

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geograafia osakond

Bakalaureusetöö geograafias (12 EAP)

Päikese kogukiirguse territoriaalne ja ajaline muutlikkus Eestis

Janely Kangur

Juhendaja: prof Jaak Jaagus

Tartu 2022

Annotatsioon

Päikese kogukiirguse territoriaalne ja ajaline muutlikkus Eestis

Käesoleva töö eesmärgiks oli analüüsida päikesekiirguse territoriaalset varieeruvust, sesoonset muutlikkust ja pikaajalisi trende Eestis. Territoriaalse varieeruvuse leidmiseks kasutati kaheksa automaatilmajaama kiirgusandmeid. Selgus, et Päikese kogukiirguse hulk on suurem Lääne-Eesti saartel ja mandril ning väiksem Põhja-Eestis ja sisemaal, kuid talvel on kiirgusgradient põhja-lõunasuunaline. Sesoonne ja pikaajaline muutlikkus leiti Tartu-Tõravere ja Tiirikoja ilmajaama andmetel. Aasta lõikes on kiirgushulk suurim juunis ja väiksem detsembris ning sooja poolaasta kiirgushulgad on stabiilsemad. Tartu-Tõravere andmetel analüüsiti muutustrende perioodi 1955-2020 kohta ning Tiirikoja andmetel aastate 1962-2020 kohta. Lisaks jagati aegread kaheks – enne ja pärast 1990. aastat. Trendianalüüsi tehti Mann-Kendalli testiga ja trendi tõusukordaja leiti Sen'i meetodil. Uuritaval perioodil on kevaded muutunud päikeselisemaks, kuid talve kiirgussummad on jäänud väiksemaks.

Märksõnad: päikesekiirgus, kogukiirgus, Eesti kliima

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

Abstract

Territorial variation and temporal changes in global radiation in Estonia

The aim of this thesis was to analyse territorial variation as well as seasonal and long-term changes in global radiation in Estonia. To find the territorial distribution of solar radiation, data from eight automatic weather stations was used. The results showed that there is more solar radiation in West-Estonian islands and coast and less in North-Estonia and inland, however in winter the radiation totals increase moving from north to south. Data from Tartu-Tõravere and Tiirikoja stations was used to study seasonal and long-term changes. Global radiation totals are highest in June and lowest in December. Radiation sums are more stable in warmer months. Tartu-Tõravere data was available for the period 1955-2020 and Tiirikoja data for 1962-2020. Trend analysis was conducted for the whole data series and also for shorter periods – before and after 1990. Trends were found using the Mann-Kendall test and Sen's slope estimator. It became evident that global radiation has increased in spring and decreased in winter.

Key words: solar radiation, global radiation, climate of Estonia

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

Sisukord

| | |
|---|----|
| Sissejuhatus | 4 |
| 1. Teoreetiline ülevaade | 6 |
| 1.1 Kiirgushulka mõjutavad tegurid | 6 |
| 1.2 Territoriaalne varieeruvus | 8 |
| 1.3 Pikaajalised trendid | 9 |
| 1.4 Sesoonsed muutused ja omapärad | 11 |
| 2. Andmed ja meetodika | 14 |
| 3. Tulemused ja arutelu | 16 |
| 3.1 Päikesekiirguse territoriaalne varieeruvus | 16 |
| 3.2 Päikesekiirguse sesoonne muutlikkus | 21 |
| 3.3 Päikesekiirguse pikaajalised muutused | 23 |
| 3.3.1 Pika aegrea trendid (1955/1962-2020) | 23 |
| 3.3.2 Esimese perioodi trendid (1955/1962-1990) | 26 |
| 3.3.3 Teise perioodi trendid (1991-2020) | 27 |
| Kokkuvõte | 29 |
| Summary | 31 |
| Tänuavaldused | 33 |
| Kasutatud kirjandus | 34 |

Sissejuhatus

Kliima on selgelt muutumas. Lisaks temperatuuri tõusule toimuvad muutused ka teistes kliimanäitajates, sest Maa on ühtne süsteem, kus üks muutus kutsub esile teise. IPCC 2021. aasta aruande kohaselt on 1970ndatest toimunud globaalse keskmise õhutemperatuuri drastiline tõus, mida põhjustavad inimtegevusega õhku paisatavad kasvuhooonegaasid. Maailma keskmine õhutemperatuur oli aastatel 2011-2020 1,09 °C võrra kõrgem kui perioodil 1850-1990. Selle tulemusena liustikud taanduvad, ookeani veetase ja temperatuur tõusevad, ekstreemsed ilmastikunähtused, nagu kuumalained, põuad, üleujutused ja orkaanid, esinevad aina sagedamini ja intensiivsemalt. (IPCC, 2021)

Kliimamuutuste kontekstis on väga aktuaalne uurida päikesekiirguse muutusi, sest Päike on meie energiaallikas ja mõjutab suuresti kliimat. Selliste teadmiste põhjal saab teha prognoose tulevikuks, oma käitumist suunata ja teha teadlikke otsuseid nii üksikisiku, valitsuse kui ka riikidevaheliste organisatsioonide tasemel. Taastuvate energiaallikate, nagu päikeseenergia, olulisus on kliimamuutuste kontekstis aina tõusmas. Päikeseenergia tootmine on keskkonnasõbralik ja aitab vähendada fossiilsete kütuste põletamisest õhku paiskuvate saasteainete hulka. Sellest tulenevalt on kasulik teada, kuidas jaotub päikesekiirgus ja millised on optimaalseimad asukohad päikesepaneelidele. (Shinn, 2018) Päike kujundab suuresti ka inimeste meeleolu ja tegevusi. Teadmine sellest, millal ja kus paistab rohkem Päikest, aitab otsustada puhkuse päevade ja koha valikul. Päikesekiirgusel on tähtis roll ka looduslike protsesside kujundamisel. Sellest sõltub näiteks fotosünteesi aktiivsus ja mikrokliima erinevused (Karing, 1972).

Põhjaliku ülevaate päikesekiirgusega seonduvast annab Viivi Russaku ja Ain Kallise koostatud „Eesti kiirguskliima teatmik“ (Russak & Kallis, 2003). Viivi Russak on kirjutanud artikleid päikesekiirguse pikaajaliste trendide kohta Eestis (Russak, 1990; 1998; 2009). Samuti on seda teemat uurinud Kalju Eerme, Ain Kallis, Uno Veismann ja Ilmar Ansko (Eerme *et al.*, 2009; Eerme jt, 2011). Päikesekiirguse territoriaalset jaotust Eestis on uurinud Peeter Karing (Karing, 1972) ja automaatilmajaamade andmete põhjal on kiirguse jaotuse leidnud Kai Rosin ja Sirje Keevallik (Rosin & Keevallik, 2012).

Territoriaalset kiirgushulga varieeruvust ei ole uusimate ja kõikide automaatilmajaama andmete põhjal analüüsitud. Nüüd mõõdetakse päikesekiirgust kokku kaheksas Eesti

automaatilmajaamas, mille andmeid kasutades on võimalik kindlaks teha täpsem päikesekiirguse territoriaalne jaotumine. Eestis ei ole summaarse päikesekiirguse uuemaid andmeid alates 2010. aastast lähemalt uuritud. Selles töös pikendatakse kiirgusandmete aegrida ja selgub kogukiirguse muutlikkus Eestis kahe ilmajaama andmete põhjal, milleks on Tartu-Tõravere ja Tiirikoja, kust on andmeid vastavalt perioodi 1955-2020 ja 1962-2020 kohta. Tööl on kolm suuremat eesmärki:

- Esiteks soovitakse teada saada, kuidas varieerub päikesekiirguse hulk Eesti lõikes ehk kas ja kui palju on rannikul päikesekiirguse hulk suurem kui sisemaal.
- Teiseks soovitakse välja selgitada, milline on päikesekiirguse sesoonne muutlikkus.
- Kolmandaks tahetakse välja uurida, milline on olnud kogukiirguse pikaajaline dünaamika ja trendid viimastel aastakümnetel nii kogu aasta summas kui ka aastaegade lõikes, kui on selgelt toimunud kliima soojenemine.

1. Teoreetiline ülevaade

Päikese, aluspinna ja atmosfääri kiirgust uurivat teadusharu nimetatakse aktinomeetriaks. Päikese summaarne ehk kogukiirgus koosneb horisontaalsele pinnale langevast otsesest ja hajusast kiirgusest. Otsekiirgus jõuab Päikeselt maapinnale praktiliselt paralleelsete kiirtena, kuid hajuskiirgus hajub õhu molekulidel, aerosoolil, veeaurul ja pilvedes enne maapinnani jõudmist. Summaarset kiirgust nimetatakse ka integraalseks summaarseks kiirguseks, sest see koosneb elektromagnetilise kiirguse kõikidest maapinnani jõudvatest ja kliimat kujundavatest lainepikkustest, milleks on ultraviolettkiirgus, nähtav valgus ja infrapunakiirgus. Otsekiirgust mõõdetakse aktinomeetriga, mille toru on suunatud otse Päikesele ja mis liigub vastava mehhanismi abil kogu aeg Päikesega kaasa. Kogukiirgust mõõdetakse aga püranomeetriga, mille tööpõhimõte seisneb seadeldise eri osade temperatuuride erinevusest tekkinud termopinge mõõtmisel, mis näitab kiirgusvoo pindtihedust. (Russak & Kallis, 2003) Kiirgushulka saab väljendada mitmete mõõtühikutega, nagu W/m^2 , $kcal/cm^2$ ja MJ/m^2 (Karing, 1972; Russak & Kallis, 2003).

1.1 Kiirgushulka mõjutavad tegurid

Kogukiirguse väärtus oleneb pilvisusest, Päikese kõrgusest, aluspinna optilistest omadustest ja atmosfääri läbipaistvusest. Pilved enamasti vähendavad päikesekiirguse hulka, aga kui taevas on vaid osaliselt pilves ja Päikese ees pilvi pole, võib summaarne kiirgus olla suurem kui täiesti selge taeva korral. Põhjus seisneb selles, et otsekiirgusele lisandub veel pilvedelt peegeldunud kiirgus. Kui taevas on lauspilves, koosneb kogukiirgus ainult hajuskiirgusest. (Russak & Kallis, 2003)

Ilma, sealhulgas pilvisust, Eesti aladel mõjutavad suure mastaabiga atmosfäärsed ja ka ookeanis toimuvad protsessid, mille toimimine on veel suuresti ebaselge ja mõju ilmale varieeruv. Erinevused ookeani pinnavee temperatuuris ja soolsuses kutsuvad esile termohaliinse tsirkulatsiooni, mis paneb vee ringlema, sest temperatuurist ja soolsusest sõltub vee tihedus ja tihedam vesi on raskem. Ookeani pinnavee omadused kujundavad rõhkkondade erinevusi atmosfääris, sest kui mingil alal on vesi soojem kui ümberringi, kandub sealt soojust ka atmosfääri ning tekivad tõusvad õhuvoolud ja madalrõhuala. Rõhu erinevused atmosfääris panevad õhu liikuma, mis omakorda tekitab hoovusi.

Eesti ilma mõjutavad enim Islandi lähistel tekkivad tsüklonid, mis liiguvad sealt ida suunas. Olenevalt sellest, kust tsüklon Eesti suhtes möödub, on meil ka erinev ilm. Juhul, kui tsüklon möödub põhjast, kandub meile läänevoolus talve kohta niiske ja soe õhk. Kui tsüklon möödub aga lõunast, on valdavad põhjakaarte tuuled, mis toovad sisemaalt või Arktikast külma õhku ja talvel lumesadu. Suvel toob tsüklon reeglina jahedama ilma, kui on kõrgrõhkkonna mõjusfääris olles. Eestisse võivad jõuda ka Lõuna-Euroopas tekkinud tsüklonid, nn lõunatsüklonid, mis liiguvad üldsuunas lõunast põhja. Kui nad mööduvad Eestist lääne poolt, siis nad toovad soojust, kui aga ida poolt, siis hoopis külma arktilist õhku. On leitud, et tsüklonite arv on suurenenud ja just selliste, millega kaasneb soe ja lõrtsine talveilm. (Sepp & Jaagus, 2007)

Tsüklonaalselt aktiivsetel perioodidel on pilvisus suurem ning talvisel ajal õhutemperatuur kõrgem ja lumikate väiksem. Tsüklonite esinemine sõltub Põhja-Atlandi ostsillatsioonist (NAO) ja Arktika ostsillatsioonist (AO). NAO indeks näitab rõhugradienti Islandi miinimumi ja Assoori maksimumi vahel. Suurema gradiendi korral on NAO indeks positiivne, millega kaasneb intensiivne läänevool ning Eestis on pilvine ja sajune. Vastasel juhul domineerivad meil aga selged ilmad. (Eerme *et al.*, 2009) NAO indeks avaldab suuremat mõju talve ilmale (Chiacchio & Wild, 2010; The BACC II Author Team, 2015). AO indeks näitab õhurõhu erinevusi põhjapooluse ja keskklaiuste vahel. Kui AO indeks on positiivne, on poolusel keskmisest madalam rõhk ja keskklaiustel keskmisest kõrgem rõhk. Sel juhul on õhurõhu gradient suur ning puhuvad tugevad läänetuuled, mis toovad tsükloneid. Negatiivse AO väärtuse korral on gradient väiksem. (Eerme *et al.*, 2009) Selliste protsesside mõjud ilmale ei ole aga alati ühetaolised ning atmosfääritingimused ja päikesekiirgusega varustatus ei ole selges korrelatsioonis (Eerme jt, 2011).

Eesti alal varieerub Päikese kõrgus taevavõlvil aasta jooksul suuresti. Kui suvisel pööripäeval on Päike olenevalt laiusest $\sim 54^\circ$ kõrgusel, siis talvisel pööripäeval kõigest $\sim 8^\circ$ kõrgusel horisondi kohal (Russak & Kallis, 2003). Sellepärast on ka kiirgushulgad väga erinevad. Suvisel poolaastal, mis on periood 21. märtsist kuni 22. septembrini, koguneb aastasest kogukiirgusest ligikaudu 80%. (Eerme *et al.*, 2009) Albeedo mõjutab aluspinnalt peegeldunud kiirgushulka. Albeedo muutub aasta jooksul lumikatte tõttu, millepärast on albeedo suurem talvisel ajal, kõige muutlikum hilissügisel ja varakevadel ning kõige stabiilsemalt madal suvisel poolaastal. (Russak & Kallis, 2003) Talvisel perioodil on kiirgussumma suurem juhul, kui esineb lumikate, sest siis toimub teistkordne peegeldumine, mis tähendab, et kõrge albeedoga

aluspinnalt peegeldub päikesekiirgus tagasi atmosfääri ja seejärel pilvedelt uuesti maapinnale tagasi. Selline protsess tõstab hajuskiirguse hulka. (Karing, 1972)

Atmosfääris leiduvad gaasid ja aerosoolid neelavad ja hajutavad päikesekiirgust, mille tulemusel jõuab ka selge taeva korral maapinnani väiksem kiirgushulk, kui on atmosfääri ülaosas. Eelkõige vähendab kiirgushulka aerosool ehk õhus hõljuvad vedelad või tahked osakesed, mis on molekulidest suuremad. Need võivad olla nii looduslikku kui ka inimtekkelist päritolu, mis tähendab, et ka inimtegevus mõjutab päikesekiirguse hulka. Looduslikku päritolu aerosoolid on näiteks vulkaanipursete produktid, tolm, õietolm, metsatulekahjude suits ning inimtekkelised on tööstusest ja transpordist pärinevad süsiniku-, väävli- ja lämmastikuühendid. Atmosfääri läbipaistvus on kõige parem novembrist jaanuarini ja halvim suvekuudel, kui on rohkem aerosoole õhus hõljumal. (Russak & Kallis, 2003)

1.2 Territoriaalne varieeruvus

Päikesekiirguse hulga territoriaalset jaotust mõjutavad mitmed tegurid, nagu veekogu lähedus, reljeef ja laiuskraad. Kiirgusrežiimi varieerumine kujundab mikroklimaatilisi erinevusi. Aasta saab kiirguse jaotumise põhjal jagada kaheks perioodiks. Novembrist märtsini kestval talveperioodil on pilvisus Eesti lõikes suhteliselt ühtlane ja kiirgushulga territoriaalset jaotust mõjutab aluspinna albeedo. Aprill on üleminekuperiood, kus albeedo osatähtsus hakkab vähenema ja pilvisuse territoriaalne muutlikkus suurenema, mis kujundab ümber kiirguse jaotumise. Maist oktoobrini kestval suveperioodil mõjutab kiirguse juurdevoolu enim pilvisus, mis on väiksem rannikul. (Karing, 1972) See on tingitud sellest, et suvel on meri rannikualadel külmaks aluspinnaks ja atmosfääris on stabiilne kihistus. Aluspinna lähedal on õhk suhteliselt jahe ja raske ning ei kipu ülespoole tõusma ega pilvi moodustama. Sisemaal aga maapind soojeneb rohkem ja ebaühtlaselt ning atmosfääris on labiilne kihistus, mis soodustab pilvede teket. (Russak & Kallis, 2003)

Karing (1972) on leidnud summaarse päikesekiirguse territoriaalse jaotuse, kasutades selleks ainult Tartu jaama kiirgusandmeid ja leides teiste ilmajaamade tõenäolised kiirgussummad sealsete pilvisuse ja albeedo andmete kaudu. Terve aasta kiirgussummade territoriaalne varieeruvus on sarnane kiirguse jaotumisele suveperioodil, sest siis langeb maapinnale enim päikesekiirgust. Kiirguse aastasumma on suurim rannikul ja saartel ning ka Peipsi ja Võrtsjärve vahelisel alal. Väiksem kiirgushulk esineb Pandivere kõrgustikul, Sakala kõrgustiku lõunaosas

ning Otepää ja Haanja kõrgustikul, sest kõrgustikel on pilvisust suurendav mõju. Aastane kiirgushulk on väiksem veel Kesk-Eesti lavamaa ja Kõrvemaa piirkonnas, kuhu kanduvad rannikul moodustunud konvektsioonipilved. (Karing, 1972)

Rosin ja Keevallik (2012) on uurinud päikesekiirguse territoriaalset jaotust mitmete automaatilmajaamade andmete põhjal. Selgus, et aastane kiirgussumma on suurem Lääne-Eesti saartel ja mandril ning väiksem Põhja-Eestis ja sisemaal. Suurimad kiirgushulgad on Vilsandil ja Pärnus. Aasta jooksul toimuvad aga päikesekiirguse territoriaalses jaotuses muutused. Aprillis on Lääne-Eestis päikest rohkem kui Ida-Eestis, sest meri on külmaks aluspinnaks, mis takistab pilvede teket. Oktoobris seevastu on jaotus Eesti lõikes suhteliselt ühtlane, sest pilvisus jaotub võrdsemalt. Suvel on kiirgushulgad suuremad rannikul, seega asuvad kuurordid seal põhjusega. Kui vaadelda territoriaalseid erinevusi kiirgushulga ööpäevases kõikumises, tuleb välja, et kiirgushulga ööpäevane käik on kevadel varieeruvam kui suvel. Lisaks saavutab päikesekiirgus oma päevase maksimumi Eesti lõikes erineval ajal. Tartu-Tõraveres on suurim kiirgushulk ligikaudu tund aega varasemal kellaajal kui Vilsandil. (Rosin & Keevallik, 2012)

1.3 Pikaajalised trendid

Wild *et al.* (2005) on leidnud, et üldiselt esines üle terve maailma 1950. aastast kuni 1990. aastani kiirgushulga vähenemine ja seejärel tõus. Tuleb välja ka erandeid. Näiteks Indias, Aafrika lõunaosas, Lõuna-Ameerikas ja mõningates Austraalia jaamades on jätkunud päikesekiirguse vähenemise tendents. Kiirgushulkade andmerekad ei ole aga kahjuks väga pikad ja mõõtmisi on tehtud üle maailma vähestes kohtades, mistõttu ei saa terve Maa kiirgustrendide kohta põhjanevaid järeldusi teha. Kõige pikemad andmerekad ja tihedamalt paiknevad jaamad on Euroopas ja Jaapanis. (Wild *et al.*, 2005) On avastatud, et ka satelliidipiltide kaudu saab leida päikesekiirguse hulka. Alates 1980ndatest toodavad satelliidid pilte terveist Maast, mille põhjal saab leida infot ka nende piirkondade kohta, kus päikesekiirguse mõõtmisi ei teostata. Võrreldes maapinnal tehtud mõõtmisi satelliidipiltide põhjal tuletatud väärtustega, esineb hea kokkulangevus, kuigi satelliitidelt saadud andmed ei sisalda teavet aerosooli optilise paksuse kohta. (Pfeifroth *et al.*, 2018; Sanchez-Lorenzo *et al.*, 2015; Sanchez-Lorenzo *et al.*, 2017)

Üle Euroopa esines 1940ndatel kiirgushulga suurenemine, seejärel vähenemine 1950ndatest kuni 1980ndateni ning siis taaskord tõus. Teadaolevate andmete kohaselt oli päikesekiirguse absoluutne maksimum Euroopas 1955. ja 1959. aastal ning miinimum 1985. aastal. (Sanchez-

Lorenzo *et al.*, 2015) Stjern *et al.* (2009) uurisid kiirgushulga muutusi Euroopa loodeosas ja arktilises piirkonnas. Enamikus jaamades on päikesekiirguse trend olnud sarnane. Alates 1955. aastast kuni 1980ndate lõpuni oli kiirgushulk vähenemas. Edaspidi on jätkunud langustrend Norras, Islandil ja Gröönimaal, kuid Saksamaal, Rootsis, Soomes ja Teravmägedel on kiirgushulgas toimunud tõusutrend. (Stjern *et al.*, 2009) Moskvas on samuti täheldatud kiirgushulga langust 1990ndateni ja seejärel tõusutrendi (Abakumova, 2008; Wild *et al.*, 2005). Sellises trendis mängib tähtsat rolli aerosooli optiline paksus, mis on aja jooksul muutunud. Kogu Euroopas langes SO₂ emissioon ajavahemikus 1980-2004 lausa 73%. Esmalt toimus emissiooni langus Lääne-Euroopas ja 1990ndatel jõudis ka Ida-Euroopa järele. (Vestreng *et al.*, 2007)

Enamasti kaasneb pilvisuse tihenemisega kiirgushulga langus, kuid see pole alati nii. Näiteks Hamburgis Saksamaal ja Lundis Rootsis suurenesid perioodil 1983-2003 nii pilvkate kui ka kiirgushulk, mida saab seletada aerosooli optilise paksuse drastilise vähenemisega. Lundi puhul võib põhjuseks olla ka see, et pilvisus suurenes just talvisel poolaastal ja vähenes suvisel perioodil, mistõttu aasta keskmine pilvisus tõusis, kuid kiirgushulk kasvas samuti just sooja poolaasta arvelt. (Stjern *et al.*, 2009) 21. sajandi alguses paistab Euroopas kiirgushulk stabiliseeruvat (Sanchez-Lorenzo *et al.*, 2015).

Konkreetselt on uuritud ka Läänemere ümbruse kiirgushulkade muutusi. Läänemere piirkonnas on kiirgushulkade trendid olnud sarnased kogu Euroopale, aga on välja tulnud ka vastupidiseid trende. Poolas oli perioodil 1950-1990 päikesekiirgus hoopis suurenenemas ja pilvi vähem ning sealt edasi hakkas kiirgushulk vähenema. (The BACC II Author Team, 2015) Leedus seevastu oli sarnaselt paljudele teistele Euroopa piirkondadele kuni 1990ndateni pimenev periood (Russak, 1990; The BACC Author Team, 2008).

Russak (2009) on uurinud päikesekiirguse hulga muutusi Eestis perioodil 1955-2007. Ta kasutas selleks Tartu-Tõravere andmeid, mille kvaliteet on garanteeritud, sest jaam kuulub rahvusvahelisse BSRN (Baseline Surface Radiation Network) jaamade võrku. Tuli välja, et 1955. aastast kuni 1990ndateni oli meil pimenev periood. Kogu- ja otsekiirgus olid kahanemas ning statistiliselt oluline trend oli märtsis ja septembris. Hajuskiirgus püsis pimeneval perioodil aga stabiilsena. Sellisel trendil on mitmeid põhjuseid. Sel perioodil oli optiliselt paksude alumiste pilvede hulk tavapärasest suurem, mis oli tingitud positiivsest NAO indeksist. (Russak, 2009) Eriti oligi märgata pilvisuse suurenemist märtsikuus (Tooming, 2002).

Lisaks oli atmosfääri läbipaistvus kuni 1990ndateni kahanemas ja aerosooli optiline paksus oli suur, mis tulenes õhu saastatusest ja vulkaanipursetest. Suur hulk aerosooli õhus tähendas ka rohkem kondensatsioonituumasid pilvede tekkeks. (Russak, 1990; Russak, 2009) Võimsad vulkaanipursked vähendavad atmosfääri läbipaistvust mitmeks aastaks, sest aerosooliosakesed jäävad stratosfääri, kust sademed neid välja ei uhu. Eriti halb oli atmosfääri läbipaistvus 1984. aastal, kui jõudis kohale 1982. aastal toimunud El Chichoni purske mõju, millele oli eelnenud veel mitu vulkaanipurset. Vahepeal atmosfäär veidi selgines kuni 1991. aasta Pinatubo vulkaanipurskeni, mis vähendas 1992. aastaks taaskord atmosfääri läbipaistvust Eestis ja mujal. (Ohvril *et al.*, 2009; Russak, 1998)

Alates 1990. aastatest hakkas päikesekiirguse hulk suurenema. Kogu- ja otsekiirgus kasvasid ning hajuskiirgus vähenes. See oli tingitud asjaolust, et NAO indeks kahanes, millega seoses vähenes ka alumiste pilvede hulk ja rohkem päikesekiirgust jõudis maapinnani. Erinevalt pimenevast perioodist hakkas atmosfääri läbipaistvus suurenema, kuna õhusaastamisele kehtestati piirangud ja tehaste korstnatele pandi heitmeid kinni püüdvad filtrid ette. (Russak, 2009) Eesti põlevkivi tehased emiteerisid 1991. aastal 149 tuhat tonni SO₂, kuid 1995. aastal juba ainult 74 tuhat tonni (Russak, 1998). Eesti iseseisvumisega vähenes siin tööstuse ja põllumajanduse osatähtsus ning kogu Euroopast viidi mitmed tehased välja, mis on aidanud kaasa õhu puhtusele (Ohvril *et al.*, 2009; Wild *et al.*, 2005).

Lisaks pole aastakümneid toimunud nii võimsaid vulkaanipurskeid kuni hiljutise ajani, mil purskas Tonga vulkaan Vaikses ookeanis, mille võimsus oli sarnane Pinatubo purskele. Ennustuste kohaselt pole aga Tonga purske mõju kliimale märkimisväärne, sest tuhapilv sisaldas võrdlemisi vähe SO₂ ja sündmus toimus lõunapoolkeral. (Zuo *et al.*, 2022) Atmosfääri läbipaistvust halvendavad ka metsatulekahjud, mida esineb kliima muutumise tõttu aina rohkem, sest põuaseid perioode esineb sagedamini ja need on pikemad (Ohvril *et al.*, 2009).

1.4 Sesoonsed muutused ja omapärad

1980ndate lõpust, kui hakkas päikesekiirguse hulga suurenemine, on Euroopas enim kasvu täheldatud kevadel ning piirkondadest Ida-Euroopas ja Loode-Euroopas (Pfeifroth *et al.*, 2018). Perioodil 1970-2000 on kogu Euroopas üldiselt talvisel ajal kiirgushulk veidi tõusnud, sügisel on statistiliselt olulisel määral langenud ning suvel ja kevadel ühtmoodi langenud kuni 1980ndateni ja sealt edasi natukene tõusnud. Muidugi esineb Euroopa lõikes varieeruvust, mis

tuleneb suuresti NAO indeksist ning erinevused kiirgushulgas on märkimisväärsemad talvel ja sügisel, kui NAO indeks avaldab ilmale suuremat mõju. (Chiacchio & Wild, 2010) Uscka-Kowalkowska *et al.* (2007) on uurinud kiirgushulga muutusi kuude kaupa Kesk-Euroopas perioodil 1951-2005. Selgus, et kiirgushulk on sel ajavahemikul peaaegu kõikides uuritavates punktides kasvanud ning eriti novembris, detsembris, aprillis ja mais. Kõige vähem kasvas kiirgushulk märtsis ja oktoobris. Kiirgushulk oli kõige stabiilsem augustis ja kõige varieeruvam detsembris ja veebruaris. (Uscka-Kowalkowska *et al.*, 2007)

Eerme *et al.* (2009) on uurinud päikesekiirguse sesoonseid muutusi Tartu-Tõraveres perioodil 1955-2006. Suvel oli maksimaalne kiirguse hulk 1966.-1975. aastatel ja siis alates 1994. aastast ning minimaalne perioodil 1976–1993. Kevadine päikesekiirguse hulk oli maksimaalne 1965. ja 2000. aasta kandis ja miinimum oli aastatel 1980-1985. (Eerme *et al.*, 2009) Kevade ja suve kiirgushulga muutused langevad kokku Russaku (2009) poolt väljaselgitatud üldise päikesekiirguse hulga muutuse trendiga. Sügisel ei ole suuri muutusi kiirguse hulgas täheldatud. Talved on 1990ndatest hoopis pimedamaks läinud, aga kuna talve päikesekiirgus panustab nii vähe terve aasta summasse, on kiirgushulk vaatamata sellele 1990ndatest kasvanud. (Eerme *et al.*, 2009)

Muutused päikesekiirguse hulgas on ennekõike seletatavad atmosfääri tsirkulatsiooni muutustega. Kiirgushulga suurenemine suvel on mõjutatud Hadley tsirkulatsiooni laienemisest pooluste suunas, millega kaasneb kõrgem õhurõhk ja selge ilm. Tegu on mastaapse õhuringlusega ekvaatori madalrõhuvööndi ja troopika kõrgrõhuvööndi vahel. (Eerme *et al.*, 2009). On täheldatud, et talvisel ajal on hakanud esinema rohkem tsükloonaalset ilma, sest NAO ja AO indeksid on kasvanud (Jaagus *et al.* 2017). See tähendab, et Atlandilt kandub Eestisse soe ja niiske õhk, millega kaasnevad pilvisemad, sajusemad ja soojemad ilmad (Jaagus *et al.* 2018). Soojemate talvedega on kaasnenud ka lumikatte kestuse vähenemine ligikaudu 30 päeva võrra alates 1950. aastast. Lumi tuleb maha hiljem ja kaob varem. Eriti on muutus toimunud märtsikuus. (Keevallik & Russak, 2001; Viru & Jaagus, 2019) Selline trend vähendab kiirgushulka, sest albeedo on väiksem ja seetõttu on ka teistkordselt peegeldunud kiirgushulk väiksem (Russak, 1998). Talve pimedamaks muutumist võib seetõttu olla mõjutanud ka albeedo vähenemine, mis pisendab hajuskiirguse hulka (Tooming, 2002).

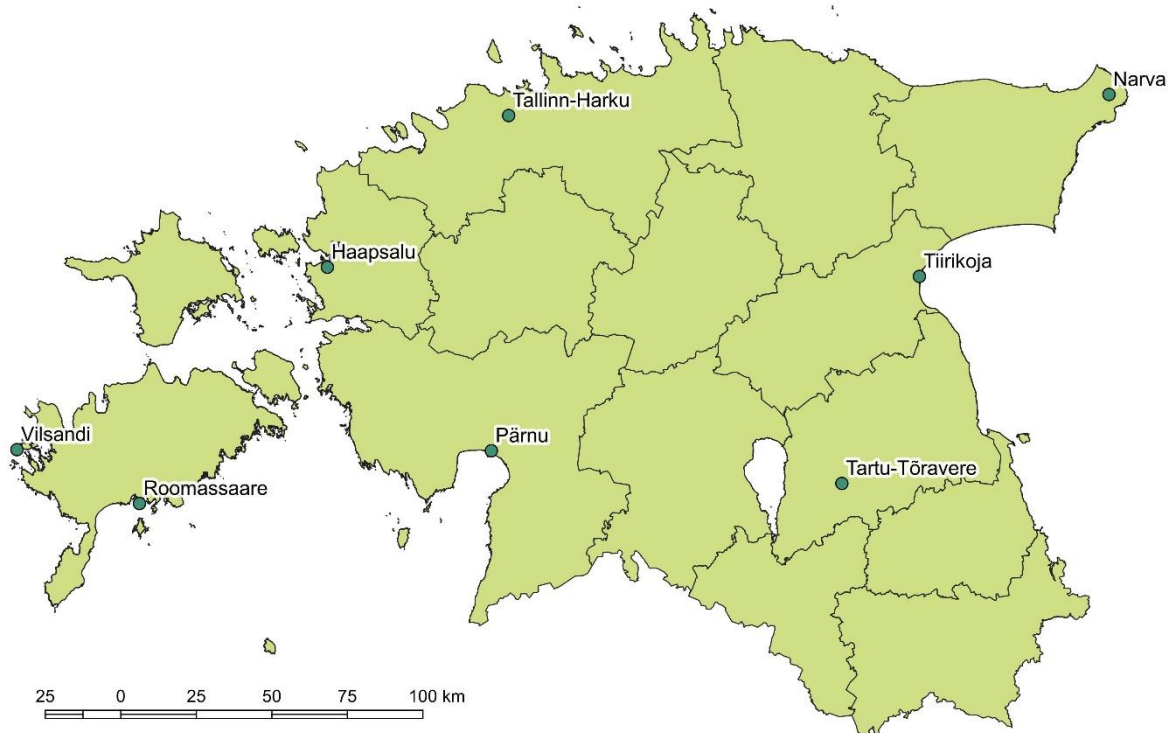
Pilvisuse ja sademete puhul on leitud mitmeid muutustrende, mis on mõjutanud ka maapinnani langeva päikesekiirguse hulka. Eriti on muutunud pilvisemaks märts, mis on jällegi seotud tsonaalse tsirkulatsiooni kasvuga, ning lisaks ka juuni ja september. Seevastu mai ja oktoober

on mõnevõrra selginenud. Need trendid kehtivad aastani 1995. (Keevallik & Russak, 2001) Sademete hulgas on esinenud tõusutrend talvel, ennekõike jaanuaris. Ka suvel on hakanud rohkem sadama ning eriti tuleb esile juuni. Aprillis ja septembris on sademeid aga vähemaks jäänud. (Jaagus *et al.*, 2017; Jaagus *et al.*, 2018)

Eerme jt (2011) on uurinud päikesekiirguse hulga muutlikkust Tartu-Tõraveres erinevatel kuudel perioodil 1955-2010. Leiti kuude tegeliku ja selge taeva korral kogu võimaliku kiirguse suhe, mis võimaldas eemaldada Päikese kõrgusest tulenevad suured erinevused. Selgus, et suvisel poolaastal on nii summaarne kui ka suhteline päikesekiirguse hulk suurem kui jahedamal poolaastal, sest lisaks Päikese kõrguse erinevusele on soojemal poolaastal tavaliselt ka vähem pilvi. (Eerme jt, 2011) Pilvkatte sesoonsest muutlikkusest tuleneb ka see, et suvel on otsekiirguse osakaal kogukiirgusest suurem kui talvel (Eerme *et al.*, 2009). Maikuus jõuab maapinnani potentsiaalsest päikesekiirgusest kõige suurem hulk, mis viitab rohketele selgetele päevadele. Suurim kiirgushulk on siiski juunis. Kõige väiksem osa võimalikust kiirgusest jõuab maapinnani aga novembris ning kiirgushulk on väikseim detsembris, kui Päike asub kõige madalamal. Vaadeldaval perioodil osutus päikesekiirguse hulk stabiilsemaks aprillist septembrini, olles stabiilseim juunis. Kiirgushulk oli muutlikum aga oktoobrist märtsini ning eriti ebastabiilne novembris ja detsembris. (Eerme jt, 2011)

2. Andmed ja metoodika

Töös analüüsitavad Päikese kogukiirguse andmed pärinevad Riigi Ilmateenistuse elektroonilisest andmebaasist. Analüüsitakse kaheksa Eesti automaatilmajaama päikesekiirguse andmeid, mis on summeeritud kuude kaupa ja esitatud ühikus MJ/m². Ilmajaamadeks on Tartu-Tõravere, Tiirikoja, Tallinn-Harku, Narva, Vilsandi, Pärnu, Haapsalu ja Roomassaare (joonis 1). Aegread on jaamade lõikes erineva pikkusega, sest mitmes ilmajaamas hakati päikesekiirgust mõõtma alles 2000ndatel. Kõigepealt oli tarvis andmetega teha mõningaid korrekture. Mõned jaamad kolisid vahepeal teise asukohta ja andmerekad tuli liita. Narva-Jõesuus asuv jaam kolis 2013. aasta detsembris Narva ja Pärnu-Sauga jaam kolis 2019. aasta aprillis Pärnusse. Narva jaamad ja Pärnu jaamad asuvad lähedastikku ja andmed on tugevas korrelatsioonis, mis võimaldas aegread lihtsalt ühendada.



Joonis 1. Ilmajaamade paiknemine

Kõikides jaamades peale Tartu-Tõravere esines tehniliste viperuste tõttu andmelünkasid, mistõttu nende täitmiseks tuli kasutada just selle jaama andmeid. Selleks leiti keskmine kiirgushulk vastaval kuul nii lüngaga jaamas kui ka Tartu-Tõravere jaamas. Saadud väärtused

jagati omavahel ning seejärel korrutati leitud suhe lüngale vastava aasta ja kuu Tartu-Tõravere kiirgushulgaga. Parem oleks olnud iga jaama lüngad täita selle jaamaga kõige tugevamas seoses oleva jaama andmete kaudu, kuid sel juhul oleks suhte jaoks leitav kuu keskmine väärtus sisaldanud tuletatud väärtusi ja mõni lünk oleks esinenud mõlemal jaamal täpselt sama aasta samal kuul, mis ei võimaldaks kumbagi lünka täita. Tartu-Tõravere jaama andmed pärinevad 1955. aastast ja Tiirikoja aegrida algab 1962. aastal. Tallinn-Harku ja Narva aegread hakkavad 2004. aasta keskelt, Vilsandi 2004. aasta lõpust, Pärnu 2005. aasta algusest ning Haapsalu ja Roomassaare 2008. aastast. Et aegread oleksid paremini võrreldavad ja saaks edukamalt leida territoriaalset varieeruvust, viidi viimasena nimetatud kuue jaama aegrea algus 2004. aastasse, tuletades puuduolevad väärtused eelnevalt kirjeldatud lünkade täitmise meetodil. Kõik aegread lõppevad 2020. aastal. Andmeid analüüsiti Excelis.

Territoriaalset varieeruvust analüüsiti kõigi kaheksa ilmajaama andmetel. Päikesekiirguse territoriaalse jaotuse leidmiseks arvutati iga kaheksa jaama iga aastaaja ja terve aasta keskmine kiirgushulk perioodil 2004-2020. Valiti see ajavahemik, sest sellest perioodist on pärast lünkade täitmist andmed olemas kõikide jaamade kohta. Kiirgushulkade territoriaalset varieeruvust kujutavaid kaarte tehti tarkvaras Surfer, kus kasutati interpoleerimiseks krigingi meetodit. Kokku loodi viis kiirgushulkade jaotust iseloomustavat kaarti.

Päikesekiirguse pikaajalisi trende saab uurida Tartu-Tõravere ja Tiirikoja ilmajaama andmetel, sest nende aegread on piisavalt pikad. Kiirgusandmed ei ole normaaljaotusega, mistõttu tehti trendianalüüsi mitteparameetrilise Mann-Kendalli testiga. Trendi usaldusväarsust kontrolliti $p < 0,05$ tasemel ja trend loeti statistiliselt usaldusväärseks, kui Mann-Kendalli statistiku Z absoluutväärtus oli suurem kui 1,96. Kui statistiku väärtus oli negatiivne, esines langustrend ja kui see oli positiivne, oli andmerekas tõusutrend. Trendi tõuskordaja leiti mitteparameetrilise Sen'i meetodil, mis eeldab lineaarset trendi ning muut ehk kogu muutus vaatlusperioodi jooksul leiti korrutades tõuskordaja aegrea pikkusega. Mann-Kendalli testi ja Sen'i meetodi teostamiseks kasutati Soome Meteoroloogia Instituudi poolt väljatöötatud Exceli makrot MAKESENS. Trendianalüüsi tehti kummagi jaama terve aegrea kohta ja teoreetilises ülevaates selgunu põhjal jagati periood kaheks. Tartu-Tõravere andmeid analüüsiti perioodide 1955-1990 ja 1991-2020 kohta ning Tiirikoja andmeid ajavahemike 1962-1990 ja 1991-2020 kohta, et tuleks välja selgemad trendid.

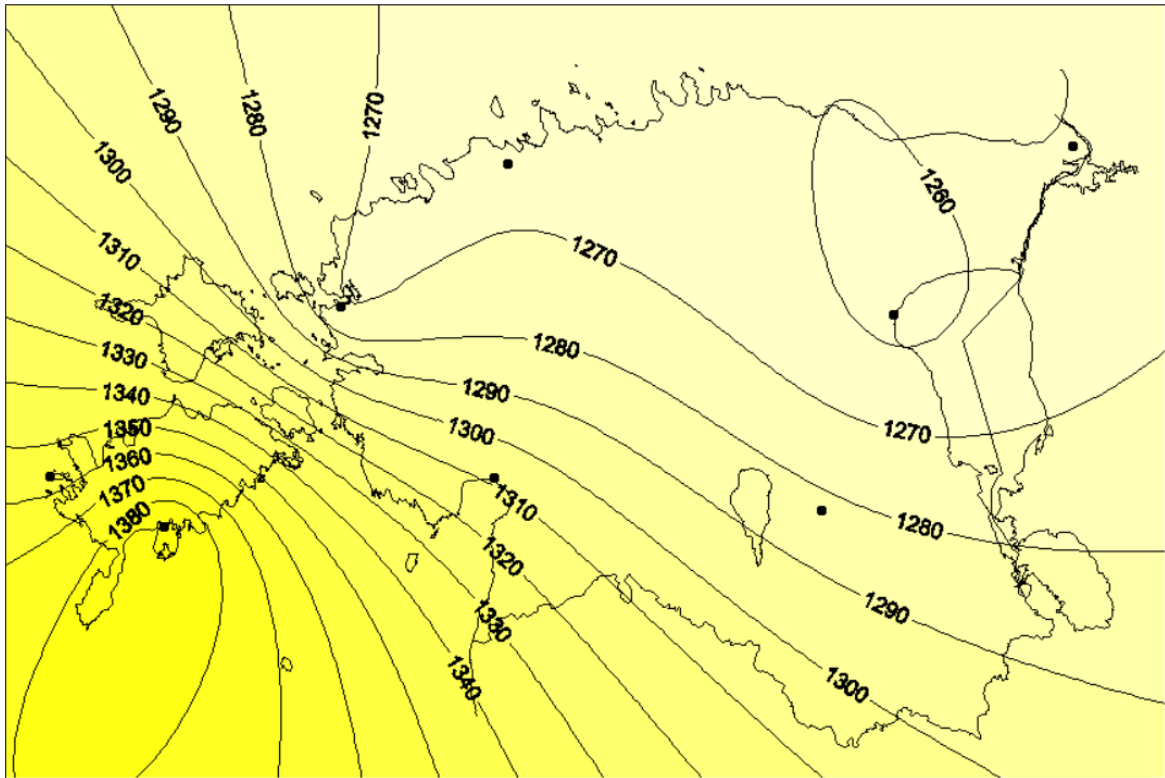
3. Tulemused ja arutelu

3.1 Päikesekiirguse territoriaalne varieeruvus

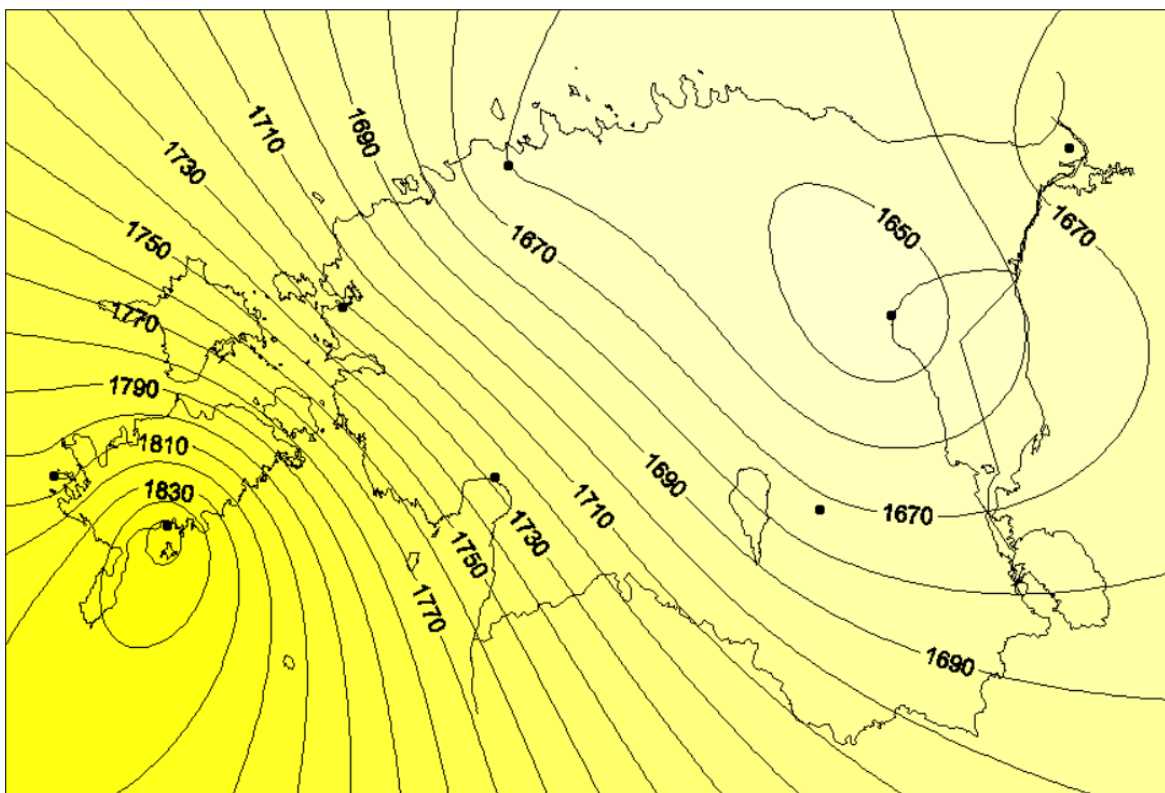
Mida suurem on aastaaja kiirgussumma, seda suuremas ulatuses varieeruvad ka kiirgusväärtused. Seda on joonistel 2-6 hästi näha, sest iga aastaaja kaardil on samakiirgusjooned 10 MJ/m² tagant (välja arvatud aasta summa kaardil). Territoriaalset varieeruvust lähemalt vaadates tuleb välja, et Roomassaares on igal aastaajal kõige suurem kiirgushulk. See võib olla põhjendatav mereäärse asukohaga või on siis hoopis mõõtmisseadmetes väike viga sees, kuna Vilsandi jaam asub samuti avamere ääres ja seal on kõikidel aastaegadel kiirgushulk väiksem. Lisaks on Roomassaares mõõtmisi tehtud lühikese perioodi jooksul ja nelja aasta jagu andmeid on tuletatud Tartu-Tõravere jaamas mõõdetud väärtuste kaudu, mis vähendab Roomassaare andmete usaldusväärsust.

Joonisel 2 on kujutatud kiirgussummat kevadel (märts-mai). Lääne-Eesti saartel on Päikest kõige rohkem, eelkõige Roomassaares. Põhjus seisneb selles, et kevadel on vesi veel talvest külma ja mereäärsetel aladel tekib vähem pilvi, sest meri on jahedaks aluspinnaks ning kuna külma õhk on raskem, ei teki pilvede moodustumiseks vajalikke tõusvaid õhuvoole. Põhja-Eestis on Päikest kõige vähem, mille põhjuseks on ilmselt see, et põhjapoolsetel aladel liigub Päike lihtsalt madalamalt. Laiuskraadi vähenedes kiirgushulk tõuseb. Sisemaal on samuti kiirgushulk väiksem kui saartel, sest kevadel soojeneb sisemaa kiiremini, mis soodustab pilvede teket, kuid lääne poole liikudes kiirgushulk suureneb. Tiirikojal on kiirgussumma väiksem ilmselt sellepärast, et piirkond asub suhteliselt põhjas ja sinna kandub sisemaal tekkinud pilvi.

Joonisel 3 on kujutatud kiirgussummat suvel (juuni-august). Suvine päikesekiirguse jaotus sarnaneb kevadisele, kuid on märgata, et Lääne-Eesti mandriosas on sel perioodil Päikest märkimisväärselt rohkem kui ida pool – samajooned on nihkunud vertikaalsemaks. Lääne-Eesti saartel on jätkuvalt kõrgeim päikesekiirguse hulk, olles maksimaalne Roomassaares. Suvel mängib mere lähedus veelgi rohkem rolli, sest hoiab õhu jahedamana. Merest kauged alad soojenevad päikeselise suvepäeva jooksul rohkem, mis tekitab atmosfääris labiilse kihistuse ja tekivad rümpilved. Põhja-Eestis, täpsemalt Läänemere avaosast kaugemal Soome lahe ääres, on kiirgushulk sarnaselt kevadele väiksem. Soome laht võiks küll suvel olla külmaks aluspinnaks ja takistada pilvede teket, aga kuna Eestis on valdavalt lõuna- ja läänekaare tuuled, võivad sinna sisemaalt pilved kanduda.



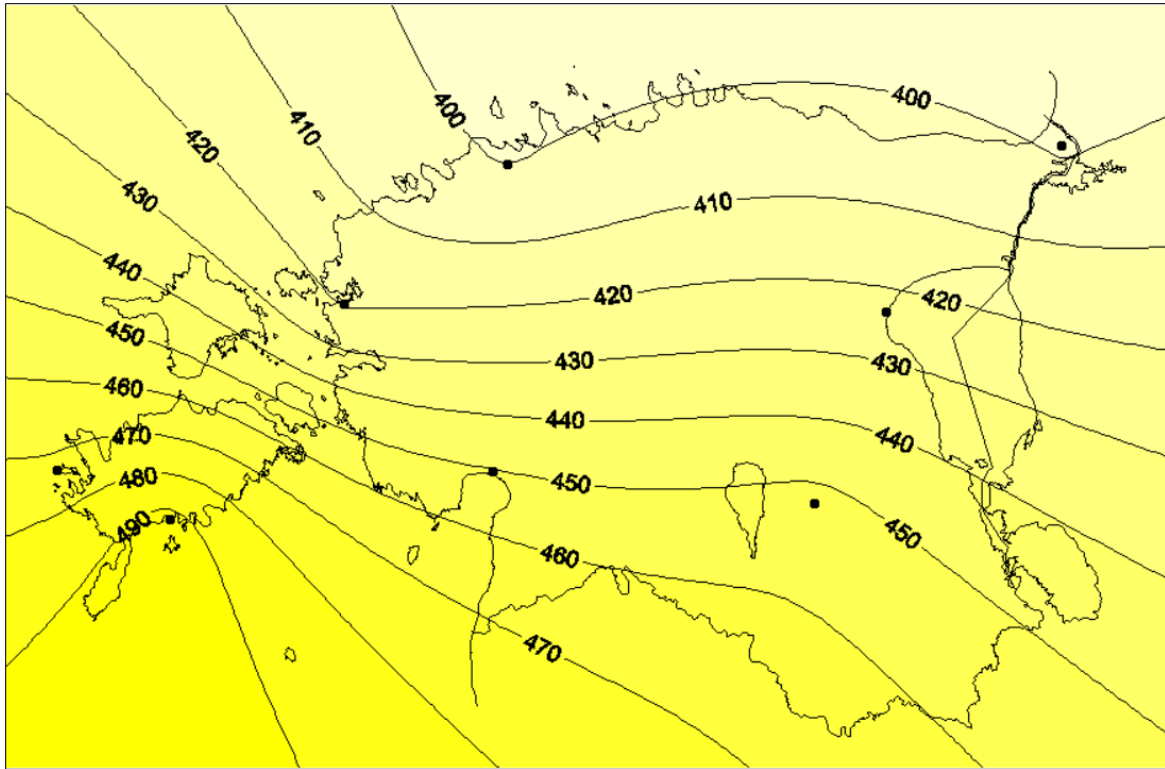
Joonis 2. Päikesekiirguse territoriaalne jaotus kevadel



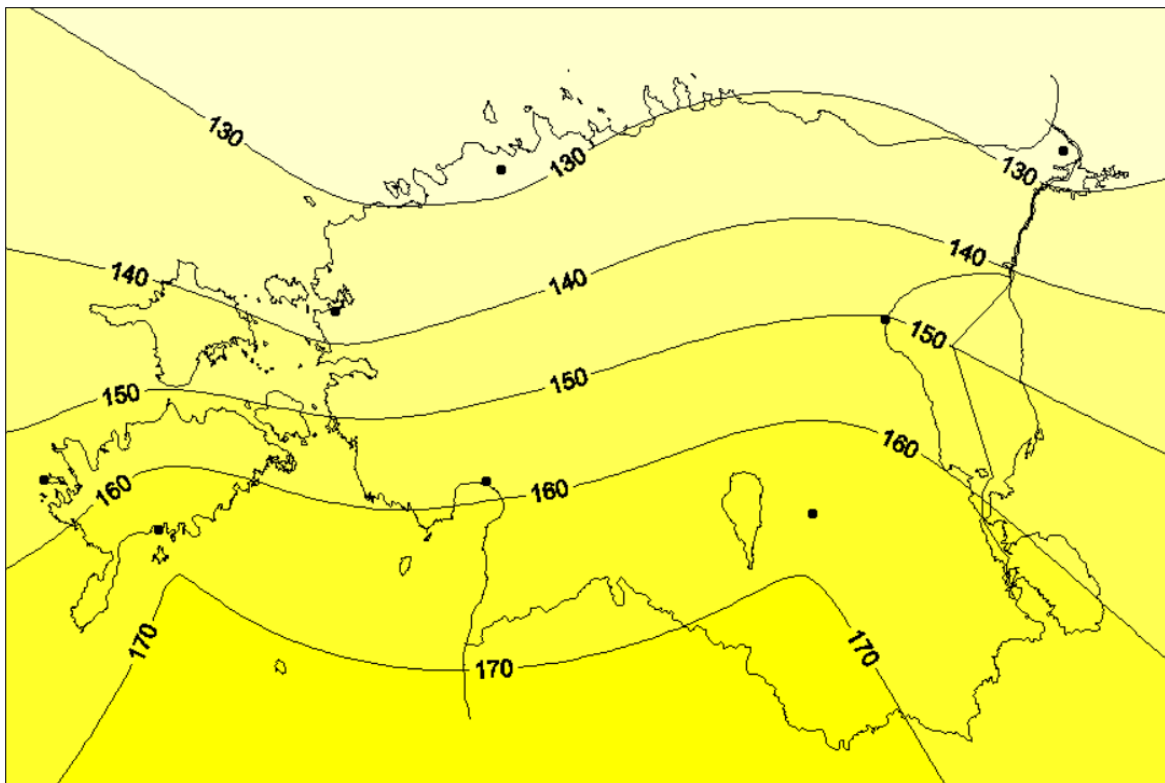
Joonis 3. Päikesekiirguse territoriaalne jaotus suvel

Joonisel 4 on kujutatud päikesekiirguse jaotust sügisel (september-november). Sel ajal on samajooned üpris horisontaalsed, mis tähendab, et kiirgushulk sõltub suuresti laiuskraadist. Sügisel ei ole mere lähedusel pilvisuse kujundamisel nii suurt rolli, sest siis on meri suvest veel soe ja jahtub tasapisi ning ei ole külmaks aluspinnaks. Madalamad lahesopid jahtuvad siiski päris kiiresti ja samuti ka sisemaa ning sellepärast on sügisel üle Eesti suhteliselt ühtlane pilvisus. Lääne-Eesti saartel on jätkuvalt aga kiirgushulk suurim. Tuleb välja, et avamere ääres asumine suurendab kiirgushulka. Võib-olla on asi selles, et sügiseste tormituultega tõuseb Läänemere sügavustest külm vesi pinnale ja on ikkagi külmaks aluspinnaks, mis takistab pilvede arengut.

Joonisel 5 on kujutatud kiirgussumma jaotust talvel (detsember-veebruar). Samakiirgusjooned on horisontaalsed ja kiirgushulka mõjutab esmajoones laiuskraad, sest talvel on Päike väga madalal ja iga kraad tõusu horisondi suhtes annab päikesekiirgust juurde. Erinevalt teistest aastaegadest ei ole talvel Lääne-Eesti saartel sugugi rohkem Päikest. Näiteks Roomassaares ja Tartu-Tõraveres on peaaegu sama kiirgushulk. Talvisel ajal kipub meri jääs olema, mistõttu see ei mõjuta pilvede teket, kuna nii sisemaal kui ka mere ääres on sel juhul aluspinna omadused samad. Kuid kliimasoojenemisega on jääkatet vähemaks jäänud ja talvel on veekogud tihti ka jäävabad. Selliste tingimuste korral on rannikul hoopis pilvisem, sest vesi on soojem kui õhk ja veekogu kohal olev soe õhk on kerge ning kondenseerub külmas õhus tõustes pilvedeks. See võib olla põhjuseks, miks Vilsandil on väiksem kiirgushulk kui Tartu-Tõraveres ning Haapsalus väiksem kui Tiirikojal, kuigi nimetatud jaamade paarid asuvad sarnastel laiustel.

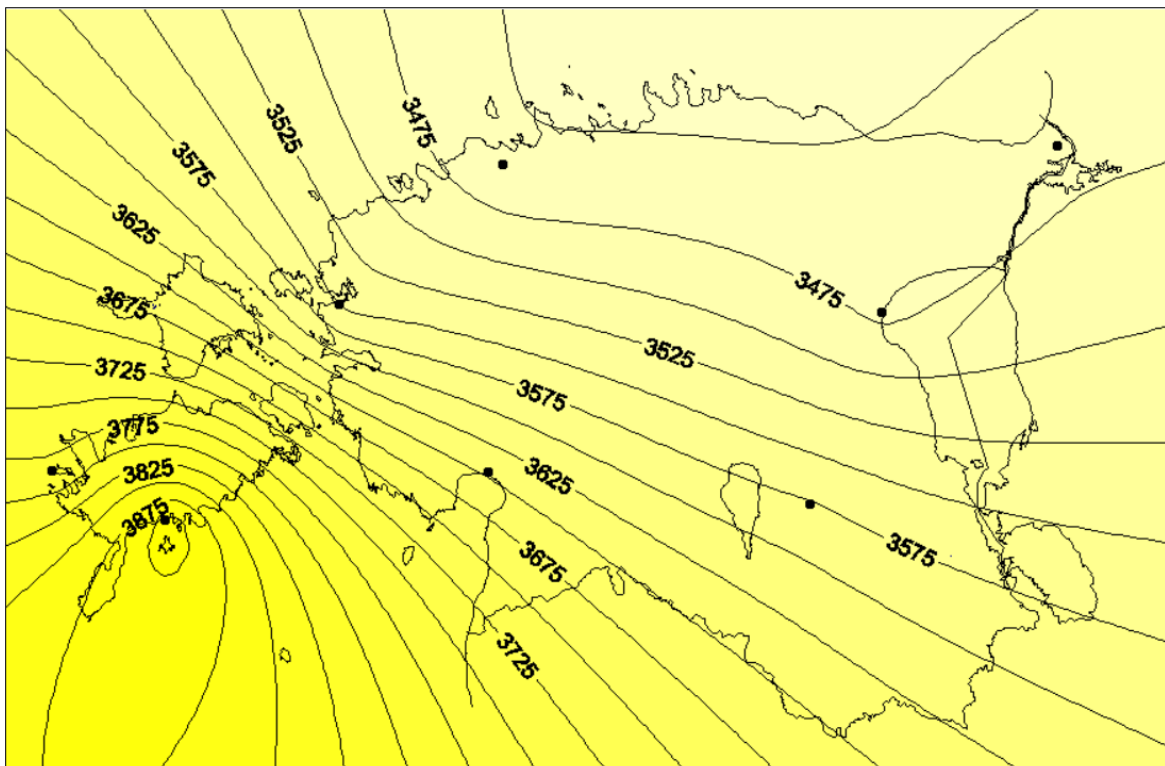


Joonis 4. Päikesekiirguse territoriaalne jaotus sügisel



Joonis 5. Päikesekiirguse territoriaalne jaotus talvel

Joonisel 6 on näha terve aasta kiirgussumma territoriaalset varieeruvust. Kogu aasta päikesekiirguse jaotus sarnaneb suve omale, sest siis koguneb ligikaudu pool terve aasta summast, kuid kogu aasta summa on rohkem laiuskraadist sõltuv kui suve summa. Kaks olulisimat kiirgushulka mõjutavat tegurit on laiuskraad ja mere lähedus. Põhja-Eestis on seega suurema laiuskraadi tõttu kiirgushulk väiksem ja samuti on Päikest vähem sisemaal merest kaugel, kus soojal poolaastal on maapinna kiirema soojenemise tõttu soodustatud pilvede teke. Lääne-Eesti saartel ja mandril on päikesekiirgust rohkem, kuna kevadel ja suvel on meri jahedaks aluspinnaks. Karing (1972) leidis, et kõrgustikel on päikesekiirgust vähem, mis põhimõtteliselt tuleb ka käesoleva töö andmetest välja, aga kuna kõrgustikud asuvad sisemaal, ei saa väita, et just nende tõttu on seal kiirgushulk väiksem, sest sisemaal on niigi pilvisem kui rannikul. Ta leidis veel, et Võrtsjärve ja Peipsi järve vahelisel alal on rohkem Päikest, mis automaatilmajaamade andmetest välja ei tule (Karing, 1972). Sarnaselt käesolevale tööle, jõudsid ka Rosin ja Keevallik (2012) järeldusele, et kiirgussumma on suurem Lääne-Eesti saartel ja mandril ning väiksem Põhja-Eestis ja sisemaal.



Joonis 6. Kogu aasta päikesekiirguse territoriaalne jaotus

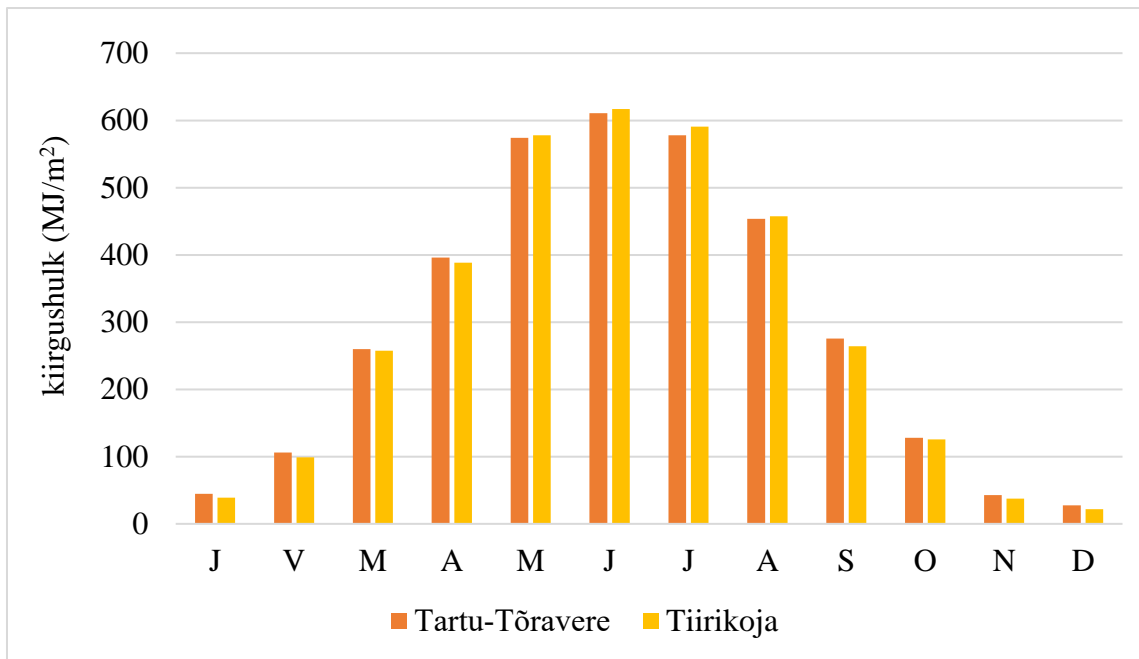
3.2 Päikesekiirguse sesoonne muutlikkus

Tabelis 1 on esitatud Tartu-Tõravere ja Tiirikojal mõõdetud kuude kiirgussummade keskmised ja mediaanid. Tartu-Tõravere väärtused on leitud perioodi 1955-2020 kohta ning Tiirikoja väärtused 1962-2020 kohta. Keskmised ja mediaanid on sarnaste väärtustega, mis viitab andmete sümmeetrilisele jaotusele. Mõningatel kuudel on aga keskmise ja mediaani väärtused erinevamad kui teistel. Kui keskmine on mediaanist suurem, peab esinema mõni väga suur kiirgushulga väärtus ja kui keskmine on mediaanist väiksem, esineb aegreas järelkult mõni väga väike väärtus, mis keskmise alla tõmbab. Enamjaolt kipub keskmine mediaanist suurem olema. Tuleb välja, et kui ühes jaamas on väärtused mõnevõrra erinevad, siis teises võivad peaaegu samad olla, nagu näiteks aprillis. Tartu-Tõravere keskmise mediaanist suhteliselt suurem veebruaris, märtsis, juulis, oktoobris ja novembris ning Tiirikojal veebruaris, aprillis, septembris, novembris ja detsembris.

Tabel 1. Kiirgussummade keskmised (kollasel taustal) ja mediaanid (valgel taustal) kuude kaupa Tartu-Tõravere ja Tiirikojal

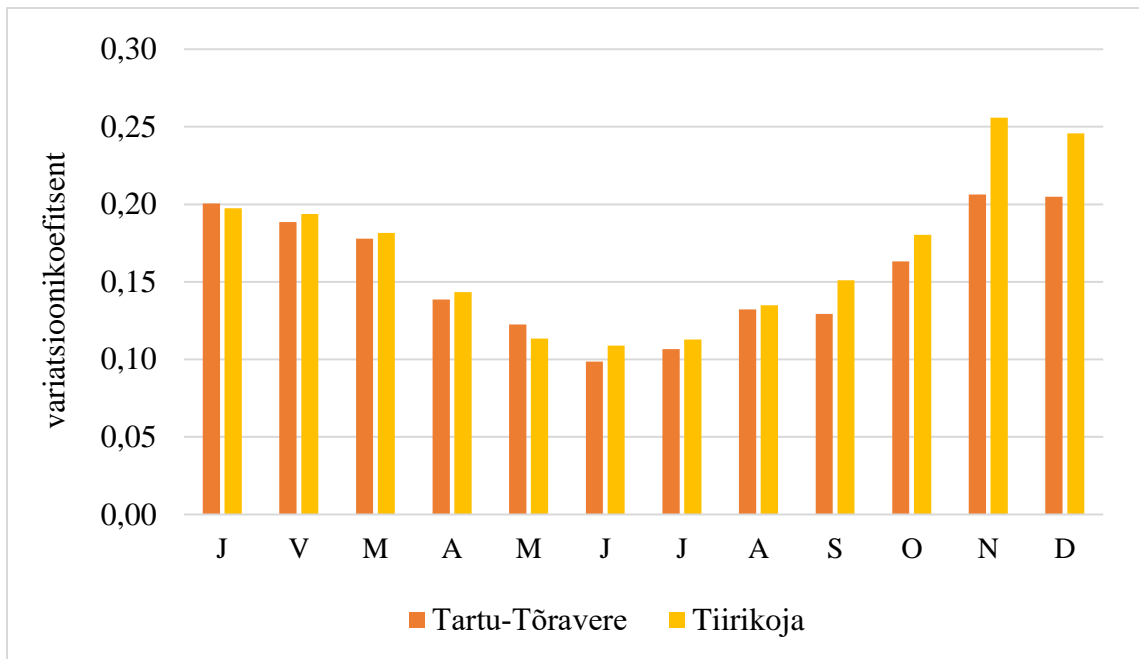
| | J | V | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|-----------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| Tartu-Tõravere | 44,7 | 109,1 | 268,4 | 395,5 | 566,5 | 608,2 | 589,6 | 457,5 | 274,8 | 130,5 | 45,1 | 27,3 |
| Tartu-Tõravere | 44,5 | 106,0 | 259,6 | 395,8 | 573,9 | 610,7 | 577,9 | 453,6 | 275,4 | 127,8 | 42,7 | 27,4 |
| Tiirikoja | 39,4 | 103,3 | 261,8 | 396,3 | 573,4 | 607,6 | 594,8 | 458,2 | 269,7 | 124,8 | 38,8 | 22,5 |
| Tiirikoja | 38,8 | 99,2 | 257,6 | 388,3 | 578,1 | 616,7 | 590,5 | 457,3 | 263,9 | 125,8 | 37,5 | 22,0 |

Joonisel 7 on näha mediaanide väärtusi graafiliselt mõlemas jaamas kõikidel kuudel. Aasta jooksul muutub kiirgushulk väga suures ulatuses, olles umbes 20 MJ/m² detsembris ja tõustes üle 600 MJ/m² juunis. Joonis illustreerib hästi seda, kui väheoluline ikkagi on talvel kogunenud päikesekiirguse hulk kogu aasta summas. Kui võrrelda Tartu-Tõravere ja Tiirikoja pika aja mediaane, siis Tartu-Tõravere mediaan suurem septembrist aprillini, kuid Tiirikojal maist augustini. Suurem kiirgushulk talvisel poolaastal Tartu-Tõravere võib tuleneda sellest, et antud ilmajaam asub lihtsalt natukene lõuna pool ja Päike käib seal kõrgemalt. Veidi suurem päikesekiirguse hulk suvisel ajal Tiirikojal võib olla seletatav sellega, et Tiirikoja asub Peipsi järve ääres, mis on suvisel ajal jahedaks aluspinnaks ja takistab pilvede teket.



Joonis 7. Kiirgussummade mediaanväärtused kuude kaupa Tartu-Tõraveres ja Tiirikojal

Kuna päikesekiirguse summad on kuude lõikes väga erinevad, on kõige parem analüüsida väärtuste varieeruvust variatsioonikoefitsendi põhjal, mis kujutab endast standardhälbe ja keskmise suhet. Sel viisil saab kõrvaldada suurtest (väikestest) väärtustest tuleneva suure (väikese) varieeruvuse. Variatsioonikoefitsent näitab, kui muutlik on iga kuu kiirgushulk pika perioodi vältel. Jooniselt 8 paistab, et variatsioonikordaja käik on vastupidine kiirgussumma aastasele käigule. Nimelt kiirgushulgad on stabiilsemad soojemal ajal, ennekõike aprillist septembrini ja muutlikumad jahedamal perioodil ehk oktoobrist märtsini. Tuleb välja, et Tiirikojal on päikesekiirguse hulk enamasti varieeruvam kui Tartu-Tõraveres, eriti torkavad silma novembri ja detsembri suur varieeruvus. Suurem variatsioonikordaja Tiirikojal võib viidata mõõtmiste kehvemale kvaliteedile.



Joonis 8. Kiirgussummade variatsioonikoefitsendid Tartu-Tõraveres ja Tiirikojal

3.3 Päikesekiirguse pikaajalised muutused

3.3.1 Pika aegrea trendid (1955/1962-2020)

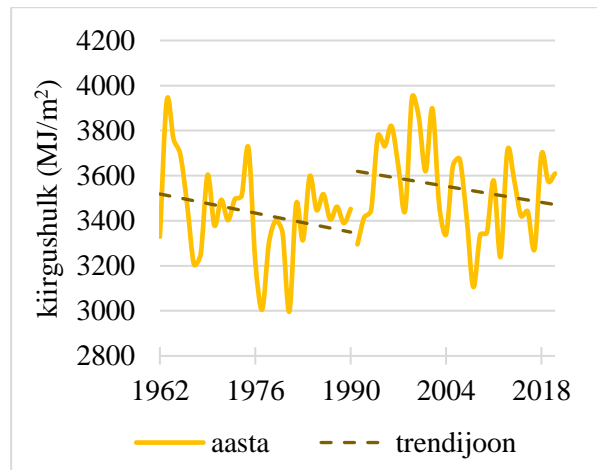
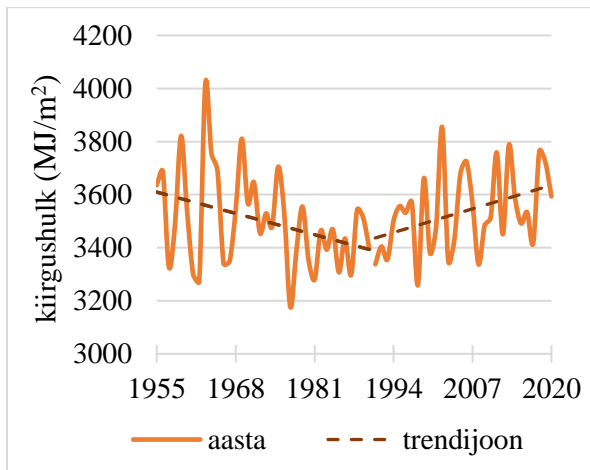
Tabelis 2 on toodud kuude, aasta ja aastaaegade päikesekiirguse hulga muutused trendi järgi. Tartu-Tõravere ilmajaamas toimus perioodil 1955-2020 päikesekiirguse hulgas statistiliselt oluline langustrend kõikidel talvekuudel: detsembris, jaanuaris ja veebruaris. Sellest tulenevalt langes kiirgushulk olulisel määral ka kogu talve jooksul. Tiirikojal toimus samuti kogu perioodi (1962-2020) vältel oluline langus jaanuaris ja detsembris ning kogu talvel. Päikesekiirguse vähenemine talvisel ajal langeb kokku kliima soojenemise mõjuga. Kõrgemate temperatuuride tõttu on tsükloonaalset ilma talvel rohkem, millega kaasneb ka rohkem pilvi, mis vähendavad päikesekiirguse hulka. Ainukene kuu, mil Tartu-Tõraveres esines statistiliselt oluline tõusutrend, oli mai. Tiirikojal esines mais küll tõus, mis osutus statistiliselt väheoluliseks. Tiirikojal tuleb välja aga oluline kiirgushulga tõus kevadel, kuigi ühegi kevadkuu tõus eraldi võttes statistiliselt oluline ei ole. Tartu-Tõraveres on ka kevade kiirgussummas toimunud tõus, mis on küll statistiliselt mitteoluline. Päikesekiirguse hulga suurenemine kevadel on kooskõlas aprilli ja mai selginemisega (Jaagus *et al.*, 2018; Keevallik & Russak, 2001).

Vaadates joonisel 9 esitatud terve aasta kiirgussumma muutusi Tartu-Tõraveres, tuleb välja, et aegrealt alguse ja lõpu vahel on marginaalne tõusutrend. Selgelt aga tuleb välja, et vahepeal toimus langus ja seejärel tõus, mida analüüsitakse täpsemalt järgmistes peatükkides. Tiirikojal on kogu aasta kiirgushulgas toimunud samuti väike tõus ja vaadeldava perioodi jooksul on toimunud mitmeid kõikumisi. Väga päikeseline oli 1963. aasta. Ka sajandi vahetusel tulevad välja suuremad päikesekiirguse hulgad. Madalamad kiirgusväärtused jäävad aga vahemikku 1977-1994. Suvel ja sügisel on mõlemas ilmajaamas mõõdetud kiirgushulgad marginaalselt tõusnud. Suve kiirgushulk on suurenenud juuli ja augusti arvelt, mitte aga juunis, mil on leitud ka sademete hulga tõusutrend (Jaagus *et al.*, 2018).

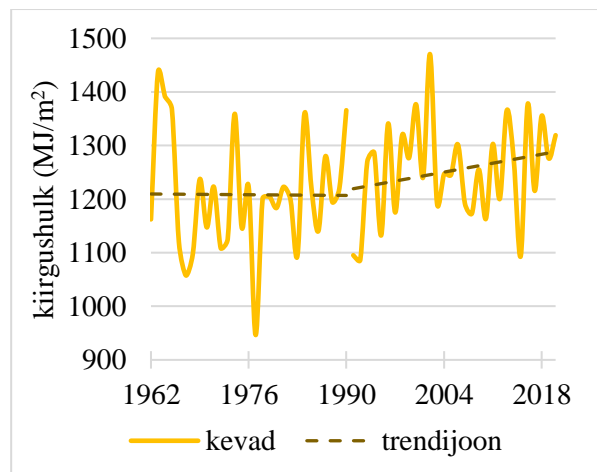
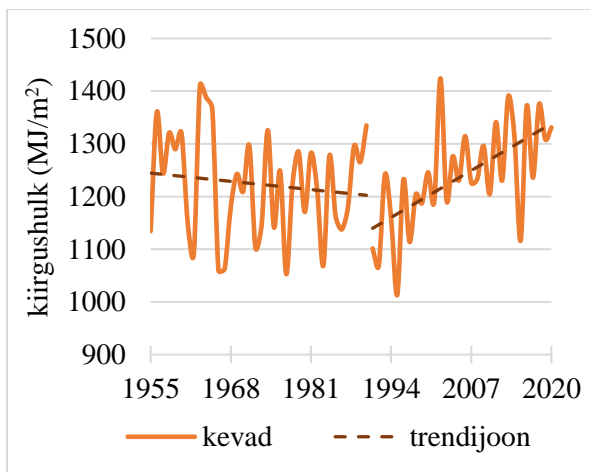
Tabel 2. Muutused kiirgushulgas (MJ/m²) Sen'i meetodi põhjal kogu perioodil ning esimesel ja teisel perioodil. Statistiliselt olulised muutused on paksus kirjas.

| | Tartu- Tõravere 1955-2020 | Tiirikoja 1962-2020 | Tartu- Tõravere 1955-1990 | Tiirikoja 1962-1990 | Tartu- Tõravere 1991-2020 | Tiirikoja 1991-2020 |
|-----------|--|--------------------------------|--|--------------------------------|--|--------------------------------|
| jaanuar | -10,1 | -9,8 | -0,2 | -4,6 | -4,8 | -9,2 |
| veebruar | -20,3 | -16,8 | 3,1 | -1,9 | -4,9 | -12,7 |
| märts | -34,1 | 4,4 | -79,9 | -56,7 | 41,4 | 11,6 |
| aprill | 16,3 | 29,1 | -24,9 | -1,1 | 71,0 | 8,5 |
| mai | 56,8 | 30,4 | 39,9 | 38,5 | 79,0 | 11,2 |
| juuni | -22,5 | -30,6 | -61,3 | -62,5 | 63,3 | 15,4 |
| juuli | 15,0 | 20,6 | -27,8 | -12,7 | -41,6 | -62,4 |
| august | 31,5 | 13,4 | -19,6 | -38,0 | 5,7 | -49,0 |
| september | 11,9 | 22,3 | -51,6 | -37,2 | 29,3 | -8,0 |
| oktoober | 2,0 | -3,5 | 14,9 | 3,8 | 1,0 | -25,0 |
| november | -7,3 | -6,7 | 0,8 | -4,0 | -12,1 | -15,1 |
| detsember | -7,6 | -6,9 | 0,2 | 1,0 | -8,2 | -9,3 |
| aasta | 58,7 | 102,2 | -232,0 | -101,5 | 235,6 | -137,7 |
| kevad | 71,5 | 109,2 | -41,4 | 33,9 | 212,1 | 66,1 |
| suvi | 30,4 | 12,1 | -110,3 | -91,8 | 5,8 | -120,0 |
| sügis | 3,8 | 17,6 | -33,7 | -32,1 | 16,6 | -53,7 |
| talv | -36,8 | -34,8 | 6,5 | -0,7 | -23,5 | -35,3 |

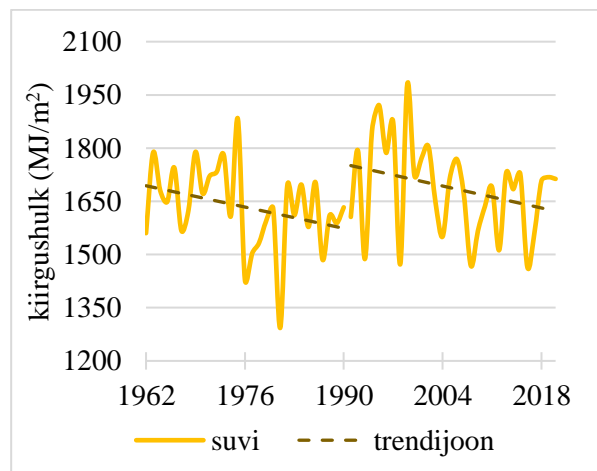
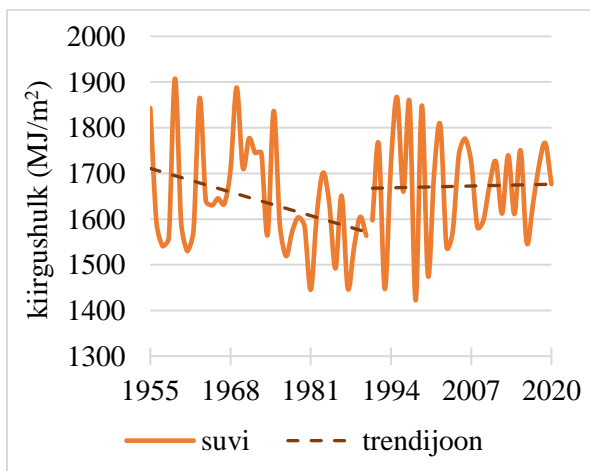
a)



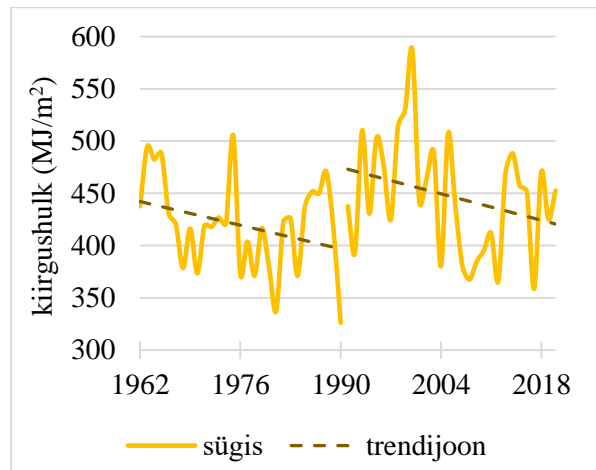
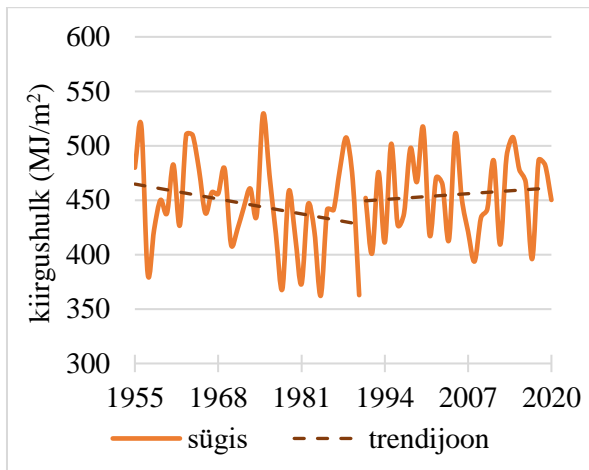
b)



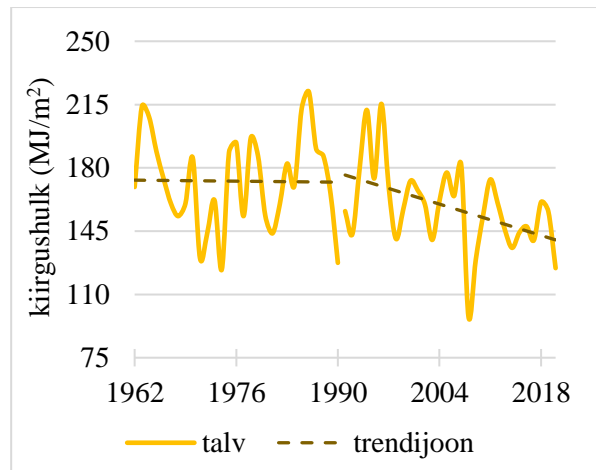
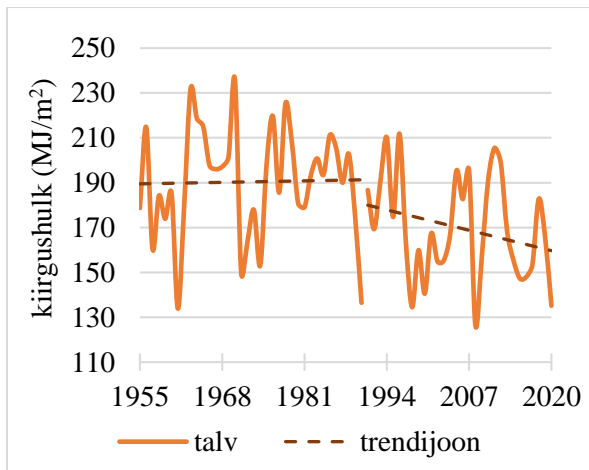
c)



d)



e)



Joonis 9. Päikesekiirguse hulga pikaajaline muutlikkus terve aasta (a), kevade (b), suve (c), sügise (d) ja talve (e) kohta. Tartu-Tõravere graafikud on vasakul pool oranži joonega ja Tiirikoja graafikud on paremal pool kollase joonega.

3.3.2 Esimese perioodi trendid (1955/1962-1990)

Esimesel perioodil on mõlemas ilmajaamas märgata kiirgushulga kahanemist. Tartu-Tõravere jaamas toimus perioodil 1955-1990 statistiliselt oluline päikesekiirguse hulga langus märtsis ja septembris, mis langeb kokku Russaku (2009) poolt uurituga. Tiirikojal esines statistiliselt oluline langus ainult septembris, kuigi märtsis langes kiirgushulk samuti, aga mitteolulisel määral. On leitud, et antud perioodil olidki märts ja september pilvisemad (Keevalik & Russak, 2001). Tulenevalt kiirgushulga langusest sel ajavahemikul nii mõnelgi kuul, toimus Tartu-Tõraveres märkimisväärne, aga statistiliselt ebaoluline kiirgushulga langus terve aasta kiirgussummas. Aastane kiirgussumma langes ka Tiirikojal, aga mitte nii märgatavalt.

Ka suve ja sügise päikesekiirguse hulk langes mõlema ilmajaama andmetel, kuid ebaolulisel määral. Suvel esines langustrend kõikidel kuudel ning sügise langustrendi põhjustas ainult september. Oktoobris esines hoopis väikene tõusutrend, mis langeb kokku teadmise, et oktoobris toimuski pilvisuse vähenemine (Keevallik & Russak, 2001). Seevastu, kui Tartu-Tõravere esines kevadel langustrend, siis Tiirikojal hoopis pisike tõusutrend, sest seal ei langenud märtsi kiirgushulk nii palju ja aprill oli ka stabiilsem. Talve kiirgushulk oli mõlemas ilmajaamas suhteliselt stabiilne, mis võiks viidata sellele, et tsükloonaalse ilma sagenemine ei olnud veel aset leidnud. Üldine languse tendents sel perioodil on seletatav optiliselt paksude alumiste pilvede hulga kasvuga ja atmosfääri läbipaistvuse vähenemisega õhu saastatuse tõttu.

3.3.3 Teise perioodi trendid (1991-2020)

Teisel perioodil ehk alates 1991. aastast tuleb Tartu-Tõravere ja Tiirikoja vahel välja olulisi erinevusi. Sel ajavahemikul toimus mõlemas ilmajaamas kiirgushulga tõus kõikidel kevadkuudel, kuid Tartu-Tõravere oli tõusutrend tugevam. Seal suurenes päikesekiirguse hulk statistiliselt olulisel määral aprillis ja mais ning seetõttu ka kogu kevade lõikes. On teada, et aprillis ongi sademeid mõnevõrra vähemaks jäänud, mis on ilmselt tõstnud päikeseliste ilmade esinemissagedust (Jaagus *et al.*, 2018). Tiirikojal on kevade selginemine olnud aga tagasihoidlikum. Oluline langus toimus mõlemas ilmajaamas aga novembris ja detsembris. Tiirikojal on viimasel 30 aastal toimunud oluline kiirgushulga vähenemine kogu talve jooksul, aga Tartu-Tõravere on see olnud mitteoluline. Talvise kiirgushulga vähenemisesse on mõlema ilmajaama andmetel panustanud kõik talvekuud, mis viitab hästi tsükloonaalsete ilmade sagenemise tendentsile.

Suur erinevus tuleb ilmajaamade andmetes välja aga kogu aasta kiirgussumma muutumises. Kui Tartu-Tõravere on alates 1991. aastast terve aasta päikesekiirguse hulk statistiliselt olulisel määral tõusnud, siis Tiirikojal on see hoopis langenud. Kui aga vaadata joonist 9, siis selgub, et 1990ndatel kiirgushulk Tiirikojal küll tõusis märkimisväärselt, kuid 2000ndatest langes taaskord, mis muutis 30-aastase perioodi trendi siiski negatiivseks. Seesugune trend 2000ndatel võib olla seletatav hoopis probleemsete mõõtmisvahenditega. Kui aga jagada Tiirikoja aegrida teisiti, siis perioodil 1977-2000 paistab oluline tõusutrend olevat.

Erinev on ka suvise kiirgushulga muutus. Nimelt Tartu-Tõravere on see olnud stabiilne, kuid Tiirikojal märgatavalt, aga statistiliselt väheolulisel määral langenud. Sellist erinevust on

põhjustanud suurem kiirgushulga langus juulis ja augustis ning väiksem tõus juunikuus Tiirikoja ilmajaamas võrreldes Tartu-Tõraverega. Sügisene trend on ka ilmajaamades vastupidine. Tartu-Tõraveres on sügisene päikesekiirguse hulk natukene tõusnud, kuid Tiirikojal on toimunud langustrend, mida on põhjustanud kiirgushulga vähenemine kõikidel sügiskuudel. On leitud, et septembris on sademete hulk vähenenud, mis tähendab ka vähem pilvi (Jaagus *et al.*, 2018). Sellega saab seletada päikesekiirguse hulga tõusu Tartu-Tõraveres, kuid Tiirikojal mõõdetud kiirgushulgale pole selline trend eeldatavat mõju avaldanud.

Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli välja selgitada Päikese kogukiirguse territoriaalne varieeruvus Eestis, kiirgushulga sesoonne muutlikkus ja pikaajalised trendid. Päikesekiirguse territoriaalne jaotus leiti iga aastaaja ja terve aasta summa kohta. Selleks kasutati kaheksa automaatilmajaama andmeid: Tartu-Tõravere, Tiirikoja, Tallinn-Harku, Narva, Vilsandi, Pärnu, Haapsalu ja Roomassaare. Kiirgushulga sesoonse muutlikkuse ja pikaajalise dünaamika väljaselgitamiseks kasutati aga ainult Tartu-Tõravere ja Tiirikoja andmeid, sest nende jaamade aegread on pikemad. Tartu-Tõravere andmetel sai pikaajalist muutlikkust analüüsida perioodi 1955-2020 kohta ning Tiirikoja andmetel aastate 1962-2020 kohta. Kiirgushulga muutustrend leiti nii kummagi ilmajaama terve aegrea kohta kui ka lühematel perioodidel, et trendid tuleksid paremini välja. Tartu-Tõravere aegrida jagati perioodideks 1955-1990 ja 1991-2020 ning Tiirikoja 1962-1990 ja 1991-2020. Trendianalüüsi tehti Mann-Kendalli testiga ja trendi tõusukordaja leiti Sen'i meetodil.

Päikesekiirguse territoriaalne jaotus sõltub peamiselt mere lähedusest ja laiuskraadist. Kevadel ja eriti suvel on kiirgushulk Lääne-Eesti saartel ja mandril märgatavalt suurem kui Põhja-Eestis ja sisemaal. Põhjus seisneb selles, et kevadel ja suvel on vesi jahedam kui õhk ning vesi on jahedaks aluspinnaks, mis takistab pilvede teket. Soojal ajal moodustuvad konvektiivsed pilved ennekõike kiiresti soojeneva maismaa kohal, mis vähendab maapinnale langevat päikesekiirgust. Sügisel on pilvisus Eesti lõikes ühtlasem ja sellepärast hakkavad samakiirgusjooned nihkuma horisontaalsemaks ehk kiirgushulk sõltub rohkem laiuskraadist, kuid Lääne-Eesti saartel on siiski mõnevõrra rohkem Päikest. Talv on ainuke aastaaeg, mil Lääne-Eestis ei ole päikesekiirgust rohkem kui mujal Eestis, vaid kiirgushulga jaotumisel on olulisim laiuskraad. Arvestades päikesekiirguse jaotumist kõikidel aastaegadel, on aastane kiirgussumma suurem Lääne-Eestis ning väiksem Põhja-Eestis ja sisemaal.

Päikesekiirguse hulk on suurim juunis ja väiksem detsembris. Kiirgussummad on stabiilsemad aga soojal poolaastal ja varieeruvad jahedal perioodil. Pika aegrea jooksul toimus nii Tartu-Tõraveres kui ka Tiirikojal statistiliselt oluline päikesekiirguse hulga langus detsembris, jaanuaris ja kogu talvel ning Tartu-Tõraveres lisaks ka veebruaris. Tiirikojal tuli oluline tõusutrend välja aga kevade summas ning ainukene kuu, mil päikesekiirguse hulk kogu perioodil märkimisväärselt kasvas, oli mai ja seda vaid Tartu-Tõraveres. Esimesel perioodil ehk 1990. aastani esines statistiliselt oluline kiirgushulga langus mõlemas ilmajaamas septembris

ning Tartu-Tõraveres ka märtsis. Aasta summa oli küll langustrendis, aga mitte statistiliselt olulisel määral.

Teisel perioodil vähenes mõlema ilmajaama andmetel päikesekiirgus oluliselt novembris ja detsembris ning Tiirikojal ka kogu talvel. Statistiliselt oluline tõusutrend tuleb välja aprillis ja mais, millest tulenevalt ka kogu kevade summas, kuid seda ainult Tartu-Tõraveres. Alates 1990. aastast on päikesekiirguse terve aasta summa oluliselt suurenenud ainult Tartu-Tõraveres, aga Tiirikojal tuleb välja hoopis mõningane langustendents. Tiirikojal tõusis küll päikesekiirguse hulk 1990ndatel hüppeliselt, kuid 2000. aastate alguses hakkas taaskord langema, mis muutis 30 aasta trendi negatiivseks. Üldiselt on kevaded muutunud päikeselisemaks ja talved pimedamaks.

Territorial variation and temporal changes in global radiation in Estonia

Janely Kangur

Summary

Earth's climate is changing and this influences global solar radiation. The amount of solar radiation that reaches the ground depends on several factors like the Sun's height above the horizon, cloudiness, surface albedo and atmospheric transparency (Russak & Kallis, 2003). It's known that the amount of global solar radiation was decreasing in Estonia and many other regions in the world up until 1990s and then started to increase. That was because atmospheric aerosol concentration was high until 1990s due to human activity and volcanic eruptions. In addition, it was cloudier during this period which also contributed to lower amounts of solar radiation. (Russak, 2009)

The aim of the bachelor's thesis was to analyse spatial distribution of global radiation on the territory of Estonia and to study the seasonal variation and long-term trends of radiation regime. In order to find the territorial variation of global solar radiation during different seasons and in the annual sum, data from eight automatic weather stations was used. The stations were Tartu-Tõravere, Tiirikoja, Tallinn-Harku, Narva, Vilsandi, Pärnu, Haapsalu and Roomassaare. Seasonal peculiarities and long-term changes in global radiation were studied using data from Tartu-Tõravere and Tiirikoja. Data from Tartu-Tõravere station was available for the period 1955-2020 and from Tiirikoja station 1962-2020. Considering the knowledge from previously conducted studies, the time series were divided into two periods – before and after 1990. Trends were found for the whole data series and for shorter periods using the Mann-Kendall test and Sen's slope estimator.

The results showed that territorial variation of global radiation depends on latitude and proximity to the sea. The latter is especially influential during summer and spring when the amount of solar radiation is noticeably higher in the western part of Estonia and lower in North-Estonia and further from the sea. The reason for such variation comes from the fact that during summer and spring water acts as a cooler surface that prevents clouds from forming. On the other hand, inland areas warm quickly during the day and clouds are able to form. In autumn the proximity to the sea is not that important anymore, however there is still more sunshine in West-Estonia. In winter the global radiation depends solely on latitude which means solar

radiation increases moving from north to south. The annual sum of global radiation distribution is similar to spring and summer being highest in West-Estonia and lower in the northern and inland part of Estonia.

Data analysis showed that global radiation is highest in June and lowest in December, however radiation amount is more stable during warmer months and more varying in cooler months. During the whole time series, a statistically significant decrease was identified in Tartu-Tõravere as well as Tiirikoja in December, January and winter totals and in Tartu-Tõravere also in February. In that period some increases in solar radiation also became evident. In Tiirikoja station a statistically significant increase was detected in spring and in Tartu-Tõravere an increase was found in May.

During the global dimming period until 1990 a statistically significant decrease was found in both stations in September and in addition in March but only in Tartu-Tõravere. There was no significant brightening in any months during that period. The annual sum was decreasing but the trend was statistically insignificant. The following period since 1990 showed a brightening tendency. However a statistically significant decrease became evident in the months of November and December in both stations and Tiirikoja data showed a significant decrease also in winter totals. In Tartu-Tõravere a statistically significant increase in global radiation was detected in April, May and in spring totals as well. Only Tartu-Tõravere data shows a significant increase in the annual radiation total. Interestingly there hasn't been significant increase in global radiation during any month in Tiirikoja since the 1990 and the annual sum even shows a slight decreasing tendency which is contrary to Tartu-Tõravere. Nevertheless, there was an increase in solar radiation in Tiirikoja in the 1990s but the trend became opposite in the 2000s. Overall, the study shows that spring season has become sunnier and winters on the other hand tend to be less sunny.

Tänuavaldused

Tänan oma juhendajat professor Jaak Jaagust tööks vajalike andmete hankimise ning kasulike nõuannete ja tagasiside eest. Tänan ka Ain Kulli, kes aitas Surferi programmi allalaadimisega.

Kasutatud kirjandus

Abakumova, G. M., Gorbarenko, E. V., Nezval, E. I., Shilovtseva, O. A. (2008). Fifty years of actinometrical measurements in Moscow. *International Journal of Remote Sensing*, 29(9), 2629-2665. <https://doi.org/10.1080/01431160701767500>

Eerme, K., Ansko, I., Veismann, U. (2011). Päikesekiirgusega varustatuse muutlikkus Tõravere 1955-2010. *Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis*, 109, 125-149.

Eerme, K., Kallis, A., Veismann, U., Ansko, I. (2009). Long-term variations of available solar radiation on seasonal timescales in 1955–2006 at Tartu-Tõravere Meteorological Station, Estonia. *Theoretical and applied climatology*, 101(3), 371-379. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0226-6>

IPCC. (2021). Summary for Policymakers. In: *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.)]. In Press.

Jaagus, J., Briede, A., Rimkus, E., Sepp, M. (2018). Changes in precipitation regime in the Baltic countries in 1966–2015. *Theoretical and Applied Climatology*, 131(1), 433-443. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1990-8>

Jaagus, J., Sepp, M., Tamm, T., Järvet, A., Mõisja, K. (2017). Trends and regime shifts in climatic conditions and river runoff in Estonia during 1951–2015. *Earth System Dynamics*, 8(4), 963-976. <https://doi.org/10.5194/esd-8-963-2017>

Karing, P. (1972). Summaarse kiirguse jaotumisest Eesti NSV territooriumil. *Eesti geograafia Seltsi Aastaraamat 1971/72*, 24-34.

Keevallik, S., Russak, V. (2001). Changes in the amount of low clouds in Estonia (1955–1995). *International journal of climatology*, 21(3), 389-397. <https://doi.org/10.1002/joc.618>

- Ohvril, H., Teral, H., Neiman, L., Kannel, M., Uustare, M., Tee, M., Russak, V., Okulov, O., Jõeveer, A., Kallis, A., Ohvril, T., Terez, E., I., Terez, G., A., Gushchin, G., K., Abakumova, G., M., Gorbarenko, E., V., Tsvetkov, A., V., Laulainen, N. (2009). Global dimming and brightening versus atmospheric column transparency, Europe, 1906–2007. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D10). <https://doi.org/10.1029/2008JD010644>
- Pfeifroth, U., Sanchez-Lorenzo, A., Manara, V., Trentmann, J., Hollmann, R. (2018). Trends and variability of surface solar radiation in Europe based on surface-and satellite-based data records. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(3), 1735-1754. <https://doi.org/10.1002/2017JD027418>
- Rosin, K., Keevallik, S. (2012). Regional variations in hourly and daily totals of global radiation recorded at automatic weather stations in Estonia. *Estonian Journal of Engineering*, 18(1). doi: 10.3176/eng.2012.1.06
- Russak, V. (1990). Trends of solar radiation, cloudiness and atmospheric transparency during recent decades in Estonia. *Tellus*, 42B, 206-210. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1990.t01-1-00006.x>
- Russak, V. (1998). Seasonal peculiarities of long-term changes in radiation regime in Estonia. *Climate change studies in Estonia*. Stockholm Environment Institute. Tallinn, 13-20.
- Russak, V. (2009). Changes in solar radiation and their influence on temperature trend in Estonia (1955–2007). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D10). <https://doi.org/10.1029/2008JD010613>
- Russak, V., Kallis, A. (2003). Eesti kiirguskliima teatmik.
- Sanchez-Lorenzo, A., Enriquez-Alonso, A., Wild, M., Trentmann, J., Vicente-Serrano, S. M., Sanchez-Romero, A., Posselt, R., Hakuba, M. Z. (2017). Trends in downward surface solar radiation from satellites and ground observations over Europe during 1983–2010. *Remote Sensing of Environment*, 189, 108-117. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.018>
- Sanchez-Lorenzo, A., Wild, M., Brunetti, M., Guijarro, J. A., Hakuba, M. Z., Calbó, J., Mystakidis, S., Bartok, B. (2015). Reassessment and update of long-term trends in downward surface shortwave radiation over Europe (1939–2012). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(18), 9555-9569. <https://doi.org/10.1002/2015JD023321>

Sepp, M., Jaagus, J. (2007). Tsüklonid soojendavad talvesid. *Eesti loodus* 2007/3. http://www.eestiloodus.ee/artikkel1845_1840.html. Viimati vaadatud 29.04.2022

Shinn, L. (2018). Renewable Energy: The Clean Facts. <https://www.nrdc.org/stories/renewable-energy-clean-facts>. Viimati vaadatud 27.04.2022

Stjern, C. W., Kristjánsson, J. E., Hansen, A. W. (2009). Global dimming and global brightening—An analysis of surface radiation and cloud cover data in northern Europe. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(5), 643-653. <https://doi.org/10.1002/joc.1735>

Zuo, M., Zhou, T., Man, W., Chen, X., Liu, J., Liu, F., Gao, C. (2022). Volcanoes and Climate: Sizing up the Impact of the Recent Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcanic Eruption from a Historical Perspective. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00376-022-2034-1>

The BACC Author Team. (2008). Assessment of climate change for the Baltic Sea basin. Springer.

The BACC II Author Team. (2015). Second assessment of climate change for the Baltic Sea basin. Springer.

Tooming, H. (2002). Dependence of global radiation on cloudiness and surface albedo in Tartu, Estonia. *Theoretical and Applied Climatology*, 72, 165-172. <https://doi.org/10.1007/s00704-002-0671-y>

Uscka-Kowalkowska, J., Przybylak, R., Vizi, Z., Arażny, A., Kejna, M., Maszewski, R. (2007). Variability to global solar radiation in Central Europe during the period 1951-2005 (on the basis of data from NCEP/NCAR reanalysis project). *Geographia Polonica*, 80(2), 59-68.

Vestreng, V., Myhre, G., Fagerli, H., Reis, S., Tarrason, L. (2007). Twenty-five years of continuous sulphur dioxide emission reduction in Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7: 3663 – 3681. <https://doi.org/10.5194/acp-7-3663-2007>

Viru, B., Jaagus, J. (2019). Spatio-temporal variability and seasonal dynamics of snow cover regime in Estonia. *Theoretical and Applied Climatology*, 139(1), 759-771. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03013-5>

Wild, M., Gilgen, H., Roesch, A., Ohmura, A., Long, C. N., Dutton, E. G., Forgan, B., Kallis, A., Russak, V., Tsvetkov, A. (2005). From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface. *Science*, 308(5723), 847-850. DOI:10.1126/science.1103215

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Janely Kangur,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „**Päikese kogukiirguse territoriaalne ja ajaline muutlikkus Eestis**“, mille juhendaja on **Jaak Jaagus**, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, 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.

Janely Kangur

29.05.2022