

TARTU ÜLIKOOL  
Füüsika instituut  
Füüsika, keemia ja materjaliteaduse õppekava

**Maria Ksenofontov**  
**Eesti sademete keskmised ja ekstreemumid**  
**perioodil 1979–2099**  
**Bakalaureusetöö (12 EAP)**

Juhendaja:

Erko Jakobson, PhD

Tartu 2024

## **Eesti sademete keskmised ja ekstreemumid perioodil 1979–2099**

Käesolevas töös prognoositakse CMIP6 kliimamudelite andmete abil, kuidas muutuvad Eesti sademete keskmised ja ekstreemumid 21. sajandi lõpuks võrreldes ajaloolise perioodiga 1985–2014 nelja kliimastenaariumi korral. Lisaks võrreldakse CMIP6 ajaloolise perioodi sademete andmeid ERA5, E-OBS ja mõõtmisandmetega, et hinnata mudelite sobivust Eesti kliima kirjeldamiseks. CMIP6 ansambli aastane keskmine langeb võrdlemisi hästi kokku mõõtmisandmetega. CMIP6 ansambel aga alahindab keskmist suvist sademete hulka ning ülehindab sademete hulka kevadel ja talvel. Sügiseste sademete hulk langeb hästi kokku mõõtmisandmetega. Selgus, et 21. sajandi lõpuks kasvab aastane sademete hulk 6% kuni 15% võrra sõltuvalt kliimastenaariumist. Kõige rohkem suureneb keskmine sademete hulk talvel, sõltuvalt kliimastenaariumist 10% kuni 33% võrra. Ka kevad- ja sügiskuudel toimub sademete hulga kasv. Suvel väheneb keskmine sademete hulk pessimistlikumate stsenaariumite korral kuni 6% võrra. Suvisel ajal toimub ka statistiliselt oluline kuivaperioodide pikenemine kliimastenaariumite SSP2-4.5, SSP3-7.0 ja SSP5-8.5 korral. Talvel aga kuivaperioodid lühenevad ning suure sajuga päevade esinemissagedus kasvab.

**Märksõnad:** kliimamudelid, sademed, CMIP6, ERA5

**CERCS:** P510 – Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

## **Precipitation Averages and Extremes in Estonia for the Period of 1979–2099**

In this thesis, CMIP6 climate model data was analyzed to give an overview of precipitation averages and extremes by the end of the 21st century in comparison to the period 1985–2014. Additionally, CMIP6 historical precipitation data was compared to ERA5, E-OBS and observational data to evaluate the models' ability to describe the Estonian climate. CMIP6 annual precipitation data is in agreement with observational data. However, there are some discrepancies between CMIP6 seasonal data and observations. CMIP6 models underestimate precipitation in summer, and the models overestimate precipitation in spring and winter. Precipitation is in agreement with observations in autumn. By the end of the 21st century, annual average precipitation will have increased by 6% to 15%, depending on the emission scenario. Precipitation will increase the most in winter by 10% to 33%. Precipitation will also increase to a lesser extent in spring and autumn. In the case of the more pessimistic emission scenarios, summer precipitation will decrease by up to 6%. The number of consecutive dry days in summer will also have increased by the end of the 21st century in the case of emission scenarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 and SSP5-8.5. In winter, the number of consecutive dry days will have decreased by the end of the century, and the number of wet days will have increased.

**Keywords:** climate models, precipitation, CMIP6, ERA5

**CERCS:** P510 – Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

## Sisukord

Sissejuhatus .....	5
1. Andmed ja meetodid.....	6
1.1 Ülevaade projektist CMIP6 .....	6
1.2 Kliimastsenaariumid .....	7
1.3 Ülevaade projektist ERA5 .....	8
1.4 E-OBS andmestik .....	8
1.5 Metoodika .....	9
2. Tulemused ja arutelu .....	11
2.1 Ajalooliste sademete andmete võrdlus perioodil 1979–2014 .....	11
2.2 Keskmised sademed Eestis 21. sajandil .....	16
2.2.1 Keskmise aastane sademete hulk perioodil 2015–2099 .....	16
2.2.2 Keskmise sademete hulk aastaegade kaupa perioodil 2015–2099 .....	18
2.3 Järjestikused sademetevabad päevad 21. sajandi lõpuks.....	21
2.3.1 Järjestikused sademetevabad päevad aastate lõikes perioodil 2015–2099 .....	22
2.3.2 Järjestikused sademetevabad päevad aastaegade lõikes 21. sajandi lõpuks .....	23
2.4 Suure sajuga päevade arv .....	26
2.4.1 Suure sajuga päevade arv aastate lõikes .....	27
2.4.2 Suure sajuga päevade arv aastaegade lõikes .....	28
Kokkuvõte .....	31
Tänuõnad .....	32
Kasutatud kirjandus.....	33
Lisad .....	36
Lisa 1. Koodinäide.....	36
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	39

## Sissejuhatus

Inimtegevuse tõttu on kasvuhoonegaaside kontsentratsioon atmosfääris suurenenud, mis on selgelt põhjustanud kliima soojenemist. Sellega on täheldatud ka sagenenud kliimaekstreemume – tugevaid sademeid, põuda ja kuumalaineid. IPCC 2023. aasta kliimaraporti kohaselt on need sündmused väga tõenäoliselt inimtegevuse tagajärjel sagenenud [1].

Kliimamuutustega kohanemiseks ja nendega kaasnevate negatiivsete tagajärgede ärahoidmiseks on tarvis ennustada, millised need muutused on. Selleks, et neid muutusi kirjeldada, on loodud matemaatilised mudelid. Nende mudelite abil on võimalik prognoosida, milline võib välja näha tulevik erinevate kliimastsenaariumite korral.

Üheks kliima parameetriks on sademed. Käesolev töö annab ülevaate Eesti sademetest 1979. aastast kuni 21. sajandi lõpuni. Töö annab ülevaate sellest, kuidas muutuvad 21. sajandi lõpuks sademete keskmised väärtused aastaegade ning aastate lõikes. Lisaks keskmistele väärtustele annavad olulist infot tulevikukliima kohta ka ekstreemumid. Selleks on analüüsitud kuivaperioodide ning sademeterohkete perioodide muutust erinevate kliimastsenaariumite korral. Lisaks on hinnatud kliimamudelite sobivust kirjeldamiseks Eesti ajaloolisi sademeid, võrreldes neid omavahel ning Eesti ilmajaamade andmetega.

Töös kasutatavad kliimamudelite andmed pärinevad Copernicuse andmebaasist. Kasutatud on kliimamudelite ansambli CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*) [2], ERA5 (*ECMWF Reanalysis v5*) [3] ning E-OBS [4] sademete andmeid. Lisaks kliimamudelite andmetele on kasutatud ka Keskkonnaagentuuri arvatud sademete pikaajalisi keskmisi, mis saadi elektroonilise kirjavahetuse teel.

# 1. Andmed ja meetodid

## 1.1 Ülevaade projektist CMIP6

Selleks, et võimalikult usaldusväärset ennustada, millised näevad välja kliimamuutused tulevikus, on kasulik omavahel võrrelda erinevate kliimamudelite ennustusi. Aastal 1995 sai alguse rahvusvaheline projekt CMIP, mis sellel eesmärgil ühendab ja võrdleb erinevate kliimamudelite tulemusi. Projekt on hetkel kuuendas faasis [5].

Lisaks tulevikuennustustele on CMIP6 projekti raames loodud ka ajaloolised simulatsioonid, mis ulatuvad 1850. aastani [5]. Võrreldes mudeli ajaloolisi andmeid mõõtmisandmetega saab hinnata mudeli sobivust kirjeldamiseks kliimamuutusi. Tulevikukliimat kirjeldavad CMIP6 mudelid kaheksa erineva kliimastenaariumi korral.

Käesolevas töös valiti välja sellised mudelid, mis kirjeldavad Eesti sademeid perioodil 1979-2099 nelja erineva kliimastenaariumi korral: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 ning SSP5-8.5. Kliimastenaariume on lähemalt tutvustatud järgmises alapeatükis. Seisuga 29.05.2024 on Copernicuse andmebaasis olemas SSP1-2.6 jaoks 29, SSP2-4.5 jaoks 29, SSP3-7.0 jaoks 28 ning SSP5-8.5 jaoks 32 kliimamudeli sademete andmed. Seejärel tuli alla laadida ka ajaloolised andmed perioodi 1979–2014 kohta. Selle perioodi andmed on olemas 42 mudeli korral. Järgmiseks valiti välja kõigi mudelite loetelust need, millel on olemas nii ajaloolised andmed kui ka tulevikukliimat kirjeldavad andmed kõigi nelja kliimastenaariumi korral. Seda selleks, et oleks võimalik hinnata sademete muutusi ajaloolise perioodi ja tuleviku vahel ning selleks, et erinevate stsenaariumite tulemused oleksid ka omavahel võrreldavad. Nii valiti välja kõigi mudelite loetelust 18, mida kasutatakse edasises analüüsis. Laaditi alla nende 18 mudeli ööpäevased sademete andmed. Mudelite ruumiline lahutus varieerub, mille tõttu andmed on interpoleeritud ühtsesse võrgustikku. Seda protsessi kirjeldatakse lähemalt peatükis 1.5.

## 1.2 Kliimastseenaariumid

Tulevikukliima ennustamiseks on loodud mitmeid erinevaid stsenaariume. Need stsenaariumid kirjeldavad seda, milline võib olla tulevikus kasvuhoonegaaside ja aerosoolide emissioon, sotsiaalmajanduslikud olud ning tehnoloogia areng [6]. Vastavalt sellele, milline on tulevikus kasvuhoonegaaside emissioon, muutub ka tuleviku kliima. CMIP6 projektis kasutatakse emissiooni ja maakasutuse stsenaariume, kus kombineeritakse SSP (*Shared Socio-economic pathways*) ja RCP (*Representative Concentration Pathways*) väärtusi [7]. CMIP6 kliimastseenaariumit kirjeldatakse kahe väärtuse abil ning pannakse kirja formaadis SSPx-y, kus x tähistab vastavat SSP-d ning y RCP väärtust.

SSP väärtused kirjeldavad võimalikku globaalset sotsiaalmajanduslikku olukorda tulevikus viie erineva narratiivi abil. Need narratiivid kirjeldavad muuhulgas võimalikke muutusi kliimapoliitikas, demograafias ja tehnoloogia arengus. Sõltuvalt nendest muutustest, annavad SSP-d hinnangu sellele, kui raske on tulevikus kliimamuutusega kohaneda ja kliimamuutuse negatiivset mõju vähendada [8].

RCP väärtused kirjeldavad seda, milline võiks olla kasvuhoonegaaside kontsentratsioon atmosfääris aastal 2100. Sõltuvalt sellest, kui palju kasvab kasvuhoonegaaside kontsentratsioon atmosfääris, muutub Maa kiirgusbilanss. Iga RCP väärtus on võimalik kiirgusbilansi muutus 2100. aastal võrreldes tööstusrevolutsiooni eelse ajaga. Need väärtused on esitatud kiirgustihedusena ühikutes  $W/m^2$  kohta [9].

Töös võrreldakse tulevikukliima projektsioone nelja erineva stsenaariumi korral. Optimistlikumad stsenaariumid on SSP1-2.6 ja SSP2-4.5, pessimistlikumad aga SSP3-7.0 ja SSP5-8.5. Stsenaariumite kirjeldused käesolevas lõigus tuginevad O'Neill et al. [8] artiklile. Kõige optimistlikumaks stsenaariumiks valiti SSP1, mis kirjeldab ühiskonda, kus kasvab keskkonnateadlikkus, eelistatakse taastuvaid energiaallikaid ja rakendatakse kliimapoliitikat rahvusvahelisel tasemel, mis parandab elukvaliteeti ka vähem arenenud riikides. Järgmiseks valiti SSP2, mille korral sotsiaalne, majanduslik ja tehnoloogia areng ei erine oluliselt ajaloolistest trendidest. Fossiilkütuste kasutus küll väheneb ning rakendatakse ka kliimapoliitikat, kuid koostöö eri riikide ja organisatsioonide vahel on nõrk. Seetõttu teevad erinevad riigid edusamme erinevas tempos. Pessimistlikumad on stsenaariumid SSP3 ja SSP5. SSP3 kirjeldab maailma, kus riikidevahelised konfliktid süvenevad, pärssides riikidevahelist koostööd, mis omakorda aeglustab tehnoloogia arengut. Kasvab sõltuvus fossiilkütustest.

SSP5 korral toimub hüppeline tehnoloogia areng ning investeeritakse haridusse ja inimeste heaolusse. Sellega kaasneb aga intensiivsem fossiilkütuste kasutamine ning panustatakse vähe keskkonnaprobleemide ärahoidmiseks globaalsel tasemel.

### 1.3 Ülevaade projektist ERA5

ERA5 on ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) poolt loodud globaalne järelanalüüsimudel, mis kirjeldab globaalset kliimat 1940. aastast tänapäevani [3]. Järelanalüüsimudel on arvutuslik mudel maailma minevikukliima simuleerimiseks, kuhu kaasatakse ka vaatlusandmed. Töös kasutatakse andmeid perioodi 1979–2014 kohta. Valiti just selline periood, kuna 1979. aastal algas „varajane satelliitide ajastu“, mil toimus märkimisväärne areng satelliidiandmete kättesaadavuses [10]. Sellel ajal hakati assimileerima mõõtmisandmeid mitmest uuest satelliidist. Toimus ka hüppeline kasv päevaste vaatluste arvus. Kui 1950. aastal oli assimileeritavate vaatluste arv 53 000 ringis, siis 1978. aasta lõpuks oli see kasvanud ligikaudu 570 000-ni [11].

Töös kasutatud andmed on pärit Copernicuse andmebaasist, kust on alla laetud kogu sademete (*total precipitation*) andmed perioodi 1979–2014 kohta. Andmete ruumiline lahutus on  $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$  ning ajaline lahutus 1 tund. Edasiseks analüüsiks on andmed summeritud vastavalt vajadusele kas päeva, kolme kuu või aasta kaupa. Andmeid kasutatakse CMIP6 ansambli ajalooliste andmetega võrdluseks.

### 1.4 E-OBS andmestik

E-OBS andmestik kujutab endast interpoleeritud Euroopa ilmajaamade andmeid. Andmed on saadaval alates aastast 1950. Andmete ruumiline lahutus on  $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$  ning ajaline lahutus 1 päev. Erinevalt ERA5-st ei assimileerita ilmajaamade ja satelliidiandmeid ilmaennustusmudelisse vaid kasutatakse otse ilmajaamade mõõtmisandmeid, mis interpoleeritakse võrgustikku. Andmestik sisaldab 25 Eesti ilmajaama 2000. aasta seisuga [12]. Kuna andmestik põhineb mõõtmisandmetele, siis E-OBS andmestik on oluline tööriist kliimamudelite valideerimisel.

Töös kasutatakse E-OBS päevaseid sademete andmeid perioodil 1979–2014. Päevased andmed on omakorda summeeritud vastavalt vajadusele kas aasta või aastaegade kaupa. Töös on kasutatud andmestiku versiooni 29.0e, mis on 29.05.2024 seisuga kõige värskem saadaolev versioon. Andmed on alla laetud Copernicuse andmebaasist. Andmeid kasutatakse CMIP6 ansambli ajalooliste andmete valideerimiseks ERA5 andmete kõrval.

## 1.5 Metoodika

Andmetöötluseks kasutati programmeerimiskeelt Python. Koodiga on võimalik lähemalt tutvuda Lisas 1. Nii ERA5 kui ka E-OBS andmetel on CMIP6 ansambli mudelitest kõrgem ruumiline lahutus. Selleks, et need andmed omavahel paremini võrreldavad oleksid, esialgu interpoleeriti CMIP6 kliimamudelite andmed ERA5 võrgustikku, et neil oleks sama ruumiline resolutsioon. Seejärel eraldati maski abil andmepunktid, mis jäävad Eesti maismaapiiridesse. Selleks kasutati Pythoni teeki *regionmask*. Ka ERA5 ning E-OBS andmete puhul valiti välja vaid need andmepunktid, mis jäävad Eesti maismaapiiridesse.

Keskmise sademete hulga muutuste uurimiseks summeritakse interpoleeritud ja maski abil eraldatud andmed vastavalt vajadusele aastaegade või aastate kaupa. Seejärel on leitud ansambli ajaline keskmine. Kui on uuritud vaid aegrida, siis on andmed keskmistatud ka üle pikkus- ja laiuskraadide. Aegridade trendijooned on leitud lineaarse regressiooniga. Trendijooned koos usaldusväärsusega on leitud funktsiooni *scipy.stats.linregress* abil. Trendi loetakse statistiliselt oluliseks, kui  $p$ -väärtus  $< 0,05$ .

Interpoleeritud ja maski abil eraldatud ööpäevaseid sademete andmeid kasutati kuivaperioodide ning suure sajuga päevade arvu uurimiseks. Kuivaperioodide kirjeldamiseks leiti iga Eesti ruumipunkti jaoks maksimaalne järjestikuste sademetevabade päevade arv aastaegade ja aastate kaupa. Seejärel leiti keskmine 30-aastase perioodi peale ning lõpuks arvutati ansambli keskmine. Suure sajuga päevade kirjeldamiseks leiti keskmine päevade arv aastas või aastaaja kohta, mil sademeteid oli rohkem kui 10mm. Keskmine leiti 30-aastase perioodi kohta. Aegridade uurimisel keskmistati tulemused ka üle pikkus- ja laiuskraadide.

Ruumianalüüsi osas tuuakse üldjuhul välja konkreetsed väärtused või väärtuste vahemikud kliimastenaariumite korral, mil perioodil 2015–2099 toimub statistiliselt oluline muutus

sademete hulgas või mõne muu näitaja suhtes. Tuuakse välja muutus ühe optimistlikuma ja ühe pessimistlikuma kliimastenaariumi jaoks.

## 2. Tulemused ja arutelu

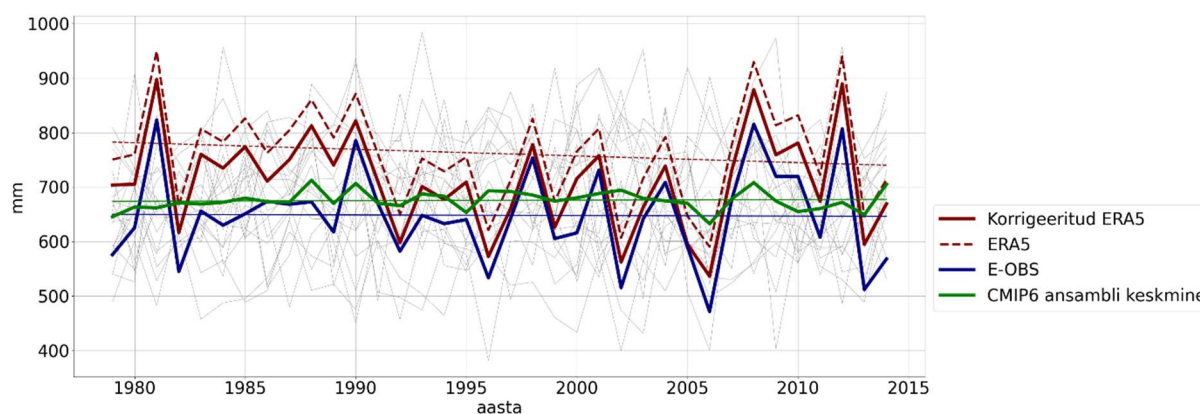
Peatükk jaguneb neljaks alapeatükiks, algul antakse ülevaade ajaloolise perioodi sademete andmetest, seejärel analüüsitakse keskmiste sademete muutust, järgmisena kirjeldatakse muutust kuivaperioodide pikkuses ning viimaks kirjeldatakse suure sajuga päevade esinemissageduse muutust Eestis 21. sajandi lõpuks.

### 2.1 Ajalooliste sademete andmete võrdlus perioodil 1979–2014

Enne seda, kui kasutada CMIP6 kliimamudelite ansambli andmeid Eesti tulevikukliima ennustamiseks, tuleks hinnata nende andmete sobivust Eesti sademete kirjeldamiseks. Selleks on töös võrreldud CMIP6 mudelite ajaloolise perioodi andmeid E-OBS, järelanalüüsitud mudeli ERA5 ning Eesti ilmajaamade sademete andmetega vahemikus 1979–2014. Võrreldi nii keskmist sademete hulka aastas kui ka aastaegade kaupa.

Varasemast uuringust on leitud, et nii ERA5 kui ka E-OBS päevased sademete andmed kirjeldavad edukalt Euroopa sademeid kvalitatiivselt [13]. Samas on leitud, et ERA5 ülehindab märkimisväärselt aastast sademete hulka. Selle üheks võimalikuks põhjuseks on asjaolu, et ERA5 ülehindab päevast sademete kogust kuivadel päevadel [14]. Seetõttu võrdsustati nulliga kõik andmepunktid, kus päevane sademete hulk jäi alla 1 mm. Selle tulemusena kokkulangevus E-OBS andmetega paranes (Joonis 1). Edasises analüüsis on samuti kasutatud korrigeeritud ERA5 sademete andmed, kus päevane sademete hulk ületab 1 mm. Siiski on märgatav süstemaatiline erinevus ERA5 ja E-OBS andmete vahel enne 1990-ndaid.

Joonisel 1 on näha CMIP6 ansambli mudelite keskmist, ERA5 ning E-OBS aastaste sademete võrdlust koos vastavate trendijoontega perioodil 1979–2014. Jooniselt on näha, et CMIP6 ansambli keskmine alahindab aastast sademete hulka võrreldes ERA5 andmetega ning võrreldes E-OBS andmetega ülehindab aastast sademete hulka. Nende taustal on halliga eraldi välja toodud iga üksiku CMIP6 mudeli andmed. Trendid ei ole statistiliselt olulised. See tulemus ei ole kooskõlas varasemate tulemustega. On leitud, et sademed Eestis on 20. sajandi teisel poolel statistiliselt oluliselt kasvanud [15].



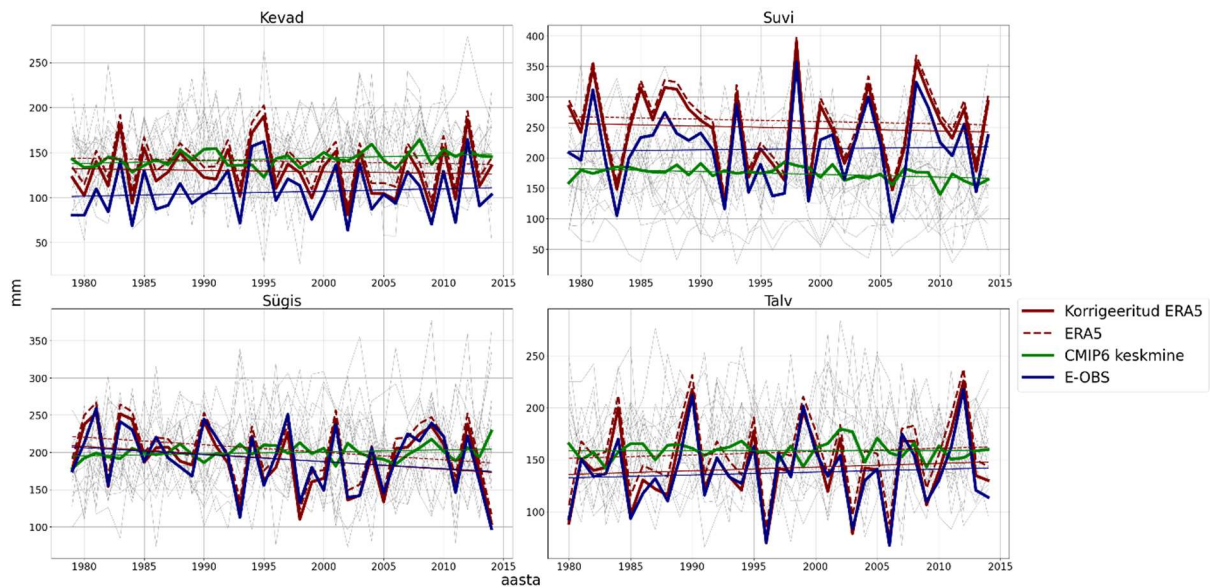
Joonis 1. CMIP6 ansambli aastaste sademete andmete võrdlus ERA5 ja E-OBS andmetega perioodil 1979–2014. Taustal on halliga välja toodud iga üksiku CMIP6 mudeli andmed.

Tabelis 1 on võrreldud CMIP6 ansambli ning iga selle eraldiseisva mudeli, E-OBS ja ERA5 keskmist aastast sademete hulka Keskkonnaagentuuri poolt arvatatud sademete normiga perioodil 1981–2010. Kliimanorm ehk pikaajaline keskmine on vähemalt 30-aasta pikkuse andmerea põhjal arvatatud keskmine [16]. Sademete normid perioodi 1981–2010 kohta koos infoga arvutusteks kasutatud ilmajaamade andmete kohta saadi Keskkonnaagentuurilt elektroonilise kirjavahetuse teel. CMIP6 ansambli keskmine langeb võrreldes ERA5 ja E-OBS andmetega kõige paremini kokku Keskkonnaagentuuri tulemusega. Siinkohal tuleb märkida, et Keskkonnaagentuuri arvatatud sademete norm on kindlate Eesti ilmajaamade mõõtmisandmete keskmine [17]. Töös kasutatud mudelite puhul on aga tegemist interpoleeritud andmetega, mis katavad Eesti ala tihedamalt ja korrapärase vahedega. Lisaks esineb ilmajaamade andmetes pikemaajalisi perioode, kus andmed on puudu. Näiteks perioodil 1.09.2003–13.09.2010 oli Pakri ilmajaamas sademetemõõtur, mis külmal perioodil andmeid ei salvestanud.

Tabel 1. Kõigi töös kasutatud CMIP6 üksikute mudelite ning nende keskmise, ERA5 ning E-OBS keskmised aastased sademed võrrelduna Keskkonnaagentuuri arvatud sademete normiga perioodil 1981–2010.

Mudel	Keskmine aastane sademete summa (mm)	Standardhälve (mm)	Erinevus Keskkonnaagentuuri keskmisest (%)
<b>Keskkonnaagentuur</b>	668.6		
<b>ERA5</b>	712	89	6
<b>E-OBS</b>	655	85	-2
<b>CMIP6 ansambli keskmine</b>	678	17	1
ACCESS-CM2	723	89	8
BCC-CSM2-MR	717	92	7
INM-CM5-0	689	102	3
IPSL-CM6A-LR	624	73	-7
KACE-1-0-G	553	73	-21
MIROC6	678	92	1
MIROC-ES2L	719	81	7
MPI_ESM1-2-LR	733	95	9
NORESM2-MM	664	67	-1
UKESM1-0-LL	722	89	7
CANESM5	787	97	15
CESM2	657	82	-2
CNRM-CM6-1	632	73	-6
CNRM-ESM2-1	613	111	-9
EC-EARTH3-VEG-LR	706	79	5
FGOALS-G3	539	68	-24
GFDL-ESM4	725	79	8
INM-CM4-8	713	82	6

Joonisel 2 on näha keskmist sademete hulka Eestis aastaegade lõikes koos vastavate trendijoontega. Trendidest on statistiliselt olulised ainult CMIP6 ansambli keskmised kevadel (p-väärtus 0,03) ja suvel (p-väärtus 0,009). Kevadiste sademete hulgas on toimunud kasv, suvel aga keskmine sademete hulga kahanemine. Kõige märkimisväärsem erinevus mudelite vahel on suviste sademete hulgas. Kõige kõrgema hinnangu suviste sademetele annab ERA5. Varasemalt on leitud, et ERA5 ülehindab sademeid Euroopas, eriti suvel [13].



Joonis 2. CMIP6 ansambli sademete andmete võrdlus ERA5 andmetega aastaegade kaupa.

Tabelis 2 on võrreldud ERA5, E-OBS ning CMIP6 ansambli keskmist aastaegade lõikes Keskkonnaagentuuri arvutatud sademete normiga perioodi 1981–2010 kohta. Ajalooliselt on sademeid kõige rohkem suvel, keskmiselt 222,8 mm, talviste sademete hulk on aga kõige väiksem, keskmiselt 137,5 mm. Kõige paremini langevad normiga kokku E-OBS andmed. Suurim erinevus mõõtmisandmete ja E-OBS hinnangu vahel on suvel ja sedagi vaid 3% võrra. Korrigeeritud ERA5 andmete kohaselt on keskmine suviste sademete hulk 26 mm ehk 12% võrra suurem sademete normist. ERA5 ülehindab kevadist sademete hulka võrreldes normiga 19% võrra. CMIP6 ansambli keskmine alahindab kõige rohkem sademeid suvel ning ülehindab kõige rohkem sademeid kevadel. Vaatlusandmete põhjal peaks sadama kõige rohkem suvel, keskmiselt 222,8 mm. CMIP6 ansambel aga alahindab suviste sademete hulka ligikaudu 47 mm ehk 21% võrra. CMIP6 ansambli keskmise järgi on kõige sajusem aastaag hoopis sügis. Keskmine sademete hulk sügisel CMIP6 ansambli andmete põhjal on 199 mm, mis langeb hästi kokku sademete vaatlusandmetega.

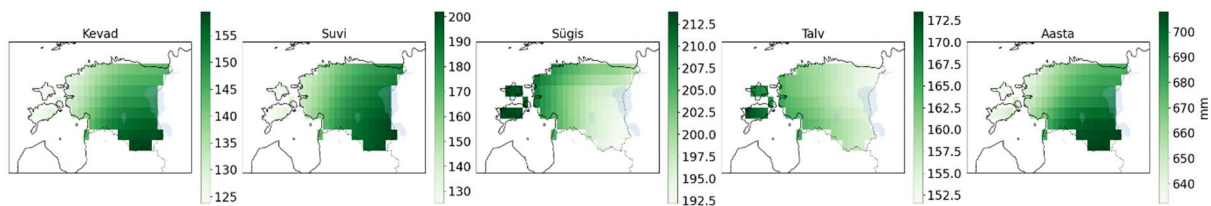
Tabel 2. Kõigi töös kasutatud CMIP6 mudelite, ERA5 ning E-OBS keskmised sademed aastaegade lõikes võrrelduna Keskkonnaagentuuri arvatatud sademete normiga perioodil 1981–2010.

Mudel	Keskmine sademete summa kevadel (mm)	Keskmine sademete summa suvel (mm)	Keskmine sademete summa sügisel (mm)	Keskmine sademete summa talvel (mm)
Keskkonnaagentuur	108,8	222,8	200,3	137,5
ERA5	129	249	191	142
E-OBS	108	216	195	136
CMIP6 ansambli keskmine	143	176	199	159

Samuti on välja toodud Tabelis 1 iga CMIP6 mudeli ning ansambli keskmise standardhälve. On näha, et CMIP6 ansambli siseselt on mudelite omavaheline varieeruvus küllaltki suur. Kõige kehvemini langes Keskkonnaagentuuri hinnanguga kokku mudel FGOALS-G3, mis alahindas keskmist aastast sademete hulka 24%. Kõige rohkem ülehindas aastast sademete hulka CANESM-5, mis ülehindas 1981–2010 sademete normiga võrreldes sademete hulka 15%.

Joonisel 3 on näha sademete ruumilist jaotust Eestis ajaloolise perioodi 1985–2014 keskmisena. On näha, et CMIP6 ajaloolisel perioodil sajab aastas enim Lõuna-Eestis, kõige vähem aga Lääne-Eestis ning saartel. Eestis on 20. sajandi teisel poolel täheldatud teistsugust mustrit, kus kõige vähem sajab rannikualadel ning Peipsi järve ääres, kõige rohkem aga sisemaal [18]. On võimalik, et CMIP6 ansambli mudelite ruumiline lahus ei ole piisav, et selliseid muutusi Eesti piires edukalt kirjeldada.

Kevad- ja suvekuudel sajab vähem Lääne-Eestis, sügis- ja talvekuudel on aga märgata vastupidist, kus Lääne-Eestis sajab just rohkem. Sellist mustrit on täheldatud ka vaatlusandmete põhjal. See võib olla tingitud sellest, et kevadel ja suvel on meri külmem kui maapind, mille tõttu mere kohal on vähem tõusvaid õhuvoole võrreldes maismaaga. Seetõttu tekib rannikualade kohal vähem pilvi kui sisemaal. Külmematel kuudel on aga meri soojem kui maismaa, mis tingib selle, et rohkem pilvi tekib rannikualadel [18]. Seega on CMIP6 sademete ruumiline jaotus laias laastus aastaegade kaupa ootuspärane



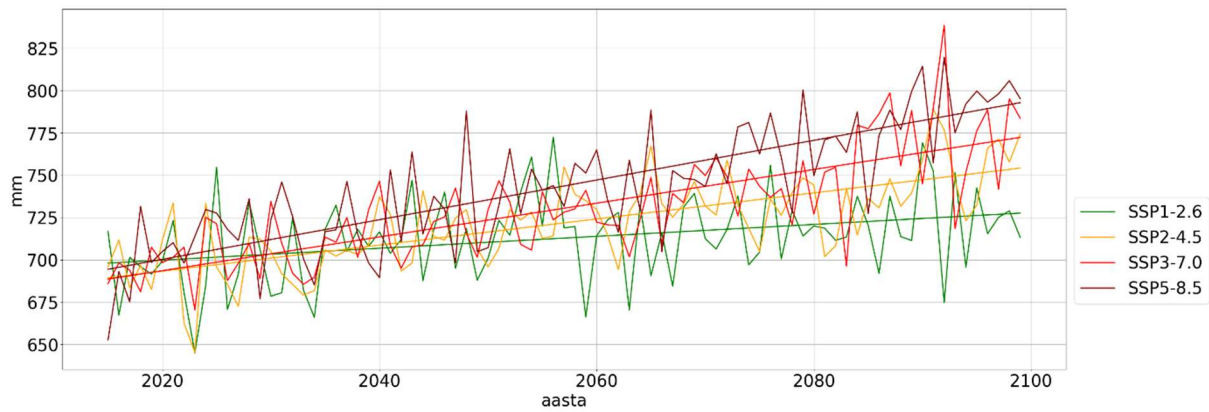
Joonis 3. CMIP6 ajaloolise perioodi sademete ruumiline jaotus aastaegade kaupa ja aastase perioodi 1985–2014 keskmisena.

## 2.2 Keskmised sademed Eestis 21. sajandil

Alapeatükk 2.2 jaguneb omakorda kaheks. Esimeses osas on uuritud Eesti keskmist aastast sademete hulga muutust perioodil 2015–2099, teises osas on uuritud aga keskmist sademete hulga muutust aastaegade lõikes. Mõlemal juhul analüüsitakse nii muutust aegreana kui ka sademete ruumilist jaotust Eestis 21. sajandi lõpuks võrreldes ajaloolise perioodiga 1985–2014.

### 2.2.1 Keskmise aastane sademete hulk perioodil 2015–2099

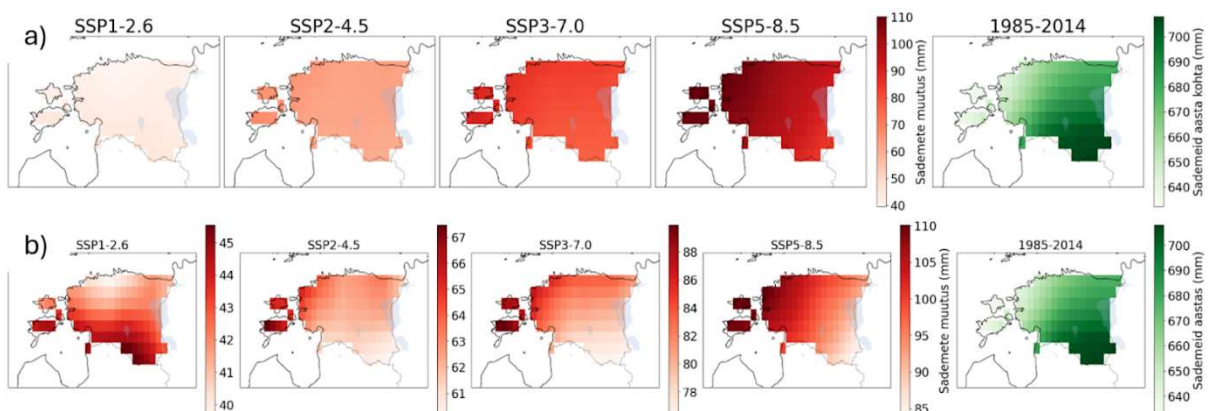
Keskmine aastane sademete summa perioodil 2015–2099 CMIP6 ansambli jaoks leiti nelja erineva kliimatsenaariumi korral. Selleks summeeriti interpoleeritud ja Eesti ala jaoks eraldatud päevased sademete andmed iga aasta kohta. Tulemus keskmistati ruumiliselt üle terve Eesti. Joonisel 4 on näha aegrida iga kliimatsenaariumi kohta koos vastava trendijoonega. Iga stsenaariumi puhul kasvab keskmine sademete hulk aastas ning see muutus on statistiliselt oluline. Mida kõrgem on mudeli RCP väärtus, seda kiiremini kasvab keskmine aastane sademete kogus 21. sajandi lõpuks. Leiti iga kliimatsenaariumi jaoks ennustatav keskmine aastane sademete hulk perioodi 2070–2099 kohta. SSP5-8.5 korral on keskmine aastane sademete hulk 21. sajandi lõpuks 777 mm, SSP3-7.0 korral 759 mm, SSP2-4.5 korral 741 mm ja SSP1-2.6 korral 721 mm. CMIP6 ansambli keskmine sademete hulk perioodil 1985–2014 on 678 mm aastas. Võrreldes ajaloolise perioodiga on see tõus 15% SSP5-8.5 korral, 12% SSP3-7.0 korral, 9% SSP2-4.5 korral ning 6% SSP1-2.6 korral. Käesolevas töös leitud tulemused on võrdlemisi hästi kooskõlas varasemate tulemustega, et suurema RCP väärtuse korral on suurem aastaste sademete hulga kasv 21. sajandi lõpuks [15].



Joonis 4. Keskmised aastased sademed Eestis nelja erineva kliimastenaariumi korral perioodil 2015–2099 koos trendijoonega.

Järgnevalt on uuritud perioodi 2070–2099 keskmise sademete hulga ruumilist jaotust aastate lõikes nelja erineva kliimastenaariumi korral. Tulemusi on võrreldud ajaloolise perioodiga 1985–2014. Joonisel 5a on kujutatud sademete muutused 21. sajandi lõpuks ühisel skaalal, et eri kliimastenaariumite vahelised tulemused oleksid omavahel võrreldavad. Joonisel 5b on aga iga kliimastenaariumi jaoks loodud omaette värviskaala selleks, et paremini esile tuua ühe stsenaariumi raames tulemuste ruumilist jaotust.

21. sajandi lõpuks kasvab keskmine aastane sademete hulk Eestis SSP1-2.6 korral enim Lõuna-Eestis. Selle stsenaariumi korral suureneb aastane sademete hulk 40 kuni 46 mm ehk kuni 6% võrra. Stsenaariumite SSP2-4.5, SSP3-7.0 ja SSP5-8.5 korral on märgata, et rohkem hakkab sadama just Lääne-Eestis ja saartel, kõige vähem aga Lõuna-Eestis. Kõige selgemat gradienti on märgata SSP5-8.5 korral, mille korral sademete hulk muutub 84 kuni 110 mm ehk 12% kuni 17% võrra.

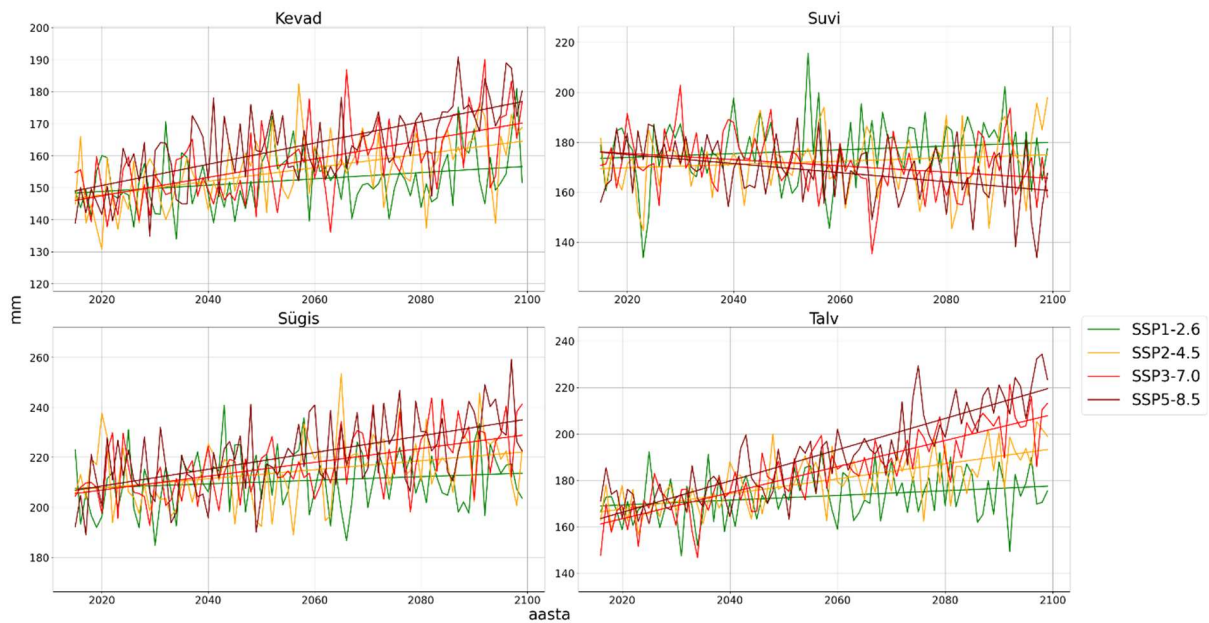


Joonis 5. Sademete pikaajaline aastane keskmine perioodi 2070–2099 kohta võrreldes perioodiga 1985–2014 nelja kliimastenaariumi korral. Muutused on iga kliimastenaariumi korral a) ühisel värviskaalal b) eraldi värviskaalal.

## 2.2.2 Keskmise sademete hulk aastaegade kaupa perioodil 2015–2099

Käesolevas peatükis kirjeldatakse sademete muutumist Eestis aastaegade kaupa. Alguses analüüsitakse sademete hulga muutumist aastaegade lõikes üle terve Eesti perioodil 2015–2099. Joonisel 6 on tulemused esitatud aegreana iga aastaaja kohta nelja kliimastenaariumi korral. Statistiliselt olulist sademete suurenemist on näha iga kliimastenaariumi korral kevadel ja talvel. CMIP6 ansambli keskmine kevadel perioodi 1985–2014 kohta on 144 mm. SSP1-2.6 korral sajab kevadel 21. sajandi lõpuks perioodil 2070–2099 keskmiselt 154 mm. Võrreldes CMIP6 ansambli keskmisega ajaloolisel perioodil on see 7%-line tõus. Kõige pessimistlikuma stsenaariumi korral on see väärtus samal perioodil 172 mm ehk tegemist oleks 19%-lise tõusuga. Sügisel toimub statistiliselt oluline sademete kasv stsenaariumite SSP2-4.5, SSP3-7.0 ja SSP5-8.5 korral. Ajaloolisel perioodil sadas CMIP6 ansambli andmete kohaselt sügisel 201 mm. SSP2-4.5 korral on 21. sajandi lõpuks sügiseste sademete hulk keskmiselt 220 mm, SSP5-8.5 korral 230 mm. Võrreldes ajaloolise perioodi keskmisega on tegemist 10%-lise kuni 14%-lise tõusuga. CMIP6 ansambli keskmine talviste sademete hulk perioodil 1985–2014 oli 159 mm, 21. sajandi lõpuks aga keskmiselt 175 mm SSP1-2.6 korral ning SSP5-8.5 korral 212 mm. Võrreldes ajaloolise perioodiga on tegemist keskmiselt 10%-lise kuni 33%-lise tõusuga.

Suvel toimub statistiliselt oluline sademete hulga langus pessimistlikumate stsenaariumite SSP3-7.0 ja SSP5-8.5 puhul. Kui CMIP6 ansambli ajaloolise perioodi 1985–2014 keskmine suvine sademete hulk oli 174 mm, siis 21. sajandi lõpuks on SSP5-8.5 korral suviste sademete hulk 163 mm. See on võrreldes ajaloolise perioodi 1981–2010 keskmisega 6% võrra vähem.



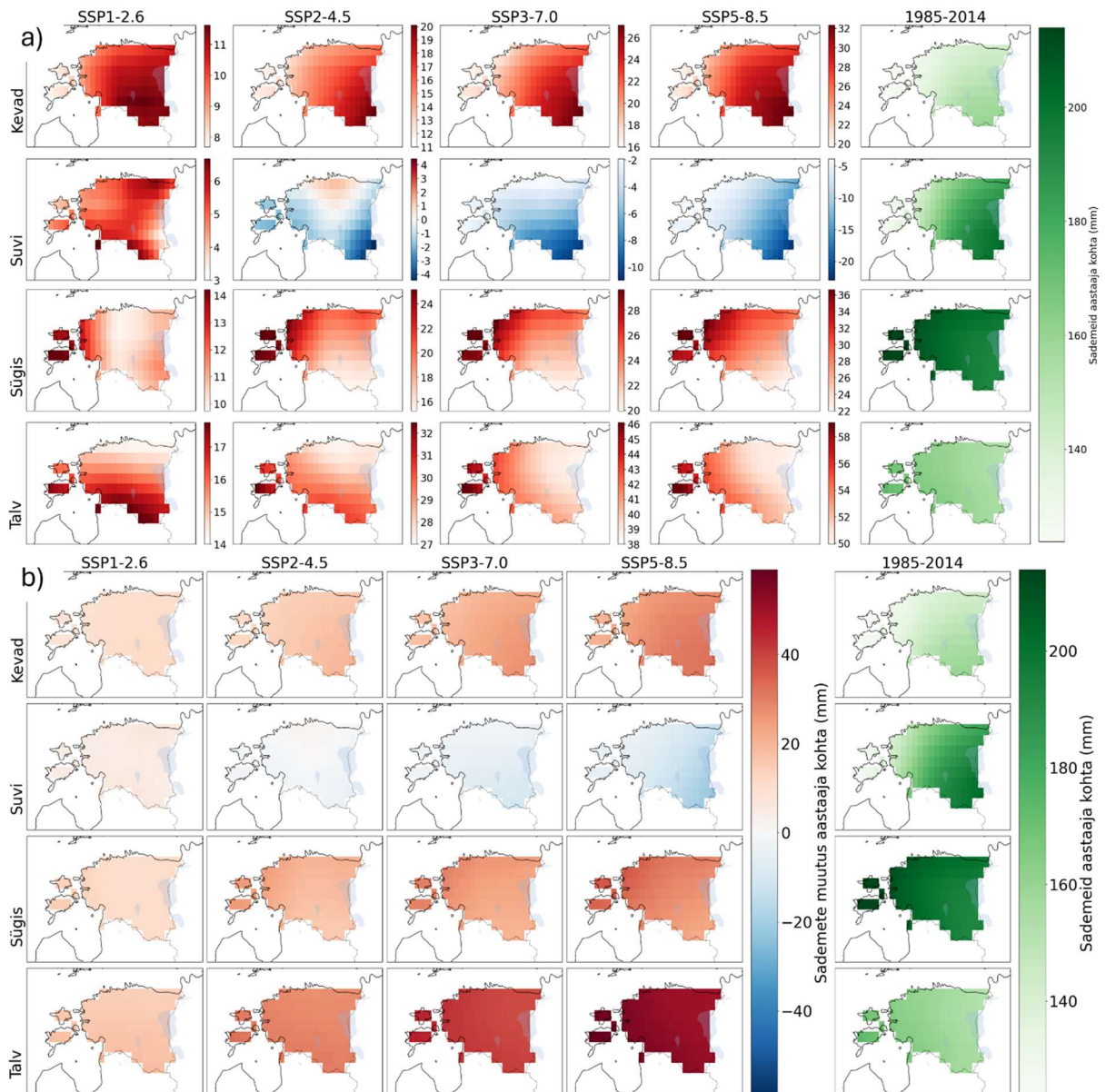
Joonis 6. Keskmised sademed aastaegade kaupa Eestis nelja erineva kliimastenaariumi korral perioodil 2015–2099 koos trendijoonega.

Järgnevalt on analüüsitud Eesti sademete muutust aastaegade lõikes ruumiliselt. On võrreldud CMIP6 ansambli ajaloolist keskmist perioodil 1985–2014 perioodi 2070–2099 keskmisega nelja erineva kliimastenaariumi korral. Joonisel 7b on muutused sademete hulgas kujutatud ühisel värviskaalal, et tulemused oleksid omavahel paremini võrreldavad. Joonisel 7a on aga loodud iga stsenaariumi ja aastaaja jaoks eraldi värviskaala, et sademete ruumiline jaotus paremini esile tuleks. Joonisel 7b on näha, et iga kliimastenaariumi korral kasvab kevadiste sademete hulk kõige rohkem Kagu-Eestis. SSP1-2.6 korral suureneb sademete hulk 8 kuni 12 mm ehk 6% kuni 7% võrra. Gradient on kõige tugevam stsenaariumi SSP5-8.5 korral, kus Kagu-Eestis suureneb keskmine sademete hulk kuni 32 mm võrra. See on 20% kõrgem kui ajaloolise võrdlusperioodi korral.

Suviste sademete hulk väheneb üle terve Eesti stsenaariumite SSP3-7.0 ja SSP5-8.5 korral. Taaskord on märgata loode-kagu suunalist gradienti. Suurim muutus on SSP5-8.5 puhul, kus Kagu-Eestis väheneb keskmine sademete hulk perioodi kohta kuni 22 mm, mis on võrreldes ajaloolise perioodiga 11% väiksem. Stsenaariumi SSP2-4.5 korral valdavalt vähenevad sademed, kõige rohkem Kagu-Eestis, kuid Põhja-Eesti rannikul on märgata sademete hulga suurenemist. Vaid stsenaariumi SSP1-2.6 korral suureneb suviste sademete hulk terve Eesti ulatuses, kõige rohkem Kirde-Eestis. Siinkohal tuleb silmas pidada et stsenaariumite SSP1-2.6 ja SSP2-4.5 sademete ruumiline varieeruvus on siiski võrdlemisi väike (Joonis 7a) ning perioodil 2015-2099 ei toimu statistiliselt olulist muutust suviste sademete hulgas.

Sügisel on märgata vastupidise suunaga gradienti võrreldes soojemate kuudega, kus iga kliimastenaariumi korral on märgata sademete suurenemist just rannikualadel. Loode-Eestis suureneb sademete hulk kõige rohkem stsenaariumi SSP5-8.5 korral, kuni 37 mm võrra, mis on 17% suurem võrreldes ajaloolise perioodiga. SSP2-4.5 korral on märgata sarnast gradienti. Loode-Eestis suureneb sel juhul keskmine sademete hulk kuni 25 mm ehk 12% võrra.

Sarnaselt sügiskuudega suureneb sademete hulk pessimistlikumate stsenaariumite korral talvekuudel rannikualadel. Optimistlikumate stsenaariumite korral on märgata sademete hulga suurenemist ka Eesti edelaosas. Kõige rohkem suureneb sademete hulk Lääne-Eestis SSP5-8.5 puhul. Sademete hulk suureneb kuni 59 mm võrra, mis on 34% suurune kasv võrreldes ajaloolise perioodiga. Talvekuudel suureneb sademete hulk enim võrreldes teiste aastaegade. Seda nii absoluutsel kui ka suhtelisel skaalal. Ka kõige optimistlikuma kliimastenaariumi SSP1-2.6 korral kasvab sademete hulk talvel kuni 18 mm ehk 11% võrra.



Joonis 7. Sademete pikaajaline keskmine aastaegade kaupa perioodil 2070–2099 võrreldes perioodiga 1985–2014 nelja kliimatsenaariumi korral. Muutused on iga kliimatsenaariumi korral a) eraldi värviskaalal b) ühisel värviskaalal, kus väärtused on absoluutne muutus sademete hulgas millimeetrites.

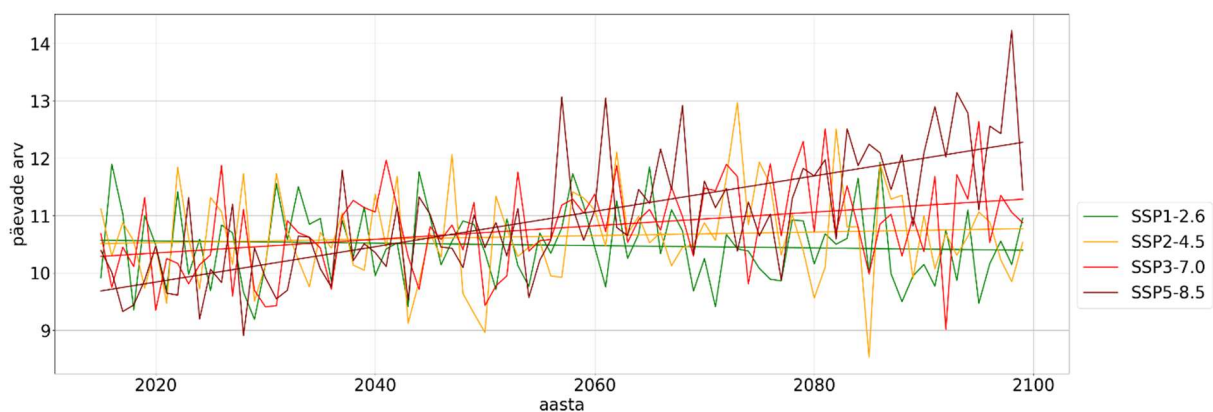
### 2.3 Järjestikused sademetevabad päevad 21. sajandi lõpuks

Käesolevas alapeatükis analüüsitakse ühe ekstreemumina kuivaperioodide pikkuse muutust Eestis 21. sajandi lõpuks. Selleks uuritakse muutust maksimaalses järjestikuste sademetevabade päevade arvus. Kirjanduses leidub erinevaid definitsioone kuiva päeva

defineerimiseks. Käesolevas töös lähtutakse WMO (*World Meteorological Organization*) juhendist vaatlusinstrumentide ja -meetodite kohta ning loetakse sademetevabaks päeva, kus sademeid on all 0.1 mm [19]. Peatükk jaguneb kaheks osaks: algul kirjeldatakse kuivaperioodide pikkuse muutust aastate lõikes, seejärel aastaegade lõikes. Uuritakse kuivaperioodide pikkuse muutust nii aegreana terve Eesti keskmisena kui ka kuivaperioodide pikkuse ruumilist jaotust Eestis 21. sajandi lõpuks võrreldes ajaloolise perioodiga.

### 2.3.1 Järjestikused sademetevabad päevad aastate lõikes perioodil 2015–2099

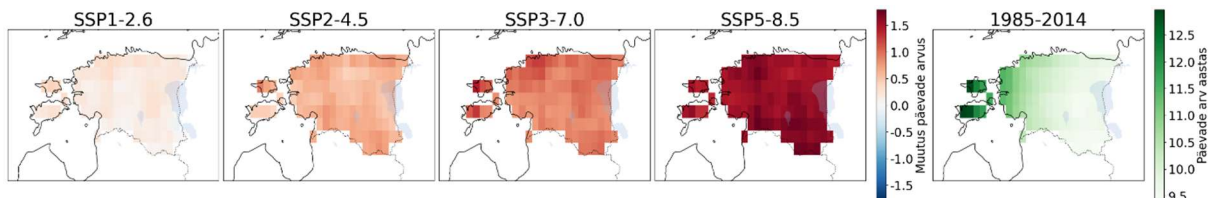
Käesolevas peatükis kirjeldatakse keskmise sademetevabade päevade maksimumi muutust üle terve Eesti perioodil 2015–2099 nelja kliimastenaariumi korral. Joonisel 8 on näha kuivaperioodide pikkuse muutust aastate lõikes koos trendijoontega. Statistiliselt oluline muutus kuivaperioodide pikkuses toimub stsenaariumite SSP3-7.0 ja SSP5-8.5 korral. Kui perioodi 1985–2014 keskmine järjestikuste sademetevabade päevade arvu maksimum oli 10,2 päeva, siis 2070–2099 perioodi keskmine SSP5-8.5 korral on 11,7 päeva. Sellisel juhul oleks tegemist 15%-lise kasvuga maksimaalse järjestikuste sademetevabade päevade arvus.



Joonis 8. Keskmine järjestikuste sademetevabade päevade arvu maksimum Eestis aastate lõikes perioodil 2015–2099 nelja kliimastenaariumi korral.

Järgnevalt on analüüsitud, kuidas muutub maksimaalne järjestikuste sademetevabade päevade arvu ruumiline jaotus Eestis. Joonisel 9 on näha, kuidas muutub perioodil 2070–2099 maksimaalne järjestikuste sademetevabade päevade arv võrreldes ajaloolise perioodiga 1985–2014. Ainsana ennustab CMIP6 ansambel SSP1-2.6 korral, et ühes Eesti punktis lüheneb see periood, kuid ainult 1% võrra. Eelnevalt sai ka märgitud, et SSP1-2.6 korral ei toimu perioodil

2015–2099 statistiliselt olulist muutust kuivaperioodide pikkuses. Mida kõrgem on kliimastenaariumile vastav RCP väärtus, seda enam pikeneb kuivaperiood. SSP5-8.5 korral on sajandi lõpuks maksimaalne järjestikuste sademetevabade päevade arv suurenenud 1,3 kuni 1,8 päeva võrra ehk 11% kuni 17% võrra. Stsenaariumite SSP3-7.0 ja SSP5-8.5 korral toimub suurim muutus Eesti loodeosas, SSP5-8.5 puhul on märgata ka suuremat kuivaperioodide pikenemist Lõuna-Eestis.



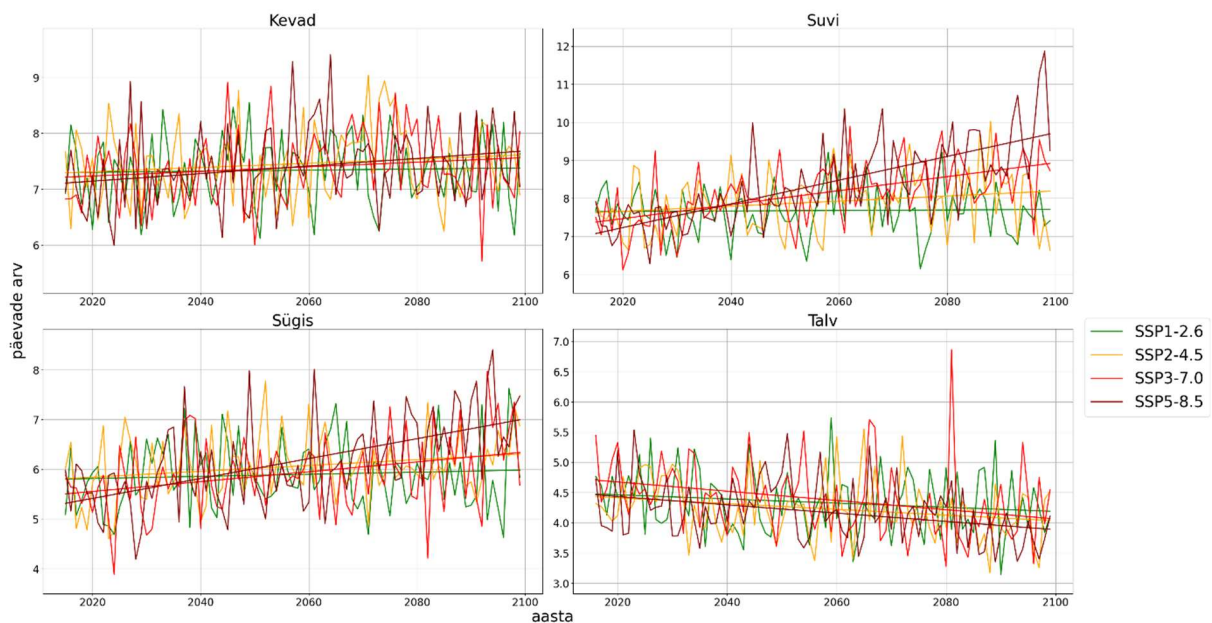
Joonis 9. Keskmine järjestikuste sademetevabade päevade arvu maksimum aastas perioodil 2070–2099 võrreldes ajaloolise perioodiga nelja kliimastenaariumi korral.

### 2.3.2 Järjestikused sademetevabad päevad aastaegade lõikes 21. sajandi lõpuks

Järgnevalt kirjeldatakse muutust keskmise sademetevabade päevade maksimumi pikkuses üle terve Eesti perioodil 2015–2099 nelja kliimastenaariumi korral aastaegade lõikes. Joonisel 10 on näha neid muutusi iga aastaaja kohta koos trendijoonetega. SSP1-2.6 korral ei ole ühelgi aastaajal muutused statistiliselt olulised. Kõige väiksem muutus kuivaperioodide pikkuses toimub kevadel. Statistiliselt oluline muutus toimub ainsana stsenaariumi SSP5-8.5 korral, kuid sedagi vaid 0,6% võrra. Kõigi teiste aastaegade korral toimub statistiliselt oluline muutus kuivaperioodide pikkuses stsenaariumite SSP2-4.5, SSP3-7.0 ja SSP5-8.5. CMIP6 ajalooliste andmete põhjal oli perioodil 1985–2014 suvel keskmine järjestikuste sademetevabade päevade arvu maksimum 7,2 päeva. SSP2-4.5 korral on perioodil 2070–2099 kuivaperioodi maksimum 8,1 päeva. SSP5-8.5 korral on 21. sajandi lõpuks kuivaperioodi maksimaalne pikkus suvel 9,2 päeva. Sellisel juhul oleks optimistlikuma stsenaariumi korral tegemist 12%-lise pikenemisega, pessimistlikuma korral 27%-lise pikenemisega. Sügisel oli ajaloolisel perioodil keskmine kuivaperioodi pikkuse maksimum 5,7 päeva. SSP2-4.5 korral oleks see 21. sajandi lõpuks 6,1 päeva, SSP5-8.5 korral 6,8 päeva. See tähendaks kuivaperioodide pikenemist 8% kuni 20% võrra.

Ainult talvel toimub stsenaariumite SSP2-4.5, SSP3-7.0 ja SSP5-8.5 korral statistiliselt oluline kuivaperioodide maksimumi lühenemine. Ajaloolisel perioodil oli kuivaperioodide maksimum keskmiselt 4,6 päeva. SSP2-4.5 korral on 21. sajandi lõpuks see aga 4,1 päeva, SSP5-8.5 korral 4,0 päeva. Sellisel juhul lüheneksid kuivaperioodid 12% kuni 14% võrra.

Joonisel 9 on näha, et maksimaalne kuivaperioodi pikkus aastas ajalooliste andmete korral on pikem kui ühegi aastaaja korral (Joonis 11). See tuleneb vaadeldava perioodi pikkuse defineerimise erinevusest. Kui vaadata kuivaperioode aastaegade lõikes, siis mõned perioodid tulevad tehnilikult lühemad. Seda selle tõttu, et läheb kaduma info nende järjestikuste sademetevabade päevade arvu kohta, mis on kahe aastaaja üleminekuperioodil. Vaadates päevaseid andmeid terve aasta ulatuses aga see info säilib.



Joonis 10. Keskmise järjestikuste sademetevabade päevade arvu maksimum Eestis aastaegade lõikes perioodil 2015–2099 nelja kliimatsenaariumi korral.

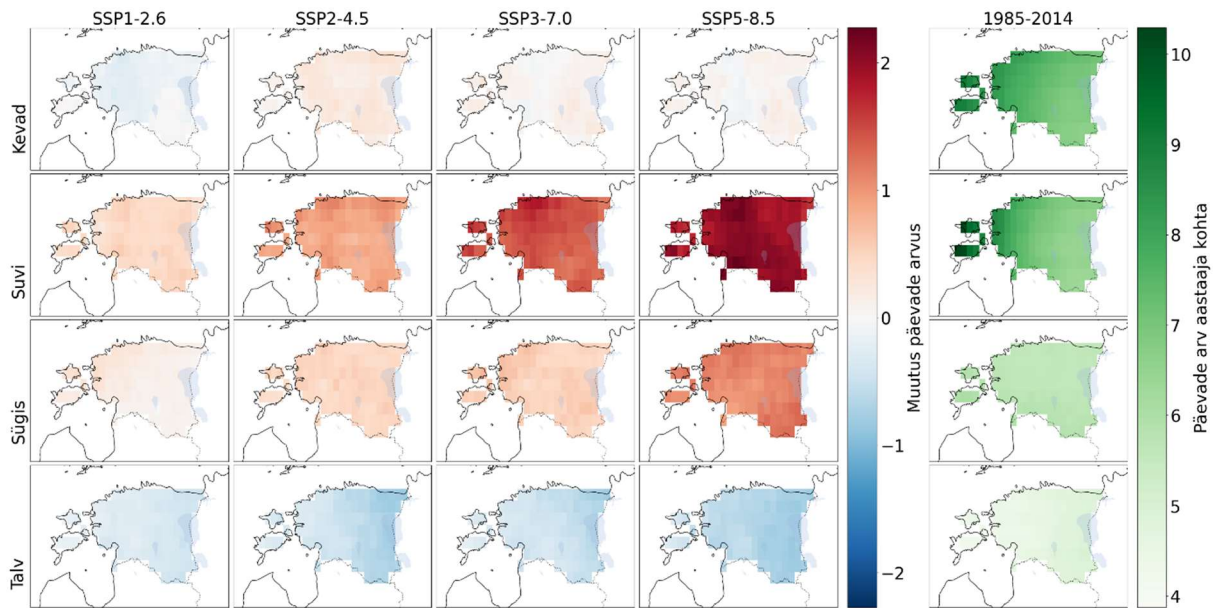
Joonisel 11 on näha, et ajaloolise perioodi jaoks jäävad kõige pikemad kuivaperioodid kevad- ja suvekuudesse. See on suuresti tingitud antitsüklonilisest ilmast sellele perioodil [20]. 21. sajandi lõpuks ennustab CMIP6 ansambel, et kõige enam pikenevad sademetevabad perioodid suvel. Statistiliselt oluline muutus on stsenaariumite SSP2-4.5, SSP3-7.0 ja SSP5-8.5 korral. Iga stsenaariumi korral on kõige tugevamini mõjutatud Lääne-Eesti. Kõige rohkem pikenevad kuivaperioodid SSP5-8.5 korral, see muutus jääb vahemikku 1,7 kuni 2,3 päeva. Sellisel juhul oleks tegemist kuni 31%-lise suurenemisega. Mida väiksem on igale kliimatsenaariumile vastav RCP väärtus, seda vähem pikenevad kuivaperioodid. SSP2-4.5 kohaselt pikenevad

maksimaalsed suvised kuivaperioodid keskmiselt 0,7 kuni 1,1 päeva, mis oleks 10% kuni 11% võrra suurenemine.

Kevadel on märgata kõige väiksemat muutust maksimaalse järjestikuste sademetevabade päevade arvus. Kuigi joonisel 10 on näha, et stsenaariumi SSP2-4.5 tõus on väiksem kui SSP5-8.5 korral, siis kõige suuremat kuivaperioodide pikenedust kevadel perioodil 2070–2099 on märgata just stsenaariumi SSP2-4.5 korral. See on tingitud sellest, et 2070-ndate alguses on märgata võrreldes teiste stsenaariumitega pikemaid kuivaperioode just SSP2-4.5 korral. SSP2-4.5 korral on 21. sajandi lõpuks järjestikuste sademetevabade päevade arv kasvanud kuni 0,4 päeva ehk 5% võrra. SSP5-8.5 korral pikenevad kuivaperioodid kõige rohkem Eesti idaosas kuni 3% võrra.

Sügiskuudel on märgata sarnast trendi nagu suvekuudelgi, kus RCP väärtuse kasvades pikenevad ka kuivaperioodid. Vaid mõnes üksikus ruumipunktis SSP1-2.6 korral toimub päevade arvu vähenemine, kuid sedagi vaid 0,2% võrra. Samuti selgus eelnevalt, et perioodil 2015–2099 ei toimu statistiliselt olulist kuivaperioodide pikkuse muutust kliimaststsenaariumi SSP1-2.6 korral. SSP2-4.5 korral pikeneb sademetevaba periood maksimaalselt 0,6 päeva ehk 10% võrra. Stsenaariumi SSP5-8.5 korral muutub sademetevaba periood 0,9 kuni 1,3 päeva ehk 16% kuni 23% võrra pikemaks. SSP5-8.5 korral toimub kõige suurem muutus Lõuna-Eestis.

Ainult talvel toimub iga stsenaariumi korral kuivaperioodi lühenemine. Iga kliimaststsenaariumi korral lüheneb see periood kõige rohkem Eesti idaosas, vähem mõjutatud on Lääne-Eesti. Keskmiselt väheneb kõige enam järjestikuste sademetevabade päevade arv SSP5-8.5 korral ning see muutus jääb vahemikku 0.3 kuni 0.8 päeva ehk 7% kuni 17%. SSP2-4.5 korral jääb see muutus vahemikku 0.2 kuni 0.8 päeva ehk 5% kuni 17%.



Joonis 11. Keskmise järjestikuste sademetevabade päevade arvu maksimum aastaegade kaupa perioodil 2070–2099 võrreldes ajaloolise perioodiga nelja kliimatsenaariumi korral.

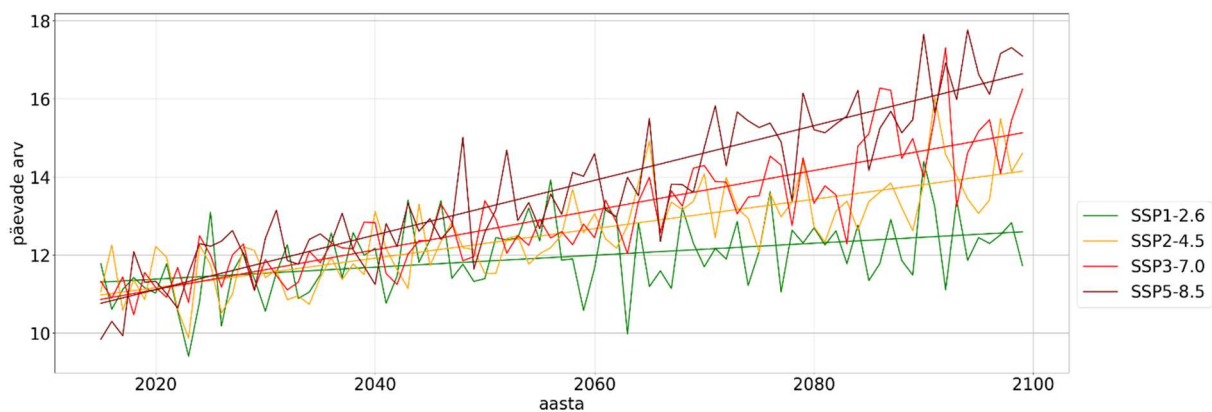
## 2.4 Suure sajuga päevade arv

Käesolevas peatükis analüüsitakse teise äärmusena suure sajuga päevade esinemise sagedust Eestis 21. sajandi lõpuks aastaegade ja aastate lõikes. Suured sajud võivad põhjustada veekogude ning põhjavee taseme tõusu ning üleujutusi. Eesti kontekstis peetakse ohtlikuks sademete hulka, mis ületab tunni jooksul 30 mm või 12 tunni jooksul ületab 50 mm [21]. CMIP6 andmete ajaline lahusus ei võimalda sellisel ajaskaalal hinnangute andmist. Samuti on sellised sündmused olnud Eestis haruldased ning ajas varieeruvad [21]. Seetõttu on töös analüüsitud vaid muutust päevade arvus, mil ööpäevas sajab rohkem kui 10 mm. Kuigi tegemist on palju väiksema sademete hulgaga, on ajalooliselt selliste päevade esinemine võrdlemisi harv nähtus. Ilmajaamade andmete põhjal on Eestis olnud selliseid päevi perioodil 1961–2006 keskmiselt 11–16 aastas [21].

Peatükk jaguneb kaheks: algul analüüsitakse muutust suure sajuga päevade arvus aastate lõikes, seejärel aastaegade lõikes. Mõlemal juhul uuritakse muutust nii aegreana perioodil 2015–2099 kui ka ruumiliselt perioodi 2070–2099 keskmisena võrreldes ajaloolise perioodi 1985–2014 keskmisega.

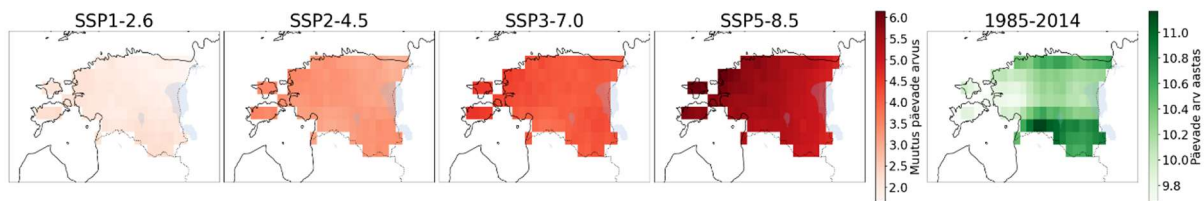
### 2.4.1 Suure sajuga päevade arv aastate lõikes

Käesolevas peatükis analüüsitakse suure sajuga päevade esinemise sageduse muutust Eestis aastate lõikes. Joonisel 12 on näha, kuidas muutub terve Eesti ulatuses aastane keskmine ööpäevade arv, mil sademete hulk ületab 10 mm. Iga kliimastenaariumi korral toimub selliste päevade esinemissageduse statistiliselt oluline suurenemine. Taaskord on märgata trendi, kus suurema RCP väärtuse korral suureneb ka päevade arv, mil sademete hulk ületab 10 mm. CMIP6 ajaloolise perioodi andmete kohaselt oli selliseid päevi perioodil 1985–2014 keskmiselt 10,2 aastas. SSP1-2.6 korral on perioodil 2070–2099 keskmiselt 12,3 sellist päeva aastas. SSP5-8.5 korral oleks keskmiselt 21. sajandi lõpuks 15,7 sellist päeva. Tegemist oleks vastavalt 21%-lise kuni 55%-lise kasvuga.



Joonis 12. Keskmine päevade arv, mil ööpäevane sademete hulk ületab 10 mm Eestis aastate lõikes perioodil 2015–2099 nelja kliimastenaariumi korral.

Järgnevalt uuritakse suure sajuga päevade esinemissageduse ruumilist muutust. Joonisel 13 on näha muutust suure sajuga päevade arvus aastate lõikes võrreldes ajaloolise perioodiga. Joonisel on näha, et iga kliimastenaariumi korral kasvab 21. sajandi lõpuks suure sajuga päevade arv terve Eesti ulatuses. Kõige pessimistlikuma stsenaariumi SSP5-8.5 korral suureneb selliste päevade esinemissagedus kõige rohkem 4,8 kuni 6,1 päeva ehk 44% kuni 61% võrra. Enim suureneb selliste päevade arv Loode-Eestis. Kõige optimistlikuma stsenaariumi korral suureneb päevade arv 1,6 kuni 2,3 päeva ehk 15% kuni 24% võrra.

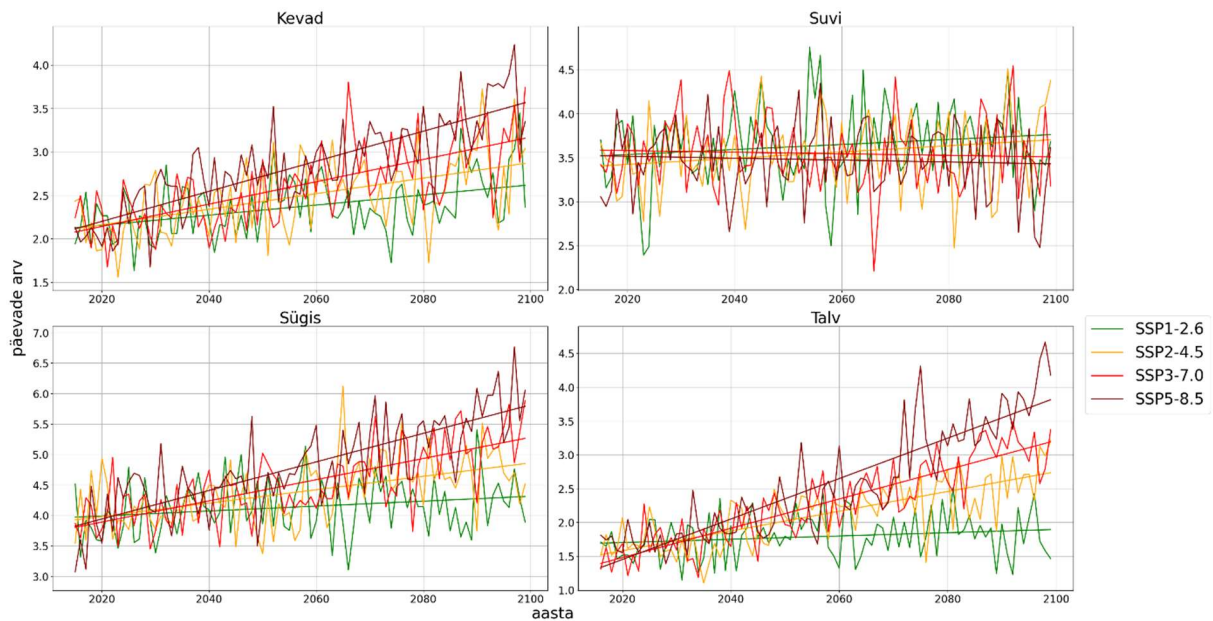


Joonis 13. Keskmine päevade arv aastas, mil sademete hulk ületab 10 mm perioodil 2070–2099 võrrelduna ajaloolise perioodiga 1985–2014 nelja kliimastenaariumi korral.

## 2.4.2 Suure sajuga päevade arv aastaegade lõikes

Joonisel 14 on näha, kuidas suure sajuga päevade arv muutub eri aastaegadel eri kliimastenaariumite korral perioodil 2015–2099. Statistiliselt oluline suurenemine suure sajuga päevade arvus toimub kevadel ja sügisel iga kliimastenaariumi korral. Kui CMIP6 ansambli ajaloolise perioodi 1985–2014 andmete kohaselt oli kevadel keskmiselt 2 päeva, mil sademete hulk ületas 10 mm, siis perioodil 2070–2099 SSP1-2.6 korral on keskmiselt 2,5 sellist päeva. SSP5-8.5 korral oleks aga 3,3 sellist päeva. Tegemist oleks vastavalt 23%-lise kuni 63%-lise tõusuga. Sügisel oli ajaloolisel perioodil keskmiselt 3,6 suure sajuga päeva, 21. sajandi lõpuks on aga SSP1-2.6 korral see arvu tõusnud 4,2 päevani ning SSP5-8.5 korral 5,5 päevani. See tähendaks, et suure sajuga päevade arv kasvaks 18% kuni 52% võrra. Talvel toimub kõikidest aastaegadest kõige märkimisväärsem statistiliselt oluline kasv suure sajuga päevade arvus SSP2-4.5, SSP3-7.0 ja SSP5-8.5 korral. Ajaloolisel perioodil oli keskmiselt 1,3 päeva talvel, mil ööpäevane sademete hulk ületas 10 mm. 21. sajandi lõpuks on SSP2-4.5 korral selliseid päevi keskmiselt 2,5, SSP5-8.5 korral keskmiselt 3,5. Tegemist oleks kasvuga 90% kuni 167% võrra.

Suvel on optimistlikumate stsenaariumite korral märgata nõrka tõusvat trendi suure sajuga päevade arvus, pessimistlikumate stsenaariumite korral aga langevat trendi. Mitte ühegi puhul ei ole tegemist statistiliselt olulise muutusega, ainult stsenaariumi SSP2-4.5 trendijoone tõusu p-väärtus on 0,05. Kui CMIP6 ajaloolise perioodi andmete kohaselt oli keskmiselt 3,4 suure sajuga päeva suvel, siis SSP2-4.5 korral on 21. sajandi lõpuks 3,6 sellist päeva. Tegemist oleks sellisel juhul 7%-lise kasvuga.

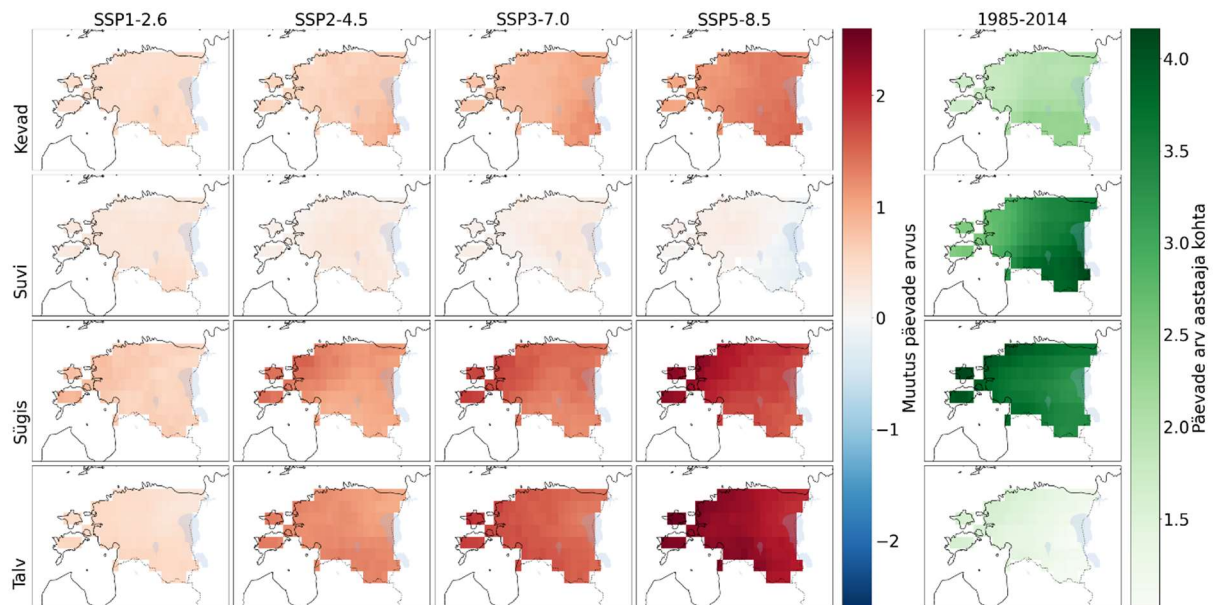


Joonis 14. Keskmise päevade arv, mil ööpäevane sademete hulk ületab 10 mm Eestis aastaegade lõikes perioodil 2015–2099 nelja kliimastenaariumi korral.

Joonisel 15 on näha suure sajuga päevade arvu ruumilist jaotust aastaegade lõikes. Parempoolses tulbas on selliste päevade keskmine esinemissagedus ajaloolisel perioodil 1985–2014. Kõige rohkem leidis selliseid päevi suvel ja sügisel. 21. sajandi lõpuks perioodil 2070–2099 on märgata suure sajuga päevade esinemissageduse muutustes sarnast mustrit nagu keskmiste sesoonsete sademete puhulgi (Joonis 7a). Kevadel, sügisel ja talvel on näha, et seal, kus kasvab keskmine sademete hulk aastaaja kohta, suureneb ka suure sajuga päevade esinemissagedus. Kõige suuremat muutust on märgata talvel stsenaariumi SSP5-8.5 korral, mil selliste päevade arv suureneb 1,9 kuni 2,6 võrra. See on kuni 161%-line tõus võrreldes ajaloolise perioodiga. SSP1-2.6 korral on see muutus 0,3 kuni 0,6 päeva ehk 29% kuni 47%. Igal juhul on talvel märgata suure sajuga päevade esinemissageduse suurenemist kõige rohkem Lääne-Eestis.

Erinevalt keskmistest suvistest sademetest, kus stsenaariumite SSP2-4.5, SSP3-7.0 ning SSP5-8.5 korral sademete hulk peamiselt väheneb üle Eesti (Joonis 7), suure sajuga päevade arv valdavalt kasvab. Ainult SSP5-8.5 korral on märgata Eesti idaosas selliste päevade esinemissageduse langust kuni 0,3 päeva ehk 7% võrra. Lääneosas kasvab päevade arv, kus sademete hulk ületab 10 mm kuni 0,3 päeva ehk 8% võrra. Kõige optimistlikuma stsenaariumi SSP1-2.6 korral jääb see kasv vahemikku 0,2 kuni 0,5 päeva ehk 6% kuni 13%. Siinkohal tuleb rõhutada, et perioodil 2015–2099 ei olnud tegemist statistiliselt olulistest muutustega. Samas SSP5-8.5 trendijoone usaldusväärsust võib mõjutada asjaolu, et Kirde- ja

Lõuna-Eestis toimub suure sajuga päevade arvu vähenemine, Kesk- ja Lääne-Eestis aga selliste päevade arvu suurenemine. Seega keskmiselt on tegemist väiksema muutusega kui kummaski Eesti piirkonnas eraldiseisvana.



Joonis 15. Keskmise päevade arv, mil sademete hulk ületab 10 mm aastaegade kaupa perioodil 2070–2099 võrrelduna ajaloolise perioodiga 1985-2014 nelja kliimatsenaariumi korral.

## Kokkuvõte

Töös prognoositi CMIP6 ansambli sademete andmete põhjal, kuidas muutuvad Eestis sademete pikaajalised keskmised ja ekstreemumid 21. sajandi lõpuks võrreldes ajaloolise perioodi 1985–2014 andmetega. Analüüsiti sademete muutust ajas ja ruumis Eesti maismaa piirides. Tulemused leiti kliimastenaariumite SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 ning SSP5-8.5 jaoks. Lisaks võrreldi CMIP6 ansambli ajaloolisi andmeid E-OBS, järelanalüüsitud ERA5 ning mõõtmisandmetega.

CMIP6 ajaloolise perioodi andmete võrdlusel tuli välja, et keskmine aastane sademete hulk langeb võrdlemisi hästi kokku Eesti sademete normiga perioodi 1981–2010 kohta. Aastaaegade lõikes tulemused nii hästi kokku ei langenud. Ajalooliselt on Eestis kõige rohkem sadanud suvel, kuid CMIP6 ansambel alahindas suviste sademete hulka 47 mm võrra. Sügisesed sademed langesid normiga võrdlemisi hästi kokku. Kevadiste ja talviste sademete hulka ülehinnati. CMIP6 ansambel jäljendas sademete ruumilist muustrit aastaaegade lõikes üldiselt õigesti, kuid peensusi hästi ei kirjelda. See võib olla tingitud sellest, et mudelite ruumiline lahutus pole selleks piisav.

Selgus, et iga kliimastenaariumi korral kasvab 21. sajandi lõpuks keskmine aastane sademete hulk. Mida kõrgem on sajandi lõpuks kasvuhoonegaaside kontsentratsioon atmosfääris, seda suurem on keskmise sademete hulga muutus. Sajandi lõpuks kasvab keskmine aastane sademete hulk umbes 6% kõige optimistlikuma kliimastenaariumi korral ning kuni 15% kõige pessimistlikuma stsenaariumi korral. Aastaaegade lõikes kasvab keskmine sademete hulk kõige rohkem talvel. See muutus jääb vahemikku 10% kuni 33% sõltuvalt kliimastenaariumist. Kuivaperioodid talvel lühenevad. Suure sajuga päevade arv talvel kasvab, SSP5-8.5 korral lausa 167% võrra. Samuti kasvab kevadiste ja sügiseste sademete hulk. Keskmine sademete hulk väheneb suvel pessimistlikumate stsenaariumite SSP3-7.0 ja SSP5-8.5 korral kuni 6% võrra. Suvel pikenevad ka kuivaperioodid kuni 31% võrra SSP5-8.5 korral. Suure sajuga päevade esinemissagedus aga valdavalt kasvab iga kliimastenaariumi korral, kuid see muutus ei ole statistiliselt oluline.

## **Tänuõnad**

Soovin tänada oma juhendajat Erko Jakobsoni, kes oli töö kirjutamise ajal toeks ning vastas alati töö käigus tekkinud küsimustele. Samuti soovin tänada Tartu observatooriumi kaugseire osakonna töötajaid, kes andsid sisukat tagasisidet töö proovikaitsmisel.

## Kasutatud kirjandus

1. IPCC, "2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," Core Writing Team, H. Lee and J. Romero, Eds., IPCC, Geneva, Switzerland, 2023, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
2. Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, Mar. 2021, "CMIP6 climate projections," Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), doi: 10.24381/cds.c866074c. (Accessed on 02-12-2023)
3. H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, G. Biavati, A. Horányi, J. Muñoz Sabater et al., 2023, "ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present," Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), doi:10.24381/cds.adbb2d47. (Accessed on 07-10-2023)
4. Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, Feb. 2020, "E-OBS daily gridded meteorological data for Europe from 1950 to present derived from in-situ observations," Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), doi:10.24381/cds.151d3ec6. (Accessed on 25-03-2024)
5. V. Eyring, S. Bony, G. A. Meehl, C. A. Senior, B. Stevens, R. J. Stouffer et al., "Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization," *Geosci. Model Dev.*, vol. 9, no. 5, pp. 1937–1958, May. 2016, doi:10.5194/gmd-9-1937-2016.
6. R. H. Moss, J. A. Edmonds, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. Van Vuuren et al., "The next generation of scenarios for climate change research and assessment," *Nature*, vol. 463, no. 7282, 747–756, Feb. 2010, doi:10.1038/nature08823.
7. B. C. O'Neill, C. Tebaldi, D. P. Van Vuuren, V. Eyring, P. Friedlingstein, G. Hurtt et al., "The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6," *Geosci. Model Dev.*, vol. 9, no. 9, pp. 3461–3482, Sept. 2016, doi:10.5194/gmd-9-3461-2016.
8. B. C. O'Neill, E. Kriegler, K. L. Ebi, E. Kemp-Benedict, K. Riahi, D. S. Rothman et al., "The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world

- futures in the 21st century," *Global Environmental Change*, vol. 42, pp. 169–180, Jan. 2017, doi:10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004.
9. D. P. Van Vuuren, J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard et al., "The representative concentration pathways: an overview," *Climatic Change*, vol. 109, no. 1–2, pp. 5–31, Nov. 2011, doi:10.1007/s10584-011-0148-z.
  10. H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater et al., "The ERA5 global reanalysis," *Quart J Royal Meteor Soc*, vol. 146, no. 730, pp. 1999–2049, Jul. 2020, doi:10.1002/qj.3803.
  11. B. Bell, H. Hersbach, A. Simmons, P. Berrisford, P. Dahlgren, A. Horányi et al., "The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950," *Quart J Royal Meteor Soc*, vol. 147, no. 741, pp. 4186–4227, Oct. 2021, doi:10.1002/qj.4174.
  12. European Climate Assessment & Dataset. Kasutatud 29.04.2024, [https://www.ecad.eu/countries/country\\_overview.php](https://www.ecad.eu/countries/country_overview.php).
  13. M. Bandhauer, F. Isotta, M. Lakatos, C. Lussana, L. Båserud, B. Izsák et al., "Evaluation of daily precipitation analyses in E-OBS (v19.0e) and ERA5 by comparison to regional high-resolution datasets in European regions," *Intl Journal of Climatology*, vol. 42, no. 2, pp. 727–747, Feb. 2022, doi:10.1002/joc.7269.
  14. D. A. Lavers, A. Simmons, F. Vamborg and M. J. Rodwell, "An evaluation of ERA5 precipitation for climate monitoring," *Quart J Royal Meteor Soc*, vol. 148, no. 748, pp. 3152–3165, Oct. 2022, doi:10.1002/qj.4351.
  15. A. Luhamaa, A. Kallis, K. Mändla, A. Männik, T. Pedusaar ja K. Rosin, "Eesti tuleviku kliimastenaariumid aastani 2100," Keskkonnaagentuur, Tallinn, Eesti, 2015. Kasutatud: 14.04.2024. Kättesaadav: [https://www.klab.ee/wp-content/uploads/sites/4/2016/04/2016-04-07-KAUR\\_Lopparuanne.pdf](https://www.klab.ee/wp-content/uploads/sites/4/2016/04/2016-04-07-KAUR_Lopparuanne.pdf).
  16. WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals 2017 ed., WMO, Geneva, Switzerland, 2017, p. 2.
  17. Keskkonnaagentuuri kliimanormid. Kasutatud 07.05.2024, <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/kliimanormid/>.

18. T. Tammets and J. Jaagus, "Climatology of precipitation extremes in Estonia using the method of moving precipitation totals," *Theor Appl Climatol*, vol. 111, no. 3-4, pp. 623–639, Feb. 2013, doi:10.1007/s00704-012-0691-1.
19. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Volume I – Measurement of Meteorological Variables, 2023 ed., WMO, Geneva, Switzerland, 2023, p. 225.
20. T. Tammets, "Distribution of extreme wet and dry days in Estonia in last 50 years," *Estonian Journal of Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 252-259, Jan. 2007, doi:10.3176/eng.2007.3.06.
21. T. Paljak, T. Tammets, M. Merilain, H. Meitern, O. Mätlik, L. Klaus et al., *Eesti ilma riskid*, Tallinn, Eesti: Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut, 2012.

# Lisad

## Lisa 1. Koodinäide

Järgnevalt on välja toodud koodijupp, mille abil laaditi CMIP6 ajaloolise perioodi sademete andmed alla. Kõigi töös tehtud arvutuste ja jooniste Pythoni koodid on nähtaval githubi repositooriumis: <https://github.com/08maria09/Maria-Ksenofontov-loput-/tree/main>.

```
import cdsapi
import urllib.request
from contextlib import suppress

# CMIP6 ajaloolise perioodi sademete andmete allalaadimiseks
# kõik CMIP6 mudelid:

models = ['access_cm2', 'access_esm1_5', 'awi_cm_1_1_mr', 'awi_esm_1_1_lr', 'bcc_csm2_mr',
'bcc_esm1', 'cams_csm1_0', 'canesm5', 'canesm5_canoe', 'cesm2', 'cesm2_fv2', 'cesm2_waccm',
'cesm2_waccm_fv2', 'ciesm', 'cmcc_cm2_hr4', 'cmcc_cm2_sr5', 'cmcc_esm2', 'cnrm_cm6_1',
cnrm_cm6_1_hr', 'cnrm_esm2_1', 'e3sm_1_0', 'e3sm_1_1', 'e3sm_1_1_eca', 'ec_earth3',
'ec_earth3_aerchem', 'ec_earth3_cc', 'ec_earth3_veg', 'ec_earth3_veg_lr', 'fgoals_f3_1', 'fgoals_g3',
'fio_esm_2_0', 'gfdl_esm4', 'giss_e2_1_g', 'giss_e2_1_h', 'hadgem3_gc31_ll', 'hadgem3_gc31_mm',
'iitm_esm', 'inm_cm4_8', 'inm_cm5_0', 'ipsl_cm5a2_inca', 'ipsl_cm6a_lr', 'kace_1_0_g',
'kiost_esm', 'mcm_ua_1_0', 'miroc6', 'miroc_es2h', 'miroc_es2l', 'mpi_esm_1_2_ham',
mpi_esm1_2_hr', 'mpi_esm1_2_lr', 'mri_esm2_0', 'nesm3', 'norcpm1', 'noresm2_lm', 'noresm2_mm',
'sam0_unicon', 'taiesm1', 'ukesm1_0_ll']

for modelnr in range(len(models)):

    try:

        zipname = 'CMIP6_daily_prec' + '_' + '_' + models[modelnr] + '.zip'

        print(models[modelnr], modelnr, zipname)

    c = cdsapi.Client()

    print(modelnr, models[modelnr])

    c.retrieve(
        'projections-cmip6',
        {
            'format': 'zip',
            'experiment': 'historical',
            'temporal_resolution': 'daily',
            'level': 'single_levels',
            'variable': 'precipitation',
            'model': models[modelnr],
```

'day': [  
    '01', '02', '03',  
    '04', '05', '06',  
    '07', '08', '09',  
    '10', '11', '12',  
    '13', '14', '15',  
    '16', '17', '18',  
    '19', '20', '21',  
    '22', '23', '24',  
    '25', '26', '27',  
    '28', '29', '30',  
    '31',

],

'month': [  
    '01', '02', '03',  
    '04', '05', '06',  
    '07', '08', '09',  
    '10', '11', '12',

],

'year': [  
    '1979', '1980', '1981',  
    '1982', '1983', '1984',  
    '1985', '1986', '1987',  
    '1988', '1989', '1990',  
    '1991', '1992', '1993',  
    '1994', '1995', '1996',  
    '1997', '1998', '1999',  
    '2000', '2001', '2002',  
    '2003', '2004', '2005',  
    '2006', '2007', '2008',  
    '2009', '2010', '2011',  
    '2012', '2013', '2014'

],

'area': [  
    '01', '02', '03',  
    '04', '05', '06',  
    '07', '08', '09',  
    '10', '11', '12',  
    '13', '14', '15',  
    '16', '17', '18',  
    '19', '20', '21',  
    '22', '23', '24',  
    '25', '26', '27',  
    '28', '29', '30',  
    '31',

```
        63, 18, 53,  
        32,  
    ],  
    },  
    zipname)  
except:  
    pass
```

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

Mina, Maria Ksenofontov,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose Eesti sademete keskmised ja ekstreemumid perioodil 1979-2099, mille juhendaja on Erko Jakobson, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

*Maria Ksenofontov*

**15.05.2024**