Turun yliopiston maantieteen laitos

Johanna Hohenthal

METEOROLOGISEN KUIVUUDEN ESIINTYMINEN POHJOIS-EUROOPASSA

Maantieteen pro gradu -tutkielma

Asiasanat: ilmastonmuutokset, kuivuus, meteorologia, Pohjois-Eurooppa, sademäärä

Turku 2009

TURUN YLIOPISTO
Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta / Maantieteen laitos

HOHENTHAL, JOHANNA: Meteorologisen kuivuuden esiintyminen Pohjois-Euroopassa

Pro gradu -tutkielma, 86 s., 41 liites.
40 op
Maantiede
Lokakuu 2009

Pohjois-Euroopan alueella pitkittyneet, normaalitasoa alhaisempien sademäärien aiheuttamat meteorologiset kuivuusjaksot ovat melko harvinaisia. Tämä johtuu alueella normaalisti vallitsevien lauhkeiden länsituulten tuomasta kosteudesta. Toisinaan länsituulten vaikutus kuitenkin heikkenee ja kuivaa mantereisempaa ilmaa pääsee virtaamaan alueelle. Pohjois-Euroopan keskimääräiset vuosisademäärät ovat kasvaneet viime vuosisadan kuluessa ja niiden odotetaan kasvavan edelleen tulevaisuudessa ilmastonmuutoksen jatkuessa. Kuivuuden kannalta eri aikavälien sadannan minimiarvoissa tapahtuvat muutokset ovat kuitenkin merkityksellisempiä kuin keskiarvoissa tapahtuvat muutokset.

Tässä tutkimuksessa meteorologisen kuivuuden esiintymisessä tapahtuneita ajallisia muutoksia ja alueellisia eroja tarkastellaan Pohjoismaiden ja Baltian maiden alueella sijaitsevien 15 säähavaintoaseman sadetilastojen avulla. Tilastot ulottuvat pisimmillään 1800-luvun puolesta välistä vuoteen 2007. Tilastoista määritettiin pisimmät, mihin tahansa aikaan vuodesta ja touko-elokuussa alkaneet, peräkkäisistä päivistä muodostuvat sadekertymäjaksot, joiden kokonaissademäärät jäivät alle 10, 100 ja 400 mm raja-arvojen. Tilastoista laskettiin lisäksi vuosittaiset ja kesäkausittaiset alle 1,0 / 0 mm ja alle 0,1 mm sadepäivien lukumäärät. Tutkimuksessa tarkastellaan myös kuivuuden esiintymisessä tulevaisuudessa mahdollisesti tapahtuvia muutoksia kolmen aseman ilmastomallinnuksiin perustuvien, pisimmillään vuoteen 2100 ulottuvien, päivittäisten sadetilastojen avulla. Suomen osalta tarkastellaan lisäksi pintamaakerroksen kosteusvajeeseen liittyvän kuivuuden alueellista ja ajallista vaihtelua vuosien 1961-1997 sekä poikkeuksellisen kuivan vuoden 2006 maankosteusindeksitilastojen avulla. Lopuksi tarkastellaan tilastollisesti 10 mm sadekertymäjaksojen pituuden ja maankosteusindeksin mukaisten ”kuivuuspäivien” lukumäärän välistä yhteyttä.

Tulosten mukaan erityisesti koko vuoden pisimmät 100 ja 400 mm sadekertymäjaksot ovat olleet tarkastelujaksoilla keskimäärin pitempiä Pohjois-Euroopan pohjois- ja itäosissa, kuin länsi- ja eteläosissa. Suurin osa ajallisista trendeistä on ollut tilastollisesti ei-merkitseviä tai väheneviä. Joitakin kasvavia trendejä on kuitenkin esiintynyt erityisesti Pohjois-Euroopan eteläosissa kesän aikasarjoissa. Tuloksiin vaikuttavat kuitenkin mahdollisesti lukuisat aineistojen laatuun liittyvät virhelähteet.

Suomessa pisimmät maankosteusindeksin mukaiset kuivuusjaksot esiintyvät yleensä rannikkoalueilla, joilla myös ”kuivuuspäivien” lukumäärät ovat suurimmat. ”Kuivuuspäivien” osuus 10 mm sadekertymäjakson pituudesta on yleensä sitä suurempi ja ”kuivuuspäiviin” yhteydessä olevan 10 mm sadekertymäjakson teoreettinen minimipituus sitä lyhyempi, mitä suurempi on sadekertymäjakson aikainen haihdunta ja mitä alhaisempi on jaksoa edeltävä maankosteus.

Asiasanat: ilmastonmuutokset, kuivuus, meteorologia, Pohjois-Eurooppa, sademäärä

Sisällysluettelo

1 JOHDANTO ... 3

2 KUIVUUDEN ESIINTYMINEN JA KUIVUUSTUTKIMUS ... 5

2.1 KUIVUUS ILMIÖNÄ ... 5
2.1.1 Kuivuuden käsitteellinen määrittely ... 5
2.1.2 Meteorologinen kuivuus ja sen vaikutukset ... 6
2.2 KUIVUUDEN ANALYSOINTI JA KUIVUUSJAKSOJEN OMINAISUUDET ... 10
2.2.1 Kuivuusjaksojen analyysimenetelmät ... 10
2.2.2 Kuivuusjaksojen ominaisuudet ... 11
2.2.3 Kuivuuden aika- ja aluemittakaava ... 12
2.3 METEOROLOGISEN KUIVUUDEN ESIINTYMINEN POHJOIS-EUROOPAN ILMASTOSSA ... 13
2.3.1 Pohjois-Euroopan kosteusolosuhteet ... 13
2.3.2 Pohjois-Euroopan alueella esiintyneet kuivuusjaksot ... 14
2.3.3 Kuivuusjaksojen meteorologiset taustatekijät ... 17
2.3.4 Ilmastonmuutoksen vaikutus kuivuusjaksojen esiintymiseen ... 19

3 AINEISTO JA MENETELMÄT ... 22

3.1 TUTKIMUKSEN YLEINEN RAKENNE ... 22
3.2 SADETILASTOIHIN PERUSTUVAT KUIVUUSANALYYSIT ... 24
3.2.1 Sadehavaintotilastot ... 24
3.2.2 Meteorologisen kuivuuden operationaalinen määrittely ja analysoidut muuttujat ... 24
3.2.3 Tilastoaineistojen esikäsittely ... 26
3.2.4 Kuivuuden alueellisen ja ajallisen vaihtelun analysointi ... 26
3.2.5 Ilmastomallinnuksiin perustuvien sadetilastojen analyysit ... 27
3.3 MAANKOSTEUSINDEKSIIN PERUSTUVAT KUIVUUSANALYYSIT ... 28
3.3.1 Kuivuuden määrittely maankosteuden perusteella ... 28
3.3.2 Maankosteusindeksitilastoista analysoidut muuttujat ... 29
3.3.3 Kuivuuden alueellisen ja ajallisen vaihtelun analysointi ... 30
3.3.4 Hilaruutumuotoiset maankosteusindeksiaineistot ... 31
3.4 METEOROLOGISEN KUIVUUDEN JA MAANKOSTEUDEN VÄLINEN YHTEYS ... 31

4 TULOKSET ... 35

4.1 PISIMMÄT SADEKERTYMÄJAKSOT ... 35
4.1.1 Alueellinen vaihtelu ... 35
4.1.2 Ajoittuminen ... 37
4.1.3 Jaksojen pituudessa tapahtuneet muutokset ... 40
4.1.4 Jaksojen pituuden tulevat muutokset ... 41
4.2 POUTAPÄIVIEN LUKUMÄÄRÄT ... 42
4.2.1 Alueellinen vaihtelu ... 42
4.2.2 Lukumäärissä tapahtuneet muutokset ... 44
4.2.3 Tulevaisuudessa tapahtuvat lukumäärän muutokset ... 45
4.3 MAANKOSTEUSINDEKSIIN PERUSTUVAT KUIVUUSANALYYSIT ... 45
4.3.1 Kuivuusjaksojen lukumäärän vaihtelu ... 45
4.3.2 Pisimpien kuivuusjaksojen pituuden vaihtelu ... 48
4.3.3 ”Kuivuuspäivien” lukumäärän vaihtelu ... 51
4.4 SADEKERTYMÄJAKSOJEN PITUUDEN JA ”KUIVUUSPÄIVIEN” LUKUMÄÄRÄN VÄLINEN YHTEYS ... 57

5 TULOSTEN TARKASTELU ... 62

5.1 METEOROLOGISEN KUIVUUDEN ESIINTYMINEN POHJOIS-EUROOPASSA ... 62
5.1.1 Alueellinen vaihtelu ... 62
5.1.2 Vuodenaikaisvaihtelu ... 63
5.2 METEOROLOGISEN KUIVUUDEN AJALLISIIN TRENDEIHIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT ... 63
5.2.1 Muutokset sademäärissä ... 63
5.2.2 Sadehavaintoaineistojen laatuun liittyvät virhelähteet ... 67
5.2.3 Yhteenveto meteorologisen kuivuuden esiintymisessä havaituista trendeistä ... 69
5.3 MAANKOSTEUTEEN LIITTYVÄN KUIVUUDEN ESIINTYMINEN SUOMESSA ... 72
5.4 TUTKIMUKSESSA KÄYTETTYJEN MENETELMIEN SOVELTUVUUS KUIVUUSANALYYSIIN ... 73
5.4.1 Pisimmät sadekertymäjaksot ja poutapäivien lukumäärät ... 73
5.4.2 Maankosteusindeksi kuivuuden mittarina ... 74
5.4.3 Meteorologisen kuivuuden vaikutukset maankosteuteen ... 75

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET 78
KIITOKSET 80
LÄHTEET 81
LIITTEET 87

1 Johdanto

1940-luvun alkuvuosina vesivoiman tuotanto oli Suomessa normaalitasoa alhaisempaa ja leipäviljan sadot jäivät aiempaa pienemmiksi (Silander & Järvinen 2004). Nämä ongelmat eivät johtuneet yksin sodankäynnistä, vaan myös vallitsevien meteorologisten tekijöiden aiheuttamista poikkeusolosuhteista. Vuosien 1939–1941 sademäärät olivat huomattavasti pitkänajan keskiarvon alapuolella ja esimerkiksi vuoden 1941 keskivirtaama Suomen vesistöissä oli vain 1 600 m³/s, kun se normaalivuonna on noin 3 200 m³/s. 1940-luvun alun kuivuus on ollut voimakkain ja pitkäkestoisin säännöllisten meteorologisten havaintojen alkamisen jälkeen Suomessa esiintynyt yhtenäinen kuivuusjakso. Myös esimerkiksi vuosina 2002–2003 Pohjois-Euroopassa kärsittiin poikkeuksellisesta kuivuudesta, mutta kyseinen kuivuusjakso kesti kuitenkin vain noin yhdeksän kuukautta ja sadannan ja virtaamien vaje ei ollut yhtä suurta kuin 1940-luvun alussa. Rauhanajan olosuhteissa ja kehittyneemmän vesijohtoverkoston puitteissa eivät kuivuuden seurauksetkaan olleet yhtä haitallisia.

1940- ja 2000-lukujen alussa esiintyneiden kuivuusjaksojen kaltaisia meteorologisia poikkeusolosuhteita esiintyy Pohjois-Euroopassa suhteellisen harvoin. Esimerkiksi 1940-luvun alun poikkeuksellisen kuivuuden toistumisajaksi Suomessa on arvioitu yli 100 vuotta (Silander & Järvinen 2004). Pohjois-Eurooppa onkin yleisesti tunnettu runsaista vesivaroistaan ja pitkällä aikavälillä veden riittävyys ei tällä alueella juuri muodostu ongelmaksi. Päinvastoin haittaa aiheutuu useimmiten liiallisten sateiden tai sulamisvesien aiheuttamista tulvista. Esiintyessään kuivuusjaksojen vaikutukset ovat kuitenkin ulottuneet yleensä laajoille maantieteellisille alueille ja koskettaneet useampia yhteiskunnan sektoreita kuin tulvien vaikutukset. Kuivuus poikkeaa muista luonnonkatastrofeista myös siinä, että se alkaa ja etenee hitaasti (Gillette 1950, cit. Wilhite & Glantz 1985: 111; Wilhite & Buchanan-Smith 2005: 5). Toisaalta pitkään jatkuva vesivaje saattaa aiheuttaa myös vaikutusten kumuloitumista, jolloin kuivuuden vaikutukset tuntuvat alueella pitkään.

Kuivuus ääri-ilmiö, joka harvinaisuudestaan huolimatta on kuitenkin osa luonnollista sääolojen vaihtelua, ja johon sen vuoksi tulisi osata varautua (Glantz 2003). Kuivuutta on kuitenkin tutkittu Pohjois-Euroopan alueella vähemmän kuin runsaiden sademäärien aiheuttamia ongelmia ja näin ollen esimerkiksi tiedot kuivuusjaksojen esiintymisfrekvensseistä ovat harvinaisia. Kuivuustutkimus tulisi kuitenkin lukea osaksi yleistä vesivarojen tutkimusta ja niihin liittyviin uhkiin varautumista. Esimerkiksi Euroopan komission tiedonannossa veden niukkuuden ja kuivuuden asettamiin haasteisiin vastaamisesta Euroopan unionissa on todettu seuraavaa: ”Jotta veden niukkuutta ja kuivuutta koskevat poliittiset toimet voivat olla mahdollisimman tehokkaita, niiden on perustuttava **korkealaatuiseen tietoon ja tiedotukseen** haasteen laajuudesta ja ennustetuista suuntauksista. Nykyiset eurooppalaiset ja kansalliset arviointi- ja seurantaohjelmat ovat epäyhtenäisiä ja epätäydellisiä. Sen vuoksi on ennen muuta paikattava tiedoissa olevat aukot ja varmistettava tietojen vertailtavuus koko EU:ssa.” (Euroopan komissio 2007, s. 5). Myös ilmastonmuutoksen vaikutusten selvittämiseksi kuivuuden esiintymisessä tapahtuneiden ajallisten muutosten tutkiminen on tärkeää. Useiden tutkimusten mukaan ilmastonmuutos lisää kuivuuden aiheuttamia ongelmia erityisesti Etelä-Euroopan alueella (esim. Beniston ym. 2007; Hanson ym. 2007; Sheffield and Wood 2008). Pohjois-Euroopassa sen sijaan keskimääräisten vuosisademäärien on jo nyt havaittu kasvaneen (Trenberth ym. 2007) ja tämän kehityksen on arvioitu jatkuvan todennäköisesti myös tulevaisuudessa (Christensen ym. 2007). On kuitenkin toistaiseksi epäselvää, kuinka sadannan ääriarvot ja haihdunta sekä niiden myötä kuivuuden esiintyminen Pohjois-Euroopan alueella tulevat muuttumaan.

Kuivuuden objektiivisen tutkimisen tekee kuitenkin hankalaksi ilmiön suhteellisuus. Kuivuuden vaikutukset eri ihmisryhmiin, yhteiskunnan sektoreihin ja ekosysteemeihin eri

alueilla ovat hyvin erilaisia. Kuivuus myös määritellään käytännössä yleensä hyvin eri tavoin katsantokannasta riippuen ja yhden yleispätevän määritelmän luominen kuivuudelle onkin osoittautunut mahdottomaksi (Dracup ym. 1980; Wilhite & Glantz 1985). Kuivuuden lukuisat määritelmät on kuitenkin perinteisesti jaettu meteorologisiin, maataloudellisiin, hydrologisiin ja sosioekonomisiin määritelmiin sen mukaan tarkastellaanko niissä kuivuutta sademäärien, maataloustuotannon kannalta riittävän maankosteuden, virtaamien tai vesivarastojen vai yhteiskuntien käyttöveden riittävyyden kannalta.

Kuivuuden käsitteelliseen määrittelyyn liittyvät vaikeudet heijastuvat myös operationaalisella tasolla analysoitaessa kuivuusjaksoja erilaisista meteorologisten tai hydrologisten muuttujien havaintoaineistoista. Sademäärien vaihtelun vaikutusten ilmenemiseen hydrologisen kierron muissa osissa vaikuttavat useat eri tekijät, joiden analysoimiseksi on kehitetty esimerkiksi lukuisia monimuuttujaindeksejä. Nämä indeksit antavat suhteellisen tarkkaa tietoa kuivuusjaksojen esiintymisajankohdista, mutta ne ovat kuitenkin monimutkaista ja niiden käyttöön vaaditaan paljon aineistoja. Tämän vuoksi kuivuustutkimuksissa on usein keskitytty tarkastelemaan yksinkertaista sadannan vajeen suuruutta sadetilastojen avulla. Yhtä ainoaa standardimenetelmää tähänkään ei kuitenkaan ole olemassa. Yksinkertaisen sademääriin perustuvan kuivuuden kvantitatiivisen määritelmän luominen kuivuuden vaikutusten ilmenemiseen perustuen olisi kuitenkin hyödyllistä kuivuusjaksojen objektiivisen tunnistamisen parantamiseksi.

Tämän tutkielman tavoitteena on tarkastella sademäärien vaihtelun aiheuttaman meteorologisen kuivuuden esiintymisen ajallista ja alueellista vaihtelua Pohjois-Euroopassa. Lisäksi tarkastellaan Suomessa esiintyneitä kuivia jaksoja ja kuivuuspäivien lukumääriä useampaan muuttujaan perustuvan maankosteusindeksin avulla. Lopuksi pyritään luomaan eräänlainen vähäsateisuuden seurauksiin kytkeytyvä kuivuuden operationaalinen määritelmä tutkimalla meteorologisen kuivuuden ja maankosteuden vaihtelun välistä yhteyttä.

Tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

1. Kuinka meteorologisen kuivuuden esiintyminen on muuttunut viimeisten noin sadan vuoden aikana Pohjois-Euroopassa?
2. Kuinka meteorologisen kuivuuden esiintyminen mahdollisesti muuttuu ilmastonmuutoksen vaikutuksesta tämän vuosisadan kuluessa Pohjois-Euroopassa?
3. Kuinka pintamaan kosteuden avulla määritelty kuivuus on vaihdellut alueellisesti Suomessa 1960-luvulta lähtien?
4. Millainen on meteorologisen ja maankosteuteen liittyvän kuivuuden välinen suhde?

Tutkimus on osa laajempaa Ilmastonmuutoksen sopeutumistutkimusohjelma ISTOn (2006–2010) sään ääri-ilmiöitä tutkivaa ACCLIM-hanketta ja se on toteutettu yhteistyössä Ilmatieteen laitoksen kanssa. Tutkimuksen tuloksia on tavoitteena hyödyntää myös yhteispohjoismaisessa Climate and Energy Systems (CES) –hankkeessa (2007–2010) (Snorrason & Harðardóttir 2008).

2 Kuivuuden esiintyminen ja kuivuustutkimus

2.1 Kuivuus ilmiönä

2.1.1 Kuivuuden käsitteellinen määrittely

Yleisellä tasolla kuivuus määritellään usein normaalitasoa alhaisempien sademäärien tai odotettujen vuodenaikaissateiden myöhästymisen tai kokonaan tulematta jäämisen aiheuttamaksi luonnonhasardiksi, joka pitkittyessään johtaa ihmisyhteisöjen ja luonnon ekosysteemien käytettävissä olevan veden määrän vähenemiseen (Wilhite & Glantz 1985; Wilhite & Buchanan-Smith 2005). Kuivuuden määritteleminen yksin sademäärien vaihtelun perusteella ei kuitenkaan huomioi ilmiön kaikkia ulottuvuuksia ja onkin siksi usein riittämätön kuivuusjaksojen tunnistamisen kannalta käytännössä. Kuivuuden syntyyn vaikuttavat sadannan ohella myös muut ympäristötekijät, kuten edeltävät kosteusolosuhteet ja haihdunnan voimakkuus (Weber & Nkemdirim 1998). Kuivuudella on lisäksi myös yhteiskunnallinen ulottuvuus, sillä yhteiskuntien ja ekosysteemien käyttöveden tarpeen määrä ja sen vaihtelu vaikuttavat kuivuuden esiintymiseen. Kuivuutta voidaankin yleisellä tasolla analysoida *käytettävissä olevan veden määrän* ja *veden tarpeen* välisen suhteen kautta (Wilhite & Glantz 1985; Weber & Nkemdirim 1998).

Kuivuutta esiintyy kaikilla maailman ilmastovyöhykkeillä, mutta sen esiintymisfrekvenssi vaihtelee (Wilhite & Buchanan-Smith 2005). Mikäli veden tarpeen voidaan katsoa olevan pysyvästi alueellisen ilmaston määritelmän aikakehyksessä suurempaa kuin vedentarjonnan, on kyseessä aridisuus (Maracchi 2000; EEA 2001). Tämä tulee erottaa kuivuudesta, joka on tilapäinen ilmiö (Weber & Nkemdirim 1998; Wilhite & Buchanan-Smith 2005). Myös ilmastolle tyypilliset kuivat kaudet tulee erottaa varsinaisesta kuivuudesta. Kuivuus onkin siis määriteltävä aina suhteessa tarkasteltavaan ajankohtaan sidottuun alueellisen vedentarjonnan ”normaalitasoon”, mikä tekee kuivuudesta ennen kaikkea suhteellisen eikä absoluuttisen ilmiön. Ajanjaksosta, jolloin vedentarjonnan taso on alentunut suhteessa tarkasteltavalle ilmastolle ominaiseen ajankohdan normaalitasoon nähden, käytetään tässä työssä nimitystä *kuivuusjakso* (engl. *dry spell*, vrt. esim. Venäläinen ym. 2007), erotukseksi ilmastolle tyypilliseksi määritellyistä kuivista kausista (engl. *dry season*) tai aridisuudesta.

Myös ihmisen aikaansaamat maankäytön muutokset voivat johtaa vedenkäyttötarpeen lisääntymiseen tai maaperän vedenpidätyskyvyn heikkenemiseen ja aiheuttaa kuivuusjaksojen yleistymistä tai voimistumista (Wilhite & Glantz 1985; Maracchi 2000). On esimerkiksi ollut epäselvää johtuiko Sahelin alueella Afrikassa 1970-luvun alusta 1980-luvun lopulle jatkunut kuivuus ilmastotekijöistä vai väestömäärien kasvusta ja maankäytön muutoksista vai näiden yhdistelmästä (Hulme 2001). Semiarideilla alueilla ”normaalin” ja ”poikkeuksellisen” kuivuuden välinen rajanveto voi myös olla vaikeaa. Pahimmillaan maankäytön muutokset ja kuivuusjaksojen lisääntyminen voivat vähäsateisilla alueilla yhdessä ihmistoimien kanssa johtaa aavikoitumiseen (Kundzewics 1997). Pohjois-Euroopassa kuivuusjaksot eivät ole yleinen hasardi, mutta myös täällä vedenkäyttötarpeen kasvu ja kilpailu eri toimijoiden välillä voivat voimistaa ajoittain esiintyvän vähäsateisuuden haitallisia vaikutuksia. Kuivuus onkin sosioekonomiselta kannalta katsottuna aina meteorologisten ja yhteiskunnallisten tekijöiden vuorovaikutuksesta aiheutuva ilmiö (Wilhite & Glantz 1985). Ihminen voi vaikuttaa kuivuuden esiintymiseen myös epäsuorasti päästämällä ilmakehään auringon säteilyä pidättäviä kasvihuonekaasuja, minkä seurauksena ilmakehä lämpenee, potentiaalinen haihdunta kasvaa ja ilmakehän kiertoliikkeet muuttuvat, millä on vaikutusta sateiden jakautumiseen maapallolla (Trenberth 1998; Huntington 2006).

Toinen seikka, joka tekee kuivuudesta suhteellisen ilmiön, on se, että käytettävissä olevan veden määrän ja veden tarpeen välinen suhde on aina sidoksissa veden käyttäjän näkökulmaan (Wilhite & Glantz 1985; Wilhite & Buchanan-Smith 2005). Muutaman viikon kestävä sateeton jakso voi olla tappava esimerkiksi runsaasti vettä tarvitsevan kasvin kannalta, mutta jäädä huomaamatta vesivoiman tuotannossa. Lukuisten näkökantojen huomioiminen on kuitenkin yksittäisissä tutkimuksissa usein vaikeaa, minkä vuoksi on keskityttävä tarkastelemaan vain rajattua määrää muuttujia tai kuivuuden vaikutuskohteita.

Jotta kuivuustutkimuksen lähtökohdat ja tarkasteltavat muuttujat pystyttäisiin selkeästi määrittelemään, on kuivuutta pyritty jaottelemaan erilaisiin kuivuustyyppeihin, jotka havainnollistavat kuivuuden ilmenemistä kausaalisesti eri tavoin ja eri aikaan hydrologisen kierron eri osissa (Dracup ym. 1980). Kirjallisuudesta löytyy hieman toisistaan poikkeavia kuivuustyyppien nimityksiä ja jaotteluita. Vuonna 1980 kuivuuden määrittelyä käsittelevässä artikkelissaan Dracup ym. jaottelivat kuivuuden *meteorologiseen*, *maataloudelliseen* ja *hydrologiseen* kuivuuteen. Heidän kirjoituksessaan esiintyi myös mainintoja kuivuuden sosiaalisista, poliittisista ja taloudellisista vaikutuksista. Myöhemmin Wilhite ja Glantz (1985) esittelivät 150 kuivuuden määritelmään perustuvan jaottelunsa, johon kuului *meteorologisen*, *maataloudellisen* ja *hydrologisen* kuivuuden lisäksi myös omana kuivuustyyppinään *sosioekonominen* kuivuus. Wilhiten ja Glantzin jaottelu keskittyi lähinnä kuvailemaan kuhunkin kuivuustyyppiin lukeutuvien silloisten kuivuuden kvantitatiivisten määritelmien luonnetta. Tästä huolimatta jaottelua on yleisesti käytetty myöhemmässä kuivuustutkimuksessa sekä käsitteellisellä että operationaalisella tasolla.

Tate ja Gustard (2000) käyttivät hieman Wilhiten ja Glantzin luokittelua tarkempaa jaottelua ja jakoivat kuivuuden *klimatologiseen*, *agro-meteorologiseen*, *virtaamien* ja *pohjaveden* kuivuuteen. Taten ja Gustardin klimatologinen kuivuus vastaa suurinpiirtein Wilhiten ja Glantzin meteorologista kuivuutta, mutta painottaa erityisesti sademääriin perustuvia kuivuusjaksojen määritelmiä. Agro-meteorologinen kuivuus vastaa puolestaan maataloudellista kuivuutta. Virtaamien ja pohjaveden kuivuus kuuluvat hydrologiseen kuivuuteen, mutta niiden määritelmistä löytyy tarkennuksia kytkennöistä sosioekonomiseen kuivuuteen. Tate ja Gustard määrittelivät lisäksi omaksi luokakseen *operatiivisen* kuivuuden, joka huomioi ihmisen vesivarojen käytön ja hallinnan vaikutuksen kuivuuden esiintymisessä.

Lukuisten kuivuuden käsitteellisten ja kvantitatiivisten määritelmien jakamisella eri luokkiin pyritään selkeyttämään tutkimuskentällä käytävää keskustelua ja rajaamaan tutkimuksissa tarkasteltavat muuttujat. Luokkarajat eivät kuitenkaan ole jyrkkiä ja jaottelu olisi mahdollista tehdä usealla eri tavalla ja tarkkuustasolla. Kirjallisuudesta ei myöskään löydy suoraa vastausta esimerkiksi siihen, rinnastetaanko metsätaloudelle haittaa aiheuttava kuivuus maataloudelliseen/agro-meteorologiseen vai sosioekonomiseen kuivuuteen. Tässä tutkimuksessa keskitytään tarkastelemaan lähinnä sademäärien vaihteluun liittyvää kuivuutta, jonka katsotaan kuuluvan *meteorologisen* kuivuuden piiriin. Lisäksi tarkastellaan maaperän pintakerroksen kosteusvajeeseen liittyvää kuivuutta, joka reagoi nopeasti sademäärien vaihteluihin ja sijoittuu siten meteorologisen ja maataloudellisen/agro-meteorologisen kuivuuden välimaastoon.

2.1.2 Meteorologinen kuivuus ja sen vaikutukset

Meteorologisella kuivuudella tarkoitetaan poikkeuksellisen alhaisia sademääriä, joiden kanssa samaan aikaan mahdollisesti, mutta ei välttämättä, esiintyy myös korkeita lämpötiloja ja voimakkaita tuulia, jotka kasvattavat potentiaalista haihduntaa ja vähentävät ilmankosteutta. Meteorologisen kuivuuden voidaan katsoa olevan kaikkien muiden kuivuustyyppien taustatekijä (Wilhite & Glantz 1985) ja näiden kuivuusjaksojen pituus määritteleekin usein

sen kuinka voimakkaina muut kuivuustyypit ilmenevät. Lisäksi meteorologisten kuivuusjaksojen ajoittumisella on suuri merkitys kuivuusvaikutusten ilmenemisen kannalta. Erityisesti lämpimänä vuodenaikana, sademäärien ja haihdunnan suhteella on suorempi vaikutus maankosteuteen ja vesistöjen vedenpinnan tasoon kuin talvella.

Meteorologisella kuivuudella itsessään on joitakin suoria positiivisia vaikutuksia erilaisiin ekologisiin tekijöihin ja yhteiskunnan sektoreihin. Esimerkiksi talvien vähälumisuus helpottaa joidenkin eläinten ravinnonhankintaa. Vuosien 2002–2003 kuivuuden on todettu juuri tämän vuoksi vaikuttaneen Suomen porotalouteen positiivisesti (Silander & Järvinen 2004). Meteorologisten kuivuusolosuhteiden, eli vähäisten sateiden ja niihin usein kesällä liittyvien korkeiden lämpötilojen, voidaan myös johonkin rajaan asti ajatella olevan lomailun ja matkailun kannalta toivottava säätyyppi.

Meteorologisen kuivuuden vaikutukset näkyvät sulana vuodenaikana yleensä ensimmäisenä maaperän kosteuden alenemisena. Alhaiseen maankosteuteen liittyvä kuivuus puolestaan aiheuttaa suuria kustannuksia erityisesti maataloudelle. Maanviljelyskasvien veden tarve vaihtelee kuitenkin kasvien biologisten ominaisuuksien ja kasvuvaiheen mukaan (Wilhite & Glatz 1985). Eniten satoa heikentää alkukesän kuivuus maan pintakerroksessa, kun taas loppukesästä syvempien maakerrosten kosteudella on suurempi merkitys. Tästä syystä esimerkiksi vuonna 2002 elokuussa alkaneesta kuivuudesta huolimatta Suomessa peltokasvien sadot olivat joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta hyviä alkukesän sateiden ja lämpimän sään takia (Silander & Järvinen 2004). Kesällä kuivuuteen usein yhdistyvä korkea lämpötila pienentää myös viileässä viihtyvien kasvien, esimerkiksi kaalien, satoja. Rehun tuotannon väheneminen saattaa puolestaan haitata maitotaloustuotantoa, mikä voi nostaa maidon tuotantokustannuksia. Kuivuus vaikuttaa lisäksi myös puutarhatuotannon vihannesten, marjojen ja hedelmien satomääriin ja laatuun. Meteorologiset kuivat päivät eivät kuitenkaan välttämättä johda heti maataloudelliseen kuivuuteen, sillä kasvit voivat käyttää hyväkseen maaperään aiemmin varastoitunutta vettä (Kamara & Jackson 1997). Toisaalta maataloudellisen kuivuusjakson aikana esiintyvät ajoittaiset sateet eivät välttämättä lisää kuivan maaperän kosteutta riittävästi, jotta viljelyskasvit menestyisivät. Näin ollen meteorologinen ja maataloudellinen kuivuus eivät välttämättä osu ajallisesti päällekkäin, mikä saattaa johtaa poikkeaviin näkemyksiin kuivuuden esiintymisestä maanviljelijöiden ja meteorologien välillä (Wilhite & Glantz 1985).

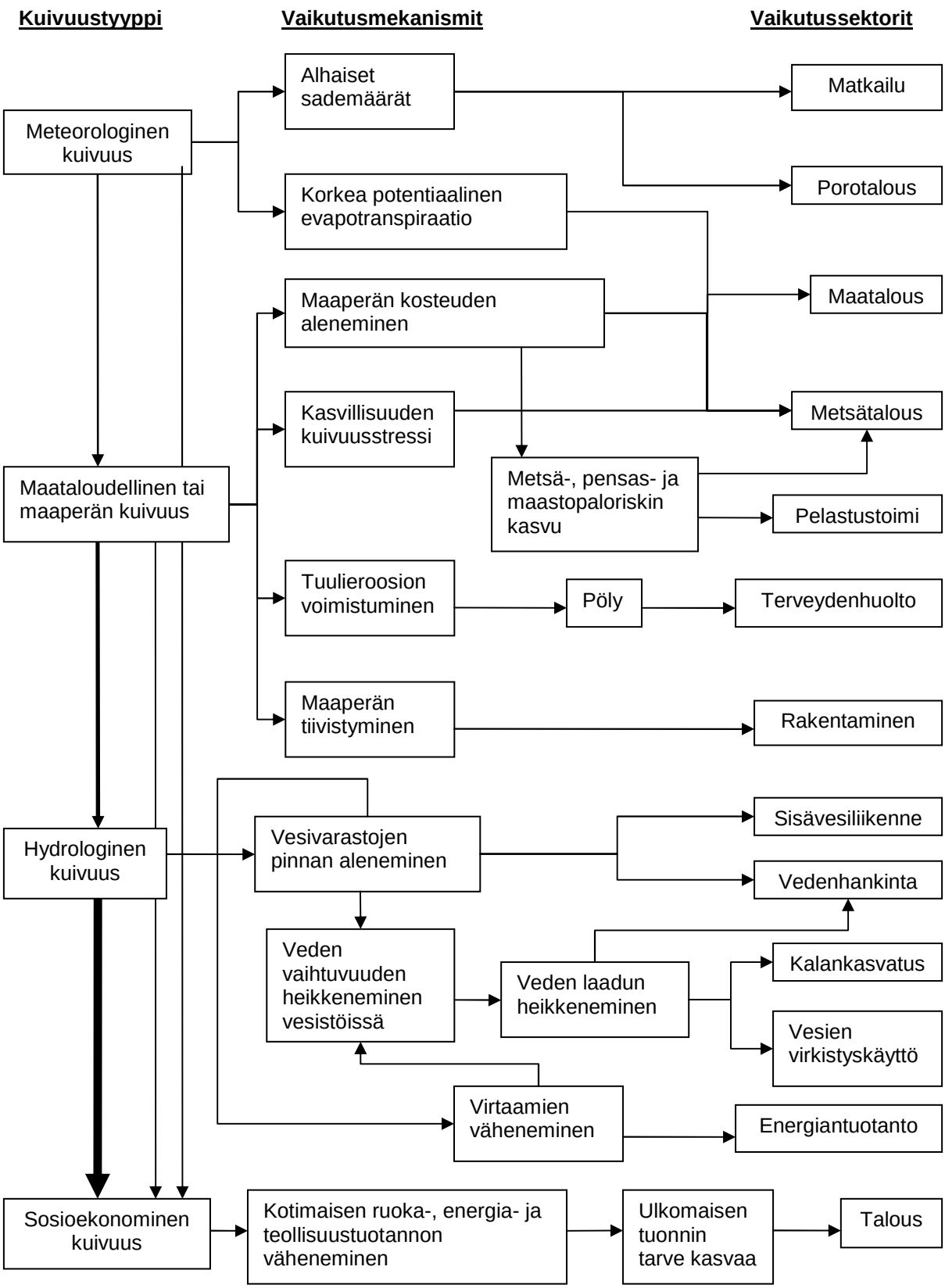
Maaperän kuivuus vaikuttaa maankosteuden kautta välillisesti myös metsätalouteen ainakin kolmella eri tavalla. Ensinnäkin kuivuusstressi alentaa puiden vastustuskykyä ja altistaa ne tuholaisvaurioille ja sairauksille (Silander & Järvinen 2004). Tietyt tuholaiset myös viihtyvät paremmin lämpimässä ja kuivassa ilmastossa. Toiseksi veden puute hidastaa puiden kasvua tai johtaa pahimmillaan niiden kuolemaan. Näistä kahdesta ensimmäisestä kuivuuden haittavaikutuksesta kärsivät Suomessa herkimmin koivut. Havupuista männyt sietävät paremmin kuivuutta kuin kuuset. Kolmanneksi puiden ja metsämaan karikekerroksen kuivuus lisää metsäpaloriskiä. Esimerkiksi vuosien 2002–2003 poikkeuksellinen kuivuuden aikana Suomessa esiintyi yli kaksi kertaa enemmän metsäpaloja kuin normaalina vuonna.

Maankosteuden aleneminen saattaa aiheuttaa myös rakenteellisia vaurioita erityisesti savimailla, joilla kuivuuden on todettu kutistavan ylimpiä maakerroksia aiheuttaen samalla maanpinnan epätasaista painumista (Silander & Järvinen 2004). Tämä aiheuttaa jännitteitä rakennusten runkorakenteisiin ja pinnoitteisiin, mikä saattaa johtaa tärinän sietokyvyn laskuun ja sitä kautta rakenteellisiin vaurioihin. Savikkojen kutistuminen saattaa synnyttää myös tukipaaluperustusten alle rakotiloja, joihin pääsee happea, minkä puolestaan edistää lahoamista. Savikkojen kutistumisesta aiheutuneita vaurioita on esiintynyt esimerkiksi

Lounais-Suomessa. Hiekka-, sora- ja moreenimaiden geokemiallisiin ominaisuuksiin kuivumisella ei sen sijaan ole todettu olevan vaikutusta.

Maahan päätyvän veden määrän väheneminen pienentää myös maan pinnalla ja maaperässä tapahtuvaa kokonaisvaluntaa, joka näkyy lopulta virtausten heikkenemisenä sekä pohja- ja pintavesivarastojen pinnantason alenemisena, jolloin on kyse hydrologisesta kuivuudesta. Hydrologinen kuivuus ilmenee kuitenkin yleensä viiveellä meteorologisiin kuivuusjaksoihin nähden erityisesti, jos pinnanalaiset vesivarastot ovat suuria (Beran & Rodier 1985; Hisdal & Tallaksen 2003). Hisdal ja Tallaksen (2003) havaitsivat Tanskassa tehdyssä tutkimuksessa hydrologisten kuivuusjaksojen olevan myös yleisesti pitempiä, harvinaisempia ja vaikutusaloiltaan pienempiä kuin meteorologisten kuivuusjaksojen.

Maataloudellinen ja hydrologinen kuivuus johtavat lopulta sosioekonomiseen kuivuuteen, kun tarjolla olevan ravinnon ja veden määrät eivät enää riitä tyydyttämään yhteiskunnan tarpeita (Wilhite & Glantz 1985). Kuivuus on kuitenkin yleisesti ottaen Pohjois-Eroopassa, paitsi harvinaisen esiintymisensä, myös sosioekonomisten vaikutustensa suhteen hyvin erityyppinen hasardi, kuin esimerkiksi maapallon semiarideilla alueilla sijaitsevissa kehitysmaissa, joissa korkea kuivuuden esiintymisriski yhdistyy suureen yhteiskunnalliseen haavoittuvuuteen (Glantz 2003). Näillä alueilla muun muassa köyhyys, avustustöiden huono organisointi ja korruptio vaikeuttavat kuivuuskatastrofeista selviämistä (esim. Githinji & Robinson 2000; Msangi 2004). Kehittyneillä, rikkailla mailla on sen sijaan teknisesti ja taloudellisesti laajemmat mahdollisuudet hyödyntää korvaavia veden- ja ravinnonlähteitä kuivuuden aikana. Silander ja Järvinen (2004) tarkastelivat vuosien 2002–2003 poikkeuksellisen kuivuuden aiheuttamia taloudellisia kustannuksia vedenhankinnan, voimatalouden, maatalouden, metsätalouden, rakentamisen, sisävesiliikenteen sekä vesien tilan ja virkistyskäytön kannalta Suomessa. Nämä yhteiskunnalliset sektorit ovat sellaisia, joilla kuivuuden vaikutukset tuntuvat herkimmin Pohjois-Euroopan kaltaisella taloudellisesti rikkaalla ja teknologisesti kehittyneellä alueella, jolla kuivuuden esiintymisfrekvenssi on alhainen (kuva 1).



Kuva 1. Kuivuustyyppien vaikutusmekanismien väliset kytkökset ja niiden yhteydet eri yhteiskunnan sektoreihin Pohjois-Euroopan kaltaisilla rikkailla ja kehittyneillä alueilla, joilla voimakkaita kuivuusjaksoja esiintyy harvoin. Meteorologisen kuivuusjakson pitkittyessä sen vaikutukset alkavat näkyä myös hydrologisen syklin muissa osissa ja lopulta vaikutukset kumuloituvat sosioekonomisiksi vaikutuksiksi. Kaaviossa esitetyt kytkökset ovat vain esimerkkejä ja mahdollisia vaikutusmekanismeja ja vaikutussektoreita on lukuisia muitakin (kaavio perustuu osittain lähteisiin: NDMC 2006 ja Silander & Järvinen 2004).

2.2 Kuivuuden analysointi ja kuivuusjaksojen ominaisuudet

2.2.1 Kuivuusjaksojen analyysimenetelmät

Kuivuuden käsitteelliseen määrittelemiseen liittyvien ongelmien vuoksi kuivuusjaksojen alkamisen ja päättymisen objektiivinen määritteleminen on usein osoittautunut hankalaksi (Wilhite & Glantz 1985). Kuivuusjaksojen ajoittumisen ja vaikutusten tunnistaminen on tärkeää esimerkiksi katastrofihallinnan ja korvausten maksamisen kannalta. Myös kuivuusjaksojen frekvenssin ja siinä tapahtuvien muutosten selvittäminen edellyttää kuivuusjaksojen mahdollisimman tarkkaa tunnistamista kunkin kuivuustyypin kannalta keskeisten muuttujien aikasarjoista.

Kuivuuden esiintymistä voidaan analysoida meteorologisista tai hydrologisista havaintoaineistoista tarkasteltavan muuttujan normaalin ja poikkeuksellisen tason väliseen erotukseen perustuvien kvantitatiivisten kriteerien avulla. Tätä kutsutaan myös *operationaaliseksi* kuivuuden määrittelemiseksi erotuksena kuivuuden *käsitteellisestä* määrittelystä (Wilhite & Glantz 1985). Menneiden kuivuusjaksojen lisäksi operationaalisten määritelmien avulla voidaan analysoida myös meneillään olevaa kuivuutta. Kuten käsitteellisiä kuivuuden määritelmiä, myös eri kuivuustyyppeihin lukeutuvien kuivuusjaksojen operationaalisia analyysimenetelmiä on kehitetty lukuisia (Heim 2002). Eri menetelmät kuitenkin huomioivat kuivuusjaksojen ominaisuuksia eri tavoin. Yksinkertaisimmat yhden muuttujan, yleensä sadannan tai virtaaman, tarkasteluun perustuvat menetelmät ovat helppokäyttöisiä ja vaativat vähemmän aineistoa kuin monimutkaiset, moneen muuttujaan perustuvat indeksit. Useisiin muuttujiin perustuvien indeksien tuottama tieto on kuitenkin jossain määrin tarkempaa kuin yhden muuttujan avulla tuotettu tieto.

Yksittäisen, tarkasteltavalle kuivuustyypille ominaisen muuttujan analyysissä käytetään yleensä kynnysarvoa, jonka suhteen muuttujan vaihtelua tarkastellaan (Panu & Sharma 2002). Kynnysarvo voidaan valita usealla eri tavalla, mutta lähinnä on käytetty kahta tapaa, joista toinen on puhtaan tilastollinen ja toinen perustuu kuivuuden vaikutusten ilmenemisen havainnointiin. Tilastollinen kynnysarvo pyrkii yleensä määrittelemään jonkinlaisen vedentarjonnan ”normaalitason", joka on kuitenkin jo käsitteenä osoittautunut ongelmalliseksi. Esimerkiksi kansainvälisen sopimuksen mukaan ”normaali ilmasto” määritellään meteorologisten muuttujien 30 vuoden keskiarvona. Kiinteiden ajanjaksojen, 1901–1930, 1931–1960, 1961–1990 ja 1991–2020, käyttäminen ei kuitenkaan välttämättä tavoita tarkasteltavan ajankohdan ilmastoa yhtä hyvin kuin liukuva aikatarkastelu tekisi, erityisesti ilmaston muuttuessa nopeasti. Beran ja Rodier (1985) panivat myös merkille, että vaikka sademäärät olisivatkin ajankohtaan nähden normaalilla tasolla, vaikuttaa niiden ajallinen jakautuminen kuivuuden esiintymiseen. Esimerkiksi olosuhteissa, joissa kertasadannan intensiteetti on heikko ja tuulet ovat voimakkaita, vesivarastojen täyttyminen on hidasta, mikä saattaa johtaa vesivajeeseen helpommin kuin tyynellä säällä. Myös tarkastellut suureet, kuten esimerkiksi sadannan pitkänajan keskiarvo, eivät yksin aina riittävästi kuvaa normaaliolosuhteita. Keskiarvo on jo sinänsä herkkä poikkeuksellisille havainnoille erityisesti pienten aineistojen kohdalla (Dracup ym. 1980). Esimerkiksi alueilla, joilla vuosisadannan vaihtelu on suurta, pitkän aikavälin mediaani tai moodi saattaa kuvata paremmin normaaliolosuhteita kuin keskiarvo. Monimutkaisempia sadetilastoihin perustuvia menetelmiä ovat muun muassa Standardized precipitation index (SPI) (McKee ym. 1993) ja Australiassa käytössä oleva desiilimenetelmä (Gibbs & Maher 1967, cit. Keyantash & Dracup 2007). Kuivuuden vaikutuksiin perustuen kynnysarvo voidaan myös valita esimerkiksi siten, että se on kriittinen jonkin kuivuuden vaikutuskohteen, kuten esimerkiksi viljelyskasvin kasvun kannalta. Tämänkaltaiset määritelmät ovat kuitenkin luonnollisesti aina erittäin

tapauskohtaisia ja paikkaan ja aikaan sidottuja, eikä niitä siten voida yleistää (Wilhite & Glantz 1985; Panu & Sharma 2002).

Myös moneen muuttujaan perustuvat indeksit pyrkivät yleensä määrittelemään kuivuusjaksot suhteessa ”normaaliolosuhteita” kuvaavaan kynnysarvoon, joka edustaa yleensä jollakin tavoin ajankohdan tarjolla olevan veden määrän ja veden tarpeen pitkänajan keskimääräistä tasapainoa tietyllä alueella (Weber & Nkemdirim 1998). Kuuluisin meteorologisen kuivuuden mittaamiseen käytetty normaaliolosuhteet määrittelevä monimuuttujaindeksi on niin kutsuttu Palmerin indeksi (Palmer drought severity index), PDSI (Palmer 1965). Myös maataloudellisen ja hydrologisen kuivuuden mittaamiseen on kehitetty omia monimuuttujaindeksejä (Keyantash & Dracup 2007).

Erilaiset kuivuusjaksojen operationaaliset analyysimenetelmät tuottavat kuitenkin toisistaan poikkeavia tuloksia, joten tulosten ja todellisuuden vastaavuus täytyisi aina varmistaa jonkin ulkopuolisen, kuivuuden vaikutuksiin perustuvan kriteerin mukaan. Tämä on kuitenkin vaikeaa, sillä kuivuusjaksojen vaikutukset riippuvat monesta tekijästä, eikä tarvittavaa dokumentaatiota kuivuuden vaikutuksista ole aina saatavilla. Lisäksi joidenkin proksiaineistoihin perustuvien menetelmien, kuten esimerkiksi puiden vuosirenkaiden paksuuden vaihteluun perustuvan dendrokronologian, ajallinen resoluutio on niin karkea, että kuivuusjaksojen yhdistäminen konkreettisiin kuivuuden vaikutuksiin on kyseenalaista.

2.2.2 Kuivuusjaksojen ominaisuudet

Kuivuusjaksojen operationaalisten määritelmien avulla pyritään ensisijaisesti määrittelemään kuivuusolosuhteiden alkamisajankohta, voimakkuus ja päättyminen (Wilhite & Glantz 1985). Näiden määritteleminen ei todellisuudessa kuitenkaan ole niin yksinkertaista, kuin esimerkiksi yhden muuttujan kynnysarvoon perustuvien menetelmien avulla saadut tulokset antaisivat olettaa. Kuivuuden alkamisajankohdan tunnistaminen on ensinnäkin hankalaa, koska esimerkiksi maaperän kosteuteen liittyvän kuivuusjakson kehittymiseen vaikuttavat huomattavasti edeltävät kosteusolosuhteet; mitä kosteampaa on ollut, sitä kauemmin kestää ennen kuin vähäsateisuus johtaa kuivuuteen ja toisin päin (Weber & Nkendirim 1998). Kuivuuden kehittymiseen vaikuttaa sadannan vajeen lisäksi myös paikallinen vedentarpeen taso, johon vaikuttavat lämpötila, kasvillisuus, maaperän laatu, ilmankosteus ja tuuli. Kuivuusjakson voimakkuudella tarkoitetaan keskimääräistä poikkemaa kynnysarvosta tai normaaliarvosta ajanjakson aikana (Dracup ym. 1980; Weber & Nkemdirim 1998). Tämä on puolestaan huomioitava kuivuusjakson päättymisen määrittelyssä, sillä mitä kuivempaa on ollut, sitä enemmän kosteutta tarvitaan normaaliolosuhteiden palauttamiseksi. Toisaalta runsas sade saattaa päättää kuivuusjakson hyvinkin nopeasti (Beran & Rodier 1985).

Kuivuusjaksojen operationaalisia määritelmiä voidaan soveltaa myös edelleen kuivuusjaksojen keston, ankaruuden, frekvenssien ja todennäköisyyksien analysoimiseen (Wilhite & Glantz 1985). Kuivuusjakson kesto määräytyy yleensä suoraan valitun analyysimenetelmän tuottaman kuivuuden alkamis- ja päättymisajankohdan mukaan. Kynnysarvomenetelmissä tämä vastaa siis esimerkiksi niiden peräkkäisten päivien lukumäärää, joiden yhteen laskettu sademäärä ei ylitä asetettua kynnysarvoa (Weber & Nkemdirim 1998). Yhteen muuttujaan perustuvien menetelmien heikkoutena on kuitenkin se, että kaikki kynnysarvon alapuolelle jäävät jaksot eivät aina välttämättä ole varsinaisia ”kuivuusjaksoja”, silloin kun muut muuttujat eivät suosi kuivuusolosuhteiden syntyä. Tällöin määritellään usein kynnysarvon lisäksi myös jokin aikaraja, jonka on täytyttävä, jotta jaksoa voidaan kutsua ”kuivaksi”. Normaaliolosuhteet määrittelevien monimuuttujaindeksien kohdalla sen sijaan tietyt indeksiarvot edustavat suoremmin kuivuutta ja tietyt liiallista

kosteutta. Näissä menetelmissä kuivuusjakson kesto määräytyy normaaliarvon alittumis- ja ylittymisajankohtien välisenä ajallisena etäisyytenä.

Kuivuusjakson ankaruus riippuu useista eri tekijöistä ja se voidaan määritellä hyvin eri tavoin erilaisista lähtökohdista käsin. Wilhiten ja Glantzin (1985) mukaan kuivuuden ankaruus määräytyy kuivuuden keston, voimakkuuden ja vaikutusalueen maantieteellisen laajuuden mukaan. Lisäksi kuivuusilmiön koetteleman alueen ihmisyhteisöjen ja ekosysteemien haavoittuvuus vaikuttaa siihen kuinka ankarana kuivuus koetaan. Tämä on lähellä Benistonin ym. (2007) näkemystä ääri-ilmiöiden ankaruudesta monialaisena ongelmana, johon fysikaalisten ympäristötekijöiden voimakkuuden lisäksi vaikuttavat taloudelliset tekijät sekä käytettävissäolevat katatrofivaikutusten lievennyskeinot. Kuivuusjakson ankaruuden voidaan näin ollen ajatella olevan merkittävä erityisesti sosioekonomisen kuivuuden kannalta. Meteorologisen kuivuuden ankaruus määritellään usein suoraan indeksien avulla (Panu & Sharma 2002), joista useimmat, kuten esimerkiksi PDSI, jättävät kuitenkin kuivuuden alueellisen ulottuvuuden ja haavoittuvuuden ankaruustarkastelun ulkopuolelle. Dracup ym. (1980) määrittelivät hydrologisen kuivuuden ankaruuden yksinkertaisesti kuivuusjakson kumulatiiviseksi virtaamavajeeksi, joka mitataan suhteessa tiettyyn kynnysarvoon. Samanlaista poikkeman kumulatiivisuuteen perustuvaa määritelmää yleisellä tasolla käyttivät myös Weber ja Nkemdirim (1998).

Kuivuusjaksojen esiintymisfrekvenssi riippuu oleellisesti käytetystä analyysimenetelmästä. Oleellista on määritellä tarkastellaanko tietyn pituisten vai tietyn voimakkuuden kuivuusjaksojen toistuvuutta vai yhdistetäänkö nämä tekijät.

2.2.3 Kuivuuden aika- ja aluemittakaava

Kuivuusjaksojen analysoinnissa aineiston ajallinen resoluutio tai valittu aikayksikkö, jonka normaaliolosuhteet määritellään, on merkittävä, sillä se määrää, minkä tyyppistä kuivuutta voidaan tutkia (Panu & Sharma 2002). Usein tarkastelun kohteena on yksi vuosi, mutta sen avulla voidaan saada viitteitä alueellisesta kuivuuden esiintymisestä ja siinä tapahtuvista muutoksista vain yleisellä tasolla. Vuodenajan, kuukauden tai lyhyemmän aikayksikön tarkastelu tuo paremmin esiin eri kuivuustyyppien esiintymisen vaihtelua (Tate & Gustard 2000; Panu & Sharma 2002; Narasimhan & Srinivasan 2005). Esimerkiksi pintamaan kosteus reagoi suhteellisen nopeasti sateettomien ja sateisten jaksojen lyhytaikaiseen vaihteluun. Tälläiset jaksot eivät kuitenkaan erotu, jos tarkastellaan vuosikeskiarvoja. Sen sijaan saderintamien harvinaistuminen pidemmällä tarkastelujaksolla vähentää valuntaa ja alentaa pohjavesien tasoa, jolloin kuivuus on yhteiskunnalliseltakin kannalta katsottuna voimakkaampaa.

Ajallisen resoluution valinta vaikuttaa myös analysoitavien kuivuusjaksojen määrään, sillä mitä lyhyempää ajanjaksoa käytetään, sitä enemmän kuivuusjaksoja pystytään erottelemaan (Dracup ym. 1980). Toisaalta esimerkiksi kuukausittaiseisen tarkastelun on katsottu olevan parempi kuin päivittäisen, sillä päivien mittakaavassa tapahtuva ääriarvojen vaihtelu ei ole kuivuustutkimuksen kannalta välttämättä oleellista (Lehner & Döll 2001). Lyhyt jallinen resoluutio lisää myös toisistaan riippuvaisten kuivuusjaksojen esiintymistä (Tallaksen 2000). Tämä voi tuottaa ongelmia kuivuusjaksojen frekvenssiä analysoitaessa, sillä siihen käytetyt menetelmät yleensä olettavat jaksojen olevan riippumattomia toisistaan.

Havaintoasemien tilastoaineistoihin perustuvassa kuivuusanalyysissä on usein vaikea huomioida kuivuuden vaikutusalueen liikkeitä ja vaikutusalueen laajenemista ja supistumista sekä voimakkuuden ajallista vaihtelua kuivuusjakson aikana. Joidenkin muuttujien, kuten sadannan, alueellinen vaihtelu on myös suurta. Tästä seuraa, että pistemäiseen aineistoon

perustuvat analyysit tuottavat yleensä tietoa hyvin pieneltä alueelta ja tulosten interpoloiminen on kyseenalaista (Panu & Sharma 2002). Ilman riittävän tiheää havaintoverkkoa on tyydyttävä tarkastelemaan vain yhden paikkakunnan tai valuma-alueen kuivuusolosuhteita kerrallaan. Tämä ei kuitenkaan ole useinkaan mielekästä, sillä kuivuus on aina alueellinen ilmiö (Dracup ym. 1980).

Dracupin ym. (1980) mukaan kuivuustutkimukseen voidaan kuitenkin ottaa mukaan alueellinen tarkastelutapa kahdella eri tavalla. Ensinnäkin mikäli on mahdollista tunnistaa fyysisesti lähekkäin sijaitsevia, ilmasto-olosuhteiltaan ja geomorfologisilta ominaisuuksiltaan samankaltaisia alueita, voidaan yhden mittausaseman antamiin tilastoihin perustuvia analyysejä yleistää laajemmalle alueelle. Olosuhteiltaan samankaltaisten alueiden määritteleminen tuottaa myös eri kuivuustyyppien esiintymisen ajallisen korrelaation tarkasteluun lisää joustavuutta, kun meteorologisten, maankosteuteen liittyvien ja hydrologisten aineistojen ei tarvitse olla juuri samasta pisteestä mitattuja. Toisaalta samanlaisten meteorologisten tai hydrologisten tilastojen perusteella voidaan myös löytää ominaisuuksiltaan samankaltaisia alueita, mittausasemien sijainnista riippumatta. Tämän lähestymistavan on kuitenkin katsottu sopivan parhaiten virtaama-aineistojen perusteella tehtävän hydrologisen kuivuuden arvioimiseen (esim. Tallaksen 2000).

Kuivuustutkimuksessa voidaan myös hyödyntää valmiita alueellisia säähavaintoaineistoja, kuten esimerkiksi sadetutka-aineistoja sekä kaukokartoitusaineistoja, joista voidaan analysoida kuivuusvaikutusten laajuutta (esim. Ghosh 1997; Vicente-Serrano 2007). Näitä aineistoja ei kuitenkaan ole saatavilla pitkiltä ajanjaksoilta, joten niiden käyttö esimerkiksi pitempiaikaisten ilmastonmuutosten havainnoinnissa on rajoittunutta.

2.3 Meteorologisen kuivuuden esiintyminen Pohjois-Euroopan ilmastossa

2.3.1 Pohjois-Euroopan kosteusolosuhteet

Tässä tutkimuksessa tarkastelun kohteena oleva Pohjois-Euroopan alue kattaa Pohjoismaat, Islantia lukuun ottamatta, sekä Baltian maat (kuva 4). Alue sijaitsee suunnilleen leveyspiirien 54–71 °N ja pituuspiirien 5–31 °E rajaamalla alueella. Köppen-Geigerin ilmastoluokituksen mukaan Pohjois-Euroopan eteläosat kuuluvat lauhkeaan mantereiseen ilmastovyöhykkeeseen ja alueen pohjoisosissa vallitsee viileä subarktinen mannerilmasto (Peel ym. 2007). Ilmastoluokituksen nimitykset ovat hieman harhaanjohtavia ainakin sademäärien suhteen, sillä erityisesti Pohjois-Euroopan Skandien vuoriston itäpuoliset alueet ovat todellisuudessa lännestä työntyvän lauhkean ja kostean mereisen ja idän puoleisen kuivan mantereisen ilmamassan vaihettumisvyöhykkeellä, eivätkä siten kuulu varsinaisen mannerilmaston piiriin (Tikkanen 2005). Osissa Tanskaa ja Norjan rannikolla sen sijaan vallitsee lauhkea meri-ilmasto (Peel ym. 2007; Tikkanen 2005). Norjan eteläosien vuoristoalueilla sekä Pohjois-Norjassa esiintyy myös tundrailmastoa (Peel ym. 2007).

Pohjois-Euroopan ilmastoon vaikuttavat merkittävästi lähialueiden suuret ilmanpainejärjestelmät (Miętus 1998). Islannin yllä normaalisti vallitseva matalapaine ja Azorien yläpuolinen korkeapaine pitävät alueella yllä lounaan ja luoteen välillä vaihtelevaa ilmavirtausta. Lisäksi Venäjän yllä kesällä vallitsevan matalapaineen ja talvella vallitsevan korkeapaineen vaikutukset tuntuvat alueen ilmastossa.

Pohjois-Euroopan alueen sademäärät vaihtelevat jonkin verran vuoden aikana, mutta varsinaisia kuivia kausia ei esiinny. Itämeren valuma-alueella, joka käsittää tässä

tutkimuksessa tarkasteltavan Skandien vuoriston itäpuolisen alueen lisäksi myös Puolan sekä osia Saksasta, Venäjästä, Tšekin tasavallasta, Slovakiasta, Ukrainasta ja Valko-Venäjästä, sademäärät ovat suurimmat elokuussa, noin 80 mm, ja pienimmät huhtikuussa, noin 40 mm (Rubel & Hantel 2001). Valuma-alueella sataa koko vuonna keskimäärin noin 700 mm. Suurimpia sademäärät ovat Skandien vuoristossa, jossa sataa yli 1500 mm vuodessa, ja alhaisimpia valuma-alueen pohjois- ja koillisosissa sekä Itämeren keskiosissa Öölannin ja Gotlannin ympäristössä, joissa sataa alle 600 mm vuodessa. Skandien vuoriston länsipuolella, Norjan rannikolla, sen sijaan sataa Itämeren valuma-aluetta huomattavasti enemmän, keskimäärin vajaat 1300 mm vuodessa (Álvarez & Estrela 2000). Tanskan länsirannikon vuosisademäärä on 600-900 mm. Kokonaissadanta saattaa kuitenkin vaihdella vuodesta toiseen voimakkaasti kaikilla Pohjois-Euroopan alueilla (Tikkanen 2005).

Sadannan lisäksi Pohjois-Euroopan vesitaseeseen vaikuttaa oleellisesti myös potentiaalinen kokonaishaihdunta, joka riippuu lämpötiloista ja tuulisuudesta. Pohjois-Euroopan vuoden keskilämpötilat ovat keskimäärin korkeimpia alueen lounaisosissa, mistä ne alenevat koilliseen mentäessä (von Storch & Omstedt 2008; Tikkanen 2005). Alhaisimpia vuoden keskilämpötilat ovat Norjan ja Ruotsin vuoristoalueilla (noin -4 °C) ja Pohjois-Lapissa Norjan rannikkoa lukuun ottamatta (noin -2 °C). Kaikkialla Fennoskandiassa ja Tanskassa vuosihaihdunnan on kuitenkin todettu olevan pienempää kuin vuosittaisten sademäärien (Hyvärinen & Kajander 2005; Hisdal & Tallaksen 2003). Kuivuuden kannalta oleellisimpia ovat kesäaikana ajoittain vähäsateisuuden kanssa samaan aikaan esiintyvät poikkeuksellisen korkeat lämpötilat, joita saattaa esiintyä kaikilla alueilla.

2.3.2 Pohjois-Euroopan alueella esiintyneet kuivuusjaksot

Pohjois-Euroopan kokonaismakeavesivarat ovat runsaat. Jo pelkästään Fennoskandian alueella on noin 400 000 yli 1 hehtaarin laajuista järveä (Hyvärinen & Kajander 2005) ja veden määrä henkeä kohden on Euroopan korkein (Mannio ym. 2005). Tästä huolimatta alueella on historian kuluessa esiintynyt ajoittain normaalia alhaisemman sadannan aiheuttamia kuivuusjaksoja, joiden aikana pinta- ja pohjavesistöjen tasot ovat alentuneet ja jokien virtaamat vähentyneet. Pohjois-Euroopan runsassateisimmilla alueilla kokonaisvalunnnan vaihtelu vuodesta toiseen on pientä, mutta mantereisemmassa ilmastossa suurempi vaihtelu on tavallista (Gottschalk ym. 1979).

Järjestelmälliset välineillä tehtävät säähavainnot alkoivat monissa Pohjois-Euroopan maissa vasta 1800-luvulla tai 1900-luvun alussa ja tietojen hankkimiseksi varhaisemmista ilmasto-olosuhteista on täytynyt käyttää niin sanottuja proksiaineistoja. Viitteitä varhaisemmista kuivuusjaksoista on saatu esimerkiksi dendrokronologian avulla. Helama ja Lindholm (2003) tarkastelivat alkukesän sadannan vaihtelua Kaakkois-Suomessa vuosina 874–1993 metsämännyn (*Pinus Sylvestris* L.) vuosilustojen avulla. Heidän tutkimuksensa mukaan kolme kuivinta alkukesää esiintyivät sarjan alkupäässä vuosina 939, 943 ja 1116. Lisäksi pisimmät vähäsateiset jaksot esiintyivät vuosina 1173–1191, 1664–1680 ja 1388–1402. Helaman ja Lindholmin tutkimuksen mukaan sademäärien vaihtelussa on mahdollisesti esiintynyt vuosikymmenten pituista syklisyyttä, mutta suuria lineaarisia muutoksia ei kyseisellä ajanjaksolla ole esiintynyt.

Järjestelmällisiä säähavaintoja edeltävältä ajalta on myös säilynyt joitakin yksittäisiä muistiin kirjattuja ilmaston vaihteluun liittyviä havaintoja. Esimerkiksi Vesajoki ja Tornberg (1994) ovat koonneet yhteen varhaisista 1500–1700-luvuilla tehdyistä meteorologisista, jäidenlähtöön ja biofenologiaan liittyvistä havainnoista sekä satomäärien vaihteluita koskevista kirjallisista dokumenteista saatuja tietoja Suomen ilmastosta. Tämän katsauksen mukaan erityisesti 1600-luvulla liialliset sateet ja kylmyys aiheuttivat enemmän tuhoja

viljelyksille kuin kuivuus. Lukuisina vuosina erityisesti ensimmäisten yöpakkasten esiintyminen jo varhain kesän lopulla aiheutti satovahinkoja. Vuoden 1643 kesällä tiedetään kuitenkin ohran ja heinän satojen kärsineen voimakkaasta kuivuudesta. P.M. Gylleniuksen Turussa tekemien havaintojen mukaan kesä 1649 oli myös osittain kuiva ja kuuma. 1650-luvulla esiintyi myös koko Lounais-Suomessa lukuisia kuivia ja kuumia kesiä ja esimerkiksi Turussa ei vuonna 1652 kasvukaudella satanut kertaakaan. Myös 1670-luvun lopulla ja 1680-luvulla viljelykset kärsivät kuivuudesta Lounais-Suomessa. Koko Suomessa kesän 1693 tiedetään myös olleen kuiva. Myös kesät 1701 ja 1703 olivat kuivia erityisesti Länsi-Suomessa. Vakavia viljakatoja kuivuuden tiedetään aiheuttaneen Suomessa 1500-luvulla neljä, 1600-luvulla seitsemän ja 1700-luvulla kolme kertaa (Myllyntaus).

Dendrokronologian ja säähavaintojen yhdistäminen on myös osoittautunut hyväksi keinoksi varhaisten kuivuusjaksojen tutkimuksessa. Esimerkiksi Linderholm ja Molin (2005) käyttivät tutkimuksessaan Keski-Ruotsin itäosassa viimeisten 250 vuoden aikana esiintyneestä kuivuudesta sekä dendrokronologian avulla rekonstruoituja SPI-indeksitilastoja että maanviljelijän päiväkirjahavaintoja. Heidän tulostensa mukaan erityisesti vuosina 1806-1835 esiintyi tutkimusalueella useita kuivia kesiä. Sama ajanjakso on ollut ilmeisesti kuiva myös muualla Keski- ja Etelä-Skandinaviassa sekä Keski-Euroopassa, mutta ei Suomessa ainakaan Helaman ja Lindholmin (2003) tulosten mukaan.

Järjestelmällisten meteorologisten havaintojen alkamisen jälkeen kuivuusjaksoja on analysoitu lähinnä erilaisten tilastollisten menetelmien avulla tarkastelemalla eri muuttujia tai niiden yhdistelmiä. Joidenkin laajempien, joissakin tapauksissa koko Euroopan aluetta käsittelevien tutkimusten yhteydessä on myös esiintynyt mainintoja Pohjois-Euroopan alueella esiintyneistä kuivista jaksoista (taulukko 1). Tutkimuksissa saadut tulokset eroavat kuitenkin toisistaan, koska kuivuutta on analysoitu niissä hyvin erilaisin menetelmin. Jotkin tutkimukset huomioivat meteorologisten tai hydrologisten kuivuutta aiheuttavien tekijöiden lisäksi myös kuivuuden sosioekonomiset ulottuvuudet. Taulukosta 1 huomataan, että kuivuusjaksot kestävät Pohjois-Euroopassa yleensä korkeintaan muutaman vuoden. Näin ollen kuivuus luonnonhasardina on Pohjois-Euroopassa aivan eri luokkaa kuin kuivuudelle alttiimmilla vähäsateisemmilla ja lämpimämmillä maapallon alueilla, joilla saattaa esiintyä useita vuosia ja jopa vuosikymmeniä kestäviä kuivuusjaksoja (Nicholls ym. 2005).

Taulukko 1. Pohjois-Euroopassa 1900-luvulla esiintyneitä kuivuusjaksoja. Kuivuustyyppi on määritelty meteorologiseksi, jos lähdetutkimuksessa on analysoitu ainoastaan sadannan poikkeamia tai vaikutuksia ei ole mainittu.

Ajankohta	Alue	Kuivuustyyppi	Lähde
1901–1911	Pohjois-Eurooppa, Brittein saaret ja Venäjän länsiosa mukaan lukien	Meteorologinen	Mauget (2006)
1904–1905 kesä-heinäkuu (14 kk)	Tanskaan, Etelä-Ruotsiin, Kaakkois-Norjaan, Liettuaan ja Latviaan Keski-Euroopasta ulottuva alue	Meteorologinen	Álvarez & Estrela (2000)
1921–1922 maalis-maaliskuu (13 kk)	Tanskaan, Etelä-Ruotsiin, Kaakkois-Norjaan, Liettuaan ja Latviaan Keski-Euroopasta ulottuva alue	Meteorologinen	Álvarez & Estrela (2000)
1932–1947	Pohjois-Eurooppa, Brittein saaret ja Venäjän länsiosa mukaan lukien	Meteorologinen	Mauget (2006)
1939–1940 elo-kesäkuu (11 kk)	Skandien vuoriston suojan puolella, Keski- ja Pohjois-Ruotsin, Suomen, Viron sekä Latvian itäosan ja Venäjän luoteisosan kattavalla alueella	Meteorologinen	Álvarez & Estrela (2000)
1963–1964 joulu-maaliskuu (4 kk)	Norjan länsirannikko	Hydrologinen	Stahl (2001)
1968–1969 marraskuu-kesäkuu (8kk)	Norjan länsirannikko	Meteorologinen	Álvarez & Estrela (2000)
1969 kesä	Ruotsi ja Tanska		Bradford (2000)
1969–1976	Pohjois-Eurooppa, Brittein saaret ja Venäjän länsiosa mukaan lukien	Meteorologinen	Mauget (2006)
1970 tammi-heinäkuu (7kk)	Norjan länsirannikko	Meteorologinen	Álvarez & Estrela (2000)
1971 tammi-toukokuu (5 kk), heinä-joulukuu (6 kk)	Tanskaan, Etelä-Ruotsiin, Kaakkois-Norjaan, Liettuaan ja Latviaan Keski-Euroopasta ulottuva alue	Meteorologinen	Álvarez & Estrela (2000)
1972 tammi-huhtikuu (4kk)	Tanskaan, Etelä-Ruotsiin, Kaakkois-Norjaan, Liettuaan ja Latviaan Keski-Euroopasta ulottuva alue	Meteorologinen	Álvarez & Estrela (2000)
1972 syys-lokakuu (2 kk)	Etelä-Skandinavia	Hydrologinen	Stahl (2001)
1974 kevät	Norja, Ruotsi ja Tanska		Bradford (2000)
1974 maalis-huhtikuu (2 kk)	60° leveyspiirin eteläp uoli	Hydrologinen	Stahl (2001)
1975 kesä	Ruotsi		Bradford (2000)
1976–1977 helmi-tammikuu (12 kk)	Tanskaan, Etelä-Ruotsiin, Kaakkois-Norjaan, Liettuaan ja Latviaan Keski-Euroopasta ulottuva alue	Meteorologinen	Álvarez & Estrela (2000)
1976 maalis-syyskuu (7 kk)	Norja, Ruotsi ja Tanska		Bradford (2000)
1976 myöhäiskesä	Pohjois-Eurooppa	Hydrologinen	Stahl (2001)
1976–1978 elo-loka (28 kk)	Norjan rannikko	Meteorologinen	Álvarez & Estrela (2000)
1978–1979 joulu-huhtikuu (5 kk)	Norjan rannikko	Meteorologinen	Álvarez & Estrela (2000)
1980 tammi-marraskuu (11 kk)	Norjan rannikko	Meteorologinen	Álvarez & Estrela (2000)
1982 tammi-joulukuu	Latviasta Liettuaan ja Kaakkois-Venäjälle ulottuva vyöhyke		Wilhite & Glantz (1985)
1983 tammi-elokuu	Norjan ja Ruotsin eteläosista Keski-Eurooppaan ulottuva vyöhyke		Wilhite & Glantz (1985)
1983 heinä-joulukuu (6 kk)	Ruotsista Keski-Eurooppaan ulottuva vyöhyke	Hydrologinen	Stahl (2001)
1989 touko-heinäkuu (3 kk)	Tanska	Hydrologinen	Stahl (2001)
1990 elo-syyskuu (2 kk)	Pohjois-Eurooppa	Hydrologinen	Stahl (2001)
1995 kesä ja syksy	Norja ja Ruotsi	Meteorologinen, hydrologinen, maankosteuteen liittyvä	Bradford (2000)

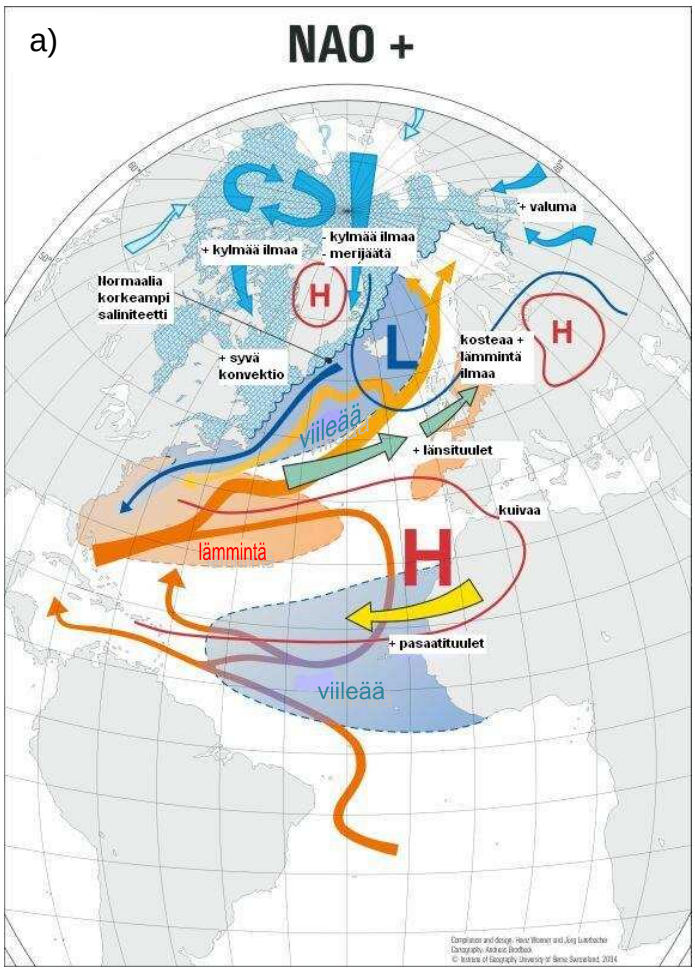
2.3.3 Kuivuusjaksojen meteorologiset taustatekijät

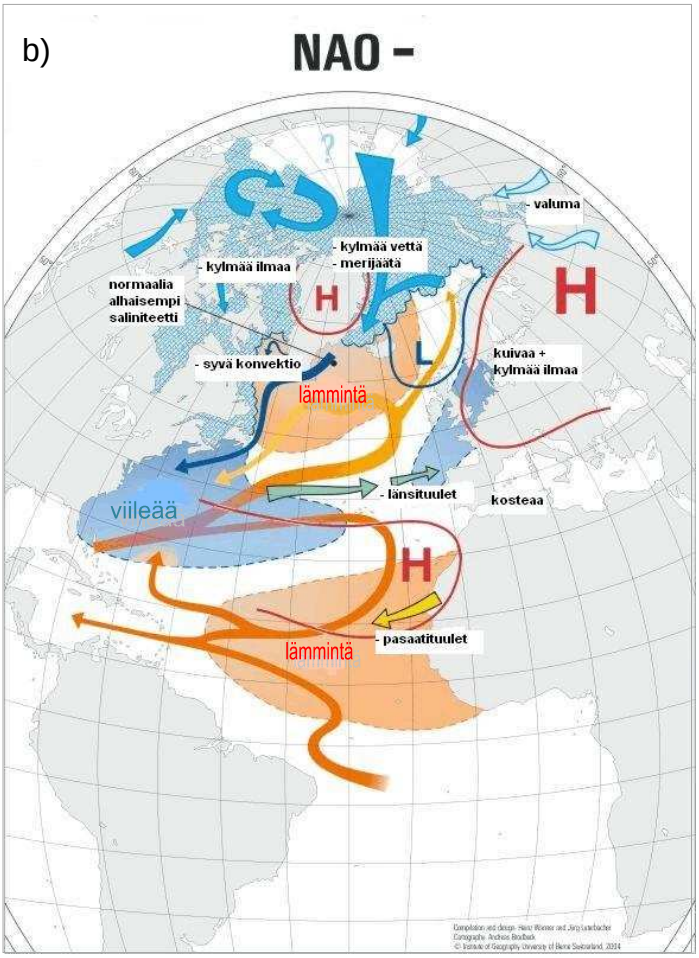
Pohjois-Euroopan kosteusolosuhteet vaihtelevat useilla eri ajallisilla mittakaavatasoilla meteorologisten olosuhteiden pysyvyyden mukaan. Lyhyen ajanjakson, korkeintaan muutaman päivän, vallitsevaan säätyyppiin vaikuttavat erityisesti liikkuvat matalapaineet, jotka tuovat mukanaan myös suurimman osan Pohjois-Euroopan sateista (Arvola 1987). Toisinaan matalapaineiden välille saattaa kuitenkin syntyä sateettomien päivien jaksoja, jotka pitkittyessään saattavat aiheuttaa kuivuutta.

Vähäsateisten jaksojen pitkittyminen viikkojen pituisiksi johtuu yleensä muutaman tuhannen kilometrin pituisten ilmavirtausaaltojen aiheuttamista meridionaalisten tai zonaalisten säätyyppien vaihteluista (Arvola 1987). Meridionaaliset eli pohjois-eteläsuuntaiset ilmavirtaukset ovat useimmiten syynä sellaisten säätyyppien esiintymiseen, joihin liittyy kuivuusolosuhteiden syntyä suosivia tekijöitä, kuten vähäisiä sateita ja/tai korkeita lämpötiloja. Näistä erityisesti keväällä ja alkukesällä tyypillisesti Norjanmerellä esiintyvät sulkukorkeapainetilanteet aiheuttavat kuivia polaarisia ilmavirtauksia Pohjois-Eurooppaan. Tilanteet, joissa vahva korkeapaine vallitsee koko Pohjois-Euroopassa ovat harvinaisia, mutta tällöin erityisesti kesällä lämpötilat nousevat korkeiksi ja potentiaalinen haihdunta on suurta. Talvella puolestaan voi esiintyä kovia pakkasia, jolloin ilma ei voi sisältää suuria määriä kosteutta ja on siksi kuivaa. Kesällä Pohjois-Eurooppaan voi saapua myös huomattavan lämmintä ilmaa kaakosta tilanteessa, jossa Venäjän yllä vallitsee voimakas korkeapaine ja Keski-Euroopan tai Itämeren yllä on paikallaan pysyvä matalapaine. Zonaalisten eli suurin piirtein itä-länsisuuntaisten ilmavirtausten vallitessakin voi Skandien vuoriston itäpuolisilla alueilla esiintyä kuivan ja lämpimän sään jaksoja föhn-ilmiön seurauksena. Länsituulten mukana Pohjois-Euroopan mantereelle saapuva kostea ilmamassa joutuu vuoriston kohdatessaan nousemaan ylös, jolloin se viilenee ja kosteus tiivistyy sateeksi vuorten länsipuolella (Arvola 1987; Tikkanen 2005). Näin ollen vuorten itäpuolella laskeva ilmamassa on kuivempaa ja se myös lämpenee nopeasti laskiessaan. Frich ja Frydendahl (1994) ovat myös panneet merkille, että luoteistuulten vallitessa Skandien vuoriston aiheuttama föhn-ilmiö vaikuttaa myös Tanskan ilmastoon ja saattaa pahentaa kuivuusolosuhteita.

Pitempien muutamia vuosia tai jopa vuosikymmeniä kestävien normaalia alhaisemman sadannan jaksojen taustalla on sen sijaan yleensä pitempiaikainen muutos laajoissa ilmakehän kiertoliikkeissä (Arvola 1987; Nicholls ym. 2005). Euroopassa Islannin ja Azorien välisen ilmanpaine-eron vaihtelun aiheuttamalla Pohjois-Atlantin oskillaatiolla on erityisesti katsottu olevan tällainen vaikutus (esim. Hurrell 1995; Wanner ym. 2001). Ilmanpaine-erojen vaihtelun aiheuttaman ilmamassojen heilahtelevan liikkeen on todettu olevan olemassa ympäri vuoden, mutta se on voimakkainta talvella, jolloin sen vaikutus Euroopan ilmastoon on myös ilmeisin (Barnston & Livezey 1987; Hurrell & van Loon 1997). Islannin ja Azorien välisen ilmanpainegradientin ollessa suuri, niin sanottu NAO-indeksi on positiivinen (Hurrell 1995). Tällaisessa tilanteessa Azorien korkeapaineen ympäri myötäpäivään ja Islannin matalapaineen ympäri vastapäivään kiertävät tuulet saavat aikaan voimakkaita länsituulia, jotka työntävät kosteaa ilmaa Pohjois-Eurooppaan (kuva 2a) (Hurrell 1995; Wanner ym. 2001). Samaan aikaan Etelä-Euroopassa on normaalia kuivempaa. Ilmanpaine-eron heiketessä ja NAO-indeksin muuttuessa negatiiviseksi myös länsituulet heikkenevät ja kosteuden saapuminen Pohjois-Eurooppaan on vähäisempää (kuva 2b). Joskus harvoin tilanne kääntyy täysin päinvastaiseksi eli Islannin yllä vallitsee korkeapaine ja Azorien yllä matalapaine (Wibig 2008). Alhaisen NAO-indeksin aikana Pohjois-Euroopassa on normaalia kuivempaa ja Välimeren alueella saadaan runsaita sateita (Hurrell 1995).

Kuva 2. Yksinkertaistettu esitys muutoksista meri-ilmakehä-merijää-järjestelmässä a) positiivisen ja b) negatiivisen NAO-indeksin aikana. Värilliset pinnat kuvaavat meriveden pinnan lämpötilaa ja merijään laajuutta, nuolet merivirtoja, valumaa ja tuulia ja punaiset ja siniset käyrät ja isot kirjaimet ilmanpainejärjestelmiä. NAO+ tilanteessa Pohjois-Euroopassa Atlantilta puhaltavat länsituulet ovat voimakkaita ja tuovat mukanaan kosteaa ja lauhaa ilmaa. Etelä-Euroopassa ja Pohjois-Afrikassa sen sijaan esiintyy kuivuutta. NAO– tilanteessa länsituulet heikkenevät ja myrskyjen reitti siirtyy etelämmäksi. Tällöin Pohjois-Euroopassa on normaalia kuivempaa ja Etelä-Euroopassa tavallista kosteampaa (Wanner ym. 2001, fig. 9a, s. 354 ja 9b, s. 355, muokattu).





NAO-indeksi on ollut ilmanpainehavaintojen alusta 1820-luvulta lähtien useimpina talvina (joulu-helmikuu) positiivinen (Jones ym. 1997; UCAR 2008). Useita peräkkäisiä talvia, jolloin indeksi on ollut negatiivinen, on esiintynyt kuitenkin esimerkiksi vuosina 1852–1856, 1939–1942, 1954–1956, 1961–1966, 1967–1971, 1975–1979 ja 1995–1998. Negatiivisimmillaan indeksi oli talvella (marraskuu-maaliskuu) vuonna 1995–1996 (Jones ym. 1997; Osborn 2009). Muiden vuodenaikojen NAO-indeksin arvo on vaihdellut jonkin verran kapeammalla arvovälillä kuin talven indeksiarvot. Jonesin ym. (1997) esittämässä kesän (kesä-elokuu) NAO-indeksin aikasarjassa esiintyy kuitenkin huomattava laskeva trendi 1930-luvulta lähtien.

NAO-indeksiä on kuitenkin kritisoitu siitä, että se yksinkertaistaa liiaksi todellisuudessa monimutkaisia ilmakehän prosesseja (Hanna ym. 2008). Lisäksi pitkäaikaistarkastelussa sen arvoihin ovat saattaneet vaikuttaa varhaisten ilmanpainemittausten virheet ja Islannin ja Azorien matala- ja korkeapaineen keskusten siirtymiset (Jones ym. 2003, cit, Hanna ym. 2008; Vinther ym. 2003). On siis syytä huomioida, että Pohjois-Euroopan kuivuusjaksoja ei voida luotettavasti ennustaa suoraan pelkän NAO-indeksin arvon perusteella.

2.3.4 Ilmastonmuutoksen vaikutus kuivuusjaksojen esiintymiseen

Ilmaston lämpenemisellä on arvioitu olevan vaikutuksia maapallon hydrologiseen sykliin ja siihen liittyvien ääri-ilmiöiden, kuten tulvien ja kuivuuksjaksojen, esiintymiseen (Trenberth 1998; Huntington 2006). Globaalilla tasolla maapallon pintalämpötilojen nousu lisää potentiaalista haihduntaa eli evaporaatiota ja samalla ilmakehän kyky pidättää kosteutta kasvaa. Yhden asteen lämpeneminen kasvattaa ilman vedenpidätyskykyä keskimäärin 7 % (Trenberth ym. 2007). Ilmakehän sisältämän maksimikosteuden kasvu on kuitenkin suurempaa alemmilla leveysvyöhykkeillä kuin korkeammilla (Trenberth 1998). Lisäksi absoluuttisen maanpinnalta ja kasvillisuudesta tapahtuvan haihdunnan eli evapotranspiraation määrä riippuu saatavilla olevan kosteuden määrästä, joka vaihtelee alueellisesti. Vähintään kohtalaisten kertasademäärien on kuitenkin todettu olevan riippuvaisempia ilmakehässä jo olevan kaukaisemmilta alueilta saapuneen kosteuden määrästä kuin paikallisen potentiaalisen haihdunnan suuruudesta. Tästä seuraa se, että haihdunnan ja sadannan välinen suhde vaihtelee alueellisesti siitä huolimatta, että näiden muuttujien välillä vallitseekin aina tasapaino globaalilla tasolla. Näin ollen ilmaston lämmetessä joillakin maapallon alueilla sademäärät kasvavat ja toisilla vähenevät.

Pohjois-Eurooppaan saapuu kosteutta pääasiassa länsituulten mukana. Länsituulten voimakkuutta ilmentävän NAO-indeksin arvo on vaihdellut melko epäsäännöllisesti ilmanpainemittausten alusta alkaen, mutta 1900-luvun jälkipuoliskolla siinä on esiintynyt positiivinen trendi, jonka aikana kosteat ja lämpimät länsituulet ovat yleistyneet jonkin verran, mikä on näkynyt myös korkeina sademäärinä (Hurrell 1995; Jones ym. 1997, Mauget 2006). On kuitenkin vielä epäselvää, kuinka ilmastonmuutos on vaikuttanut ja tulee vaikuttamaan NAO-indeksin arvon vaihteluun (Osborn 2004; Meehl ym. 2007). Länsituulissa mahdollisesti tapahtuvat muutokset saattavat kuitenkin olla ratkaisevassa osassa tulevien kosteusolosuhteiden kehityksen kannalta. Mahdollisesta kosteiden länsituulten yleistymisestä huolimatta potentiaalisen evapotranspiraation kasvu saattaa kuitenkin pahentaa kuivuutta negatiivisen NAO-indeksin aikana, kun tuulet eivät tuo Pohjois-Eurooppaan tarpeeksi kosteutta.

Pohjois-Euroopan vuosittaisten kokonaissademäärien on havaittu kasvaneen jonkin verran viime vuosisadan alusta lähtien (Trenberth ym. 2007), mutta muutosten suuruudet ovat vaihdelleet huomattavasti alueen eri osissa ja eri vuodenaikoina (Heino ym. 2008). Yleisesti ottaen sademäärien kasvu on ollut voimakkainta talvella 1900-luvun jälkipuoliskolla. Joillakin

alueilla, esimerkiksi Suomessa ja Kaakkois-Norjassa, selkeitä tilastollisesti merkitseviä trendejä ei kuitenkaan ole esiintynyt. Pohjois-Euroopan sademäärissä tulevaisuudessa tapahtuvia muutoksia on myös yritetty mallintaa useissa tutkimuksissa. IPCC:n neljännessä arviointiraportissa (AR4) esitettyjen A1B-päästöskenaarioon perustuvien mallinnusten mukaan kokonaisvuosisadanta kasvaa vuosiin 2080–2099 mennessä vuosien 1980–1999 tasoon nähden Tanskassa ja Ruotsin eteläosissa 5-10 %, Norjan eteläosissa, Ruotsin keskiosissa ja Baltiassa 10–15 % ja Ruotsin ja Norjan pohjoisosissa sekä Suomessa 15–20 % (Christensen ym. 2007). Eniten sademäärät kasvavat talvella (joulu-helmikuu). Kesällä sademäärät saattavat sen sijaan jopa vähentyä hieman Tanskassa ja Ruotsin eteläosissa.

Kuivuuden kannalta eri aikavälien sadannan minimiarvojen suuruudessa ja esiintymisfrekvensseissä tapahtuvat muutokset ovat kuitenkin merkittävämpiä kuin keskiarvoissa tapahtuvat muutokset. Eri ajanjaksojen ääriarvojen on todettu reagoivan eri tavoin keskimääräisiin sadannan muutoksiin. Alle kuukauden pituisten ajanjaksojen sadannan ääriarvojen on todettu olevan yhteydessä kertasadannan intensiteettiin (Räisänen 2005), joka puolestaan on yhteydessä ilmakehän sisältämän kosteuden maksimimäärään Claussius-Clapeyronin yhtälön mukaisesti (Trenberth 1999; Allen & Ingram 2002; Trenberth ym. 2003). Ilman maksimikosteuden muutosten lisäksi myös muut, erityisesti konvektiosateisiin vaikuttavat tekijät säätelevät lyhyiden ajanjaksojen sadannan ääriarvoja (Doswell III ym. 1996; Lenderink & Van Meijgaard 2008). Näin ollen lyhyiden ajanjaksojen sadannan ääriarvojen muutokset eivät ole suorassa yhteydessä pitempien ajanjaksojen sadannan keskiarvon muutoksiin (Räisänen 2005). Sademäärien vuosien välisen vaihtelun on lisäksi havaittu olevan suurempaa lyhyillä, alle kuukauden kestävillä kuin pitkillä, kuukausi-vuositason ajanjaksoilla. Joidenkin ilmastomallinnusten mukaan kuukausitason vaihtelu tulee kasvamaan entisestään sellaisilla alueilla, joilla sademäärät kasvavat (Räisänen 2002, fig. 6, s. 2402). Erot eri vuodenaikojen välillä tulevat kuitenkin olemaan tässä suhteessa vähäisiä. Pitempien ajanjaksojen ääriarvoissa tapahtuvien muutosten on arvioitu jäljittelevän vielä paremmin sadannan keskiarvojen muutoksia. Esimerkiksi Räisäsen (2005, fig. 2, s. 313) sadannan ääriarvojen tulevia muutoksia tarkastelevan tutkimuksen mukaan on todennäköistä, että sekä talven (joulu-helmikuu) että kesän (kesä-elokuu) sademäärien absoluuttiset maksimi- ja minimiarvot tulevat Pohjois-Euroopassa sademäärien keskiarvon kasvun vuoksi nousemaan. Kesän suhteen eri ilmastomallien tulosten välillä tosin esiintyy jonkin verran enemmän ristiriitaisuuksia kuin talvella.

Räisänen (2005) tutki myös kolmen kuukauden sadannan ääriarvojen frekvensseissä tapahtuvia muutoksia ja totesi sadannan keskiarvon kasvun vaikuttavan enemmän runsaiden sateiden esiintymisfrekvenssiin kuin varsinaisesti maksimisademäärien suuruuteen. Ääriarvojen frekvenssi ei kuitenkaan muutu lineaarisesti sadannan keskiarvon vaihtelun myötä, vaan riippuu oleellisesti vaihteluvälin suuruudesta ja siinä mahdollisesti tapahtuvista muutoksista (Katz & Brown 1992; Räisänen 2005). Vaihtelun ollessa vähäistä saattaa esimerkiksi nykyilmastossa kerran 80 vuodessa esiintyvä kertasadannan maksimiarvo esiintyä tulevaisuudessa monta kertaa useammin samalla ajanjaksolla, jos sadannan keskiarvo kasvaa. Sadannan minimiarvot eivät kuitenkaan voi vähentyä kuin korkeintaan 100 %. Joka tapauksessa Räisäsen (2005) tutkimuksen mukaan on todennäköistä, että Pohjois-Euroopassa runsaita sateita esiintyy tulevaisuudessa useammin erityisesti talvikuukausina. Sen sijaan nykyilmastossa esiintyvät sadannan minimiarvot todennäköisesti harvinaistuvat. On kuitenkin syytä ottaa myös huomioon, että ainakin paikallisella tasolla ilmakehän sisältämän maksimikosteuden kasvu lisää keskimääräistä kertasadannan intensiteettiä nopeammin kuin pitkän ajan kokonaissademäärät kasvavat (Trenberth 1998). Tästä seuraa se, että sateiden väliin jäävät kuivuusjaksot saattavat pidentyä.

Vaikka sademäärien vaihtelulla onkin suurin merkitys kuivuusjaksojen esiintymisessä, on siis myös lämpötiloilla ja potentiaalisen haihdunnan suuruudella merkitystä (Sheffield & Wood 2008). Ilmastomallinnuksiin perustuvat kuivuustutkimukset ovat antaneet voimakkaita viitteitä esimerkiksi maankosteuteen liittyvän kuivuuden lisääntymisestä Etelä-Euroopan alueella erityisesti kesällä (Wang 2005; Sheffield & Wood 2008). Sen sijaan Pohjois-Euroopassa mallinnusten osoittamat muutokset kuivuuden esiintymisessä ovat sademäärien kasvusta huolimattahuolimatta yleensä vähäisiä ainakin vuositasolla. Wangin (2005) IPCC:n neljännessä arviointiraportissa käytettyyn 15 globaaliin ilmastomallinnukseen perustuvan arvion mukaan talvisateiden lisääntyminen saattaa kuitenkin johtaa maankosteuden kasvuun talvella Pohjois-Euroopassa. Kesän maankosteuden suhteen mallien antamat tulokset olivat kuitenkin ristiriitaisempia. Tämä saattaa johtua siitä, että eri mallit arvioivat eri tavoin sitä kuinka ilmaston lämpenemisen aiheuttama potentiaalisen evaporaation kasvu suhteutuu lisääntyneeseen sadantaan. Kylmän ilmaston takia talvella sadannan lisääntyminen on kuitenkin todennäköisesti suhteessa suurempaa kuin haihdunnan lisääntyminen. Vaikka käytettävissä olevan veden määrä tulevaisuudessa todennäköisesti kasvaa, tapahtuu myös veden tarpeessa muutoksia. Lämmin ilma esimerkiksi kiihdyttää kesällä kasvien kasvua ja lisää haihduntaa, jolloin vettä kuluu enemmän (Hakala & Peltonen-Sainio 2008). Lumen ja roudan väheneminen ja kevään aikaistuminen saattavat myös lisätä maankosteuden vajetta kesällä (Sheffield & Wood 2008).

3 Aineisto ja menetelmät

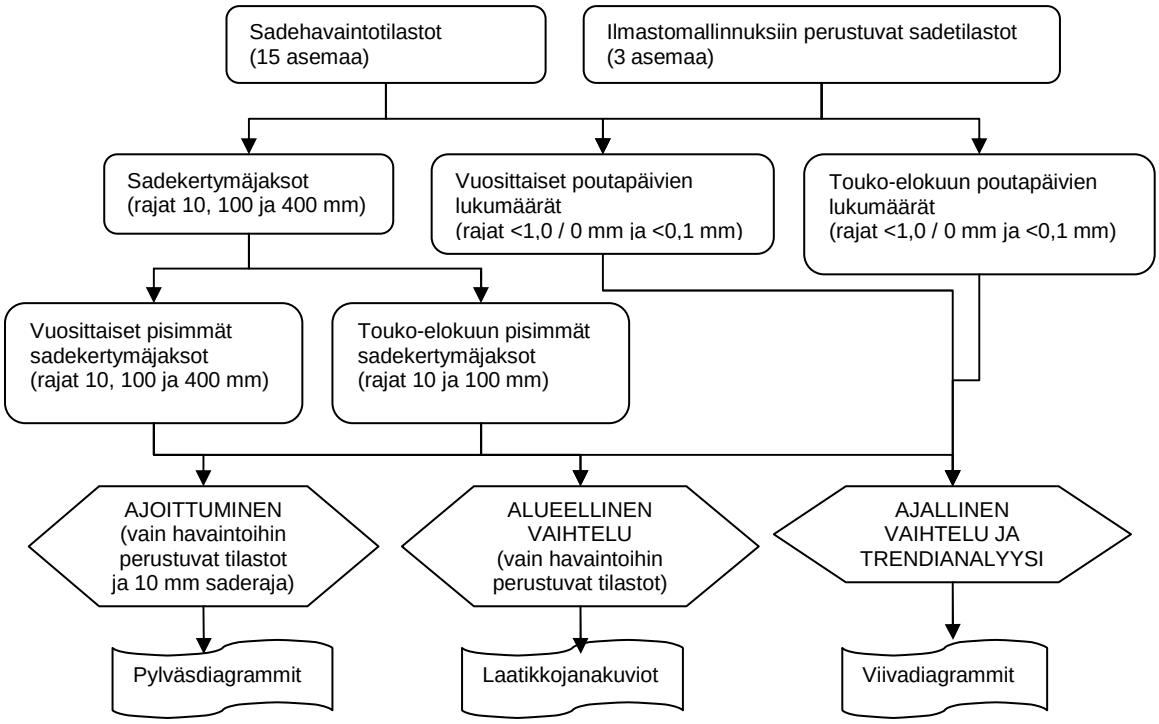
3.1 Tutkimuksen yleinen rakenne

Meteorologisen kuivuuden esiintymistä Pohjois-Euroopassa tarkastellaan tässä tutkimuksessa säähavaintoasemilta saatujen sadehavaintotilastojen avulla käyttämällä kahta saderajoihin perustuvaa operationaalista kuivuuden analyysimenetelmää: 1) pisimpien 10, 100 ja 400 mm sadekertymäjaksojen pituutta ja 2) poutapäivien (alle 1,0 mm / 0 mm sadetta) sekä täysin sateettomiksi (alle 0,1 mm sadetta) luokiteltujen päivien lukumääriä. Erikseen tarkastellaan koko vuoden ja kesän (touko-elokuu) aineistoja. Samoja analyysimenetelmiä sovellettaan myös ilmastomallinnusten tuottamiin sadetilastoihin kuivuuden esiintymisessä tulevaisuudessa mahdollisesti tapahtuvien muutosten selvittämiseksi.

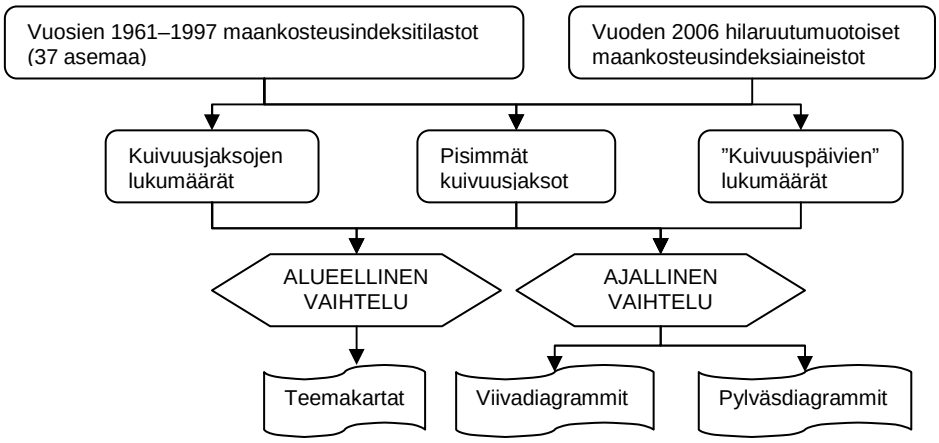
Suomen osalta kuivuuden esiintymistä tarkastellaan tutkimuksessa lähemmin myös teoreettisen maankosteuden indeksiarvon vaihtelun avulla. Kytköksiä meteorologisen ja maankosteuteen perustuvan kuivuuden välille pyritään etsimään lopuksi vertailemalla 10 mm sadekertymäjaksojen pituuksia jaksojen aikana esiintyneiden maankosteusindeksin mukaisten ”kuivuuspäivien” lukumääriin.

Tutkimus jakautuu aineistojen ja analyysimenetelmien perusteella kolmeen osakokonaisuuteen (kuva 3). Menetelmällisesti suurin osa työstä suoritettiin tilastollisten analyysien avulla, mutta jonkin verran hyödynnettiin myös kartografisia menetelmiä.

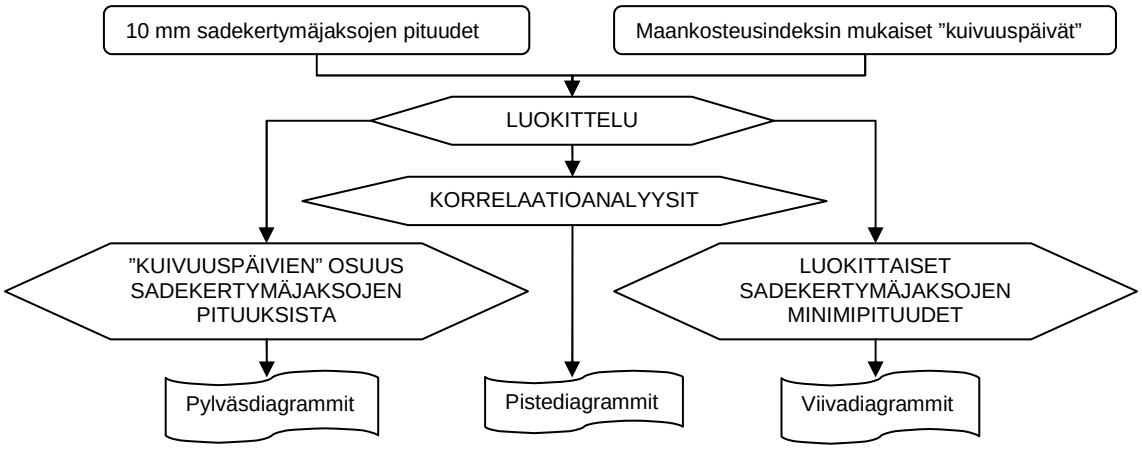
Osa 1. Pohjois-Euroopan sadetilastoihin perustuvat analyysit (luku 3.2)



Osa 2. Suomen maankosteusindeksitilastoihin perustuvat analyysit (luku 3.3)



Osa 3. Meteorologisen ja maankosteuteen liittyvän kuivuuden välinen yhteys (luku 3.4)



Kuva 3. Tutkimuksen yleinen kulku. Kaaviossa on esitetty käytetyt aineistot, menetelmät ja tuotokset.

3.2 Sadetilastoihin perustuvat kuivuusanalyysit

3.2.1 Sadehavaintotilastot

Tutkimuksessa käytettiin Pohjoismaiden ja Baltian maiden alueella sijaitsevien 15 säähavaintoaseman päivittäisiä sadetilastoja. Sadetilastot saatiin European Climate Project and Assessment (ECA&D) –projektin tietokannasta (Klein Tank 2007) lukuunottamatta Suomen aineistoja, jotka saatiin Ilmatieteen laitokselta. Tutkimukseen valittiin asemia, joiden sadehavaintoaikasarjat sisälsivät mahdollisimman vähän katkoksia, olivat useamman vuosikymmenen pituisia ja ulottuivat vähintään 1990-luvulle. Pisimmät valituista aikasarjoista ulottuivat 1800-luvulta ja lyhimmät 1900-luvun puolivälistä 2000-luvun ensimmäiselle vuosikymmenelle (taulukko 2). Kaksi valituista säähavaintoasemista sijaitsee Manner-Euroopan länsirannikolla, viisi Itämeren rannikolla ja loput sisämaassa (kuva 4).

Taulukko 2. Tutkimuksessa käytetyt sadehavaintoaikasarjat

Maa	Asema	Jakso
Latvia	Riika	1943–2007
Liettua	Vilna	1900–2007
Norja	Bergen-Samnanger	1901–2006
	Oslo	1901–2004
Ruotsi	Karesuvanto	1961–2007
	Karlstad	1918–2003
	Östersund	1918–2003
Suomi	Helsinki	1844–2008
	Jyväskylä	1883–2008
	Kajaani	1887–2000
	Sodankylä	1908–2008
Tanska	Hammer Odde	1874–2007
	Kööpenhamina	1874–2007
	Vestervig	1874–2007
Viro	Tartto	1901–2004

Kuva 4. Tutkimuksessa käytetyt säähavaintoasemat (Taustakartan lähde: MapInfo 2008)

3.2.2 Meteorologisen kuivuuden operationaalinen määrittely ja analysoidut muuttujat

Sadehavaintoihin perustuvista tilastoista analysoitiin ensin Ilmatieteen laitoksella valmiiksi peräkkäisistä päivistä koostuvia jaksoja, joiden yhteenlaskettu sadekertymä jäi alle valitun raja-arvon. Vastaavaa menetelmää ovat käyttäneet esimerkiksi Venäläinen ym. (2007) tutkimuksessa, jossa tarkasteltiin eri saderajojen mukaan määriteltyjen kuivuusjaksojen pituuksien toistuvuusaikatasoja Suomessa. Venäläinen ym. käyttivät rajoina 10, 25, 50, 100 ja 200 mm sademääriä, mutta tässä tutkimuksessa päädyttiin käyttämään vain 10, 100 ja 400 mm:n saderajoja. Pohjois-Euroopan olosuhteissa 10 mm saderaja kuvaa sadekertymäajan pituutta keskimäärin päivien ja viikkojen mittakaavassa, 100 mm saderaja kuukausien ja

400 mm raja kuivimpina vuosina jopa vuoden mittakaavassa. Kaikki näiden rajojen mukaan määritellyt sadekertymäjaksot eivät kuitenkaan olleet varsinaisia kuivuusjaksoja, sillä määritelmään ei ollut sisällytetty mitään sadannan normaalitasoon tai vähäsateisuuden seurauksiin kytkettyä ennakkoehtoa jakson kestosta. Kyse oli siis tässä vaiheessa puhtaasta meteorologisesta sadekertymäjaksojen analyysista. Sadekertymäjakson pituuden kasvaessa kuivuusolosuhteiden voidaan kuitenkin olettaa pahenevan, minkä vuoksi tuotetusta aineistosta poimittiin mihin tahansa aikaan vuodesta ja 10 ja 100 millimetrin rajoilla määritetyistä jaksoista myös erikseen kesäkautena (toukokuu-elokuu) alkaneet pisimmät sadekertymäjaksot. Näitä jaksoja voidaan luonnehtia vähintään ”vähäsateisiksi” ja joissakin tapauksissa jopa ”kuiviksi”. Lyhyesti ilmaistuna työssä käytettävä meteorologisen kuivuusjakson määritelmä on muotoa: *vuoden (kesän) pisin jakso, joka muodostuu peräkkäisistä päivistä, joiden yhteenlaskettu sademäärä jää alle 10/100/400 mm (10/100 mm)*. Tässä määritelmässä oletetaan, että kuivuusjaksoja esiintyy vähintään kerran vuodessa ja kesäkaudessa.

Tuotetut pisimpien sadekertymäjaksojen aikasarjat sisälsivät tiedot sadekertymäjaksojen alkamis- ja päättymisajankohdista sekä jaksojen pituuksista vuorokausina. Joissakin tapauksissa mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneet sadekertymäjaksot saattoivat ajoittua suurimmaksi osaksi seuraavan vuoden puolelle erityisesti, kun ne olivat alkaneet loppuvuodesta ja saderaja oli 100 tai 400 millimetriä. Kesällä alkaneet sadekertymäjaksot jatkuivat myös usein elokuun jälkeen. Tämä seikka ei kuitenkaan vaikuttanut jaksojen kestoon, joten sillä ei ollut merkitystä jatkoanalyysien kannalta.

Toiseksi meteorologisen kuivuuden esiintymistä tarkasteltiin sadetilastoista analysoitujen poutapäivien vuotuisen ja kesäkauden lukumäärän mukaan. Poutapäiviksi määriteltiin lähtökohtaisesti sellaiset päivät, joiden sademäärä oli alle 1,0 mm. Lisäksi tarkasteltiin erikseen täysin sateettomiksi määriteltyjä päiviä, joiden sademäärä oli alle 0,1 mm. Sadehavaintojen ilmoittamistarkkuuden vaihtelu yhden desimaalin ja yhden millimetrin välillä (liite 1) aiheutti kuitenkin joitakin ongelmia poutapäivien poimimiselle. Yhden millimetrin tarkkuudella ilmoitettuihin sadetilastoihin merkityt 0 mm:n lukemat sisältävät pyöristysperiaatteen mukaisesti kaikki sademäärät välillä 0,0–0,4 mm, joten näiden aikasarjojen 0 mm sadepäivien lukumäärät ovat pienempiä suhteessa yhden desimaalin tarkkuudella ilmoitettujen aikasarjojen alle 1,0 mm sadepäivien lukumääriin, jotka sisältävät kaikki 0,0–0,9 mm:n sadepäivät. Toisaalta yhden millimetrin tarkkuudella ilmoitettujen aikasarjojen 0 mm sadepäivien lukumäärät ovat suhteellisesti hieman suurempia kuin yhden desimaalin tarkkuudella ilmoitettujen aikasarjojen alle 0,1 mm sadepäivien lukumäärät, joihin lukeutuvat vain 0,0 mm arvon saaneet sadepäivät. Tämän vuoksi poutapäivien lukumäärien analysoinnissa päädyttiin tarkastelemaan erikseen eri tarkkuuksilla ilmoitettuihin sadehavaintoaikasarjoihin perustuvia poutapäivätilastoja. Joissakin aineistoissa sadehavaintojen ilmoitustarkkuus vaihteli myös aikasarjan aikana, minkä vuoksi jouduttiin suorittamaan joitakin pyörityksiä. Näin vältyttiin myös näennäisten ajallisten trendien syntymiseltä sellaisissa aikasarjoissa, joiden alku- ja loppuosissa sademäärät oli ilmoitettu eri tarkkuuksilla. Esimerkiksi Östersundin ja Karlstadin asemilla, joilla sadehavainnot oli vuodesta 1961 lähtien ilmoitettu yhden millimetrin tarkkuudella, pyöristettiin aikasarjan alun yhden desimaalin tarkkuudella ilmoitetut havainnot yhden millimetrin tarkkuuteen. Karesuvannon aikasarjan kohdalla puolestaan pyöristettiin vuodesta 2000 alkavat yhden desimaalin tarkkuudella ilmoitetut sademäärät lähimpään kokonaislukuun. Tartossa koko aikasarjan mittaustarkkuus oli yksi millimetri. Näiden neljän aseman aikasarjoista laskettiin pelkästään 0 mm sadepäivien lukumäärät. Vilnan, Riian ja Hammer Odden aikasarjat sisälsivät myös joitakin vuosia, joiden sademäärät oli ilmoitettu yhden millimetrin tarkkuudella, mutta koska niitä oli vähemmän kuin yhden desimaalin tarkkuudella ilmoitettuja vuosia, jätettiin ne kokonaan pois analyysista.

Poutapäivien ja sateettomien päivien lukumäärille ei tässä tutkimuksessa määritelty minkäänlaista raja-arvoa, jonka ylittävät vuodet ja kesät oltaisiin voitu määritellä kuiviksi. Sen sijaan keskityttiin tarkastelemaan ainoastaan poutapäivien ja sateettomien päivien lukumäärien ajallisessa kehityksessä tapahtuneita muutoksia.

3.2.3 Tilastoaineistojen esikäsittely

Ennen jatkoanalyyseja sadehavaintoihin perustuvien pisimpien sadekertymäjaksojen ja poutapäivien aikasarjoista oli poistettava alkuperäisten sadetilastojen sisältämien aukkojen ja väärien sademäärien tuottamat virheelliset arvot (liite 1). Näiden virheiden poistaminen suoritettiin eri saderajoille ja analyyseille ennalta määrättyjen kriteerien mukaan.

10 mm saderajan mukaan määriteltyjen pisimpien sadekertymäjaksojen aikasarjoista poistettiin ne vuodet, joista alkuperäisissä sadehavaintoaikasarjoissa puuttui asemakohtaisen tilaston pisimmän selvästi ei-virheellisen sadekertymäjakson pituutta enemmän päiviä. Esimerkiksi tutkimuksen aloittamisajankohdan vuoksi vajaaksi jäänyt vuosi 2008 poistettiin tämän kriteerin mukaan kaikista aikasarjoista, joissa se esiintyi. Poistot suoritettiin, koska muutoin olisi ollut ainakin teoriassa mahdollista, että vuoden pisin kuivuusjakso olisi oikeasti ollut pitempi kuin jakso, joka oli määritelty pisimmäksi silloin kun puuttuvia päiviä ei oltu huomioitu. Lisäksi ne vuodet, joista puuttui vähemmän kuin pisimmän sadekertymäjakson pituutta vastaava määrä päiviä, mutta joiden pisin jakso sisälsi katkoksen, jätettiin pois analyysista. Sen sijaan ne vuodet, joiden havaintosarjoista puuttui pisimmän jakson pituutta vähemmän päiviä, mutta joiden pisin sadekertymäjakso ei sisältänyt katkosta, otettiin mukaan analyysiin. Vaikka ei voida olla täysin varmoja siitä, ovatko vajaiden, mutta mukaan otettujen vuosien pisimmiksi määritellyt jaksot todellisuudessa pisimpiä sadekertymäjaksoja, katsottiin niiden keston kuitenkin olevan tarpeeksi suuntaa-antava.

100 ja 400 mm:n saderajoilla tilaston pisimmän sadekertymäjakson käyttäminen puuttuvien päivien maksimirajana ei toiminut, koska jaksot olivat niin pitkiä, että suurin osa vajaista vuosista olisi joka tapauksessa sisältänyt riittävän määrän päiviä. Sen sijaan, jos pisin jakso sisälsi useamman kuin muutaman päivän kestävän katkoksen tai se katkesi kesken esimerkiksi kokonaan puuttuvien kuukausien vuoksi, kyseistä sadekertymäjaksoa ei otettu mukaan analyyseihin.

Jotkin pisimpien sadekertymäjaksojen aikasarjat sisälsivät myös poikkeuksellisen pitkiä jaksoja. Näistä osa karsiutui pois, kun alkuperäisiä sadehavaintosarjoja tarkasteltiin lähemmin ja huomattiin, että jotkin vuodet sisälsivät selvästi virheellisiä havaintoja, esimerkiksi useita kuukausia kestäviä täysin sateettomia jaksoja, jotka eivät ole tavanomaisia tarkasteltavalla ilmastovyöhykkeellä.

Poutapäivien lukumääriä kuvaavista aikasarjoista poistettiin koko vuoden osalta ne vuodet, joissa oli alle 360 päivää (oikea lukumäärä 365/366 päivää) ja kesäkuukausia tarkasteltaessa, ne kaudet, jotka sisälsivät alle 120 päivää (oikea lukumäärä 123 päivää). Nämä rajat määriteltiin mielivaltaisesti, mutta kuitenkin siten, ettei puuttuvien päivien lukumäärän katsottu merkittävästi vaikuttavan poutapäivien todelliseen lukumäärään.

3.2.4 Kuivuuden alueellisen ja ajallisen vaihtelun analysointi

Pohjoismaiden ja Baltian maiden alueella kuivuudessa esiintyviä alueellisia eroja tarkasteltiin havainnollistamalla sadehavaintoihin perustuvien pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksien sekä poutapäivien lukumäärien vaihteluvälien eroja asemakohtaisissa aikasarjoissa. Analyysit suoritettiin erikseen koko vuoden ja kesäkauden osalta SPSS 16.0 –tilasto-ohjelmalla.

Toiseksi selvitettiin koko vuoden ja kesän pisimpien 10 mm sadekertymäjaksojen ajoittumisajankohtien todennäköisyyksiä tarkastelemalla jaksojen alkamiskuukausien suhteellisia frekvenssejä kunkin aseman havaintoaineistoihin perustuvissa tilastoissa SPSS–ohjelmistolla. 10 mm:n sadekertymäjaksot valittiin tarkasteluun, koska niiden vaikutusten aikamittakaava on lyhyt ja siten niiden pituuden ja ajoittumisen merkitys on esimerkiksi kasvillisuuden vedensaannin kannalta suuri. Toisaalta esimerkiksi 400 mm sademäärän kertymäaika saattoi joissakin tapauksissa olla yli vuoden pituinen, joten sen suhteen ajoittumisen tarkastelu ei olisi ollut mielekästä. Suomessa Drebs ym. (2002) ja Tanskassa Frich ym. (1997) ovat selvittäneet yli 1,0 ja 0,1 mm sadepäivien esiintymistä eri kuukausina, minkä vuoksi käänteisen alle 1,0 ja 0,1 mm sadepäivien esiintymisen vuosijakauman tarkastelua ei katsottu tässä työssä tarpeelliseksi.

Kolmanneksi pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksien ja poutapäivien lukumäärien ajallista vaihtelua analysoitiin asemakohtaisesti Microsoft Excel 2002 -taulukkolaskentaohjelmistolla. Aikasarjoissa mahdollisesti esiintyviä lineaarisia trendejä tarkasteltiin käyttämällä pienimmän neliösumman menetelmää (esim. Spiegel & Stephens 1999). Trendien tilastollista merkitsevyyttä testattiin parametrisella t-testillä (esim. Önöz & Bayazit 2003) sekä aikasarjojen analysoinnissa yleisesti käytetyllä ei-parametrisella Mann-Kendallin testillä (esim. Helsel & Hirsch 2002). t-testi on yksinkertainen lineaariseen regressioon perustuva menetelmä, joka sisältää oletuksen tarkasteltavan muuttujan arvojen normaalijakaumasta (Önöz & Bayazit 2003). Poikkeavat arvot vaikuttavat näin ollen sen antamiin tuloksiin. Mann-Kendallin testi sen sijaan ei sisällä oletusta normaalijakaumasta ja perustuu vain aikasarjan arvojen erojen suuntaan, joten sen antamien tulosten on todettu olevan vähemmän riippuvaisia poikkeavista arvoista. Mann-Kendallin testin on havaittu hylkäävän todennäköisemmin nollahypoteesin, H_0 = ei trendiä, sen ollessa väärä silloin, kun tarkasteltavien arvojen jakauma on vino. Normaalisti jakautuneilla muuttujan arvoilla t-testi sen sijaan hylkää väärän hypoteesin todennäköisemmin. Lievästi vinoilla jakaumilla molemmat testit sen sijaan antavat suurin piirtein samoja tuloksia. Ei-parametristen testien käyttö on kuitenkin yleisesti suositeltavampi vaihtoehto silloin, kun havaintojen jakauma on vino tai sen muodosta ei olla varmoja (Sneyers 1990). Tässä tutkimuksessa testejä käytettiin kuitenkin varmuuden vuoksi rinnakkain, koska arvojakaumien muoto vaihteli jonkin verran. Niissä tapauksissa, joissa testien tulokset olivat ristiriidassa keskenään, todennäköisemmin oikeassa oleva tulos tulkittiin tutkimalla tarkasteltavan aikasarjan arvojakauman muotoa SPSS-ohjelmistossa. Nollahypoteesin hylkäämisen rajana käytettiin merkitsevyystasoa 0,05. Merkitsevyystasolla 0,01 tilastollisesti merkitsevän trendin katsottiin olevan ”erittäin merkitsevä”.

3.2.5 Ilmastomallinnuksiin perustuvien sadetilastojen analyysit

Ilmastonmuutoksen vaikutuksia kuivuuden esiintymiseen vuoteen 2100 mennessä arvioitiin neljän alueellisen ilmastomallin avulla tuotetuista sadeaineistoista. Hilaruutumuotoiset tulevan sadannan mallinnukset saatiin Ilmatieteen laitoksen käyttöön ENSEMBLES-projektin kautta (Hewitt 2005) (taulukko 3). Mallinnukset perustuvat IPCC:n päästöskenaarioon A1B, jonka mukaan maailman väestön määrä kasvaa 2000-luvun puoliväliin ja kääntyy sitten laskuun, talouskasvu ja teknologian kehitys ovat nopeita ja energian tuotannossa hyödynnetään tasapuolisesti fossiilisia polttoaineita ja muita energialähteitä (Nakicenovic & Swart 2000). Hiilidioksidipäästöt kasvavat tämän skenaarion mukaan 2000-luvun puoliväliin asti, mutta alkavat laskea sen jälkeen.

Taulukko 3. Tutkimuksessa käytetyt ilmastomalliaineistot. Alueelliset ilmastomallinnukset on tuotettu Euroopan komission rahoittaman ilmastonmuutoksen ja sen seurausten tutkimukseen keskittyvän ENSEMBLES-projektin kansainvälisten osanottajainstituutioiden toimesta (Hewitt 2005; Jacob ym. 2008)

Instituutio	Globaali ilmastomalli	Alueellinen ilmastomalli	Ajanjakso
Community Climate Change Consortium for Ireland (C4I)	HadCM3	RCA3	1961–2099
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ)	HadCM3	CLM	1961–2050
Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI)	ECHAM5	RACMO	1961–2100
Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M)	ECHAM5	REMO	1961–2100

Meteorologisen kuivuuden esiintymisessä tulevaisuudessa tapahtuvia muutoksia keskityttiin tarkastelemaan Jyväskylän, Hammer Odden ja Tarton asemilla. Ilmastomallinnuksiin perustuvat sadeaineistot muodostuivat 25 x 25 km hilaruutuaineistoista, joista jatkoanalyyseja varten poimittiin Ilmatieteen laitoksella valittujen asemien koordinaatteja lähinnä olevien hilaruutujen päivittäiset sademäärät. Koska hilaruudun alueella kuitenkin sataa useammin kuin yksittäisessä mittauspisteessä, oli hilaruutuaineistoista poimituissa tilastoissa suhteessa enemmän sadepäiviä kuin pistemittauksiin perustuvissa aikasarjoissa. Lisäksi hilaruutujen arvot määräytyvät ruudun sateiden keskiarvona, minkä vuoksi esimerkiksi suuret paikalliset kertasademäärät leikkautuvat pois. Tämän vuoksi sadekeräinten avulla suoritettujen mittausten ja mallinnusten tuottamia sademääriä ei voida suoraan verrata toisiinsa ja mallinnustuloksiin perustuvia analyyseja käytettiinkin tässä työssä vain tulevien trendien arviointiin.

Ilmatieteen laitoksella määritettiin myös ilmastomallinnuksiin perustuvista sadetilastoista eri saderajoihin perustuvien sadekertymäjaksojen pituudet sekä vuosittaiset ja kesäkausittaiset pisimmät jaksot vastaavasti kuin sadehavaintoihin perustuvien tilastojen kohdalla. ECHAM5/RACMO- ja ECHAM5/REMO-mallinnuksiin perustuvista sadetilastoista laskettiin tutkimuksen aikana myös vuosittaiset ja kunkin vuoden kesäkauden alle 1,0 mm ja alle 0,1 mm sadepäivien lukumärät. HadCM3/RCA3- ja HadCM3/CLM-aineistoja ei käytetty tähän analyysiin, koska niiden tulosten muoto ei soveltunut jatkokäsittelyyn.

Ilmastomallinnuksiin perustuvat aikasarjat eivät sisältäneet katkoksia tai virheellisiksi luokiteltuja poikkeuksellisia arvoja, joten ne sisällytettiin jatkoanalyyseihin sellaisenaan. Pisimpien sadekertymäjaksojen pituuden ja poutapäivien lukumäärän ajallisten trendien tarkastelu suoritettiin Jyväkylän, Hammer Odden ja Tarton ilmastomallinnuksiin perustuville aikasarjoille vuodesta 2001 lähtien vastaavalla tavalla kuin sadehavaintoaineistojen kohdalla.

3.3 Maankosteusindeksiin perustuvat kuivuusanalyysit

3.3.1 Kuivuuden määrittely maankosteuden perusteella

Suomen osalta kuivuuden esiintymistä tarkasteltiin lisäksi maankosteuden vaihtelua kuvaavan indeksin avulla. Indeksiä on perinteisesti käytetty metsäpaloriskin arvioimiseen Suomessa (toinen nimitys: metsäpaloindeksi, engl. Finnish Forest Fire Index, FFI) (Venäläinen & Heikinheimo 2003), mutta tässä yhteydessä sitä sovellettiin kuivuustutkimukseen.

Maan pintakerroksen kosteuteen vaikuttavat lähinnä haihdunnan voimakkuus sekä maaperän vedenpidätyskyky (Heikinheimo ym. 1996). Veden varastoituminen pintamaakerrokseen riippuu puolestaan sademäärästä ja veden suodattumisesta maaperän läpi. Maankosteusindeksi

kehitettiin Heikinheimon ym. (1996) vuonna 1995 tekemien kenttäkokeiden perusteella, joissa tarkasteltiin orgaanisen pintamaakerroksen (tilavuuspaino n. 150 kg/m³) kuivumistehokkuuden (todellisen evaporaation suhde potentiaaliseen evaporaatioon) ja hetkellisen tilavuusmittaisen maan pintakerroksen kosteuden välistä suhdetta sekä varastoituneen sadeveden ja sadannan välistä suhdetta.

Maankosteusindeksi määritetään yleensä 60 mm:n paksuiselle pintamaakerrokselle (Venäläinen & Heikinheimo 2003). Pintamaan kosteuden mallintaminen voidaan aloittaa tilanteessa, jolloin maankosteuden arvo voidaan arvioida likimääräisesti. Tällainen ajankohta on yleensä keväällä lumien sulamisen jälkeen, jolloin maankosteus on lähellä kenttäkapasiteettia. Tuolloin maan pintakerroksen tilavuusmittaisen kosteuden oletetaan olevan 50 %. Maankosteuden muutos tästä lähtöarvosta määritetään päivä kerrallaan potentiaalisen evaporaation ja sadannan avulla (Heikinheimo ym. 1996). Maankosteuden määrittämiseksi tarvitaan tiedot päivittäisestä sadekertymästä, kolmen tunnin välein mitattavasta lämpötilasta, suhteellisesta ilmankosteudesta, tuulennopeudesta ja auringonsäteilystä. Potentiaalisen evaporaation laskemiseksi tarvitaan myös tiedot nettosäteilystä ja maaperän lämpövirrasta. Maankosteusindeksin laskeminen lopetetaan yleensä niin sanotun metsäpalokauden jälkeen syyskuun lopussa.

Metsäpalovaroituskäytäntöjä varten tilavuusmittaisen maankosteuden arvot skaalataan välille 1,0-6,0, jossa suuremmat arvot osoittavat vähäisempää maankosteutta ja siten suurempaa metsäpaloriskiä (taulukko 4) (Heikinheimo ym. 1996). Metsäpalovaroitus annetaan tilannekohtaista harkintaa soveltaen, kun indeksi saavuttaa arvon 4,0.

Taulukko 4. Maankosteuden ja maankosteusindeksin (FFI) luokitukset (Heikinheimo ym. 1996, Table 1, s. 554 mukaan)

Maankosteus (m³/m³)	FFI	Kuvaus
≤0,10	6,0	Erittäin kuiva
0,11–0,14	5,0–5,9	Kuiva
0,15–0,19	4,0–4,9	Kohtalaisen kuiva
0,20–0,25	3,0–3,9	Kohtalaisen kostea
0,26–0,32	2,0–2,9	Kostea
≥0,33	1,0–1,9	Erittäin kostea

”Kuivuuspäiviksi” tässä työssä määriteltiin taulukon 4 mukaisesti sellaiset päivät, joiden maankosteusindeksin arvo on yhtä suuri tai suurempi kuin 4,0. Kuivuusjaksot määriteltiin vastaavasti koostuviksi peräkkäisten ”kuivuuspäivien” muodostamista jaksoista. Näin ollen jakson aikana tilavuusmittaisen maankosteuden arvo on koko ajan alle 0,20 m³/m³.

3.3.2 Maankosteusindeksitilastoista analysoidut muuttujat

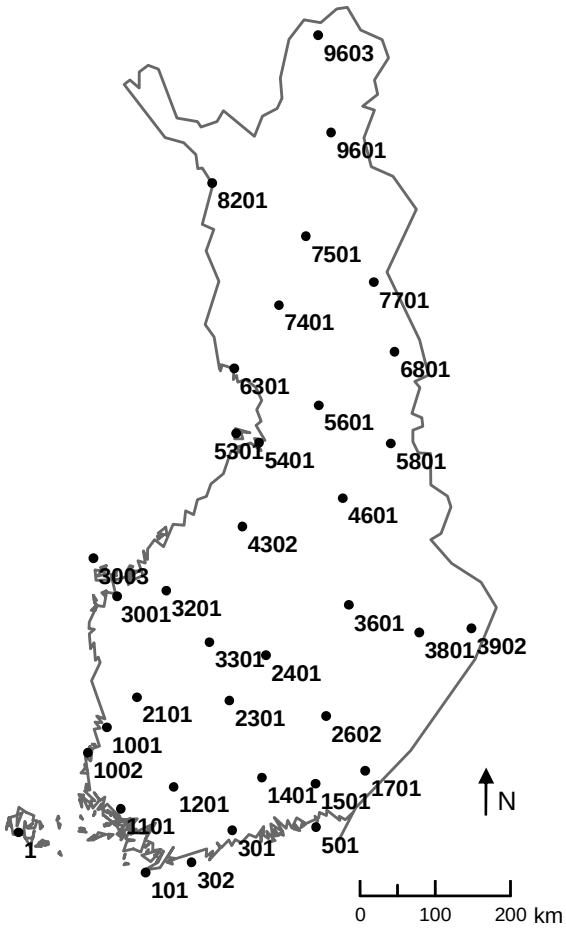
Tutkimuksessa käytettiin 37 suomalaisen aseman säähavaintojen avulla laskettuja maankosteusindeksitilastoja (taulukko 5, kuva 5). Ilmatieteen laitos on määrittänyt maankosteusindeksin päivittäiset arvot vuosille 1961–1997 (huhti-syyskuu).

Maankosteusindeksitilastoista poimittiin kuivuusjaksot käyttäen indeksin arvoa 4,0 kuivuutta osoittavan maankosteuden rajana (vrt. taulukko 4). Vaikka kaikki näin määritellyt kuivuusjaksot ovat ainakin teoriassa jo määritelmänsä mukaan kuivuusjaksoja, on niiden kestolla kuitenkin merkitystä kuivuuden vaikutusten voimakkuuden kannalta. Tämän vuoksi aineistosta poimittiin lisäksi kunkin vuoden pisimmät kuivuusjaksot.

Maankosteusindeksiaineistosta analysoitiin myös asemakohtaiset ”kohtalaisen kuivien” tai ”kuivien” (FFI = 4,0–5,9) ja erikseen varsinaisten ”kuivien” päivien (FFI = 5,0–5,9) (vrt. taulukko 4) vuosittaiset lukumäärät SPSS-ohjelmistossa. Erittäin kuivia päiviä (FFI ≥ 6,0) ei tilastoissa ollut yhtään, joten niiden lukumääriä ei tarkasteltu.

Taulukko 5. Maankosteusindeksitarkastelussa käytetyt säähavaintoasemat

Asema nro	Sijainti	Asema nro	Sijainti
1	Maarianhamina	3301	Ähtäri
101	Hanko	3601	Kuopio
301	Helsinki-Vantaa	3801	Joensuu
302	Inkoo	3902	Ilomantsi
501	Kotka	4302	Kajaani
1001	Pori	4601	Nivala
1002	Rauma	5301	Hailuoto
1101	Turku	5401	Oulu
1201	Jokioinen	5601	Pudasjärvi
1401	Lahti	5801	Suomussalmi
1501	Utti	6301	Kemi-Tornio
1701	Lappeenranta	6801	Kuusamo
2101	Kankaanpää	7401	Rovaniemi
2301	Jämsä	7501	Sodankylä
2401	Jyväskylä	7701	Salla
2602	Mikkeli	8201	Muonio
3001	Vaasa	9601	Inari-Ivalo
3003	Mustasaari	9603	Utsjoki
3201	Kauhava		



Kuva 5. Maankosteusindeksitarkastelussa käytetyt säähavaintoasemat. Numerot kartalla viittaavat taulukossa 5. mainittuihin asemien numeroihin. (Taustakartan lähde: MapInfo 2008)

3.3.3 Kuivuuden alueellisen ja ajallisen vaihtelun analysointi

Metsäpalokauden kuivuusjaksojen lukumäärän ja pisimmän kuivuusjakson pituuden alueellista vaihtelua tarkasteltiin interpoloimalla 37 havaintoasemalle lasketut pitkänajan keskiarvot kartalle. Keskiarvot laskettiin vuosien 1966–1995 tietojen perusteella, koska kyseinen 30-vuotisjakso sisältyi useimpien asemien aikasarjoihin. Interpolointi suoritettiin ArcGIS 9.2 –paikkatieto-ohjelman avulla. Interpoloinnissa käytettiin kriging-menetelmää ja hilaruudun kooksi valittiin 1 x 1 km. Kuivuusjaksojen lukumäärän ja pisimmän kuivuusjakson pituuden ajallista vaihtelua vuosina 1961–1997 tarkasteltiin lisäksi kymmenellä mittausasemalla Microsoft Excel – taulukkolaskentaohjelman avulla.

Asemakohtaisista vuosien 1966–1995 kuukausittaisista ja koko metsäpalokauden kuivuuspäivien lukumäärien keskiarvoista tuotettiin myös alueellista vaihtelua kuvaavia 1 x 1 km hilaruutukoon teemakarttoja. Lisäksi kuivuuspäivien lukumäärän ajallista vaihtelua tarkasteltiin kymmenellä asemalla Excel-diagrammien avulla.

3.3.4 Hilaruutumuotoiset maankosteusindeksiaineistot

Vuoden 1997 jälkeen Ilmatieteen laitoksella siirryttiin tuottamaan 10 x 10 kilometrin hilaruudukkoon interpoloituihin säähavaintoihin perustuvaa alueellista maankosteusindeksiaineistoa. Hilaruutuaineistoista tarkasteltiin tässä työssä esimerkkinä poikkeuksellisen kuivan kesän 2006 touko-elokuun maankosteuden alueellista vaihtelua.

Tutkimuksessa käytetyt pistemäiset ja vuoden 2006 hilaruutumuotoiset aineistot eivät ole kuitenkaan suoraan vertailukelpoisia keskenään, sillä hilaruutumuotoisen aineiston tuottamiseen käytetyt sadetiedot on saatu tutka-aineistoista, kun taas varhaisemmissa säähavaintoasemien indeksilaskelmissa on käytetty sadekeräinten havaintoja (Venäläinen 2009). Vuoden 2006 laskelmissa käytetyt säteilytiedot sen sijaan perustuvat vielä havaintoihin, vaikka myöhemmin onkin siirrytty käyttämään ilmakehämallien antamia tietoja. Hilaruutuaineiston alueellinen tarkkuus on kuitenkin sadetutka-aineiston paremman alueellisen kattavuuden vuoksi parempi kuin pisteaineistosta interpoloidun aineiston. Vuoden 2006 hilaruutuaineistoa ei myöskään ollut saatavilla huhti- ja syyskuulta, mikä vaikuttaa jonkin verran joidenkin analyysien vertailukelpoisuuteen kyseiset kuukaudet kattavien vuosien 1961–1997 aineistoihin perustuvien analyysien kanssa.

Vuoden 2006 hilaruutumuotoisesta maankosteusindeksiaineistosta poimittiin kunkin tutkimuksessa käytetyn säähavaintoaseman koordinaatteja lähinnä olevan hilaruudun tiedot kuivuusjaksojen lukumääristä, pisimmän kuivuusjakson pituuksista sekä ”kuivuuspäivien” lukumääristä. Nämä tiedot interpoloitiin edelleen 1 x 1 km hilaruutukoon teemakartoiksi.

3.4 Meteorologisen kuivuuden ja maankosteuden välinen yhteys

Lopuksi tutkimuksessa pyrittiin tarkastelemaan syvällisemmin meteorologisen kuivuuden operationaalisten määritelmien ja ”todellisen”, maanpinnalla havaittavina vaikutuksina ilmenevän kuivuuden välistä yhteyttä. Tämän yhteyden perusteellinen analyysi olisi todellisuudessa vaatinut maaperän vesitasapainoon liittyviä kenttäkokeita, joiden suorittaminen ei tämän työn puitteissa kuitenkaan ollut mahdollista. Sen sijaan tarkastelu suoritettiin tilastollisesti tutkimalla 10 mm sadekertymäjaksojen pituuden vaikutusta jaksojen kanssa yhtä aikaa esiintyvien maankosteusindeksin mukaisten ”kuivuuspäivien” (FFI $\geq$4,0) lukumääriin. Tutkimusmenetelmänä käytettiin tätä varten kehitettyä tilastollista analyysia, joka perustuu samaan oletukseen sademäärän ja pintamaan kosteuden välillä vallitsevasta, haihdunnan säätelemästä yhteydestä kuin maankosteusindeksin laskentamenetelmäkin (Heikinheimo ym. 1996). Maa-aineksen tai karikekerroksen laatu voidaan jättää analyysissa huomiotta, koska sen voidaan olettaa pysyvän vakiona samassa mittauspisteessä (ei tosin vastaa täysin todellisuutta) ja koska maankosteuden arvot on laskettu siitä riippumattomasti haihdunnan ja sadannan suhteen avulla. Sadekertymäjaksoa edeltävät maankosteusolosuhteet vaikuttavat kuitenkin siihen kuinka nopeasti vähäsateisuus ja haihdunta saavat aikaan maankosteusindeksin mukaista kuivuutta, joten ne on otettava analyysissa huomioon.

Tarkastelun konkreettisena tavoitteena oli siis selvittää minkä pituiset 10 mm sadekertymäjaksot ja maankosteusindeksin mukaisten kuivuuspäivien lukumäärät ovat

yhteydessä toisiinsa tietyissä olosuhteissa. Oletuksena oli, että tietyissä ”vakio-olosuhteissa” suurin piirtein samanpituiset alle 10 mm sadekertymäjaksot tuottavat aina suurin piirtein saman määrän maankosteusindeksin mukaisia kuivuuspäiviä. Toisin sanoen pyrkimyksenä oli siis luoda eräänlainen kuivuuden operationaalinen määritelmä, joka vastaisi kysymykseen siitä, kuinka pitkä 10 mm sadekertymäjakson täytyy olla tietyissä olosuhteissa, jotta se aiheuttaa tietyn määrän maankosteuden alenemiseen liittyviä kuivuuspäiviä.

Aineistoina tarkastelussa käytettiin Helsinki-Vantaan, Jyväskylän, Kajaanin ja Sodankylän maankosteusindeksi- ja sadekertymäjaksotilastoja (vuodet 1961–1997). Maankosteusindeksitilastoissa oli ilmoitettu myös päivittäiset tilavuusmittaiset maankosteuden arvot, sademäärät sekä potentiaalinen haihdunta, joita hyödynnettiin tarkastelussa. Sadekertymäjakso- ja poutapäivätutkimuksessa käytettyä Helsingin Kaisaniemen sadeaineistoa ei voitu käyttää tässä yhteydessä, koska maankosteusindeksitilastoja ei ollut saatavilla kyseisestä mittauspisteestä. Myöskään ulkomaisilta asemilta ei ollut saatavilla maankosteusaineistoja. Voitiin kuitenkin olettaa, että eri asemien tuloksissa ei olisi merkittäviä eroja, sillä maankosteuden arvon määritys on perustunut teoreettisiin sadannan ja haihdunnan välisen suhteen laskelmiin.

Tilastojen analyysi jakautui useaan vaiheeseen, jotka suoritettiin Excel-taulukkolaskentaohjelman avulla. Ensimmäisessä vaiheessa etsittiin manuaalisesti sellaiset pisimmät alle 10 mm sadekertymäjaksot, jotka osuivat päällekkäin maankosteusindeksin mukaisten kuivuuspäivien kanssa. Alla taulukon 6 esimerkissä tällaisia sadekertymäjaksoja on yhtä maankosteusindeksin mukaisten peräkkäisten kuivien päivien muodostamaa jaksoa kohden kolme kappaletta. Taustaoletuksena on, että nämä kolme jaksoa ikään kuin yhdessä ”aiheuttavat” kyseisen maankosteusindeksin mukaisen kuivuusjakson siten, että jakso 1. on yhteydessä kahden ensimmäisen kuivan päivän syntymiseen, jakso 2. seitsemän ensimmäisen päivän syntymiseen ja jakso 3. koko kuivuusjakson syntymiseen. Vaikka jakso 3. osuukin yksin kokonaan päällekkäin kuivuusjakson kanssa, on jaksojen 1. ja 2. huomioiminen kuitenkin oleellista, sillä jaksojen jälkeisistä sateista riippumatta niiden voidaan katsoa muodostaneen kahden ja seitsemän päivän pituiset kuivuusjaksot itsenäisesti.

10 mm sadekertymäjaksojen saderajan ilmaiseminen muodossa ”*alle* 10 mm” on harhaanjohtava, sillä taulukon 6 esimerkissä mainitut kolme sadekertymäjaksoa sisältävät tietysti myös itsessään lyhempiä alle 10 mm sadekertymäjaksoja, jotka päättyvät samana päivänä kuin sadekertymäjaksot, joiden aikainen sademäärä on lähinnä 10 mm:ä. Koska tutkimuksessa pyrittiin kuitenkin tarkastelemaan ennen kaikkea juuri 10 mm saderajan mukaisia sadekertymäjaksoja, ei lyhempiä jaksoja huomioitu. Lisäksi, jos pisimmän alle 10 mm sadekertymäjakson sisäiset lyhyemmät jaksot olisi huomioitu, olisi tullut analysoiduksi paljon jaksoja, joissa osa pisimmän sadekertymäjakson pituutta lyhyemmistä pituuksista vastaisi samaa määrää kuivuuspäiviä ja osa omaa pituuttaan vastaavaa päivien lukumäärää. Tämä olisi todennäköisesti vääristänyt lopputuloksia.

Jatkoanalyysiä varten merkittiin uuteen taulukkoon 10 mm sadekertymäjakson pituudet ja näihin liittyvien maankosteusindeksin mukaisten kuivuuspäivien lukumäärät. ”Vakio-olosuhteiden” määrittelemiseksi merkittiin muistiin myös sadekertymäjakson aikaisen haihdunnan keskiarvo ja sadekertymäjakson alkua edeltävän päivän maankosteuden arvo. Tämän jälkeen sadekertymäjaksojen ja niitä vastaavien maankosteusindeksin mukaisten kuivuuspäivien lukumäärien tiedot jaettiin luokkiin ensin haihdunnan keskiarvojen mukaan ja sitten näin saadut luokat vielä edelleen edeltävän maankosteuden mukaan uusiin luokkiin. Haihduntaluokat muodostuivat 1 mm luokista ja maankosteusluokkien rajat määriteltiin taulukon 4 mukaisesti (taulukko 7). Viittausten yksinkertaistamiseksi myöhemmissä vaiheissa käytetään yhdistelmäluokkatunnuksia.

Taulukko 6. Ote Helsinki-Vantaan vuoden 1963 (14.7.–9.8.) maankosteusindeksitilastosta. Maankosteusindeksi-sarakkeessa indeksin mukainen kuivuusjakso on rajattu neliöllä ja sen kanssa ajallisesti päällekkäin osuvien 10 mm sadekertymäjaksojen pituudet on merkitty näkyviin.

Maankosteus (m³/m³)	Sademäärä (mm)	Evaporaatio (mm)	Maankosteusindeksi	1. sadekertymä-jakso (päiviä)	2. sadekertymä-jakso (päiviä)	3. sadekertymä-jakso (päiviä)
0,252	6	3,5	2,928827			
0,27	2,6	2,8	2,661575			
0,252	0	2,8	2,928827	1		
0,29	4,8	3	2,387969	2		
0,26	0	4,2	2,807591	3	1	
0,232	0	5	3,249115	4	2	
0,234	1,5	5	3,21598	5	3	
0,264	3,2	3,7	2,748448	6	4	1
0,218	0	8,6	3,487935	7	5	2
0,195	0	6,4	3,906419	8	6	3
0,178	0	6,1	4,236617	9	7	4
0,172	0,4	5,2	4,357396	**10**	8	5
0,169	0,3	3,3	4,418614		9	6
0,161	0	4,1	4,584567		10	7
0,15	0	6	4,81917		11	8
0,156	0,6	2,2	4,690283		12	9
0,15	0	3,3	4,81917		**13**	10
0,181	4	5,8	4,177057			11
0,167	0	5,8	4,459734			12
0,155	0	5,9	4,711611			13
0,144	0	6,4	4,950268			14
0,145	0,3	2,5	4,928265			15
0,137	0	5,5	5,106011			16
0,13	0	4,9	5,264763			17
0,126	0	3,3	5,35683			18
0,12	0	5,4	5,496773			**19**
0,265	11,3	2,2	2,733815			

Taulukko 7. Sadekertymäjakson aikaisen haihdunnan ja sadekertymäjaksoa edeltävän maankosteuden luokat. Yhdistelmäluokkien (36 kpl) tunnukset saadaan taulukosta yhdistämällä luokkien numerot. Esimerkiksi olosuhteet, joissa haihdunnan keskiarvo on 4,55 mm ja edeltävä maankosteus 0,17, kuuluvat luokkaan 4.3.

Haihdunta (mm)	**Haihduntaluokka**	**Maankosteus (m³/ m³)**	**Maankosteusluokka**
1,00-1,99	1	≤ 0,10	1
2,00-2,99	2	0,11-0,14	2
3,00-3,99	3	0,15-0,19	3
4,00-4,99	4	0,20-0,25	4
5,00-5,99	5	0,26-0,32	5
6,00-6,99	6	≥0,33	6

Kolmannessa vaiheessa tarkasteltiin sadekertymäjaksojen pituuden ja maankosteusindeksin mukaisten kuivuuspäivien välistä korrelaatiota eri luokissa. Korrelaatioiden voimakkuutta tarkasteltiin Pearsonin korrelaatiokertoimen merkitsevyyden avulla. Edellisten vaiheiden sisältämien oletusten perusteella voitiin odottaa, että muuttujien välillä vallitsisi positiivinen

tilastollisesti merkitsevä korrelaatio, eli että sadekertymäjaksojen pituuden kasvaessa maankosteusindeksin mukaisten kuivuuspäivien lukumäärä kasvaisi. Positiivinen korrelaatio oli tietysti odotettavissa jo yksinkertaisesti sen vuoksi, että mitä pitempi sadekertymäjakso on, sitä enemmän se voi sisältää kuivuuspäiviä sijainnista riippumatta. Lisäksi voitiin myös olettaa, että mitä suurempi on sadekertymäjakson aikainen haihdunta ja mitä vähäisempi on jaksoa edeltävä maankosteus, sitä suurempi osa sadekertymäjakson päivistä olisi varsinaisia kuivuuspäiviä. Tällä puolestaan on vaikutusta sadekertymäjaksoja vastaavien kuivuuspäivien lukumääriä kuvaavan pistejoukon läpi piirretyn pienimmän neliösumman mukaisen suoran kulmakertoimeen, jonka näin ollen voitiin odottaa todennäköisemmin olevan suurempi niissä luokissa, joissa sadekertymäjakson aikaisen haihdunnan keskiarvo on suuri ja edeltävä maankosteus alhainen. Pienimmän neliösumman mukaisen suoran yhtälön avulla voitiin myös määrittää kuivuutta aiheuttavien sadekertymäjaksojen teoreettiset minimipituudet, eli sellaiset pituudet, jotka ”aikaansaavat” vähintään yhden kuivuuspäivän.

4 Tulokset

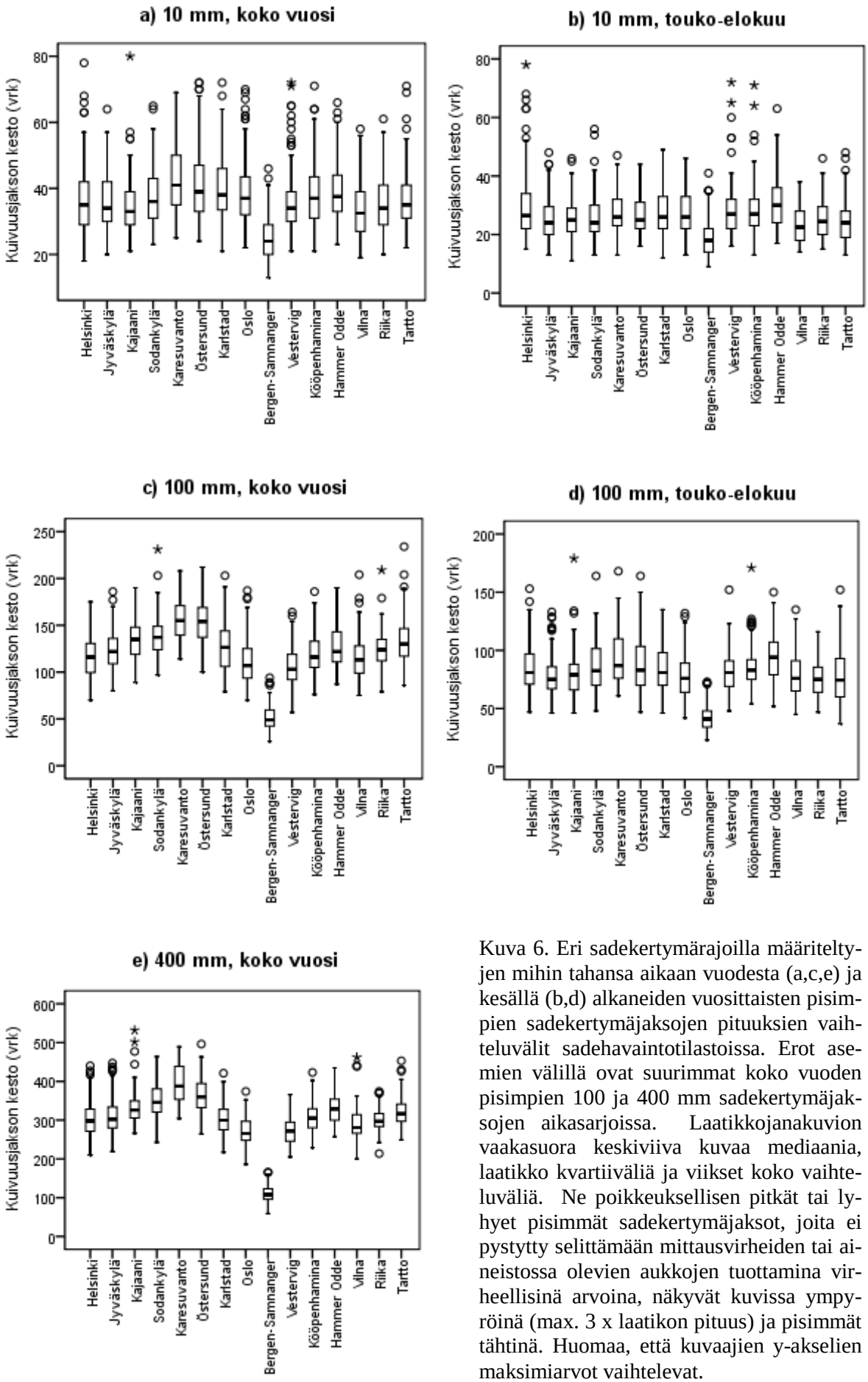
4.1 Pisimmät sadekertymäjaksot

4.1.1 Alueellinen vaihtelu

Pohjoismaiden ja Baltian maiden sadehavaintojen perusteella määriteltyjen pisimpien 10 mm sadekertymäjaksojen pituudet ovat asemakohtaisilla havaintojaksoilla vaihdelleet melko samanlaisilla vaihteluväleillä (kuvat 6a ja b). Selkeimmin erottuva poikkeus on Bergen-Samnangerin asema, jolla suurin osa pisimmistä jaksoista on ollut keskimäärin muiden asemien jaksoja lyhyempiä sekä koko vuoden että kesän tilastoissa. Kesäkuukausina alkaneet pisimmät kuivuusjaksot ovat kuitenkin olleet keskimäärin lyhyempiä kuin mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneet kuivuusjaksot kaikilla havaintoasemilla. Useimmilla asemilla on myös esiintynyt poikkeuksellisia, muita jaksoja pitempiä sadekertymäjaksoja.

100 mm saderajan mukaan määriteltyjen mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneiden pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksien vaihteluvälit ovat poikenneet eri asemilla toisistaan jonkin verran enemmän kuin 10 mm rajan mukaan määriteltyjen jaksojen pituuksien vaihteluvälit (kuva 6c). Lisäksi 10 mm saderajalla vain heikosti havaittava sadekertymäjaksojen piteneminen kohti pohjoista Suomen, Ruotsin ja Baltian maiden asemilla erottuu 100 mm rajan tarkastelussa selkeämmin. Sadekertymäjaksojen voidaan havaita pitenevän myös lännestä itään Norjan ja Ruotsin sekä Tanskan asemia tarkasteltaessa. Bergen-Samnangerin havaintoaseman pisimpien sadekertymäjaksojen kesto on ollut myös tällä saderajalla muita lyhyempi. Keskimäärin muita asemia pitempiä pisimmät sadekertymäjaksot ovat sen sijaan olleet Östersundin ja Karesuvannon asemilla. Kesällä alkaneiden pisimpien 100 mm sadekertymäjaksojen pituuksien asemakohtaiset vaihteluvälit poikkeavat toisistaan hieman vähemmän ja etelästä pohjoiseen ja lännestä itään tapahtuva vaihettuminen ei ole enää yhtä selkeää tai se puuttuu kokonaan, kuten esimerkiksi Baltian maiden asemilla (kuva 6d). Bergen-Samnangerin aseman kuivuusjaksot ovat kuitenkin olleet keskimäärin lyhyempiä kuin muilla asemilla. Karesuvannon ja Östersundin lisäksi myös Hammer Odde erottuu kesäkuukausien tarkastelussa muita keskimäärin pitemmillä kuivuusjaksoilla.

400 millimetrin saderajalla on erotettavissa sama etelästä pohjoiseen ja lännestä itään tapahtuva pisimpien sadekertymäjaksojen piteneminen kuin 100 mm saderajallakin (kuva 6e). Bergen–Samnangerin asema erottuu tälläkin rajalla muita lyhyemmillä sadekertymäjaksoilla. Karesuvannon jaksot ovat sen sijaan keskimäärin hieman muita pitempiä.

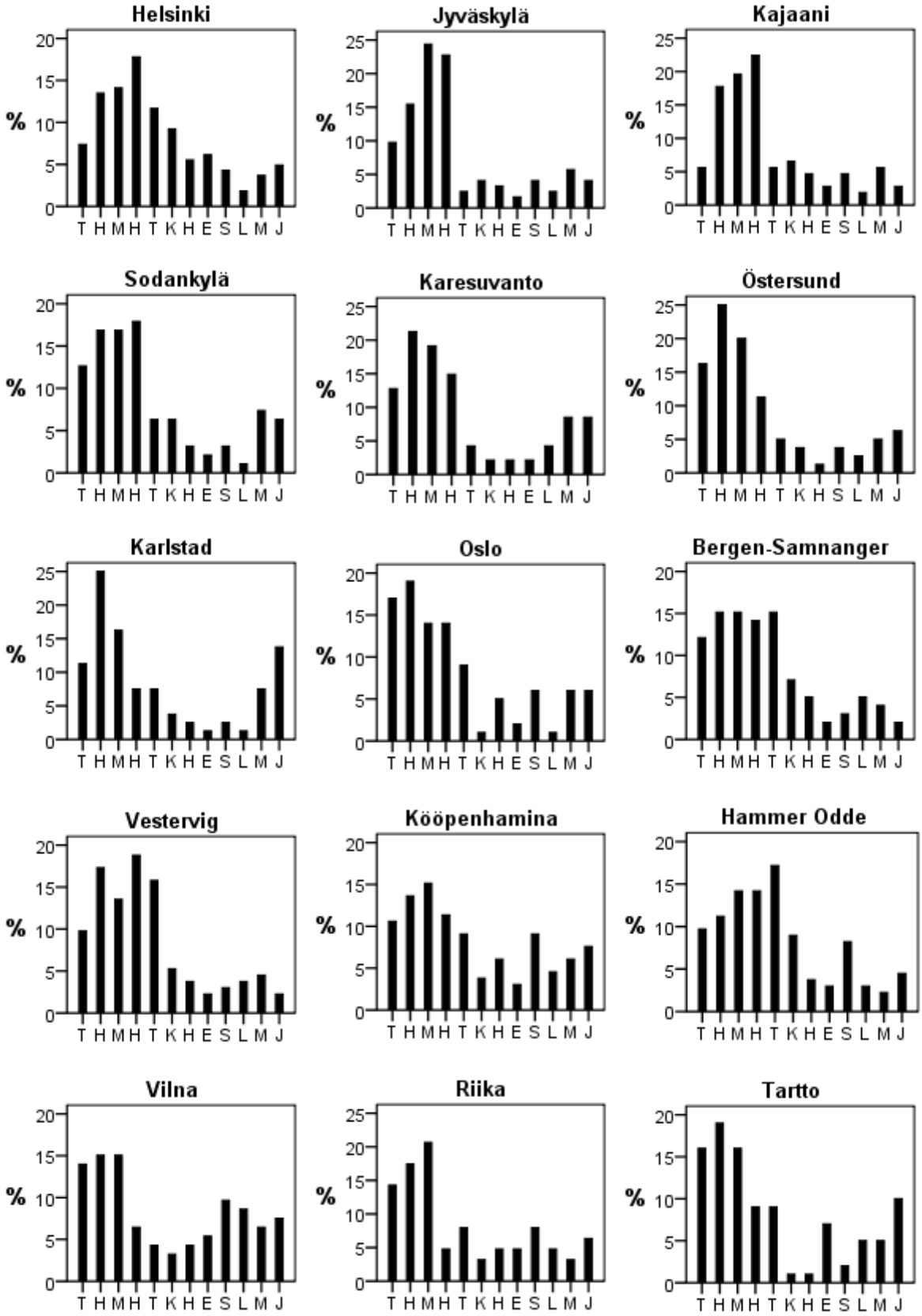


Kuva 6. Eri sadekertymärajoilla määriteltyjen mihin tahansa aikaan vuodesta (a,c,e) ja kesällä (b,d) alkaneiden vuosittaisten pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksien vaihteluvälit sadehavaintotilastoissa. Erot asemien välillä ovat suurimmat koko vuoden pisimpien 100 ja 400 mm sadekertymäjaksojen aikasarjoissa. Laatikkojanakuvion vaakasuora keskiviiva kuvaa mediaania, laatikko kvartiiväliä ja viikset koko vaihteluväliä. Ne poikkeuksellisen pitkät tai lyhyet pisimmät sadekertymäjaksot, joita ei pystytty selittämään mittausvirheiden tai aineistossa olevien aukkojen tuottamina virheellisinä arvoina, näkyvät kuvissa ympyröinä (max. 3 x laatikon pituus) ja pisimmät tähtinä. Huomaa, että kuvaajien y-akselien maksimiarvot vaihtelevat.

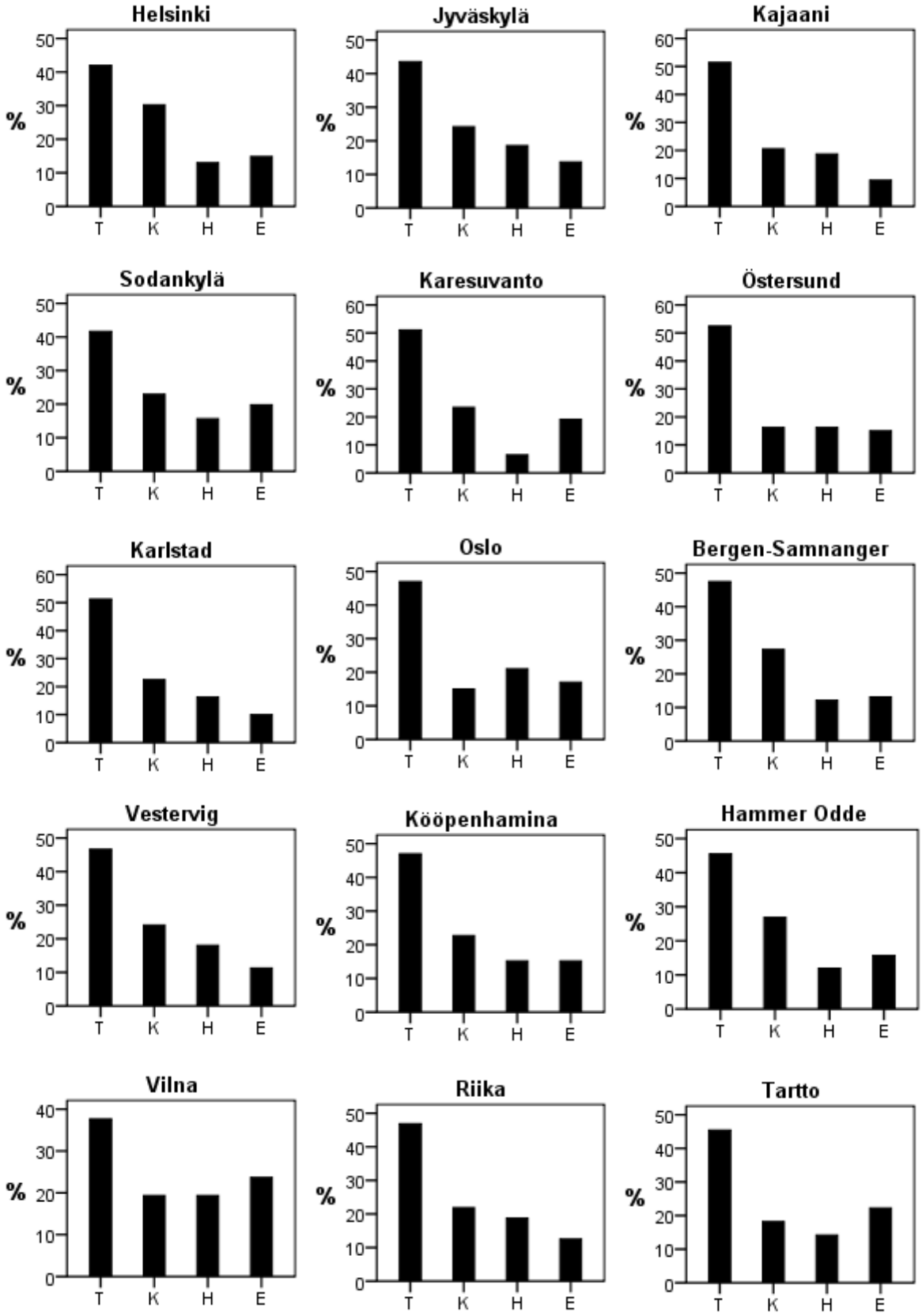
4.1.2 Ajoittuminen

10 mm saderajan mukaan määritellyt pisimmät mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneet sadekertymäjaksot ovat ajoittuneet useimmiten talveen ja kevääseen (kuva 7a). Suomen asemilla helmi-, maalis- ja huhtikuu ovat olleet yleisimpiä alkamiskuukausia. Näiden lisäksi Helsingissä pisin jakso on alkanut hieman yli 10 %:ssa tapauksista toukokuussa ja Sodankylässä tammikuussa. Sodankylässä myös marras- ja joulukuun suhteellinen osuus alkamiskuukautena on ollut suurempi kuin muilla Suomen asemilla. Sodankylää lähinnä sijaitsevan mittausaseman, Ruotsin Karesuvannon, alkamiskuukausien suhteellisten frekvenssien jakauma muistuttaa Sodankylän alkamiskuukausien jakaumaa. Myös Östersundin ja Karlstadin jakaumat ovat samantyyppisiä, tosin niissä huhtikuun frekvenssi ei ole yhtä suuri. Kaikilla Ruotsin asemilla helmikuun suhteellinen frekvenssi on suurin. Tämä on tilanne myös Oslossa, missä tosin myös tammi-, maalis-, huhti- ja toukokuun osuudet ovat merkittäviä. Bergen-Samnangerissa tammi-toukokuun osuudet jakautuvat suhteellisen tasaisesti. Tanskassa pisin kuivuusjakso on alkanut useimmiten tammi-toukokuussa. Hammer Oddessa syys- ja kesäkuun ja Kööpenhaminassa syyskuun osuudet ovat olleet myös suuria. Baltiassa pisin jakso on alkanut useimmiten tammi-maaliskuussa. Vilnassa merkittäviä alkamiskuukausia ovat olleet näiden lisäksi myös syys-joulukuu ja Tartossa huhti-, touko-, elo- ja joulukuu.

Kesän pisin 10 mm rajalla mitattu kuivuusjakso on alkanut tilastojen mukaan kaikilla havaintoasemilla useimmiten toukokuussa (kuva 7b). Noin puolella asemista alkamiskuukauden suhteellinen frekvenssi vähenee kesän loppua kohti ja noin puolessa se kasvaa hieman heinäkuun minimistä elokuuhun. Oslo on ollut tässä suhteessa poikkeus, sillä siellä heinäkuun suhteellinen frekvenssi alkamiskuukautena on ollut toukokuun jälkeen suurin. Mitään selkeää maantieteellistä jakaumaa alkamiskuukausien suhteellisissa frekvensseissä ei kuitenkaan ole havaittavissa.



Kuva 7a. 10 mm saderajan mukaan määriteltyjen koko vuoden pisimpien sadekertymäjaksojen alkamiskuukausien suhteelliset frekvenssit asemakohtaisissa tilastoissa Vuoden pisimmät sadekertymäjaksot alkavat useimmiten lopputalvesta tai keväällä. Huomaa, että kuvaajien y-akselien maksimiarvot vaihtelevat.



Kuva 7b. 10 mm saderajan mukaan määriteltyjen touko-elokuun pisimpien sadekertymäjaksojen alkamiskuukausien suhteelliset frekvenssit asemakohtaisissa tilastoissa. Kesän pisimmät sadekertymäjaksot alkavat kaikilla asemilla useimmiten toukokuussa. Huomaa, että kuvaajien y-akselien maksimiarvot vaihtelevat.

4.1.3 Jaksojen pituudessa tapahtuneet muutokset

Pisimpien sadekertymäjaksojen pituus on vaihdellut suuresti vuodesta toiseen havaintojaksojen aikana kaikilla mittausasemilla (liitteet 2-6). Selkeitä tilastollisesti merkitseviä lineaarisia trendejä esiintyi kuitenkin vain muutamien asemien aikasarjoissa (taulukko 8).

Taulukko 8. Sadehavaintoihin perustuvien pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksien asemakohtaiset trendit. Suurin osa trendeistä on ei-merkitseviä tai väheneviä. Taulukossa: ”x” = ei tilastollisesti merkitsevää trendiä, **”–”** = vähenevä tilastollisesti merkitsevä trendi ja **”+”** = kasvava tilastollisesti merkitsevä trendi. Tähdet kuvaavat trendien tilastollista merkitsevyystasoa seuraavasti: ** = p<0,01 ja * = p<0,05. Yksityiskohtaisemmat tiedot on esitetty liitteessä 7.

Asema	**Jakso**	**Trendi**				
		10 mm koko vuosi	**10 mm kesä**	**100 mm koko vuosi**	**100 mm kesä**	**400 mm koko vuosi**
Bergen-Samnanger	1901–1999	x	x	x	x	x
Hammer Odde	1874–2007	x[1)]	**+***	x	x	x
Helsinki	1845–2007	x	x	x	x	**– ***
Jyväskylä	1883–2007	x	x	**– ***	x	**– ****
Kajaani	1887–1999	x	x	**+***[3)]	x	x
Karesuvanto	1961–2007	x	x	x	x	x
Karlstad	1918–2003	x	x	x	x	x
Kööpenhamina	1874–2005	x	**+***	**– ****	x	**– ****
Oslo	1901–2004	– *[2)]	x	x	x	**– ****
Riika	1943–2007	x	x	**– ***	**– ***	**– ****
Sodankylä	1908–2007	x	x	**– ***	x	x
Tartto	1901–2003	x	x	x	x	x
Vestervig	1874–2007	x	x	x	x	**– ****
Vilna	1900–2007	**– ****	x	**– ****	x	**– */****
Östersund	1918–2002	x	x	x	x	x

[1)] Trendi on tilastollisesti merkitsevä vain t-testin mukaan, mutta koska muuttujan arvojen jakauma on vino, on Mann-Kendallin testin tulos todennäköisemmin oikea ja trendin ei voida katsoa olevan tilastollisesti merkitsevä.
[2)] Trendi on tilastollisesti merkitsevä vain Mann-Kendallin testin mukaan, mutta koska muuttujan arvojen jakauma on vino, on testin tulos todennäköisemmin oikea kuin t-testin ja trendin voidaan katsoa olevan tilastollisesti merkitsevä.
[3)] Trendi on tilastollisesti merkitsevä vain t-testin mukaan, mutta koska muuttujan arvot ovat lähes normaalisti jakautuneet, on testin tulos todennäköisemmin oikea kuin Mann-Kendallin testin ja trendin voidaan katsoa olevan tilastollisesti merkitsevä.

10 mm saderajan mukaan määritellyt pisimmät mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneet sadekertymäjaksot ovat lyhentyneet tilastollisesti merkitsevästi vain Oslon ja Vilnan havaintoasemilla. Vilnassa muutos on ollut jonkin verran suurempi. Kesällä alkaneet pisimmät 10 mm saderajalla määritellyt kuivuusjaksot puolestaan ovat tilastollisesti merkitsevästi pidentyneet Kööpenhaminassa ja Hammer Oddessa. Näissä trendit ovat olleet suurin piirtein yhtä jyrkkiä.

100 mm saderajalla määriteltyjen koko vuoden pisimpien kuivuusjaksojen pituuksien aikasarjoissa lineaariset trendit olivat tilastollisesti merkitseviä testien mukaan useammalla asemalla. Näistä Kajaanissa trendi on ollut kasvava, mutta Jyväskylässä, Kööpenhaminassa, Riiassa, Sodankylässä ja Vilnassa trendit ovat olleet väheneviä. Suomen asemilla muutokset ovat olleet pienempiä kuin muilla asemilla. Kesän kuivuusjaksojen kohdalla trendi on ollut tilastollisesti merkitsevä ainoastaan Riiassa, jossa kuivuusjaksot ovat lyhentyneet.

400 mm saderajan mukaiset pisimmät sadekertymäjaksot ovat lyhentyneet tilastollisesti merkitsevästi Helsingissä, Jyväskylässä, Kööpenhaminassa, Oslossa, Riiassa, Vestervigissä ja

Vilnassa. Voimakkaimmin jaksot ovat lyhentyneet Riiassa. Jyväskylässä, Kööpenhaminassa, Oslossa, Riiassa ja Vestervigissä muutos on ollut kohtalainen. Loivin trendi on ollut Helsingissä. Suurimmalla osalla muistakin asemista kehitys on ollut lievästi negatiivista, mutta tilastollisesti merkitseviä muutoksia ei ollut havaittavissa.

4.1.4 Jaksojen pituuden tulevat muutokset

Hammer Odden, Jyväskylän ja Tarton sääasemille määriteltyjen tulevien pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksissa eniten tilastollisesti merkitseviä trendejä esiintyi HadCM3/RCA3-malliin perustuvissa aikasarjoissa Jyväskylän ja Tarton asemilla (taulukko 9). Vähiten tilastollisesti merkitseviä trendejä puolestaan esiintyi HadCM3/CLM-mallin tuloksiin perustuvissa aikasarjoissa.

Taulukko 9. Ilmastomallinnuksiin perustuvien pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksien trendit kolmella asemalla. Ilmastomallinnusten mukaan jaksojen pituuksissa ei joko tapahdu muutosta tai ne lyhenevät vuosisadan kuluessa. Taulukossa: ”x” = ei tilastollisesti merkitsevää trendiä ja ”**–**” = lyhenevä tilastollisesti merkitsevä trendi. Tähdet kuvaavat trendien tilastollista merkitsevyystasoa seuraavasti: ** = p<0,01 ja * = p<0,05. Yksityiskohtaisemmat tiedot on esitetty liitteessä 13.

Asema	Ilmastomalli	Ajanjakso	Trendi				
			10 mm koko vuosi	10 mm kesä	100 mm koko vuosi	100 mm kesä	400 mm koko vuosi
Hammer Odde	HadCM3/CLM	2001–2050	x	x	x	x	**– ****
	HadCM3/RCA3	2001–2099	x	x	x	x	**– */****
	ECHAM5/RACMO	2001–2100	x	x	**– **** [1]	x	**– ****
	ECHAM5/REMO	2001–2100	x	x	x [2]	x	**– ****
Jyväskylä	HadCM3/CLM	2001–2050	x	x	x	x	x
	HadCM3/RCA3	2001–2099	**– ***	x	**– ****	**– ***	**– ****
	ECHAM5/RACMO	2001–2100	x	x	**– ****	x	**– ****
	ECHAM5/REMO	2001–2100	x	x	x	x	**– */****
Tartto	HadCM3/CLM	2001–2050	x	x	x	x	x [2]
	HadCM3/RCA3	2001–2099	**– ***	x	**– ****	x	**– ****
	ECHAM5/RACMO	2001–2100	x	x	x	x	**– */****
	ECHAM5/REMO	2001–2100	x	x	x	x	**– ****

[1] Trendi on tilastollisesti merkitsevä vain Mann-Kendallin testin mukaan, mutta koska muuttujan arvojen jakauma on vino, on testin tulos todennäköisemmin oikea kuin t-testin ja trendin voidaan katsoa olevan tilastollisesti merkitsevä.
[2] Trendi on tilastollisesti merkitsevä vain Mann-Kendallin testin mukaan, mutta koska muuttujan arvot ovat lähes normaalisti jakautuneet, on t-testin tulos todennäköisemmin oikea ja trendin ei voida katsoa olevan tilastollisesti merkitsevä.

10 mm saderajan mukaan määritellyt mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneet pisimmät sadekertymäjaksot tulevat lyhenemään HadCM3/RCA3-mallin mukaan Jyväskylässä ja Tartossa hieman nykyisestä pituudestaan vuosisadan loppuun mennessä. Kesän aikasarjoissa ei tällä saderajalla esiintynyt yhtään tilastollisesti merkitsevää trendiä. 100 mm saderajan mukaan määritellyt koko vuoden pisimmät sadekertymäjaksot lyhenevät ECHAM5/RACMO-mallin mukaan Hammer Oddessa ja Jyväskylässä vuosisadan kuluessa. HadCM3/RCA3-mallin mukaan pisimmät sadekertymäjaksot lyhenevät Jyväskylässä ja Tartossa. Myös kesän pisimmät sadekertymäjaksot tulevat lyhenemään Jyväskylässä tämän mallin mukaan.

Suurin yksimielisyys eri ilmastomallien välillä vallitsi 400 mm saderajan mukaan määriteltyjen pisimpien vuosittaisten sadekertymäjaksojen pituuden lyhenevästä trendistä vuoteen 2100 mennessä. Kuivuusjaksojen pituus tulee lyhenemään HadCM3/RCA3-, ECHAM5/RACMO- ja ECHAM5/REMO-mallien mukaan kaikilla asemilla. Näistä HadCM3/RCA3-malli arvioi muutoksen pienimmäksi Hammer Oddessa, mutta suurimmaksi Jyväskylässä ja Tartossa. ECHAM5/REMO-malli antoi suurimman arvion muutoksen

suuruudesta Hammer Oddessa ja pienimmän arvion Jyväskylässä. Tarton kohdalla ECHAM5/RACMO- ja ECHAM5/REMO-mallit arvioivat muutoksen suurin piirtein yhtä suureksi. Vuoteen 2050 ulottuvan HadCM3/CLM-mallin tulosten mukainen trendi ei ollut merkitsevä Jyväskylässä ja ainoastaan Mann-Kendallin testin mukaan Tartossa. Hammer Oddessa pisimmät sadekertymäjaksot tulevat kuitenkin lyhenemään myös tämän mallin mukaan.

Keskimäärin jaksojen pituudet vaihtelivat jonkin verran ilmastomalleittain. Vuoteen 2050 ulottuva HadCM3/CLM-malli arvioi jaksojen pituudet keskimäärin pitemmiksi kuin muut mallit. Vuoteen 2099 ulottuva HadCM3/RCA3-malli puolestaan arvioi jaksot muita ilmastomalleja lyhemmiksi (liitteet 8-12).

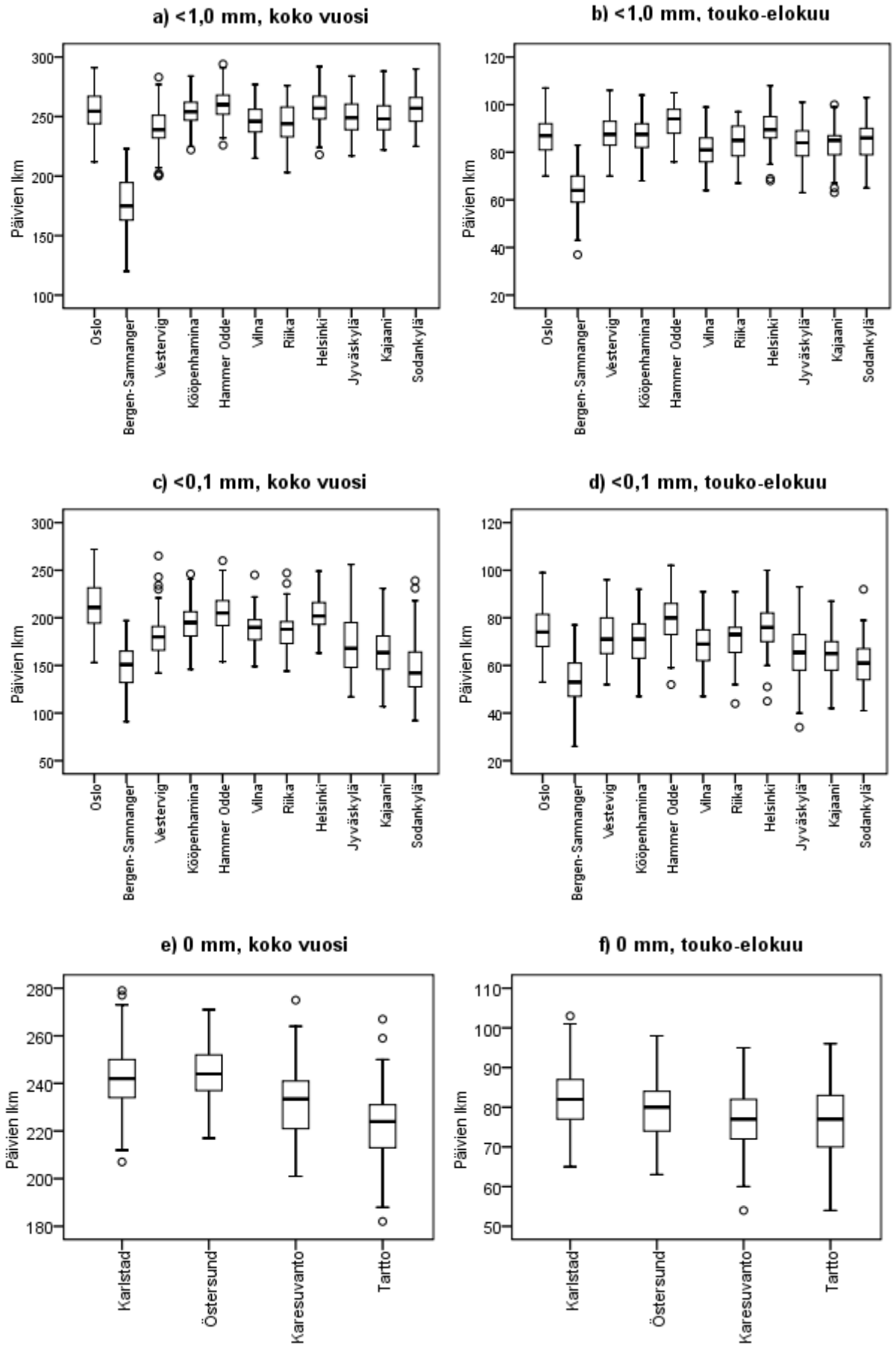
4.2 Poutapäivien lukumäärät

4.2.1 Alueellinen vaihtelu

Sademäärältään alle 1,0 mm poutapäivien vuosittainen lukumäärä on vaihdellut suurimmalla osalla Pohjoismaiden ja Baltian maiden asemia melko samoissa rajoissa havaintojaksojen aikana (kuva 8a). Bergen-Samnangerin asemalla poutapäiviä on ollut kuitenkin keskimäärin vähemmän kuin muilla asemilla. Tanskassa poutapäivien lukumäärien voidaan havaita kasvavan hieman lännestä itään. Kesäkuukausien alle 1,0 mm sadepäivien määrä on myös vaihdellut suurimmalla osalla havaintoasemia melko samalla tasolla (kuva 8b). Bergen-Samnangerin asema erottuu kuitenkin myös kesän tilastoissa hieman muita asemia alhaisemmilla lukumäärillä.

Täysin sateettomiksi luonnehdittujen alle 0,1 mm sadepäivien koko vuoden lukumäärien vaihteluväleissä on esiintynyt jonkin verran enemmän eroja havaintoasemien välillä kuin kaikkien poutapäivien lukumäärissä (kuva 8c). Oslossa vaihteluvälin arvojen enemmistö on koostunut hieman korkeammista arvoista kuin muilla asemilla. Bergen-Samnangerin asema ei ole kuitenkaan poikennut sateettomien päivien lukumäärän suhteen yhtä paljon muista asemista kuin kaikkien poutapäivien kohdalla ja sen sateettomien päivien lukumäärän vaihteluväli onkin ollut lähes samanlainen kuin Sodankylän asemalla. Tanskassa sateettomien päivien lukumäärän vaihteluvälin arvot ovat hieman pitempiä idässä kuin lännessä. Suomessa Helsingin vuosittaisten sateettomien päivien lukumäärien vaihteluvälien arvot ovat olleet suurin piirtein samoja kuin Hammer Oddessa, mutta pohjoisemmilla asemilla lukumäärät ovat olleet keskimäärin vähäisempiä. Baltiassa vuosien enemmistön vaihteluvälin arvot ovat olleet hieman alhaisempia kuin Helsingissä. Kesäkuukausina asemien välillä ilmenevät maantieteelliset erot sateettomien päivien lukumäärissä ovat olleet lähes samanlaiset suhteellisesti kuin koko vuoden tarkastelussakin (kuva 8d). Tanskassa Vestervigin sateettomien päivien lukumäärän vaihteluvälin arvot ovat kuitenkin olleet hieman korkeampia kuin Kööpenhaminassa, mutta alempia kuin Hammer Oddessa.

Yhden millimetrin tarkkuudella esitettyihin sadehavaintoihin perustuvat poutapäivien (0 mm sadetta) lukumäärät ovat Karlstadin ja Östersundin asemilla vaihdelleet melko samoissa rajoissa, mutta Karesuvannossa ja Tartossa lukumäärät ovat olleet keskimäärin hieman alhaisempia (kuva 8e). Kesäkuukausien 0 mm sadepäivien kohdalla voidaan huomata lukumäärien vaihteluvälien arvojen pienenevän Ruotsissa jonkin verran siirryttäessä etelästä pohjoiseen (kuva 8f).



Kuva 8. Koko vuoden (a, c, e) ja kesän (b, d, f) poutapäivien (<1,0 mm / 0 mm) ja sateettomien päivien (<0,1 mm) lukumäärien vaihtelu sadehavaintotilastoissa. Erot asemien välillä ovat suurempia 0,1 mm kuin 1,0 ja 0 mm saderajoilla. Huomaa, että kuvaajien y-akselien arvovälit vaihtelevat.

4.2.2 Lukumäärissä tapahtuneet muutokset

Alle 1,0 mm sadepäivien vuotuisissa sekä alle 0,1 mm sadepäivien vuotuisissa ja kesäkausien lukumäärissä on esiintynyt laskevia, tilastollisesti merkitseviä trendejä Norjan havaintoasemilla (taulukko 10a, liitteet 14–17). Bergen-Samnangerissa alle 1,0 mm sadepäivien lukumäärät ovat pienentyneet hieman enemmän kuin Oslossa, mutta alle 0,1 mm sadepäivien lukumäärät sen sijaan hieman vähemmän. Oslon asemaa lähinnä sijaitsevalla Karlstadin asemalla ei esiintynyt tilastollisesti merkitseviä trendejä 0 mm sadepäivien lukumäärissä (taulukko 10b, liitteet 18–19). Östersundin asemalla sen sijaan esiintyi laskeva tilastollisesti merkitsevä trendi koko vuoden 0 mm sadepäivien lukumäärissä.

Vestervigissä esiintyi muista Tanskan asemista poiketen laskevia tilastollisesti merkitseviä trendejä alle 1,0 ja alle 0,1 mm sadepäivien vuotuisissa lukumäärissä (taulukko 10a, liitteet 14–17). Hammer Oddessa trendit olivat sen sijaan kasvavia molemmilla saderajoilla sekä koko vuoden että kesän tilastoissa. Kööpenhaminassa trendit ovat olleet kasvavia kaikissa muissa tapauksissa paitsi alle 1,0 mm saderajalla koko vuoden tilastossa.

Baltiassa trendien suuntien välillä esiintyi enemmän hajontaa. Vilnassa koko vuoden alle 1,0 mm sadepäivien trendi on ollut laskeva (taulukko 10a, liitteet 14–17). Sen sijaan kesän aikasarjoissa sekä 1,0, että 0,1 mm saderajoilla trendit ovat olleet kasvavia. Riiassa alle 1,0 mm sadepäivien vuotuisen lukumäärän trendi on ollut myös laskeva, mutta alle 0,1 mm sadepäivien lukumäärän trendi on ollut kasvava sekä koko vuoden, että kesän osalta. Tarton yhden millimetrin tarkkuudella ilmoitetuissa sadetilastoissa ei sen sijaan esiintynyt lainkaan lineaarisia trendejä 0 mm sadepäivien lukumäärissä (taulukko 10b, liitteet 18–19).

Suomen kaikilla muilla asemilla paitsi Helsingissä esiintyi laskeva trendi alle 0,1 millimetrin sadepäivien vuotuisessa lukumäärässä (taulukko 10a, liitteet 14–17). Sodankylässä myös kesän alle 0,1 millimetrin sadepäivien lukumäärä on vähentynyt havaintojaksolla.

Taulukko 10a. Poutapäivien ja sateettomien päivien lukumäärien ajallisessa vaihtelussa esiintyneet trendit havaintoasemilla, joiden sademäärät oli kokonaan tai suurimmaksi osaksi ilmoitettu yhden desimaalin tarkkuudella. Suurin osa trendeistä on tilastollisesti ei-merkitseviä tai väheneviä. Tilastollisesti merkitseviä trendejä esiintyy enemmän alle 0,1 mm sadepäivien lukumäärissä kuin alle 1,0 mm päivien lukumäärissä. Taulukossa: ”x” = ei tilastollisesti merkitsevää trendiä, ”**–**” = vähenevä tilastollisesti merkitsevä trendi ja ”**+**” = kasvava tilastollisesti merkitsevä trendi. Tähdet kuvaavat trendien tilastollista merkitsevyystasoa seuraavasti: ** = p<0,01 ja * = p<0,05. Yksityiskohtaisemmat tiedot on esitetty liitteessä 20.

Asema	**Jakso**	**Trendi**			
		<1,0 mm, koko vuosi	**<1,0 mm kesä**	**<0,1 mm koko vuosi**	**<0,1 mm kesä**
Bergen-Samnanger	1901–1999	**– ****	x	**– ****	**– ***
Hammer Odde	1874–2005	**+***	**+****	**+****	**+****
Helsinki	1845–2007	x	x	x	x
Jyväskylä	1883–2007	x	x	**– ****	x
Kajaani	1887–1999	x	x	**– ****	x
Kööpenhamina	1874–2005	x	**+***	**+***	**+****
Oslo	1901–2004	**– ****	x	**– ****	**– ****
Riika	1943–2004	**– */****	x	**+ */****	**+***
Sodankylä	1908–2007	x	x	**– ****	**– ***
Vestervig	1874–2007	**– ***	x	**– *[1)]**	x
Vilna	1900–2007	**– *[1)]**	**+*[1)]**	x	**+***

[1)] Trendi on merkitsevä vain t-testin mukaan, mutta koska muuttujan arvot ovat lähes normaalisti jakautuneet, testin tulos on todennäköisemmin oikea kuin Mann-Kendallin testin ja trendin voidaan katsoa olevan tilastollisesti merkitsevä.

Taulukko 10b. Poutapäivien lukumäärien ajallisessa vaihtelussa esiintyneet trendit havaintoasemilla, joiden sadetilastoissa kaikki tai suurin osa arvoista oli yhden millimetrin tarkkuudella ilmoitettu. Suurin osa trendeistä on tilastollisesti ei-merkitseviä. Taulukossa: ”x” = ei tilastollisesti merkitsevä trendi ja ”**–**” = vähenevä tilastollisesti merkitsevä trendi. Tähdet kuvaavat trendien tilastollista merkitsevyystasoa seuraavasti: * = p<0,05 Yksityiskohtaisemmat tiedot on esitetty liitteessä 20.

Asema	Jakso	Trendi	
		0 mm, koko vuosi	0 mm kesä
Karesuvanto	1961–1999	x	x
Karlstad	1961–2003	x	x
Tartto	1901–2003	x	x
Östersund	1918–2002	**– ***	x

4.2.3 Tulevaisuudessa tapahtuvat lukumäärän muutokset

Ilmastomallinnuksiin perustuvissa arvioissa poutapäivien tulevista lukumääristä ei esiintynyt juuri tilastollisesti merkitseviä trendejä (taulukko 11). Ainoastaan Jyväskylässä mallinnukset ennustivat pieniä muutoksia alle 1,0 mm ja alle 0,1 mm sadepäivien vuotuisessa lukumäärässä, mutta tämänkin suhteen tarkastellut ilmastomallit antoivat keskenään ristiriitaisia tuloksia. Hilaruututietoihin perustuvat arviot poutapäivien ja sateettomien päivien tulevista lukumääristä olivat myös systemaattisesti alhaisempia kuin havaintoihin perustuvat lukumäärät (liitteet 21–24). Ilmastomallien välillä selkeimmät erot esiintyivät Hammer Odden ja Jyväskylän koko vuoden aikasarjoissa, joissa ECHAM5/RACMO-malli arvioi lukumäärät keskimäärin suuremmiksi kuin ECHAM5/REMO-malli.

Taulukko 11. Poutapäivien lukumäärien ajallisen vaihtelun tulevat trendit kahden eri ilmastomallin mukaan vuosina 2001–2100 kolmella asemalla. Aikasarjojen trendit ovat suurimmaksi osaksi tilastollisesti ei-merkitseviä. Taulukossa: ”x” = ei tilastollisesti merkitsevä trendi, ”**–**” = vähenevä tilastollisesti merkitsevä trendi ja ”**+**” = kasvava tilastollisesti merkitsevä trendi. Tähdet kuvaavat trendien tilastollista merkitsevyystasoa seuraavasti: ** = p<0,01 ja * = p<0,05. Yksityiskohtaisemmat tiedot on esitetty liitteessä 25.

Asema	Ilmastomalli	Trendi			
		<1,0 mm koko vuosi	<1,0 mm kesä	<0,1 mm koko vuosi	<0,1 mm kesä
Jyväskylä	ECHAM5/RACMO	**– ** **	x	x	x
	ECHAM5/REMO	x	x	**+ ***	x
Hammer Odde	ECHAM5/RACMO	x	x	x	x
	ECHAM5/REMO	x	x	x	x
Tartto	ECHAM5/RACMO	x	x	x	x
	ECHAM5/REMO	x	x	x	x

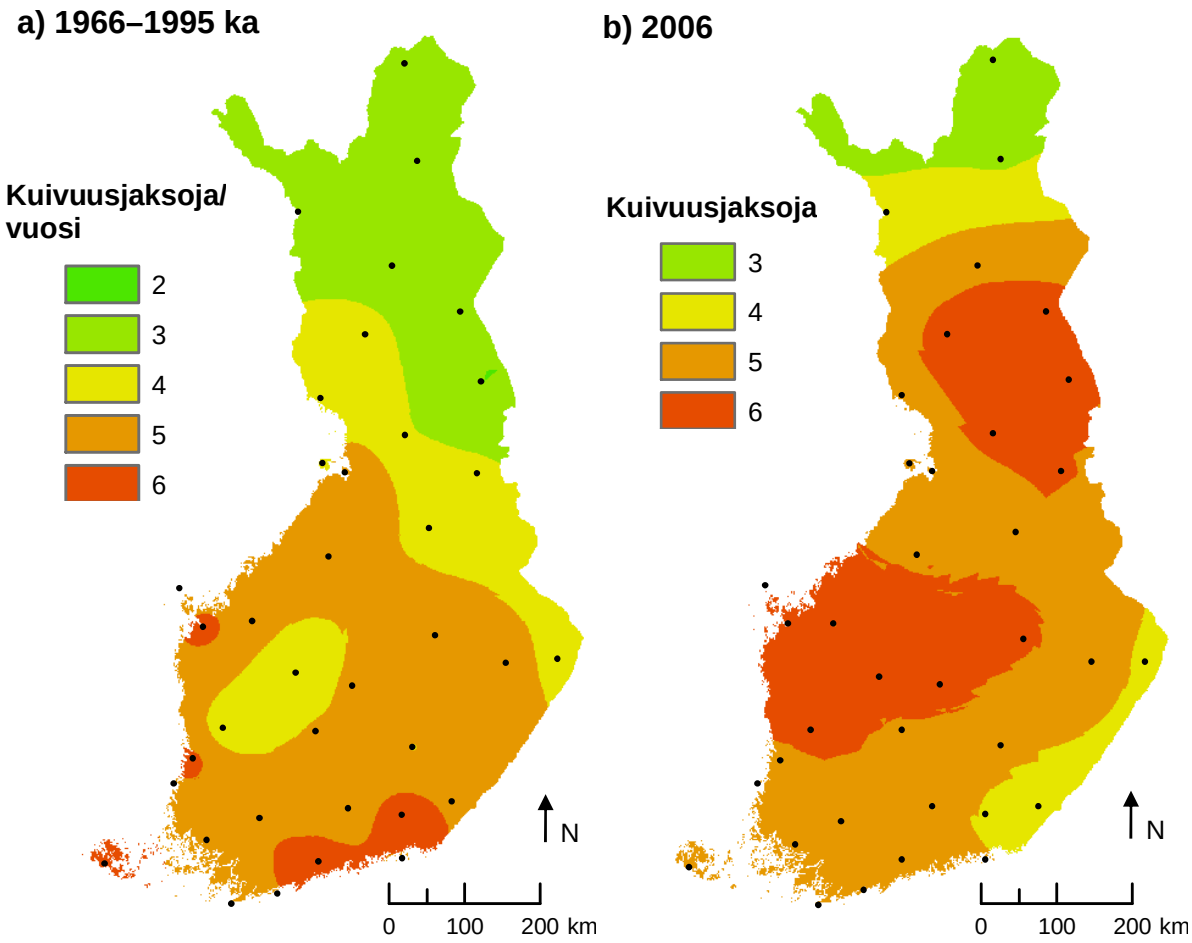
4.3 Maankosteusindeksiin perustuvat kuivuusanalyysit

4.3.1 Kuivuusjaksojen lukumäärän vaihtelu

Suomen alueella maankosteusindeksin mukaan määriteltyjen kuivuusjaksojen lukumäärän pitkänajan keskiarvo oli korkein Ahvenanmaalla ja Etelä-Suomen rannikkoseudulla, missä kuivuusjaksoja esiintyi tarkastelujaksolla keskimäärin noin kuusi kertaa metsäpalokauden aikana (kuva 9a). Myös länsirannikolla Vaasan ja Porin seutujen keskiarvot olivat korkeat. Muualla Etelä-Suomessa sekä Keski-Suomen länsiosissa aina Oulun tienoille asti kuivuusjaksoja on esiintynyt tarkastelujaksolla keskimäärin viisi kertaa metsäpalokauden aikana. Suomenselän alueella kuivuusjaksojen keskiarvo oli kuitenkin hieman muuta Keski-

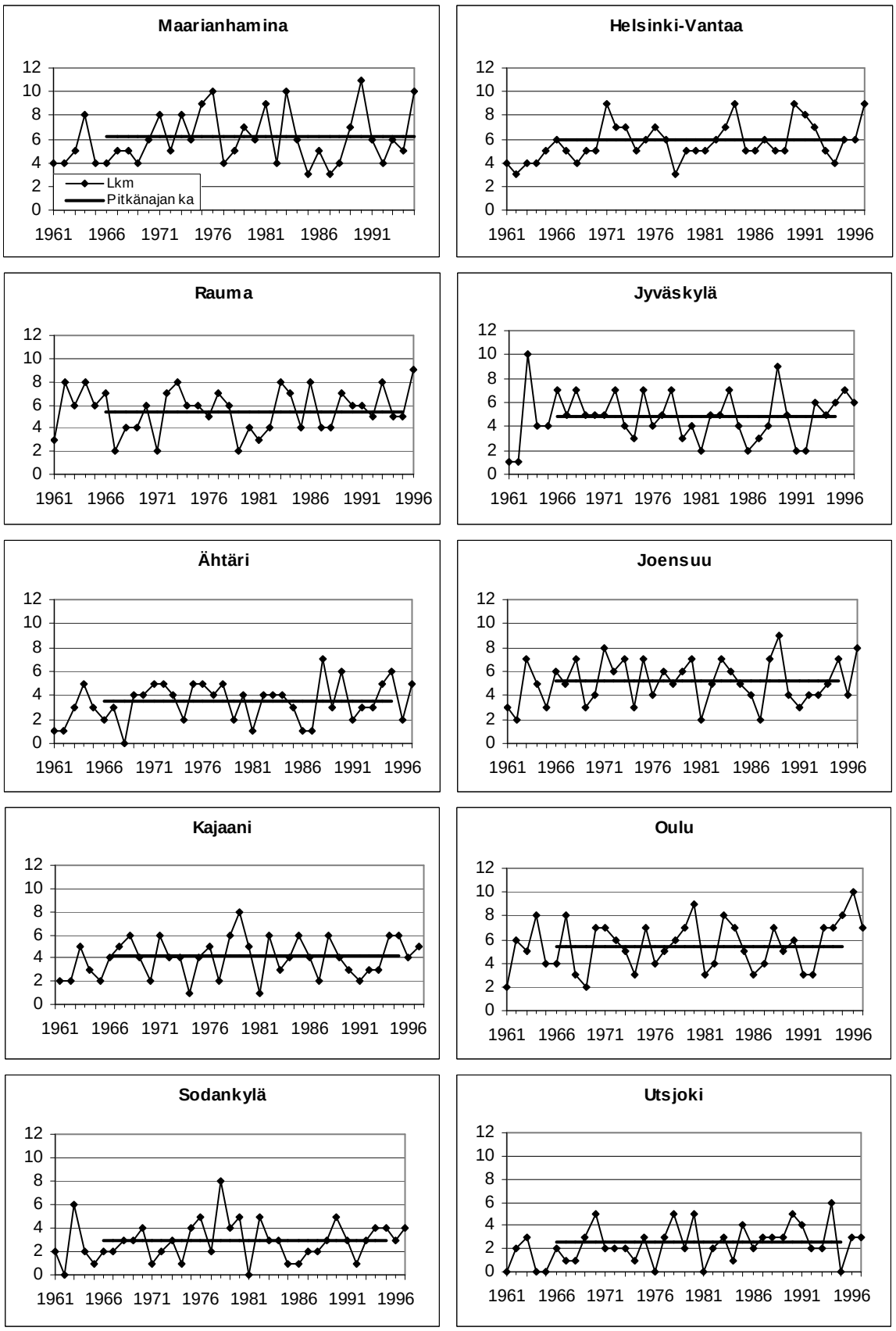
Suomea alhaisempi ollen suurin piirtein sama kuin Itä-Suomesta Lounais-Lappiin ulottuvalla vyöhykkeellä. Keski-Suomen pohjoisosien ja Etelä-Lapin välillä kuivuusjaksojen lukumäärän keskiarvo myös pieneni vyöhykkeittäin kaakosta koilliseen. Kuivuusjaksojen lukumäärän pitkänajan keskiarvo oli pienin Oulun läänin koillisosassa sekä Lapin läänissä sen lounaisinta osaa lukuun ottamatta.

Kesällä 2006 kuivuusjaksoja esiintyi koko maassa. Eniten niitä esiintyi länsirannikolta Keski-Suomeen ulottuvalla vyöhykkeellä (kuva 9b). Tämä alue kattoi myös Suomenselän alueen, jonka pitkänajan keskiarvo oli alhainen. Kuivuusjaksoja esiintyi myös pitkänajan keskiarvosta poiketen useita Kaakkois-Lapissa ja Oulun läänin länsiosissa. Pohjois-Lapissa kuivuusjaksoja esiintyi vähiten.



Kuva 9. Maankosteusindeksin mukaan määriteltyjen kuivuusjaksojen lukumäärän alueellinen vaihtelu Suomessa a) metsäpalokauden (huhti-syyskuu) pitkänajan keskiarvon mukaan sekä b) poikkeuksellisen kuivana kesänä 2006 (touko-elokuu). Kuivuusjaksoja esiintyi vuosina 1966-1995 keskimäärin eniten Suomen rannikkoalueilla ja vähiten Lapissa. Tutkimuksessa käytettyjen säähavaintoasemien sijainti on osoitettu kartoissa mustilla pisteillä.

Kuivuusjaksojen lukumäärä on vaihdellut Suomessa tilastojen mukaan paljon vuodesta toiseen (kuva 10). Etelä-Suomessa maankosteus alenee yleensä muutamia kertoja metsäpalokauden aikana kuivuusrajan alapuolelle vähintään muutamaksi päiväksi, mutta Pohjois-Suomessa joinakin vuosina maankosteusindeksin mukaisia kuivuusjaksoja ei ole esiintynyt lainkaan. Kaikista tutkimuksessa käytetyistä maankosteusindeksien aikasarjoista eniten kuivuusjaksoja, 11 kappaletta, esiintyi Utissa vuonna 1971 ja Maarianhaminassa vuonna 1990.

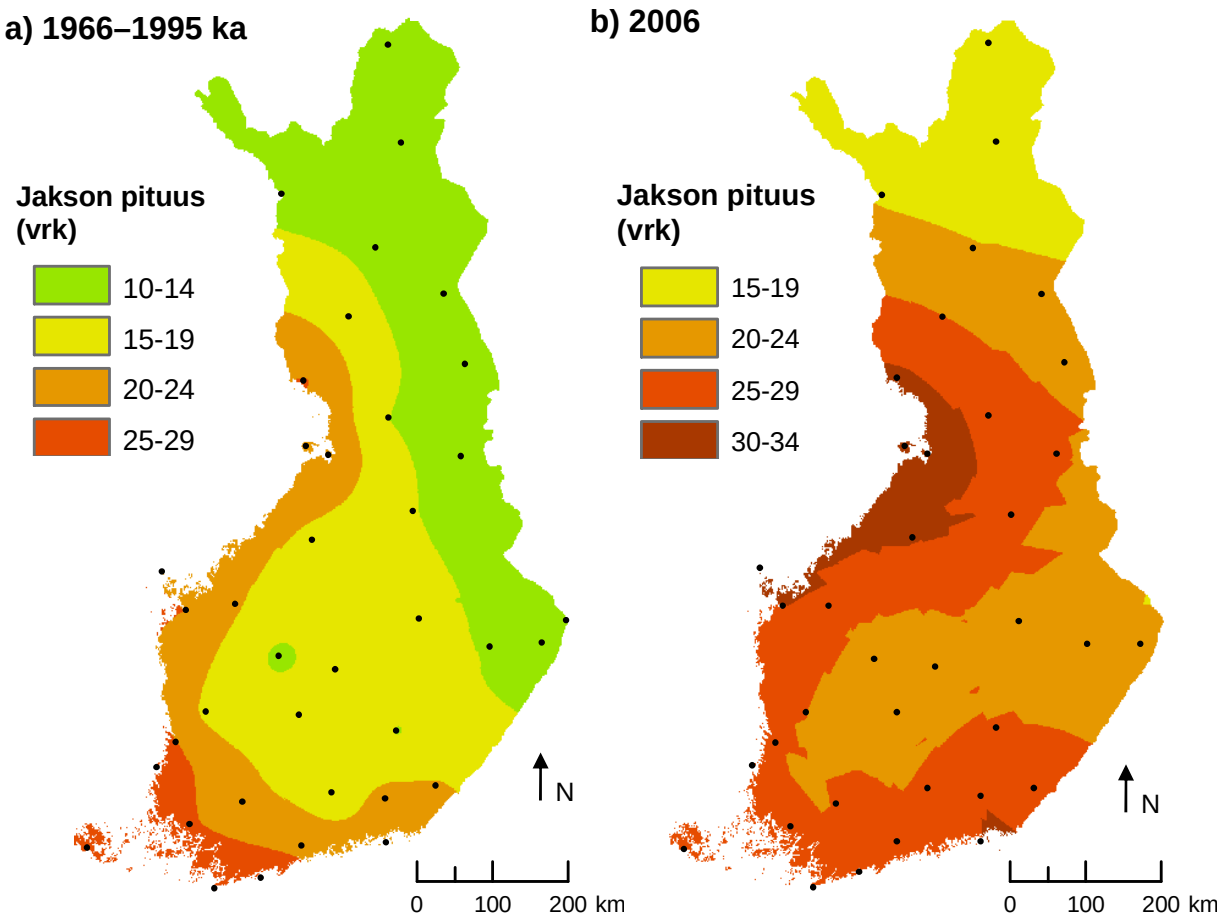


Kuva 10. Maankosteusindeksin mukaan määriteltyjen kuivuusjaksojen vuosittaisen lukumäärän vaihtelu kymmenellä säähavaintoasemalla vuosina 1961–1997. Etelä- ja Keski-Suomen asemilla, Ähtäriä lukuunottamatta, kuivuusjaksoja esiintyi tarkastelujaksolla joka vuosi. Lapissa kuivuusjaksoja esiintyi keskimäärin vähemmän ja joinakin vuosina ei ollenkaan. Kuvaajissa on lisäksi näkyvillä vuosien 1966–1995 keskiarvo (musta vaakasuora viiva).

4.3.2 Pisimpien kuivuusjaksojen pituuden vaihtelu

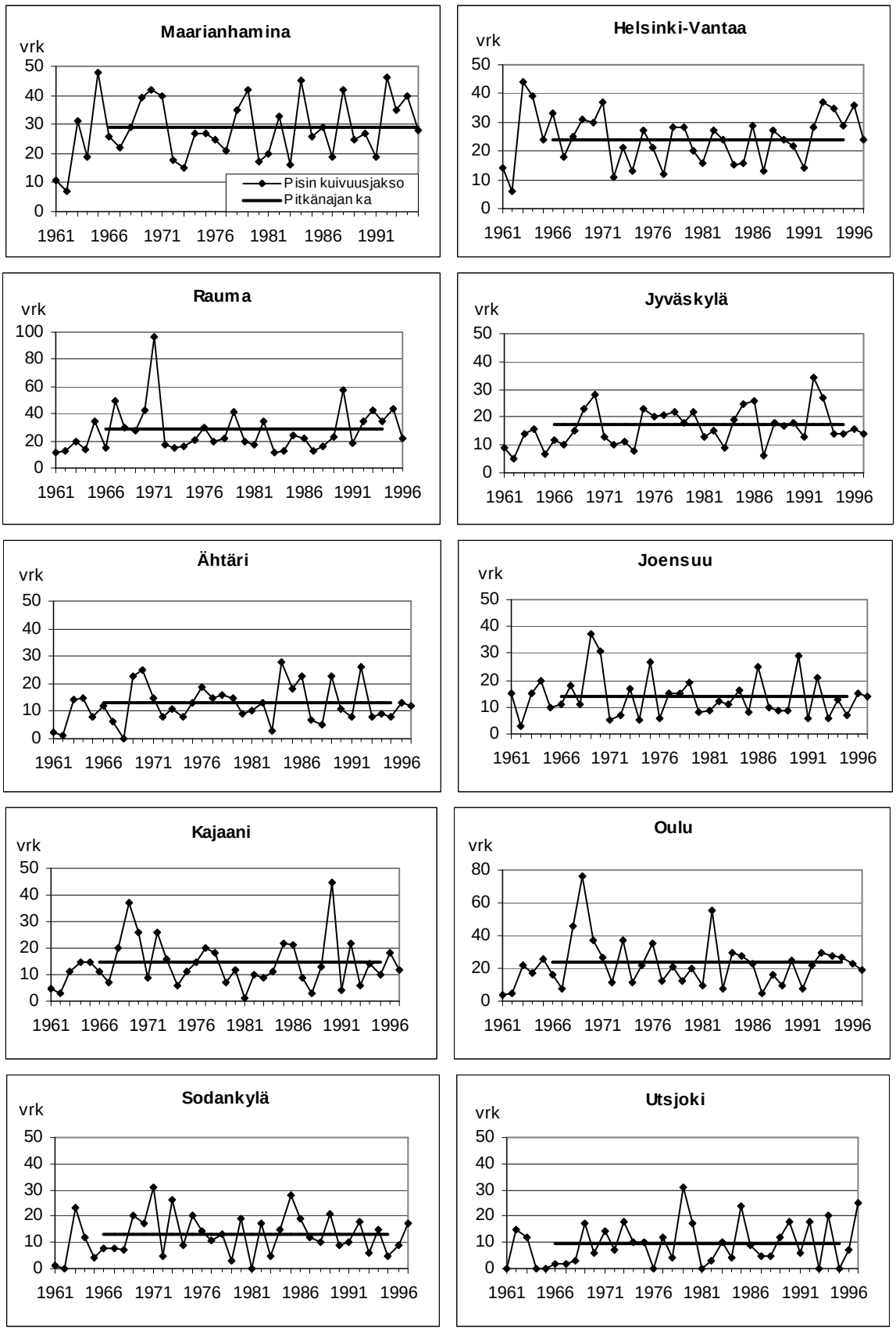
Metsäpalokauden pisimmän kuivuusjakson pituuden pitkänajan keskiarvo on ollut kaikilla rannikkoalueilla muuta maata korkeampi (kuva 11a). Lounais-Suomessa erottuu myös selkeästi lounaasta koilliseen tapahtuva kuivuusjaksojen lyheneminen. Oulun läänin alueella pisimmän kuivuusjakson pituuden keskiarvo on sen sijaan lyhentynyt länsi-itä-suunnassa ja Lounais-Lapissa jälleen lounaasta koilliseen. Pisimmän kuivuusjakson pituuden keskiarvo oli pisin Ahvenanmaalla, Lounais-Suomen rannikolla sekä pienillä alueilla Vaasan ja Tornion seuduilla. Lyhin pituuden keskiarvo on sen sijaan ollut Itä-Suomessa, Oulun ja Lapin läänien itäosissa sekä Pohjois-Lapissa. Myös Ähtärin ja Mikkelin mittausasemien alhaiset keskiarvot erottuvat muusta Keski-Suomen alueesta.

Vuonna 2006 pisimmät kuivuusjaksot esiintyivät Pohjois-Pohjanmaan, Oulun läänin sekä Kaakkois-Suomen rannikkoalueilla (kuva 11b). Myös muilla rannikkoalueilla pisin kuivuusjakso oli keskimäärin pitempi kuin muualla maassa. Pohjois-Lapissa pisimmät kuivuusjaksot olivat muuta maata lyhempiä, mutta sielläkin niiden pituus oli vuosien 1966–1995 pitkänajan keskiarvon yläpuolella.



Kuva 11. Maankosteusindeksin mukaan määritellyn pisimmän kuivuusjakson pituuden alueellinen vaihtelu a) metsäpalokauden (huhti-syyskuu) pitkänajan keskiarvon mukaan sekä b) poikkeuksellisen kuivana kesänä 2006 (touko-elokuu). Pisimmän kuivuusjakson pituus on keskimäärin suurin Lounais-Suomessa ja lyhin Itä-Suomessa ja Lapissa. Vuonna 2006 noin kuukauden pituisia kuivuusjaksoja esiintyi erityisesti Pohjois-Pohjanmaan rannikkoseudulla, Oulun läänin länsiosassa ja Lounais-Lapissa. Tutkimuksessa käytettyjen säähavaintoasemien sijainti on osoitettu kartoissa mustilla pisteillä.

Asemakohtaisesti pisimpien kuivuusjaksojen pituus on kuitenkin vaihdellut huomattavasti vuodesta toiseen tarkastelujaksolla (kuva 12). Varsinaisia lineaarisia trendejä aikasarjoissa ei kuitenkaan ole juuri esiintynyt. Kaikkien tarkasteltujen tilastojen pisin yhtenäinen kuivuusjakso esiintyi Raumalla vuonna 1971 ja se kesti 96 vuorokautta (8.5.–11.8.). Lähimmällä havaintoasemalla Porissa esiintyi samana kesänä myös useita pitkittyneitä kuivuusjaksoja, joiden välillä maankosteusindeksin arvo laski kuivuusrajan alapuolelle vain muutamaksi päiväksi. Muillakin mittausasemilla, erityisesti länsi- ja etelärannikolla, esiintyi vuonna 1971 pitkähköjä ja toistuvia kuivuusjaksoja.



Kuva 12. Maankosteusindeksin mukaan määritellyn vuoden pisimmän kuivuusjakson pituuden vaihtelu kymmenellä säähavaintoasemalla vuosina 1961–1997. Kuvaajissa on lisäksi näkyvillä vuosien 1966–1995 keskiarvo (vaakasuora musta viiva). Pisimmät kuivuusjaksot esiintyivät tarkastelujaksolla Suomen ranniikkoalueilla. Huomaa, että y-akselin arvoväli poikkeaa muista Rauman ja Oulun kuvaajissa.

4.3.3 ”Kuivuuspäivien” lukumäärän vaihtelu

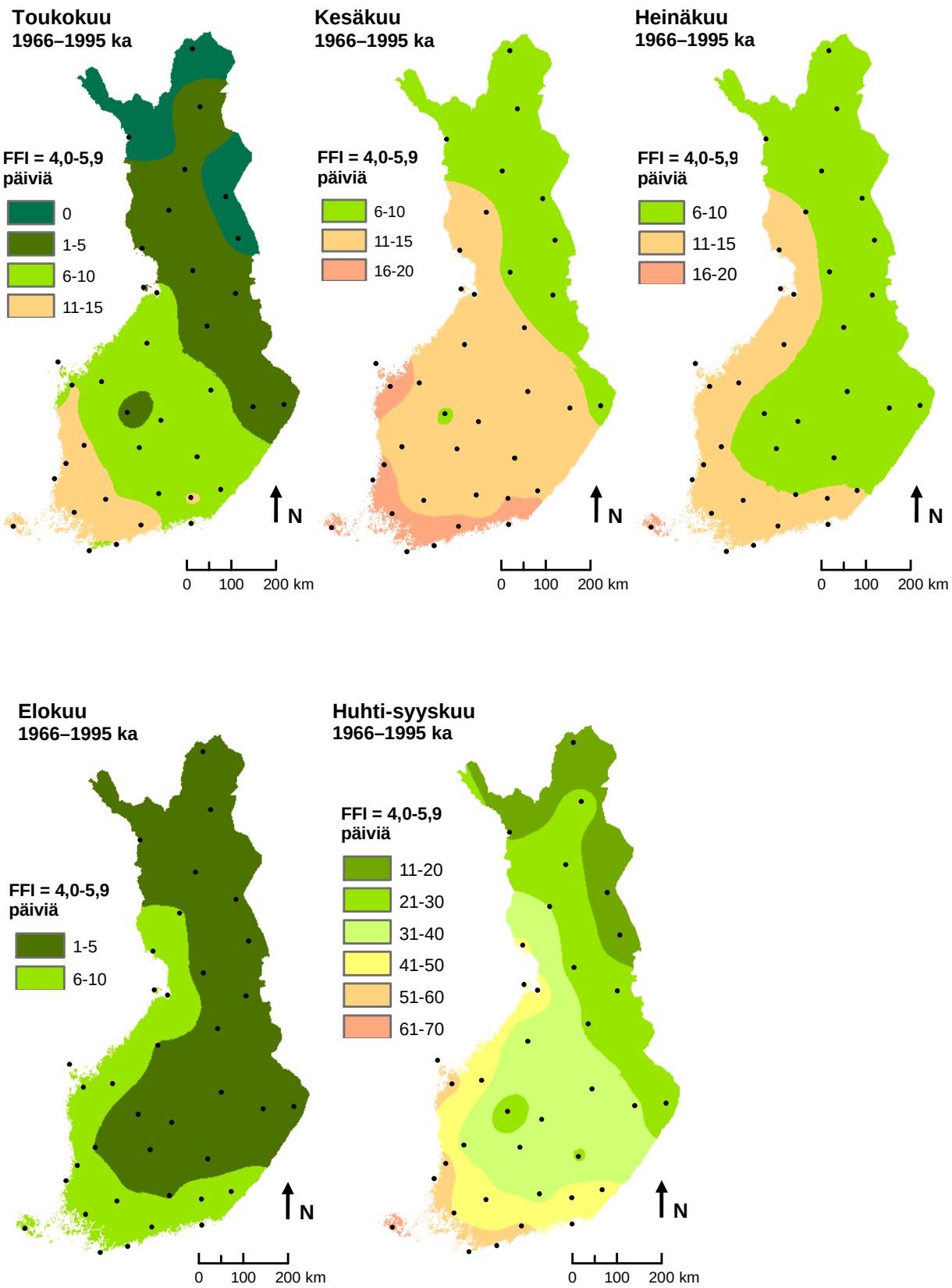
”Kohtalaisen kuivien” tai ”kuivien” päivien kuukausittaisten ja koko metsäpalokauden lukumäärien pitkänajan keskiarvot pienenivät tarkastelujaksolla Suomen alueella keskimäärin lounaasta koilliseen (kuva 13). Kaakkois-Suomessa keskiarvot olivat kuitenkin samaa tasoa kuin etelä- ja länsirannikolla. Keski-Suomen alueella esiintyi myös joitakin alueita, joilla keskiarvo oli ympäröiviä alueita alhaisempi ja samaa luokkaa kuin Pohjois- ja Itä-Suomessa. Etelä- ja Länsi-Suomen rannikkoalueilla sekä Keski-Suomessa esiintyi ”kuivuuspäiviä” metsäpalokaudella eniten kesäkuussa. Pohjois- ja Itä-Suomessa ”kuivuuspäiviä” esiintyi sen sijaan eniten sekä kesä- että heinäkuussa.

Varsinaisten ”kuivien” päivien vuosien 1966–1995 lukumäärien keskiarvot pienenivät myös keskimäärin lounaasta koilliseen (kuva 14). Korkeita keskiarvoja esiintyi laajimmilla alueilla kesäkuussa Etelä- ja Keski-Suomessa, sekä Oulun läänin länsiosissa ja Lounais-Lapissa. Muualla Lapissa ja Itä-Suomessa keskiarvot olivat alhaisia eivätkä vaihdelleet merkittävästi kuukausien välillä.

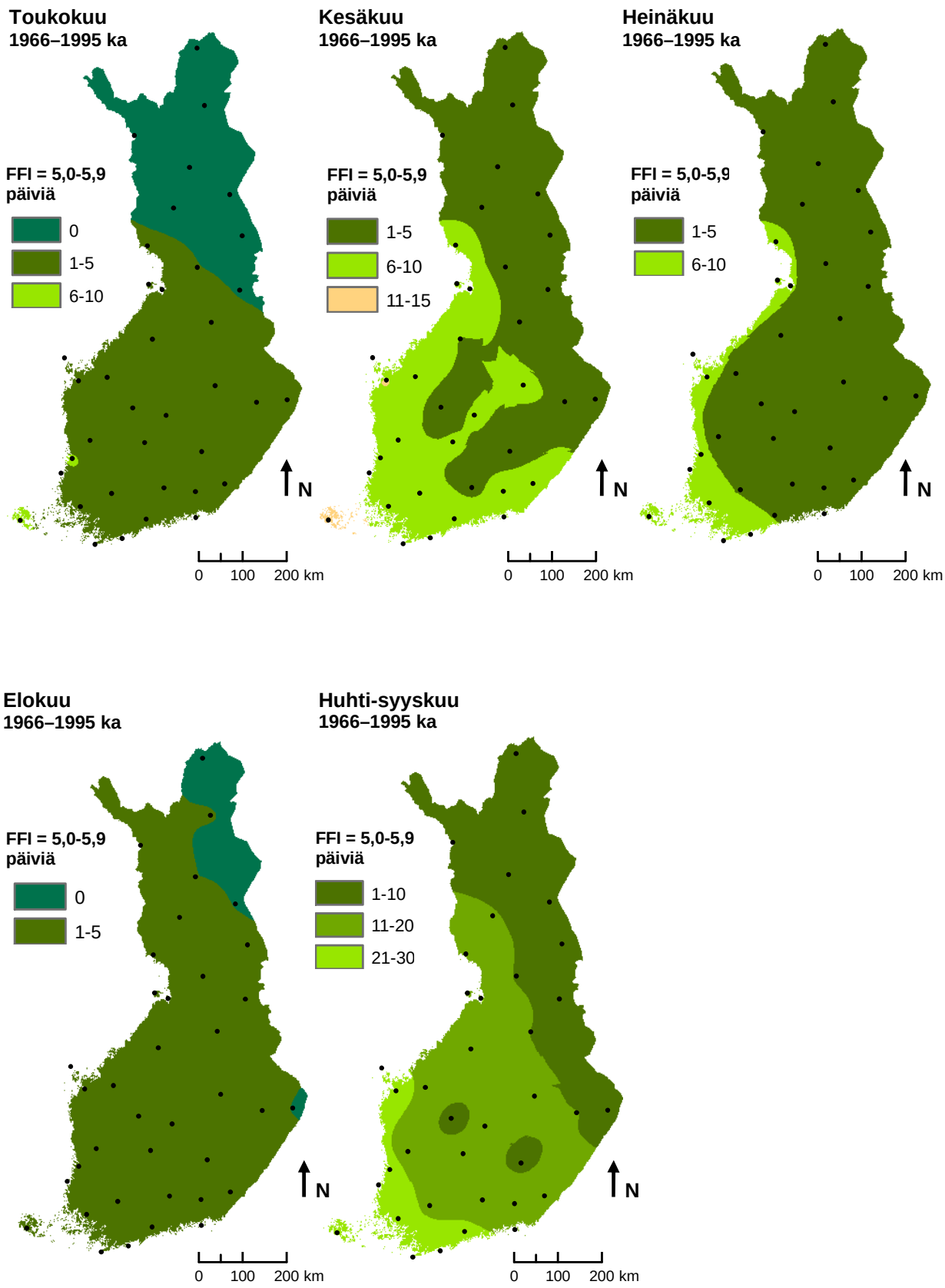
Poikkeuksellisen kuivana vuonna 2006 ”kohtalaisen kuvien” tai ”kuivien” päivien lukumäärät olivat vuosien 1966-1995 keskiarvoihin nähden korkeampia lähes kaikilla muilla alueilla paitsi osassa Lappia (kuva 15). Toukokuussa ”kohtalaisen kuivien” tai ”kuivien päivien” lukumäärä oli melko suuri koko Etelä-Suomen alueella. Kesäkuussa päiviä oli hieman vähemmän, mutta heinäkuussa lukumäärä kasvoi jälleen rannikkoalueilla, mutta väheni sisämaassa. Elokuussa ”kuivia päiviä” esiintyi paljon laajoilla alueilla erityisesti Oulun läänissä ja Etelä-Lapissa. Itä-Suomessa ja pohjoisimmassa Lapissa esiintyi myös korkeita lukumääriä. Sen sijaan Etelä-Suomessa kuivuuspäivien lukumäärä oli paikoin noin puolet alhaisempi kuin heinäkuussa. Koko metsäpalokaudella kuivuuspäiviä esiintyi eniten Suomen rannikkoalueilla erityisesti Oulun seudulla sekä Kaakkois- ja Lounais-Suomessa. Kosteimmat alueet sen sijaan sijaitsivat Lapissa ja Oulun läänin itäosissa.

Vuonna 2006 eniten varsinaisia ”kuivia” päiviä esiintyi Oulun läänin länsiosassa elokuussa (kuva 16). Koko kesän ”kuivien” päivien lukumäärät olivat pitkänajan keskiarvoa korkeammat erityisesti Etelä-Suomessa ja Pohjois-Pohjanmaan rannikkoalueilla sekä Oulun läänin länsiosissa. Sen sijaan Keski- ja Pohjois-Suomessa ”kuivia” päiviä esiintyi normaalia vähemmän.

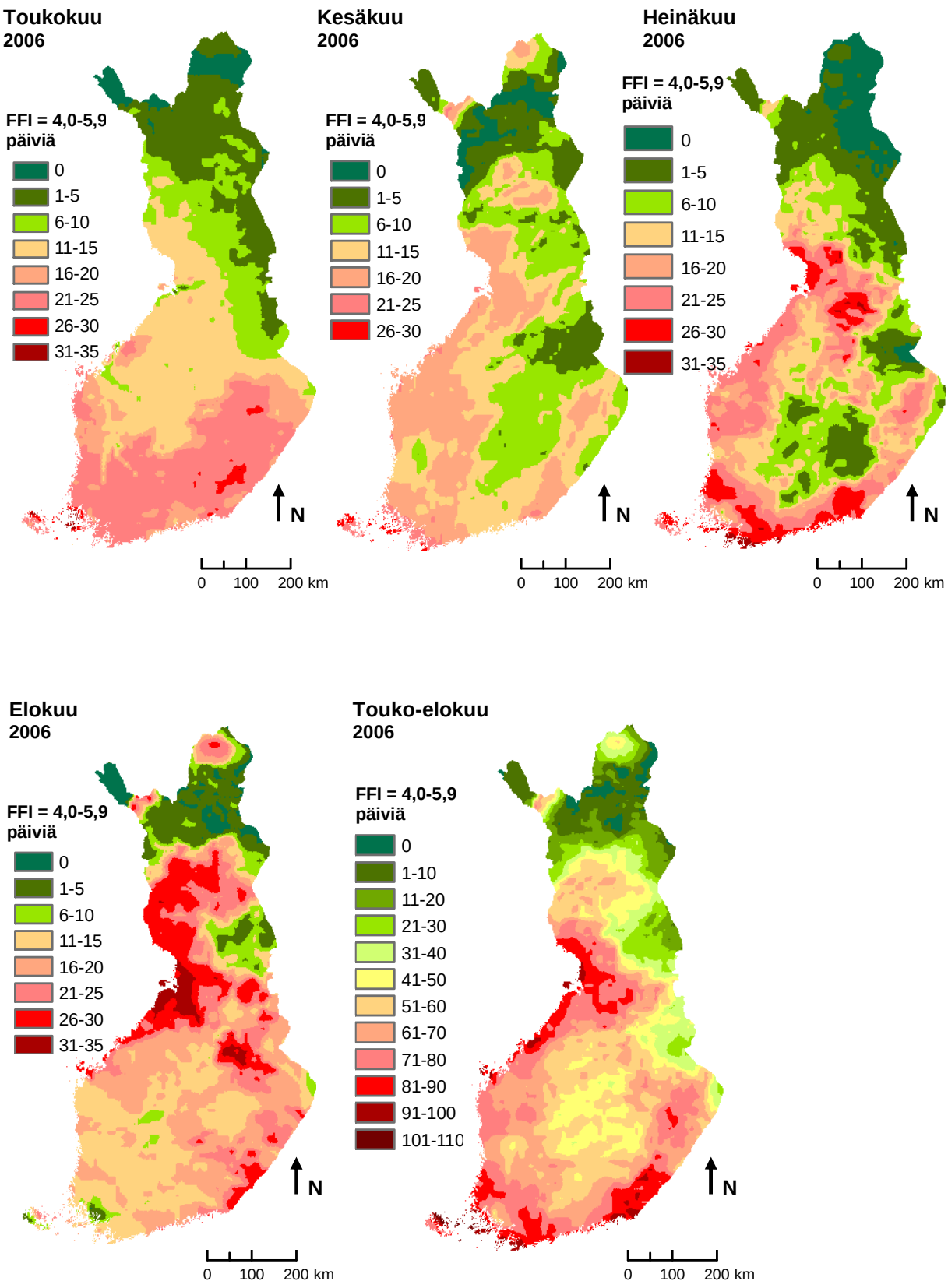
Kuivuuspäivien lukumäärä on vaihdellut yleisesti vuodesta toiseen paljon (kuva 17). Erityisesti Pohjois-Suomessa kuivuuspäiviä ei joinakin vuosina ole esiintynyt lainkaan.



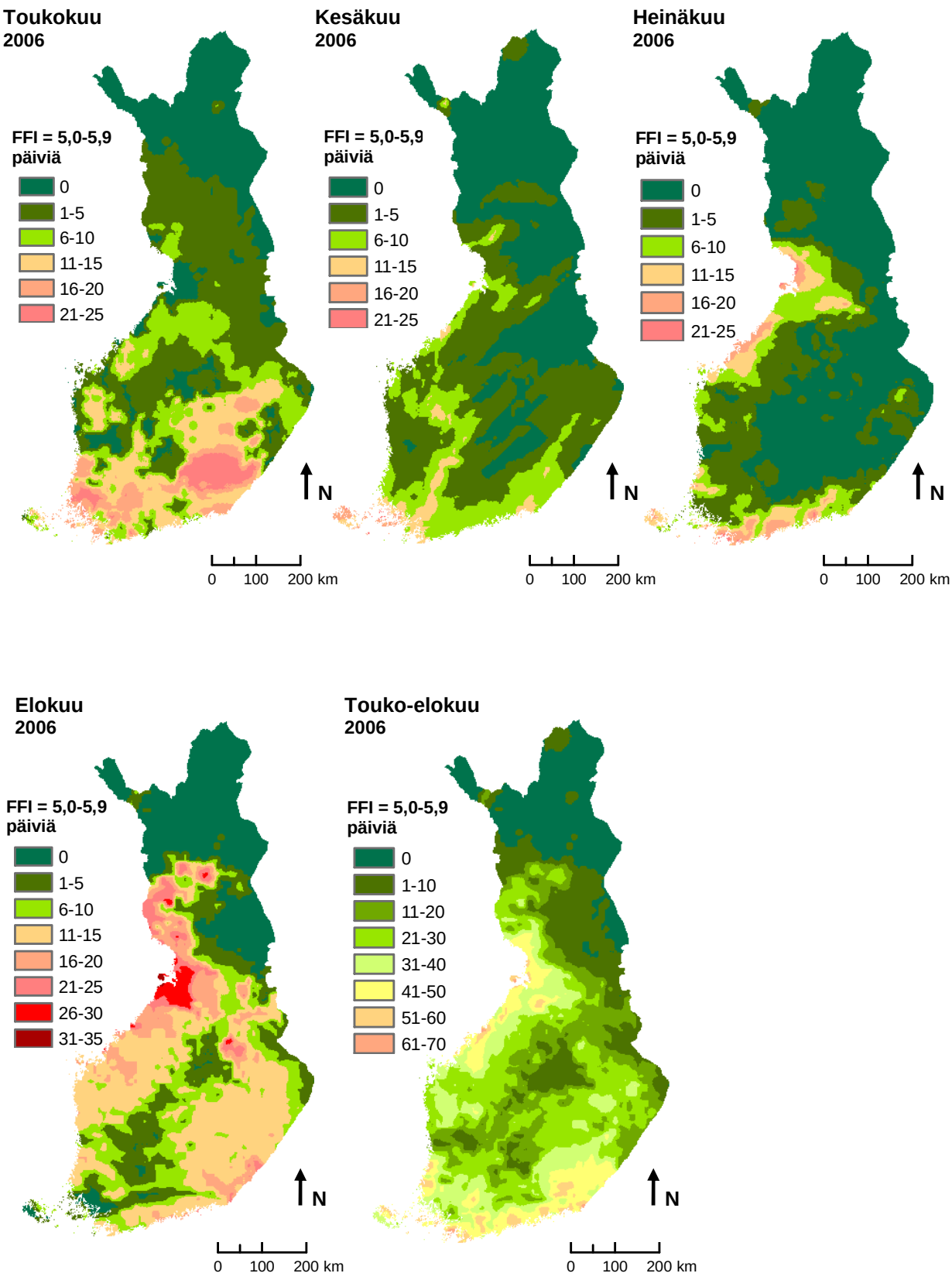
Kuva 13. Maankosteusindeksin mukaisten ”kohtalaisen kuivien” tai ”kuivien” päivien lukumäärän pitkänajan keskiarvon alueellinen vaihtelu Suomessa kuukausittain ja koko metsäpalokaudella. Laajoilla alueilla eniten ”kuivuuspäiviä” esiintyi tarkastelujaksolla kesäkuussa. Huhti- ja syyskuun päivien lukumäärän pitkänajan keskiarvot olivat suurimmassa osassa maata 0 ja koko maassa alle 5 (ei karttaa). Koko metsäpalokauden ”kuivuuspäivien” lukumäärä väheni keskimäärin lounaasta koilliseen. Tutkimuksessa käytetyt säähavaintoasemat on merkitty karttoihin mustilla pisteillä.



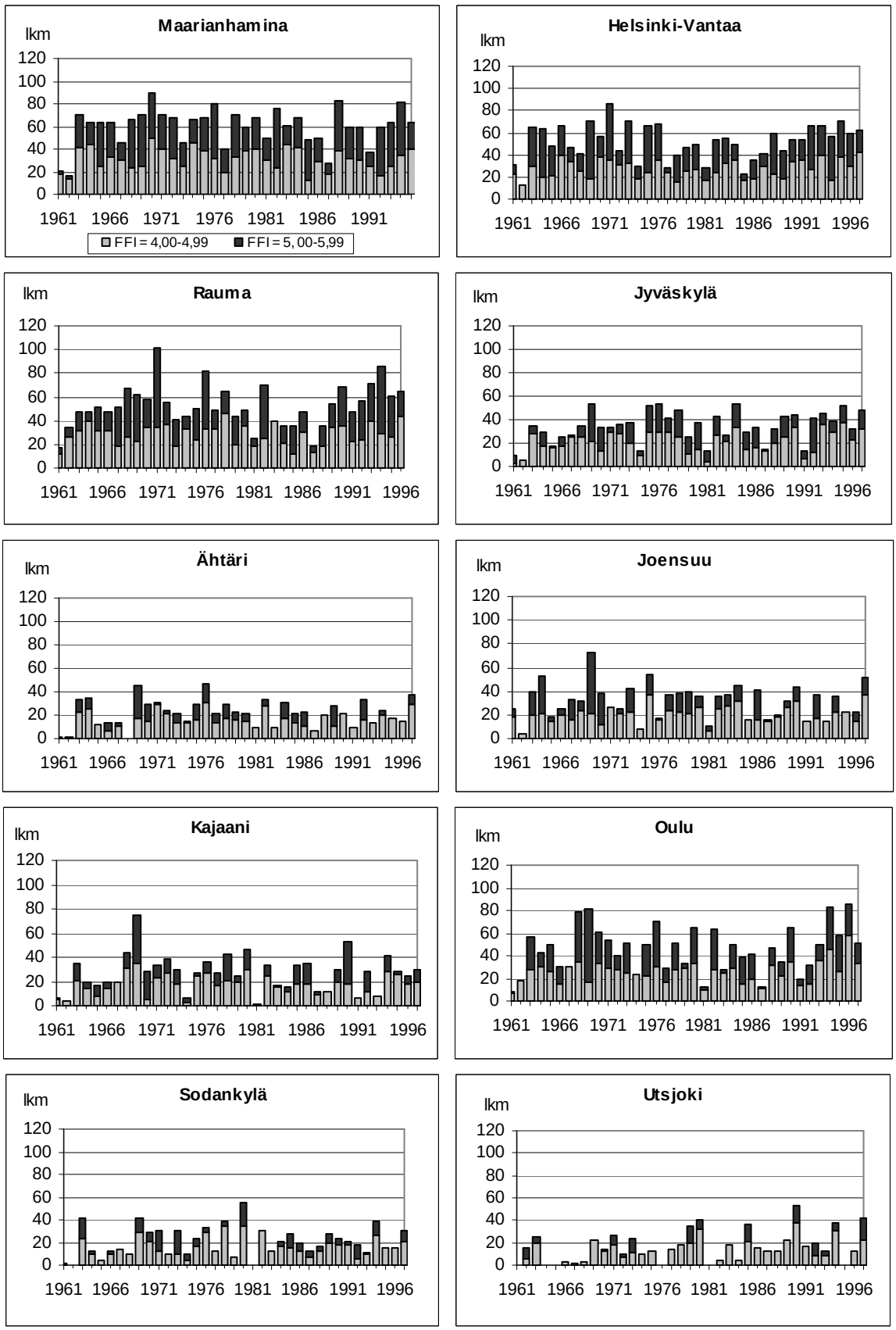
Kuva 14. Maankosteusindeksin mukaisten ”kuivien” päivien lukumäärän pitkänajan keskiarvon alueellinen vaihtelu Suomessa kuukausittain ja koko metsäpalokaudella. Laajoilla alueilla eniten ”kuivia” päiviä esiintyi tarkastelujaksolla kesäkuussa. Huhti- ja syyskuun päivien lukumäärän pitkänajan keskiarvot olivat koko maassa 0 (ei karttaa). Koko metsäpalokauden ”kuivien” päivien lukumäärä väheni keskimäärin lounaasta koilliseen. Tutkimuksessa käytetyt säähavaintoasemat on merkitty karttoihin mustilla pisteillä.



Kuva 15. Maankosteusindeksin mukaisten ”kohtalaisen kuivien” tai ”kuivien” päivien lukumäärän alueellinen vaihtelu Suomessa poikkeuksellisen kuivana kesänä 2006. Erityisen paljon ”kuivuuspäiviä” esiintyi elokuussa Oulun läänin länsiosassa.



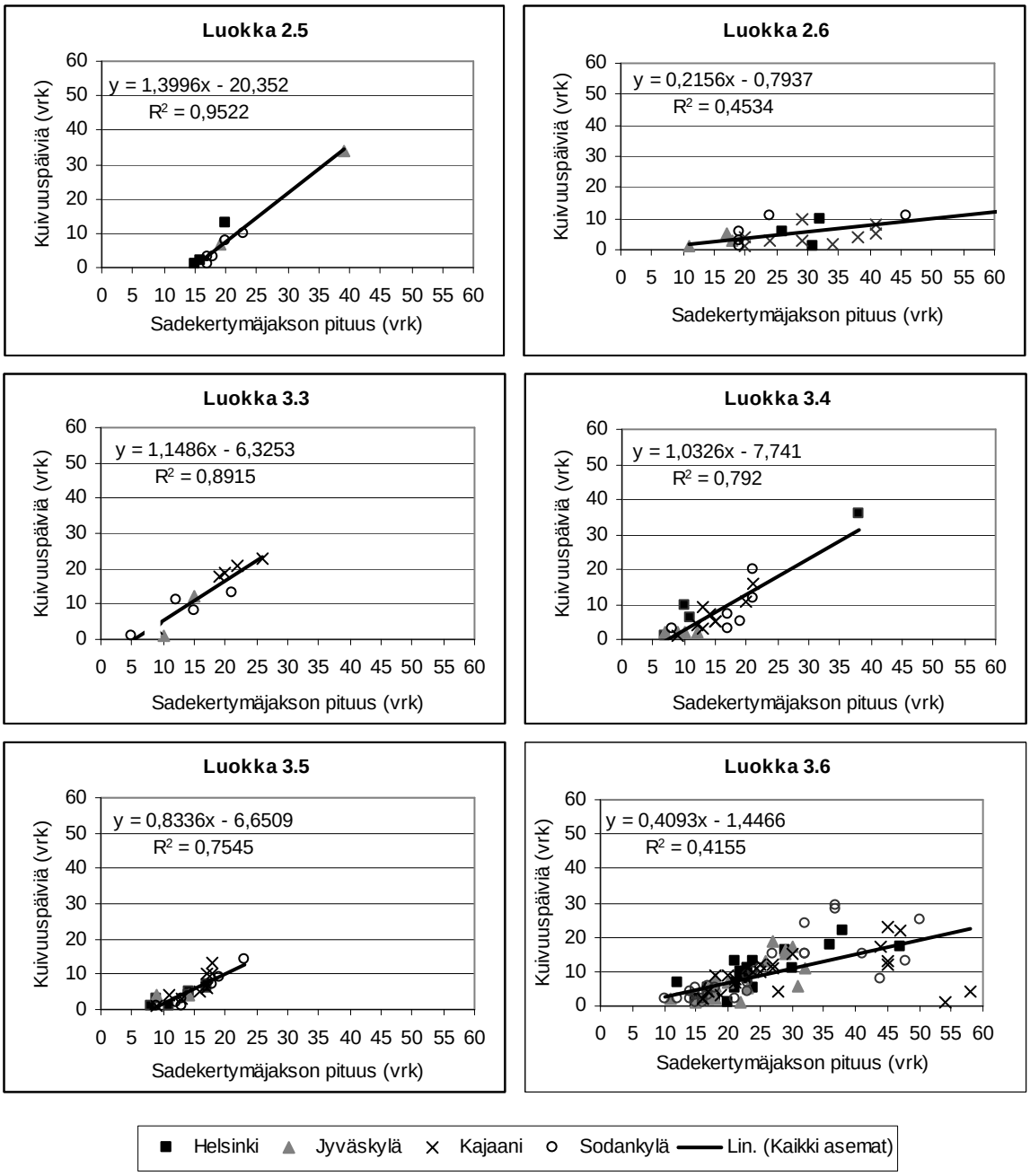
Kuva 16. Maankosteusindeksin mukaisten ”kuivien” päivien lukumäärän alueellinen vaihtelu Suomessa poikkeuksellisen kuivana kesänä 2006. Erityisen paljon ”kuivia” päiviä esiintyi elokuussa Oulun läänin länsiosassa. Pohjois-Lapissa sen sijaan ei varsinaisia ”kuivia” päiviä paikoin esiintynyt lainkaan.



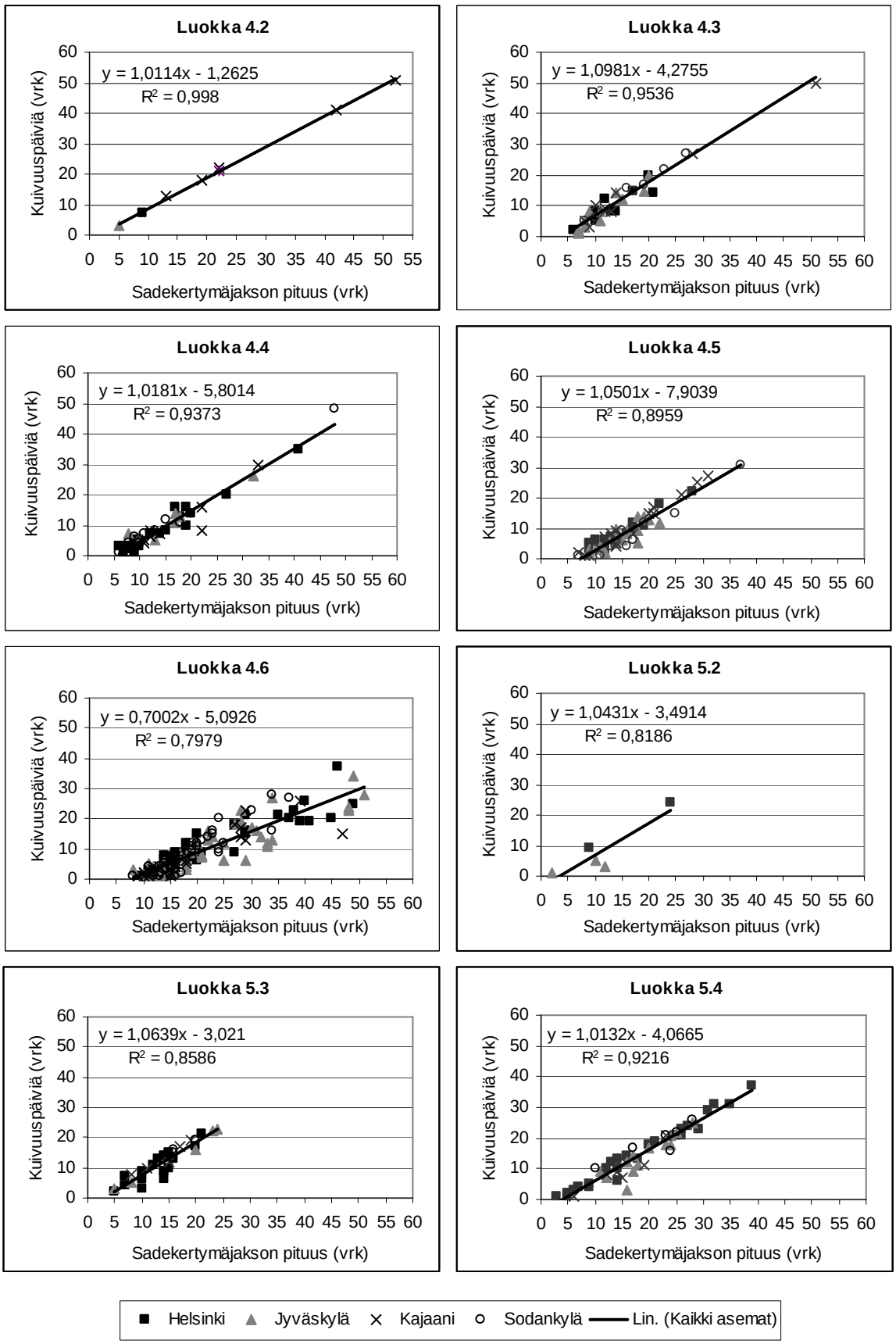
Kuva 17. ”Kuivuuspäivien” lukumäärien vaihtelu kymmenellä säähavaintoasemalla vuosina 1961–1997. ”Kuivuuspäiviä” esiintyi vuosittain tarkastelujaksolla eniten Etelä-Suomen asemilla, mutta Pohjois-Suomen asemilla joinakin vuosina ei ollenkaan.

4.4 Sadekertymäjaksojen pituuden ja ”kuivuuspäivien” lukumäärän välinen yhteys

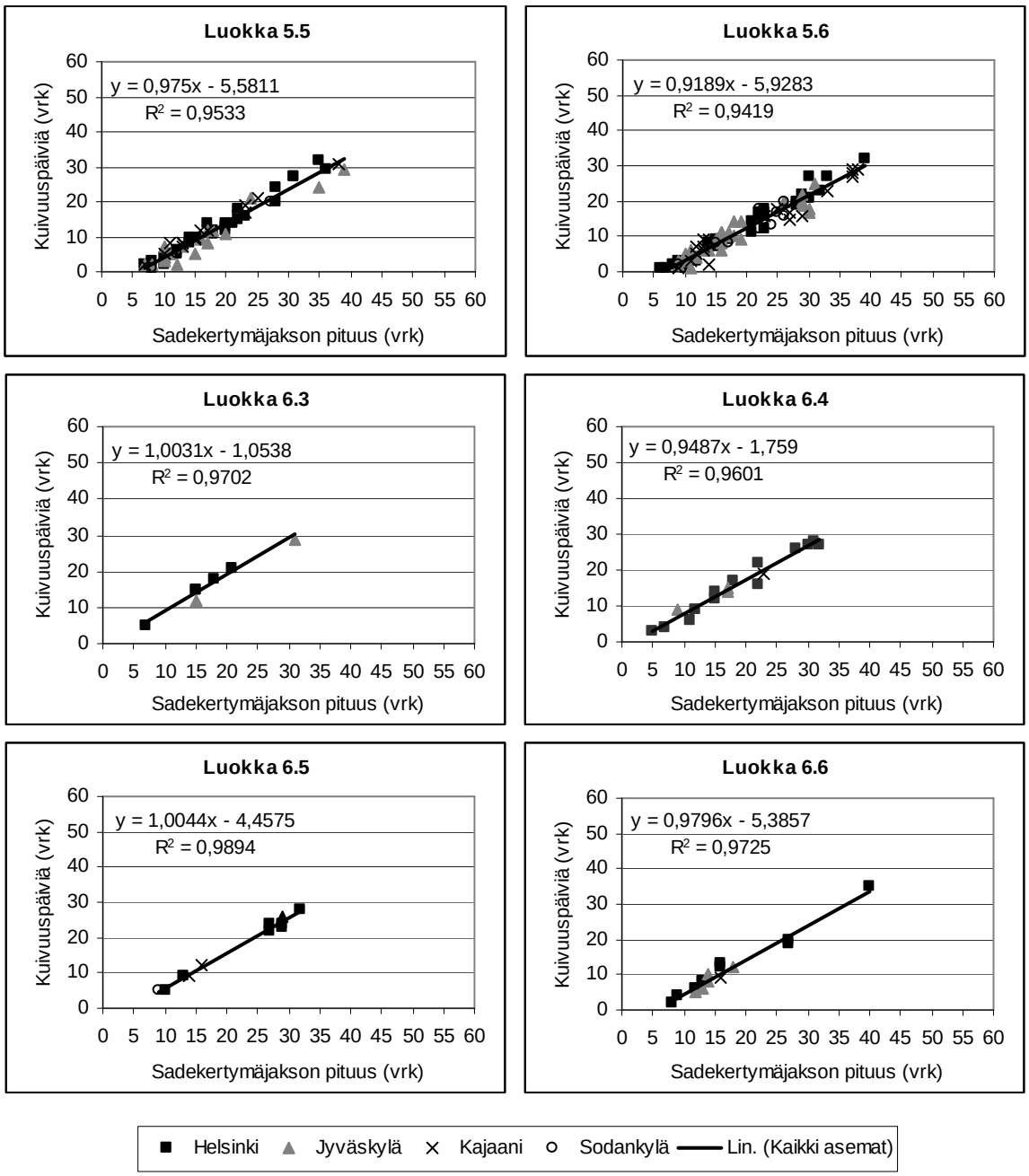
Suurimmassa osassa luokitelluista asemakohtaisista aineistoista esiintyi positiivinen ja tilastollisesti merkitsevä korrelaatio 10 mm sadekertymäjaksojen pituuksien ja niiden aikana esiintyneiden maankosteusindeksin mukaisten ”kuivuuspäivien” lukumäärien välillä (liite 26). Ei-merkitseviä korrelaatioita esiintyi vain lähinnä pienimmissä aineistoissa. Koska eri mittausasemien aineistojen pisteet osuivat luokkakohtaisesti suurin piirtein samalle korrelaatiosuoralle (kuva 18), yhdistettiin aineistot suuremman otoksen aikaansaamiseksi. Yhdistetyissä aineistoissa korrelaatiot olivat positiivisia ja tilastollisesti merkitseviä kaikissa luokissa (taulukko 12).



Kuva 18. 10 mm sadekertymäjakson pituuden ja jakson aikana esiintyvien ”kuivuuspäivien” lukumäärien välinen korrelaatio yhdistelmäluokittain (ks. taulukko 7). Korrelaatiot ovat positiivisia kaikissa luokissa. Korrelaatiosuoran kulmakerroin on keskimäärin sitä suurempi, mitä korkeampi on sadekertymäjakson aikainen haihdunta ja mitä alhaisempi on jaksoa edeltävä maankosteus.



Kuva 18. jatkuu.

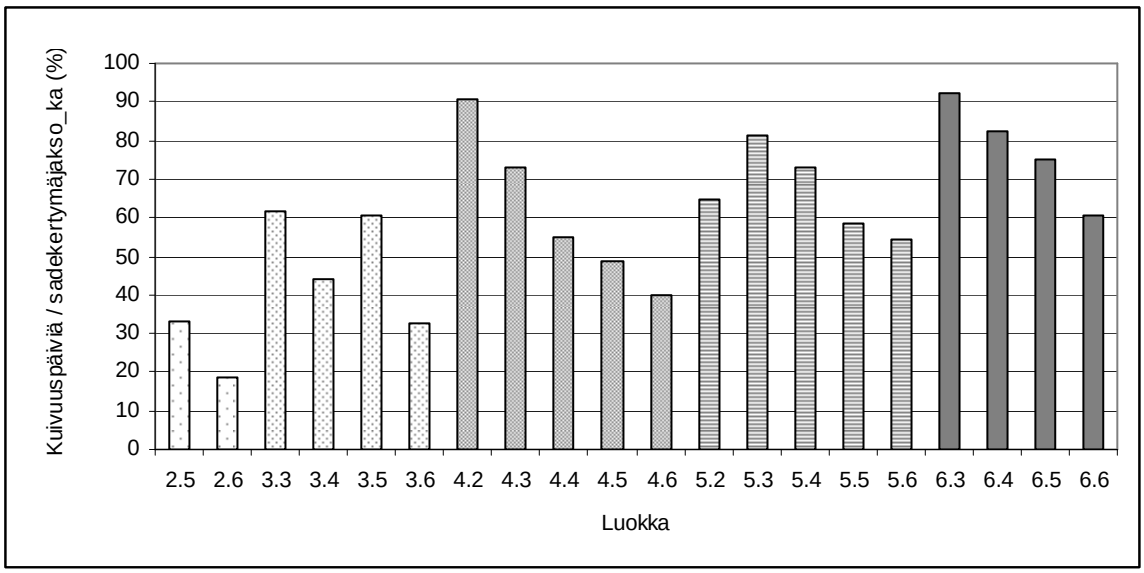


Kuva 18. jatkuu.

Taulukko 12. Helsingin, Jyväskylän, Kajaanin ja Sodankylän tutkimusasemien yhdistetyssä aineistossa esiintyvät korrelaatiot 10 mm sadekertymäjaksojen pituuksien ja maankosteusindeksin mukaisten ”kuivuuspäivien” lukumäärien välillä. Pearsonin korrelaatiokertoimien arvot on määritetty luokittain sadekertymäjakson aikaisen haihdunnan keskiarvon ja sadekertymäjaksoa edeltävän maankosteuden arvon mukaan. Korrelaatiot ovat positiivisia ja tilastollisesti merkitseviä kaikissa luokissa, eli mitä pitempiä ovat sadekertymäjaksot, sitä enemmän ne sisältävät ”kuivuuspäiviä”. Taulukossa tähdet kuvaavat korrelaatioiden tilastollista merkitsevyystasoa seuraavasti: ** = p<0,01 ja * = p<0,05. (vapausaste df = n-2). Kuhunkin analyysiin sisällytettyjen tapausten lukumäärä (n) on merkitty sulkuihin korrelaatiokertoimen viereen. Alle viisi tapausta sisältävien yhdistelmäluokkien korrelaatioita ei tarkasteltu.

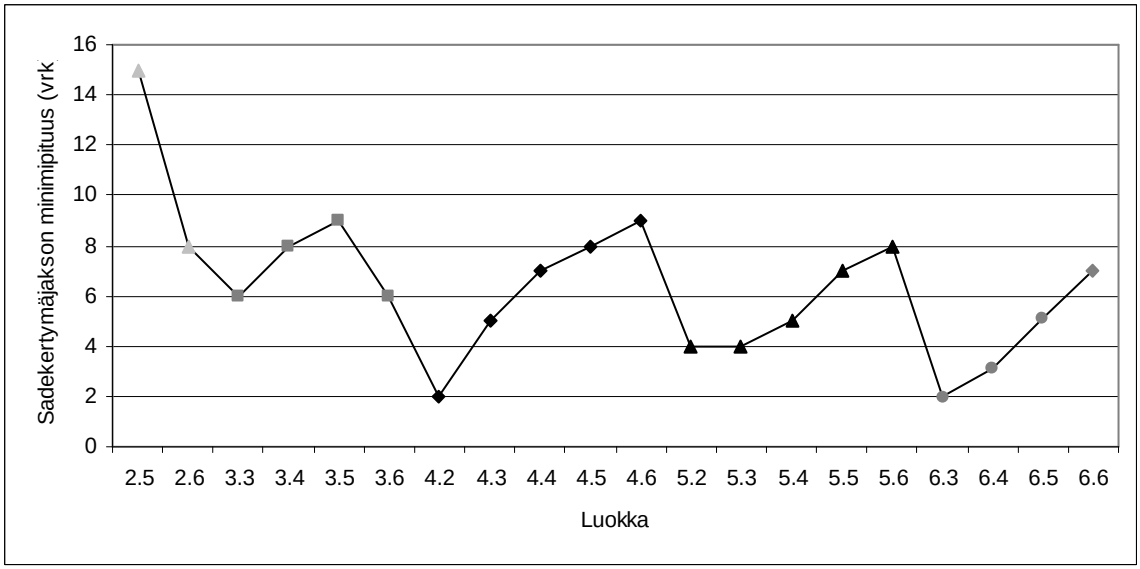
Haihdunta (mm)	**Maankosteus (m^3/ m^3)**					
	≤0,10	**0,11–0,14**	**0,15–0,19**	**0,20–0,25**	**0,26–0,32**	**≥0,33**
≤1,99	-	-	-	-	-	-
2-2,99	-	-	-	-	0,976** (10)	0,673** (21)
3-3,99	-	-	0,944** (13)	0,890** (23)	0,869** (25)	0,645** (96)
4-4,99	-	0,999** (8)	0,977** (34)	0,968** (51)	0,947** (65)	0,893** (172)
5-5,99	-	0,905* (5)	0,927** (32)	0,960** (51)	0,976** (68)	0,971** (100)
6-6,99	-	-	0,985** (7)	0,980** (17)	0,995** (11)	0,986** (15)

”Kuivuuspäivien” osuus 10 mm sadekertymäjaksojen pituudesta oli keskimäärin suurempi korkeammissa haihduntaluokissa, mutta väheni suhteellisen tasaisesti haihduntaluokissa 2, 4 ja 6 jaksoa edeltävän maankosteuden kasvaessa (kuva 19). Luokissa 3 ja 5 yhteys oli myös havaittavissa, mutta se ei ollut täysin lineaarinen.



Kuva 19. Maankosteusindeksin mukaisten ”kuivuuspäivien” keskimääräiset osuudet 10 mm sadekertymäjaksojen pituuksista eri yhdistelmäluokissa kaikkien asemien yhdistetyssä aineistossa. Eri haihduntaluokkiin kuuluvat pylväät on merkitty kuvaajaan erilaisin rasterein. Haihduntaluokissa 4-6 sadekertymäjaksot sisältävät keskimäärin sitä enemmän ”kuivuuspäiviä”, mitä alhaisempi on jaksoa edeltävä maankosteus.

Haihduntaluokissa 4-6 ”kuivuuspäiviin” yhteydessä olevan 10 mm sadekertymäjakson teoreettinen minimipituus oli pääsääntöisesti sitä lyhempi, mitä suurempi oli sadekertymäjakson aikainen haihdunta ja mitä alhaisempi oli jaksoa edeltävä maankosteus (kuva 20). Haihduntaluokissa 2 ja 3 yhteys ei kuitenkaan ollut yhtä selkeä. Minimiarvosta lähtien sadekertymäjakson pituuden ja jakson aikaisten ”kuivuuspäivien” välisen suhteen voidaan todeta etenevän teoriassa yhdistelmäluokkien määrittelemissä olosuhteissa pienimmän neliösumman mukaisten suorien kulmakerrointen mukaisesti (kuva 18).



Kuva 20. Korrelaatiosuoran yhtälön (kuva 18) mukaisen ”kuivuuspäivien” syntyyn yhteydessä olevan 10 mm sadekertymäjakson teoreettisen minimipituuden vaihtelu eri yhdistelmäluokissa. Eri haihduntaluokkien mukaiset minimipituudet on erotettu toisistaan kuvaajassa erilaisilla symboleilla. Mitä suurempi on haihdunta ja mitä alhaisempi on sadekertymäjaksoa edeltävä maankosteus haihduntaluokissa 4-6, sitä alhaisempi on ”kuivuuspäiviä” aikaansaavan sadekertymäjakson minimipituus.

5 Tulosten tarkastelu

5.1 Meteorologisen kuivuuden esiintyminen Pohjois-Euroopassa

5.1.1 Alueellinen vaihtelu

Maakohtaisissa tarkasteluissa 100 ja 400 mm saderajojen mukaan määritellyt mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneet pisimmät sadekertymäjaksot olivat tulosten mukaan keskimäärin pitempiä pohjoisessa kuin etelässä ja idässä kuin lännessä (kuva 6). Tämä saattaa osaltaan selittyä sillä, että kylmä ja mannermainen ilmasto sisältää pienempiä määriä kosteutta kuin lauhkea ja mereinen ilmasto. Toisaalta kiinteässä muodossa tulevan sateen kertyminen sademittareihin on heikompaa kuin vetenä tulevan sateen, erityisesti tuulisissa olosuhteissa (Houghton ym. 1990), minkä vuoksi erityisesti tutkimusalueen pohjoisosien mitatut sademäärät saattavat olla paljonkin todellisia sademääriä pienempiä. Myös vallitseva lännenpuoleinen ilmavirtaus yhdessä topografisten tekijöiden kanssa aiheuttaa länsirannikoille suurempia sademääriä kuin maiden itäosiin (Frich ym. 1997). Tanskasta Baltiaan, Baltiasta Suomeen ja Ruotsista Suomeen tultaessa pisimpien sadekertymäjaksojen pituuden kasvu ei ollut kuitenkaan lineaarista vaan alueiden välissä jaksojen kestossa näytti tapahtuvan pieni notkahdus alaspäin. Tähän saattavat olla syynä alueiden välillä olevat kosteuden lähteinä toimivat merialueet, Itämeren allas Tanskan ja Baltian, Suomenlahti Viron ja Suomen sekä Pohjanlahti Ruotsin ja Suomen välissä. Kesän aikasarjoissa pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksien erot asemien välillä olivat vähäisempiä, mikä johtuu todennäköisesti ainakin osittain sateen paremmasta kertymisestä mittalaitteisiin myös pohjoisessa, kun lumena tulevan sateen osuus on vähäisempi.

Koko vuoden poutapäivien ja sateettomien päivien lukumäärät eivät vähentyneet pohjoista ja itää kohti yhtä selkeästi kuin olisi pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksien alueellisen vaihtelun perusteella voinut olettaa. Koko vuoden alle 1,0 mm sadepäivien keskimääräinen lukumäärä oli selkeästi alhaisempi lännen kuin idän puoleisilla asemilla vain Norjassa ja Tanskassa ja kesän aikasarjoissa vain Norjassa (kuva 8). Sekä kesän, että koko vuoden alle 0,1 mm sadepäivien kohdalla tilanne oli Norjan ja Tanskan osalta samanlainen kuin alle 1,0 mm päivien kohdalla. Tanskan osalta nämä havainnot ovat yhtäpitäviä Frichin ym. (1997) yli 1,0 ja yli 0,1 mm sadepäivien vuotuisen lukumäärän alueellisesta jakautumisesta esittämien havaintojen kanssa. Suomessa alle 0,1 mm päivien lukumäärät olivat sen sijaan selkeästi pienempiä pohjoisessa kuin etelässä. Se, että etelästä pohjoiseen tapahtuva alle 1,0 mm sadepäivien lukumäärän väheneminen ei ollut Suomessa samansuuntaista, viittaisi siihen, että Pohjois-Suomessa sataa useampana päivänä 0,1–0,9 mm kuin Etelä-Suomessa. Yleisesti ottaen alle 1,0 ja 0,1 mm sadepäivien lukumäärät vastasivat käänteisesti melko hyvin Tveiton ym. (2001) vuosien 1961-1990 tietoihin perustuvia arvioita ≥0,1 ja ≥1,0 mm sadepäivien lukumäärien jakaumasta Pohjoismaiden alueella. 0,1 mm saderajan suhteen on kuitenkin syytä huomioida, että se, saadaanko mittarista ≥0,1 mm lukema riippuu lähinnä mitarinlukijan tarkkuudesta ja mittarista tapahtuvasta haihdunnasta, mikä saattaa osittain selittää eroja eri asemien alle 0,1 mm sadepäivien lukumäärissä. Ruotsissa 0 mm sadepäivien lukumäärä oli hieman alhaisempi pohjoisessa kuin etelässä vain kesällä. Baltian vertailu tässä suhteessa oli vaikeampaa, koska sademäärät oli alkuperäisissä sadetilastoissa ilmoitettu eri tarkkuudella Tartossa kuin Riiassa ja Vilnassa.

Tulosten tarkastelussa on kuitenkin huomioitava, että pistemäiseen säähavaintoasemilta kerättyyn tilastoaineistoon perustuvien analyysitulosten yleistäminen laajemmille alueille on sadannan suuren alueellisen vaihtelun vuoksi kyseenalaista (Panu & Sharma 2002). Esimerkiksi kahden sadehavaintoaseman välisen kuukausisadannan merkitsevän korrelaatioetäisyyden on todettu vaihtelevan maaston mukaan, ollen joitakin satoja

kilometrejä tasaisella maalla, mutta vain muutamia kymmeniä kilometrejä vuoristoalueilla (Groisman & Legates 1995). Kesällä konvektiosateiden osuus on myös suurempi, mikä lyhentää korrelaatioetäisyyttä verrattuna talveen (Osborn & Hulme 1997). Tutkimuksessa tarkastellut säähavaintoasemat muodostavat Itämeren ympärille ikään kuin renkaan, jossa kahden vierekkäisen aseman välinen etäisyys linnuntietä pitkin mitattuna on suurimmillaan noin 700 km, Östersundin ja Karesuvannon välillä, ja lyhimmillään noin 150 km, Kööpenhaminan ja Hammer Odden välillä. Yksittäisten vuosien tai kesien pisimpien sadekertymäjaksojen pituudet tai poutapäivien lukumäärät saattavat näin pitkillä etäisyyksillä poiketa toisistaan jonkin verran. Pitemmällä aikavälillä erot kuitenkin tasoittuvat tietyille vaihteluväleille, joiden maksimiarvot kuvaavat paikallista meteorologisen kuivuuden esiintymistä ja voimakkuutta.

Tutkimusalueen eri maiden sadetilastoihin perustuvien analyysien välistä vertailukelpoisuutta heikentää kuitenkin se, että eri maissa on eri aikoina ollut käytössä erilaisia sadekeräimiä (Førland ym. 1996) ja mittauskäytännöt eivät muutoinkaan ole noudattaneet kansainvälisiä yhteisiä standardeja (Houghton ym. 1990). Vetenä ja, kuten aiemmin todettiin, erityisesti lumena tulevan sateen mittaukset ovat sinänsä jo aina aliarvioita, sillä niihin aiheutuu virhettä muun muassa sadekeräimen rakenteesta ja sen suuntautumisesta sateen tulokulmaan nähden (Heino 1994). Myös paikalliset olosuhteet, kuten ympäristön avoimuus ja mittarista tapahtuva haihdunta sekä mittauskäytännöt, kuten veden siirrot mittauksen aikana, veden roiskuminen, mittarinlukijan tekemät havainnointivirheet ja satunnaiset tekijät saattavat aiheuttaa eroja mittausaseman todellisen ja mitatun sademäärän välille (Førland ym. 1996). Tässä tutkimuksessa käytettyjä alkuperäisiä sademittauksia ei ollut korjattu lainkaan, minkä vuoksi esitettyihin asemakohtaisiin pisimpien sadekertymäjaksojen absoluuttisiin pituuksiin ja poutapäivien lukumääriin onkin suhtauduttava varauksella.

5.1.2 Vuodenaikaisvaihtelu

Koko vuoden pisimmät 10 mm sadekertymäjaksot ajoittuivat tilastoissa useimmiten kevättalveen ja joillakin asemilla myös vuoden loppuun (kuva 7a). Tämä tulos oli osittain jo odotettavissa edellä mainittujen kiinteässä muodossa tulevan sateen mittaamiseen liittyvien ongelmien sekä lämpötiloista riippuvaisten ilmakehän maksimikosteusmäärien vuoksi. Poutapäivien keskimääräistä jakautumista eri kuukausille ei tarkasteltu tässä työssä. Drebsin ym. (2002) tutkimuksen mukaan Suomen eri osissa esiintyi jaksolla 1971-2000 vähiten yli 1,0 mm:n ja yli 0,1 mm:n sadepäiviä keväisin ja alkukesällä, jolloin siis kääntäen poutapäivien ja täysin sateettomien päivien määrä on suurimmillaan. Tanskassa vuosina 1961-1990 poutapäivien ja sateettomien päivien esiintymismaksimi ajoittuu suurinpiirtein samaan aikaan (Frich ym. 1997). Pohjois-Euroopan ilmastollisen homogeenisuuden huomioon ottaen voidaan olettaa saman pätevän ainakin jossakin määrin myös muuhun Pohjois-Eurooppaan. Kevään ja alkukesän kuivuus Pohjois-Euroopassa liittyy todennäköisesti aiemmin mainittuun sulkukorkeapainetilanteen muodostumiseen Norjanmerelle (Arvola 1987).

5.2 Meteorologisen kuivuuden ajallisiin trendeihin vaikuttavat tekijät

5.2.1 Muutokset sademäärissä

Tutkimuksessa havaitut tilastollisesti merkitsevät trendit pisimpien sadekertymäjaksojen ja poutapäivien lukumäärien aikasarjoissa selittyvät osittain sademäärien todellisilla muutoksilla, jotka liittyvät mahdollisesti 1) ihmisen aiheuttamaan ilmastonmuutokseen, 2) ilmakehän kiertoliikkeiden epäsäännölliseen vaihteluun tai 3) näiden yhdistelmään.

Pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksien analysointiin käytetyissä, sekä havaintoihin että ilmastomallinnuksiin perustuvissa tilastoissa esiintyi enemmän tilastollisesti merkitseviä lineaarisia trendejä pisimpien 100 ja 400 mm sadekertymäjaksojen aikasarjoissa kuin 10 mm jaksojen sarjoissa (taulukot 8 ja 9). Tähän saattaa olla syynä se, että lyhyempien ajanjaksojen sademäärät eivät heijasta yhtä selkeästi kokonaissademäärien muutoksia kuin pitemmät muutamasta kuukaudesta vuoteen kestävät ajanjaksot (Räisänen 2005). Se, että tilastollisesti merkitsevät trendit olivat lisäksi suurimmaksi osaksi väheneviä, sopii yhteen sen seikan kanssa, että maapallon ilmaston lämmetessä Pohjois-Euroopan vuosisademäärien keskiarvot ovat pääasiassa kasvaneet ja tulevat todennäköisesti kasvamaan myös tulevaisuudessa (Trenberth ym. 2007; Christensen ym. 2007).

Tilastollisesti merkitseviä lineaarisia trendejä esiintyi myös enemmän koko vuoden kuin kesän aikasarjoissa. Tämä saattaa ainakin osittain johtua siitä, että Pohjois-Euroopan alueen kokonaisvuosisadannan kasvu ei ole jakautunut tasaisesti eri vuodenajoille, vaan muutosten on todettu olleen yleensä voimakkaimpia ja tilastollisesti merkitsevämpiä muina vuodenaikoina kuin kesällä (Heino ym. 2008). Näin ollen sademäärien kasvu saattaa lyhentää kyseisinä vuodenaikoina alkaneita pisimpiä sadekertymäjaksoja. Koska 10 ja 100 mm koko vuoden pisimpien sadekertymäjaksojen pituudet olivat pääsääntöisesti pitempiä kuin kesällä alkaneiden, voidaan olettaa, että koko vuoden pisimmät jaksot eivät ole yleensä alkaneet kesällä, mikä tekee yllä esitetyn tulkinnan mahdolliseksi tässä yhteydessä. Vähäisemmät muutokset kesän sademäärissä saattavat selittää myös poutapäivien ja täysin sateettomien päivien lukumäärien kesän aikasarjoissa koko vuoden aikasarjoihin nähden hieman harvinaisemmat tilastollisesti merkitsevät trendit (taulukot 10 ja 11).

Ilmaston lämpeneminen saattaa myös vähentää joillakin alueilla lumena tulevan sateen osuutta, mikä parantaa talvisadannan kertymistä mittalaitteisiin ja näin ollen aiheuttaa sademääriin näennäisen kasvavan trendin (Groisman & Legates 1995; Mauget 2006). Lumisateiden osuuden on havaittu vähentyneen Skandinavian niemimaan länsiosissa sekä Baltiassa 1900-luvulla (Kitaev ym. 2006; Heino ym. 2008). Esimerkiksi joillakin alueilla Skandinavian pohjoisosissa tilanne on sen sijaan ollut päinvastainen, sillä talvilämpötilat ovat siellä laskeneet, mikä on lisännyt lumena tulevan sateen osuutta. Pohjois-Euroopan tasangon koillisosissa, leveyspiirien 60-63°N eteläpuolella, lumena tulevan sateen osuus on sen sijaan kasvanut samaan aikaan talvilämpötilojen nousun ja talven sademäärien kasvun myötä. Lumena tulevan sateen osuuden kasvu saattaisi puolestaan aiheuttaa näennäisen laskevan trendin aikasarjoihin.

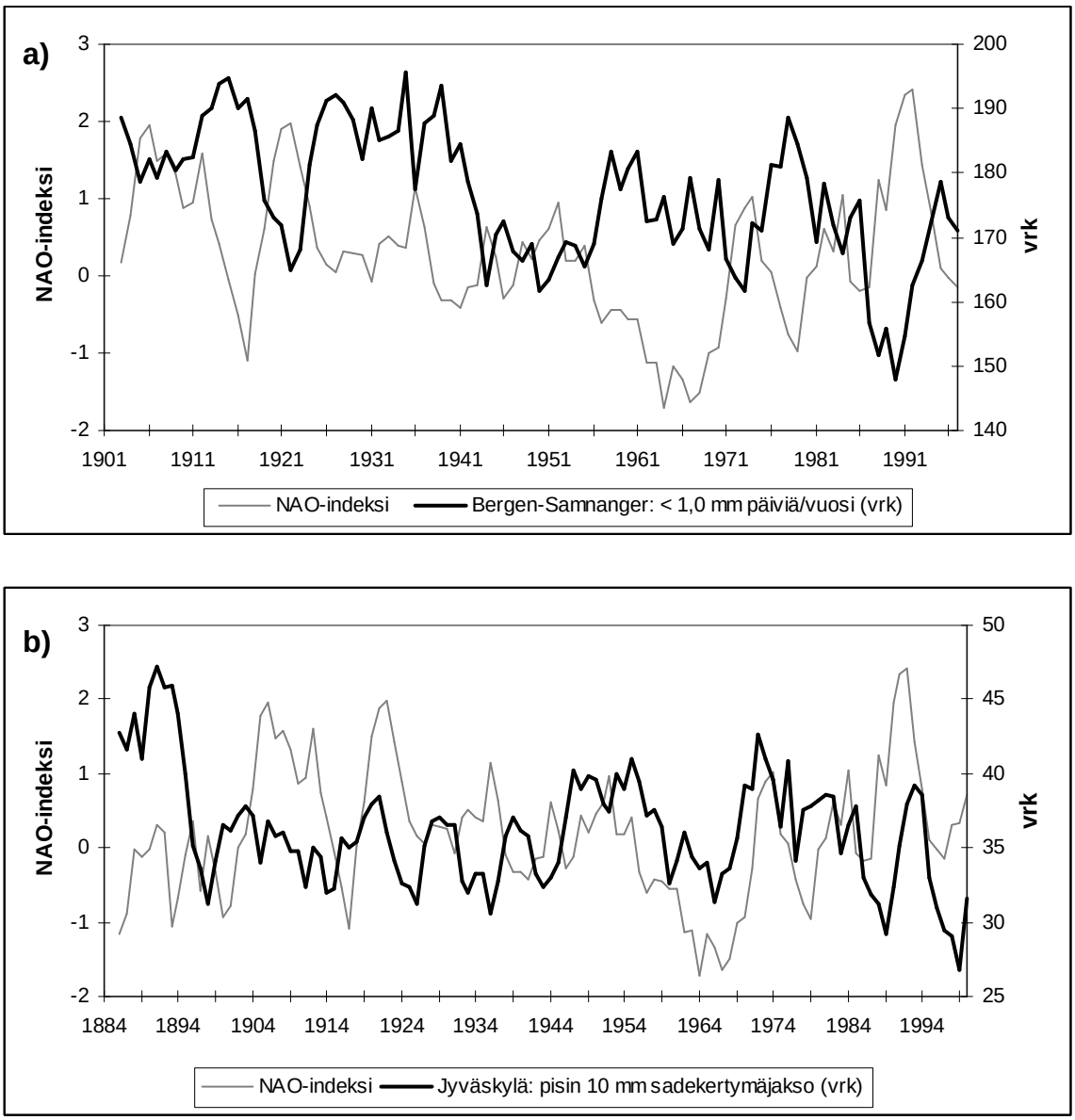
Ilmastonmuutoksen vaikutukset sademääriin ilmoitetaan usein yksinkertaistetun lineaarisesti tyyliin ”sademäärät kasvavat” tai ”sademäärät vähenevät”. Ilmakehän kiertoliikkeiden epäsäännöllisen vaihtelun ja erilaisten palautemekanismien vuoksi ei ole kuitenkaan mitään syytä olettaa, että kehitys olisi täysin lineaarista. Onkin syytä huomioida, että kaikissa niissä aikasarjoissa, jotka testien mukaan sisälsivät tilastollisesti merkitseviä trendejä, eivät muutokset kuitenkaan olleet täysin lineaarisia. Esimerkiksi Kajaanin 100 mm saderajan mukaan määriteltyjen koko vuoden pisimpien sadekertymäjaksojen aikasarja on hieman U:n muotoinen, joten siinä havaitun kasvavan trendin ei voida katsoa olleen täysin lineaarinen (liite 4). Hammer Oddessa myös alle 1,0 mm sadepäivien vuotuiset ja kesäkauden lukumäärät ovat vähentyneet 1970-luvun puolivälistä lähtien sekä alle 0,1 mm lukumäärät jo 1940-luvulta lähtien, joten koko aikasarjan positiivista trendiä ei voida myöskään näissä aikasarjoissa pitää täysin lineaarisena (liitteet 14-17). Laskevat trendit eivät myöskään jatku tasaisesti Hammer Odden ilmastomallinnuksiin perustuvissa tilastoissa, vaan jonkinlaista aaltoliikettä on niissäkin havaittavissa (liitteet 21-24). Koko vuoden alle 0,1 mm sadepäivien trendi ei ole myöskään Jyväskylässä ollut tasaisen laskeva, sillä vuosien 1891–1935 voimakkaan laskun jälkeen lukumäärä kasvoi voimakkaasti 1940-luvun lopulle saakka ja 1960-luvun alussa

vaihteluväli vakiintui lähes nykyiselle tasolle (liite 16). Sodankylässä koko vuoden sateettomien päivien lukumäärien kehitys on ollut myös hyvin vaihtelevaa ja 1980-luvun alusta lähtien trendi on ollut kasvava, vaikka koko aikasarjan trendi onkin ollut laskeva.

Epälineaarinen kehitys saattaa aiheuttaa näennäisen trendin tilanteessa, jossa kehitys etenee aaltomaisesti ja esimerkiksi edeltävän aallon harjalta ehditään aikasarjassa edetä vasta seuraavan aallon pohjalle. Toisaalta aikasarjan kohdalle saattaa osua myös aallonpohja tai aallonharja, jolloin lineaarisia trendejä ei esiinny. Esimerkiksi Helsingin, Karesuvannon ja Kööpenhaminan asemien koko vuoden pisimpien 10 mm sadekertymäjaksojen aikasarjoissa oli nähtävissä selkeä U-muoto (liite 2). Helsingissä ja Karesuvannossa myös kesän pisimpien 10 mm sadekertymäjaksojen aikasarja oli U:n muotoinen (liite 3). 100 mm sadekertymäjaksojen aikasarjoista U:n muotoisia ovat myös Helsingin koko vuoden ja kesän aikasarjat (liitteet 4 ja 5). Helsingissä myös koko vuoden alle 0,1 mm sadepäivien lukumäärä laski sarjan alussa, mutta on lisääntynyt 1970-luvun lopulta lähtien voimakkaasti (liite 16).

Pohjois-Euroopassa sademääriin vaikuttavan NAO-indeksin arvon vaihtelusta ei ole löydetty säännöllistä syklisyyttä, mutta sen sijaan epäsäännöllisesti vaihtelevia positiivisen ja negatiivisen NAO-indeksin jaksoja on esiintynyt (Osborn 2009). Kosteiden länsituulten voimakkuus todennäköisesti vaikuttaa ainakin poutapäivien lukumääriin (esim. kuva 21a). Sen sijaan erityisesti alempien saderajojen mukaan määriteltyjen pisimpien sadekertymäjaksojen pituuden ja NAO-indeksin arvojen välistä yhteyttä on vaikeampi arvioida (esim. kuva 21b). Länsituulten voimakkuuden vaihtelun seuraukset ovat myös todennäköisesti selvemmät Pohjois-Euroopan länsiosissa kuin itäosissa, joissa mantereisen ilmaston vaikutukset tuntuvat voimakkaammin.

Edellä mainitut esimerkit aikasarjojen sisältämien muutosten epälineaarisuudesta eivät kuitenkaan vielä todista sitä, etteikö tietyn suuntaista lineaarista kehitystä voisi tapahtua pidemmällä aikavälillä. Esimerkiksi vaikka Hammer Odden 400 mm pisimpien sadekertymäjaksojen havaintoihin perustuvassa aikasarjassa ei esiintynyt koko aikasarjan kattavaa lineaarista trendiä, lähempi tarkastelu kuitenkin osoittaa jyrkän laskeva trendin esiintyneen 1970-luvun puolivälistä lähtien (liite 6). Ilmastomallinnusten mukaan tämä trendi tulee jatkumaan mahdollisesti hieman loiventuen (liite 12). Myös Jyväskylässä koko vuoden pisimpien 100 ja 400 mm sadekertymäjaksojen pituudet lyhenivät ensimmäisen kerran 1800-luvun lopulla, jonka jälkeen ne pitenivät hieman, mutta ovat lyhentyneet jälleen tasaisemmin 1930-luvun lopulta lähtien (liitteet 4 ja 6). Kyseinen laskeva trendi tulee jatkumaan 2000-luvun kuluessa 100 mm pisimpien sadekertymäjaksojen osalta kahden (liite 10) ja 400 mm jaksojen osalta kolmen ilmastomallin mukaan (liite 12). Tartossa ei havaintoihin perustuvien pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksissa ole esiintynyt yhtään tilastollisesti merkitsevää trendiä koko tarkastelujaksolla. 10 mm pisimpien mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneiden sadekertymäjaksojen pituudet ovat kuitenkin Tartossa lyhentyneet loivasti 1950-luvulta lähtien (liite 2). HadCM3/RCA3-ilmastomallin mukaan tämä trendi tulee myös jatkumaan tulevaisuudessa, joskin epätasaisesti (liite 8). 100 ja 400 mm pisimpien sadekertymäjaksojen kohdalla Tartossa lyhentyminen alkoi 1960-luvulla (liitteet 4 ja 6). Myös 100 mm sadekertymäjaksojen osalta HadCM3/RCA3-ilmastomalli osoittaa sadekertymäjaksojen lyhenevän edelleen, mutta 400 mm jaksojen kohdalla kaikki muut paitsi HadCM3/CLM-malli osoittavat tilastollisesti merkitsevää lyhentymistä (taulukko 9).



Kuva 21. Esimerkki NAO-indeksin arvon ja tutkimuksessa analysoitujen muuttujien välisistä yhteyksistä. Kuvasta a) nähdään, että Bergen-Samnangerin koko vuoden poutapäivien lukumäärän viiden vuoden liukuvaa keskiarvoa kuvaava käyrä on miltei NAO-indeksin vastaavan keskiarvokäyrän peilikuva, eli näiden muuttujien välillä vallitsee negatiivinen korrelaatio (viiden vuoden liukuvan keskiarvon aineistossa: r = -0,252, p = 0,014 ja on tilastollisesti merkitsevä; vuosittaisessa aineistossa: r = -0,408, p = 0,000 ja on tilastollisesti erittäin merkitsevä). Kuvassa b) Jyväskylän pisimpien 10 mm sadekertymäjaksojen ja NAO-indeksin vaihtelun välillä ei kuitenkaan ole havaittavissa samanlaista selkeää yhteyttä (viiden vuoden liukuvan keskiarvon aineistossa: r = -0,072, p = 0,445 ja ei ole tilastollisesti merkitsevä; vuosittaisessa aineistossa: r = -0,02, p = -0,980 ja ei ole tilastollisesti merkitsevä). Esimerkiksi 1940-luvulta 1970-luvulle muuttujien välillä vallitsi kuitenkin jonkinlainen positiivinen yhteys, joka on ristiriidassa sen oletuksen kanssa, että kuivuusjaksot olisivat pitempiä NAO-indeksin ollessa negatiivinen (NAO-indeksin lähde: UCAR 2008).

Sheffieldin ja Woodin (2008) mukaan trendien erottuminen muuttujien luonnollisen vaihtelun aiheuttamasta taustakohinasta vaihtelee ajallisesti maapallon eri alueilla ja riippuu oleellisesti juuri muutosten suuruudesta, tilastollisen merkitsevyyden testaamisessa käytetystä riskitasosta sekä ilmastomallinnusten kohdalla myös käytetystä päästöskenaariosta. Jos trendien tilastollisen merkitsevyyden hyväksymisrajana olisi merkitsevyystason 0,05 sijaan käytetty esimerkiksi merkitsevyystasoa 0,10, olisi tilastollisesti merkitseviä trendejä esiintynyt

aikasarjoissa jonkin verran enemmän. Sen sijaan merkitsevyystasolla 0,01, jota tässä työssä käytettiin tilastollisesti ”erittäin merkitsevän” muutoksen rajana, trendit olisivat olleet jonkin verran harvinaisempia ja niitä olisi esiintynyt lähinnä korkeampien saderajojen mukaan määriteltyjen pisimpien sadekertymäjaksojen aikasarjoissa ja koko vuoden poutapäivien ja sateettomien päivien aikasarjoissa.

Arvioihin tulevasta pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksien ja poutapäivien lukumäärien kehityksestä vaikuttavat oleellisesti tulevaisuuden sadetilastot tuottaneiden ilmastomallien ominaisuudet sekä päästöskenaarion valinta. Hydrologiset prosessit ovat hyvin monimutkaisia, joten niiden kaikkien yksityiskohtien mallintaminen on vaikeaa (Trenberth 1998; May ym. 2002). Myös esimerkiksi ilmakehän suurissa kiertoliikkeissä, kuten Pohjois-Atlantin oskillaatiossa tapahtuvien luonnollisten muutosten yhdistäminen ihmisen mahdollisesti aiheuttamiin ilmastossa tapahtuviin muutoksiin lisää mallinnuksen monimutkaisuutta.

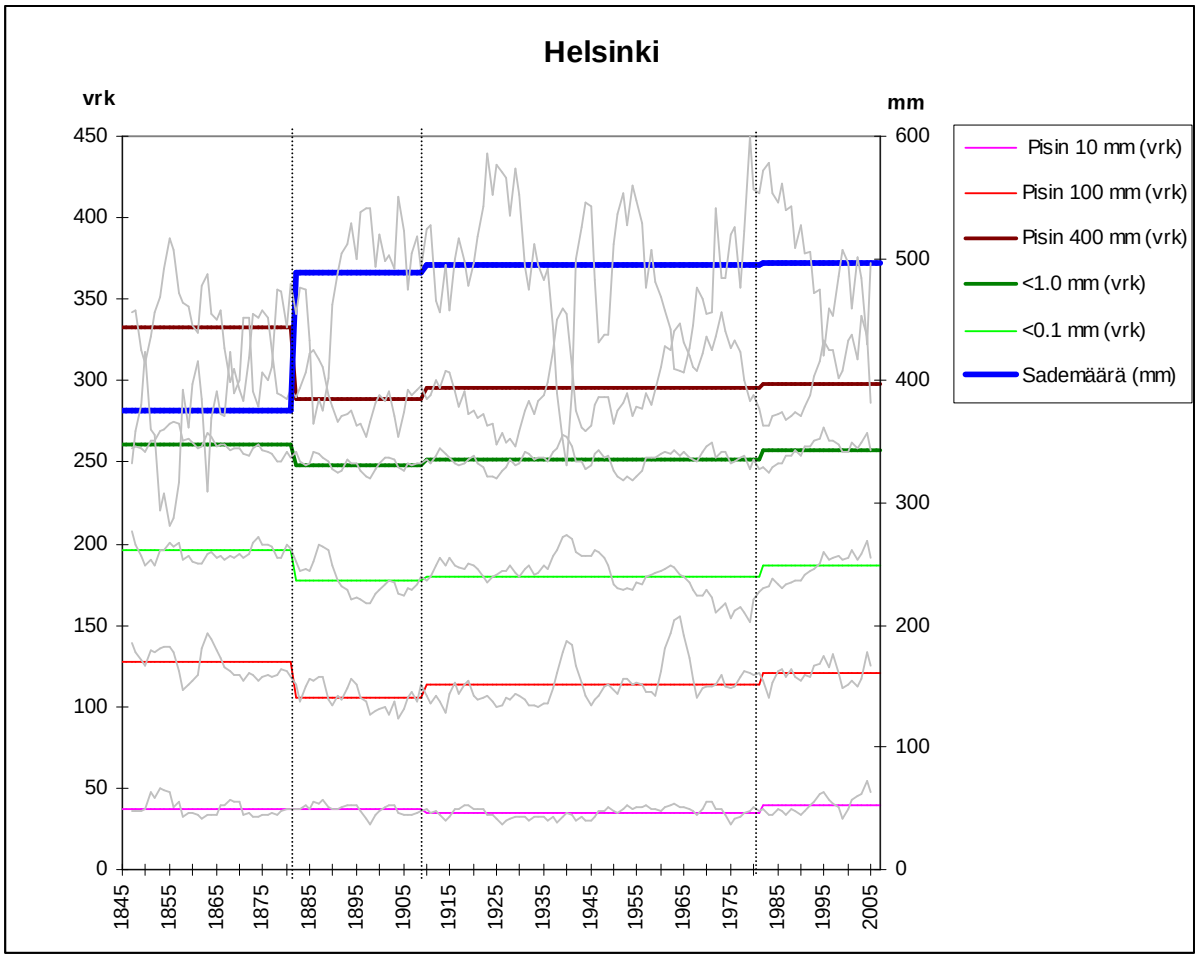
Tutkimuksessa käytettiin skenaariota A1B joka edustaa keskitietä päästökehityksessä kahden ääripään välillä (Nakicenovic & Swart 2000). Tulevaisuuden kehitys ei kuitenkaan välttämättä tule noudattamaan tätä kyseistä skenaariota. Pienempien päästöskenarioiden, kuten B1, mukaiset trendien suuruudet suhteessa luonnolliseen vaihteluun olisivat todennäköisesti olleet pienempiä ja siten myös vähemmän tilastollisesti merkitseviä (Sheffield & Wood 2008). Korkeampien skenaarioiden, kuten A2, kohdalla tilanne olisi ollut päinvastainen. Tosin eri ilmastomallien reaktiot suuriin päästöihin saattavat olla myös hyvin erilaisia, mikä lisää mallien välistä hajontaa.

5.2.2 Sadehavaintoaineistojen laatuun liittyvät virhelähteet

Todellisten sademäärien muutosten lisäksi tutkimuksessa käytettyjen alkuperäisten sadehavaintotilastojen laadulliset ominaisuudet saattavat vaikuttaa trendianalyysien tuloksiin. Trenditarkastelua vääristäviä laadullisia tekijöitä ovat 1) sadetilastojen sisältämät mittausvirheet ja sadekeräinten vaihtaminen ajoittain uusiin malleihin, 2) aikasarjojen sisältämät katkokset ja 3) sademittausten ilmoitustarkkuuden vaihtelu.

Erityisesti kiinteässä muodossa tulevan sateen keräämisen tehokkuus on parantunut uusiin sadekeräinmalleihin siirtymisen myötä, mikä aiheuttaa sadetilastoihin ajallista epäyhtenäisyyttä (Heino 1994). Tämä saattaa aiheuttaa tilastoihin näennäisiä sademäärien kasvavia trendejä (Houghton ym. 1990) ja hankaloittaa siten esimerkiksi arvioita ilmastonmuutoksen vaikutuksesta sademäärien muutoksiin (Groisman & Legates 1995). Sadekeräinten ajoittaiset vaihdokset uusiin, tarkempia mittaustuloksia antaviin malleihin saattavat osaltaan selittää joidenkin asemien aikasarjoissa esiintynyttä pisimpien sadekertymäjaksojen lyhenemistä ja poutapäivien määrän laskua havaintojaksojen aikana. Sadekeräinten vaihtamisen aiheuttamien muutosten täytyisi kuitenkin periaatteessa olla hyppäyksenomaisia ja sadekertymäjaksojen pituuksien ja poutapäivien lukumäärien kehityksen vastakkaista mitattujen sademäärien muutoksiin nähden. Tämä ei kuitenkaan käynyt aikasarjoista selkeästi ilmi. Esimerkiksi Helsingin mittausasemalla mittarin vaihdoksista mahdollisesti osittain johtuva sademäärien kasvu korreloi sadekertymäjaksojen lyhenemisen ja poutapäivien ja sateettomien päivien lukumäärien vähenemisen kanssa vain jaksojen 1845–1881 ja 1882–1908 välillä (kuva 22). Muilla jaksoilla pituudet ja lukumäärät ovat sen sijaan keskimäärin suurempia edeltäviin jaksoihin nähden. Kuvan 22 viiden vuoden liukuvaa keskiarvoa kuvaavista käyristä voidaan huomata, että mittarin vaihdoksista ei myöskään ole aiheutunut äkillisiä hyppäyksiä tasolta toiselle. Toisaalta muuttujien vaihtelu on niin suurta, että se saattaa jonkin verran peittää alleen tätä vaikutusta. Lisäksi on huomioitava, että sadekeräinten vaihdon ohella myös ympäristön muutokset, jotka aiheutuvat itse

mittausasemien siirtämisestä paikasta toiseen tai muutoksista paikallaan pysyviä asemia ympäröivissä olosuhteissa, saattavat myös vaikuttaa sademääriin (Heino 1994; Frich ym. 1997). Esimerkiksi ympäristön muuttuessa avoimemmaksi tuulivirheen osuuden sademittauksissa on havaittu kasvavan merkittävästi.



Kuva 22. Esimerkki sadekeräinten vaihdosten aiheuttamien muutosten vaikutuksesta Helsingin havaintoaseman aikasarjoihin. Sademäärien, pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksien sekä poutapäivien ja sateettomien päivien lukumäärien aikasarjoista on laskettu keskiarvoja niille aikaväleille, jolloin eri sadekeräintyypit ovat olleet käytössä (Heino 1994). Uusiin sadekeräintyyppeihin siirryttiin vuosina 1882, 1909 ja 1981/1982. Kyseiset ajankohdat on merkitty kuvaajaan pystysuorilla katkoviivoilla. Keskiarvokäyrien taustalla on esitetty kunkin aikasarjan viiden vuoden liukuvaa keskiarvoa kuvaavat arvokäyrät vaaleanharmaalla värillä. Kuivuusparametrien arvojen lasku vastaa sademittarin vaihdoksen aiheuttamaa mitattujen sademäärien arvon kasvua vain jaksojen 1845-1881 ja 1882-1908 välillä.

Sademittausten korjaustarve olisi luonnollisesti ollut suurin niillä alueilla, joilla suurin osa talvikuukausien sadannasta tulee kiinteässä muodossa (Heino 1994). Korjauskertoimet olisivat olleet myös suurempia vanhempien sademittausten kohdalla. Alkuperäisten sademittausten korjaaminen olisi mahdollisesti muuttanut tutkimuksessa tuotetuissa aikasarjoissa esiintyneitä trendejä jonkin verran. Jos yksittäiseen sadekertymäjaksoon kuuluvien päivien sademääriä olisi kasvatettu hieman, olisi jakson pituus todennäköisesti lyhentynyt ainakin sellaisissa tapauksissa, joissa jakson sadesumma olisi ollut muutoin jo lähellä tarkasteltavaa saderajaa. Tästä seuraa se, että erityisesti koko vuoden pisimpien sadekertymäjaksojen pituudet ovat olleet todellisuudessa mahdollisesti hieman lyhempiä erityisesti tarkastelujaksojen alkupäissä. Tämä muutos loiventaisi laskevia trendejä, mutta

voimistaisi kasvavia trendejä. Kesän pisimpien jaksojen osalta muutos olisi pienempi kuin koko vuoden jaksojen osalta. Jos koko vuoden sademääriä olisi kasvatettu hieman, olisivat myös alle 1,0 ja 0,1 mm sadepäivien lukumäärät havaittuja pienempiä. Muutoksen vaikutus trendeihin olisi samanlainen kuin sadekertymäjaksojen kohdalla. Yhteenvetona voidaan todeta, että tässä työssä esitetyt havaintoaineistoon perustuvat laskevat trendit eri aikasarjoissa ovat olleet todellisuudessa mahdollisesti loivempia ja osa jopa ei-merkitseviä, kun sen sijaan kasvavat trendit ovat mahdollisesti olleet voimakkaampia ja osa ei-merkitsevistä trendeistä on saattanut olla tilastollisesti merkitseviä ja positiivisia (kuva 23).

Toinen aineiston laatuun liittyvä trenditarkastelua mahdollisesti vääristävä tekijä oli tarkastelluissa aikasarjoissa esiintyneet katkokset. Trendianalyyseja varten useimmista tutkituista aikasarjoista täytyi poistaa korkeintaan muutaman vuoden pituisia yhtenäisiä jaksoja, joiden mukanaololla ei todennäköisesti olisi ollut suurta merkitystä trendien suunnan tai merkitsevyyden kannalta. Poikkeuksellisen pitkä katkos syntyi kuitenkin Kajaanin aikasarjoihin, joista täytyi poistaa huomattava kahdeksan vuoden jakso 1950-luvulta. Myös Vilnan aikasarjoista poistettiin vuodet 1911–1917. Näiden jaksojen mukanaolo olisi mahdollisesti saattanut vaikuttaa määritettyjen trendien tilastolliseen merkitsevyyteen (kuva 23), sillä joissakin sarjoissa puuttuvaa jaksoa edeltävän arvokäyrän osa oli eri tasolla kuin jaksoa seuraava osa, mikä sai aikaan lineaarisen laskevan tai nousevan trendin.

Kolmanneksi alkuperäisten sademäärien ilmoitustarkkuuden vaihteluilla havaintojaksojen aikana on teoriassa voinut olla vaikutusta pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksien trendeihin niissä aineistoissa, joissa yhden desimaalin tarkkuudella ilmoitettuja arvoja pyöristettiin lähimpään kokonaislukuun. Vaikutuksen suuruus riippuu todennäköisesti pyöristyksen pääsuunnasta. Jos jollakin jaksolla päivittäisten sadehavaintojen arvoissa on esiintynyt paljon lukua 5 pienempiä kymmenesosadesimaaleja, on kyseisen ajankohdan sadekertymäjakso todennäköisemmin pitempi tapauksessa, jossa havainnot on pyöristetty lähimpään kokonaislukuun, kuin tapauksessa, jossa sademäärät on ilmoitettu yhden desimaalin tarkkuudella. Jos sen sijaan luvun 5 kanssa yhtä suuria tai suurempia kymmenesosadesimaaleja on esiintynyt paljon, on tilanne päinvastainen. Käytännössä kymmenesosadesimaalien suuruus kuitenkin vaihtelee jo mittarinlukijan havainnointitarkkuudesta riippuen hyvin paljon, joten yleistysten tekeminen on mahdotonta ja jopa tarpeetonta, sillä suuressa otoksessa ilmoitustarkkuuden vaihtelu ei todennäköisesti vaikuta esimerkiksi trendien muodostumiseen. Voidaan esimerkiksi olettaa, että Karlstadin ja Östersundin havaintoasemien aikasarjojen yhden desimaalin tarkkuudella ilmoitetuissa aikasarjojen alkuosissa esiintyy suurin piirtein yhtä paljon sellaisia sadekertymäjaksoja, jotka olisivat yhden millimetrin tarkkuudella analysoituina pitempiä kuin nykyisessä tarkastelussa ja sellaisia jaksoja, jotka olisivat lyhyempiä kuin nykyisessä tarkastelussa. Samoin sarjojen yhden millimetrin tarkkuudella ilmoitetuissa loppuosissa esiintyy yhtä paljon jaksoja, jotka olisivat pitempiä, jos sademäärät olisi ilmoitettu yhden desimaalin tarkkuudella ja jaksoja jotka olisivat lyhempiä. Tätä oletusta tukee se, että eri tarkkuudella ilmoitetut jaksot Ruotsin ja Riian asemilla eivät erotu säännönmukaisesti aikasarjojen muista osista. Tarton koko sadeaineisto oli ilmoitettu yhden millimetrin tarkkuudella, mutta sen sadekertymäjaksojen pituudet eivät myöskään kokonaisuutena poikkea muiden asemien jaksojen pituuksista.

5.2.3 Yhteenveto meteorologisen kuivuuden esiintymisessä havaituista trendeistä

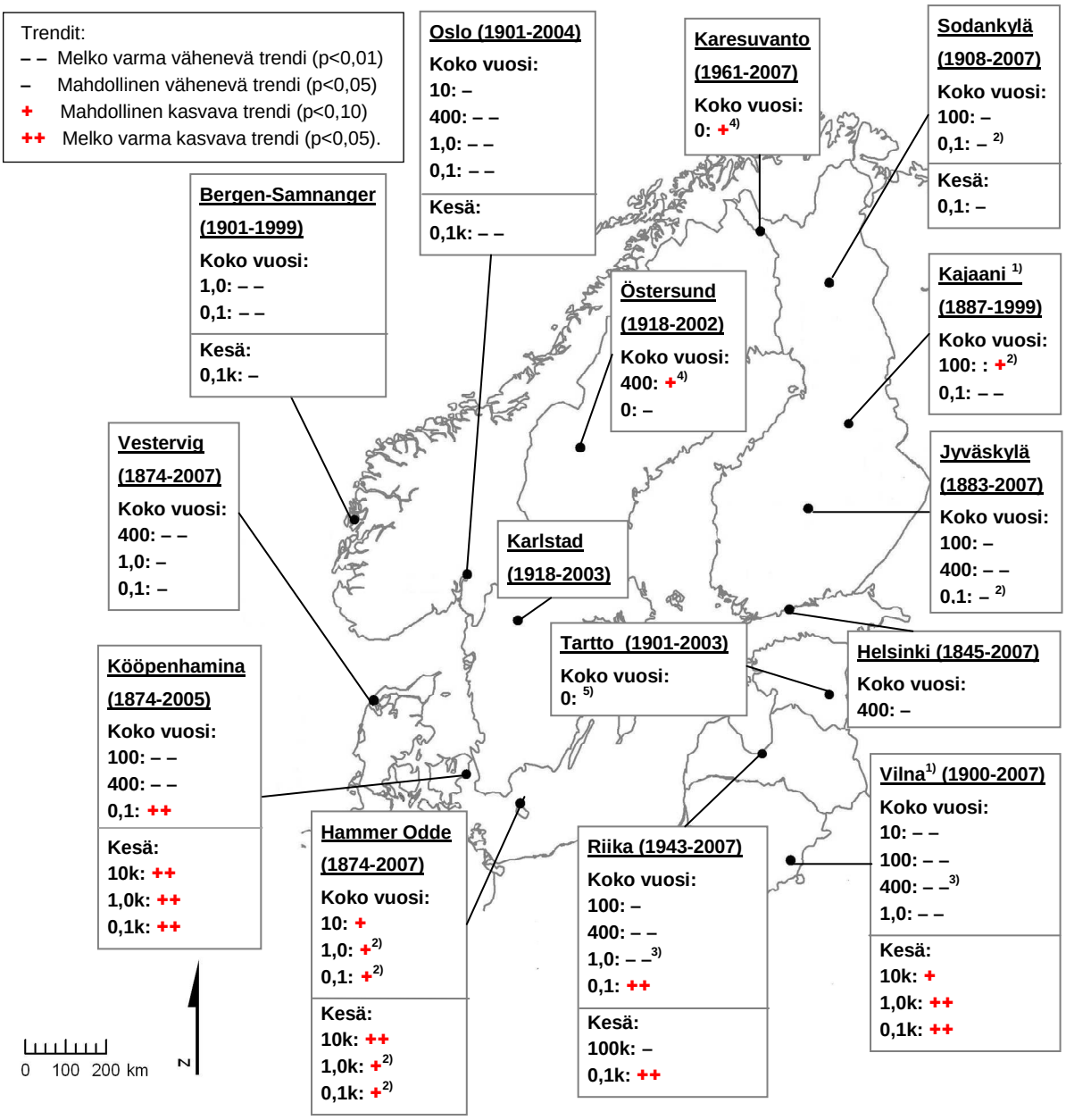
Huomioimalla kappaleissa 5.2.1 ja 5.2.2 mainitut pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksien ja poutapäivien tai sateettomien päivien lukumäärien trendianalyyseihin liittyvät epävarmuustekijät voidaan havaitut trendit jaotella ”melko varmoihin” ja ”mahdollisiin” (kuva 23). Tällä jaottelulla pyritään erottelemaan mahdollisesta ilmastonmuutoksesta johtuvat

lineaariset meteorologisen kuivuuden esiintymisessä tapahtuneet muutokset näennäisistä, esimerkiksi mittausvirheiden tai säännöllisen syklisyyden aiheuttamista trendeistä.

Sateen mittaustarkkuuden paranemisesta johtuen negatiiviset trendit olivat epävarmempia kuin positiiviset trendit, joten ”melko varmoiksi väheneviksi trendeiksi” luokiteltiin vain trendit, jotka merkitsevyystestien tulosten mukaan olivat väheneviä ja tilastollisesti erittäin merkitseviä ($p<0,01$). Näiden trendien kohdalla aikasarjojen muodot eivät myöskään antaneet aihetta olettaa, että trendit voisivat johtua ilmakehän kiertoliikkeisiin liittyvästä epäsäännöllisestä aaltomaisesta vaihtelusta. ”Mahdollisiksi väheneviksi trendeiksi” puolestaan luokiteltiin trendit, jotka tulosten mukaan olivat väheneviä ja vähintään tilastollisesti merkitseviä ($p<0,05$). Mahdollisiksi luokiteltiin myös ne erittäin merkitsevät trendit, joiden aikasarjojen muodot viittasivat siihen, että trendit saattoivat johtua aaltomaisesta vaihtelusta. ”Melko varmoiksi kasvaviksi trendeiksi” sen sijaan luokiteltiin trendit, jotka tulosten mukaan olivat kasvavia ja tilastollisesti vähintään merkitseviä ($p<0,05$). Aikasarjojen muodot eivät myöskään antaneet aihetta olettaa, että trendit voisivat johtua aaltomaisesta kehityksestä. ”Mahdollisiksi kasvaviksi trendeiksi” sen sijaan luokiteltiin trendit, jotka tulosten mukaan olivat kasvavia ja tilastollisesti vähintään melkein merkitseviä ($p<0,10$). Tähän luokkaan luettiin myös tilastollisesti merkitsevät kasvavat trendit, joiden voitiin aikasarjojen muotojen perusteella arvioida johtuvan mahdollisesti epäsäännöllisestä aaltomaisesta kehityksestä.

”Melko varmojen” ja ”mahdollisten” trendien suuntia tarkasteltaessa voidaan huomata suurimman osan menneistä muutoksista pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksissa ja poutapäivien lukumäärissä Pohjois-Euroopan alueella olleen väheneviä (kuva 23). Erityisesti koko vuoden aikasarjoissa kasvavia trendejä on esiintynyt vain satunnaisesti, mistä kuitenkin poikkeuksena on Hammer Odden asema, jonka koko vuoden kaikki mahdollisesti tilastollisesti merkitsevät trendit olivat positiivisia. Mutta kuten aiemmin jo todettiin, poutapäivien ja täysin sateettomien päivien trendit eivät Hammer Oddessa ole olleet lineaarisia koko aikasarjassa ja niiden loppuosassa trendit ovat olleet laskevia.

Kesän aikasarjoissa tilastollisesti merkitseviä kasvavia trendejä esiintyi suhteessa runsaammin kuin laskevia. Nämä kasvavat trendit sijoittuvat pääasiassa Pohjois-Euroopan eteläosien asemille. Pohjoisosissa enemmistö trendeistä on ollut tilastollisesti ei-merkitseviä tai väheneviä.



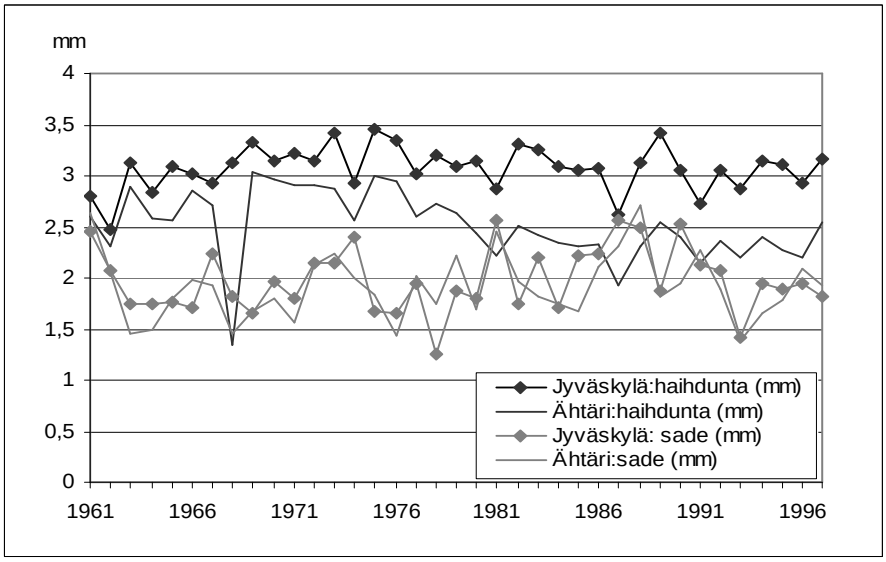
Kuva 23. Yhteenveto sadehavaintoihin perustuvissa aikasarjoissa esiintyvistä ”melko varmoista” ja ”mahdollisista” lineaarisista trendeistä. Trendien esiintymisen arvioinnissa on huomioitu sadekeräinten vaihdosten aiheuttamien virheiden korjauksen, mahdollisen ilmakehän kiertoliikkeiden epäsäännöllisen aaltomaisen vaihtelun ja aikasarjojen sisältämien katkosten vaikutukset trendien ilmenemiseen. Kuvan trendianalyysit: 10 = pisimmät 10 mm sadekertymäjaksot, 100 = pisimmät 100 mm sadekertymäjaksot, 400 = pisimmät 400 mm sadekertymäjaksot, 1,0 = <1,0 mm sadepäivien lukumäärä, 0,1 = <0,1 mm sadepäivien lukumäärä, 0 = 0 mm sadepäivien lukumäärä.

1) Katkokset aikasarjoissa saattavat vääristää trenditarkasteluja.
2) Trendi mahdollisesti epäsäännöllisen aaltomaisen kehityksen aiheuttama.
3) Trendi on tilastollisesti erittäin merkitsevä (p<0,01) vain t-testin mukaan, mutta koska muuttujan arvot ovat lähes normaalisti jakautuneet, on testin tulos todennäköisemmin oikea kuin Mann-Kendallin testin ja trendin voidaan katsoa olevan tilastollisesti erittäin merkitsevä
4) Trendi on tilastollisesti melkein merkitsevä (p<0,10) vain t-testin mukaan, mutta koska muuttujan arvot ovat lähes normaalisti jakautuneet, on testin tulos todennäköisemmin oikea kuin Mann-Kendallin testin ja trendin voidaan katsoa olevan tilastollisesti melkein merkitsevä
5) Trendi on tilastollisesti melkein merkitsevä (p<0,10) vain Mann-Kendallin testin mukaan, mutta koska muuttujan arvot ovat lähes normaalisti jakautuneet, on t-testin tulos todennäköisemmin oikea kuin Mann-Kendallin testin ja trendin ei voida katsoa olevan tilastollisesti melkein merkitsevä.
(ks. lisäksi taulukoiden 8 ja 10 alaviitteet)

5.3 Maankosteuteen liittyvän kuivuuden esiintyminen Suomessa

Maankosteusindeksin perusteella määriteltyjen kuivuusjaksojen lukumäärien ja keston sekä ”kuivuuspäivien” lukumäärien alueellisen jakauman perusteella kuivuusolosuhteiden esiintyminen on yleisintä Lounais-Suomessa ja harvinaisinta Pohjois-Suomessa (kuvat 9-17). Lounais-Suomen rannikkoalueiden kuivuuden voidaan katsoa suurimmaksi osaksi johtuvan yksinkertaisesti sademääriä suuremmasta haihdunnasta (Solantie 1987). Pohjois-Suomessa tilanne on päinvastainen eli siellä sademäärät ovat suurempia kuin haihdunta. Pohjoisessa myös lumet sulavat myöhemmin, minkä vuoksi kuivuuspäiviä ja sadekertymäjaksoja ei ehdi esiintyä yhtä paljon kuin etelässä. Lounais-Suomen kuivuutta on selitetty myös konvektiosateiden vähäisyydellä erityisesti kesän alussa, jolloin maata ympäröivien merialueiden pintavedet ovat vielä viileitä (Larjavaara ym. 2004).

Maankosteusindeksin mukaan määritellyn kuivuuden muutoin melko tasaisesta vyöhykkeittäisestä vähenemisestä lounaasta koilliseen poikkeuksen muodosti Ähtärin säähavaintoasema, jonka kuivuusjaksojen lukumäärän, pisimmän kuivuusjakson pituuden ja ”kuivuuspäivien” lukumäärän pitkänajan keskiarvot olivat muuta Keski-Suomea alhaisemmat. Ähtärin sademäärät eivät kuitenkaan poikkea huomattavasti esimerkiksi Jyväskylän sademääristä, mutta potentiaalinen haihdunta on Ähtärissä keskimäärin vähäisempää kuin Jyväskylässä (kuva 24). Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että Ähtäri sijaitsee Suomenselän vedenjakajaalueella, missä lämpötilat ovat useina kesäkuukausina ympäröiviä alueita hieman alhaisemmat (Helminen 1987).



Kuva 23. Ähtärin ja Jyväskylän huhti-syyskuun sademäärän ja haihdunnan keskiarvot 1961-1997. Ähtärin haihdunta on koko tarkastelujaksolla alhaisempi kuin Jyväskylässä, mikä saattaa selittää Ähtärin poikkeuksellisen kosteita olosuhteita muuhun Keski-Suomeen verrattuna. Sademäärissä ei sen sijaan esiinny säännönmukaista eroa.

Poikkeuksellisen kuivan vuoden 2006 maankosteusindeksin arvot ja siten myös kuivuusjaksojen lukumäärät, pisimmän kuivuusjakson pituudet ja ”kuivuuspäivien” lukumäärät eivät ole suoraan verrannollisia vuosien 1966-1995 keskiarvojen kanssa. Vuoden 2006 esimerkki kuitenkin osoittaa, että yksittäisenä vuotena tai kuukautena kuivuuden alueellinen esiintyminen saattaa poiketa suhteellisesti pitkänajan keskiarvojen alueellisesta jakaumasta. Erityisesti Etelä- ja Keski-Suomessa maankosteuden alueellinen vaihtelu on

hyvin laikuttaista. Kesän paikallisten kuurosateiden on erityisesti todettu lyhentävän maankosteusarvojen spatiaalista korrelaatioetäisyyttä (Heikinheimo & Venäläinen).

Tutkimuksessa ei tarkasteltu ajallisia trendejä maankosteusindeksiin liittyen, mutta esimerkiksi Larjavaaran ym. (2004) tutkimuksessa, jossa tarkasteltiin maankosteusindeksin mukaan määritellyn maankosteuden vaikutusta metsäpalojen syttymisherkkyyteen, ei syttymisherkkyydessä havaittu ajallisia trendejä vuosina 1961-1997. Mahdollisten ilmastonmuutoksen aiheuttamien pitkäaikaisten trendien erottamiseksi tarkasteltavan ajanjakson täytyisi olla joka tapauksessa pitempi.

5.4 Tutkimuksessa käytettyjen menetelmien soveltuvuus kuivuusanalyysiin

5.4.1 Pisimmät sadekertymäjaksot ja poutapäivien lukumäärät

Eri saderajojen mukaan määriteltyjen sadekertymäjaksojen pituuksien sekä poutapäivien lukumäärien maksimiarvot voivat antaa jonkinlaisia viitteitä siitä, mitä meteorologisella kuivuudella tarkoitetaan Pohjois-Euroopan ilmasto-olosuhteissa. Jos kyseisiä ääriarvoja ei kuitenkaan millään tavoin kytketä maanpinnalla havaittaviin kuivuusvaikutuksiin, jää näiden tilastoarvojen merkitys käytännön kuivuusanalyysin kannalta vähäiseksi. Pitkittyneet normaalitasoa alhaisemmat sademäärät ovat kaikkien muiden kuivuustyyppien taustatekijä, mutta ilman syy-seuraus-suhteiden tarkastelua on mahdotonta määritellä esimerkiksi kuinka paljon poutapäiviä kesäkaudella saa esiintyä ennen kuin kesää voidaan varsinaisesti kutsua ”kuivaksi”. Eri ekosysteemien ja yhteiskunnan toimijoiden erilainen vedentarve kuitenkin luonnollisesti vaikeuttaa tätä tehtävää. Lähimmäs pisimpien sadekertymäjaksojen ”normaalin” pituuden ja poutapäivien ”normaalin” lukumäärän määritelmää päästiin tässä tutkimuksessa määrittelemällä asemakohtaiset mediaanit (kuvat 6 ja 8). Näiden mediaanien voidaan katsoa olevan ainakin jonkinlainen ilmastotilastollinen kuivuusraja, joka todennäköisesti on hyvin erilainen jollakin toisella ilmastovyöhykkeellä. Mediaaniarvojen ympärille jää kuitenkin hämärä vyöhyke, jolla kunakin ajankohtana vallitsevat muut tekijät, erityisesti lämpötilat ja niistä juontuva potentiaalisen haihdunnan suuruus sekä eri toimijoiden vedenkäyttötarve, määräävät todellisen kuivuusvaikutusten ilmenemisrajan.

Sadekertymäjaksojen ja poutapäivien lukumäärien analyysit antoivat myös keskenään hieman ristiriitaisia tuloksia sadehavaintoihin perustuvissa tilastoissa tapahtuneiden muutosten suhteen. Poutapäivien lukumäärissä on tapahtunut selkeästi enemmän tilastollisesti merkitseviä muutoksia eri mittausasemien havaintojaksoilla kuin pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksissa. Esimerkiksi Bergen-Samnangerissa pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksissa ei ole esiintynyt tilastollisesti merkitseviä muutoksia, mutta sen sijaan alle 1,0 ja 0,1 mm sadepäivien lukumäärät ovat vähentyneet kaikissa muissa paitsi alle 1,0 mm sadepäivien kesän aikasarjassa. Hammer Oddessa puolestaan poutapäivien ja sateettomien päivien lukumäärät ovat kasvaneet sekä koko vuoden että kesän aikasarjoissa, mutta sadekertymäjaksot vain 10 mm jaksojen osalta.

Voisi olettaa, että poutapäivien tai täysin sateettomien päivien lukumäärien vähentyessä pisimpien sadekertymäjaksojen pituudet lyhenevät ja toisin päin. Erityisen voimakkaasti tämän yhteyden voisi olettaa pätevän 400 mm sadekertymäjaksojen ja koko vuoden alle 1,0 / 0 mm sadepäivien osalta. Tulokset tukevat tätä oletusta kuitenkin vain osittain. Pisimpien 400 mm sadekertymäjaksojen pituudessa ja koko vuoden alle 1,0 / 0 mm sadepäivien lukumäärissä ei ole esiintynyt tilastollisesti merkitsevää muutosta Kajaanissa, Karlstadissa, Sodankylässä ja Tartossa (mahdollisesti myös Hammer Oddessa, Helsingissä,

Karesuvannossa ja Östersundissa) (kuva 23). Oslon ja Riian (mahdollisesti myös Vestervigin ja Vilnan) molemmissa aikasarjoissa trendi on ollut sen sijaan laskeva. Östersundissa kehitys on kuitenkin voinut olla näiden muuttujien osalta täysin päinvastaista. Lisäksi Bergen-Samnangerissa, Jyväskylässä ja Kööpenhaminassa (mahdollisesti myös Hammer Oddessa, Helsingissä, Karesuvannossa, Vestervigissä, Vilnassa ja Östersundissa) trendi on ollut tilastollisesti ei-merkitsevä toisessa aikasarjassa.

Yhteyden voisi olettaa mahdollisesti esiintyvän myös kesän pisimpien 100 mm sadekertymäjaksojen ja kesän alle 1,0 / 0 mm sadepäivien aikasarjojen välillä. Enemmistöllä asemista kummassakaan näistä aikasarjoista ei esiintynyt tilastollisesti merkitseviä trendejä (kuva 23). Kesän pisimpien 100 mm sadekertymäjaksojen aikasarjoissa esiintyi mahdollisesti vain yksi laskeva trendi Riian havaintoasemalla, joka ei kuitenkaan vastannut kesän alle 1,0 mm sadepäivien aikasarjassa tapahtuneita muutoksia. Joidenkin muiden asemien kesän alle 1,0 mm sadepäivien aikasarjoissa esiintyi kasvavia trendejä, mutta pisimmät 100 mm sadekertymäjaksot eivät osoittaneet kasvavaa suuntaa kyseisillä asemilla.

Pisimpien 10 mm sadekertymäjaksojen pituudessa tapahtuneet muutokset puolestaan vastasivat melko hyvin alle 1,0 mm sadepäivien lukumäärien muutoksia, mutta jonkin verran huonommin alle 0,1 mm päivien lukumäärien muutoksia (kuva 23). On kuitenkin mahdollista, että poutapäivien lukumäärien muutokset ovat olleet erisuuntaisia eri vuodenaikoina samoin kuin sademäärien muutokset. Trendien ollessa vähenevi pisimpien sadekertymäjaksojen esiintyminen on mahdollisesti siirtynyt vuodenajasta toiseen ja samalla niiden pituus on lyhentynyt, pidentynyt tai pysynyt muuttumattomana.

5.4.2 Maankosteusindeksi kuivuuden mittarina

Maankosteusindeksin mukaan määritellyn kuivuuden tarkasteluun liittyy joitakin huomioon otettavia seikkoja. Ensinnäkin kuivuusjaksojen lukumäärien, pisimmän kuivuusjakson pituuden ja ”kuivuuspäivien” lukumäärän keskiarvotarkasteluja saattavat vääristää jotkin poikkeavat arvot. Keskiarvotarkastelun sijaan oltaisiinkin voitu käyttää esimerkiksi mediaaneja.

Toiseksi kuivuusjaksojen lukumäärä ei sinänsä kerro kovin paljon kesän kuivuudesta, sillä esimerkiksi Raumalla kesällä 1971 esiintyi vain yksi erittäin pitkä kuivuusjakso. Toisaalta joissakin tapauksissa on metsäpalokaudella saattanut esiintyä useita vain yksi tai kaksi päivää kestäviä kuivuusjaksoja, joiden aikana tuskin oltaisiin annettu edes metsäpalovaroitusta (Heikinheimo & Venäläinen). Lisäksi joissakin aineistoissa esiintyi tapauksia, joissa kahden tai useamman peräkkäisen kuivuusjakson välissä oli vain muutama päivä, jolloin metsäpaloindeksin arvo oli pienempi kuin 4,0. Tälläisiä välipäiviä aiheutuu yleensä lämpimien jaksojen aikana paikallisista konvektiosateista (Larjavaara ym. 2004), mutta todennäköisesti näillä päivillä ei ole kovin suurta merkitystä kosteusolosuhteiden parantumisen kannalta. Muutaman välipäivän erottamat kuivuusjaksot olisikin ollut periaatteessa mahdollista lukea samaksi kuivuusjaksoksi. Tämän tutkimuksen puitteissa kosteusolosuhteiden kannalta merkityksellisen välipäivien lukumäärän tutkiminen ei kuitenkaan ollut mahdollista, joten jotta vältyttiin määrittelyyn liittyviltä ongelmilta, päädyttiin katkeamattomia kuivuusjaksoja tarkastelemaan erillisinä.

Kolmanneksi maankosteusindeksiä on kritisoitu siitä, että alimman mahdollisen maankosteuden raja on laskentamallissa määritetty liian korkeaksi, minkä vuoksi se arvioi systemaattisesti maankosteuden arvot todellista suuremmiksi (Larjavaara ym. 2004). Tämän vuoksi on mahdollista, että tässäkin tutkimuksessa arvioidut kuivuusjaksojen pituudet ovat todellisuudessa hieman pitempiä ja ”kuivuuspäivien” lukumäärät hieman suurempia.

Neljänneksi maankosteusindeksin kyky mitata yhteiskunnalliselta kannalta tarkasteltuna ”merkittävää” kuivuutta on kyseenalainen. Maankosteuteen liittyvä kuivuus ei varsinaisesti kuulu mihinkään johdantokappaleessa mainituista neljästä kuivuustyypistä. Alkukesästä, jolloin pintamaakerroksen kosteus on kasvien kasvun kannalta merkittävä tekijä, voidaan maankosteuteen liittyvällä kuivuudella mahdollisesti katsoa oleva jonkinlaisia yhteyksiä maataloudelliseen kuivuuteen ja sitä kautta sillä voi olla myös sosioekonomisia vaikutuksia. Pintamaan kosteuden vaihtelu on kuitenkin melko suoraan riippuvainen meteorologisista tekijöistä ja sen vuoksi se reagoi meteorologiseen kuivuuteen suhteellisen nopeasti. Vesivajeen muodostuminen syvempiin maaperän kerroksiin vie kuitenkin huomattavasti enemmän aikaa, joten maankosteusindeksin mukaisen kuivuuden esiintymisellä ei välttämättä ole kovin suurta merkitystä esimerkiksi hydrologisen kuivuuden ilmenemisen kannalta. Näin ollen maatalouden tarpeisiin saattaa olla hyvinkin tarjolla riittävästi kasteluvettä, jolloin maataloudellista kuivuutta ei ilmene. Sosioekonomisia ja ekologisia seurauksia on kuitenkin karikekerroksen kuivuuden osaltaan aiheuttamilla maasto- ja metsäpaloilla, joiden esiintymisriskin arviointia varten maankosteusindeksi alun perin kehitettiinkin (Heikinheimo ym. 1996). Larjavaara ym. (2004) ovat kuitenkin todenneet, että 30 mm paksuisen pintamaakerroksen kosteus selittää paremmin palojen syttymistodennäköisyyttä kuin tässä työssä tarkasteltu 60 mm paksuisen kerroksen kosteus. Näin ollen maankosteuteen liittyviä tutkimustuloksia ei suoraan voida yhdistää metsäpalojen syttymisherkkyyden alueelliseen ja ajalliseen vaihteluun. Mikäli kuivuusjakson ankaruus määritellään sen mukaan kuinka useaa yhteiskunnallista sektoria ja ekosysteemin osaa kuivuus koskettaa, ei maankosteuden mukaisen kuivuuden esiintyminen ole vielä välttämättä merkki kovin vakavasta kuivuudesta. Esimerkiksi pitkittyneitten, laajoja sosioekonomisia vaikutuksia aiheuttavien, voimakkaiden kuivuusjaksojen esiintymistä olisi mahdollisesti syytä arvioida hydrologisten aineistojen tai sosioekonomisten indeksien (esim. Martin-Carrasco & Garrote 2007) avulla.

5.4.3 Meteorologisen kuivuuden vaikutukset maankosteuteen

Tutkimuksessa tarkastellut 10 mm sadekertymäjaksot osuivat ajallisen mittakaavansa suhteen hyvin yksiin maankosteusindeksin mukaisten kuivuusjaksojen kanssa, minkä vuoksi niiden välisen kytköksen tutkiminen oli mielekästä. Suurimmassa osassa tutkituista tapauksista yhden alle 10 mm sadekertymäjakson aikana esiintyi yksi jonkin verran lyhyempi maankosteusindeksin mukainen kuivuusjakso. Molemmat jaksot useimmiten myös loppuivat samana päivänä tilanteessa, jossa jokin suurehko sademäärä sai samalla sekä 10 mm saderajan ylittymään, että nosti maankosteuden kuivuusrajan yläpuolelle. Vain kahdessa Helsinki-Vantaalla esiintyneessä tapauksessa maankosteusindeksin mukaisen kuivuusjakson aikana satoi yhtenä päivänä yli 10 mm ilman, että maankosteus olisi noussut kuivuusrajan yläpuolelle. Näissä tapauksissa 0 päivän pituisen sadekertymäjakson voitiin katsoa aiheuttaneen yhden ”kuivuuspäivän”. Tämä oli kuitenkin mahdollista vain tilanteessa, jossa edellisen päivän maankosteus oli jo ollut hyvin alhainen (0,10 ja 0,14 m^3/m^3). Aineistossa esiintyi kuitenkin myös runsaasti tapauksia, joissa useammat sadekertymäjaksot ajoittuivat limittäin päällekkäin saman kuivuusjakson kanssa. Näissä tapauksissa alle 10 mm sadekertymä syntyi pienistä useampana päivänä esiintyneistä sademääristä.

Sadekertymäjaksojen pituuden ja niiden aikana esiintyvien ”kuivuuspäivien” lukumäärän välinen positiivinen, tilastollisesti merkitsevä korrelaatio vastasi pääasiassa hyvin menetelmän kuvailuosiossa tehtyjä oletuksia (ks. luku 3.4). Pienimmissä aineistoissa luontainen hajonta saattoi kuitenkin haitata korrelaatioiden esiintymistä jonkin verran. Poikkeuksena suurten aineistojen hyvistä asemakohtaisista korrelaatioista oli Sodankylän yhdistelmäluokan 3.6 aineisto, jossa oli 24 tapausta, mutta korrelaatio ei ollut lainkaan tilastollisesti merkitsevä (liite 26). Tämä johtui ilmeisesti kahdesta vuoden 1978 alussa esiintyneestä 54 ja 58 päivän

pituisesta sadekertymäjaksosta, jotka olivat yhteydessä vain yhden ja neljän ”kuivuuspäivän” syntyyn. Ilman näitä jaksoja Pearsonin korrelaatiokerroin saa arvon 0,827 ja korrelaatio on tilastollisesti merkitsevä merkitsevyystasolla 0,01. Yhdistetyn aineiston korrelaatiokertoimen arvokin nousee hieman, kun kyseiset tapaukset poistetaan korrelaatiosta. Pearsonin korrelaatiokerroin saa tällöin arvon 0,788, joka on myös tilastollisesti merkitsevä merkitsevyystasolla 0,01. Kyseisen epäsuhdan sadekertymäjaksojen pituuden ja kuivuuspäivien lukumäärien välillä mahdollisti kyseisenä vuonna huhti-toukokuussa esiintynyt 43 päivän pituinen sateeton jakso sekä pitkään ylläpysynyt maankosteuden maksimiarvo (23.5.asti), mikä viittaa myöhäiseen lumien sulamiseen.

Eri yhdistelmäluokkien sisältämien tapausten vähäinen määrä saattoi vaikuttaa myös keskimääräiseen ”kuivuuspäivien” osuuteen sadekertymäjakson pituudesta. Tämä on mahdollista ainakin yhdistelmäluokan 5.2 kohdalla, koska se sisälsi vain viisi tapausta (kuva 18, taulukko 12). Tapausten vähäinen määrä ei kuitenkaan selitä luokan 3.5 poikkeavuutta samassa analyysissä, eikä myöskään luokkien 2.5, 2.6 ja 3.6 poikkeavuutta sadekertymäjakson minimipituuden analyysissa (kuva 20). Jälkimmäisistä erityisesti luokille 2.6 ja 3.6 on sen sijaan tunnusomaista pistejoukon läpi piirretyn korrelaatiosuoran kulmakertoimen poikkeuksellinen mataluus (kuva 18). Näissä alhaisemmissa haihduntaluokissa esiintyy paljon edellä mainitun Sodankylän vuoden 1978 kaltaisia tapauksia, joissa alkukesällä myöhäisen lumen sulamisen jälkeen esiintyneet maankosteusindeksin mukaiset kuivuusjaksot osuvat osittain päällekkäin pitkähkön vähäsateisen jakson kanssa. Koska sademäärä ja haihdunta eivät vaikuta lumipeitteisen maan pintakerroksen kosteuteen, olisi analyysistä teoriassa täytynyt jättää pois sellaiset sadekertymäjaksot, jotka ovat alkaneet ennen lumen sulamista. Lumen sulamishetkeä ei kuitenkaan voida suoraan arvioida maankosteustilastoista, sillä maankosteus saattaa pysyä arvossa 0,5 m^3/m^3 vielä jonkin aikaa lumen sulamisen jälkeenkin. Näin ollen voidaan vain todeta, että kyseisten yhdistelmäluokkien tuloksiin on syytä suhtautua suuremmalla varauksella kuin muiden luokkien. Korkeiden haihduntaluokkien (4, 5 ja 6) ja korkeimman maankosteusluokan (6) yhdistelmissä korrelaatiot ja arviot ovat jonkin verran luotettavampia, koska niiden tapaukset eivät sijoitu yhtä usein lumipeiteaikaan ja niissä esiintyy vähemmän 0,5 m^3/m^3 maankosteusarvoja.

Sadekertymäjaksojen pituuden ja niiden aikana esiintyvien ”kuivuuspäivien” lukumäärän yhteyden analysointiin käytetty menetelmä sisälsi muutamia muitakin epävarmuustekijöitä. Ensinnäkin vaikka analyysissä pyrittiin tarkastelemaan jaksoja, joiden aikainen sadekertymä oli noin 10 mm, saattoi sadekertymä käytännössä tarkoittaa mitä tahansa arvoa välillä 0-9,9 mm. Periaatteessa haihdunnan keskiarvoon ja edeltävään maankosteuteen perustuvat yhdistelmäluokat olisi täytynyt vielä luokitella todellisen sadekertymän mukaan. Toisaalta sadannan jakautuminen sadekertymäjakson aikana vaihtelee jo sinänsä paljon ja vaikuttaa kuivuuspäivien ajoittumiseen sadekertymäjaksolla, mikä saattaisi kumota luokituksen vaikutuksen. Esimerkiksi yhdistetyn aineiston luokassa 4.6 esiintyi kaksi 12 päivän pituista sadekertymäjaksoa, joiden molempien aikana esiintyi kolme kuivuuspäivää. Näistä toisen sadekertymä oli 6,3 mm, kun taas toisen vain 0,8 mm.

Toisaalta myös potentiaalinen haihdunta saattaa vaihdella sadekertymäjakson aikana merkittävästi. Haihdunnan kasvu osuu esimerkiksi joissakin tapauksissa yksiin maankosteusindeksin mukaisen kuivuusjakson alkamisajankohdan kanssa. Haihdunnan keskiarvon laskeminen maankosteusindeksin mukaisten kuivuuspäivien ajalta, sadekertymäjakson sijaan, saattaisi muuttaa tuloksia.

Kolmanneksi, jotta tuotetuista arvioista tietyn pituisten sadekertymäjaksojen aiheuttamista maankosteusindeksin mukaisten kuivuuspäivien lukumääristä olisi jotakin käytännön hyötyä

tulevaisuudessa, olisi voitava ennustaa kuinka monta päivää kuluu 10 mm saderajan saavuttamiseen ja mikä on kyseisen ajanjakson haihdunnan keskiarvo. Maankosteusindeksin arvoja voidaan toki ennustaa sademäärä- ja haihduntaennusteiden avulla käyttämällä kuivumis- ja kostumiskäyriä (Heikinheimo & Venäläinen), joten periaatteessa tässä tutkimuksessa käytetyn 10 mm sadekertymäjakson ja kuivuusjaksojen välisen yhteyden käyttäminen vallitsevan kuivuuden keston ennustamistarkoituksissa on tarpeetonta.

Maankosteusindeksin käyttö ”todellisen kuivuuden” mittarina on myös kyseenalaista, sillä kyseessä on lopulta vain teoreettinen laskelma. Todenmukaisempaa olisi kenties ollut verrata 10 mm sadekertymäjaksojen pituuksia samassa pisteessä empiirisesti mitattuihin maankosteusarvoihin. Maankosteuden vaihtelu kertoo lisäksi meteorologisen kuivuuden vaikutuksista vain pintamaan kosteuden kannalta. Tulosten perusteella ei voidakaan suoraan vetää johtopäätöksiä muiden kuivuusvaikutusten samanaikaisesta ilmenemisestä.

Muiden tässä tutkimuksessa käytettyjen kuivuuden operationaalisten määritelmien kytkeminen kuivuuden vaikutuksiin ja todellisten kuivuusrajojen määritteleminen erilaisille sadannan tilastoarvoille ei myöskään ollut maankosteusindeksiaineiston avulla mahdollista. Samoin kuin 10 mm sadekertymäjaksojen kohdalla, voidaan tietysti olettaa, että mitä pitempiä metsäpalokauden aikaiset 100 ja 400 mm:n sadekertymäjaksot ovat, sitä enemmän niiden aikana esiintyy ”kuivuuspäiviä”. Esimerkiksi haihdunnan vaihtelu on kuitenkin pitkillä aikaväleillä suurta ja sadekertymäjaksoa edeltävän maankosteuden vaikutus ei ulotu kovin pitkälle jakson alusta, joten vastaavan luokkajaon käyttäminen ei olisi näissä tapauksissa ollut mielekästä. Lisäksi useat kuivuuspäivien kanssa päällekkäin menevät 100 ja 400 mm sadekertymäjaksot alkavat jo ennen lumien sulamista, mikä vääristäisi analyysejä. Kesäkausittaisten poutapäivien ja täysin sateettomien päivien lukumäärien ja ”kuivuuspäivien” lukumäärien välillä todennäköisesti vallitsee positiivinen korrelaatio, mutta jotta tämä vertailu olisi mielekäs, täytyisi ensin pystyä määrittelemään sellainen raja-arvo ”kuivuuspäivien” lukumäärille, jolloin metsäpalokautta voitaisiin kutsua ”kuivaksi” ja tutkia tämän jälkeen millainen poutapäivien tai sateettomien päivien lukumäärä vastaa kyseistä poutapäivien määrää. On lisäksi vaikeata määritellä, missä olosuhteissa yksittäinen poutapäivä tai sateeton päivä on yhtä kuin varsinainen ”kuivuuspäivä” eli kuinka sadannan, haihdunnan ja edeltävän maankosteuden välinen suhde kytkeytyy maankosteuden kuivuusrajan alittumiseen yksittäisen päivän osalta.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Sadehavaintotilastoista analysoitujen pisimpien sadekertymäjaksojen pituuksien alueellisen vaihtelun perusteella meteorologisten kuivuusjaksojen voidaan arvioida olevan jonkin verran pitempiä Pohjois-Euroopan itä- ja pohjoisosissa kuin länsi- ja eteläosissa. Poutapäivien lukumäärien alueellinen vaihtelu ei kuitenkaan täysin vastaa pisimpien sadekertymäjaksojen pituuden alueellista vaihtelua. Aikasarja-analyysin perusteella meteorologisen kuivuuden esiintymisen voidaan lisäksi todeta todennäköisemmin pysyneen samana tai vähentyneen Pohjois-Euroopassa kuin lisääntyneen vuositasolla. Sen sijaan kesällä Pohjois-Euroopan eteläosissa, Tanskan ja Liettuan alueella, pisimpien alle 10 mm sadekertymäjaksojen pituudet ovat kuitenkin mahdollisesti hieman pidentyneet ja poutapäivien ja sateettomien päivien lukumäärät kasvaneet. Suurimmassa osassa eri asemien aikasarjoista muutokset eivät kuitenkaan ole olleet tilastollisesti merkitseviä.

Meteorologisen kuivuuden esiintymisessä havaitut muutokset johtuvat ainakin osittain todellisista sademäärissä tapahtuneista muutoksista, jotka johtuvat mahdollisesti ilmastonmuutoksesta, ilmakehän kiertoliikkeiden epäsäännöllisestä vaihtelusta tai näiden yhdistelmästä. Ajallisten trendien ilmenemiseen vaikuttavat kuitenkin mahdollisesti myös alkuperäisten sadehavaintoaineistojen laatuun liittyvät tekijät. Näistä merkittävimpiä ovat sademittausten sisältämät virheet, sateen mittauskäytäntöjen alueelliset erot ja niissä tapahtuneet muutokset sekä aikasarjoissa esiintyvät katkokset. Tämän vuoksi on tutkimuksen tuloksissa esitettyjen sadekertymäjaksojen pituuksien ja poutapäivien lukumäärien absoluuttisiin arvoihin suhtauduttava kriittisesti. Vaikka aineistojen laatuun liittyvät virheet saataisiinkin eliminoitua, on mahdollisesti ilmastonmuutokseen liittyvien kehitystrendien erottaminen aikasarjoista kuitenkin vaikeaa pisimpien sadekertymäjaksojen pituuden ja poutapäivien lukumäärien vuodesta toiseen tapahtuvan suuren vaihtelun vuoksi. Joissakin tapauksissa vain muuttujan toisen ääripään arvojen muuttuminen saattaa aiheuttaa aikasarjaan kasvavan tai laskevan trendin. Lisäksi esimerkiksi eri vuodenaikojen NAO-indeksin vaikutusta meteorologiseen kuivuuteen Pohjois-Euroopassa olisi syytä tarkastella tarkemmin esimerkiksi korrelaatioanalyysien avulla.

Tulevan sadannan mallinnuksiin perustuvan analyysin mukaan erityisesti pisimmät 400 mm sadekertymäjaksot tulevat lyhenemään vuoteen 2100 mennessä Hammer Oddessa, Jyväskylässä ja Tartossa. Muiden saderajojen kohdalla tilastollisesti merkitsevät trendit olivat harvinaisempia. Poutapäivien ja sateettomien päivien lukumääriessä ei myöskään tulosten mukaan tule tapahtumaan tilastollisesti merkitseviä lineaarisia muutoksia. Tulevien muutosten tarkastelu perustui kuitenkin vain neljään ilmastomalliin ja yhteen päästöskenaarioon eikä sen vuoksi ole kovin kattava. Näin ollen vaikka analyyseissä ei tilastollisesti merkitseviä trendejä juuri ilmennytkään, ei tämä kuitenkaan vielä takaa, ettei trendejä tulevaisuudessa esiintyisi. Lisäksi ilmastomallinnukset eivät ole täydellisiä ja ne ovat herkkiä eri muuttujille. Tulevaan kasvihuonekaasupäästökehitykseen ja ilmaston lämpenemisen vaikutuksiin liittyy myös paljon epävarmuustekijöitä, joiden vuoksi sademäärissä tapahtuvat muutokset saattavat edetä eri tavoin tai eri tahdissa kuin tässä työssä käytetty A1B-skenaario olettaa.

Meteorologisen kuivuuden vaikutus näkyy yleensä ensimmäisenä pintamaankosteuden alenemisena. 10 mm sadekertymäjaksojen pituus korreloi tulosten mukaan positiivisesti näiden jaksojen kanssa samaan aikaan esiintyvien maankosteusindeksin mukaan määriteltyjen kuivuuspäivien lukumäärän kanssa sadekertymäjakson aikaisen haihdunnan ja edeltävän maankosteuden mukaan määritellyissä luokissa. ”Kuivuuspäivien” osuus 10 mm sadekertymäjakson pituudesta on sitä suurempi, mitä korkeampi on sadekertymäjakson aikainen haihdunta ja mitä alhaisempi on edeltävä maankosteus. Samoin mitä korkeampi on haihdunta ja mitä alhaisempi on edeltävä maankosteus, sitä lyhempi 10 mm sadekertymäjakso

aiheuttaa maankosteusindeksin mukaisen kuivuusjakson. Luontainen hajonta saattoi kuitenkin heikentää tutkimuksessa tarkasteltujen korrelaatioiden esiintymistä luokissa, jotka sisälsivät vähän tapauksia. Joissakin suurissa luokissa korrelaatiota heikensivät myös tapaukset, joissa pitkän sadekertymäjakson aikana esiintyi vain muutama maankosteusindeksin mukainen ”kuivuuspäivä”. Näissä tapauksissa sadekertymäjakso oli alkanut ennen lumen sulamista.

Suomessa maankosteusindeksin mukaan määriteltyjen kuivuusjaksojen lukumäärät ja pituudet ovat metsäpalokaudella keskimäärin suurimmat rannikkoalueilla ja pienimmät Lapissa. ”Kuivuuspäivien” lukumäärät puolestaan vähenevät lounaasta koilliseen. Yksittäisinä vuosina näiden kuivuusparametrien alueellinen jakauma saattaa kuitenkin poiketa keskimääräisestä jakaumasta paljonkin.

Tässä tutkielmassa tarkasteltu meteorologinen kuivuus ja sen aiheuttama maankosteuden aleneminen ovat vain osia kuivuusvaikutusten moniulotteisesta ketjusta. Eri kuivuustyypit johtavat toisiinsa kausaalisesti ja aiheuttavat kukin itsessään hieman erityyppisiä seuraamuksia eri yhteiskunnan sektoreille. Lopulta eri kuivuustyyppien vaikutukset kumuloituvat sosioekonomisiksi vaikutuksiksi, jotka saattavat näkyä kuivuudesta kärsineellä alueella pitkäänkin.

Kiitokset

Kiitän ohjaajiani professori Jukka Käyhköä Turun yliopiston maantieteen laitokselta ja Ari Venäläistä Ilmatieteen laitokselta tuesta, neuvoista ja hyödyllisestä palautteesta. Lisäksi kiitokset pro gradu -työni syntyä edesauttaneelle Ilmatieteen laitoksen henkilökunnalle, erityisesti Jussi Ylhäisille ilmastomallinnuksiin perustuvien sadetilastoaineistojen poimimisesta ja toimittamisesta sekä tutkielman sisältöön liittyvistä kommenteista. Kiitokset myös Pentti Piriselle ja Seppo Sakulle sade- ja maankosteusindeksiaineistojen toimittamisesta sekä Hanna Tietäväiselle trendianalyyseihin liittyvästä avusta. Turun yliopiston maantieteen laitokselta kiitän myös Leena Laurilaa taustakartta-aineistojen toimittamisesta sekä yleisestä tietoteknisestä avusta sekä Risto Kalliolaa ja Elina Kasvia työn sisältöön liittyvistä kommenteista. Kiitokset myös Kaija Hakalalle Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksesta ja Stefan Fronzekille Suomen ympäristökeskuksesta kuivuuteen liittyvästä informaatiosta. Työssä käytetyt ENSEMBLES-aineistot oli tuotettu EU FP6 ENSEMBLES-projektin (sopimusnumero 505539) rahoituksella. Tukea työhön saatiin myös pohjoismaisesta Climate and Energy Systems; Risks, Potential and Adaptation (CES) – projektista ja suomalaisesta Ilmastonmuutoksen sopeutumistutkimusohjelman (ISTO) ACCLIM-hankkeesta.

Lähteet

Allen, M.R. & W.J. Ingram (2002). Constraints on future changes of climate and the hydrological cycle. *Nature* 419, 224-231.

Álvarez, J. & T. Estrela (2000). Regionalization and drought characterisation in Europe. *Technical Report to the ARIDE project* 9. 55 s. Madrid, Spain.

Arvola, E. 1987. Suomen ilmastoon vaikuttavat ilmavirtausjärjestelmät ja säätyypit. *Teoksessa* Alalammi, P. (toim.): *Ilmasto. Suomen Kartasto* 131, 22-23. Maanmittaushallitus, Suomen maantieteellinen seura, Helsinki.

Barnston, A.G. & R.E. Livezey (1987). Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review* 115, 1083-1126.

Beniston, M., D.B. Stephenson, O.B. Christensen, C.A.T. Ferro, C. Frei, S. Goyette, K. Halsnaes, T. Holt, K. Jylhä, B. Koffi, J. Palutikof, R. Schöll, T. Semmier & K. Woth (2007). Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change* 81, 71-95.

Beran, M. & J. A. Rodier (1985). Hydrological aspects of drought. *Studies and reports in hydrology* 39. 149 s. UNESCO-WMO, Paris, France.

Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr & P. Whetton, (2007). Regional Climate Projections. *Teoksessa* Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller (toim.): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 847-940. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Doswell III, C.A., H.E. Brooks & R.A. Maddox (1996). Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology. *Weather and Forecasting* 11, 560-581.

Dracup, J.A., K.S. Lee & E.G. Jr. Paulson (1980). On the definition of droughts. *Water Resources Research* 16, 297-302.

Drebs, A., A. Norlund, P. Karlsson, J. Helminen & P. Rissanen (2002). Tilastoja Suomen ilmastosta 1971–2000. *Ilmastotilastoja Suomesta* 1. 99 s. Ilmatieteen laitos, Helsinki.

EEA, European Environment Agency (2001). Sustainable water use in Europe, Part 3: extreme hydrological events: floods and droughts. *Environmental Issue Report* 21. 84 s. Copenhagen.

Euroopan komissio (2007). Veden niukkuuden ja kuivuuden asettamiin haasteisiin vastaaminen Euroopan unionissa. KOM (2007) 414 lopullinen. 28.3.2009. <*http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52007DC0414:FI:NOT*>

Førland, E.J., P. Allerup, B. Dahlström, E. Elomaa, T. Jónsson, H. Madsen, J. Perälä, P. Rissanen, H. Vedin & F. Vejen (1996). Manual for operational correction of precipitation data, *DNMI-klima Report* 24, Norwegian Meteorological Institute, Oslo.

Frich, P. & K. Frydendahl (1994). The summer climate in the Øresund region of Denmark A.D. 1675 to 1715. *Teoksessa* Frenzel, B. (toim.): Climatic trends and anomalies in Europe 1675-1715. *Paläoklimaforschung - Palaeoclimate Research* 13, 51-60.

Frich, P., S. Rosenørn, H. Madsen & J.J. Jensen (1997). Observed precipitation in Denmark, 1961-1990. *Technical Report* 97-8. 38 s. Danish Meteorological Institute, Kopenhagen, Denmark.

Ghosh, T.K. (1997). Investigation of drought through digital analysis of satellite data and geographical information systems. *Theoretical and Applied Climatology* 58, 105-112.

Gibbs, W.J. & J.V. Maher (1967). Rainfall deciles as drought indicators. *Bureau of meterology Bulletin* 48. 37 s. Melbourne, Australia.

Gillette, H.P. (1950). A creeping drought under way. *Water and Sewage Works* March, 104-105.

Githinji, W. & S. Robinson (2000). Lights out. *Time Europe* 156, 25.

Glantz, M.H. (2003). *Climate affairs: a primer*. 292 s. Island Press, Washington.

Gottschalk, L., J. Lundager Jensen, D. Lundquist, R. Solantie & A. Tollan (1979). Hydrologic regions in the Nordic Countries. *Nordic Hydrology* 10, 273-286.

Groisman, P. Y. & D.R. Legates (1995). Documenting and detecting long-term precipitation trends: Where we are and what should be done. *Climatic change* 31, 601-622.

Hakala, K. & P. Peltonen-Sainio (2008). Tuleeko Suomesta vilja-aitta, kun ilmasto muuttuu? Esitelmä Maataloustieteen Päivillä 2008.

Hanna, E., J. Cappelen, R. Allan, T. Jónsson, F. Le Blancq, T. Lillington & K. Hickey (2008). New insights into North European and North Atlantic surface pressure variability, storminess, and related climatic change since 1830. *Journal of climate* 21, 6739-6766.

Hanson, C.E., J.P. Palutikof, M.T.J. Livermore, L. Barring, M. Bindi, J. Corte-Real, R. Durao, C. Giannakopoulos, P. Good, T. Holt, Z. Kundzewics, G.C. Leckebush, M. Moriondo, M. Radziejewski, J. Santos, P. Schlyter, M. Schwarb, I. Stjernquist & U. Ulbrich (2007). Modelling the impact of climate extremes: an overview of the MICE project. *Climatic Change* 81, 163-177.

Heikinheimo, M. & A. Venäläinen. Kosteusindeksi metsäpalovaaran arvioimiseksi. Meteorologinen tutkimus. (ei julkaisutietoja).

Heikinheimo, M., A. Venäläinen & T. Tourula (1996). A soil moisture index for the assessment of forest fire risk in the boreal zone. *Teoksessa* Dalezios, N.R. (toim.): *Proceedings of the International Symposium on Applied Agrometeorology and Agroclimatology*, EUR 18328-COST 77,79,711, 549-555.

Heim, R.R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83, 1149-1165.

Heino, R. (1994). Climate in Finland during the period of meteorological observations. *Finnish meteorological Institute Contributions* 12. 209 s. Ilmatieteen laitos, Helsinki.

Heino, R., H. Tuomenvirta, V.S. Vuglinsky, B.G. Gustafsson, H. Alexandersson, L. Bärring, A. Briede, J. Cappelen, D. Chen, M. Falarz, E.J. Førland, J. Haapala, J. Jaagus, L. Kitaev, A. Kont, E. Kuusisto, G. Lindström, H.E.M. Meier, M. Miętus, A. Moberg, K. Myrberg, T. Niedźwiedź, Ø. Nordli, A. Omstedt, K. Orviku, Z. Pruszak, E. Rimkus, V. Russak, C. Schrum, Ü. Suursaar, T. Vihma, R. Weisse & J. Wibig (2008). Past and current climate change. *Teoksessa* The BACC Author Team: *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*, 35-131. Springer, Berlin.

Helama, S. & M. Lindholm (2003). Droughts and rainfall in south-eastern Finland since AD 874, inferred from Scots pine ring-widths. *Boreal Environmental Research* 8, 171-183.

Helminen, V.A. (1987). Lämpöolot. *Teoksessa* Alalammi, P. (toim.): *Ilmasto. Suomen Kartasto* 131, 4-10. Maanmittaushallitus, Suomen maantieteellinen seura, Helsinki.

Helsel, D.R. & R.M. Hirsch (2002). Statistical Methods in Water Resources. *Teoksessa* U.S. Geological Survey, *Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 4, Chapter A3. (Verkkojulkaisu) 3.12.2008 <http://water.usgs.gov/pubs/twri/twri4a3>

Hewitt C.D. (2005). The ENSEMBLES Project: Providing ensemble-based predictions of climate changes and their impacts. *EGGS newsletter* 13, 22-25.

Hisdal, H. & L.M. Tallaksen (2003). Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics: a case study for Denmark. *Journal of Hydrology* 281, 230-247.

Houghton, J.T., G.J. Jenkins & J.J. Ephraums (toim. 1990). *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment Report Prepared for the Intergovernmental Panel on Climate Change by Working Group*. 356 s. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Hulme, M. (2001). Climatic perspectives on Sahelian desiccation 1973-1998. *Global Environmental Change* 11, 19-29.

Huntington, T.G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis. *Journal of Hydrology* 319, 83-95.

Hurrell, J.W. (1995). Decadal trends in the North Atlantic oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science* 269, 676–679.

Hurrell, J.W. & H. van Loon (1997). Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Climatic Change* 36, 301-326.

Hyvärinen, V. & J. Kajander (2005). Rivers and lakes of Fennoscandia. *Teoksessa* Seppälä, M. (toim.): *The physical geography of Fennoscandia*, 136-157. Oxford University Press, Oxford.

Jacob, D., O. Bøssing Christensen, F.J. Doblas-Reyes, C. Goodess, A. Klein Tank, P. Lorenz & E. Roeckner (2008). Information on observations, global and regional modelling data availability and statistical downscaling. *ENSEMBLES Technical Report* 4.

Jones P.D., T. Jonsson & D. Wheeler (1997). Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *International Journal of Climatology* 17, 1433-1450.

Jones, P.D., T. J. Osborn & K.R. Briffa (2003). Pressure-based measures of the North Atlantic Oscillation (NAO): A comparison and an assessment of changes in the strength of the NAO and in its influence on surface climate parameters. The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact. *Geophysical Monographs* 134, 51-62. American Geophysical Union.

Kamara, S.I. & I.J. Jackson (1997). A new soil-moisture based classification of raindays and drydays and its application to Sierra Leone. *Theoretical and applied climatology* 56,199-213.

Katz, R.W. & B.G. Brown (1992). Extreme events in a changing climate: variability is more important than averages. *Climatic Change* 21, 303-315.

Keyantash, J. & J.A. Dracup (2007). The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83, 1167-1180.

Kitaev L, V. Razuvaev, R. Heino & E. Forland (2006). Duration of snow cover over Northern Europe. *Russian Meteorology and Hydrology* 3, 95–100.

Klein Tank, A. (2007). *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), European Climate Assessment & Dataset (ECA&D) project document*, 38 s. Royal Netherlands Meteorological Institute KNMI.

Kundzewicz, Z. (1997). Water resources for sustainable development. *Hydrological Sciences Journal* 41, 467-480.

Larjavaara, M., T. Kuuluvainen, H. Tanskanen & A. Venäläinen (2004). Variation in forest fire ignition probability in Finland. *Silva Fennica* 38, 253-266.

Lehner, B. & P. Döll (2001). Europe's droughts today and in the future. *Teoksessa* Lehner, B., T. Henrichs, P. Döll, J. Alcamo: EuroWasser – Model-based assessment of European water resources and hydrology in the face of global change. 7-1 – 7-16. *Kassel World Water Series* 5, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany.

Lenderink, G. & E. Van Meijgaard (2008). Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience* 1, 511-514.

Linderholm, H.W. & T. Molin (2005). Early nineteenth century drought in east central Sweden inferred from dendrochronological and historical archives. *Climate Research* 29, 63-72.

Mannio, J., B. Skjelkvåle, A. Wilander, E. Fjeld & S. Rekolainen (2005). Lake-water pollution. *Teoksessa* Seppälä, M. (toim.): *The physical geography of Fennoscandia*, 391-404. Oxford University Press, Oxford.

Maracchi, G. (2000). Agricultural drought – a practical approach to definition, assessment and mitigation strategies. Teoksessa Vogt, J.V. & F. Somma (toim.): Drought and drought mitigation in Europe. *Advances in Natural and Technological Hazards Research* 14, 63-75.

Martin-Carrasco, F.J. & L. Garrote (2007). Drought-induced water scarcity in water resources systems. *Teoksessa* Vasiliev, O.F., P.H.A.J.M van Gelder, E.J. Plate & M.V Bolgov (toim.): *Extreme Hydrological Events: New Concepts for Security*, 301-311. Springer, Netherlands.

Mauget, S.A. (2006). Intra- to multi-decadal terrestrial precipitation regimes at the end of the 20th century. *Climatic Change* 18, 317-340.

May, W., R. Voss & E. Roeckner (2002). Changes in the mean and extremes of the hydrological cycle in Europe under enhanced greenhouse gas conditions in a global time-slice experiment. *Teoksessa* Beniston, M. (toim.): *Climatic Change: Implications for the Hydrological Cycle and Water Management*, 1-29.

McKee, T.B., N.J. Doesken & J. Kleist (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Teoksessa Preprints, 8th Conference on Applied Climatology*, 179-184. American Meteorological Society, Anaheim, CA, Boston, MA, 17-22 January.

Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver & Z.-C. Zhao (2007). Global Climate Projections. *Teoksessa* Solomon, S, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & Miller (toim.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 747-845. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Miętus M. (1998) The Climate of the Baltic Sea Basin. Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities. *Report* 41. WMO/TD-No. 933. 64 s. World Meteorological Organization.

Msangi, J.P. (2004). Drought hazard and desertification management in the drylands of Southern Africa. *Environmental Monitoring and Assessment* 99, 75-87.

Myllyntaus, T. (painossa). Summer Frost, A Hazard with Fatal Consequences in Pre-industrial Finland. *Teoksessa* Pfister, C. & C. Mauch (toim.): *Natural Disasters and Cultural Strategies: Responses to Disasters in Global Perspective*, Lexington, New York.

Nakicenovic, N. & R. Swart (toim. 2000). *Emissions scenarios 2000. Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* 599 s. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Narasimham, B. & R. Srinivasan (2005). Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology* 133, 69-88.

NDMC, National Drought Mitigation Center (2006). What is drought? Understanding and defining drought. 11.2.2008. <*http://drought.unl.edu/whatis/concept.htm*>

Nicholls, N., M.J. Coughan & K. Monnik (2005). The challenge of climate prediction in mitigating drought impacts. *Teoksessa* Wilhite, D.A. (toim.): *Water crises: science, technology, and management issues*, 33-52. Taylor & Francis Group, Boca Raton.

Osborn, T. J. (2004). Simulating the winter North Atlantic Oscillation: the roles of internal variability and greenhouse gas forcing. *Climate Dynamics* 22, 605-623.

Osborn, T. (2009). North Atlantic Oscillation index data. 27.2.2009. <*http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao_update.htm*>

Osborn, T.J. & M. Hulme (1997). Development of a relationship between station and grid-box rainday frequencies for climate model evaluation. *Journal of Climate* 10, 1885-1908.

Palmer, W.C. (1965). Meteorological drought. *Research Paper* 45. 58 s. US Weather Bureau, Washington, D.C., USA.

Panu, U.S. & T.C. Sharma (2002). Challenges in drought research: some perspectives and future directions. *Hydrological Sciences Journal* 47, S19-S20.

Peel, M.C., B.L. Finlayson & T.A. McMahon (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 1633-1644.

Rubel, F. & M. Hantel (2001). BALTEX 1/6-degree daily precipitation climatology 1996-1998. *Meterology and Atmospheric Physics* 77, 155-166.

Räisänen, J. (2002). CO_2-induced changes in interannual temperature and precipitation variability in 19 CMIP2 experiments. *Journal of Climate* 15, 2395-2411.

Räisänen, J. (2005). CO_2-induced impact of increasing CO_2 on monthly to-annual precipitation extremes: analysis of the CMIP2 experiments. *Climate Dynamics* 24, 309–323.

Sheffield, J. & E.F. Wood (2008). Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate Dynamics* 31, 75-105.

Silander, J. & E. A. Järvinen (toim., 2004). Vuosien 2002-2003 poikkeuksellisen kuivuuden vaikutukset. *Suomen ympäristö* 731. 79 s. Suomen ympäristökeskus, Helsinki.

Sneyers, R. 1990. On the statistical analysis of series of observations. *World Meteorological Organization Technical Note* 143.

Snorrason, Á. & J. Harðardóttir (2008). Climate and Energy Systems (CES) 2007–2010. A new Nordic energy research project. *Teoksessa* Sveinsson, O.G.B., S. M. Garðarsson & S. Gunnlaugsdóttir (toim.): *Northern hydrology and its global role. XXV Nordic hydrological conference, Nordic Association for Hydrology, Reykjavík, Iceland August 11–13, 2008*, 591–596. Icelandic Hydrological Committee, Reykjavík.

Solantie, R. (1987). Sade- ja lumiolot. *Teoksessa* Alalammi, P. (toim.): *Ilmasto. Suomen Kartasto* 131, 18-22. Maanmittaushallitus, Suomen maantieteellinen seura, Helsinki.

Spiegel, M.R. & L.J. Stephens (1999). *Schaum's outline of theory and problems of statistics*. 3. painos. 538 s. McGRAW-HILL, New York.

von Storch, H. & A. Omstedt (2008). Introduction and summary. *Teoksessa* The BACC Author Team: *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. 1-34. Springer, Berlin.

Tallaksen, L.M. (2000). Streamflow drought frequency analysis. *Teoksessa* Vogt, J.V. & F. Somma (toim.): Drought and Drought Mitigation in Europe. *Advances in Natural and Technological Hazards Research* 14, 103-117.

Tate, E.L. & A. Gustard (2000). Drought definition: a hydrological perspective. *Teoksessa* Vogt, J.V. & F. Somma (toim.): Drought and Drought Mitigation in Europe. *Advances in Natural and Technological Hazards Research* 14, 23-48.

Tikkanen, M. (2005). Climate. *Teoksessa* Seppälä, M. (toim.): *The physical geography of Fennoscandia*, 97-112. Oxford University Press, Oxford.

Trenberth, K.E. (1998). Atmospheric moisture residence times and cycling: implications for rainfall rates and climate change. *Climatic Change* 39, 667-694.

Trenberth, K.E., (1999): Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. *Climatic Change* 42, 327–339.

Trenberth, K. E., A. Dai, R. Rasmussen & D. Parsons (2003). The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 84, 1205–1217.

Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden & P. Zhai (2007). Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. *Teoksessa* Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller (toim.): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 235-336. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Tveito, O.E., E.J. Førland, H. Alexandersson, A. Drebs, T. Jónsson, H. Tuomenvirta & E. Vaarby Laursen (2001). Nordic climate maps. *DNMI Report* 06. 28 s.

UCAR, The University Corporation for Atmospheric Research (2008). *Annual station based NAO index*. 27.2.2009. *<http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.data.html#naostatann>*

Venäläinen, A. *<ari.venalainen@fmi.fi>* (2009). Re: Menetelmät ja tulokset. Henkilökohtainen sähköpostiviesti 10.2.2009.

Venäläinen, A. & M. Heikinheimo (2003). The Finnish forest fire index calculation system. *Teoksessa* Zschau, J. & A. Küppers (toim.): *Early warning systems for natural disaster reduction*, 645-647. Springer, New York.

Venäläinen, A., S. Saku, T. Kilpeläinen, K. Jylhä, H. Tuomenvirta, A. Vajda, K. Ruosteenoja & J. Räisänen (2007). Sään ääri-ilmiöistä Suomessa. *Ilmatieteen laitoksen raportteja* 4. 81 s. Helsinki.

Vesajoki, H. & M. Tornberg (1994). Outlining the climate in Finland during the pre-instrumental period on the basis of documentary sources. *Teoksessa* Frenzel, B. (toim.): Climatic trends and anomalies in Europe 1675-1715. *Paläoklimaforschung - Palaeoclimate Research* 13, 51-60.

Vicente-Serrano, S.M. (2007). Evaluating the impact of drought using remote sensing in a mediterranean semi-arid region. *Natural Hazards* 40, 173-208.

Vinther, B.M., K.K. Andersen, A.W. Hansen, T. Schmith, & P.D. Jones (2003). Improving the Gibraltar/Reykjavik NAO index. *Geophysical Research Letters* 30, 2222.

Wang, G. (2005). Agricultural drought in a future climate: results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th assessment. *Climate Dynamics* 25, 739-753.

Wanner, H, S. Brönnimann, C. Casty, D. Gyalistras, J. Luterbacher, C. Schmutz, D.B. Stephenson & E. Xoplaki (2001). North Atlantic Oscillation – concepts and studies. *Surveys in Geophysics* 22, 321-382.

Weber, L. & L. Nkemdirim (1998). Palmer's drought indices revisited. *Georafiska Annaler* 80A, 153-172.

Wibig, J. (2008). Annex 7. North Atlantic Oscillation and Arctic Oscillation. *Teoksessa* The BACC Author Team: *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*, 473. Springer, Berlin.

Wilhite, D. A. & M. Buchanan-Smith (2005). Drought as hazard: Understanding the natural and social context. *Teoksessa* Wilhite, D. A. (toim.): *Drought and water crises: science, technology, and management issues*, 3-29. Taylor & Francis Group, Boca Raton.

Wilhite, D.A. & M.H. Glantz (1985). Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International* 10, 111–120.

Önöz, B. & M. Bayazit (2003). The power of statistical tests for trend detection. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 27, 247-251.

LIITTEET

1. Sadehavaintotilastojen sisältämät aukot, virheet, mittausten ilmoitustarkkuus sekä analyyseistä poistetut vuodet
2. Sadehavaintoihin perustuvien mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneiden pisimpien 10 mm sadekertymäjaksojen pituuksien ajallinen vaihtelu
3. Sadehavaintoihin perustuvien kesällä alkaneiden pisimpien 10 mm sadekertymäjaksojen pituuksien ajallinen vaihtelu
4. Sadehavaintoihin perustuvien mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneiden pisimpien 100 mm sadekertymäjaksojen pituuksien ajallinen vaihtelu
5. Sadehavaintoihin perustuvien kesällä alkaneiden pisimpien 100 mm sadekertymäjaksojen pituuksien ajallinen vaihtelu
6. Sadehavaintoihin perustuvien mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneiden pisimpien 400 mm sadekertymäjaksojen pituuksien ajallinen vaihtelu
7. Sadehavaintoihin perustuvien pisimpien sadekertymäjaksojen lineaaristen trendien suuruudet ja tilastolliset merkitsevyydet
8. Mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneiden pisimpien 10 mm sadekertymäjaksojen pituuden vaihtelu vuosina 1961–2100
9. Kesällä alkaneiden pisimpien 10 mm sadekertymäjaksojen pituuden vaihtelu vuosina 1961–2100
10. Mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneiden pisimpien 100 mm sadekertymäjaksojen pituuden vaihtelu vuosina 1961–2100
11. Kesällä alkaneiden pisimpien 100 mm sadekertymäjaksojen pituuden vaihtelu vuosina 1961–2100
12. Mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneiden pisimpien 400 mm sadekertymäjaksojen pituuden vaihtelu vuosina 1961–2100
13. Ilmastomallinnuksiin perustuvien pisimpien sadekertymäjaksojen lineaaristen trendien suuruudet ja tilastolliset merkitsevyydet
14. Sadehavaintoihin perustuvien koko vuoden <1,0 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu.
15. Sadehavaintoihin perustuvien kesän <1,0 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu
16. Sadehavaintoihin perustuvien koko vuoden <0,1 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu.
17. Sadehavaintoihin perustuvien kesän <0,1 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu
18. Sadehavaintoihin perustuvien koko vuoden 0 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu
19. Sadehavaintoihin perustuvien kesän 0 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu
20. Sadehavaintoihin perustuvien poutapäivien ja sateettomien päivien lukumäärien lineaaristen trendien suuruudet ja tilastolliset merkitsevyydet
21. Ilmastomallinnuksiin perustuvien koko vuoden <1,0 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu vuosina 1961–2100
22. Ilmastomallinnuksiin perustuvien kesän <1,0 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu vuosina 1961–2100
23. Ilmastomallinnuksiin perustuvien koko vuoden <0,1 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu vuosina 1961–2100
24. Ilmastomallinnuksiin perustuvien kesän <0,1 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu vuosina 1961–2100
25. Ilmastomallinnuksiin perustuvien poutapäivien ja sateettomien päivien lukumäärien lineaaristen trendien suuruudet ja tilastolliset merkitsevyydet
26. Sadekertymäjaksojen pituuksien ja maankosteusindeksin mukaisten kuivuuspäivien lukumäärien väliset korrelaatiot

LIITE 1. Sadehavaintotilastojen sisältämät aukot, virheet, mittausten ilmoitustarkkuus sekä analyyseistä poistetut vuodet

Asema	Ajanjakso	Vajaat vuodet (päiviä vuodessa)	Vajaat kesät (päiviä vuodessa)	Virheelliset sademäärät (vuodet)	Tarkkuus (mm: vuodet)	Analyyseista puuttuvat vuodet						
						Pisimmät kuivuusjaksot					Poutapäivät	
						10 mm saderaja		100 mm saderaja		400 mm saderaja	Koko vuosi	Kesä
						Koko vuosi	Kesä	Koko vuosi	Kesä			
Bergen-Samnanger	1.1.1901–24.6.2006	2000–2005 (0) 2006 (126)	2000–2005 (0) 2006 (49)		0,1	2000–2006	2000–2006	2000–2006	2000–2006	2000–2006	2000–2006	2000–2006
Hammer Odde	1.1.1874–31.12.2007	1947 (334) 1948 (335) 1951 (334) 2003 (364) 2005 (364)	1951 (92)		0,1: 1874–2005 1: 2006–2007						1947 1948 1951 2006 2007	1951 2006 2007
Helsinki	1.7.1844–14.6.2008	1844 (184) 1852 (314) 1960 (364) 1961 (364) 2005 (362) 2008 (167)	1844 (62) 1852 (92) 2005 (122) 2008 (46)		0,1	1844 2008	1844 1852 2008	1844 2008	1844 1852 2008	1844 2008	1844 1852 2008	1844 1852 2008
Jyväskylä	1.1.1883–10.6.2008	1883 (347) 1954 (274) 2005 (362) 2006 (360) 2008 (162)	1954 (62) 2005 (122) 2006 (121) 2008 (41)		0,1	1883 1954 2008	1954 2008	1954 2005 2008	1954 2008	2008	1883 1954 2008	1954 2008
Kajaani	1.1.1887–31.7.2000	1918 (243) 1919 (0) 2000 (203)	1919 (0) 2000 (82)	1951–1958 1960 (osa 0,1 mm arvoista virheellisiä)	0,1	1918–1919 1951–1958 2000	1918–1919 1951–1958 2000	1919 1951–1958 2000	1918–1919 1951–1958 2000	1918–1919 1951–1958 2000	1918–1919 1951–1958 2000 <0,1 mm: 1960	1919 1951–1958 2000 <0,1 mm: 1960
Karesuvanto	1.1.1961–31.12.2007	1965 (334) 2006 (364) 2007 (363)	1965 (92) 2007 (121)		1: 1961–1999, 2006–2007 0,1: 2000–2005 (pyöristetty 1 mm)						1965	1965
Karlstad	1.1.1918–31.12.2003			1998 (alkuvuosi)	0,1: 1918–1960 (pyöristetty 1 mm) 1: 1961–2007	1997–1998		1997–1998		1997–1998	1998	1998

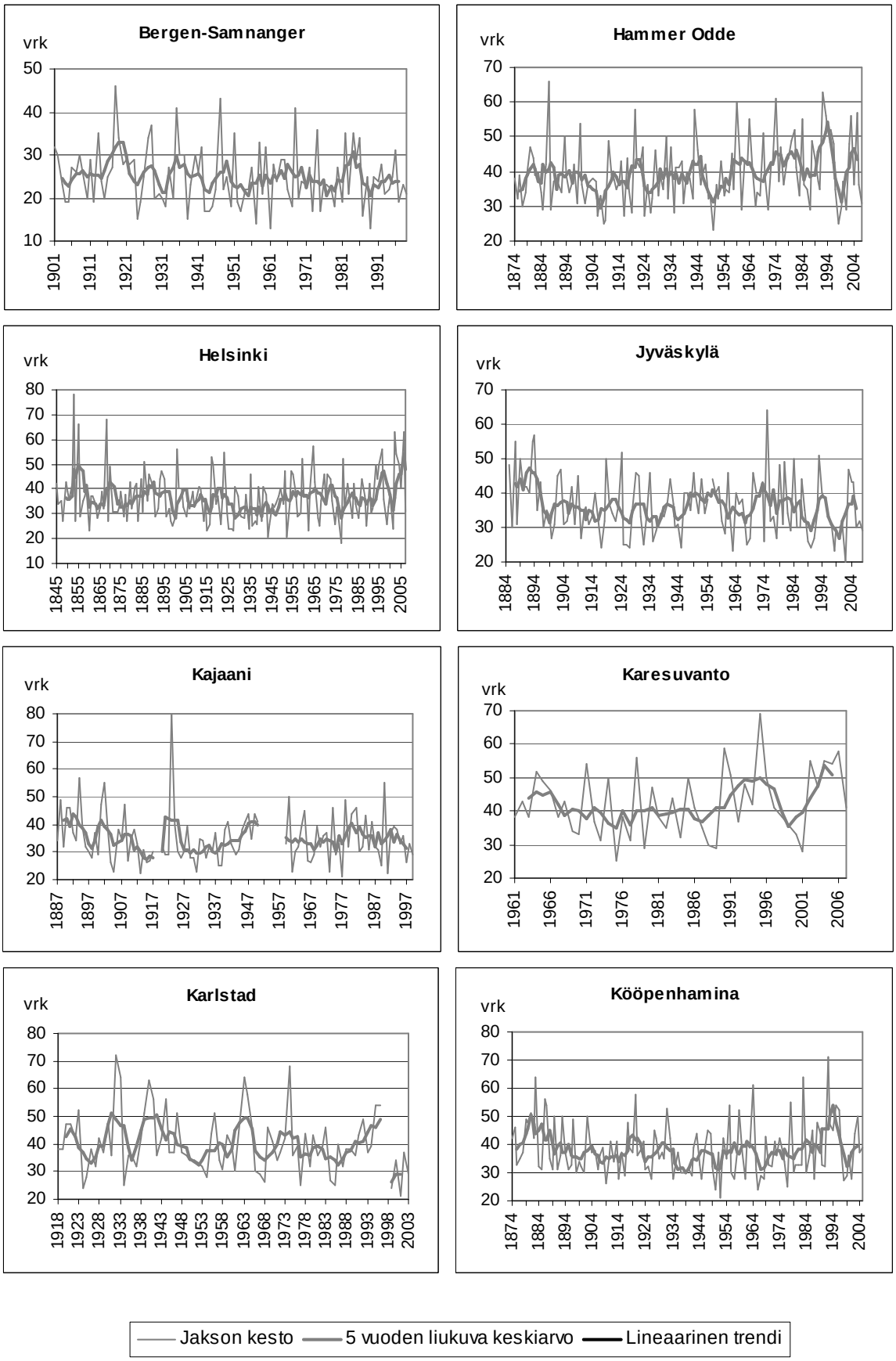
LIITE 1. jatkuu.

Asema	Ajanjakso	Vajaat vuodet (päiviä vuodessa)	Vajaat kesät (päiviä vuodessa)	Virheelliset sademäärät	Tarkkuus (mm: vuodet)	Analyyseista puuttuvat vuodet						
						Pisimmät kuivuusjaksot					Vähäsateiset ja sateettomat päivät	
						10 mm saderaja		100 mm saderaja		400 mm saderaja		
						Koko vuosi	Kesä	Koko vuosi	Kesä			
Kööpenhamina	1.1.1874– 31.12.2007	2006 (203) 2007 (216)	2006 (59) 2007 (77)		0,1: 1874–2005 1: 2006–2007	2006–2007	2006–2007	2006–2007	2006–2007	2006–2007	2006–2007	2006–2007
Oslo	1.1.1901– 31.12.2004	1954 (364)										
Riika	1.1.1943– 31.12.2007	1950 (360) 1973 (364) 1993 (363) 1994 (364) 2006 (358) 2007 (362)	1950 (118) 2006 (116)	1992 1993 (alkuvuosi)	0,1: 1943– 1991, 1995 1: 1993–1994, 1996–1998, 2005–2007	1992–1993	1992	1991–1993	1992	1991–1992	1992–1994 1996–1998 2006–2007	1950 1992–1994 1996–1998 2006–2007
Sodankylä	1.1.1908– 10.6.2008	1911 (364) 1918 (346) 1919 (352) 1927 (364) 1944 (258) 1945 (184) 1952 (361) 1953 (364) 2007 (364) 2008 (162)	1927 (122) 1944 (122) 1945 (62) 1953 (122) 2008 (41)		0,1: 1908–2008	1944 1945 2008	1945 2008	1918 2008	1944 2008	1944 2008	1918–1919 1944–1945 2008	1945 2008
Tartto	1.1.1901– 30.6.2004	1902 (364) 1913 (364) 1923 (364) 1934 (364) 1944 (304) 1945 (364) 1951 (334) 2004 (182)	1902 (122) 1934 (122) 1944 (92) 1951 (92) 2004 (79)		1: 1901–2004	2004	1944 2004	2004	1944 2004	2004	1944 1951 2004	1944 1951 2004
Vestervig	1.1.1874– 31.12.2007	2006 (171) 2007 (300)	2006 (0)		0,1: 1874–2005 1: 2006–2007	2006	2006	2006	2006	2006	2006–2007	2006–2007

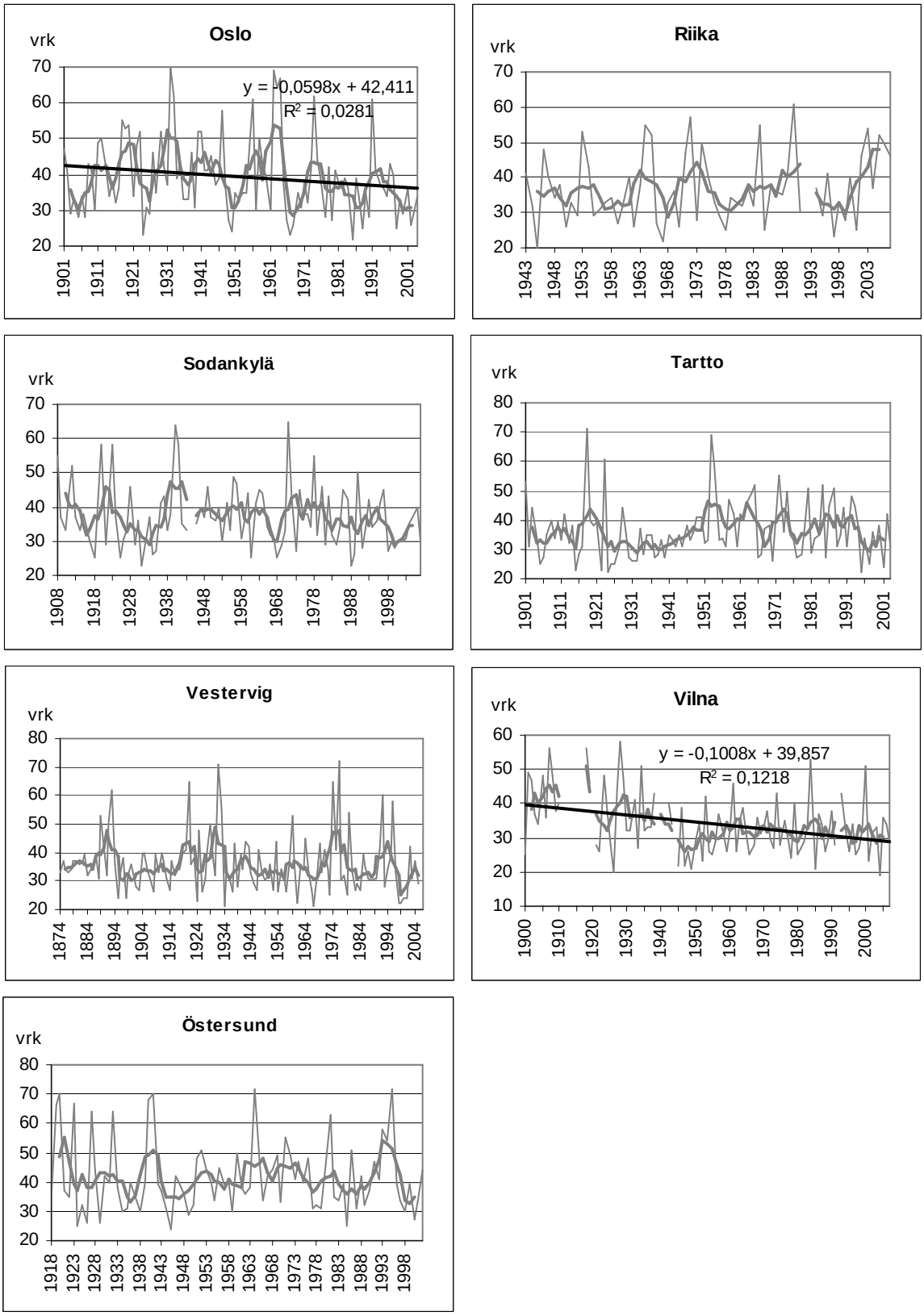
LIITE 1. jatkuu.

Asema	Ajanjakso	Vajaat vuodet (päiviä vuodessa)	Vajaat kesät (päiviä vuodessa)	Virheelliset sademäärät	Tarkkuus (mm: vuodet)	Analyyseista puuttuvat vuodet						
						Pisimmät kuivuusjaksot					Vähäsateiset ja sateettomat päivät	
						10 mm saderaja		100 mm saderaja		400 mm saderaja		
						Koko vuosi	Kesä	Koko vuosi	Kesä			
Vilna	1.1.1900–31.12.2007	1911 (241) 1912 (121) 1913 (121) 1914 (61) 1915–1917 (0) 1918 (363) 1919 (364) 1920 (213) 1923 (363) 1931 (364) 1934 (364) 1937 (364) 1945 (357) 1946 (364) 1959 (364) 1961 (364) 1964 (364) 1970 (364) 1971 (364) 1974 (364) 1975 (364) 1976 (364)	1911–1917(0) 1918 (121) 1920 (61) 1923 (121) 1945 (115) 1946 (122) 1964 (122) 1976 (122)	1939 1941 1944 1992	0,1: 1900–2005 1: 2006–2007	1911–1917 1920 1939 1941 1944 1992	1911–1917 1920 1939 1941 1944 1992	1911–1917, 1920 1939 1941 1944 1991 1992	1911–1917 1920 1939 1941 1944 1992	1911–1917 1920 1938 1939 1941 1943 1944 1991 1992	1911–1917, 1920 1939 1941 1944–1945 1992 2006–2007	1911–1917, 1920 1939 1941 1944–1945 1992 2006–2007
Östersund	1.1.1918–31.12.2003	1943 (334)		2002 (loppuvuosi) 2003	0,1: 1918–1960 (pyöristetty 1 mm) 1: 1961–2003	2003	2003	2003	2002–2003	2002–2003	1943 2002 2003	2003

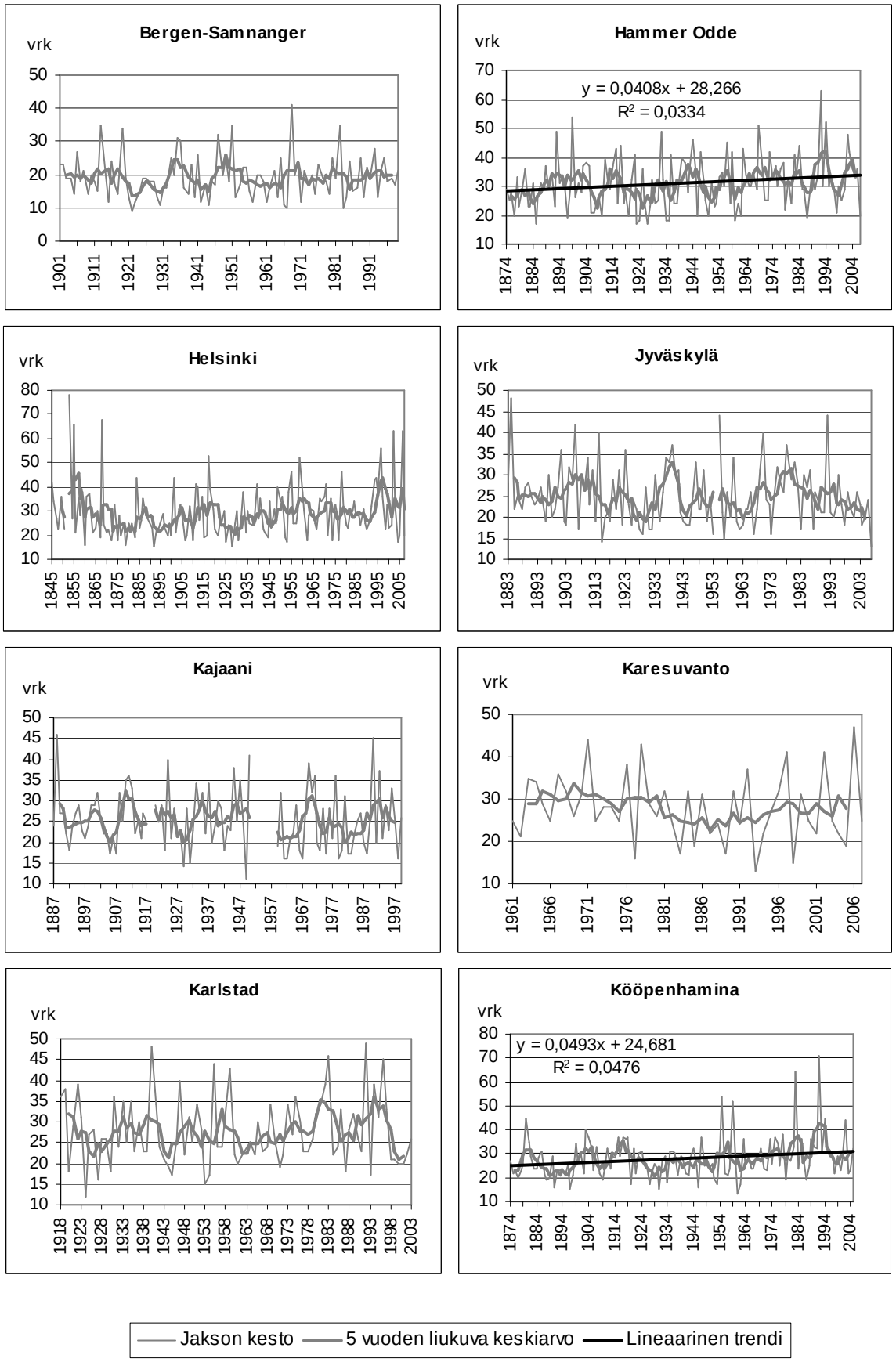
LIITE 2. Sadehavaintoihin perustuvien mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneiden pisimpien 10 mm sadekertymäjaksojen pituuksien ajallinen vaihtelu. Lineaarinen trendiviiva on esitetty kuvaajassa vain, jos trendi on ollut tilastollisesti merkitsevä merkitsevyystasolla 0,05. Huomaa, että kuvaajien akselien arvot vaihtelevat.



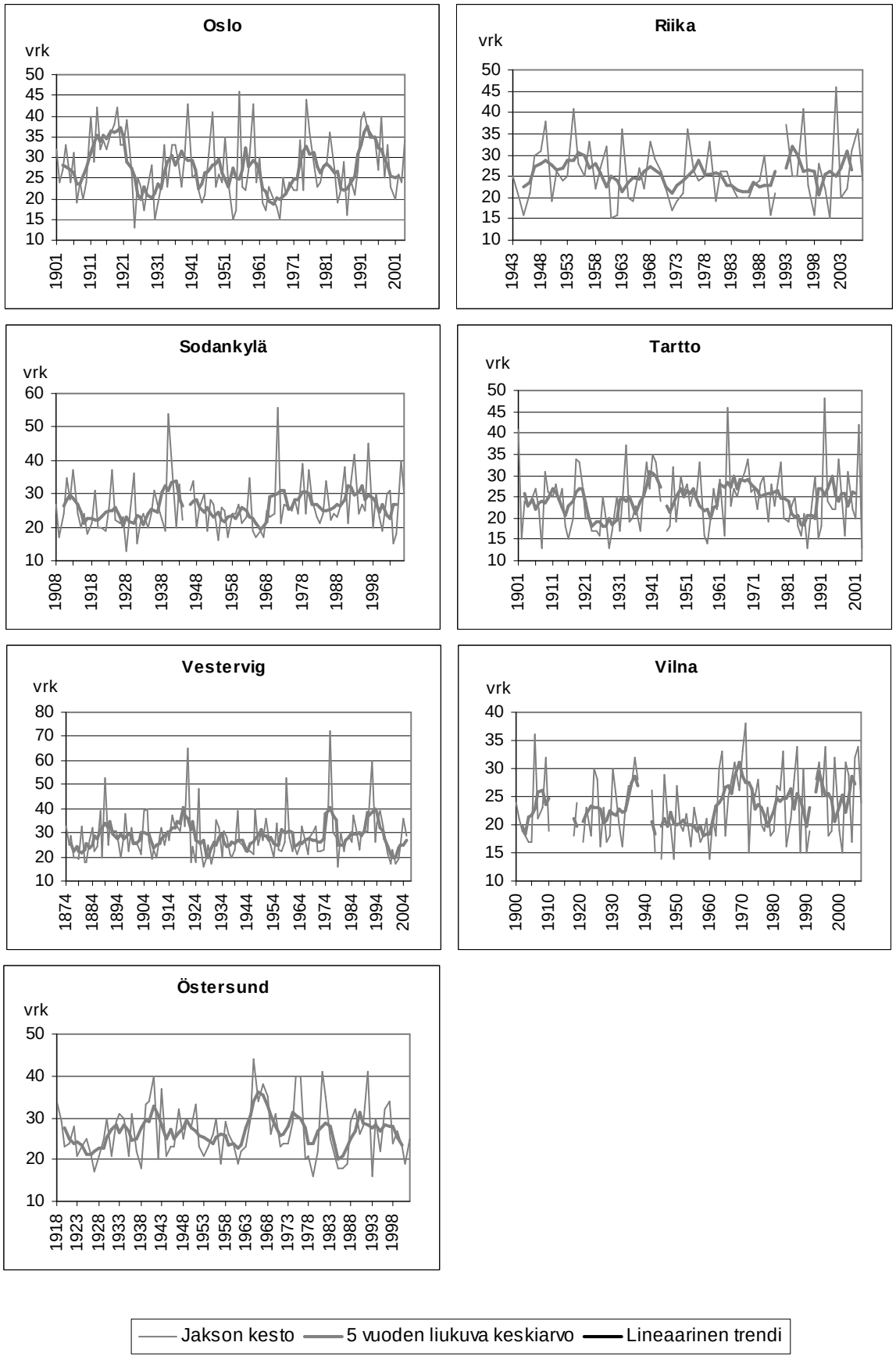
LIITE 2. jatkuu.



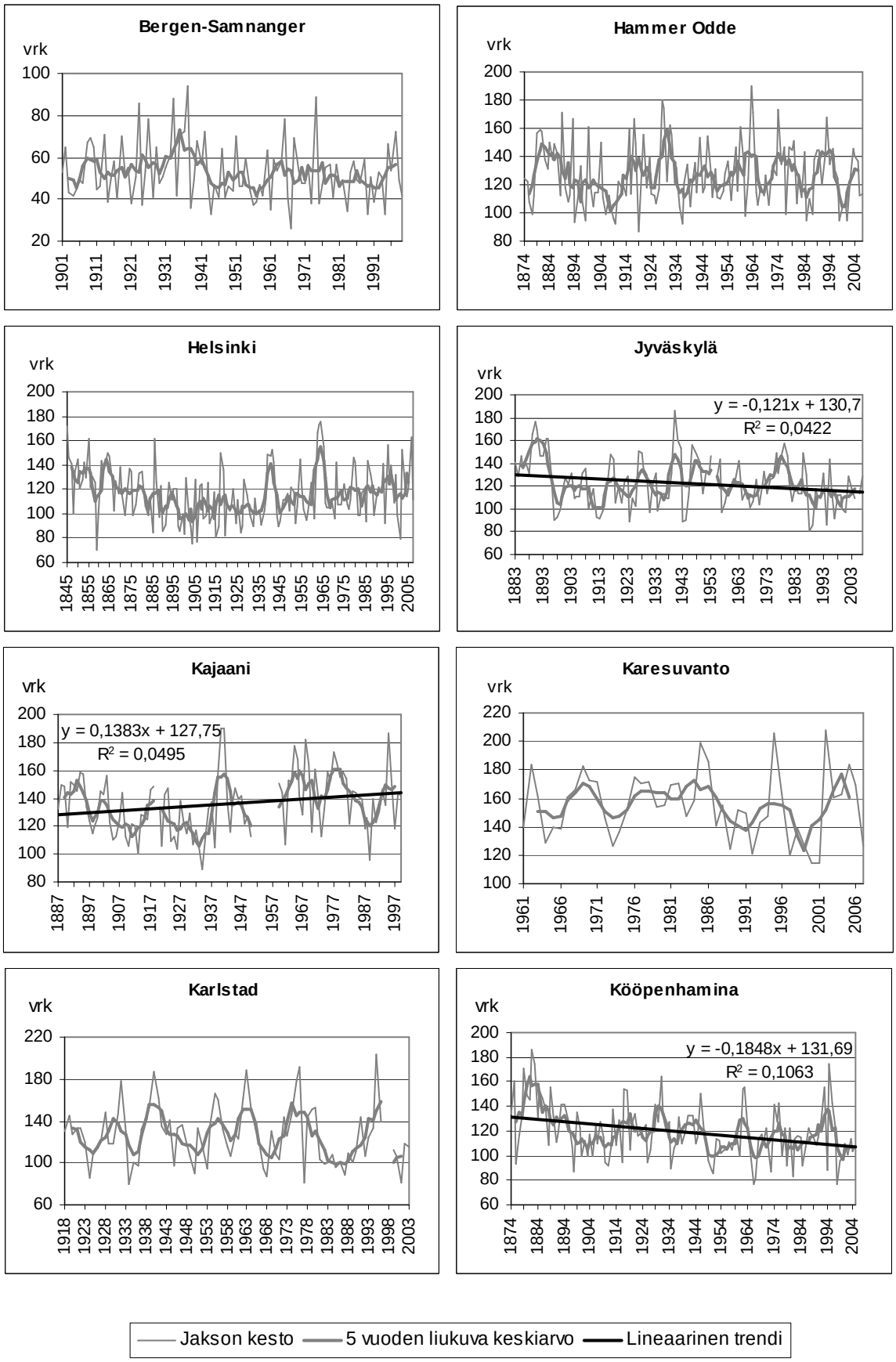
LIITE 3. Sadehavaintoihin perustuvien kesällä alkaneiden pisimpien 10 mm sadekertymäjaksojen pituuksien ajallinen vaihtelu. Lineaarinen trendiviiva on esitetty kuvaajassa vain, jos trendi on ollut tilastollisesti merkitsevä merkitsevyystasolla 0,05. Huomaa, että kuvaajien akselien arvot vaihtelevat.



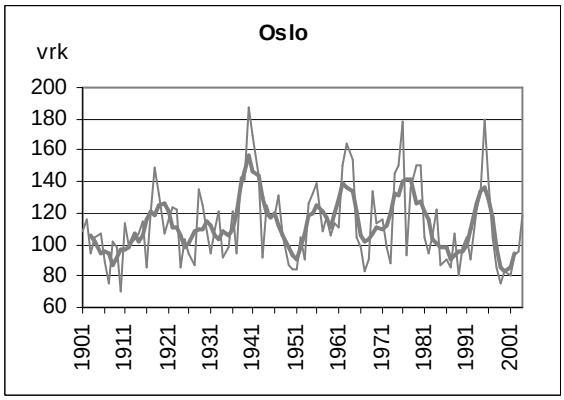
LIITE 3. jatkuu.

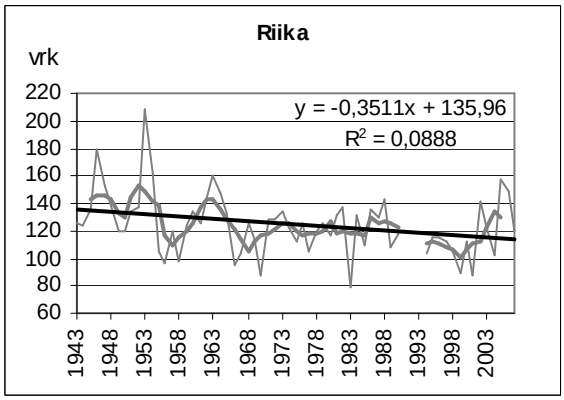


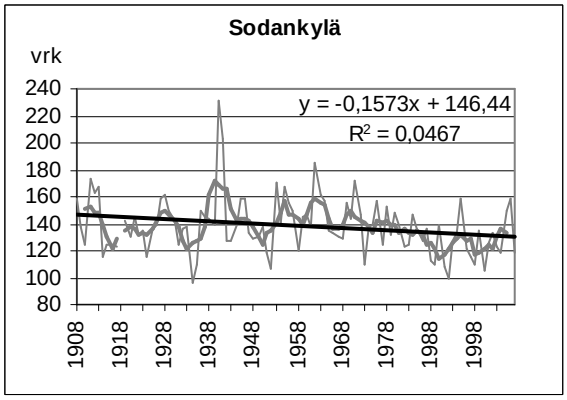
LIITE 4. Sadehavaintoihin perustuvien mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneiden pisimpien 100 mm sadekertymäjaksojen pituuksien ajallinen vaihtelu. Lineaarinen trendiviiva on esitetty kuvaajassa vain, jos trendi on ollut tilastollisesti merkitsevä merkitsevyystasolla 0,05. Huomaa, että kuvaajien akselien arvot vaihtelevat.

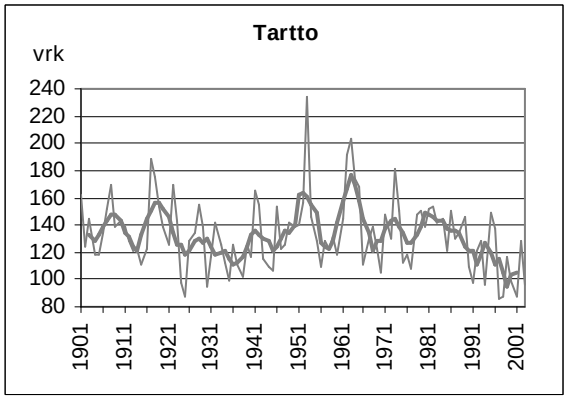


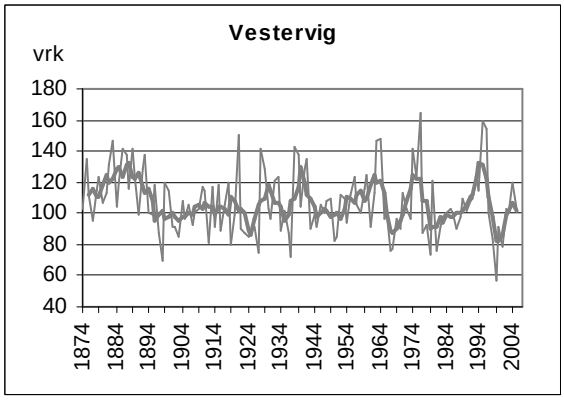
LIITE 4. jatkuu.

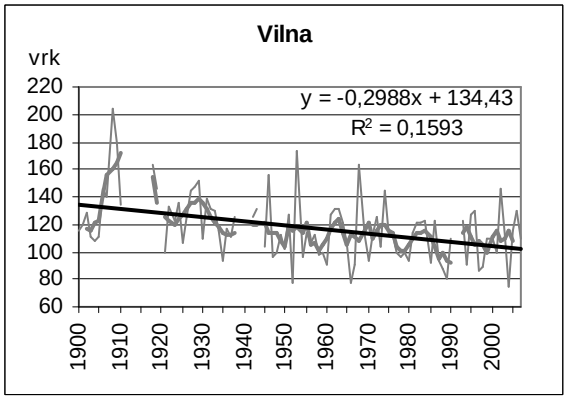


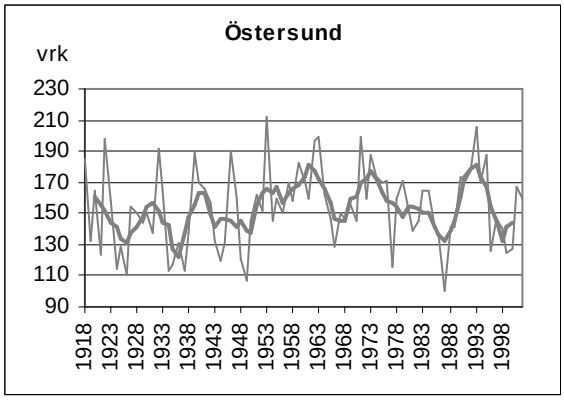






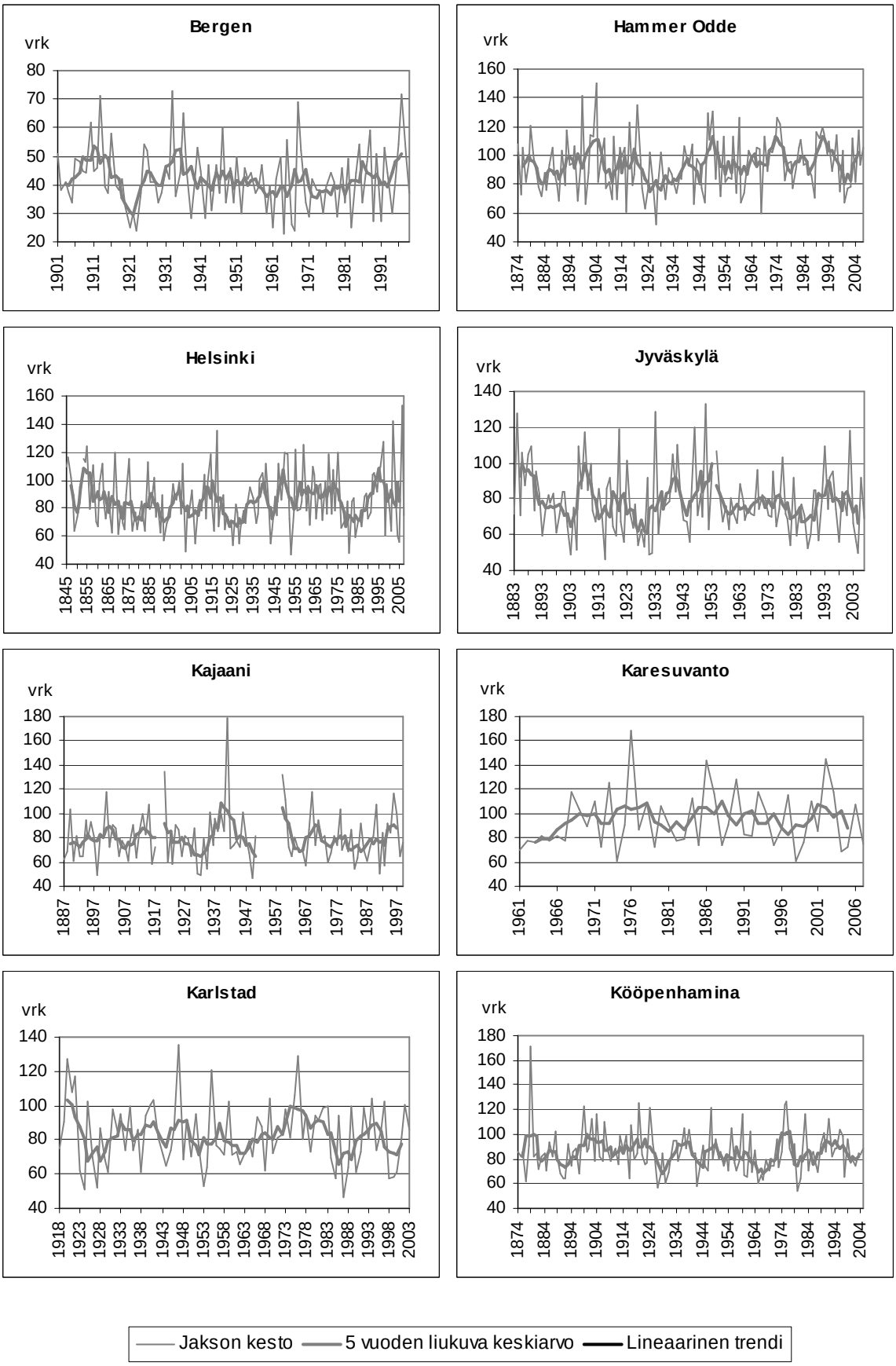




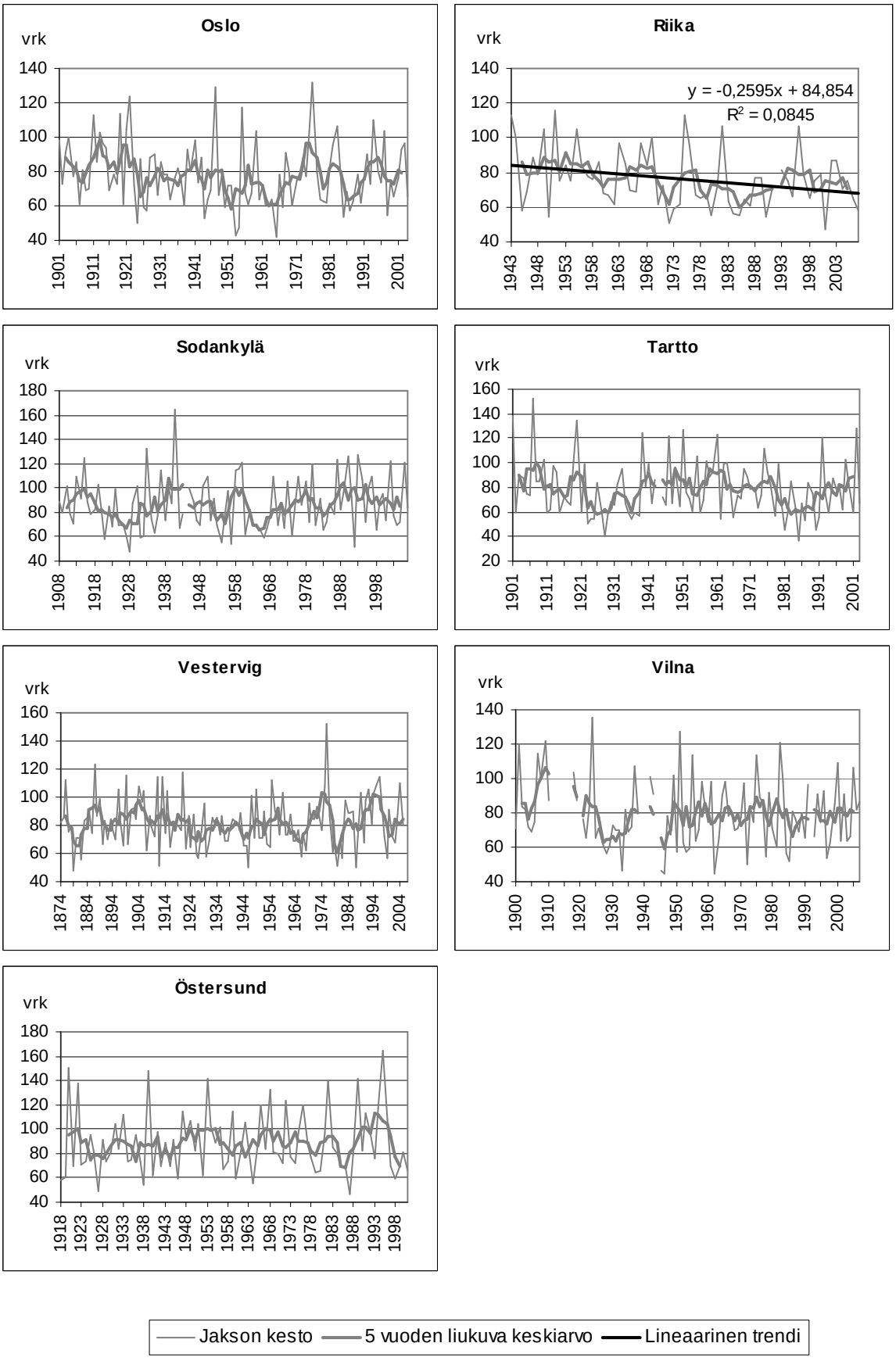


Jakson kesto — 5 vuoden liukuva keskiarvo — Lineaarinen trendi

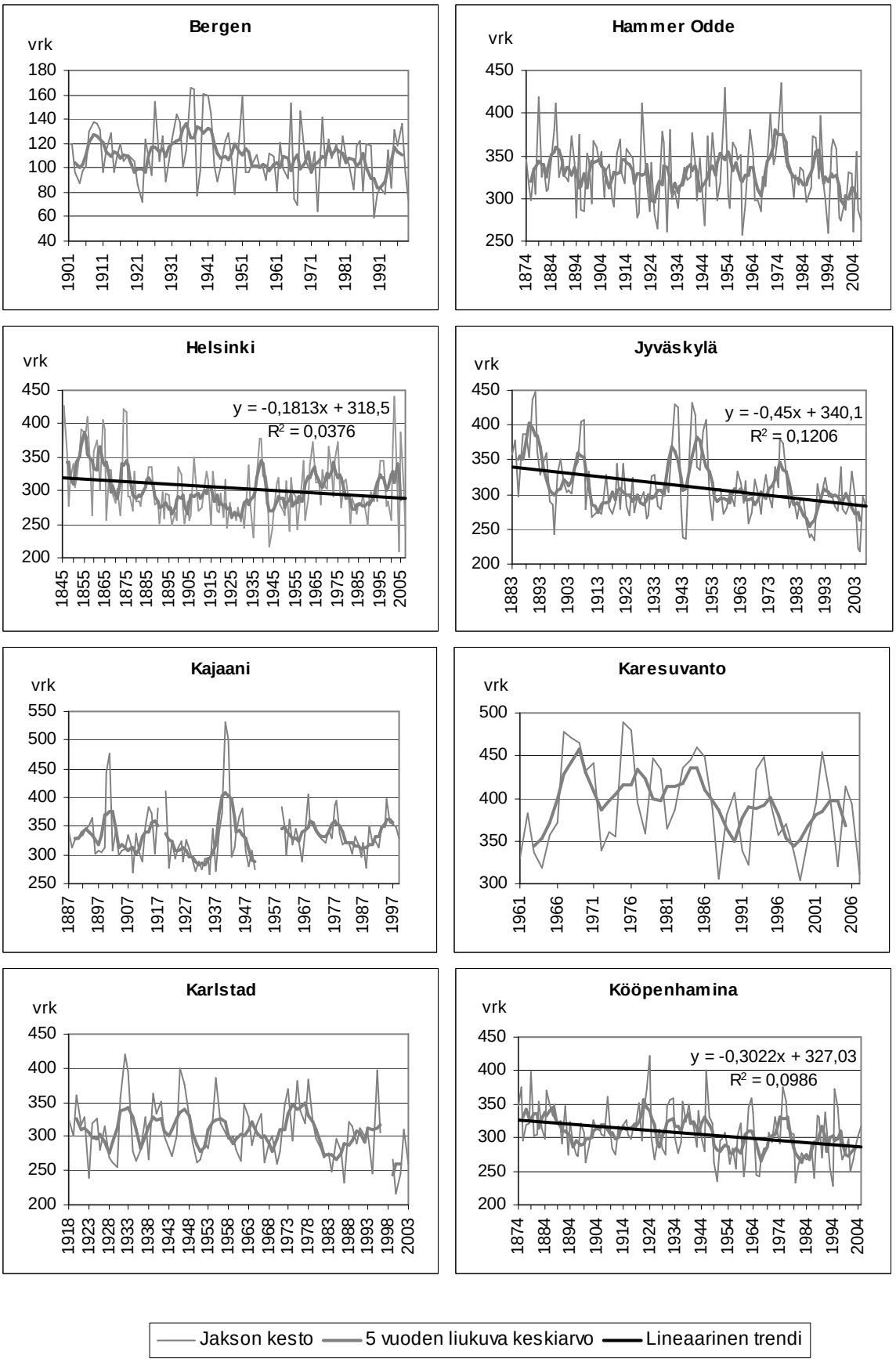
LIITE 5. Sadehavaintoihin perustuvien kesällä alkaneiden pisimpien 100 mm sadekertymäjaksojen pituuksien ajallinen vaihtelu. Lineaarinen trendiviiva on esitetty kuvaajassa vain, jos trendi on ollut tilastollisesti merkitsevä merkitsevyystasolla 0,05. Huomaa, että kuvaajien akselien arvot vaihtelevat.



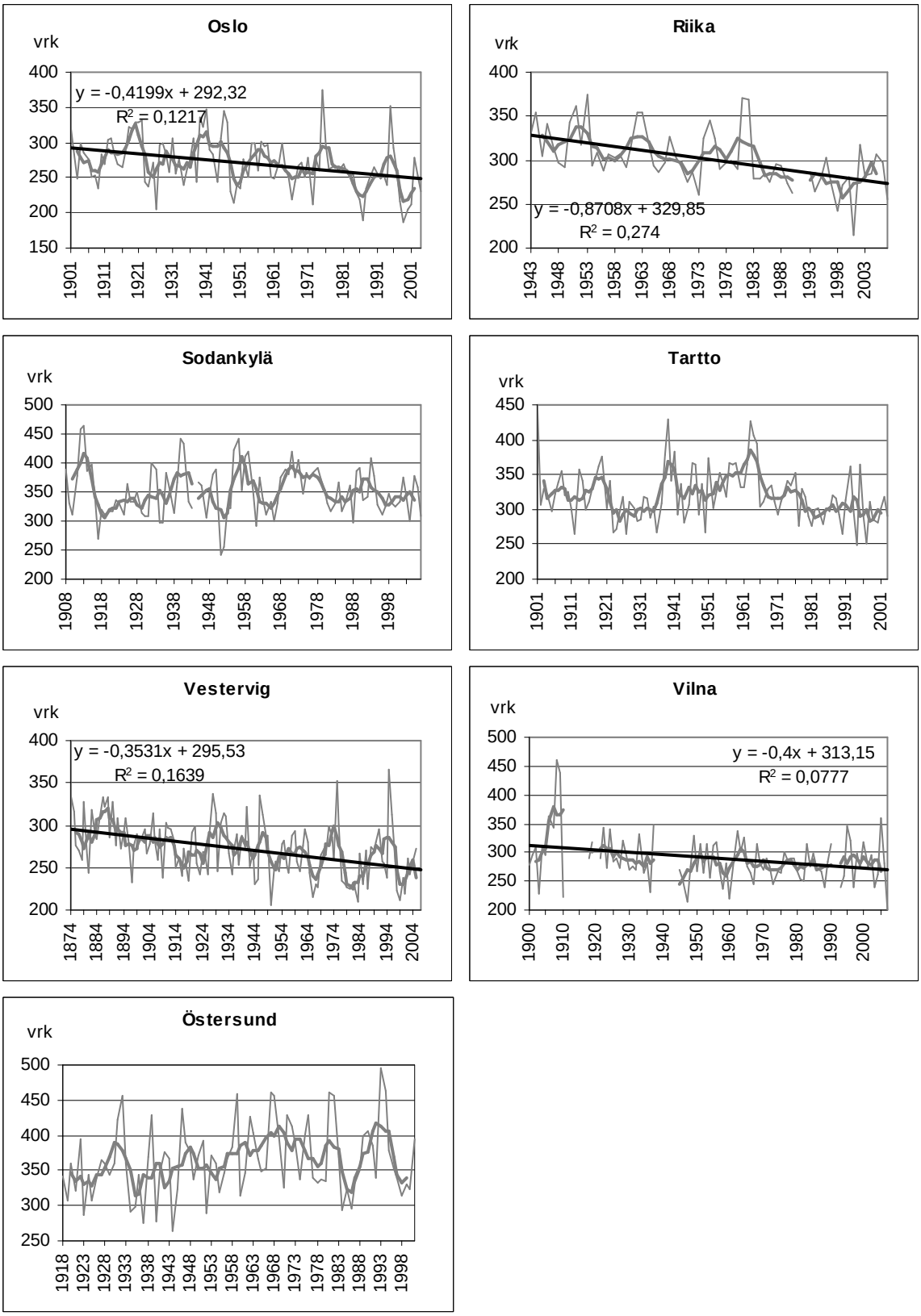
LIITE 5. jatkuu.



LIITE 6. Sadehavaintoihin perustuvien mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneiden pisimpien 400 mm sadekertymäjaksojen pituuksien ajallinen vaihtelu. Lineaarinen trendiviiva on esitetty kuvaajassa vain, jos trendi on ollut tilastollisesti merkitsevä merkitsevyystasolla 0,05. Huomaa, että kuvaajien akselien arvot vaihtelevat.



LIITE 6. jatkuu.



LIITE 7. Sadehavaintoihin perustuvien pisimpien sadekertymäjaksojen trendien suuruudet ja tilastolliset merkitsevyydet. Taulukossa: k = pienimmän neliösumman mukaisen suoran kulmakerroin, r = Pearsonin korrelaatiokerroin, R^2 = Pearsonin korrelaatiokertoimen neliö, t = t-testin testiarvon itseisarvo, p_t = t-testin mukainen trendin merkitsevyystaso, Z = Mann-Kendallin testin testiarvon itseisarvo ja p_z = Mann-Kendallin testin mukainen trendin merkitsevyystaso.

Asema	**Jakso**	**10 mm, koko vuosi**						
		k	**r**	**R^2**	**t**	**p_t**	**Z**	**p_z**
Bergen-Samnanger	1901–1999	-0,0303	-0,1279	0,0164	1,2699	>0,10	1,16	>0,10
Hammer Odde	1874–2007	0,0424	0,1877	0,0352	2,1961	**0,01–0,05**	1,95	0,05–0,10
Helsinki	1845–2007	0,0062	0,0296	0,0009	0,3760	>0,10	0,58	>0,10
Jyväskylä	1884–2007	-0,0353	-0,1536	0,0236	1,7605	0,05–0,10	1,69	0,05–0,10
Kajaani	1887–1999	-0,0223	-0,0846	0,0072	0,8947	>0,10	0,01	>0,10
Karesuvanto	1961–2007	0,1517	0,2117	0,0448	1,4533	>0,10	0,99	>0,10
Karlstad	1918–2003	-0,0709	-0,1656	0,0274	1,5391	>0,10	1,39	>0,10
Kööpenhamina	1874–2005	-0,0065	-0,0268	0,0007	0,3052	>0,10	1,36	>0,10
Oslo	1901–2004	-0,0598	-0,1676	0,0281	1,7172	0,05–0,10	1,97	**0,01–0,05**
Riika	1943–2007	0,086	0,1671	0,0279	1,3452	>0,10	1,10	>0,10
Sodankylä	1908–2007	-0,0437	-0,1426	0,0203	1,4258	>0,10	1,20	>0,10
Tartto	1901–2003	0,0204	0,0633	0,004	0,6374	>0,10	1,11	>0,10
Vestervig	1874–2007	-0,0154	-0,0610	0,0037	0,7023	>0,10	1,69	0,05–0,10
Vilna	1900–2007	-0,1008	-0,3490	0,1218	3,8337	**<0,01**	2,90	**<0,01**
Östersund	1918–2002	-0,0264	-0,0544	0,003	0,4997	>0,10	0,20	>0,10

Asema	**Jakso**	**10 mm, touko-elokuu**						
		k	**r**	**R^2**	**t**	**p_t**	**Z**	**p_z**
Bergen-Samnanger	1901–1999	0,0037	0,0168	0,0003	0,1660	>0,10	0,23	>0,10
Hammer Odde	1874–2007	0,0408	0,8524	0,0334	2,1361	**0,01-0,05**	2,04	**0,01-0,05**
Helsinki	1845–2007	0,0161	0,0711	0,0051	0,9050	>0,10	1,55	>0,10
Jyväskylä	1883–2007	-0,0195	-0,1013	0,0106	1,1297	>0,10	1,11	>0,10
Kajaani	1887–1999	-0,0155	-0,0749	0,0056	0,7911	>0,10	0,88	>0,10
Karesuvanto	1961–2007	-0,0607	-0,1053	0,0111	0,7104	>0,10	1,19	>0,10
Karlstad	1918–2003	0,0102	0,0318	0,001	0,2912	>0,10	0,24	>0,10
Kööpenhamina	1874–2005	0,0493	0,2182	0,0476	2,5495	**0,01-0,05**	2,18	**0,01-0,05**
Oslo	1901–2004	-0,0089	-0,0354	0,0013	0,3575	>0,10	0,40	>0,10
Riika	1943–2007	0,0086	0,0234	0,0005	0,1860	>0,10	0,17	>0,10
Sodankylä	1908–2007	0,0365	0,1368	0,0187	1,3671	>0,10	1,43	>0,10
Tartto	1901–2003	0,013	0,0552	0,003	0,5551	>0,10	0,24	>0,10
Vestervig	1874–2007	0,0111	0,0468	0,0022	0,5381	>0,10	0,58	>0,10
Vilna	1900–2007	0,0361	0,1826	0,0333	1,9121	0,05-0,10	1,73	0,05-0,10
Östersund	1918–2002	0,011	0,0418	0,0017	0,3813	>0,10	0,29	>0,10

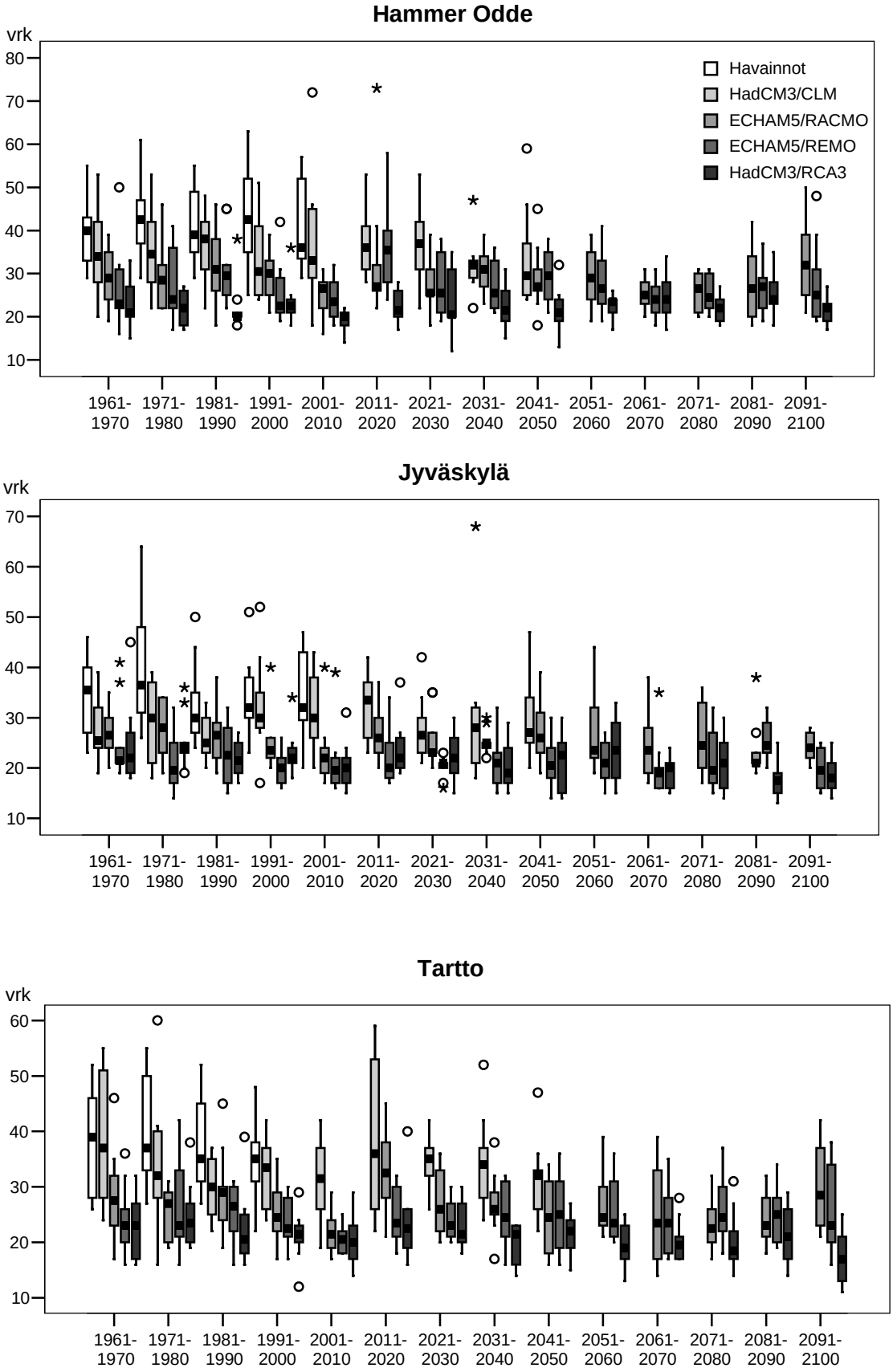
Asema	**Jakso**	**100 mm, koko vuosi**						
		k	**r**	**R^2**	**t**	**p_t**	**Z**	**p_z**
Bergen-Samnanger	1901–1999	-0,0647	-0,1371	0,0188	1,3628	>0,10	1,00	>0,10
Hammer Odde	1874–2007	0,0019	0,0034	0,0000	0,0385	>0,10	0,26	>0,10
Helsinki	1845–2007	-0,0177	-0,0381	0,0015	0,4836	>0,10	0,74	>0,10
Jyväskylä	1883–2007	-0,121	-0,2055	0,0422	2,3292	**0,01-0,05**	1,97	**0,01-0,05**
Kajaani	1887–1999	0,1383	0,2226	0,0495	2,3059	**0,01-0,05**	1,74	0,05-0,10
Karesuvanto	1961–2007	-0,1413	-0,0830	0,0069	0,5586	>0,10	0,87	>0,10
Karlstad	1918–2003	-0,1129	-0,1028	0,0106	0,9469	>0,10	1,22	>0,10
Kööpenhamina	1874–2005	-0,1848	-0,3261	0,1063	3,9325	**<0,01**	3,81	**<0,01**
Oslo	1901–2004	0,0313	0,0383	0,0015	0,3874	>0,10	0,12	>0,10
Riika	1943–2007	-0,3511	-0,2981	0,0888	2,4786	**0,01-0,05**	2,25	**0,01-0,05**
Sodankylä	1908–2007	-0,1573	-0,2160	0,0467	2,1901	**0,01-0,05**	2,25	**0,01-0,05**
Tartto	1901–2003	-0,1275	-0,1478	0,0218	1,5016	>0,10	1,46	>0,10
Vestervig	1874–2007	-0,0769	-0,1455	0,0212	1,6891	0,05-0,10	1,84	0,05-0,10
Vilna	1900–2007	-0,2988	-0,3992	0,1593	4,4823	**<0,01**	3,80	**<0,01**
Östersund	1918–2002	0,1183	0,1173	0,0138	1,0761	>0,10	1,18	>0,10

LIITE 7. jatkuu.

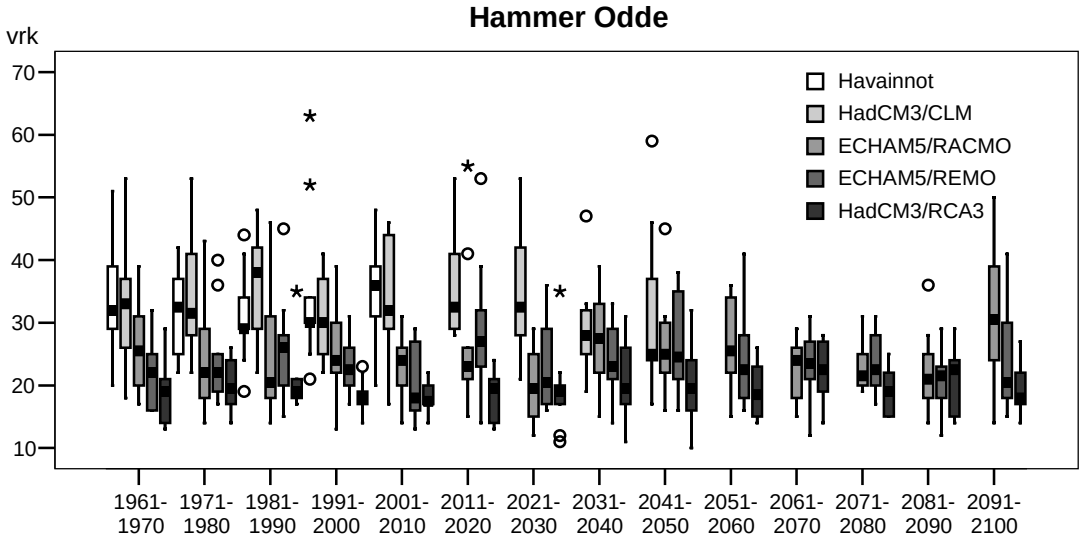
Asema	Jakso	100 mm, touko-elokuu						
		k	r	R^2	t	p_t	Z	p_z
Bergen-Samnanger	1901–1999	-0,0191	-0,0495	0,0024	0,4876	>0,10	0,42	>0,10
Hammer Odde	1874–2007	0,0491	0,1031	0,0106	1,1909	>0,10	1,51	>0,10
Helsinki	1845–2007	0,0137	0,0320	0,001	0,4066	>0,10	0,17	>0,10
Jyväskylä	1883–2007	-0,0561	-0,1107	0,0123	1,2352	>0,10	1,13	>0,10
Kajaani	1887–1999	0,0045	0,0076	0,0000	0,0804	>0,10	-0,06	>0,10
Karesuvanto	1961–2007	0,1658	0,0954	0,0091	0,6428	>0,10	0,63	>0,10
Karlstad	1918–2003	-0,0423	-0,0566	0,0032	0,5195	>0,10	0,09	>0,10
Kööpenhamina	1874–2005	-0,026	-0,0579	0,0034	0,6616	>0,10	0,37	>0,10
Oslo	1901–2004	-0,0711	-0,1171	0,0137	1,1904	>0,10	1,31	>0,10
Riika	1943–2007	-0,2595	-0,2907	0,0845	2,4111	**0,01-0,05**	2,09	**0,01-0,05**
Sodankylä	1908–2007	0,0585	0,0790	0,0062	0,7848	>0,10	0,75	>0,10
Tartto	1901–2003	-0,0689	-0,0909	0,0083	0,9168	>0,10	0,56	>0,10
Vestervig	1874–2007	0,0072	0,0157	0,0002	0,1803	>0,10	0,13	>0,10
Vilna	1900–2007	-0,052	-0,0811	0,0066	0,8376	>0,10	0,42	>0,10
Östersund	1918–2002	0,0506	0,0487	0,0024	0,4415	>0,10	0,32	>0,10

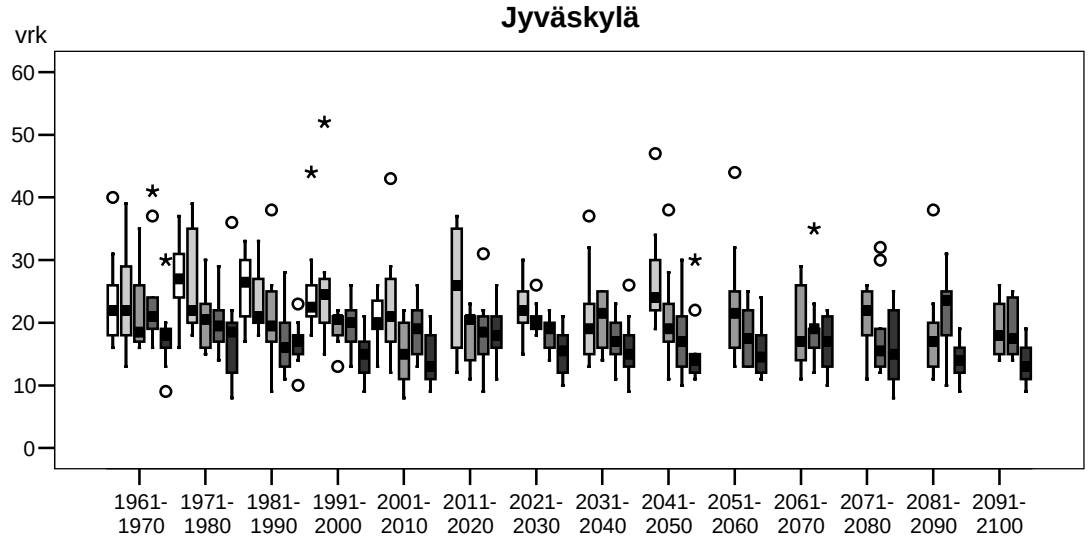
Asema	Jakso	400 mm, koko vuosi						
		k	r	R^2	t	p_t	Z	p_z
Bergen-Samnanger	1901–1999	-0,1573	-0,1944	0,0378	1,9522	0,05-0,10	1,75	0,05-0,10
Hammer Odde	1874–2007	-0,0794	-0,0819	0,0067	0,9445	>0,10	0,94	>0,10
Helsinki	1845–2007	-0,1813	-0,1940	0,0376	2,5165	**0,01-0,05**	2,16	**0,01-0,05**
Jyväskylä	1883–2007	-0,45	-0,3473	0,1206	4,1078	**<0,01**	3,74	**<0,01**
Kajaani	1887–1999	0,0661	0,0498	0,0025	0,5253	>0,10	1,12	>0,10
Karesuvanto	1961–2007	-0,5986	-0,1545	0,0239	1,0487	>0,10	0,86	>0,10
Karlstad	1918–2003	-0,3338	-0,1940	0,0376	1,8123	0,05-0,10	1,64	>0,10
Kööpenhamina	1874–2005	-0,3022	-0,3139	0,0986	3,7699	**<0,01**	3,71	**<0,01**
Oslo	1901–2004	-0,4199	-0,3488	0,1217	3,7592	**<0,01**	3,83	**<0,01**
Riika	1943–2007	-0,8708	-0,5235	0,274	4,8762	**<0,01**	4,65	**<0,01**
Sodankylä	1908–2007	-0,0328	-0,0224	0,0005	0,2216	>0,10	0,02	>0,10
Tartto	1901–2003	-0,2308	-0,1795	0,0322	1,8335	0,05-0,10	1,958	0,05-0,10
Vestervig	1874–2007	-0,3531	-0,4049	0,1639	5,0876	**<0,01**	5,05	**<0,01**
Vilna	1900–2007	-0,4	-0,2787	0,0777	2,7683	**<0,01**	2,35	**0,01-0,05**
Östersund	1918–2002	0,4208	0,2038	0,0415	1,8850	0,05-0,10	1,56	>0,10

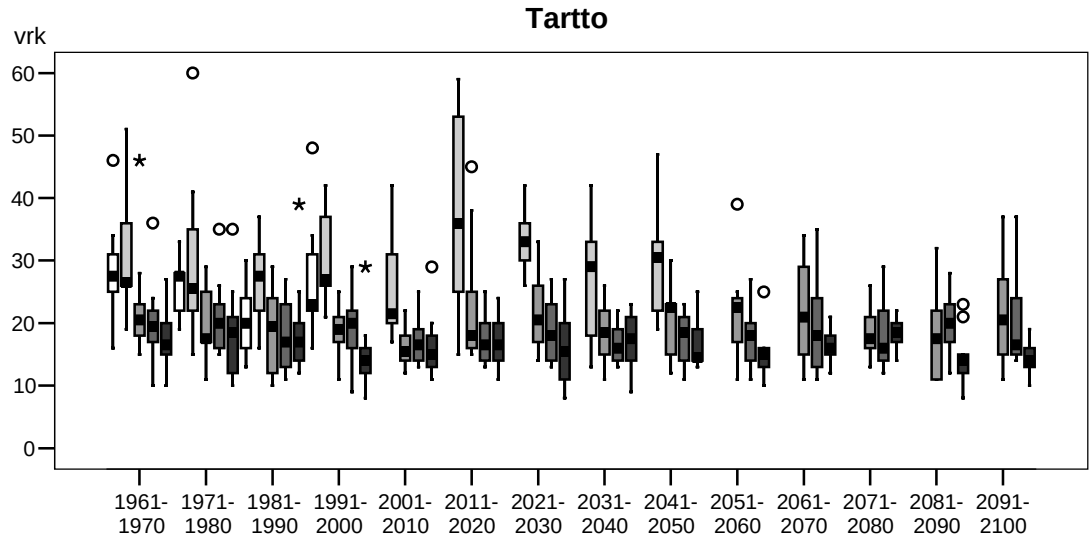
LIITE 8. Mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneiden pisimpien 10 mm sadekertymäjaksojen pituuden vaihtelu vuosina 1961–2100. Kuvaajissa on esitetty Hammer odden ja Jyväskylän vuosien 1961–2007 ja Tarton vuosien 1961–2000 havaintoihin perustuva vaihtelu sekä neljän ilmastomallin tuloksiin perustuva vaihtelu vuosikymmenittäin. Pistehavaintoihin perustuvat arvot eivät ole suoraan vertailukelpoisia ilmastomallinnusten mukaisten hilaruudukosta poimittujen arvojen kanssa. Huomaa, että vuorokausi-akselin (vrk) arvot vaihtelevat.



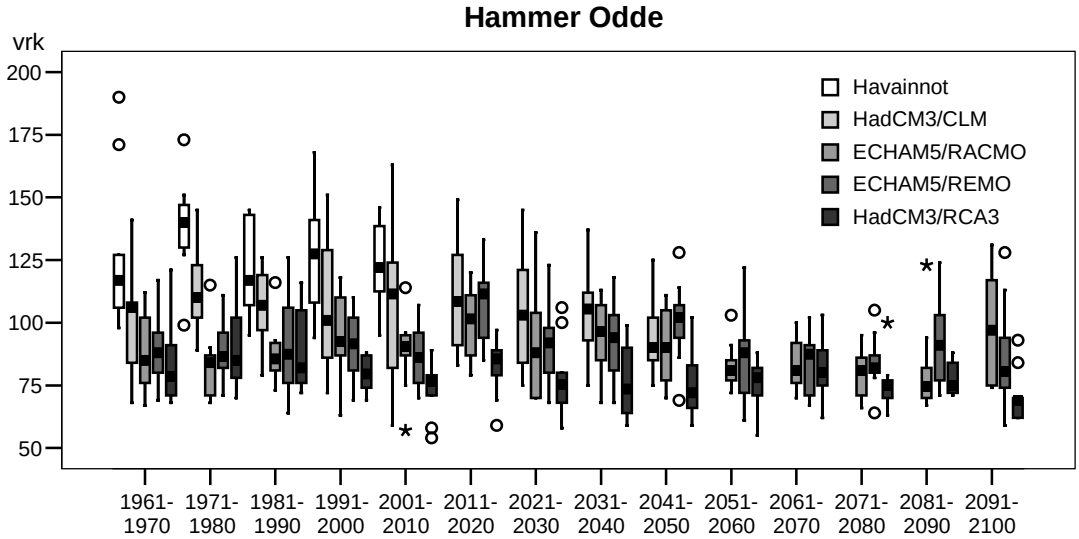
LIITE 9. Kesällä (touko-elokuu) alkaneiden pisimpien 10 mm sadekertymäjaksojen pituuden vaihtelu vuosina 1961–2100. Kuvaajissa on esitetty Hammer odden ja Jyväskylän vuosien 1961–2007 ja Tarton vuosien 1961–2000 havaintoihin perustuva vaihtelu sekä neljän ilmastomallin tuloksiin perustuva vaihtelu vuosikymmenittäin. Pistehavaintoihin perustuvat arvot eivät ole suoraan vertailukelpoisia ilmastomallinnusten mukaisten hilaruudukosta poimittujen arvojen kanssa. Huomaa, että vuorokausi-akselin (vrk) arvot vaihtelevat

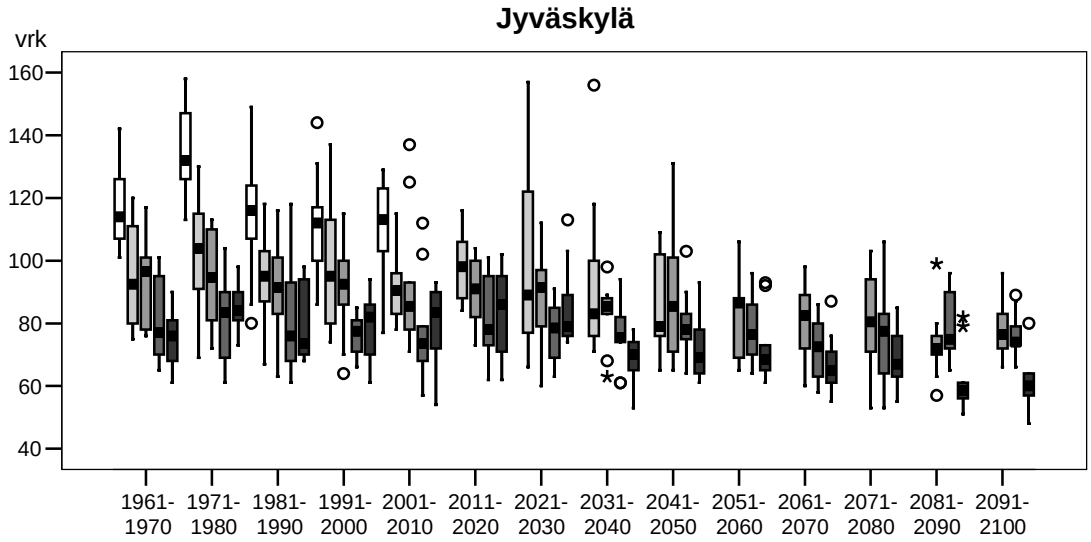


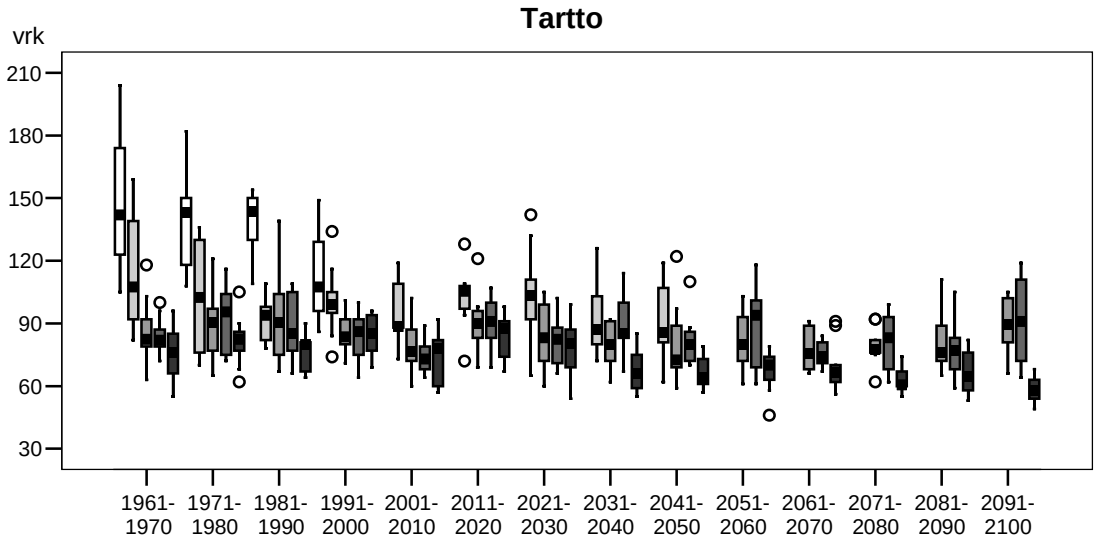




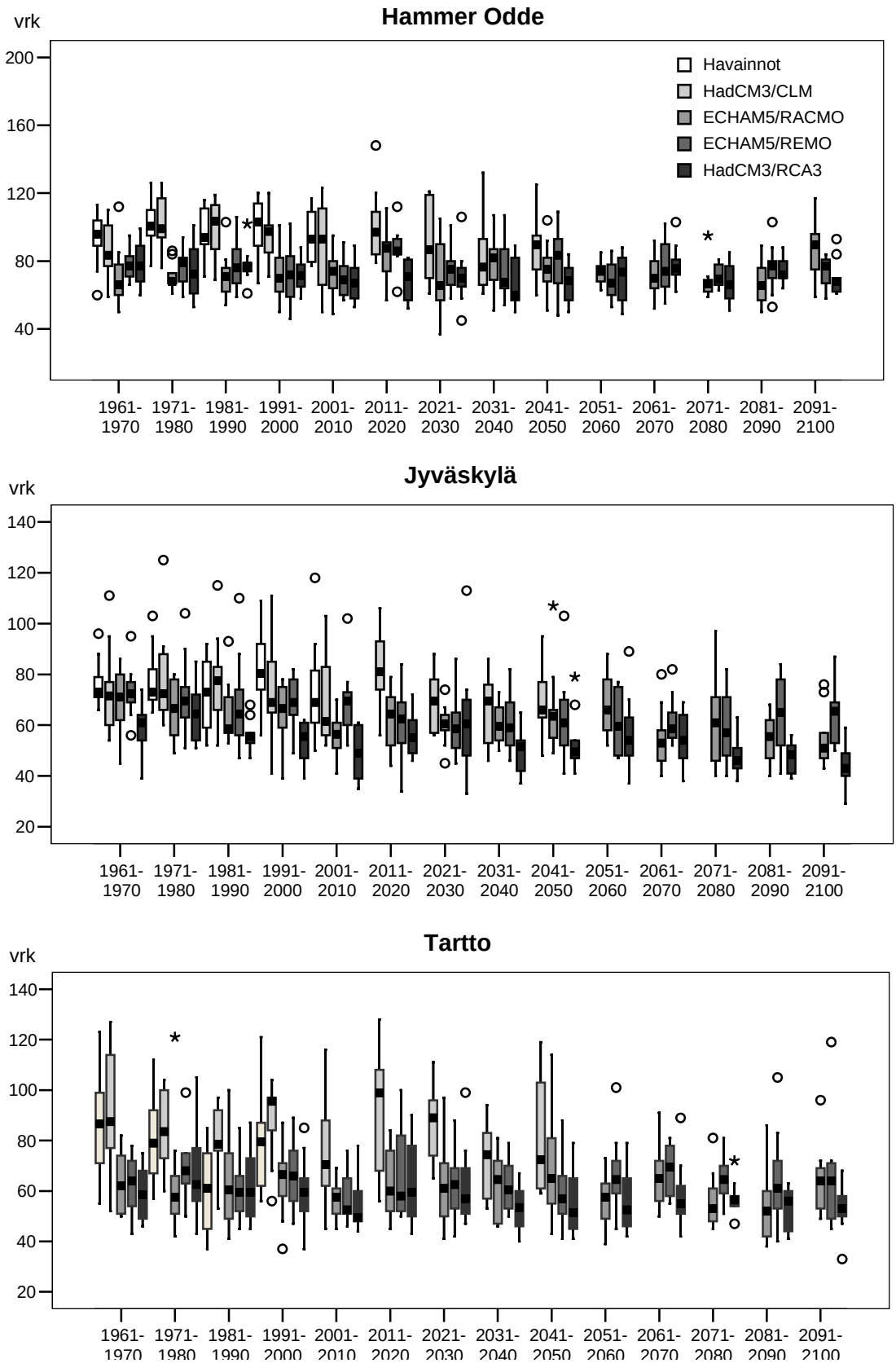
LIITE 10. Mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneiden pisimpien 100 mm sadekertymäjaksojen pituuden vaihtelu vuosina 1961–2100. Kuvaajissa on esitetty Hammer odden ja Jyväskylän vuosien 1961–2007 ja Tarton vuosien 1961–2000 havaintoihin perustuva vaihtelu sekä neljän ilmastomallin tuloksiin perustuva vaihtelu vuosikymmenittäin. Pistehavaintoihin perustuvat arvot eivät ole suoraan vertailukelpoisia ilmastomallinnusten mukaisten hilaruudukosta poimittujen arvojen kanssa. Huomaa, että vuorokausi-akselin (vrk) arvot vaihtelevat



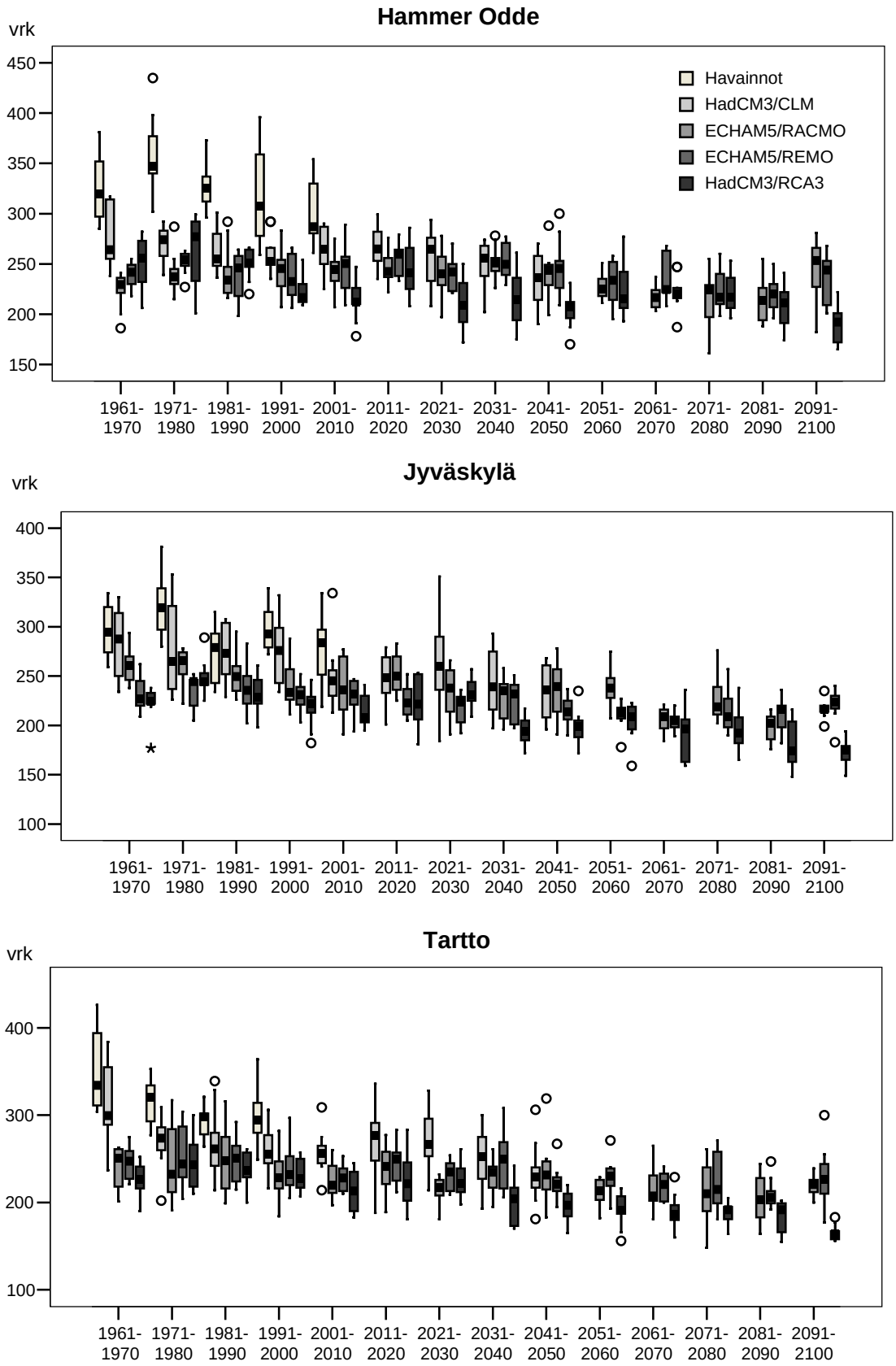




LIITE 11. Kesällä (touko-elokuu) alkaneiden pisimpien 100 mm sadekertymäjaksojen pituuden vaihtelu vuosina 1961–2100. Kuvaajissa on esitetty Hammer odden ja Jyväskylän vuosien 1961–2007 ja Tarton vuosien 1961–2000 havaintoihin perustuva vaihtelu sekä neljän ilmastomallin tuloksiin perustuva vaihtelu vuosikymmenittäin. Pistehavaintoihin perustuvat arvot eivät ole suoraan vertailukelpoisia ilmastomallinnusten mukaisten hilaruudukosta poimittujen arvojen kanssa. Huomaa, että vuorokausi-akselin (vrk) arvot vaihtelevat



LIITE 12. Mihin tahansa aikaan vuodesta alkaneiden pisimpien 400 mm sadekertymäjaksojen pituuden vaihtelu vuosina 1961–2100. Kuvaajissa on esitetty Hammer odden ja Jyväskylän vuosien 1961–2007 ja Tarton vuosien 1961–2000 havaintoihin perustuva vaihtelu sekä neljän ilmastomallin tuloksiin perustuva vaihtelu vuosikymmenittäin. Pistehavaintoihin perustuvat arvot eivät ole suoraan vertailukelpoisia ilmastomallinnusten mukaisten hilaruudukosta poimittujen arvojen kanssa. Huomaa, että vuorokausi-akselin (vrk) arvot vaihtelevat



LIITE 13. Ilmastomallinnuksiin perustuvien pisimpien sadekertymäjaksojen trendien suuruudet ja tilastolliset merkitsevyydet. Trendit on laskettu HadCM3/CLM-mallissa vuosille 2001–2050, HadCM3/RCA3 mallissa vuosille 2001–2099 ja ECHAM5/RACMO- ja ECHAM5/REMO-mallissa vuosille 2001–2100. Taulukossa: k = pienimmän neliösumman mukaisen suoran kulmakerroin, r = Pearsonin korrelaatiokerroin, R^2 = Pearsonin korrelaatiokertoimen neliö, t = t-testin testiarvon itseisarvo, p_t = t-testin mukainen trendin merkitsevyystaso, Z = Mann-Kendallin testin testiarvon itseisarvo ja p_z = Mann-Kendallin testin mukainen trendin merkitsevyystaso.

Asema	**Ilmastomalli**	**10 mm, koko vuosi**						
		k	**r**	**R^2**	**t**	**p_t**	**Z**	**p_z**
Hammer	HadCM3/CLM	-0,1338	-0,1887	0,0356	1,3314	>0,10	1,41	>0,10
Odde	HadCM3/RCA3	0,0111	0,1573	0,004	1,5689	>0,10	1,71	0,05-0,10
	ECHAM5/RACMO	0,0017	0,0064	0,0000	0,0632	>0,10	0,07	>0,10
	ECHAM5/REMO	-0,0378	-0,1503	0,0226	1,5045	>0,10	1,44	>0,10
Jyväskylä	HadCM3/CLM	-0,0345	-0,0569	0,0032	0,3948	>0,10	1,03	>0,10
	HadCM3/RCA3	-0,0382	-0,2224	0,0495	2,2470	**0,01-0,05**	2,17	**0,01-0,05**
	ECHAM5/RACMO	-0,0049	-0,0256	0,0007	0,2535	>0,10	0,32	>0,10
	ECHAM5/REMO	0,0131	0,0768	0,0059	0,7629	>0,10	0,91	>0,10
Tartto	HadCM3/CLM	-0,0053	-0,0089	0,0000	0,0617	>0,10	0,17	>0,10
	HadCM3/RCA3	-0,0464	-0,2155	0,0697	2,1737	**0,01-0,05**	2,11	**0,01-0,05**
	ECHAM5/RACMO	-0,0105	-0,0461	0,0021	0,4572	>0,10	0,45	>0,10
	ECHAM5/REMO	0,0311	0,1576	0,0248	1,5797	>0,10	1,43	>0,10

Asema	**Ilmastomalli**	**10 mm, kesä**						
		k	**r**	**R^2**	**t**	**p_t**	**Z**	**p_z**
Hammer	HadCM3/CLM	-0,1303	-0,1892	0,0358	1,3346	>0,10	1,93	0,05-0,10
Odde	HadCM3/RCA3	0,0054	0,1048	0,0110	1,0382	>0,10	1,23	>0,10
	ECHAM5/RACMO	0,0171	0,0640	0,0041	0,6347	>0,10	0,62	>0,10
	ECHAM5/REMO	-0,0203	-0,0832	0,0069	0,8262	>0,10	0,50	>0,10
Jyväskylä	HadCM3/CLM	0,0402	0,0738	0,0054	0,5128	>0,10	0,30	>0,10
	HadCM3/RCA3	-0,0238	-0,0962	0,0214	0,9523	>0,10	0,94	>0,10
	ECHAM5/RACMO	0,0209	0,1001	0,01	0,9957	>0,10	0,85	>0,10
	ECHAM5/REMO	0,0226	0,1243	0,0154	1,2398	>0,10	0,72	>0,10
Tartto	HadCM3/CLM	0,0025	0,0036	0,0000	0,0247	>0,10	0,24	>0,10
	HadCM3/RCA3	-0,0258	-0,1150	0,0132	1,1403	>0,10	0,73	>0,10
	ECHAM5/RACMO	0,0127	0,05333	0,0028	0,5286	>0,10	0,81	>0,10
	ECHAM5/REMO	0,0288	0,1652	0,0273	1,6582	>0,10	1,19	>0,10

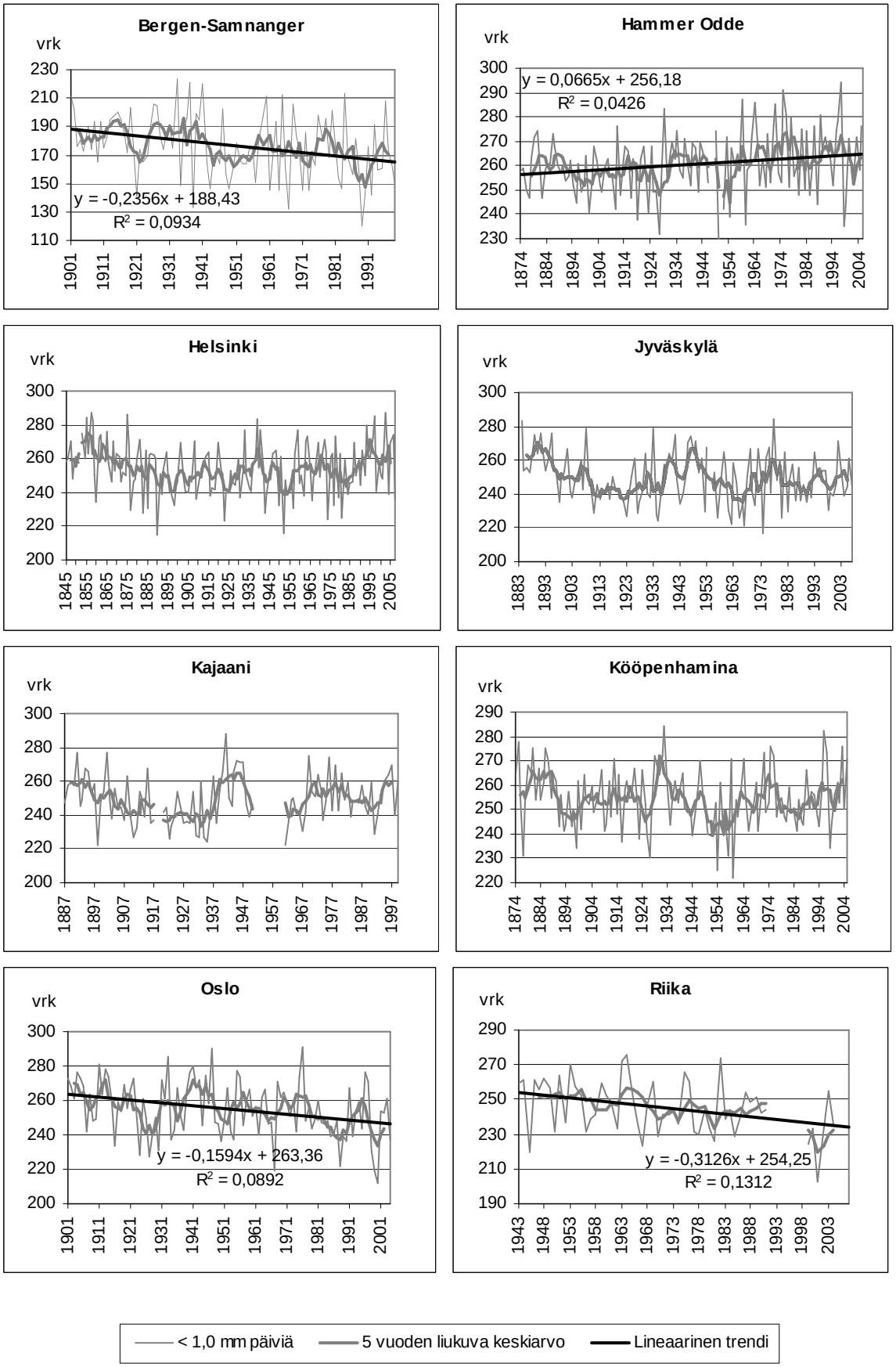
Asema	**Ilmastomalli**	**100 mm, koko vuosi**						
		k	**r**	**R^2**	**t**	**p_t**	**Z**	**p_z**
Hammer	HadCM3/CLM	-0,3042	-0,1921	0,0369	1,3561	>0,10	1,32	>0,10
Odde	HadCM3/RCA3	-0,0832	-0,0958	0,0092	0,9482	>0,10	1,16	>0,10
	ECHAM5/RACMO	-0,0962	-0,1701	0,0289	1,7090	0,05-0,10	2,61	**<0,01**
	ECHAM5/REMO	-0,1125	-0,1952	0,0381	1,9707	0,05-0,10	2,06	**0,01-0,05**
Jyväskylä	HadCM3/CLM	-0,1236	-0,0865	0,0075	0,6017	>0,10	1,10	>0,10
	HadCM3/RCA3	-0,2884	-0,5431	0,2949	6,3700	**<0,01**	6,04	**<0,01**
	ECHAM5/RACMO	-0,1721	-0,3363	0,1131	3,5351	**<0,01**	3,20	**<0,01**
	ECHAM5/REMO	-0,0245	-0,0608	0,0037	0,6033	>0,10	0,41	>0,10
Tartto	HadCM3/CLM	-0,1941	-0,1592	0,0253	1,1168	>0,10	1,29	>0,10
	ECHAM5/RACMO	0,0084	0,0180	0,0003	0,1787	>0,10	0,29	>0,10
	ECHAM5/REMO	-0,0027	-0,0053	0,0000	0,0528	>0,10	0,37	>0,10
	HadCM3/RCA3	-0,2412	-0,4839	0,2342	5,4466	**<0,01**	4,85	**<0,01**

Asema	**Ilmastomalli**	**100 mm, kesä**						
		k	**r**	**R^2**	**t**	**p_t**	**Z**	**p_z**
Hammer	HadCM3/CLM	-0,1842	-0,1166	0,0136	0,8135	>0,10	0,63	>0,10
Odde	HadCM3/RCA3	-0,006	0,0854	0,0073	0,8437	>0,10	0,77	>0,10
	ECHAM5/RACMO	-0,0179	-0,0334	0,0011	0,3305	>0,10	0,84	>0,10
	ECHAM5/REMO	-0,0494	-0,1036	0,0107	1,0307	>0,10	0,65	>0,10
Jyväskylä	HadCM3/CLM	-0,1984	-0,1941	0,0377	1,3711	>0,10	1,29	>0,10
	HadCM3/RCA3	-0,1173	-0,2082	0,0433	2,0962	**0,01-0,05**	2,21	**0,01-0,05**
	ECHAM5/RACMO	-0,0327	-0,0771	0,0059	0,7651	>0,10	0,96	>0,10
	ECHAM5/REMO	-0,0166	-0,0382	0,0015	0,3779	>0,10	0,29	>0,10
Tartto	HadCM3/CLM	-0,1238	-0,0869	0,0075	0,6040	>0,10	0,74	>0,10
	HadCM3/RCA3	-0,0883	-0,1323	0,0175	1,3150	>0,10	0,42	>0,10
	ECHAM5/RACMO	-0,027	-0,0556	0,0031	0,5516	>0,10	0,72	>0,10
	ECHAM5/REMO	0,0508	0,1043	0,0109	1,0384	>0,10	1,01	>0,10

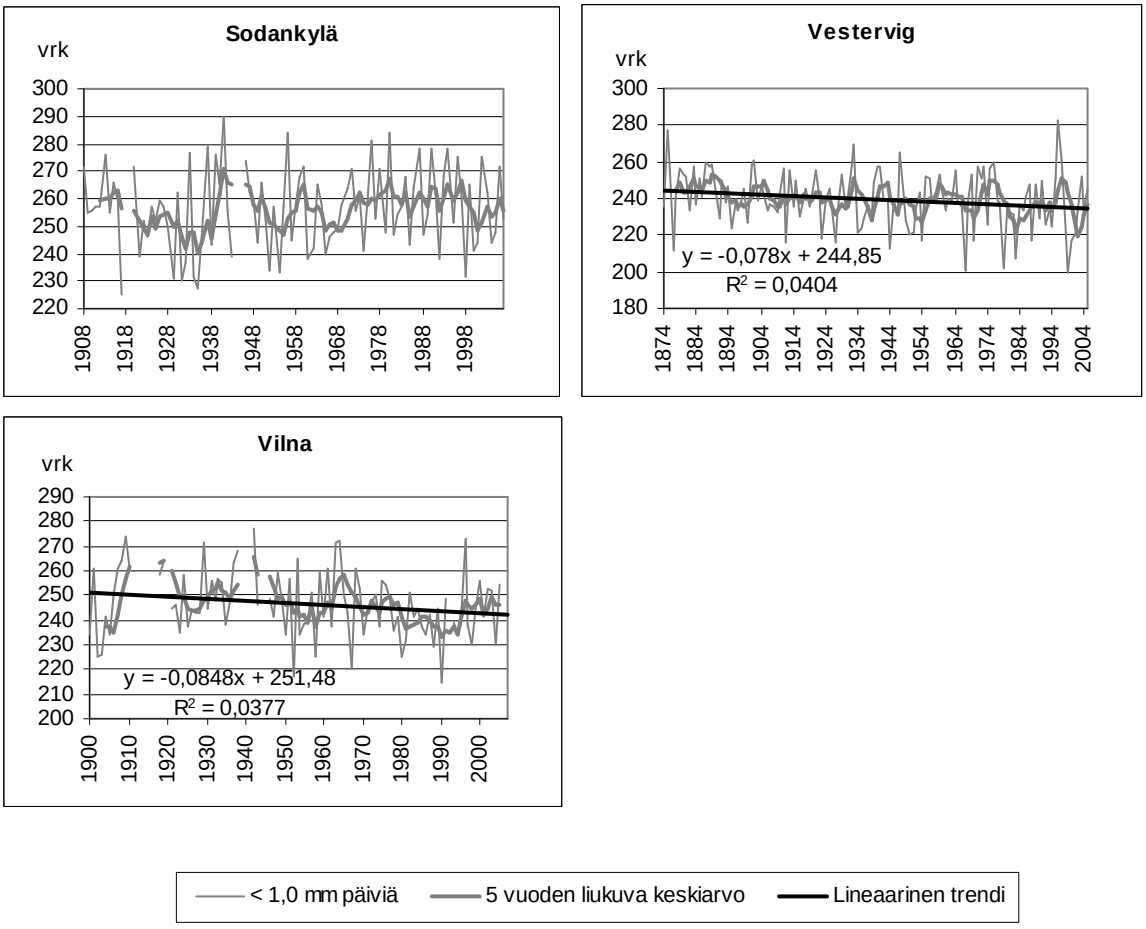
LIITE 13. jatkuu.

Asema	Ilmastomalli	400 mm, koko vuosi						
		k	r	R^2	t	p_t	Z	p_z
Hammer	HadCM3/CLM	-0,7368	-0,4107	0,1687	3,1210	**<0,01**	2,80	**<0,01**
Odde	HadCM3/RCA3	-0,3465	-0,2627	0,0690	2,6813	**<0,01**	2,31	**0,01-0,05**
	ECHAM5/RACMO	-0,2864	-0,3406	0,1160	3,5856	**<0,01**	3,80	**<0,01**
	ECHAM5/REMO	-0,2972	-0,3717	0,1382	3,9636	**<0,01**	3,71	**<0,01**
Jyväskylä	HadCM3/CLM	-0,4077	-0,1715	0,0294	1,2063	>0,10	1,05	>0,10
	HadCM3/RCA3	-0,6281	-0,5808	0,3373	7,0264	**<0,01**	5,88	**<0,01**
	ECHAM5/RACMO	-0,4038	-0,4498	0,2023	4,9852	**<0,01**	4,46	**<0,01**
	ECHAM5/REMO	-0,1524	-0,2587	0,0669	2,6507	**<0,01**	2,47	**0,01-0,05**
Tartto	HadCM3/CLM	-0,6572	-0,2725	0,0743	1,9624	0,05-0,10	2,00	**0,01–0,05**
	HadCM3/RCA3	-0,6811	-0,6318	0,3992	8,0287	**<0,01**	6,74	**<0,01**
	ECHAM5/RACMO	-0,2280	-0,2607	0,0680	2,6735	**<0,01**	2,56	**0,01-0,05**
	ECHAM5/REMO	-0,2262	-0,2586	0,0669	2,6498	**<0,01**	2,77	**<0,01**

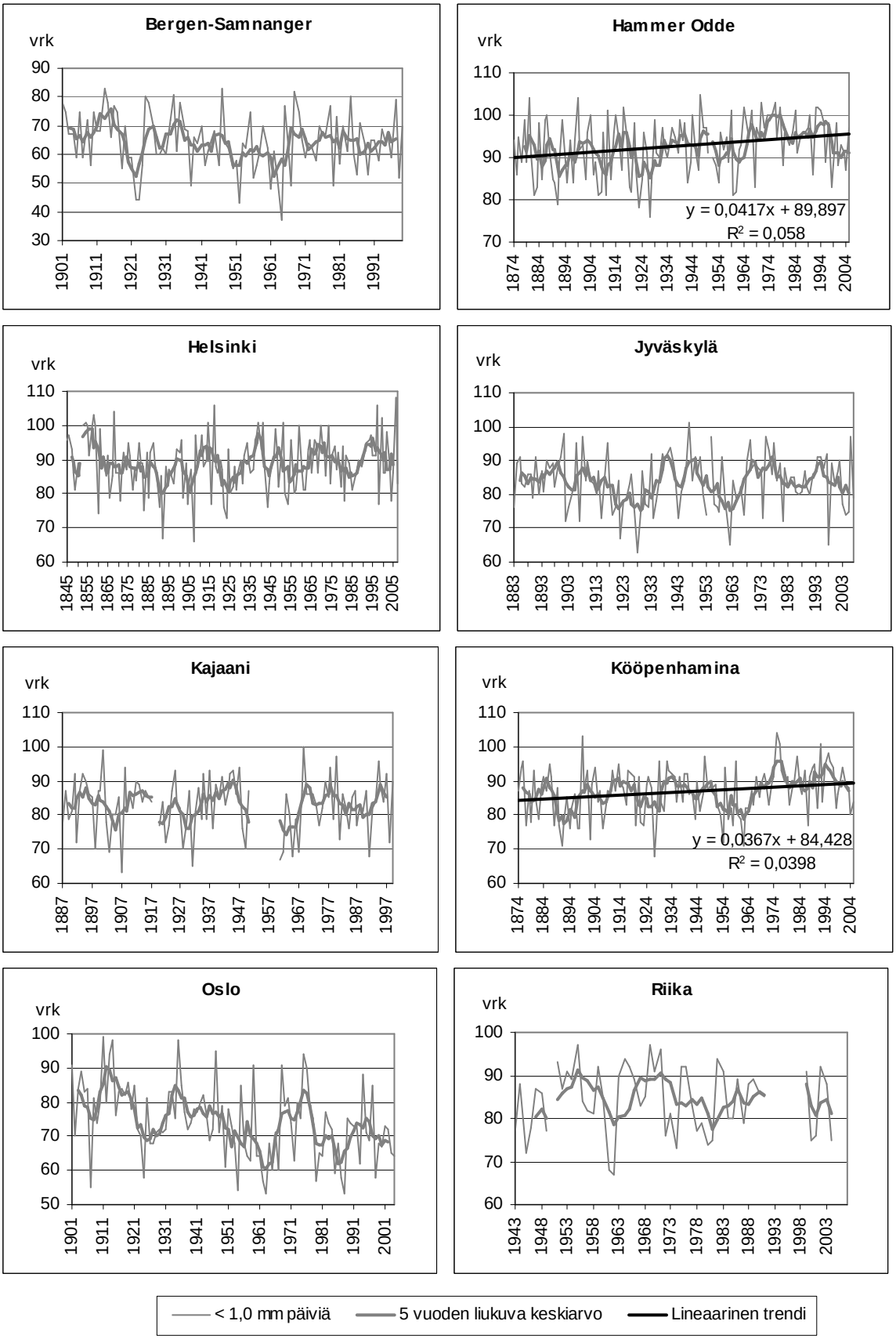
LIITE 14. Sadehavaintoihin perustuvien koko vuoden <1,0 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu. Lineaarinen trendiviiva on esitetty kuvaajassa vain, jos trendi on ollut tilastollisesti merkitsevä merkitsevyystasolla 0,05. Huomaa, että kuvaajien akselien arvot vaihtelevat.



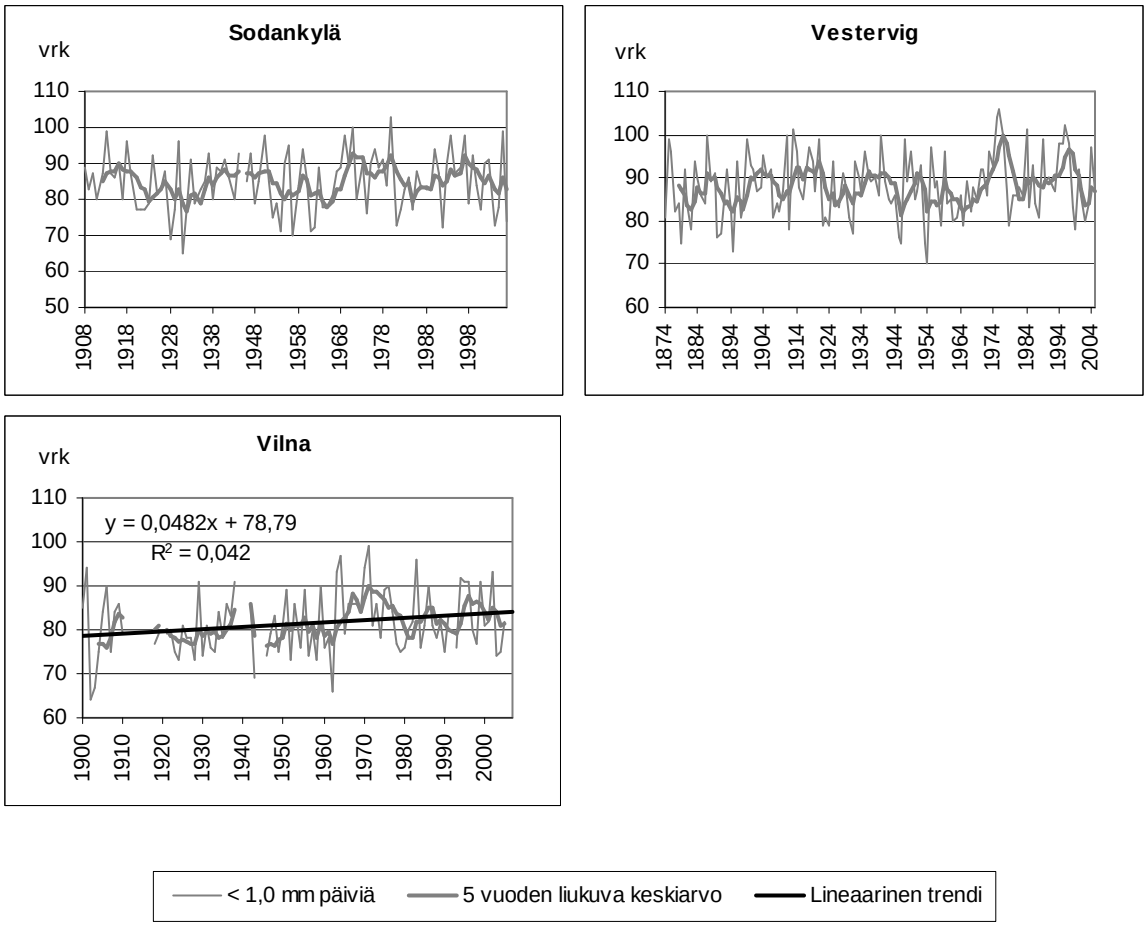
LIITE 14. jatkuu.



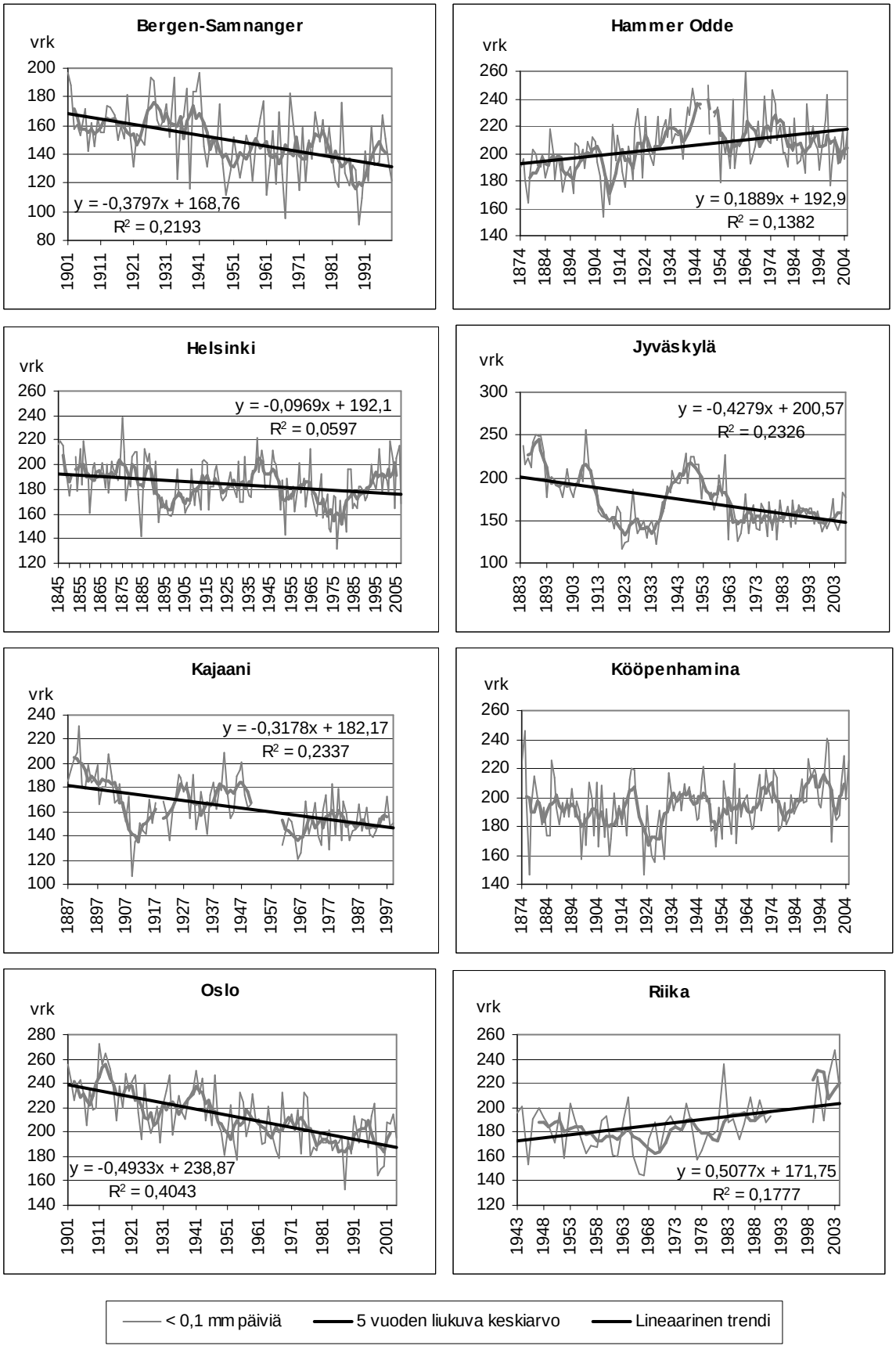
LIITE 15. Sadehavaintoihin perustuvien kesän (touko-elokuu) <1,0 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu. Lineaarinen trendiviiva on esitetty kuvaajassa vain, jos trendi on ollut tilastollisesti merkitsevä merkitsevyystasolla 0,05. Huomaa, että kuvaajien akselien arvot vaihtelevat.



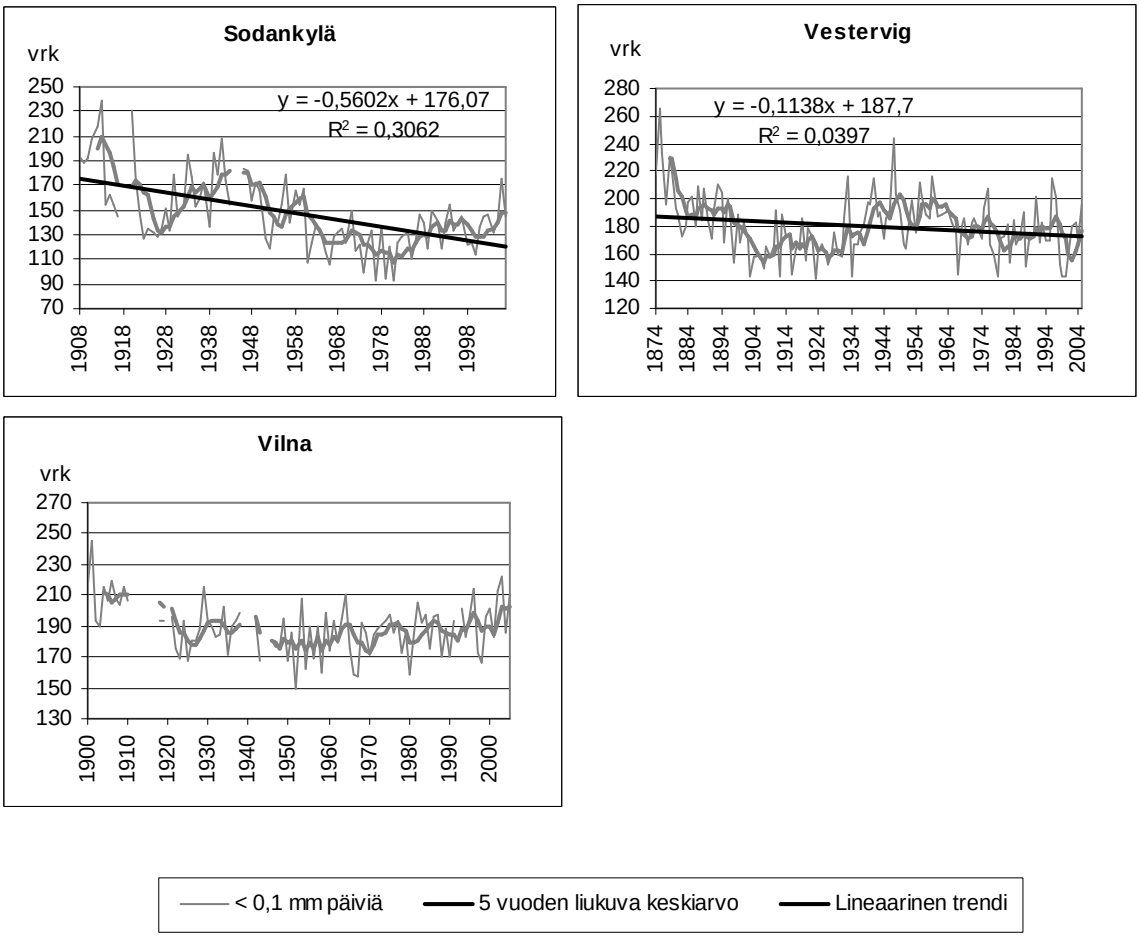
LIITE 15. jatkuu.



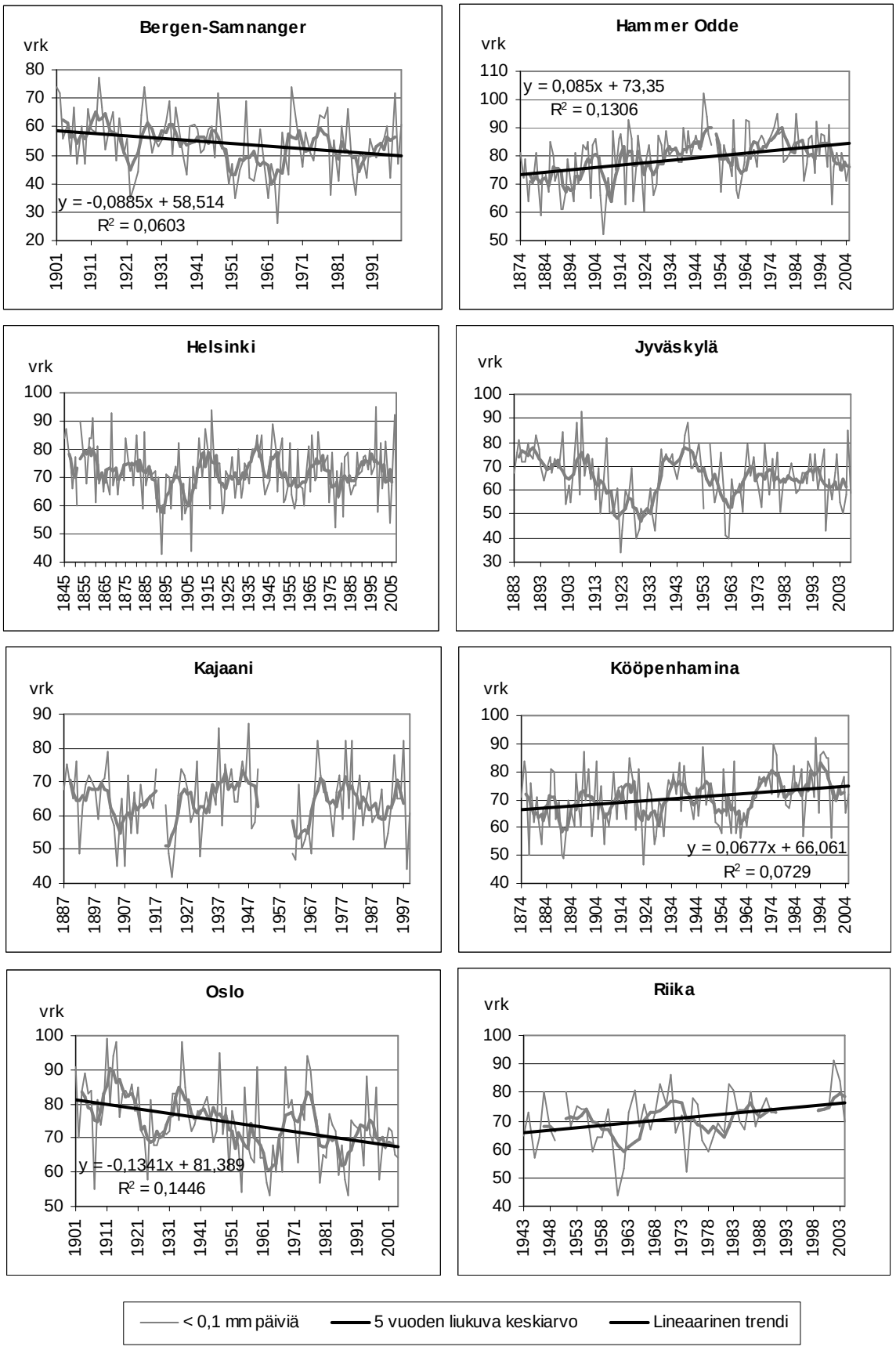
LIITE 16. Sadehavaintoihin perustuvien koko vuoden <0,1 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu. Lineaarinen trendiviiva on esitetty kuvaajassa vain, jos trendi on ollut tilastollisesti merkitsevä merkitsevyystasolla 0,05. Huomaa, että kuvaajien akselien arvot vaihtelevat.



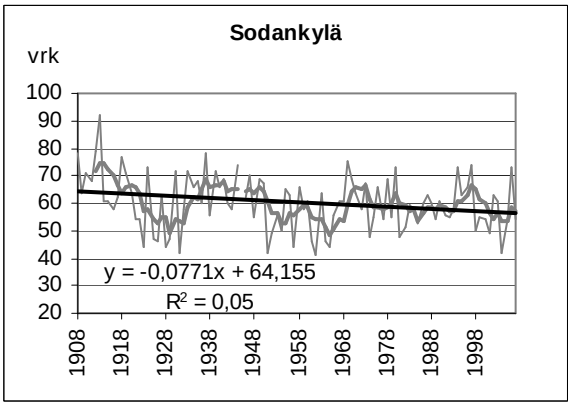
LIITE 16. jatkuu.

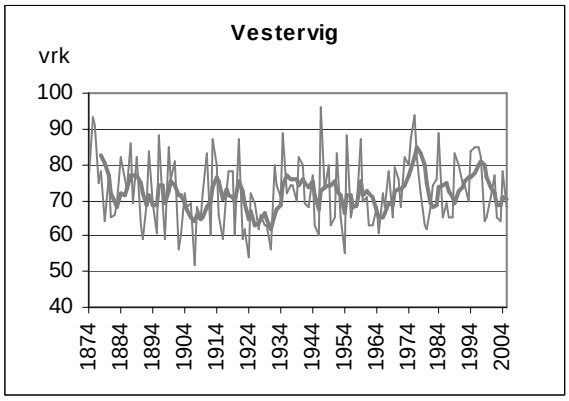


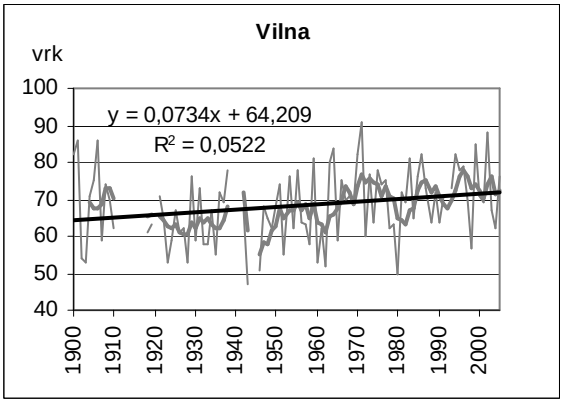
LIITE 17. Sadehavaintoihin perustuvien kesän (touko-elokuu) <0,1 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu. Lineaarinen trendiviiva on esitetty kuvaajassa vain, jos trendi on ollut tilastollisesti merkitsevä merkitsevyystasolla 0,05. Huomaa, että kuvaajien akselien arvot vaihtelevat.



LIITE 17. jatkuu.

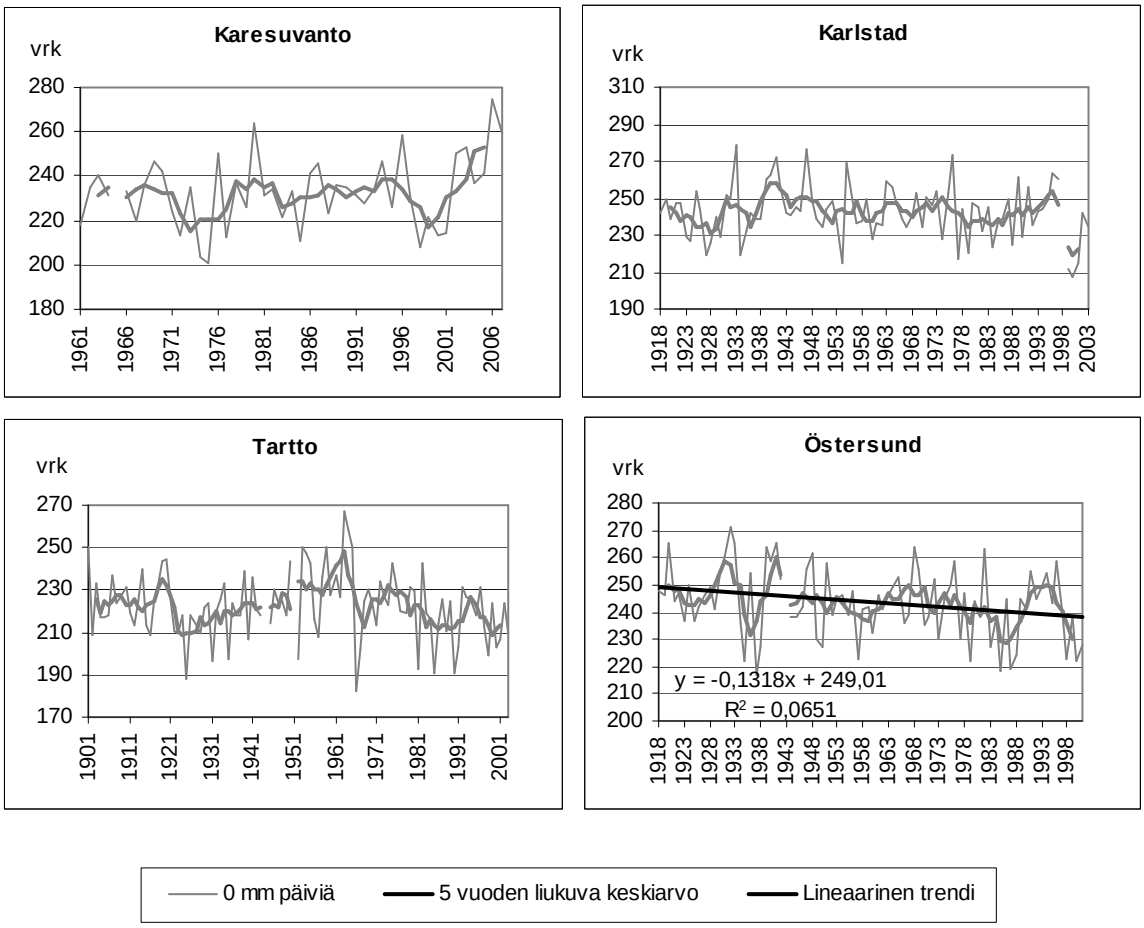




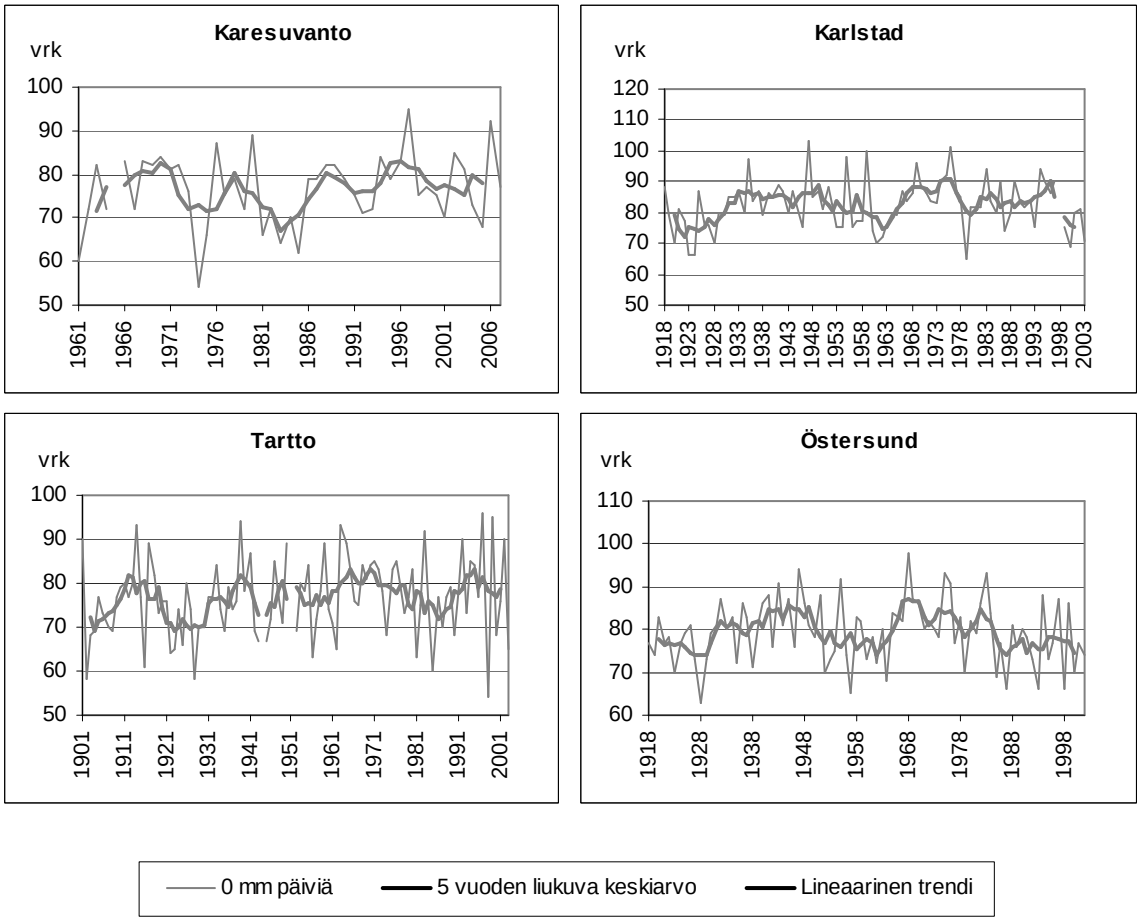


< 0,1 mm päiviä | 5 vuoden liukuva keskiarvo | Lineaarinen trendi

LIITE 18. Sadehavaintoihin perustuvien koko vuoden 0 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu. Lineaarinen trendiviiva on esitetty kuvaajassa vain, jos trendi on ollut tilastollisesti merkitsevä merkitsevyystasolla 0,05. Huomaa, että kuvaajien akselien arvot vaihtelevat.



LIITE 19. Sadehavaintoihin perustuvien kesän 0 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu. Lineaarinen trendiviiva on esitetty kuvaajassa vain, jos trendi on ollut tilastollisesti merkitsevä merkitsevyystasolla 0,05. Huomaa, että kuvaajien akselien arvot vaihtelevat.



LIITE 20. Sadehavaintoihin perustuvien poutapäivien ja sateettomien päivien lukumäärien lineaaristen trendien suuruudet ja tilastolliset merkitsevyydet. Taulukossa: k = pienimmän neliösumman mukaisen suoran kulmakerroin, r = Pearsonin korrelaatiokerroin, R^2 = Pearsonin korrelaatiokertoimen neliö, t = t-testin testiarvon itseisarvo, p_t = t-testin mukainen trendin merkitsevyystaso, Z = Mann-Kendallin testin testiarvon itseisarvo ja p_z = Mann-Kendallin mukainen trendin merkitsevyystaso.

Asema	**Jakso**	**<1,0 mm, koko vuosi**						
		k	**r**	**R^2**	**t**	**p_t**	**Z**	**p_z**
Bergen-Samnanger	1901–1999	-0,2356	-0,3057	0,0934	3,1617	**<0,01**	3,09	**<0,01**
Hammer Odde	1874–2005	0,0665	0,2065	0,0426	2,3597	**0,01-0,05**	2,23	**0,01-0,05**
Helsinki	1845–2007	-0,0224	-0,0718	0,0052	0,9105	>0,10	1,30	>0,10
Jyväskylä	1883–2007	-0,0665	-0,1631	0,0266	1,8184	0,05-0,10	1,77	0,05-0,10
Kajaani	1887–1999	0,0315	0,0751	0,0056	0,7571	>0,10	0,70	>0,10
Kööpenhamina	1874–2005	-0,0252	-0,0803	0,0064	0,9185	>0,10	1,29	>0,10
Oslo	1901–2004	-0,1594	-0,2986	0,0892	3,1603	**<0,01**	3,17	**<0,01**
Riika	1943–2004	-0,3126	-0,3623	0,1312	2,8561	**<0,01**	2,21	**0,01-0,05**
Sodankylä	1908–2007	0,0472	0,0947	0,009	0,9219	>0,10	0,89	>0,10
Vestervig	1874–2007	-0,078	-0,2011	0,0404	2,3408	**0,01-0,05**	2,38	**0,01-0,05**
Vilna	1900–2005	-0,0848	-0,1941	0,0377	1,8974	**0,01-0,05**	1,90	0,05-0,10

Asema	**Jakso**	**< 1,0 mm kesä**						
		k	**r**	**R^2**	**t**	**p_t**	**Z**	**p_z**
Bergen-Samnanger	1901–1999	-0,0479	-0,1418	0,0201	1,4112	>0,10	1,35	>0,10
Hammer Odde	1874–2005	0,0417	0,2409	0,0580	2,8194	**<0,01**	2,79	**<0,01**
Helsinki	1845–2007	0,0057	0,0347	0,0012	0,4388	>0,10	0,11	>0,10
Jyväskylä	1883–2007	0,0018	0,0084	0,0000	0,0930	>0,10	0,21	>0,10
Kajaani	1887–1999	0,0036	0,0157	0,0002	0,1590	>0,10	0,06	>0,10
Kööpenhamina	1874–2005	0,0367	0,1995	0,0398	2,3212	**0,01-0,05**	2,16	**0,01-0,05**
Oslo	1901–2004	-0,0297	-0,1091	0,0119	1,1081	>0,10	1,38	>0,10
Riika	1943–2004	-0,0116	-0,0267	0,0007	0,1945	>0,10	0,50	>0,10
Sodankylä	1908–2007	0,0156	0,0572	0,0033	0,5642	>0,10	0,58	>0,10
Vestervig	1874–2007	0,0188	0,0749	0,0056	1,1320	>0,10	0,87	>0,10
Vilna	1900–2005	0,0482	0,2050	0,0420	2,0095	**0,01-0,05**	1,88	0,05-0,10

Asema	**Jakso**	**< 0,1 mm, koko vuosi**						
		k	**r**	**R^2**	**t**	**p_t**	**Z**	**p_z**
Bergen-Samnanger	1901–1999	-0,3797	-0,4683	0,2193	5,2196	**<0,01**	4,54	**<0,01**
Hammer Odde	1874–2005	0,1889	0,3718	0,1382	4,5134	**<0,01**	4,33	**<0,01**
Helsinki	1845–2007	-0,0969	-0,120	0,0144	1,5289	>0,10	1,51	>0,10
Jyväskylä	1883–2007	-0,4279	-0,4823	0,2326	6,0558	**<0,01**	5,25	**<0,01**
Kajaani	1887–1999	-0,3178	-0,4834	0,2337	5,5224	**<0,01**	4,85	**<0,01**
Kööpenhamina	1874–2005	0,1072	0,2182	0,0476	2,5489	**0,01-0,05**	2,36	**0,01-0,05**
Oslo	1901–2004	-0,4933	-0,6359	0,4043	8,3206	**<0,01**	6,63	**<0,01**
Riika	1943–2004	0,5077	0,4215	0,1777	3,4161	**<0,01**	2,30	**0,01-0,05**
Sodankylä	1908–2007	-0,5602	-0,5534	0,3062	6,4412	**<0,01**	4,98	**<0,01**
Vestervig	1874–2007	-0,1130	-0,1992	0,0397	2,3176	**0,01-0,05**	1,82	0,05-0,10
Vilna	1900–2005	-0,1095	-0,1990	0,0396	1,9479	0,05-0,10	1,27	>0,10

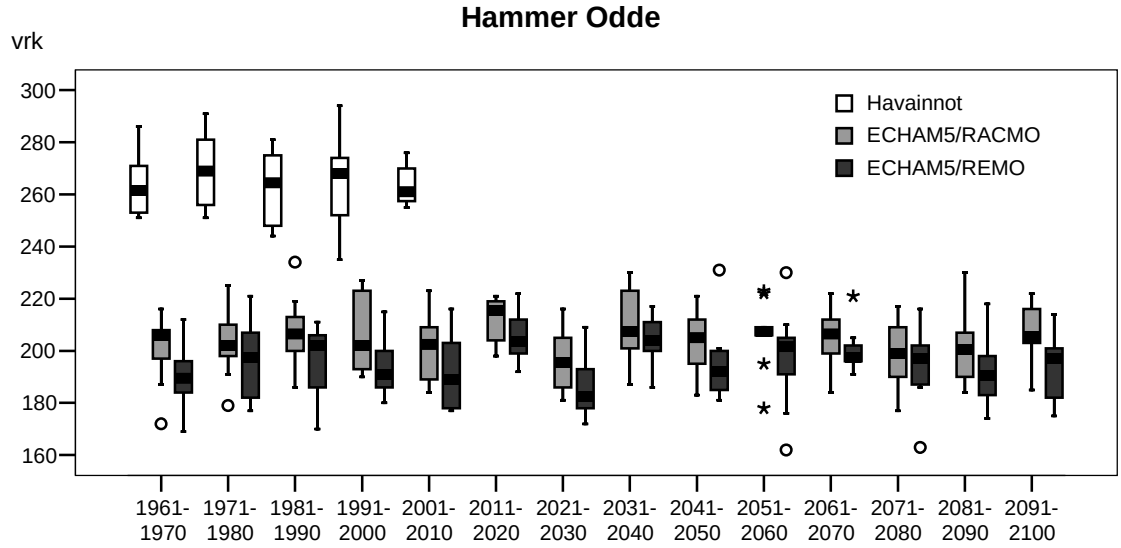
LIITE 20. jatkuu.

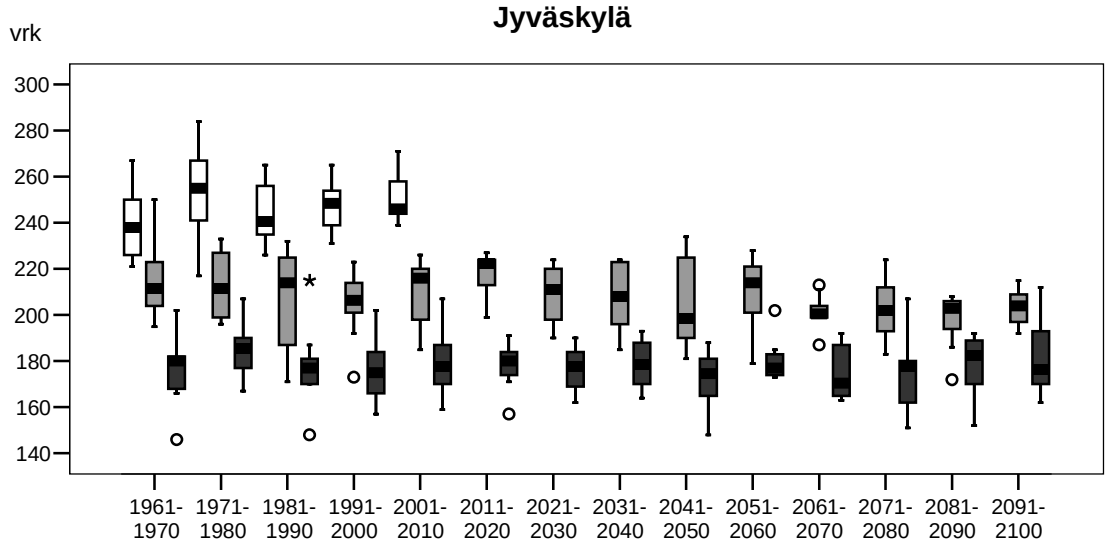
Asema	Jakso	< 0,1 mm kesä						
		k	r	R^2	t	p_t	Z	p_z
Bergen-Samnanger	1901–1999	-0,0885	-0,2455	0,0603	2,4946	**0,01-0,05**	2,48	**0,01-0,05**
Hammer Odde	1874–2005	0,085	0,3613	0,1306	4,4011	**<0,01**	3,96	**<0,01**
Helsinki	1845–2007	-0,0093	-0,0462	0,0021	0,5850	>0,10	0,24	>0,10
Jyväskylä	1883–2007	-0,0427	-0,1358	0,0185	1,5144	>0,10	1,76	0,05-0,10
Kajaani	1887–1999	-0,0133	-0,0459	0,0021	0,4622	>0,10	0,69	>0,10
Kööpenhamina	1874–2005	0,0677	0,2700	0,0729	3,1969	**<0,01**	2,99	**<0,01**
Oslo	1901–2004	-0,1341	-0,3802	0,1446	4,1520	**<0,01**	4,25	**<0,01**
Riika	1943–2004	0,1727	0,3360	0,1129	2,5973	**0,01-0,05**	2,42	**0,01-0,05**
Sodankylä	1908–2007	-0,0771	-0,2237	0,05	2,2605	**0,01-0,05**	2,28	**0,01-0,05**
Vestervig	1874–2007	0,0094	0,0381	0,0014	0,4344	>0,10	0,51	>0,10
Vilna	1900–2005	0,0734	0,2285	0,0522	2,2509	**0,01-0,05**	2,45	**0,01-0,05**

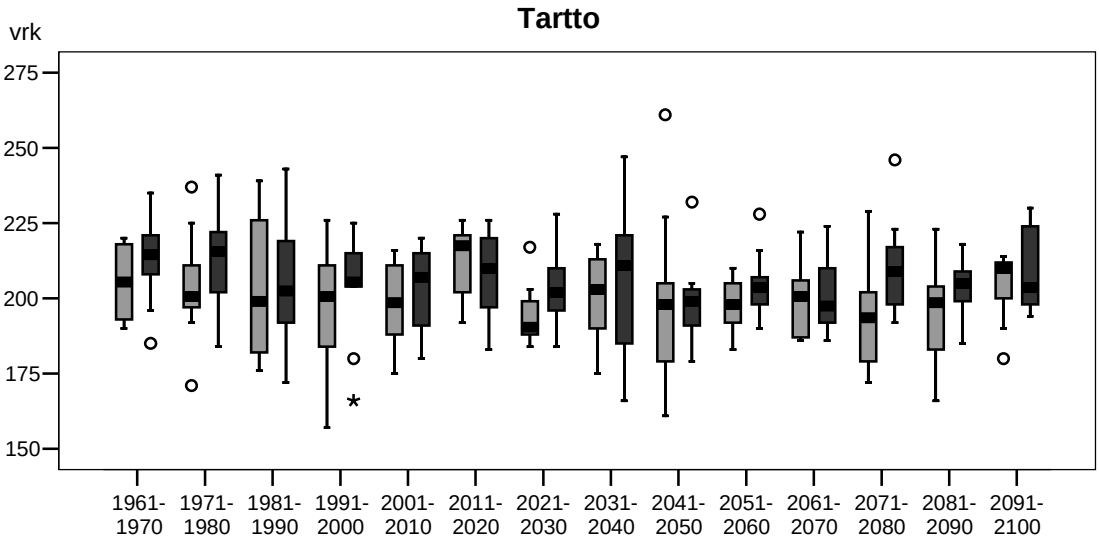
Asema	Jakso	0 mm, koko vuosi						
		k	r	R^2	t	p_t	Z	p_z
Karesuvanto	1961–2007	0,2967	0,2515	0,0632	1,7234	0,05–0,10	1,35	>0,10
Karlstad	1918–2003	-0,0694	-0,1187	0,0141	1,0888	>0,10	0,71	>0,10
Tartto	1901–2003	-0,0525	-0,1014	0,0103	1,0142	>0,10	0,84	>0,10
Östersund	1918–2001	-0,1318	-0,2551	0,9669	2,3749	**0,01–0,05**	2,15	**0,01–0,05**

Asema	Jakso	0 mm, kesä						
		k	r	R^2	t	p_t	Z	p_z
Karesuvanto	1961–2007	0,1017	0,1667	0,0278	1,1217	>0,10	0,51	>0,10
Karlstad	1918–2003	0,0357	0,1114	0,0124	1,0217	>0,10	1,05	>0,10
Tartto	1901–2003	0,0461	0,1574	0,0248	1,5861	>0,10	1,70	0,05-0,10
Östersund	1918–2002	-0,006	-0,0203	0,0004	0,1834	>0,10	0,17	>0,10

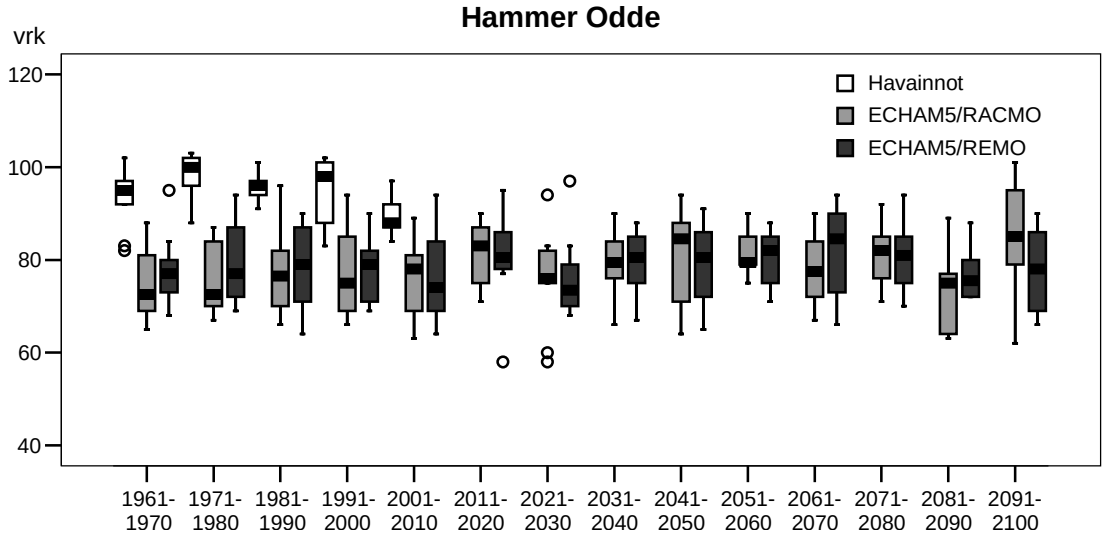
LIITE 21. Ilmastomallinnuksiin perustuvien koko vuoden <1,0 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu vuosina 1961–2100. Kuvaajissa on esitetty Hammer Odden ja Jyväskylän vuosien 1961–2007 havaintoihin perustuva vaihtelu sekä kahden ilmastomallin tuloksiin perustuva vaihtelu vuosina vuosikymmenittäin. Pistehavaintoihin perustuvat arvot eivät ole suoraan vertailukelpoisia ilmastomallinnusten mukaisten hilaruudukosta poimittujen arvojen kanssa. Huomaa, että vuorokausi-akselin (vrk) arvot vaihtelevat.

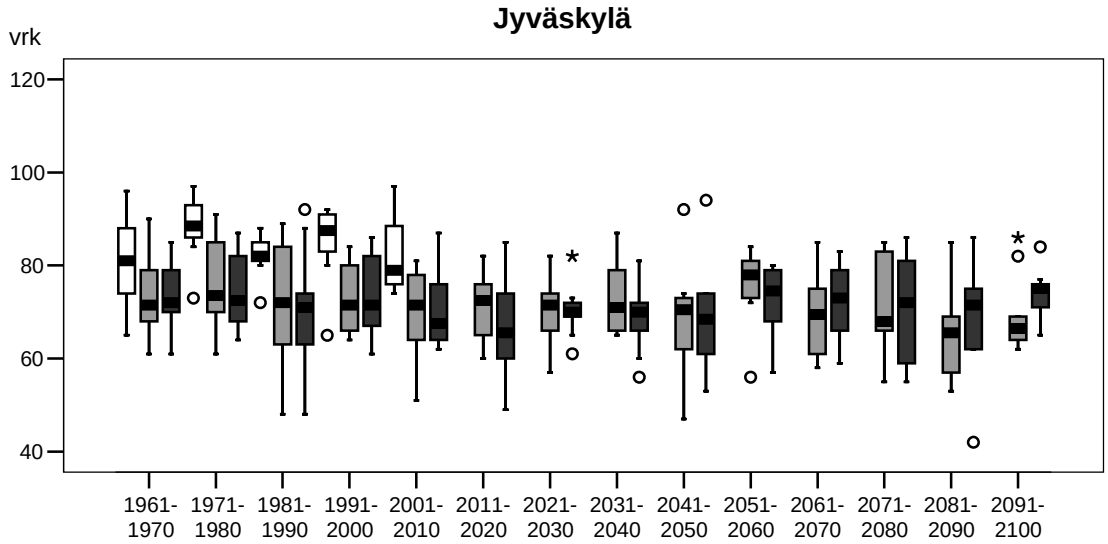


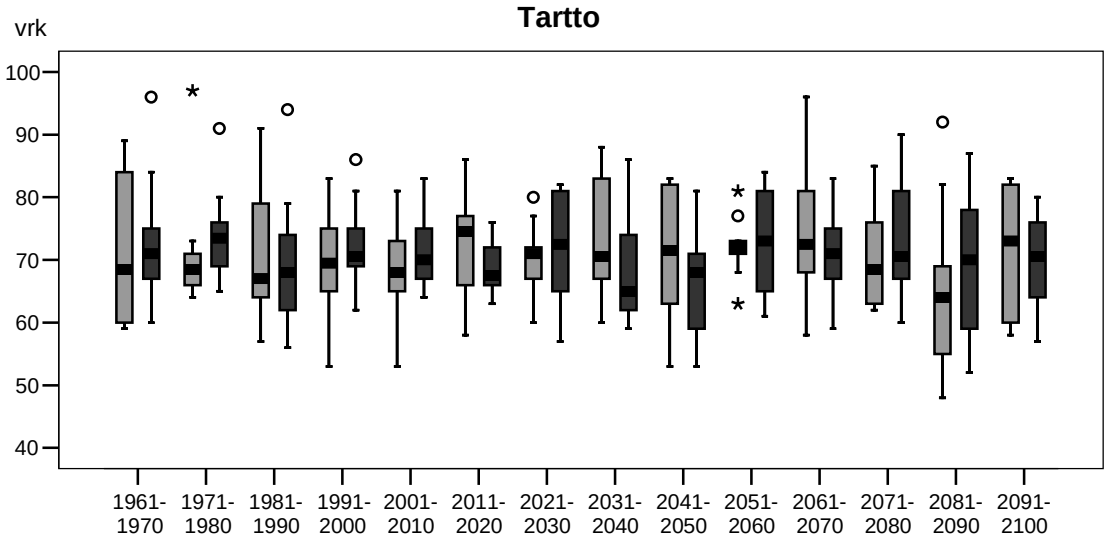




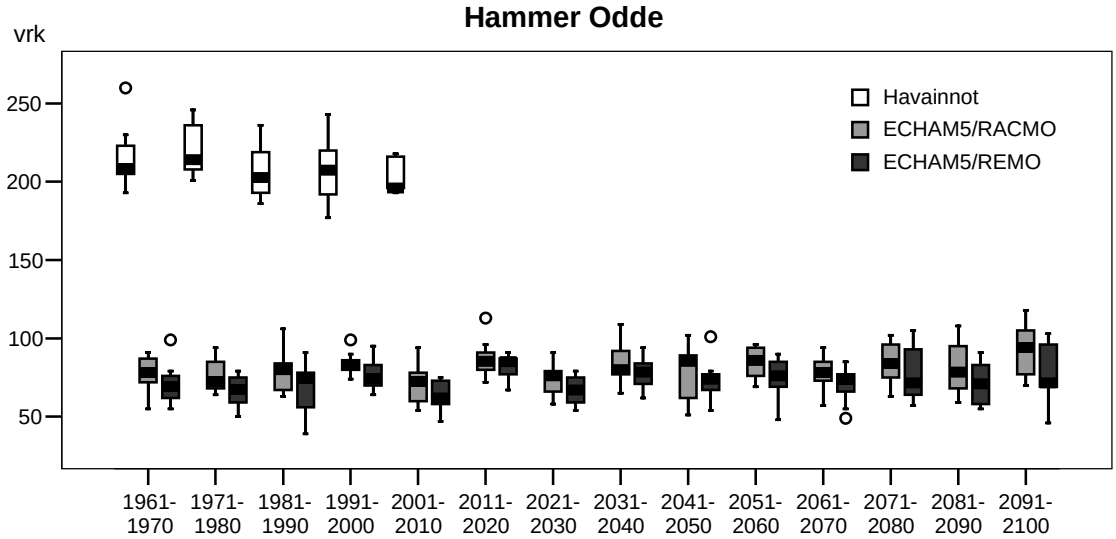
LIITE 22. Ilmastomallinnuksiin perustuvien kesän (touko-elokuu) <1,0 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu vuosina 1961–2100. Kuvaajissa on esitetty Hammer Odden ja Jyväskylän vuosien 1961–2007 havaintoihin perustuva vaihtelu sekä kahden ilmastomallin tuloksiin perustuva vaihtelu vuosina vuosikymmenittäin. Pistehavaintoihin perustuvat arvot eivät ole suoraan vertailukelpoisia ilmastomallinnusten mukaisten hilaruudukosta poimittujen arvojen kanssa. Huomaa, että vuorokausi-akselin (vrk) arvot vaihtelevat.

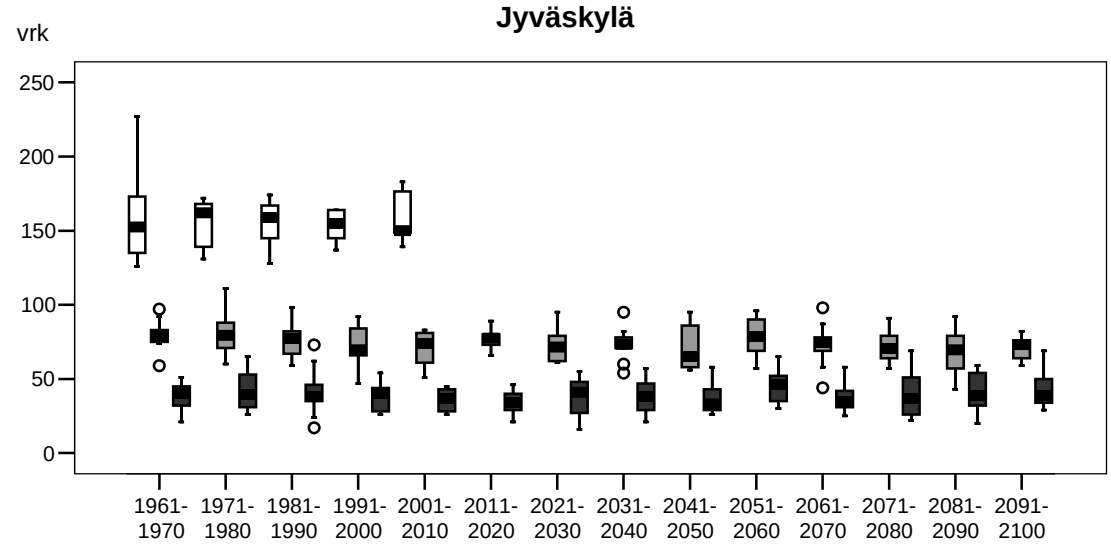


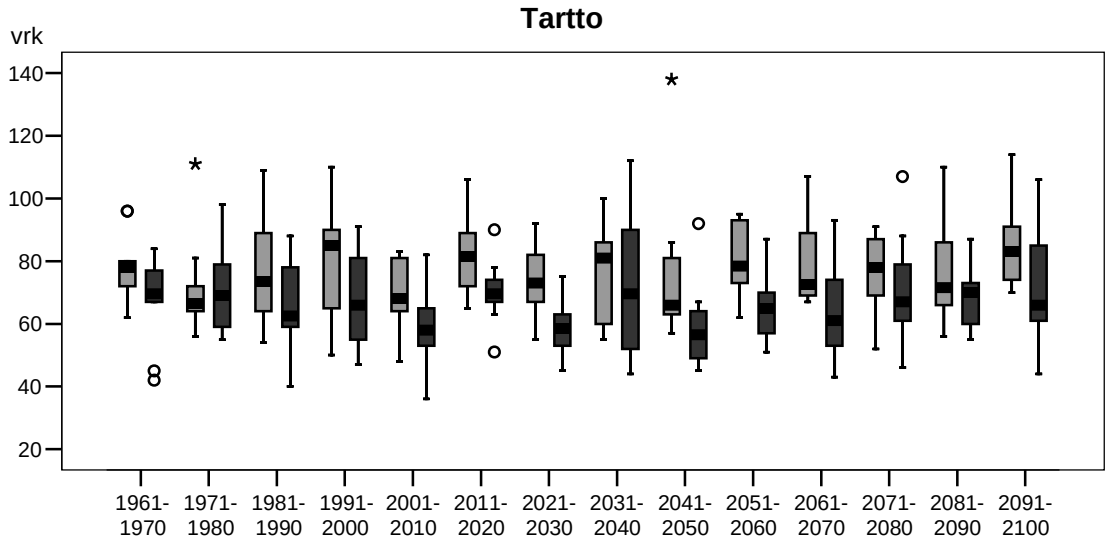




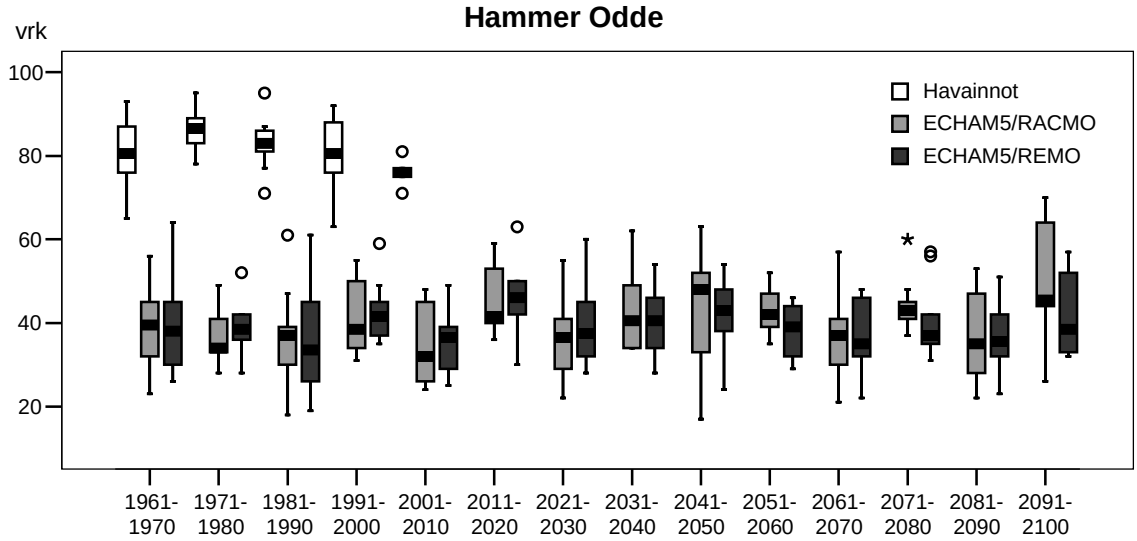
LIITE 23. Ilmastomallinnuksiin perustuvien koko vuoden <0,1 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu vuosina 1961–2100. Kuvaajissa on esitetty Hammer Odden ja Jyväskylän vuosien 1961–2007 havaintoihin perustuva vaihtelu sekä kahden ilmastomallin tuloksiin perustuva vaihtelu vuosina vuosikymmenittäin. Pistehavaintoihin perustuvat arvot eivät ole suoraan vertailukelpoisia ilmastomallinnusten mukaisten hilaruudukosta poimittujen arvojen kanssa. Huomaa, että vuorokausi-akselin (vrk) arvot vaihtelevat.

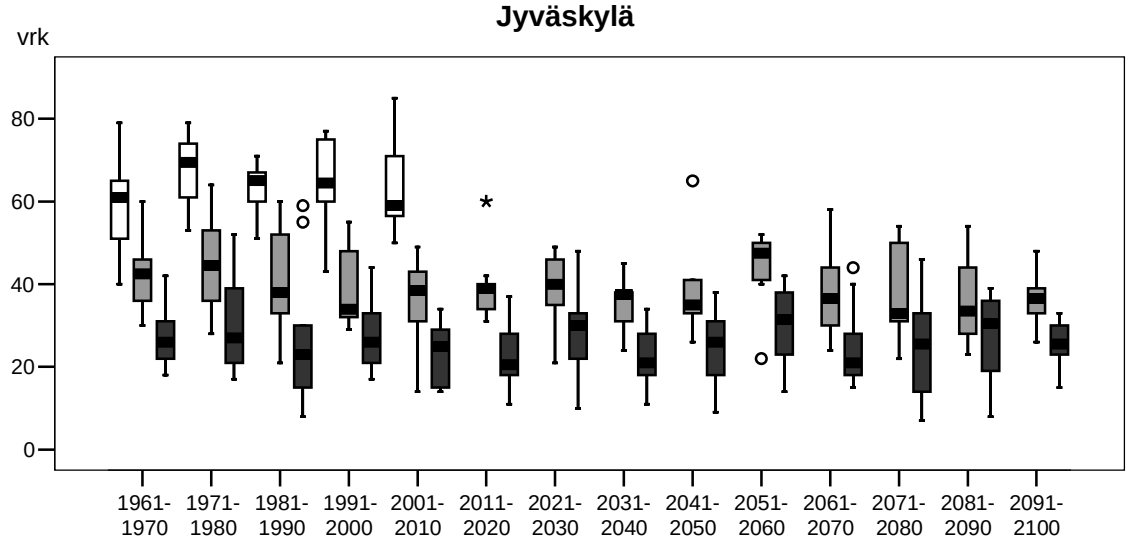


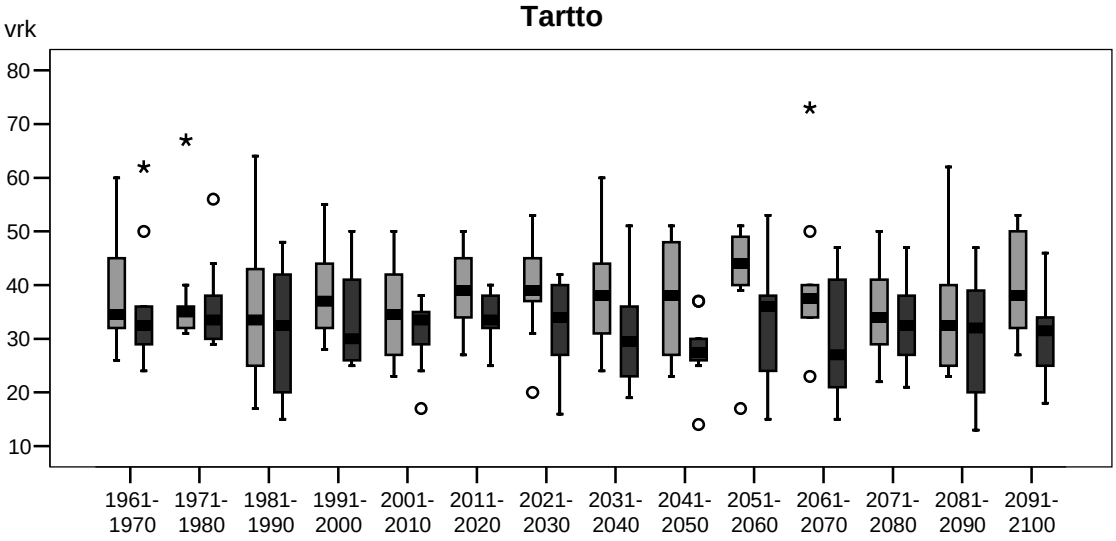




LIITE 24. Ilmastomallinnuksiin perustuvien kesän <0,1 mm sadepäivien lukumäärien ajallinen vaihtelu vuosina 1961–2100. Kuvaajissa on esitetty Hammer Odden ja Jyväskylän vuosien 1961–2007 havaintoihin perustuva vaihtelu sekä kahden ilmastomallin tuloksiin perustuva vaihtelu vuosina vuosikymmenittäin. Pistehavaintoihin perustuvat arvot eivät ole suoraan vertailukelpoisia ilmastomallinnusten mukaisten hilaruudukosta poimittujen arvojen kanssa. Huomaa, että vuorokausi-akselin (vrk) arvot vaihtelevat.







LIITE 25. Ilmastomallinnuksiin perustuvien poutapäivien ja sateettomien päivien lukumäärien lineaaristen trendien suuruudet ja tilastolliset merkitsevyydet. Trendit on laskettu vuosille 2001–2100. Taulukossa k = pienimmän neliösumman mukaisen suoran kulmakerroin, r = Pearsonin korrelaatiokerroin, R^2 = Pearsonin korrelaatiokertoimen neliö, t = t-testin testiarvon itseisarvo, p_t = t-testin mukainen trendin merkitsevyystaso, Z = Mann-Kendallin testin testiarvon itseisarvo ja p_z = Mann-Kendallin testin mukainen trendin merkitsevyystaso.

Asema	**Jakso**	**< 1,0 mm**						
		k	**r**	**R^2**	**t**	**p_t**	**Z**	**p_z**
Hammer Odde	RACMO	-0,0132	-0,0307	0,0009	0,3036	>0,10	0,32	>0,10
	REMO	-0,0282	-0,0597	0,0036	0,5936	>0,10	0,70	>0,10
Jyväskylä	RACMO	-0,1547	-0,3351	0,1123	3,5209	**< 0,01**	3,24	**< 0,01**
	REMO	0,008	0,0192	0,0004	0,1904	>0,10	0,04	>0,10
Tartto	RACMO	-0,0519	-0,0961	0,0092	0,9557	>0,10	0,88	>0,10
	REMO	0,0196	0,0397	0,0016	0,3935	>0,10	0,36	>0,10

Asema	**Jakso**	**< 1,0 mm kesä**						
		k	**r**	**R^2**	**t**	**p_t**	**Z**	**p_z**
Hammer Odde	RACMO	0,029	0,0962	0,0093	0,9566	>0,10	0,79	>0,10
	REMO	0,014	0,0500	0,0025	0,4952	>0,10	0,51	>0,10
Jyväskylä	RACMO	-0,0283	-0,0916	0,0084	0,9103	>0,10	1,25	>0,10
	REMO	0,0295	0,0955	0,0091	0,9500	>0,10	1,44	>0,10
Tartto	RACMO	-0,0164	-0,0512	0,0026	0,5078	>0,10	0,63	>0,10
	REMO	0,0055	0,0195	0,0004	0,1935	>0,10	0,00	>0,10

Asema	**Jakso**	**< 0,1 mm**						
		k	**r**	**R^2**	**t**	**p_t**	**Z**	**p_z**
Hammer Odde	RACMO	0,1012	0,2089	0,0437	0,2089	>0,10	1,78	0,05-0,10
	REMO	0,0435	0,0981	0,0096	0,9763	>0,10	0,63	>0,10
Jyväskylä	RACMO	-0,0326	-0,0779	0,0061	0,7738	>0,10	0,91	>0,10
	REMO	0,0868	0,2166	0,0469	2,1969	**0,01-0,05**	1,99	**0,01-0,05**
Tartto	RACMO	0,0583	0,1143	0,0131	1,1387	>0,10	1,16	>0,10
	REMO	0,0896	0,1734	0,0301	1,7427	0,05-0,10	1,56	>0,10

Asema	**Jakso**	**< 0,1 mm kesä**						
		k	**r**	**R^2**	**t**	**p_t**	**Z**	**p_z**
Hammer Odde	RACMO	0,0665	0,1775	0,0315	1,7857	0,05-0,10	1,38	>0,10
	REMO	-0,0086	-0,0289	0,0008	0,2858	>0,10	1,09	>0,10
Jyväskylä	RACMO	-0,0108	-0,0342	0,0012	0,3390	>0,10	0,62	>0,10
	REMO	0,0347	0,1087	0,0118	1,0820	>0,10	1,04	>0,10
Tartto	RACMO	-0,0012	-0,0035	0,0000	0,0346	>0,10	0,30	>0,10
	REMO	-0,0186	-0,0618	0,0038	0,6134	>0,10	0,84	>0,10

LIITE 26. Neljän suomalaisen tutkimusaseman aineistoissa esiintyneet korrelaatiot sadekertymäjaksojen pituuksien ja maankosteusindeksin mukaisten ”kuivuuspäivien” lukumäärien välillä. Pearsonin korrelaatiokertoimen arvot on määritetty luokittain sadekertymäjakson aikaisen haihdunnan keskiarvon ja sadekertymäjaksoa edeltävän maankosteuden mukaan. Taulukossa tähdet kuvaavat korrelaatioiden tilastollista merkitsevyystasoa seuraavasti: ** = p<0,01 ja * = p<0,05. (vapausaste df = n-2). Kuhunkin korrelaatioanalyysiin sisällytettyjen tapausten lukumäärä (n) on merkitty sulkuihin korrelaatiokertoimen viereen. Alle kolme tapausta sisältävien yhdistelmäluokkien korrelaatioita ei tarkasteltu.

Helsinki-Vantaa

Haihdunta (mm)	Maankosteus (m^3/m^3)					
	≤0,10	0,11–0,14	0,15–0,19	0,20–0,25	0,26–0,32	≥0,33
≤1,99	-	-	-	-	-	-
2-2,99	-	-	-	-	0,993 (3)	0,092 (3)
3-3,99	-	-	-	0,986* (4)	0,897** (8)	0,812** (22)
4-4,99	-	-	0,887** (9)	0,970** (22)	0,983** (18)	0,925** (38)
5-5,99	-	-	0,861** (18)	0,987** (25)	0,986** (31)	0,982** (38)
6-6,99	-	-	0,997** (5)	0,982** (13)	0,994** (7)	0,990** (9)

Jyväskylä

Haihdunta (mm)	Maankosteus (m^3/m^3)					
	≤0,10	0,11–0,14	0,15–0,19	0,20–0,25	0,26–0,32	≥0,33
≤1,99	-	-	-	-	-	-
2-2,99	-	-	-	-	-	0,792 (3)
3-3,99	-	-	-	-	-	0,767** (21)
4-4,99	-	-	0,951** (11)	0,975** (7)	0,847** (19)	0,888** (59)
5-5,99	-	0,756 (3)	0,991* (5)	0,892** (13)	0,965** (20)	0,954** (29)
6-6,99	-	-	-	0,988 (3)	-	0,911* (5)

Kajaani

Haihdunta (mm)	Maankosteus (m^3/m^3)					
	≤0,10	0,11–0,14	0,15–0,19	0,20–0,25	0,26–0,32	≥0,33
≤1,99	-	-	-	-	-	-
2-2,99	-	-	-	-	-	0,393 (3)
3-3,99	-	-	0,987** (6)	0,880** (9)	0,854** (8)	0,779** (29)
4-4,99	-	1,000** (5)	0,991** (9)	0,992** (14)	0978** (15)	0,868** (38)
5-5,99	-	-	0,960** (5)	0,916** (7)	0,992** (14)	0,975** (20)
6-6,99	-	-	-	-	-	-

Sodankylä

Haihdunta (mm)	Maankosteus (m^3/m^3)					
	≤0,10	0,11–0,14	0,15–0,19	0,20–0,25	0,26–0,32	≥0,33
≤1,99	-	-	-	-	-	-
2-2,99	-	-	-	-	0,953* (5)	0,849* (6)
3-3,99	-	-	0,885 (4)	0,641 (6)	0,965** (7)	0,387 (24)
4-4,99	-	-	0,993** (7)	0,926** (8)	0,966** (13)	0,905** (37)
5-5,99	-	0,904* (5)	0,867 (4)	0,894* (6)	0,995** (4)	0,951** (11)
6-6,99	-	-	-	-	-	-