

Mida näitavad kliimaprojektsioonid Eesti kohta?

Erko ja Liisi Jakobson

Kliimaproгноos ja kliimaprojektsioon

Sageli aetakse need kaks mõistet segamini. Alustamegi siis kõigepealt nende erinevuse selgeks tegemisest. Kliimaproгноose kasutatakse lähituleviku hindamiseks, mõne kuu kuni mõne aasta pärast tulevate ilmaparameetrite, nagu näiteks suve keskmine temperatuur ja sademete hulk või talvise lumikatte kestvuse prognoosimiseks. Kümnete aastate jooksul toimuvate kliimamuutuste analüüsimiseks kasutatakse kliimaprojektsioone. Kliimaprojektsioonid lähtuvad inimtegevusega kaasnevate kasvuhoonegaaside kontsentratsioonistsenaariumitest. Kliimaproгноosi saamiseks võetakse kliimamudeli algolukorraks hetkeilm ja põhimõtteliselt arvutatakse pikendatud ilmaproгноos. Kliimaprojektsiooni puhul on kliimamudeli algseis juhuslik, oluline on kasvuhoonegaaside, aerosoolide ja päikesekiirguse varieeruvusega kaasneva kiirgussunni (radiative forcing) muutustega arvestamine.

Tulenevalt ajaskaalast huvitavad pikaajalisi otsuseid vastuvõtva inimesi peale kliimaproгноosi kindlasti (ja rohkemgi) kliimaprojektsioonid. Sii gruppi kuuluvad näiteks poliitikud, projekteerijad, keskkonnatehnikud, kindlustusettevõtjad, pankurid, põllumehed, rohealade kujundajad jne. Valdkonnaga seotud inimeste ring on väga lai ning kätkeb endas kindlasti kõiki inimesi, kes hoolivad sellest, millise kliima me enda järeltulevatele põlvedele edasi anname. Kliimaprojektsioon terminina hõlmab endas juba inimühiskonna käitumise sisendit, heitgaaside hulga stsenaariume, seepärast on see termin ka oluliselt rohkem politiseeritud kui termin kliimaproгноos. Erinevad arvamused põhinevad kliimaprojektsioonide suurel määramatusel. Määramatus tuleneb pikast ajaskaalast ning alati suure määramatusega inimühiskonna käitumisest tulenevast emissioonide hulgast.

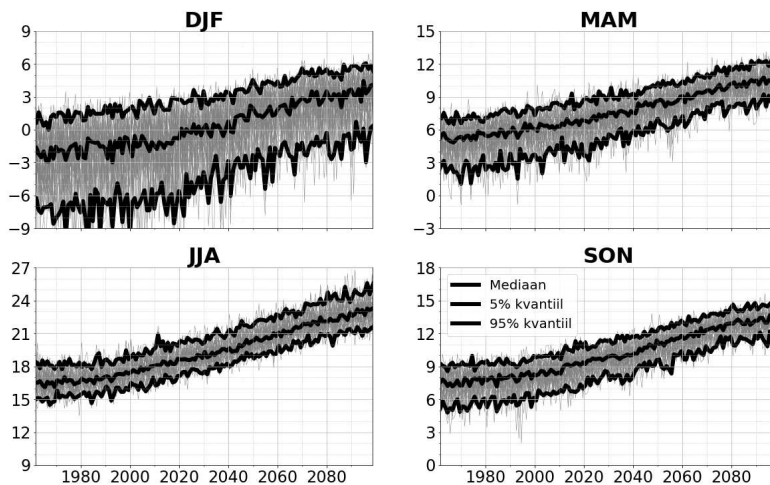
Kliimamuutus ja kliima loomulik varieeruvus

Maa kliima on pidevas muutumises. Eesti alad on olnud korduvalt nii paksu jääkihi all kui ka praegusest oluliselt soojema kliimaga. Nende muutuste põhjuseks on naturaalsed, inimtegevusest sõltumatud tegurid nagu orbiidiparameetrite muutused (tuhandetes aastates mõõdetavad Milankovići tsüklid), päikesepunktide arvu muutlikkus, vulkaanipursked ning hiidasteroidid. Nende põhjal ei peaks hetkel kliima arvestatavalt muutuma ja nõnda peaks jätkuma veel mitmeid tuhandeid aastaid.

Käimasolevad kliimamuutused on seega kaasa toonud inimkonna käitumine, mis on muutnud energiatasakaalu neelduva päikesekiirguse ning lahkuva soojuskiirguse vahel. Tööstusrevolutsioonist saadik on CO₂ kontsentratsioon tõusnud ca 50%. Ka oluliselt järgmise kasvuhoonegaasi – metaani – kontsentratsioon atmosfääris tõuseb, kuigi mitte CO₂-ga võrreldava kiirusega. Viimased neli aastakümnet

on olnud järjepanu soojemad kui mistahes eelnenud aastakümne aastast 1850 (IPCC, 2021).

Kliimamuutuse ulatuse mõistmist varjab kliima loomulik varieeruvus – loomulikust varieeruvusest väiksemaid kliimamuutuseid on keeruline eristada. Kliima loomuliku varieeruvuse hindamiseks kasutatakse sama mudeli erinevate altingimustega kliimamudeli ansamblite tulemusi. Joonisel 1 on toodud USA kliimaandmebaasi CESM-LE (Kay jt 2015) 40-liikmelise kliimaansambli Eesti piirkonna sesoonikeskmised maapinnalähedase temperatuuri kliimaprojektsioonid aastatel 1960–2100. Selles andmebaasis kasutatakse aastani 2005 ajaloolist kiirgussunni stsenaariumit ning seal edasi pessimistlikku süsinikupõhise majanduse kiirgussunni stsenaariumit RCP8.5.



Joonis 1. Eesti sesoonikeskmine maapinnalähedane temperatuur perioodil 1960–2100 USA kliimaandmebaasi CESM-LE 40-liikmelise kliimaansambli andmetel.

Joonisel on toodud iga sesooni (DJF – detsember, jaanuar, veebruar; MAM – märts, aprill, mai; JJA – juuni, juuli, august ja SON – september, oktoober, november) keskmise kohta 40 ansambli liikme kliimaprojektsioonid koos mediaanväärtusega ning 5% ja 95% kvantiilidega. Kui defineerida loomuliku varieeruvuse ulatus kui 5% kvantiili ja 95% kvantiili vahe, siis kõige suurem maapinnalähedase temperatuuri loomulik varieeruvus on talvel, mil 90% aastate varieeruvus on keskmiselt 8° C. Kevade keskmine loomulik varieeruvus on 4° C ning suvel ja sügisel 3° C. Võrdluseks – perioodil 1950–2000 tõusis kevade keskmine temperatuur Eesti meteojaamades statistiliselt usaldusväärselt 2,0–3,3° C (Jaagus, 2006). Ka talve keskmine temperatuur tõusis samal perioodil 1,9–2,5° C, kuid see polnud statistiliselt usaldusväärne. On arusaadav, et talvine trend polnud statistiliselt usaldusväärne, kuna loomulik varieeruvus oli ligi neli korda suurem kui keskmine muutus.

Eesti keskmise temperatuuri projektsioonid

Kliimaprojektsioonide tulemused sõltuvad ka kasutatavast kliimamudelist, sest

kuigi dünaamikavalemid on neil ühised, kasutatakse mudelites siiski ka suurel hulgal parametriseringuid. Samuti on protsesse, mida mõned mudelid võtavad arvesse, kuid mõned mitte. Tänu sellele võivad olla erinevate mudelite projektsioonid üksteisest veidi erinevad, kusjuures see erinevus sõltub nii mudelitest, piirkonnast, aastaajast kui ka vaadeldavast parameetrist. Kõige paremini töötavad aga hoopis kliimaprojektsioonide ansamblid, mille loomisel on kasutatud erinevaid kliimamudeleid. Sellise ansambli keskväärtsus on usaldusväärsem kui mõne üksiku mudeli projektsioon, sest üksikute ansambliliikmete parametriseringutest tingitud süstemaatilised vead peaksid välja keskmistuma.

Kõigi kliimaprojektsioonide oluliseks sisendparameetrik on ka kasvuhoonegaaside prognoos. Varasemalt kasutati rohkem mõistet kasvuhoonegaaside kontsentratsiooni stsenaarium (RCP). Nüüdseks on võetud kasutusele RCP laiendatud edasiarendus – globaalne sotsiaalmajanduslik stsenaarium (SSP). Stsenaariumi kahekohaline number tähistab prognoositavat kiirgussundi (W/m^2) aastaks 2100. Kolmekohalise numbriga puhul on kiirgussundi ette lisatud arengustsenaariumi number (1 = jätkusuutlik, roheline; 5 = süsinikupõhine). Kõige levinumad stsenaariumid on SSP2.6, SSP4.5 ning SSP8.5. SSP2.6 on stsenaarium, mille puhul on lootus, et globaalne keskmine temperatuuri tõus jääb alla kahe kraadi. SSP8.5 on stsenaarium, mille puhul eeldatakse, et jätkub süsinikupõhine majandus ning kasvuhoonegaaside emissioone ei piirata.

Lähimineviku kliima uurimiseks ning võrdlemiseks kliimaprojektsioonidega on kõige mugavam kasutada atmosfääri järelanalüüsimudeleid. Nende loomisel korrigeeritakse igal ajasammul mudeli andmed ajalooliste mõõtmisandmetega ning tulemuseks on terviklik ilmaprojektsiooni koordinaatvõrgustikus olev andmebaas, mis on kooskõlas atmosfääri mõõtmisandmetega.

Valitsustevahelise kliimamuutuste paneeli (IPCC) kuuendas hindamisaruandes kasutatakse kliimaprojektsioone, mille aluseks on seotud (coupled) globaalsete mudelite võrdlusprojekt CMIP6 (Eyring jt 2016). Joonisel 2 on toodud CMIP6 ansambliprojektsioonide keskmine kolme erineva kiirgussundi stsenaariumi korral. Võrdluseks on lisatud ka atmosfääri järelanalüüsimudeli ERA-5 (Hersbach jt 2020) andmed. CMIP6 projektsioonid algavad aastast 2015 ning ERA-5 andmed lõppevad aastaga 2021, ERA-5 andmed jäävad ilusti CMIP6 ansambliliikmete varieeruvuse piirkonda. Siiski tunduvad CMIP6 ansambliprojektsioonid olevat madalamad kui mõõtmisandmetel põhinevad ERA-5 andmed, ehk mõõdetud soojenemine on olnud pigem kergelt kiirem kui kliimaprojektsioonid näitavad. Selge lahknemine erinevate projektsioonide vahel tekib alles sajandi keskel, mil projektsiooni SSP8.5 korral temperatuuri tõusutrend jätkub, samas kui SSP2.6 ja SSP4.5 puhul trend peatub. Siinkohal tuleb välja tuua, et päris üks-ühele ERA-5 järelanalüüsimudelit ja CMIP6 projektsioone omavahel võrrelda ei saa, sest kuigi mõlemal juhul on Eesti keskmine temperatuur defineeritud kui Eestit katva ristkülikukujulise ala (58,0–59,5 N, 22,0–27,5 E) keskväärtsus, võivad juba mudelite resolutsioonide erinevuse tõttu olla tulemused mõneti erinevad. Veelgi rohkem erineb nende keskväärtsuse definitsioon Eesti Keskkonnaagentuuri poolt arvatud Eesti keskmisest, mille arvutamisel kasutatakse Eesti maismaal asuvate meteojaamade andmeid.

Joonis 3 on analoogne joonisega 2, kuid see käib sesoonsete kliimaprojektsioonide kohta. Selgelt on näha, et kõigil aastaegadel on ansambliliikmete varieeruvus oluliselt suurem kui joonisel 1 toodud kliima loomulik varieeruvus. See kinnitab, et CMIP6 ansambliliikmete varieeruvus sisaldab lisaks loomulikule varieeru-

vusele ka mudeli parametriseringutest tingitud süstemaatilisi vigasid. Suvel eristuvad kaks ansambliiiget, mis on ülejäänud ansamblist selgelt madalama temperatuuriga ning seda kogu perioodi ulatuses. Need siiski ei mõjuta meie ansambli keskvaärtuseid, kuna keskvaärtusena vaatame me mediaanvaärtuseid. Samas väärivad need ansambliiikmed kindlasti edasist uurimist.

Kuigi aastatevaheline varieeruvus on erinevatel aastaegadel erinev, on trendid üllatavalt sarnased. Perioodil 2015–2100 tõuseb maapinnalähedane temperatuur igal aastaajal SSP585 korral 5°C , SSP245 korral 2°C ning SSP126 korral temperatuuri tõus praktiliselt puudub.

Eesti temperatuuri ekstreemumite projektsioonid

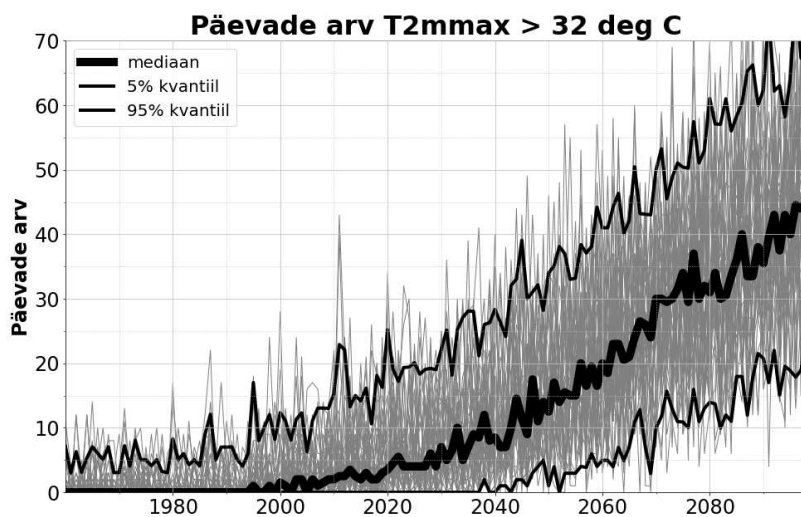
Kuna keskmise temperatuuri trendid on võrreldes loomuliku varieeruvusega väikesed, on väga keeruline kliima soojenemist tunnetada. Eriti, kui tuleb vahele mõni lumerohkem talv või jahedapoolsem suvi. Ning enamasti ongi Eesti ilm selline, et paar kraadi soojem ilm teeks tuju heaks. Teisiti on aga lugu ekstreemsete ilmaoludega – nii loodus kui inimene pole harjunud ekstreemsete ilmaoludega ning juba veidi pikem põud, kuuma- või külmalaine võib mõjuda vägagi laastavalt.

Ekstreemsete ilmaolude analüüsimiseks kasutame jälle CESM-LE 40-liikmelist kliimaansamblit. Sama mudeli erinevate algtingimustega kliimamudeli ansambli te kasutamisel on põhjendatud vaadata kõiki ansambliiikmeid kui sama ilma samaväärse tõenäosusega esineda võivaid realiseeringuid. Seeläbi moodustub näiteks ühe aasta 365 ööpäeva maksimaalse temperatuuri asemel juba 40 korda suurem ehk 14600-elementne andmebaas, kust saab oluliselt täpsemalt hinnata ekstreemse temperatuurinivoo ületamise tõenäosust. CESM-LE ansambli eeliseks on ka asjaolu, et selle keskvaärtused langevad ligi kraadise täpsusega kokku CMIP6 andmebaasi keskvaärtusega, mis lubab oletada, et sellel andmebaasil pole olulist süstemaatilist viga.

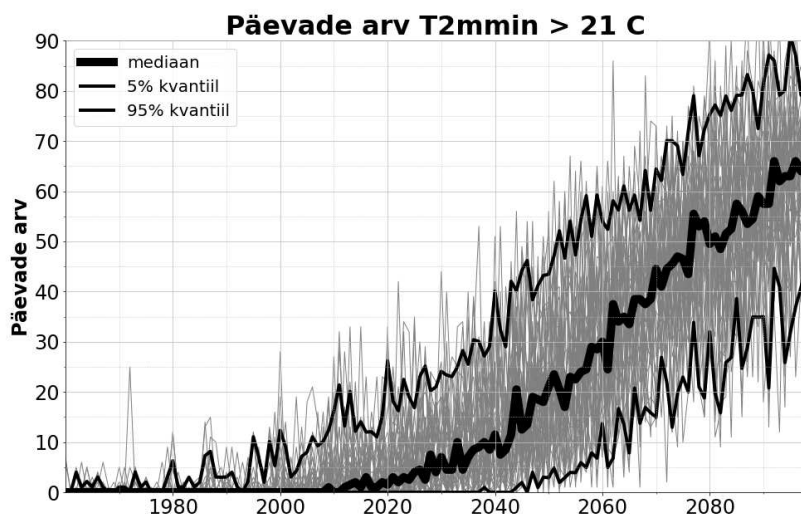
Joonisel 4 on toodud keskmine päevade arv aastas, mil ööpäeva maksimaalne temperatuur ületab 32°C vähemalt ühes Eesti punktis. Jooniselt on näha, et aastani 1994 oli päevade mediaanvaärtus 0. See tähendab et tõenäosus oli üle 50%, et temperatuuri maksimum ei ületa aasta jooksul kordagi 32°C . Aastaks 2020 on mediaan tõusnud juba kolmeni ning 5% aastatest võib selliste maksimaalsete temperatuuridega päevade arv olla juba üle 10. Võrdluseks – aastatel 2004–2021 möödeti Võrus üle 32°C olevaid temperatuure 18-l päeval, neist 8 päeva aastal 2010. Kuid senine Eesti kõrgeim möödunud temperatuur $35,6^{\circ}\text{C}$ on jätkuvalt juba 1992. aasta augustist.

Joonist edasi vaadates on näha juba 2040. aasta paiku olukord, kus 95% aastatest esineb üle 32°C temperatuure. Ning kui selle sajandi alguses oli tegemist haruldase ekstreemse temperatuuriga, siis juba 2070-ndatel on sellise maksimumtemperatuuriga päevi keskmiselt terve kuu jagu ja ekstreemne aasta on selline, kus selliste päevade arv on alla kümne.

Kõrge temperatuuriga päevadesse toovad leevendust jahedad ööd, mil hooned saavad maha jahtuda. Keeruliseks läheb siis, kui ka ööd on palavad ja nii inimesed kui koduloomad ei saa ka öösiti taastuda päevasest ülekuumenemisest. Troopilis- teks öödeks nimetatakse Euroopas olukorda, kus öine temperatuur ei lange alla 20°C . Näiteks aastatel 2004–2021 esines Võru mõõtmisandmetes troopilisi öid 19 korral, neist viis aastal 2010. Kõige kuumemad troopilised ööd olid 2012. aastal, kui 28. juuli öine temperatuur ei langenud Võru meteojaamas alla $24,5^{\circ}\text{C}$ ning järgne-



Joonis 4. Päevade arv aastas, kui vähemalt ühes Eesti punktis on ööpäevane maksimaalne temperatuur kõrgem kui 32° C kliimaandmebaasi CESM-LE 40-liikmelise kliimaansambli andmetel.



Joonis 5. Päevade arv aastas, kui vähemalt ühes Eesti punktis on ööpäevane minimaalne temperatuur kõrgem kui 21° C kliimaandmebaasi CESM-LE 40-liikmelise kliimaansambli andmetel.

val ööl 23,4° C.

Ekstreemsete sündmuste esinemissagedus sõltub oluliselt valitud nivoost. Kliimaansamblite puhul ei omagi sisulist tähendust mitte konkreetne nivoo, vaid ekstreemsete sündmuste esinemissagedus erinevatel perioodidel. Joonisel 5 on toodud keskmine päevade arv aastas, mil ööpäeva minimaalne temperatuur ületab 21° C vähemalt ühes Eesti punktis. Troopilise öö definitsioonist ühe kraadi võrra soojema temperatuurilävendi valimisel lähtuti soovist, et ansambli lävendit ületavate päevade sagedus langeks ligikaudu kokku troopiliste ööde sagedusega Võru meteojaamas selle sajandi alguses.

Kui aastani 2040 prognoosib mudel troopiliste ööde arvu kasvutrendiks üks troopiline öö kahe aasta kohta, siis sealt edasi peaks igal järgneval aastal olema juba keskmiselt üks troopiline öö rohkem. Kui möödunud sajandil olid troopilised ööd haruldased sündmused, siis selle sajandi lõpus peaks selliseid öid olema igal aastal keskmiselt kahe kuu jagu, kusjuures 90% usaldusintervall oleks 30 kuni 85 troopilist ööd aastas.

Kas kliimamuutusega on mõtet võidelda?

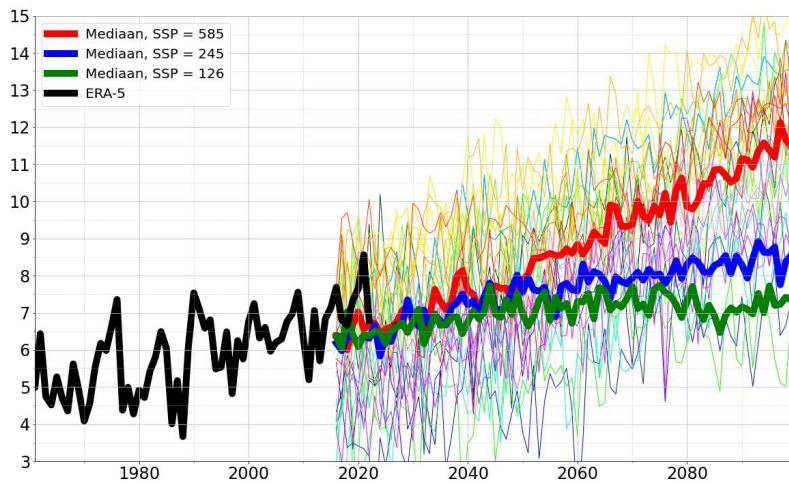
Vastus sellele küsimusele sõltub meid huvitavast ajaskaalast. Joonistel 2 ja 3 on näha, et aastani 2050 pole vähemalt temperatuuri osas olulist vahet, kas globaalsel kliimakäitumisel püritakse kliimanetraalsuse poole või jätkub peamiselt süsinikupõhine majandusmudel. Kusjuures toimuvate kliimamuutustega tuleb ikka taasesitavalt kohaneda. Kui perspektiiv on pikem kui 30 aastat, siis muutuvad kliimakäitumise valikute tulemused juba nähtavaks. Kogu sajandi teise poole kliima saab olema meie endi praeguste valikute tagajärg. Kuumade päevade ja troopiliste ööde arvutustes on eeldatud süsinikupõhist stsenaariumit SSP8.5. Kui sajandi keskpaigast järgiks kliima SSP2.6 stsenaariumi, võiks eeldada, et kuumade päevade ja troopiliste ööde arv Eestis on sajandi lõpus poole väiksem, kui joonistel 4 ja 5 esitatud. Kusjuures õpetaja Lauri soovitus teha pool rehkendust, kui tervet ei jõua, on asjakohane ka kliimamuutusega võitlemisel. Globaalne sotsiaalmajanduslik stsenaarium SSP4.5 ongi poolik rehkendus, kuid sajandi lõpuks on erinevus tegemata rehkendusest silmatorkavalt suur.

Tegelikult on veel võimalik vaadata kliimat Eestis perspektiiviga kümnetes tuhandetes aastates, nagu tegi akadeemik Raukas. Siis on lühiajalised inimtekkelised kasvuhooonegaaside kontsentratsiooni tõusud kliima seisukohast ebaolulised, võrreldes Milankovići tsüklitega.

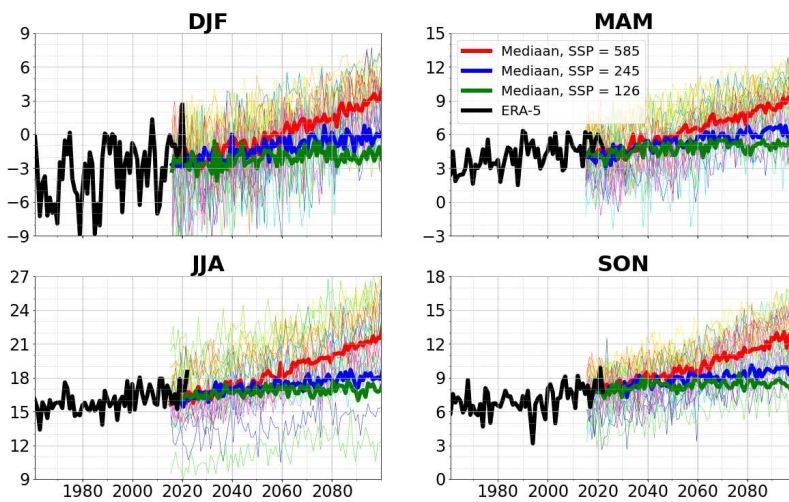
Kasutatud kirjandus

- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E. 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937–1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>, 2016.
- Hersbach, H. ja kaasautorid, 2020. The ERA5 Global Reanalysis. *QJRMS*. doi: 10.1002/qj.3803.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., 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, and B. Zhou (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi: 10.1017/9781009157896.
- Jaagus, J. 2006. Climatic changes in Estonia during the second half of the 20th century in relationship with changes in large-scale atmospheric circulation. *Theoretical and Applied Climatology*, 83, 77–88.
- Kay, J. E. ja kaasautorid, 2015. The Community Earth System Model (CESM) large ensemble project: A community resource for studying climate change in the presence of internal climate variability. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 1333–1349, doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00255.1>



E. Jakobson: Joonis 2. Eesti aastakeskmine maapinnalähedane temperatuur ERA-5 järelanalüüsimudeli (1960–2021) ja kliimamudelite ansambli CMIP6 (2015–2100) andmetel. Kliimaprojektsioonid on toodud erinevate kasvuhoonegaaside kontsentratsioonistsenaariumite kohta.



E. Jakobson: Joonis 3. Eesti sesoonikeskmine maapinnalähedane temperatuur ERA-5 järelanalüüsimudeli (1960–2021) ja kliimamudelite ansambli CMIP6 (2015–2100) andmetel. Kliimaprojektsioonid on toodud erinevate kasvuhoonegaaside kontsentratsioonistsenaariumite kohta.