

Rankkasateet ja ilmastonmuutos – katsaus viimeaikaiseen tutkimukseen

SETUKLIM-hankkeen raportti 2013

Mikko Laapas

Ilmatieteen laitos

Helsinki, 2013

1.	Johdanto.....	3
2.	Menetelmät ja tarkasteltavat suureet.....	8
2.1.	Mallintaminen ja mallitulosten tarkentaminen.....	8
2.2.	Rankkasadeilmastoa kuvaavia muuttujia.....	10
3.	Tuloksia kotimaisista ja kansainvälisistä tutkimuksista.....	11
4.	Yhteenveto.....	18
5.	Lähteet.....	21

1. Johdanto

Maapallon keskilämpötilan arvioidaan nousevan kasvihuoneilmiön voimistumisen myötä tämän vuosisadan aikana (IPCC, 2013). Lämmitessään myös ilmakehän kosteussisältö muuttuu. Teoreettisesti Clausius-Clapeyronin yhtälön perusteella ilmakehän kyky sitoa vettä kasvaa noin 7 % sen lämpötilan noustessa yhdellä asteella. Tällaisella muutoksella on perusteellinen vaikutus veden kiertokulkuun ilmakehässä, tarjoten perustan voimakkaiden sateiden lisääntymiselle ilmaston lämmitessä. Asia ei ole kuitenkaan aivan näin yksinkertainen, vaan sateisuuteen vaikuttaa moni muukin asia, eivätkä muutokset jakaudu tasaisesti eri puolille maapalloa ja eri osiin sateen todennäköisyysjakautumaa (Berg et al., 2013). Esim. alueellisella tasolla muutoksiin sadeilmastossa vaikuttavat myös mahdolliset siirtymät säähäiriöiden tyypillisissä kulkureiteissä.

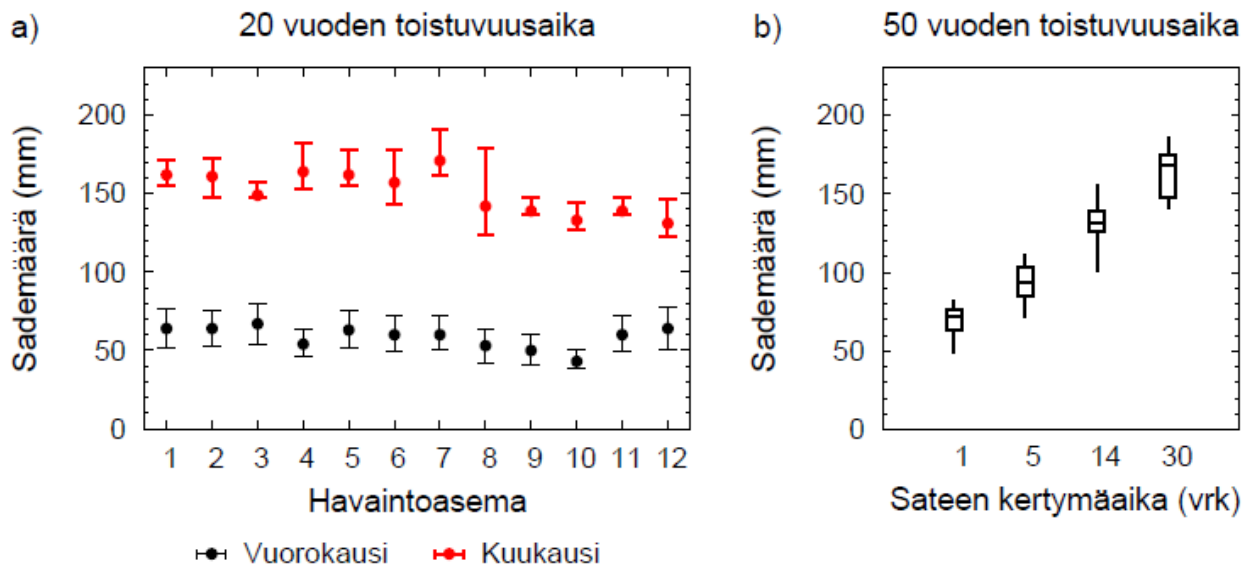
Muutokset sateisuuden ääripäissä ovat yhteiskunnan ja ekosysteemien kannalta erityisen tärkeitä, sillä niiden vaikutukset voivat olla vakaviakin (IPCC, 2012). Esimerkiksi kaupunkien hulevedet ovat läheisesti kytköksissä sateen intensiteettiin, sillä rakennetussa ympäristössä maaperän kyky sitoa vettä on rajallinen, mikä mahdollistaa pintavalunnan nopeatkin kasvut ja tätä kautta vakavat tulvatilanteet. Lisäksi monet rakenteet, kuten padot ja sillat, on suunniteltava hyvinkin pitkäikäisiksi, joten tietämys ilmaston muuttuessa rankkasateissa mahdollisesti tapahtuvista muutoksista on tarpeen.

Sademäärät vaihtelevat suuresti niin paikallisesti kuin ajallisestikin. Erityisesti rankimmat sateet, joita Suomessa saadaan lähinnä konvektiivisten kuurosateiden yhteydessä kesäaikaan, ovat hyvinkin paikallisia ilmiöitä. Kuuron elinaikana sateen voimakkuus voi vaihdella nopeasti huomattavassa määrin. Lisäksi on mahdollista, ettei sademittariverkosto saa tällaista sadetta havaittua, ainakaan kokonaisuudessaan. Perinteisiä sademittareita on nykyään keskimäärin vain yksi noin 500 neliökilometriä kohden, joten jonnekin sademittareiden väliin voi osua huomattavasti mitattua suurempia sademääriä. Tätä puutetta voidaan onneksi paikata tutkamittausten avulla, kuten esim. RATU-hankkeessa on tehty (Aaltonen et al., 2008).

Suomessa vuotuinen sademäärä on alueesta riippuen keskimäärin n. 450 mm:stä reiluun 700 mm:iin. Heinä-elokuussa vettä saadaan eniten, tammi-helmikuussa vähiten. Sateiden määrä vaihtelee kuitenkin suuresti vuodesta toiseen. Esimerkiksi Helsingissä vuosina 1900–2012 kesä-elokuun sademäärän mittaukset (jakson 1971–2000 keskiarvo 188 mm) vaihtelivat vajaan 50 mm:n

ja lähes 350 mm:n välillä (Nevanlinna, 2008, tilasto päivitetty kirjoittajan toimesta 2013). Yksittäisellä sadeasemalla kuukausisadanta nousee n. 140 mm:iin keskimäärin kerran vuosikymmenessä. Vastaavasti kerran vuosikymmenessä vettä saadaan vuorokaudessa vähintään 50 mm. Kun tarkastellaan useampia sadeasemia, nousee kerran vuosikymmenessä jossain päin Suomea saatava kuukausisademäärä 240 mm:iin (Venäläinen et al., 2009).

ACCLIM-hankkeessa (Jylhä et al., 2009) tarkasteltiin sateiden havaittuja 20 ja 50 vuoden toistuvuustasoja, siis sademääriä joiden vuotuinen esiintymistodennäköisyys on 5 % ja 2 %. Nämä todennäköisyydet edustavat ns. harvinaisia ja poikkeuksellisia tapauksia. 20 vuoden toistuvuusaikaa vastaavat kuukauden ja vuorokauden sademäärät sekä niiden 95 % luottamusvälit on esitetty 12 havaintoasemalle eri puolelta Suomea kuvassa 1a. Etelä- ja Länsi-Suomessa (asemat 1-6) keskimäärin kerran 20 vuodessa ylittävä kuukausisademäärä on noin 160 ± 15 mm ja vuorokausisademäärä vastaavasti noin 60 ± 10 mm. Pohjois-Suomessa vastaavat sademäärät ovat hieman pienempiä, varsinkin kuukausisademäärän kohdalla (kuva 1a, asemat 8-12). Kuvassa 1b on puolestaan esitetty vuorokausi- ja kuukausisademäärän 50 vuoden toistuvuustason lisäksi 5 ja 14 vuorokauden sademäärien toistuvuustasot. Nyt tulokset on esitetty 12 havaintoaseman parhaiden arvioiden jakaumana, mediaanin ollessa vuorokausisateelle n. 70 mm, 5 vrk:n sateelle n. 90 mm, 14 vrk:n sateelle n. 130 mm ja kuukausisademäärälle n. 170 mm.



Kuva 1. a) 20 vuoden toistuvuusaikaa vastaavat kuukauden (punainen) ja yhden vuorokauden (musta) sademäärät havaintojen perusteella. Toistuvuusaika-analyysin parhaan arvion (ympyrä, ns. suurimman uskottavuuden estimaatti) lisäksi on esitetty 95 %:n luottamusvälit. Havaintoasemat 1-12 ovat Helsinki, Turku, Jokioinen, Utti, Jyväskylä, Kauhava, Joensuu, Oulu, Kuusamo, Sodankylä, Muonio ja Ivalo. b) 50 vuoden toistuvuusaikaa vastaavat yhden, viiden ja 14

vuorokauden sekä kuukauden sademäärät; parhaiden arvioiden vaihtelu 12 havaintoaseman välillä. Ylhäältä alas minimi, 25. prosenttipiste, mediaani, 75. prosenttipiste ja maksimi (Jylhä et al., 2009).

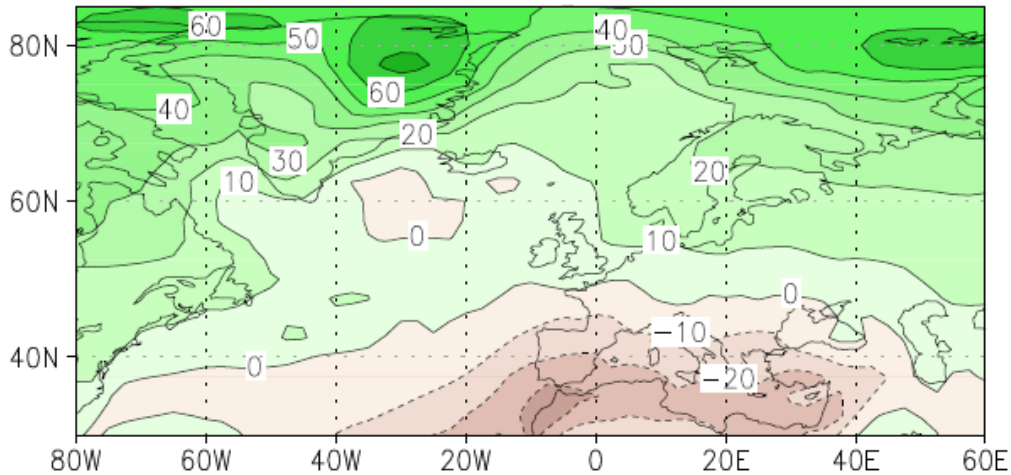
Meteorologisesti määriteltynä rankkasade on suhteellisen yleinen tapahtuma, sillä Suomessa Ilmatieteen laitos luokittelee sateen rankaksi kun vettä tulee joko 2,5 mm / 5 min, 5,5 mm / 30 min, 7,0 mm / 60 min, 10 mm / 4 h, 15 mm / 12 h tai 20 mm / 24 h. Esim. jaksolla 1961–2005 vuorokausisademäärä ylitti rankan sateen rajan (20 mm / 24 h) RATU-hankkeessa tutkituilla havaintoasemilla keskimäärin 0-8 kertaa vuodessa. Rankkasateiden alueellisesta jakaumasta mainittakoon, että Pohjois-Suomessa rankkasateiden todennäköisyys on pienempi kuin muualla maassa (Aaltonen et al., 2008).

Ilmaston lämpenemisen viimeisen sadan vuoden aikana voidaan odottaa vaikuttaneen myös sademääriin, joskin ilmastonmuutossignaalin havaitseminen luonteeltaan huomattavasti hälyisemmästä sadehavaintoaineistosta on selvästi vaikeampaa kuin lämpötilan tapauksessa. Rankkasateiden kohdalla tämän on luonnollisesti vieläkin vaikeampaa, jo niiden havaitsemiseen liittyvien epävarmuuksien takia. SREX-raportti (IPCC, 2012) toteaa Pohjois-Euroopan osalta voimakkaissa sateissa jo havaituista muutoksista vielä varsin varovaisesti. Raportin mukaan talvella muutos on ollut paikoin positiivinen kohtalaisella varmuudella, mutta kesällä muutos on ollut pääasiassa joko epä johdonmukaista tai tilastollisesti ei-merkitsevää.

Globaalisti ilmastonmuutoksen odotetaan vaikuttavan sateisuuteen monin eri tavoin, sillä ilmakehän vesihöyrymäärän lisääntymisestä huolimatta sademäärät eivät kaikkialla maapallolla kasva. Sateisuuden muutos jakautuu karkeasti niin, että sademäärät lisääntyvät korkeilla leveysasteilla ja trooppisissa, mutta vähenevät subtropiikissa, esim. Välimeren maissa. On myös alueita, kuten Sahelin alue Afrikassa ja Amazonin alue Etelä-Amerikassa, missä eri ilmastomallien tulokset sateisuuden suhteen ovat varsin ristiriitaisia. Myös lisääntyvä sateisuuden vaihtelu leimaa monia alueita maailmassa. Rankkasateet saattavat lisääntyä sellaisillakin alueilla, missä keskimääräiset sademäärät eivät lisäänty.

Eurooppaa tarkasteltaessa kahtiajako tulevaisuuden sademäärän muutoksessa näkyy selvästi. Tästä on esimerkkinä kuva 2 sademäärän vuosikeskiarvon muutoksesta Euroopassa. Pohjois-Euroopassa sataa tulevaisuudessa nykyistä enemmän, Etelä-Euroopassa vähemmän. Keski-Euroopassa vuotuinen sademäärä näyttää pysyvän lähes ennallaan. Kesän osalta kuvassa 2 näkyvä raja positiivisen ja negatiivisen muutoksen välillä siirtyy pohjoisemmaksi, Etelä-Skandinavian ja Viron

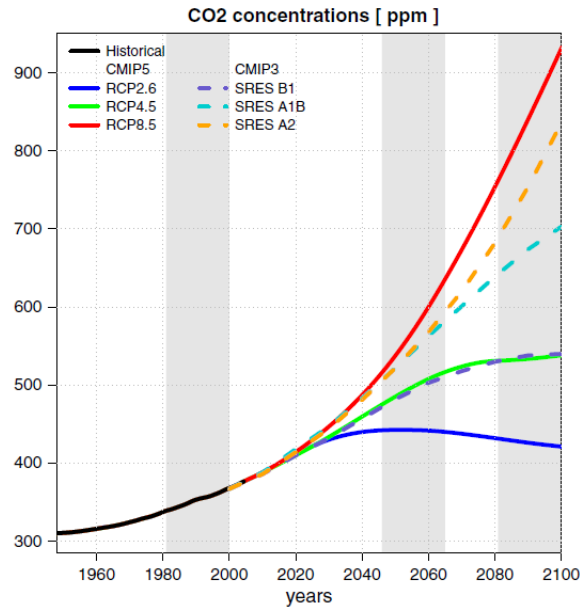
korkeudelle, ja talvella vastaavasti etelämmäksi, Etelä-Ranskan ja Pohjois-Italian korkeudelle. Tällöin esim. Keski-Euroopassa vettä saadaan talvella nykyistä enemmän ja kesällä vähemmän.



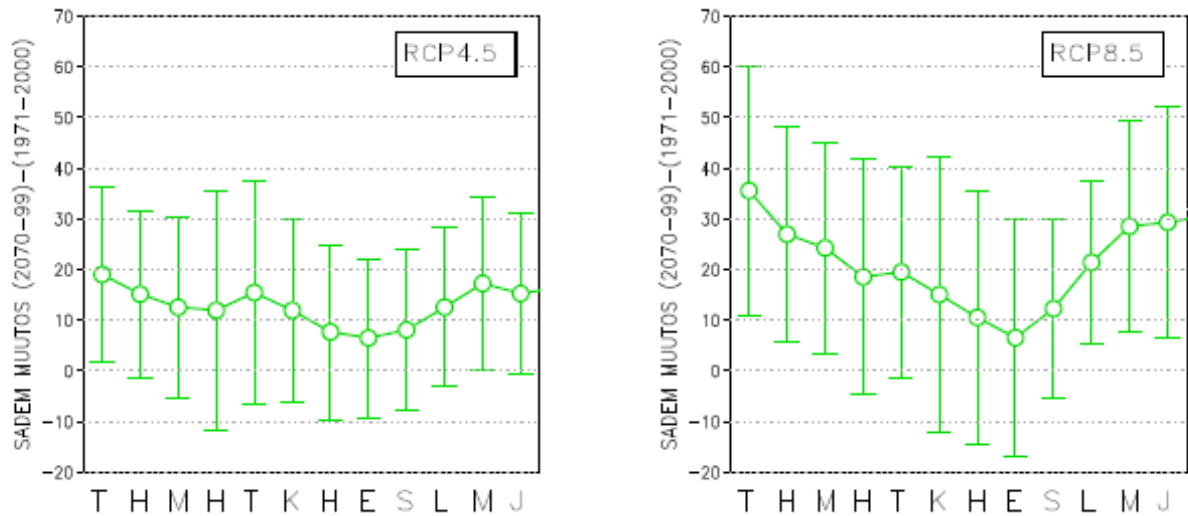
Kuva 2. Sademäärän vuosikeskiarvon ennustettu muutos (%) Euroopassa RCP8.5-skenaarion mukaan siirryttäessä jaksosta 1971–2000 jaksoon 2070–2099. Laskelma perustuu 28 maailmanlaajuisen ilmastomallin tulosten keskiarvoon (Ruosteenoja, 2013).

IPCC 5. arviointiraporttia varten suoritettujen CMIP5-ilmastomallisimulaatioiden tuloksista on tehty jo ensimmäisiä arvioita myös Suomea koskien (Ruosteenoja, 2013). Arviot sademäärien muutoksista perustuvat 28 ilmastomallin tuloksiin, jotka muodostavat osajoukon IPCC:n 5. arviointiraporttia varten suoritetuista ns. CMIP5-mallikokeista. Malleissa käytettiin ns. RCP-skenaarioita, jotka korvaavat aikaisemmin mm. IPCC:n 4. arviointiraporttia laadittaessa käytössä olleet SRES-skenaariot. Näissä skenaarioissa kuvataan ilmastojärjestelmään vaikuttavien kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten päästöt. Tässä käytetty RCP4.5-skenaario on lämmityspakotteeltaan hieman aikaisemmin käytettyä B1-skenaariota voimakkaampi, kun taas RCP8.5-skenaariossa se on selvästikin A2-skenaariota voimakkaampi. Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kehitys eri SRES- ja RCP-skenaarioissa on esitetty kuvassa 3. Sademäärän muutokset Suomelle laskettiin suhteessa perusjakson 1971–2000 keskiarvoon. Ilmastomallien keskiarvona lasketun tuloksen mukaan vuotuisen kokonaissademäärän kasvu on Suomessa vuosisadan loppuun mennessä runsaimpien päästöjen skenaarion tapauksessa noin 20 % ja pienimpien päästöjen tapauksessa 8 %:n luokkaa. Eri mallien antamat arviot kuitenkin poikkeavat toisistaan melko paljon. Sademäärän kasvu ei jakaudu tasaisesti pitkin vuotta, vaan sademäärän lisääntyminen on talvella selvästi voimakkaampaa kuin kesällä (kuva 4). Kuvassa 4 näkyy myös eri mallien tulosten hajonta. Esim. RCP8.5-päästöskenaarion tapauksessa mallituloksista laskettu 90 % todennäköisyysväli tammikuun keskimääräisen sademäärän muutokselle jaksosta 1971–2000

jaksoon 2070–2099 on noin 10–60 %, mallitulosten keskiarvon ollessa noin 35 %. Alueellisesti ero muutoksessa näkyy lähinnä kesällä, jolloin sateet lisääntyvät enemmän Pohjois-Suomessa. Sademäärien osalta edellä esitetyt muutosennusteet eivät pääpiirteissään juuri eroa IPCC:n 4. arviointiraportin aikaan suoritettujen edellisen mallisukupolven tuottamista tuloksista.



Kuva 3. Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden (pysty akseli) kehitys tilavuuden miljoonasosina (ppm) eri päästöskenaarioissa. Katkoviivat kuvaavat CMIP3-malliajoissa käytettyjä SRES-päästöskenaarioita B1 (tumman sininen), A1B (vaalean sininen) ja A2 (oranssi). Yhtenäiset viivat kuvaavat CMIP5-malliajoissa käytettyjä RCP-päästöskenaarioita RCP2.6 (sininen), RCP4.5 (vihreä) ja RCP8.5 (punainen). Musta käyrä kuvaa CMIP5-malliajoissa käytettyä hiilidioksidipitoisuuden havaittua kehitystä vuodesta 1950 lähtien. Kuvan taustan varjostukset esittävät tutkimuksessa käytetyt tarkastelujaksot (Sillmann et al., 2013).



Kuva 4. Sademäärän muutos (%) Suomessa vuoden eri kuukausina siirryttäessä jaksosta 1971–2000 jaksoon 2070–2099. Käyrä esittää 28 maailmanlaajuisen ilmastomallin tulosten keskiarvoa ja pystyjanat mallituloksista laskettua 90 % todennäköisyysväliä. Vasen kuva edustaa RCP4.5- ja oikea kuva RCP8.5-skenaariota (Ruosteenoja, 2013).

Sään ääri-ilmiöihin ja niissä tapahtuvien muutosten tutkimiseen on viime vuosina panostettu entistä enemmän. Tästä esimerkkinä on IPCC:n vuonna 2012 julkaisema, viimeaikaista tutkimusta yhteen kokoava SREX-erikoisraportti, joka käsittelee tuhoisiin sääilmiöihin varautumista osana ilmastonmuutokseen sopeutumista (IPCC, 2012). Raportin mukaan ihmiskunnan kasvihuonekaasupäästöillä näyttää olleen jo vaikutusta mm. voimakkaiden sateiden ääriarvoihin ja tulevaisuudessa muutos näkyy Pohjois-Euroopassa sekä rankkasadetapahtumien yleistymisenä että niiden voimakkuuden lisääntymisenä. Tarkemmin SREX-raportin antia käsitellään tässä raportissa myöhemmin muiden tutkimustulosten tarkastelun yhteydessä.

Jatkossa raportissa luodaan katsaus Suomessa ja muualla maailmassa tehtyyn sadeilmaston muuttumista käsittelevään tutkimukseen keskittyen erilaisiin rankkasateita kuvaaviin suureisiin Suomessa ja sen lähialueilla. Tarkastelu ulottuu kuluvan vuosisadan loppuun ja kattaa kuukauden ja sitä lyhyempien jaksojen sademäärät. Tutkimuksissa käytettyjä menetelmiä ja niissä käytettyjä sadeilmastoa kuvaavia suureita ja indeksejä esitellään lyhyesti tutkimusten varsinaisista julkaisuista löytyviin tarkempiin tietoihin viitaten.

2. Menetelmät ja tarkasteltavat suureet

2.1. Mallintaminen ja mallitulosten tarkentaminen

Ilmastomallit ovat keskeisessä osassa arvioitaessa rankkasateissa tapahtuvia muutoksia kuluvan vuosisadan aikana. Ne koostuvat kolmesta pääkomponentista. Ilmakehä- ja valtamerimallit huolehtivat ilmakehän ja valtamerien virtauksista, noudatellen fysiikan lakeja. Kolmas pääkomponentti, maaperää kuvaava osio sisältää mm. lumi- ja kasvipeitteen ja niiden vaikutuksen ilmastoon.

Globaalien ilmastomallien ilmakehäosion alueellinen erotuskyky on yleensä n. parin sadan km:n luokkaa. Esim. IPCC:n uusimmassa CMIP5-mallijoukossa, johon sisältyy entistä kokonaisvaltaisempia ilmastomalleja, ilmakehäosioiden horisontaalinen resoluutio on 0,5-4 astetta, mikä on kilometreiksi muutettuna karkeasti 50–400 km. Kehitys kohti erotuskyvyltään tarkempia malleja näkyy mm. siten, että CMIP5-mallijoukon ilmakehämalleista noin puolet ylittää tarkkuuteen, johon edellisen sukupolven CMIP3-malleista vain yksi ylsi (Taylor et al., 2012). Pystysuunnassa ilmakehä on tyypillisesti jaettu n. 20–30 tasoon.

Ilmastomallinnuksen keskeisenä ongelmana, joka korostuu etenkin rankkasateille, on ilmastomallin alueellista tarkkuutta pienempien ilmiöiden kuvaaminen (ns. parametrisointiongelma). Nämä pienemmät ilmiöt, kuten konvektiiviset sateet, joudutaan kuvaamaan epäsuorasti mallin ilmakehäosioon erilaisia menetelmiä käyttäen. Juuri tästä erilaisten parametrisointimenetelmien käytöstä seuraa suuri osa ilmastomallien välisistä eroista, ja nämä erot luovat epävarmuutta ilmastomallien tuloksiin.

Yksi keino tuottaa paikallisesti tarkempaa tietoa ilmaston muuttumisesta on ns. alueelliset ilmastomallit, jotka globaalien ilmastomallien maailmanlaajuisen tarkastelualueen sijaan keskittyvät vain tietyn alueen, esim. Euroopan, mallintamiseen. Alueellisilla ilmastomalleilla päästään jo n. 20–50 km alueelliseen erotuskykyyn, jolloin globaalin ilmastomallin tuloksista saadaan esiin paikallisia piirteitä. Alueelliset ilmastomallit siis käyttävät globaalien ilmastomallien tuloksia reunaehtoinaan. Tämä johtaa siihen, että niiden tulokset riippuvat voimakkaasti globaalista ilmastomallista, jonka tuloksiin reunaehdot perustuvat. Alueellisia ilmastomalleja ei siis tule pitää globaalien ilmastomallien ja niiden puutteiden korvaajina, vaan lähinnä niiden tuloksia paikallisesti tarkentavina työkaluina. Ilmastomallien, niin globaalien kuin alueellisten, suora käyttö on myös usein ongelmallista niiden tuloksissa esiintyvän, usein systemaattisen harhan takia. Tämä harha

korostuu erityisesti ääriarvoissa ja lyhyissä sadetapahtumissa, varsinkin tarkasteltaessa kestoltaan muutaman tunnin sademääriä (Hanel & Buishand, 2010; Mishra et al., 2012).

Alueellisten ilmastomallien käyttö on globaalien ilmastomallien ns. dynaamista tarkentamista. Niiden ohella käytetään tilastollisia menetelmiä ilmastomalliaineistojen tarkentamiseksi paikallisiin kohteisiin. Näillä menetelmillä pyritään täyttämään se aukko, joka on vielä olemassa ilmastomallien alueellisen ja ajallisen tarkkuuden ja mallitulosten paikkakohtaisen soveltamisen välillä. Myös erilaiset mallituloksissa esiintyvää harhaa korjaavat menetelmät ovat tässä yhteydessä tärkeässä roolissa (esim. Themeßl et al., 2011; Tryhorn & DeGaetano, 2011; Ahmed et al., 2013). Tilastollisen alueellisen tarkentamisen piiriin kuuluu useita erilaisia menetelmiä, jotka voidaan jakaa kolmeen luokkaan (Wilby & Wigley, 1997; Willems et al., 2012). Ensimmäiseen luokkaan kuuluvat erilaiset muutosfunktioihin perustuvat menetelmät, joissa selitettävän muuttujan ja selittävän muuttujan välille määritetään havaintoihin perustuva yhteys. Selittävät muuttujat kuvaavat yleensä suurehkon alueellisen mittakaavan ominaisuuksia joita ilmastomallit pystyvät mallintamaan tarkemmin kuin pienemmän mittakaavan selitettävää muuttujaa. Pienen skaalan sateelle soveltuvia selittäviä muuttujia ovat tutkineet esim. Vrac et al. (2007). Toiseen luokkaan kuuluvat säätyypitykseen perustuvat menetelmät. Havaitun ja ilmastomallin tuottaman suuren mittakaavan muuttujan, kuten painekentän, väliltä etsitään samankaltaisuuksia. Tällaisen samankaltaisuuden löydyttyä voidaan yhdistää ilmastomallista saatava suuren mittakaavan tilanne ja havaintojen mukaiset pienen mittakaavan sääolosuhteet. Tätä lähestymistapaa sateen tilastolliseen alueellistamiseen ovat käyttäneet esim. Willems & Vrac (2011). Kolmannen lähestymistavan muodostavat stokastiset sademallit, joita myös säägeneraattoreiksi kutsutaan (esim. Semenov, 2008; Onof & Arnbjerg-Nielsen, 2009).

Myös tilastolliset menetelmät pitävät sisällään lukuisia ongelmia. Olettamus siitä, että nykyilmastossa vallitsevat suhteet suuren skaalan ja pintasäähavaintojen välillä vallitsevat myös tulevaisuudessa, sekä ongelmat menetelmien kalibroimiseen käytettävän havaintoaineiston vaihteluvälin ulkopuolelle jäävien arvojen mallintamisessa ovat näistä esimerkkejä. Suomen tyypillisesti konvektiivisten äärisateiden kannalta mielenkiintoinen on myös Hundedha & Bardossyn (2009) tutkimus. He havaitsivat tutkimuksessa käytettyjen menetelmien olevan luotettavampia niinä vuodenaikoina, joina paikallinen sadeilmasto määräytyy pääasiassa suuren skaalan kiertoliikkeestä (Suomessa syksyllä ja talvella), kuin niinä, joina konvektiiviset sateet dominoivat (Suomessa kesällä).

2.2. Rankkasadeilmastoa kuvaavia muuttujia

Moni äärisateita tarkasteleva tutkimus keskittyy erilaisten sadeilmastoa kuvaavien indeksien käyttöön. Indeksit tarjoavat suhteellisen yksinkertaisen ja johdonmukaisen tavan ilmaston piirteiden ja niiden muutosten tarkasteluun. Indeksillä kuvataan usein erilaisten kynnyksarvojen ylityksiä, esim. tietyn vuorokausisademäärän ylitysten lukumäärää vuodessa.

Toinen tyypillinen lähestymistapa tarkasteltaessa äärisateita ovat vuotuiset maksimit eripituisten ajanjaksojen, esim. muutamasta päivästä jopa alle tuntiin, sademäärissä. Vielä harvinaisempia sadetapahtumia tarkastellaan yleensä näiden vuosimaksimien erilaisten toistuvuusajkojen muodossa, esim. sateen vuorokausimaksimin 20 vuoden toistuvuustasot määrittelemällä.

Kolmas tyypillinen tarkastelutapa, absoluuttisten vuosimaksimien sijaan, on tietyn prosenttipisteen tarkastelu. Tarkasteltavana vuorokausisademääränä voidaan pitää esim. tietyn ajanjakson havaintojen 95. prosenttipistettä, jota suurempiin sademääriin kuuluu siis 5 % aineiston sademääristä.

Esimerkiksi IPCC:n SREX-erikoisraportissa (2012) käsitellään rankkasateiden osalta pääasiassa kolmea muuttujaa, jotka kuvaavat voimakkaita sateita skaalassa, joka ylittää suhteellisen yleisistä sateista hyvinkin harvinaisiin. Näistä vähiten harvinaisia sateita kuvaa %DP10-indeksi, joka kuvaa niiden päivien prosentuaalista osuutta kaikista sadepäivistä, jolloin vettä saadaan yli 10 mm. Hieman harvinaisempia sateita kuvaa HPD-indeksi (Heavy Precipitation Days), joka kuvaa sadepäivien sademääräjakauman 95. prosenttipisteen sademäärää. Näitä kahta selvästi harvinaisempia rankkasateita tarkastellaan RV20HP-indeksillä, joka on sateen vuosittaisen vuorokausimaksimin 20 vuoden toistuvuusajkaa vastaava sademäärä.

Monessa muussakin tutkimuksessa tarkastellaan pitkälti samansuuntaisia indeksejä, mikä helpottaa eri tutkimusten tulosten vertailua keskenään. Suoraviivaisemmissa ilmastomalliaineistojen analyyseissä tarkastellaan myös esimerkiksi 30 ja 60 minuutin aika-askelten maksimisademääriä. Kestoltaan lyhyempiä sateita ja niiden intensiteettejä tarkastellaan erityisesti kaupunkihydrologian tutkimuskohteissa. Taajamatulvien kannalta tärkeitä muuttujia ovat yhden vuorokauden ja sitä lyhyempien tarkasteluaikojen lisäksi hieman pidemmän ajan sademäärät. Pidempään jatkuneet hyvin runsaat sateet ovat laaja-alaisten tulvien synnyn kannalta oleellisempia kuin lyhytkestoiset mutta hyvin intensiiviset taajamatulvia aiheuttavat sateet. Tämän tyyppisiä rankkasadetapahtumia tarkastellaan esim. 5 vrk:n jakson maksimisateella.

Eräs tapa yhdistää rankkasateiden eri piirteitä on ns. IDF-kuvaajat. Niillä kuvataan yleisesti lyhytkestoisia, paikallisia rankkasateita. Kuvaajan nimi tulee sanoista Intensity, Duration and Frequency, ja se yhdistää siis sateen voimakkuuden, keston ja toistuvuuden. IDF-kuvaajia käytetään erityisesti erilaisten suunnittelutehtävien, kuten esim. viemärijärjestelmien suunnittelun tukena. Mm. Willem & Vrac (2011) ja Olsson et al. (2012) ovat tutkineet rankkasateiden IDF-suhteissa tapahtuvia muutoksia.

3. Tuloksia kotimaisista ja kansainvälisistä tutkimuksista

Rankkasateita ja taajamatulvia käsitelleessä RATU-tutkimuksessa (Aaltonen et al., 2008) tarkasteltiin touko-syyskuun sadeilmaston muutoksia. Tämä jakso on siinä mielessä hyvä, että sinä aikana mitattuihin sademääriin eivät lumisateen mittaamiseen liittyvät epävarmuuslähteet pääse juurikaan vaikuttamaan. Rankkojen kesäsateiden muuttumista arvioitiin tutkimuksessa tarkastelemalla suurimman vuorokausisateen 30-vuotiskeskisarvon muuttumista jaksosta 1961–1990 jaksoon 2071–2100 alueellisten ilmastomallien tulosten perusteella. Tulosten mukaan enemmistö malleista ennusti muutoksen olevan 10–30 %, muutaman mallikokeen muutosennusteen jäädessä 5 %:iin. Yleisesti kesäsateiden muuttumista leimaa juuri rankkasateiden voimistuminen muutosten ollessa suurempia kuin saman ajanjakson keskimääräisen sateen muutokset. Hankkeessa tarkasteltiin myös kuuden tunnin maksimisateiden muuttumista. Tarkastelu ei tosin ollut yhtä kattava kuin vuorokausimaksimin osalta, sillä se perustui vain yhteen globaalin ja alueellisen ilmastomallin sekä päästöskenaarion yhdistelmään (ECHAM5/MPI-OM, RCA3 ja A1B). Kyseisessä mallikokeessa kuuden tunnin maksimisateen muutos on Suomen aluekeskiarvona noin 25 %. Muutoksen suuruus vaihteli kuitenkin alueellisesti paljon, ollen yleisesti 20–30 % ja paikoin vain n. 10 % tai jopa 30–40 %. Eripituisten ajanjaksojen sademäärien muutosten vertailu osoitti, että kuuden tunnin maksimisateet kasvavat varsinkin maan etelä- ja keskiosassa vuorokauden maksimisateita ja touko-syyskuun keskimääräisiä sateita enemmän.

Samoin kuin RATU-tutkimuksessa, myös ilmastonmuutosarvioita sopeutumistutkimuksia varten tuottaneessa ACCLIM-hankkeessa tulevaisuuden muutoksia rankkasateiden osalta tarkasteltiin käyttäen alueellisten ilmastomallien tuloksia. Vaikka alueellisten ilmastomallien tuloksia käytettiin kahdeksasta eurooppalaisesta mallikeskuksesta, tarkennettiin niillä vain muutaman, suurelta osin yhden, maailmanlaajuisen ilmastomallin tuloksia. Useimpien mallikokeiden mukaan talven rankimmat vuorokausisateet voimistuvat lähes yhtä suurella prosenttimäärällä kuin keskimääräiset sateet. Tulosten mukaan myös kesän rankkasateet voimistuvat, vaikkakaan eivät prosentuaalisesti yhtä paljon kuin talvella. Tämä pätee myös niille malliajoille, jotka ennustavat kesän

kokonaissademäärän pienenevän. Malliryppään, jossa 7 alueellista ilmastomallia tarkensi HadAM3H-ilmastomallia, tulosten (malliajojen keskiarvo) mukaan talven (joulu-helmikuu) suurin vuorokausisademäärä kasvoi 30 vuoden keskiarvona jaksosta 1961–1990 jaksoon 2071–2100 mennessä (A2-päästöskenaario) Pohjois-Lapissa 10–20 %, suuressa osassa Suomea 20–30 % ja Lounais-Suomessa sekä Tornionjokilaakson ympäristössä 30–40 %. Kesän (kesä-elokuu) osalta vastaava muutos oli alueellisesti hajanaisesti 10–40 %. Globaalin ilmastomallin merkitys tuloksiin näkyy selvästi, kun tarkastellaan toisen malliryppään vastaavia tuloksia. Toinen malliryppäs koostui kolmen alueellisen ilmastomallin tuloksista, joissa reunaehdot on otettu ECHAM5/MPI-OM-ilmastomallista. Nyt muutosarviot olivat talven osalta hajanaisesti 20 %:sta jopa yli 50 %:iin ja kesän osalta välillä 0-30 %.

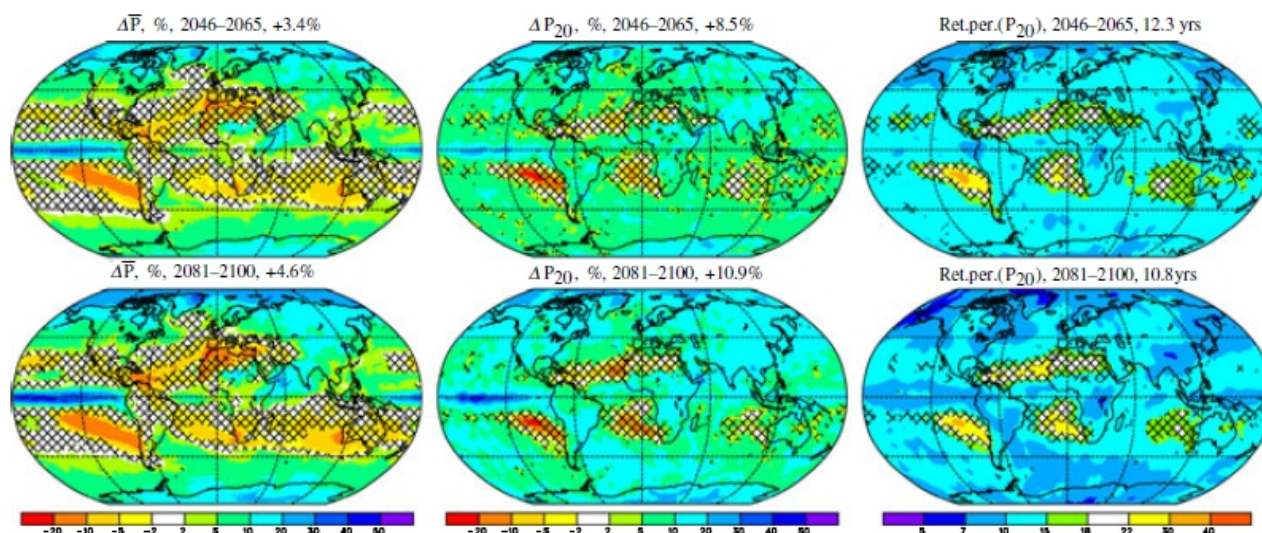
Alueellisten ilmastomallien tulosten pohjalta rankkasateiden muutoksia Euroopassa ovat tarkastelleet myös Rajczak et al. (2013) analysoimalla ENSEMBLES-projektissa (van der Linden & Mitchell, 2009) tuotettua malliaineistoa. Tutkimuksessa tarkasteltiin sekä indeksejä että toistuvuusajoja, käyttäen 10 alueellisen ilmastomallin, joiden horisontaalinen erotuskyky oli 25 km, tuloksia SRES-päästöskenaario A1B:lle. Reunaehtoina käytettiin kuuden globaalin ilmastomallin aineistoa. Käytetyistä indekseistä melko runsaita sateita edusti q90, joka on sadepäivinä (tässä päivät joiden sademäärä on yli 1 mm) sataneen sademäärän todennäköisyysjakauman 90 % prosenttipiste, eli se sademäärä jota enemmän sataa 10 % sadepäivistä. Toistuvuusarvoja taas määritettiin yhden ja viiden vuorokauden sadekertymille toistuvuusajoilla 2, 5, 10, 20, 50 ja 100 vuotta. Tutkimuksessa tarkasteltiin muutosta jaksosta 1970–1999 jaksoon 2070–2099 kaikille neljälle vuodenajalle erikseen. 10 malliajon mediaanina q90:n kasvu on Suomen alueella talvikuukausina (joulu-tammi-helmi) Etelä-Suomessa 15–20 % ja muualla Suomessa 20–30 %. Keväällä (maalis-huhti-toukokuu) ja syksyllä (syys-loka-marraskuu) muutos on pitkälti samansuuntainen talven kanssa, tosin muutosarvot ovat hieman, noin 5-10 prosenttiyksikköä pienempiä. Kesän osalta tilanne on erilainen. Ensinnäkin mallit eivät ole muutoksesta Etelä- ja Kaakkois-Suomessa yhtä yksimielisiä kuin muina vuodenaikoina. Näillä alueilla muutos jää mallijoukon mediaanina paikoin alle 5 %:n. Muualla Suomessa kasvu on 5-15 %:n luokkaa, Pohjois-Lapissa hieman enemmän. Suomen osalta tutkimuksessa tarkasteltiin vain viiden vuoden toistuvuustasoja vuodenajoittain yhden ja viiden vuorokauden sadekertymälle. Tulosten mukaan muutokset ovat alueellisesti varsin yhteneväisiä yhden ja viiden vuorokauden sadekertymille, muutoksen ollessa yleisesti hieman suurempi yhden vuorokauden sadannalle. Yhden vuorokauden sadannan viiden vuoden toistuvuustaso kasvaa mallitulosten mediaanina talvisin Etelä-Suomen noin 10 %:sta Pohjois-Suomen paikoin yli 30 %:iin. Kevään osalta

muutokset ovat hyvin pitkälti talven kaltaisia. Kesällä ja syksyllä vuorokausisadannan viiden vuoden toistuvuustason kasvaa varsin hajanaisesti eri puolella Suomea 15–30 %.

SREX-raportissa, joka kokoaa yhteen IPCC:n 4. arviointiraportin jälkeistä tutkimusta ääri-ilmiöiden osalta, ei käsitellä yksityiskohtaisesti äärisateiden muutoksia Suomessa, vaan yhteenveto muutoksista tehdään Pohjois-Euroopan tasolla. Raportti toteaa, perustuen lukuisten globaalien ja alueellisten ilmastomallien tuloksiin, että Pohjois-Euroopan osalta muutosten suhteen on suuri varmuus. Rankkasateiden voimakkuuden ja määrän sekä indeksin %DP10 (kts. selitys, osio 2.2) kasvu talvisin on raportin mukaan hyvin todennäköistä. Hieman tarkemmin SREX-raportissa käsitellään, perustuen Kharin et al. (2007) tutkimukseen, sateen vuosittaisen vuorokausimaksimin 20 vuoden toistuvuustason muutosta, ja toisaalta sitä, kuinka nykyilmastossa kerran 20 vuodessa toistuvan vuosittaisen vuorokausisademäärän toistuvuus aika muuttuu. Arviot perustuvat 14 globaalien ilmastomallien tuloksiin, jotka ovat osajoukko CMIP3-malliajoista. Pohjois-Euroopan aluekeskiarvona vuorokausisademäärän vuosimaksimin 20 vuoden toistuvuustaso kasvaa. Verrattuna jaksoon 1981–2000, kasvu on jaksossa 2046–2065 mennessä pienten päästöjen B1-skenaariossa 4 % ja suurten päästöjen A2-skenaariossa 10 %. Muutokset jaksossa 2081–2100 mennessä ovat vastaavasti 10 % ja 17 %. Edellä esitetyt luvut ovat mallijoukon mediaaneja. Mallien hajonta arvioissa, esim. A2-skenaariossa jaksolle 2081–2100, on jopa 3 %:sta 29 %:iin, eli ilmastomallien eroista johtuva epävarmuus on tässä tapauksessa varsin suurta. 1900-luvun lopun 20 vuoden toistuvuusajaa vastaavan sademäärän toistuvuus aika puolestaan pienenee. Jaksossa 2046–2065 mennessä 1900-luvun loppua vastaavan sademäärän toistumisaika on enää 15 vuotta B1-skenaariossa ja 12 vuotta A2-skenaariossa. Kuluvan vuosisadan lopulla toistuvuusajat ovat pienentyneet edelleen 11 ja 7 vuoteen (B1- ja A2-skenaariot). Ilmastomallien tuoma epävarmuus tuloksiin näkyy myös tässä, sillä A2-skenaariossa jaksolla 2081–2100 hajonta on 5–14 vuotta.

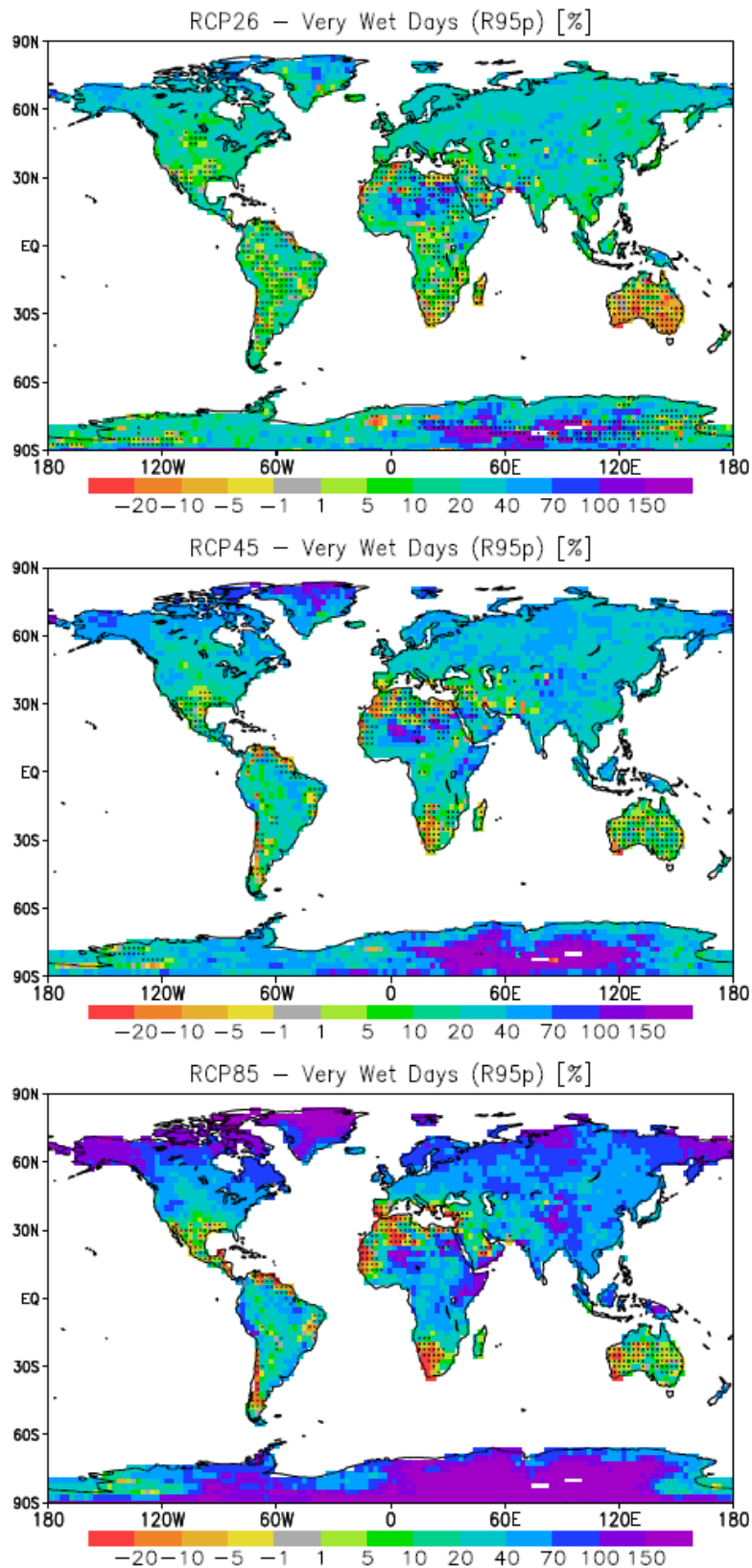
CMIP3-malliajojen pohjalta muutoksia äärisateissa ovat tutkineet myös mm. Orłowsky & Seneviratne (2012) sekä Lehtonen et al. (2013), joista jälkimmäisessä tutkimuksessa käytettiin lisäksi myös alueellisten ilmastomallien tuloksia. Lehtonen et al. (2013) tarkasteli vuodenaajoittain, kattaen koko Euroopan, muutoksia yhden ja viiden vuorokauden maksimisademäärissä. Globaalien ilmastomallien tulosten keskiarvona suurin vuorokausisademäärä kasvaa Suomen alueella A1B-skenaariossa vuosisadan loppuun mennessä (2081–2100) talvella noin 20–25 % ja muina vuodenaikoina 15–20 %. Viiden vuorokauden maksimisademäärälle muutokset ovat yleisesti 2–5 prosenttiyksikköä pienempiä kuin yhden vuorokauden sademäärälle. Alueellisten ilmastomallien tulokset keskittyivät yleisesti globaalien ilmastomallien tuottamien muutoshaarukoiden sisään.

Kharin et al. (2013) tarkasteli sateen vuorokausimaksimin 20 vuoden toistuvuusaikojen toistuvuustasojen (P_{20}) muuttumista samaan tapaan kuin edellä SREX-raportissa, mutta nyt käyttäen CMIP5-malliajojen tuloksia. Tämä tarjoaa konkreettisen tapauksen verrata CMIP3- ja CMIP5-malliajojen tuottamia tuloksia, pitäen kuitenkin mielessä erot käytetyissä päästöskenaarioissa. Käytetty malliaineisto koostui vuodet 1850–2005 kattavasta historia-aineistosta, jota verrattiin uusanalyysiin mallien suorituskyvyn selvittämiseksi, ja vuodet 2006–2100 kattavasta tulevaisuusaineistosta. Tutkimuksessa käytettiin päästöskenaarioita RCP2.6, RCP4.5 ja RCP8.5. Verratessa CMIP5-mallijoukon mediaanina jakson 1986–2005 toistuvuustasoja vastaavan jakson ERA-Interim-uusanalyysin arvoihin todettiin mallien olevan ± 10 % sisällä uusanalyysin arvoista Suomen alueella. Tulevaisuuden muutosten osalta tarkasteltiin jaksoja 2046–2065 ja 2081–2100 tuloksia suhteessa jaksoon 1986–2005. Yleisesti, kuten on jo esim. CMIP3-malliajojen pohjalta todettu, muuttuu sateen vuorokausimaksimin 20 vuoden toistuvuustaso enemmän kuin keskimääräiset sademäärät. Esim. P_{20} :n globaali muutos vuosisadan loppuun (2081–2100) mennessä mallijoukon keskiarvona RCP4.5-skenaariossa on +10,9 %, verrattuna +4,6 %:n muutokseen vastaavassa keskimääräisessä sateessa (kuva 5). Mallijoukon keskiarvona P_{20} :n muutos on kuvan 5 perusteella Suomen alueella RCP4.5-skenaariossa jaksolle 2046–2065 +10 %:n luokkaa ja vastaavasti jaksolle 2081–2100 noin 15 %. Muutokset ovat siis hieman suurempia kuin keskimäärin maailmanlaajuisesti. Jakson 1986–2005 P_{20} :n toistuvuusaika puolestaan pienenee ilmaston lämmitessä, eli nykyisin kerran 20 vuodessa esiintyvän vuorokausisadannan todennäköisyys kasvaa. Jaksoon 2046–2065 mennessä RCP4.5-skenaariossa toistuvuusaika tippuu globaalina mallijoukon mediaanina 12,3 vuoteen, Suomessa hieman pienemmäksi, reiluun 10 vuoteen. Vuosisadan lopulla (2081–2100) globaali mediaani on 10,8 vuotta ja Suomessa vajaat 10 vuotta. Suomen osalta arviot ovat lähinnä suuntaa antavia, sillä tutkimuksessa annettiin tarkempia lukuarvoja vain globaalilla tasolla ja alueelliset arviot perustuvat kuvan 5 tulkintaan. Verrattuna CMIP3-malliaineistoon perustuneeseen vastaavaan tutkimukseen (Kharin et al., 2007) tämän uuden tutkimuksen tulokset ovat pitkälti samaa luokkaa.



Kuva 5. CMIP5-mallijoukon mediaanimuutos keskimääräisessä vuosisadannassa (vasen pystyriivi) ja sateen vuotuisen vuorokausimaksimin 20 vuoden toistuvuusajan toistuvuustasossa (keskimmäinen pystyriivi) sekä jakson 1986–2005 20 vuoden toistuvuusajaa vastaavan vuorokausisademäärän toistuvuusajan muuttuminen (oikea pystyriivi). Yläriivillä on muutos jaksosta 1986–2005 jaksoon 2046–2065 ja alarivillä jaksosta 1968–2005 jaksoon 2081–2100. Muutokset edustavat RCP4.5-skenaarion tuloksia. Muutoksen globaali keskiarvo (toistuvuusajan tapauksessa mediaani) on esitetty kunkin kartan yläpuolisessa otsakkeessa. Alueet, joilla muutokset eivät ole tilastollisesti merkitseviä 5 %:n tasolla, on merkitty ristiviivoituksella. (Kharin et al., 2013)

Hieman yleisempien rankkasateiden piirteitä ja niiden muutoksia käsittelevät Sillman et al. (2013) nojautuen hekin uusiin CMIP5-malliajoihin. Muutoksia tarkasteltiin käyttäen joukkoa rankkasateita kuvaavia indeksejä. Nämä indeksit olivat RX5day, R10mm ja R95p. RX5day kuvaa suurinta viiden vuorokauden sadekertymää, R10mm päivien lukumäärää joiden sademäärä on yli 10 mm, ja R95p vuotuista sadekertymää niiden päivien osalta, joiden sademäärä on suurempi kuin nykyilmaston sadepäivien sademääräjakauman 95. prosenttipisteen sademäärä. Suhteessa jaksoon 1981–2000 verrattuna RX5day kasvaa tutkimuksen tulosten mukaan vuosisadan loppuun (2081–2100) mennessä Pohjois-Euroopan aluekeskiarvona ja mallijoukon mediaanina RCP4.5-skenaariossa vuositasolla 11 % (kesä-heinä-elokuussa 9 % ja joulutammihelmikuussa 10 %). Suomen alueella muutosarvot ovat välillä 10–20 %. Arvioiden epävarmuudesta kertoo kolmen päästöskenaarion (RCP2.6, RCP4.5 ja RCP8.5) ja käytettyjen ilmastomallien aiheuttama tulosten vaihteluväli, joka on vuositason muutokselle 7–23 %. R10-indeksi puolestaan kasvaa muutamalla päivällä vuosisadan loppuun mennessä. Tarkemmin Suomen alueella RCP2.6-skenaariossa mallijoukon mediaanina 1–4 päivällä. RCP4.5- ja RCP8.5-skenaarioissa vastaavasti 3–5 ja 4–8 päivällä. R95p:n muutos eri puolilla maailmaa on esitetty kuvassa 6. Suomen alueella muutos on vuosisadan loppuun mennessä RCP2.6-skenaarion 20–40 %:sta RCP8.5-skenaarion peräti 70–100 %:iin.



Kuva 6. R95p-indeksin suhteellinen [%] muutos mallijoukon mediaanina jaksosta 1981–2000 jaksoon 2081–2100 RCP2.6- (yllä), RCP4.5- (keskellä) ja RCP8.5-skenaariossa (alla). Pisteytetyillä alueilla muutos ei ole tilastollisesti merkitsevä 5 % merkitsevyystasolla (Sillmann et al., 2013).

Ruotsissa ja Tanskassa on tehty runsaasti tutkimusta lyhytkestoisten sateiden parissa keskittyen erityisesti kaupunkihydrologian tarpeisiin. Näistä tuloksista voidaan tehdä jossain määrin johtopäätöksiä myös Suomea koskien. Tutkimuksissa on käytetty pääasiassa alueellista ilmastomallinnusta, ja niissä on sovellettu myös tulosten tilastollista tarkentamista eri menetelmin. Tutkimukset kattavat sekä suurempia alueita (Larsen et al., 2009; Olsson & Foster, 2013) että yksityiskohtaisia tapaustutkimuksia (Semadeni-Davies et al., 2008; Olsson et al., 2009; Olsson et al., 2012; Olsson et al., 2013). Tutkimuksissa on tarkasteltu esim. 30 ja 60 minuutin sateen voimakkuuden 10 vuoden toistuvuustason muuttumista. Tulokset ovat pitkälti samansuuntaisia, keskiarvon näyttäessä noin 20 % kasvua vuosisadan viimeiselle kolmannekselle mennessä. Vastaavan vuorokausisateen kasvun ennustetaan jäävän pienemmäksi, Ruotsin keskiarvona 13 %:iin. Esimerkiksi Länsi-Ruotsissa jotakuinkin samalla leveyspiirillä Helsingin kanssa sijaitsevan Arvikan tapaustutkimuksessa (Olsson et al., 2013) 30 minuutin sateen intensiteetin 10 vuoden toistuvuustaso muuttui jakson 1961–1990 arvosta $6,0 \pm 0,4$ mm / tunti jaksoon 2071–2100 mennessä arvoon $7,4 \pm 0,4$ mm / tunti. Tutkimuksessa tehdyn analyysin mukaan rankkasateiden voimistumisen huomioiminen uudistettaessa alueen sadevesiviemärijärjestelmää kaksinkertaistaa uudistuksen kustannukset.

4. Yhteenveto

Tässä raportissa luotiin katsaus rankkasadeilmaston muuttumista tämän vuosisadan aikana käsittelevään tutkimukseen. Tuloksien osalta keskityttiin Suomeen ja sen lähialueille. Tämän lisäksi tarkasteltiin erilaisia lähestymistapoja aiheen tutkimiseen, käytettyihin menetelmiin ja niiden rajoituksiin.

Ilmaston lämpeneminen luo fysikaaliset edellytykset rankkasateiden voimistumiselle ilmakehän kosteussisällön kasvaessa. Muutos ei ole kuitenkaan suoraviivaista, vaan sen suuruus vaihtelee kautta sateen todennäköisyysjakauman ja ajallisen skaalan. Äärevät sateet ovat erityisen tärkeitä yhteiskunnan toiminnan kannalta, joten niiden, kuten ääri-ilmiöiden yleisestikin, tutkimiseen on panostettu viime vuosina enenevässä määrin. Mahdollisimman tarkat arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksesta rankkasateisiin ovat tärkeitä, sillä esim. viemärijärjestelmien tapauksessa nykyisin rakennettavat tai uusittavat järjestelmät ovat käytössä jotakuinkin tämän vuosisadan loppuun asti.

Äärisateet näyttävät kasvavan Suomessa hieman enemmän kuin keskimääräiset sateet, muutosten eron kasvaessa mitä harvinaisempia ja lyhytkestoisempia sateita tarkastellaan. Lehtonen et al. (2013) mukaan kesän suurimman vuorokausisademäärän muutoksen suuruutta voidaan yleisesti

approksimoida lisäämällä kesän keskimääräisen sademäärän ennustettuun muutokseen 10–20 prosenttiyksikköä. Toisaalta myös muutosarvioiden epävarmuudet kasvavat, sillä yleisten ilmastonmuutokseen liittyvien epävarmuuksien lisäksi mukaan tulee myös oma epävarmuutensa esim. ääriarvojen tilastolliseen analyysiin liittyen. Tämän lisäksi ilmastomalleilla on vaikeuksia juuri lyhytkestoisten rankkasateiden mallintamisessa, mikä luo oman epävarmuutensa ja lisää tarvetta erilaisille malliaineistoa korjaaville menetelmille. Vielä yksi epävarmuuslähde syntyy menetelmistä joilla ilmastomalliaineistoa tarkennetaan paikallisiin sovelluskohteisiin. Ilmastomallien kehittyessä sekä alueelliselta että ajalliselta erotuskyvyltään entistä paremmiksi, päästään suoraan kiinni yhä pienempialaisiin rankkasateisiin. Tosin esim. kaupunkihydrologian sovelluksissa tarvitaan sateen pistearvoja niinkin lyhyelle aikavälille kuin 10 minuuttia, joten näille ns. alasskaalausmenetelmille on käyttöä vielä tulevaisuudessa. Ilmastonmuutoksen edetessä kasvaa kuitenkin vähitellen todennäköisyys uusille sade-ennätyksille ja nykymittapuulla poikkeuksellisia sademääriä esiintyy yhä useammin kohti vuosisadan loppua. Esim. nykyilmastossa todennäköisyydeltään kerran 20 vuodessa esiintyvän vuorokausisademäärän todennäköisyys voi jopa kaksinkertaistua Suomen alueella.

Tässä raportissa käsiteltyjen tutkimusten tulosten kokoaminen yhdeksi rankkasateiden muutosarvioiksi on hyvin vaikeaa. Tutkimuksissa tarkastellut erilaiset rankkasademuuttujat ja käytetyt menetelmät ja ilmastomallikokoonpanot vaikeuttavat tulosten vertailua ja mahdollista yhdistämistä yhdeksi kokonaisuudeksi. Taulukossa 1 on yhteenveto raportissa käsiteltyjen tutkimusten tuloksista. Yleisesti äärevien sademuuttujien arvot näyttävät kasvavan Suomen alueella noin 10–30 % vuosisadan loppuun mennessä. Kuten keskimääräisten sateiden kohdalla, myös rankkasateille pätee, että muutos on sitä suurempi mitä pidemmälle kuluva vuosisataa tarkastellaan, sekä mitä voimakkaammin ilmahan kasvuhuonekaasupitoisuus skenaarioissa kasvaa.

Puhuttaessa sadeilmaston äärevöitymisestä ja sen vaikutuksista yhteiskuntaan kokonaisuudessaan pitäisi ottaa huomioon myös muutokset sateisuuden toisessa ääripäässä, eli esim. pitkien kuivuusjaksojen esiintymisen muutoksissa. Tätä puolta sadeilmastosta ei kuitenkaan käsitellä tässä raportissa, mutta esim. Sillmann et al. (2013) ja Lehtonen et al. (2013) tarkastelevat tuoreissa tutkimuksissaan tässä raportissa esiteltyjen tuloksien lisäksi myös pisimmän sateettoman jakson ja sateettomien päivien määrän muutosta.

Taulukko 1. Yhteenveto raportissa käsiteltyjen tutkimusten keskeisistä tuloksista. Muutosarvioissa esiintyvät vaihteluvälit edustavat muutoksen alueellista vaihtelua tarkastelualueella sekä tutkimustulosten esitystavasta syntyvää vaihteluväliä, ei eri ilmastomallien tulosten eroa. Esitetyt lukuarvot ovat tutkimuksessa käytetyn mallijoukon keskiarvoja tai mediaaneja. Muuttujista: q90 edustaa sadepäivinä (sademäärä yli 1 mm) sataneen sademäärän 90. prosenttipistettä, RX5day vuoden suurinta 5 vuorokauden sadesummaa ja R95p vuotuista sadekertymää niiden päivien osalta, joiden sademäärä on suurempi kuin nykyilmaston sadepäivien sademääräjakaman 95. prosenttipisteen sademäärä. Muuttujat joiden yhteydessä on merkintä (k.a.) kuvaavat tarkastelujakson keskiarvon muutosta. Mallikokoonpanoissa RCM tarkoittaa alueellista ilmastomallia ja GCM globaalia ilmastomallia. Kuva 3 tarjoaa tietoa taulukossa esiintyvien päästöskenaarioiden eroista.

Lähde	Muuttuja	Tarkastelujakso	Mallikokoonpano ja päästöskenaario	Muutosarvio
Suomi				
Aaltonen et al. 2008	Touko-syyskuun suurin 1 vrk sademäärä (k.a.)	1961-1990 -> 2071-2100	RCM SRES-A2	10 - 30 %
	Touko-syyskuun suurin 6h sademäärä (k.a.)		RCM SRES-A1B	10 - 40 %
Jylhä et al. 2009	Kesä-elokuun suurin 1 vrk sademäärä (k.a.)	1961-1990 -> 2071-2100	RCM SRES-A2 (mallikokoonpano 1)	10 - 40 %
			RCM SRES-A2 (mallikokoonpano 2)	0 - 30 %
Rajczak et al. 2013	Kesä-elokuun q90	1970-1999 -> 2070-2099	RCM SRES-A1B	5 - 20 %
	1 vrk sademäärän 5v toistuvuustaso			10 - 30 %
	5 vrk sademäärän 5v toistuvuustaso			5 - 25 %
Lehtonen et al. 2013	Kesä-elokuun suurin 1 vrk sademäärä (k.a.)	1971-2000 -> 2081-2100	GCM SRES-A1B	15 - 20 %
	Kesä-elokuun suurin 5 vrk sademäärä (k.a.)			10 - 15 %
Kharin et al. 2013	1 vrk sademäärän 20v toistuvuustaso	1986-2005 -> 2046-2065	GCM RCP4.5	10 %
		1986-2005 -> 2081-2100		15 %
Sillman et al. 2013	RX5day (k.a.)	1981-2000 -> 2081-2100	GCM RCP4.5	10 - 20 %
	R95p (k.a.)			20 - 70 %
Pohjois-Euroopan aluekeskiarvo				
IPCC 2012	1 vrk sademäärän 20v toistuvuustaso	1981-2000 -> 2046-2065	GCM SRES-A2	10 %
		1981-2000 -> 2081-2100		17 %
Ruotsi				
Olsson & Foster 2013	30 minuutin sademäärän 10v toistuvuustaso	1981-2010 -> 2071-2100	RCM SRES-B2 / A1B / A2	23 %
	1 vrk sademäärän 10v toistuvuustaso			13 %

5. Lähteet

- Aaltonen, J., Hohti, H., Jylhä, K., Karvonen, T., Kilpeläinen, T., Koistinen, J., Kotro, J., Kuitunen, T., Ollila, M., Parvio, A., Pulkkinen, S., Silander, J., Tiihonen, T., Tuomenvirta, H. ja Vajda, A., 2008. Rankkasateet ja taajamatulvat (RATU). Suomen ympäristö 31/2008, Luonnonvarat, 123 s. Suomen ympäristökeskus (SYKE).
- Ahmed, K. F., Wang, G., Silander, J., Wilson, A. M., Allen, J. M., Horton, R. & Anyah, R. (2013): Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the U.S. northeast. *Global and Planetary Change*, **100**, 320-332.
- Berg, P., Moseley, C. & Haerter, J. O. (2013): Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. *Nature Geoscience*, **6**, 181-185.
- Hanel, M. & Buishand, T. A. (2010): On the value of hourly precipitation extremes in regional climate model simulations. *Journal of Hydrology*, **393**, 265-273.
- Hundecha, Y. & Bardossy, A. (2008): Statistical downscaling of extreme of daily precipitation and temperature and construction of their future scenarios. *International Journal of Climatology*, **28(5)**, 589-610.
- IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the IPCC Fifth Assessment Report.
- Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Ruokolainen, L., Saku, S. ja Seitola, T., 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti 2009. Ilmatieteen laitos, *Raportteja 2009:4*, 102 s.
- Kharin, V., Zwiers, F. W., Zhang, X. & Hegerl, G. C. (2007): Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations. *Journal of Climate*, **20(8)**, 1419-1444.
- Kharin, V., Zwiers, F. W., Zhang, X. & Wehner, M. (2013): Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Climatic Change*, DOI 10.1007/s10584-013-0705-8.
- Larsen, A. N., Gregersen, I. B., Christensen, O. B., Linde, J. J. & Mikkelsen, P. S. (2009): Potential future increase in extreme one-hour precipitation events over Europe due to climate change. *Water Science & Technology*, **60**, 2205-2216.
- Lehtonen, I., Ruosteenoja, K. & Jylhä, K. (2013): Projected changes in European extreme precipitation indices on the basis of global and regional climate model ensembles. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.3758
- Mishra, V., Dominiguez, F. & Lettenmaier, D. P. (2012): Urban precipitation extremes: How reliable are regional climate models? *Geophysical Research Letters*, **39**, L03407.

- Nevanlinna, H. (2008, toim.): Muutamme ilmastoa. Ilmatieteen laitoksen tutkijoiden katsaus ilmastomuutokseen, 237 s.
- Olsson, J., Berggren, K., Olofsson, M. & Viklander, M. (2009): Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: A case study in Kalmar City, Sweden. *Atmospheric Research*, **92**, 364-375.
- Olsson, J., Willén, U. & Kawamura, A. (2012): Downscaling extreme short-term regional climate model precipitation for urban hydrological applications. *Hydrology Research*, **43**, 341-351.
- Olsson, J. & Foster, K. (2013): Short-term precipitation extremes in regional climate simulations for Sweden: historical and future changes. *Hydrology Research*, In Press, DOI: 10.2166/nh.2013.206.
- Olsson, J., Amaguchi, H., Alsterhag, E., Dåverhög, M., Adrian, P.-E. & Kawamura, A. (2013): Adaptation to climate change impacts on urban storm water: a case study in Arvika, Sweden. *Climatic Change*, **116**, 231-247.
- Onof, C. & Arnbjerg-nielsen, K. (2009): Quantification of anticipated future changes in high resolution design rainfall for urban areas. *Atmospheric Research*, **92**, 350-363.
- Orlowsky, B. & Seneviratne, S. I. (2012): Global changes in extreme events: regional and seasonal dimension. *Climatic Change*, **110**, 669-696.
- Rajczak, J., Pall, P. & Schär, C. (2013): Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine Region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **118**, 1-17.
- Ruosteenoja, K. (2013): Maailmanlaajuisiin ilmastomalleihin perustuvia lämpötila- ja sademääräskenaarioita. SETUKLIM verkkoraportti (27.3.2013), http://ilmatieteenlaitos.fi/c/document_library/get_file?uuid=c4c5bf12-655e-467a-9ee0-f06d8145aaa6&groupId=30106
- Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G. & Gustafsson, L.-G. (2008): The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system. *Journal of Hydrology*, **350**, 100-113.
- Semenov, M. (2008): Simulation of extreme weather events by stochastic weather generator. *Climate Research*, **35**, 203-212.
- Sillmann, J., Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X. & Bronaugh, D. (2013): Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, doi:10.1002/jgrd.50188
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J. & Meehl, G. A. (2012): An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 485-498.
- Themeßl, M. J., Gobiet, A. & Leuprecht, A. (2011): Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *International Journal of Climatology*, **31(10)**, 1530-1544.
- Tryhorn, L. & DeGaetano, A. (2011): A comparison of techniques for downscaling extreme precipitation over the Northeastern United States. *International Journal of Climatology*, **31**, 1975-1989.
- van der Linden, P. & Mitchell, J. F. B. (2009): ENSEMBLES: Climate Change and Its Impacts: Summary of Research and Results From the ENSEMBLES Project, 160 pp., MetOffice Hadley Centre, Exeter.

- Venäläinen A., Jylhä K., Kilpeläinen T., Saku S., Tuomenvirta H., Vajda A. & Ruosteenoja K. (2009): Recurrence of heavy precipitation, dry spells and deep snow cover in Finland based on observations. *Boreal Environment Research*, **14**, 166-172.
- Vrac, M., Marbaix, P., Peillard, D. & Naveau, P. (2007): Non-linear statistical downscaling of present and LGM precipitation and temperatures over Europe. *Climate of the Past*, **3**, 669-682.
- Wilby, R.L. & Wigley, T.M.L. (1997): Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, **21**, 530–548.
- Willems, P., Arnbjerg-nielsen, K., Olsson, J. & Nguyen, V. T. V. (2012): Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. *Atmospheric Research*, **103**, 106-118.
- Willems, P. & Vrac, M. (2011): Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change. *Journal of Hydrology*, **402**, 193-205.