

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Matemaatika-loodusteaduskond

Meresüsteemide Instituut

SUMMAARSE KIIRGUSE HINDAMINE SATELLIITIDELT  
EESTI ALADE JAOKS

Magistritöö

Epp Juust

Juhendaja: Sirje Keevallik

Tallinn 2016

*Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus ning kinnitan, et esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud. Kinnitan, et antud töö koostamisel olen kõikide teiste autorite seisukohtadele, probleemipüstitustele, kogutud arvandmetele jmt viidanud.*

*(Töö autori nimi)*

*(allkiri ja kuupäev)*

Juhendaja:

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

*(allkiri ja kuupäev)*

Kaitsmiskomisjoni esimees:

Lubatud kaitsmisele

.....

(nimi, allkiri, kuupäev)

## **SISUKORD**

LÜHENDITE LOETELU	5
RESÜMEE	6
ABSTRACT	7
SISSEJUHATUS	8
1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE	10
1.1 Päikesekiirguse teekond läbi atmosfääri	10
1.2 Päikesekiirguse mõõtmised maapinnal	11
1.3 Päikesekiirguse mõõtmised satelliitidelt	12
1.4 CMSAF satelliitandmed	13
2 MATERJAL JA MEETODID	16
2.1 Andmed	16
2.1.1 Vaatlusjaamad	16
2.1.2 <i>In situ</i> vaatlusjaamade mõõtetehnika ja andmeedastus	20
2.1.3 Perioodil 2005 - 2014 kasutusel olnud püranomeetrid	21
2.2 Satelliitidelt mõõdetud andmed	23
2.2.1 Satelliitandmete mõõtetehnika	23
2.2.2 SARAH summaarse kiirguse arvutamine	25
2.3 Metoodika	26
2.3.1 Puuduvad andmed	26
2.3.2 Probleemsed püranomeetri mõõdetud andmed	28
2.3.3 Statistike arvutamine	29
3 Andmete võrdlus ja tulemused	31
3.1 Pikaajaliste keskmiste võrdlus	31
3.2 Pikaajaliste keskmiste võrdlus erinevatel kuudel	33
3.2.1 Keskmine süstemaatiline kõrvalekalle	33

3.2.2 Absoluutne keskmine kõrvalekalle	34
3.2.3 Keskmine suhteline viga	35
3.3 Hajuvusdiagrammid päevakeskmiste põhjal	37
3.4 Järeldused	41
KOKKUVÕTE	44
KASUTATUD ALLIKATE LOETELU	46
LISAD	48
Lisa 1. Pärnu-Sauga summaarse kiirguse hajuvusdiagrammid kuude kaupa perioodil 2005 - 2014.	48
Lisa 2. Tallinn-Harku summaarse kiirguse hajuvusdiagrammid kuude kaupa perioodil 2005 - 2014.	53
Lisa 3. Tiirikoja summaarse kiirguse hajuvusdiagrammid kuude kaupa perioodil 2005 - 2014.	57
Lisa 4. Vilsandi summaarse kiirguse hajuvusdiagrammid kuude kaupa perioodil 2005 - 2014.	62
Lisa 5. Narva-Jõeüü summaarse kiirguse hajuvusdiagrammid kuude kaupa perioodil 2005 - 2014. .	67

## **LÜHENDITE LOETELU**

BSRN Baseline Surface Radiation Network

CAL effective cloud albedo

CM SAF the Satellite Application Facilities on Climate Monitoring

EUMETSAT European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites

ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

ERA ECMWF ReAnalysis

GCOS Global Climate Observing System

GEBA Global Energy Balance Archive

GERB Geostationary Earth Radiation Budget

HRV high resolution visible

ISO International Organization for Standardization

KAUR Keskkonnaagentuur

MABD mean of absolute bias difference

MACC Monitoring Atmospheric Composition and Climate

MAPE mean absolute percentage error

MBD mean bias difference

MFG Meteosat First Generation

MSG Meteosat Second Generation

MVIRI Meteosat VisibleInfraRed Imager

NASA National Aeronautics and Space Administration

NetCDF Network Common Data Form

RMSD root mean square deviation

SARAH Surface Solar Radiation Data Set – Heliosat

SIS surface incoming solar radiation

SEVIRI Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager

WMO World Meteorological Organization

WRDC World Radiation Data Center

## RESÜMEE

### Summaarse kiirguse hindamine satelliitidelt Eesti alade jaoks

Epp Juust

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on hinnata summaarse kiirguse satelliitandmete CMSAF SARAH täpsust võrreldes *in situ* mõõtmistega Eesti kuues vaatlusjaamas perioodil 2005 – 2014. Klimatoloogilisel eesmärgil võrreldakse kuukeskmisi andmeid. Päevakeskmiste andmete põhjal leitakse satelliitandmete ja *in situ* mõõtmiste hajuvusdiagrammid ja korrelatsioonid. Töö tulemused näitavad, et kuue jaama pikaajaline keskmine on satelliitandmetes alahinnatud –  $4,06 \text{ W/m}^2$  võrra. Suurimad kõrvalekalde satelliitandmete ja *in situ* mõõtmiste vahel esinevad veebruaris, märtsis või aprillis. Viies jaamas – Tartu-Tõravere, Tiirikoja, Tallinn-Harku, Narva-Jõesuu, Vilsandi, jäävad keskmise absoluutse kõrvalekalde väärtused alla  $15 \text{ W/m}^2$  rohkem kui 90% kuudest. Kõrvalekallete osakaal keskmistest kuu väärtustest on suurim talvekuudel (detsember, jaanuar, veebruar), ulatudes Pärnu-Saugal ja Tartu-Tõraveres üle 20 %. Suvekuudel (juuni, juuli, august) jääb kõrvalekallete osakaal kõikidel jaamadel alla 5 %. Summaarse kiirguse päeva keskmiste põhjal leitud korrelatsioonikoefitsiendid on üle 0,9 Tartu-Tõraveres, Tallinn-Harkus ja Vilsandis aprillist kuni oktoobrini ning Pärnu-Saugal ja Tiirikojal maikuust kuni oktoobrini.

Võtmesõnad

Summaarne kiirgus, satelliitandmed, CMSAF SARAH, Eesti

## **ABSTRACT**

### **Retrieval of global radiation from satellite data for Estonia**

**Epp Juust**

The aim of this master's thesis is to estimate the validity of geostationary satellite-based dataset of global radiation SARA<sup>H</sup>, using in situ observations at six meteorological stations of Estonia as reference during 2005 - 2014. Average daily and monthly values for different statistics were calculated using global radiation data. The SARA<sup>H</sup> solar surface irradiance shows a negative bias of 4,06 W/m<sup>2</sup> and a mean absolute bias of 5,93 W/m<sup>2</sup> for monthly means. The values of the bias are the largest in February, March or April. In five stations – Tartu-Tõravere, Tiirikoja, Tallinn-Harku, Vilsandi, Narva-Jõesuu – the mean absolute bias values are less than 15 W/m<sup>2</sup> in 90 % of months. Correlation coefficients between the daily averages of global radiation at different stations were calculated. Daily averages show strong correlation over the whole region from May to October, where correlation coefficients exceed 0,9.

Keywords

global radiation, CMSAF SARA<sup>H</sup>, remote sensing, Estonia

## SISSEJUHATUS

Päikesekiirguse hulk ja selle jaotus Maal määrab ära antud koha ilma ja kliima. Et kirjeldada Maa kiirgusbilanssi, on vaja analüüsida erinevaid protsesse atmosfääris (soojenemine ja jahtumine, vee aurumine ja kondensatsioon) ja maapinnal (Müller and Träger-Chatterjee, 2014).

Päikesekiirguse andmed on olulised kliimasüsteemi iseloomustamisel, kuid samuti oluliseks sisendparameetriks agrometeoroloogias, hüdroloogias, keskkonna ja okeanograafilistes mudelites ning rakendustes. Päikesekiirgust kasutatakse ka soojusenergia allikana erinevates küttesüsteemides ja elektrienergia tootmises.

Mitmete kümnendite jooksul on summaarse päikesekiirguse hindamiseks loodud erinevaid meetodeid ja andmebaase, mille mõõtmised põhinevad erinevatel allikatel: maapinnal vaatlusjaamades püranomeetri ja pürheliomeetri mõõtmistest, järelanalüüside numbriliste ilmaennustus- ja kliimamudelite andmetest ning satelliitmõõtmistest.

Päikesekiirguse andmeid on mõõdetud erinevate riikide meteoroloogiateenistuste vaatlusjaamades aastakümneid. Eesti päikesekiirguse mitmekümne aastased andmerekad on olemas Tartu-Tõravere ja Tiirikoja vaatlusjaamadest. Eesti pikaajalise kiirgusrežiimi iseloomustamisel on kasutatud empiirilisi valemeid, mille väärtused on siiski ligikaudsed ja annavad kiirguse jaotusest Eestis vaid orienteeruva pildi (Russak ja Kallis, 2003). Alates 2005. aastast kuni praeguseni on summaarse kiirguse andmed saadaval veel Tallinn-Harkus, Pärnu-Saugal, Vilsandil ja Narva-Jõesuus. Lisandunud jaamade mõõtmised on võimaldanud täpsemalt hinnata summaarse kiirguse jaotust Eesti alade jaoks (Rosin, 2012), kuid klimatoloogiliselt on mõõtmisperiood lühike.

Tänapäeval on kaugseire väga edukalt arenenud ja tihti ainuke võimalus hankida andmeid regioonidest, kus maapealseid meteoroloogilisi mõõtmisi ei teostata või need on raskendatud asukoha keerukuse tõttu (ookeanid, kõrgustikud jne). Satelliidi mõõtmised aitavad paremini analüüsida territoriaalseid muutusi ajas, anda huvitatud regiooni kohta kindla ruumilise lahutusega jaotuse pildimaterjali kujul (Schmetz *et*



al., 2002). Geostatsionaarsete meteoroloogiliste satelliitide mõõtmiste põhjal on CMSAF genereerinud mitmekümne aastased homogeniseeritud päikesekiirguse andmereal, mis võimaldavad hinnata kiirgusrežiimi globaalselt kui ka kindla regiooni kohta.

Satelliitidelt mõõdetud CMSAF SARAHI andmestikust on koostatud 2015. aastal päikesekiirguse atlas Balti riikide kohta perioodil 1991 - 2014. Atlas valmis Läti, Leedu, Poola ja Eesti meteoroloogiateenistuste ühisprojektina, tulemused kiirguse jaotuse kaartidest on saadavad Keskkonnaagentuuri Riigi Ilmateenistuse veebilehel ([www.ilmateenistus.ee](http://www.ilmateenistus.ee)). Seoses kiirgusatlase ilmumisega teostati esmane kontroll Tartu-Tõravere jaama andmete (periood 1991 – 2014) kohta, teiste Eesti jaamade kohta hinnangud puuduvad.

Magistritöös on antud ülevaade erinevatest uuringutest satelliitide ja *in situ* mõõtmiste vahel, kirjeldatakse töös analüüsitavaid vaatlusjaamasid ja mõõtetehnikat ning antakse hinnang SARAHI satelliitandmetele Eesti alade jaoks.

Töö eesmärk on hinnata satelliitidelt mõõdetud CMSAF SARAHI päikese summaarse kiirguse andmete täpsust võrreldes neid Eestis mõõdetud kuue vaatlusjaama andmetega perioodil 2005 - 2014. Analüüsi tulemuste põhjal leitakse vastused järgmistele küsimustele: Kui hästi langevad SARAHI andmed kokku *in situ* andmetega pikaajaliste kuukeskmiste lõikes? Millistel kuudel on võimalik hinnata kiirguse jaotumist SARAHI andmetest?

# 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Käesolevas peatükis antakse ülevaade päikesekiirgusest ja teda mõjutavatest teguritest. Kirjeldatakse maapinnal ja sateliitidelt mõõdetud päikesekiirguse andmete kasutamist ning antakse ülevaade CMSAF SARAH andmetetest.

## 1.1 Päikesekiirguse teekond läbi atmosfääri

Päikesekiirgus on Päikeselt lähtuv elektromagnetlainete ja aineosakeste voog. Ligikaudu 97% päikesekiirgusest, mis jõuab atmosfääri ülapiirile, jääb elektromagnetlainete spektri 290 – 3000 nm piirkonda (WMO, 2008). Seda osa kiirgusest nimetatakse ka lühilaineliseks kiirguseks.

Käesolevas töös kasutatakse päikesekiirguse iseloomustamisel suurust kiirguse vootihedus, mis defineeritakse kui kiirgusvoog läbi pinnaühiku ning antud suuruse ühik on  $W/m^2$ .

Päikeselt kiiratud voog ei muutu oluliselt kosmoses ja atmosfääri ülapiirile jõudes on tema keskmine väärtus  $1367 W/m^2$  (Russak ja Kallis, 2003). Antud väärtust nimetatakse solaarkonstandiks, mis on päikesekiirguse keskmine vootihedus kiirtega risti pinnal atmosfääri ülapiiril. Aasta jooksul muutub solaarkonstandi väärtus keskmiselt 3,5 %, kuna Maa tiirleb ümber Päikese elliptilisel orbiidil, st põhjapoolkera talvel asub Päike Maale lähemal kui suvel (Russak ja Kallis, 2003).

Maapinnani jõudmiseks tuleb päikesekiirgusel läbida atmosfäär, kus kiirgus hajub või neeldub pilvede, aerosoolide ja atmosfääri molekulide mõjul (Wang *et al.*, 2012). Vastavalt kiirguse spektraalsele koostisele on atmosfääris neelajateks osoon, veeaur ja süsihappegaas (Russak ja Kallis, 2003). Kiirguse hajumine toimub tänu atmosfääris hõljuvatele tahketele või vedelatele osakestele, mida nimetatakse aerosoolideks. Seega päikesekiirguse muutused maapinnal sõltuvad pilvede ja aerosoolide muutustest atmosfääris, mille varieeruvus atmosfääris on suur (Wang *et al.*, 2012). Eestis on päikesekiirguse kõige suuremateks mõjutajateks pilved (Russak, 2005).

Vastavalt atmosfääri läbimise teekonnale jaguneb päikesekiirgus otseseks, hajusaks, peegeldunud ja summaarseks kiirguseks. Käesolevas töös kasutatakse Päikese summaarse kiirguse andmeid. Summaarset päikesekiirgust nimetatakse horisontaalsele pinnale langenud otsese ja hajusa kiirguse summat. Otsene kiirgus jõuab päikeseketta suunast maapinnani praktiliselt paralleelsete kiirte kimbuna ning tema osa summaarses kiirguses on suurem selge taeva ja atmosfääri hea läbipaistvuse korral ning Päikese suurte kõrguste korral (Russak ja Kallis, 2003). Hajuskiirguseks nimetatakse seda osa päikesekiirgusest, mis hajub atmosfääri läbimisel ning tema osa summaarses kiirguses on suurem Päikese madalate kõrguste korral (Russak ja Kallis, 2003).

## **1.2 Päikesekiirguse mõõtmised maapinnal**

Päikesekiirguse andmeid on mõõdetud erinevate riikide meteoroloogiateenistuste vaatlusjaamades aastakümneid. Üle maailma asetsevate vaatlusjaamade päikesekiirguse andmetest on loodud mitmeid homogeniseeritud ja kvaliteetseid andmearhiive nagu ülemaailmne kiirgusbaasjamade võrk BRSN, ülemaailne energiabilansi arhiiv GEBA ja maailma kiirgusandmete keskus WRDC. BSRN võrku kuulub 50 jaama üle maailma ning mõõtmisandmed on arhiivis minuti lahutusega (König-Langlo *et al.*, 2013). WRDC arhiivis on andmed tunni lahutusega ja GEBA arhiivis kuu lahutusega. Nende arhiivide andmeid kasutatakse Maa kiirgus- ja energiabilansi iseloomustamiseks ning erinevate mudelite ja satelliidi produktide valideerimisel (Trentmann *et al.*, 2014)

Jaamade mõõtmistele, mille andmed kuuluvad nimetatud võrkudesse, on seatud järgmised nõuded (Vernay *et al.*, 2013): kvaliteetne andur, perioodiline anduri kalibreerimine ja vaatlusväljaku horisondi avatus, usaldusväärsed ja kvaliteedi kontrolli läbinud andmed.

Eesti vaatlusjaama Tartu-Tõravere päikesekiirguse andmed kuuluvad kõigisse kolme nimetatud arhiivi. Tõravere jaam on spetsialiseerunud päikesekiirguse mõõtmistele, andurite ja andmete kontroll on väga kõrge. Seetõttu on Tõravere

päikesekiirguse andmeid laialdaselt kasutatud erinevates uuringutes ja valideerimistes satelliitidelt mõõdetud andmetega.

### 1.3 Päikesekiirguse mõõtmised satelliitidelt

Satelliitidelt mõõdetud andmed võimaldavad tänapäeval kirjeldada päikesekiirguse territoriaalset jaotust mitmete kümnendite kohta kõrge ajalise ja ruumilise lahutusega. Aja jooksul on arvutite võimsused suurenenud, et töödelda üha suuremat hulka satelliitandmeid. Tuletatud on mitmeid keerulisi algoritme ja meetodeid seoses päikesekiirguse läbimisega läbi atmosfääri, et saada kvaliteetseid ja homogeniseeritud päikesekiirguse andmeid.

Polaararbiidil liikuva NOAA-11 andmeid kasutades on hinnatud päikesekiirguse tunnisummasid Läänemere kohal ja kontrollitud pakutavat meetodit Tartu-Tõravere jaamas (Keevallik and Kärner, 1999). Uuritava ala laiuskraadidel oli piksli suuruseks ligikaudu  $200 \times 200$  km. Tulemuste analüüsil leiti, et satelliitidelt mõõdetud kiirgushulgad ei lange kuigi hästi kokku sellega, mis oli mõõdetud Tõravere jaamas. Suurt erinevust põhjendati sellega, et ühe punktikoha päikesekiirgust maapinnal ei saa hästi hinnata satelliidilt pärineva suure ruumilise lahutusega andmete alusel.

Geostatsionaarsete satelliitide päikesekiirguse mõõtmistel võib mõõtmisviga olla suurematel laiuskraadidel suurem (Journee *et al.*, 2011). Pilved, mis blokeerivad otsekiirgust maapinna lähedal, erinevad sellest, mida mõõdab satelliit geostatsionaarsel orbiidil. Näiteks satelliidi andmetes võivad olla 10 km kõrgusel asetsevad pilved 50. laiuskraadil tegelikkusest rohkem kui 10 km põhja pool. Eriti siis, kui Päikese kõrgus horisondil on madal ja kiirgus läbib pika teekonna läbi atmosfääri.

BSRN jaamade andmetega on võrreldud geostatsionaarsete satelliitide andmeid, kus leiti, et enamuste jaamade võrdluses oli absoluutne keskmine kõrvalekalle alla  $15 \text{ W/m}^2$  läve (Posset *et al.*, 2011). Suurimad erinevused *in situ* ja satelliidi andmetes esinesid jaamades, mis asetsesid satelliidi vaatevälja äärealade lähedal. Võrreldud jaamade seas oli ka Tõravere, mille kõrvalekalded olid ühed suuremad võrreldes

teiste, Tõraverest lõunapool asetsevate jaamadega. Põhjuseks loeti suuremat pilvede hulka, mille tõttu olid satelliidi andmed alahinnatud.

Rootsi ja Soome vaatlusjaamade puhul on võrreldud Euroopa polaarorbiidil ja geostatsionaarsel orbiidil liikuvate satelliitide andmeid *in situ* mõõtmistega. Polaarorbiidi satelliidi CLARA-A1 andmed pole saadaval lumega kaetuse perioodil, geostatsionaarsed SARAH andmed pole saadaval Skandinaavia põhjaosa kohta ja mõõtmisvead suurenevad laiuskraadi suurenemisega (Riihelä *et al.*, 2015). Analüüsitud andmete põhjal leiti, et mõlemad satelliitandmed alahindavad maapinna mõõtmiseid. Pikaajalised erinevused kuu keskmistes olid alla  $10 \text{ W/m}^2$ .

#### **1.4 CMSAF satelliitandmed**

Magistritöös kasutatakse andmete analüüsimiseks Euroopa geostatsionaarsete meteoroloogiliste satelliitide poolt mõõdetud andmeid. Euroopa satelliitide kasutamist koordineerib EUMETSAT, mille eesmärk on ilmasatelliitide ülalpidamine ning neilt saadava info jagamine ja kasutamine liikmesriikide meteoroloogiaorganisatsioonidele (Schmetz *et al.*, 2002). Eesti on EUMETSAT organisatsiooni täisliige alates 2013. aastast. Eesti esindaja EUMETSAT organisatsioonis on Keskkonnaagentuuri Riigi Ilmateenistus.

EUMETSAT organisatsiooni alla kuuluvad vastavalt uurimistemadele erinevad võrgustikud. Üks nendest on kliima jälgimine satelliitide abil CMSAF, mis loodi 1999. aastal (Trentmann *et al.*, 2014). CMSAF võrgustiku loomise eesmärk oli kliima operatiivne jälgimine ja kliimamuutuste varajane avastamine. Võrgustikku juhib Saksamaa ilmateenistus ja konsortsiumisse kuuluvad veel Rootsi, Belgia, Hollandi, Inglismaa, Soome ja Šveitsi ilmateenistused.

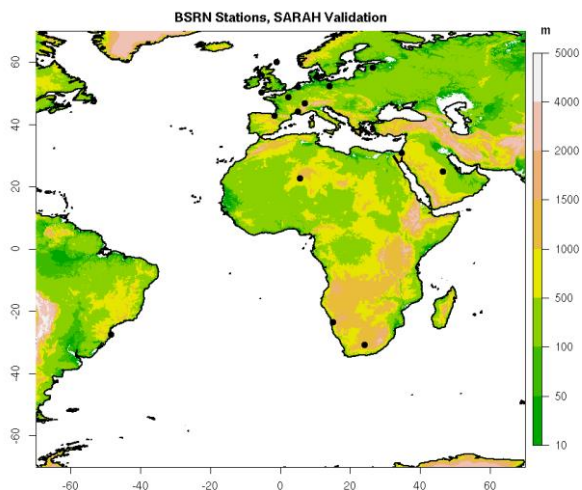
Satelliitidelt mõõdetud CM SAF kliimaandmereal on kindla pikkusega ja ilma suuremate katkestusteta. Kõik produktid on põhjalikult üle kontrollitud rahvusvaheliste ekspertide poolt ning töödeldud ja valideeritud maapinnal toimunud mõõtmiste või erinevate perioodide järelanalüüsi tulemustega (Trentmann *et al.*, 2014). Iga CM SAF produkti kohta on saadaval põhjalik dokumentatsioon, mis

hõlmab juhendeid, algoritme ja valideerimise tulemusi. Peamised produktid CM SAF andmetes on päikesekiirgus maapinnal ja atmosfääri ülapiiril, pilvede informatsioon, maapinna albedo, sademed ja temperatuur ookeani pinnal. CMSAF produktide andmed on igapäevase vabalt kättesaadavad ([www.cmsaf.eu](http://www.cmsaf.eu)).

CMSAF päikesekiirguse andmeid on *in situ* mõõtmistega võrrelnud mitmed autorid (Sanchez-Lorenzo *et al.*, 2013; Riihelä *et al.*, 2015; Posselt *et al.*, 2014; Müller *et al.*, 2015) erinevate piirkondade ja perioodide kohta. CMSAF töögrupp on võrrelnud SARAHI andmeid enne andmete avalikuks tegemist ülemaailmse kiirgusbaasjaamade BSRN võrku kuuluvate jaamade andmetega.

BSRN on Maailma Kliimauuringute programmi WCRP (World Climate Research Program) ja Globaalse Energia ja Vee Eksperimenti GEWEX (Global Energy and Water Experiment) ühisprojekt. BSRN võrku kuuluvate jaamade eesmärk on teostada väga täpseid ja pidevaid päikesekiirguse mõõtmisi maailma eri paikades, andmete arhiiv on kättesaadav alates 1992. aastast (König-Langlo *et al.*, 2013).

CMSAF SARAHI andmete valideerimisel on kasutatud 15 BSRN jaama (sh Tõravere), suurem osa neist asuvad põhjapoolkeral, täpsemalt vt joonis 1.1.



Joonis 1.1. SIS valideerimises kasutatud BSRN jaamade asukohad (mustad täpid kaardil) (allikas Trentmann *et al.*, 2014)

Satelliitandmete võrdlemisel *in situ* andmetega on ülemaailmne kliimauuringute vaatlussüsteem GCOS seadnud täpsusnõuded absoluutse keskmise kõrvalekalde

väärtuste hindamiseks (Trentmann *et al.*, 2014). Kuu keskmiste jaoks on absoluutse keskmise kõrvalekalde (MABD) hindamiseks ette antud ülemine lävi 15 W/m<sup>2</sup>, sihtväärtuseks 10 W/m<sup>2</sup> ja optimaalseks väärtuseks 8 W/m<sup>2</sup>. Maapinnal mõõdetud summaarse kiirguse väärtuste täpsuseks on BSRN hinnanud 5 W/m<sup>2</sup> (Müller *et al.*, 2015).

SARAH kuu keskmiste summaarse kiirguse väärtuste võrdluses on süstemaatiline kõrvalekalle (MBD) 1,3 W/m<sup>2</sup> ja absoluutne keskmine kõrvalekalle (MABD) 5,5 W/m<sup>2</sup>. Ligi 95 % kuudest on absoluutse keskmise kõrvalekalde väärtused alla nõutud 15 W/m<sup>2</sup> lävest (Trentmann *et al.*, 2014). Andmete analüüsimisel on CMSAF hinnanud SARAH summaarse kiirguse andmed täpsuselt ligilähedaseks *in situ* mõõtmistega (Trentmann *et al.*, 2014).

## **2. MATERJAL JA MEETODID**

### **2.1 Andmed**

Käesolevas peatükis kirjeldatakse vaatlusjaamade asukohtasid, mõõtetehnikat, puuduvaid andmeid ja andmete korrastamist *in situ* mõõtmistes.

#### **2.1.1 Vaatlusjaamad**

Eestis tegeleb meteoroloogiliste vaatlusandmete kogumisega Keskkonnaagentuuri alla kuuluv Riigi Ilmateenistus, lähtudes meteoroloogiliste vaatluste teostamisel Maailma Meteoroloogiaorganisatsiooni (WMO) nõuetest. Eesti kuulub WMO-sse alates 1992. aastast. WMO korraldab rahvusvahelisel tasandil ühtse katuseorganisatsioonina meteoroloogia valdkonna tegevust, mis on oluline, kuna kõik mõõtmised üle maailma peavad olema omavahel võrreldavad ja ühtse metoodikaga ning juhiste järgi. Päikesekiirgust mõõtvatele vaatlusjaamade väljakutele on WMO (WMO, 2008) poolt järgmised soovitusel: avatud horisont (oluline just talveperioodil, kui Päikese kõrgus horisondil on madal), kiirgusandurite perioodiline kalibreerimine, regulaarne anduri tehniline kontroll.

Magistritöös kasutatakse Eesti territooriumil paikneva kuue vaatlusjaama andmeid (vt joonis 2.1)





Joonis 2.1. Summaarset kiirgust mõõtvate jaamade asukohad.

Lääne-Eesti rannikuäärset kiirgusrežiimi iseloomustavad Vilsandi ja Pärnu-Sauga, Põhja-Eesti kiirgusrežiimi Tallinn-Harku ja Kirde-Eesti režiimi Narva-Jõesuu vaatlusjaam. Mandrisisest režiimi kirjeldab Tartu-Tõravere vaatlusjaam ja Tiirikoja järvejaamana Peipsi järve looderannikul.

Töös kasutatud vaatlusjaamade andmed ja summaarse kiirguse mõõtmiste algused on toodud tabelis 2.2.

Tabel 2.2. Jaamade andmed ja summaarse kiirguse mõõtmiste algus (allikas: Riigi ilmateenistuse CLIDATA andmebaas)

Jaama nimi	Laiuskraad	Pikkuskraad	Jaama kõrgus (m)	Summaarse kiirguse mõõtmiste algus
Tartu-Tõravere	N 58°15'51''	E 26°27'41''	70	al 1965
Tiirikoja	N 58°51'55''	E 26°57'08''	32	al 1955
Narva-Jõesuu	N 59°28'06''	E 28°02'33''	6	01.04.2004 – 19.12.2013
Narva	N 59°23'22''	E 28°06'33''	28	20.12.2013
Tallinn-Harku	N 59°23'53''	E 24°36'10''	33	01.04.2004
Pärnu-Sauga	N 58°25'11''	E 24°28'11''	12	23.12.2004
Vilsandi	N 58°22'58''	E 21°48'51''	6	01.04.2004

*Tartu-Tõravere* meteoroloogiajaam asub Tõraveres, ligikaudu 20 km kaugusel Tartu linnast. Jaama ümbrus on ulatuslikult põllustatud. Meteoväljaku vahetus läheduses on Tartu Observatooriumi ehitised ligikaudu 100 – 500 meetri raadiuses.

Jaam on Riigi Ilmateenistuse üks kuuest kliimajaamast, st. jaamas viibib vaatleja ööpäevaringselt. Vaatleja teostab 8 korda ööpäevas meteoroloogiliste parameetrite manuaalseid vaatlusi ja kontrollib ning puhastab vaatlusväljakul teatud andurid (vastavalt ilmale). Jaamas toimuvad peale põhiliste meteoroloogiliste vaatluste ka mitmed päikesekiirguse mõõtmised. Vaatlusväljakul toimub 12 eri liiki kiirguse mõõtmine, mis on täpsemalt välja toodud Eesti meteoroloogia aastaraamatus (Kallis *et al.*, 2014).

Tartu-Tõravere jaam kuulub rahvusvahelisse kiirgusmõõtmiste baasjaamade BSRN (*Baseline Surface Radiation Network*) võrku, mille kiirgusandmed on BSRN arhiivis olemas minutiandmete lahutusega alates 1999. aastast. Andmeid edastatakse veel WRDC andmebaasi tunni lahutusega ja GEBA arhiivi kuu keskmiste väärtustega .

*Tiirikoja* järvejaam asub Peipsi järve looderannikul. Meteoväljak asub tasasel maa-alal põhja pool Mustvee linna ca 300 m kaugusel viimastest majadest ja ca 100 m kaugusel järvest. Vaatlusväljakut ümbritseb looduslik heinamaa, kus kasvavad üksikud puud ja puude grupid, mille kõrgus ulatub kuni 15 meetrini. Mõned kõrgemad puudegrupid on meteoväljakust ca 100 meetri kaugusel kagus ja kirdes. Umbes 50 meetri kaugusel läänekaares kasvab pajuvõsa. Metsapiir jääb väljakust 150 - 200 meetri kaugusele. Viimased horisondi kaetuse mõõtmised toimusid 2001. aastal, mille järgi oli juba siis vaatlusväljak põhjast ja läänest varjatud (objektide ligikaudne kõrgus 10 kraadi) (Russak ja Kallis, 2003). Kuna metsa kõrgus on aastatega veelgi kasvanud, on Tiirikoja päikesekiirguse mõõtmised talvisel perioodil (Päikese madalatel kõrgustel horisondil) alahinnatud.

*Narva-Jõesuu* meteoroloogiajaam asub Soome lahe ääres, Narva jõe vahetus läheduses. Meteoväljak asub Narva jõe vasakul kaldal veepiirist 70 m kaugusel, merest 400 m kaugusel. Väljakust põhja ja kirde suunas on väljak avatud, 20 - 30 m kaugusel on üksikud männid ja lehtpuud. Väljakust edelasse, 10 meetri kaugusele

jääb jaama hoone kõrgusega seitse meetrit, läände ja loodesse jäävad 20 - 40 meetri raadiuses 10 - 14 meetri kõrgused lehtpuud ja 1 - 2 korruselised hooned. Jaamas toimunud horisoni kaetuse mõõtmised 2001. aastal näitasid, et ida-, lõuna- ja lääne kaares asuvate objektide kõrgused ulatusid 10-12 kraadini (Russak ja Kallis, 2003). Need objektid võivad varjutada andurit talvekuudel, kui Päikese kõrgus on väike.

2013. aasta detsembris koliti Narva-Jõesuu jaam linnulennult ca 9 km kagu suunas Narva Olgina lennuvälja kõrvale. Seoses kolimisega uuendati kogu Narva automaatjaama instrumendid, sh sumaarse kiirguse andur. Kuna uus vaatlusväljak asub lennuvälja kõrval, avaral väljakul, on päikesekiirguse mõõtmistingimused väga head.

*Tallinn-Harku* aeroloogiajaam asub Tallinna lääneservas, Tallinna-Paldiski maantee ääres kolme kilomeetri kaugusel Õismäe elamurajoonist. Meteoväljak asub aeroloogiajaama majast kirde pool. Põhja - loode suunal asub väljakust 80 meetri kaugusel segamets, mis on aastate jooksul meteoväljaku varjatust antud suunas suurendanud. Väljakust edelas (ca 60 m kaugusel) asuvad ilmajaama radari kuplid (uus radar paigaldati 2009. aastal). Vana radari kuppel asub ilmajaama hoone katusel, kuid uus radar asetseb jaama hoone kõrval eraldi 16,3 m kõrguse torni otsas. Käesoleval hetkel ei ole autorile teada, kas uue radari kuppel varjutab päikesekiirguse andurit (Päikese madalate kõrguste tingimustes), kuna viimased horisoni kaetuse mõõtmised teostati 2001. aastal.

*Pärnu-Sauga* meteoroloogiajaam asub Pärnu linnast väljas Sauga lennuvälja kõrval. Jaam koliti Pärnu linnast Sauga lennuvälja kõrvale 2004. aastal. Vaatlusväljak asub avaral väljakul, lennuradade vahelisel alal lennujaama hoonest kagus.

*Vilsandi* rannikujaam asub Saare maakonnas, Vilsandi saarel. Saare läänerannikul asub Vilsandi tuletorn, mille kõrgus on 38 m. Meteojaam asub tuletorni kõrval ida pool väikesel lamedal paekuplil. Meteoväljakust läänes paikneb 14 m kaugusel jaama maja ja 90 m kaugusel tuletorn. Nende objektide tõttu on päikesekiirgus mõnevõrra varjatud Päikese madalatel kõrgustel horisondil.

### 2.1.2 *In situ* vaatlusjaamade mõõtetehnika ja andmeedastus

Summaarset kiirgust registreeritakse püranomeetriga, mis mõõdab poolsfäärist horisontaalsele pinnale saabuvat summaarse kiirguse võimsust lainela vahemikus 300 kuni 3000 nm (WMO, 2008).

Eestis on kasutusel summaarse kiirguse registreerimiseks firma Kipp & Zonen püranomeetrid tüübiga CM ja CMP. Nimetatud püranomeetrid registreerivad kiirgust vahemikus 285 kuni 2800 nm (Kipp & Zonen, 2015). Püranomeetri mõõtmiste juures on oluline selle perioodiline kalibreerimine, et vähendada mõõtepiirkonna nihet aja jooksul. Firma Kipp & Zonen püranomeetrite soovituslik kalibreerimine on iga kahe aasta tagant. Andureid peab regulaarselt hooldama (st klaaskuplite puhastamine ja anduri silikageeli vahetus). Mitteperioodiline kalibreerimine ja nullinihe (*zero offset*) võivad põhjustada püranomeetri mõõtmistes kuni 5% ebatäpsuse kuu keskmiste väärtuste ja 2% aasta keskmiste jaoks (Wang *et al.*, 2012; Hakuba *et al.*, 2014).

Püranomeetris on kasutusel termoelektriline sensor, mis neelab päikesekiirguse ja muundab selle soojusenergiaks. Vajaliku spektraaltundlikkuse saavutamiseks, s.t pikalainelise kiirguse elimineerimiseks ning kaitseks välismõjude eest on instrument kaetud kahe poolsfäärilise klaaskupliga (vt joonis 2.3). Tänu klaaskuplitele jõuab päikeselt saabunud otsekiirgus anduri vastuvõtupinnale igast nurgast võrdsena. Klaaskuplid aitavad vähendada ka saabunud kiirguse suunalisi vigu (*directional errors*).



Joonis 2.3 Püranomeeter (Kipp & Zonen, 2015)

Summaarse kiirguse mõõtmisel võib esineda püranomeetris tehiskiirguse (*zero offset*) registreerimist õistel kellaaegadel kui päikesekiirgus on null. Nähtus tekib, kui anduri temperatuuri kõikumistest tekkinud soojuse liikumine (tingitud temperatuuride vahel anduri sees ja selle kohal olevas õhukihis) põhjustab tundlikus elemendis tehiskiirgust, mille tõttu registreerib andur väikeseid positiivseid või negatiivseid väärtuseid (Kipp & Zonen, 2015). Nullist erinevaid õiste kellaaegade väärtuseid aitab vähendada püranomeetri külge paigaldatav ventilaator, mis reguleerib püranomeetri sisetemperatuuri ning vähendab udu ja hära tekkimist klaaskuplitele ning kiirendab lumekihi sulamist andurilt.

Püranomeeter registreerib vaatlusjaamas summaarse kiirguse väärtused vastavalt paigaldatud tarkvara järgi minuti sagedusega ja andmed salvestatakse automaatjaama logerisse. Minutiandmetest arvutatakse iga tunni kohta keskmine, maksimum- ja miinimumväärtused. Igal täistunnil edastab automaatjaama loger tunniandmed keskusesse, kus andmed arhiveeritakse kliimainfosüsteemi CLIDATA. Andmete kvaliteedikontroll toimub keskusel vastava erialaspetsialisti poolt.

Kirjeldatud andmeedastus keskusesse toimub kõigis töös kasutatud jaamades, välja arvatud Tartu-Tõravere. Tartu-Tõravere toimub kiirgusandmete salvestamine minutiandmete tasandil jaama arvutisse, kus kohapeal töötab vastava ala spetsialist, kes kontrollib ja töötleb mõõtmisandmed (minutiandmed) soovitud kujule. Tartu-Tõravere kontrollitud päikesekiirguse minutiandmed edastatakse igakuiselt rahvusvahelisse kiirgusjaamade BSRN võrku ja tunniandmed ilmateenistuse infosüsteemi CLIDATA ja rahvusvahelisse WRDC ning GEBA andmebaasi.

### **2.1.3 Perioodil 2005 - 2014 kasutusel olnud püranomeetrid**

Firma Kipp & Zonen instrumendid kuuluvad rahvusvahelise standardi ISO 9060:1990 järgi kõrgeima kvaliteedi hulka. Kipp & Zonen püranomeetrid vastavad WMO summaarset kiirgust mõõtvate instrumentide nõuetele (Kipp & Zonen, 2000 ja 2004).

Alljärgnevas tabelis 2.4 on välja toodud vaatlusjaamades toimunud andurite vahetused ja kalibreerimised.

Tabel 2.4. Vaatlusjaamades toimunud püranomeetrite vahetused ja andurite ventilaatori olemasolu info (allikas: Riigi Ilmateenistuse CLIDATA andmebaas)

Jaam	Püranomeetri tüüp	Mõõtmiste periood	Ventilaatori olemasolu	Kalibreerimised
Tartu-Tõravere	CM11	05.04.1999-31.03.2002	+	
	CM21	01.04.2002 – praeguseni	+	Iga kevad
Tiirikoja	CM11	04.2004 - praeguseni	-	08.05.2008; 21.06.2012;
Narva-Jõesuu	CM11	04.2004-19.12.2013	-	06.09.2013
Narva	CMP6	20.12.2013	+	
Tallinn-Harku	CM11	04.2004 – 04.05.2015	+	07.09.2013; (03.12.2013 ventilaatori toitebloki vahetus)
	CMP21	05.05.2015 - praeguseni	+	
Pärnu-Sauga	CM21	12.2004 - praeguseni	(paigaldati 06.04.2006)	05.09.2013
Vilsandi	CM21	04.2004 – 14.07.2009	-	
	CM21	15.07.2009 – 16.10.2014	-	
	CMP21	17.10.2014 - praeguseni	+	

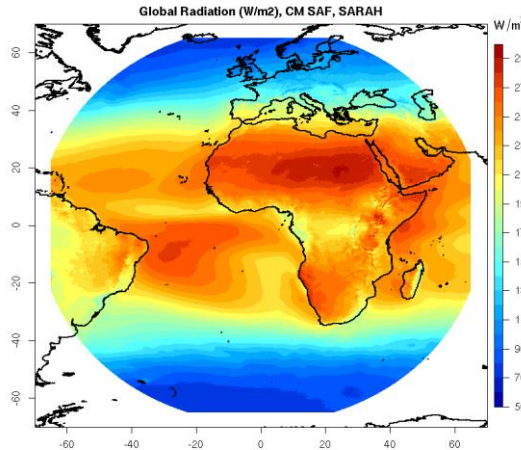
Perioodi 2005 – 2014 jooksul on ainult Vilsandis toimunud püranomeetri vahetus. Ventilaatorid puuduvad Tiirikojal, Narva-Jõesuul ja Vilsandil.

Tõravere jaamas puhastab vaateleja andureid tolmust, lumest, jääst jm iga 3 tunni tagant ja kiirgusandurite hooldus (sh kalibreerimine) on toimunud iga aasta kevaditi. Teiste jaamade kohta on teada osaline info püranomeetri kalibreerimiste kohta (kalibreerimisi ei ole üles kirjutatud jne). Mandril paiknevatest jaamadest toimus viimane kalibreerimine septembris 2013. aastal Narva-Jõesuus, Pärnu-Saugal ja Tallinn-Harkus. Uued andurid paigaldati Narva 2013. aasta lõpus, Vilsandile 2014. aasta oktoobris ja Tallinn-Harkusse 2015. aasta maikuus.

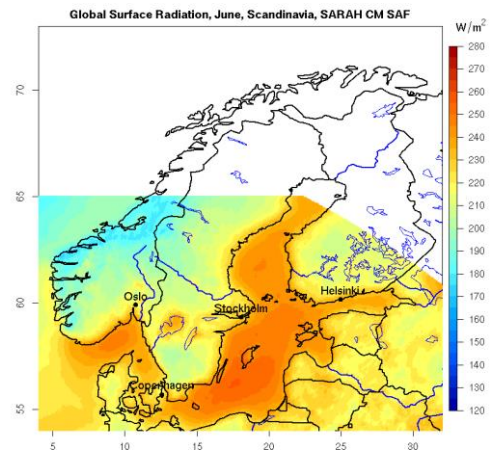
## 2.2 Satelliitidelt mõõdetud andmed

Magistritöös on kasutatud CMSAF poolt 2013. aastal genereeritud andmestikku nimega SARAH, milles summaarse kiirguse andmed on saadaval aastate 1983 – 2014 kohta, kuid antud töös kasutatakse andmeid perioodil 2005 - 2014. Andmete ruumiline lahutus on ekvaatori kohal  $0,05^\circ \times 0,05^\circ$  ning andmed on kättesaadavad pikkuskraadidel  $0^\circ - 65^\circ$  ida- ja läänepikkustel ning  $0^\circ - 65^\circ$  põhja- ja lõunalalailustel

(Trentmann *et al.*, 2014). Illustreerivad joonised SARAH summaarse päikesekiirguse kohta Skandinaavias ja globaalselt on toodud joonistel 2.5 ja 2.6.



Joonis 2.5. SIS väärtused globaalselt, 1983-2013 aasta keskmine summaarne kiirgus ( $W/m^2$ ) (Trentmann *et al.*, 2014)



Joonis 2.6. SIS väärtused Skandinaavias. 1983-2013 juunikuu keskmine summaarne kiirgus ( $W/m^2$ ) (Riihelä *et al.*, 2015)

Joonis 2.6 kirjeldab satelliidi vaatevälja ulatust SARAH summaarse kiirguse kohta Skandinaavias, mille põhjaosa kohta andmed puuduvad (valged alad joonisel). Suurematel laiuskraadidel on geostatsionaarsetelt satelliitidelt mõõdetud kiirgusandmed mõjutatud pika teekonna tõttu läbi atmosfääri (Riihelä *et al.*, 2015).

### 2.2.1 Satelliitandmete mõõtetehnika

SARAH lühilainelise kiirguse andmed põhinevad Meteosat I ja II generatsiooni mõõtmistel. Satelliidid liiguvad geostatsionaarsel orbiidil, asudes Maa ekvaatori kohal pikkuskraadil  $0^\circ$  (v.a. Meteosat 8, mille asukoht on  $3,4^\circ W$ ) ligikaudu 36 000 km kõrgusel (Posselt *et al.*, 2014).

Töös kasutatud SARAH andmed on mõõdetud Meteosat 7 – Meteosat 10 (vt tabel 2.7), mis opereerivad Euroopa ja Aafrika alasid.

Tabel 2.7 SARAH andmestik kasutatud satelliitide mõõtmisperioodid (Müller *et al.*, 2015)

Satelliit	Algus	Lõpp
Meteosat 7 (MFG)	03.06.1998	31.12.2005
Meteosat 8 (MSG)	01.01.2006	Aprill 2007

Meteosat 9 (MSG)	01.05.2007	Detsember 2012
Meteosat 10 (MSG)	01.01.2013	Detsember 2014

MFG satelliitide põhiline instrument on MVIRI (*Meteosat Visible-InfraRed Imager*), mis on kõrge resolutsiooniga radiomeeter 3 spektraalse kanaliga. Instrument toodab põhilise osa Meteosat andmetest ja iga 30 minuti järel formeerib Maast terve kujundi. CMSAF töögrupi poolt koostatud SARAH juhendi (Trentmann *et al.*, 2014) järgi on MVIRI spektraalsed kanalid kirjeldatud järgmiselt. Nähtav kanal lainepikkuse vahemikuga 0,45 – 1,0  $\mu\text{m}$  on kasutusel päevaajal, kui päikesekiirus on kättesaadav, ruumiline resolutsioon on 2,5 km nadiiris. Veeauru kanal lainepikkuse vahemikuga 5,7 – 7,1  $\mu\text{m}$  on kasutusel, et mõõta veeauru troposfääri ülakihis, ruumiline resolutsioon on 5 km nadiiris. Soojuskiirguse kanal töötab nii päeval kui öösel, et kindlaks teha pilvede ülapiiri ja ookeani pinna temperatuur. Antud kanal registreerib maapinnalt ja atmosfäärist eraldunud soojuskiirgust lainepikkuste vahemikus 10,5 – 12,5  $\mu\text{m}$ , ruumiline resolutsioon on 5 km nadiiris.

MSG satelliidid on varustatud SEVIRI ja GERB instrumentidega. Nimetatud instrumendid toodavad andmeid Maa kettast iga 15 minuti järel. Põhiline instrument SEVIRI jälgib Maad 12 spektraalses kanalis ekvaatori kohal resolutsiooniga 3 km v.a. kõrge resolutsiooniga HRV (*high resolution visible channel*) kanal, mille resolutsioon on 1 km. Nähtavas kanalis on peale HRV kanali veel kaks spektri vahemikku VIS0.6 (0,56 – 0,71  $\mu\text{m}$ ) ja VIS0.8 (0,74 – 0,88  $\mu\text{m}$ ), resolutsiooniga 3km ekvaatori kohal. HRV kanal töötab vahemikus 0,4 – 1,1  $\mu\text{m}$ , mis on ligilähendane MVIRI instrumendi nähtava kanaliga, kuid HRV kanal ei anna globaalset pilti (Posselt *et al.*, 2014).

GERB instrument on nähtav-infrapuna radiomeeter, mis registreerib Maa kiirgusbilanssi. Radiomeeter mõõdab lühi- ja pikalainelise kiirgusbilansi andmeid atmosfääri ülapiiril. Instrument töötab nähtava kanali vahemikus 0,32 – 4,0  $\mu\text{m}$  ja laiemas elektromagnetiliste lainete vahemikus 0,32 – 30  $\mu\text{m}$ .



### 2.2.2 SARAH summaarse kiirguse arvutamine

SARAH andmestik on nimetatud summaarse kiirguse produkti lühendiga *SIS* ja defineeritud kui päikesekiirguse hulk, mis jõuab horisontaalsele maapinnale spektri vahemikus 0,2 – 4 μm, ühik on W/m<sup>2</sup> (Trentmann *et al.*, 2013).

Summaarse kiirguse andmed arvutatakse efektiivse pilvisuse albeedo (*CAL*) ja selge taeva summaarse kiirguse muutujatest alljärgneva valemi põhjal.

$$SIS = SIS_{CLS}(1 - CAL) \quad (1)$$

Siin *SIS* - summaarne kiirgus, *SIS<sub>CLS</sub>* - päikese summaarne kiirgus selge taeva korral, *CAL* - efektiivne pilvisuse albeedo (Trentmann *et al.*, 2013).

*SIS* andmed on genereeritud kahe sammu tulemusena. Esmalt arvutatakse satelliidi poolt mõõdetud andmetest vajalik pilvede info – täpsemalt efektiivse pilvisuse albeedo *CAL*, mis on defineeritud kui kogu taeva peegeldunud kiirguse suhe selge taeva peegeldunud kiirgusesse, tingimusel, et peegeldunud kiirgus ei ole jõudnud maapinnale (Müller *et al.*, 2015). *CAL* väärtuste täpsus kahaneb vastavalt geostatsionaarse satelliidi vaatenurgale maapinna ja pilvede suhtes, mistõttu suurematel laiuskraadidel esinevad suuremad mõõtmisvead, mis omakorda vähendavad summaarse kiirguse täpsust ja kvaliteeti (Amillo *et al.*, 2014; Sanchez-Lorenzo *et al.*, 2013). Tugev selge taeva peegeldus heleda maapinna kohal vähendab kontrastsust selge ja pilvise taeva peegelduste vahel, mistõttu on usaldusväärsus *CAL* väärtustes väiksem ja omakorda vead *SIS* arvutustes suuremad (Trentmann *et al.*, 2014)

Teise sammuna arvutatakse kogu summaarne kiirgus *SIS*, mis tuletatakse keerulise SPECMATIC meetodiga. Meetodit on põhjalikult kirjeldanud Müller *et al.* (2015). Nimetatud meetod kasutab *look-up* tabelite lähendusi, mis põhinevad kiirguslevi modelleerimisel (*radiative transfer modelling*) kasutades *libRadtran*<sup>1</sup> mudelit (Mayer and Kylling, 2005). *Look-up* tabel on ettearvutatud andmete kogum, mis võimaldab asendada keerulised arvutused vähem aega nõudvate

---

<sup>1</sup> libRadtran - matemaatiliste programmeerimiskeelte C ja Fortrani kombinatsioon, et arvutada päikese- ja soojuskiirgust Maa atmosfääris.

interpoleerimistega. Meetodis on arvestatud järgmist atmosfääri informatsiooni: aerosoolide optiline paksus, aerosoolide tüüp, veeaur ja osoon (Müller *et al.*, 2015).

Aerosooli andmed pärinevad Euroopa Keskpika ilmaennustusmudeli projekti MACC (*Monitoring Atmospheric Composition and Climate*) järelanalüüsi tulemustest. Aerosoolide kontsentratsioon mõjutab oluliselt kiirgust selge taeva korral ja seega kogu summaarset kiirgust. Kasutatud on järgmist aerosoolide klimatoloogilist (st pikaajalist keskmist) informatsiooni (550 nm spektri piirkonnas): aerosoolide optiline paksus, üksikhajumise albeedo ja asümmeetria parameeter (Müller *et al.*, 2014).

Veeauru andmed on saadud ERA-40 ja ERA-Interim järelanalüüside tulemustest. Osoon on tugev neelaja UV-spektrialas, kuid ülejäänud spektris nõrk ja seega ei mõjuta oluliselt summaarse kiirguse väärtusi. Algoritmis on kasutatud osooni klimatoloogilisi väärtuseid standardatmosfääri tingimustes.

Maapinna albeedo väärtused pärinevad NASA CERES/SARB Surface Properties Project tulemustest, mis põhineb kahekümne erineva maapinnatüübi albeedo andmetel. Albeedo informatsiooni on kasutatud ainult selge taeva kiirguse arvutamisel. Albeedo väärtuste ebausaldusväärsuseks loetakse 1 – 2 % nendes piirkondades, kus maapinnal esinevad sagedased lumikatte muutused (Müller *et al.*, 2014).

## **2.3 Metoodika**

Järgmistes alapeatükkides on kirjeldatud andmeridades esinenud andmelünki, püranomeetri mõõdetud probleemseid andmeid ja nende parandamist ning arvutusi, mis on tehtud tulemuste saavutamiseks.

### **2.3.1 Puuduvad andmed**

Vaatlusjaamades mõõdetud summaarse kiirguse andmeridades esines lünkasid ja probleemseid andmeid mitmetel põhjustel nagu elektrikatkestus jaamas, anduri konfiguratsioonist tulenevad vead (*zero offset, update*), vigane andmeedastus vms.

Satelliitidelt pärinevate andmelünkade põhjusteks võisivad olla radiomeetrite vigane mõõtmine, satelliidilt vigane andmeedastus või andmetöötlus protsessil esinenud vead.

Alljärgnevas tabelis on toodud puuduvate päevakeskmiste arv perioodil 2005 - 2014. Eraldi on välja toodud satelliidi ja püranomeetri mõõtmistes esinenud lünkade arv.

Tabel 2.8. Puuduvate päevakeskmiste väärtuste arv perioodil 2005 - 2014

Jaam	Satelliit	Püranomeeter
Tartu-Tõravere	22	0
Tallinn-Harku	22	4
Pärnu-Sauga	22	16
Tiirikoja	22	1
Vilsandi	22	90
Narva-Jõesuu/Narva	22	12

SARAH andmelünkade kohta ei ole dokumentatsioonis täpseid põhjuseid välja toodud. Perioodil 2005 - 2014 jooksul puudub satelliidilt mõõdetud andmetest 22 päeva, millest 2/3 esines 2006. aasta oktoobris, 2013. aasta juulis ja 2014. aasta detsembrikuus.

Tartu-Tõravere vaatlusjaamas püranomeetriga mõõdetud päeva keskmistes andmetes lükkasid ei esinenud, kuna andmekontroll on väga kõrgel tasemel.

Vilsandi vaatlusjaamas 90 % püranomeetri andmelünkadest esines keskpäevastel tundidel 2008. aasta augustis, 2009. aasta aprillist augustini ja 2010. aasta aprillist juunini. Põhjus seisnes püranomeetri tarkvara ebatäpsetest seadistustest. Tarkvara uuenduste tõttu oli anduri mõõtepiirkond seadistatud väiksemaks kui tegelik summaarne kiirgus ja sellest tulenevalt blokeeris püranomeeter kiirguse väärtused, mis olid suuremad kui 640 W/m<sup>2</sup>. Probleemile saadi jälile 2010. aasta suve keskel ja taastati anduris normaalne kiirguse registreerimine.

Pärnu-Sauga vaatlusjaamas 32% püranomeetri andmelünkadest esines aprillis 2011 eda samal põhjusel nagu eelnevalt kirjeldatud Vilsandis. Püranomeeter blokeeris kiirguse väärtused, mis olid suuremad kui 613 W/m<sup>2</sup>. Nimetatud probleem

avastati igapäevase andmekontrolli tulemusel. Ülejäänud puuduvad andmed olid põhjustatud teistel, andurist mitteolenevatel põhjustel (andmeedastuse torked, kalibreerimine vms).

Narva-Jõesuus puuduvad andmed 2013. aasta detsembris, kui toimus jaama kolimine. Uues asukohas esines esimestel päevadel mitmeid üldiseid probleeme jaama ja anduritega (andurite seadistamine ja interneti puudumine), mistõttu olid häiritud andmete registreerimine ja edastamine andmebaasi.

Päeva keskmistest väärtustest on töö autor arvanud kuu keskmised väärtused tingimusel, et kuus on olemas vähemalt 2/3 andmetest, vastasel korral jäeti terve kuu väärtused arvutustest välja. Selline tingimus sai valitud, kuna nii arvutab CMSAF satelliitidelt tuletatud kuu andmeid. Kui andmelüngad esinesid satelliitandmetes, siis elimineeriti samade kuupäevade andmed ka vaatlusjaamade väärtustes ja vastupidi. Kirjeldatud keskmistamise meetodi (arvestades puuduvaid väärtusi) mõju tulemustele eeldatakse minimaalseks, kuna arvutused teostatakse mõlemale andmereale samasuguselt.

Tulemuste analüüsimisel on Vilsandi jaama kohta arvestatud 115 kuu väärtust (puudu 5 kuud, mille põhjused kirjeldatud alapeatüki alguses) ja ülejäänud viie jaama kohta 120 kuu väärtust (ei puudu ühtegi kuu väärtust).

### **2.3.2 Probleemsed püranomeetri mõõdetud andmed**

Probleemsed andmed esinesid püranomeetri tunniväärtustes, kus esines perioode, kui püranomeeter registreeris öistel kellaaegadel kiirguse väärtuseid kui tegelik päikesekiirgus on null. Selliseid perioode esines Tallinn-Harku, Pärnu-Sauga ja Tiirikoja jaamade andmetes. Nimetatud jaamade tunniväärtustes esines mitmel perioodidel öistel kellaaegadel väikeseid positiivseid väärtusi, mis olid põhjustatud temperatuuri kõikumistest anduri sees (nähtus *zero offset*) ja tekitasid tehislisku kiirguse registreerimist.

Pärnu-Sauga tunni keskmistes väärtustes esines öösiti nullist suuremaid väärtuseid (max 6 W/m<sup>2</sup>) perioodidel: 2008. aasta veebruar – oktoober, 2010. aasta märts – september. Tallinn-Harkus esinesid öösiti nullist suuremad väärtused (max 7 W/m<sup>2</sup>)

2013. aasta veebruaris ja novemberis ning 2014. aasta veebruaris. Tiirikojal esinesid öösiti nullist suuremad väärtused ( $\max 5 \text{ W/m}^2$ ) 2005. aasta oktoobrist kuni 2006. aasta aprillini.

Öised positiivsed tunniväärtused korrastati autori poolt enne arvutuste tegemist. Korrastamise meetod oli järgmine: arvutati öösel esinenud kiirguse väärtuste keskmine ja lahutati leitud väärtus terve päeva andmetest. Sellise meetodi järgi toimub Tartu-Tõraveres minutiandmete töötlus enne BSRN võrku edastamist.

### 2.3.3 Statistiliste arvutamine

Järgnevalt on kirjeldatud arvutusi, mis on töö autor teinud, et hinnata omavahel SARAH ja *in situ* summaarse kiirguse väärtuseid.

SARAH summaarse päikesekiirguse andmed on analüüsiks sobivale kujule (NetCDF formaadist Excelisse) viinud Leedu Hüdrometeoroloogia teenistuse klimatoloog Justinas Kilpys. Autori käsutuses oli SARAH SIS päeva keskmised väärtused, millest arvutati kuu väärtused aritmeetilise keskmisena. Kuu andmed arvutati tingimusel, et päeva andmeid esines rohkem kui 2/3 kuust.

Maapinnal mõõdetud summaarse kiirguse andmed on saadud Riigi Ilmateenistuse kliimainfosüsteemist CLIDATA tunni lahutusega. Sellest arvutati päeva keskmised väärtused aritmeetilise keskmisena tingimusel, et ei puudu ühtegi tunni väärtust. Kuuväärtused on arvutatud aritmeetilise keskmisena päeva keskmistest tingimusel, et puuduvaid päevaväärtuseid võib esineda  $< 1/3$  kuust.

Satelliitandmete ja maapinnal mõõdetud andmete võrdlemisel on arvutatud järgmised statistilised näitajad: keskmine süstemaatiline kõrvalekalle (MBD), keskmine absoluutne kõrvalekalle (MABD), ruutkeskmine erinevus (RMSD) ja keskmine suhteline viga (MAPE).

$$MBD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SIS_i - F_i) \quad (2)$$

$$MABD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |SIS_i - F_i| \quad (3)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SISi - Fi)^2}{n}} \quad (4)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|SISi - Fi|}{Fi} \quad (5)$$

Siin  $SISi$  - satelliitidelt tuletatud summaarse kiirguse andmed,  $Fi$  - maapinnal vaatlusjaamades mõõdetud kiirguse andmed ja  $n$  - arvutustes kasutatud kuude arv.

Tulemuste analüüsimisel on arvesse võetud CMSAF töögrupi poolt eelnevates valideerimistes kasutatud lävesid kuu keskmiste väärtuste hindamisel. Kuu keskmiste jaoks on absoluutse keskmise kõrvalekalde hindamiseks ette antud ülemine lävi (*threshold*)  $15 \text{ W/m}^2$ , sihtväärtuseks  $10 \text{ W/m}^2$  ja optimaalseks (*optimal*) väärtuseks  $8 \text{ W/m}^2$  (Trentmann et al., 2014). Ülemise läve väärtuse hindamisel on arvesse võetud BSRN poolt hinnatud *in situ* andmete täpsust  $5 \text{ W/m}^2$  (st ülemine lävi =  $10 \text{ W/m}^2 + \textit{in situ}$  mõõtmisviga  $5 \text{ W/m}^2$ ).

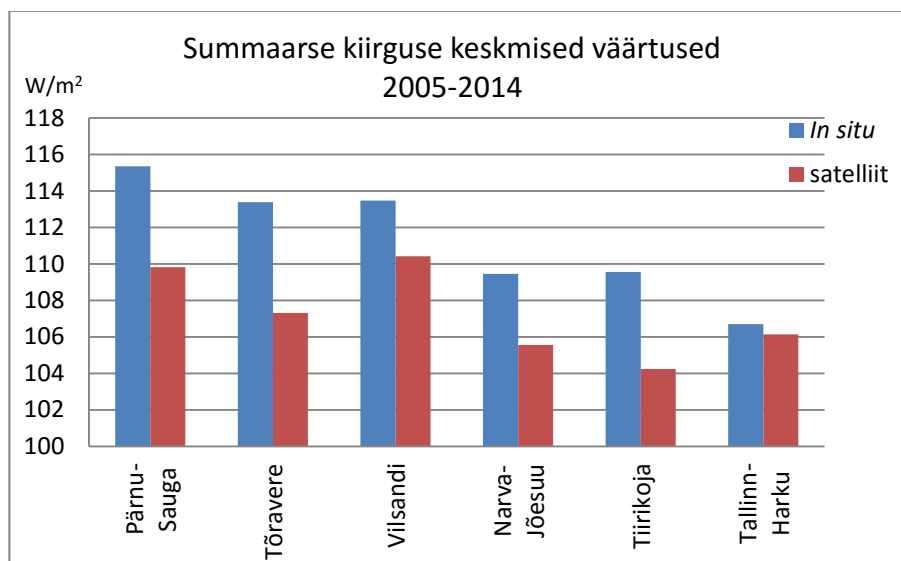
### 3. Andmete võrdlus ja tulemused

#### 3.1 Pikaajaliste keskmiste võrdlus

Alljärgnevalt on võrreldud summaarse kiirguse kuu keskmiseid andmeid perioodil 2005 - 2014. Tabelis 3.1 on välja toodud satelliitideltmõõdetud SARAH ja *in situ* kümne aasta kuu keskmised väärtused kuue jaama kohta.

Kuue vaatlusjaama keskmine summaarne kiirgus perioodil 2005 - 2014 on *in situ* andmetes 111,32 W/m<sup>2</sup> ja SARAH andmetes 107,25 W/m<sup>2</sup>. Pikaajalised statistilised näitajad jaamades on esitatud tabelis 3.2.

Summaarse kiirguse keskmised väärtused perioodil 2005 - 2014 on toodud joonisel 3.1.



Joonis 3.1 Summaarse kiirguse keskmised pikaajalised väärtused satelliidi ja *in situ* andmetest

Satelliitandmete SARAH põhjal esinevad suurimad väärtused Eesti lääne osas, Vilsandil ja Pärnu-Saugal. Samadel jaamadel on ka *in situ* mõõtmistes suurimad väärtused, kuid neile lisandub veel *in situ* andmetes Tartu-Tõravere jaam, mille pikaajaline keskmine on Vilsandiga peaaegu võrdne. Vaatlusjaamade keskmiste andmete põhjal on summaarse kiirguse väärtused kõrged Eesti läänerannikul ja saartel. Head tulemust näitab ka sisemaal asetsev Tartu-Tõravere jaam. Kui Tallinn-

Harku pikaajaline keskmine väärtus on *in situ* andmetes kuuest jaamast kõige väiksem, siis SARAHi väärtustes on väikseim pikaajaline keskmine Tiirikojal.

Tabeli 3.2 alusel on kuue jaama keskmine süstemaatiline kõrvalekalle (MBD)  $-4,06 \text{ W/m}^2$  ja MABD  $5,93 \text{ W/m}^2$ . Kõikides jaamades on MBD negatiivne, st SARAHi andmed alahindavad summaarse kiirguse väärtuseid.

Tabel 3.2 SARAHi ja *in situ* kuuandmete võrdlus perioodil 2005-2014.

Nr	Jaam	Kuude arv	SARAHi mean ( $\text{W/m}^2$ )	<i>In situ</i> mean ( $\text{W/m}^2$ )	MBD ( $\text{W/m}^2$ )	MABD ( $\text{W/m}^2$ )	RMSD ( $\text{W/m}^2$ )
1	Tõravere	120	107,31	113,38	-6,07	6,32	9,18
2	Tallinn-Harku	120	106,14	106,69	-0,51	6,07	9,05
3	Pärnu-Sauga	120	109,82	115,36	-5,54	6,60	10,76
4	Tiirikoja	120	104,24	109,55	-5,30	5,83	9,18
5	Vilsandi	115	110,43	113,48	-3,05	6,04	7,84
6	Narva-Jõesuu	120	105,56	109,46	-3,90	4,70	7,02
	keskmine		107,25	111,32	-4,06	5,93	8,84

Kõige väiksem keskmine süstemaatiline kõrvalekalle (MBD) esineb Tallinn-Harku jaamas väärtusega  $-0,51 \text{ W/m}^2$ , mille järgi võiks esialgu eeldada, et SARAHi andmed langevad häsi kokku *in situ* mõõdetutega. Samas on ruutkeskmise hälve (RMSD)  $9,05 \text{ W/m}^2$ . Nullilähedane keskmine kõrvalekalle (MBD) ja sellest suuresti erinev ruutkeskmine hälve (RMSD) näitab, et antud jaama väärtustes esineb palju satelliitandmete üle- ja alahindamisi võrreldes *in situ* mõõtmistega, mis keskmistamisel üksteist kompenseerivad.

Võrreldes pikaajalisi keskmisi SARAHi ja *in situ* andmetes, on Tartu-Tõravere ja Pärnu-Sauga jaamade andmetes suurimad erinevused, absoluutne keskmine kõrvalekalle (MABD) on vastavalt  $6,32 \text{ W/m}^2$  ja  $6,60 \text{ W/m}^2$ . Pikaajaliste keskmiste põhjal võib öelda, satelliitandmetega langevad kõige paremini kokku Vilsandi, Narva-Jõesuu ja Tallinn-Harku jaamade *in situ* andmed.

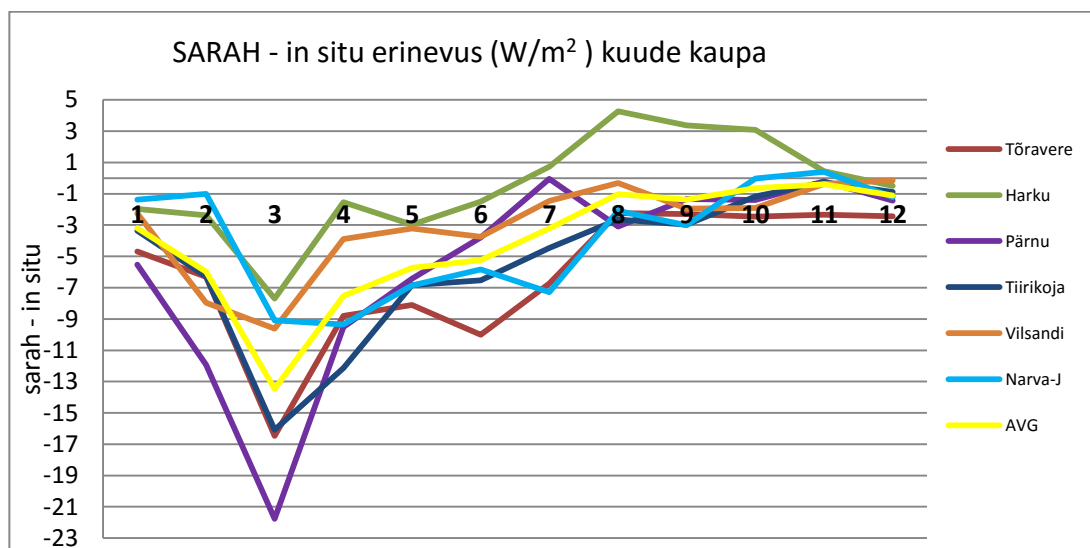


### 3.2 Pikaajaliste keskmiste võrdlus erinevatel kuudel

Eelnevalt võrreldi *in situ* ja satelliitandmeid üle 10 aasta keskmistatud väärtustega, kuid alljärgnevalt kirjeldatakse, missugused on kõrvalekalded erinevatel kuudel.

#### 3.2.1 Keskmise süstemaatiline kõrvalekalle

Joonisel 3.3 on toodud satelliitandmete SARAH ja *in situ* mõõtmiste summaarse kiirguse mitmeaastased keskmised kõrvalekalded (MBD) kuude kaupa. Viies jaamas on kõikidel kuudel MBD negatiivne, välja arvatud Tallinn-Harkus, kus juulist novembrini on MBD positiivne. Negatiivne MBD tähendab, et nendel kuudel on *in situ* summaarse kiirguse keskmised väärtused suuremad kui satelliitidelt mõõdetud.



Joonis 3.3. Summaarse kiirguse kahe andmerea mitmeaastased erinevused kuude kaupa

Satelliit alahindab summaarset kiirgust kõige rohkem märtsikuus kõigis kuues jaamas, kõige suurem negatiivne MBD on Pärnu-Saugal väärtusega  $-21,77 \text{ W/m}^2$ . Narva-Jõesuul on suured erinevused peale märtsikuu veel aprillist juulini (väärtused  $-9,35$  kuni  $-5,85 \text{ W/m}^2$ ). Tallinn-Harku jaama satelliitandmed on alahinnatud jaanuarist juunini ja detsembris, juulist novembrini on SARAH pikaajalised kiirgusandmed suuremad kui *in situ* mõõtmised.

Tartu-Tõravere esinevad suurimad keskmised kõrvalekalded satelliitide ja *in situ* andmetes märtsis ( $-16,48 \text{ W/m}^2$ ) ja juunis ( $-10,01 \text{ W/m}^2$ ). Pärnu-Saugal on suurimad MBD väärtused veebruaris ( $-11,92 \text{ W/m}^2$ ) ja märtsis ( $-21,77 \text{ W/m}^2$ ). Tiirikojal on suurimad MBD väärtused märtsis ( $-16,07 \text{ W/m}^2$ ) ja aprillis ( $-12,14 \text{ W/m}^2$ ). Ülejäänud kolmes jaamas, Narva-Jõesuu, Vilsandi, Tallinn-Harku, jäävad satelliitide ja *in situ* pikaajalised keskmised kõrvalekalded kõikidel kuudel  $\pm 10 \text{ W/m}^2$  piiresse.

### 3.2.2 Absoluutne keskmine kõrvalekalle

Et anda ülevaade, millistel kuudel olid satelliitandmete SARAH ja *in situ* andmete suurimad pikaajalised erinevused, arvutatakse absoluutse keskmise kõrvalekalde (MABD) väärtuste põhjal, mitmel protsendil kuudest ületavad MABD väärtused etteantud läve. Arvesse võetakse kõik kuud perioodil 2005 - 2014. Autor võttis aluseks GCOS (*Global Climate Observing System*) poolt satelliitandmete hindamisel etteantud MABD ülemise läve  $15 \text{ W/m}^2$  (Posselt *et al.*, 2011).

Leiti, et kuue jaama andmete põhjal ületavad absoluutse keskmise kõrvalekalde kuu väärtused  $15 \text{ W/m}^2$  3,5 – 12,5 % kuudest. Eraldi iga jaama kohta on nimetatud protsendid toodud tabelis 3.4.

Tabel 3.4 Keskmise absoluutse kõrvalekalde (MABD) esinemine üle  $15 \text{ W/m}^2$  erinevatel kuudel

Jaam	MABD väärtused $> 15 \text{ W/m}^2$ (%)
Tartu-Tõravere	8,3
Tallinn-Harku	8,3
Pärnu-Sauga	12,5
Tiirikoja	7,5
Vilsandi	3,5
Narva-Jõesuu	4,2

Kõige vähem esines MABD väärtuseid erinevatel kuudel üle läve Narva-Jõesuul ja Vilsandil vastavalt 4,2 % ja 3,5 % ning kõige suurem oli protsent Pärnu-Saugal väärtusega 12,5 %. See tähendab, et kõikides jaamades, v.a. Pärnu-Saugal, jäävad

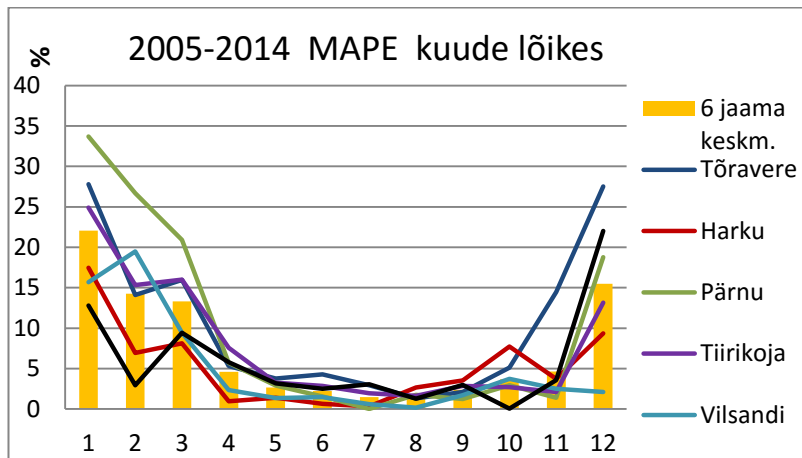
absoluutse keskmise kõrvalekalde väärtused vähemalt 90 % kuudest  $15 \text{ W/m}^2$  piiresse.

Kõikides jaamades olid MABD väärtused üle läve veebruaris, märtsis või aprillikuus. Uurides erinevaid aastaid, mil MABD väärtused olid üle  $15 \text{ W/m}^2$ , võib välja tuua veebruari - aprilli kohta aastad 2005, 2010 ja 2013. Kõigis 6 jaamas olid 2005. aasta veebruarist - märtsini MABD väärtused üle läve. Üheks põhjuseks võib olla, et selle aasta satelliidiandmed pärinevad I generatsiooni MVIRI instrumendi mõõtmistelt, alates 2006. aastast on andmed mõõdetud II generatsiooni SEVIRI instrumendiga. Ka 2010. ja 2013. aasta märtsi ja aprilli suured erinevused olid esinadatud kõigis kuues jaamas. Üheks põhjuseks võib olla, et 2013. aastal sulas lumikate pikaajalisest keskmisest kuu aega hiljem, aprilli keskpaigaks. 2010. aasta talv oli võrreldes teiste aastatega väga lumerohke, lumi sulas märtsi lõpus või aprilli alguses. Lumega ja lume sulamise perioodil on satelliitidelt kiirguse määramine CMSAF töögrupi sõnul raskendatud, sest summaarset kiirgust arvatav algoritm ei suuda korrektselt eristada lund ja pilvi.

Mõnes jaamas esines üksikuid MABD väärtusi üle  $15 \text{ W/m}^2$  ka suvekuudel. Näiteks Narva-Jõesuul 2007. juulis, Tiirikojal 2013. juunis, Tartu-Tõraveres juunis (2011, 2012, 2013), Pärnu-Saugal mais (2009, 2013), Tallinn-Harkus juunis (2011, 2013), juulis (2007, 2011) ja augustis (2007, 2011). Suured kõrvalekalded satelliitandmetes suvekuudel võivad olla põhjustatud pilvisusest (Posselt *et al.*, 2011

### **3.2.3 Keskmise suhteline viga**

Et iseloomustada, kui suur osakaal on kahe andmerea keskmisel kõrvalekaldel vaatlusjaamas mõõdetud väärtustest, on arvatud MAPE väärtused kuude kaupa. Võrreldes keskmise kõrvalekalde väärtustega aitavad MAPE väärtused paremini hinnata kahe andmerea kõrvalekallete osakaalu erinevatel kuudel: suvekuudel on summaarse kiirguse väärtused kordades suuremad kui talvekuudel. Joonisel 3.6 on välja toodud mitmeaastased MAPE väärtused kuues jaamas ja jaamade keskmine erinevatel kuudel.



Joonis 3.6 Mitmeaastased keskmised MAPE (%) väärtused kuude lõikes.

Joonis 3.6 kirjeldab kuue jaama keskmiseid MAPE väärtuseid erinevatel kuudel. Kuue jaama keskmine MAPE jääb alla 5 % aprillist kuni novembrini, kuid jaamati on jaotus erinev. MAPE väärtused on suurimad talvekuudel, Pärnu-Saugal jaanuaris 33,7 % ning Tartu-Tõraveres detsembris ja jaanuaris vastavalt 27,5 ja 27,8 %. Detsembrikuu MAPE väärtused on kordades erinevad Lääne-Eestis asuvate jaamade Pärnu-Sauga (18,8 %) ja Vilsandi (2,1 %) vahel. Võrreldes teiste jaamadega on MAPE väärtused veebruaris kordades väikseimad Narva-Jõesuul (2,9 %).

Suvekuudel (juunist - augustini) jäävad kõigis kuues jaamas MAPE väärtused alla 5 %. Suurim väärtus esineb juunikuus Tartu-Tõraveres, väärtusega 4,3 %.

MAPE väärtused aastaegade kaupa on toodud tabelis 3.7. Kolme suvekuu keskmine MAPE on üle 2 % Tartu-Tõraveres, Tiirikojal ja Narva-Jõesuul, teistes jääb see alla 2 %. Kevadkuudel (märtsist – maini) on keskmine MAPE väikseim Tallinn-Harkus, kus esinesid ka väikseimad keskmise kõrvalekalde (MBD) väärtused nimetatud kuudel.

Tabel 3.7. MAPE väärtused (%) aastaegade kaupa

MAPE (%)	Tartu-Tõravere	Tallinn-Harku	Pärnu-Sauga	Tiirikoja	Vilsandi	Narva-Jõesuu
DJV	23,1	11,2	26,4	17,8	12,4	12,6
MAM	8,3	3,5	9,8	8,9	4,4*	6,1
JJA	2,8	1,2	1,1	2,1	0,8*	2,3
SON	7,2	5,0	1,8	2,5	2,6	2,2

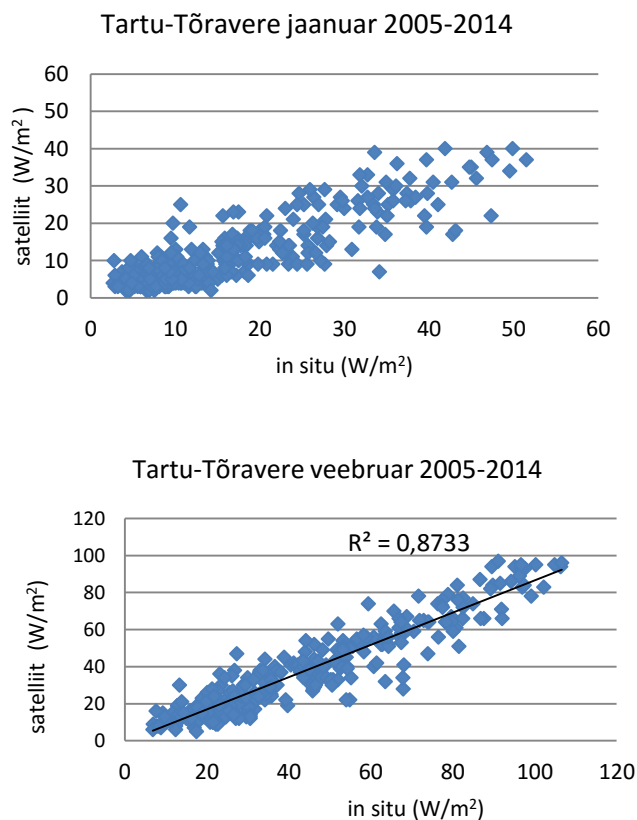
\* Kuuandmetes esineb 1-2 puuduvat kuud

Talvekuudel, kui Päikese kõrgus on Eesti laiuskraadil madal ja esinevad suurimad keskmised kõrvalekalded *in situ* ja satelliitandmete vahel, on satelliitidelt summaarse kiirguse hindamine problemaatiline [Riihela, *et al*, 2014].

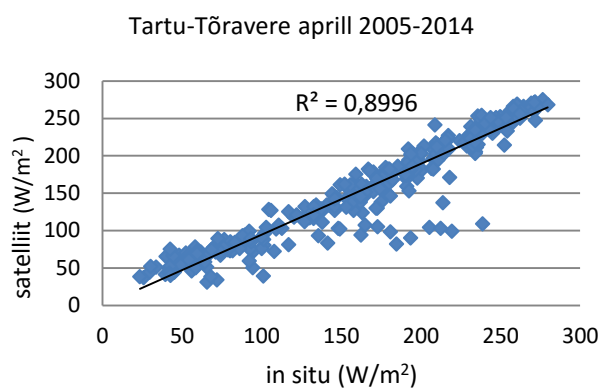
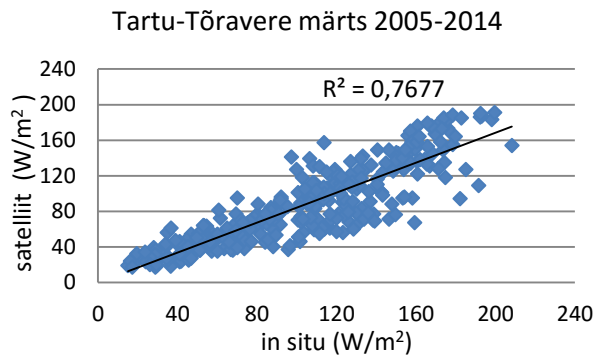
### 3.3 Hajuvusdiagrammid päevakeskmiste põhjal

Antud alapeatükis on kasutatud päevakeskmiseid andmeid ja leitud satelliitandmete ja *in situ* mõõtmiste vahelised hajuvusdiagrammid ja korrelatsioonikoefitsiendid kuude kaupa kuues jaamas.

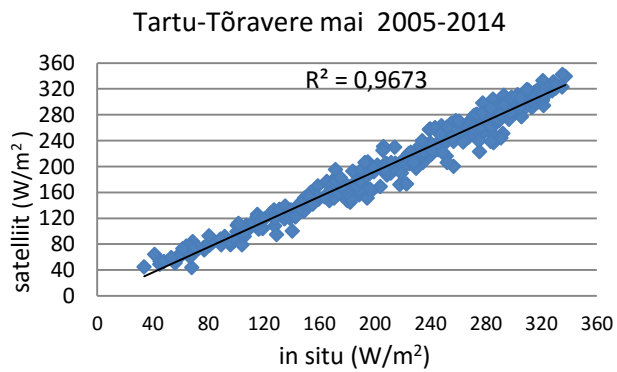
Hajuvusdiagrammidel asetsevad x-teljel *in situ* mõõtmised ja y-teljel satelliitmõõtmised. Alljärgnevalt on ära toodud Tartu-Tõravere hajuvusdiagrammid (joonised 3.8 – 3.13) erinevatel kuudel, teiste jaamade hajuvusdiagrammid on toodud lisades 1 – 5.

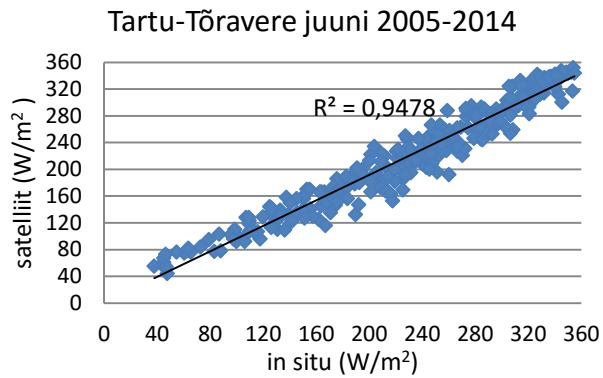


Joonis 3.8 Tartu-Tõravere pikaajalised päevakeskmiste hajuvusdiagrammid jaanuaris ja veebruaris

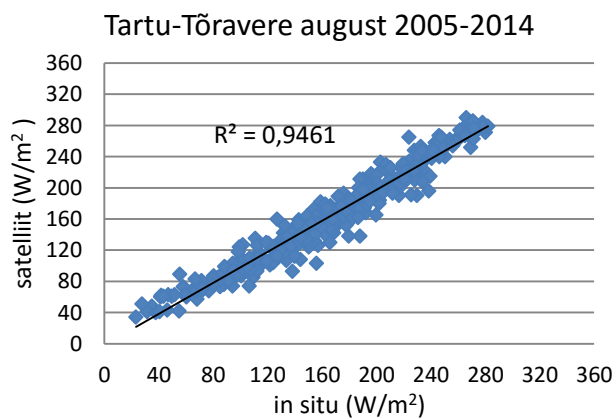
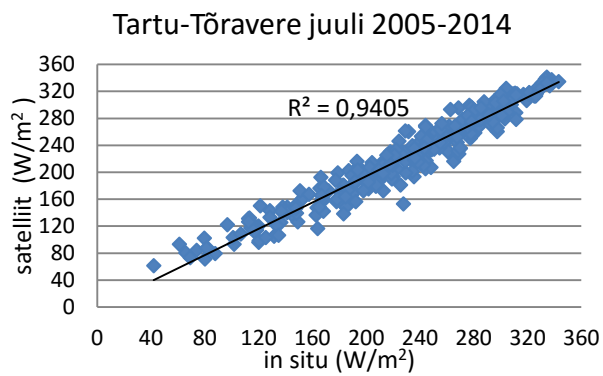


Joonis 3.9 Tartu-Tõravere pikaajalised päevakeskmiste hajuvusdiagrammid märtsis ja aprillis

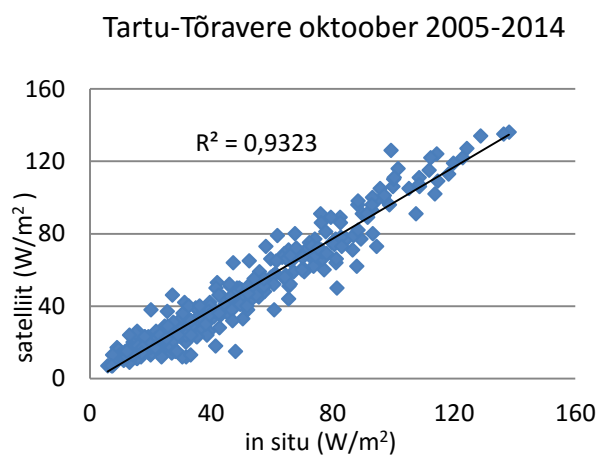
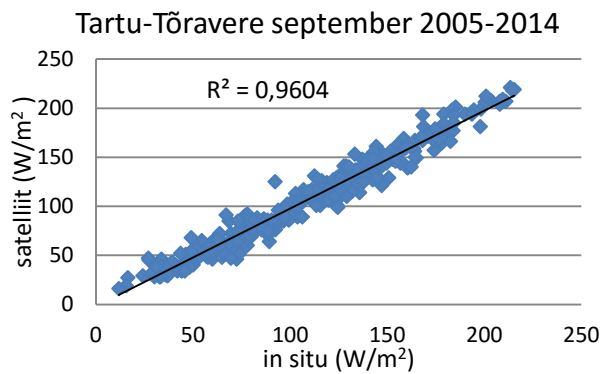




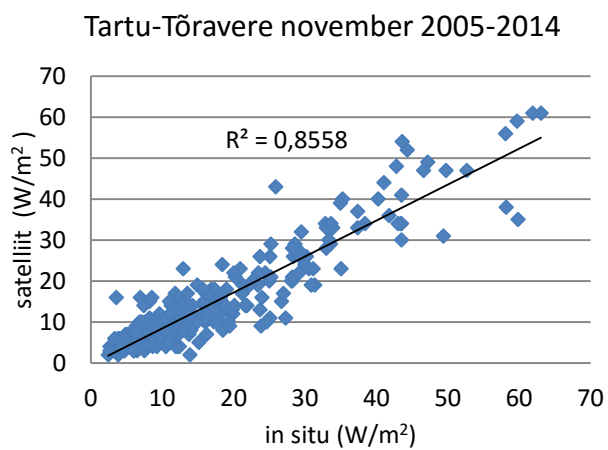
Joonis 3.10 Tartu-Tõravere pikaajalised päevakeskmiste hajuvusdiagrammid mais ja juunis



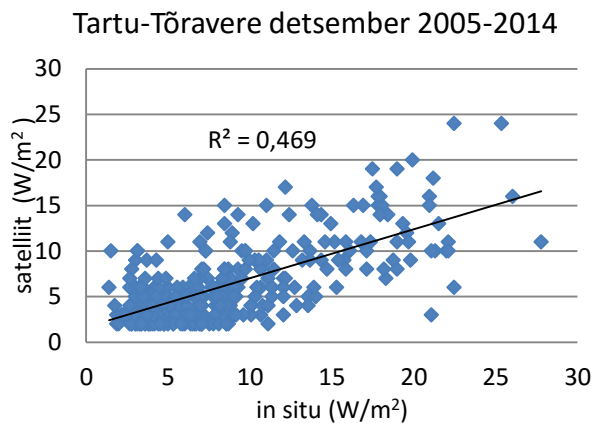
Joonis 3.11 Tartu-Tõravere pikaajalised päevakeskmiste hajuvusdiagrammid juulis ja augustis



Joonis 3.12 Tartu-Tõravere pikaajalised päevakeskmiste hajuvusdiagrammid septembris ja oktoobris







Joonis 3.13 Tartu-Tõravere pikaajalised päevakeskmiste hajuvusdiagrammid novembris ja detsembris

Kõigi kuue jaama korrelatsiooni koefitsiendid on üle 0,9 aprillist kuni oktoobrini, v.a. Pärnu-Sauga ja Tiirikoja aprillikuud, kus koefitsiendid on vastavalt 0,89 ja 0,86.

Erinevate kuude korrelatsioonikoefitsiente võrreldes selgub, et üle kogu territooriumi korreleeruvad pikaajalised päeva keskmised kõige paremini maikuus. Siis esinevad Tartu-Tõraveres ja Vilsandil suurimad väärtused (0,97). Kõige väiksemad korrelatsioonikoefitsiendid esinevad kõigis jaamades detsembrikuus, Narva-Jõesuus esineb sel kuul ka kõige väiksem väärtus 0,22.

Märtsikuus, kui kuu keskmiste põhjal SARAH ja *in situ* andmetes esinesid suurimad kõrvalekalded, on päevakeskmiste korrelatsioonikoefitsiendid Narva-Jõesuus 0,88 ja Tartu-Tõraveres 0,77, kõige väiksem koefitsient on märtsis Pärnu-Saugal 0,71.

Kokkuvõttes võib öelda, et satelliitandmed SARAH on *in situ* andmetega hästi võrreldavad kui koefitsient on üle 0,9. Seega aprillist oktoobrini Tartu-Tõraveres, Tallinn-Harkus, Vilsandis ja Narva-Jõesuus. Maikuust kuni oktoobrini Pärnu-Saugal ja Tiirikojal.

### 3.4 Järeldused

Käesolevas töös on hinnatud satelliitide poolt mõõdetud SARAH ja *in situ* pikaajalisi keskmiseid väärtuseid.

Klimatoloogilise eesmärgiga võrreldi pikaajalisi keskmiseid väärtuseid ning leiti, et SARAH andmed alahindavad kõigis kuues uuritavas jaamas *in situ* mõõdetud väärtuseid. Pikaajaliste kuu keskmiste põhjal langesid SARAH ja *in situ* andmed kõige paremini kokku Tallinn-Harkus, kuid selles jaamas hindas satelliit summaarset kiirgust võrreldes *in situ* mõõtmistega sageli üle ja alla, mis keskmistamisel andsid keskmisele kõrvalekaldele (MBD) nullilähedase väärtuse.

Kuu keskmiste andmete hindamisel leiti, et kõikidel kuudel on SARAH andmed alahinnatud, välja arvatud Tallinn-Harkus. Nimetatud jaamas olid juulist kuni novembrini satelliitandmed võrreldes *in situ* mõõtmistega ülehinnatud.

Kuu keskmiste satelliitandmete ja *in situ* andmete võrdlemisel esinesid suurimad kõrvalekalded kõigis kuues jaamas märtsikuus, suurim erinevus antud kuul oli Pärnu-Saugal ligikaudu - 22 W/m<sup>2</sup> ja väikseim Tallinn-Harkus väärtusega - 7,7 W/m<sup>2</sup>. Suvekuudel (juuni - august) esines suurim kõrvalekalle juunis Tartu-Tõravere jaamas väärtusega - 10 W/m<sup>2</sup>. Kõigis kuues jaamas esinesid väiksemad kõrvalekalded juulist kuni detsembrini.

Absoluutse keskmise kõrvalekalde (MABD) väärtustele seati ülemine lävi 15 W/m<sup>2</sup> ja arvatati, kui suur protsent kuudest ületab selle. Tulemusteks saadi, et kõikides jaamades, v.a. Pärnu-Saugal, jäävad absoluutse keskmise kõrvalekalde väärtused vähemalt 90 % kuudest 15 W/m<sup>2</sup> piiresse. Suurimad MABD väärtused esinesid veebruaris, märtsis või aprillis, kui lumi katab maapinda või on sulamas. Märtsis ja aprillis võib selle põhjuseks olla satelliitandmeid arvutava algoritmi ebatäpsus. Nimetatud kuudel, kui lumi on veel maas või hakkab sulama ja samal ajal päikesekiirguse hulk hakkab suurenema (Päike on kõrgemal ja pilvisus on väiksem), summaarse kiirguse algoritm määrab ebatäpselt lume pilvedeks ja annab aluspinnale jõudnud summaarsele kiirgusele väiksemad väärtused.

Keskmine suhteline viga (MAPE) oli kõikides jaamades jaanuaris (12,8 – 33,7 %), va Narva-Jõesuu ja Tartu-Tõravere. Narva-Jõesuul oli MAPE väärtus suurim detsembris väärtusega 22 %. Tartu-Tõraveres olid suured MAPE väärtused peale jaanuari veel detsembris (27,5%) ja märtsis (15,9%). Nimetatud kuudel on nendes

jaamades keskmine suhteline viga suurim ja seega satelliitidelt summaarse kiirguse hindamine raskendatud.

Pikaajaliste päeva keskmiste korrelatsioonikoefitsientide põhjal võib öelda, et satelliitandmed SARAH on *in situ* andmetega hästi võrreldavad aprillist oktoobrini Tartu-Tõraveres, Tallinn-Harkus, Vilsandis ja Narva-Jõesuus ning maikuust kuni oktoobrini Pärnu-Saugal ja Tiirikojal.

## KOKKUVÕTE

Töö eesmärgiks oli hinnata satelliitidelt mõõdetud ja *in situ* summaarse kiirguse andmete täpsust Eesti alade jaoks. Selleks võrreldi Eesti kuue vaatlusjaama kiirguse andmeid perioodil 2005 – 2014.

Käesolevas töös on kasutatud Euroopa meteoroloogiliste satelliitide mõõdetud andmeid, millest EUMETSAT organisatsiooni alla kuuluv võrgustik CMSAF on genereerinud kvaliteetsed ja homogeniseeritud summaarse kiirguse kliimaandmerekad.

Eesti vaatlusjaamades on kasutatud Tartu-Tõravere, Tallinn-Harku, Pärnu-Sauga, Tiirikoja ja Narva-Jõesuu *in situ* mõõtmisandmeid.

Uuritavate andmete analüüs on esmalt teostatud kuu keskmiste summaarse kiirguse väärtuste (ühik  $W/m^2$ ) järgi, millest arutati järgmised statistilised näitajad: keskmine süstemaatiline kõrvalekalle, keskmine absoluutne kõrvalekalle, ruutkeskmine hälve, keskmine suhteline viga. Päeva keskmiste väärtuste põhjal koostati hajuvusdiagrammid ja arutati korrelatsioonikoeffitsiendid kõigi kuue jaama kohta kuude kaupa.

Pikaajaliste *in situ* ja satelliitandmete SARAH võrdluses leiti, et satelliitandmed annavad kõigis jaamades väiksemaid väärtusi. Kõrvalekalded olid vähimad Tallinn-Harku, Vilsandi ja Narva-Jõesuu jaamades.

Perioodi 2005 – 2014 absoluutse keskmise kõrvalekalde kuu väärtustest selgus, et kõikides jaamades, v.a. Pärnu-Saugal, jäävad need vähemalt 90 % kuudest  $15 W/m^2$  piiresse (GCOS ette antud ülemine lävi satelliitandmete hindamisel). SARAH summaarse kiirguse andmed rahuldavad GCOS etteantud tingimusi kiirguse hindamisel Eesti vaatlusjaamade kohta.

Suurimad keskmised kõrvalekalded esinesid kõikides jaamades veebruaris, märtsis või aprillis, seega kuudel, mil lumi katab maad või on sulamas. Keskmine suhteline viga oli suur samuti talvekuudel, kui keskmise kõrvalekalde osakaalu protsendid kuu väärtustest olid suurimad. Tartu-Tõraveres ja Pärnu-Saugal

moodustasid keskmised erinevused talvekuude väärtustest üle 20 %. Selle põhjal võib väita, et talvekuudel on satelliitandmete hindamine kõige problemaatilisem.

Suvekuudel, mil summaarse kiirguse väärtused on kordades suuremad kui talvekuudel, jäävad keskmise erinevuse osakaalud kuu väärtustest alla 5 % ja kiirguse hindamine satelliitidelt võimalik väiksemate vigadega.

Pikaajaliste päevakeskmiste korrelatsiooni koefitsientide põhjal võib öelda, et satelliitandmed SARAH on *in situ* andmetega hästi võrreldavad aprillist oktoobrini Tartu-Tõraveres, Tallinn-Harkus, Vilsandis ja Narva-Jõesuus ning maikuust kuni oktoobrini Pärnu-Saugal ja Tiirikojal. Nendel kuudel esinevad korrelatsiooni koefitsiendi väärtused üle 0,9.

## KASUTATUD ALLIKATE LOETELU

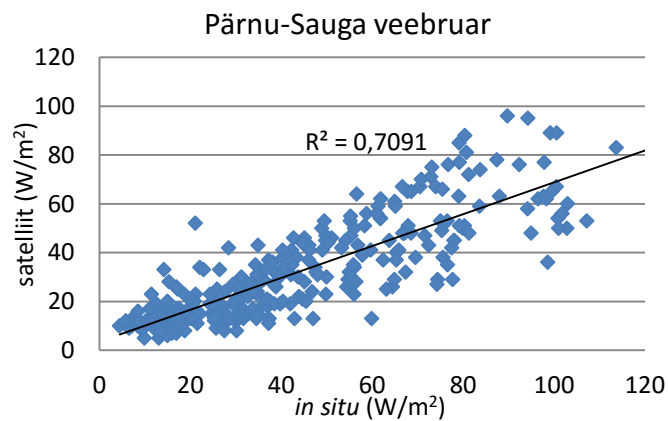
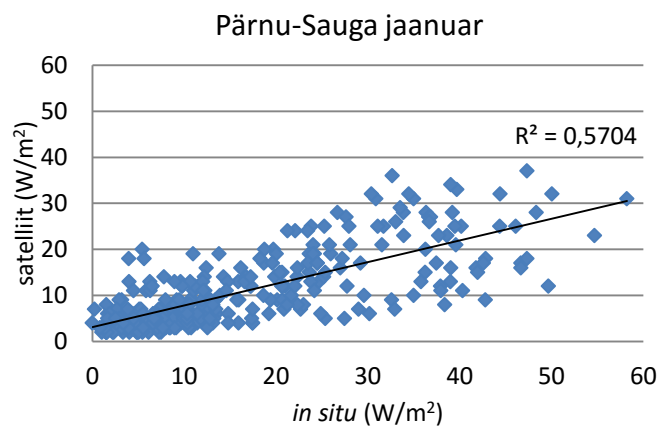
- Amillo, A. C., Huld, T., Müller, R. 2014. *A New Database of Global and Direct Solar Radiation Using the Eastern Meteosat Satellite, Models and Validation*. Remote Sensing, 6, 8165-8189
- Hakuba, M. Z., Folini, D., Schaepman-Strub, G., Wild, M. 2014. *Solar absorption over Europe from collocated surface and satellite observations*. Geophysical Research Atmospheres, 119, 3420–3437
- Journee, M., Stöckli, R., and Bertrand, C. 2011. *Sensitivity to spatio-temporal resolution of satellite-derived daily surface solar irradiation*. Remote Sensing Letters, 3:4, 315-324
- Kallis, A., Loodla, K., Tillmann, E., Krabbi, M., Pärn, R., Vint, K., Jõeveer, A., Juust, E. 2014. *Eesti Meteoroloogia aastaraamat 2014*, Keskkonnaagentuur, www.ilmateenistus.ee, 24.03.2016
- Keevallik, S. and Kärner, O. 1999. *Surface insolation from AVHRR data by means of a three-dimensional histogram separation*. Adv. Space Res., 24, No 7, 963-966
- Kipp & Zonen. 2015. *Instruction Manual CMP Series Pyranometer - Manual* Version: 1501, [www.kippzonen.com](http://www.kippzonen.com), 24.03.2016.
- Kipp & Zonen. 2004. *Instruction Manual CM21 - Manual* Version: 1004, [www.kippzonen.com](http://www.kippzonen.com), 24.03.2016.
- Kipp & Zonen. 2000. *Instruction Manual CM11 pyranometer and CM14 albedometer*. Manual Version: 0806, [www.kippzonen.com](http://www.kippzonen.com), 24.03.2016.
- König-Langlo, G., Sieger, R., Schmithüsen, H., Bücken, A., Richter, F., Dutton, E. G. 2013. *The Baseline Surface Radiation Network and its World Radiation Monitoring Centre at the Alfred Wegener Institute*. WCRP Report, 24, 10-12
- Mayer, B. and Kylling, A. 2005. *Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use*. Atmospheric Chemistry and Physics, European Geosciences Union, 5 (7), 1855-1877
- Müller, R. and Träger-Chatterjee, C. 2014. *Brief Accuracy Assessment of Aerosol Climatologies for the solar surface radiation*. Atmosphere, 5, 959-972
- Müller, R., Pfeifroth, U., Träger-Chatterjee, C., Trentmann, J., Cremer, R. 2015. *Digging the Meteosat Treasure — 3 Decades of Solar Surface Radiation*. Remote Sensing Letters, 7, 8067-8101
- Posselt, R., Mueller, R., Stöckli, R., Trentmann, J. 2011. *Spatial and Temporal Homogeneity of Solar Surface Irradiance across Satellite Generations*. Remote Sensing Letters, 3, 1029-1046

- Posselt, R., Müller, R., Trentmann, J., Stockli, R., Liniger, M.A. 2014. *A surface radiation climatology across two Meteosat satellite generations*. Remote Sensing of Environment, 142, 103–110
- Riihelä, A., Carlund, T., Trentmann, J., Müller, R., Lindfors, V. A. 2015. *Validation of CM SAF surface solar radiation datasets over Finland and Sweden*. Remote Sens. 7(6), 6663-6682
- Rosin, K., 2012. *Solar Radiation and Wind as Agents of the Formation of the Radiation Regime in Water Bodies*. Tallinn Univ. Technol. TUT Press.
- Russak, V. ja Kallis A. 2003 *Eesti kiirguskliima teadmik*, Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut, Tallinn, 25-36, 216-220
- Russak, V. 2005. *Eesti kiirguskliima*, kogumikust Universum valguses ja vihmast, koostajad Veismann U. ja Veskimäe R., Tallinn, 118-124
- Schmetz, J., Pili, P., Tjemkes, S., Just, D., Kerkmann, J., Rota, S., Ratier, A. 2002. *An introduction to Meteosat second generation (MSG)*. Bulletin of the American Meteorological Society, 83,7. 977-992
- Sanchez-Lorenzo, A., Wild, M., Trentmann, J. 2013. *Validation and stability assessment of the monthly mean CM SAF surface solar radiation dataset over Europe against a homogenized surface dataset (1983–2005)*. Remote Sensing of Environment, 134, 355–366
- Trentmann, J., Träger-Chatterjee, C., Müller, R. 2014. *Product user manual - Meteosat Solar Surface Irradiance and effective Cloud Albedo Climate Data records*. Version: 1.1, www.cmsaf.eu, 24.03.2016.
- Vernay, C., Pitaval, S., Blanc, P. 2013. *Review of satellite-based surface solar irradiation databases for the engineering, the financing and the operating of photovoltaic systems*. ISES Solar World Congress, Nov 2013, Cancun, Mexico
- Wang, K., Dickinson, E. R., Ma, Q., Augustine, A. J., Wild, M. 2012. *Measurement Methods Affect the Observed Global Dimming and Brightening*. Journal of Climate, American Meteorological Society, 26, 2012, 4112-4120
- WMO *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. 2008. WMO-No. 8. Geneva.

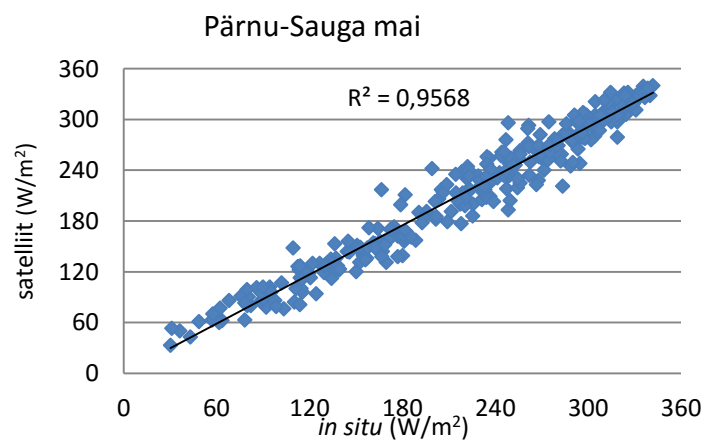
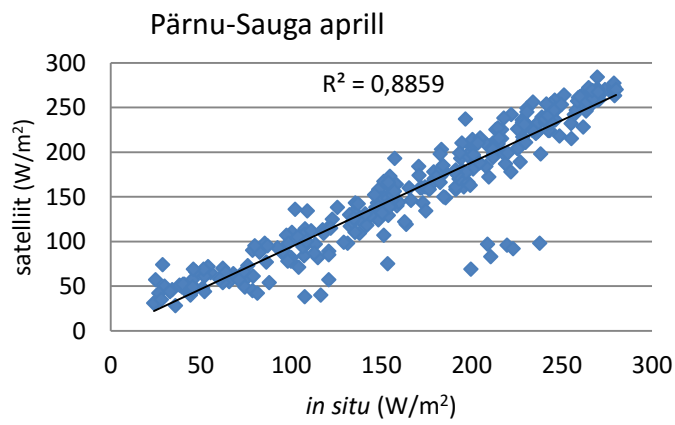
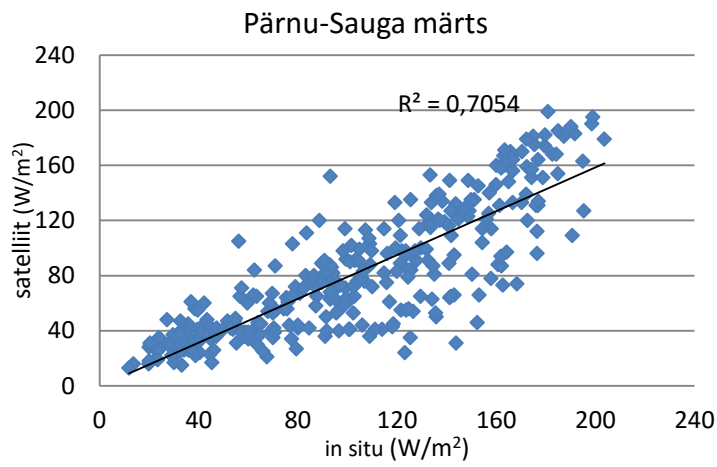
## LISAD

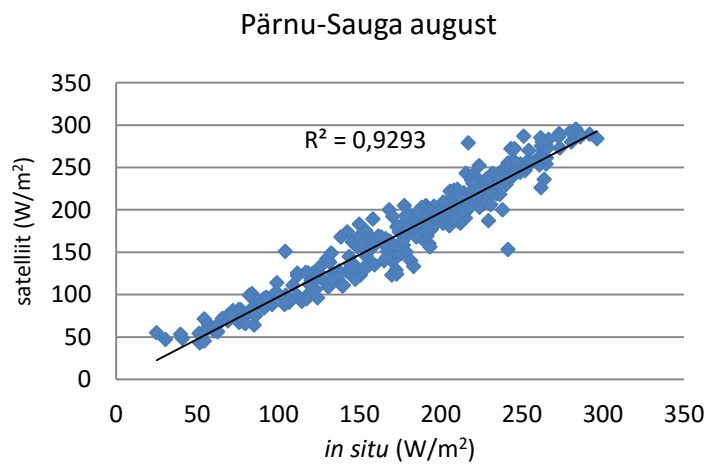
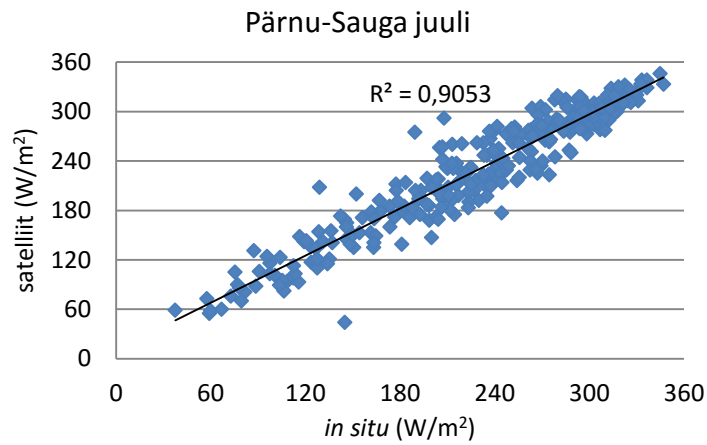
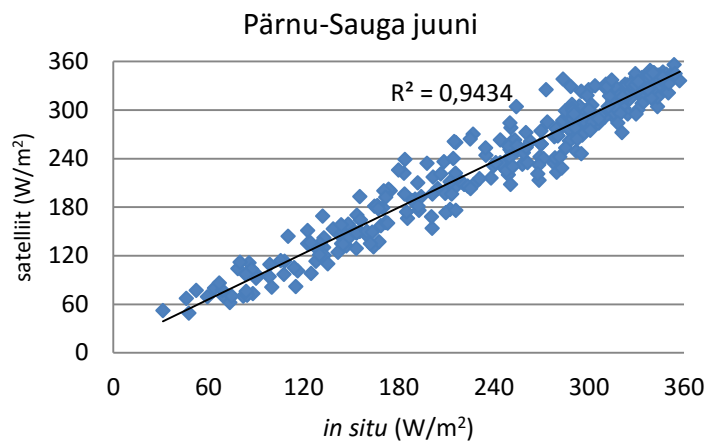
### Lisa 1. Pärnu-Sauga summaarse kiirguse hajuvusdiagrammid kuude kaupa perioodil 2005 - 2014.

Hajuvusdiagrammid on koostatud päevakeskmiste väärtuste põhjal; x-teljel on in situ ja y-teljel satelliitandmed.

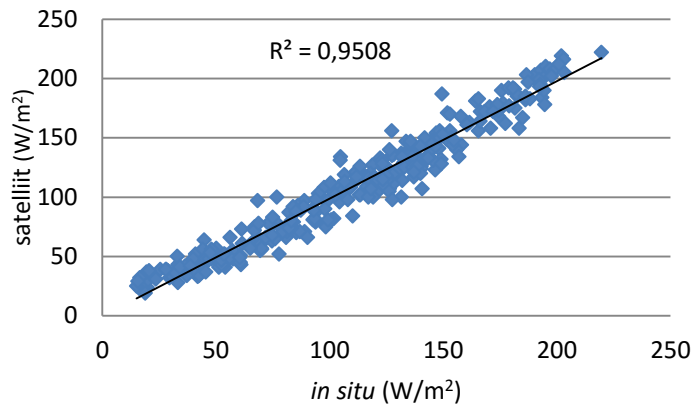




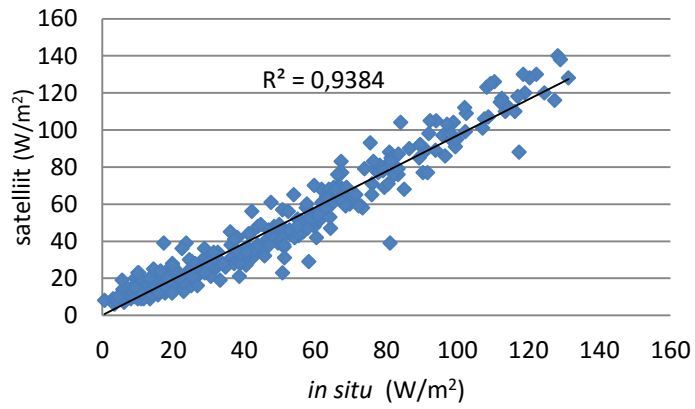




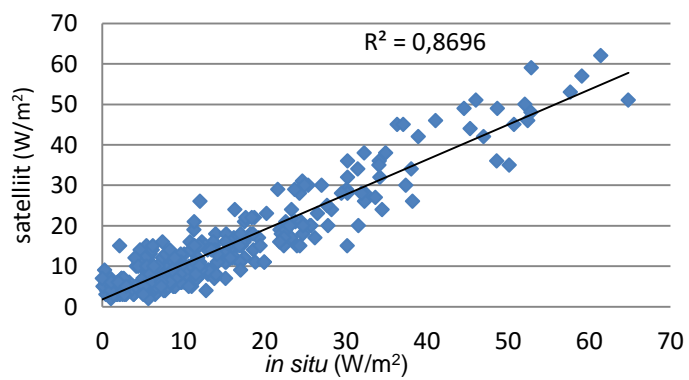
Pärnu-Sauga september

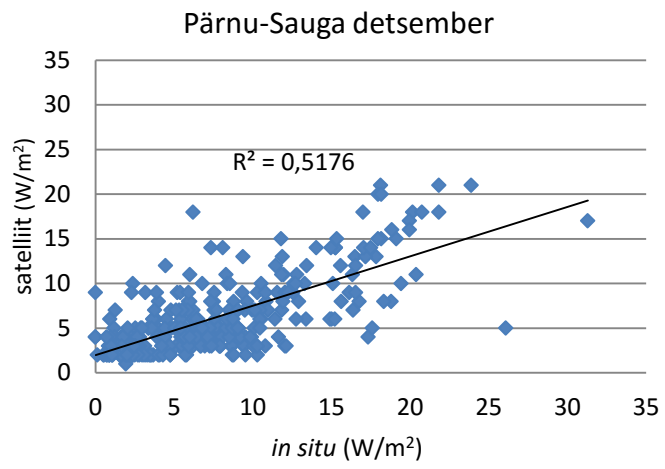


Pärnu-Sauga oktoober



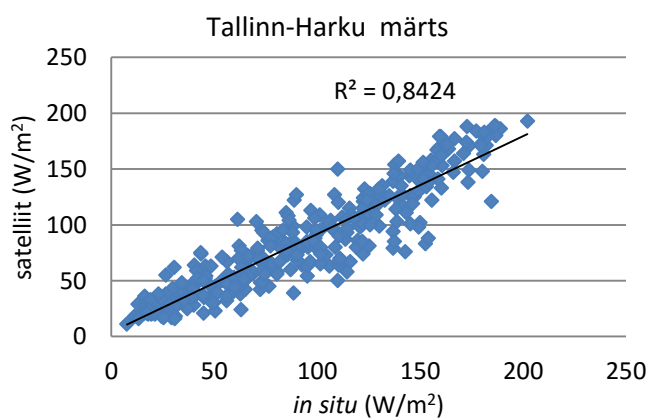
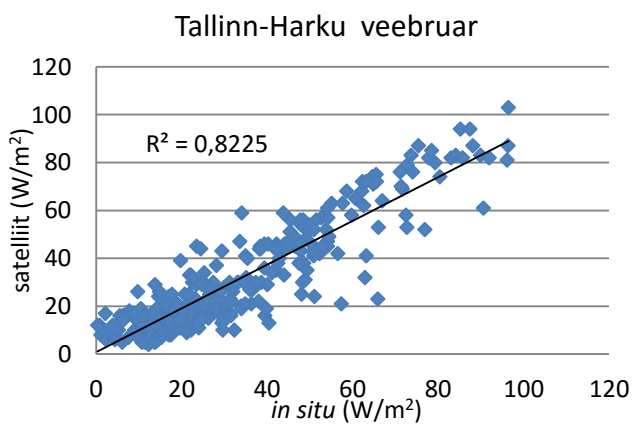
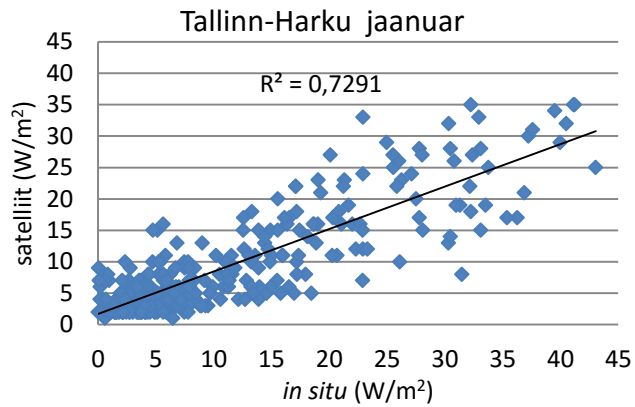
Pärnu-Sauga november

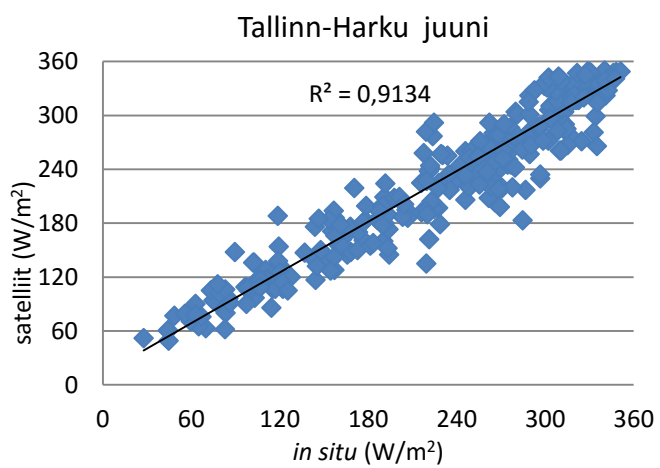
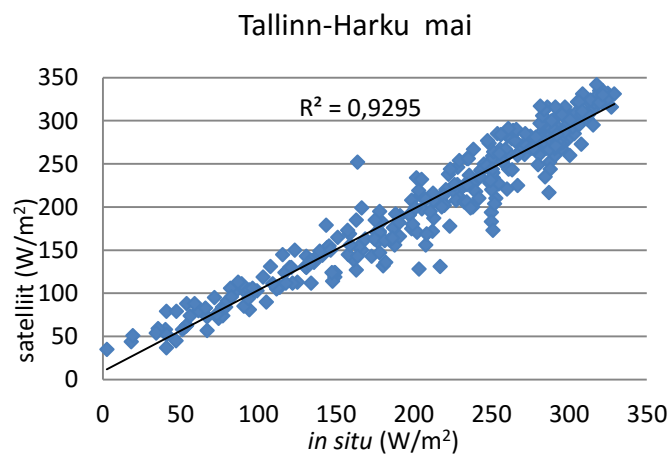
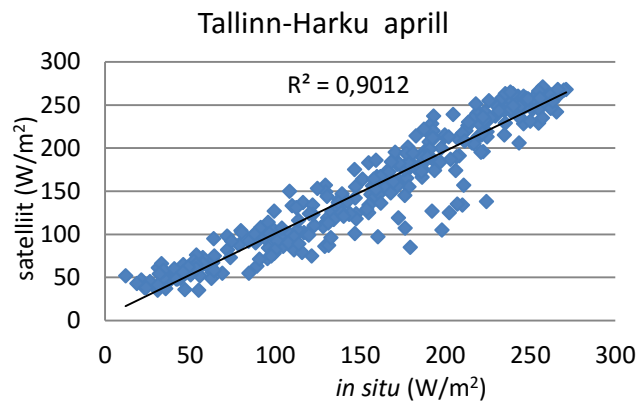


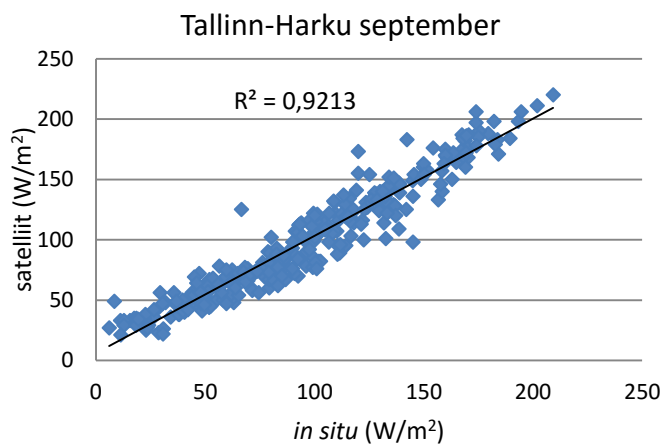
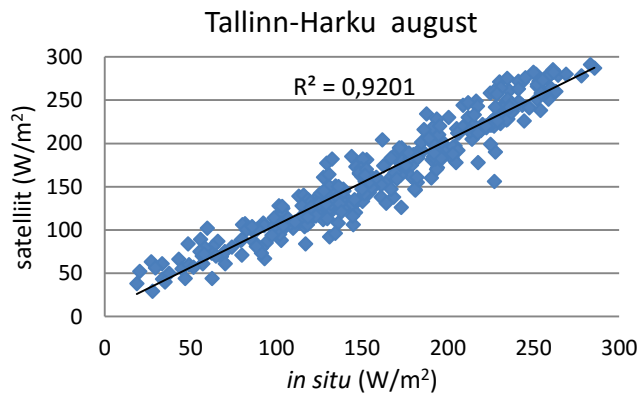
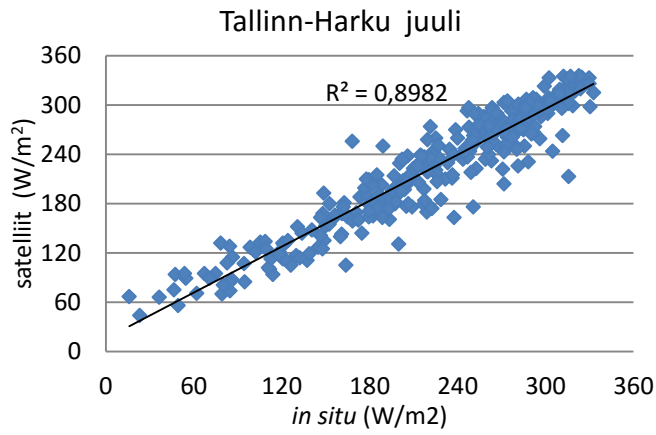


**Lisa 2. Tallinn-Harku summaarse kiirguse hajuvusdiagrammid kuude kaupa perioodil 2005 - 2014.**

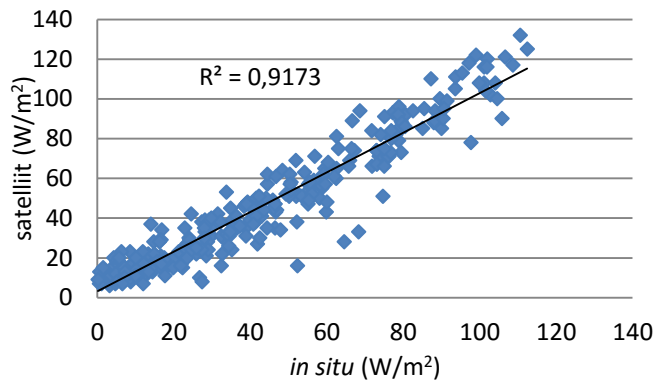
Hajuvusdiagrammid on koostatud päevakeskmiste väärtuste põhjal; x-teljel on *in situ* ja y-teljel satelliitandmed.



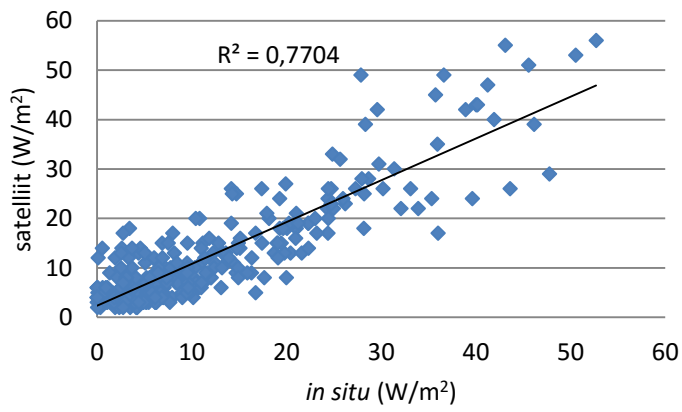




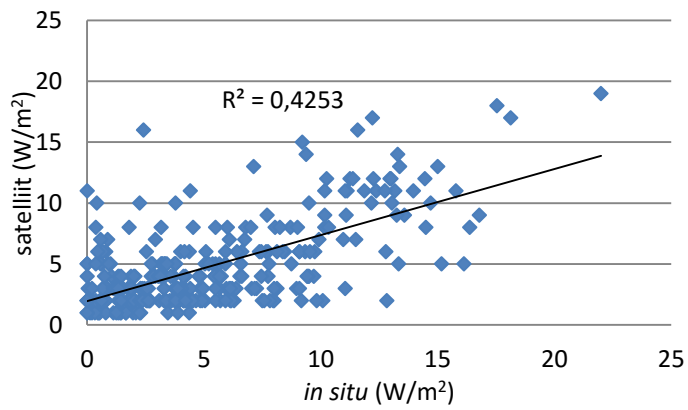
Tallinn-Harku oktoober



Tallinn-Harku november



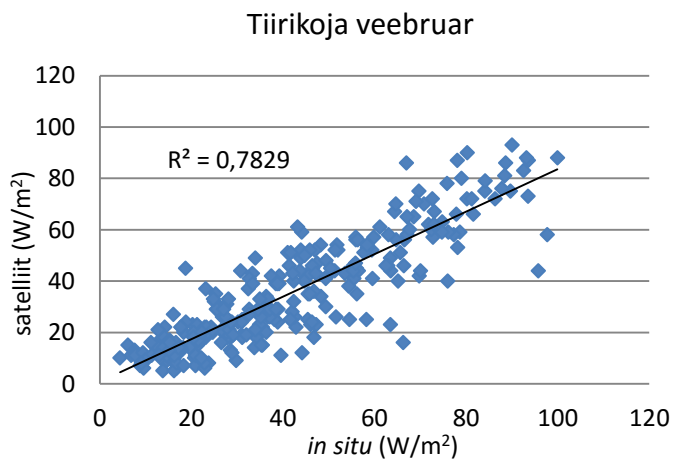
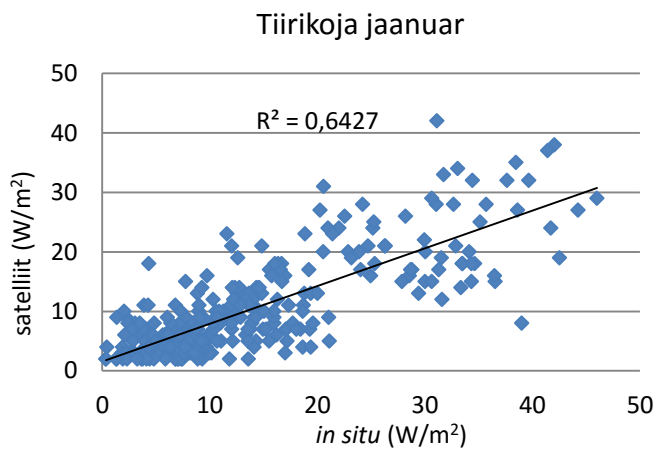
Tallinn-Harku detsember

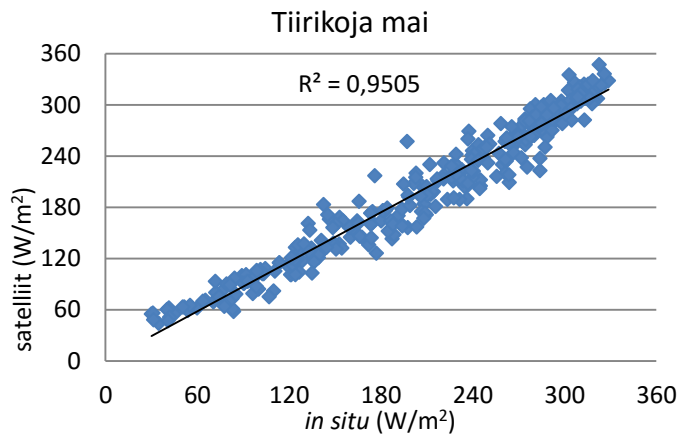
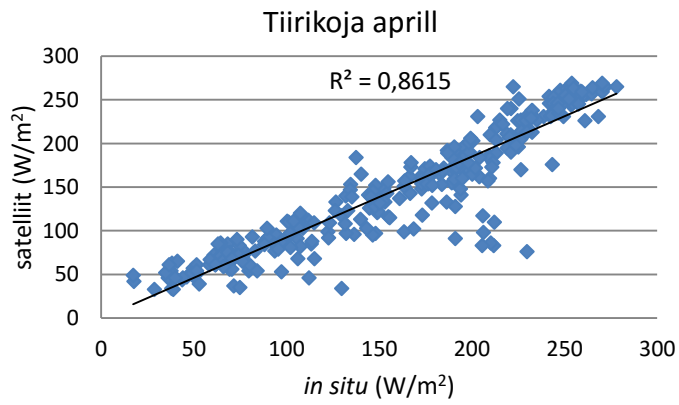
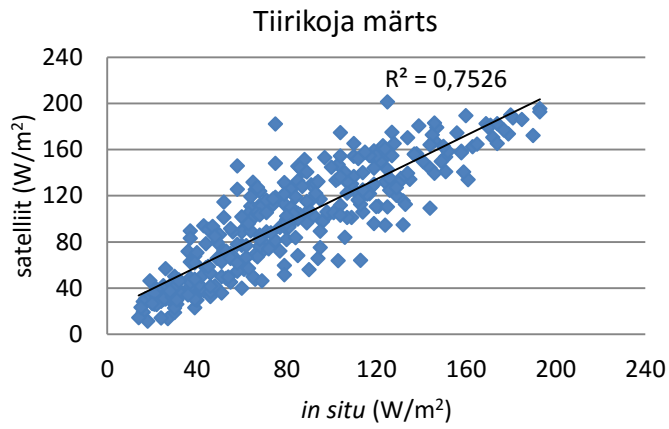


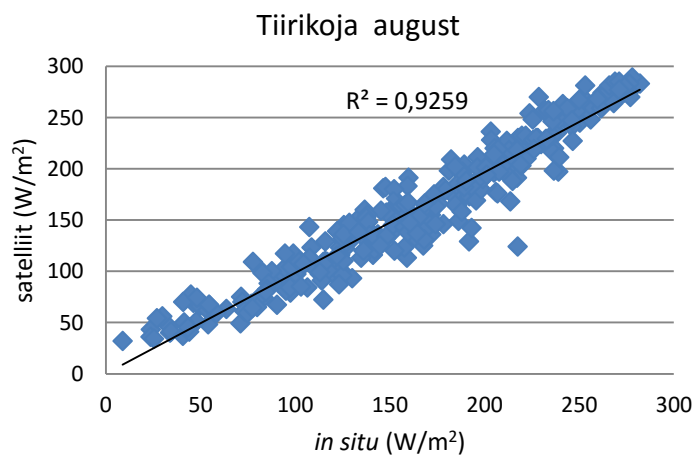
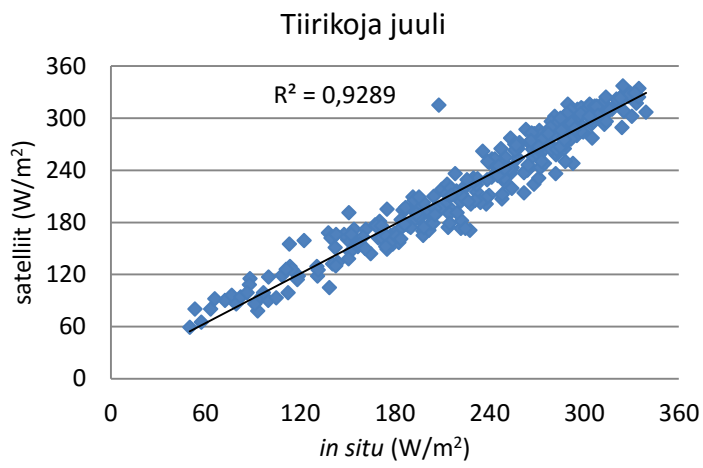
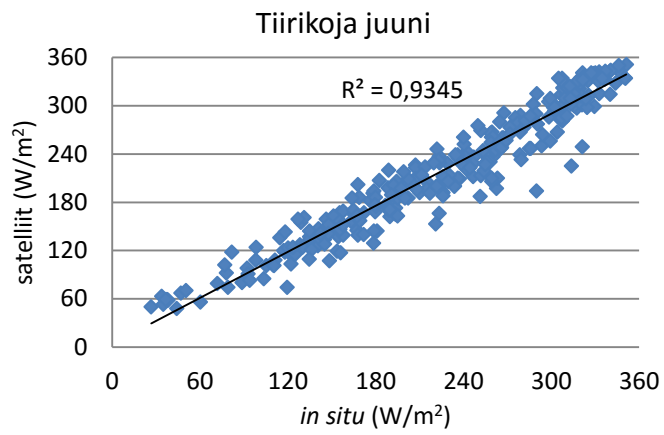


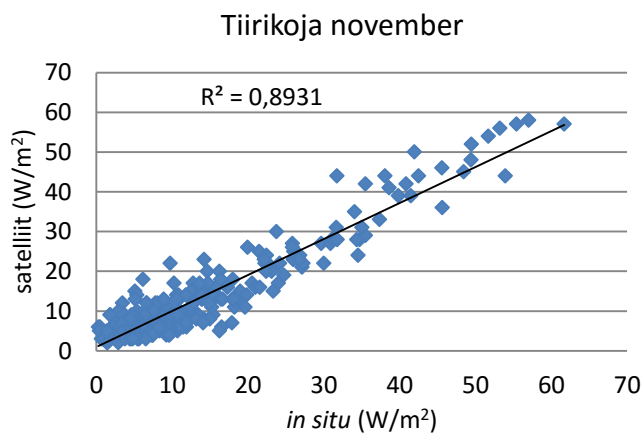
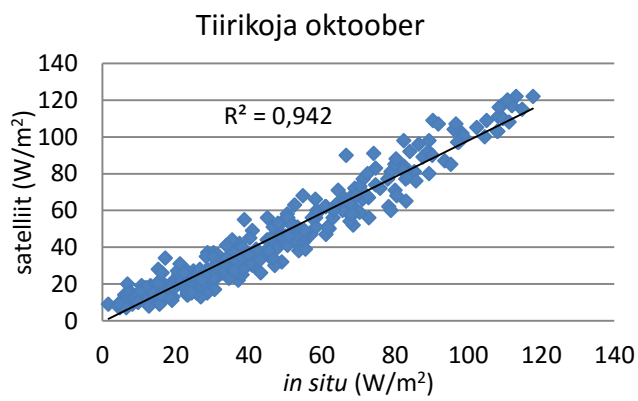
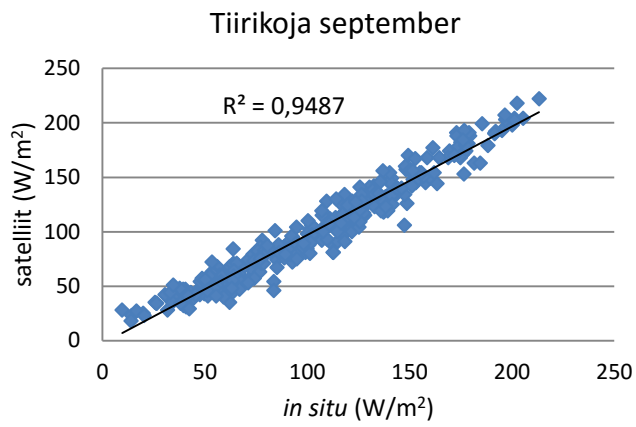
**Lisa 3. Tiirikoja summaarse kiirguse hajuvusdiagrammid kuude kaupa perioodil 2005 - 2014.**

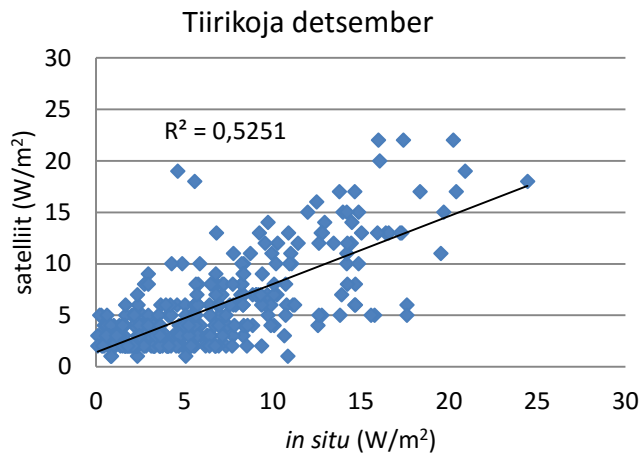
Hajuvusdiagrammid on koostatud päevakeskmiste väärtuste põhjal; x-teljel on *in situ* ja y-teljel satelliitandmed.





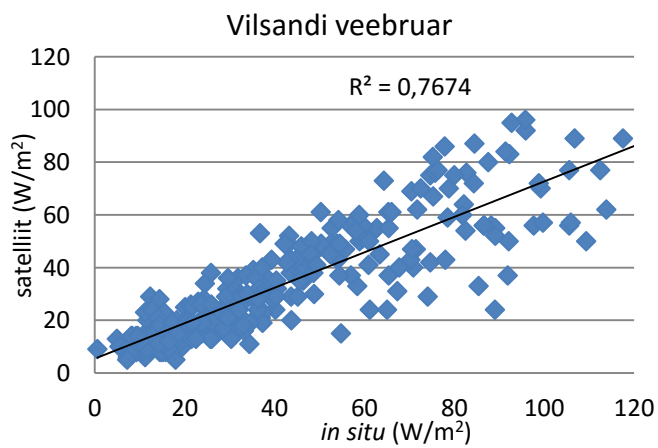
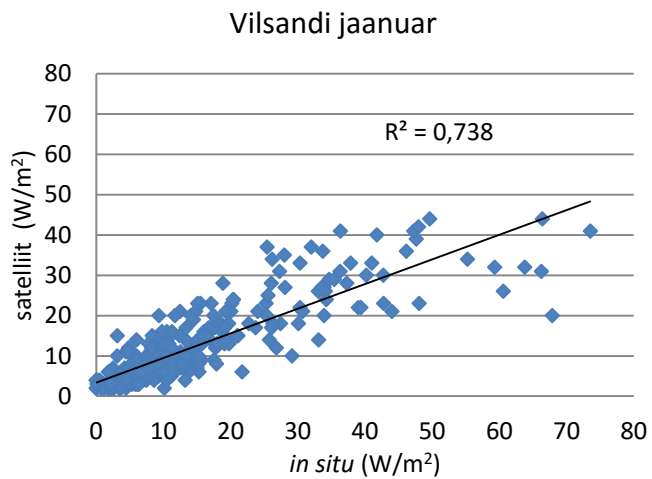


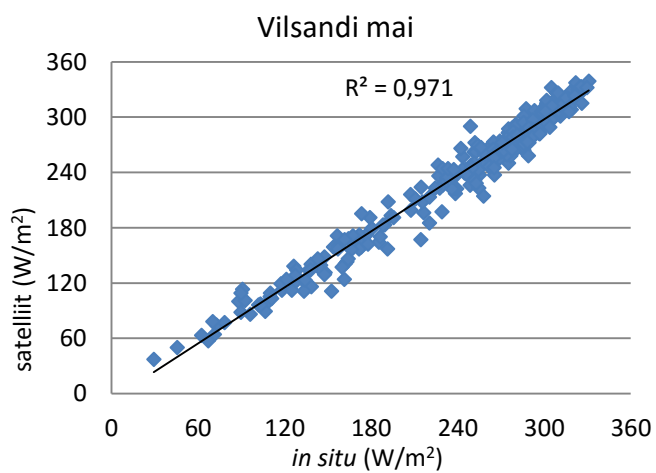
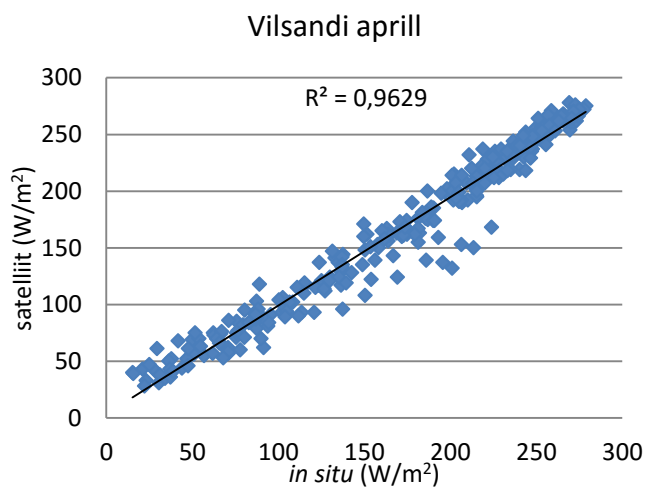
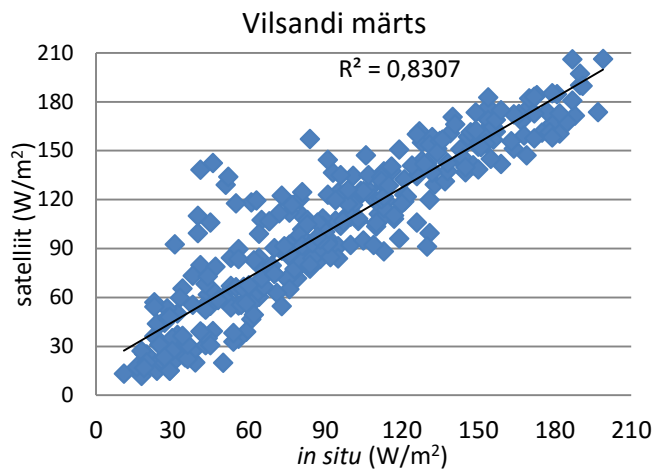


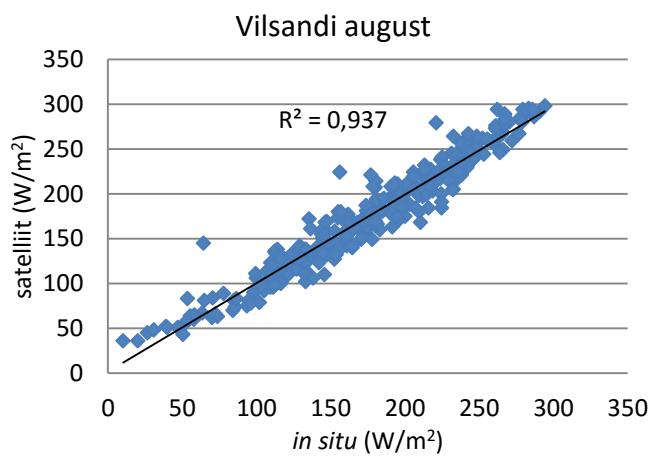
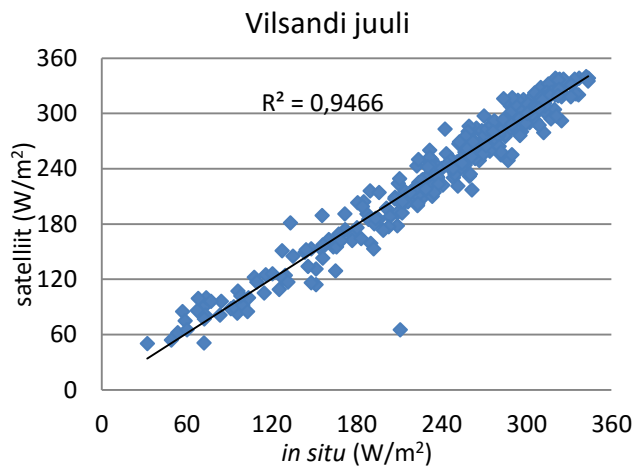
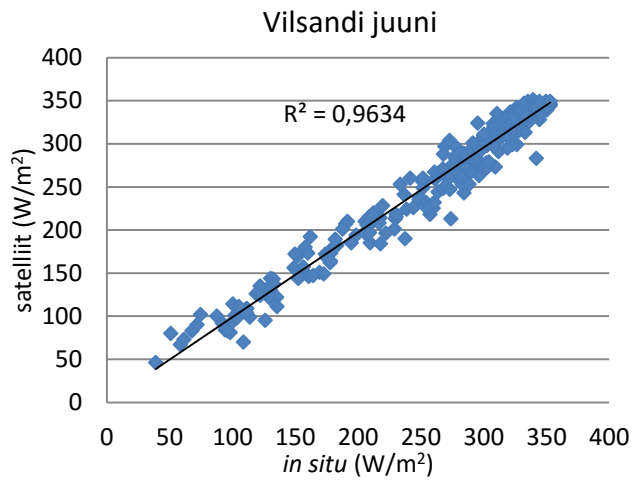


**Lisa 4. Vilsandi summaarse kiirguse hajuvusdiagrammid kuude kaupa perioodil 2005 - 2014.**

Hajuvusdiagrammid on koostatud päevakeskmiste väärtuste põhjal; x-teljel on *in situ* ja y-teljel satelliitandmed.

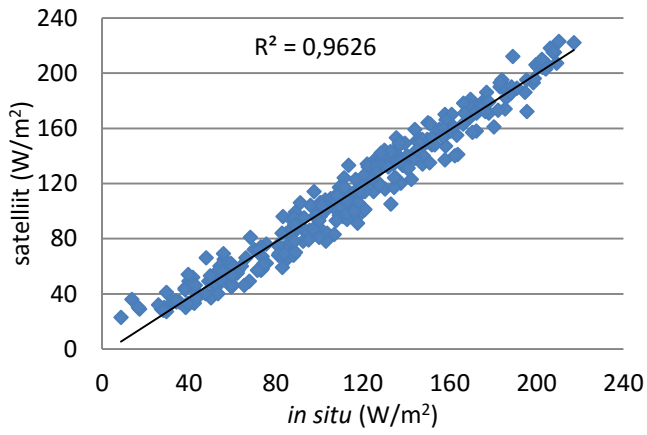




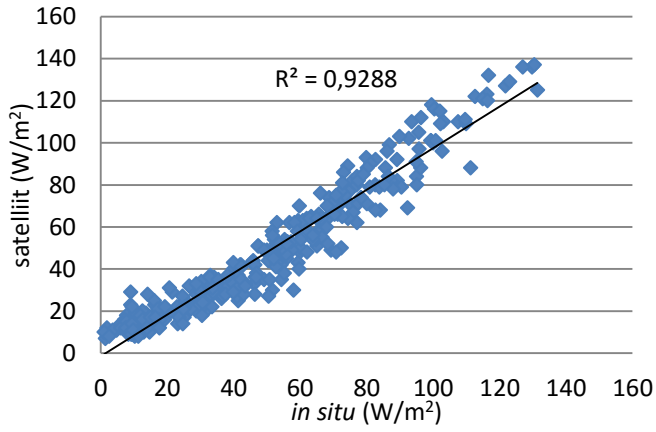




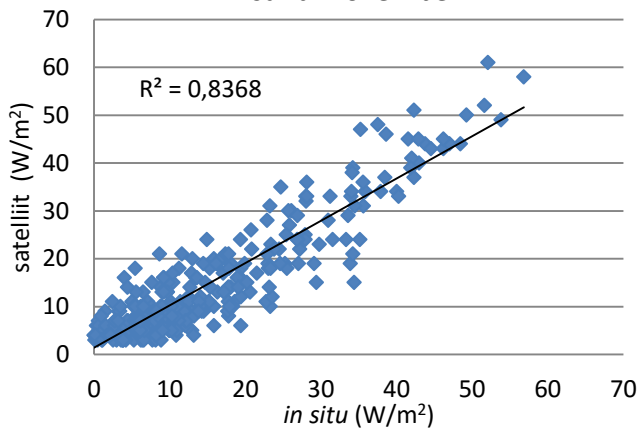
Vilsandi september

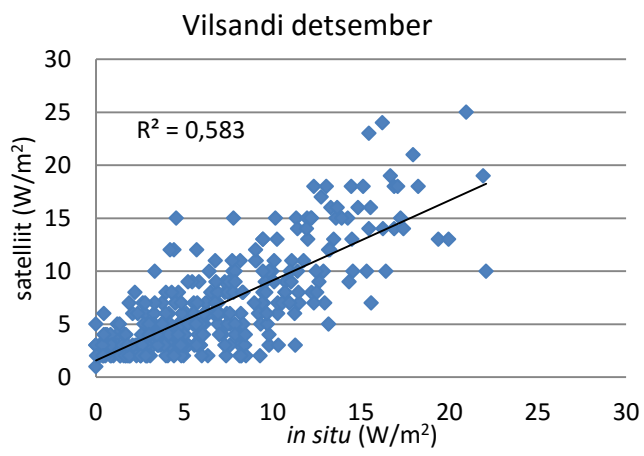


Vilsandi oktoober



Vilsandi november





**Lisa 5. Narva-Jõesuu summaarse kiirguse hajuvusdiagrammid kuude kaupa perioodil 2005 - 2014.**

Hajuvusdiagrammid on koostatud päevakeskmiste väärtuste põhjal; x-teljel on *in situ* ja y-teljel satelliitandmed.

