntä. Muissa jakaumissa häntä on melko pitkä, mikä viittaa siihen, että ääriarvojakaumat ovat Fréchet-tyyppisiä. Muodostettujen ääriarvojakaumien kaavaan 2.7 liittyvät parametrit on esitetty taulukossa 6.7. Sijaintiparametri μ pienenee loogisesti, kun intensiteettien aika pitenee ja intensiteettien arvot pienenevät. Myös skaalaparametri σ pienenee pidemmän ajan intensiteettejä kohti. Muotoparametri ξ on kaikilla viidellä jakaumalla positiivinen eli jakaumat ovat Fréchet-tyyppisiä. 5 minuutin intensiteetillä muotoparametrin arvo on kuitenkin vain heikosti positiivinen, joten jakauma on lähellä Gumbel-tyyppiä. 5 minuutin jakauma eroaa selvästi muista jakaumista. Koska lyhyiden ääriarvojen mittaaminen on epätarkkaa, esiintyy 5 minuutin ääriarvoissa enemmän virhettä kuin 10–60 minuutin jakaumissa. Todennäköisesti mittausten epätarkkuus aiheuttaa 5 minuutin intensiteeteille erilaisen ja hieman vääristyneen ääriarvojakauman. 5 minuutin ääriarvojakaumaa ei voida siten pitää kovin luotettavana. 10–60 minuutin intensiteettien ääriarvojakaumat ovat hyvin keskenään yhteensopivia, ja niitä voidaan pitää melko luotettavina. Jakaumia muodostettaessa myös testattiin, miten herkästi jakaumat reagoivat ääriarvojen muutoksiin. Todettiin, että jo muutaman ääriarvopisteen poistaminen muuttaa jakauman muotoparametria ja vaikuttaa sitä kautta myös toistumisaikoihin huomattavasti. Tapa, jolla ääriarvot valittiin aineistosta, on siis osaltaan vaikuttanut jakaumien muotoihin.



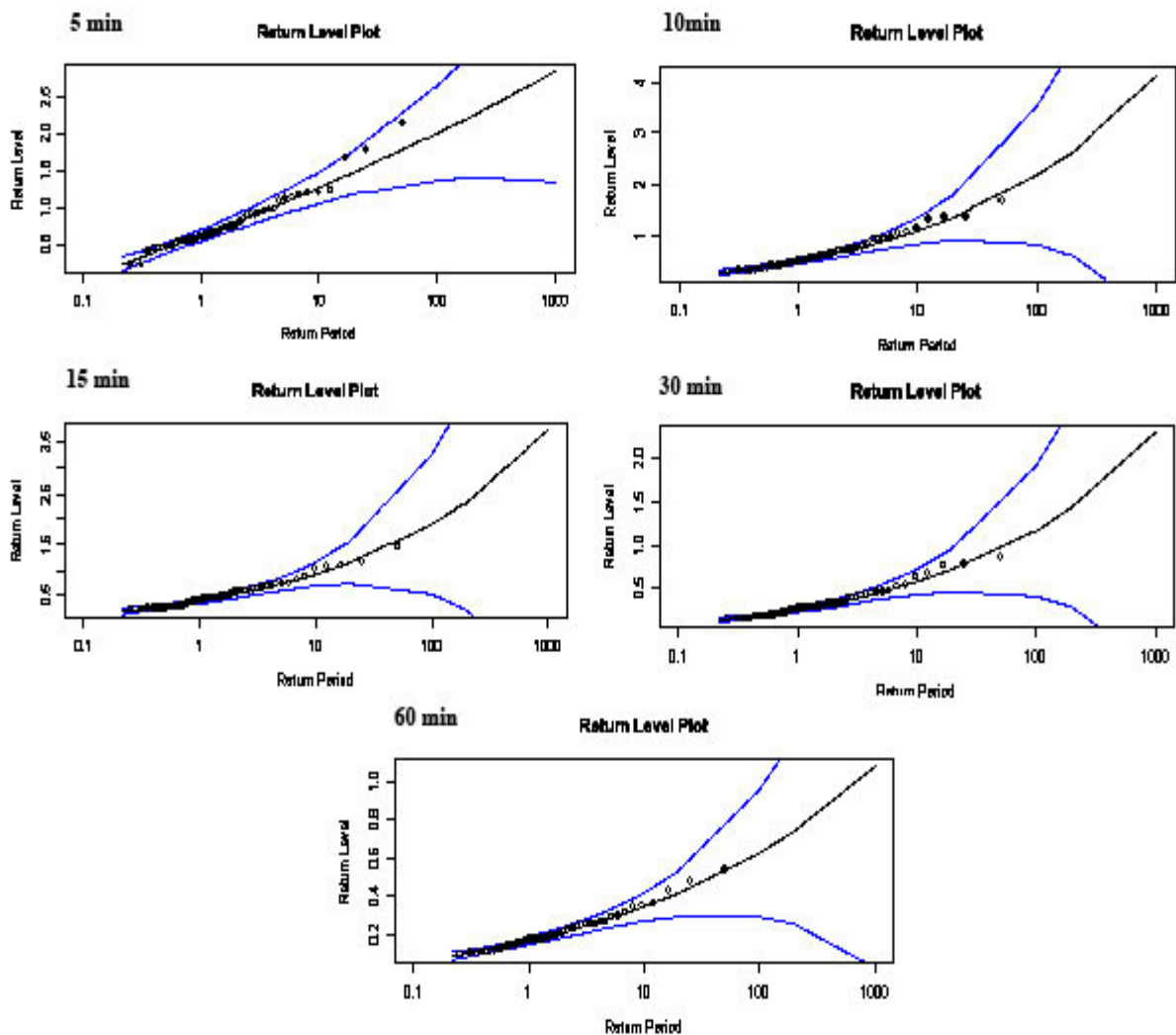
Kuva 6.25 Yleistetyin ääriarvojakauman (GEV-jakauman) todennäköisyystiheysfunktiot 5, 10, 15, 30 ja 60 minuutin intensiteeteille. Vaaka-akselilla on esitetty intensiteetit (mm/min). Pisteet kuvaavat vuosittaisia ääriarvoja. Pystyakselilla on yleistetyin ääriarvojakauman tiheys.

Taulukko 6.7 Yleisen ääriarvojakauman kaavan 2.7 parametrit 5–60 minuutin intensiteeteille.

	5 min	10 min	15 min	30 min	60 min
μ	0.615	0.497	0.406	0.257	0.165
σ	0.265	0.191	0.161	0.098	0.060
ξ	0.056	0.257	0.276	0.277	0.204

Kuvassa 6.26 on esitetty kuvan 6.25 ääriarvojakaumista muodostetut toistumisajat 5–60 minuutin intensiteeteille 95 % luottamusvälillä. 5 minuutin intensiteeteille muodostettu toistumisajan kuvaaja on lähes suora, ja se eroaa muodoltaan 10–60 minuutin intensiteettien toistumisaikojenkäyristä, jotka ovat nousevia. 5 minuutin intensiteetin kolme suurinta arvoa

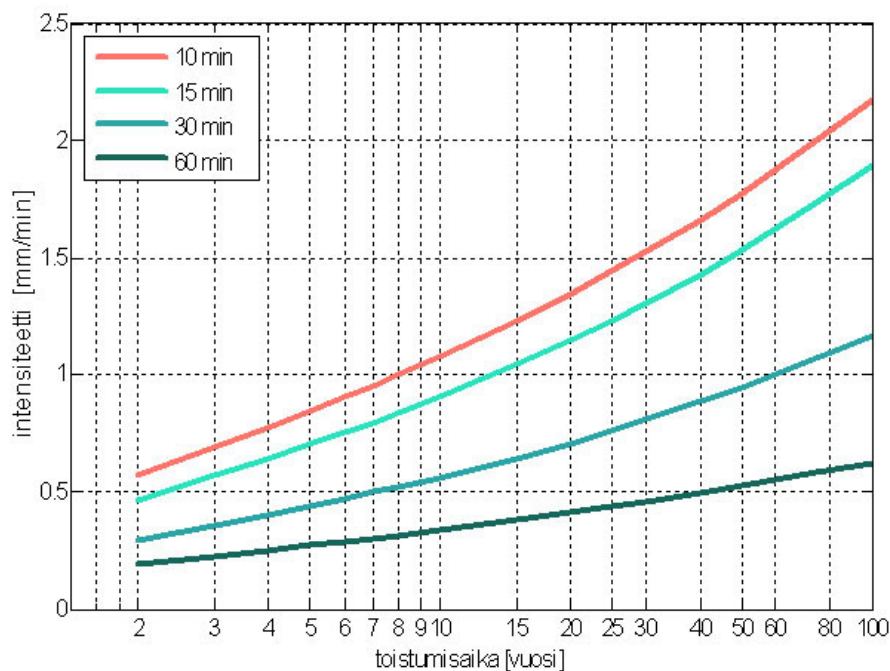
eivät näytä asettuvan hyvin toistumisajan käyrälle vaan sijoittuvat selvästi käyrän yläpuolelle. 10–60 minuutin nousevien käyrien ongelmana on, että toistumisaikojen kasvaessa intensiteetin arvot kasvavat rajatta. Todellisuudessa intensiteeteille tulee fyysikaalinen raja vastaan. Lisäksi luottamusväli kasvaa myös nopeasti toistumisajan kasvaessa. 50 vuoden toistumisajoilla luottamusväli on vielä kohtuullinen, mutta 100 vuoden toistumisajoilla luottamusväli on jo hyvin leveä.



Kuva 6.26 Yleistetyt ääriarvojakauman toistumisajat 5, 10, 15, 30 ja 60 minuutin intensiteeteille. Vaaka-akselilla on toistumisaika vuosissa ja pystyakselilla intensiteetti (mm/min).

Kuvaan 6.27 on koottu 10–60 minuutin intensiteettien toistumisajat. 5 minuutin intensiteetin toistumisajat jätettiin kuvasta 6.27 kokonaan pois, koska todettiin, että piirtävän sademittarin mittaustarkkuus ei ole riittävän hyvä 5 minuutin toistumisaikojen laskemiseen.

Tulokseksi saadut 5 minuutin toistumisajat noudattavat erilaista jakaumaa, ja yli 50 vuoden toistumisajoilla 5 minuutin intensiteetti on epäfysikaalisesti pienempi kuin 10 minuutin intensiteetti. Toistumisaikoja verrattiin aikaisempien tutkimusten tuloksiin. Esimerkkinä vertailusta todettakoon, että Ruson (1969) tutkimuksessa 10 minuutin keskimääräinen intensiteetti 50 vuoden toistumisajalla oli 1.64 mm/min, Kuusisto (1980) sai vastaavaksi intensiteetiksi 2 mm/min. Tässä tutkimuksessa vastaavaksi tulokseksi saatiin 1.75 mm/min. Vertailussa selvisi, että tämän tutkimuksen intensiteettien arvot ovat kaikilla 2–100 vuoden toistumisajoilla pienempiä kuin Kuusiston. Ruso käytti Gumbel-jakaumaa, jossa toistumisajat asettuvat suoralle. Ruson 10 minuutin intensiteettien arvot vaihtelevat pienemmästä suurempaan verrattuna tämän tutkimuksen tuloksiin, mikä johtuu jakaumien muodon erilaisuudesta, mutta kaiken kaikkiaan tulokset ovat keskimäärin melko lähellä toisiaan. Vertailun valossa voidaan saatuja toistumisaikoja pitää hyvinä.



Kuva 6.27 Toistumisajat 10, 15, 30 ja 60 minuutin intensiteeteille.

6.6 Ilmastolliset piirteet kuukausittain

Luvuissa 6.1-6.5 on käsitelty useasta näkökulmasta Kaisaniemen kesäsateita. Koska eri ilmastolliset piirteet käsiteltiin pääosin erillään omissa aliluvuissaan, on syytä koota yhteen tärkeimmät tulokset ja esittää kullekin kesäkuukaudelle tyypilliset sadannan piirteet.

Toukokuu:

Kaisaniemen mittausasemalla sademäärä on toukokuussa kesäkuukausista selvästi pienin. Toukokuussa myös sadetapahtumien määrä on vähäisin, ja vuosikymmenen aikana esiintyy keskimäärin noin 240 sadetapahtumaa eli noin 24 sadetapahtumaa vuodessa. Sateiden yhteiskesto on noin 25 tuntia kuukaudessa, joten toukokuussa 3.6 % ajasta sataa. Sateen osuus ajasta vaihtelee paljon vuosikymmenten välillä. Sadetapahtumat ovat suhteellisen pitkäkestoisia, koska kylmä meri ja viileä ilma vähentävät konvektiivisten sateiden osuutta ja rintamasateet hallitsevat sadantaa. 70- ja 80-luvuilla sadetapahtumat olivat keskimääräistä lyhytkestoisempia, mutta niiden lukumäärä oli selvästi suurempi. Sateettomat jaksot kestävät keskimäärin 32 tuntia kerrallaan, 70- ja 80-luvuilla sateettomat jaksot olivat selvästi lyhyempiä, koska sadetapahtumia oli enemmän. Sadetapahtumien sadesummat ovat pieniä, koska sade on pienipisaraista. Sateen keskimääräinen intensiteetti on 0.014 mm/min. Viileän meren johdosta sadesumma ja sateen intensiteetti eivät vaihtele vuorokauden kuluessa paljon toukokuussa. Todennäköisintä sade on klo 04–10 ja 16–22. Todennäköisyys, että kahden tunnin aikana sataa yhteensä 3 mm, on alle 0.5 %. Suurimmat sadesummat kertyvät klo 10–12 ja 16–18, ja pienimmät klo 02–04. Sateen intensiteetti on pienin klo 02–04 ja suurin kello 08–10. Suurimmat sadesummat ja intensiteetit ajoittuvat eri kellonajoille, mikä tarkoittaa, että intensiteetiltään voimakkaimmat sateet ovat usein lyhytkestoisia ja suurimmat sadesummat kertyvät pidempikestoisissa sateissa. *Toukokuulle ovat ominaisia harvalukuiset heikot sateet, jotka ovat pitkäkestoisia.*

Kesäkuu:

Kesäkuun sadesumma on kesäkuukausista toiseksi pienin, vaikka sadepäiviä on yhtä paljon kuin heinäkuussa. Myös sadetapahtumia on toiseksi vähiten: noin 300 sadetapahtumaa vuosikymmenessä eli 30 vuodessa. Sadetapahtumien lukumäärän hajonta vuosikymmenien välillä on suurta, ja etenkin 80-luvulla sadetapahtumia oli erityisen paljon. Keskimäärin kesäkuun aikana sataa noin 30 tuntia yhteensä ja 60 minuuttia kerrallaan. Sateettomat jaksot

kestävät keskimäärin 24 tuntia kerrallaan. Noin 4 % kokonaisajasta sataa. Sadetapahtumien sadesummat ovat melko pieniä, ja sadesumma on keskimäärin 1.2 mm/sadetapahtuma. Keskimääräinen intensiteetti on noin 0.019 mm/min. Sadesummalla on selvä iltapäivämaksimi ja toinen pienempi maksimi klo 04–06, mutta muuten sadesumman vuorokautinen vaihtelu on pientä. Sateen intensiteetin iltapäivämaksimi ei ole suhteellisesti yhtä voimakas kuin sadesumman iltapäivämaksimi, ja intensiteetin vuorokautinen kulku on pääpiirteiltään tasaista. Sade on todennäköisintä klo 18–20. Suurimmat sadesummat kertyvät klo 20–22. Rankimmat sateet esiintyvät klo 12–16, jolloin konvektio on voimakkainta. Rankkojen sateiden todennäköisyys kasvaa kuun loppua kohden. *Kesäkuulle ovat ominaisia iltapäivälle ajoittuvat konvektiiviset sateet, jotka eivät usein ole rankkoja.*

Heinäkuu:

Heinäkuussa kuukauden sadesumma on melko suuri. Sadetapahtumia vuosikymmenen ajalla esiintyy noin 350 eli noin 35 vuodessa, mutta vaihtelu vuosikymmenten ja etenkin vuosien välillä on suurta. Kokonaisajasta noin 4 % sataa, eli kuukauden aikana sateista aikaa on noin 30 tuntia. Sade kestää kerralla noin 50 minuuttia, ja sateettomat jaksot kestävät 22 tuntia. 70- ja 80-luvuilla sekä sateen että sateettomien jaksojen kesto oli huomattavasti lyhyempi, mutta sadetapahtumia oli paljon. Sadesumma on keskimäärin 1.3 mm/sadetapahtuma, 70- ja 80 -luvulla sadesummat olivat selvästi pienimpiä. Heinäkuussa sadesumman vuorokausivaihtelu on alkukesää suurempaa ja iltapäivällä on selvä maksimi. Vuorokauden suurin sadesumma kertyy klo 16–18. Keskimäärin intensiteetti on 0.023 mm/min. Intensiteetin vuorokausivaihtelu on melko tasaista, ja iltapäivällä ei havaita selvää maksimia. Sade on todennäköisintä klo 16–20. Rankimmat sateet ovat myös todennäköisimpiä iltapäivällä, mutta heinäkuun puolella välissä rankkoja sateita esiintyy usein klo 8–10. Heinäkuun lopussa todennäköisyys rankkojen sateiden esiintymiselle on pieni. Heinäkuun aikana sateen ja suurien intensiteettien todennäköisyys vaihtelee paljon. *Heinäkuun sateille ominaista on rankkuus ja lyhyt kesto.*

Elokuu:

Elokuussa kuukauden sademäärä on kesäkuukausista suurin ja sadetapahtumien lukumäärä toiseksi suurin. Vuosikymmenen aikana esiintyy keskimäärin 360 sadetapahtumaa, eli noin 36 vuodessa. Yhden elokuun aikana sataa noin 34 tuntia, eli noin 4.6 % kokonaisajasta. Yksi sadetapahtuma kestää noin 60 minuuttia. 70- ja 80-luvulla sadetapahtumien kesto oli selvästi muita vuosikymmeniä lyhyempi, mutta sadetapahtumien muita vuosikymmeniä

suurempi lukumäärä tasoitti sademäärää. Yksittäisessä sadetapahtumassa kertyvä sadesumma on elokuun sateissa kesän suurin. 90-luvulla yksittäiset sadetapahtumat olivat aiempia vuosikymmeniä runsassateisempia, 70- ja 80 -luvulla sadetapahtumien sadesummat olivat pienimpiä. Sateen keskimääräinen intensiteetti on noin 0.026 mm/min, joka on hieman suurempi kuin heinäkuussa. Sateen todennäköisyys on melko suuri läpi vuorokauden. Suurimmat sadesummat kertyvät klo 04–08 ja 16–18. Vuorokausivaihtelu on yleisesti suhteellisen suurta lämpimän meren vaikutuksesta. Konvektiiviset sadekuurot selittävät sadesumman iltapäivämaksimin, joka havaitaan myös sateen intensiteeteissä. Aamun sadesummamaksimin aikaan, klo 04–08, sateen rankkuus on elokuulle keskimääräinen. Todennäköisesti maata lämpimämpi meri lisää kuitenkin aamulla sadekuurojen todennäköisyyttä ja lisää aamun sademäärää. Rankimmat sateet ovat todennäköisimpiä elokuun alussa klo 12–16. Myöhemmin elokuussa rankkojen sateiden todennäköisyys on vähän pienempi. *Elokuussa sataa tyypillisesti kerralla paljon ja sateet ovat lyhytkestoisia. Vuorokausivaihtelu on elokuussa suurimmillaan.*

Syyskuu:

Syyskuussa sademäärä on kesäkuukausista toiseksi suurin, mutta silloin esiintyy eniten sadetapahtumia. Sadetapahtumia on vuosikymmenen aikana noin 390, eli noin 39 vuodessa. Myös sateen osuus kokonaisajasta on yli 6 %, eli noin 45 tuntia yhden syyskuun aikana. Keskimäärin sade kestää kerrallaan 70 minuuttia ja sateeton jakso 16 tuntia. Kestojen vaihtelu vuosikymmenten välillä on kohtalaisen suurta. Yksittäisessä sadetapahtumassa sademäärä on yhtä suuri kuin heinäkuussa, eli noin 1.3 mm. Keskimääräinen intensiteetti on noin 0.019 mm/min, eli sateet eivät ole yleisesti rankkoja. Vuorokausivaihtelu on pientä, koska konvektiivisten sateiden osuus on selvästi pienentynyt syyskuuhun mennessä. Sadesumma on kuitenkin läpi vuorokauden melko suuri, koska sade liittyy useimmiten rintamiin, jotka ylittävät mittauspisteen satunnaiseen vuorokauden aikaan. Sade on kaikista todennäköisintä klo 06–08 ja 16–20. Suurimmat intensiteetit havaitaan klo 20–22. Syyskuun loppua kohti todennäköisyys kohtalaisen intensiteetin sateelle kasvaa selvästi. Rankkojen sateiden osuus on pieni syyskuussa, eikä niitä esiinny erityisesti tiettyyn vuorokauden aikaan. *Syyskuulle ovat tyypillisiä pitkäkestoiset ja tasaiset sateet läpi vuorokauden.*

7. Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa selvitettiin Helsingin Kaisaniemen mittausaseman piirtävän sademittarin aineiston perusteella sadannan ilmastollisia piirteitä kesäkuukausina. Aiheesta on tehty muutamia suppeita tutkimuksia useita vuosikymmeniä sitten, mutta ensimmäistä kertaa tutkimuksessa oli käytössä aineistoa 50 vuoden ajalta. Digitalisoitu aineisto osoittautui kohtalaisen laadukkaaksi, ja siitä pystyttiin tutkimaan sateen ominaisuuksia kohtuudella 5 minuutin ajallisella ja 0.1 mm sademäärän erotuskyvyllä. Piirtävän sademittarin sadeaineistoa verrattiin saman mittausaseman vuorokausisademäärää mittaavien keräysastioiden aineistoon, ja korrelaatio todettiin hyväksi.

Sadanta on stokastinen prosessi, ja sen piirteitä voidaan kuvata tilastollisin menetelmin. Tässä tutkimuksessa selvisi, että kahden eksponenttijakauman summalla voidaan hyvällä vastaavuudella kuvata sateen sekä sateettomien jaksojen kestoja ja yksittäisten sadetapahtumien sadesummia. Ääriarvoihin sovellettiin yleistettyä ääriarvojakaumaa, ja jaksomaksimimenetelmän avulla saatiin laskettua rankoille sateille toistumisaikoja. Tulokseksi saatiin, että Helsingin Kaisaniemessä sataa kerran 50 vuodessa 1.78 mm/min 10 minuutin ajan, 1.53 mm/min 15 minuutin ajan, 0.95 mm/min 30 minuutin ajan ja 0.52 mm/min 60 minuutin ajan. 5 minuutin intensiteettien toistumisaikoja ei piirtävän sademittarin riittämättömän mittaustarkkuuden takia voitu pitää luotettavina.

Tutkimuksessa selvisi, että rankkojen sateiden ajallinen muoto vaihtelee paljon pistemittauksessa. Rankoille sateille pyrittiin luomaan niiden ajallista muotoa kuvaava teoreettinen muoto. Normitetuista jakaumista muodostettu teoreettinen jakauma on lähes symmetrinen rankimman hetkellisen sadannan suhteen, mutta keskihajonta oli tutkituilla sateilla ennen ja jälkeen maksimi-intensiteettiä suuri.

Helsingin Kaisaniemessä sataa kesällä keskimäärin 4.5 % kokonaisajasta. Yksi sadetapahtuma kestää keskimäärin 60 minuuttia, ja sadetapahtumia erottavat sateettomat jaksot kestävät keskimäärin 21 tuntia. Yhden sadetapahtuman aikana Kaisaniemessä sataa keskimäärin 1.2 mm. Sateen intensiteetti on koko kesän aikana keskimäärin 0.020 mm/min. Tutkimuksessa esille tulleet kuukausikohtaiset sadannan piirteet olivat suurelta osin odotettuja. Toukokuussa sateet ovat melko pitkäkestoisia, mutta intensiteetiltään heikkoja rintamasateita. Kesäkuussa konvektiiviset sateet yleistyvät ja runsaimmat sateet esiintyvät

iltapäivällä. Heinäkuun sateet ovat kesäkuukausista lyhytkestoisimpia. Elokuussa sadannan vuorokausivaihtelu on suurimmillaan ja sateet ovat rankkoja. Syyskuussa sateen osuus kokonaisajasta on kesäkuukausista suurin, ja sateet ovat silloin luonteeltaan pitkäkestoisia ja intensiteetiltään heikkoja.

Tämän tutkimuksen tuloksissa näkyy, että meren läheisyys vaikuttaa Kaisaniemen sadantaan etenkin alkukesällä. Kaupunki-ilmastolla on todennäköisesti myös pieni vaikutus, mutta vuosikymmenten kuluessa tapahtunut kaupungin kasvun vaikutuksia sadantaan ei voida tuloksista erotella. Vuosikymmenten välillä havaittiin suurta vaihtelua etenkin sadetapahtumien lukumäärässä ja kestossa. Vuosikymmentenvälinen vaihtelu selittyy suurelta osin luontaisella vaihtelulla, eikä merkkejä ja trendejä ilmastonmuutoksesta löydetty.

Kiitokset

Haluan esittää suuret kiitokset Ilmatieteen laitoksen Ilmastotutkimuksen ryhmälle hyvästä yhteistyöstä. Lisäksi kiitos myös apureilleni Shumengille ja Eevalle sekä kaikille niille henkilöille, joilta olen saanut apua, vinkkejä ja kannustusta gradun tekoon.

Kirjallisuusviitteet

Alalammi, P. (toim.), 1987: *Suomen kartasto, vihko 131, Ilmasto*. Maanmittaushallitus, Suomen maantieteellinen seura.

Allerup, P., Madsen, H., 1980: *Accuracy of point precipitation measurements*. Nordic Hydrology, Copenhagen. Vol.11, No. 2, s. 57-70.

Austin, P. M., Houze, R.A., Jr, 1972: *Analysis of the structure of precipitation patterns in New England*. Journal of Applied Meteorology, Vol. 11. s. 926-934.

Barnston, A.G. ja Thomas, J. L., 1983: *Rainfall Measurement Accuracy in FACE: A Comparison of Gage and Radar Rainfalls*. Journal of climate and applied meteorology. Vol 22. s. 2038-2052.

Buishand, T. A., 1984: *The Effect of Seasonal Variation and Spatial Correlation on the Extreme Value Distribution of Rainfall Data*. Journal of climate and applied meteorology. Vol 24. s. 154-160.

Coles, S., 2001: *An introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer-Verlag, London, UK. 204 s.

Dahlström, B., 1979: *Regional fördelning av nederbördsintensitet – en klimatologisk analys*. Rapport R18:1979, Byggnadsforskningen.

Drebs, A., Nordlund, A., Karlsson, P., Helminen, J., Rissanen, P., 2002: *Tilastoja Suomen ilmastosta 1971-2000*. Ilmastotilastoja Suomesta 2002:1. Ilmatieteen laitos. 99 s.

Drufuca, G. I., Zawadzki, I., 1975: *Statistics of Raingage data*. Journal of Applied Meteorology. Vol. 14, No. 8, s.1419-1429.

Eicher, C., 1991: *Selection of design storms – time resolution considerations*. Atmospheric Research, Amsterdam. Vol. 27, s. 23-43.

Gilleland, E., Katz, R., Young, G., 2005: *Extremes toolkit (extRemes): Weather and climate applications of extreme value statistics*. <http://www.assessment.ucar.edu/toolkit/>

Heino, R. 1979: *Urban effect on climatic elements in Finland*. Geophysica 15. s. 171-188.

Heino, R. 1994: *Climate in Finland during the period of meteorological observations*. Finnish Meteorological Institute contributions, No. 12. 209 s.

Hobbs, P. V., Locatelli, J.D., 1978: *Rainbands, precipitation cores and generating cells in a cyclonic storm*. Journal of the Atmospheric Sciences. Vol. 35, s. 230-241.

Ilmatieteen laitos. <<http://www.fmi.fi>>

Inkinen, M., 2003: *Sateen intensiteetti Suomen kesäsateissa säätutkamittausten mukaan*. Pro Gradu –tutkielma. Helsingin yliopisto, Fysikaalisten tieteiden laitos. 54 s.

Katz, R. W., Brush, G. S., Parlange, M. B., 2005: *Statistics of extremes: Modelling ecological disturbances*. Ecology. 86(5), s. 1124-1134.

Kaurola, J., Koistinen, J., Leskinen, M., Puhakka, T., Saarikivi, P., 1989: *Mesometeorologisten tekijöiden vaikutus epäpuhtauksien leviämiseen erityisesti Suomenlahden rannikolla, osa 3: Mesoilmiöiden yleisyys Etelä-Suomessa ja Dopplersäätutkijan mahdollisuudet niiden havainnoimisessa*. Helsingin yliopisto, Meteorologian laitos. 51 s.

Kedem, B., Harry, P., Xiaodong G., David A. S., 1994: *A Probability Distribution Model for Rain Rate*. Journal of Applied Meteorology. Vol. 33, No. 12, s. 1486–1493.

Koistinen, J., 1985: *Tutkamittauksia sateen hetkellisten intensiteettien esiintymistodennäköisyyksistä*. Seminaariraportti, toim. Helminen, J. ja Ikonen, E. Suomen Akatemian julkaisuja 7/1985.

Kuusisto, E., 1980: *On the intensity of rainfall in Finland*. Aqua Fennica 10. s. 3-11.

Landsberg, H.E., 1981: *Urban Climate*. Academic Press. 285 s.

Liljequist, G., 1962: *Meteorologi*. Generalstabens Litografiska anstalt. 436 s.

McDonald, J. E., Green, C. R., 1960: *Effects of inhomogeneity and record length on estimates of correlation and variability of precipitation data*. Journal of Geophysical Research 65, s. 2375-2381.

Modén, H. ja Nyberg, A., 1965: *Stocholmsområdets klimat del 1. Nederbörden*. Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, Meddelanden, serie B. Nr. 19. 32 s.

Mustonen, S. (toim.), 1986: *Sovellettu hydrologia*. Vesiyhdistys r.y.

Niemczynowicz, J., 1991: *On storm movement and its applications*. Atmospheric Research, Vol 27, No. 1-3. s.109-127.

Puhakka, T. 1995: *Pilvifysiikka*. Luentomoniste, Helsingin yliopisto, meteorologian laitos. 209 s.

Rantakrans, E. 1967: *Ilmatieteenlaitoksen ja Sodankylän observatorion havaintoihin perustuva tilastollinen tutkielma sateen rankkuuksista*. Tutkielma. Helsingin yliopisto, meteorologian laitos. 13 s.

Rasmussen, K. R., Halgreen, C., 1978: *Some errors in precipitation measurements*. Nordic Hydrology, Copenhagen. Vol. 9, no. 3/4, s. 145-160.

Ruso, R., 1969: *Rankkasateiden voimakkuus ja toistumistiheys Suomessa*. Rakennushallitus, tiedotuksia. 13 s.

Schilling, W., 1991: *Rainfall data for urban hydrology: what do we need?* Atmospheric Research, Amsterdam, Vol.27, s. 5-21.

Simojoki, H., 1944: *Einige Ergebnisse der Niederschlagsregistrierungen in Finnland*. Annales Academiae Scientiarum Fennicae, Series A 1 26. 44 s.

Solantie, R., Junila, P., 1995: *Sademäärien korjaaminen Tretjakovin ja Wildin sademittarien vertailumittausten avulla*. Meteorologisia julkaisuja, 33. Ilmatieteen laitos. 67 s.

Tattelman, P. ja Knight, R. W., 1988: *Analyses of 1-min Rain Rates Extracted from Weighing Raingage Recordings*. Journal of Applied Meteorology. Vol. 27. s. 928-938.

Ulbrich, C. W. ja Miller N. E., 2001: *Experimental Test of the Effects of Z-R Law Variations on Comparison of WSR-88D Rainfall Amounts with Surface Rain Gauge and Disdrometer Data*. Weather and Forecasting. Vol. 16, No. 3, s. 369–374.

Wäre, M., 1961: *The Intensity of rainfall in the period May to October*. Soil and Hydrotechnical Investigations 9. 2.

Ylä-Soininmäki, E., 1982: *Tilastollinen tutkimus sateiden rankkuuksista ja kestoista mitoitus ja simulointitarkoituksiin*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Rakennusinsinööri-osasto. 73 s.