

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Füüsika instituut

Jass Kaarama

Troopilised ööd Eestis

Bakalaureusetöö (6 EAP)

Füüsika, keemia ja materjaliteaduse õppekava, füüsika eriala.

Juhendaja:

Erko Jakobson, PhD

Tartu 2025

Troopilised ööd Eestis

Käesoleva töö eesmärk oli analüüsida troopiliste ööde sageduse muutust Eestis ajavahemikus 1979–2100, kasutades selleks ERA5-Land järelanalüüsiandmeid ja CMIP6 kliimamudelite andmeid nelja erineva SSP stsenaariumi alusel. Töö käigus valideeriti ERA5-Land andmestiku usaldusväärsust, võrreldes seda meteoroloogiajaamade mõõtmistulemustega Eestis. Analüüs näitas, et ERA5-Land andmestik kirjeldab hästi mõõdetud miinimumtemperatuure. CMIP6 mudelid suudavad kirjeldada miinimumtemperatuuride kliimatrendi, kuid ei suuda arvesse võtta Peipsi järve mõju troopiliste ööde arvule. Prognoosid näitavad, et troopiliste ööde arv kasvab käesoleva sajandi lõpuks oluliselt, eriti kõrgete heitestsenaariumite korral. Töö tulemustel on praktiline väärtus kohanemismeetmete ja kliimapoliitika kavandamisel Eestis.

Märksõnad: troopilised ööd, ERA5-Land, CMIP6

Tropical nights in Estonia

The aim of this thesis was to analyze the change in the frequency of tropical nights in Estonia between 1979 and 2100, using ERA5-Land reanalysis data and CMIP6 climate model outputs under four different SSP scenarios. The reliability of ERA5-Land data was validated through comparison with ground-based meteorological station observations. The analysis showed that ERA5-Land closely follows the measured minimum temperatures. While CMIP6 models effectively describe the overall climate trend, they tend to underestimate the number of tropical nights, especially near Lake Peipus. Projections indicate a significant increase in tropical nights by the end of the century, particularly under high-emission scenarios. These findings provide valuable insight for future climate adaptation planning and policy development in Estonia.

Keywords: tropical nights, ERA5-Land, CMIP6

CERCS: P500 Geofüüsika, füüsikaline okeanograafia, meteoroloogia/ Geophysics, physical oceanography, meteorology

Sisukord

1	Kasutatud lühendid.....	4
2	Sissejuhatus	5
3	Teoreetiline taust.....	6
3.1	Troopiliste ööde mõju.....	6
4	Andmed ja meetodika	8
4.1	ERA5-Land andmestik	8
4.2	Kliimamudelite võrdlusprojekti CMIP6 andmestik	9
4.3	Jagatud sotsiaalmajanduslikud rajad SSP.....	10
5	Tulemused	12
5.1	ERA5-Land andmestiku võrdlus maapealsete jaamadega.....	12
5.2	CMIP6 andmestiku võrdlus ERA5-Land andmestikuga	15
5.3	CMIP6 andmestiku prognoos	18
6	Arutelu.....	20
7	Kokkuvõte	21
8	Tänu.....	22
9	Kasutatud kirjandus.....	23
10	Lisa	25

1 Kasutatud lühendid

SSP	Jagatud sotsiaalmajanduslikud rajad (<i>Shared Socioeconomic Pathways</i>)
CMIP	Kliimamudelite võrdlusprojekt (<i>Climate Model Intercomparison Project</i>)
WCRP	Maailma Kliimauuringute Programm (<i>World Climate Research Program</i>)
ECMWF	Euroopa Keskuse Keskpika Ilmaprognooside Keskus (<i>European Centre of Medium-Range Weather Forecasts</i>)
GCM	standardiseeritud globaalne tsirkulatsioonimudel (<i>coupled Global Circulation Model</i>)
MJ	Meteoroloogiajaam
HJ	Hüdromeetria jaam

2 Sissejuhatus

Kliimamuutused on üks 21. sajandil suurimaid väljakutseid, mille mõju ulatub üle kogu maailma, see mõjutab inimesi, loodust ja majandussektoreid. Globaalse kliimasoojenemise mõjud on ilmsed, kuid need varieeruvad oluliselt piirkondade ja riikide vahel. Viimastel aastatel on saanud üha suuremat tähelepanu pälvinud troopiliste ööde ja kuumalainete sagenemine. Troopilised ööd, kus õhutemperatuur ei lange ööpäeva jooksul alla 20 °C [1], häirivadund, suurendavad terviseriske ja võivad mõjutada looduslikke süsteeme ning majandussektoreid, eriti põllumajandust ja tervishoidu. Parasvöötme riikides nagu Eesti, kus troopilised ööd on seni olnud harvad, võib nende sagenemine osutada üheks selgemaks märgiks kliima muutumisest.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on analüüsida troopiliste ööde sageduse muutust Eestis ajavahemikus 1979–2100, kasutades selleks kõrglahutusega järelanalüüsimudelit ERA5-Land ja CMIP6 kliimamudeleid koos erinevate tulevikustsenaariumitega (SSP). Töös pööratakse erilist tähelepanu Eesti kliimat oluliselt mõjutavatele geograafilistele teguritele, näiteks Peipsi järve mõjule ning hinnatakse, kui hästi suudavad globaalsed mudelid kajastada kohalikke iseärasusi, mis võivad väikese territooriumiga riikides olla väga olulised.

Töös võrreldakse CMIP6 kliimamudelite prognoose ERA5-Land andmetega, et hinnata nende täpsust ja sobivust Eesti piirkondliku kliima hindamiseks. Analüüs hõlmab nii ajaloolist perioodi kui ka erinevaid tulevikustsenaariume, keskendudes aastatele 1979–2100. Võrdlus võimaldab uurida troopiliste ööde ajaloolist arengut ja prognoosida nende võimalikke muutusi tulevikus.

Töö tulemused aitavad paremini mõista, kuidas kliimamuutused võivad mõjutada öiseid temperatuurimustreid Eestis ning milliseid järeldusi saab teha olemasolevate mudelite põhjal. Tulemused aitavad avastada kliimamuutuste kohalikke mõjusid, mis võivad eri piirkondades olla väga erinevad.

3 Teoreetiline taust

Eestis on alates 1970. aastatest täheldatud märkimisväärset õhutemperatuuri tõusu. Alates 20. sajandi keskpaigast on temperatuur Eestis tõusnud kiiremini kui maailmas keskmiselt. Seniste prognooside kohaselt võib Eesti aastane keskmine õhutemperatuur tõusta 21. sajandi lõpuks 2 kuni 4 °C võrra, sõltuvalt kasvuhoonegaaside heitkoguste edasisest arengust. [2]

Varasemates uuringutes on Tallinnas analüüsitud kuumalaineid ja linnalise soojusaare efekti. Kuigi Tallinn on rahvusvaheliselt suhteliselt roherikas linn, on seal täheldatud ulatuslikku soojusaare efekti, mis muutub eriti märgatavaks kuumalainete ajal. Uuringud näitavad, et soojusaarte ulatus on laialdasem kui varasemalt hinnatud ning sarnast nähtust võib esineda ka teistes tiheda asustusega piirkondades Eestis. [3]

Globaalsel soojenemisel üheks indikaatoriks on ööpäevase miinimumtemperatuuri tõus, kuna see muutus on sageli märgatavam kui maksimumtemperatuuri muutus [2]. Troopilisteks öödeks loetakse öid, mil minimaalne õhutemperatuur ei lange alla 20 °C [1]. Nende esinemissageduse kasv on oluline kliimamuutustele viitav näitaja, eriti piirkondades, kus sellised ööd varasemalt pole esinenud [4]. Troopiliste ööde esinemissagedust võivad oluliselt mõjutada mikrokliima eripärad, nagu tõestab Leedus Läänemere kagurannikul aastatel 1993–2022 läbiviidud uuring. Uuringu kohaselt oli Nida kuurordis, mis asub Kura säärel, troopilisi öid 2–3 korda rohkem kui teistes lähedal asuvates Läänemere-äärsetes linnades nagu Palanga ja Klaipėda. Peamiseks põhjuseks peetakse kohalikke geograafilisi tingimusi, nagu soojenenud mere- ja laguuniveed ning Nemunase jõe mõju, mis takistavad öist jahenemist. [5]

3.1 Troopiliste ööde mõju

Troopilised ööd võivad avaldada märkimisväärset negatiivset mõju taimekasvule ja põllumajandussaadusele. Kliimamuutustega kaasnevad sagenenud ja intensiivsemad kõrge temperatuuriga perioodid, sealhulgas troopilised ööd, mis võivad oluliselt häirida agronoomilisi süsteeme. Kõrged öised temperatuurid võivad kiirendada taimede arenguprotsesse, mille tagajärjeks võib olla küll kiirem küpsemine, kuid samas väheneb võimekus toota täisväärtuslikku saaki. Eriti tundlik on taimede areng viljade moodustumisefaasis, kus ka mõõdukas temperatuuri tõus võib põhjustada kasvuperioodi lühenemist ning saagikuse vähenemist. Seetõttu on temperatuuritundlikud kultuurtaimed kliimamuutuste kontekstis suuremas ohus. [6]

Lisaks mõjutavad sagenenud soojad ööd kaudselte ka inimeste tervist. Temperatuur on oluline une kvaliteeti määrav tegur. Kõrged öised temperatuurid võivad häirida une normaalset füsioloogilist kulgu, takistades keha taastumist. Piisav ja kvaliteetne uni on inimese tervisele hädavajalik – see toetab nii füüsilist vastupidavust kui ka vaimset võimekust. Unepuudus suurendab haigestumise riski ning võib oluliselt vähendada töövõimet ja elukvaliteeti. [7]

4 Andmed ja metoodika

Andmetöötluseks kasutati Jupyter Notebooki (versioon 6.5.4) ning programmeerimiskeelena kasutati Pythonit (versioon 3.11.5). Python valiti, kuna tegemist on teadusarvutustes laialdaselt kasutatava töövahendiga, mis on levinud ka Copernicuse andmebaasi andmete töötlemisel. Tänu sellele on olemas rohkesti dokumentatsiooni, juhendeid ja näidislahendusi.

Andmete piiritlemiseks Eesti alale kasutati Pythonis teeki *regionmask*, mis võimaldas eraldada ja töödelda vaid uurimispiirkonda jäävaid ruutvõrgu andmeid. Täiendavalt eemaldati käsitsi Peipsi järve piirkond, et vältida suurte veekogude potentsiaalset mõju temperatuurinäitajatele. Uuritava ala paiknemist ja ulatust illustreerib Lisa 1, kus on kujutatud CMIP6 mudelite mediaanväärtustel põhinev troopiliste ööde keskmine arv aastatel 2000–2022 (SSP5-8.5 stsenaariumi alusel).

ERA5-Land järelanalüüsiandmestiku kasutati CMIP6 andmestiku valideerimiseks. Valideerimise aluseks oli ajavahemik 1979–2022, kus CMIP6 andmestikust kasutati vastavalt ajaloolist osa (1979–2014) ning SSP5-8.5 stsenaariumi alusel arvatud tulevikuprojektsioone (2015–2022). Andmeid varasemast perioodist kui 1979 ei ole töösse kaasatud, kuna enne aastat 1979 on mitmed olulised sisendparameetrid, näiteks merepinna temperatuur ja merejää kontsentratsioon, puudulikud ja seetõttu ka vähem usaldusväärsed [8]. See piirab mudelite täpsust ja järjepidevust varasemate perioodide puhul.

Töö käigus kasutatud andmetöötluse ja analüüsi kood on kättesaadav GitHubi repositooriumis <https://github.com/JassKaarama/Troopilised-d>.

4.1 ERA5-Land andmestik

ERA5-Land on kõrglahutusega järelanalüüsiandmestik, mis pakub järjepidevat ja detailset ülevaadet maapinnaga seotud muutujate arengust läbi aastakümnete. ERA5-Land põhineb Euroopa Keskuse Keskpika Ilmaprognooside Keskuse (ECMWF) kliimajärelanalüüsil ERA5, kus mudelil põhinevaid andmeid korrigeeritakse globaalselt kogutud vaatluste abil. ERA5-Land andmestik sisaldab 50 parameetrit, mis kirjeldavad globaalset vee ja energia ringlust maismaal. Andmestiku ruumiline lahutusvõime on 9 km ja ajasamm 1 tund. Võrreldes ERA5 andmestikuga, on ERA5-Land oluliselt suurema lahutusvõimega, sobides seega paremini lokaalse kliima uurimiseks. [9]

ERA5-Land andmed ei põhine otseselt vaatluste kasutamisel, kuid mõõtmised mõjutavad tulemust kaudselt, sest kasutatakse ERA5 atmosfääriandmeid maapinnalähedaste muutujate modelleerimise sisendina. Sellist lähenemist nimetatakse atmosfääri sunniks (*atmospheric forcing*). Ilma nende sisendandmeteta kalduks simulatsioon tegelikkusest kiiresti kõrvale. Lisaks rakendatakse ERA5-Land andmestikus *lapse rate correction* meetodit, mille abil korrigeeritakse õhutemperatuuri, -niiskust ja -rõhku atmosfääri sunni ja ERA5-Landi kõrguserinevuste tõttu. [10]

Kuigi tegemist on usaldusväärse andmestikuga, sisaldab ERA5-Land teatud määral määramatust, mis on omane kõikidele simulatsioonipõhiste andmetikele. Määramatus tuleneb nii mudelite sisemistest piirangutest kui ka ajalooliste vaatluste piiratud kättesaadavusest. Mida kaugemale ajas tagasi liikuda, seda suuremaks muutub määramatus, sest sisendandmeid on aina vähem. [10]

ERA5-Land kõrge detailsus teeb selle sobilikuks erinevateks rakendusteks, alates pikaajalise kliimadünaamika analüüsist kuni ekstreemsete ilmastikunähtuste, nagu üleujutuste ja põudade, hindamiseni. Käesolevas töös kasutati ERA5-Land andmestikku, mis on saadud Copernicuse kliimaandmete teenusest [11]. Töös kasutati ööpäevaseid miinimumtemperatuuri andmed 2 meetri kõrgusel ning ruumilise lahutusvõimega $0,1^\circ$ nii laius- kui ka pikkuskraadil.

4.2 Kliimamudelite võrdlusprojekti CMIP6 andmestik

Kliimamudelite võrdlusprojekt (*Climate Model Intercomparison Project*) edaspidi CMIP, loodi 1995. aastal Maailma Kliimauuringute Programmi (*World Climate Research Program*, WCRP) eestvedamisel eesmärgiga pakkuda teadlastele ligipääsu standardiseeritud globaalse tsirkulatsioonimudeli (*coupled Global Circulation Model*, GCM) simulatsioonidele. CMIP raames töötavad erinevad meteoroloogiakeskused üle maailma välja ja käitavad oma kliimamudeleid, kasutades ühtlustatud sisendparameetreid ja standardiseeritud väljundformaate. Saadud tulemused tehakse avalikult kättesaadavaks, võimaldades mudelite omavahelist võrdlemist ja analüüsi. Selline rahvusvaheline koostöö loob ulatusliku andmekogu, mis hõlmab simulatsioone erinevatest mudelitest ning aitab paremini mõista kliimamuutuste minevikku, olevikku ja tulevikustsenaariume. [12]

CMIP6 on selle võrdlusprojekti kuues etapp, mis sisaldab andmeid 134 mudeli kohta, mida on arendanud 53 erinevat uurimisasetust üle maailma. Töös kasutatud kliimamudelite andmed on pärit Copernicuse andmebaasist [13]. Analüüsiks kasutati kõiki saadaolevaid

CMIP6 mudeleid, millel oli olemas ööpäevane miinimum õhutemperatuur 2 meetri kõrgusel (Lisa 2). Need mudelid on välja töötatud erinevates uurimisasutustes üle maailma ajavahemikus 2016–2019 [12]. Antud töös uuritav periood katab aastad 1979–2100, millest aastad 1979–2014 moodustavad mudelite ajaloolise osa. Alates aastast 2015 kasutatakse mudelites erinevaid jagatud sotsiaalmajanduslikke arengustsenaariume (SSP), mida on täpsemalt kirjeldatud peatükis 4.3.

Selleks, et erinevaid CMIP6 mudeleid oleks võimalik omavahel ning ERA5-Land andmestikuga võrrelda, interpoleeriti CMIP6 mudelite andmed ühtsele ruumilisele resolutsioonile $0,1^\circ$ nii laius- kui ka pikkuskraadides. Interpoleerimiseks kasutati NumPy teegi funktsiooni *numpy.interp*, mis põhineb lineaarsel interpolatsioonil.

CMIP6 mudelite valideerimiseks kasutati SSP5-8.5 stsenaariumi andmeid. Kokku oli algselt 25 erinevat mudelit, millest jäeti välja viis. Mudelid FGOALS-f3-L ja EC-Earth3-AerChem jäeti välja, sest neil puudusid vajalikud ajaloolised andmed, mis oleksid võimaldanud tulemusi võrrelda ERA5-Land järelanalüüsi andmestikuga. Mudelid BCC-CSM2-MR, TaiESM1 ja ACCESS-CM2 jäeti välja, sest nende poolt simuleeritud keskmine ööpäevane miinimumtemperatuur Eesti alal aastatel 1979–2014 erines rohkem kui $3\text{ }^\circ\text{C}$ ERA5-Land andmetest.

4.3 Jagatud sotsiaalmajanduslikud rajad SSP

Tuleviku kliima ennustused sõltuvad suurel määral kasvuhooonegaaside heitkogustest, mis omakorda on tihedalt seotud inimkonna käitumismustritega. Kuna tulevikku ei ole võimalik üheselet prognoosida, ei saa kliimamudeleid koostada ühe kindla heitestsenaariumi alusel. Selle asemel kasutatakse erinevaid jagatud sotsiaalmajanduslikke radasid (*Shared Socioeconomic Pathways*), mis kirjeldavad võimalikke arenguteid, arvestades muu hulgas rahvastiku kasvu, tehnoloogia arengut, majanduse muutumist ja keskkonnapoliitikat. SSP-d on CMIP6 kliimamudelite oluline komponent, kuna need võimaldavad hinnata, kuidas inimtegevuse muutused mõjutavad tuleviku kliimat. Käesolevas töös keskendutakse neljale laialdaselt kasutatavale SSP-le (SSP5-8.5, SSP3-7.0, SSP2-4.5, SSP1-2.6), mille abil hinnatakse kasvuhooonegaaside potentsiaalseid arengutrende ja nende mõju troopiliste ööde sagedusele Eestis. [14]

SSP1-2.6 on kiirgussuunaga (*radiative forcing*) $2,6\text{ (W/m}^2\text{)}$ ja kirjeldab maailma, mis liigub jätkusuutlikuma arengu suunas. Suurendatakse investeeringuid haridusse ja tervisesse ning väheneb ülemaailmne ebavõrdsus. Tarbimine muutub vähem materjali- ja

energiakulukaks ning majanduskasvu fookus nihkub inimeste heolule. Kliimapoliitika on ambitsioonikas ja koordineeritud, mille tulemusena väheneb kasvuhoonegaaside heide märgatavalt. [14]

SSP2-4.5 on kiirgussuunaga 4,5 (W/m²) ja kirjeldab maailma, mille arengutee ei erine oluliselt ajaloolisest. Majanduse ja tehnoloogia areng toimub ebahühtlaselt. Mõned riigid arenevad edukamalt kui teised. Globaalsete ja rahvuslike eesmärkide saavutamine edeneb aeglaselt. Ressursside kasutamise intensiivsus väheneb aeglaselt, kuid keskkonna seisundi halvenemine jätkub. Rahvastiku kasv on mõõdukas ja stabiliseerub sajandi teisel poolel. [14]

SSP3-7.0 on kiirgussuunaga 7,0 (W/m²) ja kirjeldab maailma, kus tugevneb rahvusriikide suveräänsuse rõhutamine ja rahvusvaheline koostöö nõrgeneb. Keskendutakse energiajulgeolekule ja toidu tootmisele piirkondlikul tasandil, sageli üldise arengu arvelt. Haridusse ja tehnoloogiasse investeerimine väheneb, majanduskasv aeglustub ja ebavõrdsus süveneb. Arenenud riikides rahvaarv väheneb, arengumaades aga kasvab. Keskkonnakaitse on madala prioriteediga, mistõttu halveneb looduslik seisund. [14]

SSP5-8.5 on kiirgussuunaga 8,5 (W/m²) ja kirjeldab maailma, kus usaldatakse tugevalt turgude, innovatsiooni ja inimkapitali arendamise võimekust, mis viib kiire majanduskasvuni. Suurenevad investeeringud tervishoidu, haridusse ja institutsioonidesse. Tarbimine põhineb ressursi- ja energiamahukatel eluviisidel ning fossiilkütuste kasutamine kasvab. Globaalne elanikkond saavutab haripunkti ja hakkab seejärel kahanema. Kohalikud keskkonnaprobleemid lahendatakse, kuid üldine sõltuvus fossiilkütustest püsib. [14]

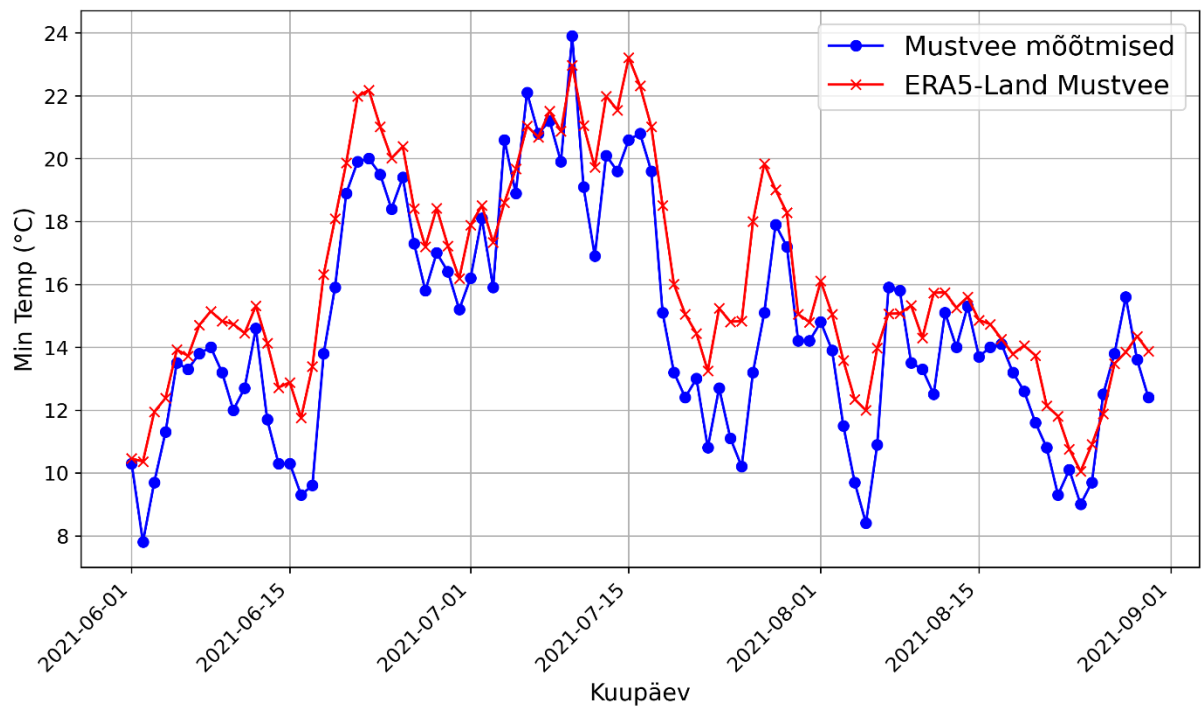
Neid stsenaariume kasutati töö käigus selleks, et võrrelda, kui palju troopilisi öid esineb erinevate tulevikustsenaariumide korral ning kuidas eri sotsiaalmajanduslikud arengud võiksid mõjutada öiste miinimumtemperatuuride muutust Eestis.

5 Tulemused

5.1 ERA5-Land andmestiku võrdlus maapealsete jaamadega

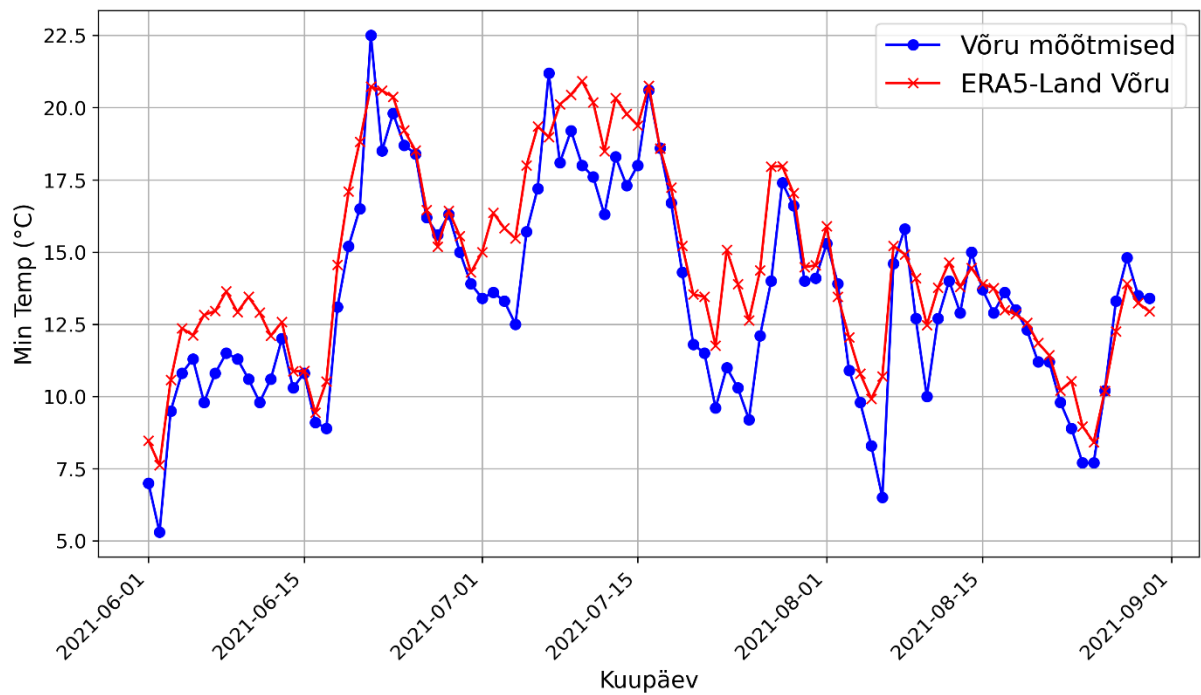
ERA5-Land andmete usaldusväärsuse hindamiseks valiti kolm mõõtmisjaama, mis asuvad võimalikult erinevates Eesti piirkondades: Lääne-Nigula meteoroloogiajaam Loode-Eestis, Võru meteoroloogiajaam Kagu-Eestis ja Mustvee hüdroomeetria jaam Kirde-Eestis (Joonis 5). Võrdluse aluseks võeti 2021. aasta juunist septembrini mõõdetud ööpäevased miinimumtemperatuurid. ERA5-Land järelanalüüsiandmed kõrvutati vastavate mõõtmisjaamade mõõtmistulemustega, et hinnata mudelandmete vastavust Eesti piirkondlike temperatuuri muutustele (Joonis 1–Joonis 3). Mõõtmisjaamade andmed pärinevad Eesti Keskkonnaagentuuri andmebaasist [15].

Joonis 1 on kujutatud 2021. aasta juunist kuni septembrini ööpäevased miinimumtemperatuurid Mustvee hüdroomeetria jaamas ning samas piirkonnas ERA5-Land järelanalüüsi väärtused. Võrdlusest selgub, et ERA5-Land andmestik järgib üldjoontes mõõdetud temperatuuride muutumistrende, kuid täpne väärtuste vastavus puudub. Enamikel päevadel on ERA5-Land hinnangud mõõdetud temperatuuridest kõrgemad, mis viitab sellele, et ERA5-Land andmestik kaldub alahindama miinimumtemperatuuri langust öösel. Selline erinevus võib olla tingitud mitmetest teguritest, sealhulgas ERA5-Land andmestiku ruumilisest silumisest, mis ei pruugi täielikult kajastada lokaalseid mikroklimaatilisi eripärasusi. Keskmise erinevus ERA5-Land ja Mustvee meteoroloogiajaama mõõtmiste vahel jääb alla 1,5 °C, mistõttu võib järelanalüüsiandmeid pidada piisavalt usaldusväärseteks Eesti piirkondliku temperatuuri dünaamika hindamiseks ning kliimamuutuste üldiste trendide analüüsiks.



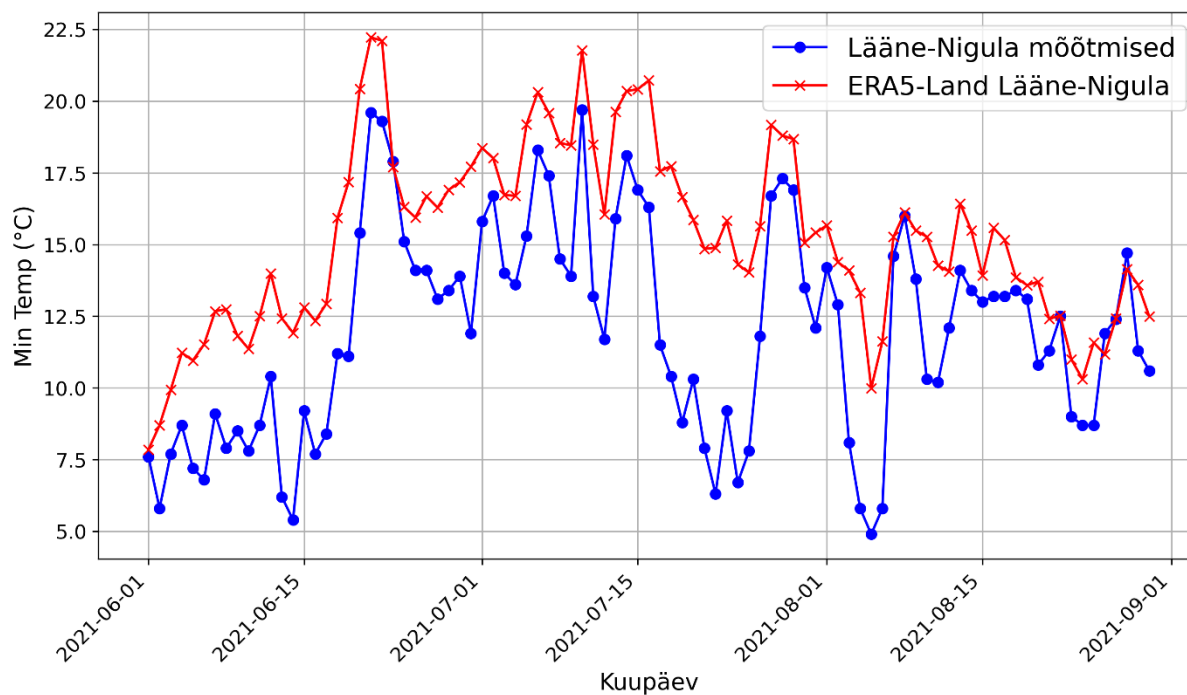
Joonis 1. ERA5-Land järelanalüüsimudeli ning Mustvee hüdroomeetriaamaa ööpäeva miinimumtemperatuurid 2021. aasta juunis – septembris.

Sarnaselt Mustvee jaamale viidi läbi võrdlusanalüüs ka Võru meteoroloogiajaamaga (Joonis 2). Tulemused näitasid, et ERA5-Land andmestik jäljendab Võru jaama temperatuurimuutuste trende üldjoontes piisavalt hästi, kuigi täpne vastavus igapäevaste väärtustega puudub. ERA5-Land kaldub näitama kõrgemaid miinimumtemperatuure võrreldes Võru meteoroloogiajaamas mõõdetud andmetega. Keskmine erinevus jääb alla 2 °C, mis kinnitab, et ERA5-Land andmeid võib usaldusväärselt kasutada piirkondliku kliimaanalüüsi ja temperatuuritrendide hindamiseks ka Lõuna-Eestis.



Joonis 2. ERA5-Land järelanalüüsimudeli ning Võru meteoroloogiajaama ööpäeva miinimumtemperatuurid 2021. aasta juuni – september.

Lisaks Mustvee ja Võru jaamadele analüüsiti ERA5-Land järelanalüüsiandmete usaldusväärsust ka Lääne-Nigula meteoroloogiajaama andmetega (Joonis 3). ERA5-Land andmestik jäljendab üldjoontes Lääne-Nigula mõõtmiste temperatuuritrende, kuid esineb suuremaid kõrvalekaldeid võrreldes teiste vaadeldud jaamadega. ERA5-Land kaldub näitama mõõtmistest oluliselt kõrgemaid miinimumtemperatuure, mille põhjuseks võib olla piirkonna keerukam rannikulähedane mikrokliima ning mudeli piiratud võimekus seda realistlikult kirjeldada. Keskmise erinevus ületab 3 °C, mis viitab, et antud piirkonnas tuleks ERA5-Land andmeid kasutada ettevaatusega, eriti kui eesmärk on hinnata täpseid öiseid temperatuure lokaalsel tasandil. Samas annab andmestik siiski usaldusväärse ülevaate temperatuuride üldistest trendidest.



Joonis 3. ERA5-Land järelanalüüsimudeli ning Lääne-Nigula meteoroloogiajaam ööpäeva miinimumtemperatuurid 2021. aasta juuni – september.

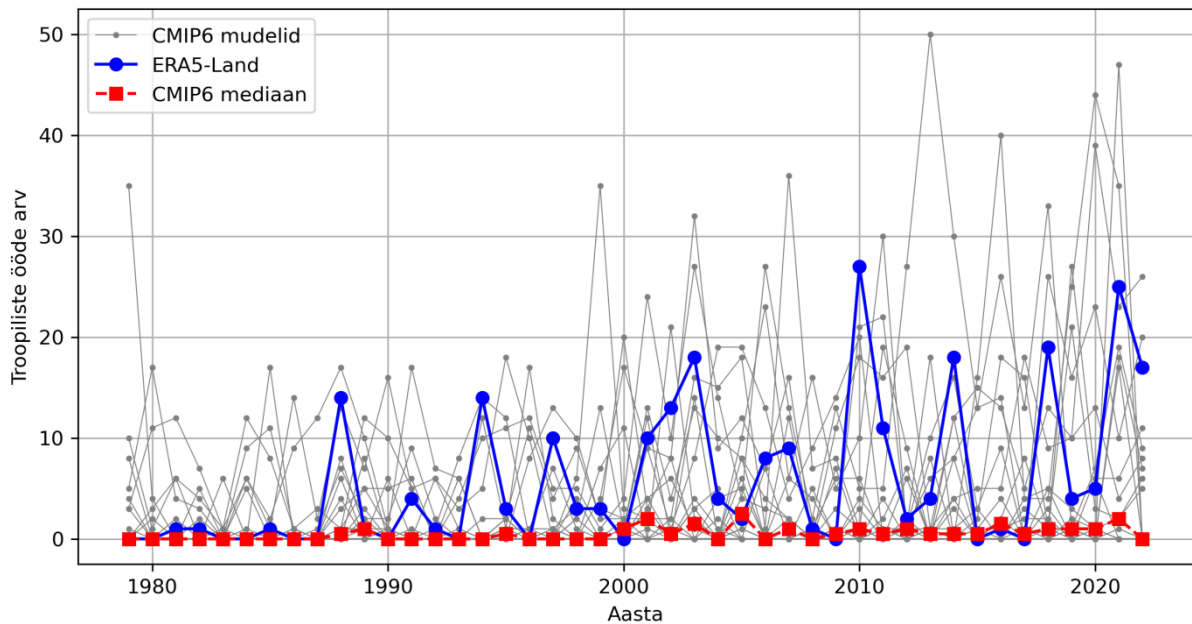
5.2 CMIP6 andmestiku võrdlus ERA5-Land andmestikuga

CMIP6 andmestiku usaldusväarsuse hindamiseks võrreldi tulemusi ERA5-Land andmestikuga. Analüüsi eesmärk oli hinnata, kui täpselt suudavad CMIP6 mudelid kirjeldada troopiliste ööde esinemissagedust Eestis ajavahemikus 1979–2022. Troopiliste ööde arv aastas arvutati CMIP6 mudelite põhjal, kasutades SSP5-8.5 stsenaariumi väärtusi. Võrdlusandmestikuna kasutati ERA5-Land järelanalüüsi, mille alusel leiti troopiliste ööde arv samal perioodil.

Joonis 4 on kujutatud troopiliste ööde aastane arv Eestis. Jooniselt selgub, et CMIP6 mudelite mediaan (joonisel märgitud punasega) ei lange kokku ERA5-Land (joonisel märgitud sinisega) põhjal saadud väärtustega. ERA5-Land andmestik näitab suuremat troopiliste ööde arvu võrreldes CMIP6 mediaaniga, viidates võimalikule erinevusele mudelite ja reaalse ilmastikutingimuste vahel. Kõrvalekalded võivad olla põhjustatud mudelite ruumilisest lahutusvõimest või lokaalsetest kliima eripäradest, mida mudelid ei pruugi täpselt kajastada.

Mõned üksikud CMIP6 mudelid (joonisel märgitud halliga) järgivad ERA5-Land andmestiku trende piisavalt hästi, kuid valdav enamus seda ei suuda. See viitab sellele, et

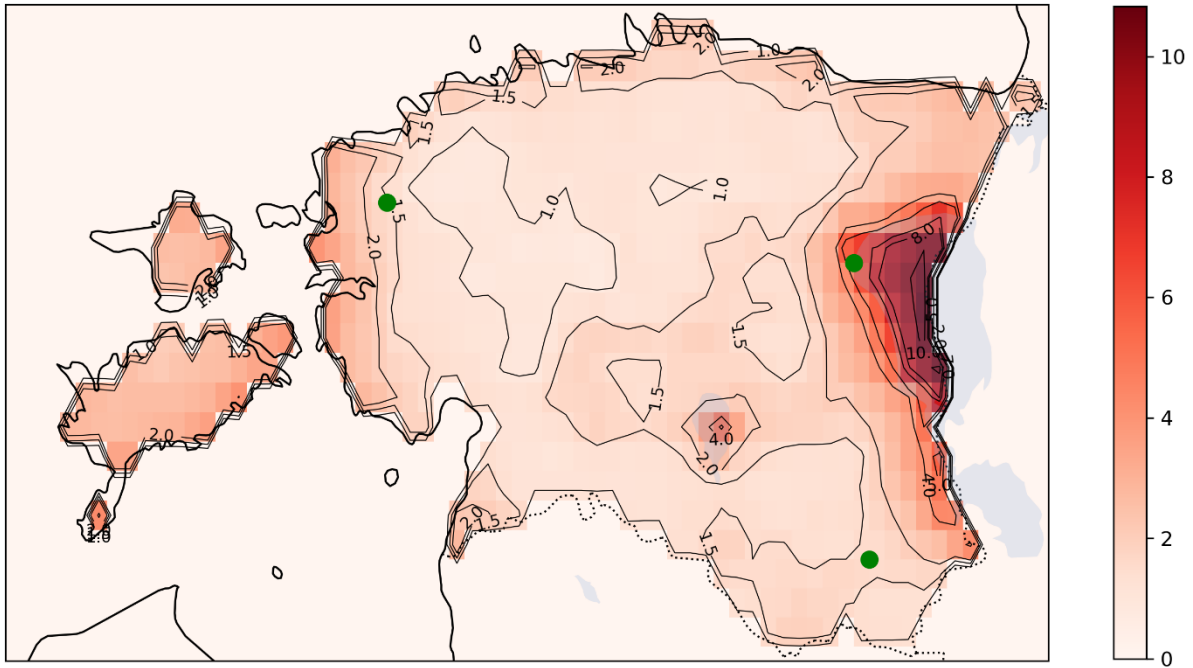
CMIP6 mudelite seas esineb märkimisväärset varieeruvust, mille põhjuseks võivad olla erinevused mudelite simulatsiooni algoritmides ning ruumilises ja ajalises lahutusvõimes. Tuleb arvestada ka sellega, et isegi juhul, kui mõni mudel suudab simuleerida troopiliste ööde esinemissagedust, ei pruugi see mudel tervikuna vastata tegelikele kliimatingimustele, näiteks võib mudelil esineda positiivne temperatuurinihe, mille tõttu on minimaalne temperatuur kooskõlas ERA5-Landi andmetega, kuid ööpäeva keskmine temperatuur on ootuspärasest kõrgem.



Joonis 4. Troopiliste ööde aastane arv Eestis perioodil 1979–2022 CMIP6 mudelite (SSP5-8.5) ja ERA5-land andmestiku alusel.

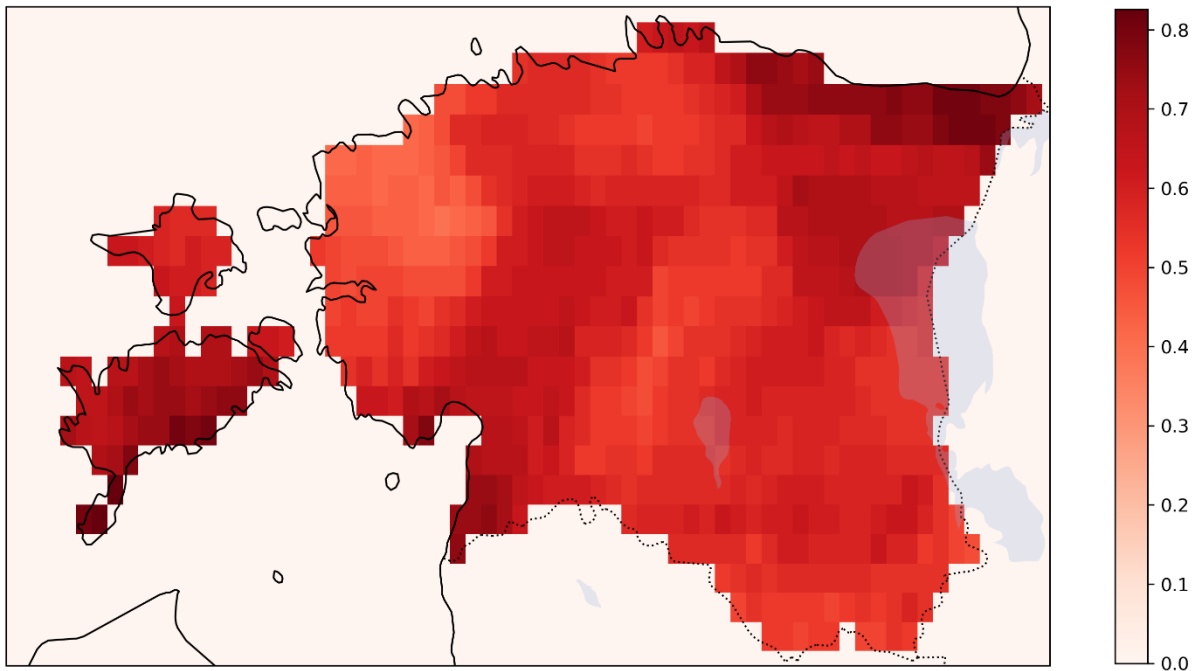
ERA5-Land ja CMIP6 andmestike erinevuste hindamiseks arvutati mõlema andmestiku alusel aastatel 2000–2022 keskmine troopiliste ööde arv Eesti alal (Joonis 5 ja Joonis 6). Analüüsis kasutati ruumilist lähenemist, kus visualiseeriti andmed geograafilisel kaardil, ning Peipsi järv lisati tagasi kaardialasse, et säilitada piirkonna täielik geograafiline ulatus.

Joonis 5, mis põhineb ERA5-Land andmestikul, ilmneb selgelt, et Peipsi järve kohal ja selle ümbruses esineb märgatavalt rohkem troopilisi öid võrreldes ülejäänud Eesti alaga. See viitab järve soojendavale efektile, mis takistab öösel temperatuuri langust. Lisaks on märgata madalat troopiliste ööde sageduse tõusu ka Võrtsjärve läheduses, mis viitab sarnasele, ehkki nõrgemalt väljendunud lokaalsele veekogu mõjule. Sellised piirkondlikud erinevused rõhutavad, kui olulised on kohalikud geograafilised tegurid öiste temperatuuride kujunemisel.



Joonis 5. Keskmise troopiliste ööde arv Eesti territooriumil aastatel 2000–2022 ERA5-Land andmestiku põhjal. Rohelise värviga on tähistatud võrdluspunktid: Mustvee HJ (Kirde-Eestis), Võru MJ (Kagu-Eestis) ja Lääne-Nigula MJ (Loode-Eestis).

Joonis 6, mis põhineb CMIP6 mudelite mediaanil (SSP5-8.5 stsenaarium), ei kajastu samaväärne troopiliste ööde rohkus Peipsi piirkonnas, mis viitab sellele, et globaalsed kliimamudelid ei pruugi suuta piisava täpsusega esitada kohalikke mikrokliima mõjusid. Näiteks võib jääda arvestamata suurte veekogude, nagu Peipsi järb, jahutav jahutav mõju öistele temperatuuridele.



Joonis 6. Keskmine troopiliste ööde arv Eesti territooriumil aastatel 2000–2022 CMIP6 andmestiku põhjal kasutades SSP5-8.5.

5.3 CMIP6 andmestiku prognoos

Tulevikku suunatud analüüsis kasutati CMIP6 andmestikus sisalduvaid SSP stsenaariume (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5), et prognoosida troopiliste ööde sageduse muutust Eestis kuni aastani 2100. Joonis 7 illustreerib troopiliste ööde aastast esinemissagedust Eestis ajavahemikus 1979–2100. Tulevikuprognoosid on esitatud vastavalt mudelite mediaan väärtustele: SSP5-8.5 (punane), SSP3-7.0 (roheline), SSP2-4.5 (kollane) ja SSP1-2.6 (violettne). Hallide joontega on lisatud CMIP6 mudelite individuaalsed tulemused SSP3-7.0 stsenaariumi raames, mis aitab illustreerida mudelite varieeruvust. Sinisega on kujutatud ERA5-Land tulemused kuni aastani 2022.

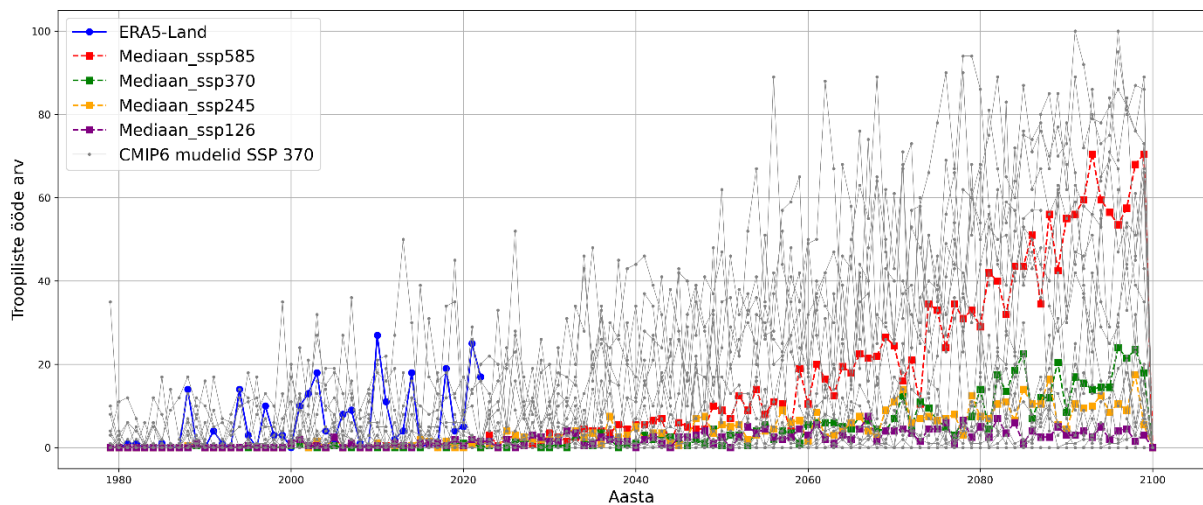
Joonis 7 näitab, et ERA5-Land andmetel on troopiliste ööde arv Eestis seni kõikunud, ulatudes mõnel aastal üle 20 juhtumi, kuid jäädes sageli madalamale. Tulevikuprognoosid näitavad selget kasvutrendi kõigi stsenaariumite puhul, kuid kasvutempo ja ulatus varieerub oluliselt, sõltuvalt valitud arengurajast.

SSP1-2.6, mis eeldab kestlikku arenguteed ja madalaid kasvuhoonegaaside heitkoguseid, näitab troopiliste ööde väga aeglast sagenemist, kus sajandi lõpuks võib troopilisi öid esineda vaid üksikutel aastatel rohkem kui viiel korral.

SSP2-4.5 ja SSP3-7.0 prognoosivad mõõdukat tõusu, kus troopilised ööd muutuvad 21. sajandi teises pooles regulaarseks suviseks nähtuseks, ulatudes kohati 20 ööni aastas.

SSP5-8.5, mis esindab kiiret majandusarengut fossiilkütuste baasil, näitab kõige suuremat kasvu. Prognoosides sajandi lõpuks üle 60 troopilise öö aastas. See viitab olulisele kliimarisikile, kuna troopiliste ööde sagenemine suurendab terviseriske ning vähendab taimede saagikust.

Kuigi CMIP6 andmestik ei võimalda teha täpseid kvantitatiivseid ennustusi, näitavad kõik stsenaariumid selget kasvutrendi troopiliste ööde sageduses. See võib avaldada olulist mõju nii inimeste tervisele, heaolule kui ka looduskeskkonnale ja põllumajandusele. Lisaks viitab märgatav varieeruvus CMIP6 mudelite vahel modelleerimis alasele ebakindlusele, mille põhjuseks võib olla ruumiline lahtusvõime või lokaalkliima eripärade kajastamine.



Joonis 7. Troopiliste ööde aastane arv Eestis perioodil 1979–2100. Sinine joon tähistab ERA5-Land andmestiku põhjal arvatud troopiliste ööde arvu (1979–2100). Katkendjooned näitavad CMIP6 mudelite mediaanväärtusi erinevate SSP puhul: SSP1-2.6 (violettne), SSP2-4.5 (kollane), SSP3-7.0 (roheline) ja SSP5-8.5 (punane). Hallid jooned kujutavad kõikide CMIP6 mudelite individuaalseid tulemusi SSP3-7.0 stsenaariumi alusel. Graafik illustreerib troopiliste ööde arvu prognoositavat suurenemist sajandi lõpuni.

6 Arutelu

Töös ilmnes suur erinevus ERA5-Land järelanalüüsi andmestiku ja CMIP6 kliimamudelite tulemuste vahel troopiliste ööde esinemissageduse osas perioodil 1979–2022. ERA5-Land andmed näitavad oluliselt suuremat troopiliste ööde arvu võrreldes CMIP6 mudelite mediaanväärtusega. Kuigi üldised suundumused, näiteks troopiliste ööde sagemine ajas, langevad omavahel kokku, on CMIP6 andmestiku troopiliste ööde arv oluliselt madalam. Selle erinevuse üheks võimalikuks põhjuseks on mudelite erinev ruumiline lahutusvõime. CMIP6 mudelid on globaalsed kliimamudelid, mille lahutusvõime on madalam kui ERA5-Landil. See tähendab, et need ei pruugi sarnase detailsusega kajastada piirkondlikke kliimaatilisi eripärasid, nagu näiteks mikrokliima mõju maastiku ja veekogude läheduses. ERA5-Land suudab paremini arvestada selliseid lokaalseid tegureid, mis mõjutavad öiseid miinimumtemperatuure ja soodustavad troopiliste ööde teket.

Oluline näide ERA5-Landi ja CMIP6 andmestiku erinevuse kohta tuleb esile Joonis 5 ja Joonis 6 võrdluses. Joonis 5, mis põhineb ERA5-Land andmetel, on näha, et aastatel 2000–2022 esineb troopilisi öid oluliselt sagedamini Peipsi järve ümbruses ning mõningal määral ka Võrtsjärve lähistel. See viitab veekogude soojusmahutavuse olulisele rollile öiste temperatuuride hoidmisel üle 20 °C. Joonis 6, mis kajastab CMIP6 mudelite mediaana tulemusi, sellist piirkondlikku mustrit aga ei ilmne. See viitab tõsiasjale, et globaalmodelid ei suuda piisavalt hästi arvesse võtta lokaalseid geograafilisi mõjusid või need tasanduvad mudelite üldistustes

Kuigi CMIP6 mudelid on sobivad üldiste kliimatrendide ja globaalse soojenemise suundumuste hindamiseks, ei tohiks neid kasutada detailsete piirkondlike analüüsitude tegemiseks ilma täiendava kohandamise või interpolatsioonita. Eriti piirkondades, kus lokaalsed tingimused soosivad troopiliste ööde teket, näiteks suuremate veekogude läheduses nagu Peipsi järv, võib nende esinemissagedus osutada suuremaks kui globaalsete mudelite prognoositud väärtused.

Kokkuvõttes kinnitavad töö tulemused, et kuigi mudelipõhised prognoosid ja reaalandmed näitavad troopiliste ööde arvu kasvu, tuleb mudelite kasutamisel arvestada ruumilise lahutusvõime piirangut. See on eriti oluline öiste miinimumtemperatuuride analüüsimisel, kus väikesed erinevused võivad viia oluliselt erinevate järeldusteni. Täpsema ruumilise kirjelduse saavutamiseks vajavad globaalsed mudelid lokaalset kohandamist või täpsustamist, et toetada usaldusväärset kliimaprognoosi väiksemate alade puhul, nagu Eesti.

7 Kokkuvõte

Töö eesmärk oli hinnata troopiliste ööde sageduse muutust Eestis ajavahemikul 1979–2100. Selleks kasutati ERA5-Land kõrglahutusega järelanalüüsi andmeid ja CMIP6 kliimamudelite simulatsioone, mis põhinevad neljal erineval sotsiaalmajanduslikul arengustsenaariumil (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5). ERA5-Land andmete usaldusväärsust hinnati võrreldes 2021. aasta suve ööpäevaseid miinimumtemperatuure Eesti eri piirkondades asuvate meteoroloogia- ja hüdromeetriaajaamade mõõtmistega. Tulemused näitasid head kooskõla, kusjuures keskmine erinevus jäi valdavalt alla 2 °C.

Tulemused näitasid, et CMIP6 mudelite mediaanväärtused alahindavad troopiliste ööde arvu võrreldes ERA5-Land andmetega, eriti Peipsi järve piirkonnas, kus lokaalsed geograafilised tegurid, nagu veekogude mõju, mõjutavad tugevalt öist jahenemist. Sellest hoolimata kajastavad kõik stsenaariumid usaldusväärselt üldist trendi: troopiliste ööde arv kasvab 21. sajandi jooksul. Suurem kiirgussuund tähendab kiiremat ja ulatuslikumat tõusu troopiliste ööde arvus.

Kuigi CMIP6 mudelitel esineb piiranguid väiksema mastaabi nähtuste, nagu mikrokliima mõju, kirjeldamisel, pakuvad need olulist teavet kliimamuutuste tuleviku arengute kohta. Troopiliste ööde sagenemine on Eestis tõenäoline ning need võivad muutuda tavapärasteks suvisteks nähtusteks 21. sajandi teises pooles. Selline muutus võib kaasa tuua olulisi mõjusid inimeste tervisele, põllumajandusele ja elukeskkonnale. Seetõttu on oluline käsitleda neid muutusi kliimapoliitika kujundamisel ning töötada välja sobivad kohanemismeetmed.

8 Tänu

Avaldame tänu maailma kliimauuringute programmile (*World Climate Research Programme*), kes oma sidusmodelite töörühma (*Working Group on Coupled Modelling*) kaudu koordineeris ja toetas CMIP6 initsiatiivi. Täname kliimamudelite arendajaid, kes löid ja tegid avalikult kättesaadavaks oma mudeli väljundid, samuti *Earth System Grid Federation*-i (ESGF), kes arhiveeris andmed ning võimaldas nendele ligipääsu. Samuti täname erinevaid rahastusasutusi, kes toetasid CMIP6 ja ESGF tegevust.

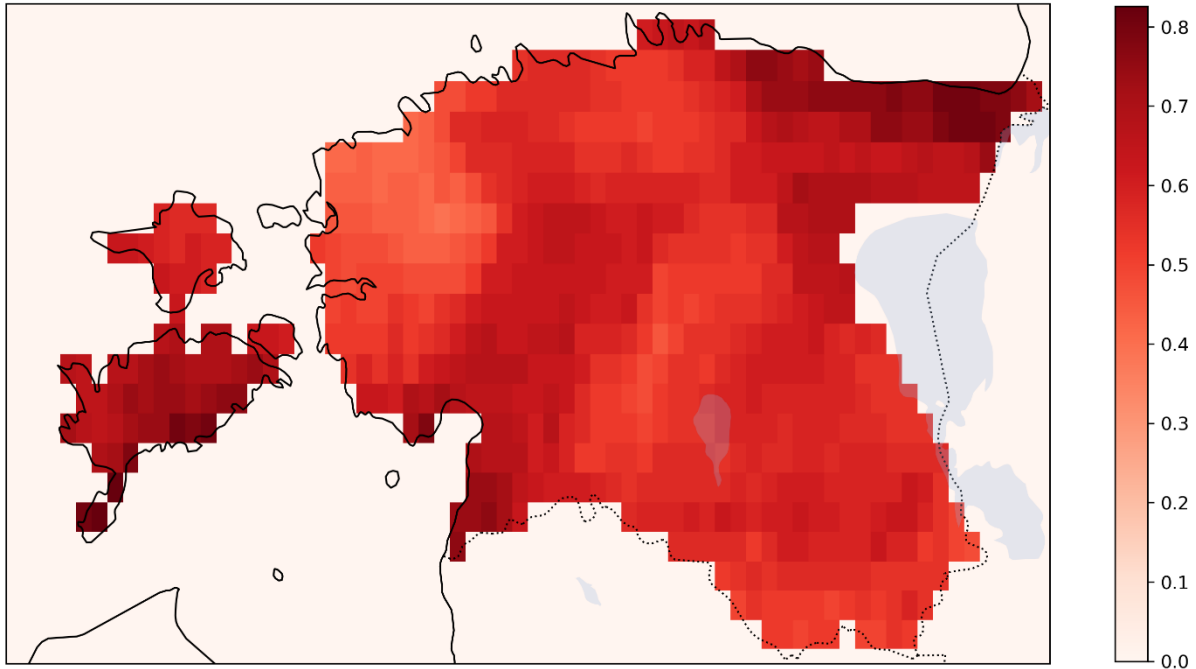
9 Kasutatud kirjandus

- [1] A. Rutgersson, J. Jaagus, F. Schenk, M. Stendel, L. Bärring, A. Briede, B. Claremar, I. Hanssen-Bauer, J. Holopainen, A. Moberg, Ø. Nordli, E. Rimkus ja J. Wibig, *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*, Springer International Publishing, 2015, p. 87.
- [2] A. Luhamaa, A. Kallis, K. Mändla, A. Männik, T. Pedusaar ja K. Rosin, „Eesti tuleviku kliimastenaariumid aastani 2100,“ *Keskkonnaagentuur*, 2015.
- [3] A. Roose, M. Sepp, T. Tamm, V. Sagris, M. Gauk, A. Rosentau, E. Karro, M. Muru, M. Kuusik, A. Tammepuu, J. Tross, K. Orru ja M. Tillmann, *Kliimamuutustega kohanemine Eestis – valmis vääramatuks jõuks?*, Tartu Ülikool Ökoloogia ja maateaduste instituut, geograafi osakond, 2015, pp. 68-75.
- [4] S. Klok, A. Kornus, O. Kornus, O. Danylchenko ja O. Skyba, „Tropical nights (1976–2019) as an indicator of climate change,“ *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, p. 1126, 2023.
- [5] I. Dailidienė, I. Servaitė, R. Dailidė, E. Vasiliauskienė, L. Rapolienė, R. Povilanskas ja D. Valiukas, „Increasing Trends of Heat Waves and Tropical Nights in Coastal Regions (The Case Study of Lithuania Seaside Cities),“ *Sustainability*, kd. 15, nr 19, p. 14281, 2023.
- [6] J. L. Hatfeld ja J. H. Prueger, „Temperature extremes: Effect on plant growth and development,“ *Weather and Climate Extremes*, kd. Volume 10, nr Part A, pp. 4-10, 2015.
- [7] N. Obradovich, R. Migliorini, S. C. Mednick ja J. H. Fowler, „Nighttime temperature and human sleep loss in a changing climate,“ *Science Advances*, kd. 3, nr 5, 26 May 2017.
- [8] V. Eyring, S. Bony, G. A. Meehl, C. A. Senior, B. Stevens, R. J. Stouffer ja K. E. Taylor, „Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization,“ *Geoscientific Model Development*, kd. 9, nr 26 May 2016, p. 1937–1958, 2016.
- [9] J. Muñoz-Sabater, E. Dutra, A. Agustí-Panareda, C. Albergel, G. Arduini, G. Balsamo, S. Boussetta, M. Choulga, S. Harrigan, H. Hersbach, B. Martens, D. G. Miralles, M. Piles, N. J. Rodríguez-Fernández, E. Zsoter, C. Buontempo ja J.-N. Thépaut, „ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications,“ *Earth System Science Data*, kd. 13, nr 9, pp. 4349-4383, 2021.
- [10] Copernicus Climate Data Store, „ERA5-Land hourly data from 1950 to present,“ 12 July 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land>. [Kasutatud 17 April 2025].

- [11] J. Muñoz Sabater, „ERA5-Land hourly data from 1950 to present.“ *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*, 12 07 2019.
- [12] ECMWF, „CMIP6: Global climate projections,“ ECMWF, 12 January 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/CMIP6%3A+Global+climate+projections>. [Kasutatud 16 April 2025].
- [13] „CMIP6 climate projections,“ Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, 23 03 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projections-cmip6?tab=overview>. [Kasutatud 17 04 23].
- [14] K. Riahi, D. 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, S. KC, 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 ja M. Tavoni, „The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview,“ *Global Environmental Change*, kd. 42, pp. 153-168, 01 2017.
- [15] Keskkonnaagentuur, „Ajaloolised ilmaandmed,“ 2025. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/ajaloolised-ilmaandmed/>. [Kasutatud 03 2025].

10 Lisa

Lisa 1 Troopiliste ööde aastane keskmine arv Eestis perioodil 2000–2022 CMIP6 mudelite mediaanväärtuste alusel. Joonisel on kujutatud uurimisala.



Lisa 2 Töös kasutatud CMIP6 mudelid ning nende algne resolutsioon.

CMIP6 Mudel	Algne keskmine resolutsioon
ACCESS-CM2	Lat 1.250° Lon 1.875°
CNRM-ESM2-1	Lat 1.400° Lon 1.406°
TaiESM1	Lat 0.942° Lon 1.250°
MRI-ESM2-0	Lat 1.121° Lon 1.125°
KIOST-ESM	Lat 1.895° Lon 1.875°
CNRM-CM6-1-HR	Lat 0.499° Lon 0.500°
AWI-CM-1-1-MR	Lat 0.935° Lon 0.938 °
GFDL-ESM4	Lat 1.000° Lon 1.250°
FGOALS-f3-L	Lat 1.000° Lon 1.250°

EC-Earth3-AerChem	Lat 0.702° Lon 0.703°
INM-CM5-0	Lat 1.500° Lon 2.000°
NorESM2-MM	Lat 0.942° Lon 1.250°
CanESM5	Lat 2.789° Lon 2.812°
NorESM2-LM	Lat 1.895° Lon 2.500°
NESM3	Lat 1.865° Lon 1.875°
MIROC6	Lat 1.400° Lon 1.406°
BCC-CSM2-MR	Lat 1.121° Lon 1.125°
CNRM-CM6-1	Lat 1.400° Lon 1.406°
IPSL-CM6A-LR	Lat 1.268° Lon 2.500°
INM-CM4-8	Lat 1.500° Lon 2.000°
CMCC-ESM2	Lat 0.942° Lon 1.250°
MIROC-ES2L	Lat 2.789° Lon 2.812°
MPI-ESM1-2-LR	Lat 1.865° Lon 1.875°
EC-Earth3-CC	Lat 0.702° Lon 0.703°
EC-Earth3-Veg-LR	Lat 1.121 ° Lon 1.125°

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Jass Kaarama,

1. Annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

Troopilised ööd Eestis,

Mille juhendaja on Erko Jakobson, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada Tartu Ülikooli digitaalarhiivi kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni,

2. annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks 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.

Jass Kaarama

29.05.2025