

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Annika Velt

**PEAMISTE ATMOSFÄÄRI JÄRELANALÜÜSIMUDELITE  
PIKALAINELISE KIIRGUSE ANDMETE VALIDEERIMINE  
LÄÄNEMERE REGIOONIS**

Magistritöö (30 EAP)

Juhendajad:  
PhD Erko Jakobson  
PhD Hanno Ohvril

Tartu 2018

## **Peamiste atmosfääri järelanalüüsimudelite pikalainelise kiirguse andmete valideerimine Läänemere regioonis**

Atmosfääri pikalaineline kiirgus on üks tähtsamaid parameetreid mõistmaks kasvuhoonegaaside mõju kliimale. Samas pole atmosfääri parameetrite mõõtmisandmed ei ajaliselt ega ruumiliselt pidevad, et vastavaid muutusi hinnata. Taoliseid stabiilseid aegridu on aga võimalik genereerida järelanalüüsimudelitega. Käesoleva töö eesmärgiks on valideerida nelja järelanalüüsimudeli atmosfääri pikalainelise kiirguse väärtuste vastavust Läänemere ümbruses paiknevates jaamades mõõdetud väärtustele. Selgus, et neljast mudelist kolm (JRA-55, ERA-Interim, MERRA 2) alahindavad pikalainelise kiirgusi väärtusi aastaringelt. Neljas mudel, NCEP CFSR, aga ülehindab.

**Märksõnad:** järelanalüüsimudelid, atmosfääri pikalaineline kiirgus

**CERCS kood:** P500 Geofüüsika, füüsikaline okeanograafia, meteoroloogia

## **Validation of the longwave radiation data from the main atmospheric reanalysis models in the Baltic Sea region**

Atmospheric longwave radiation is one of the most important parameters for understanding the impact of greenhouse gases on the climate. Unfortunately, the measured data of atmospheric parameters is neither temporally nor spatially continuous in order to evaluate the corresponding changes. However, these kind of stable time series can be generated with reanalysis models. The aim of this study is to validate the atmospheric longwave radiation values calculated by four atmospheric reanalysis models compliance to values measured in stations in Baltic Sea region. It turned out that three out of the four models (JRA-55, ERA-Interim, MERRA 2) underestimate the values of atmospheric longwave radiation throughout the whole year. The fourth model on the other hand, the NCEP CFSR, overestimates.

**Keywords:** reanalysis, atmospheric longwave radiation

**CERCS code:** P500 Geophysics, physical oceanography, meteorology

# Sisukord

<b>Sissejuhatus</b>	<b>5</b>
<b>1 Kirjanduse ülevaade</b>	<b>6</b>
1.1 Kiirgusparameetrite ülevaade . . . . .	6
1.1.1 Atmosfääri pikalaineline kiirgus . . . . .	7
1.2 Atmosfääri järelanalüüsimudelid . . . . .	8
1.2.1 NCEP CFSR . . . . .	9
1.2.2 ERA INTERIM . . . . .	10
1.2.3 JRA-55 . . . . .	10
1.2.4 MERRA 2 . . . . .	10
1.3 Varasemad uuringud . . . . .	11
<b>2 Andmed ja metoodika</b>	<b>12</b>
2.1 Jaamade andmed . . . . .	12
2.2 Mudelite andmed . . . . .	14
2.3 Metoodika . . . . .	15
<b>3 Tulemused ja arutelu</b>	<b>16</b>
3.1 Keskmised väärtused . . . . .	16
3.2 Keskmised kõrvalekalded . . . . .	18
3.3 Kõrvalekalded mudelite ja jaamade kaupa . . . . .	20
3.3.1 JRA-55 . . . . .	20
3.3.2 MERRA 2 . . . . .	21
3.3.3 NCEP CFSR . . . . .	21

3.3.4 ERA INTERIM . . . . .	22
3.4 Jääkstandardhälbe analüüs . . . . .	23
3.5 Järeldused . . . . .	24
<b>Kokkuvõte</b>	<b>26</b>
<b>Summary</b>	<b>27</b>
<b>Kirjandus</b>	<b>28</b>
<b>A Kiirguse keskmised väärtused kellaaegade kaupa</b>	<b>32</b>
<b>B Jääkstandardhälbe analüüs jaamade ja mudelite kaupa</b>	<b>40</b>
<b>Lihtlitsents</b>	<b>47</b>

# Sissejuhatus

Tänapäeval on inimkonna üheks suurimaks probleemiks kliimamuutused. Selleks, et neid muutusi paremini mõista on vaja ajaliselt ja ruumiliselt stabiilseid ning võimalikult pikkasid andmeridu kogu Maa ning atmosfääri kohta. Inimeste poolt ilmajaamades läbiviidavad ning ka satelliidimõõtmised pole selleks sageli piisavad. Lahenduseks on järelanalüüsimumelid, mis kasutavad kogu perioodi kohta sama füüsilist mudelit ning kuhu on assimileeritud kõik kättesaadavad mõõtmisandmed.

Üheks kliimamuutuste oluliseks näitajaks on aluspinna energiabilanss, mille üheks vähem uuritud komponendiks on atmosfääri pikalaineline kiirgus. Selle mõõtmisega on tegeletud vaid viimased paarkümmend aastat. Atmosfääri pikalainelise kiirguse üldisemaks analüüsamiseks on mõistlik kasutada järelanalüüsimumeleid. Sobiva järelanalüüsimumeli valimiseks ning tulemuste analüüsamiseks on aga vaja kõigepealt mudelite täpsushinnanguid uuritava piirkonna kohta.

Käesoleva töö eesmärgiks on valideerida nelja erineva järelanalüüsimumeli abil arvutatud atmosfääri pikalainelist kiirgust Läänemere piirkonnas paiknevate ilmajaamade mõõtmisandmetega.

# Peatükk 1

## Kirjanduse ülevaade

### 1.1 Kiirgusparameetrite ülevaade

Päike on Maa peamine energiaallikas. Päikese pinnatemperatuur on ca 5800 Kelvinit ning raadius ca 700000 kilomeetrit. Tänu oma suurusele ja kõrgele temperatuurile kiirgab Päike suure hulga energiat. Maad ümbritseva atmosfääri ülapiirile jõuab sellest vaid umbes pool miljardikku. Kui suur osa energiast jõuab aluspinnani, see sõltub pilvedest, atmosfääri läbipaistvusest ja aluspinna optilistest omadustest. Lisaks ka kellaajast, Päikese kändest ning asukohast [1].

Kiirgus jagatakse lainepikkuse alusel lühi- ja pikalaineliseks. Lühilaineliseks kiirguseks loetakse lainepikkusi vahemikus 0,2–4  $\mu\text{m}$  ning pikalaineliseks 4–100  $\mu\text{m}$ . Päikese kiirgus on valdavalt lühilaineline ning kiiratud lainepikkused jäävad peamiselt vahemikku 0,3–3  $\mu\text{m}$ , maksimumiga 0,5  $\mu\text{m}$  juures. Maapinna ning atmosfääri temperatuurid on palju madalamad ning nende kiiratud kiirgus vastavalt pikalaineline [1]. Päikese kiirgus ja Maa ning atmosfääri kiirgus lahutatakse lühi- ja pikalaineliseks vastavalt võrdlusele: musta keha, mille temperatuur on 6000 K, kiirgusest 99,6% on lainepikkusega  $< 5 \mu\text{m}$ . Musta keha, mille temperatuur on 250 K, kiirgusest 99,6% on lainepikkusega  $> 5 \mu\text{m}$  [2].

Kuna päikesekiirgus mõjutab Maa kliimat, siis selleks, et mõista ja ennustada kliimamuutusi, on vaja võimalikult täpselt hinnata Maale jõudva ning lahkuva kiirguse väärtusi. Tähtsaimaks

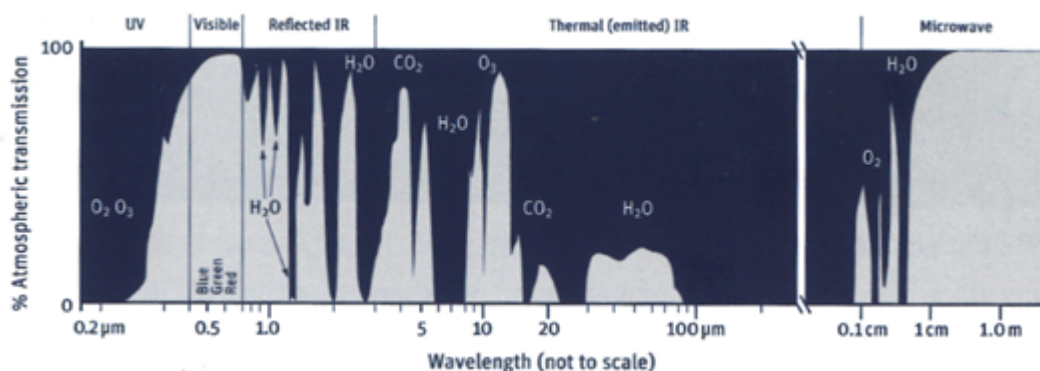
kliimamuutuste hindamise parameetriks on aluspinna temperatuur, mida mõjutab lokaalne aluspinna energiabilanss [3]. See bilanss on leitav valemiga:

$$R_n = S_d - S_u + L_d - L_u, \quad (1.1)$$

kus  $R_n$  – pinna netokiirgus,  $S_d$  – aluspinnani jõudev päikesekiirgus,  $S_u$  – pinnalt peegeldunud päikesekiirgus,  $L_d$  – atmosfääri pikalaineline kiirgus,  $L_u$  – pinna poolt kiiratav pikalaineline kiirgus [4]. Kuna  $L_d$  hulk on tugevalt mõjutatud CO<sub>2</sub> ja muude kasvuhoonegaaside kogusest atmosfääris, siis on see üks tähtsamaid parameetreid mõistmaks kasvuhoonegaaside mõju kliimale [5][6]. Samas pole atmosfääri pikalainelist kiirgust eriti uuritud, kuna pidevaid mõõtmisandmeid on vähe [7].

### 1.1.1 Atmosfääri pikalaineline kiirgus

Aluspinnani jõudva atmosfääri pikalaineline kiirguse hulk sõltub enim pilvedest, atmosfääris olevast veeaurust ning kasvuhoonegaasidest [4][8]. Maa atmosfääris on pikalainelise kiirguse osas kaks tugevat neelajat: veeaur ja süsihappegaas (joonis 1.1). Lisaks ka hapnik ja osoon, kuid nende neelavad omadused on nõrgemad [9].

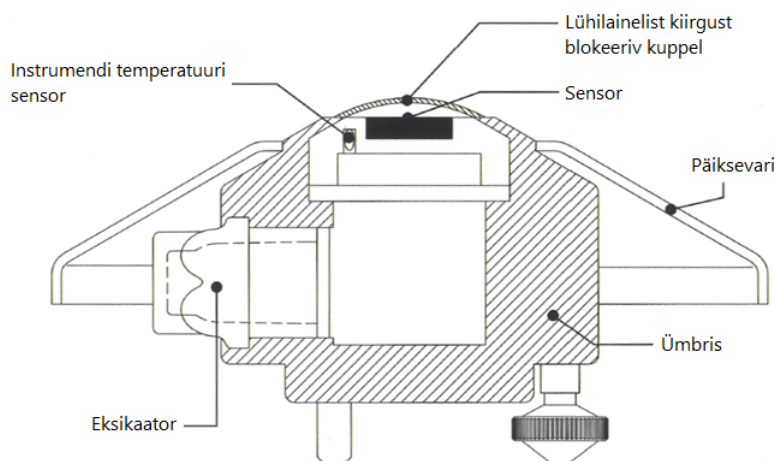


Joonis 1.1: Atmosfääri spektraalne läbitavus sõltuvalt lainepikkusest [9].

Erinevalt päikesekiirgusest on atmosfääri pikalainelise kiirguse ööpäevane amplituud väike ehk 24 tunni jooksul muutuvad tunnikeskmsed väärtused vähe. Talvel erinevus eri kellaaegade

vahel põhimõtteliselt puudub [10].

Nagu eelnevalt mainitud, on päikesekiirgust mõõdetud juba mitmeid aastakümneid, kuid atmosfääri pikalainelise kiirguse mõõtmisega on tegeletud vaid umbes viimased 20 aastat [10]. Käesolevas töös kasutatud jaamade mõõtmisandmete aastad on leitavad tabelist 2.1. Pikalainelist kiirgust on keeruline mõõta, kuna mõõteseade ise samuti kiirgab vastavalt Stefan-Boltzmanni valemile. Mõõtmiseks kasutatavaid instrumente nimetatakse pürgeomeetriteks, mille ehituskeem on toodud joonisel 1.2. Instrumendi kõige keerukam osa on kuppel, mis on vajalik Päikese lühilainelise kiirguse blokeerimiseks [9].



Joonis 1.2: Pürgeomeetri skeem [9].

## 1.2 Atmosfääri järelanalüüsimumelid

Atmosfääri koostise maapealsed mõõtmised pole kunagi olnud piisavalt laiaulatuslikud ja järjepidevad, et hinnata kogu Maad ümbritseva atmosfääri seisundit. Järelanalüüsimumelitega on aga võimalik luua aastakümnete pikkuseid pidevaid andmeridu [11]. Mudelitesse assimileeritakse iga 6 kuni 12 tunni tagant vaatlusandmeid. Assimileerimise protsess ajas ei muutu, et vältida parameetrite muutusest tingitud kunstlikke süstemaatilisi efekte. Kasutades numbrilisi mudeleid sünteesitakse ebaregulaarselt jaotunud mõõtmisandmetest ajaliselt ja ruumiliselt homogeenseid andmeridu [12].

Peamisi assimileerimise süsteeme on kaks: kolme- ning neljadimensionaalsed. Kolmedimensionaalsetes süsteemides assimileeritakse ühe analüüsivahemiku andmed eeldusega, et kõik andmed oleks justkui mõõdetud analüüsivahemiku keskel. Seega see meetod ei arvesta parameetrite muutlikkusega kindlas analüüsivahemikus, kuid vajab vähem arvutusressurssi [13]. Neljadimensionaalse süsteemi puhul lisatakse andmed mudelisse samale kellaajale, millal mõõtmised realselt on tehtud. Ehk ühe analüüsivahemiku assimileerimisel arvestatakse ka mõõtmiste kellaega. Meetod nõuab rohkem arvutusressurssi, kuid see on täpsem [14].

Järelanalüüsi lõpp-produktina luuakse parim hinnang atmosfääri hetkeseisundile mingil kindlal ajal. Siiski on võimatu arvestada korraga kõiki atmosfääri mõjutavaid faktoreid. Eriti keeruline on modelleerida pilvede optilisi omadusi ja aerosoolide kontsentratsiooni, kuna need muutuvad ajas ja ruumis pidevalt. Need aga mõjutavad oluliselt näiteks kiirguse hajumist ja seega ka maapinnale jõudva kiirguse hulka [4][15]. Järelanalüüsi mudelitest saadud andmeid on võimalik kasutada kliimamuutuste jälgimiseks ning uurimiseks [16].

Peamised globaalse ulatusega atmosfääri järelanalüüsimumelid on USA Riikliku Keskkonnaennustuse Keskuse (NCEP) mudel CFSR, Euroopa Keskulatusega Ilmaennustuse Keskuse (ECMWF) mudel ERA-Interim, NASA loodud MERRA-2 ning Jaapani Meteoroloogia Agentuuri poolt loodud JRA-55. Nende nelja mudeli andmeid on kasutatud ka käesolevas töös.

Lisaks on ka ECMWFi poolt loodud ERA-20C, mille andmerida on üle sajandi pikk ehk aastate 1900–2010 kohta. Mudeli peamiseks eesmärgiks on uurida, kas on võimalik analüüsida sajandi ilma assimileerides vaid maapinnal tehtud vaatlusi ning kasutades uusi assimileerimise meetodeid. Siiski on leitud, et mudeli arvutatud pikaajalised kliimatrendid on enamikus kohtades ebakorrektsed [17].

### **1.2.1 NCEP CFSR**

USA Riikliku Keskkonnaennustuse Keskuse (NCEP) CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) mudeli puhul on tegemist kolmanda põlvkonna mudeliga. CFSRile eelnesid NCEP/NCAR ja NCEP-DOE mudelid. Mudeli andmerida algab aastast 1979 ning seda

uuendatakse pidevalt tänapäevani [18][19]. Mõõtmisandmete assimileerimiseks kasutab mudel kolmedimensionaalset süsteemi. Mudeli globaalne horisontaalne resolutsioon on 38 km ning tal on 64 vertikaalset tasapinda, mille viimane piir on 0,2 hPa juures [18].

### **1.2.2 ERA INTERIM**

ERA-Interim on uusim Euroopa Keskulatusega Ilmaennustuse Keskuse (ECMWF) järelanalüüsimumudel. Mudeliga arvatud andmed katavad perioodi alates 1979 kuni tänapäev. Mõõtmisandmete assimileerimiseks kasutab mudel neljadimensionaalset süsteemi. Mudeli horisontaalne resolutsioon 60 km, mis on parem kui tema eelkäijal ERA-40 mudelil, millel see oli 83 km. Vertikaalne resolutsioon võrreldes eelneva mudeliga ei muutunud ehk ERA-Interimil on 60 tasapinda ning viimane neist 0,1 hPa juures. Iga päev mudelisse assimileeritavate vaatluste arv on ligi  $10^7$  [20].

### **1.2.3 JRA-55**

Jaapani Meteoroloogia Agentuuri poolt loodud JRA-55 on üks kõige pikema aegreaga mudel. See algab aastast 1958, kui algasid ka globaalsed regulaarsed mõõtmised raadiosondidega. Mudeli loomine võttis kolm aastat ning see saadi valmis 2013nda aasta märtil. JRA-55 on esimene mudel, mis kattis pool sajandit ning võttis selle perioodi jaoks kasutusele neljamõõtmelise variatsioonilise analüüsi. Mudeli horisontaalne resolutsioon on 55 km ning vertikaalselt on sellel sarnaselt ERA-Interimile 60 tasandit, mis lõppevad 0,1 hPa juures [21].

### **1.2.4 MERRA 2**

NASA loodud MERRA-2 (*the second Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications*) andmerida algab aastast 1980. MERRA-2 on asendus algsele MERRA mudelile, kuna viimase mõõtmisandmete assimileerimise süsteem hakkas vananema. Nimelt ei olnud see võimeline töötlemas mitmeid uusi andmetüüpe (näiteks andmed hüperspektraalsetest infrapuna kiirgusinstrumentidest). Lisaks kuna vanemad satelliidid, mida MERRA toetas, lakkavad töötamast, on mudelil järjest vähem andmeid, mida assimileerida. Mõõtmisandmete

assimileerimiseks kasutab mudel kolmedimensionaalset süsteemi. Mudeli horisontaalne resolutsioon on 50 km ning vertikaalselt on 42 tasandit, millest viimane neist 0,1 hPa juures [22].

### 1.3 Varasemad uuringud

Varasemates uuringutes on järelanalüüsitud kiirgusparameetrite valideerimisel keskendunud rohkem globaalsetele keskmistele näitajatele, kui regionaalsetele [23]. On leitud, et kõige suuremad on kõrvalekalded mõõdetud väärtustest parameetrite puhul, mis sõltuvad enim pilvedest, õhuniiskusest ja temperatuurist. Seega on ka atmosfääri pikalainelise kiirguse mudelite poolt arvatud voogudes enim vigu [12][23]. Regionaalselt on kõrvalekalded suurimad troopikas ja polaaraladel [4].

Wang ja Dickinson poolt läbi viidud uuringus selgus, et CFSR alahindab pisut atmosfääri pikalainelise kiirguse väärtusi. Globaalne kõrvalekalle  $-0,19 \text{ W m}^{-2}$ . ERA-Interimi puhul on keskmiseks globaalseks kõrvalekaldeks arvatud  $-2,31 \text{ W m}^{-2}$ . MERRA 2 puhul on pikalainelise kiirguse alahindamine suurem, nimelt  $-14,51 \text{ W m}^{-2}$ . MERRA suurem kõrvalekalle tuleneb ilmselt sellest, et MERRA õhutemperatuuri ning niiskuse andmestik pole nii kvaliteetne kui teistel mudelitel [4]. Ka teised uuringud kinnitavad, et erinevad järelanalüüsitud mudelid alahindavad globaalset atmosfääri pikalainelise kiirguse väärtust [24][25].

## **Peatükk 2**

### **Andmed ja metoodika**

Käesolevas töös on uuritud nelja atmosfääri järelanalüüsi mudeli atmosfääri pikalainelise kiirguse vastavust erinevates jaamades mõõdetud andmetele. Kõik töös kasutatavad kiirguse andmed on ühikutes  $W m^{-2}$ .

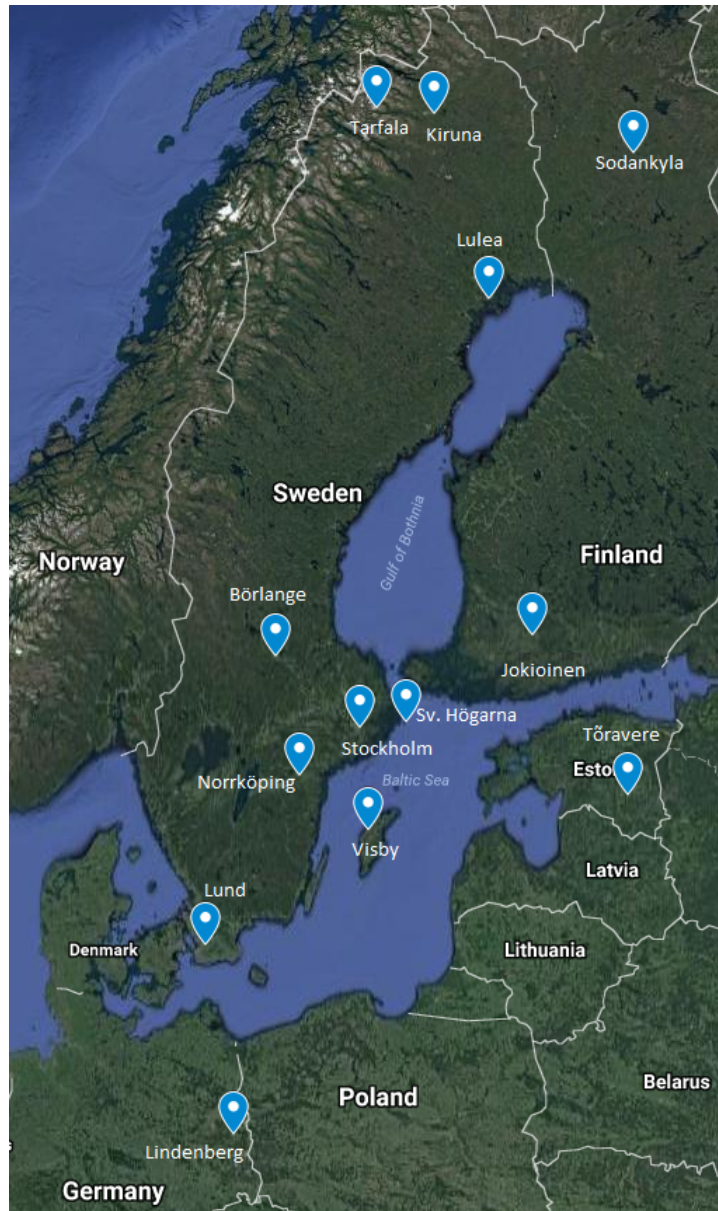
#### **2.1 Jaamade andmed**

Mudelite atmosfääri pikalainelise kiirguse valideerimiseks kasutati 13ne ilmajaama andmeid. Kõik valitud jaamad asusid Läänemere ümbruses. Jaamade paiknemine on näha jooniselt 2.1. Kuna atmosfääri pikalainelist kiirgust hakati mõõtma alles hiljuti, siis erinevad jaamades mõõtmiste algus ja lõpp aastad. Jaamade mõõtmisperioodide vahemikud on toodud tabelis 2.1. Mudelite valideerimisel on lähtunud just neist vahemikest.

Tabel 2.1: Jaamad

Riik	Jaam	Asukoht	Mõõtmisperiood
Eesti	Tõravere	58,254; 26,462	2003–2016
Saksamaa	Lindenberg	52,210; 14,122	1994–2012
Soome	Jokioinen	60,801; 23,480	2013–2016
	Sodankyla	67,365; 26,628	2006–2016
Rootsi	Börlange	60,488; 15,430	1990–1998
	Kiruna	67,842; 20,410	2007–2016
	Lulea	65,544; 22,111	1983–1999
	Lund	55,714; 13,212	1983–2000
	Norrköping	58,583; 16,152	2007–2016
	Stockholm	59,353; 18,063	1985–1998
	Svenska Högarna	59,442; 19,502	2007–2016
	Tarfala	67,911; 18,607	2007–2016
Visby	57,673; 18,345	2007–2016	

Rootsi ning Soome jaamade andmed on küsitud vastavalt Rootsi Meteoroloogia ja Hüdroloogia instituudist ning Soome Meteoroloogia Instituudist. Tõravere ning Lindenbergi jaamade andmed on alla laetud Maailma kiirgusseire keskuse andmebaasist [26] [27].



Joonis 2.1: Jaamade asukohad kaardil.

## 2.2 Mudelite andmed

Mudelite andmeid on aastate 1979–2016 kohta, mis on lineaarselu interpoleeritud vastavate meteoroloogiajaamade asukohtadesse. Mudelite NCEP-CFSR, JRA ning MERRA 2 puhul on andmed 6 tunnise resolutsiooniga ehk iga päeva kohta on neli andmepunkti. Sellest lähtuvalt on võrdlused jaamadega tehtud kell 00:00, 06:00, 12:00 ja 18:00 UTC. ERA INTERIM mudeli

puhul on andmed 12 tunnise resolutsiooniga ehk võrdlused jaamadega on tehtud kell 00:00 ning 12:00 UTC.

## **2.3 Metoodika**

Esmalt on leitud jaamade ning mudelite keskmised atmosfääri pikalainelise kiirguse väärtused igal aastaajal neljal eelnevalt mainitud kellaajal. Seejärel on esmase ülevaate saamiseks arvutatud mudelite keskmised kõrvalekalded mõõdetud väärtustest, taaskord iga aastaaja ja kellaaja kohta. Lisaks on leitud eraldi iga mudeli kõrvalekalded igas jaamas mõõdetud tulemustest. Peale seda on läbi viidud ka jääkstandardhälbe analüüs.

Andmetööluseks on kasutatud programmi Excel ning autori poolt koostatud skripte programmeerimiskeeles Python.

# Peatükk 3

## Tulemused ja arutelu

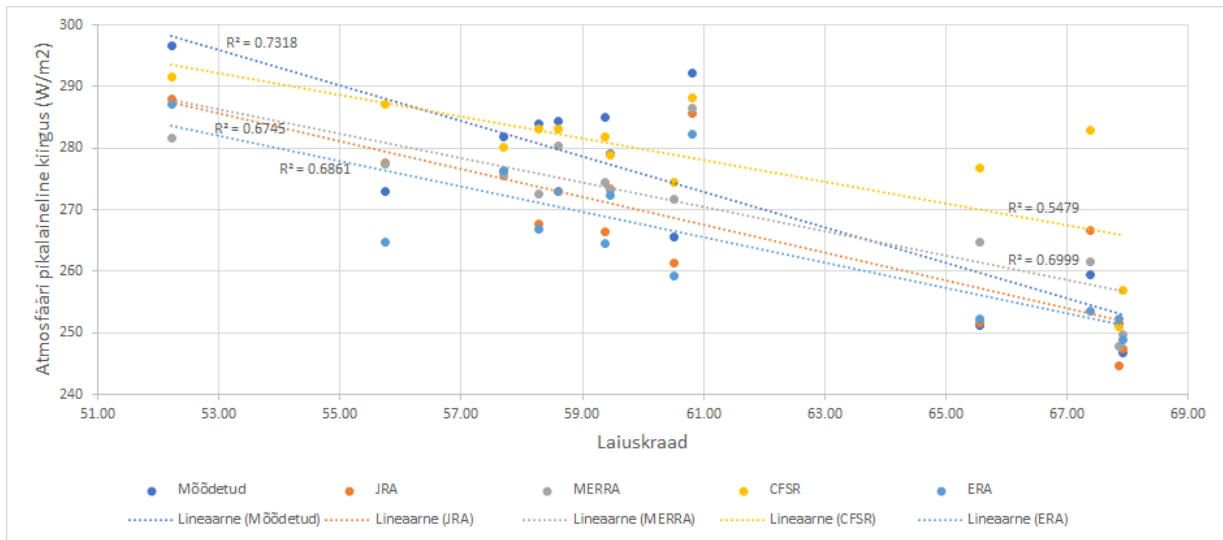
### 3.1 Keskmised väärtused

Atmosfääri vastukiirguse keskmised väärtused sesoonide ja kellaaegade kaupa on toodud järgnevatel joonistel.  $X$ -teljel on laiuskraadid ning iga nelja- (kell 06:00 ja 18:00) või viie- (kell 00:00 ja 12:00) punktiline veerg vastab ühele jaamale. Laiuskraadid, millel jaamad asuvad, on leitavad tabelist 2.1. Joonisel 3.1 on toodud näitena kiirguse keskmised väärtused kevadel kell 00:00, ülejäänud kellaaegade joonised on lisas A.

Käesolevas töös uuritud jaamades mõõdetud atmosfääri pikalainelise kiirguse väärtused jäävad aasta lõikes keskmiselt vahemikku  $270\text{--}360\text{ W m}^{-2}$ . Välja arvatud neljas rohkem põhjapool asuvas jaamas (Tarfala, Kiruna, Sodankyla, Lulea), kus väärtused jäävad  $230\text{--}330\text{ W m}^{-2}$  vahele.

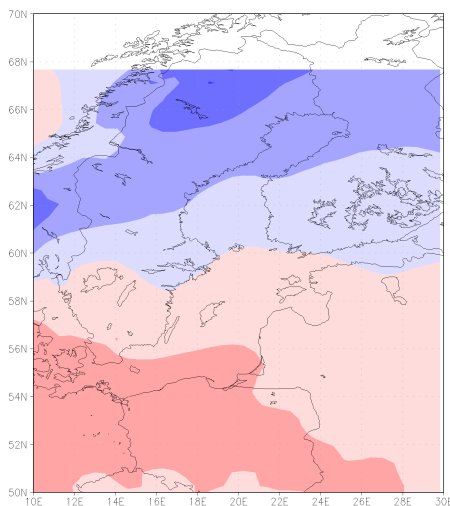
Vaadates keskmiste väärtuste jooniseid, on näha suuremal osal juhtudest mudelid alahindavad jaamades mõõdetud väärtusi. Erandina CFSR, mille puhul on rohkem näha ülehindamist. Kõrvalekalletest on täpsemalt kirjas järgnevatel peatükkides.

Lisaks on keskmiste väärtuste joonistel välja toodud kiirguse trendid jaamade laiuskraadide suhtes. Kõikide jaamade ja kellaaegade puhul on näha, et pikalainelise kiirguse mõõdetud väärtused vähenevad vastavalt sellele, mida põhjapoolsema jaamaga on tegu. Sarnane trend on ka kõigil mudelitel.

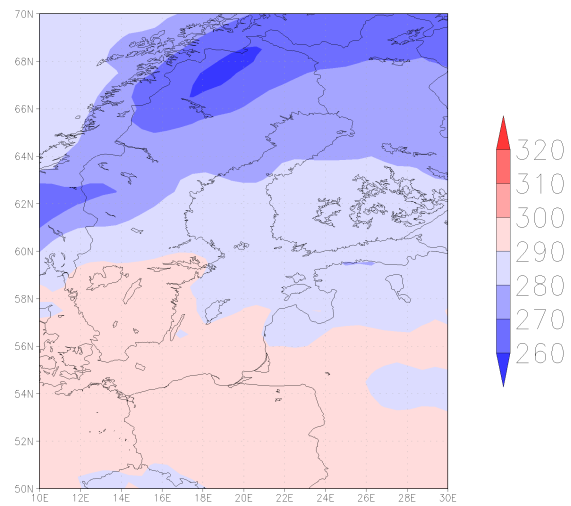


Joonis 3.1: Atmosfääri vastukiirguse keskmised väärtused kevadel, kell 00:00 UTC sõltuvalt laiuskraadist.

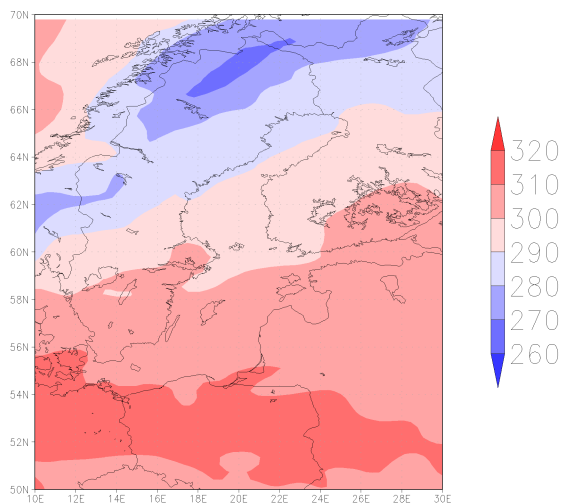
Joonistel 3.2–3.5 on toodud mudelite arvatud atmosfääri pikalainelise kiirguse keskmised väärtused ( $\text{W m}^{-2}$ ) aastatel 1975–2015 (MERRA 2 1979–2010). Üldjoontes on mudelite tulemused sarnased. Suurimad erinevused on CFSR puhul, kus lõunapool hinnatakse pikalainelise kiirguse väärtusi suuremaks kui teistel mudelitel, ning MERRA puhul madalamaks kui teised mudelid.



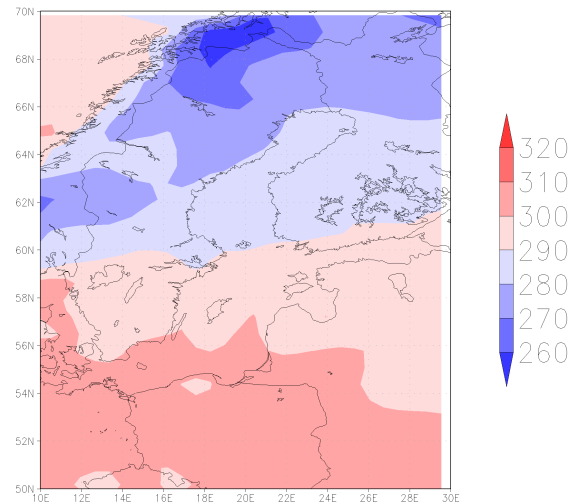
Joonis 3.2: JRA pikalainelise kiirguse keskmised väärtused ( $\text{W m}^{-2}$ ) aastatel 1975–2015.



Joonis 3.3: MERRA 2 pikalainelise kiirguse keskmised väärtused ( $\text{W m}^{-2}$ ) aastatel 1975–2010.



Joonis 3.4: CFSR pikalainelise kiirguse keskmised väärtused ( $\text{W m}^{-2}$ ) aastatel 1975–2015.



Joonis 3.5: ERA INTERIM pikalainelise kiirguse keskmised väärtused ( $\text{W m}^{-2}$ ) aastatel 1975–2015.

## 3.2 Keskmised kõrvalekalded

Tabelis 3.1 on toodud mudelite kõrvalekalded mõõtmistulemustest üle kõikide jaamade iga aastaaja ning kellaaja kohta eraldi.

Suurimad kõrvalekalded esinevad MERRA mudeli puhul. Nimelt alahindab mudel kiirguse väärtusi igal aastaajal ning igal kellaajal. Suurimad kõrvalekalded esinevad suvel ( $-9 \dots -21 \text{ W m}^{-2}$ ). Teistel aastaegadel on maksimaalne kõrvalekalle  $-17 \text{ W m}^{-2}$ . Lisaks on näha ka ööpäevane käik. Suurimad on kõrvalekalded kell 12 päeval ning väikseimad kesköösel.

Saraselt MERRA-le hindab ka JRA mudel aastaringselt atmosfääri pikalainelise kiirguse väärtusi üle. Samuti on ka tulemustest näha, et kõrvalekalded on suuremad just soojadel aastaegadel, eriti suvel keskpäeval ja õhtul, kui päikese kiirgust on rohkem. Näiteks suvel jäävad kõrvalekalded vahemikku  $-5 \dots -15 \text{ W m}^{-2}$ , samas kui teistel aastaegadel on selleks vahemikuks  $-3 \dots -9 \text{ W m}^{-2}$ .

Samuti alahindab kiirguse väärtusi ERA INTERIM mudel. Taaskord on kõrvalekalded suuremad kevadel ja suvel, kus need jäävad vahemikku  $-6 \dots -9 \text{ W m}^{-2}$ . Talvel ja sügisel on kõrvalekalded vahemikus  $-3 \dots -6 \text{ W m}^{-2}$ .

CFSR hindab ainsana kiirguse väärtusi suuremaks kui mõõdetud, välja arvatud suvel.

Kevadel, sügisel ning talvel jäävad kõrvalekalded vahemikku  $1-9 \text{ W m}^{-2}$ , kusjuures jällegi on kõrvalekalded pisut suuremad just kevadel. Suvised kõrvalekalded (välja arvatud kell 06:00) jäävad aga vahemikku  $0...-11 \text{ W m}^{-2}$ .

Tabel 3.1: Mudelite keskmised kõrvalekalded jaamades mõõdetud väärtustest ( $\text{W m}^{-2}$ )

Aastaaeg	Kellaaeg	JRA	MERRA	CFSR	ERA
kevad	0	-5,51	-2,63	5,00	-7,53
	6	-4,52	-7,47	9,08	
	12	-8,61	-16,94	4,49	-6,95
	18	-8,49	-8,98	0,75	
suvi	0	-5,38	-9,71	-5,90	-8,20
	6	-5,20	-17,82	0,22	
	12	-15,70	-21,33	-5,60	-8,50
	18	-10,49	-12,38	-10,96	
sügis	0	-5,44	-7,04	2,07	-4,38
	6	-7,44	-8,20	3,96	
	12	-4,63	-16,93	1,57	-4,48
	18	-6,17	-9,75	0,16	
talv	0	-6,30	-8,78	3,95	-5,85
	6	-7,42	-9,19	3,90	
	12	-3,32	-11,77	4,98	-3,12
	18	-6,54	-8,79	4,30	
keskmine		-6,95	-11,10	1,37	-6,13

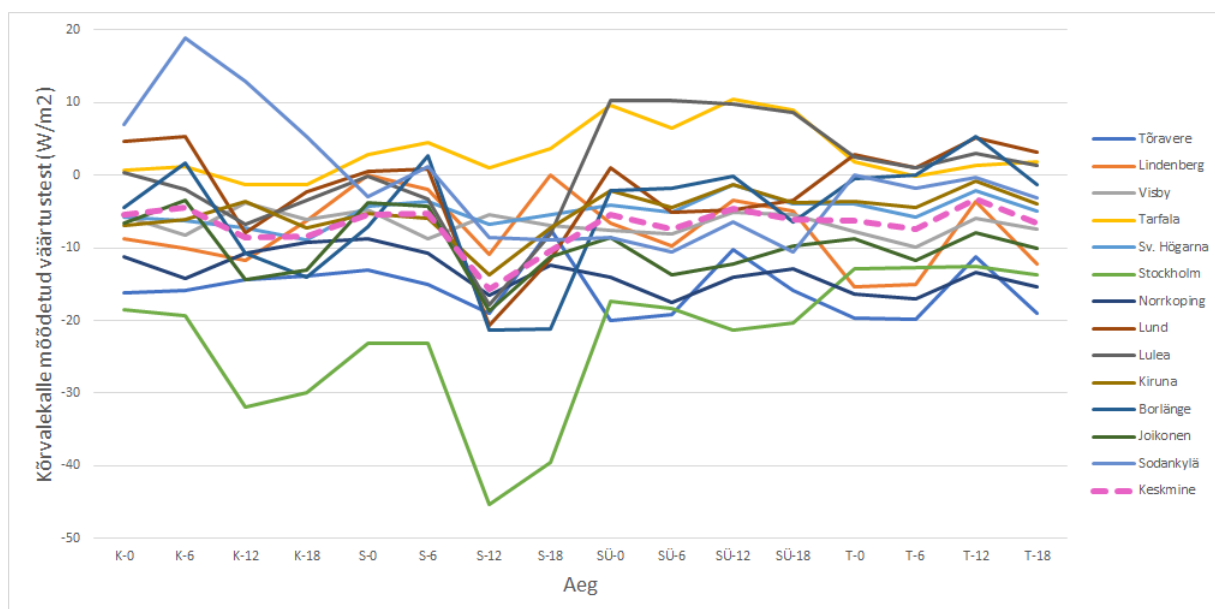
### 3.3 Kõrvalekalded mudelite ja jaamade kaupa

#### 3.3.1 JRA-55

Tabelist 3.1 on näha, et JRA alahindab atmosfääri pikalainelise kiirguse väärtusi igal aastaajal ning igal kellaajal. Sama saab järeltada, mõne erandiga, ka jooniselt 3.6, kus on toodud kõrvalekalded jaamade kaupa.

Enamik jaamade puhul jääb aastaringne alahindamine vahemikku  $0 \dots -20 \text{ W m}^{-2}$ . Eranditena hinnatakse kiirguse väärtusi mõõdetust kõrgemaks Tarfalas (väljaarvatud kevadel kell 12 ja 18), Sodankylas kevadel, Luleas sügisel ja talvel. Need on kolm neljast kõige põhjapoolsemast uuritud jaamast, seega võiks eeldada, et mudel hindabki külmema kliimaga aladel kiirguse väärtusi mõõdetust kõrgemaks. Samas neljandas kõige põhjapoolsemas jaamas – Kirunas – on kõrvalekalded väga lähedased jaamade keskmisele kõrvalekaldele.

Selgelt eristub ka Stockholm, kus võrreldes teiste jaamadega on kõrvalekalded palju suuremad, eriti soojematel aastaegadel (kevad, suvi). Tegemist võib olla asjaoluga, et Stockholm on üks jaamadest, mille kohta on ainult vanemad (1990–1998) mõõteandmed.

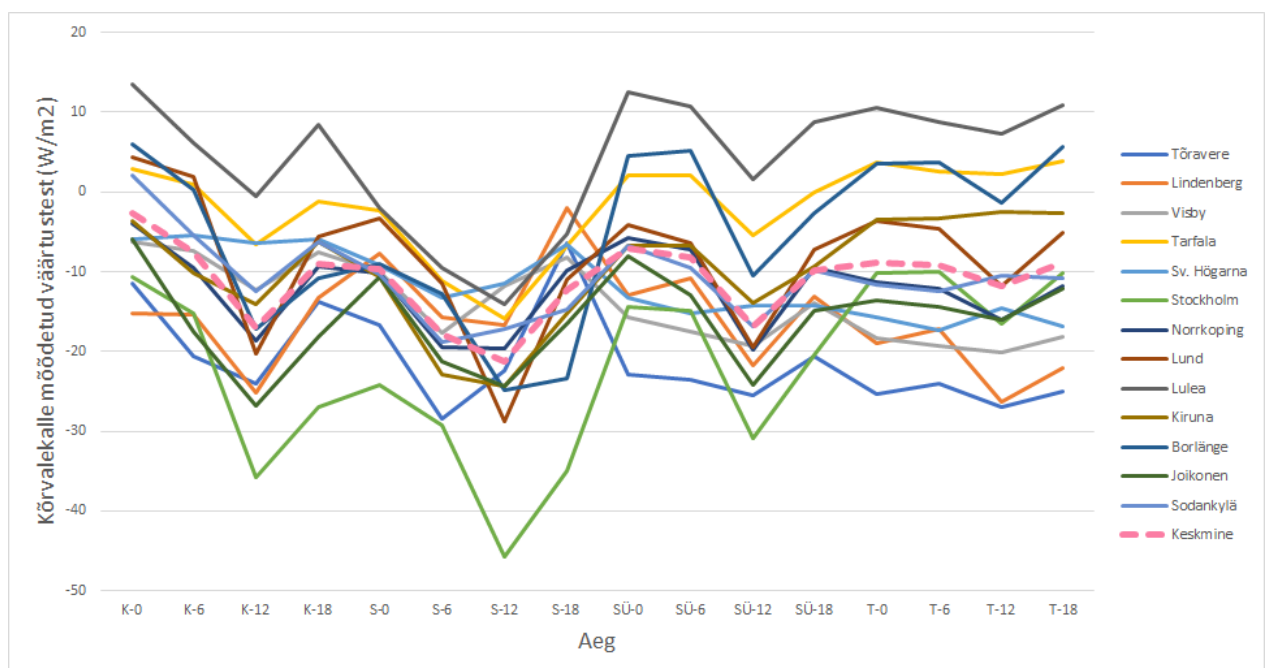


Joonis 3.6: JRA kõrvalekalded mõõdetud tulemustest aasta lõikes.

### 3.3.2 MERRA 2

MERRA alahindab aastaringselt atmosfääri pikalainelise kiirguse väärtusi pea kõigis jaamades (joonis 3.7). Eranditeks on Lulea, kus alahindamine toimub vaid suvel; Tarfala ja Börlänge, kus mudel ülehindab kevadel kell 00 ja 06 ning osaliselt sügisel ja talvel; Lund ja Sodankyla, kus kevadel kell 00 ja 06 toimub samuti ülehindamine.

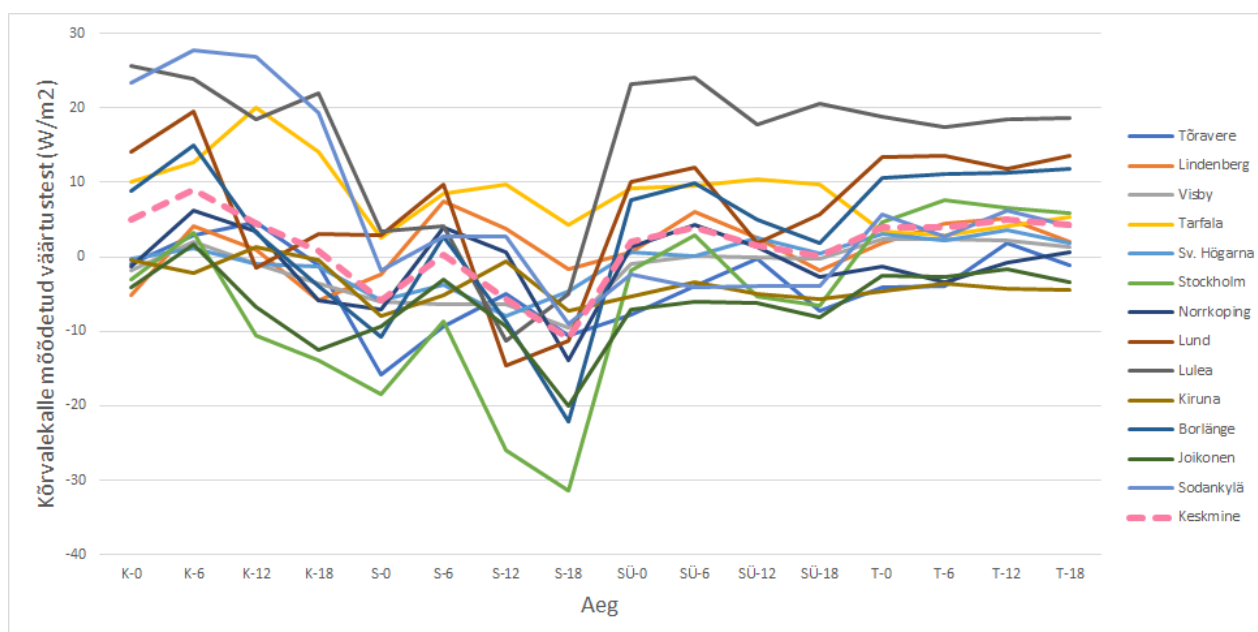
Lisaks on enamus jaamade ning aastaegade puhul näha, et kõrvalekalded on suuremad keskpäeval.



Joonis 3.7: MERRA kõrvalekalded mõõdetud tulemustest aasta lõikes.

### 3.3.3 NCEP CFSR

CFSR puhul on näha, et enamus jaamade korral mudel suvel pigem alahindab atmosfääri pikalainelise kiirguse väärtusi (joonis 3.8). Samas sügisel ja talvel jäävad enamus jaamade kõrvalekalded vahemikku  $-10...10 \text{ W m}^{-2}$  ehk osade jaamade korral toimub kiirguse väärtuste ülehindamine, teiste puhul aga alahindamine. Kuna positiivsed kõrvalekalded on aga siiski natukene suuremad, siis on ka jaamade keskmine kõrvalekalle sel perioodil pisut üle nulli.

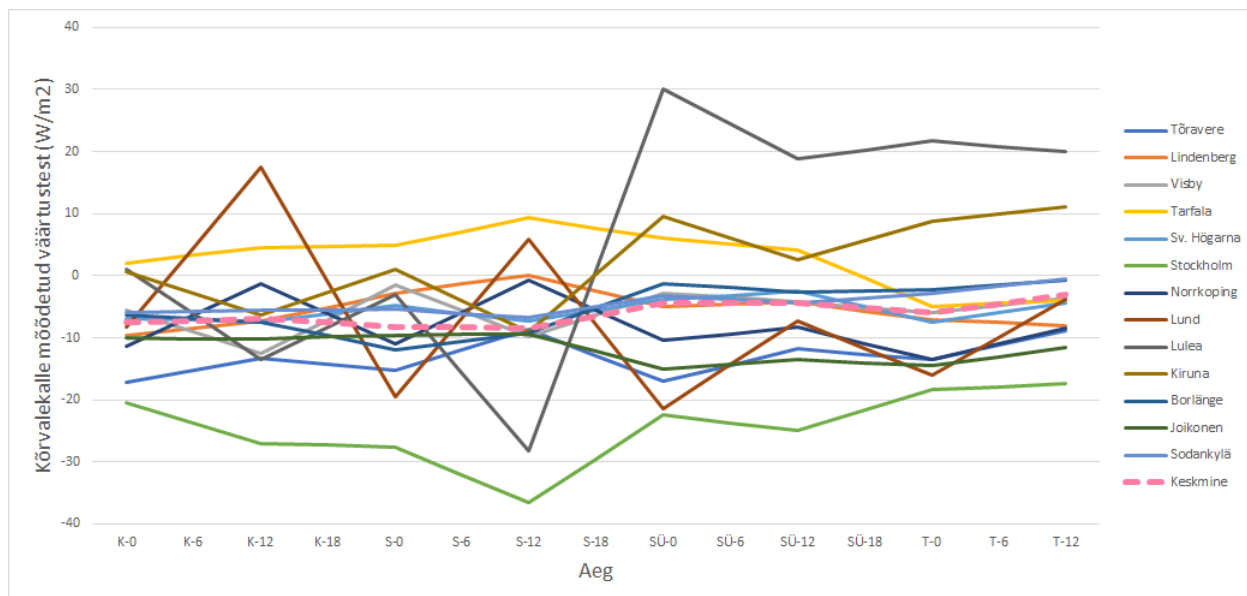


Joonis 3.8: CFSR kõrvalekalded mõõdetud tulemustest aasta lõikes.

### 3.3.4 ERA INTERIM

ERA INTERIM mudeli kõrvalekalded jaamadest on toodud joonisel 3.9. Keskmise kõrvalekalle jääb terve aasta jooksul  $-3...-8,5 \text{ W m}^{-2}$  vahele. Ka enamus jaamade puhul mudel pigem alahindab pikalainelise kiirguse väärtusi ehk enamasti jäävad jaamade kõrvalekalded aasta ringselt vahemikku  $0...-20 \text{ W m}^{-2}$ .

Eranditeks on kolm põhjapoolsemat jaama: Tarfala, kus mudel ülehindab kiirguse väärtusi (välja arvatud talvel) ning Lulea ja Kiruna, mille puhul ülehinnatakse kiirguse väärtusi sügisel ja talvel. Lisaks ka Lund, kus keskpäevased kõrvalekalded on palju positiivsemad kui keskõised ning kevadel ja suvel mudel ka hindab kiirguse väärtusi üle. Vastandlikuks erandiks on Stockholm, kus alahindamine on igal aastaajal ja kellaajal suurem kui teistes jaamades.



Joonis 3.9: ERA kõrvalekalded mõõdetud tulemustest aasta lõikes.

### 3.4 Jääkstandardhälbe analüüs

Järgnevalt on toodud eraldi kõikide jaamade kohta mudelite jääkstandardhälbed igal aastaajal ning igal kellaajal. Lisaks võrdlusena mõõdetud andmete standardhälve, kasutades jaama sessiooni keskmist kiirguse väärtust iga kellaaja kohta. Tabelis 3.2 on näitena toodud jääkstandardhälbed Tõraveres. Ülejäänud jaamade tabelid on toodud lisas B.

Atmosfääri pikalainelise kiirguse väärtuste hindamiseks on mudeli andmeid mõttekas kasutada vaid siis kui nende jääkstandardhälve on väiksem mõõtmisandmete standardhälbest. Nii on see enamuse mudelite puhul enamuse jaamades. Siiski, olukordi, kus jääkstandardhälve on suurem mõõtmisandmete standardhälbest leidub iga mudeli puhul. Kuid kõik juhtumid jäävad kevadesse või suvesse.

Selliseid juhtumeid on vähe JRA mudeli puhul, kus vaid Stockholmi (kevad kell 12, suvi 6-18, tabel B.5), Lundi (suvi kell 12, tabel B.7) ning Borlänge (suvi 12-18, tabel B.10) jaamades on mudeli jääkstandardhälve suurem mõõdetud andmete standardhälbest. Sarnane seis on ka CFSRi puhul, kus lisaks eelnimetatud kolmele jaamale on ka Luleas (kevad 0 ja 18, tabel B.8) mudeli jääkstandardhälve suurem. Vähe juhtumeid on ka ERA puhul, kus selline olukord esineb Stockholmis (suvi), Luleas (suvi kell 12) ning Jokioinensis (kevad 0 ja suvi, tabel B.11). Kõige

rohkem sääraseid olukordi ilmnes aga MERRA mudeli puhul, kus mudeli jääkstandardhälve on suurem mõõdetud andmete standardhälbest kuues jaamas: Tõraveres (tabel 3.2), Stockholmis, Lundis, Kirunas (tabel B.9), Börlanges ning Jokioinenis. Kõikide jaamade puhul esines seda aga ainult suvel ja enim keskpäeval. Lisaks selgus, et jääkstandardhälbed ei sõltu oluliselt laiuskraadist, vaid pigem jaamade asukoha iseärasustest.

Tabel 3.2: Jääkstandardhälbed Tõraveres mudelite kaupa

Aastaaeg	Kellaaeg	JRA	MERRA	CFSR	ERA	Mõõdetud
kevad	0	29,97	27,51	33,19	27,99	44,68
	6	29,33	31,57	29,53		44,12
	12	29,42	30,97	27,92	22,05	42,37
	18	26,92	26,11	31,54		43,86
suvi	0	26,71	27,97	30,15	26,15	35,32
	6	26,19	34,02	22,48		29,99
	12	25,64	27,76	21,27	18,73	27,8
	18	20,84	20,87	23,87		32,49
sügis	0	33,18	33,81	28,92	29,23	37,85
	6	32,64	34,09	27,02		38,41
	12	31,3	34,33	24,9	23,12	37,04
	18	31,14	32,15	29,45		38,26
talv	0	31,63	34,72	25,79	24,94	44,74
	6	31,7	33,74	24,37		46,69
	12	30,7	36,69	26,01	22,94	47,39
	18	30,97	34,87	25,98		45,48

### 3.5 Järeldused

Käesoleva töö käigus selgus, et Läänemere piirkonnas oleks kõige mõistlikum kasutada CFSR mudelit, kuna sel mudelil on kõrvalekalded kõige väiksemad, keskmine erinevus on kõigest 1,4  $W m^{-2}$ . Kõige suuremad süstemaatilised vead on MERRA-1, kus on keskmine erinevus  $-11,1$

$\text{W m}^{-2}$ . JRA-55 ja ERA-Interim mudelite keskmine erinevus on alla  $-7 \text{ W m}^{-2}$ , samas jäävad nende mudelite puhul enamuse jaamade keskmised kõrvalekalded terve aasta vältel samasse vahemikku ( $0 \dots -20 \text{ W m}^{-2}$ ).

CFSRi puhul toimub kiirguse ülehindamine (välja arvatud suvel). JRA, MERRA ning ERA aga alahindavad aastaringselt atmosfääri pikalainelise kiirguse väärtusi. Alahindamine on kõikide mudelite puhul suurim just suvel. MERRA puhul ilmneb ka ööpäevane käik ehk kõrvalekalded on iga aastaaja puhul suurimad kell 12 UTC ja väikseimad kell 00 UTC.

Jääkstandardhälvete analüüsist selgub, et mudelite jääkstandardhälbed on oluliselt suuremad mudelite keskmisest süstemaatilistest vigadest ning üksikutel juhtudel ületavad isegi mõõtmisandmete standardhälbeid (kus on parimaks hinnanguks jaama mõõdetud sesoonne keskväärtus). Tõenäoliselt on see seotud asjaoluga, et järelanalüüsimumudelid ei suuda realistlikult hinnata pilvisuse infot. Seetõttu on mõistlik kasutada järelanalüüsimumodelite ajaliselt keskmistatud andmeid. Üksikväärtuste puhul tuleb arvestada standardhälbega ligikaudu  $30 \text{ W m}^{-2}$ .

# **Peamiste atmosfääri järelanalüüsitud mudelite pikalainelise kiirguse andmete valideerimine Läänemere regioonis**

**Annika Velt**

## **Kokkuvõte**

Kliimamuutuste paremaks mõistmiseks ning üldiseks kliima uurimiseks on heaks allikaks erinevate järelanalüüsitud tulemuste. Mudelite lõpp-produktiks on nimelt ajaliselt ja ruumiliselt homogeenised andmerekogud kogu Maad ümbritseva atmosfääri kohta.

Käesolevas töös uuriti nelja atmosfääri järelanalüüsitud mudeli (NCEP-CFRS, JRA-55, MERRA 2 ja ERA-Interim) atmosfääri pikalainelise kiirguse väärtuste vastavust kolmeteistkümnes Läänemere ümber paiknevas jaamas mõõdetud väärtustest. Võrdlused viidi läbi aastaegade põhiselt neljal erineval kellaajal (00:00, 06:00, 12:00 ning 18:00). Lisaks viidi läbi ka jääkstandardhälbe analüüs, hindamaks, kas mudelite andmeid on üldse mõttekas kasutada.

Selgus, et võrreldes mudelite keskmisi kõrvalekaldeid üle kõikide jaamade, siis JRA-55, MERRA 2 ning ERA-Interim alahindavad terve aasta vältel atmosfääri pikalainelise kiirguse väärtusi. CFRS mudel aga ülehindab, välja arvatud suvel. Kõrvalekalletest hoolimata sobivad kõik mudelid atmosfääri pikalainelise kiirguse uurimiseks Läänemere piirkonnas, kuna enamikel juhtudel on nende jääkstandardhälve väiksem mõõtmisandmete standardhälbest.

Kõige väiksemad olid kõrvalekalded CFRS mudeli puhul ehk see oleks ka kõige sobivam uurimaks atmosfääri pikalainelist kiirgust Läänemere regioonis. Ka ERA-Interim ning JRA-55 mudelite puhul on kõrvalekalded väiksemad ning pea kõikide jaamade puhul jäävad keskmised kõrvalekalded terve aasta vältel vahemikku  $0...-20 \text{ W m}^{-2}$ .

# **Validation of the longwave radiation data from the main atmospheric reanalysis models in the Baltic Sea region**

**Annika Velt**

## **Summary**

For a better understanding of climate change and for general climate research, the products of various reanalyses are a good source. The end products of those models are temporally and spatially homogeneous datasets about the atmosphere surrounding the Earth.

The aim of this study was to analyse the atmospheric longwave radiation values calculated by four atmospheric reanalysis models (NCEP-CFRS, JRA-55, MERRA 2 ja ERA-Interim) compliance to values measured in 13 stations around the Baltic Sea. The comparisons were carried out for each season at 00:00, 06:00, 12:00 and 18:00 (UTC). In addition, a residual standard deviation analysis was performed to assess whether it is worthwhile to use the model data.

As a result, it turned out that by comparing the average biases of the models over all stations, the JRA-55, MERRA 2 and ERA-Interim underestimate the atmospheric longwave radiation throughout the whole year. The CFRS model, however, overestimates the values, except for the summer. Despite the biases, the data from all models is suitable for researching the longwave atmospheric radiation in the Baltic Sea region, since in most cases their residual standard deviation is lower than the standard deviation of measured data.

The smallest biases were present in the CFRS model. Perhaps it would be the most appropriate model, out of the four models, to investigate the longwave atmospheric radiation in the Baltic Sea region. Also for ERA-Interim and JRA-55 models, the biases are smaller and for almost all stations the average bias for the whole year remains within the range of 0...-20 W m<sup>-2</sup>.

# Kirjandus

- [1] Viivi Russak ja Ain Kallis. *Eesti kiirguskliima teatmik*. Maailma Meteoroloogiaorganisatsioon, Eesti Vabariigi Keskkonnaministeerium, Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut, Tallinn, 2003.
- [2] R.M. Goody and Y.L. Yung. *Atmospheric Radiation. Theoretical Basis*. Oxford University Press, 1995.
- [3] Kaicun Wang and Robert E. Dickinson. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics*, 50(2), May 2012.
- [4] Kaicun Wang and Robert E. Dickinson. Global atmospheric downward longwave radiation at the surface from ground-based observations, satellite retrievals, and reanalyses. *Reviews of Geophysics*, 51(2):150–185, April 2013.
- [5] Michael J. Iacono, Jennifer Delamere, Eli J. Mlawer, Mark W. Shephard, Shepard A. Clough, and William D. Collins. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research*, 113(D13), July 2008.
- [6] Graeme L. Stephens and Thomas J. Greenwald. The earth's radiation budget and its relation to atmospheric hydrology: 1. observations of the clear sky greenhouse effect. *Journal of Geophysical Research*, 96(D8):15311, 1991.
- [7] Kevin E. Trenberth, John T. Fasullo, and Jeffrey Kiehl. Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3):311–324, March 2009.

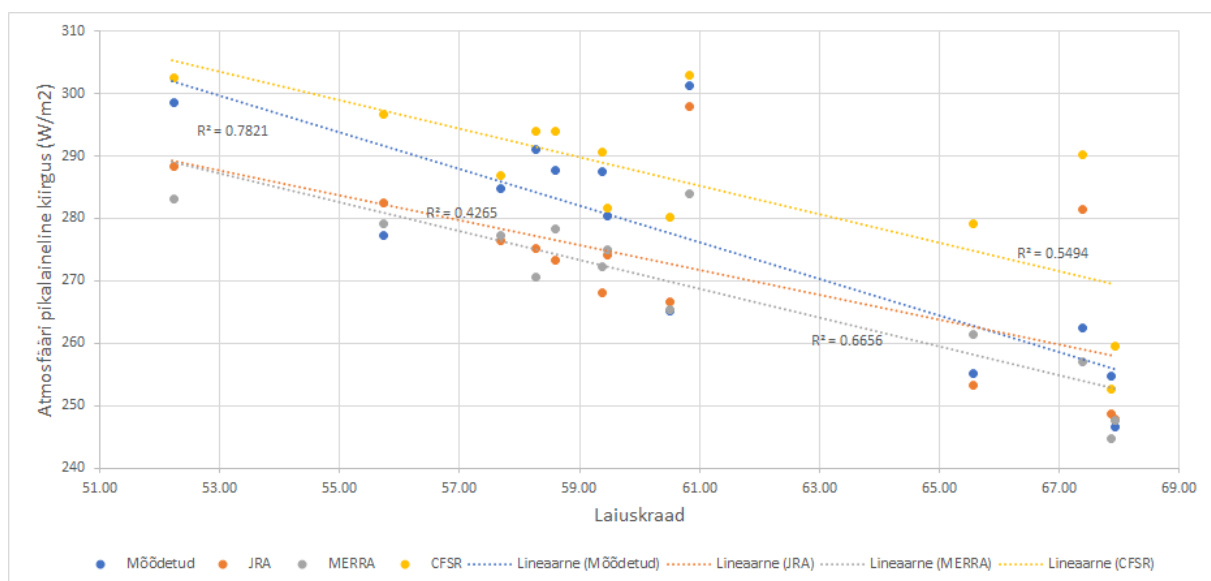
- [8] R. Lindsay, M. Wensnahan, A. Schweiger, and J. Zhang. Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the arctic. *Journal of Climate*, 27(7):2588–2606, April 2014.
- [9] Reinhold Rösemann. *A guide to solar radiation measurement*. Kipp & Zonen, 2011.
- [10] Viivi Russak ja Ingrid Niklus. Longwave radiation at the earth’s surface in Estonia. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 64(4):480, 2015.
- [11] D. P. Dee, M. Balmaseda, G. Balsamo, R. Engelen, A. J. Simmons, and J.-N. Thepaut. Toward a consistent reanalysis of the climate system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(8):1235–1248, August 2014.
- [12] Ayan H. Chaudhuri, Rui M. Ponte, Gael Forget, and Patrick Heimbach. A comparison of atmospheric reanalysis surface products over the ocean and implications for uncertainties in air–sea boundary forcing. *Journal of Climate*, 26(1):153–170, January 2013.
- [13] D. M. Barker, W. Huang, Y-R. Guo, A. J. Bourgeois, and Q. N. Xiao. A three-dimensional variational data assimilation system for mm5: Implementation and initial results. *Monthly Weather Review*, 2004.
- [14] Xiang-Yu Huang, Qingnong Xiao, Dale M. Barker, Xin Zhang, John Michalakes, Wei Huang, Tom Henderson, John Bray, Yongsheng Chen, Zaizhong Ma, Jimy Dudhia, Yongrun Guo, Xiaoyan Zhang, Duk-Jin Won, Hui-Chuan Lin, and Ying-Hwa Kuo. Four-dimensional variational data assimilation for WRF: Formulation and preliminary results. *Monthly Weather Review*, 137(1):299–314, January 2009.
- [15] Yu-Tai Hou, Shrinivas Moorthi, and Kenneth Campana. Parameterization of solar radiation transfer in the ncep models. *NCEP Office Note 441*, 2002.
- [16] S. M. Uppala et al. Gmes climate service: Towards a european knowledge base in support of mitigation and adaptation. *Draft Report European Commission DG ENTR/H.4/CC*, 2011.
- [17] P. Poli, H. Hersbach, D. G. H. Tan, D.P. Dee, J.-J. Thepaut, A. Simmons, C. Peubey, P. Laloyaux, T. Komori, P. Berrisford, Rossana Dragani, Y. Trémolet, E. V. Hólm, M. Bonavita, L. Isaksen, and Mike Fisher. The data assimilation system and initial

- performance evaluation of the ecmwf pilot reanalysis of the 20th-century assimilating surface observations only (era-20c). *ERA Report Series*, (14):59, September 2013.
- [18] Suranjana Saha, Shrinivas Moorthi, Hua-Lu Pan, Xingren Wu, Jiande Wang, Sudhir Nadiga, Patrick Tripp, Robert Kistler, John Woollen, David Behringer, Haixia Liu, Diane Stokes, Robert Grumbine, George Gayno, Jun Wang, Yu-Tai Hou, Hui ya Chuang, Hann-Ming H. Juang, Joe Sela, Mark Iredell, Russ Treadon, Daryl Kleist, Paul Van Delst, Dennis Keyser, John Derber, Michael Ek, Jesse Meng, Helin Wei, Rongqian Yang, Stephen Lord, Huug van den Dool, Arun Kumar, Wanqiu Wang, Craig Long, Muthuvel Chelliah, Yan Xue, Boyin Huang, Jae-Kyung Schemm, Wesley Ebisuzaki, Roger Lin, Pingping Xie, Mingyue Chen, Shuntai Zhou, Wayne Higgins, Cheng-Zhi Zou, Quanhua Liu, Yong Chen, Yong Han, Lidia Cucurull, Richard W. Reynolds, Glenn Rutledge, and Mitch Goldberg. The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8):1015–1058, August 2010.
- [19] Wanqiu Wang, Pingping Xie, Soo-Hyun Yoo, Yan Xue, Arun Kumar, and Xingren Wu. An assessment of the surface climate in the NCEP climate forecast system reanalysis. *Climate Dynamics*, 37(7-8):1601–1620, October 2010.
- [20] D. P. Dee, S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Holm, L. Isaksen, P. Kallberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavolato, J.-N. Thepaut, and F. Vitart. The ERA-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656):553–597, April 2011.
- [21] Shinya KOBAYASHI, Yukinari OTA, Yayoi HARADA, Ayataka EBITA, Masami MORIYA, Hirokatsu ONODA, Kazutoshi ONOGI, Hirotaka KAMAHORI, Chiaki KOBAYASHI, Hirokazu ENDO, Kengo MIYAOKA, and Kiyotoshi TAKAHASHI. The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 93(1):5–48, 2015.

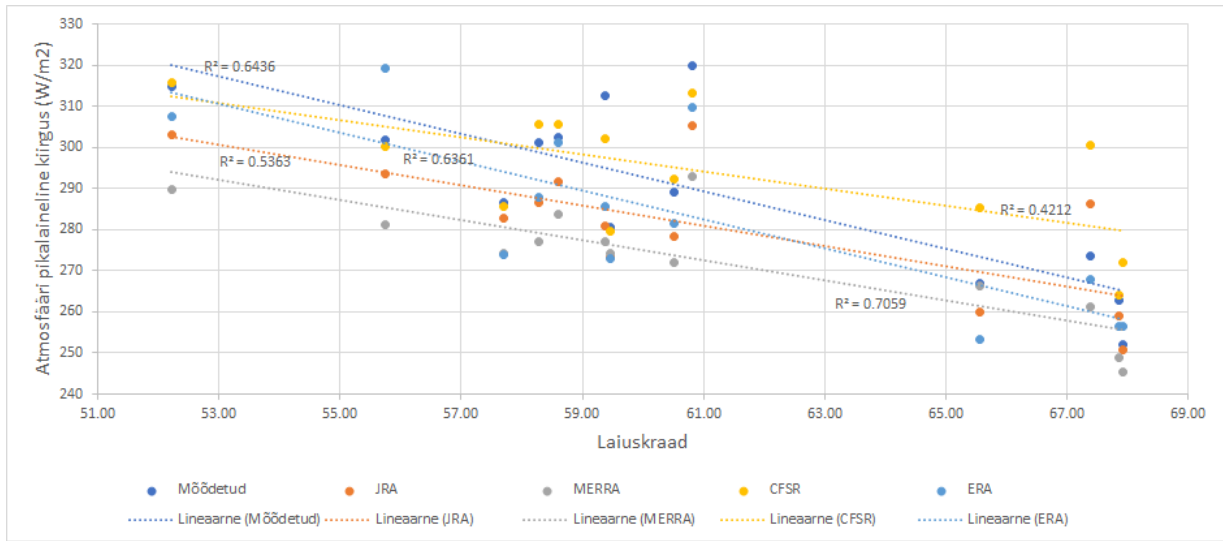
- [22] M. G. Bosilovich, R. Lucchesi, and M. Suarez. Merra-2: File specification. *GMAO Office Note No. 9 (Version 1.1)*, 2016.
- [23] T. J. Troy and E. F. Wood. Comparison and evaluation of gridded radiation products across northern eurasia. *Environmental Research Letters*, 4(4):045008, October 2009.
- [24] Paul A. Dirmeyer, Liang Chen, Jiexia Wu, Chul-Su Shin, Bohua Huang, Benjamin A. Cash, Michael G. Bosilovich, Sarith Mahanama, Randal D. Koster, Joseph A. Santanello, Michael B. Ek, Gianpaolo Balsamo, Emanuel Dutra, and David M. Lawrence. Verification of land–atmosphere coupling in forecast models, reanalyses, and land surface models using flux site observations. *Journal of Hydrometeorology*, 19(2):375–392, February 2018.
- [25] Clara S. Draper, Rolf H. Reichle, and Randal D. Koster. Assessment of MERRA-2 land surface energy flux estimates. *Journal of Climate*, 31(2):671–691, January 2018.
- [26] Ain Kallis. Basic and other measurements of radiation at station Tõravere (2003-01) - (2016-12), 2008.
- [27] Klaus Behrens. Basic measurements of radiation at station Lindenberg (1994-10) - (2012-12), 2010.

# Lisa A

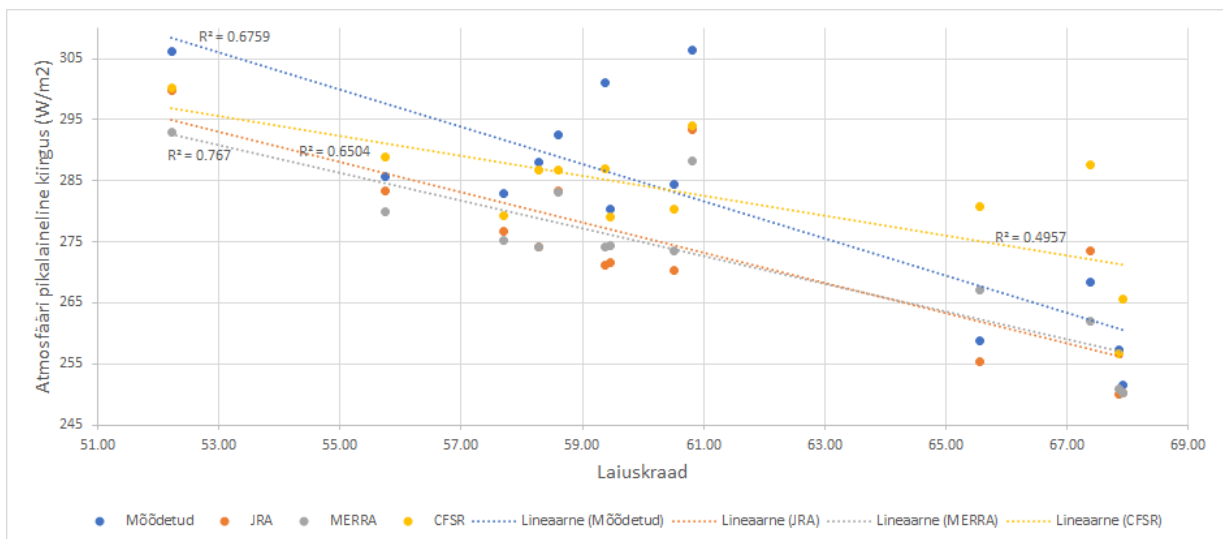
## Kiirguse keskmised väärtused kellaaegade kaupa



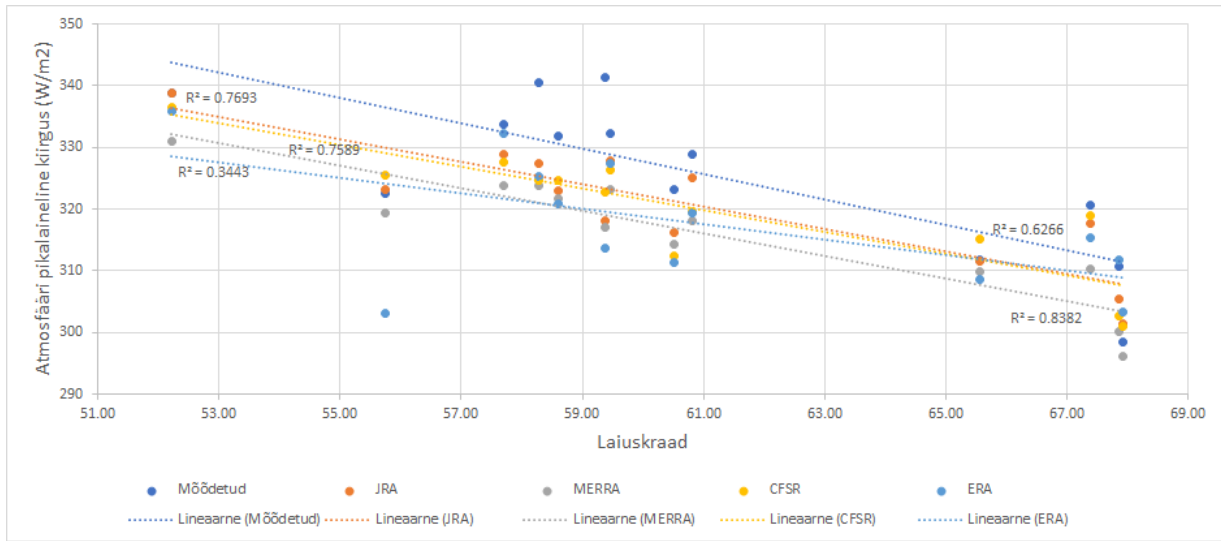
Joonis A.1: Atmosfääri vastukiirguse keskmised väärtused kevadel, 06:00 UTC, sõltuvalt laiuskraadist.



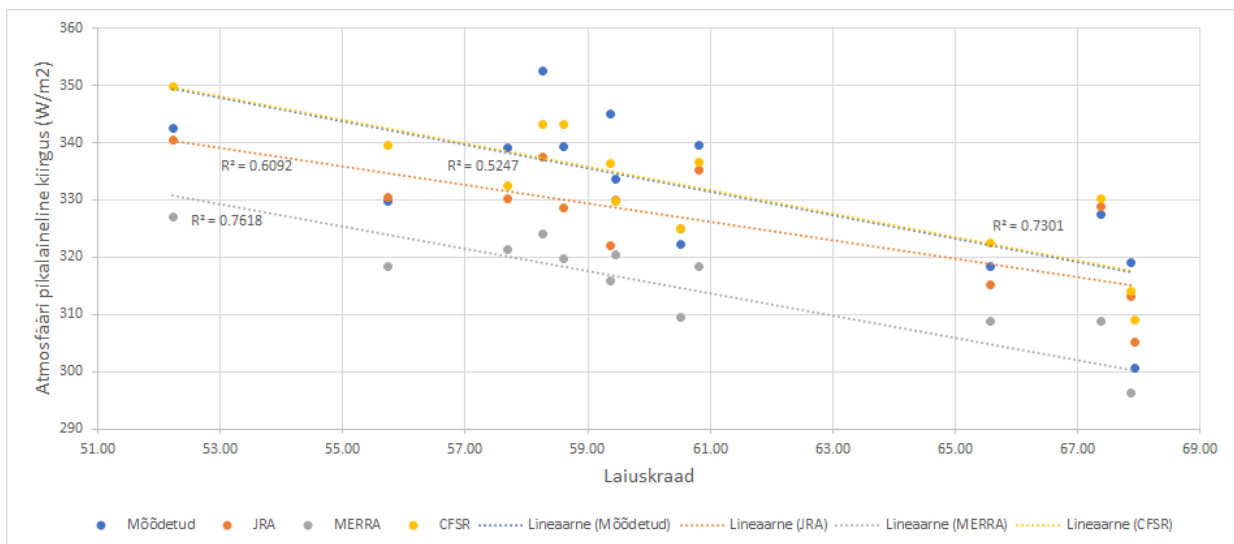
Joonis A.2: Atmosfääri vastukiirguse keskmised väärtused kevadel, 12:00 UTC, sõltuvalt laiuskraadist.



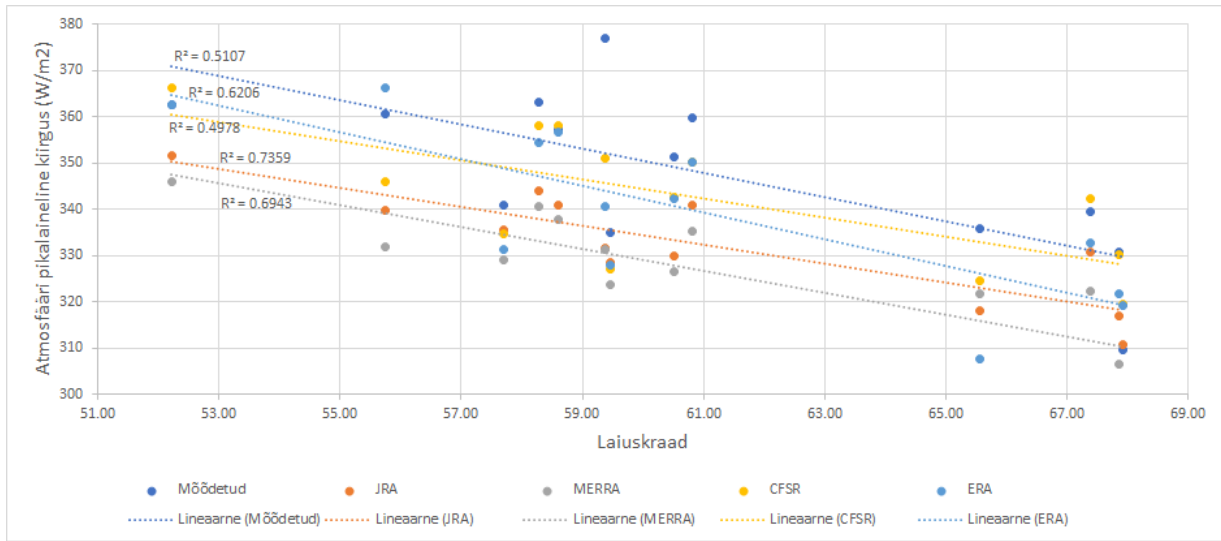
Joonis A.3: Atmosfääri vastukiirguse keskmised väärtused kevadel, 18:00 UTC, sõltuvalt laiuskraadist.



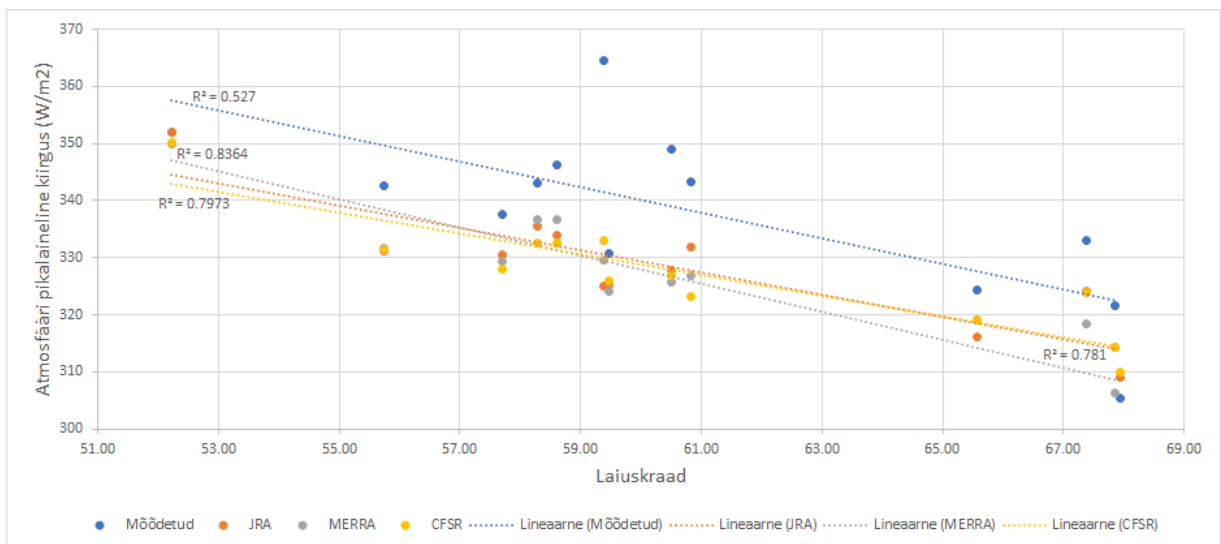
Joonis A.4: Atmosfääri vastukiirguse keskmised väärtused suvel, 00:00 UTC, sõltuvalt laiuskraadist.



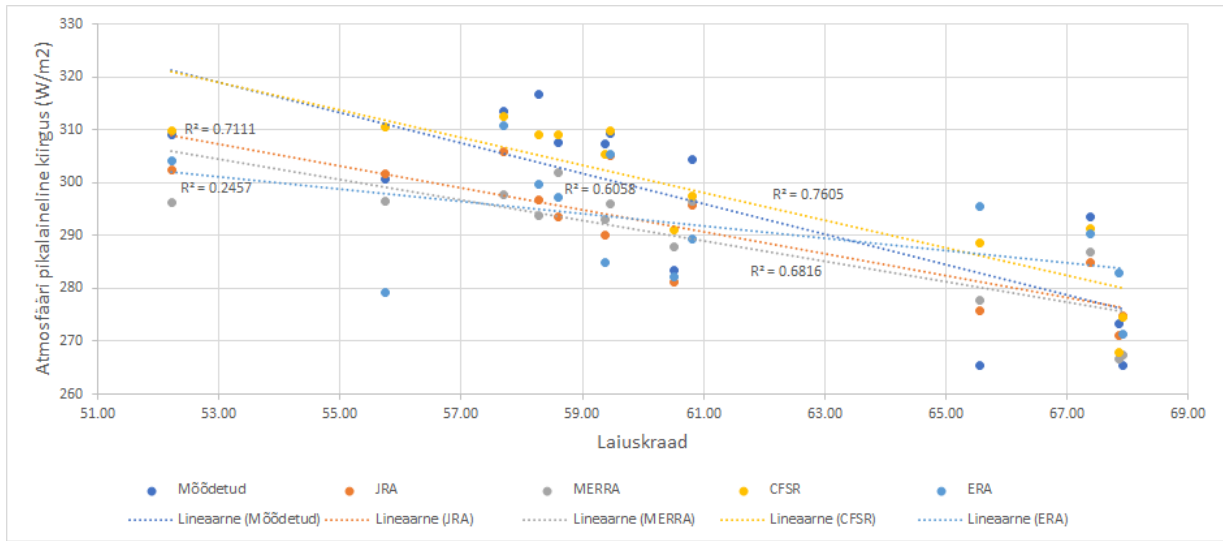
Joonis A.5: Atmosfääri vastukiirguse keskmised väärtused suvel, 06:00 UTC, sõltuvalt laiuskraadist.



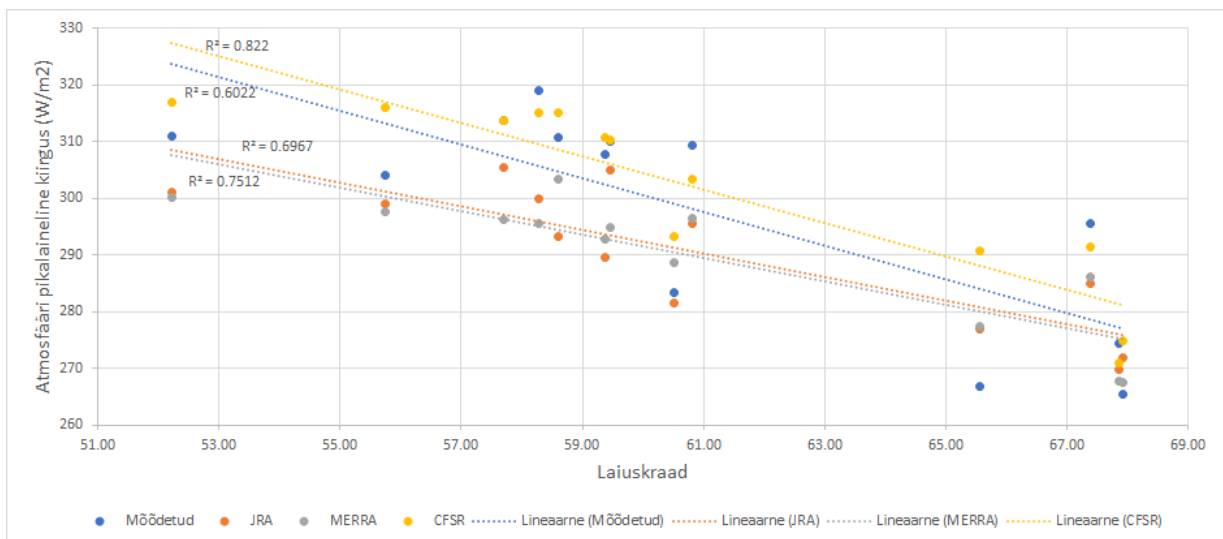
Joonis A.6: Atmosfääri vastukiirguse keskmised väärtused suvel, 12:00 UTC, sõltuvalt laiuskraadist.



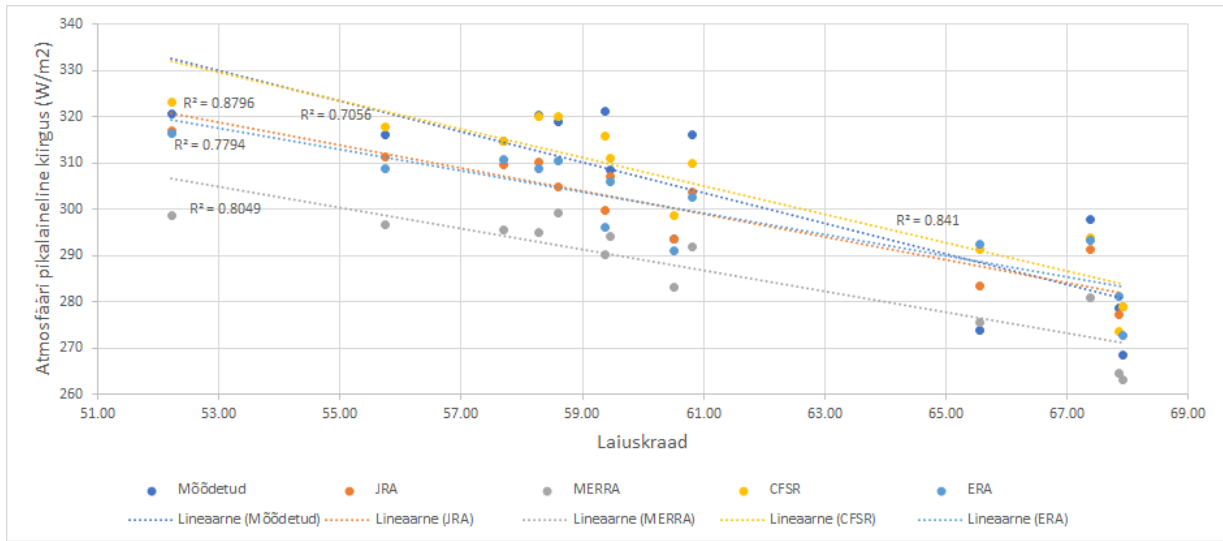
Joonis A.7: Atmosfääri vastukiirguse keskmised väärtused suvel, 18:00 UTC, sõltuvalt laiuskraadist.



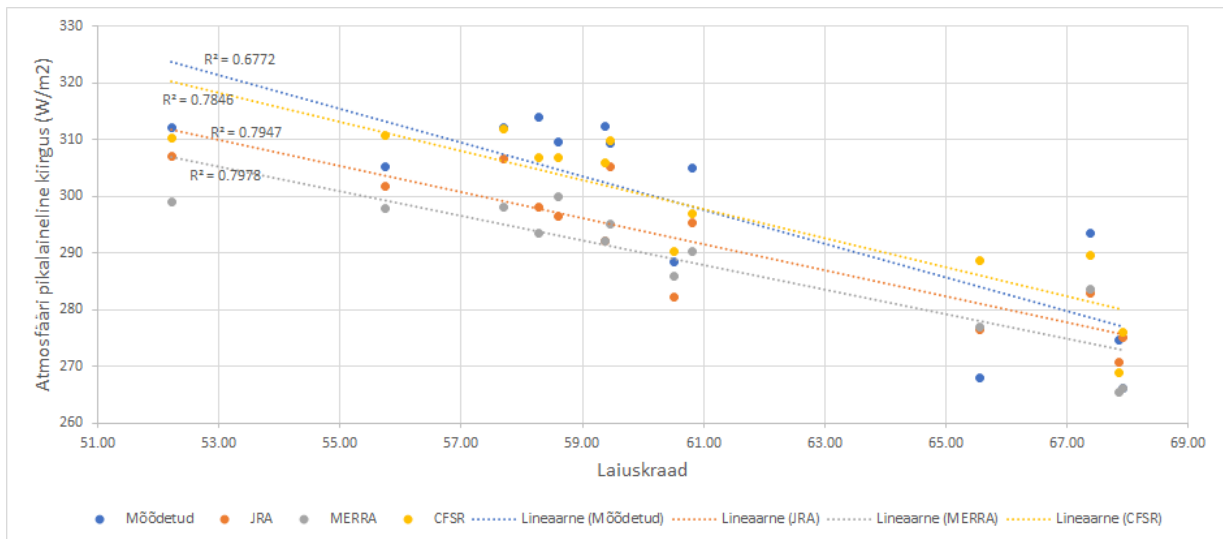
Joonis A.8: Atmosfääri vastukiirguse keskmised väärtused sügisel, 00:00 UTC, sõltuvalt laiuskraadist.



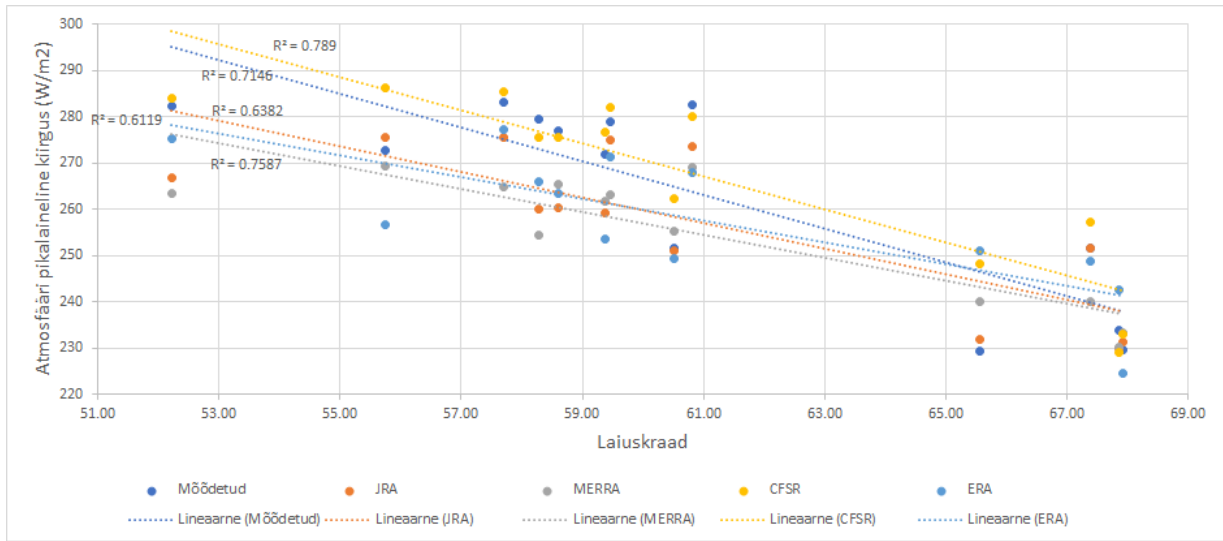
Joonis A.9: Atmosfääri vastukiirguse keskmised väärtused sügisel, 06:00 UTC, sõltuvalt laiuskraadist.



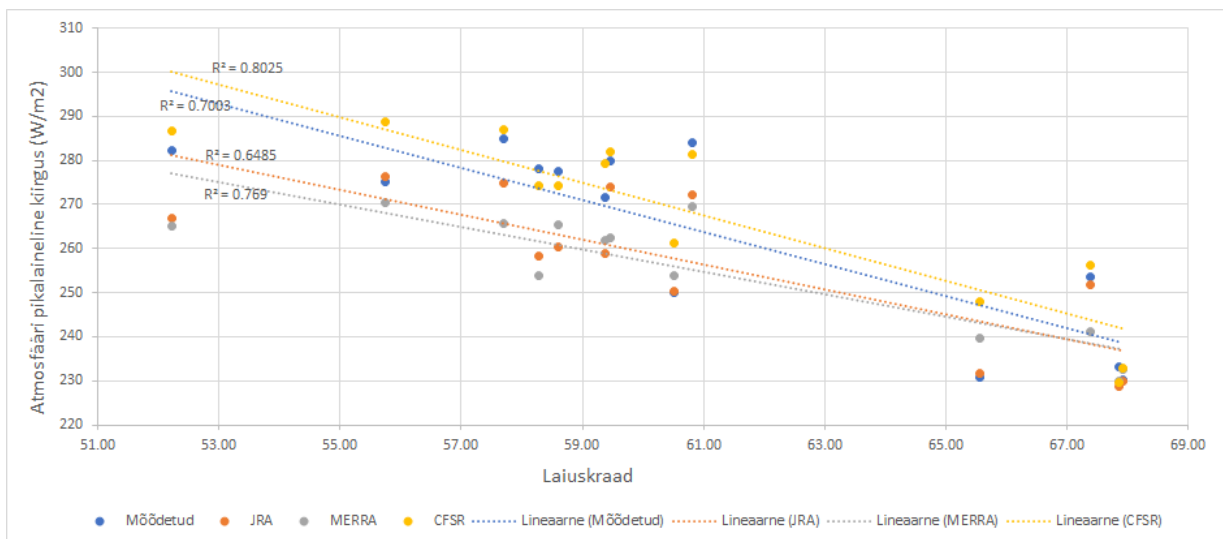
Joonis A.10: Atmosfääri vastukiirguse keskmised väärtused sügisel, 12:00 UTC, sõltuvalt laiuskraadist.



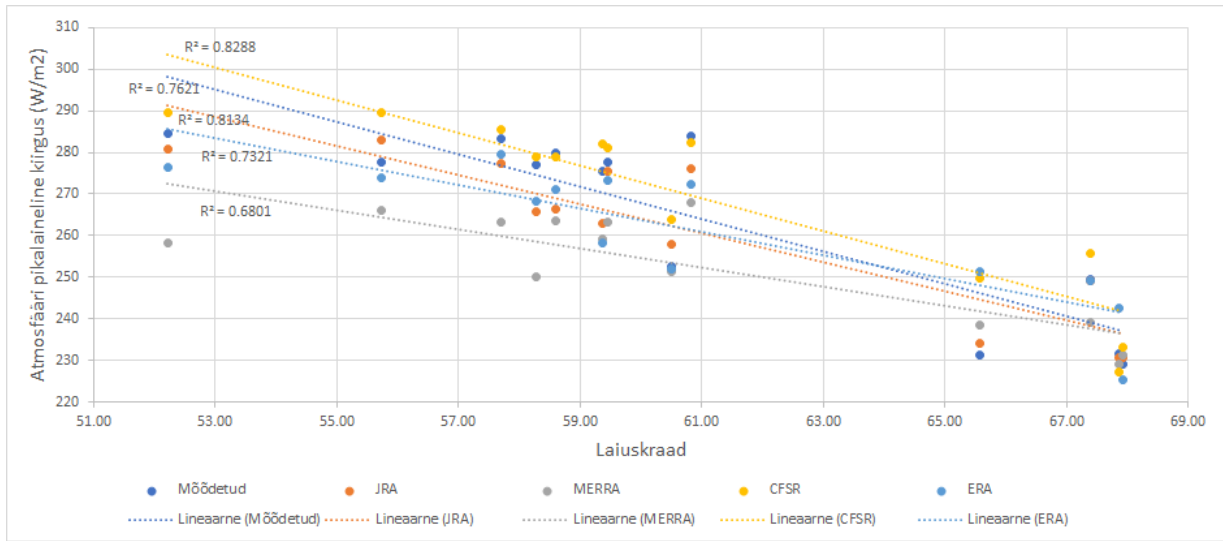
Joonis A.11: Atmosfääri vastukiirguse keskmised väärtused sügisel, 18:00 UTC, sõltuvalt laiuskraadist.



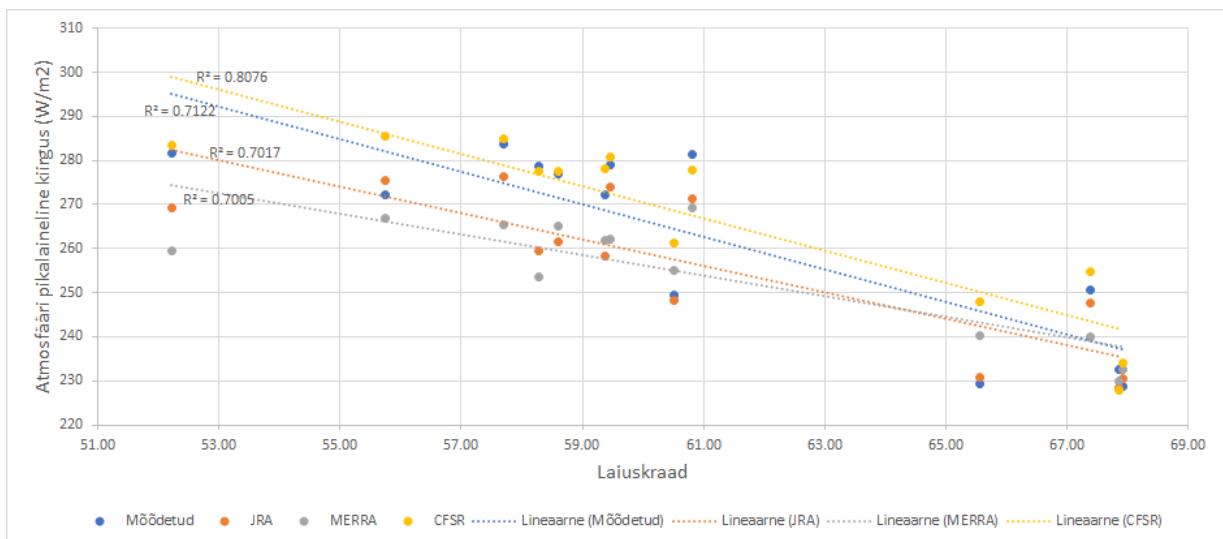
Joonis A.12: Atmosfääri vastukiirguse keskmised väärtused talvel, 00:00 UTC, sõltuvalt laiuskraadist.



Joonis A.13: Atmosfääri vastukiirguse keskmised väärtused talvel, 06:00 UTC, sõltuvalt laiuskraadist.



Joonis A.14: Atmosfääri vastukiirguse keskmised väärtused talvel, 12:00 UTC, sõltuvalt laiuskraadist.



Joonis A.15: Atmosfääri vastukiirguse keskmised väärtused talvel, 18:00 UTC, sõltuvalt laiuskraadist.

## Lisa B

# Jääkstandardhälbe analüüs jaamade ja mudelite kaupa

Tabel B.1: Jääkstandardhälbed Lindenbergis mudelite kaupa

Aastaaeg	Kellaaeg	JRA	MERRA	CFSR	ERA	Möödetud
kevad	0	21,98	24,5	24,93	20,54	40,18
	6	24,25	28,27	27,14		41,36
	12	26,75	28,96	21,69	17,86	37,35
	18	22	23,54	24,55		39,22
suvi	0	18,97	20,75	21,87	17,54	31,42
	6	19,99	25,79	21,77		30,85
	12	19,49	23,47	19,9	15,55	24,84
	18	17,51	17,72	21,1		27,97
sügis	0	23,15	27,15	26,59	21,75	39,62
	6	26,04	28,73	27,44		39,41
	12	29,72	29,84	24,49	19,01	36,61
	18	24,52	26,46	27,16		39,07
talv	0	29,34	32,05	28,98	24,23	42,79
	6	28,94	32,34	28,45		43,61
	12	31,73	34,98	26,87	22,14	41,76
	18	28,4	32,55	29,22		42,6

Tabel B.2: Jääkstandardhäbed Visbys mudelite kaupa

Aastaaeg	Kellaaeg	JRA	MERRA	CFSR	ERA	Mõõdetud
kevad	0	23,63	23,47	25,34	22,57	39,81
	6	24,93	24,44	25,91		39,7
	12	25,83	22,33	24,55	24,75	38,79
	18	23,17	19,87	23,56		38,47
suvi	0	19,74	21,32	21,38	18,42	32,74
	6	21,77	25,98	21,35		32,06
	12	21,07	20,62	19,57	21,94	31,93
	18	19,32	19,19	20,09		30,44
sügis	0	27,63	28,48	24,75	22,5	34,79
	6	28,25	29,44	26,44		35,6
	12	27,83	29,07	23,95	21,41	34,32
	18	27,03	26,22	24,27		33,36
talv	0	29,54	31,63	26,65	24,28	37,3
	6	30,19	32,45	26,08		35,98
	12	30	31,53	26,54	24,59	37,01
	18	28,84	30,82	25,33		36,61

Tabel B.3: Jääkstandardhäbed Tarfalas mudelite kaupa

Aastaaeg	Kellaaeg	JRA	MERRA	CFSR	ERA	Mõõdetud
kevad	0	30,41	28,59	32,64	29,55	43,28
	6	31,22	27,91	32,96		42,4
	12	29,71	26,85	36	24,39	41,63
	18	29,13	27,05	34,19		43,01
suvi	0	28,7	25,88	31,48	29,39	36,68
	6	29,42	27,63	31,09		35,25
	12	25,07	27,12	26,68	23,09	32,4
	18	28,06	24,82	28,24		33,9
sügis	0	33,67	27,42	32,59	29,76	41,59
	6	31,87	28,44	31,48		42,61
	12	35,74	27,95	30,92	26,11	42,83
	18	32,8	27,4	32,05		42,08
talv	0	35,42	29,64	29,47	30,48	42,34
	6	34,73	30,14	27,96		42,8
	12	35,04	28,81	29,13	28,51	42,8
	18	35,46	29,45	28,76		43,03

Tabel B.4: Jääkstandardhäbed Svenska Högarnas mudelite kaupa

Aastaaeg	Kellaaeg	JRA	MERRA	CFSR	ERA	Möödetud
kevad	0	24,38	22,22	25,97	21,48	38,54
	6	24,97	22,95	26,97		39
	12	25,82	21,46	25,17	20,42	37,44
	18	23,79	20,92	23,64		37,85
suvi	0	19,81	20,1	20,51	19,67	32,15
	6	21,54	22,17	21,56		31,91
	12	21,7	21,12	20,44	19,01	30,05
	18	19,52	18,6	19,48		29,96
sügis	0	25,02	26,02	23,57	22	36,64
	6	27,5	28,21	25,51		37,3
	12	28,53	25,53	24,03	21,14	35,69
	18	27,41	26,29	22,2		35,53
talv	0	28,49	29,65	25,7	24,1	37,47
	6	29,57	30,49	25,47		36,92
	12	30,45	28,99	27,21	23,86	37,14
	18	28,64	29,35	25,42		37,46

Tabel B.5: Jääkstandardhäbed Stockholmis mudelite kaupa

Aastaaeg	Kellaaeg	JRA	MERRA	CFSR	ERA	Möödetud
kevad	0	37,08	34,72	38,25	37,61	45,99
	6	37,05	35,42	35,29		46,08
	12	48,19	48,73	41,01	41,78	45,74
	18	46,23	44,04	44,66		48,67
suvi	0	42,55	42,9	44,05	44,25	43,32
	6	41,78	45,02	38,33		41,4
	12	56,99	56,37	48,79	49,44	36,99
	18	53,92	49,91	53,85		39,99
sügis	0	34,38	36,06	33,95	36,52	47,47
	6	34,71	36	31,44		47,21
	12	38,5	41,78	33,48	37,02	44,83
	18	37,15	36,6	36,47		46,11
talv	0	33,7	33,45	30,93	34,55	47,49
	6	34,14	33,37	32,62		47,11
	12	33,91	33,68	31,04	32,73	46,75
	18	34,01	34,17	32,58		48,46

Tabel B.6: Jääkstandardhäbed Norrkopings mudelite kaupa

Aastaaeg	Kellaaeg	JRA	MERRA	CFSR	ERA	Möödetud
kevad	0	25,29	24,38	27,51	23,57	41,77
	6	27,59	26,27	27,77		41,58
	12	29,42	25,73	24,93	18,48	38,54
	18	22,38	22,01	25,89		39,74
suvi	0	21,76	23,09	23,68	22,31	33,42
	6	23,24	27,22	20,63		31,97
	12	24,3	25,19	20,77	18,5	26,13
	18	21,59	21,29	24,85		28,84
sügis	0	26,5	28,6	27,54	25,29	39,96
	6	29,36	29,32	26,92		40,23
	12	29,32	29,17	22,69	20,51	37,34
	18	26,28	25,4	24,86		38,24
talv	0	31,27	30,08	27,64	28,99	41,22
	6	30,84	30,52	27,57		41,47
	12	29,78	29,73	27,6	23,95	40,25
	18	29,97	29,04	27,94		41,87

Tabel B.7: Jääkstandardhäbed Lundis mudelite kaupa

Aastaaeg	Kellaaeg	JRA	MERRA	CFSR	ERA	Möödetud
kevad	0	32,35	33,43	39,32	36,15	46,46
	6	33,52	32,95	39,84		46,1
	12	34,43	36,35	34,9	35,32	42,95
	18	31,87	31,07	37		45,84
suvi	0	22,11	24,27	27,06	32,42	33,16
	6	24,28	27,15	28,12		31,73
	12	28,91	34,54	27,98	22,34	22,54
	18	22,34	22,77	26,11		26,03
sügis	0	26,52	27,22	30,13	36,92	43,05
	6	28,39	28,53	31,67		43,47
	12	28,88	31,26	27,31	24,98	40,89
	18	26,82	25,31	28,4		43,19
talv	0	27,89	26,87	29,78	35,21	45,38
	6	27,59	26,92	30,18		44,68
	12	29,19	27,63	28,3	26,61	42,82
	18	28,03	26,92	30,78		45,22

Tabel B.8: Jääkstandardhåbed Luleas mudelite kaupa

Aastaaeg	Kellaaeg	JRA	MERRA	CFSR	ERA	Möödetud
kevad	0	27,35	33,13	45,55	28,96	44,64
	6	27,24	29,7	42,9		43,76
	12	27,93	27,04	40,81	33,41	42,23
	18	25,73	30,36	44,58		43,53
suvi	0	31,85	31,99	33,98	32,72	43,9
	6	30,27	32,32	32,91		43,19
	12	34,8	32,97	34,12	43,54	37,78
	18	31,38	31,82	33,67		39,58
sügis	0	32,29	33,44	37,38	34,63	52,05
	6	30,62	32,34	34,95		51,21
	12	30,12	29,08	30,95	30,71	49,63
	18	30,16	31,41	33,73		50,66
talv	0	28,11	32,45	35	37,65	46,74
	6	28,09	31,5	34,06		46,57
	12	27,75	30,75	34,6	38,05	47,75
	18	27,39	31,9	34,39		46,65

Tabel B.9: Jääkstandardhåbed Kirunas mudelite kaupa

Aastaaeg	Kellaaeg	JRA	MERRA	CFSR	ERA	Möödetud
kevad	0	27,46	27,13	31,53	26,19	43,82
	6	27,55	28,69	30,7		43,99
	12	26,66	28,21	30,71	24,32	43,63
	18	25,39	26,41	30,83		43,84
suvi	0	26,58	26,88	29,59	25,11	36,91
	6	26,7	32,07	26,15		33,61
	12	25,58	31,04	24,07	20,6	30,1
	18	24,71	26,27	27,98		33,07
sügis	0	26,69	27,65	27,89	30,04	43,75
	6	26,95	27,61	27,06		43,88
	12	26,66	29,44	26,7	26,41	43,54
	18	26,02	27,01	28,13		43,07
talv	0	28,86	27,76	27,82	27,57	42,91
	6	28,69	28,34	28,23		42,2
	12	30,21	28,53	28,32	28,87	43,62
	18	27,97	27,91	26,89		43,26

Tabel B.10: Jääkstandardhäbed Börlanges mudelite kaupa

Aastaaeg	Kellaaeg	JRA	MERRA	CFSR	ERA	Möödetud
kevad	0	25,25	29,42	33,85	24,8	43,1
	6	29,78	27,82	35,06		42,2
	12	32,82	30,53	32,06	25,68	40,48
	18	25,68	26,6	32,04		39,97
suvi	0	24,9	23,47	28,35	24,02	32,95
	6	25,82	26,81	25,4		34,65
	12	28,86	31,31	25,44	20,23	25,82
	18	27,09	29,42	31,17		25,36
sügis	0	36,04	38,47	37,43	32,75	52,24
	6	38,39	39,84	39,77		52,99
	12	38,46	37,79	37,35	33,53	52,02
	18	34,13	34,86	36,64		49,92
talv	0	26,93	30	32,91	23,52	45,01
	6	27,91	28,86	32,16		45,46
	12	27,5	25,77	29,38	21,89	45,1
	18	24,6	29,48	31,45		45,75

Tabel B.11: Jääkstandardhäbed Jokioinenis mudelite kaupa

Aastaaeg	Kellaaeg	JRA	MERRA	CFSR	ERA	Möödetud
kevad	0	24,24	24,35	26,51	47,33	41,2
	6	24,76	27,07	24,28		44,44
	12	29,11	31,02	22,93	33,05	40,44
	18	22,86	25,68	26,66		42,67
suvi	0	21,06	23,47	23,77	43,55	35,05
	6	21,46	29,09	21,2		32,24
	12	22,49	27,43	20,95	31,64	25,28
	18	19,1	23,47	28,7		28,81
sügis	0	29,01	30,4	29,85	37,83	39,58
	6	32,47	31,95	29,06		42,23
	12	26,85	31,14	24,99	31,6	37,49
	18	25,37	27,37	26,96		39,11
talv	0	24,13	27,93	24,25	39,41	47,65
	6	27,31	29,57	26,75		45,98
	12	24,26	29,22	22,85	36,56	46,4
	18	25,67	29,2	23,96		47,08

Tabel B.12: Jääkstandardhübed Sodankylas mudelite kaupa

Aastaaeg	Kellaaeg	JRA	MERRA	CFSR	ERA	Möödetud
kevad	0	24,83	29,54	37,49	22,78	47,33
	6	26,56	29,35	37,05		47,39
	12	26,37	26,84	36,84	20,69	45,45
	18	23,83	26,83	35,35		46,77
suvi	0	25,35	26,47	29,01	22,49	35,97
	6	24,89	29,7	24,22		34,71
	12	22,87	24,18	21,38	17,53	28,87
	18	23,2	25,78	27,14		31,57
sügis	0	28,29	30,31	29,34	23,38	41,1
	6	27,9	30,17	27,29		41,93
	12	28,28	29,06	27,26	22,07	40,96
	18	26,73	29,21	27,44		41,53
talv	0	27,05	29,64	27,23	21,22	44,88
	6	26,2	29,88	26,49		44,31
	12	25,32	31,14	27,21	22,18	46,77
	18	26,19	30,87	26,86		46,28

# **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Annika Velt,

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

**Peamiste atmosfääri järelanalüüsitud pikalainelise kiirguse andmete**

**valideerimine Läänemere regioonis,**

mille juhendajad on PhD Erko Jakobson ja PhD Hanno Ohvril,

- (a) reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - (b) üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
  3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartu, 30. mai 2018. a.