



Tooma soojaama aurumismõõtmiste võrdlev analüüs

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Laura Nummert

Üliõpilaskood: 233271LARB

Juhendaja: Arne Männik, Taltech Meresüsteemide instituut, vanemteadur

Kaasjuhendaja: Katriin Käärrik, Taltech Meresüsteemide instituut, doktorant-nooremteadur

Õppekava: Maa süsteemid, kliima ja tehnoloogiad

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Laura Nummert

[allkiri ja kuupäev]

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Arne Männik

[allkiri ja kuupäev]

Kaasjuhendaja: Katriin Käärik

[allkiri ja kuupäev]

Sisukord

Annotatsioon	3
Abstract	4
Jooniste loetelu	5
Tabelite loetelu.....	7
1. Sissejuhatus	8
2. Teoreetiline taust.....	9
2.1. Aurumine Läänemere piirkonnas	9
2.2. Aurumise mõõtmine.....	10
3. Metoodika	14
3.1. Mõõtmisjaamade tutvustused	14
3.2. Statistiline- ja trendianalüüs.....	15
3.3. ERA5 järelanalüüs.....	16
4. Tulemused	18
4.1. Aurumine jaamades	18
4.2. Statistilised karakteristikud ja ajaline jaotus	19
4.3. Andmete võrdlus ERA5-Land järelanalüüsiga.....	21
4.4. Trendianalüüs.....	22
5. Järeldused ja arutelu.....	26
Kokkuvõte.....	28
Tänuavaldused.....	29
Kirjanduse loetelu.....	30

Annotatsioon

Bakalaureusetöös analüüsitakse Tooma soojaamas mõõdetud aurumist ning võrreldakse tulemusi Tiirikoja järvejaama ja Kuusiku meteoroloogiajaama andmetega. Töös uuritakse aurumise statistilisi karakteristikuid, hooajalist jaotust ning trende vahemikus 1960-2025. Lisaks hinnatakse ERA5-Land järelanalüüsi usaldusväärsust Eesti aurumisandmete kirjeldamisel.

Tulemused näitasid, et kõrgeim aurumine toimus Tooma soojaama laukast, kus aastaseks keskmiseks oli 511,1 mm (perioodil 1968-2025). Tooma soojaama soopinna aurumise keskmiseks oli 340,6 mm/aastas (1960-2025), kusjuures Tiirikoja järvejaama (1953-2014) ning Kuusiku meteoroloogiajaama (1972-2014) aurumishulgad olid Tooma soopinna aurumisega sarnased (keskmistega vastavalt 347,3 ja 335,9 mm/aastas). Jaamade aurumishulgad järgisid sarnast hooajalist mustrit ning suurim oli aurumine juunis ja juulis. Aurumine ületas sademeid kõigis jaamades mais ja juunis.

ERA5-Land kirjeldas aastatevahelisi kõikumisi hästi (Pearsoni kordajaga 0,85-0,86), kuid alahindas lauka ja ülehindas soopinna aurumist. Trendianalüüs näitas Tooma laukast aurumisel aastatel 1968-2025 selget olulist langevat trendi -2,6 kuni -3,27 mm/aastas ($p < 0,001$), mis oli tugevaim suvekuudel. Soopinna aurumisel leiti samuti aastatel 1960-2025 langev, kuid statistiliselt ebaoluline trend. ERA5-Land järelanalüüsi koguaurumine näitas 1960-2025 aastatel olulist kasvavat trendi +0,50 kuni +0,51 mm/aastas ($p < 0,001$). Leitud erinevus langevate mõõdetud aurumise trendide ja ERA5-Landi kasvava koguaurumise trendi vahel näitab aurumisparadoksi tunnuseid.

Comparative analysis of evaporation measurements at Tooma bog station

Abstract

This bachelor's thesis analyses Tooma bog stations evaporation measurements and compares the results with data from the Tiirikoja lake station and the Kuusiku meteorological station. The study examines the statistical characteristics of evaporation, seasonal distribution and time trends between 1960 and 2025. Additionally, the validity of the ERA5-Land reanalysis dataset for describing Tooma bog stations evaporation data is assessed.

The results showed that the highest evaporation occurred from the open water surface at Tooma station, where the annual average was 511.1 mm (for the years 1968-2025). The average evaporation from the bog surface at Tooma was 340.6 mm/year (1960-2025), with similar evaporation amounts at Tiirikoja lake station (1953-2014) and Kuusiku meteorological station (1972-2014) with averages of 347.3 and 335.9 mm/year, respectively. Stations showed a similar seasonal pattern, with peak evaporation in June and July. Evaporation exceeded precipitation at all stations in May and June.

ERA5-Land described interannual variability well (with a Pearson coefficient of 0.85-0.86), but underestimated evaporation from the water surface and overestimated evaporation from the bog surface. The trend analysis showed a clear significant decreasing trend in open water evaporation at Tooma in 1968-2025 from -2.6 to -3.27 mm/year ($p < 0.001$), which was strongest in the summer months. A decreasing but statistically insignificant trend was also found in evaporation from the bog surface from 1960 to 2025. In contrast total evaporation from the ERA5-Land reanalysis showed a significant increasing trend from +0.50 to +0.51 mm/year ($p < 0.001$) (during 1960-2025). Signs of the evaporation paradox were found, due to the difference between increasing total evaporation and decreasing measured evaporation.

Jooniste loetelu

Joonis 1. Laukast aurumise mõõteseadeldis VDM-100, mis paigaldati 2021 aasta kevadel Tooma soojaama (Miina Krabbi, isiklik suhtlus, 17.02.2026).

Joonis 2. GGI-B-1000 tüüpi soopinna aurumise mõõtevahend, mis oli Toomal kasutuses aastatel 1960-2024 (Miina Krabbi, isiklik suhtlus, 17.02.2026).

Joonis 3. 2024 aasta juunis paigaldatud uus soopinna aurumise mõõteseadeldis, mis teostab mõõtmisi ööpäevaringselt (Miina Krabbi, isiklik suhtlus, 17.02.2026).

Joonis 4. Aurumise mõõtejaamad Eestis: Tooma soojaam, Tiirikoja järvejaam, Kuusiku meteoroloogiajaam.

Joonis 5. Aurumise mõõtepäevade osakaal maksimumist (mai-oktoober) jaama ning aasta kaupa.

Joonis 6. Aastased aurumise summad Eesti jaamades vahemikus 1953-2025 (maist oktoobrini). Sinise joonega on näidatud Tooma laukast aurumist (1968-2025), oranžiga soopinnalt aurumist (1960-2025), rohelisega aurumist Tiirikoja järvejaamas (1953-2014) ning punasega Kuusiku meteoroloogiajaamas (1972-2014).

Joonis 7. Aurumise (roheline joon) ja sademete (sinine joon) summad maist oktoobrini Tooma soojaamas (aurumine soopinnalt 1960-2025 ning aurumine laukast 1968-2025), Kuusiku meteoroloogiajaamas (1972-2014), Tiirikoja järvejaamas (1953-2014). Rohelisega on varjutatud alad, kus aurumine ületab sademeid.

Joonis 8. Tooma soojaama veepinna kuise ja aastase aurumishulga jaotus (01.05.1968-22.10.2025, maist oktoobrini.).

Joonis 9. Tooma soojaama soopinna kuise ja aastase soopinna aurumishulga jaotus (1960. mai-2025. oktoober, maist oktoobrini)

Joonis 10. Kuude lõikes aurumise- ja sademetehulga jaotused Kuusiku meteoroloogiajaamas (1972-2014), Tooma soojaamas soopinnalt (1960-2025) ja veepinnalt (1968-2025), Tiirikoja järvejaamas (1953-2014).

Joonis 11. ERA5-Land kuise aurumishulga (mm/kuu) võrdlus Tooma soojaama aurumismõõtmistega veepinnalt (punase joonena, 1968-2025) ning soopinnalt (roheline joonena, 1960-2025).

Joonis 12. ERA5-Land võrdlus Tooma soojaama aurumismõõtmistega. Vasakpoolsel graafikul on võrreldud ERA5-Land aurumist Tooma veepinna aurumisega, parempoolsel on võrreldud ERA5-Land aurumist Tooma soopinna aurumisega. Graafikud näitavad vastavalt kui palju ERA5-Land keskmiselt kuiselt erineb mõõdetud aurumisest (ERA5-mõõdetud).

Joonis 13. Tooma soojaama soopinna aurumise trendianalüüs aastatel 1960-2025 (kuudel maist oktoobrini). Esimesel joonisel on näidatud 10-aastane libisev keskmine ja aurumise aastased summad koos lineaarse trendijoone ning Mann-Kendalli Seni trendijoonega. Teisel joonisel on näidatud keskmist aastast soopinna aurumist WMO normperioodidel (1961-1990, 1971-2000, 1981-2010, 1991-2020). Esimeses kokkuvõtvas tabelis on näidatud lineaarregressiooni meetodil tehtud trendianalüüsi tulemused (lineaarne trend koos R^2 ja p-väärtusega). Teises kokkuvõtvas tabelis on näidatud Mann-Kendalli meetodil leitud trendianalüüsi tulemused (Seni kalle, R^2 , Mann-Kendalli S-statistik, Z-skoor ja p-väärtus).

Joonis 14. Tooma soojaama laukast aurumise trendianalüüs aastatel 1968-2025 (kuudel maist oktoobrini). Esimesel graafikul on toodud veepinna aurumise aastased summad, 10-aastane libisev keskmine ning lineaarregressiooni ja Mann-Kendalli Seni trendijoon. Teisel graafikul on näidatud keskmine ööpäevane laukast aurumine maist oktoobrini. Kolmandal joonisel on näidatud keskmist aastast laukast aurumist WMO normperioodidel (1961-1990, 1971-2000, 1981-2010, 1991-2020).

Aastad 1961-1990 on märgistatud tärniga, sest laukast aurumine algab aastast 1968. Neljandal graafikul on toodud kuude kaupa veepinna aurumise trendid koos nende usaldusväärsusega. Üleni värvitud tulbad näitavad lineaarregressiooni trende kuude kaupa ning viirutatud tulbad näitavad Mann-Kendalli trende kuude kaupa. Esimeses kokkuvõttes tabelis on näidatud lineaarregressiooni meetodil tehtud trendianalüüsi tulemused (trendi kalle koos R^2 -ga ja p-väärtusega). Teises kokkuvõttes tabelis on näidatud Mann-Kendalli meetodil tehtud trendianalüüsi tulemused (Seni kalle, R^2 , Mann-Kendalli S-statistik, Z-skoor ning p-väärtus).

Joonis 15. ERA5-Land trendianalüüs Tooma soojaama asukohas aastatel 1960-2025 (maist oktoobrini). Esimesel graafikul on toodud ERA5-Land aurumise aastased summad koos 10-aastase libiseva keskmisega ning lineaarse ja Seni trendijoonega. Teine graafik näitab keskmist ööpäevast aurumist maist oktoobrini. Kolmandal joonisel on näidatud keskmist aastast soopinna aurumist WMO normperioodidel (1961-1990, 1971-2000, 1981-2010, 1991-2020). Neljas graafik näitab trende kuude kaupa koos nende usaldusväärsustega. Üleni värvitud tulpades on trendid leitud lineaarregressiooni meetodil ning viirutatud tulpades on trendid leitud Mann-Kendalli meetodil. Esimeses kokkuvõttes tabelis on näidatud 1960-2025 aastate keskmine aastane aurumise summa ning lineaarregressiooni meetodil tehtud trendianalüüsi tulemused (trend koos selle R^2 -ga ning p-väärtusega). Teises kokkuvõttes tabelis on näidatud Mann-Kendalli meetodil tehtud trendianalüüsi tulemused (Seni kalle, R^2 , Mann-Kendalli S-statistik, Z-skoor ning p-väärtus).

Tabelite loetelu

Tabel 1. ERA5-Land võrdlus Tooma soojaama veepinna ja soopinna aurumisega. Tabelis on toodud ERA5-Land keskmine erinevus Tooma aurumishulkadest, ruutkeskmine viga ja Pearsoni korrelatsioonikordaja.

1. Sissejuhatus

Veeaur on üks olulisimaid gaase atmosfääris. Selle kondenseerumisel moodustuvad pilveosakesed, mis kasvades langevad Maale sademetena. Muutudes aurust veeks (kondensatsioon) või jääks (härmatumine) eraldub suures koguses latentset soojust, mis on atmosfääris tähtsaks energiaallikaks. Aurumine, lisaks sulamisele ja sublimatsioonile, on keskkonda jahutav protsess. Aurumist mõjutavad peamiselt temperatuur, tuul ja õhuniiskus (Ahrens & Henson, 2022).

Vee aurumine, kas veepinnalt või pinnaselt, on üks hüdroloogilise tsükli peamisi osasid. Vesi aurub, kondenseerub ja sajab pidevalt, ning globaalsel tasandil on aurumine ligikaudselt võrdne sademetega (Graham jt, 2010). Lisaks veekogudele eraldavad transpiratsiooni kaudu veeauru ka taimed (Ahrens ja Henson, 2022). Atmosfääris leiduva veeauru kogus jääb pikaajaliselt umbes samaks, aga maapinna kohal ületavad sademed aurumist, ning ookeanide kohal on vastupidi (Graham jt, 2010). Euroopas on sademed muutunud üha muutlikumaks – lühikesed kuid ekstreemsed vihmatormid viitavad suurenenud veeauru kogusele atmosfääris (C3S/ECMWF ja WMO, 2026).

Globaalne veeringe mõjutab Maa kliimat mitmel viisil. Vesi mängib erinevaid rolle atmosfääri jahutamisel ja soojendamisel. Umbes pool maapinna jahtumisest tuleneb vee aurumisest, kuid samal ajal on veeaur tugev kasvuhoonegaas, mis moodustab umbes 60-75% tervest kasvuhooneefektist Maal (Chahine, 1992; Trenberth, 2007). Kliimamuutuste kontekstis on ka oluline mõista, kuidas Maa veeringe võib muutuda. Soojeneva kliima puhul lähtutakse sageli eeldusest, et atmosfääri suhteline õhuniiskus jääb samaks, kuid kasvab eriniiskus. Siis on võimalik Clausius-Clapeyroni võrrandi põhjal järeldada, et atmosfääris oleva veeauru sisaldus suureneb temperatuuri kasvades umbes 6-7% iga 1°C kohta. Seda seostatakse globaalse veetsükli intensiivistumisega (Koutsoyiannis, 2020). Prognooside kohaselt intensiivistab kliimasoojenemine Maa globaalset veeringlust, sealhulgas selle varieeruvust (IPCC, 2023). Veetsükli kiirenemine on oluline ka ühiskondlikust vaatenurgast, sest mitmed kliimamuutustest tulenevad ohud on seotud just pöudadega või üleujutustega (Koutsoyiannis, 2020).

Suurem veeauru kogus põhjustab keskmiselt suuremaid sademete koguseid, aga need hulgad ei ole maailmas ruumiliselt ühtlaselt jaotunud (Bates jt, 2008). Suurenev veeauru kogus atmosfääris võimendab positiivse tagasiside tsükli kaudu omakorda veelgi kasvuhooneefekti (Ahrens ja Henson, 2022). Ka Läänemere piirkonnas eeldatakse õhutemperatuuri tõustes sademete ja aurumise suurenemist. Tuleviku kliimaga kaasnevad soojemad suved võivad põhjustada märkimisväärset aurumise kasvu ning mõjutada jõgede hooajaliste vooluhulkade mustreid (The BACC II Author Team, 2015). Seetõttu on oluline uurida muudatusi aurumise mustrites ka Eestis.

Bakalaureusetöö peamine eesmärk on analüüsida Tooma soojaama aurumismõõtmiseid ning teha võrdlevat analüüsi Tiirikoja järvejaama ning Kuusiku meteoroloogiajaama andmetega. Töös uurin aurumise statistilisi karakteristikuid ning selle ajalist jaotust, lisaks analüüsin Tooma soojaama trende. Töö sekundaarne eesmärk on võrrelda Tooma soojaama aurumist ERA5 andmestikuga ning hinnata viimase usaldusväärsust ja kasutatavust Eestis.

2. Teoreetiline taust

2.1. Aurumine Läänemere piirkonnas

Läänemere piirkonnas on aurumine suurim suvel, ületades sel perioodil üldiselt ka sademeid. Kuna kliimamuutuste tõttu prognoositakse tõusvaid temperatuure ja sellest tulenevat aurumise kasvu, on selle uurimine piirkonna veeringe mõistmiseks üha olulisem (The BACC II Author Team, 2015).

Piirkonnas on aurumist uuritud mitmetes riikides, aga enim Rootsis, kus on läbi viidud hulk põhjalikke uuringuid. Järgnev ülevaade Rootsi aurumisuuringutest on koostatud Sven Halldini (1988) kokkuvõtva artikli põhjal. Erinevate maakatte tüüpide aurumist on uuritud mitmekülgset, näiteks Stilfelt (1944) uuris metsade aurumist, lõigates puude võsusid ning kaaludes nende massi vähenemist. Ta leidis, et metsad võivad vähendada piirkonna veehulka, sest puud aurustavad suures koguses vett ning sademetest ei piisa selle kompenseerimiseks. Samas leidis Kihlberg (1958), et metsaga aladel on aurumine suurem, kuid mitte piisavalt, et toimida kuivendajana.

Rabade aurumist Rootsis on vähe uuritud, kuid Johansson (1974) mõõtis Komosse märgalal Lõuna-Rootsis GGI-3000 aurumisanumaga 1972. aasta aprilli-oktoobri aurumishulgaks 460 mm. Põllumajandusliku maa aurumist on uurinud Högstrom ja Larsson (1968), kes mõõtsid seda Lõuna-Rootsi põllumajanduslikult liivaselt pinnaselt, ning isegi talvel mõõtsid märkimisväärse aurumishulgana 5-30 mm/kuus. Järvede aurumist on uuritud põhjalikult, näiteks mitmeid analüüse on läbi viinud Wallén (1914, 1917, 1929, 1934), Ångström (1920, 1939) jpt. Rodhe (1977) pakkus välja meetodi aurumise hindamiseks, kasutades ainult õhutemperatuuri ning insolatsiooni andmeid. Lume aurumist on uurinud Hamberg (1896), Westman (1901) ja ka Bengtsson (1980), kes leidis, et lumelt aurumine on väikese hulga tõttu veebilansis vähese olulisusega (Halldin, 1988).

Soomes on aurumist analüüsinud Vehviläinen ja Huttunen (1977). Nad koostasid potentsiaalse aurumise mudeli, mis põhineb keskmisel päeval temperatuuril, aastaajal ning sademetel. Mudel kalibreeriti aurumisanuma mõõtmiseid kasutades. Mudel kalibreeriti aurumisanuma mõõtmiseid kasutades ning seejärel rakendati seda SILMU keskmisele ehk "parima oletuse" stsenaariumile, et leida tulevased potentsiaalse aurumise hulgad. SILMU oli ulatuslik Soome kliimamuutuste uurimisprojekt, mille raames koostati kolm võimalikku kliimastenaariumit, mis iseloomustavad tuleviku kliima ebakindlust Soomes. Kasutades keskmise stsenaariumi andmeid leiti, et aastane potentsiaalne aastane aurumine suureneks 6%, 13%, 23% aastatel 2020, 2050, 2100. Olulise probleemina leiti, et aurumine järvedelt kasvab oluliselt ning suviti võib lausa ületada sademeid, põhjustades äravoolu vähenemist.

Lisaks uurisid Soomes aurumist ka Pirinen jt (2022), kes koostasid 40-aastase Soome evapotranspiratsiooni andmestiku aastatele 1981-2020. Veel uurisid Moroizumi jt (2014) Soome aurumisanumate trende ja leidsid viies jaamas aurumise kahaneva trendi, kuid kahes jaamas kasvava trendi. Kahanevate trendide põhjuseks oli sademete kasv ning Penmani võrrandi aerodünaamilise teguri suurenemine. Kasvavate trendide põhjused jäid ebaselgeks.

Eestis on aurumist analüüsitud pigem vähe. Eesti aurumise andmeid on aga kasutatud atmosfääri aurumisenõudluse hindamisel, mille töögrupis osales Jaak Jaagus ja selle võrdluse tulemusi on esitatud laiendatud konverentsi teesidena. Analüüsis arvutati Penman-Moneith valemiga

evapotranspiratsioon, kasutades andmeid Eesti jaamadest, kaasaarvatud Tooma soojaamast, Kuusiku meteoroloogiajaamast ning Tiirikoja järvejaamast. Analüüsi tuletatud evapotranspiratsiooni ruumilist ja ajalist varieeruvust ning selle peamisi mõjureid. Evapotranspiratsioon näitas üleriigilist positiivset trendi (5,3 mm kümnendi kohta ehk +0,53 mm/aastas) ja sellele leiti kõrge korrelatsioon ajavahemikus 1968-2005 mõõdetud anumatest aurumisega. Evapotranspiratsioon on tugevas positiivses korrelatsioonis päikesepaistega ja maksimaalse temperatuuriga, kuid negatiivses korrelatsioonis suhtelise õhuniiskusega (Domínguez-Castro jt, 2017).

Lisaks on ka satelliitidega püütud hinnata aurumist Balti riikidest. Olulise tulemusena toodi välja, et evapotranspiratsiooni muutused on tingitud peamiselt kliimamuutustest, mitte maakasutuse muutustest. Leiti veel, et osaliselt seletab jõgede vooluhulga vähenemist evapotranspiratsiooni kasv. Analüüs näitas, et evapotranspiratsioon ületab sademeid mais +31,1 mm, juunis +52,5 mm ning juulis +36,3 mm, mis võib põhjustada pinnaseniiskuse ja põhjavee kättesaadavuse vähenemist. Toodi ka välja, et taimede kasvuperiood on pikenenud umbes 11-12 päeva võrra, mis suurendab evapotranspiratsiooni aprillis ja septembris. Kusjuures on põllumaa sademete puudujäägile tundlikum kui mets, sest sügavamad puude juured võimaldavad niiskust paremini kätte saada. Seetõttu võib kuival kasvuperioodil saagikus väheneda 25-45% (Montibeller jt, 2021).

Talvise aurumise mõõtmine on keeruline, sest siis on aurumisanumad sageli jäätunud. Nistor jt (2022) on koostanud Euroopa potentsiaalse evapotranspiratsiooni andmestiku kasutades Thornthwaite'i valemit, mis katab ka talvekuud. Tulemused näitasid, et Eesti aladel oli 1990. (1961-1990) kui ka 2020. (2011-2040) aastatel detsembrist märtsini potentsiaalne evapotranspiratsioon alla 10 mm/kuus. Muutus ilmnes novembrikuus, kus 1990. aastate alla 10 mm tasemelt toimus kasv 2020. aastatel 10-30 mm/kuus vahemikku. Kokkuvõttes siiski on talvine aurumine üsna madal.

Laiemas Läänemere piirkonna kontekstis on trende uuritud ka teistes riikides. Saksamaal leiti, et evapotranspiratsioon aastatel 1970-2000 kasvas, kuid hiljem on see stabiliseerunud, või isegi hakanud kahanema (Bruno ja Duethmann, 2024). Poolas aastatel 1961-2020 teostatud uuringus leiti märgatav aurumise kasv, kus kõige suurem aurumiskasv toimus suvel, kuid samal ajal sademed ei muutunud oluliselt, mis tekitab suurenenud põuahtu (Bartczak jt, 2024). Speranskaya (2011) uuris Läänemere valgala piirkonna veeringe erinevaid elemente, ning leidis, et valgala idapoolseimas osas on aurumisanumate aurumises väike tõusev trend, ning oluline langev trend ida- ja kaguosades. Need muutused viitavad Speranskaya sõnul niiskustingimuste ebaühtlastele muutustele piirkonnas.

2.2. Aurumise mõõtmine

Maapealset aurumist saab iseloomustada aurumisanumast aurumise, näilise potentsiaalse aurumise või tegeliku evapotranspiratsiooniga. Igaüks neist kolmest kirjeldab aurumist veidi erinevalt ning koos annavad need tervikliku ülevaate aurumisprotsessidest, sidudes atmosfääri aurumisenõudluse (kui palju võiks auruda ehk potentsiaalne aurumine), keskkonna võimekuse (kui palju tingimused lubavad ehk tegelik evapotranspiratsioon) ja veepinnalt aurumise (anumast aurumine), mida mõjutavad kohalikud pinnatingimused ja mikrokliima. Kliimamuutused kajastuvad ka aurumises, mida näitavad kõigi kolme mõõdiku muutuvad trendid (Lee ja Woo, 2025).

Potentsiaalse aurumise trendid näitavad sarnasust anumatest aurumise trendidele, kuid suurema varieeruvusega.

Pinnasel, kus niiskus ei ole piiravaks teguriks, on tegelik aurumine võrdne potentsiaalse aurumisega ja aurumisanum on selle indikaatoriks. Kui aga pinnasel niiskus väheneb, ei suuda tegelik aurumine enam potentsiaalset aurumist toetada ning kasutamata energia ilmneb tuntava soojusvoo (*sensible heat flux* ΔH) kasvuna, mis omakorda kiirendab aurumist anumast. Selle tulemusena ei näita aurumisanuma aurumine alati tegelikku aurumist ja aurumisanuma aurumise mõõtmise interpreteerimiseks on vaja lisainformatsiooni ümbritsevast keskkonnast. Aurumisanuma aurumist võib kasutada tegeliku aurumise iseloomustamiseks siis, kui niiskuse vajakut ei teki (Brutsaert ja Parlange, 1998).

Aurumise mõõtevahendeid on mitmeid. Lüsimeetrit (aurumisanumat) ehk veega või pinnasega täidetud anumast on ilmselt kõige pikemalt ja kõige rohkem kasutatud (Virta, 1966). Eestis on samuti kasutusel olnud erinevad aurumisanumad. Nii Tiirikoja järvejaamas kui ka Kuusiku meteoroloogiajaamas kasutati mõõtmisvahendit GGI-500-50. Tooma soojaamas laukast aurumise mõõtmisel kuni aastani 2020 kasutati GGI-3000 mudelit, ning alates 2021. aastast mudelit VDM-100 (Joonis 1). Viimane teostab veetaseme mõõtmisi ööpäevaringselt ja edastab andmed otse andmebaasi (Miina Krabbi, isiklik suhtlus, 17.02.2026).

GGI-3000 oli väga levinud aurumismõõtmiskomplekt Nõukogude Liidus ja ka Hiinas (Fu jt, 2009). See koosneb aurumisanumast (3000 cm², 61,8 cm diameetriga), sademetemõõtjast (samuti 3000 cm²) ning mahubüretist, millega mõõdeti veetaseme kõrgust. Aurumishulga mõõtmiseks tuli mõõta aurumisanuma veetaset ning sademete kogust. Kuna sademetemõõtja ning aurumismõõtja pindala on sama, on need omavahel võrreldavad. Edasi leitakse aurumise hulk millimeetrites, liites veetaseme langusele sademete hulga (Glavnoye upravleniye gidrometeorologicheskoy sluzhby pri Sovete Ministrov SSSR, 1961; Fu jt, 2009).



Joonis 1. Laukast aurumise mõõteseadeldis VDM-100, mis paigaldati 2021 aasta kevadel Tooma soojaama (Miina Krabbi, isiklik suhtlus, 17.02.2026).

Aurumist soopinnalt mõõdeti Toomal aastani 2024 kasutades GGI-B-1000 mõõtevahendit, mis on neljast soo pinnasega täidetud lüsimeetrist koosnev seadeldis (Joonis 2). Mõõtmised viidi läbi iga viie päeva tagant kasutades manuaalset mehaanilist tõsteseadeldist. Lüsimeetri tunnid kaaluti, tõstes need tõsteseadeldisega kaalule. Aurumise arvutamiseks kasutati kaalumistulemuste

erinevust ning sademete hulka. Alates 2024. aasta juunist paigaldati uus Keskkonnaagentuuri välja töötatud mõõteseade, mis teostab mõõtmisi ööpäevaringselt (Joonis 3) (Miina Krabbi, isiklik suhtlus, 17.02.2026).



Joonis 2. GGI-B-1000 tüüpi soopinna aurumise mõõtevahend, mis oli Toomal kasutuses aastatel 1960-2024 (Miina Krabbi, isiklik suhtlus, 17.02.2026).



Joonis 3. 2024 aasta juunis paigaldatud uus soopinna aurumise mõõteseadeldis, mis teostab mõõtmisi ööpäevaringselt (Miina Krabbi, isiklik suhtlus, 17.02.2026).

Peale eelnevalt käsitletud aurumisanumate on muu maailma kirjanduses mainitud kõige rohkem klass-A aurumisanumat. See on 120,7 cm diameetriga ning 25,4 cm sügav. Hiinas on levinud modifitseeritud variant mudelist GGI-3000, mida kutsutakse E601 aurumisanumaks. Sõltuvalt aurumisanumast on pakutud välja erinevaid koefitsiente, millega saab anumast aurumist teisendada kogaurumiseks. Näiteks väiksematel 20 cm diameetriga anumatel on see 0,60 ning E601 anumal on see 1,07 (Fu jt, 2009).

Aurumist saab ka mitmel viisil arvutada. Kõige täpsemaks peetakse Penman-Moneith valemit, kuid see vajab mitmeid parameetreid, mis pole eriti lihtsalt kättesaadavad. Seetõttu kasutatakse lihtsamaid ja empiirilisemaid valemeid (Ansoorge ja Beran, 2019). Näiteks saab aurumist leida kasutades Maa kiirgusbilansi valemit, kui on olemas teised vajalikud komponendid. Teine variant on massiülekanne meetodi/aerodünaamilise meetodi kasutamine (*mass transfer method*), mille idee seisneb selles, et veepinna aurumine on enamjaolt samas proportsioonis tuule kiirusega ning veepinnal ja õhus oleva veeauru rõhu erinevuse korrutisega (Virta, 1966). Veel kasutatakse ka Thornthwaite'i valemit, millega saab leida potentsiaalset evapotranspiratsiooni. Ainsaks valemi

sisendiks on keskmine kuutemperatuur, millest tuletatakse nii aastane soojusindeks kui ka eksponent (Thorntwaite, 1948; Nistor jt, 2022).

Üks kliimamuutuse oodatavatest tagajärgedest on maapinnalähedase õhu kuivenemine, mis peaks omakorda kiirendama aurumise kiirust veekogudest, sealhulgas aurumisanumatest. Vaatamata keskmise temperatuuri tõusule on üle maailma märgatud vastupidist – anumatest aurumine on hoopis pidevalt vähenenud umbes 1-4 mm/aastas. Seda nähtust kutsutakse aurumise "paradoksiks" (Fu jt, 2009; Lee ja Woo, 2025). Sellised trendid võivad tuleneda päikesekiirguse vähenemisest suurenenud pilvisuse tõttu, tuulekiiruse vähenemisest, aerosoolide ja kasvuhoonegaaside kontsentratsiooni kasvust või atmosfääri tsirkulatsiooni nõrgenemisest (Lee ja Woo, 2025; Duan jt, 2020), ehk kokkuvõttes teised aurumist mõjutavad tegurid muutuvad viisil, mis ületab temperatuuri tõusu mõju.

Golubev jt (2001) uurisid seda paradoksi endises Nõukogude Liidus ning Ameerikas ja nad leidsid, et mitmes asukohas, kus aurumisanuma aurumine on vähenenud, on hoopis tegelik aurumishulk kasvanud. Üks töös uuritud jaamadest asus Lätis, mis asub Tooma soojaamast umbes 200km lõuna pool. Antud jaama andmete põhjal leiti nõrk negatiivne korrelatsioon aurumisanuma aurumise ja tegeliku aurumise vahel ning seda ainult kuivematel aastatel. Niisketel aastatel korrelatsioon praktiliselt puudus.

Kuigi ülemaailmselt on leitud palju langevaid aurumisanuma trende, siis see ei ole nii päris igal pool. Näiteks osades põhjapoolsemates jaamades Kanada preerias, Taiwanis, Nigeerias ning eelnevalt mainitud kahes Soome jaamas on leitud ka kasvavaid trende. Kuigi Soomes nende trendide põhjuseid ei leitud siis Taiwanis leiti, et enim mõjutasid aurumist päikesepaiste, suhteline õhuniiskus ning temperatuur. Nigeerias oli põhjusteks tuule kiiruse kasvamine ja Kanada preerias oli mõjuriks vee aururõhu defitsiit (Fu jt, 2009; Dinpashoh jt, 2011; Moroizumi jt, 2014; Yu jt, 2002; Burn ja Hesch, 2007).

3. Metoodika

3.1. Mõõtmisjaamade tutvustused

Aurumist on Eestis mõõdetud kolmes mõõtejaamas: Tooma soojaamas, Tiirikoja järvejaamas, Kuusiku meteoroloogiajaamas (Joonis 4). Tooma soojaam on ainuke jaam, kus aurumist mõõdetakse tänapäevani. Tiirikoja järvejaamas ja Kuusiku meteoroloogiajaamas lõpetati aurumise mõõtmine aastal 2014.

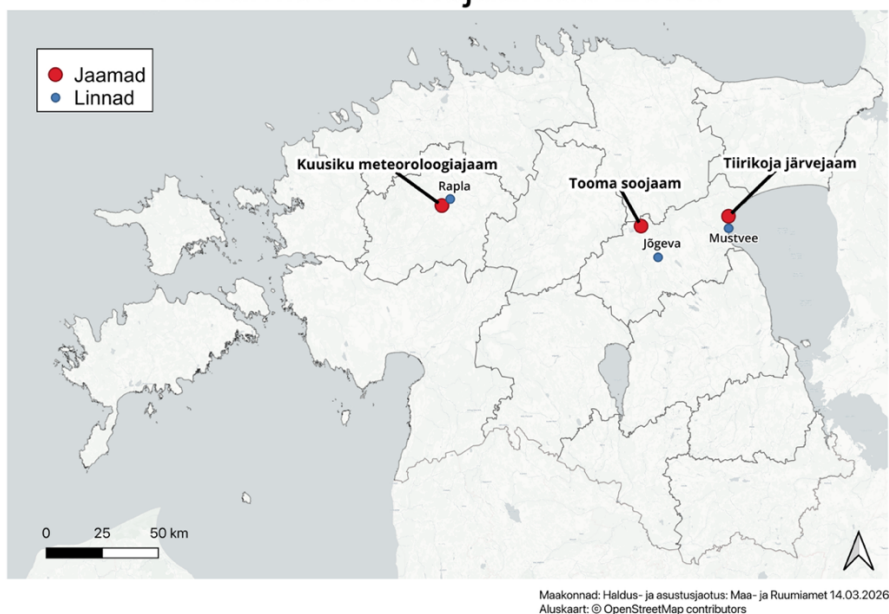
Jõgevamaal Tooma külas asuvas meteoroloogiajaamas on sademeid ja õhutemperatuuri mõõdetud juba 1893. aastast. 1950. aastal rajati sinna meteoroloogiajaama alusel soohüdroloogiajaam (Tooma soojaam), mis uurib tänase päevani soo mikromaastike veebilanssi ja mikrokliimat. Jaama teeb eriliseks selle unikaalsus, nimelt märgalaseid on üle maailma väga vähe nii detailselt uuritud (Keskkonnaagentuur, 2021). Mõõtmised toimuvad automatiseerituna aastaringselt mineraalmaal ja Männikjärve rabas paikneval meteoroloogiliste vaatluste väljakul. Seal mõõdetakse õhutemperatuuri, õhuniiskust, tuult, sademeid, temperatuuri maa- ja soopinnal ja ka turbalasundi ja mulla temperatuuri erinevatel sügavustel kuni 3,2 meetri sügavuseni.

Aurumist hakati Toomal mõõtma 1960. aastal soos peenra-älve mikromaastikul asuval meteoroloogilisel väljakul mudeliga GGI-B-1000 (Keskkonnaagentuur, 2025) ning 2024. aasta juunis paigaldati uus mõõteseade (Keskkonnaagentuur, 2025). Soopinna aurumise mõõtmised on puudu aastatel 2003-2004. Aurumist veepinnalt hakati mõõtma 1968. aastal mudeliga GGI-3000 ning 2020. aastal asendati vana mudel VDM-100 mudeliga (Keskkonnaagentuur, 2025). Veepinna aurumise mõõtmised on puudu aastal 1982 ning vahemikus 2003-2011 (Joonis 5). Kahjuks on 2003-2011 vahemiku andmed kaduma läinud ja Keskkonnaagentuuri arhiivist puudu.

Aurumist on mõõdetud ka Tiirikoja järvejaamas, mis asub samuti Jõgevamaal. Juba 1923 asutas sinna Tartu Ülikooli Meteoroloogia Observatoorium meteoroloogiajaama. 1946. aastal muudeti see ümber järvejaamaks, mille peamine ülesanne on uurida järve hüdrooloogilist ja meteoroloogilist režiimi. Vaatluseid tehakse rannal (meteoväljakul) ning Peipsi järvel (hüdrooloogilistel profiilidel) (Keskkonnaagentuur, 2022). Meteoroloogiaväljakul on aurumist mõõdetud aastatel 1953-2014 (Keskkonnaagentuur, 2023). Andmed on puudu aastast 1963 (Joonis 5).

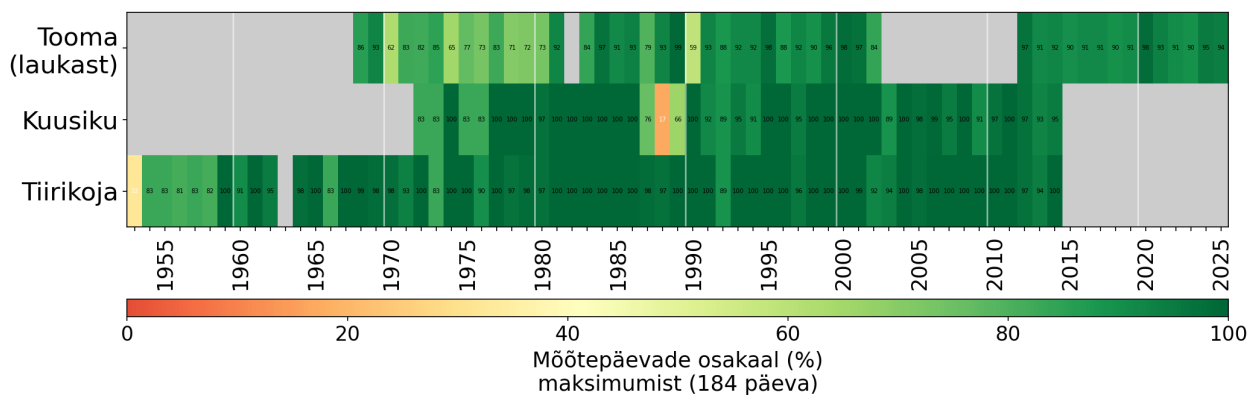
Kolmandaks jaamaks, kus aurumist on mõõdetud, on Kuusiku meteoroloogiajaam Raplamaal. Ilmavaatlust alustati seal 1920. aastal agrometeoroloogiajaamaga ühe riigimõisa tarbeks (Keskkonnaagentuur, 2022). Aurumise andmeid mõõdeti seal alates 1972 ning sarnaselt Tiirikoja lõpetati sellega 2014.

Aurumise mõõtejaamad Eestis



Joonis 4. Aurumise mõõtejaamad Eestis: Tooma soojaam, Tiirikoja järvejaam, Kuusiku meteoroloogiajaam.

Mõõtepäevade osakaal maksimumist (mai-oktoober) jaama ja aasta kaupa



Joonis 5. Aurumise mõõtepäevade osakaal maksimumist (mai-oktoober) jaama ning aasta kaupa.

3.2. Statistiline- ja trendianalüüs

Aurumishulkade sagedusjaotuste analüüsimiseks koostasid histogrammid Tooma soojaama laukast ja soopinnalt aurumise kohta kogu mõõteperioodi ulatuses. Histogrammide analüüsimiseks eemaldasid puuduvad ning nullväärtused. Histogrammid koostasid pythoni paketiga matplotlib. Jaotuste keskmised leidsid kasutades pandas paketti.

Trendianalüüsi eesmärk on anda statistiline hinnang sellele, kuidas aurumise väärtused on ajas muutunud. Trendianalüüs viidi läbi Tooma soojaama veepinna (igapäevased mõõtmised vahemikus 1968-2025, maist oktoobrini) ning soopinna aurumise andmete (igakuised mõõtmised 1960-2025,

maist oktoobrini) ja ERA5-Land andmetele aastatel 1960-2025. Kõigi andmestike puhul leidsin aastased summad. Andmete visualiseerimiseks leidsin ka 10-aastase libiseva keskmise. Trendianalüüsid teostasid nii lineaarregressiooni kui ka Mann-Kendalli meetodil.

Lineaarregressiooni läbiviimisel peab andmestik olema sõltumatu struktuuriga, erinevused trendijoone ja tegeliku mõõtmise vahel peavad järgima normaaljaotust ning olema konstantse dispersiooniga. Seetõttu viisin läbi Shapiro-Wilk normaaljaotuse kontrolli kasutades scipy paketti ning andmepunktide sõltumatust ja konstantset dispersiooni kontrollisin statsmodels paketi. Lineaarregressiooni analüüsi teostasid scipy paketi, mis andis trendi kalde (mm/aastas), determinatsioonikordaja R^2 , ning p-väärtuse.

Lisaks lineaarsele regressioonile teostasid Mann-Kendalli meetodil analüüsi kasutades pyMannKendall paketti. Mann-Kendalli testi eeliseks on see, et normaaljaotus pole vajalik ja test pole tundlik katkestuste suhtes. Väga kõrge positiivne S-väärtus viitab tõusvale trendile ning madal negatiivne väärtus viitab kahanevale trendile (Alhaji, jt, 2018). Testi null hüpoteesiks on et andmed on sõltumatud ja juhuslikult järjestatud ning ei sisalda monotoonset trendi. Trendi hindamiseks tuleb ka leida standardiseeritud S- statistik ehk Z-skoor. Z-skoor näitab trendi suunda ja selle statistilist olulisust, kus positiivne Z-skoor viitab kasvavale ja negatiivne kahanevale trendile. Kui aegridades esineb lineaarne trend, siis saab selle kallet hinnata kasutades Seni trendikalde meetodit. (Almazroui ja Şen, 2020; Alhaji, jt, 2018).

ERA5-Land trendianalüüsi andmed laadisin alla CDS (Copernicus Climate Data Store) API kaudu kasutades cdsapi pythoni paketti. Analüüsiks kasutasid koguaurumise päevaseid summasid (muutuja *total_evaporation*) vahemikus 1960-2025 alates maist kuni oktoobrini. Andmete alaks oli 58,8°-59,0N°, 26,2°-26,4°E. ERA5-Landi aurumise ühikuks on meetrites vee ekvivalent (*m of water equivalent*). Teisendasid andmed millimeetritesse ning muutsid väärtused positiivseks, kuna aurumine on ERA5 andmetes märgitud negatiivselt.

Päevased mõõtmisväärtused summeerisid kuude kaupa. Leidsid keskmised ja ruutkeskmised erinevused. Lisaks arvutasid Pearsoni korrelatsioonikordaja scipy paketi, mis annab ka p-väärtuse. Kõik eelnimetatud statistikud arvutati ka iga kuu kohta (mai-oktoober) eraldi, et tuvastada hooajalisi erinevusi ERA5-Landi täpsuses.

3.3. ERA5 järelanalüüs

Järelanalüüsid on meteoroloogia- ja kliimauuringutes tähtsad tööriistad, sest need täiendavad traditsioonilisi vaatluste analüüsimeetodeid. Järelanalüüside eesmärgiks on luua numbriliste ilmaprognoosmudelite andmete assimilatsiooni käigus varasematest atmosfääritingimustest rekonstruktsioone, mis oleks kooskõlas kõigi vaatlustega ning füüsikaliste protsessidega. Need on erinevalt reaalistest vaatlustest ühtlased nii ruumis kui ka ajas. Järelanalüüsid annavad võimaluse uurida ka muutujaid, mida päriselt mõõta ei saa (Hartmann jt, 2013), näiteks potentsiaalset evapotranspiratsiooni (Muñoz-Sabater, jt, 2021).

On loodud mitmeid globaalseid järelanalüüse, millest esimesed valmisid 1990. aastatel. Sellest ajast alates on toimunud pidev märkimisväärne areng järelanalüüsi kvaliteedis ning resolutsioonis (Hartmann jt, 2013). Lisaks globaalsetele järelanalüüsidele tehakse ka regionaalseid analüüse,

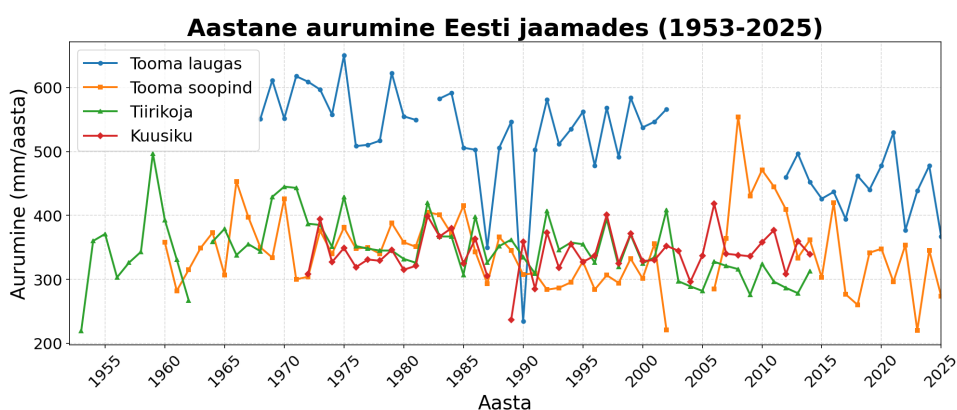
näiteks Läänemere piirkonnas BaltAn65+, kus tehti järelanalüüs ajavahemikule 1965-2005 (Luhamaa jt, 2010). Kuigi järelanalüüsid annavad kliimast olulise ülevaate, peab nendest tuletatud pikaajalistesse trendidesse suhtuma ettevaatusega, sest vaatlusandmete katvus ja kvaliteet on ajas muutnud, mis võib trende moonutada (Hartmann jt, 2013).

ERA5 on ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ehk Euroopa Keskpika Ilmaennustuse Keskuse poolt loodud Maa ilma ja kliima viienda põlve järelanalüüs (Hersbach jt, 2020). Järelanalüüsis assimileeritakse vaatlusandmed mudelandmetega globaalseks ühtlaseks andmestikuks. ERA5 andmed on saadaval alates 1940. aastast. ERA5-ga saab uurida erinevate atmosfääriliste parameetrite, ookeani lainete ja maapinna parameetrite ligikaudseid väärtuseid. (Copernicus Climate Change Service ja Climate Data Store, 2023). Kui ERA5 vaatab kogu planeeti, siis on eraldi loodud ka ERA5-Land järelanalüüsi andmestik, mis keskendub just maapinna muutujatele. Maapinna muutujad on ERA5-Land andmestikus parema ruumilise lahutusega ca 9 km, võrreldes ERA5-ga, mille ruumiline lahutus on ca 30 km (Muñoz-Sabater, jt, 2021; Copernicus Climate Change Service, 2022). Seetõttu on töös kasutatud ERA5-Land järelanalüüsi andmeid.

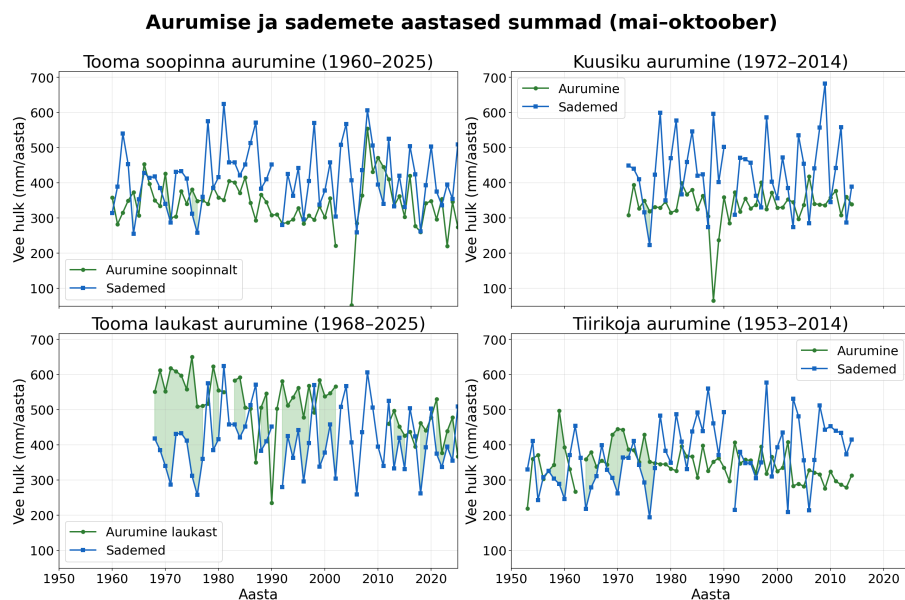
4. Tulemused

4.1. Aurumine jaamades

Aurumishulkade üldiseks iseloomustamiseks ja jaamade vaheliseks võrdluseks kujutasin Joonis 6 aurumismõõtmiste aastaseid summasid perioodil 1953-2025. Kõige kõrgem oli aurumine Tooma soojaama veepinnalt ning ainsana oli veepinna aurumine madalam soopinna aurumishulgast aastal 1990, mis ilmselt oli tingitud madalast mõõtmiste arvust. Teiste jaamade ning Tooma soopinna aurumise mustrid on üsna sarnased ning kohati olid aastased summad samad, näiteks Kuusikul ja Tiirikojal vahemikus 1996-2001.



Joonis 6. Aastased aurumise summad Eesti jaamades vahemikus 1953-2025 (maist oktoobrini). Sinise joonega on näidatud Tooma laugast aurumist (1968-2025), oranžiga soopinnalt aurumist (1960-2025), rohelisega aurumist Tiirikoja järvejaamas (1953-2014) ning punasega Kuusiku meteoroloogiajaamas (1972-2014).



Joonis 7. Aurumise (roheline joon) ja sademete (sinine joon) summad maist oktoobrini Tooma soojaamas (aurumine soopinnalt 1960-2025 ning aurumine laugast 1968-2025), Kuusiku meteoroloogiajaamas (1972-2014), Tiirikoja järvejaamas (1953-2014). Rohelisega on varjutatud alad, kus aurumine ületab sademeid.

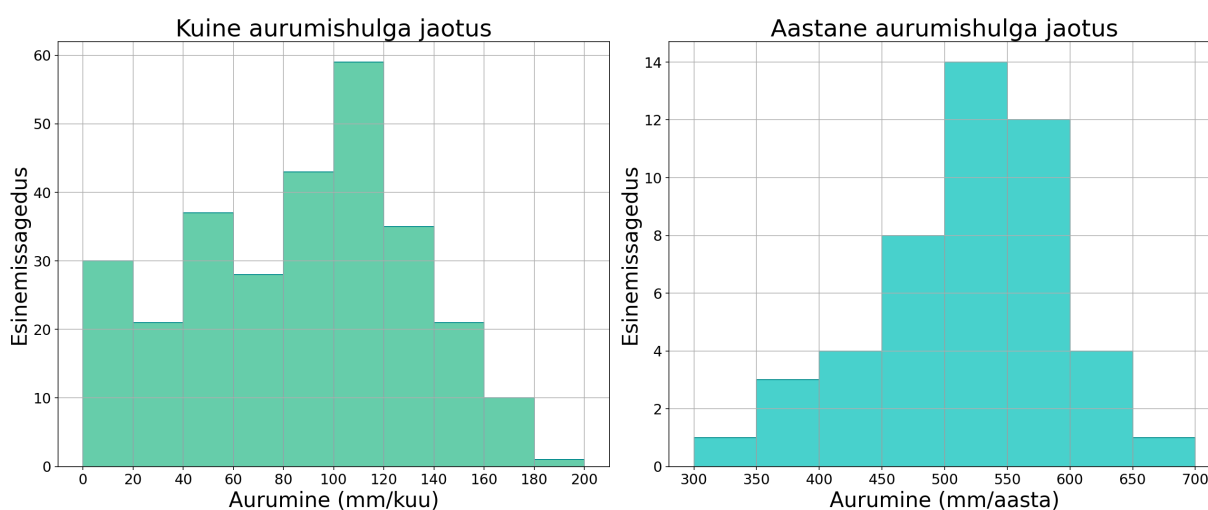
Aurumise ning sademete hulga võrdlemiseks kujutasin Joonis 7 kõigis jaamades kuudel maist oktoobrini sinise joonega sademete ning rohelisega aurumise hulka. Paljudel aastatel on aurumine ületanud sademeid, eriti Tooma soojaama laukast aurumise puhul. Lähtudes eeldusest, et talvine aurumine on väga madal, siis võrdlesin ka kogu aasta sademete summasid aurumisega ning sel juhul ületas aurumine sademeid vaid üksikudel aastatel: Tooma lauka aurumine ületas aastaseid sademeid 1971, 1975 ning 2018. Tiirikoja aurumine ületas aastaseid sademeid aastal 1959.

Aasta keskmine aurumine Tooma soojaama soopinnalt oli 340,6 mm/aastas ning võrreldes aasta keskmiste sademete hulgaga 677,6 mm/aastas ületavad aasta lõikes sademed aurumist keskmiselt +327,0 mm/aastas. Tooma soojaama lauka aurumise keskmine oli 511,1 mm/aastas, ning sademete keskmine aastane summa oli 671,3 mm/aastas, keskmiselt ületasid sademed aurumist +160,2 mm/aastas. Kuusiku meteoroloogiajaamas oli aastane keskmine aurumine 335,9 mm/aastas, ning sademete aastane keskmine oli 739,5 mm/aastas ja keskmine erinevus sademete ja aurumise vahel oli +403,5 mm/aastas. Tiirikoja järvejaamas oli keskmine aurumise hulk 347,3 mm/aastas ning sademete aastane keskmine 594,1 mm/aastas. Keskmiselt ületasid sademed aurumist +246,8 mm/aastas.

4.2. Statistilised karakteristikud ja ajaline jaotus

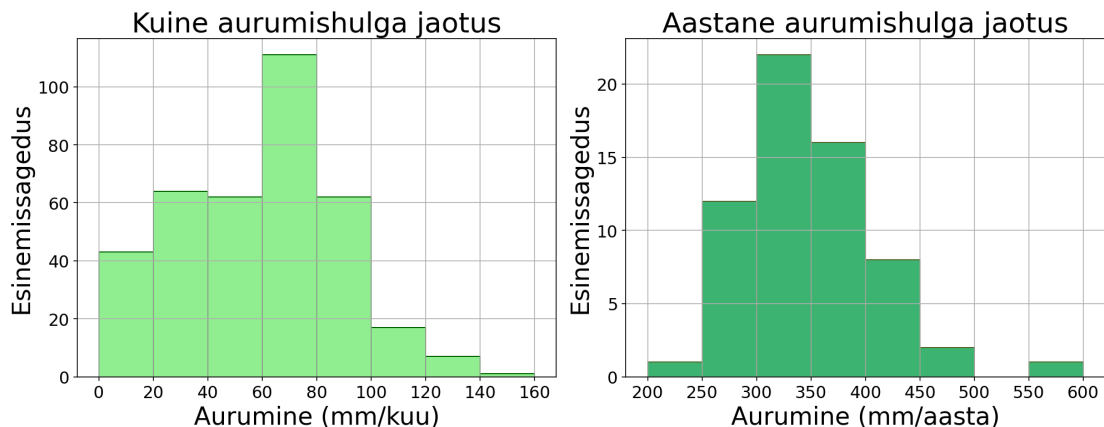
Aurumise statistiliste karakteristikute uurimiseks koostasid erinevaid histograme kuiste ning aastaste aurumishulkade kohta Tooma soojaamas, et näha kuidas aurumishulgad jaotuvad.

Veepinna aurumishulkade jaotused Tooma soojaamas (01.05.1968-22.10.2025)



Joonis 8. Tooma soojaama veepinna kuise ja aastase aurumishulga jaotus (01.05.1968-22.10.2025, maist oktoobrini.).

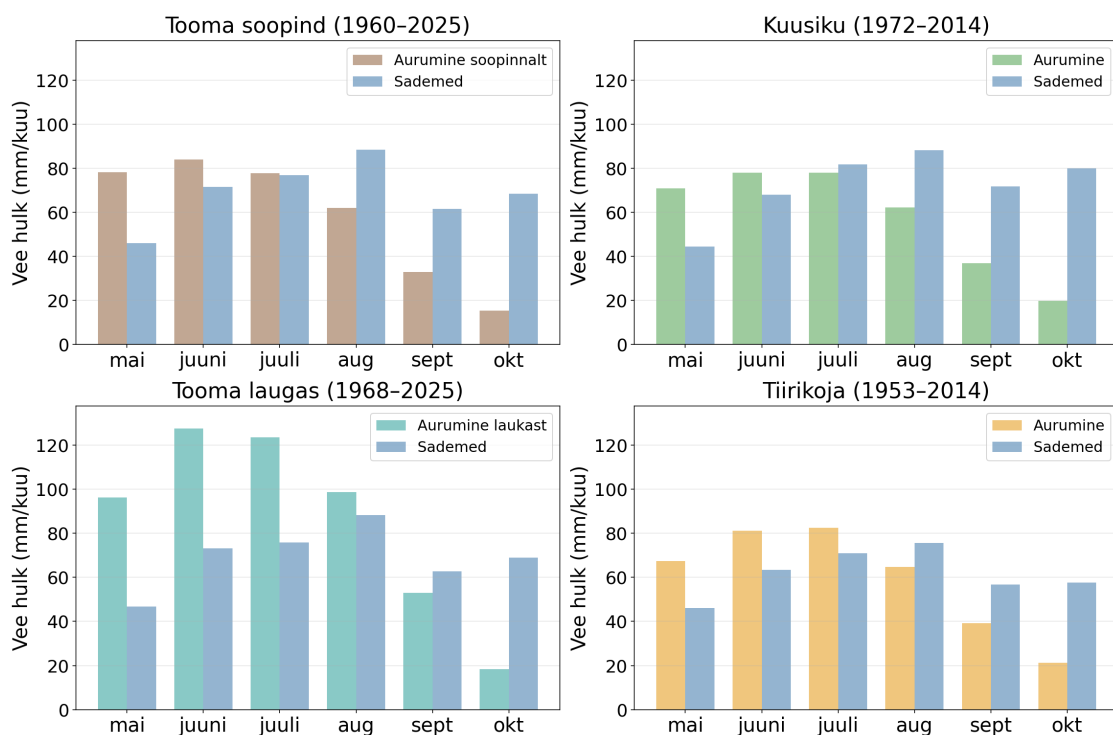
Soopinna aurumishulgade jaotus Tooma soojaamas (1960. mai-2025. oktoober)



Joonis 9. Tooma soojaama soopinna kuise ja aastase soopinna aurumishulga jaotus (1960. mai-2025. oktoober, maist oktoobrini)

Tooma soojaama kuiseks veepinna aurumishulgaks oli kõige sagedamini 100-120 mm. Aastane aurumishulk oli kõige sagedamini vahemikus umbes 500-550 mm (Joonis 8). Tooma soojaama soopinna kuine aurumishulk oli kõige sagedamini 60-80 mm, ning aastane aurumishulk oli enamasti 300-350 mm (Joonis 9).

Aurumise ja sademete kuised keskmised (mai-oktoober)



Joonis 10. Kuude lõikes aurumise- ja sademetehulga jaotused Kuusiku meteoroloogiajaamas (1972-2014), Tooma soojaamas soopinnalt (1960-2025) ja veepinnalt (1968-2025), Tiirikoja järvejaamas (1953-2014).

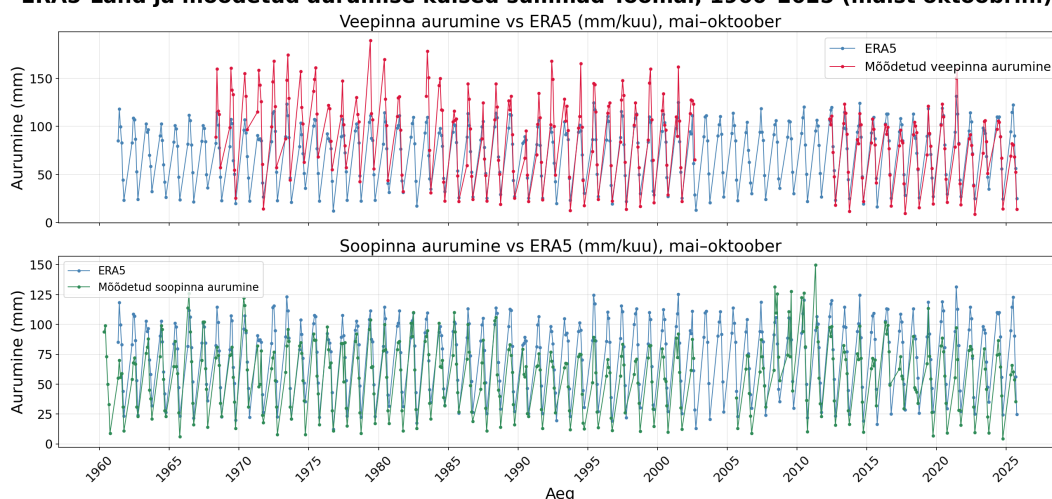
Aurumishulgade hooajaliseks iseloomustamiseks esitasin Joonis 10 kuude keskmised aurumise hulgad neljas jaamas. On näha, et kõigis mõõtejaamades järgib aurumise jaotus sarnast mustrit.

Suurim aurumine toimub juunis ja juulis, Tooma soojaama soopinnalt ka mais. Juunis oli keskmine aurumine Tiirikoja järvejaamas 81,2 mm, Kuusiku jaamas 77,8 mm, Tooma soojaama veepinna aurumisel 127,6 mm ning soopinna aurumisel 84,0 mm. Joonisel 10 on samuti toodud sademete jaotus kuude lõikes, et hinnata, mis kuudel ületab aurumine sademeid. Sademed on madalamad Tooma soopinna ja Tiirikoja järvejaama aurumisest mais, juunis ning juulis. Tooma lauka aurumisega võrreldes on sademed madalamad mais, juunis, juulis ning augustis ja Kuusikul mais ning juunis. Kõigis jaamades ületas aurumine sademeid mais ja juunis.

4.3. Andmete võrdlus ERA5-Land järelanalüüsiga

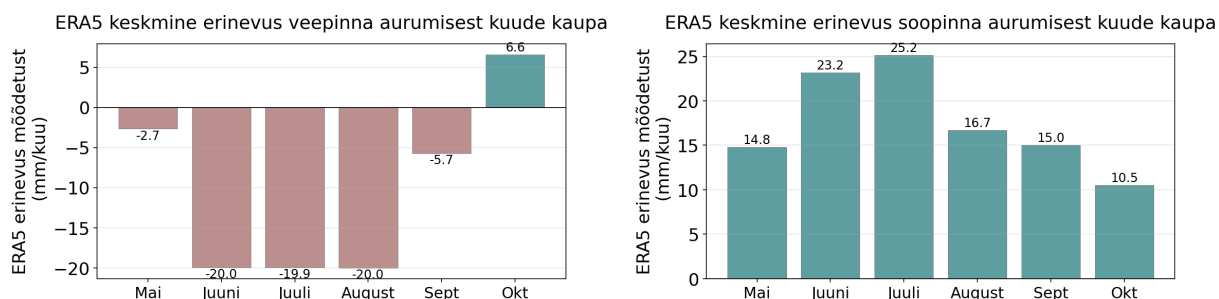
Järelanalüüsi kasutamine suuruste hindamisel, mille kohta on vähe mõõtmisi, on laialt levinud ja seetõttu pakub huvi, kuidas ERA5-Landi andmed esitavad aurumist Tooma soojaama piirkonnas. Seetõttu oli töö sekundaarseks eesmärgiks võrrelda ERA5-Land järelanalüüsi Tooma soojaama andmetega ning hinnata selle usaldusväärsust ja kasutatavust.

ERA5-Land ja mõõdetud aurumise kuised summad Toomal, 1960-2025 (maist oktoobrini)



Joonis 11. ERA5-Land kuise aurumishulga (mm/kuu) võrdlus Tooma soojaama aurumismõõtmistega veepinnalt (punase joonena, 1968-2025) ning soopinnalt (rohelise joonena, 1960-2025).

ERA5-Land võrdlus Tooma soojaama mõõtmistega, mai-oktoober



Joonis 12. ERA5-Land võrdlus Tooma soojaama aurumismõõtmistega. Vasakpoolsel graafikul on võrreldud ERA5-Land aurumist Tooma veepinna aurumisega, parempoolsel on võrreldud ERA5-Land aurumist Tooma soopinna aurumisega. Graafikud näitavad vastavalt kui palju ERA5-Land keskmiselt kuise erineb mõõdetud aurumisest (ERA5-mõõdetud).

Tabel 1. ERA5-Land võrdlus Tooma soojaama veepinna ja soopinna aurumisega. Tabelis on toodud ERA5-Land keskmine erinevus Tooma aurumishulkadest, ruutkeskmine erinevus ja Pearsoni korrelatsioonikordaja.

Võrdlus ERA5-Landiga	Veepinna aurumine	Soopinna aurumine
Keskmine erinevus (mm/kuu)	-11,5	17,8
Ruutkeskmine erinevus (mm/kuu)	25,1	23,3
Pearsoni korrelatsioonikordaja	0,856	0,869

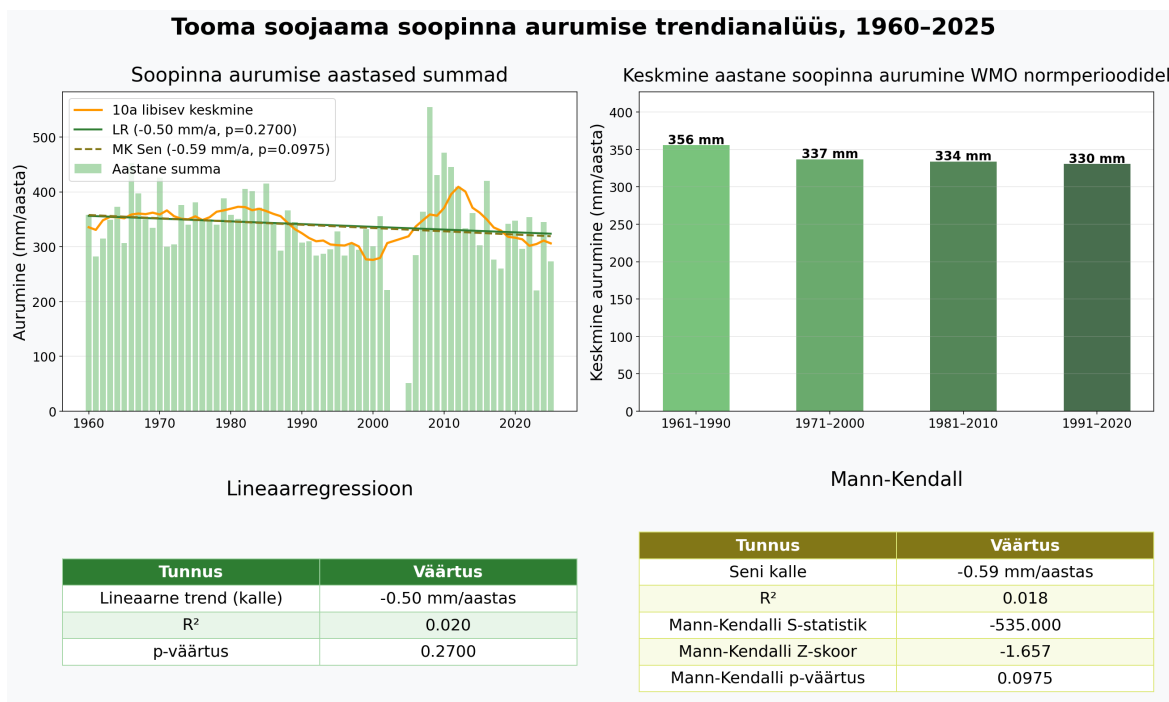
Joonis 11 võrdlesin ERA5-Landi ning Tooma soojaama veepinna ning soopinna kuist aurumishulka. Joonis 12 näitab kui palju ERA5-Land järelanalüüs erineb keskmisest aurumisest Toomal. ERA5-Land enamasti alahindas veepinna aurumist, eriti suvekuudel juunist augustini, kus see alahindas pidevalt umbes -20 mm/kuus. Oktoobrikuus mudel ülehindab aurumist võrreldes veepinna aurumisega umbes 6,6 mm/kuus. Vastupidiselt veepinna aurumisele ülehindas ERA5-Land aurumist võrreldes soopinna aurumisega. Kõige rohkem ülehindas järelanalüüs soopinna aurumiskogust juulikuus (umbes +25 mm/kuus).

Pidevalt alahindas ERA5-Land keskmiselt 11,5 mm/kuus veepinna aurumist, ruutkeskmine erinevus on 25,1 mm/kuus, mis näitab, et mudelis on ka juhuslikku hajuvust lisaks süstemaatilisele alahindamisele. Samuti soopinna aurumise puhul ülehindas mudel keskmiselt 17,8 mm/kuus, ning ruutkeskmine viga on 23,3 mm/kuus. Pearsoni korrelatsioonikordaja on mõlemal sarnane, olles veepinna puhul 0,856 ning soopinna puhul 0,869 (Tabel 1).

4.4. Trendianalüüs

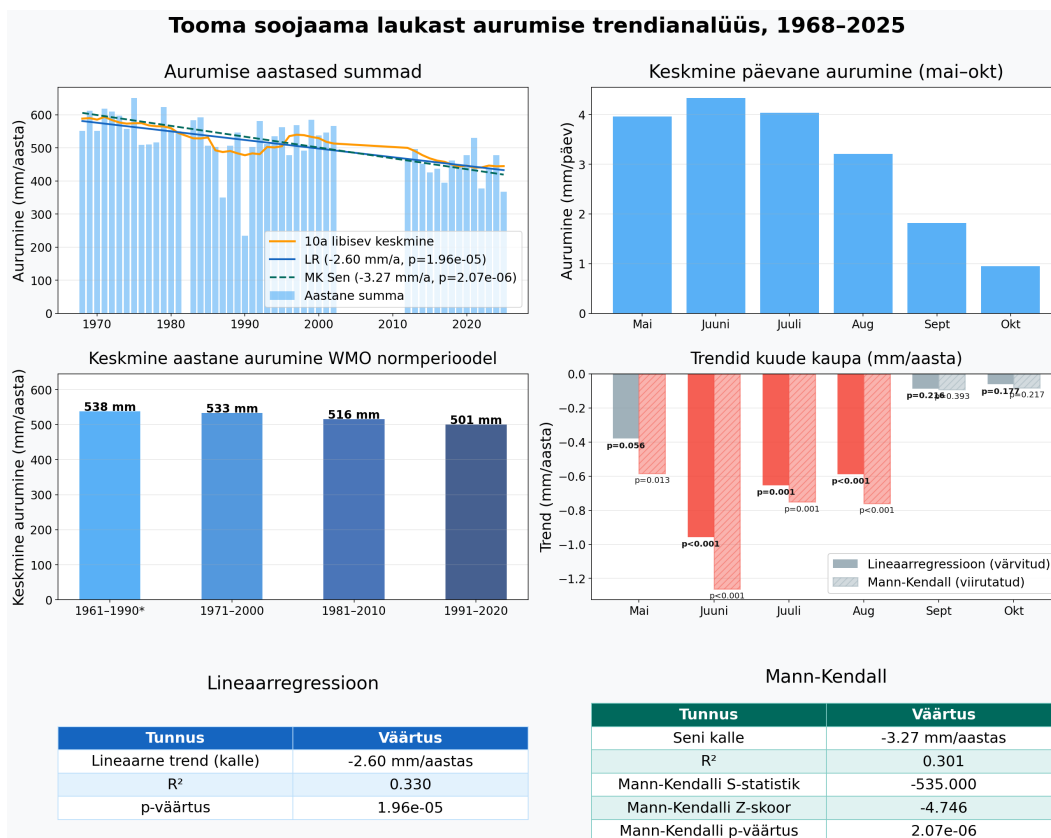
Töö üks eesmärkidest oli teostada Tooma soojaama andmetele trendianalüüs. Lisaks viisin läbi ERA5-Land järelanalüüsile trendianalüüsi vahemikus 1960-2025.

Tooma soojaama ning ERA5-aurumisandmetel kontrollisin eelnevalt normaaljaotust ning autokorrelatsiooni. Aurumisandmed ei järginud normaaljaotust, kuid olulist autokorrelatsiooni ei tuvastatud. Normaaljaotuse puudumise tõttu teostasid ka lisaks lineaarregressioonile Mann-Kendalli meetodil trendianalüüsid. Kuigi ERA5-Land andmed järgisid normaaljaotust ning olulist autokorrelatsiooni ei tuvastatud, siis teostasid neile siiski Tooma soojaama andmetega parema võrdluse eesmärgil samuti lineaarregressiooni ning Mann-Kendalli meetodil trendianalüüsi.



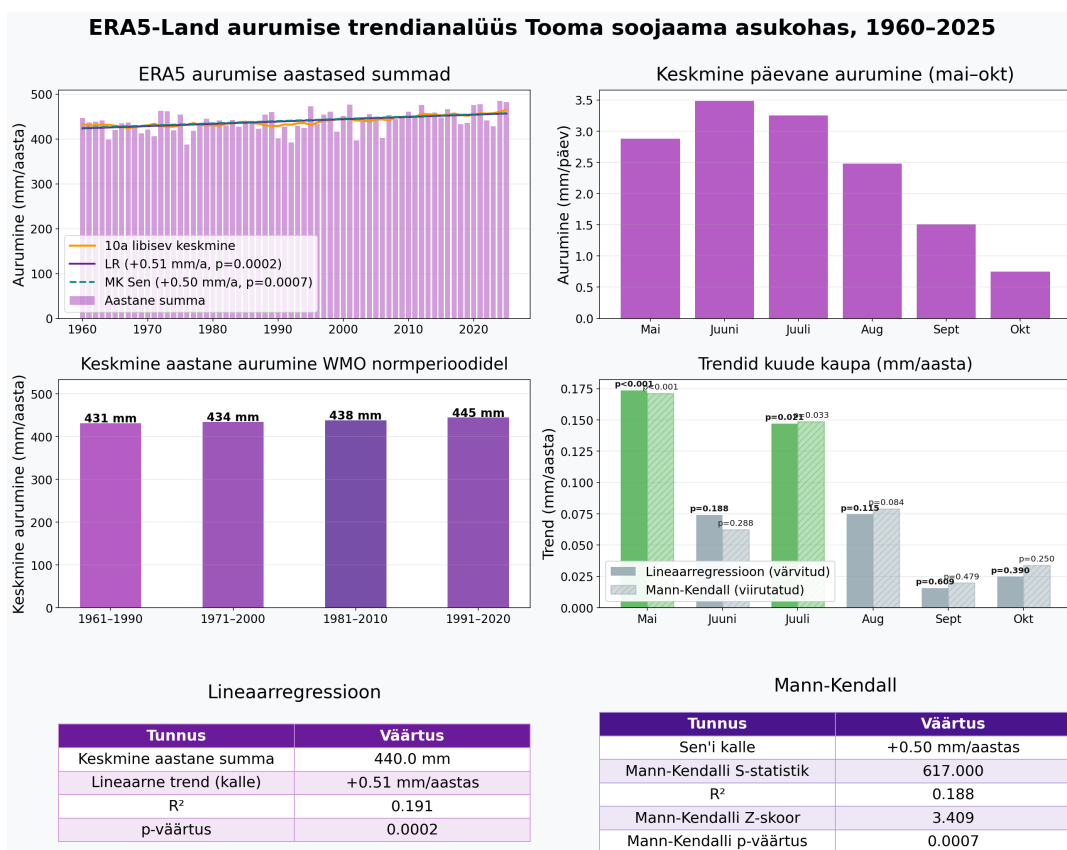
Joonis 13. Tooma soojaama soopinna aurumise trendianalüüs aastatel 1960-2025 (kuudel maist oktoobrini). Esimesel joonisel on näidatud 10-aastane libisev keskmine ja aurumise aastased summad koos lineaarse trendijoone ning Mann-Kendalli Seni trendijoonega. Teisel joonisel on näidatud keskmist aastast soopinna aurumist WMO normperioodidel (1961-1990, 1971-2000, 1981-2010, 1991-2020). Esimeses kokkuvõtvas tabelis on näidatud lineaarregressiooni meetodil tehtud trendianalüüsi tulemused (lineaarne trend koos R² ja p-väärtusega). Teises kokkuvõtvas tabelis on näidatud Mann-Kendalli meetodil leitud trendianalüüsi tulemused (Seni kalle, R², Mann-Kendalli S-statistik, Z-skoor ja p-väärtus).

Joonisel 13 olen näidanud Tooma soojaama soopinna aurumise trendianalüüsi. Perioodil 1961-1990 oli keskmine soopinna aurumine 346 mm/aastas, 1971-2000 337 mm/aastas, 1981-2010 oli see 334 mm/aastas ning aastatel 1991-2020 330 mm/aastas. Lineaarregressiooni ning Mann-Kendalli meetodil tehtud trendianalüüsid näitasid mõlemad ebaolulist langevat trendi. Lineaarregressiooni tulemus näitas langust -0,50 mm/aastas (p-väärtusega 0,27). Mann-Kendalli test leidis ebausaldusväärse langeva trendi (S-statistik -535,00, Z-skoor -1,657, p-väärtusega 0,0975). Seni kalle leidis trendi suuruseks -0,59 mm/aastas. R² tulemusteks olid lineaarregressiooni puhul 0,020 ning Seni kaldel 0,018 (Joonis 13).



Joonis 14. Tooma soojaama laukast aurumise trendianalüüs aastatel 1968-2025 (kuudel maist oktoobrini). Esimesel graafikul on toodud veepinna aurumise aastased summad, 10-aastane libisev keskmine ning lineaarregressiooni ja Mann-Kendalli Seni trendijoon. Teisel graafikul on näidatud keskmine ööpäevane laukast aurumine maist oktoobrini. Kolmandal joonisel on näidatud keskmist aastast laukast aurumist WMO normperioodidel (1961-1990, 1971-2000, 1981-2010, 1991-2020). Aastad 1961-1990 on märgistatud tärniga, sest laukast aurumine algab aastast 1968. Neljandal graafikul on toodud kuude kaupa veepinna aurumise trendid koos nende usaldusväärsusega. Üleni värvitud tulbad näitavad lineaarregressiooni trende kuude kaupa ning viirutatud tulbad näitavad Mann-Kendalli trende kuude kaupa. Esimeses kokkuvõtväs tabelis on näidatud lineaarregressiooni meetodil tehtud trendianalüüsi tulemused (trendi kalle koos R²-ga ja p-väärtusega). Teises kokkuvõtväs tabelis on näidatud Mann-Kendalli meetodil tehtud trendianalüüsi tulemused (Seni kalle, R², Mann-Kendalli S-statistik, Z-skoor ning p-väärtus).

Joonis 14 olen näidanud Tooma soojaama laukast aurumise trendianalüüsi vahemikus 1968-2025 (kuudel maist oktoobrini). Kõige kõrgem päevane aurumine oli mais, juunis, juulis, mil see oli enamasti umbes 4 mm/päevas. Perioodil 1961-1990 oli keskmine laukast aurumine 538 mm/aastas, 1971-2000 oli see 533 mm/aastas, perioodil 1981-2010 oli see 516 mm/aastas ning 1991-2020 oli see 501 mm/aastas. Lineaarregressiooni meetodil leitud trend näitas olulist langust -2,6 mm/aastas ($p=1,96 \cdot 10^{-5}$) ning R²-väärtusega 0,330. Kuude lõikes leidsin lineaarregressiooniga langevad trendid juunis -0,957 mm/aasta ($p<0,001$), juulis -0,654 mm/aastas ($p=0,001$) ning augustis -0,589 mm/aastas ($p<0,001$). Mann-Kendalli test näitas samuti olulise langeva trendi olemasolu (S-statistik -535,00, Z-skoor -4,746, $p=2,7 \cdot 10^{-6}$). Seni kalle näitas, et trend on -3,27 mm/aastas. Determinatsioonikordaja R² on Seni kaldel 0,301. Mann-Kendalliga leidsin olulised langevad trendid ($p<0,015$) kuude lõikes mais -0,583, juunis -1,261, juulis -0,752 ning augustis -0,759 mm/aastas.



Joonis 15. ERA5-Land trendianalüüs Tooma soojaama asukohas aastatel 1960-2025 (maist oktoobrini). Esimesel graafikul on toodud ERA5-Land aurumise aastased summad koos 10-aastase libiseva keskmisega ning lineaarse ja Seni trendijoonega. Teine graafik näitab keskmist ööpäevast aurumist maist oktoobrini. Kolmandal joonisel on näidatud keskmist aastast soopinna aurumist WMO normperioodidel (1961-1990, 1971-2000, 1981-2010, 1991-2020). Neljas graafik näitab trende kuude kaupa koos nende usaldusväärsustega. Üleni värvitud tulpades on trendid leitud lineaarregressiooni meetodil ning viirutatud tulpades on trendid leitud Mann-Kendalli meetodil. Esimeses kokkuvõtvas tabelis on näidatud 1960-2025 aastate keskmine aastane aurumise summa ning lineaarregressiooni meetodil tehtud trendianalüüsi tulemused (trend koos selle R²-ga ning p-väärtusega). Teises kokkuvõtvas tabelis on näidatud Mann-Kendalli meetodil tehtud trendianalüüsi tulemused (Seni kalle, R², Mann-Kendalli S-statistik, Z-skoor ning p-väärtus).

Joonis 15 on näidatud ERA5-Land koguaurumise trendianalüüsi Tooma soojaama asukohas aastatel 1960-2025 (maist oktoobrini). Keskmine aurumine selles vahemikus oli 440,0 mm/aastas. Kõige suurem aurumine toimus juunis ja juulis, kui päevane aurumine oli 3,0-3,5 mm/päevas. Perioodil 1961-1990 oli keskmine koguaurumine 431 mm/aastas, 1971-2000 oli see 434 mm/aastas, perioodil 1981-2010 oli see 438 mm/aastas ning 1991-2020 oli see 445 mm/aastas. Lineaarregressiooni meetodil leitud trend näitas olulist tõusu +0,51 mm/aastas (p-väärtusega 0,0002) ning R² väärtusega 0,191. Kuude lõikes leidsin lineaarregressiooniga kasvavad trendid mais +0,174 mm/aastas (p<0,001) ja juulis +0,147 mm/aastas (p=0,021). Mann-Kendalli test näitas samuti olulise tõusva trendi olemasolu (S-statistik 617, Z-skoor 3,409, p-väärtusega 0,0007). Seni kalle näitas, et trend on +0,50 mm/aastas, determinatsioonikordajaga 0,188. Mann-Kendalliga leidsin olulised kasvavad trendid kuude lõikes samuti mais +0,171 mm/aastas (p-väärtusega <0,001) ja juulis +0,149 mm/aastas (p-väärtusega 0,033).

5. Järeldused ja arutelu

Bakalaureusetöö eesmärgiks oli analüüsida Tooma soojaama aurumise mõõtmisandmeid, uurida aurumise ajalist jaotust ja trende ning võrrelda tulemusi Tiirikoja järvejaama ja Kuusiku meteoroloogiajaama andmetega. Sekundaarseks eesmärgiks oli hinnata ERA5-Land järelanalüüsi usaldusväärsust ja kasutatavust Eesti aurumise kirjeldamisel.

Aurumishulkade võrdlus kolme jaama vahel näitas, et kõige kõrgem aurumine toimub Tooma soojaama laukast, kus aastaseks keskmiseks oli 511,1 mm (perioodil 1968-2025). Seda selgitab avatud veepinna suurem soojuse neelamine ja madalama albeedoga pinnaomadused, mis soodustavad intensiivsemat aurumist võrreldes soopinnaga. Tooma soojaama soopinna aurumise keskmiseks oli 340,6 mm/aastas (1960-2025), kusjuures Tiirikoja järvejaama ning Kuusiku meteoroloogiajaama aurumishulgad olid Tooma soopinna aurumisega sarnased (keskmistega vastavalt 347,3 (1953-2014) ja 335,9 (1972-2014) mm/aastas). Kuigi aurumine ületas sademeid kõigis jaamades mai ning juunikuus, siis aurumine ületas kogu aasta sademeid ainult üksikutel aastatel (eeldusel, et aurumine on talvel väga madal).

Hooajaline jaotus oli kõigis jaamades ühtlaselt sarnane: aurumine saavutas tipu juunis ja juulis, kui päikesekiirgus ja temperatuur on kõige kõrgemad. Erandi moodustas Tooma soojaama soopinna aurumine, kus maikuu aurumine on juuni ja juulikuuga peaaegu samaväärne (umbes 80 mm/kuus). See võib viidata rabapinna kiiremale soojenemisele kevadel ning soopinna kiiremale reaktsioonile kasvava sissetuleva kiirguse hulgaga võrreldes avatud veekogu aeglasema soojenemisega.

ERA5-Land järelanalüüsi võrdlus Tooma soojaama mõõtmistega tõi esile mitmeid olulisi erinevusi. Tooma veepinna aurumise võrdlus ERA5-Land järelanalüüsiga näitas, et mudel alahindas veepinna aurumist keskmiselt 11,5 mm/kuus. Suvekuudel oli alahindamine eriti tugev (kuni -20 mm/kuus). Vastupidiselt teiste kuudega, ülehindas oktoobris ERA5-Land veepinna aurumist 6,6 mm/kuus. Selge muustrina on näha, et suvekuudel on ERA5-Land veepinna aurumise suhtes kõige ebaühtlasem. Soopinna aurumisega võrreldes oli ERA5-Landi käitumine vastupidine, ülehinnates keskmiselt aurumist 17,8 mm/kuus. Suurim ülehindamine toimus suvekuudel (keskmiselt +16,7 kuni +25,2 mm/kuus).

Vaatamata suurtele erinevustele absoluutväärtustes oli ERA5-Landi korrelatsioon Tooma mõõtmistega märkimisväärselt hea. Pearsoni korrelatsioonikordaja oli veepinna mõõtmistega 0,856 ja soopinnaga 0,869. See näitab, et järelanalüüs tajub üsna hästi aurumise aastatevahelisi kõikumisi, kuigi absoluutväärtused on erinevad. Selline tulemus oli oodatav, sest võrdlesin ERA5-Landi koguaurumist erinevate pinnaste aurumisega. Ruutkeskmised vead olid üsna märkimisväärsed—veepinna aurumisega võrreldes 25,1 mm/kuus ning soopinnaga 23,3 mm/kuus, mis näitab samuti absoluutväärtuste ebatäpsust. Kokkuvõttes on soopinna aurumine ERA5-Landiga statistiliselt veidi paremini korreleeritud (kuigi erinevus on väga väike), aga absoluutväärtuste poolest on ERA5-Land sarnasem laukast aurumisega.

Töös tuvastasin olulised erinevused veepinna, soopinna ning ERA5-Land trendide vahel. Trendianalüüs Tooma soojaama lauka aurumise kohta näitas selget langust -2,60 kuni -3,27 mm/aastas ($p < 0,001$). Langus oli tugevaim suvekuudel. Soopinna aurumine näitas samuti langevat kuid ebaolulist trendi -0,50 kuni -0,59 mm/aastas ($p > 0,05$), seega see on jäänud pigem stabiilseks. Vastupidiselt mõõtmisandmete langevatele trendidele leidsin ERA5-Landi koguaurumisel usaldusväärse kasvava trendi +0,50 kuni +0,51 mm/aastas ($p < 0,001$). See on sarnane Domínguez-

Castro jt (2017) leitud Eesti koguaurumise trendiga +0,53 mm/aastas, kuid nemad arvutasid aurumise Penman-Moneith valemist.

ERA5-Landi kasvav trend on vastuolus Tooma veepinna aurumise langeva trendiga. See lahknevus on meetodiliselt oluline, sest veepinna aurumisanum mõõdab aurumist avatud veekogust, samas kui ERA5-Land hindab tegelikku evapotranspiratsiooni maapinnalt, võttes arvesse mullaniiskust, taimkatte ja maapinna omadusi (Muñoz-Sabater jt, 2021). Need on põhimõtteliselt erinevad aurumise mõõdikud, mistõttu ei ole nende trendide otsene võrdlemine meetodiliselt täiesti põhjendatud. Samuti on tarvis hoida meeles, et järelanalüüsi andmetega leitud trendid ei pruugi olla alati usaldusväärsed (Trenberth jt, 2010; Hartmann jt, 2013).

Laukast aurumise langeva trendi ja ERA5-Landi kasvava evapotranspiratsiooni trendi samaaegne esinemine on kooskõlas Brutsaert ja Parlange'i (1998) aurumise paradoksi loogikaga. Nende teooria kohaselt, kui tegelik aurumine on piirkonnas kasvanud niiskete pinnasetingimuste tõttu, siis avatud aurumisanumaga mõõdetud aurumine peaks langema. Tuleks samas arvestada, et Golubev jt (2001) leidsid, et Lätis asuva jaama (geograafiliselt Toomale lähedal) andmete põhjal oli see sellise seose tegemine nõrk ning ebastabiilne, kehtides ainult kuivematel aastatel. Seetõttu ei saa Tooma langeva veepinna aurumise trendi põhjal teha tugevat järeldust tegeliku koguaurumise suuna kohta. Siiski saab järeldada, et atmosfääri aurumisnõudlus on tõenäoliselt vähenenud, kuid tegeliku koguaurumise trendi suuna osas tuleb teha ettevaatlikke järeldusi ning teema vajab ka täiendavat uurimist.

Üks veepinna aurumise langeva trendi võimalikest põhjustest on päikesekiirguse vähenemine (Bates jt, 2008), kuid Post ja Aun (2024) leidsid, et Läänemere piirkonnas on üldiselt pilvisus vähenenud. Teine võimalik aurumist pärssiv mõjutegur võib olla tuulekiiruse vähenemine (Lee ja Woo, 2025; Duan jt, 2020), kuid Eesti suvised tuulekiirused on hoopis natukene kasvanud või on jäänud samaks (Luhamaa jt, 2014).

Tooma laukast aurumise trend on huvitav Läänemere piirkonna laiemas kontekstis. Poolas leidsid Bartczak jt (2024) kasvava aurumise trendi, ning Soomes on leitud nii kasvavaid kui kahanevaid trende (Moroizumi jt, 2014) ning Speranskaya (2011) leidis Läänemere valgala idaosas nõrga tõusva trendi. Langev veepinna aurumine koos ERA5-Landi kasvava koguaurumise trendiga viitab sellele, et piirkondlikud erinevused on suured ning ühtset Läänemere piirkonna mustrit on keeruline määratleda.

Kokkuvõte

Bakalaureusetöös uurisin Tooma soojaama aurumismõõtmisi, teostasin trendianalüüsi ning võrdelist analüüsi teiste Eesti aurumismõõtmistega Kuusiku meteoroloogiajaamast ning Tiirikoja järvejaamast. Lisaks hindasin ERA5-Land järelanalüüsi usaldusväärsust lauka ning soopinna aurumise kirjeldamisel.

Aurumishulkade võrdlus näitas, et kõrgeim aurumine toimus Tooma soojaama laukast, kus aastaseks keskmiseks oli 511,1 mm/aastas perioodil 1968-2025. Soopinna aurumine Toomal (1960-2025) ning Tiirikoja (1953-2014) ja Kuusiku (1972-2014) jaamade aurumine jäid sarnasesse suurusjärku keskmistega vastavalt 347,3 ja 335,9 mm/aastas. Kõigis jaamades oli aurumine hooajaliselt suurim juunis ja juulis. Kõigis jaamades ületas aurumine sademeid mai ja juunikuus. Siiski ületavad tervikuna aastased sademed aurumist eeldusel, et talvine aurumine on nullilähedane.

ERA5-Landi võrdlus Tooma soojaama andmetega näitas, et järelanalüüs kirjeldab aastatevahelisi kõikumisi hästi (Pearsoni korrelatsioonikordaja soopinna 0,869 ja veepinna 0,856), kuid absoluutväärtused erinesid mõõtmistest üsna suurelt, olles väiksemad veepinna aurumisest kuid kõrgemad soopinna aurumisest. Seetõttu tuleb ERA5-Land andmete kasutamisel olla kriitiline.

Trendianalüüs näitas Tooma laukast aurumisel aastatel 1968-2025 selget olulist langevat trendi -2,6 kuni -3,27 mm/aastas ($p < 0,001$), ning langus oli tugevaim suvekuudel. Soopinna aurumisel leidsin samuti aastatel 1960-2025 langeva, kuid statistiliselt ebaolulise trendi -0,50 kuni -0,59 mm/aastas ($p > 0,05$). ERA5-Landi koguaurumine näitas sel perioodil teistele vastupidiselt olulist kasvavat trendi +0,50 kuni +0,51 mm/aastas ($p < 0,001$). See lahknevus on kooskõlas aurumise paradoksiga, mille kohaselt anumatest aurumise langus võib viidata tegeliku koguaurumise kasvule, kuid Eesti kontekstis vajab see seos veel täiendavat uurimist.

Tänuavaldused

Täna esmalt oma juhendajat Aarne Männikut huvitava teema väljapakkumise, teoreetiliste teadmiste ning suurepärase nõuannete eest. Samuti jagas ta mulle palju usaldusväärseid allikaid ja viiteid ning aitas lahendada kõik erinevad tekkinud probleemid. Suur tänu ka juhendajale Katriin Käärikule, kes andis mitmeid väärtuslikke ideid ning aitas töö valmimisele suuresti kaasa. Mõlemad juhendajad suunasid, tegid sisukaid märkusi ning täiustasid tööd igatpidi.

Kõigi mõõtmisandmete eest olen tänulik Keskkonnaagentuurile. Keskkonnaagentuurist sooviksin eriti tänada Miina Krabbit, kes jagas mulle palju infot mõõtmiste kohta ja vastas kõikidele tekkinud küsimustele.

Kirjanduse loetelu

- Ahrens, C. Donald & Henson, R. (2022). *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment* (13th ed.). Cengage Learning, Inc.
- Alhaji, U. U., Yusuf, A. S., Edet, C. O., Oche, C. O., & Agbo, E. P. (2018). Trend analysis of temperature in Gombe state using Mann Kendall trend test. *Journal of Scientific Research & Reports*, 20(3): 1-9.
<http://irepo.futminna.edu.ng:8080/jspui/handle/123456789/3308>
- Almazroui, M., & Şen, Z. (2020). Trend analyses methodologies in hydro-meteorological records. *Earth Syst. Environ.*, 4(4), 713-738. <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00190-6>
- Ansorge, L., & Beran, A. (2019). Performance of simple temperature-based evaporation methods compared with a time series of pan evaporation measures from a standard 20 m² tank. *J. Water Land Dev.*, (41).
<http://archive.sciendo.com/JWLD/jwld.2019.41.issue-1/jwld-2019-0021/jwld-2019-0021.pdf>
- Bartczak, A., Krzemiński, M., & Arażny, A. (2024). Changes in evaporation patterns and their impact on Climatic Water Balance and river discharges in central Poland, 1961–2020. *Reg. Environ. Change*, 24(3), 130. <https://doi.org/10.1007/s10113-024-02296-3>
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., & Palutikof, J. P. (Eds.). (2008). *Climate change and water. Technical paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC Secretariat.
- Bruno, G., & Duethmann, D. (2024). Increases in water balance-derived catchment evapotranspiration in Germany during 1970s–2000s turning into decreases over the last two decades, despite uncertainties. *Geophys. Res. Lett.*, 51(6), e2023GL107753. <https://doi.org/10.1029/2023GL107753>
- Brutsaert, W., & Parlange, M. B. (1998). Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, 396(6706), 30-30. <https://doi.org/10.1038/23845>
- Burn, D. H., & Hesch, N. M. (2007). Trends in evaporation for the Canadian Prairies. *Journal of hydrology*, 336(1-2), 61-73.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.12.011>
- C3S/ECMWF & WMO. (2026). *C3S-WMO European State of the Climate*.
<https://doi.org/10.24381/zy93-sb27>
- Chahine, M. T. (1992). The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature*, 359(6394), 373-380. <https://doi.org/10.1038/359373a0>

- Copernicus Climate Change Service (2022). *ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.68d2bb30> (Loetud 16.03.2026)
- Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store (2023). *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47> (Loetud 16.03.2026)
- Dinpashoh, Y., Jhajahria, D., Fakheri-Fard, A., Singh, V. P., & Kahya, E. (2011). Trends in reference crop evapotranspiration over Iran. *J. Hydrol.*, 399(3-4), 422-433. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.021>
- Domínguez-Castro, F., Vicente-Serrano, S., Jaagus, J., Tomas-Burguera, M., Peña-Gallardo, M., & McVicar, T. (2017). Climatic influence on atmospheric evaporative demand in Estonia (1951-2015). <https://sciforum.net/manuscripts/4860/manuscript.pdf>
- Duan, K., Guo, J., Hu, T., Wang, X., & Mei, Y. (2020). Assessing the Roles of Terrestrial Stilling and Solar Dimming in Land Surface Drying/Wetting across China. *Water*, 12(7), 1996. <https://doi.org/10.3390/w12071996>
- Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut. (2003). *Hüdroloogiline aastaraamat 2002*. https://www.ilmateenistus.ee/wp-content/uploads/2013/01/HydroAastaraamat_2002.pdf
- Fu, G., Charles, S. P., & Yu, J. (2009). A critical overview of pan evaporation trends over the last 50 years. *Clim. Change*, 97(1), 193-214. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9579-1>
- Glavnoye upravleniye gidrometeorologicheskoy sluzhby pri Sovete Ministrov SSSR. (1961). *Nastavleniye gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam. Vypusk 7, Chast' II: Nablyudeniya nad ispareniyem s vodnoy poverkhnosti* [Juhend hüdro meteoroloogiajaamadele ja -postidele. 7. väljaanne, II osa: Vaatlused aurumisest veepinnalt] (2. trükk). Gidrometeorologicheskoye izdatel'stvo.
- Golubev, V. S., Lawrimore, J. H., Groisman, P. Y., Speranskaya, N. A., Zhuravin, S. A., Menne, M. J., ... & Malone, R. W. (2001). Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment. *Geophys. Res. Lett.*, 28(13), 2665-2668. <https://doi.org/10.1029/2000GL012851>
- Graham, S., Parkinson, C. & Chahine, M. (2010). The Water Cycle. *NASA Earth Observatory*. http://www.mrnagle.com/uploads/8/5/0/7/8507404/the_water_cycle_feature_articles.pdf
- Halldin, S. (1988). Swedish evaporation research a review. *Hydrol. Res.*, 19(5), 303-340. <https://doi.org/10.2166/nh.1988.0022>

Hartmann, D. L., Klein Tank, A. M. G., Rusticucci, M., Alexander, L. V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F. J., Dlugokencky, E. J., Easterling, D. R., Kaplan, A., Soden, B. J., Thorne, P. W., Wild, M., & Zhai, P. M. (2013). Observations: Atmosphere and surface. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., & Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf

Keskkonnaagentuur (2023). Eesti meteoroloogia aastaraamat 2023. Loetud 7. veebruar 2026 https://www.ilmateenistus.ee/wpcontent/uploads/2024/03/Eesti_meteoroloogia_aastaraamat-2023.pdf

Keskkonnaagentuur. (2016). *Eesti meteoroloogia aastaraamat 2016*. https://www.ilmateenistus.ee/wp-content/uploads/2013/01/aastaraamat_2016.pdf

Keskkonnaagentuur. (2019). *Eesti meteoroloogia aastaraamat 2018*. https://www.ilmateenistus.ee/wp-content/uploads/2019/05/aastaraamat2018_parandusega.pdf

Keskkonnaagentuur. (2021). Soo aastaraamat 2020. Loetud 7. veebruar 2026 <https://storymaps.arcgis.com/stories/ddf8407548044878aecd37759e35ffe7>

Keskkonnaagentuur. (2021). Tooma Soojaam. Eesti Meteoroloogia aastaraamat 2021. Loetud 7. veebruar 2026 <https://storymaps.arcgis.com/stories/7c69212925db4f10b08bb01794671e9e>

Keskkonnaagentuur. (2022). Jõgevamaa kliimast. Loetud 7. veebruar 2026 <https://www.ilmateenistus.ee/2022/02/jogevamaa-kliimast/>

- Keskonnaagentuur. (2025). Soo aastaraamat 2024. Loetud 7. veebruar 2026
<https://storymaps.arcgis.com/stories/744c00b8efdc4ffebfb149307a58f903>
- Keskonnaportaal (2022, 14. oktoober) *Raplamaa kliimast*. Loetud 10. veebruar 2026
aadressil <https://keskkonnaportaal.ee/et/teemad/ilm-kliima/ilmajutud/raplamaa-kliimast>
- Koutsoyiannis, D. (2020). Revisiting the global hydrological cycle: is it intensifying? *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24(8),3899-3932. <https://doi.org/10.5194/hess-24-3899-2020>
- Lee, E., & Woo, D. K. (2025). Hydrological impacts on the discrepancy between apparent potential evaporation and pan evaporation. *J. of Hydrol.*, 134876.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134876>
- Luhamaa, A., Kallis, A., Mändla, K., Männik, A., Pedusaar, T., & Rosin, K. (2014). Eesti tuleviku kliimastenaariumid aastani 2100. Lepingulise töö aruanne projekti “Eesti riikliku kliimamuutuste mõjuga kohanemise strateegia ja rakenduskava ettepaneku väljatöötamine” lisana. Keskkonnaagentuur, 90.
- Luhamaa, A., Kimmel, K., Männik, A., & Rõõm, R. (2011). High resolution re-analysis for the Baltic Sea region during 1965–2005 period. *Clim. Dyn.*, 36(3), 727-738.
<https://doi.org/10.1007/s00382-010-0842-y>
- Montibeller, B., Jaagus, J., Mander, Ü., & Uemaa, E. (2021). Evapotranspiration intensification over unchanged temperate vegetation in the Baltic countries is being driven by climate shifts. *Front. For. Glob. Change*, 4, 663327.
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.663327>
- Moroizumi, T., Ito, N., Koskiahho, J., & Tattari, S. (2014, December). Long-term trends of pan evaporation and an analysis of its causes in Finland. In AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 2014, pp. H51F-0674). <https://ousar.lib.okayama-u.ac.jp/52684>
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., & Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst. Sci. Data*, 13(9), 4349–4383.
<https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Nistor, M.-M., Satyanaga, A., Dezsi, Ş., & Haidu, I. (2022). European Grid Dataset of Actual Evapotranspiration, Water Availability and Effective Precipitation. *Atmosphere*, 13(5), 772. <https://doi.org/10.3390/atmos13050772>
- Pirinen, P., Lehtonen I., Heikkinen, R. K., Aapala, K., & Aalto, J. (2022). Daily gridded evapotranspiration data for Finland for 1981–2020. *FMI's Climate Bulletin Research Letters*, 4(2), 35-37. <https://doi.org/10.35614/ISSN-2341-6408-IK-2022-11-RL>

- Post, P., & Aun, M. (2024). Changes in cloudiness contribute to changing seasonality in the Baltic Sea region. *Oceanologia*, 66(1), 91-98.
<https://doi.org/10.1016/j.oceano.2023.11.004>
- Sauga, A. (2017). Statistika õpik majanduseriala üliõpilastele. Tallinn: TTÜ Kirjastus.
<https://digikogu.taltech.ee/et/item/76e80221-4d41-40e6-b395-a6ef16609482>
- Speranskaya, N. A. (2011). Changes in some elements of the water cycle in the easternmost part of the Baltic Sea Drainage Basin between 1945 and 2010. *Oceanologia*, 53, 279-292. <https://doi.org/10.5697/oc.53-1-TI.279>
- The BACC II Author Team. (2015). *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16006-1>
- Thorntwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geogr. Rev.*, 38(1), 55–94. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Trenberth, K. E., Dole, R., Xue, Y., Onogi, K., Dee, D., Balmaseda, M., ... & Large, W. (2010). Atmospheric reanalyses: a major resource for ocean product development and modeling. <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/people/yxue/pub/24.pdf>
- Trenberth, K. E., Jones, P. D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein Tank, A., Parker, D., Rahimzadeh, F., Renwick, J. A., Rusticucci, M., Soden, B., & Zhai, P. (2007). Observations: Surface and atmospheric climate change. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, & H. L. Miller (Eds.), *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Vehviläinen, B., & Huttunen, M. (1997). Climate change and water resources in Finland. *Boreal Environ. Res.*, 2, 3-18.
- Virta, J. (1966). Measurement of evapotranspiration and computation of water budget in treeless peatlands in the natural state. *Hydrologisen toimiston tiedonantoja*.
<https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/171575/tie6170.pdf?sequence=1>
- Yu, P. S., Yang, T. C., & Chou, C. C. (2002). Effects of climate change on evapotranspiration from paddy fields in southern Taiwan. *Clim. Change*, 54(1), 165-179.
<https://doi.org/10.1023/A:1015764831165>

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Laura Nummert

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Tooma soojaama aurumismõõtmiste võrdlev analüüs“, mille juhendaja on Arne Männik ja kaasjuhendaja Katriin Käärik,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

22.05.2026

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.