

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Füüsika instituut

Hannes Kuslap

Eesti tulevikukliima temperatuuriekstreemumid

Bakalaureusetöö (6 EAP)

Füüsika, keemia ja materjaliteaduse õppekava, füüsika eriala

Juhendaja Velle Toll, PhD

Andres Luhamaa, MSc

Tartu 2023

Eesti tulevikukliima temperatuuriekstreemumid

Analüüsisin globaalsete CMIP6 kliimamudelite temperatuuriprojektsioone Eestile 21. sajandiks. Töös kasutasin 9 kuni 13 mudeli väljundit, mille parameetrid vastasid töö nõuetele. Võrdlesin temperatuuriprojektsioone kahe erineva emissioonistsenaariumi jaoks: SSP245 ja SSP585 ehk vastavalt inimtekkeliste kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamise stsenaariumi jaoks ja heitkoguste järjepideva kasvu stsenaariumi jaoks. Analüüsist selgus, et sajandi lõpuks tõuseb Eesti temperatuur ligikaudu 2 korda rohkem globaalsest keskmisest. Enim soojenevad talvekuud ja vähem suvekuud, kuid siiski esineb suvel praegusest rohkem kuumalaineid. Üle 25°C ööpäevakeskmise temperatuuriga päevade arv aastas suureneb emissioonistsenaariumi SSP245 korral enam kui 4 korda ja emissioonistsenaariumi SSP585 korral enam kui 20 korda. Lisaks tõuseb talvine minimaalne ööpäevakeskmise temperatuur 14°C kuni 19°C võrra ning alla 0°C keskmise temperatuuriga päevade arv väheneb 40% kuni 60% võrra. Töö tulemused on olulised Eestis kliimamuutusteks ettevaatavalt valmistumise ehk kliimamuutustega kohanemise seisukohalt.

Märksõnad: Eesti tulevikukliima, kliimaprojektsioonid, kliimamudel, CMIP6, temperatuuriekstreemumid

CERCS: P500 Geofüüsika, füüsikaline okeanograafia, meteoroloogia

Temperature extremes in future climate of Estonia

I analyzed CMIP6 21st century global climate model projections for Estonia. I used data from 9 to 13 models as these met the given requirements. I compare projected temperatures for two different emission scenarios, SSP245 and SSP585. These emission scenarios refer to the reduction of anthropogenic greenhouse gas emissions during the 21st century and to the continuously increasing emissions, respectively. The analysis revealed that by the end of the century, Estonia will face a temperature increase of about 2 times the global average. The winter months will warm the most and the summer months the least, but in summer there will still be more heatwaves than today. The number of days per year with the average temperature above 25°C will increase more than 4-fold in case of SSP245 and more than 20-fold in case of SSP585. In addition, the winter daily minimum temperature will increase by 14°C to 19°C and the number of days with average temperatures below 0°C will decrease by 40% to 60%.

Keywords: future climate in Estonia, climate projections, climate model, CMIP6, Temperature extremes

CERCS: P500 Geophysics, physical oceanography, meteorology

Sisukord

Eesti tulevikukliima temperatuuriekstreemumid	1
Temperature extremes in future climate of Estonia	2
1. Sissejuhatus	4
1.1. Kliimamuutused.....	4
1.2. Töö eesmärk	4
2. Metoodika.....	6
2.1. Mis on kliimamudelid.....	6
2.2. Emissiooni- ja sotsiaalmajanduslikud stsenaariumid	7
2.3. CMIP6 ansambli loomine temperatuuri projektsioonide analüüsiks.....	9
3. Tulemused ja arutelu	11
3.1. Keskmise temperatuuri muutus Eestis.....	11
3.1.1. Aasta keskmise temperatuuri tõus.....	11
3.1.2. Temperatuuri tõusu geograafiline jaotus.....	12
3.2. Temperatuuri muutus kuude lõikes	15
3.3. Päevased andmed.....	16
3.3.1. Ööpäeva keskmiste temperatuuride maksimumid Eesti alal.....	17
3.3.2. Kõrge temperatuuriga päevade arv aastas Eesti alal	18
3.3.3. Ööpäevaste temperatuuride miinimumid Eestis.....	20
3.3.4. Alla 0°C temperatuuriga päevade arv aastas Eestis	21
4. Kokkuvõte	22
Kasutatud kirjandus.....	24
Lisad	28
Lisa 1: Töös defineeritud Eesti ala.....	28
Lisa 2: Koodinäited	28
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	31

1. Sissejuhatus

1.1. Kliimamuutused

Fossiilsete kütuste põletamise tulemusena tõuseb atmosfääris kasvuhoonegaaside kontsentratsioon. Selle tulemusel tugevneb atmosfääri kasvuhooneefekt, põhjustades Maa keskmise temperatuuri tõusu. Pariisi kliimaleppes on defineeritud erinevad sammud, mida riigid kasvuhoonegaaside emissiooni vähendamiseks astuma peaksid [1-2]. Pariisi kliimaleppe üldine eesmärk on hoida globaalse keskmise temperatuuri tõus alla 2°C [3]. Omalt poolt on ka Valitsustevaheline Kliimamuutuste Nõukogu IPCC koostanud kliimateaduse hetkeseisu kirjeldavaid raporteid, mille järgi poliitikut üldiseid kliimapoliitika arengusuundi kujundama peaksid [4]. Hetkel ei ole aga mingil viisil tagatud nende kokkulepete täitmine. Seetõttu peame selle sajandi jooksul olema valmis nii stsenaariumiks, kus maakera keskmise temperatuuri tõus pidurdub ja jääb 2°C piiresse, kuid ka kuni 4°C globaalse keskmise temperatuuri tõusuks sajandi lõpuks [5].

Kliima ei muutu igal pool ühetaoliselt ja erinevad regioonid peavad olema valmis erinevateks muutusteks [6]. Eesti keskmise temperatuuri tõuseb 21. sajandi lõpuks 2,7°C kuni 4,3°C võrreldes 20. sajandi lõpuga [7]. Lisaks keskmise temperatuuri muutusele on kasulik teada ka seda, millisteks ekstreemseteks temperatuurideks tulevikus valmis olema peame. Seda on vaja silmas pidada erinevate pikaajaliste investeeringute ja infrastruktuuri planeerimisel. Talviste ekstreemsete külmakraadide puhul peab energiatööstus olema valmis suureks tiputarbimiseks, suviste ekstreemsete kuumakraadide korral peavad aga hooned suutma konditsioneerida või tarkade arhitektuuriliste lahendustega tagada küllaldase jahutuse [7]. Järgneva 80 aasta temperatuurimuutuste ennustamiseks arendatakse täppisteaduslikke kliimamudeleid ja arvutatakse tuleviku kliima tingimused lähtuvalt inimtekkeliste kasvuhoonegaaside heitkogustest.

1.2. Töö eesmärk

Töö eesmärk on kirjeldada Eesti tulevikukliima temperatuuriekstreemumeid aastani 2100. Analüüsiks kasutan globaalsete CMIP6 kliimamudelite väljundandmeid, mis on vabalt

kättesaadavad Amazon'i pilves. Töös võrdlen ekstreemseid temperatuure minevikus ja tulevikus eri kümnenditel, lisaks võrdlen temperatuuriekstreemumeid erinevate emissioonistsenaariumide korral. Tööst on kasu Eesti pikaajaliste arengukavade koostamisel valdkondades, mis sõltuvad oluliselt temperatuurist, näiteks energeetika, ehitus, põllumajandus ja metsandus.

Töös käsitlen järgnevat uurimisküsimusi. Kui palju tõuseb keskmine temperatuur Eestis 21. sajandi jooksul? Kuidas muutub Eesti keskmine temperatuur võrreldes ülejäänud Euroopa kliimaga? Millistel kuudel muutub temperatuur enim ja kuidas? Millised on maksimaalsed ja minimaalsed võimalikud ööpäevased temperatuurid selle sajandi jooksul? Kuidas sõltub Eestis aset leidva kliimamuutuse ulatus globaalsete kasvuhoonegaaside heitkogustest?

2. Metoodika

2.1. Mis on kliimamudelid

Kliimamudel on superarvutite abil numbriliselt integreeritav matemaatiline mudel, mis kirjeldab matemaatiliselt Maa kliimasüsteemi käitumist iseloomustavaid loodusseadusi. Kliimasüsteem koosneb viiest osast: atmosfäär, hüdroosfäär, krüosfäär, litosfäär ja biosfäär ning nende omavahelistest interaktsioonidest. Kliimamudelid aitavad ennustada kliimamuutusi, mille võivad esile kutsuda looduslikud või inimtekkelised tegurid, nagu kasvuhoonegaaside sisalduse suurenemine atmosfääris, päikesekiirguse muutused, maakasutuse muutused või vulkaanipursked, kusjuures tööstusrevolutsioonijärgsed kliimamuutused on peamiselt inimtekkelised [8].

Kliimamudel jagab atmosfääri ja maapinna väikesteks osadeks ning arvestab lähteparametreid iga osa kohta. Seejärel rakendab mudel iga osa jaoks füüsikalisi seaduseid, et arvutada sisendparameetritega samad füüsikalised suurused teatud lühikese ajavahemiku järel. Saadud tulemusi kasutatakse sama piirkonna järgmise ajavahemiku sisendandmeteks. Tavaliselt kasutatakse ajalist sammu kümnete minutite kuni tundide suurusjärgus. Ruumiline lahutus on samuti muutunud paremaks: 1990. aastal oli horisontaalne võrgusamm 500 km, aga praeguseks on see suurusjärgus 100 km. Kuna arvutusmaht ja vajalik mälu maht on suured, on selliseid mudeleid võimalik jooksutada vaid superarvutitel [9].

Näitena vaatan olulisemaid osi kliimamudelites. Enamasti algab kliimamudelite ülesehitus termodünaamika esimesest seadusest ehk energia jäävuse seadusest. Sellest tuleneb, et igasse ruumipiirkonda siseneva ja väljuva energia vahe näitab, kui palju suureneb antud ruumipiirkonna siseenergia $Q_{sisse} - Q_{välja} = \Delta Q$, mis omakorda määrab ruumiosa temperatuuri.

Kliimasüsteemi sisenev energia tuleb Päikeselt elektromagnetkiirgusena. Maalt lahkub energia samuti ainult kiirguslikult; seda kirjeldab Stefan-Boltzmanni seadus. Kui arvutada Maa pinnatemperatuur vaid siseneva ja väljuva energia tasakaalust, on tulemuseks ligikaudu -20°C . Päikeselt tuleb Maale energiavoog $I = 1368\text{W}/\text{m}^2$ [10], Stefan-Boltzmanni konstant on $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$ [11] ja Maa keskmine albeedo on 0,29 [12]. Energiatasakaalus peab kehtima võrdus $P_{sisse} = P_{välja}$. Eeldame, et Maa puhul kehtib $P_{sisse} = I \cdot S_{maa\ risti} \cdot (1 - \alpha) = I \cdot$

$\pi R_{maa}^2 \cdot (1 - \alpha)$ ja toimub täielik soojusvahetus üle kogu maakera. Leiame siseneva võimsuse $P_{sisse} = \sigma \cdot S_{maaristi} \cdot (1 - \alpha) = \sigma \cdot \pi R_{maa}^2 \cdot (1 - \alpha)$ ja Stefan-Boltzmanni seadusest $P_{välja} = \sigma \cdot T^4 \cdot S_{kogu} = \sigma \cdot T^4 \cdot 4\pi R_{maa}^2$. Nendest võrranditest saame avaldada $T^4 = I \cdot (1 - \alpha) \cdot \frac{\pi R_{maa}^2}{\sigma \cdot 4\pi R_{maa}^2} \approx 4,14 \cdot 10^9 K^4$, seega $T_{maapind} \approx 253K \approx -20^\circ C$. See on oluliselt madalam maakera tegelikust keskmisest temperatuurist, mis 20. sajandi jooksul oli $13.9^\circ C$ [13]. See tuleneb asjaolust, et kliimamudelites on lisaks vaja arvestada muude faktoritega, nagu atmosfääri kasvuhooneefekt. Samuti on vaja arvutustesse lisada ka näiteks veeauru tasakaalu arvutamiseks Clausius–Clapeyron’i valem, mis seob vee küllastava aururõhu temperatuuriga, ja ka kolmemõõtmelises ruumis õhumasside liikumist kirjeldavad Navier-Stokesi võrrandid. Lisaks atmosfäärile peab arvestama ka paljude teiste kliimat mõjutavate faktoritega, näiteks maaharimine, jää maal ja merel, ookeanide hoovused ja mitmed teised komponendid.

Selles töös kasutan globaalsete kliimamudelite projektsioone CMIP6 projektist (*Coupled Model Intercomparison Project phase6*) [14]. CMIP6 projektis osaleb umbes 50 uurimismeeskonda oma kliimamudelitega, mida omavahel pidevalt võrreldakse. CMIP6 erineb varasematest CMIP projektidest selle poolest, et mudelitel on suurem resolutsioon, on lisatud uusi arvutatavaid suuruseid ja selle põlvkonna mudelitel on eelnevatest parem dokumentatsioon. Antud töös on neist edusammudest kõige olulisem horisontaalse resolutsiooni suurenemine [15].

2.2. Emissiooni- ja sotsiaalmajanduslikud stsenaariumid

Kliimaprojektsioonide omavaheliseks võrdlemiseks on vaja ühetaoliselt kirjeldada kasvuhoonegaaside kogust ja muutust Maa energiabilansis. Selleks on kasutusele võetud suurus RCP (*Representative Concentration Pathway*), mis väljendab Maa kiirgusbilansi häiritust atmosfääri ülapiiril võrreldes tööstusrevolutsioonieelse ajaga (*Effective Radiative Forcing*). RCP’d kirjeldavad Maa energiabilansi muutust mõõdetakse ühikutes W/m^2 . Näiteks näitab RCP4,5, et võrreldes tööstusrevolutsioonieelse ajaga oleks Maalt kiiratav infrapunakiirguse voog kahanenud $4,5W/m^2$ võrra, kui kasvuhoonegaaside kontsentratsioon atmosfääris oleks hetkeliselt kasvanud. Seega kirjeldab RCP kaudselt ka kasvuhoonegaaside kontsentratsiooni atmosfääris [16]. RCP võimaldab erinevaid kliimaprojektsioone omavahel hästi võrrelda. Konkreetse mudeliga arvutatud projektsiooni võrreldakse sama kliimamudeliga ajaloolise perioodi 1850-2015 jaoks arvutatud kliimaga, kus eeldatakse ajaloolisi kasvuhoonegaaside kontsentratsioone Maa atmosfääris [14]. Antud töös viidatakse ajaloolise perioodi andmetele

kui ajaloolistele andmetele. Üldiselt kasutatakse stsenaariumides nelja erinevat RCP väärtust: $2,6W/m^2$; $4,5W/m^2$; $6,0W/m^2$ ja $8,5W/m^2$. Samas ei näita need suurused midagi sotsiaalmajanduslike stsenaariumite kohta [17].

Sotsiaalmajanduslike stsenaariumite sidumiseks RCP väärtustega võeti kasutusele SSP (*shared socioeconomic pathways*) väärtused. Erinevalt RCP väärtustest kirjeldavad need ka sotsiaalmajanduslikke narratiive. SSP1 on kõige optimistlikum stsenaarium, mille kohaselt väheneb ühiskondlik ebavõrdsus ning suureneb kliimasäästlike tehnoloogiate kasutamine. SSP5 on kõige pessimistlikum stsenaarium, mille kohaselt suureneb ühiskondlik ebavõrdsus ja kasutatakse üha rohkem fossiilkütuseid. Stsenaariumide puhul on SSP ja RCP väärtused omavahel seotud nii, et stsenaariumi nimetuse esimene number näitab SSP väärtust ning viimased kaks numbrit RCP väärtust, näiteks SSP245 tähendab SSP2 ja RCP4,5 ning SSP585 tähendab SSP5 ja RCP8,5 [18].

Antud töös võrdlen SSP245 ja SSP585 ühiskonna arengu stsenaariume. SSP245 valisin sellepärast, et SSP2 vastab praegusele ühiskondlikule suundumusele kõige paremini [18]. SSP2 kirjeldus on järgnev: „Maailm järgib rada, kus sotsiaalsed, majanduslikud ja tehnoloogilised suundumused ei erine oluliselt ajaloolistest mustritest. Areng ja sissetulekute kasv kulgevad ebaühtlaselt, kusjuures mõned riigid teevad suhteliselt suuri edusamme, samas kui teised jäävad ootustele alla. Ülemaailmsed ja riiklikud institutsioonid töötavad jätkusuutliku arengu eesmärkide saavutamise nimel, kuid teevad aeglaselt edusamme. Keskkonnaprobleemid süvenevad, kuigi on vähenenud ressursi- ja energiakasutuse intensiivsus. Ülemaailmne rahvastiku kasv on mõõdukas ja tasandub sajandi teisel poolel. Sissetulekute ebavõrdsus püsib või paraneb ainult aeglaselt [19].“

Võrdlusstsenaariumiks valisin SSP5, et näidata, mis võib juhtuda ilma globaalse kliimapoliitikata. SSP5 kirjeldus on järgmine: „See maailm usub üha enam konkurentsivõimelistesse turgudesse, innovatsiooni ja osalusühiskonda, et saavutada kiire tehnoloogiline progress ja inimkapitali arendamine. Ülemaailmsed turud on üha enam integreeritud. Samuti on tehtud suuri investeeringuid tervishoidu ja haridusse, et suurendada inim- ja sotsiaalset kapitali. Samal ajal kaasneb majandusliku ja sotsiaalse arengu hoogustamisega fossiilkütuste üha suurem kasutamine ning ressursi- ja energiamahukate eluviiside omaksvõtmine kogu maailmas. Kõik need tegurid toovad kaasa maailmamajanduse kiire kasvu, samal ajal kui maailma rahvastik saavutab 21. sajandil haripunkti ja väheneb.

Kohalikke keskkonnaprobleeme, näiteks õhusaastet, hallatakse edukalt. Usutakse, et sotsiaalseid ja ökoloogilisi süsteeme on võimalik tõhusalt hallata, vajadusel ka kliimat inimese käe läbi jahutades [19].“ Ma ei valinud analüüsi kõige optimistlikumat stsenaariumi sellepärast, et paraku ei ole see kooskõlas viimaste poliitiliste otsustega [5].

2.3. CMIP6 ansambli loomine temperatuuri projektsioonide analüüsiks

Ansambli koostan ja valin Tartu Ülikooli Rocket superarvutil. Andmete töötlemiseks kasutan JupyterLab andmeanalüüsi ja tarkvaraarenduse keskkonda. Kasutan Python programmeerimiskeelt. Antud töös kasutan kliimamudelite andmeid Amazon'i pilvest. Kõik võimalikud CMIP6 kliimamudelid on leitavad ühes CSV-failis aadressil <https://cmip6-pds.s3.amazonaws.com/pangeo-cmip6.csv>. Kokku oli mudelite erinevaid unikaalseid andmestikke töö kirjutamise ajal 522218 tükki. Sobivate andmestike valimiseks on 10 veergu; lisaks on veerg *z-store*, mis annab lingi Amazon'i pilve, kust pääseb andmetele ligi. Võimalikud tunnused, mille järgi andmeid filtreerida saab, on *activity_id*, *institution_id*, *source_id*, *experiment_id*, *member_id*, *table_id*, *variable_id*, *grid_label*, *dcpp_init_year* ja *version*, mille tähendused on järgnevad [15, 20]. *Activity_id* on mudelit kirjeldav projekti tüüp. *Institution_id* näitab, mis asutuse loodud antud mudel on. *Source_id* on mudelispetsiifiline suurus, mis näitab, mis mudeli andmetega tegu on. *Experiment_id* näitab, mis stsenaariumi kohta antud andmed käivad. *Member_id* on mudelile spetsiifiline suurus. *Table_id* näitab kliimamudelis andmete ajalist sammu. *Variable_id* määrab füüsikalise suuruse, mida mudeli väljundandmestik kirjeldab. *Grid_label* näitab mudeli ruumikoordinaatide tüüpi. *Dcpp_init_year* näitab andmete genereerimisel kasutatud alguse kümnendit, kuid antud töös vaadatavates andmestikes väärtust ei oma. *Version* näitab aega, millal mudel on käivitatud; selle järgi on võimalik vahet teha uuematel ja vanematel andmetel.

Esialgse filtreerimise teen tunnuste *table_id*, *variable_id* ja *grid_label* järgi. Kuna kasutan uurimiseks kuu- ja ööpäevakeskmiseid andmeid, siis valin mudelid, millel *table_id* väärtus on vastavalt “*Amon*” või “*day*”. *Variable_id* väärtuseks valin temperatuuri analüüsiks ainult suuruse “*tas*”, mis on ingliskeelne lühend terminist *surface air temperature* ehk aluspinnalähedane õhutemperatuur. *Grid_label* väärtuseks valin “*gr*”, mis tähendab, et ruumiandmed on mudeli koostava grupi poolt interpoleeritud ühetaolisele pikkus-laiuskraadi võrgustikule.

Järele jäänud andmestikest valin välja vaid sellised, millel on olemas stsenaariumid SSP245, SSP585 ja ajaloolised andmed. Lõpuks võtan iga sellisel mudelil viimase saada oleva versiooni. CSV-failist sobivate andmete filtreerimiseks kasutan Pythoni teeki *pandas*.

Selliste filtrite korral jääb kuu keskmistatud andmete puhul alles 13 ja päevaste andmete puhul 9 mudelit. Mudeli väljunditele viitavad lingid lisan ühte listi ja laen Jupyteri arvutuskeskkonda Pythoni teegiga *xarray*. *Xarray* kasutamiseks peavad erinevatel andmehulkadel ruumi- ja ajakoordinaadid omavahel kattuma. Seetõttu on vaja andmed enne sisse lugemist interpoleerida samadele ruumikoordinaatidele. Selle jaoks defineerin uue koordinaatruudustiku sammuga 1 kraad. Interpoleerin ruumiandmed igal mudelil sellele võrgustikule. Lisaks kasutavad erinevad mudelid erinevaid ajaformaate. Teisendan kõik standardsesse *NumPy* teegi *datetime64* formaati. Seejärel laen kõik andmed sisse ja lisan *xarray*-sse täiendava koordinaadi selle kohta, mitmenda mudeliga tegu on. Peale kõikide andmete sisse lugemist lõikan ruumiandmetest lõigu, mis vastab Eesti alale, ja vabanen lisatud koordinaatidest keskmistades kõikide mudelite tulemused. Aegrea uurimise korral vabanen ka ruumikoordinaatidest, jättes alles vaid keskmise temperatuuri Eestis.

3. Tulemused ja arutelu

Tulemuste peatükis vaatan temperatuuri muutuseid Eesti alal, kus Eesti ala on defineeritud kui laiuskraadide N57,5 kuni N59,7 ja pikkuskraadide E21,7 kuni E28,2 vaheline ala. See ala katab enamuse Eesti mandriosast ja 3 suuremat saart (vt. Lisa 1). Töös viitangi sellele alale kui Eestile. Kaardile kuvades kasutan suuremat ala, et oleks paremini näha ka Eesti ääreala. Kõigil joongraafikutel on kujutatud sinisega ajalooliseid andmeid, rohelisega stsenaariumi SSP245 ja punasega stsenaariumi SSP585 andmeid.

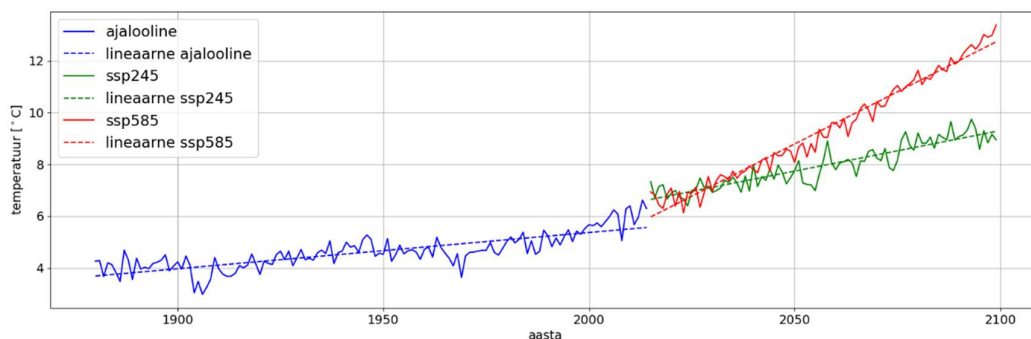
3.1. Keskmise temperatuuri muutus Eestis

Et saada lihtsat ettekujutust kliimamuutuse kohta, on kõige lihtsam vaadelda keskmise temperatuuri tõusu. Ekstreemsete temperatuuride tõusu võrdlen keskmise temperatuuri tõusuga. Eesti keskmise temperatuuri muutuste analüüsiks kasutasin CMIP6 kuukeskmiseid andmeid.

3.1.1. Aasta keskmise temperatuuri tõus

Keskmistan kuukeskmised andmed sama aasta lõikes ja vaatan järgnevalt aastakeskmiseid temperatuure. Jooniselt 1 on näha, et keskmine temperatuur on hakanud tõusma juba ajalooliste andmete puhul. Seda näitab sinise joone tõus viimastel kümnenditel; samuti tõuseb ka lineaarse trendi joon. Lisaks on näha, et mõlema emissioonistsenaariumi korral tõuseb keskmine temperatuur ajas üha kõrgemale. Stsenaariumi SSP245 kohaselt võib aasta keskmine temperatuur võrreldes aastaga 2015 tõusta sajandi lõpuks 2 kraadi ning võrreldes tööstusrevolutsioonieelse ajaga 5 kraadi võrra. Nagu eelnevalt mainitud, nõuab see stsenaarium fossiilsete kütuste tarbimise vähendamist. Seega on ka näha, et temperatuuri tõusu aeglustumine toimub 21. sajandi teises pooles. Stsenaariumi SSP585 puhul on temperatuuri tõus alguses sarnane SSP245 omaga, kuid kuna fossiilsete kütuste tarbimist ei piirata, siis tõuseb temperatuur sajandi teises pooles üha edasi. Aasata keskmine temperatuur jõuaks sajandi lõpuks umbes 13 kraadini, mis on 7-kraadine tõus 2015. aastast ja 9-kraadine tõus 1880. aastast. See näitab, et Eesti alal on temperatuuri muutus ligikaudu 1,5 korda suurem kui globaalne keskmine, mis on 3 kraadi SSP245 ja 6 kraadi SSP585 korral [14]. See on tingitud Eesti geograafilisest asendist suhteliselt kõrgel laiuskraadil.

Samuti on graafikutelt näha, et heitkoguste piiramisest tulenevad muudatused hakkavad olulisemalt mõjuma pärast aastat 2050. Selle ajani on SSP245 ja SSP585 prognooside erinevus väiksem.



Joonis 1. Eesti ala aasta keskmine temperatuur ajalooliste heiteandmete ning emissioonistsenaariumide SSP245 ja SSP585 korral koos lineaarsete trendidega.

3.1.2. Temperatuuri tõusu geograafiline jaotus

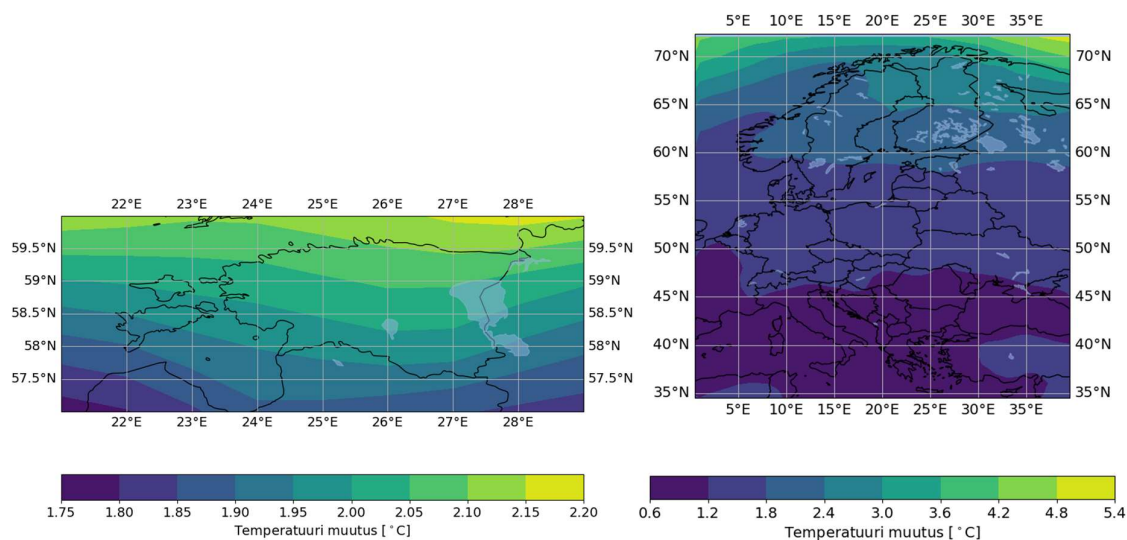
Järgnevalt analüüsin, kuidas erineb keskmise temperatuuri muutus Eestis ning Eesti lähiumbruses piirkonniti ning kuidas see erineb lähiumbruse riikidest (Joonised 2-4). Ajaloolistest andmetest on näha, et enim on soojenenud põhjapoolsed alad. See on tingitud Arktika kiiremast soojenemisest. Siinkohal on oluline märkida, et mudelite horisontaalne võrgusamm on umbes 0,9 kraadi ehk umbes 100 km põhja-lõuna suunas. Seetõttu ei ole võimalik täpselt hinnata ümbrusest erineva mikrokliimaga alade nagu Haanja või Otepää kõrgustike temperatuurimuutuseid.

Sarnaselt eelmises peatükis vaadatud graafikule (Joonis 1) on siingi näha ligi 2-kraadist temperatuuritõusu (Joonis 2a). Kõige vähem on keskmine temperatuur tõusnud Saaremaa lõunaosas ja Kagu-Eestis. Nendes kohtades on keskmine temperatuur tõusnud 1,85°C kuni 1,95°C võrra. Kõige enam, 2,05°C kuni 2,10°C võrra, on keskmine temperatuur tõusnud Põhja-Eestis; Lääne-Virumaa mereäärsetel aladel isegi üle 2,10°C. Võrdluses Euroopa ajalooliste keskmiste temperatuuride graafikuga (Joonis 2b) on näha, et üldiselt on Ida-Euroopas sarnased trendid Eestiga. Enim on tõusnud keskmine temperatuur põhjapoolsetel aladel.

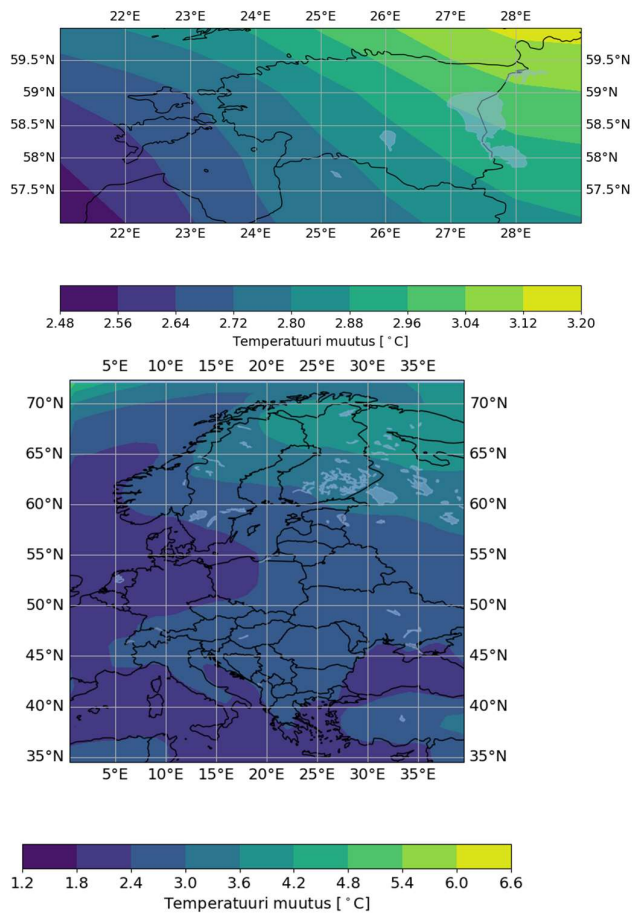
Tulevikuprognosides on mõlema vaadeldava stsenaariumi korral näha, et tekib Ida-Lääne suunaline gradient temperatuuritõusus (Joonised 3a ja 4a). Mõlema vaadeldava

emissioonistsenaariumi korral tõuseb temperatuur enim Kirde-Eestis ja kõige vähem Lääne-Eesti saartel. Stsenaariumi SSP585 korral tõuseb keskmine temperatuur Kirde-Eestis 7,4°C kuni 7,6°C ja Lääne-Eesti saartel 6,6°C kuni 6,8°C võrra, Saaremaa edelaosas isegi alla 6,6°C. See on 0,8-kraadine keskmise temperatuuri muutuse erinevus Eesti-siseselt. Stsenaariumi SSP245 korral tõuseb keskmine temperatuur Kirde-Eestis 3,04°C kuni 3,12°C ja Lääne-Eesti saartel 2,64°C kuni 2,72°C võrra, Saaremaa edelaosas isegi alla 2,64°C. See on 0,4-kraadine keskmise temperatuuri muutuse erinevus Eesti-siseselt.

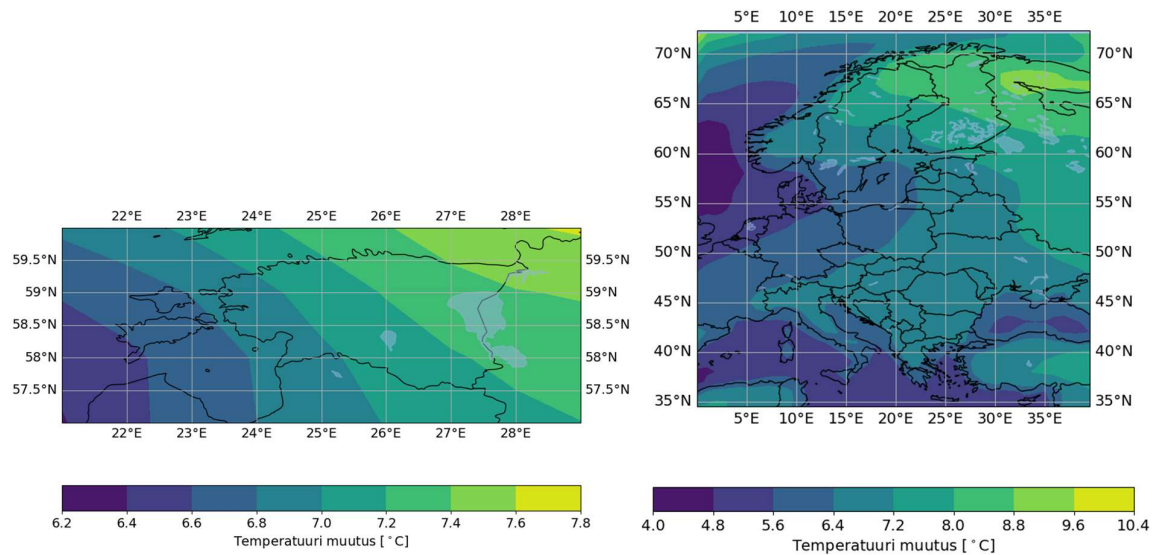
Eesti keskmise temperatuuri muutus ei erine tulevikus oluliselt ümbruskonna keskmise temperatuuri muutusest kummagi vaadeldava stsenaariumi korral (Joonised 3b ja 4b). Nii emissioonistsenaariumi SSP245 kui ka SSP585 korral soojeneb enim Põhja-Euroopa, eriti Valge mere ümbrus. Mõlema stsenaariumi korral soojeneb Eestist põhja pool temperatuur Eestist kiiremini, kuid Stsenaariumi SSP585 korral on näha ka, et temperatuur soojeneb Eestist kiiremini Eestist ida pool. Mõlema stsenaariumi korral on ka näha, et Euroopa mandriala soojeneb kiiremini merealast, mis ajalooliste andmete korral nii selgelt veel ei väljendu (Joonis 2b). Erinevalt ajaloolistest andmetest (Joonis 2b), soojeneb Põhja-Jäämeri mõlema emissioonistsenaariumi puhul vähem kui Skandinaavia põhjaosa mandriala (Joonised 3b ja 4b). See on tõenäoliselt tingitud maismaa kiiremast soojenemisest võrreldes ookeaniga [21].



Joonis 2. Temperatuuri muutus aastatel 1880 kuni 2015 lineaarse trendi järgi ajalooliste heiteandmete põhjal (a) Eestis ja (b) Ida-Euroopas.



Joonis 3. Temperatuuri muutus aastatel 2015 kuni 2100 lineaarse trendi järgi emissioonistsenaariumi SSP245 korral (a) Eestis ja (b) Ida-Euroopas.



Joonis 3. Temperatuuri muutus aastatel 2015 kuni 2100 lineaarse trendi järgi emissioonistsenaariumi SSP585 korral (a) Eestis ja (b) Ida-Euroopas.

3.2. Temperatuuri muutus kuude lõikes

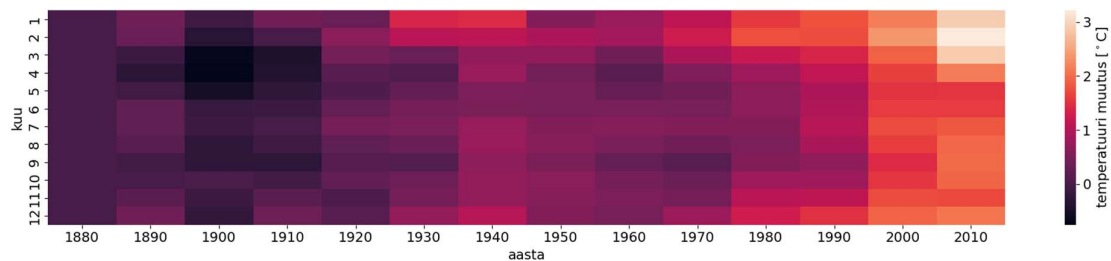
Peatükk vastab uurimisküsimusele, millistel kuudel muutub temperatuur enim ja kuidas. Eelnevalt vaatasin kuukeskmiseid andmeid keskmistatuna aasta keskmisteks andmeteks ning kirjeldasin keskmise temperatuuri muutuseid Eestis ja selle lähiümbruses. Nüüd vaatan neid samu kuukeskmiseid andmeid algsel kujul. Võrdlus toimub iga mudeli puhul selle mudeli projektsiooni esimese kümnendiga, ajalooliste andmete puhul kasutan keskmise temperatuuri muutust aastate 1880-1890 keskmisest temperatuurist. SSP245 ja SSP585 stsenaariumide graafikute korral võrdlen keskmise temperatuuri muutust sajandi lõpuks võrreldes aastate 2015-2025 kuude keskmiste temperatuuridega.

Ajalooliselt on temperatuur tõusnud enim talvekuudel, eriti silmapaistev temperatuuri suurenemine on toimunud veebruaris. Veebruar on ainuke kuu, mille keskmine temperatuur on tõusnud üle 3°C võrra. Sama aja jooksul, nagu ka eelmises peatükis kirjeldasin, on aasta keskmine temperatuur tõusnud 2°C võrra (Joonis 1). Hiliskevadine ja varasügisene temperatuur on tõusnud kõige vähem ehk ligikaudu 1,5°C võrra. Viimasel 50 aastal on näha, et kõige vähem soojenenud kuud on aprill, mai, juuni, august, september ja oktoober. Nendel kuudel on temperatuuri muutus olnud vähemalt poole kraadi võrra väiksem kui veebruaris (Joonis 5).

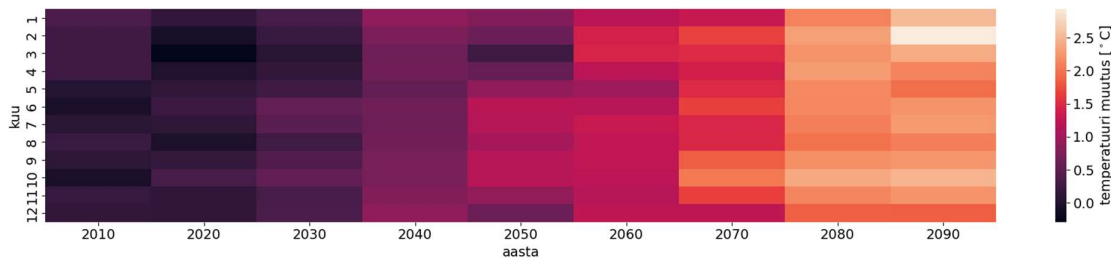
Tulevikustsenaariumite korral on sarnaselt ajaloolistele andmetele näha, et kõige kiiremini soojenevad talvekuud ja kõige aeglasemalt hiliskevad ja hilissügis. Kõige rohkem soojeneb SSP245 korral veebruar ja SSP585 korral jaanuar. Alates 2060. aastatest on näha, et temperatuur tõuseb kiiremini talvekuudel. Lisaks tõuseb temperatuur SSP585 stsenaariumi korral kiiremini oktoobris ja selle lähikuudel. (Joonised 6 ja 7).

SSP245 stsenaariumi korral on 2060. aastateks on kõik kuud soojenenud 1,2°C kuni 1,8°C võrra. Sajandi viimaseks kümnendiks on suvekuudel temperatuur tõusnud ligikaudu 1,5°C kuni 2°C ja talvekuudel ning oktoobris isegi 2,5°C kuni 3°C võrra (Joonis 6). Stsenaariumi SSP585 puhul on alates 2050. aastatest soojenenud kõige rohkem talved, eriti jaanuar. Kõige vähem soojenevad mai, juuni ja juuli. SSP585 korral on 2060. aastateks temperatuur tõusnud keskmiselt 3°C kuni 4°C ja 2090. aastateks 5°C kuni 7°C võrreldes aastatega 2015-2025 (Joonis 7). Samuti soojeneb kiiresti september, mis vihjab suve pikenemisele sügisesse. See võib suurendada kahjurite arvukust Eestis, näiteks võib selle tulemusel kuuseürask anda suve jooksul rohkem pesakondi [22].

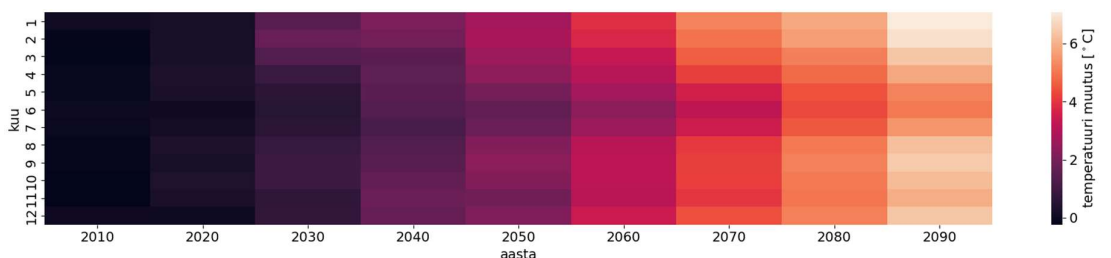
Nii ajalooliste andmete kui ka mõlema tulevikustsenaariumi korral on näha, et kõige kiiremini soojenevad talvekuud ja kõige aeglasemalt suvekuud (Joonised 5, 6 ja 7). Seetõttu väheneb Eesti talvine elektritarbimine ja läheneb suvisele tarbimisele. See on oluline sisend Eesti elektritootmisvõimekuse planeerimisel, kuna soojendamise vajaduse vähenedes ei ole enam tarvis nii suurt võimsust talvekuudel. Samas tõuseb suvekuudel elektritarbimine jahutamise eesmärgil. Sellest tulenevalt tõuseb ka päiksepaneelide kasulikkus, kuna need toodavad Eestis elektrit enim just suvekuudel ja vähem talvekuudel.



Joonis 4. Temperatuuri muutus kuude lõikes aastaks 2015 võrdluses 1880-1890 aastate keskmisega.



Joonis 5. Temperatuuri muutus kuude lõikes aastaks 2100 võrdluses 2015-2025 aastate keskmisega emissioonistsenaariumi SSP245 järgi.



Joonis 6. Temperatuuri muutus kuude lõikes aastaks 2100 võrdluses 2015-2025 aastate keskmisega emissioonistsenaariumi SSP585 järgi.

3.3. Päevased andmed

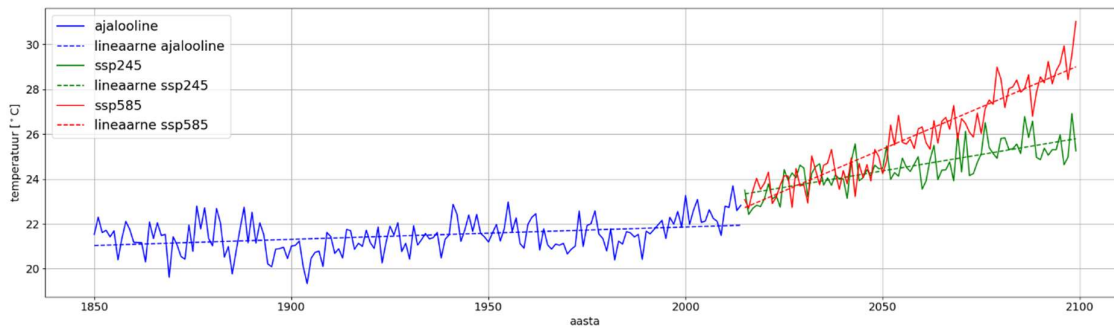
Ööpäevaste temperatuuride andmetena kasutan CMIP6 selliseid andmeid, millel on täidetud järgnevad tingimused. Esiteks peavad olema olemas ajaloolised ning tulevikustsenaariumide

SSP245 ja SSP585 andmed. Teiseks peab andmete ajaline samm olema 1 päev. Kolmandaks peab olema muutujana olemas *tas* ehk õhutemperatuur maapinna lähedal. Neljandaks peab olema võrgustiku tüüp *gr* ehk *regrided*, mida on eelnevalt seletatud ansambli loomise peatükis. Mudeleid, mis kõiki neid nelja tingimust täitsid, oli 9 tükki.

3.3.1. Ööpäeva keskmiste temperatuuride maksimumid Eesti alal

Võtan mudelitest Eesti alal paiknevad punktid ja jätan alles vaid iga mudeli iga aasta kõrgeima ööpäeva keskmise temperatuuri. Seejärel võtan iga aasta jaoks kõigi mudelite keskmise. Joonisel 8 on kuvatud aasta maksimaalne ööpäeva keskmine temperatuur. Ajalooliste andmete järgi on viimasel 160 aastal püsinud kõige soojema ööpäeva keskmine temperatuur 21°C ja 22°C vahel. Lineaarse trendi järgi tõuseb kõige soojema ööpäeva keskmine temperatuur SSP245 stsenaariumi järgi sajandi lõpuks temperatuurini 25,5°C. See on ligi 2-kraadine tõus käimasolevast kümnendist ja 4-kraadine tõus tööstusrevolutsioonieelsest ajast. Joonise 8 põhjal võib stsenaariumi SSP585 korral keskmine ööpäevane maksimumtemperatuur tõusta temperatuurini 29°C. See on ligi 6-kraadine tõus käimasolevast kümnendist ja 8-kraadine tõus tööstusrevolutsioonieelsest ajast. Keskmiste temperatuurimuutuste graafikult (Joonis 1) nägime mõlema stsenaariumi korral veidi suuremat keskmist muutust: SSP245 korral üle 2°C ja SSP585 korral 7°C võrreldes käimasoleva kümnendiga. See on kooskõlas eelnevatelt tehtud järeldustega, et suvekuudel on temperatuuri tõus kõige väiksem. Seega järeldub andmetest, et suve maksimaalne temperatuur tõuseb vähem aasta keskmisest.

Kuna antud algoritmiga vaatan mitme mudeli maksimaalse temperatuuri keskmist, siis ligikaudu pooltel aastatel peaks olema maksimaalne temperatuur sellest veelgi soojem. Seega on SSP245 stsenaariumi korral tõenäoline jõuda üle 25-kraadiste ööpäevakeskmiste temperatuuride esinemiseni mõnedel aastatel juba enne 2050. aastat ja sajandi lõpuks veelgi soojemate temperatuurideni.



Joonis 7. Aasta maksimaalne ööpäevakeskmine temperatuur Eestis koos lineaarsete trendidega.

3.3.2. Kõrge temperatuuriga päevade arv aastas Eesti alal

Lisaks maksimaalsele temperatuurile on inimestele oluline ka see, kui sageli esineb kuumi päevi. Kui kuumalainete pikkus ja sagedus kasvab, on vaja vastavalt muuta ehitiste arhitektuuri ja sisustust. Inimeste tervisele ohutu keskkonna tagamiseks oleks temperatuuri tõusmisel üle teatud piiri vaja hoonetele lisada konditsioneer. Samuti võib olla otstarbekas vältida otse lõunasse suunatud aknaid. Kuumalained mõjutavad oluliselt ka teisi valdkondi, nagu põllumajandus jm.

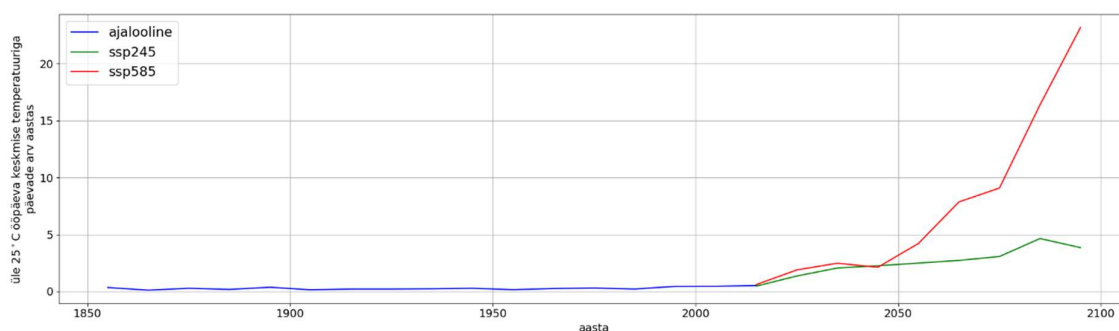
Graafikute 9 ja 10 juures on oluline märkida, et antud töös käsitlen Eestina ka mereala, seega võib sisemaal olla veelgi soojem temperatuur. Lisaks tähendab ööpäeva keskmine temperatuur, et päeval võib olla temperatuur oluliselt soojem.

Vaatan üle 25 ja üle 30 kraadise ööpäeva keskmise temperatuuriga päevade arvu aastas. Leidsin selliste päevade arvu iga mudeli jaoks igal aastal ja võtsin tulemuste keskmise iga kümnendi kohta. Joonistel 9 ja 10 on kujutatud kümnendi keskmine selliste päevade arv vastava kümnendi 5. aastal. Joonise 9 põhjal on üle 25 kraadise temperatuuriga päevi ajalooliselt pidevalt olnud keskmiselt alla 1 aastas, kuid mõlema tulevikustsenaariumi korral näeme selliste päevade arvu tõusu üle 1 juba käimasoleval kümnendil. Erinevus stsenaariumide SSP245 ja SSP585 vahel on sajandi esimesel poolel peaaegu olematu, kuid 2050. aastaks jõuab üle 25 kraadiste päevade arv stsenaariumi SSP585 järgi neljani, mis on stsenaariumi SSP245 sajandi lõpu prognoos. Stsenaariumi SSP585 järgi on sajandi lõpuks üle 25 kraadiseid päevi üle 20, mis on peaaegu veerand kõigist suvepäevadest (Joonis 9).

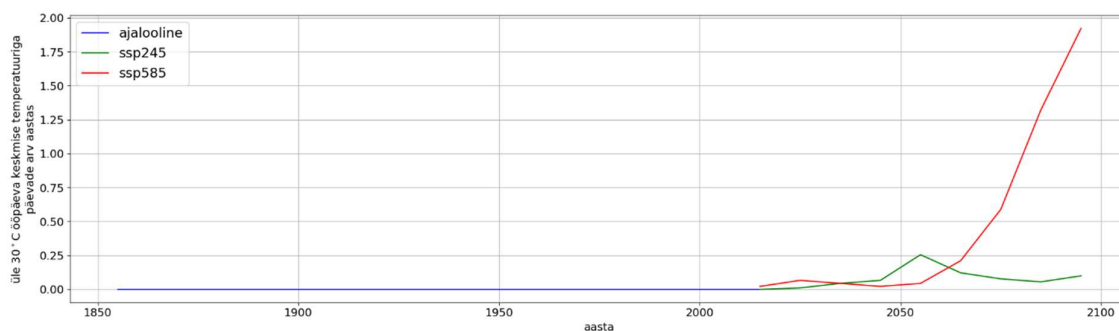
Jooniste 9 ja 10 põhjal on üle 25°C ja üle 30°C ööpäeva keskmise temperatuuriga päevade suhteline jaotus kümnendite lõikes sarnased. Sellise ööpäeva keskmise temperatuuri korral võib

päevane temperatuur kohati ületada 40 kraadi. Ajalooliselt pole üle 30 kraadise ööpäeva keskmise temperatuuriga päevi Eestis olnud, kuid stsenaariumi SSP585 järgi on näha antud sajandil eksponentsiaalset kasvu selliste päevade arvus. Alates 2060. aastast võib olla selliseid päevi igal viiendal aastal ja sajandi viimasel kahel kümnendil esineb neid juba keskmiselt üle ühe korra aastas. Seevastu stsenaariumi SSP245 järgi ei tohiks neid kogu sajandi vältel esineda rohkem kui üks kord 10 aasta jooksul (Joonis 10).

Väga kuumade päevade arv Eestis tõuseb nii optimistlikuma kui pessimistlikuma stsenaariumi korral. Mõlemal juhul peavad Eesti arhitektuuristandardid tõenäoliselt muutuma, et vähendada suvel liigse soojuse tупpa tulemist ning sellest tulenevat ruumide ülekuumenemist. Samuti tuleks ilmselt rekonstrueerida vanemaid kortermaju, et need ei muutuks suvel elamiskõlbmatuteks. Lisaks tuleks paigaldada konditsioneerid ja vajadusel muuta hoonete soojustusmaterjale, et vältida majade sisepindadele kondensatsioonivee teket.



Joonis 8. Üle 25°C ööpäeva keskmise temperatuuriga päevade arv aastas Eestis kümnendite kaupa.

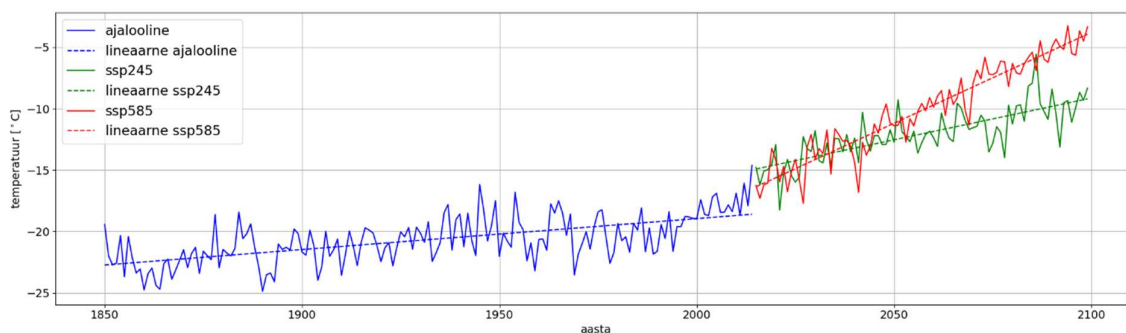


Joonis 9. Üle 30°C ööpäeva keskmise temperatuuriga päevade arv aastas Eestis kümnendite kaupa.

3.3.3. Ööpäevaste temperatuuride miinimumid Eestis

Nägime eelnevalt, et enim tõusevad Eestis just talvised temperatuurid. Seega ilmselt tõuseb ka talvine miinimumtemperatuur rohkem kui keskmine temperatuur. Talvised miinimumtemperatuurid on viimastel kümnenditel juba tugevalt tõusnud, nagu näha alloleval graafikul (Joonis 11). Ajalooliste andmete lineaarse trendi järgi on talvine miinimumtemperatuur tõusnud temperatuurilt $-22,5^{\circ}\text{C}$ temperatuurini -19°C aastaks 2015. Kiireneva temperatuurimuutuse tõttu on selle sajandi alguses aastane ööpäevakeskmine miinimumtemperatuur olnud aga sellest tulemusest veelgi kõrgem, keskmiselt $-17,5^{\circ}\text{C}$. Tulevikustsenaariumid näitavad samuti kiiremat minimaalsete ööpäevaste temperatuuride tõusu võrreldes aasta keskmise temperatuuri tõusuga. Sarnaselt eelmistele graafikutele on näha, et 2050. aastani püsivad mõlema stsenaariumi minimaalsed temperatuurid sarnased ja suuremad muutused tulevad esile sajandi teises pooles (Joonis 11).

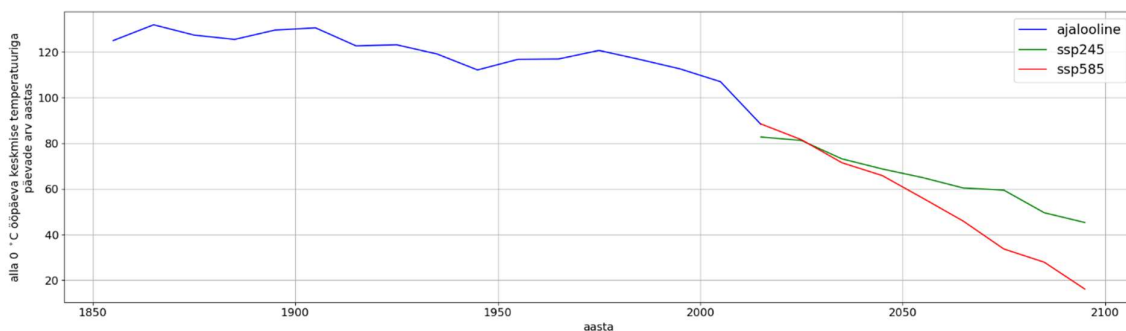
Emissioonistsenaariumi SSP245 kohaselt tõuseb aasta ööpäevakeskmine miinimumtemperatuur 2015. aastast 2100. aastaks temperatuurilt -16°C temperatuurini -11°C , mis on 5-kraadine tõus. Samal perioodil tõuseb stsenaariumi SSP585 kohaselt ööpäevakeskmine miinimumtemperatuur temperatuurilt -17°C temperatuurini -6°C , mis on 11-kraadine tõus. Samal vahemikul on nende stsenaariumide aastase keskmise temperatuuri tõus vastavalt 2°C ja 7°C (Joonis 1), talvekuude keskmiste temperatuuride tõus vastavalt 3°C ja 8°C (Joonised 6 ja 7) ning suviste maksimaalsete ööpäeva keskmiste temperatuuride tõus vastavalt 2°C ja 6°C (Joonised 6 ja 7). Seega lisaks sellele, et talvekuude keskmine temperatuur soojeneb kiiremini aasta keskmisest temperatuurist, soojenevad talvised minimaalsed temperatuurid veelgi kiiremini. See on kooskõlas varasemate teadmistega, et enim muutub talviste külmade päevade temperatuur [23]. Emissioonistsenaariumi SSP585 korral ei oleks sama lineaarse trendi jätkudes ka peale 21. sajandi lõppu 2150. aastateks Eestis enam alla 0°C keskmise õhutemperatuuriga päevi (Joonis 11).



Joonis 10. Aasta minimaalne ööpäeva keskmine temperatuur Eestis koos lineaarsete trendidega.

3.3.4. Alla 0°C temperatuuriga päevade arv aastas Eestis

Ajalooliselt on püsinud alla 0°C keskmise temperatuuriga päevade arv igal kümnendil stabiilselt 110 ja 130 vahel aastas kuni 1990. aastateni. Sellest ajast on toimunud märgatav langus alla 0°C keskmise temperatuuriga päevade arvus. Aastatel 2010-2015 on neid juba alla 90 aastas, mis on üle 20% langust võrreldes 19. sajandi teise poolega. Stsenaariumi SSP245 korral on oodata miinuskraadidega päevade arvu langust alla 70 2050. aastateks ja alla 50 sajandi lõpuks. See on üle 50% langus aasta keskmises alla 0°C keskmise temperatuuriga päevade arvus võrreldes 19. sajandi teise poolega. Stsenaariumi SSP585 kohaselt on alla 0°C keskmise temperatuuriga päevade arv 2050. aastateni SSP245 stsenaariumi tulemustega sarnane, kuid sajandi lõpuks jääb alles alla 20 päeva aastas. See on 85% langus aasta keskmises alla 0°C keskmise temperatuuriga päevade arvus võrreldes 19. sajandi teise poolega (Joonis 12).



Joonis 11. Alla 0°C ööpäeva keskmise temperatuuriga päevade arv aastas Eestis kümnendite kaupa.

4. Kokkuvõte

Töös analüüsisin Eesti kliima muutust. Töö eesmärk oli kirjeldada 21. sajandi jooksul Eestis esineda võivaid ekstreemseid temperatuure. Kasutasin CMIP6 projekti raames arvatud globaalsete kliimamudelite andmeid, mille põhjal analüüsisin õhutemperatuuri maapinna lähedal. Andmeid töötlesin Tartu Ülikooli Rocket superarvutil programmeerimiskeeles Python. Võrdlesin 2 erinevat globaalset emissioonistsenaariumi, SSP245 ja SSP585. SSP245 on optimistlikum stsenaarium, mille kohaselt minnakse järjest enam üle taastuvenergia allikatele ja piiratakse kasvuhoonegaaside õhku paiskamist. SSP585 on pessimistlikum stsenaarium, mille kohaselt taastuvenergia lahendusi ei arendata ja kasvuhoonegaaside õhku paiskamine kiireneb koos rahvastiku kasvu ja energiavajaduse suurenemisega.

CMIP6 andmed on igati sobilikud, et analüüsida Eesti tulevikkliima temperatuurimuutuseid, sest nende võrgusamm on ligikaudu 100 km, mis on väiksem Eesti gabariitmõõtmetest. Eesti temperatuur tõuseb globaalsest keskmisest kiiremini ja eriti kiiret temperatuuritõusu on oodata talvekuudel. Hetkel on Eesti keskmine temperatuur juba tõusnud 2°C võrra, võrreldes tööstusrevolutsioonieelse ajaga. Olenevalt ülemaailmsete inimtekkeliste kasvuhoonegaaside heitkogustest võib keskmine temperatuur Eestis aasta lõikes tõusta sajandi lõpuks veel 2°C kuni 7°C võrra, võrreldes 2015. aasta seisuga. Suvekuudel on oodata väiksemat temperatuuritõusu, 1,5°C kuni 6°C, ning talvekuudel suuremat, 3°C kuni 7°C. Kõige kiiremat temperatuuritõusu on nii SSP245 kui SSP845 korral oodata Kirde-Eestis, kõige aeglasemat Lääne-Eesti saartel. Erinevus kahe piirkonna vahel võib jääda vahemiku 0,4°C kuni 0,8°C.

Suvel kasvab oluliselt kuumalainete oht: üle 25°C ööpäevakeskmise temperatuuriga päevade arv mitmekordistub, võrreldes ajalooliste andmetega aastatest 1850-2015. Ajalooliselt on selliseid päevi olnud stabiilselt keskmiselt alla 1 korra aastas, kuid stsenaariumi SSP245 korral võib neid sajandi lõpuks olla aastas üle 4 ja stsenaariumi SSP585 korral üle 20. Lisaks väheneb oluliselt talviste külmalainete oht. Sajandi lõpuks on mõlema stsenaariumi korral oodata, et aasta külmimatel ööpäevadel ei ole keskmine temperatuur madalam kui -10°C. Ajalooliselt on aasta külmima ööpäeva keskmine temperatuur olnud keskmiselt alla -20°C. Emissioonistsenaariumi SSP245 korral tõuseb aasta minimaalne ööpäeva keskmine temperatuur võrreldes 2015. aastaga 5°C, SSP585 korral 11°C võrra. Lisaks väheneb negatiivsete ööpäevakeskmiste temperatuuridega päevade arv tööstusrevolutsioonieelse ajaga

võrreldes 40% SSP245 korral ja 60% SSP585 korral. Töö tulemused on olulised Eestis kliimamuutusteks ettevaatavalt valmistumise ehk kliimamuutustega kohanemise seisukohalt.

Kasutatud kirjandus

1. Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change, T.I.A.S. No. 16-1104, (2015) <https://www.state.gov/16-1104/>.
2. IPCC, “Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change“, P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, eds. (Cambridge University Press, Cambridge and New York, 2022), <https://doi.org/10.1017/9781009157926>.
3. C.-F. Schleussner, J. Rogelj, M. Schaeffer, T. Lissner, R. Licker, E. M. Fischer, R. Knutti, A. Levermann, K. Frieler, W. Hare, “Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal“, *Nature Clim Change* **6**, 827–835, (2016) <https://doi.org/10.1038/nclimate3096>.
4. IPCC, “Summary for Policymakers“ in *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, eds. (Cambridge University Press, Cambridge and New York, 2022), <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>.
5. United Nations Environmental Programme, “Emissions Gap Report 2022: The Closing Window — Climate crisis calls for rapid transformation of societies“, (2022) <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2022>
6. IPCC, “Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change“, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama, eds. (Cambridge University Press, Cambridge and New York, 2022), <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
7. A. Luhamaa, A. Kallis, K. Mändla, A. Männik, T. Pedusaar, K. Rosin, “Eesti tuleviku kliimastenaariumid aastani 2100“, (2015) https://www.klab.ee/wp-content/uploads/sites/4/2016/04/2016-04-07-KAUR_Lopparuanne.pdf.

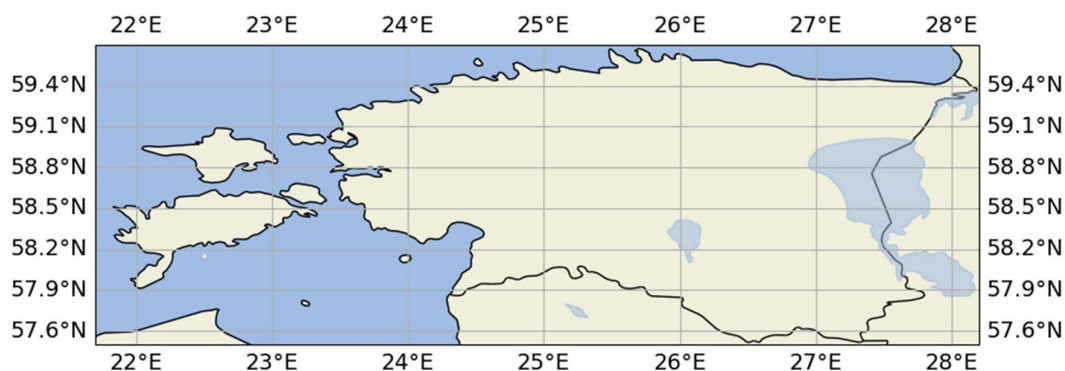
8. IPCC, “Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change“, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou, eds. (Cambridge University Press, Cambridge and New York, 2021), <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
9. R. McSweeney, Z. Hausfather, “How do climate models work?“, (2018) <https://www.carbonbrief.org/qa-how-do-climate-models-work/>.
10. J. H. Shirley, “Solar constant“ in *Encyclopedia of Planetary Science*, J. H. Shirley, R. W. Fairbridge, eds. (Springer, Dordrecht, 1997), pp. 745-746, https://doi.org/10.1007/1-4020-4520-4_370
11. Britannica, The Editors of Encyclopaedia, “Stefan-Boltzmann law“, Encyclopedia Britannica, (2023) <https://www.britannica.com/science/Stefan-Boltzmann-law>.
12. G. Stephens, D. O'Brien, P. Webster, P. Pilewskie, S. Kato, J.-L. Li, “The Albedo of Earth“, *Reviews of Geophysics* **53**, 141-163, (2015) <https://doi.org/10.1002/2014RG000449>.
13. National Centers for Environmental Information, “Annual 2022 Global Climate Report“, (2023) <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213>.
14. C. Tebaldi, K. Debeire, V. Eyring, E. Fischer, J. Fyfe, P. Friedlingstein, R. Knutti, J. Lowe, B. O'Neill, B. Sanderson, D. van Vuuren, K. Riahi, M. Meinshausen, Z. Nicholls, K. B. Tokarska, G. Hurtt, E. Kriegler, J.-F. Lamarque, G. Meehl, R. Moss, S. E. Bauer, O. Boucher, V. Brovkin, Y.-H. Byun, M. Dix, S. Gualdi, H. Guo, J. G. John, S. Kharin, Y. Kim, T. Koshiro, L. Ma, D. Olivié, S. Panickal, F. Qiao, X. Rong, N. Rosenbloom, M. Schupfner, R. Séférian, A. Sellar, T. Semmler, X. Shi, Z. Song, C. Steger, R. Stouffer, N. Swart, K. Tachiiri, Q. Tang, H. Tatebe, A. Voldoire, E. Volodin, K. Wyser, X. Xin, S. Yang, Y. Yu, T. Ziehn. “Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6“, *Earth Syst. Dynam.* **12**, 253–293, (2021) <https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>.
15. V. Eyring, S. Bony, G. A. Meehl, C. A. Senior, B. Stevens, R. J. Stouffer, K. E. Taylor, “Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)

- experimental design and organization“, *Geosci. Model Dev.* **9**, 1937–1958, (2016) <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.
16. M. Meinshausen, S. J. Smith, K. Calvin, J. S. Daniel, M. L. T. Kainuma, J-F. Lamarque, K. Matsumoto, S. A. Montzka, S. C. B. Raper, K. Riahi, A. Thomson, G. J. M. Velders, D.P. P. van Vuuren, “The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300”, *Climatic Change* **109**, 213, (2011) <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>.
 17. G. P. Wayne, „The Beginner’s Guide to Representative Concentration Pathways“, (2013) https://skepticalscience.com/docs/RCP_Guide.pdf
 18. K. Riahi, D. P. van Vuuren, E. Kriegler, J. Edmonds, B. C. O’Neill, S. Fujimori, N. Bauer, K. Calvin, R. Dellink, O. Fricko, W. Lutz, A. Popp, J. C. Cuaresma, K.C. Samir, M. Leimbach, L. Jiang, T. Kram, S. Rao, J. Emmerling, K. Ebi, T. Hasegawa, P. Havlik, F. Humpenöder, L. A. Da Silva, S. Smith, E. Stehfest, V. Bosetti, J. Eom, D. Gernaat, T. Masui, J. Rogelj, J. Strefler, L. Drouet, V. Krey, G. Luderer, M. Harmsen, K. Takahashi, L. Baumstark, J. C. Doelman, M. Kainuma, Z. Klimont, G. Marangoni, H. Lotze-Campen, M. Obersteiner, A. Tabeau, M. Tavoni, “ The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview“, *Global Environmental Change* **42**, 153-168, (2017) <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
 19. B.C. O’Neill, E. Kriegler, K.L. Ebi, E. Kemp-Benedict, K. Riahi, D.S. Rothman, B.J. van Ruijven, D.P. van Vuuren, J. Birkmann, K. Kok, M. Levy, W. Solecki, “The roads ahead: narratives for Shared Socioeconomic Pathways describing world futures in the 21st Century“, *Global Environ. Change*, (2016) <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>.
 20. Pangeo, „Zarr Data Overview“, <https://pangeo-data.github.io/pangeo-cmip6-cloud/overview.html#csv-file-structure>.
 21. S. Manabe, R. J. Stouffer, M. J. Spelman, K. Bryan, “ Transient Responses of a Coupled Ocean–Atmosphere Model to Gradual Changes of Atmospheric CO₂. Part I. Annual Mean Response“, *Journal of Climate* **4**, 8, 785-818, (1991) [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0785:TROACO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0785:TROACO>2.0.CO;2).
 22. K. Õ. Voolma, *Metsakaitse. Metsakahjustused ja nende vältimine* (Maaelu Arengu Instituut, Tartu, 2000), pp. 60.

23. E. Kjellström, "Recent and future signatures of climate change in Europe", *Ambio* **33**, 193–198, (2004) <https://www.jstor.org/stable/4315483>.

Lisad

Lisa 1: Töös defineeritud Eesti ala



Lisa 1. Töös Eesti alana defineeritud geograafiline ala.

Lisa 2: Koodinäited

Kogu kood on nähtaval gitlab'is lingil: https://gitlab.cs.ut.ee/ut-climate-research-centre/climateprojections/student_projects/hanneskuslap_bsc

Näide koodist, millega lugesin Eesti kuukeskmised andmed Amazoni pilvest:

```
data_catalogue = pd.read_csv('https://cmip6-pds.s3.amazonaws.com/pangeo-cmip6.csv')

d_subset = data_catalogue[(data_catalogue['variable_id'] == variable_id) &
    (data_catalogue['experiment_id'].isin(['ssp245', 'ssp585', 'historical'])) &
    (data_catalogue['table_id'] == table_id) &
    (data_catalogue['grid_label'].isin([grid_label]))]# 'gn',

experiments = d_subset.groupby(['institution_id', 'source_id']).nunique() #uusim versioon

exps = experiments[(experiments.experiment_id==3)].reset_index().source_id # valib need, millel
kõik 3 olemas
d_subset = d_subset[(d_subset.source_id.isin(exps.values))]
model_parameters_list = d_subset[['source_id', 'experiment_id', 'version']].groupby(['source_id',
'experiment_id']).max().reset_index().values

#get suitable paths for links
historical_list = []
ssp245_list = []
ssp585_list = []

for parameetrid in model_parameters_list:
    z_path = d_subset[(d_subset['version']==parameetrid[2]) &
```

```

        (d_subset['source_id']==parameetrid[0]) &
        (d_subset['experiment_id']==parameetrid[1])
        ]['zstore'].values[0]
    if parameetrid[1] == 'historical':
        historical_list.append(z_path)
    elif parameetrid[1] == 'ssp245':
        ssp245_list.append(z_path)
    elif parameetrid[1] == 'ssp585':
        ssp585_list.append(z_path)

mitmes = 0
def preprocess(ds):
    try:
        ds = ds.rename({"latitude": "lat", "longitude": "lon"})
    except:
        None
    new_lat = np.linspace(-90, 90, 181) #defines lat values
    new_lon = np.linspace(-180, 180, 361) #defines lon values
    ds = ds.convert_calendar("standard", align_on="date") #erinevate päeva tüüpide muutmise
    ühiseks

    if ds.experiment_id == 'historical':
        new_time = pd.date_range(start=time0, end =time1, freq='MS')#ühise aegrea loomine
    else:
        new_time = pd.date_range(start=time2, end =time3, freq='MS')#ühise aegrea loomine

    global mitmes

    dsi = ds.interp(lat=new_lat, lon=new_lon, time = new_time) #interpoleerib uutele koordinaatidele
    dsi.coords['mitmes'] = [str(mitmes)]
    mitmes+=1
    return dsi

# vali kõik sobivad andmete lingid
ds_final_1 = xr.open_mfdataset([fsspec.get_mapper(historical_list[i], anon=True) for i in
range(len(historical_list))],
    engine='zarr',
    preprocess=preprocess,
    coords='minimal',
    compat='override'
)
ds_final_2 = xr.open_mfdataset( [fsspec.get_mapper(ssp245_list[i], anon=True) for i in
range(len(ssp245_list))],
    engine='zarr',
    preprocess=preprocess,
    coords='minimal',
    compat='override'
)
ds_final_3 = xr.open_mfdataset([fsspec.get_mapper(ssp585_list[i], anon=True) for i in
range(len(ssp585_list))],
    engine='zarr',
    preprocess=preprocess,

```

```
coords='minimal',  
compat='override'  
)
```

```
# vali sobiv piirkond
```

```
ds_final_1_all=ds_final_1.sel(  
lon=slice(lon0, lon1),  
lat=slice(lat0, lat1))
```

```
ds_final_2_all=ds_final_2.sel(  
lon=slice(lon0, lon1),  
lat=slice(lat0, lat1))
```

```
ds_final_3_all=ds_final_3.sel(  
lon=slice(lon0, lon1),  
lat=slice(lat0, lat1))
```

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Hannes Kuslap

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose Eesti tulevikukliima temperatuuriekstreemumid, mille juhendaja on Velle Toll, 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.

Hannes Kuslap

26.05.2023