

Tartu Ülikool  
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond  
Ökoloogia ja Maateaduste Instituut  
Geograafia osakond

**Jüri Kamenik**

**EESTI SADEMETE EKSTREEMUMITE  
KORDUVUSPERIOODID**

Magistritöö loodusgeograafia erialal

Juhendajad: professor Jaak Jaagus  
dotsent Piia Post

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Instituudi juhataja:

Tartu 2015

# Sisukord

1. Sissejuhatus.....	3
2. Üldine teoreetiline taust .....	5
2.1. Mis on ekstreemumid?.....	5
2.2. Sademete ekstreemumite kirjeldamine ja indeksid .....	6
2.2. Ekstreemsete sademete uuringute ülevaade .....	9
2.3. Eesti sademekliima .....	12
3. Metoodika ja andmed.....	17
3.1. Jaamade andmed .....	17
3.1. R ja sellel põhinev analüüsipakett extRemes .....	19
3.2. Töö käik.....	20
4. Tulemused ja arutelu .....	22
4.1.ExtRemes väljundi kirjeldus .....	22
4.2. Korduvusperioodide ja nende sajuhulkade territoriaalne jaotus.....	24
4.3. Korduvusperioodi funktsiooniga lähendamise täpsuse hindamine .....	30
Kokkuvõte .....	34
Recurrence interval of Estonian precipitation extremes.....	36
Tänuavaldused.....	38
Kasutatud kirjandus.....	39
Lisad .....	42

# 1. Sissejuhatus

Kliimasoojenemise tõttu on üha enam hakatud huvi tundma ilma- ja ilmastikuekstreemsuste vastu. IPCC ehk valitsustevahelise kliimamuutuste paneeli viimase aruande järgi on Maa pinnalähedane temperatuur tõusnud keskeltläbi 0,85°C perioodi 1880–2012 kohta, kusjuures tõus kiireneb (IPCC, 2013). Kuna kliima soojenemisel atmosfääri energeetilisus ja veeauru sisaldus kasvab, siis suureneb ka ekstreemsete nähtuste tõenäosus ja võimsus, sh sademete osas (Hennessy *et al.*, 1997; Watterson, 2005; Tebaldi *et al.*, 2006; Trenberth *et al.*, 2003).

Ekstreemsademetega seoses on oluline märkida, et nende hulk kasvab suhteliselt rohkem kui tavasademetehulk (Karl ja Knight, 1998; Groisman *et al.*, 1999). Olulisus väljendub eeskätt selles, et ekstreemsademed võivad põhjustada suurt majanduslikku kahju – tekivad üleujutused, mudavoolud, erosioon (Nutter, 1999). Ekstreemsademetehulki kasutatakse simuleeritud üleujutuste mudelite sisendväärtustena. Selliseid mudeleid on vaja arvestada nt äravoolutaristu, maastiku jms planeerimisel (Physical hydrology, 2002).

Sademetehulki ekstreemumitel ja ekstreemsademetel on palju erinevaid definitsioone ja indekseid. Kõige äärmuslikumate ja rangemate definitsioonide kohaselt on ekstreemsademed need, mille esinemissagedus on mõned korrad aastas või veelgi harvem ja sellele võiks vastata koguseliselt 30-50 mm sajuhulk. Samas märksa leebemad definitsioonid käsitlevad ekstreemsademetena neid, mis korduvad näiteks mõne nädala tagant. Nii esimesel kui teisel definitsioonigrupil on omad eelised ja probleemid: kui väga haruldasi sademesündmusi on statistiliselt raske analüüsida ja uurida, sest juhtumeid andmeridades on väga vähe, siis suhteliselt sageli ette tulevad sündmused on küll väikese mõjuga, st et ei põhjusta kahju, üleujutusi vms, aga neid on jällegi lihtsam uurida.

Eesti kohta seni tehtud uurimused põhinevad enamasti põua- ja sajuperioodidel või fikseeritud lävenditel (Merilain ja Post 2006; Tammets, 2007; Tammets ja Jaagus, 2007, 2013). Samuti leidub uurimusi, milles on käsitletud sademete kuusummade ajalisi käiku ja sademete korrelatsiooni atmosfääri tsirkulatsiooni näitajate vahel (Jaagus, 2006).

Hilisemal ajal on sademete ekstreemumite ajalisi muutlikust Eestis perioodil 1961–2008 uurinud Päädam ja Post (2011). Uurimus põhines sademete ööpäevastel andmetel. Selles töös defineeriti sademete ekstreemumid kahe näitaja abil: 95% ja 99% kvantiilidega ööpäevaste sademete summade sagedusjaotusest. Trendide olulisuse hindamiseks kasutati mitteparameetrilist Mann-Kendalli testi.

Tulemusena selgus, et kasutatud indeksite väärtused on perioodi jooksul statistiliselt usaldusväärset tõusnud, mis on kooskõlas teiste sarnaste uurimustega, kuid erinevuseks on see, et vastav tõus esineb nii külmal kui soojal poolaastal – võimalikuks põhjuseks Eesti põhjapoolsem asend, aga ka teistes töödes kasutatud aastaaegade teistsugune jaotus. Negatiivseid trende oli vähe ja need polnud statistiliselt usaldusväärsed. Veel selgus, et kui aasta keskmine sademehulk pole märkimisväärselt kasvanud, siis ekstreemsademetesündmusi on seevastu rohkem (Päädam ja Post, 2011).

Magistritöö eesmärgiks on ekstreemsete sademete klimatoloogilise režiimi (ruumilise varieeruvuse) uurimine ning ülesanneteks erinevate korduvusperioodide ja nendele vastavate sajuhulkade leidmine ilmajaamadele. Käesolev töö on kindlasti uudne ja oluline, sest sademetega seotud ekstreemume või ekstreemsademeid on Eestis üsna vähe uuritud.

Töös kasutatakse Riigi Ilmateenistusest pärinevaid vaatlusandmeid (ööpäevased sademesummad perioodi 1948–2013 kohta, kuid täpne aegrea pikkus sõltub konkreetsest ilmajaamast) ja statistiliseks analüüsiks vabavara R-l põhinevat analüüsipaketti extRemes.

## 2. Üldine teoreetiline taust

### 2.1. Mis on ekstreemumid?

Kui uurida seda, kui sageli mingeid väärtusi esineb, siis selgub, et tavaliselt varieeruvad need mingi keskvaartuse (aritmeetilise keskmise ehk teoreetilises jaotuses keskvaartuse) ümber. Seega ekstreemsusega on tegu siis, kui kõrvalekalle keskmisest on väga suur, mistõttu sel on madal esinemissagedus, st sellist sündmust tuleb väga harva ette. Kui toimub keskvaartuse (aritmeetilise keskmise) nihkumine, siis varasem äärmus ei pruugi olla enam äärmus, vaid võib liigituda tavapärase alla.

Raportis *Extreme Temperatures and Precipitation in Europe: Analysis of a High-Resolution Climate Change Scenario* (Dankers ja Hiederer, 2008) mainitakse IPCC määratletud ekstreemse sündmuse definitsiooni: ekstreemne on selline sündmus, mille piirmääraks on 10- või 90-protsentiil. Veel viidatakse *The Extreme Events Working Group of the Long-Term Ecological Research* (LTER) definitsioonile, mis küll protsentiile ei maini, aga räägib samuti statistiliselt tagapõhjast ja aegridadest. Viimane ongi definitsioonis kindlaks määratud pikkusega (mitte nt lõpmatu, määramatu), samuti on oluline geograafiline ulatus. Teise ehk LTER definitsiooni järgi ei piisa üksnes statistilisest analüüsist, vaid selleks, et sündmus oleks ekstreemne, peab ökosüsteem sellele mingil erilisel viisil reageerima.

Ekstreemsust saab defineerida kolme aspekti kaudu või kolme võimaluse alusel: piirmäärad (sobivad nt sademetele, sest need on tugevalt asümmeetrilise jaotusega), sagedus (sobib nt temperatuuri puhul, millel on mingi konkreetne statistiline jaotus) ja võimsus (sobib nt mitmete hüdroloogiliste näitaja puhul) (Dankers ja Hiederer, 2008).

Ekstreemseid sademeid saab defineerida kui mõõtmistulemuste kvantiile. Näiteks on defineeritud 0,95 kvantiili alusel väga vihmased päevad ja 0,99 kvantiili alusel paduvihmad. Kvantiilide kasutamisel sademete puhul ilmneb nende oluline eelis – need on vähetundlikud jämedate vigade suhtes (Päädam, 2009).

Mõistet „ekstreemne“ kasutatakse ka ilma iseloomustamisel. Selline mõiste – ekstreemne – eeldab, et olemas on mingi tavapärase ja normaalne seisund või tase. Viimane tuleneb aegridade analüüsist: see võib-olla mingi väärtuse stabiilsus, aga võib ka olla perioodilisus, nt iseloomustab kuumakõrbi ööpäevase temperatuuri suur varieeruvus, mis on sellises kohas siiski tavapärase olukord, ja ekstreemsusest saab rääkida antud näites juhul, kui seda varieeruvust mingil ööpäeval pole (Dankers ja Hiederer, 2008).

Kuigi pealtnäha sünonüümid, ei ole siiski sademeteekstreemumid ja ekstreemsademed üks ja see sama. Ekstreemsademed on konkreetne sündmus, kui (väga) lühikese aja jooksul tuleb harvaesinevalt suur hulk sademeid ehk sademete intensiivsus on tavatult suur, näiteks National Climate Assessment (2014) järgi vastab sellisele sündmusele sademete intensiivsuse 99 % kvantiil vastavast sagedusjaotusest.

Sademeteekstreemumi mõiste tuleneb aga üldistatud ekstreemväärtuste jaotuse analüüsist (generalized extreme value – GEV distribution), millest tuleneb ka korduvusperioodide arvutamine – sisuliselt on tegu sobitatud funktsiooni ekstreemumkohtadega (Kharin *et al.*, 2007)

## 2.2. Sademete ekstreemumite kirjeldamine ja indeksid

Kui uuritakse sademete hulga muutlikkust, siis selgub, et peamiseks probleemiks on nende suur ajaline ja ruumiline varieeruvus. See on põhjuseks, miks on fikseeritud ekstreemsademete definitsioone raske kasutada, sest tegelikult on iga jaama jaoks vastav definitsioon erinev. Selle põhjuseks on sademeterežiimi erinevus olenevalt jaama asukohast ja see tuleneb sademete ajalis-ruumilisest varieeruvusest – teatud kaugusel merest sajab suhteliselt rohkem kui saartel või kaugemal sisemaal (joonis 1).

Väga tähtis roll sellise sademete varieeruvuse põhjustajana on pinnamoel, sest see mõjutab õhu liikumist atmosfääris – kõrgustikud ja mäed on õhu liikumisele füüsiliseks takistuseks – kuna õhk ei saa minna maa sisse, peab see järelikult minema kas üle või ümber takistuse. Nii on leitud seaduspärasus, et iga 100 m tõusu kohta suureneb tuulepealsel nölval aasta keskmine sademete hulk umbes 10-15% (Avaste, 1990). Seega kõrgustikud nagu Haanja või Otepää kindlasti mõjutavad sademete jaotumist.

Kuna antud töös on olulisel kohal just sademete ekstreemumid, tuleb ülevaade anda, kuidas neid kirjeldatakse ja milliseid indekseid kasutatakse. Iga sellise kirjelduse ja analüüsi aluseks on piisavalt pikk ja eeldatavasti homogeenne vaatlusrida. Vastava vaatlusrea alusel saab koostada pingerea, kui palju sademeid on mingis ajaühikus maksimaalselt tulnud. Selle järgi saab anda ka ligikaudse valemi:  $R=425 \cdot D^{0.47}$ , kus R on maksimaalne võimalik sajuhulk (mm) ja D selle kestus tundides (Physical hydrology, 2002).

**Sagedustõenäosus** näitab seda, kui suur on tõenäosus, et mingi ajaperioodi, nt ühe aasta jooksul, mingi sündmus juhtub: nt 100 mm ööpäevane sademetehulga sagedustõenäosus aasta

kohta võib olla 0,04. Korduvusperiood annab perioodi pikkuse, mille jooksul mingit sündmust on oodatud – selles näites siis 100 mm ööpäevast sademehulka võib oodata kord 25 aasta jooksul ehk sagedustõenäosus on ühe aasta kohta 0,04 (Physical hydrology, 2002).

**Korduvusperiood** ehk **tagatusperiood** (*recurrence interval*) ehk väljendab mingi sündmuse, nt maavärina, üleujutuse jms tõenäosuse hinnangut. Tegu on statistilise näitaja ehk statistikuga, mis põhineb mingitel vaatlusandmetel (vaatlusreal), mille alusel arvutatakse välja keskmine sündmuse esinemissagedus – perioodi pikkus, mille jooksul meid huvitav sündmus keskmiselt aset leiab. Selleks on vajalik vähemalt sama pikk andmerida kui on korduvusperiood ise: nt kui see on 100 a, peab ka andmestik olema vähemalt 100 a pikkune. Seda statistikut kasutatakse sageli riskianalüüsis. Korduvusperioodi võrrand on

$$\frac{n + 1}{m}, \quad (1)$$

kus  $n$  on vaatlusaastate arv ja  $m$  sündmuste arv nende aasta ehk perioodi jooksul (Water Resources Engineering, 2005).

**Teoreetiline tagatus- ehk korduvusperiood** on sagedustõenäosuse pöördväärtus. Viimane on tõenäosus, et mingi sündmus leiab aset aasta jooksul. Näiteks, kui mingi tuule tugevuse korduvusperiood on 10 aastat, siis selle sagedustõenäosus aasta kohta on  $1/10$  ehk 0,1 (10%). Siin tuleks tähele panna, et mingit konkreetset regulaarsust ei ole, vaid tegu on tõenäosusega – pole mingit garantiid, et vastav sündmus toimub nt iga 10 a tagant. Samuti on tegu statistikuga ehk see arvutatakse vaatlusandmetest, mitte pole tegu ideaalse jaotusega (nagu on normaaljaotus) ehk tegu on omamoodi tagantjärele tarkusega. Seega, kui meil on võtta pikem aegrida (läheb veel 10 aastat mööda – kokku 20 a pikkune aegrida), siis võib selguda, et korduvusperiood on hoopiski 8 või 20 aastat (Water Resources Engineering, 2005).

Korduvusperiood on seotud ka binomiaalse jaotusega, ent kui aegrida on väga pikk, siis see läheneb Poissoni jaotusele:

$$p = 1/T = \frac{m}{n + 1}, \quad (2)$$

kus  $p$  on vastava sündmuse tõenäosus,  $T$  on tagatus- ehk korduvusperiood,  $n$  andmerea pikkus aastates ja  $m$  meid huvitavate sündmuste arv vaadeldava andmerea jooksul (Water Resources Engineering, 2005).

Veel kasutatakse sademete ekstreemumite defineerimiseks lävendeid. Selle eeliseks on asjaolu, et need arvestavad iga jaama eripäradega ja annavad piisavalt tulemusi, et uurida nende ajalist muutlikust. Üheks lävendite võimaluseks on ööpäevaste sademete

sagedusjaotuse kvantiilid (Päädam, 2011). Kvantiile on varasemates uurimustes kasutatud, näiteks Klein Tank ja Können (2003) ja Zolina *et al.* (2004).

Veel saab kasutada **indekseid**, mis võimaldavad andmeid võrrelda ja sademete muutlikkust hinnata. ETCCDI (*Expert Team on Climate Change Detection and Indices*) koduleheküljel [http://etccdi.pacificclimate.org/list\\_27\\_indices.shtml](http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml) on 2015. a mai seisuga 27 erinevat kliimamuutuse indeksit, millest sademetega on seotud 11 (Karl *et al.*, 1999; Peterson *et al.*, 2001; Päädam, 2011). Nendest on järgnevalt esitatud mõned näited.

$RR_{ij}$  –  $RR_{ij}$  on sademete päevane summa päeval  $i$  perioodil  $j$ . Perioodi  $j$  sademesumma väärtused antakse valemiga

$$RR_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij}. \quad (3)$$

$RR_1 - RR_{ij}$  on sademete päevane summa päeval  $i$  perioodil  $j$ . Kokku loetakse päevad kui  $RR_{ij} > 0 \text{ mm}$ .

R95 ja R99 on vaatlusperioodi (aastate) ööpäevaste sademete sagedusjaotuse 95% ja 99% kvantiil.

R95pTOT ja R99pTOT (TOT – total) – kui  $RR_j$  on perioodi  $j$  sademetesumma,  $RR_{wj}$  sajupäeva ( $RR > 0 \text{ mm}$ ) sademe summa perioodil  $j$  ja  $RR_{wj95(99)}$  95% (99%) kvantiil uuritud perioodi sademete jaotusest, siis R95pTOT (R99pTOT) arvutatakse valemiga

$$R95(99)pTOT = 100\% \frac{\sum RR_{ij}}{RR_j}, \text{ kui } RR_{ij} \geq R95(99) \quad (4)$$

(Päädam ja Post, 2011)

Lisaks ETCCDI koduleheküljel toodud ja mõnedele siin kirjeldatud sademetega seotud indeksitele, mida kokku 11 (Karl *et al.*, 1999; Peterson *et al.*, 2001; Päädam, 2011), on sademete klimatoloogias on kasutuses 6 erinevat indeksit. European Climate Assessment & Dataset leheküljel on need defineeritud järgmiselt:

- CDD – maksimaalne järjestikuste kuivade päevade arv ( $< 1 \text{ mm}$ );
- CWD – maksimaalne järjestikuste sademetega päevade arv ( $\geq 1 \text{ mm}$ );
- R10mm – suure sademete hulgaga päevade arv (sademeid  $\geq 10 \text{ mm}$ );
- R20mm – väga suure sademete hulgaga päevade arv (sademeid  $\geq 20 \text{ mm}$ );
- RX1day – suurim sademete hulk ühel päeval;
- RX5day – suurim sademete hulk viie päeva jooksul (ECA&D, 2005).

Kuna need piirid on igale jaamale erinevad (mõju avaldab väga tugevalt reljeef, kaugus merest jne), siis tuleb need ka arvutada igale jaamale eraldi. Nii saab koostada igale jaamale



sademetesagedusjaotus 0,75, 0,95 ja 0,99 kvantiilile ja seejärel loetakse neid ületavate päevade arv. Selle põhjal on kasutatud järgmised indeksid:

- R75p - päevade arv, mil jaamas registreeritud sademete hulk ületab ööpäevaste sademesummade 0,75 kvantiili (keskmiselt vihmane päev);
- R75pTOT – keskmiselt vihmaste päevade osakaal kogu sademete summas;
- R95p – päevade arv, mil jaamas registreeritud sademete hulk ületab ööpäevaste sademesummade 0,95 kvantiili (väga vihmane päev);
- R95pTOT – väga vihmaste päevade osakaal kogu sademete summas;
- R99p – päevade arv, mil jaamas registreeritud sademete hulk ületab ööpäevaste sademesummade 0,99 kvantiili (paduvihm);
- R99pTOT – paduvihma osakaal kogu sademete summas (Päädam, 2009).

Antud töös on kesksel kohal korduvusperioodide ja nendele vastavate ööpäevaste sademehulkade arvutamine jaamadele. Seda tehakse sagedustõenäosuse kaudu ja see avaldub valemiga

$$EP_x(x) \equiv \Pr \{X > x\} = 1 - F_x(x) \quad (5)$$

Kui seda valemit rakendada aegridadele, siis  $EP_x(x)$  on tõenäosus, et  $X > x$  ( $x$  on muutuja) igal konkreetse pikkusega ajaperioodil  $\Delta t$ . Kui  $EP_x(x)$  jääb konstantseks kõikides ajaperioodides, siis saab näidata, et keskmine intervallide/ajaperioodide arv sündmuse  $X > x$  toimumiste vahel on võrdne  $1/EP_x(x)$  ehk see on korduvusperiood (Physical hydrology, 2002).

Järelikult saab siit defineerida korduvusperioodi, mis avaldub valemiga

$$TR_x(x) \equiv 1/EP_x(x) = 1/(1 - F_x(x)) \quad (6)$$

Kui  $\Delta t$  on täpselt 1 aasta, siis  $TR_x(x)$  on keskmine aastate arv aastate vahel, kui  $X > x$ . Kuigi jääb mulje, et termin korduvusperiood viitab mingile perioodilisusele, siis tegelikult seda ei pruugi olla (Physical hydrology, 2002).

## 2.2. Ekstreemsete sademete uuringute ülevaade

Ekstreemsete ilmanähtuste klimatoloogiline uurimine on viimastel aastatel muutunud klimatoloogias üheks kõige aktuaalsemaks uurimissuunaks. Selle põhjuseks on asjaolu, et ekstreemsed nähtused segavad inimeste igapäevaelu, nendega peab arvestama planeerimisel. Samuti on teema päevakorras seoses kliimamuutustega (Christiansen, 2013).

Peamiselt on ekstreemseid nähtusi ja ekstreemume puudutavad uuringud pärit USAst, Euroopast või Hiinast. Leidub nii regioonile (nt riik või kontinent) kui kogu Maale keskendunud uuringuid. Võrdlemisi palju tähelepanu on pööratud kliimaprojektsioonidele ehk sellele, mis eri stsenaariumite põhjal võiks ekstreemsustega hakata toimuma (Kharin *et al.*, 2013).

Ekstreemsuste määramisel on kasutatud nii kvantiile (95- või 99-protsentiil) kui mitmesuguseid statistilisi esinemistõenäosuseid, näiteks korduvusperioode, viimane annab tõenäosuse, kui tihti võib mingi sündmus juhtuda. Mõned uurimused keskenduvad mingile silmapaistvale perioodile või sündmusele (nn juhtumiuuringud), nt tsüklonaalse tormi Xynthia areng (Liberato *et al.*, 2013).

Sademetekstreemumeid on van den Besselaar *et al.* (2013) käsitlenud ülevaatlikus uurimuses Euroopa sademetekstreemumite trendidest perioodil 1951–2010. Uuriti kõiki aastaagu Põhja- ja Lõuna-Euroopas. Leiti, et vaatlusperioodi jooksul on muutunud ekstreemsed sademesündmused sagedasemaks, mis väljendub näiteks korduvusperioodide vähenemises, eriti Põhja-Euroopas talvel ja kevadel. Lõuna-Euroopas on muutused väiksemad. Uurimuses vihjatakse, et muutused olenevad siiski konkreetsest kohast, erinevused võivad välja tulla juba sama riigi piires (van den Besselaar *et al.*, 2013).

Pfahl ja Wernli (2011), kes analüüsisid ilmaekstreemumite autokorrelatsiooni Saksamaa ja Šveitsi kohta, leidsid, et sademete puhul on see madal, st äärmuslikud sajud on üpris lokaalsed ega ulatu sageli naaberjaamadeni. Samuti ei õnnestunud leida mingit ilmamustrit ega tsirkulatsioonitüüpi, millega võiksid need äärmuslikud sademesündmused olla seotud.

Andrade *et al.* (2012) uurisid perioodi 1961–2010 temperatuuri ekstreemumeid Euroopas – temperatuuri on sageli seotud ekstreemsete sademesündmustega. Peamiselt leiti, et väga kuumi päevi on uuritud perioodi lõpuaastatel (2000–2010) rohkem, kuid väga külmi öid jääb vähemaks, mida seostatakse kliimasoojenemisega. Veel uuriti temperatuuri ekstreemumite seoseid tsirkulatsiooniga. Talvel, kevadel ja sügisel leiti märkimisväärne seos NAO ostsillatsiooniga ja anomaaliatega läänevoolus – meridionaalne tsirkulatsioon, atmosfääri blokeeringud jms. Samas suvised külmad ja soojad ekstreemumid on omavahel vähem seotud ja seotud tsirkulatsioonianomaaliatega, mitte niivõrd NAOga (Andrade *et al.*, 2012). Kindlasti on selgete seoste leidmisel tsirkulatsiooniga oluline see, et temperatuuri ja selle ekstreemumite puhul on leitud näitajatest suurim autokorrelatsioon, st äärmusliku juhtumi puhul on ka naaberjaamades samal ajal tavaliselt väga soe või külm, mitte ei piirdu selline sündmus vaid ühe jaamaga, nagu on sademete puhul (Pfahl ja Wernli, 2011).

Ehkki magistritöös kliima tulevikustsenaariume ja projektsioone otseselt ei käsitleta, pakuvad need ometigi teoreetilist huvi. Dankers ja Hiederer (2008) näitavad avaldatud raportis Euroopa temperatuuri- ja sademete ekstreemumite tulevikutrendide kohta, kasutades kõrglahutusliku RCM kliimamudeli simulatsioone, samuti ekstreemselt kõrgete temperatuurijuhtude kasvu 21. sajandi lõpuks. Samas siingi tulevad esile regionaalsed eripärad: kui Lõuna-Euroopas on tõenäolisem kõrge temperatuuri juhtude sagenemine suvisel ajal, siis näiteks talvel on positiivne trend suurem Alpides ja Ida-Euroopas. Samuti on projektsioonide kohaselt oodata näiteks troopilise ööde (miinimumtemperatuur  $>20^{\circ}\text{C}$ ) sagenemist seal, kus neid on vähem, nt Läänemere ümbruses (Dankers ja Hiederer, 2008).

Raportis on näidatud, et Lõuna-Euroopa on tulevikus rohkem ohustatud põuaperioodidest kui sademeterežiimi ühest äärmusest, samas Põhja-Euroopa muutub aga niiskemaks, eriti talvel. Ekstreemsademetes sündmused (paduvihmad) muutuvad tulevikus tõenäoliselt sagedasemateks, ka seal, kus põuasus kasvab (Dankers ja Hiederer, 2008).

Temperatuuri- ja sademete ekstreemumite tulevikutrende on globaalselt analüüsinud Kharin *et al.* (2013), kasutades CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*) mudeleid. Mudelite tulemustes olid lahknevused suuremad ekstreemselt madalate temperatuuride osas. Ekstreemsademetes puhul leiti usutavamad tulemused troopikavälise piirkonna kohta, samas kui troopika ja lähistroopika aladel on määramatus väga suur. Siiski selgus, et näiteks ekstreemselt madalad temperatuurid kasvavad ekstreemselt kõrgetest rohkem (v.a kohati troopikas), eriti krüosfääri servaaladel. Ekstreemsademetes intensiivsus muutub suhteliselt rohkem kui aasta keskmine sademehulk. Ka ekstreemsademetes korduvusperioodide lühenemine (v.a mõnes lähistroopika paigas) on tõenäoline (Kharin *et al.*, 2013).

Väga palju ekstreemtemperatuure on külmadel ja veel rohkem anomaalselt soojadel aastaegadel. Eestiski on viimastel aastatel järjest olnud kuumi suvesid, mil on ette tulnud nt kuumalaineid või sagedasi ekstreemselt kõrgeid temperatuure, millega liitub tihti ka põud kui sademerežiimi äärmus. Seepärast pakub huvi perioodi 1951-2010 tehtud uurimus ekstreemselt kuumadest suvedest Kesk- ja Ida-Euroopa kohta, kasutades kriteeriumina kahe standardhälbeühiku suurust anomaaliat võrreldes keskmisega. Näidati, et selliste suvede sagedus on kasvanud, tipnedes 2010. a suvega, mis oli kuumim ja suurima ulatusega kogu perioodi jooksul (Twardosz ja Kossowska-Cezak, 2013).

Veel on uuritud ekstreemselt tugevaid tuuli, olgu siis pagidena või tsüklonaalsetes tormides. Rohkem on tehtud Euroopas selliseid uurimusi kas regionaalsete piirkondade kohta, näiteks suviste ekstreemtuulte kohta Saksamaal (Gatzen, 2013) või juhtumiuuringuid mõnest palju kahju põhjustanud tsüklonaalsest tormist. Saksamaa uurimus võiks võrdlusmaterjalina olla

käesoleva töö seisukohast oluline seetõttu, et seal käsitletakse küllaltki palju konvektsiooniga seotud sündmusi (põhjustavad sageli ekstreemsademeid), mis viimastel aastatel on Eestiski tähelepanu pälvinud. Samas juhtumiuuringud, nagu torm Xynthiast, mis märatses 2010. a veebruari lõpus Lääne-Euroopas ja jõudis juba rahunenuna Eestissegi (Liberato *et al.*, 2013), võivad anda olulist lisainformatsiooni tsüklonaalsete tormide põhjuste, ulatuste ja trajektooride osas. Pfahl ja Wernli (2011) näitasid, et ekstreemtuulte autokorrelatsioon on keskmise kuni madal võrreldes teiste ekstreemnäitajatega, sõltudes oluliselt jaama asukohast ja topograafiast.

Kuna töö on seotud sademete ekstreemumite kaudu ekstreemsete ilmanähtustega, siis pakub huvi Euroopa Ohtliku Ilma Andmebaas (*European Severe Weather Database – ESWD*), mis asutati 2002. a mitteametliku vaatlusvõrguna ja millest on ülevaate andnud Dotzek *et al.* (2009). See keskendub ohtlikele nähtustele, nagu pagid, paduvihmad, tornaadod, hiidrahe jms, mis on enamasti konvektsiooniga seotud. Viimasel ajal lisatakse andmebaasi ka laviinid ja isegi udupüksid (ESWD, 2013).

### 2.3. Eesti sademekliima

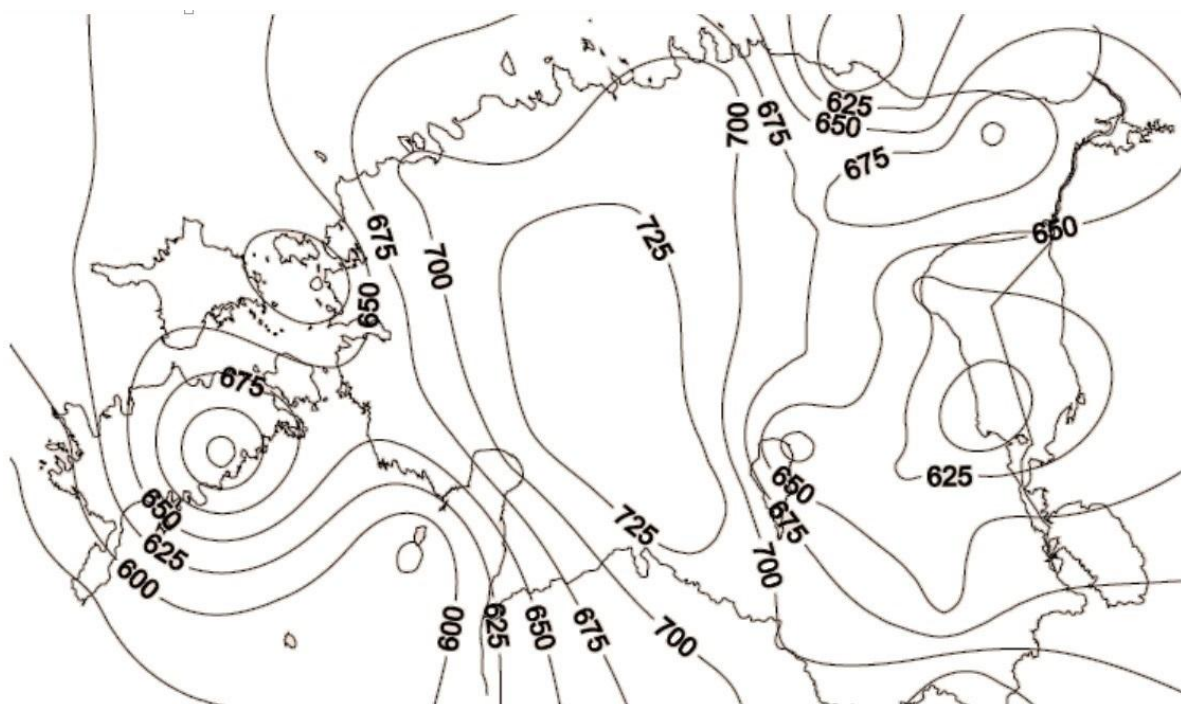
Eesti jääb merelise ja mandrilise kliima üleminekualale, kusjuures olulised kliima mõjutajad on Atlandi ookeani põhjaosa, Skandinaavia mäestik, Läänemeri ja Ida-Euroopa lausmaa. Kliima on suhteliselt niiske, kuid ette võib tulla nii põua- kui ka liigsademetega perioode (Tammets ja Jaagus, 2013).

Jaagus ja Tarand (1998) on uurinud Eesti sademete territoriaalset jaotust. Selles töös võeti vaatluse alla 62 mõõtmispunkti andmed alates 1920. aastast ning sademete hulka mõjutavad tegurid, et välja selgitada sademete jaotuse seaduspärasused ja selle põhjused Eestis.

Jaagus ja Tarand (1998) võtsid oma töös kõige olulisemaks sademete hulka määravaks teguriks tsüklonaaalsuse. Tsüklonitega seotud sajualad on Eestiga võrreldava suurusega, mistõttu riigi erinevates osades võib sajuhulk konkreetse tsükloni puhul märgatavalt erineda. Tsükloniga seotud raamides mõjutab sademete hulka ja jaotust aluspind, mille mõju seisneb õhu tõusu soodustamises (maismaa, kõrgustikud) ja takistamises (veepinna konvektsiooni pärssiv mõju) või muudetud turbulentsis. Aluspinnaga seotud teguriteks on pinnamood, näiteks kõrgustikud, metsasus ja linnad, samuti veekogud ning kaugus nendest. Lisaks arvestati edela-kirdesuunalist kaugust merest, sest õhuvoolud on aastas keskmiselt suunatud

Eestis edelast kirdesse. Kõiki neid tegureid kasutati maastikuliste paranditena, et sademete territoriaalset jaotust võimalikult hästi välja selgitada ja seletada.

Sademete territoriaalse jaotuse kaartidelt selgus (perioodi 1966–1985 kohta), et Eesti aastane keskmine sademete hulk on 600–700 mm. Vähem, umbes 600 mm, sajab eelkõige mere kohal, aga ka Peipsil ja selle rannikualadel. Olulisim sademete maksimumi piirkond jääb Sakala kõrgustikule, kus sajab keskmiselt kuni 750 mm aastas ja see maksimum ulatub vööndina Loode-Eestini (joonis 1; Jaagus, 2013). Ka Pandivere ja Haanja kõrgustikul sajab rohkem kui ümbritsevatel aladel, kuni 700 mm (Jaagus ja Tarand, 1998). Sarnaseid tulemusi said ka Tammets ja Jaagus (2013).



**Joonis 1.** Sademete territoriaalse jaotus ehk aasta keskmine sademehulk 1960–2010 kohta (Jaagus, 2013)

Tammets ja Jaagus (2007) uurisid äärmuslikult kuivade ja sajuste päevade esinemissageduse territoriaalset jaotust Eestis perioodil 1957–2006 54 vaatluskoha andmete alusel. Nii sademepuuduse kui ka liigsademetega päevade leidmisel kasutati ööpäeva summade libisevaid keskmisi. Defiineerimisel lähtuti agrometeoroloogilistest kaalutlustest: sademepuudusega päevi loeti alates 20-päevase sademeteta perioodi viimasest päevast. Liigsademetega perioode arvestati alates 10-päevase perioodi viimasest päevast juhul, kui selle perioodi libisev keskmine sademete hulk oli vähemalt 10 mm (Tammets ja Jaagus, 2007).

Töö tulemusena selgus, et selliste kriteeriumide alusel on liigsademetega päevi ainult suvel ja sügisel, kusjuures kõige rohkem juulis ja augustis: mõlemal kuul keskmiselt 37% kõigist

liigsademetega päevadest. Põuaperioodi, kui selleks lugeda 20-päevast või pikemat sademeteta aega, võib-olla igas kuus, kuid kõige enam on neid mais ja augustis (vastavalt 17 ja 22% aastasest sademepuudusega päevade arvust). Uuritud 50-aastase perioodi jooksul on ekstreemsete päevade arv ja selle varieeruvus märkimisväärselt tõusnud (Tammets ja Jaagus, 2007).

Uuriti ka ekstreemse sademerežiimiga perioodide varieerumist Eesti piires. Sademepuudusega päevade hulga erinevused on mitmekordsed, kusjuures põuahtlikumad on Lääne-Eesti ja saared, eriti kevadel-suve hakul. Selle põhjuseks on jahe meri, mis põhjustab stabiilset õhu kihistust ega soodusta õhu vertikaalset liikumist ja sajupilvede arengut – pärsib konvektsiooni. Seevastu sisemaal on väiksem põuaht. Uuriti ka maksimaalset põuapäevade arvu. Selgus, et väikseim on see Kesk-Eestis ja suurim Eesti äärmises kagunurgas, Saaremaa lääneosas ja kohati Põhja-Eestis. Põuased suved olid näiteks 2002. ja 2006. aastal (Tammets ja Jaagus, 2007).

Liigsademetega päevad on põuapäevadega võrreldes vastupidiselt jaotunud – neid on märgatavalt vähem rannikujaamades ja enim Kagu-Eestis. Ka Põhja-Eestis on liigsademetega päevi üsna palju. Kesk-Eestist kuni saarteni jääb piirkond, kus on liigsademeteks väiksem tõenäosus – sellest alast nii lõuna kui põhja pool on suvel liigsademetega päevi rohkem. Liigsademetega päevi ei ole tavaliselt suvel üle kümne, väljaarvatud mõnel erandlikul aastal. Liigsajused suved olid näiteks 1978., 1987. ja 2005. aastal (Tammets ja Jaagus, 2007).

Päädam (2009) uuris kliima soojenemise mõju ekstreemsademetete esinemisele Eestis. Andmetena kasutati EMHI (alates 1.06.2013 Keskkonnaagentuuri alluvuses töötav Riigi Ilmateenistus) 40 vaatlusjaama aegridu perioodi 1961–2005 kohta. Ekstreemsademed defineeriti mõõtmistulemuste kvantiilidena: näiteks väga sajuseks päevaks loeti 0,95 ja paduvihmaks 0,99 kvantiil. Kuna igal jaamal on vastav lävend tegelikult erinev, siis arvutati kvantiilid igale jaamale eraldi nii aastate kui aastaegade lõikes. Lisaks kasutati Jaaguse ja Tarandi (1998) sademerajoneeringut .

Töö tulemusena leiti, et väga sajuste päevade ja paduvihmade hulk on vaadeldaval perioodil suurenenud, kusjuures statistiliselt olulisi trende on enim talvel. Samas väga sajuste päevade keskmine sajuhulk on kõikidel aastaegadel tõusnud peaaegu võrdselt (3,3%). Paduvihmade sajuhulk on suvel kasvanud aga 8,2% ja talvel 4,8% (Päädam, 2009).

Jaagus (1992) uuris sademete perioodilisust Eestis. Uurimuses kasutati kõiki vaatluspunktide andmeid perioodi 1866-1990 kohta. Töö tulemusena leiti, et sademete hulk on uuritud perioodi vältel kasvanud. Selle põhjuseks on arvatavasti sademete paremad sademete registreerimise võimalused ja üldine tendents sademete suurenemisele. Eriti märgatav on

sademetega kasv olnud talvel, mille põhjuseks on nii uut tüüpi sadememõõtjate (Tretjakovi) kasutuselevõtt kui ka kliima merelisuse suurenemine. Suvekuudel ei leitud statistiliselt olulist sademete hulga suurenemist (Jaagus, 1992). Spektraalanalüüs näitas, et sademete puhul on jälgitavad kolm erineva pikkusega tsüklit: üldine 25–30-aastane perioodilisus; 6–7-aastane perioodilisus, mis on iseloomulik eelkõige suvekuudele ja 50–60-aastane perioodilisus, mis on iseloomulik eelkõige sügiskuudele (Jaagus, 1992).

Jaagus *et al.* (2010) uurisid Baltimaades sademeid ja nende seost nii maastikuliste tegurite kui atmosfääri tsirkulatsiooniga. Töös võeti aluseks kuude sademete summad kokku 123 jaamas nii Eestis, Lätis ja Leedus perioodil 1966–2005. Arvestati 52 maastikuteguri ja 13 tsirkulatsiooni-muutujaga.

Uurimuse tulemusena selgus, et sademejaotuse peamine määraja Baltimaades on Läänemeri. Sellega paralleelselt asuvad erinevad sademete tsoonid, sest Baltimaad jäävad mere suhtes tuulepealsele küljele, sest aasta keskmiselt on õhuvool merelt sisemaale (edelast kirdesse). Sealjuures asub merest 10–60 km kaugusel nn sademehari ehk sademeterikkam ala. Teiseks oluliseks sademete hulka ja jaotust mõjutavaks faktoriks selgus aluspinna kõrgus. Seetõttu on kõrgustikel sademeid rohkem (Jaagus *et al.*, 2010).

Sademetega seose uurimine atmosfääri tsirkulatsiooniga näitas, et läänevool on tugevalt positiivses korrelatsioonis eelkõige talve sademete hulga, eriti mõõdukal kaugusel merest. Meridionaalse õhuvooluga on sademed vähem seotud (Jaagus *et al.*, 2010).

Uuriti veel sademete ruumilist autokorrelatsiooni. Selgus, et jaamade sademehulgad ja sadememuster on aastasiseselt sarnane, kuid see oleneb vaadeldavate jaamade omavahelisest kaugusest. Suvisel ajal on korrelatsioon väiksem, sest siis on sademete põhjuseks konvektsioon (rünksajupilved ja nendega seotud äikesesademed), mis on ruumiliselt väga heterogeenne. Külmal aastaajal on ruumiline autokorrelatsioon märksa suuremal alal palju kõrgem, sest siis määravad sademed tsüklonid ja fronid, mis mõjutavad ulatuslikku piirkonda ning sademete jaotumine on erinevates piirkondades sarnasem (Jaagus *et al.*, 2010). Ehkki Eestis on ekstreemsademeid vähe uuritud, saab siiski nimetada näiteks Merilaini ja Posti (2006) ning Mätlikku ja Posti (2008), kes uurisid väga suurte sadude ( $\geq 50$  mm 24 h jooksul) esinemist Eestis aastatel 1961–2005, kuid olulisi trende ei tuvastanud. Üks põhjustest, miks trende ei tuvastatud, on kindlasti lühenemise suurus – mõnedes jaamades ei leitud sellel perioodil ühtegi nii suurt ööpäevast sademete summat (Päädam, 2011; Päädam ja Post, 2011).

Veel on põhjalikumalt ekstreemsademeid Eesti kohta uurinud Tammets ja Jaagus (2013), kes võtsid aluseks liigsademetega päevad ja ööpäeva sademesummade libisevaid keskmisi.

Kasutati 51 jaama andmeid perioodi 1957–2009 kohta. Selgus, et selliseid päevi, kui 10 päeva jooksul sajab üle 100 mm, on vaid suvel ja sügisel, kuudest enim juulis ja augustis. Samas väga sajuseid päevi (R10 ja R20 mm) võib olla mistahes ajal aastast. Samuti uuriti sademepuudusega (põua-) päevadega perioode. Metoodika ja tulemused sarnanesid Tammets ja Jaagus (2007) tööga. Märkimist väärib 2002. a suvi, kui augustist septembrini oli 30 sademepuudusega päeva. Sama aasta osutus uuritud perioodi jooksul keskmiselt kõige põuasemaks, sest jaamades selgus keskmiseks sademepuudusega päevade arvuks 12,6 (Tammets ja Jaagus, 2013).



## 3. Metoodika ja andmed

### 3.1. Jaamade andmed

Magistritöö aluseks on Riigi Ilmateenistuse jaamades mõõdetud ööpäevaste sademeandmed, mis on kogutud aastatel 1948–2013. Konkreetne aegrea pikkus jaamati erineb – mõnes algab see juba 1948. aastast, mõnes alles 1963. aastal, samuti lõpeb vaadeldav aegrida olenevalt jaamast vahemikus 2009–2013 (tabel 1).

Mõõtmised on kõikides jaamades kuni 2003. aastani tehtud käsitsi, kasutades 1950. aastateni Nipheri tüüpi sadememõõtjaid, aga alates 1950. aastatest Tretjakovi tüüpi sadememõõtjaid (Nõges, 2012; Mätlik ja Post, 2008). Alates 2003. aastast hakati jaamu automatiseerima ja paljudes jaamades lõpetati järgnenud aastate jooksul manuaalvaatlused ära. Pärast 2010. aastat on manuaalvaatlused jäänud järgmistesse ilmajaamadesse: Tallinn-Harku, Pärnu-Sauga, Tartu-Tõravere, Vilsandi ja Võru (Ilmateenistus, 2014). Edaspidi kasutatakse jaama nimedena vaid Tallinn, Pärnu ja Tartu.



**Joonis 2.** Töös kasutatud vaatlusjaamade nimed ja nende asukohad.

Vaatamata viimaste aastate tööplaani muudatustele on jätud meteoroloogilise ööpäeva piiriks kell 18 GMT, et töötluses säilitada ööpäevaste andmete võrreldavus varasemate andmetega. Seega ööpäevased sademed summeeriti iga päev kell 18:00 UTC (Ilmateenistus, 2014).

Andmekogu koosneb 25 ilmajaama andmetest (jaamade asukohti vt joonis 2). Nendest kahekümne viiest oli andmeid puudu seitsmeteistkümmel, kusjuures Tooma jaamas ületas puuduvate sademete hulk 2% piiri. Tooma ilmajaama andmed on puudu mitmel järjestikusel aastal, nii et korduvusperioode ja neile vastavaid sajuhulki on mõistlik arvutada vaid olemasoleva tervikliku andmerea (1960–1999) kohta, mida tuleb interpoleerimisel arvestada. Liigaastate 29. veebruar jäeti uurimistööst välja, sest see tekitas arvutuslikke (tehnilisi) probleeme. 29. veebruari väljajätmist ei käsitleta andmete puudumisena. Need ööpäevad, mille kohta andmed puudusid, samastati andmemassiivis nullsademetega, et vältida arvutuslikke probleeme.

Pärast 1966. aastat on kasutusel märgumisparand 0,2 mm. See viitab andmekogu mittehomoogeensusele, kuid ekstreemumite uurimist see oluliselt siiski ei mõjuta.

**Tabel 1.** Andmete aegrea pikkused ja olemasolu ilmajaamades

	Jõgeva	Jõhvi	Kärdla	Kihnu	Kunda	Kuressaare	Kuusiku	Narva	Nigula
<b>Periood</b>	1957-2011	1957-2013	1963-1999	1951-2013	1951-2013	1957-2009	1951-2013	1948-2013	1963-2013
<b>Puudu /kogu arv</b>	0	0	0	0	1/22630	39/19345	669/22995	0	243/18615
<b>Puudu (%)</b>	0	0	0	0	<0,01	0,02	0,29	0	0,01

	Pakri	Pärnu	Ristna	Ruhnu	Sõrve	Tallinn	Tartu	Tiirikoja	Tooma
<b>Periood</b>	1957-2009	1948-2013	1948-2013	1957-1989	1957-2013	1948-2013	1948-2013	1948-2013	1960-2013
<b>Puudu /kogu arv</b>	10/19345	399/24090	0	1/12045	1/20805	435/24090	?/24090*	0	7089/14600
<b>Puudu (%)</b>	<0,01	0,017	0	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	0	48,55

	Türi	Valga	Viljandi	Vilsandi	Virtsu	Väike-Maarja	Võru	Türi	Valga
<b>Periood</b>	1948-2013	1951-2013	1948-2013	1949-2013	1960-2013	1962-2013	1948-2013	1948-2013	1951-2013
<b>Puudu /kogu arv</b>	446/24090	1/22995	54/24090	81/23725	85/18710	0	567/24090	446/24090	1/22995
<b>Puudu (%)</b>	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0	0,02	0,02	<0,01

\*- Tartu andmetabelites pole nullsademeid puuduvatest andmetest eristatud, mistõttu puuduvate andmete hulk jääb teadmata. Juhendajate väitel ei ületa puuduvate andmete hulk tõenäoliselt 0,01 % piiri.

### 3.1. R ja sellel põhinev analüüsipakett extRemes

Magistritöös kasutati korduvusperioodidele vastavatele ööpäevaste sajuhulkade ja ööpäevaste sajuhulkade korduvusperioodide leidmiseks funktsiooniga sobitamist ja GEVi abil täpsete väärtuste välja arvutamist. See teostati vabavara R ja sellel põhineva analüüsipaketi extRemes abil.

R on vabavaraline avatud lähtekoodiga statistiliste arvutuste ja graafika keskkond. Avatud lähtekood võimaldab igal huvilisel osaleda tarkvara arendamises (Aasa, 2014).

Lisaks R-ile kui sellisele on veel RStudio, mis on integreeritud tarkvaraliste tööriistade kogum, mis aitab R-iga töötamise produktiivsust veelgi suurendada. See sisaldab nii konsooli kui ka graafikute, ajaloo, koodiparanduse ja töökeskkonna haldamist hõlbustavaid vahendeid (Aasa, 2014).

R üks analüüsipakett extRemes on mõeldud andmete analüüsiks, et välja selgitada ekstreemväärtused (ekstreemumid), kasutades selleks ekstreemväärtuste analüüsi (*Extreme value analysis* – EVA). Viimane võimaldab kvantifitseerida ekstreemväärtuste juhuslikku käitumist, sest selliseid väärtusi on andmeridades väga vähe ja neid ei saa tavalise statistika abil kirjeldada. Selle aluseks on tõenäosuste leidmine, spetsiifilised jaotused (Gumbel, Frechet, Weibull) ja vastavate funktsioonidega sobitamine (Gilleland, 2015).

Paketi extRemes peamised funktsioonid on:

- fevd: ekstremaalväärtuste (EV) jaotuste [üldistatud ekstremaalväärtuste jaotus (GEVD), Gumbeli jaotus, Üldistatud Pareto jaotus (GPD), eksponentjaotus] sobitamine (blokimaksimumid või lävendi ületamised);
- ci: funktsioon EV jaotuse parameetrite ja realiseerumismäärade usalduspiiride leidmiseks;
- taildep: hii ja/või hii-katuse hindamise funktsioon – need statistikud annavad informatsiooni kahe juhusliku suuruse sabasõltuvuse kohta;
- atdf: Auto-tail sõltuvusfunktsioon ja blokk. See aitab informeerida võimalikest sõltuvustest extRemesi protsessidest. Siiski asjaolu, et mõne protsessi puhul selgub kõrge korrelatsioon, ei pruugi olla seotud analüüsipaketiga extRemes;
- decluster: dekluster läveületus (*Decluster threshold exceedance*) andmekogumis aitab saada uusi seotud protsesse, mis oleksid rohkem sõltumatud analüüsipaketis extRemes;
- extremalindex: hindab ekstremaalindeksi, mis on analüüsipaketi extRemes sõltumatuse näitaja;

- `devd`, `pevd`, `qevd`, `revd`: EV jaotuste tihedusfunktsioonid, jaotusfunktsioonid, kvantiilfunktsioonid ja simuleerimine;
- `pextRemes`, `rextRemes`, `return.level`: funktsioonid sobitatud EV jaotuse jaotusfunktsiooni väärtuse leidmiseks, temast simuleerimiseks ja vastavate realiseerumismäärade leidmiseks (Gilleland, 2015).

### 3.2. Töö käik

Andmetabelid muudeti sobivaks R-i keskkonna jaoks, sest funktsiooniga sobitamine ja korduvusperioodidele vastavate sajuhulkade (millimeetrites) ja nende korduvusperioodide (aastates) arvutamine toimus R-s. Seejärel loodi R-s vastav skript (näitena Jõgeva kohta vt Lisa 1), et kiirendada ja automatiseerida funktsiooniga sobitamine.

Skript annab eeskirja selleks, et analüüsipakett leiaks andmerekast üles ekstreemsed sademesündmused, reastaks need punktgraafikusse ja sobitaks *fevd* funktsiooni abil sobiva funktsiooniga (GEV, Gumbel, GP, Exponential, PP), mille järgi saab tuletada korduvusperioodidele vastavad sajuhulgad iga jaama kohta vastava graafiku alusel. Kuna *extRemes* ainult sobitab funktsiooni olemasolevate andmepunktidega, st punktgraafikus, siis täpseid sajuhulkasid veel kätte ei saa, vaid need tuleb eraldi arvutada.

Selleks, et korduvusperioodile vastavad täpsed sajuhulgad (mm) välja arvutada, kasutati andmete alusel skriptiga R-s arvutatud parameetreid, mille väärtused pandi GEV valemisse:

$$F(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \xi \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\} \quad (7)$$

kus kolm parameetrit  $\xi$ ,  $\mu$  ja  $\sigma$  näitavad vastavalt jaotuse kuju, kohta ja skaalat, kusjuures  $\sigma$  ja  $1 + \xi(x-\mu)/\sigma$  peavad olema nullist suuremad, kuid kuju ja koha parameeter võivad omandada mistahes reaalarvulisi väärtusi. Skriptiga arvutatud parameetrid rakendati valemisse vastavas käsureas (Lisa 2).

Seega arvutas R skriptide jooksutamisel antud jaama kohta jaotuse parameetrid, pani need GEV valemisse ja arvutas sealt etteantud korduvusperioodidele (2, 5, 10, 20, 100 aastat) täpsed sajuhulgad millimeetrites välja. Seejärel koostati skript pöördülesande ehk korduvusperioodide arvutamise jaoks koos graafiku joonistamisega (Lisa 3).

Kuna võimalik on arvutada ainult pikema kui ühe aasta pikkuse korduvusperioodile vastavaid sajuhulki, siis väga väikeste (<20 mm) sajuhulkade korduvusperioode ei saagi arvutada. Et 20

mm korduvusperiood ongi *ca* 1 aasta, otsustati leida 20, 30, 40, 50, 60 mm ööpäevaste sajuhulkade korduvusperioodid aastates. Skript arvutas 0,1-aastase sammuga alates 1,1 aasta pikkusele korduvusperioodile vastavaid sajuhulki (mm). Tulemustest tekkis tabel, mis võimaldas välja lugeda soovitud sajuhulkade korduvusperioodid, v.a kahel jaamal (Tooma, Kärkla), kus aegrea lühidus ja teiste jaamade aegridades võrreldavate ekstreemsademetesündmuste puudumine ei võimaldanud >50 mm korduvusperioode leida. Kuna täpsus on piiratud 0,1 aastaga, siis leitud korduvusperioodid on teatud määral interpoleeritud (ümaratud). Interpoleerimise õigsuse kontrollimiseks kirjutati skripti käsk sujuva joograafiku tegemiseks (joonis 14).

Seejärel koostati tarkvaraliste tööriistade Kriging ja IDW abil ArcGISis kaardid. Paraku osutus tulemus ebarahuldavaks, sest tekkinud samajooned olid ilmselgelt ebaloogilised: Krigingi puhul suurte jõnksudega ja IDW puhul moodustasid „mullikesi“, mitte sujuvaid samajooni, sest andmepunkte on nende interpoleerimismeetodite jaoks liiga vähe, kuna sademete (ekstreemsete sündmuste) puhul on jaamadevaheline korrelatsioon liiga väike. Lõpuks koostati kaardid Surferis (Golden Software, Inc.) n-ö punktkrigingumeetodil. Selle tulemus osutus rahuldavaks.

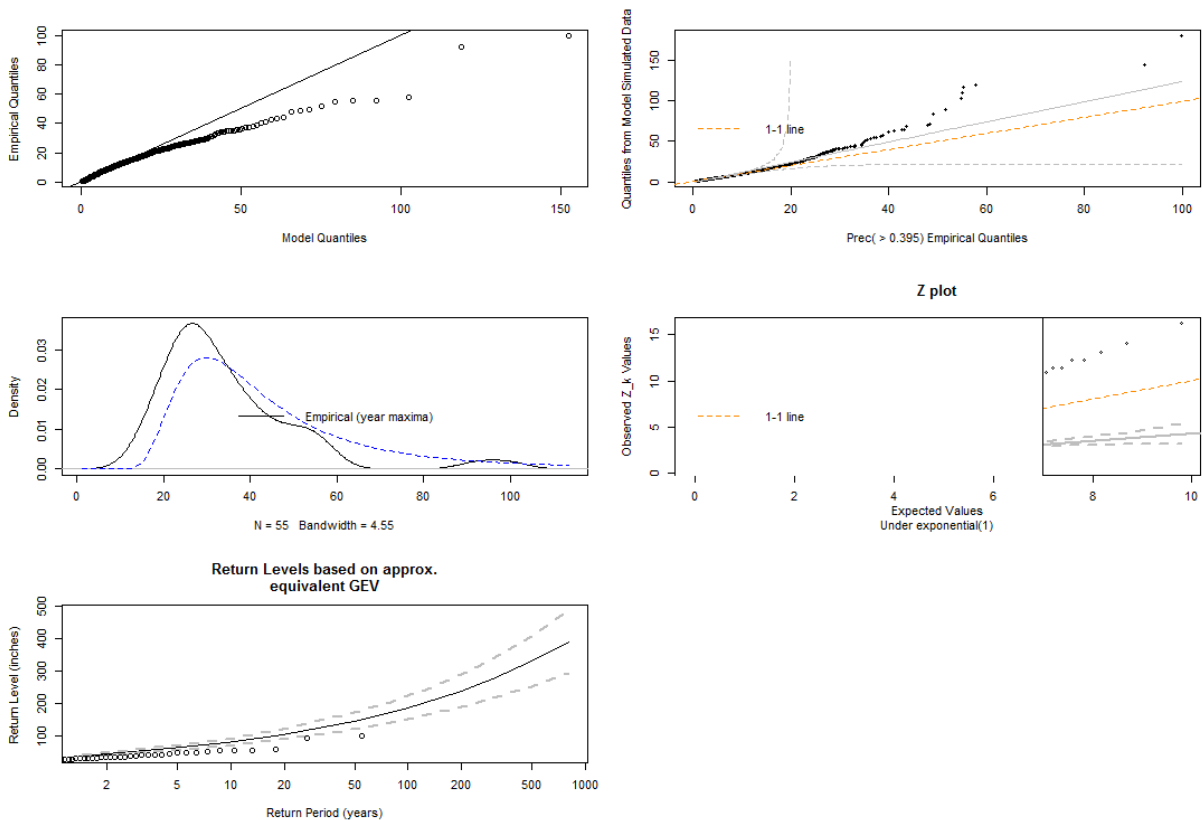
Interpoleerimismeetodiks jäi kriging, mida kasutatakse sademekaartide koostamisel sageli. Põhimõtteliselt arvutatakse selle käigus erinevate jaamade kaalud antud punkti sademete väärtuse leidmiseks, lähtudes variogrammist. Kui sademed on ruumi ühtlaselt jagunenud, mistõttu jaamadevahelised erinevused on väikesed, siis võib kaugemal asuvate jaamade kaal interpoleerimisel olla suhteliselt suur. Kui aga sademete väli on väga suure muutlikkusega, jääb kaugemal asuvate jaamade kaal suhteliselt palju väiksemaks kui lähedaste jaamade kaal. Lõpuks tehti korduvusperioodi funktsiooniga lähendamise täpsuse hindamiseks Excelis ja R-s mõned täiendavad graafikud.

## 4. Tulemused ja arutelu

### 4.1. ExtRemes väljundi kirjeldus

ExtRemes väljastas pärast vastava skripti rakendamist mitmeid histogramme ja graafikuid. Korduvusperioode puudutavad graafikud on leitavad kahest blokist, millest üks toodud alljärgnevalt (joonis 3).

fevd(x = Prec, data = Fort, threshold = 0.395, type = "PP", units = "inches")



**Joonis 3.** ExtRemesi analüüsi tulemusena väljastatud blokk Jõgeva kohta.

Selliselt graafikult saab küll graafilisel meetodil põhimõtteliselt lugeda välja korduvusperioodid ja neile vastavad sajuhulgad, ent mitte päris täpselt. Siiski, vastavat skripti rakendades ja GEV valemi järgi õnnestus ööpäevased sajuhulgad (mm) iga jaama kohta palju täpsemalt välja arvutada (tabel 2).

Tooma jaamas jäi aegrida liiga lühikeseks ja puudusid piisavalt ekstreemsed sündmused, et 100 aasta korduvusperioodile vastavat ööpäevast sajuhulka välja arvutada. Tegelikult ei pruugi olla teisteski jaamades 100 aasta korduvusperioodile leitud sajuhulgad usaldusväärsed (nt Kihnu 106,9 või Sõrve 130,8 mm ööpäevane sajuhulk – tabelis olevaid väärtusi pole neis jaamades kunagi esinenud), sest kasutatud aegread jäid oluliselt lühemaks kui 100 aastat. Siit

tulenebki sisuline küsimus: kui meil on N aasta pikkune vaatlusrida, siis kui haruldast sündmust (s.o jaotuse "sabas" olevat) saab veel usaldusväärset kirjeldada? Ilmne on see, et nt 50–70-aastane empiiriline vaatlusrida ei võimalda leida kord 100 aasta kohta toimuvat sündmust muidu, kui lähendades vaatluste jaotust mingi teoreetilise jaotusega. Seega küsimus taandub jaotuse määramisele ja selle õigsusele.

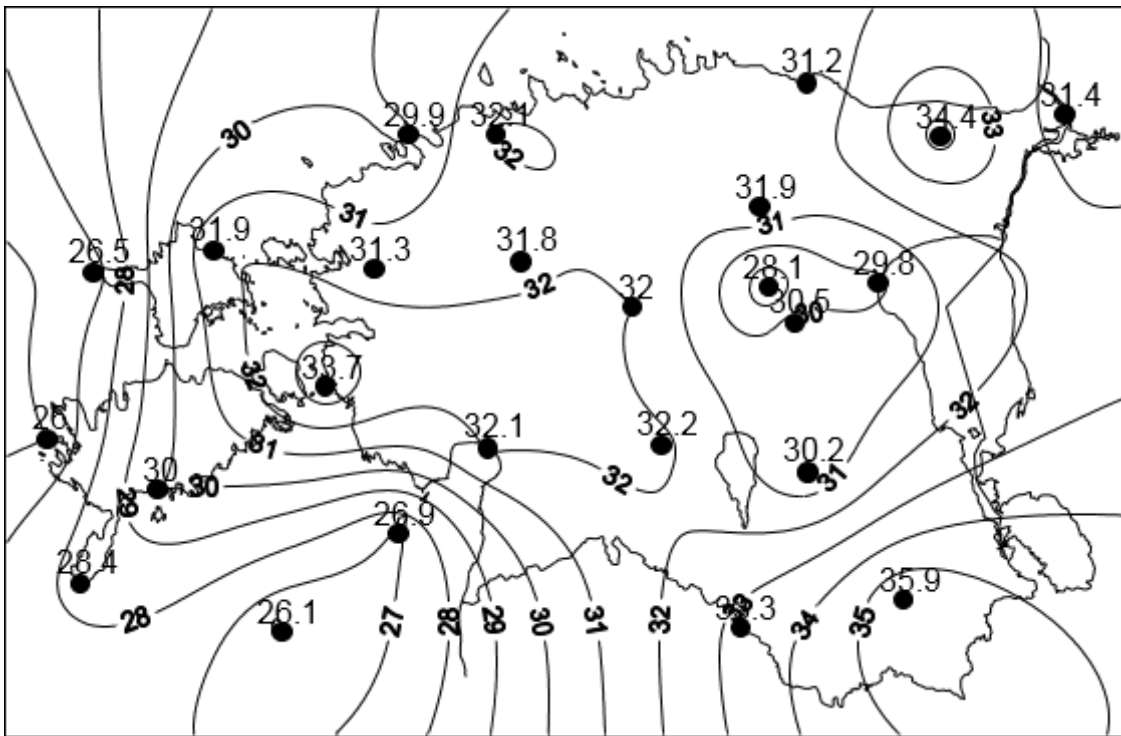
**Tabel 2.** Korduvusperioodidele vastavad sajuhulgad (mm)

<i>jaam/ periood aastates</i>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>100</b>
<b>Jõgeva</b>	30,5	43,2	53,4	64,9	98,1
<b>Jõhvi</b>	34,4	47,7	57,7	68,5	97,3
<b>Kärdla</b>	31,9	39,8	44,2	47,9	54,5
<b>Kihnu</b>	26,9	38,1	48,5	61,5	106,9
<b>Kunda</b>	31,2	41,6	48,5	55,2	70,5
<b>Kuressaare</b>	30,0	41,0	49,4	58,3	82,0
<b>Kuusiku</b>	31,8	41,4	48,0	54,7	70,7
<b>Narva</b>	31,4	41,0	47,0	52,5	64,0
<b>Nigula</b>	31,3	44,2	54,6	66,1	99,2
<b>Pakri</b>	29,9	39,4	46,2	53,1	70,3
<b>Pärnu</b>	32,1	42,7	50,4	58,2	78,2
<b>Ristna</b>	26,5	37,3	48,4	63,5	124,1
<b>Ruhnu</b>	26,1	33,4	39,6	46,7	68,8
<b>Sõrve</b>	28,4	43,0	56,4	73,1	130,8
<b>Tallinn</b>	32,1	44,1	53,2	62,9	88,9
<b>Tartu</b>	30,2	40,8	48,9	57,4	80,1
<b>Tiirikoja</b>	29,8	41,1	48,5	55,7	72,1
<b>Tooma</b>	28,1	36,5	41,8	46,7	–
<b>Türi</b>	32,0	41,9	49,0	56,2	73,9
<b>Valga</b>	33,3	44,1	52,3	61,0	84,1
<b>Viljandi</b>	32,2	42,1	48,5	54,6	68,1
<b>Vilsandi</b>	26,0	34,3	40,9	48,2	69,2
<b>Virtsu</b>	33,7	46,6	54,5	61,6	76,2
<b>Väike-Maarja</b>	31,9	42,3	49,8	57,4	76,5
<b>Võru</b>	35,9	50,4	61,5	73,6	106,5

## 4.2. Korduvusperioodide ja nende sajuhulkade territoriaalne jaotus

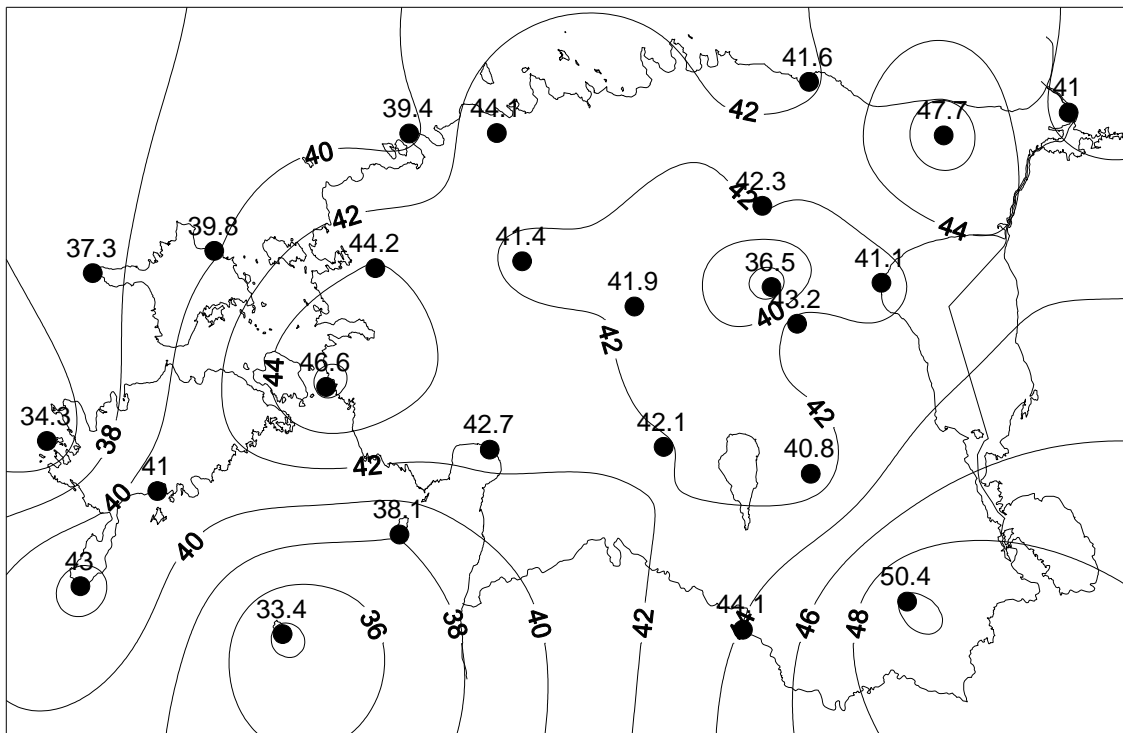
Tabelis 2 esitatud väärtusi kaartidel kujutades (joonised 4...8) on näha, et ööpäevaste sajuhulkade väli on väga ebahomogeenne. Samuti tuleb esile seaduspärasus: mida pikem korduvusperiood, seda haruldasemaks (juhuslikumaks) vastavad äärmuslikud sademesündmused muutuvad, mistõttu ruumiline korrapära hakkab kaduma, sest juhuslikkuse osatähtsus nende sündmuste esinemisel muutub väga suureks.

Siiski on joonistelt 4 ja 5 näha, et 2- ja 5-aastastele korduvusperioodidele vastavad sajuhulgad on suuremad sisemaal ja väiksemad saartel. Selle esmaseks põhjuseks on kindlasti erinev aluspinna tüüp: maismaa soojeneb kiiremini ja tugevamalt, mistõttu on seal konvektsiooniga seotud sademeid rohkem ja need on tugevamad.

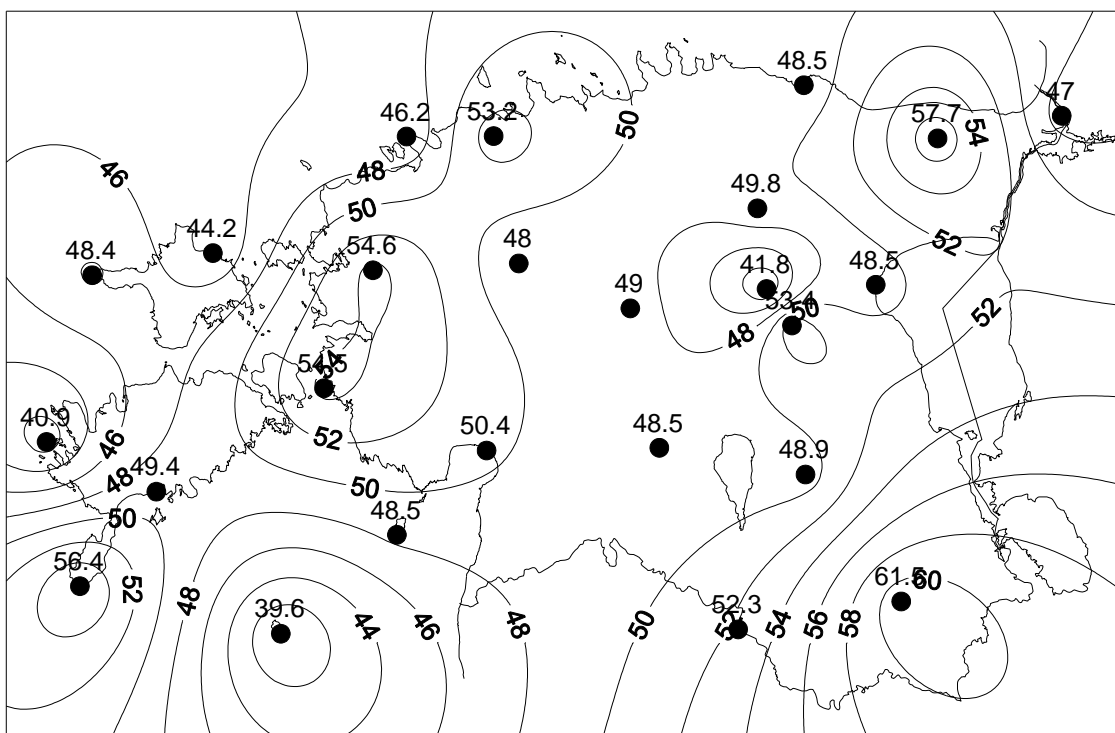


**Joonis 4.** 2-aastasele korduvusperioodile vastavad sajuhulgad (mm).

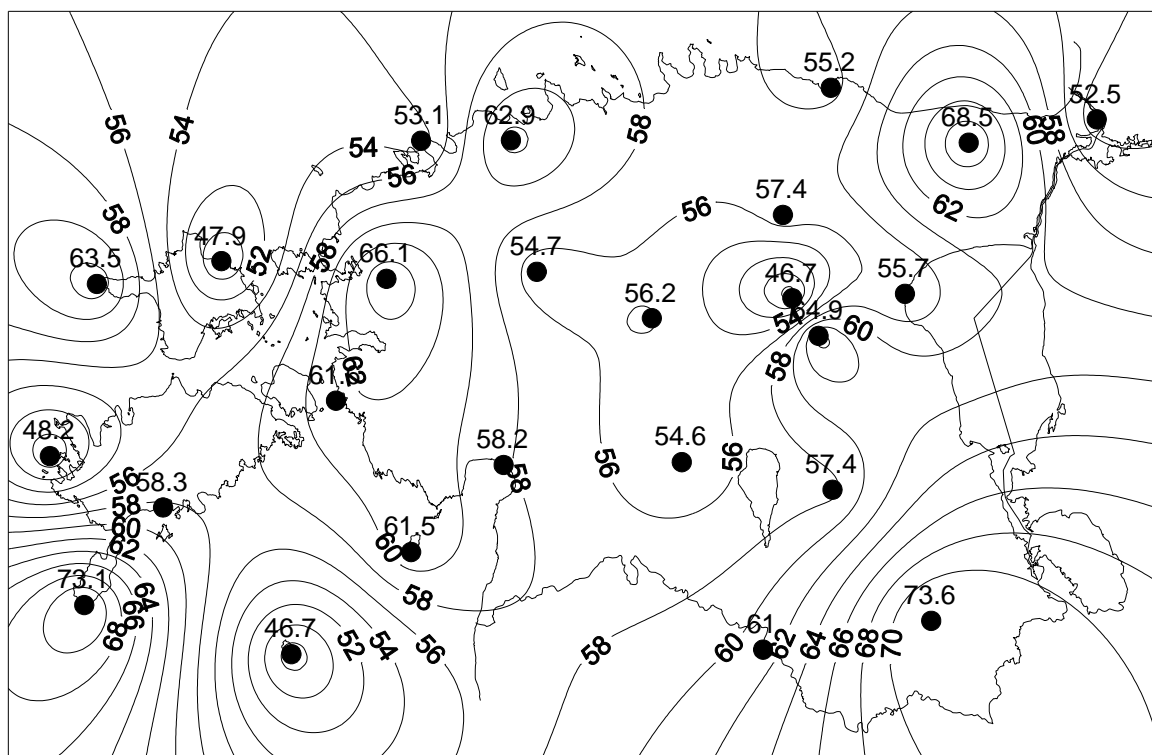




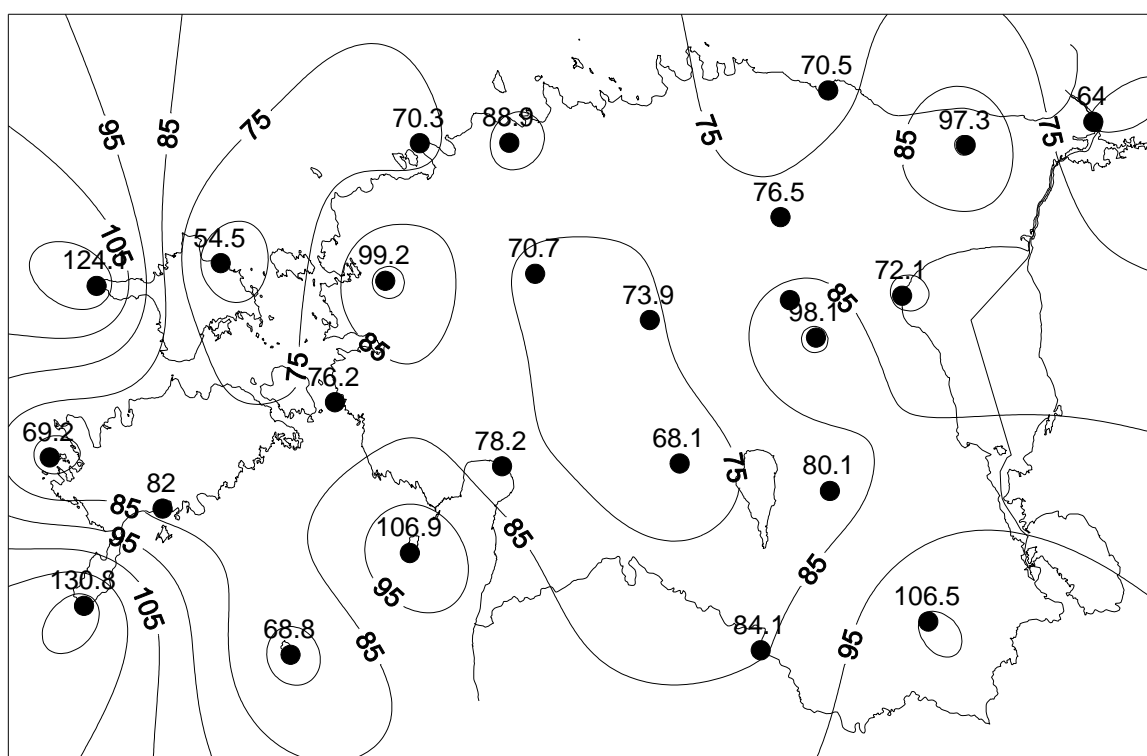
**Joonis 5.** 5-aastasele korduvusperioodile vastavad sajuhulgad (mm).



**Joonis 6.** 10-aastasele korduvusperioodile vastavad sajuhulgad (mm).



Joonis 7. 20-aastasele korduvusperioodile vastavad sajuhulgad (mm).



Joonis 8. 100-aastasele korduvusperioodile vastavad sajuhulgad (mm).

Küllaltki märkimisväärsed kõrvalekalded sellest seaduspärasusest on põhjustatud näiteks Jõhvis konkreetselt sündmusest, mis jääb kasutatud aegre sisse, mõjutades tulemusi. Näiteks registreeriti Jõhvis 6.08.2003 ööpäevane sajuhulk 90 mm ja 26.08.2008 115,7 mm. See on küll sisemaa jaam, kuid joonistelt 4 ja 5 paistab see kõrvalekalle anomaaliana siiski selgelt

silma. Seevastu Pakri väiksemaid sajuhulki lisaks merele kui enamuse ajast konvektsiooni pärssivale aluspinnale saab selgitada ka sellega, et seal pole vaatlusrea jooksul üle 100 mm ööpäevaseid sajuhulki registreeritud – suurim on 90,4 mm (12.06.1998).

Kindlasti tuleb arvestada juhuslikkuse suure osatähtsusega, sest enamik selliseid ekstreemsademetega sündmusi on seotud konvektsiooniga, aga ka üldisemalt sademetega kui ruumiliselt ja ajaliselt äärmiselt varieeruva suure juhuslikkusega nähtusega. Veel mõjutab tulemusi mitmes jaamas andmete puudumine – kui mõni huvipakkuv haruldane sündmus (ööpäevane sajuhulk näiteks üle 50 mm) sattus sellisele päevale või perioodile, mille kohta andmed puuduvad, siis mõistagi on sel oluline mõju tulemustele.

10aastasele ja pikemale korduvusperioodile vastavate ööpäevaste sajuhulkade kaartidelt (joonised 6...8) on näha, et vastav väli muutub üha ebahomogeensemaks. 10- ja 20-aastaste korduvusperioodide sajuhulkade puhul säilib üldjoontes seaduspärasus, et sisemaal on vastavad ööpäevased sajuhulgad suuremad, aga rannikualadel, eriti saartel, on need väiksemad. Kõrvalekalded tulenevad jällegi konkreetsetes jaamades juhuslikult esinenud ekstreem-sademetest: näiteks analoogse sündmuse Jõhvi jaamaga leiab ka Lääne-Nigula vaatlusreast, kus 7.07.2012 registreeriti sajuhulgaks 102,5 mm.

Tooma paistab igal pool silma väiksemate sajuhulkadega, sest aegrida on lühike (1960–1999) ja sinna pole sattunud väga suuri ööpäevaseid sajuhulki (suurim on 49,7 mm, mis registreeriti 23.08.1963). Sarnane olukord on ka Kärda ja Ruhnu jaamaga.

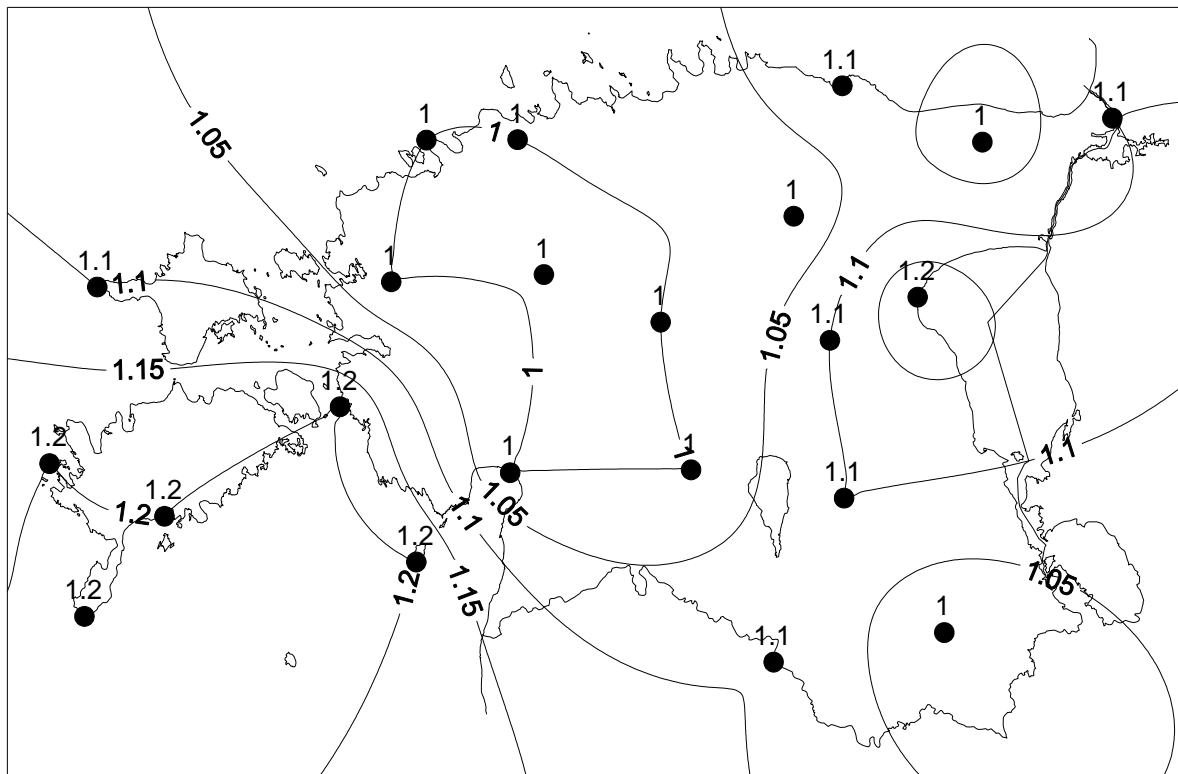
Tabelis 3 on esitatud 20, 30, 40, 50, 60 mm sademete korduvusperioodid aastates. Nendest 20, 40 ja 60 mm sademete korduvusperioodide väärtusi kaartidel kujutades (joonised 9...11) on näha, et väiksemate sajuhulkade (20 mm) puhul on korduvusperiood jaamades üsna ühesugune, olles 1 aasta või mõni kuu pikem, sest juhuslikkuse mõju on väiksem – selliseid sündmusi, kui ööpäev sajab 20-30 mm, tuleb sagedamini ette ning määravaks on ilmselt tsirkulatsioon. Siiski on 20 mm korduvusperiood Lääne-Eesti saartel ja rannikualadel pisut pikem (kuni 1,2 aastat) kui enamuses Mandri-Eestis. Selle põhjuseks võib pidada aluspinna ja üldise edelavoolu koosmõju: ühest küljest soodustab maismaa konvektiivseid sademeid, mis on tugevamad, teisalt suunab edelavool arenevad konvektsioonipilved kirde suunas, mistõttu vastavaid sündmusi on rohkem ka Põhja-Eestis, sh rannikualadel – sellele vastab lühem korduvusperiood (joonisel 9 on näha samajoonte loode-kagusuunaline asend eeskätt Lääne-Eestis).

Oluliselt keerukamaks muutub olukord 30 mm korduvusperioodi puhul (joonis 10). Veelgi suuremad territoriaalsed erinevused tulevad 50 ja 60 mm ööpäevase sajuhulga korduvusperioodides: jaamade vahel erinevad need üle kuue korra. Tõenäoliselt põhjuseks on

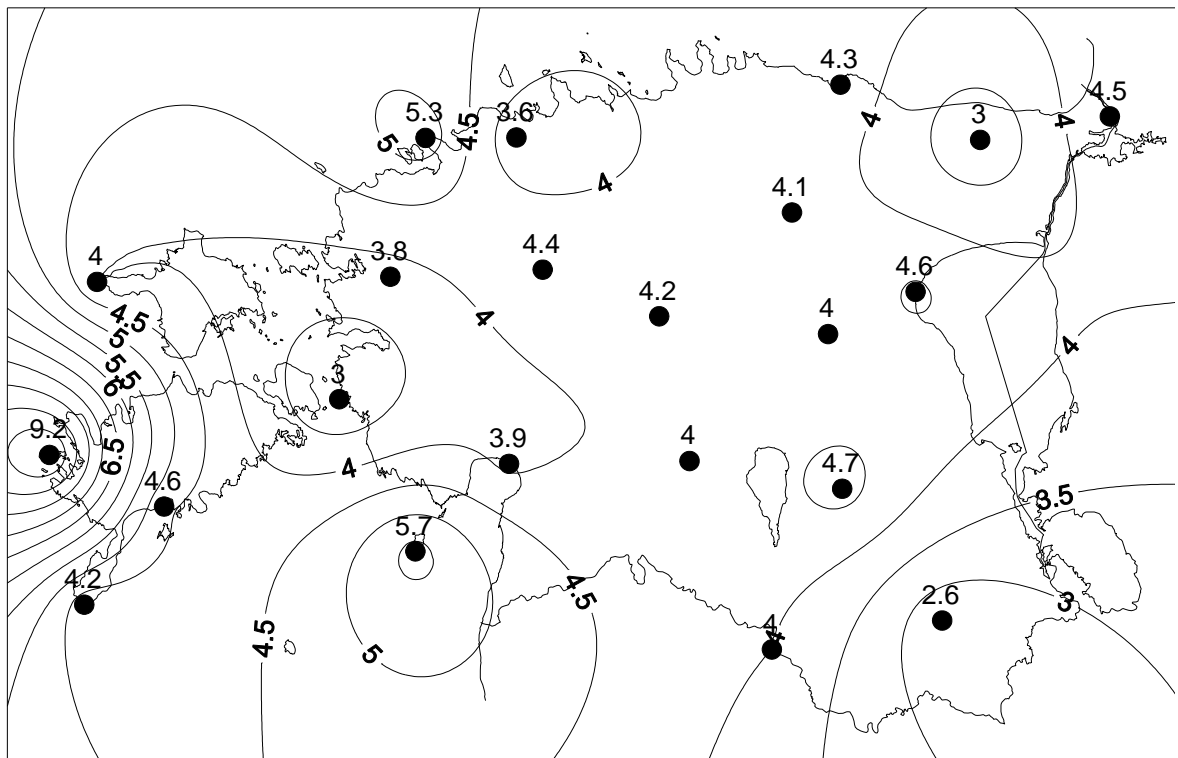
**Tabel 3.** 20, 30, 40, 50, 60 mm ööpäevaste sajuhulkade korduvusperioodid aastates

<i>jaam/sajuhulk</i>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>
<b>Jõgeva</b>	1,1	2	4	8	15,1
<b>Jõhvi</b>	1	1,6	3	5,9	11,7
<b>Kärdla</b>	1	1,8	5,2	31,8	–
<b>Kihnu</b>	1,2	2,6	5,7	11	18,7
<b>Kunda</b>	1,1	1,9	4,3	11,7	33
<b>Kuressaare</b>	1,2	2	4,6	10,5	22,8
<b>Kuusiku</b>	1	1,8	4,4	12,3	34,6
<b>Narva</b>	1,1	1,8	4,5	14,5	55,8
<b>Nigula</b>	1	1,9	3,8	7,5	14
<b>Pakri</b>	1	2	5,3	14,7	38,9
<b>Pärnu</b>	1	1,7	3,9	9,7	23,3
<b>Ristna</b>	1,1	2	4	8	15,1
<b>Ruhnu</b>	1	3,3	10,5	26,6	56,7
<b>Sõrve</b>	1,2	2,2	4,2	7,3	11,8
<b>Tallinn</b>	1	1,7	3,6	7,9	16,4
<b>Tartu</b>	1,1	2	4,7	11	24,5
<b>Tiirikoja</b>	1,2	2	4,6	11,5	30,3
<b>Tooma</b>	1,2	2,4	7,9	32,7	–
<b>Türi</b>	1	1,7	4,2	11,1	28,8
<b>Valga</b>	1,1	1,9	4	8	15,1
<b>Viljandi</b>	1	1,7	4	11,8	37,7
<b>Vilsandi</b>	1,2	3,1	9,2	23,4	52,4
<b>Virtsu</b>	1,2	1,7	3	6,7	17
<b>Väike- Maarja</b>	1	1,8	4,1	10,3	25,3
<b>Võru</b>	1	1,4	2,6	4,9	9,2

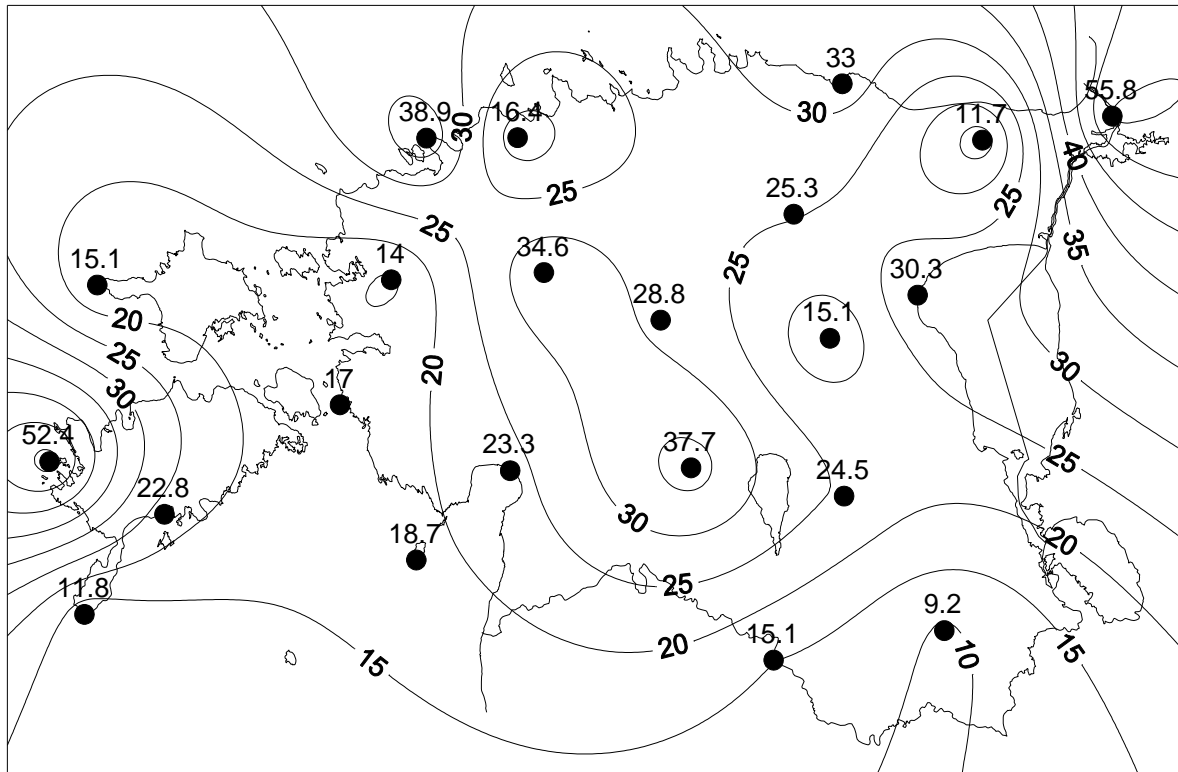
nende sündmuste (ööpäevane sajuhulk 50 mm ja rohkem) haruldus, mistõttu korduvusperioodi määrab juhuslikkus, aga ka aegrea pikkus – nendes jaamades, kus on aegrida pikem, esineb suurema tõenäosusega haruldane sademesündmus. Teisalt mõjutab korduvusperioodi ka asukoht – rannikujaamades (Pakri, Ruhnu, Kärdla) tuleb mere kui konveksiooni pärssiva aluspinna tõttu suuri sadusid ette harvemini (korduvusperiood pikem) kui näiteks sisemaa jaamades (Jõhvi, Jõgeva, Valga; korduvusperiood lühem). Suure juhuslikkuse tõttu on sellest seaduspärasusest kõrvalekaldeid: näiteks Narva ja Vilsandi paistavad silma 60 mm ööpäevase sajuhulga väga pika korduvusperioodi (>50 aastat) poolest, sest neis on ekstreemsademetest sündmusi vähem olnud. Arvesse tuleb võtta sedagi, et Kärdla ja Tooma jaamade puhul polnud see arvutatav aegrea lühiduse ja vastavate sündmuste puudumise tõttu (Ruhnu jaama puhul siiski õnnestus arvutada; nimetatud kolme jaama pole kaardil kujutatud, joonis 11).



**Joonis 9.** 20 mm ööpäevasele sajuhulgale vastav korduvusperioodi jaotus (aastates).



**Joonis 10.** 40 mm ööpäevasele sajuhulgale vastav korduvusperioodi jaotus (aastates).

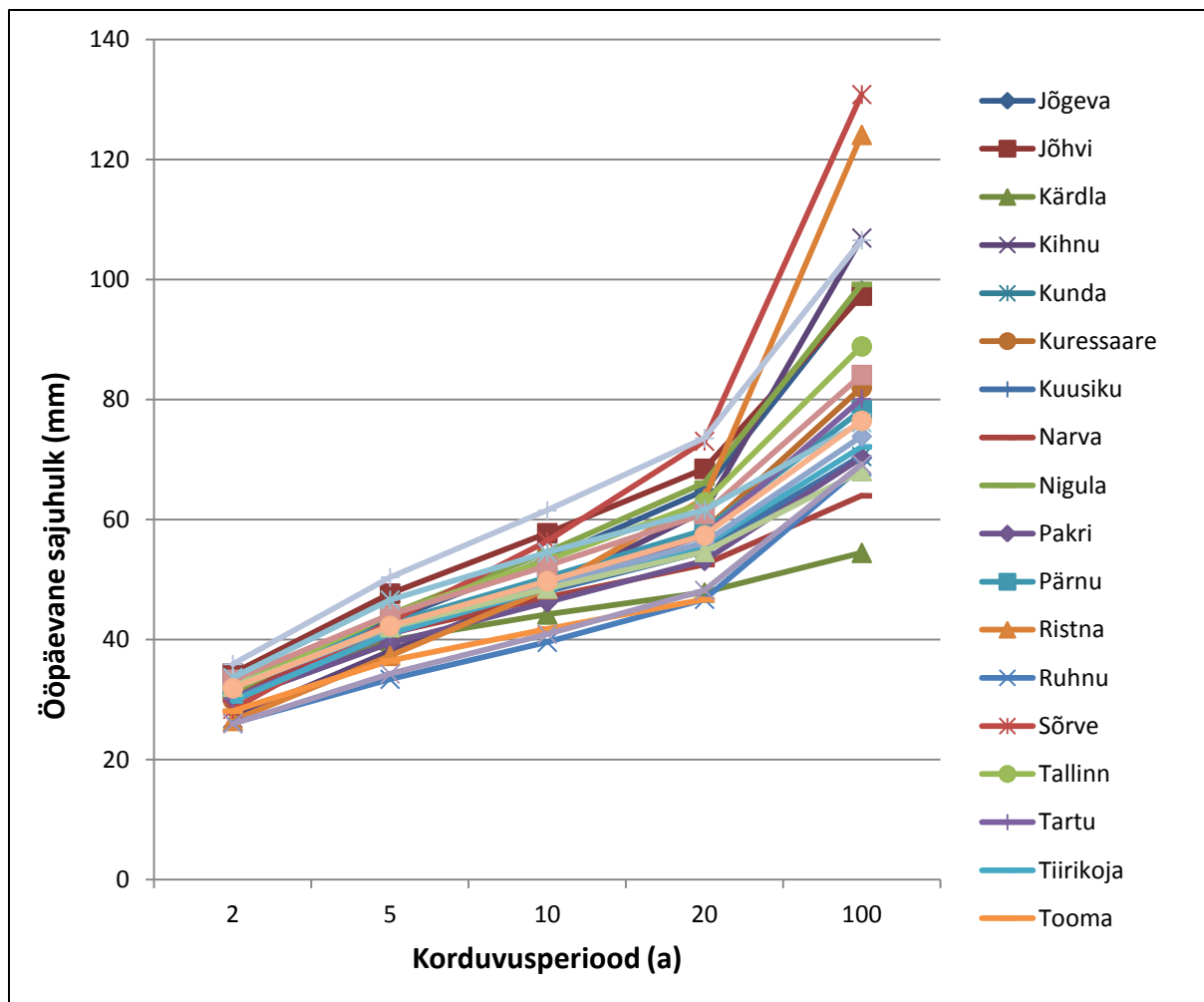


**Joonis 11.** 60 mm ööpäevasele sajuhulgale vastav korduvusperioodi jaotus (aastates).

#### 4.3. Korduvusperioodi funktsiooniga lähendamise täpsuse hindamine

100aastasele korduvusperioodile vastavate sajuhulkade kaardilt (joonis 8) on näha, et väli on äärmiselt ebahomogeenne – ühelt poolt väga suur juhuslikkuse osatähtsus, teisalt on tulemus vähemalt osaliselt ebausaldusväärne, sest aegrea pikkus ei võimalda kõikides jaamades hinnata vastavate haruldaste sündmuste esinemist, kuna see peaks olema vähemalt sama pikk kui on huvipakkuv korduvusperiood. Nii muutub oluliseks lähendusprobleem: kui hästi valitud funktsioon (GEV) suudab lähendada andmetega.

Siiski saab hinnata, kui usaldusväärset saab arvutada ühes või teises jaamas oodatavat maksimaalset sajuhulka 100-aastase korduvusperioodi kohta. Selleks koostati kõikide korduvusperioodide vastavate ööpäevaste sajuhulkade kohta graafikud kahel viisil: püstteljel ööpäevane sajuhulk ja rõhtteljel korduvusperiood aastates ning püstteljel ööpäevane sajuhulk ja kõveraga korduvusperiood aastates (joonis 12 ja 13). Esile tuleb asjaolu, et mõne ilmajaama (Sõrve, Ristna) kõverad on liiga järsu tõusuga, mis võib viidata vigadele andmetes. Seega tuleks edaspidistes töodes analüüsida, kui hästi GEV interpoleerib sajuhulkade sagedusjaotust eri

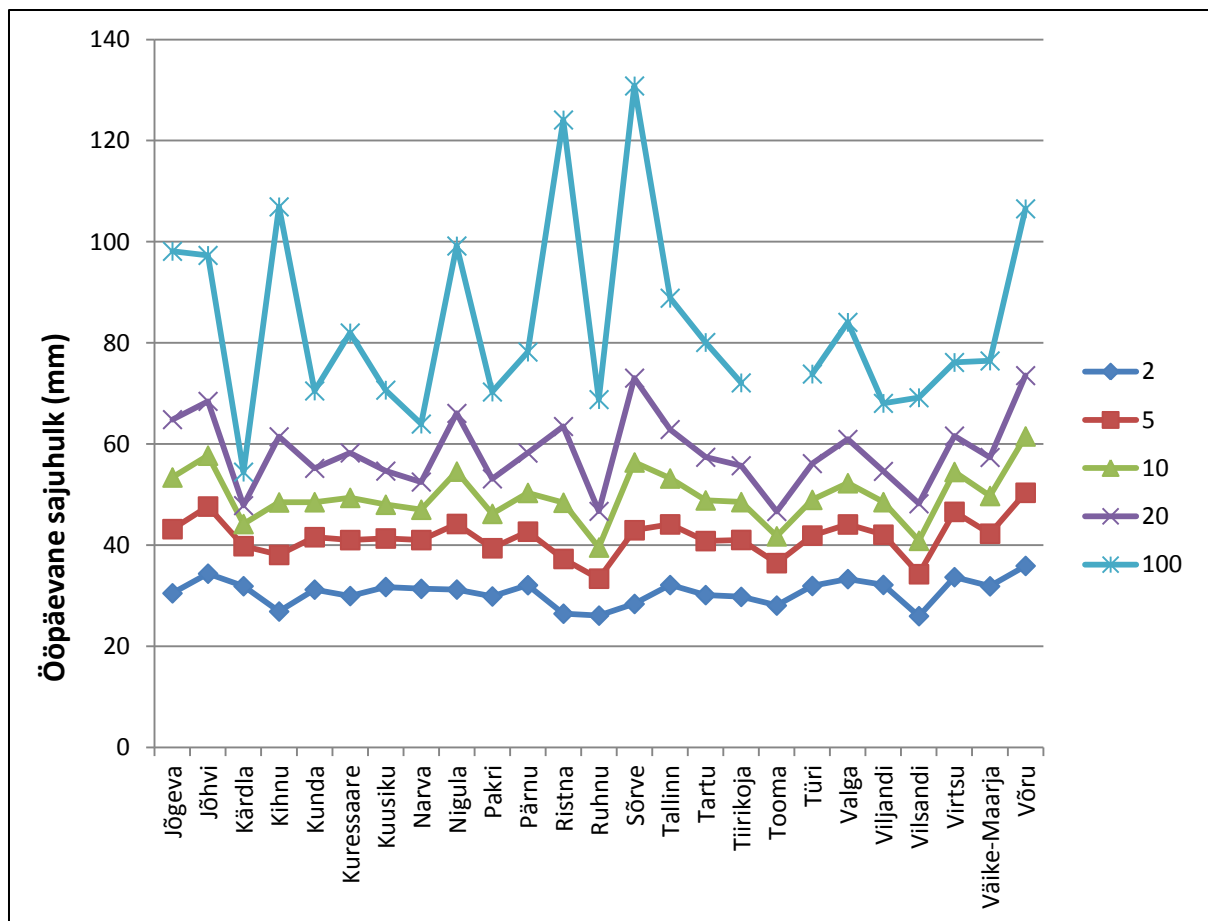


**Joonis 12.** Korduvusperioodidele vastavad ööpäevased sajuhulgad (mm) ilmajaamades.

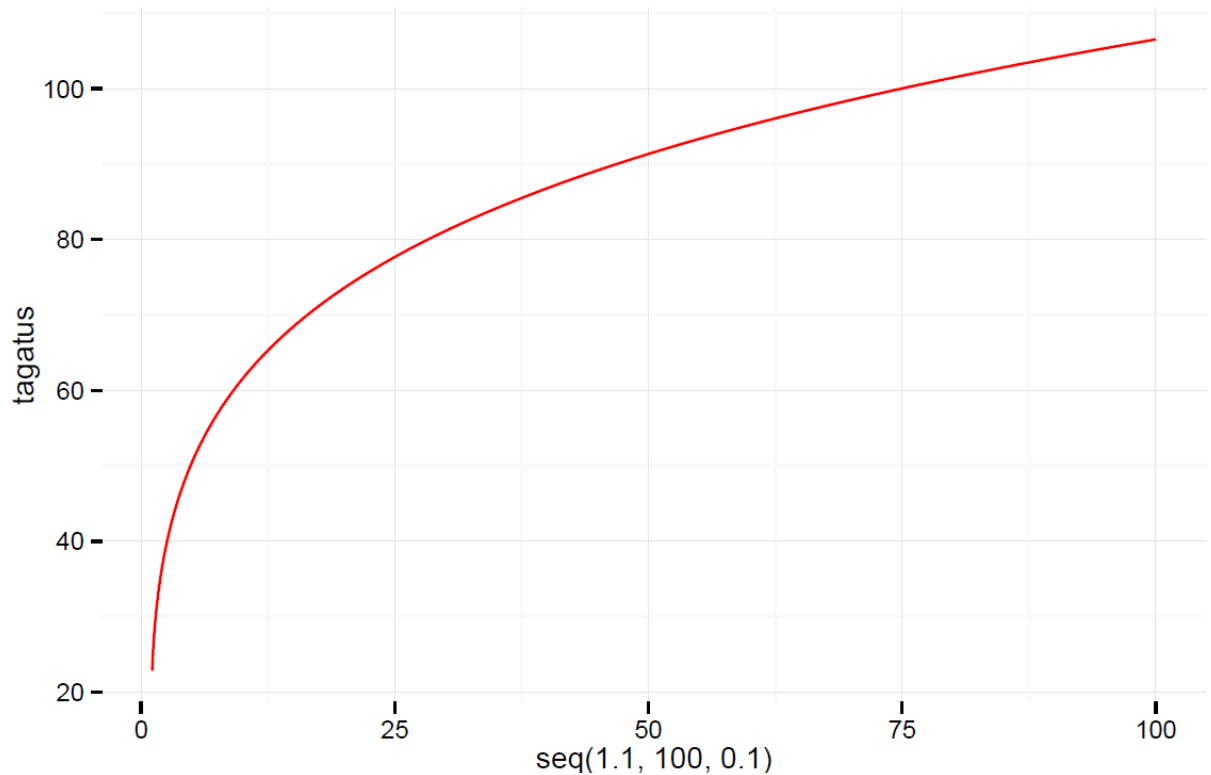
jaamade korral (lähendusprobleem) ehk välja selgitada, mis on need parameetrite väärtused, mille kaudu lähendus otsustatakse.

Tabelis 3 on toodud 20, 30, 40, 50, 60 mm ööpäevaste sajuhulkade korduvusperioodid. Joonisel 14 on aga kujutatud näidisenähtena korduvusperioodide ja ööpäevaste sajuhulkade seosegraafik Võru ilmajaama kohta – sealt saab graafiliselt kontrollida ja anda esmane hinnang, kui usaldusväärne võiks olla lähendus ja kas GEVi järgi on arvutused ikka õigesti tehtud. Võrdlus tabeliga 3 näitab, et vastavus on justkui hea.

Järgmisena vaadati lähemalt R-s kõikide jaamade kohta koostatud lähendusgraafikuid (näidis joonisel 3 üleval vasakul). Ilmnes, et GEV ei lähendu kõikide jaamadega ühtmoodi hästi, vaid mõnede puhul väga hästi, teiste puhul halvasti. Näide heast ja halvast lähenduvusest on toodud joonisel 15: kui Sõrve puhul asuvad punktid (vaadeldud sündmused) kõik joone lähedal, siis Võru puhul on näha, et kaks ülemist punkti ei asu sirgel, kusjuures üks neist asub sirgest väga kaugel. See näitab, et GEV ei lähendu kuigi hästi Võru andmetega, mistõttu on vaja leida alternatiive.



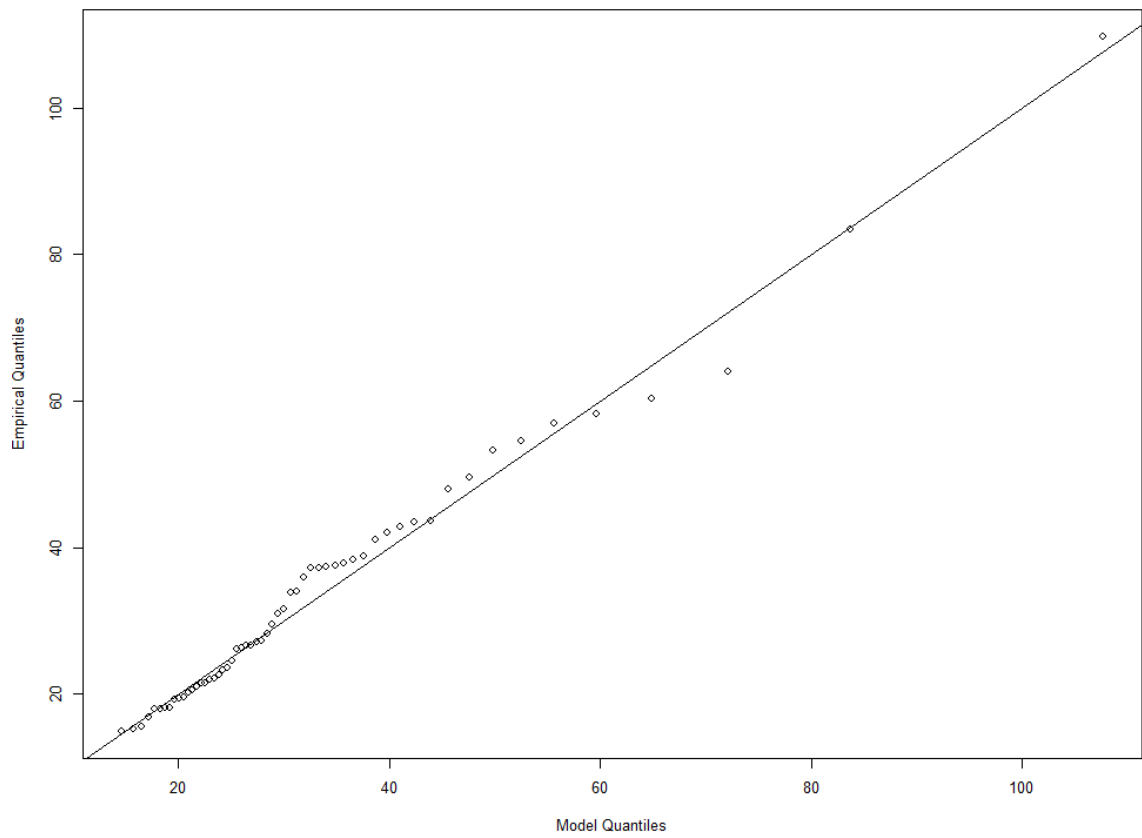
**Joonis 13.** Erinevatele korduvusperioodidele vastavad ööpäevased sajuhulgad (mm) ilmajaamades. Püstteljel on ööpäevane sajuhulk ja kõveraga on korduvusperiood aastates.



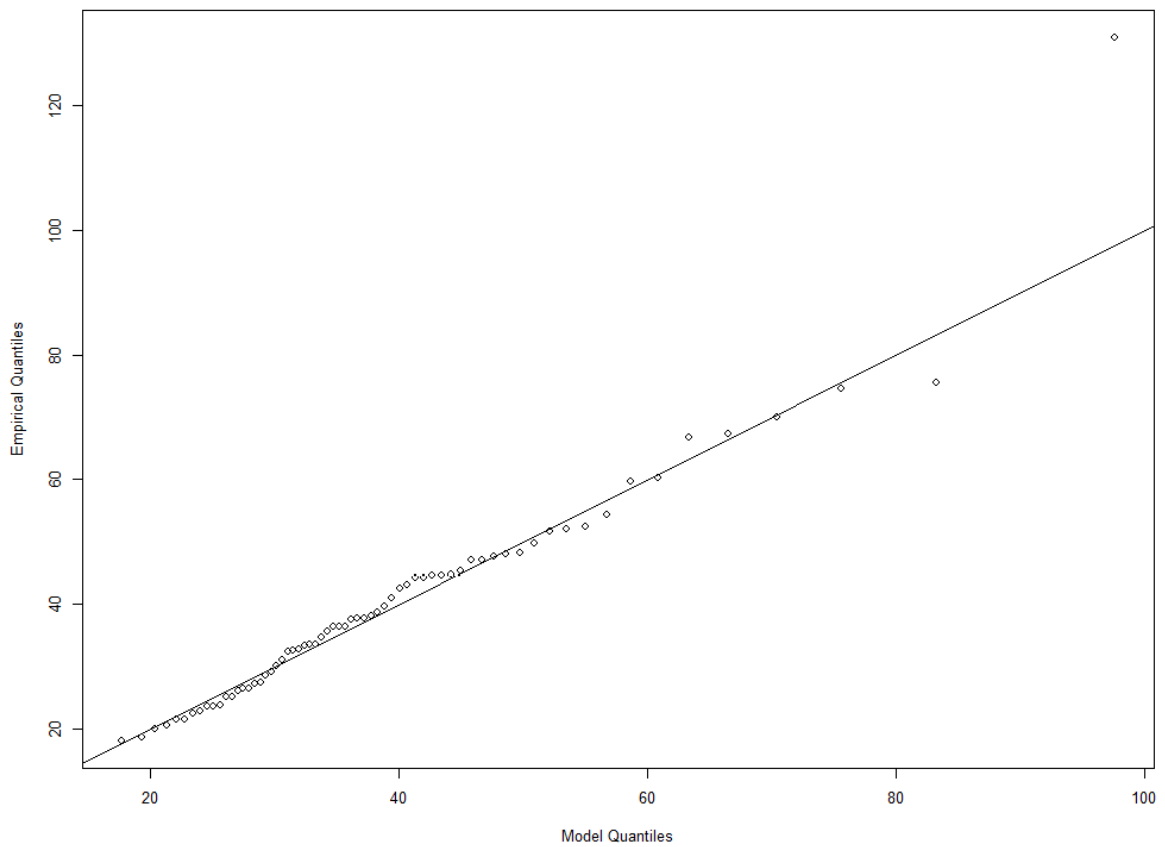
**Joonis 14.** Korduvusperioodide ja ööpäevaste sajuhulkade seosegraafik Võru ilmajaama kohta. Püstteljel on ööpäevane sajuhulk millimeetrites ja rõhtteljel period aastates.



a)



b)



Joonis 15. Lähendusgraafikud Sørve (a) ja Võru (b) kohta.

## Kokkuvõte

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on ekstreemsete sademete klimatoloogilise režiimi (ruumilise varieeruvuse) uurimine. Töö ülesanneteks seati Eesti ilmajaamade kaupa erinevate korduvusperioodide ja nendele vastavate sajuhulkade leidmine. Lisaks antakse töös esialgne hinnang korduvusperioodi funktsiooniga lähendamise täpsusele.

Töös on kasutatud Riigi Ilmateenistusest pärinevaid vaatlusandmeid (ööpäevased sademesummad perioodi 1948–2013 kohta, kuid täpne aegrea pikkus sõltub konkreetsest ilmajaamast) ja statistiliseks analüüsiks R-il põhinevat analüüsipaketti extRemes.

Töös on kasutatud statistilist esinemistõenäosust – korduvusperioodi, mis annab tõenäosuse, kui tihti võib mingi sündmus juhtuda. Korduvusperioodidele vastavate ööpäevaste sajuhulkade ja ööpäevaste sajuhulkade korduvusperioodide leidmiseks sobitati andmed funktsiooniga ja GEV-i (üldistatud ekstreemväärtuste jaotuse funktsioon ehk generalized extreme value), abil arvutati välja täpsed väärtused. Seejärel koostati kaardid Surferis (Golden Software, Inc.) n-õ punktkrigingumeetodil. Lõpuks hinnati esialgse tulemuste põhjal iga jaama andmestiku puhul korduvusperioodi funktsiooniga lähendamise täpsust ja selle parandamise võimalusi.

Töö tulemusena selgus, et 2-, 5-, 10-, 20- ja 100-aastasele korduvusperioodile vastavad sajuhulgad varieeruvad Eesti piires vastavalt 26–36, 33–51, 40–62, 47–74 ja 55–131 mm-ni. Seevastu 20, 30, 40, 50, 60 mm sademete korduvusperioodid varieeruvad Eesti piires vastavalt 1–1,2, 1,4–3,3, 2,6–10,5, 4,9–32,7 ja 9,2–56,7 aastani. Seega korduvusperioodidele vastavate ööpäevaste sajuhulkade väli on väga ebahomogeenne. Samuti tuli esile seaduspärasus: mida pikem periood, seda haruldasemaks (juhuslikumaks) sündmused muutuvad, mistõttu korrapära hakkab kaduma, sest juhuslikkuse osatähtsus muutub väga suureks.

Siiski on 2- ja 5-aastastele korduvusperioodidele vastavad sajuhulgad suuremad sisemaal ja väiksemad saartel. Selle esmaseks põhjuseks on kindlasti erinev aluspinna tüüp: maismaa soojeneb kiiremini ja tugevamalt, mistõttu on seal konvektsiooniga seotud sademeid rohkem ja need on tugevamad. Samas on märkimisväärsed kõrvalekalded sellest seaduspärasusest põhjustatud näiteks Jõhvis ja Lääne-Nigulas konkreetsetest sündmustest, mis jäävad kasutatud aegrea sisse, mõjutades tulemusi. Kindlasti tuleb arvestada juhuslikkuse suure osatähtsusega, sest enamik selliseid ekstreemsademetest sündmusi on seotud konvektsiooniga, aga ka üldisemalt sademete kui ruumiliselt ja ajaliselt äärmiselt varieeruva ehk suure juhuslikkusega nähtusega.

Väiksemate sajuhulkade puhul on korduvusperiood jaamades üsna ühesugune, olles 1 aasta või mõni kuu pikem, sest juhuslikkuse mõju on väiksem – selliseid sündmusi, kui ööpäevase sajab 20–30 mm, tuleb sagedamini ette, ning määravaks on ilmselt tsirkulatsioon. Oluliselt keerukamaks muutub olukord 30 mm korduvusperioodi puhul. Veelgi suuremad territoriaalsed erinevused tulevad 50 ja 60 mm ööpäevase sajuhulga korduvusperioodides: jaamade vahel erinevad need mitu korda. Tõenäoliseks põhjuseks on nende sündmuste (ööpäevane sajuhulk 50 mm ja rohkem) haruldus, mistõttu korduvusperioodi määrab juhuslikkus, aga ka aegrea pikkus – nendes jaamades, kus on aegrida pikem, esineb suurema tõenäosusega haruldane sademesündmus. Teisalt mõjutab korduvusperioodi ka asukoht – rannikujaamades tuleb mere kui konvektsiooni pärssiva aluspinna tõttu suuri sadusid ette harvemini (korduvusperiood pikem) kui näiteks sisemaa jaamades (korduvusperiood lühem). 50–70-aastane empiiriline vaatlusrida ei võimalda leida kord 100 aasta kohta toimuvat sündmust muidu, kui lähendades vaatluste jaotust mingi teoreetilise jaotusega. Kuna töös kasutati funktsiooniga sobitamist ja lähendamist, siis on väga oluline lähendusprobleem: kui hästi valitud funktsioon (GEV) suudab andmetega lähendada. R-is kõikide jaamade kohta koostatud lähendusgraafikud näitasid, et GEV ei lähendu kõikide jaamadega ühtmoodi hästi, vaid mõne puhul väga hästi (nt Sõrve), teiste puhul halvasti (nt Võru). Seega halvasti lähenduvate jaamade puhul tuleks GEV-ile leida alternatiive.

# Recurrence interval of Estonian precipitation extremes

Jüri Kamenik

## Summary

The purpose of this thesis is to study the regime of extreme precipitation in Estonia, and its task is to find various recurrence intervals and respective precipitation amounts for Estonian weather stations. In addition, this work will be evaluated for fitting of the fevd function.

The study is based on the Estonian Weather Service dataset from the period 1948–2013 comprising of 25 stations, but the exact length of the period is station-dependent. For statistical analysis, the R statistical programming language and its package extRemes (version  $\geq 2.0$ ) was used.

Specific statistical probability – recurrence interval, which gives an estimate of the likelihood of an event, such as an earthquake, flood or other to occur, was used in this study. To establish a recurrence interval for given daily precipitation amounts and vice versa, daily precipitation amounts corresponding to a given recurrence interval were fitted to a function, these intervals and corresponding precipitation amounts were calculated for each station by a specific distribution formula – GEV (generalized extreme value). Finally, the results were mapped using point kriging for spatial interpolation in Surfer (Golden Software, Inc.). Additionally, correctness of the fitting to GEV was evaluated.

Results show that corresponding daily precipitation amounts for 2-, 5-, 10-, 20- and 100-year recurrence interval varies over Estonia 26–36, 33–51, 40–62, 47–74 and 55–131 mm, respectively. Recurrence interval for 20, 30, 40, 50, 60 mm daily precipitation amounts varies 1–1,2, 1,4–3,3, 2,6–10,5, 4,9–32,7 and 9,2–56,7 year, respectively. Mapping of these results confirm the respective field of values is very inhomogeneous. Results also revealed that the longer the period, the less frequent corresponding precipitation events are, and that these are more randomly distributed due to the growth of relative importance of randomness.

However, the corresponding daily precipitation amounts for 2 and 5 years recurrence intervals are longer in the mainland, but smaller in the islands and coastal regions. The primary reason for this is certainly a different type of surface: the land warms up faster and stronger. As a result there is a higher amount of convective precipitation which is characterized by higher accumulations and intensity. However, exceptions exist, such as in Jõhvi and Lääne-Nigula. These are caused by specific events which fall inside the used time period and have an effect on the results. It has to be taken into consideration that there is a high share of randomness.

This is caused by the convective nature of the majority of extreme precipitation events as well as more general large spatial and temporal variability of precipitation.

Recurrence intervals for smaller daily precipitation amounts between different stations are quite similar, being a year or a few months longer because the randomness is not so high – events with a daily precipitation amount between 20 and 30 mm occur at a higher frequency and the determining factor is probably the circulation.

The situation becomes considerably more complicated in the case of recurrence interval for 30 mm. Even greater territorial differences are observable at the recurrence intervals for 50 and 60 mm: they differ between stations more than six times. The reason for these variabilities is possibly a less frequent occurrence of these events (daily precipitation amount of 50 mm and more) as well as the length of the time series – in the stations where the time series is longer, there is a greater probability of a rare precipitation event. Additionally, the location affects the recurrence interval – with the proximity to the sea where the convection is more inhibited, coastal stations have less (with a longer recurrence interval) events with large rainfall than those on the mainland.

50 to 70 years long empirical observation does not allow to find a 100-year event unless approximating the distribution of observations with some theoretical distribution for the dataset. Since the fitting to a function was used, an important issue exists: how well the selected function (GEV) is capable of fitting for these specific datasets used. Approximation graphs generated in R indicated that not all the stations fit well with GEV. Some stations, such as Sörve, had a very good fit while stations like Vöru did not. For stations that are not fitting well, alternatives should be sought to GEV.

## Tänuavaldused

Täna väga oma juhendajaid Piia Posti ja Jaak Jaagust juhendamise, nõu ja toe eest ning Anto Aasat R-i puudutavate asjalike nõuannete eest!

## Kasutatud kirjandus

- Aasa, A., 2014. Statistilise andmetöötluse praktikumid. Õppeaine LOOM.02.153. Geograafia osakond, Tartu Ülikool.
- Andrade, C., Leite, S. M. ja Santos, J. A., 2012. Temperature extRemes in Europe: overview of their driving atmospheric patterns. *Natural Hazards Earth System Science* 12, 1671–1691.
- Avaste, O., 1990. *Klimatoloogia*. Tartu, Tartu Ülikool.
- Christiansen, B., 2013. Changes in temperature records and extRemes : Are they statistically significant? *Journal of Climate* 26, 7863–7875.
- Dankers, R. ja Hiederer, R., 2008. Extreme Temperatures and Precipitation in Europe: Analysis of a High-Resolution Climate Change Scenario. JRC Scientific and Technical Reports.
- Dingman, L. S., 2002. *Physical hydrology*, 1. köide, Prentice Hall.
- Dotzek, N., Groenemeijer, P., Feuerstein, B. ja Holzer, A. M., 2009. Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. *Atmospheric Research* 93, 575–586.
- Gatzen, Ch., 2013. Warm-season severe wind events in Germany. *Atmospheric Research* 123, 197–205.
- Gilleland, E., 2015. Package 'extRemes'. Juhend-ülevaade.
- Groisman, P. Y., Karl, R. T., Easterling, R. D., Knight, R. W., Jamason, F. P., Hennessy, J. K., Suppiah, R., Page, M. C., Wibig, J., Fortuniak, K., Razuvaev, N. V., Douglas, A., Førland, E. ja Zhai, P., 1999. Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change. *Climatic Change* 42, 40.
- Hennessy, K. J., Gregory, J. M. ja Mitchell, J. F. B., 1997. Changes in daily precipitation under enhanced greenhouse conditions. *Climate Dynamics* 13(9), 667-680.
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex ja P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom ja New York, NY, USA. IPCC.
- Jaagus, J., 1992. Periodicity of precipitation in Estonia. In: *Estonian Geographical Studies. Estonia, man and nature*. Tallinn, pp. 43–53.

- Jaagus, J., 2006. Climatic changes in Estonia during the second half of the 20th century in relationship with changes in large-scale atmospheric circulation. *Theoretical and Applied Climatology* 83(1-4), 77 - 88.
- Jaagus, J., Briede, A., Rimkus, E. ja Remm, K., 2010. Precipitation pattern in the Baltic countries under the influence of large-scale atmospheric circulation and local landscape factors. *International Journal of Climatology* 30, 705–720.
- Jaagus, J. ja Tammets, T., 2007. Äärmuslikult kuivade ja sajaste päevade esinemissageduse territoriaalne jaotus Eestis perioodil 1957–2006. Rmt: Jaagus, J. (toim.), *Uurimusi Eesti kliimast*. Tartu Ülikooli Kirjastus, 109–116.
- Jaagus, J., Tammets ja T., 2013. Climatology of precipitation extremes in Estonia using the method of moving precipitation totals. *Theoretical and Applied Climatology* 111, 623–639.
- Jaagus, J. ja Tarand, A., 1998. Precipitation. Periodical fluctuations and a seasonal shift. Country Case Study in Climate Change Impacts and Adaptation Assessments in the Republic of Estonia. Report to the UNEP/GEF Project N.: GF/2200-96-45 (21 - 23). Tallinn: Stockholm Environment Institute Tallinn Centre.
- Karl, T. R. ja Knight, R. W., 1998. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79(2), 231-241.
- Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X. ja Hegerl, G. C., 2007. Changes in Temperature and Precipitation ExtRemes in the IPCC Ensemble of Global Coupled Model Simulations. *Journal of Climate* 20, 1419–1444.
- Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X. ja Wehner, M., 2013. Changes in temperature and precipitation extRemes in the CMIP5 ensemble. *Climatic Change* 119, 345–357.
- Liberato, M. L. R., Pinto, J. G., Trigo, R. M., Ludwig, P., Ordóñez, P., Yuen, D. ja Trigo, I. F., 2013. Explosive development of winter storm Xynthia over the subtropical North Atlantic Ocean. *Natural Hazards Earth System Science* 13, 2239–2251.
- Mays, L. W., 2005. *Water Resources Engineering*, 2. köide, John Wiley & Sons, Inc.
- Merilain, M. ja Post, P., 2006. Heavy Rainfall – Is It Only a Feature of Recent Years' Summers in Estonia? *Publicationes Geophysicales Universitatis Tartuensis* 50, 144-154.
- Mätlik, O., Post ja P., 2008. Synoptic weather types that have caused heavy precipitation in Estonia in the period 1961-2005. *Estonian Journal of Engineering* 14(3), 195–208.
- Nutter, F. W., 1999. Global Climate Change: Why U.S. Insurers Care. *Climatic Change* 42(1), 45-49.
- Nõges, P., 2012. Kliimamuutuse mõju veeökosüsteemidele ning põhjaveele Eestis ja sellest tulenevad veeseireprogrammi võimalikud arengusuunad. Keskkonnaministeeriumiga sõlmitud lepingulise uurimuse aruanne



- Päädam, K., 2009. Ekstreemsademet ajalis-ruumilisest jaotusest Eestis. Bakalaureusetöö, Tartu Ülikool.
- Päädam, K., 2011. Eesti sademete ekstreemumite muutlikus jaamade ning BaltAn65+ järelanalüüsi andmete põhjal. Magistritöö, Tartu Ülikool.
- Päädam, K. ja Post, P. 2011. Temporal variability of precipitation extremes in Estonia 1961-2008 .
- Riigi Ilmateenistus, 2014. Jaamade andmete ja ajaloo kokkuvõtted.
- Tammets, T. ja Jaagus, J., 2013. Climatology of precipitation extremes in Estonia using the method of moving precipitation totals. *Theoretical and Applied Climatology* 111(3-4), 623 - 639.
- Tebaldi, C., Hayhoe, K., Arblaster, J. ja Meehl, G., 2006. Going to the ExtRemes. *Climatic Change* 79(3), 185-211.
- Trenberth, K. E., Dai, A. G., Rasmussen, R. M. ja Parsons, D. B., 2003. The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 84(9), 1205–1217.
- Twardosz, R. ja Kossowska-Cezak, U., 2013. Exceptionally hot summers in Central and Eastern Europe (1951–2010). *Theoretical Application Climatolgy* 112, 617–628.
- van den Besselaar, E. J. M., Klein Tank, A. M. G. ja Buishand, T. A., 2013. Trends in European precipitation extRemes over 1951–2010. *International Journal of Climatology* 33, 2682–2689.
- Watterson, I. G., 2005. Simulated changes due to global warming in the variability of precipitation, and their interpretation using a gamma-distributed stochastic model. *Advances in Water Resources* 28(12), 1368-1381.

**Internetiallikad:**

- ECA&D (European Climate Assessment & Dataset), 2015 (URL <http://eca.knmi.nl/indicesextRemes/indicesdictionary.php#1>)
- European Severe Weather Database (ESWD), 2006. Selected data from the database, 2.12.2013. [WWW] <http://www.essl.org/cgi-bin/eswd/eswd.cgi>

## Lisad

**Lisa 1.** Skript Jõgeva andmetabelite muutmiseks, töötlemiseks R-s ja funktsiooniga sobitamise automatiseerimiseks

```
library(reshape2)
library(dplyr)
library(lubridate)
#Jogevadp <- read.csv("C:/ANTO/persona/Kamenik/Jogevadp.csv", sep=";", dec=",")

vahetabel <- Jogevadp
vahetabel <- select(vahetabel, -Paev, -abi)
vahetabel/m <- melt(vahetabel, id=c("kuu", "mday"))
vahetabel/m$variable <- as.numeric(gsub("X", "", vahetabel/m$variable))
vahetabel/m$date <- as.Date(paste(vahetabel/m$variable, vahetabel/m$kuu,
vahetabel/m$mday, sep="-"))
b <- nrow(vahetabel/m)
a <- seq(1:b)
vahetabel/m <- cbind(vahetabel/m, a)
vahetabel/m <- mutate(vahetabel/m, obs=a, tobs=yday(date), month=kuu, day=mday,
year=year(date), Prec=value)
vahetabel/m <- select(vahetabel/m, obs, tobs, month, day, year, Prec)
Jogevadp/m <- vahetabel/m

Fort <- Jogevadp/m

library(extRemes)
#data(Fort)
names(Fort)

bmFort <- blockmaxxer(Fort, blocks = Fort$year, which="Prec")
names(bmFort)

plot(Fort$year, Fort$Prec, xlab = "Year",
ylab = "Precipitation (inches)",
cex = 1.25, cex.lab = 1.25,
col = "darkblue", bg = "lightblue", pch = 21)

points(bmFort$year, bmFort$Prec, col="darkred", cex=1.5)

# Fit a GEV distribution to annual maximum Precipitation
# in Fort Collins, Colorado, U.S.A.
fitGEV <- fevd(Prec, data = bmFort)
fitGEV
```

**Lisa 2.** Skript korduvusperioodidele täpsete sajuhulkade (mm) välja arvutamiseks GEV valemiga

```
ls(fitGEV)
fitGEV$results$par
rlevd(c(2, 5, 10, 20, 100), loc=27.022072, scale=9.17683, shape=0.209961, type="GEV")
```

**Lisa 3.** Skript pöördülesande ehk korduvusperioodide arvutamise jaoks koos graafiku joonistamisega:

```
ls(fitGEV)
fitGEV$results$par
library(extRemes)
library(ggplot2)
rlevd(c(2, 5, 10, 20, 50, 100), loc=27.022072, scale=9.176830, shape=0.209961,
type="GEV")
tagatus <- rlevd(seq(1.1, 100, 0.1), loc=27.022072, scale=9.17683, shape=0.209961,
type="GEV") # arvutab tagatuse määratud aastate kohta
# kasutasin käsku "seq", mis teeb jada.
?seq # siit näeb, mis see käsk täpsemalt teeb
tagatus <- as.data.frame(tagatus) # konverdib tulemuse tabeliks (et seda graafikule kanda)
head(tagatus)
library(ggplot2)
View(tagatus)
ggplot() + theme/minimal() + geom/line(data=tagatus, aes(x=seq(1.1, 100, 0.1), y=tagatus),
colour="red") #graafiku tegemine
```

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, \_\_\_\_\_ Jüri Kamenik \_\_\_\_\_,  
(*autori nimi*)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose  
\_\_\_\_\_ Eesti sademete ekstreemumite korduvusperioodid \_\_\_\_\_,  
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendajateks on \_\_\_\_\_ Jaak Jaagus ja Piia Post \_\_\_\_\_,  
(*juhendajate nimed*)

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;  
1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **25.05.2015**