



Regionaalse kliimamudeli Päikese otsekiirguse parametriseerimisskeemi võrdlev analüüs

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Ott-Matis Aun

Üliõpilaskood: 232623YAFB

Juhendaja: Aarne Männik, Meresüsteemide Instituut, vanemteadur, osakonnajuhataja

Õppekava: Rakendus Füüsika

Autorideklaratsioon

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

Autor: Ott-Matis Aun

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Aarne Männik

Sisukord

1	Sissejuhatus	5
2	Teoreetiline taust: modelleerimine ja kiirgusprotsessid atmosfääris	6
2.1	Numbriline ilma- ja kliimamodelleerimine	6
2.2	Regionaalne kliimamodelleerimine	7
2.3	Kiirgus atmosfääris	8
3	Andmed ja meetodika	10
3.1	Astronoomilised karakteristikud	10
3.2	Otsekiirguse parametrizeerimise skeemid	10
3.2.1	<i>Savijärvi originaalskeem</i>	10
3.2.2	<i>HLRADIA realisatsioon</i>	11
3.3	Andmed	12
3.4	Kvaliteedi karakteristikud	13
4	Tulemused	15
4.1	Skeemide võrdlus vaatlusandmetega	15
4.2	Skeemide tundlikkus peegeldunud kiirguse tagasihajumise kordaja suhtes	17
4.3	Skeemide tundlikkus aerosooli hajuvus parameetri suhtes	17
4.4	Skeemide tundlikkus aerosooli neelduvus parameetri suhtes	22
5	Järeldused	25
	Kasutatud kirjandus	26
	Lisa 1- Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	28

Annotatsioon

Käesolevas bakalaureusetöös viiakse läbi võrdlev analüüs päikese otsekiirguse parametrizeerimisskeemi kahe realisatsiooni täpsuse ja parameetrite tundlikkuse kohta Eesti kliimatingimustes. Võrdluse aluseks on selge taeva tunnised otsekiirguse vaatlusandmed Tartu-Tõravere meteoroloogiajaamast perioodil 2011–2020 ning arvutustes kasutatakse AERONETi veeaurusamba andmeid. Mõlema skeemi arvutatud otsekiirgust võrreldi vaatlustega, hinnates keskmist viga, ruutkeskmist viga ja korrelatsiooni vaatlustega. Samuti analüüsiti skeemide tundlikkust peegeldunud kiirguse tagasihajumise kordaja, aerosooli hajuvuse ja aerosooli neelduvuse parameetrite muutuste suhtes.

Tulemused näitavad, et üks skeemidest annab üldiselt täpsemaid tulemusi, kuigi mõlemad skeemid kalduvad otsekiirgust Tõraveres süstemaatiliselt alahindama. Parameetrite tundlikkuse analüüsiga selgitati välja võimalusi skeemide täpsust parandada.

Abstract

Comparitive analysis of direct solar radiation parametrization scheme of a regional climate model

This Bachelor's thesis provides a comparative analysis of the accuracy and parameter sensitivity of two implementations of direct solar radiation parametrization schemes under Estonian climate conditions. The comparison is based on hourly clear-sky direct radiation observations from the Tartu-Tõravere meteorological station in the period of 2011–2020, along with water vapour column data from AERONET. Direct radiation calculated by both schemes was compared against observations, evaluating mean error, root mean square error and correlation with observations. The sensitivity of the schemes to changes in the backscattering coefficient of reflected radiation, aerosol scattering and aerosol absorption parameters was also analysed.

The results show that one of the schemes generally provides more accurate results, although both schemes tend to systematically underestimate direct radiation in Tõravere. The parameter sensitivity analysis identified opportunities to improve the accuracy of the schemes.

1 Sissejuhatus

Päike on Maa kliimasüsteemi kõige olulisem energiaallikas. Selle kiirgav päikesevalgus soojendab maapinda, paneb liikuma õhumassid, aurustab vett ja loob aluse ilmastiku mitmekesisusele. Päikese kiirgus jaguneb atmosfääri läbimisel kaheks: otsekiirguseks, mis jõuab maapinnani ilma vahepealse hajumiseta, ja hajunud kiirguseks, mis on tekkinud atmosfääri komponentide, gaaside, aerosoolide või pilvede poolt valguse hajutamisel. Mõlemad komponendid on olulised, kuid otsekiirgus on eriti määrava tähtsusega, näiteks päikeseenergia tootmisel ja maapinna soojenemise hindamisel. (Hartmann, 2016)

Päikese sissetuleva kiirguse täpne arvutamine on oluline mitmel praktilisel põhjusel: ilmaprognoosid vajavad teadmist, kui soojaks päev kujuneb, kliimamudelid peavad arvestama, kui palju energiat maapind neelab, ja päikesepeakide planeerijad tahavad teada, kui palju elektrit konkreetses kohas toota saab (Abreu u. a., 2023). Eriti oluline on Päikese lühilainelise kiirguse õige arvutamine kliimamudelite juures, sest see määrab suuresti energeetilise tasakaalu ja kliima karakteristikud mudelis. (Rontu u. a., 2017)

Numbrilised atmosfääri mudelid on arvutiprogrammid, mis kirjeldavad hüdrodünaamika võrrandite abil atmosfääri käitumist ja protsesse. Kuna arvutusvõimsus on piiratud, ei ole võimalik iga füüsikalist protsessi algvõrranditest alates täpselt analüütiliselt lahendada. Seetõttu kasutatakse parametriseerimisskeeme, lihtsustatud matemaatilisi valemeid, mis võtavad keeruliste protsesside (nagu kiirgusülekanne, pilvede teke või turbulentsi) olulise mõju kokku ühe või mitme võrrandiga. Kui kiirguse parametriseerimisskeem on ebatäpne, võib mudeli arvutatud temperatuuri üle- või alahinnata, mis omakorda mõjutab sademeid, tuuli ja pilvisust. Sellest tulenevalt mõjutab parametriseerimisskeemide valik ja detailsus otseselt mudeli tulemuste usaldusväärsust. Erinevad skeemid teevad erinevaid lihtsustusi, millest mõned on arvutuslikult kiiremad, teised aga füüsikaliselt detailsemad. Seepärast on oluline kontrollida valitud skeemi tööd kohalike tingimuste kirjeldamisel. (Kalnay, 2012)

Käesoleva töö eesmärk on hinnata kahe päikese otsekiirguse parametriseerimisskeemi töötamist Eesti kliimatingimustes, võrreldes nende arvutatud päikese otsekiirgust Tartu-Tõravere vaatlusandmetega ajavahemikul 2011–2020. Lisaks analüüsitakse skeemide tundlikkust kolme parameetri suhtes: maapinna peegeldunud kiirguse tagasihajumise kordaja, aerosooli hajuvus ja aerosooli neelduvus. Töö piirdub selge taeva tingimustega päevasel ajal, pilvede mõju on teadlikult kõrvale jäetud, kuna pilved toovad sisse täiendava keerukuse (albeedo, pilvepiiskade suurus, veesisaldus), mis muudaks analüüsi väga mahukaks. Need lihtsustused võimaldavad keskenduda just skeemide endi käitumisele ja nende tugevustele ning nõrkustele Eesti tingimustes Päikese otsekiirguse kirjeldamisele.

2 Teoreetiline taust: modelleerimine ja kiirgusprotsessid atmosfääris

2.1 Numbriline ilma- ja kliimamodelleerimine

Numbriline modelleerimine on meetod, mille abil lahendatakse keerukaid füüsikalisi protsesse kirjeldavaid matemaatilisi võrrandeid arvutite abil. Kuna enamik looduses toimuvaid protsesse on kirjeldatavad osatuletistega diferentsiaalvõrranditega, siis nende analüütiline lahendamine on liiga keerukas või võimatu.

Põhiideeks on pidevates protsessides asendada füüsikalised suurused diskreetsete väärtustega kindlates ruumipunktides ja ajahetkedes. Selleks moodustatakse võrk (grid) ja ajasamm (time step), kus igal sammul leitakse võrgustiku punktides diskreetne väärtus.

Atmosfäär on mittelineaarne süsteem, ehk väikesed muutused algtingimustes võivad põhjustada suuri muutusi tulemustes. Atmosfääris toimuva kirjeldamiseks peab jälgima õhumasside liikumist, temperatuuride muutusi, vee liikumist, olekute muutusi ja pinnase protsesse. (Kalnay, 2012) rõhutab, et atmosfääri võrrandid on nii keerukad, et nende analüütiline lahendamine on võimalik ainult väga lihtsustatud juhtudel. Sellest tulenevalt on ilmaproгноos limiteeritud kahe nädala juurde.

Atmosfääri modelleerimiseks kujutatakse võrgustik, kus igal sõlmpunktil on oma väärtused sealsele komponentidele. Sõlmpunktide vaheliseks kauguseks on võrgustiku samm (grid spacing). Mida väiksem samm, seda detailsem mudel aga ka arvutuslikul kulukam. Valitud samm ei pea olema ühtlane, saab võtta tihedamalt kohas, mis pakub rohkem huvi. Vertikaalselt huvitab meid atmosfääri madalamatel kihtidel toimuv rohkem ja seetõttu on võrgustik tihedam. Kliima mudelid on tavaliselt mesoskaalal, kus horisontaalne samm on ühe kuni mitme saja kilomeetri vahel.

Mudeli käivitamiseks on vaja algtingimusi ja ääretingimusi. Algtingimuste saamiseks kasutatakse mõõtmisandmeid ja eelneva prognoosi andmeid, mille abil kirjeldatakse võimalikult täpselt atmosfääri hetkeseisundit. Ääretingimuste abil kirjeldatakse mudeli piiridel toimuvat. Regionaalne mudel võib näiteks saada alale liikuvate õhumasside kohta informatsiooni globaalselt mudelilt.

Paljud atmosfääris toimuvad protsessid toimuvad skaalal, mis on väiksem kui mudeli võrgustiku samm. Neid protsesse ei ole võimalik otseselt lahendada, kuna mudel ei näe neid. Siiski võivad need väikesemastaabilised protsessid oluliselt mõjutada suuremate skaalade arengut. Selle lahendamiseks kasutatakse parametrizeerimist, mille käigus väikesemastaabiliste protsesside kollektiivne mõju suurematele skaaladele kirjeldatakse lihtsustatud matemaatiliste seoste abil.

Päikese lühilainelist ja Maa pikkalainelist kiirgust parametrizeeritakse, kuna täpne arvutus nõuab lainepikkuste kaupa integreerimist terves atmosfääris, mis oleks liiga kulukas. Veel parametrizeeritakse konvektsiooni, pilvede mikrofüüsikat, turbulentsset segunemist ja Maa pinna protsesse.

Vaatamata arvutustehnika kiirele arengule on numbrilisel modelleerimisel alati arvutuslikud piirangud. Kui mudel on liiga detailne, võib ühe prognoosi tegemine võtta liiga kaua aega, et see oleks operatiivses ilmaennustuses kasutatav. Kuigi suuri mudeleid arvutatakse tuhandete protsessorite peal

paralleelselt, ei ole kõiki protsesse võimalik lõputult paralleliseerida. Teatud arvutused (näiteks kiirgusülekanne terves atmosfäärisambas) on oma olemuselt järjestikused. Mida detailsem on mudeli füüsika, seda arvutuslikult kulukam see on. Sellest tulenevalt tuleb leida kompromiss täpsuse ja kiiruse vahel.

2.2 Regionaalne kliimamodelleerimine

RCM-id katavad piiratud ala ning neil on oluliselt kõrgem lahutusvõime võrreldes globaalsete mudelitega. See võimaldab neil näha piirkondlikke protsesse ja kliimaerinevusi, mida globaalne mudel ei suuda. RCM-ide peamine eesmärk on globaalsete kliimamudelite tulemuste ruumiline ja ajaline täpsustamine piirkondlikul tasandil. Seda protsessi nimetatakse dünaamiliseks peenskaleerimiseks (dynamical downscaling). Dünaamiline peenskaleerimine lahendab füüsikavõrrandeid kõrgema lahutusvõimega, võimaldades seega arvestada kohalike füüsikaliste protsessidega.

(Warner, 2010) rõhutab, et RCM-ide vajadus tuleneb asjaolust, et paljud kliimaprobleemid nagu üleujutused, põuad, rannikuerosioon ja põllumajandusliku tootlikkuse muutused nõuavad informatsiooni skaalal, mida globaalmodellid ei suuda otse pakkuda. Näiteks Eesti kontekstis on oluline mõista kohalike kliimaerinevusi ranniku ja sisemaa vahel, need erinevused on mõõdetavad vaid piisavalt kõrge lahutusvõimega mudeliga.

RCM vajab ääritingimusi, mis kirjeldavad mudeli piiridel toimuvaid õhumasside, niiskuse, soojuse ja impulsi liikumist alale ja sealt väljumist. Protsessi, kus regionaalmodell saab ääritingimused globaalmodellilt, nimetatakse pesastamiseks (nesting). (Kalnay, 2012) eristab kolme pesastamise tüüpi: ühesuunaline, kahesuunaline ja mitmetasandiline. RCM-i tingimused peavad olema füüsikaliselt konsistentsed globaalmodeli tingimustega, muidu tekivad piirialadel kunstlikud efektid, mis võivad levida kogu mudelialasse ja rikkuda tulemusi.

RCM suudab arvestada lokaalsete tagasisidemeid, näiteks metsade, järvede ja linnade mõju kohalikele kliimale. Kõrgema lahutusvõimega on võimalik protsesse paremini esitada ning saada täpsemaid tulemusi.

Ääritingimuste ja sisemise lahenduse mittevastavus võib tekitada võltsitud protsesse piirialadel. Pikade simulatsioonide korral võib RCM-i kliima kalduda eemale nii globaalmodeli kui ka tegeliku kliima käitumisest.

(Syed u. a., 2019) leidsid, et CORDEX raamistikus teostatud uuringutes mudeli tulemused temperatuuri osas on tundlikumad simulatsioonidomeeni valikule kui lateraalsete piiritingimuste erinevustele. See näitab, et RCM-i seadistus on vähemalt sama oluline kui globaalmodeli kvaliteet.

RCM-ide kontekstis on kiirgusparametriseerimine eriti oluline. Kogu atmosfääri ja maapinna energia bilanssi määrab suuresti päikese lühilaineline kiirgus, mis RCM-ides arvutatakse parametriseerimisskeemidega. RCM-i kõrgem lahutusvõime võimaldab paremini esitada pilvede struktuuri, kuid pilvede mikrofüüsika ja nende mõju kiirgusele on endiselt parametriseeritav probleem.

2.3 Kiirgus atmosfääris

Kiirgus on energia ülekandumine elektromagnetlainete kaudu, mis ei vaja levimiseks keskkonda. See tähendab, et Päikeselt Maale jõudev energia läbib peaaegu vaakumilist kosmilist ruumi just kiirguse näol. Kiirgust iseloomustab lainepikkus või sagedus, mis on omavahel seotud valguse kiirusega. Mida lühem on lainepikkus, seda suurem on footoni energia. Atmosfäärifüüsika seisukohalt jagatakse kiirgus tavaliselt kahte suurde kategooriasse lühilaineline kiirgus (SW) ja pikalaineline kiirgus (LW). SW lainepikkus on vahemikus $0.1 - 4 \mu\text{m}$, mis on päikeseenergia, see on atmosfääri ja maapinna soojenemise peamine allikas. LW, mille lainepikkus on suurem kui $4 \mu\text{m}$ on soojuskiirgus, see on energia, mida Maa ja atmosfäär kiirgavad tagasi kosmosesse. Kliimasüsteemi energia bilanss sõltub nende kahe energia voo omavahelisest suhtest. (Russak und Kallis, 2003)

Päikese spekter sarnaneb umbkaudu musta keha spektriga temperatuuril $\sim 6000\text{K}$. Solaarkonstant S_0 on Päikese kiirgusevoog (võimsus pinnauhiku kohta) Maa orbiidi keskmisel kaugusel (1 astronoomiline ühik) atmosfääri ülemisel piiril, risti päikesekiirtega (Hartmann, 2016). Selle kaasaegne väärtus on ligikaudu $S_0 = 1361\text{W m}^{-2}$ (Kopp und Lean, 2011). Solaarkonstandi väärtus ei ole konstantne, selle variatsioon sõltub Päikesetsüklitest ja Maa orbiidi ekstsentrilisusest. Soojuslikult kasutatav päikeseenergia sõltub palju rohkem päikese kõrgusest kui solaarkonstandi väikesest aastasest varieerumisest.

Kui kiirgus läbib atmosfääri, võib temaga toimuda neli erinevat protsessi: neeldumine, hajumine, peegeldumine ja läbipaistmine. Neeldumisel kandub kiirguse energia üle atmosfääri molekulidele või osakestele, mis saavad sellest soojusenergiat. Erinevad gaasid neelavad erinevatel lainepikkustel, näiteks osoon neelab enamik kiirgust, mis on alla $0.3 \mu\text{m}$. Hajumine on protsess, mille käigus kiirguse suund muutub, kuid energia ei neeldu. Peegeldumine toimub piirpinnal, kus muutub keskkonna murdumisnäitaja. Atmosfääris peegelduvad kiirgused: pilvede ülemisel pinnal, maapinnal ning aerosoolide ja gaaside tiheduspiiridel. peegeldunud valgus levib kindlas suunas, kuid hajunud valgus levib kõikides suundades. Läbipaistmine kirjeldab seda osa kiirgusest, mis läbib keskkonda ilma neeldumise, hajumise või peegeldumiseta. Otsekiirguse puhul on tegu just selle osaga, mis on säilitanud oma algse suuna ja jõuab läbipaistva atmosfääri korral muutumatuna maapinnale. Kõik need protsessid määravad, kui palju tulevast kiirgusest neeldub ja palju kiirgub tagasi kosmosesse. (Russak und Kallis, 2003)

Kiirgusülekanne protsessi täpne kirjeldamine toimub kiirgusülekanne võrrandi (Radiative Transfer Equation) abil. See annab teada, kui palju kiirgust jõuab maapinnale ja palju neeldub. Atmosfääri gaaside neeldumisjooned on kitsad ning neid on tuhandeid, mistõttu täpne lahendamine eeldaks integreerimist üle sadade tuhandete spektriintervallide. Lisaks sellele võib kiirgus enne atmosfäärist lahkumist või maapinnale jõudmist hajuda mitu korda eri suundades, mis omakorda nõuaks kõikide võimalike levimissuundade arvestamist. (Kalnay, 2012)

Erinevalt SW-st, mis tuleb väljastpoolt, kiirgab iga keha, mille temperatuur on üle absoluutse nulli, ise LW-i. Reaalses atmosfääris on maapinna temperatuur kõrgem, kuna suure osa kiiratud LW-d neeldub tagasi atmosfääris ja osa kiiratakse tagasi maapinnale. Tulenevalt sellest on LW ülekanne keerulisem kui SW oma, sest kogu atmosfäär kiirgab ise LW-d. (Hartmann, 2016) on välja toodud, et Päiksel tuleb keskmiselt 340W m^{-2} , millest peegeldub tagasi 100W m^{-2} , neeldub 80W m^{-2} atmos-

fääris ja maapinda neeldub 160W m^{-2} . Samas Maa pinnalt kiirgab LW-d 376W m^{-2} atmosfääri ja latentse soojusega 88W m^{-2} . Atmosfäärist kiirgab LW-d Maa pinnale tagasi 345W m^{-2} ja 239W m^{-2} tagasi kosmosesse. Nendest arvudest on näha, et Maa talletab väikese osa saadud energiast, see on kasvuhooneefekti olemus

Kiirgusvoogude koosmõju maapinnal on oluline kliimaprotsesside mõistmiseks. Maapinna netokiirgus R_n on:

$$R_n = SW \downarrow - SW \uparrow + LW \downarrow - LW \uparrow,$$

kus: $SW \downarrow$ on lühilaineline kiirgus maapinnale, $SW \uparrow$ on maapinnalt peegeldunud lühilaineline kiirgus, $LW \downarrow$ on atmosfääri pikalaineline kiirgus maapinnale, $LW \uparrow$ on maapinnalt lähtuv pikalaineline kiirgus. (Mallick u. a., 2015)

3 Andmed ja meetodika

3.1 Astronoomilised karakteristikud

Otsekiirgus parametrizeerimisskeemide oluliseks sisendiks on Päikese kiirgusevoog atmosfääri ülemisel piiril, mis sõltub nii Maa orbiidi ekstsentrilisusest kui ka päikese seniitnurgast θ . Päikese kiirgusevoog S arvestatakse aastase muutusega vastavalt Savijärvi (1990) soovitusel:

$$S = S_0 \cdot \left(1 + 0.03422 \cos \left(\frac{d \cdot 2\pi}{365} \right) + 0.00128 \cdot \sin \left(\frac{d \cdot 2\pi}{365} \right) \right) \quad (\text{W m}^{-2}),$$

kus d on päeva number alates 1. jaanuarist. Selline lihtne harmooniline lähendus annab solaarkonstandi täpsusega umbes 1 W m^{-2} .

Päikese seniidinurk θ (või alternatiivselt päikese kõrgus h , kus $\sin h = \cos \theta$) sõltub laiuskraadist ϕ , deklinatsiooninurgast δ ja kohalikust päikeseajast t . Deklinatsiooninurk arvutatakse ligikaudu:

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \cos \left(\frac{(d - 172) \cdot 2\pi}{365} \right).$$

Päikese seniidi koosinus on:

$$\cos \theta = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \left(\frac{(t - 12) \cdot 2\pi}{24} \right).$$

Saadud päikesekiirguse voo ja seniidi koosinuse korrutisega leiame atmosfääri ülemisel piiril horisontaalselt pinnale langeva kiirgusevoog $S \cos \theta$. See on aluseks parametrizeerimisskeemides otsekiirguse arvutamiseks. (Savijärvi, 1990) (Rontu u. a., 2017)

3.2 Otsekiirguse parametrizeerimise skeemid

Kiirgusülekanne täpne lahendamine lainepikkuste kaupa on arvutuslikult väga kulukas ega sobi operatiivsetesse ilmaja kliimamudelitesse. Seetõttu on vaja lairibalisi parametrizeerimisskeeme, mis koondivad kogu päikesespektri ühte või paari võrrandisse ning annavad piisava täpsusega tulemuse märksa väiksema arvutuskooormusega.

3.2.1 Savijärvi originaalskeem

Savijärvi (1990) töö „Fast Radiation Parameterization Schemes for Mesoscale and Short-Range Forecast Models“ on üks esimesi süstemaatilisi katseid luua väga kiireid, kuid füüsikaliselt põhjendatud kiirgusskeeme mesomõõtkava mudelite jaoks. Tema lähenemine on lairibaline kogu lühilaineline spekter koondatakse ühte valemisse, mis annab globaalkiirguse horisontaalsele pinnale selge taeva tingimustes.

Savijärvi globaalkiirguse valem maapinnal (tema artikli võrrand 16.) on:

$$S^\downarrow = S \cos \theta \left[1 - 0.024(\cos \theta)^{-0.5} - a_a \cdot 0.11 \left(\frac{u}{\cos \theta} \right)^{0.25} - a_s \left(\frac{0.28}{1 + 6.43 \cos \theta} - 0.07\alpha \right) \right], \quad (1)$$

kus: S on Päikese kiirgusevoog atmosfääri ülemisel piiril ($W m^{-2}$), θ on päikese seniidinurk, $\cos \theta$ on Päikese seniidi koosinus, u on sadestunud vee hulk (cm), a_a on aerosooli neeldumise parameeter, a_s on aerosooli hajumise parameeter, α on Maapinna albeedo.

$S \cos \theta$ on Päikese energiavoog horisontaalsele pinnale atmosfääri puudumisel. Maksimaalne võimalik väärtus, millest kõik järgnevad liikmed lahutatakse.

$0.024(\cos \theta)^{-0.5}$ kirjeldab molekulaarset hajumist ja osooni neeldumist. See on parandus, mis sõltub ainult päikese kõrgusest. Mida madalam on päike, seda suurem on selle liikme absoluutväärtus. Kui vaja täpsemat tulemust, saab osooni kihi paksuse asemel 0.024 asendada $0.024 + (x - 0.35) \cdot 0.03$ -ga, kus x on osooni kihi paksus (cm).

$a_a \cdot 0.11(u/\cos \theta)^{0.25}$ kirjeldab veeauru, CO_2 ja O_2 neeldumist troposfääris.

$a_s \left(\frac{0.28}{1 + 6.43 \cos \theta} - 0.07\alpha \right)$ kirjeldab aerosoolide hajumist. Kus viimane osa 0.07α kirjeldab peegeldunud kiirguse tagasihajumist, 0.07 saab vajadusel muuta ~ 0.05 merel, 0.2 maapinnal, 0.7 lume korral.

Savijärvi (1990) rõhutab, et aerosoolide parameetrid sõltuvad tugevalt asukohast.

3.2.2 HLRADIA realisatsioon

HLRADIA (Rontu u. a., 2017)(HIRLAM RADIATION scheme) on Savijärvi pärandi otsene edasiarendus, mida on aastakümnete jooksul täiustanud mitmed autorid. Seda kasutatakse HIRLAMi ja HARMONIE-AROME RCMides, mis on operatiivses kasutuses paljudes Euroopa riikides, sealhulgas Eestis.

HLRADIA ei ole mitte ainult lühilaineline skeem, vaid terviklik kiirgusskeem, mis arvutab nii lühi- kui pikalainelist kiirgust nii selge kui pilvise taeva korral. Käesolevas töös keskendume ainult lühilainelisele osale.

Kõige olulisem erinevus Savijärvi (1990) lihtsate a_a ja a_s parameetrite ja HLRADIA vahel on aerosoolide käsitluses: Savijärvi on need empiirilised parameetrid valitud piirkonna järgi, HLRADIA-s (Rontu u. a., 2017) on aerosoolide omadusi hinnatud GADS (Global Aircraft Data Set)/OPAC (Optical Properties of Aerosols and Clouds) andmebaasi põhjal.

HLRADIA-s on GADS/OPAC andmed keskmistatud lühilainelise spektri ulatuses kasutades spektraal-

seid kaalusid, mis on arvatud libRadtran/DISORT tarkvara abil.

$$S^\downarrow = S \cos \theta \left[1 - \frac{0.024 + (O_{3\text{tot}} - 0.35) \cdot 0.03}{\sqrt{\cos \theta}} - 0.125 a_a \left(\frac{u}{\cos \theta} \right)^{0.25} - a_s \frac{p_s}{p_{\text{ref}}} \left(\frac{0.28}{1 + 6.43 \cos \theta} - 0.056 \alpha \right) \right], \quad (2)$$

kus: S on Päikese kiirgusevoog atmosfääri ülemisel piiril (W m^{-2}), θ on päikese seniidinurk, $O_{3\text{tot}}$ on osooni samba üldsisaldus (cm), u on sadestunud vee hulk (cm), p_s on pinna õhurõhk, $p_{\text{ref}} = 1013.15$ hPa, α on pinna albedo, a_a on aerosoolide neeldumise parameeter, a_s on aerosoolide hajumise parameeter.

HLRADIA skeemis kasutatud lisaparameetrid, mis Savijärvi omas ei ole, on võetud konstantidena, kus p_s on võrdne p_{ref} ja $O_{3\text{tot}} = 320$ DU (1 Dobson = 0.001 cm), mis on Eesti tingimustes umbes aastakesmine. Sellega HLRADIA skeem küll kaotab oma täpsuses, aga on sellest Savijärvi skeemiga sarnasem ja paremini võrreldav. HLRADIA skeemis on muutunud peegeldunud kiirguse tagasihajumistegur 0.056-le.

(Rontu u. a., 2017) juhivad tähelepanu, et HLRADIA skeemi arendamisel on arvestatud just RCMide eripäradega: "Mesomöötkava mudelites võib lihtsama skeemi sagedasem väljakutsumine olla kasulikum kui spektraalselt detailse, kuid harvemini arvatud skeemi kasutamine".

3.3 Andmed

Peatüki eesmärk on kirjeldada töös kasutatud andmeid, nende töötlemise põhimõtteid ning võrdlusmetoodikat, mille abil hinnatakse kahe parametrizeerimisskeemi Savijärvi (1990) ja HLRADIA (Rontu u. a., 2017) täpsust Eesti tingimustes. Võrdluse aluseks on Tartu-Tõravere meteoroloogiajaama vaatlusandmed ning AERONETi NASA (2026) mõõtmised. Kogu andmetöötlus on automatiseeritud spetsiaalselt selleks otstarbeks Pythonis realiseeritud koodiga, mis teostab andmete filtreerimist, tunnistkeskmistamist ning parameetrite tundlikkuse analüüsi.

Tartu-Tõravere meteoroloogiajaam asub Eestis Tõravere alevikus, $58^\circ 16' \text{N}$, $26^\circ 28' \text{E}$, kõrgus 70 m merepinna. Jaam kuulub Keskkonnaagentuuri haldusalasse (Keskkonnaagentuur, 2026). Töös kasutatakse jaamast pärinevaid tunnise lahutusega kiirguse andmeid (W m^{-2}), Päikese paistmise kestus sel tunnil (min) ja pilvisus oktandites (0-8).

AERONET (Aerosol Robotic Network) on globaalne maapealne aerosoolide seirevõrk, mis koosneb standardsete fotomeetritega varustatud jaamadest. Töös kasutatakse Tõravere AERONETi jaama andmeid, mis asuvad samas piirkonnas kui meteoroloogiajaam, tagades seega aerosooliomaduste horisontaalse esinduslikkuse.

AERONETi andmete eripära on nende ebaühtlus mõõtmised ei ole alati pidevad, vaid sõltuvad ilmastikutingimustest ja seadme hooldusest. Seetõttu kasutatakse töös kuu keskmisi väärtusi, mis on arvatud kõigi saadaolevate mõõtmiste põhjal antud kuu jooksul.



Joonis 1. Tartu-Tõravere vaatlusjaama asukoht, kus asub meteoroloogiajaam ja AERONETi jaam.

AERONETist saadud andmetega leitakse u ehk sadestuva vee sammas atmosfääris (cm).

Kuna AERONETi NASA (2026) andmed on ebaühtlase ajalis-paiknemisega ning kiirguse parametriseerimisskeemides on aerosooliparameetrid enamasti ajaliselt keskmistatud, on kuu keskmiste kasutamine meetodiliselt õigustatud.

Töös kasutatakse Eesti kiirgus teadmikus (Russak und Kallis, 2003) esitatud Tartu-Tõravere piirkonna kuude keskmisi albeedo väärtusi ajavahemikust 1955-2000. Albeedo väärtused on teisendatud protsendist kümnendmurruks.

3.4 Kvaliteedi karakteristikud

Vaatluste ja skeemide tulemuste võrdlemiseks arvutatakse kolm statistilist karakteristikut. Keskmine viga (ME) näitab skeemi süstemaatilist viga:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_{\text{mod},i} - S_{\text{obs},i}),$$

kus S_{obs} on vaatlus tulemus ja S_{mod} on skeemi tulemus.

Ruutkeskmine viga (RMSE) annab hinnangu prognoosi koguvigade suuruselt:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_{\text{obs},i} - S_{\text{mod},i})^2}.$$

Korrelatsioonikordaja R iseloomustab skeemi ja vaatluse vahelist lineaarset seost:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{\text{obs},i} - \overline{S_{\text{obs}}})(S_{\text{mod},i} - \overline{S_{\text{mod}}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_{\text{obs},i} - \overline{S_{\text{obs}}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_{\text{mod},i} - \overline{S_{\text{mod}}})^2}},$$

kus $\overline{S_{\text{obs}}}$ on vaatluste keskmine tulemus ja $\overline{S_{\text{mod}}}$ on skeemi keskmine tulemus.

Lisaks on uuritud vaadeldavate skeemide peegeldunud kiirguse tagasihajumise kordaja ja aerosooli parameetrite tundlikkust. Aerosooli kordajateks on võetud skeemides olevad algsed väärtused ja Savijärvi (1990) välja pakutud väärtust 0.2, mis peaks sobima maismaa tingimustega paremini. Aerosooli hajuvus ja neelduvus parameetriteks on võetud aluseks ka Savijärvi (1990) töös välja toodud erinevat keskkondadele sobilikud väärtused.

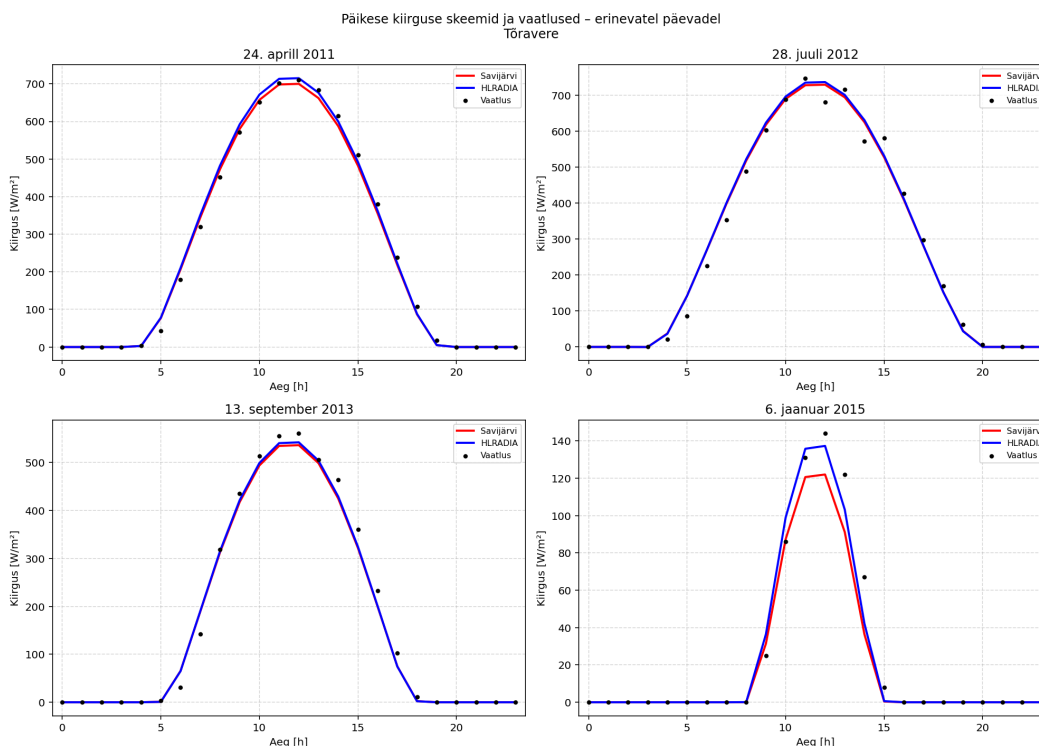
4 Tulemused

Antud töös rakendatakse eelnevalt kirjeldatud Savijärve originaali (1) ja HLRADIA realisatsiooni (2) kiirguskeeme. Nende skeemide realiseerimiseks on koostatud Pythoni programm, millele vajalikute parameetrite sisestamisel saame vastavate skeemide tulemused.

Kirjutatud kood filtreerib vaatlusandmetest välja selge taeva juhtumid, kus vaadeldava tunni jooksul ja selle ümbruses oleval ajal on taevast pole pilvi ja Päike paistab kogu vaatluse ajal. Kuna vaatlusandmed on tunni keskmised on ka skeemide tulemused võetud tunni keskmiselt. Skeemide puhul on võetud tunni kohta 12 viie minutise vahega tulemust ja nendest saadud keskmine.

4.1 Skeemide võrdlus vaatlusandmetega

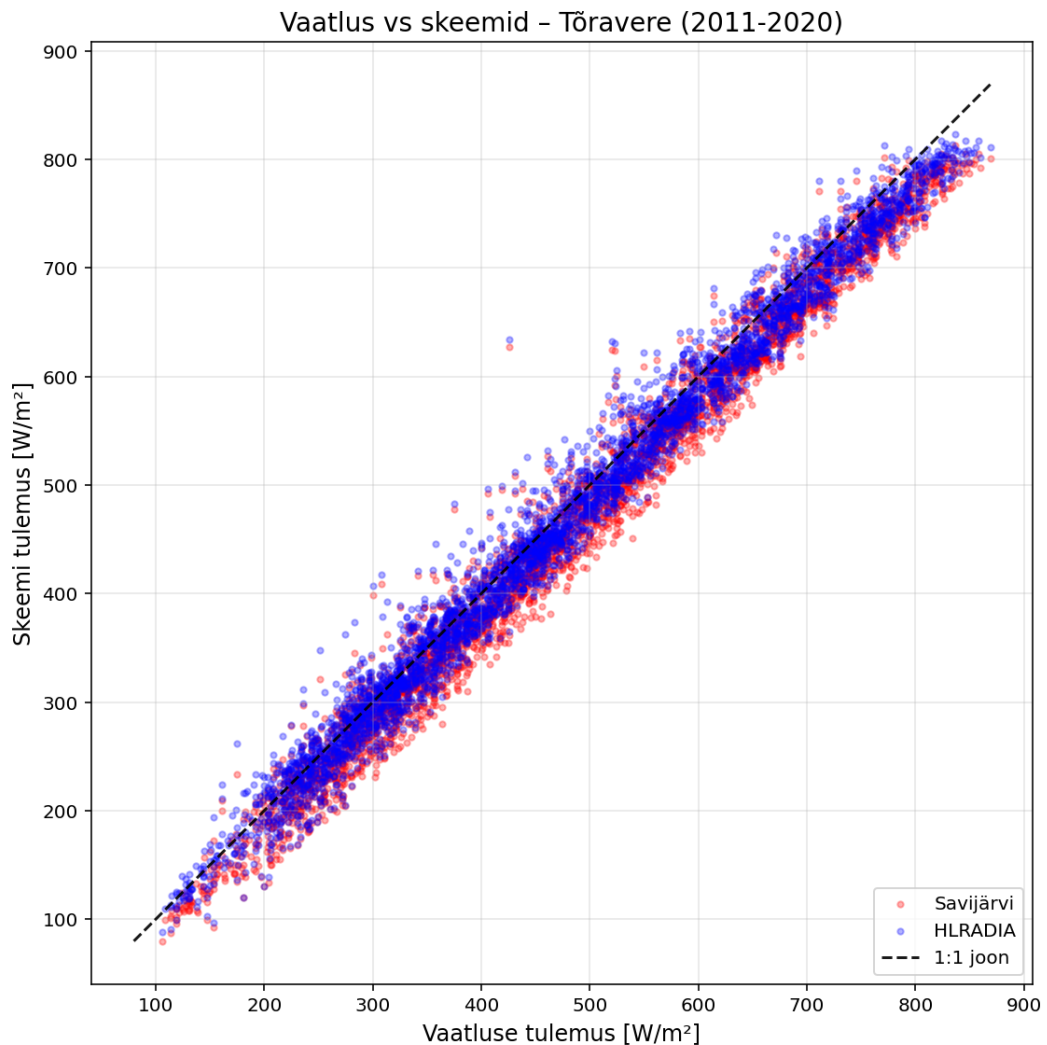
Parametriseerimiskeemide algtingimuste korrektsuse demonstreerimiseks analüüsiti skeemide igapäevast käiku. Valiti neli erinevat aastaega esindavat päikeselist päeva: kevad (24. aprill 2011), suvi (28. juuli 2012), sügis (13. september 2013) ja talv (6. jaanuar 2015) joonis 2. Mõlemad skeemid jäljendavad päeva loomulikku käiku hommikust tõusu, keskpäevast maksimumi ja õhtust langust üsna hästi. 28. juuli 2012 päeva teises pooles langevad mõned vaatlusandmed, see ei ole skeemide viga, vaid tingitud üksikutest pilvedest, mis läbisid päikeseketast. Sellised juhtumid filtreeriti hiljem analüüsis välja, kuid joonisel 2 on need jäetud näitamaks, et reaalandmed sisaldavad alati teatud määral häiringuid.



Joonis 2. Skeemide ja vaatluse otsekiirgus (tunnised väärtused) Tõraveres 24. aprillil 2011, 28. juuli 2012, 13. september 2013 ja 6. jaanuar 2015. Savijärvi (punane), HLRADIA (sinine), vaatlus (must). (28. juuli 2012 päeva teises pooles on taevast mõned pilved millest vaatlus tulemused langevad.)

Skeemide omaduste analüüsimiseks kogu kümneaastase perioodi kohta on joonisel 3 hajuvusdiagrammid. Mõlemad skeemid näitavad vaatlusega väga kõrget korrelatsiooni ($R \approx 0.991$), mis kinnitab,

et mõlemad tabavad suurepäraselt otsekiirguse muutlikkust nii aastaaja kui päeva kui ka erinevate päikesekõrguste lõikes. Hajuvusdiagrammidelt on siiski selgelt näha süstemaatiline viga: punktid paiknevad enamasti allpool ideaalset kokkulangevus joont, mis tähendab, et mõlemad skeemid kalduvad otsekiirgust süstemaatiliselt alahindama. Savijärvi skeemi korral punktid paiknevad keskmiselt kaugemal kokkulangevus joonest kui HLRADIA puhul. See visuaalne mulje kinnitub tabelis 1 esitatud statistikaga. HLRADIA RMSE on 24.87 W m^{-2} , mis on märkimisväärselt parem kui Savijärvi oma (31.24 W m^{-2}). Veelgi selgem on erinevus MEs: HLRADIA alahindab vaatlusi keskmiselt 9.57 W m^{-2} võrra, samas kui Savijärvi alahindab neid enam kui kaks korda rohkem 20.49 W m^{-2} võrra.

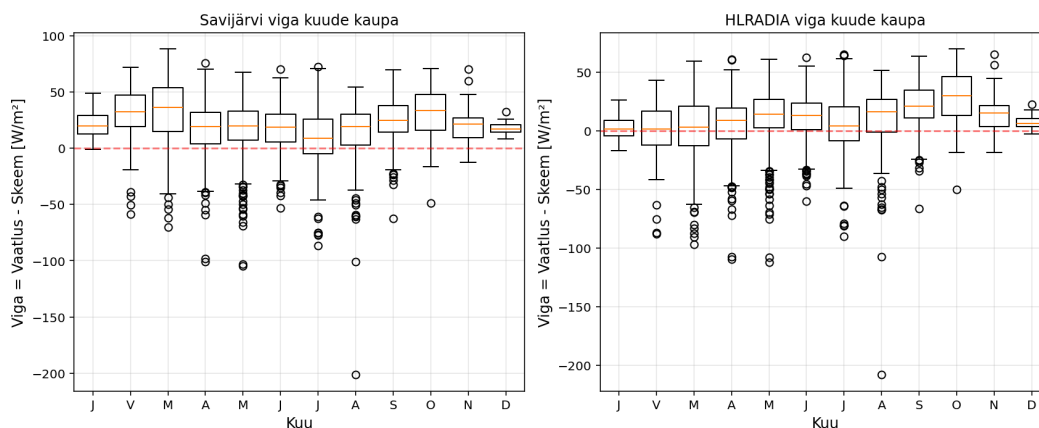


Joonis 3. Savijärvi originaalskeem (punane) ja HLRADIA realisatsioon (sinine) arvutustulemuste võrdlus Tõravere vaatlusandmetega perioodil 2011-2020, algselt valitud parameetritega. Must katkendjoonega on tähistatud ideaalne kokkulangevus joon.

Hooajaliste karakteristikute vigade jaotust kirjeldavad joonisel 4 toodud kastdiagrammid. Selgub, et HLRADIA viga on enamikus kuudes väiksem ja stabiilsem. Skeemidel on näha ebastabiilsusi kuudes, kus toimuvad suurimad muutused lume kattes.

Tabel 1. ME ($W m^{-2}$), RMSE ($W m^{-2}$) ja korrelatsioon vaatustega skeemide algsete väärtustega.

Statistik	Savijärvi	HLRADIA
ME, ($W m^{-2}$)	-20.49	-9.57
RMSE ($W m^{-2}$)	31.24	24.87
Korrelatsioon (R)	0.9913	0.9918



Joonis 4. Vigade (vaatlus - skeem) kastdiagrammid kuude lõikes. Vasakul Savijärvi, paremal HLRADIA. Iga kasti mediaan on märgitud oranži joonega, kasti ülemine ja alumine serv on 1. ja 3. kvartiil, vurrud näitavad 1.5 korda kvartiilide vahet. Punktidega märgitud väärtused on keskmisest palju erinevad ja jäävad vurrudest välja.

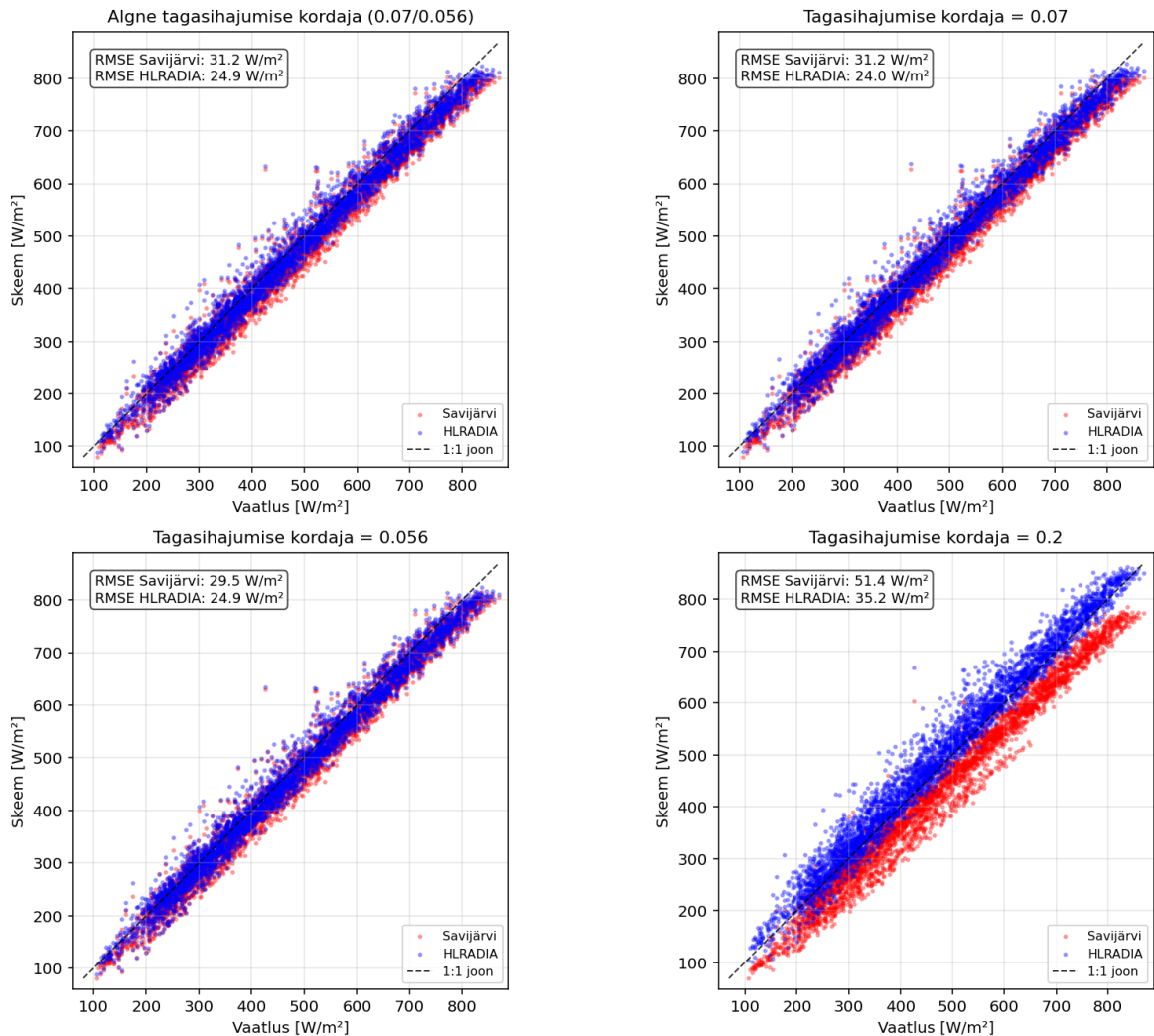
4.2 Skeemide tundlikkus peegeldunud kiirguse tagasihajumise kordaja suhtes

Skeemide tundlikkuse uurimiseks kolme võtmeparameetri suhtes analüüsiti esimesena tagasihajumise kordajat. See parameeter määrab, kui suure osa tagasihajunud kiirgusest maapind neelab. Savijärvi skeemi originaalkordaja on 0.07 ja HLRADIA oma 0.056. Võrdluseks valiti mõlema skeemi jaoks kordajad 0.056, 0.07 ja 0.2 (viimane on Savijärve soovitatud väärtus maismaa jaoks). Skeemide tulemuste ja vaatluste joonisel 5 on näha, et madala tagasihajumise kordaja puhul skeemide tulemused kattuvad rohkem, kui kõrge kordaja korral. Päevade vaates joonisel 6 on näha sarnast efekti, samas on see efekt tugevam kõrge maapinna albeedoga aegadel. Saadud tulemuste uurimiseks on koostatud tabel 2, kus on kokku võetud skeemide ME, RMSE ja korrelatsioonid vaatlustega. Savijärvi puhul andis parima tulemuse kordaja 0.056, vähendades RMSE $31.24 W m^{-2}$ -lt $29.48 W m^{-2}$ -ni. See on tähelepanuväärne, kuna 0.056 on teise skeemi (HLRADIA) algne väärtus. HLRADIA puhul seevastu andis parima tulemuse kordaja 0.07 (Savijärve algne), vähendades RMSE $24.87 W m^{-2}$ -lt $24.03 W m^{-2}$ -ni ja ME $-6.50 W m^{-2}$ -ni. Kordaja tõstmine 0.2-ni mõjub skeemidele dramaatiliselt: Savijärvi puhul kasvab RMSE $51.35 W m^{-2}$ -ni (alahindamine süveneb), samas kui HLRADIA puhul muutub ME positiivseks ($+22.01 W m^{-2}$), mis tähendab, et skeem hakkab nüüd süstemaatiliselt üle hindama.

4.3 Skeemide tundlikkus aerosooli hajuvus parameetri suhtes

Aerosooli hajuvuse parameetri (a_s) mõju hindamiseks testiti väärtusi 1.0, 1.25, 1.5 ja 1.9 (originaalväärtused on mõlemas skeemis 1.25, mis vastab üldisele maismaa ja asustatud ala keskmisele). Skeemide tulemuste ja vaatluste joonisel 7 on näha Savijärvi skeemi suuremat tundlikkust parameetri muu-

Vaatlus vs skeemid – erinevate tagasihajumise kordajatega
Tõravere (2011-2020)

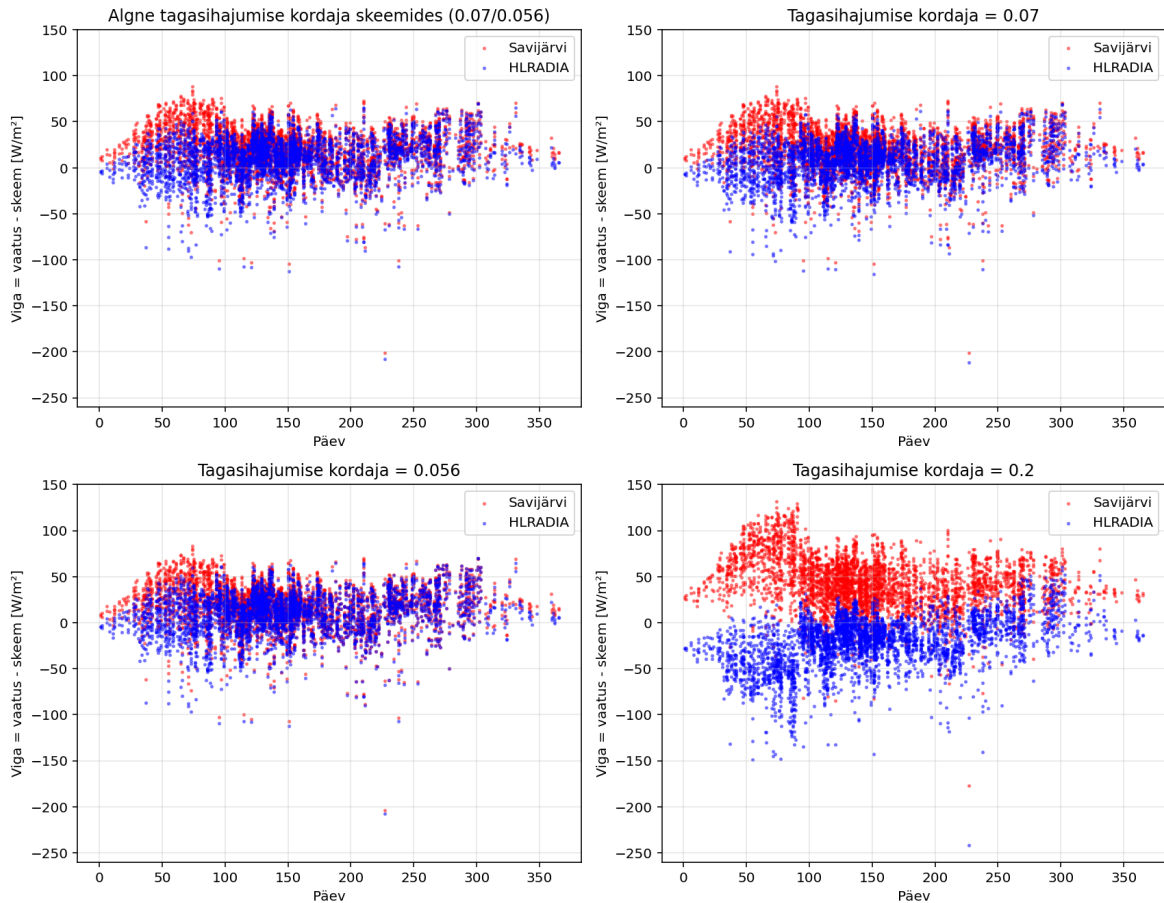


Joonis 5. Savijärvi originaalskeem (punane) ja HLRADIA realisatsioon (sinine) arvutustulemuste võrdlus Tõravere vaatlusandmetega perioodil 2011-2020, erinevate peegeldunud kiirguse tagasihajumise kordajate korral. Must katkendjoonega on tähistatud ideaalne kokkulangevus. Tagasihajumise kordaja väärtus on esitatud paneeli pealkirjas ja sellele vastavad RMSE-d paneeli legendis. Esimesel on skeemide algne tagasihajumise kordajad (Savijärvil 0.07 ja HLRADIAL 0.056), teisel on mõlemal skeemil tagasihajumise kordaja 0.07, kolmandal on mõlemal skeemil tagasihajumise kordaja 0.056 ja neljandal on mõlema tagasihajumise kordaja 0.2.

Tabel 2. ME (W m⁻²), RMSE (W m⁻²) ja korrelatsioon vaatlustega erinevate tagasihajumise kordajatega.

Tagasihajumise kordaja	Savijärvi			HLRADIA		
	ME (W m ⁻²)	RMSE (W m ⁻²)	korrelatsioon vaatlustega	ME (W m ⁻²)	RMSE (W m ⁻²)	korrelatsioon vaatlustega
0.056	-18.04	29.48	0.9915	-9.57	24.87	0.9918
0.07	-20.49	31.24	0.9913	-6.50	24.03	0.9916
0.2	-43.30	51.35	0.9882	+22.01	35.18	0.9883

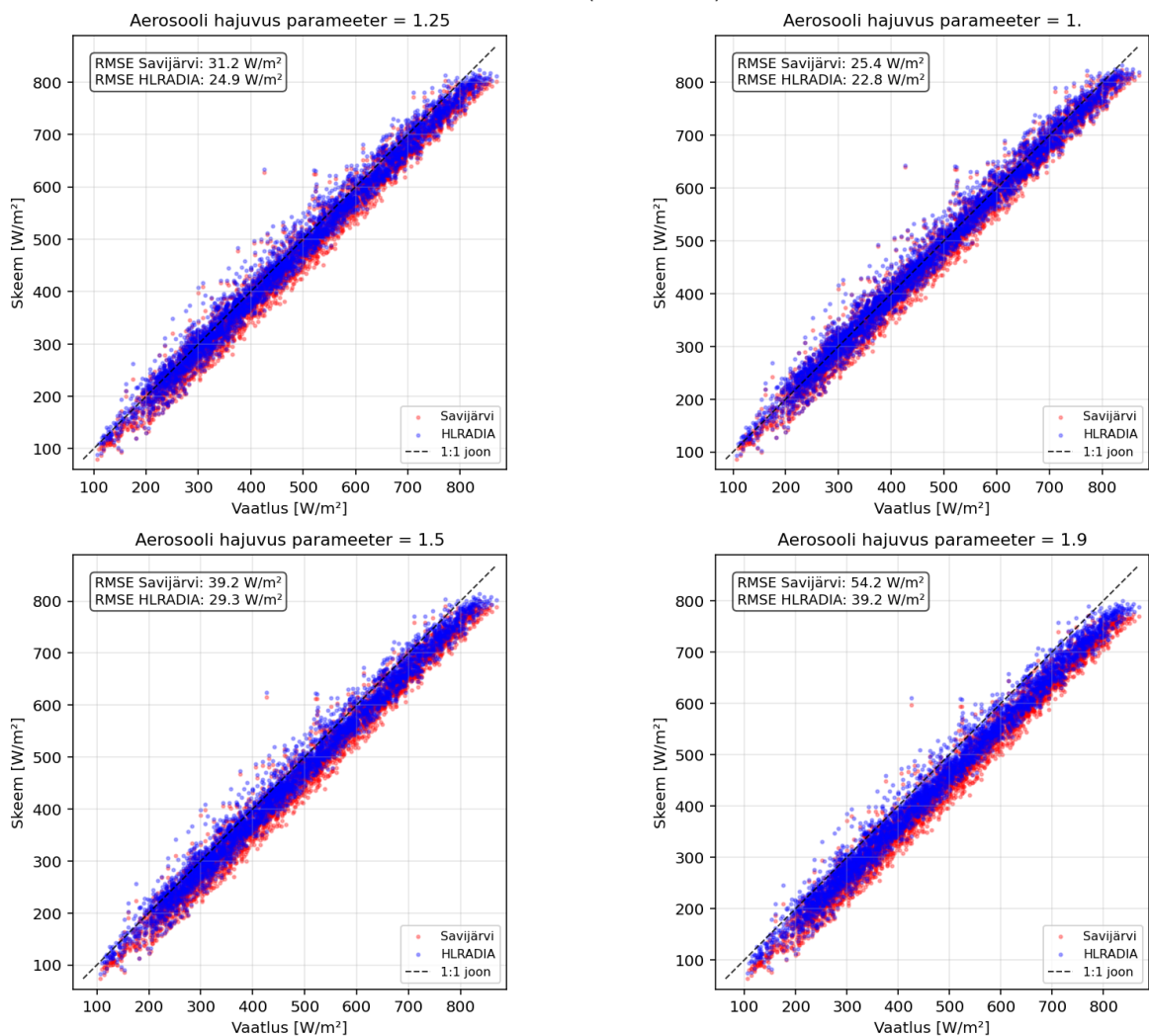
Skeemide viga võrreldes vaatlusega – erinevate tagasihajumise kordajatega
Tõravere (2011-2020)



Joonis 6. Savijärvi originaalskeem (punane) ja HLRADIA realisatsioon (sinine) vigade võrdlus Tõravere vaatlusandmete suhtes päevade vaates perioodil 2011-2020, erinevate peegeldunud kiirguse tagasihajumise kordajate korral. Tagasihajumise kordaja väärtus on esitatud paneeli pealkirjas. Esimesel on skeemide algne tagasihajumise kordajad (Savijärvil 0.07 ja HLRADIAL 0.056), teisel on mõlemal skeemil tagasihajumise kordaja 0.07, kolmandal on mõlemal skeemil tagasihajumise kordaja 0.056 ja neljandal on mõlema tagasihajumise kordaja 0.2.

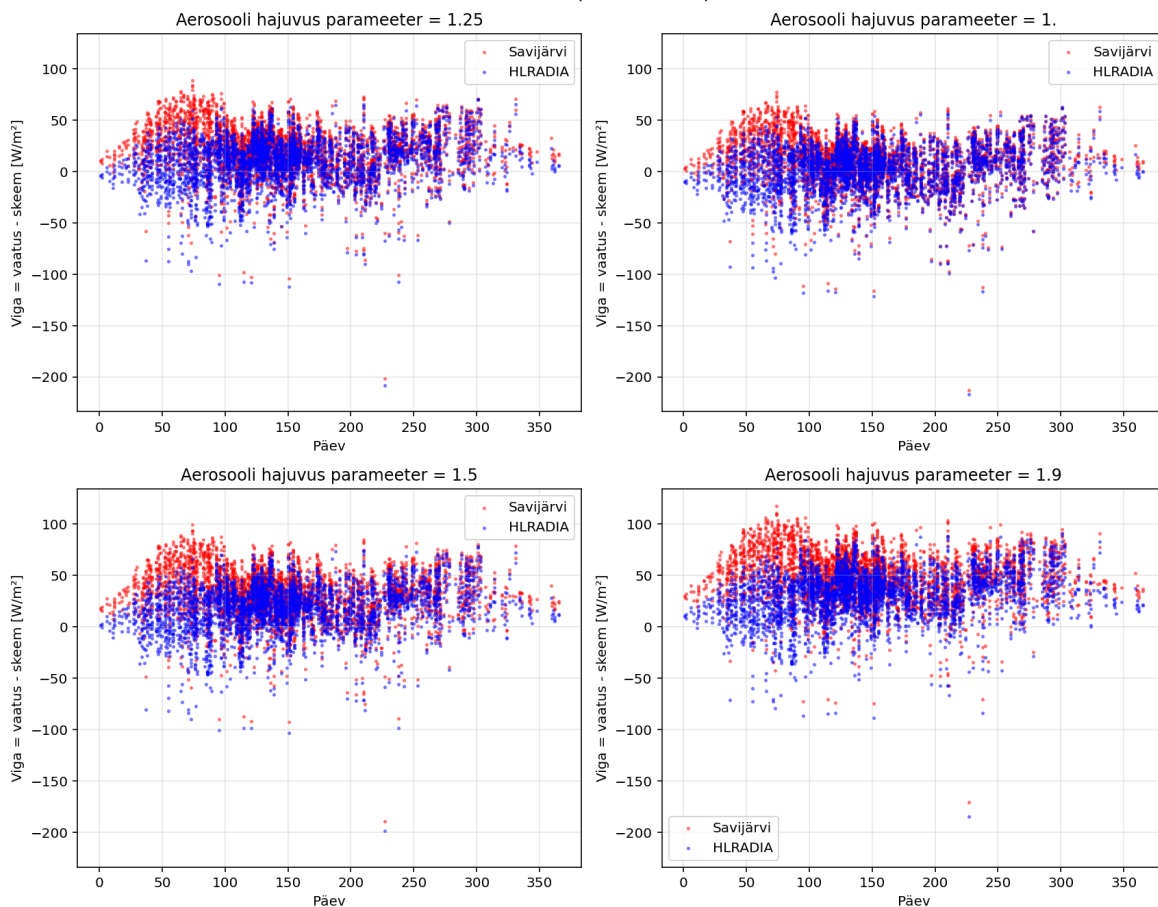
tuse suhtes. Seda on märgata ka joonisel 8, millel ilmneb ka skeemide suurem kattuvus madala hajuvus parameetri korral. Saadud tulemuste uurimiseks on koostatud tabel 3, kus on kokku võetud skeemide ME, RMSE ja korrelatsioonid vaatlustega. Hajuvus parameetri vähendamine 1.25-lt 1.0-le parandas mõlema skeemi tulemusi märgatavalt. Savijärvi puhul langes RMSE 31.24 W m⁻²-lt 25.44 W m⁻²-ni ja ME paranes -20.49 W m⁻²-lt -9.69 W m⁻²-ni. See on märkimisväärne paranemus, mis viitab tugevalt sellele, et Tõravere tingimustes on aerosoolide hajumisvõime väiksem kui skeemide algsed maismaa keskmised eeldavad. HLRADIA paranes vähem, kuid siiski tuntavalt: RMSE 24.87 W m⁻²-lt 22.82 W m⁻²-ni ja ME -9.57 W m⁻²-lt -1.22 W m⁻²-ni, mis on peaaegu erapooletu tulemus. Hajuvuse suurendamisel 1.5 või 1.9-ni langeb tulemuste täpsus. Näiteks Savijärvi puhul $a_s=1.9$ korral on ME -48.59 W m⁻². Korrelatsioonist on näha, et Savijärvi puhul see ei muutunud, kuid HLRADIA korral langes see parameetri väärtuse tõstmisel.

Vaatlus vs skeemid - erinevate aerosooli hajuvus parameetritega Tõravere (2011-2020)



Joonis 7. Savijärvi originaalskeem (punane) ja HLRADIA realisatsioon (sinine) arvutustulemuste võrdlus Tõravere vaatlusandmetega perioodil 2011-2020, erinevate aerosooli hajuvus parameetrite korral. Must katkendjoonega on tähistatud ideaalne kokkulangevus. Aerosooli hajuvus parameetri väärtus on esitatud paneeli pealkirjas ja sellele vastavad RMSE-d paneeli legendis. Esimesel on skeemide algne aerosooli hajuvus parameeter 1.25, teisel on aerosooli hajuvus parameeter 1.0, kolmandal on aerosooli hajuvus parameeter 1.5 ja neljandal on aerosooli hajuvus parameeter 1.9.

Skeemide viga võrreldes vaatlusega – erinevate aerosooli hajuvus parameetritega
Tõravere (2011-2020)



Joonis 8. Savijärvi originaalskeem (punane) ja HLRADIA realisatsioon (sinine) vigade võrdlus Tõravere vaatlusandmete suhtes päevade vaates perioodil 2011-2020, erinevate aerosooli hajuvus parameetrite korral. Aerosooli hajuvus parameetri väärtus on esitatud paneeli pealkirjas. Esimesel on skeemide algne aerosooli hajuvus parameeter 1.25, teisel on aerosooli hajuvus parameeter 1.0, kolmandal on aerosooli hajuvus parameeter 1.5 ja neljandal on aerosooli hajuvus parameeter 1.9.

Tabel 3. ME ($W m^{-2}$), RMSE ($W m^{-2}$) ja korrelatsioon vaatustega erinevate aerosooli hajuvuse parameetritega.

Albeedo hajuvus parameeter	Savijärvi			HLRADIA		
	ME ($W m^{-2}$)	RMSE ($W m^{-2}$)	korrelatsioon vaatlusetega	ME ($W m^{-2}$)	RMSE ($W m^{-2}$)	korrelatsioon vaatlusetega
1.0	-9.69	25.44	0.9913	-1.22	22.82	0.9919
1.25	-20.49	31.24	0.9913	-9.57	24.87	0.9918
1.5	-31.30	39.25	0.9913	-17.92	29.29	0.9917
1.9	-48.59	54.15	0.9913	-31.28	39.19	0.9914

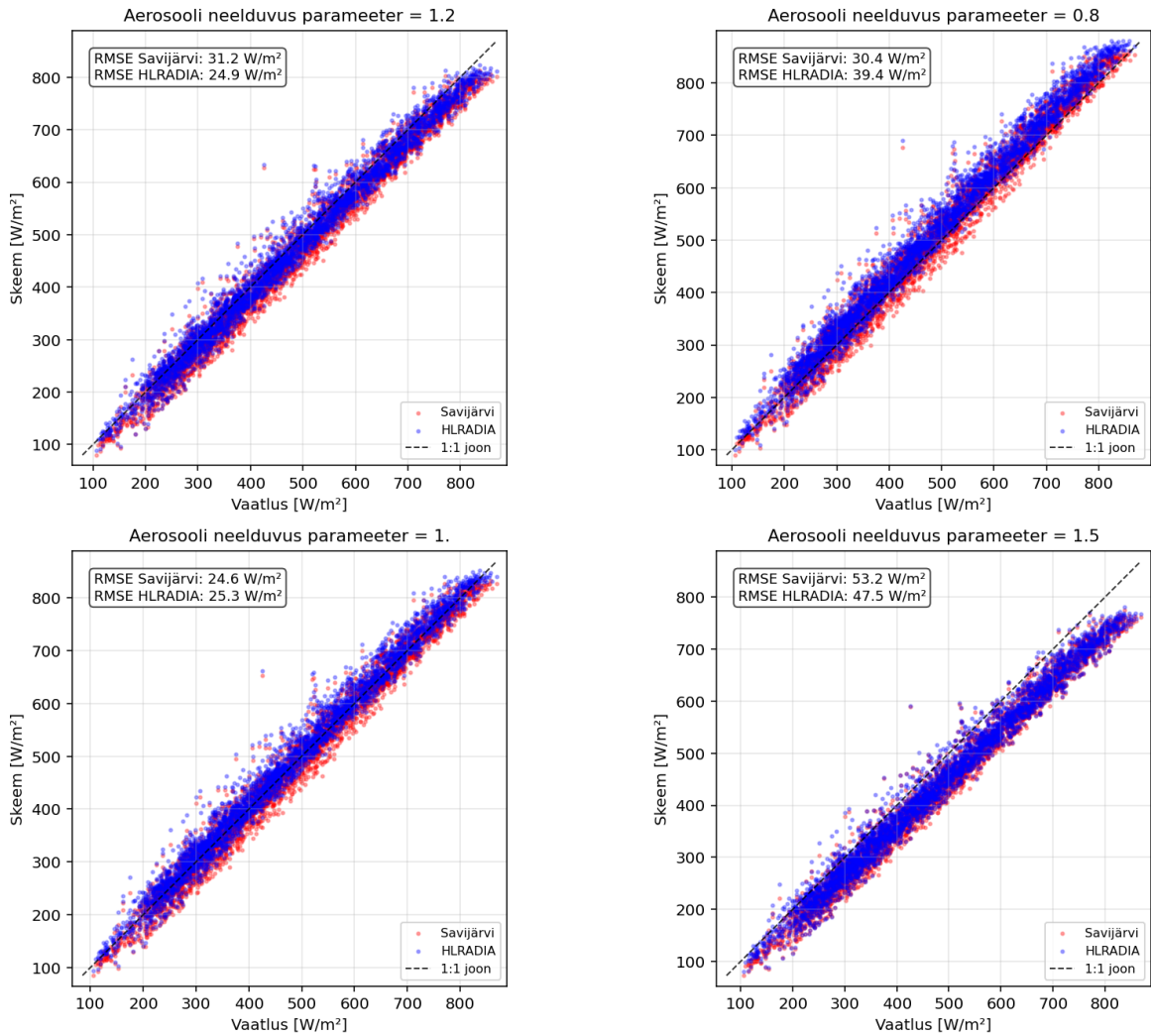
4.4 Skeemide tundlikkus aerosooli neelduvus parameetri suhtes

Aerosooli neelduvus parameetri (a_a) mõju hindamiseks testiti väärtusi 0.8, 1.0, 1.2 ja 1.5. Skeemide tulemuste ja vaatluste võrdlemiseks koostatud joonisel 9 on näha, et aerosooli neelduvus parameeter mõjutab tugevamalt kõrgema kiirgusega juhtumeid. Jooniselt 10 on näha suurt mõju madala maapinna albedoga aegadel, millest tekivad vigade küüarakud. Saadud tulemuste uurimiseks on koostatud tabel 4, kus on kokku võetud skeemide ME, RMSE ja korrelatsioonid vaatlustega. Savijärvi puhul andis neelduvuse vähendamine 1.2-lt 1.0-le praktiliselt erapooletu tulemuse (ME -2.80 W m^{-2}) ja RMSE langes 24.58 W m^{-2} -ni, mis on peaaegu sama hea kui HLRADIA parim tulemus. HLRADIA puhul aga halvendas neelduvuse vähendamine tulemusi, originaalne väärtus osutus optimaalseks. Savijärvi skeemi saab neelduvuse parameetri kohandamisega muuta täpsemaks, ilma et RMSE märgatavalt suureneks.

Tabel 4. ME (W m^{-2}), RMSE (W m^{-2}) ja korrelatsioon vaatlustega erinevate aerosooli hajuvuse parameetritega.

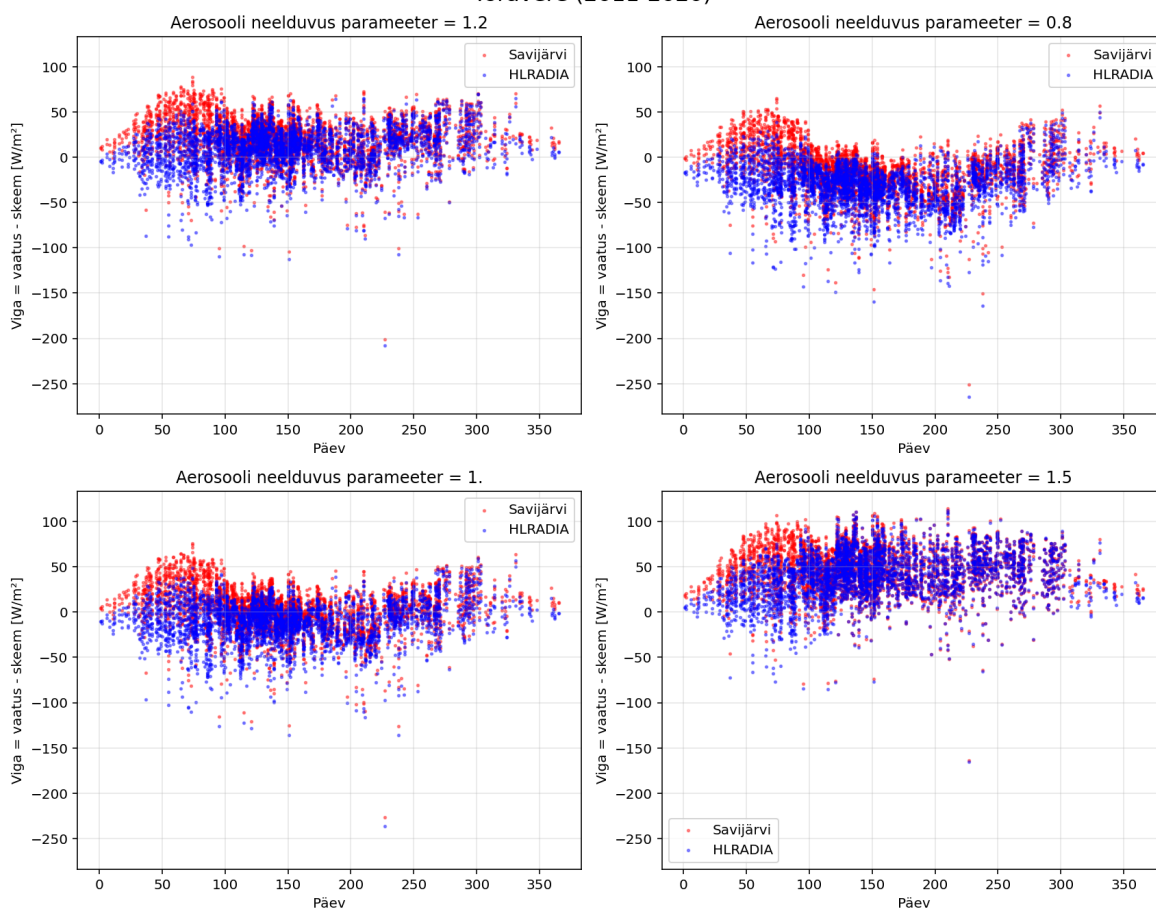
Albedo neelduvus parameeter	Savijärvi			HLRADIA		
	ME (W m^{-2})	RMSE (W m^{-2})	korrelatsioon vaatlustega	ME (W m^{-2})	RMSE (W m^{-2})	korrelatsioon vaatlustega
0.8	+14.89	30.37	0.9901	+30.63	39.37	0.9917
1.0	-2.80	24.58	0.9908	+10.53	25.27	0.9919
1.2	-20.49	31.24	0.9913	-9.57	24.87	0.9918
1.5	-47.03	53.18	0.9917	-39.73	47.53	0.9910

Vaatlus vs skeemid - erinevate aerosooli neelduvus parameetritega
Tõravere (2011-2020)



Joonis 9. Savijärvi originaalskeem (punane) ja HLRADIA realisatsioon (sinine) arvutustulemuste võrdlus Tõravere vaatlusandmetega perioodil 2011-2020, erinevate aerosooli neelduvus parameetrite korral. Must katkendjoonega on tähistatud ideaalne kokkulangevus. Aerosooli neelduvus parameetri väärtus on esitatud paneeli pealkirjas ja sellele vastavad RMSE-d paneeli legendis. Esimesel on skeemide algne aerosooli neelduvus parameeter 1.2, teisel on aerosooli neelduvus parameeter 0.8, kolmandal on aerosooli neelduvus parameeter 1.0 ja neljandal on aerosooli neelduvus parameeter 1.5.

Skeemide viga võrrleldes vaatlusega - erinevate aerosooli neelduvus parameetritega
Tõravere (2011-2020)



Joonis 10. Savijärvi originaalskeem (punane) ja HLRADIA realisatsioon (sinine) vigade võrdlus Tõravere vaatlusandmete suhtes päevade vaates perioodil 2011-2020, erinevate aerosooli neelduvus parameetrite korral. Aerosooli neelduvus parameetri väärtus on esitatud paneeli pealkirjas. Esimesel on skeemide algne aerosooli neelduvus parameeter 1.2, teisel on aerosooli neelduvus parameeter 0.8, kolmandal on aerosooli neelduvus parameeter 1.0 ja neljandal on aerosooli neelduvus parameeter 1.5.

5 Järeldused

Käesolevas töös viidi läbi kahe päikese otsekiirguse parametriseerimisskeemi võrdlev analüüs Eesti kliimatingimustes, tuginedes Tartu-Tõravere meteoroloogiajaama selge taeva tunnistele vaatlusandmetele ajavahemikus 2011-2020 ning AERONETi veeaurusamba mõõtmistele. Hinnati mõlema skeemi tundlikkust kolmel parameetri suhtes: peegeldunud kiirguse tagasihajumistegur, aerosooli hajuvus ja aerosooli neelduvuse kohta.

Tulemused näitasid, et HLRADIA skeem (2) on algtingimustes täpsem kui Savijärvi skeem (1). HLRADIA RMSE (24.87 W m^{-2}) on ligi 20% väiksem kui Savijärve oma (31.24 W m^{-2}) ja ME (-9.57 W m^{-2}) on enam kui kaks korda väiksem absoluutväärtuses võrreldes Savijärviga (-20.49 W m^{-2}). Lisaks HLRADIA on ka kuude lõikes stabiilsem, kus Savijärve vead on märgatavalt suuremad.

Mõlemad skeemid kalduvad otsekiirgust süstemaatiliselt alahindama, võrreldes Tõravere vaatlusandmetega, mis viitab vajadusele vaadeldavaid skeeme Eesti tingimustega paremini kohandada.

Parameetrite tundlikkuse analüüsist selgub, et Savijärvi skeemi saab lihtsate parameetrite muutmisega viia HLRADIA täpsusele ning samas muuta seda erapooletumaks. Tagasihajumise kordaja osas selgus, et nende skeemide kordaja väärtused omavahel vahetamisega said skeemid paremad tulemused ning võttes seda väärtust tunduvalt suurendades oli näha, et Savijärvi algne skeem on palju tundlikum selle muutusele.

Aerosooli hajuvuse vähendamine 1.25-lt 1.0-ni andis Savijärvi puhul paranemise (RMSE langes 31.24 W m^{-2} -lt 25.44 W m^{-2} -ni) ning HLRADIA puhul oli paranemine minimaalne, aga mõlema puhul on näha, kuidas ME paraneb märgatavalt. Aerosooli neelduvuse muutmisel on märgata sarnasust hajuvusega, kus need on algsete parameetritega ülehinnatud. Joonisel 10 on nähtav ka tugev tundlikkus madala maapinna albeedoga aegadel.

Tulevikus oleks kasulik neid parameetreid testida otse kliimamudelis. Samuti oleks vajalik korrata analüüsi teistes Eesti piirkondades (näiteks rannikul või Ida-Virumaal), kus aerosooliprofiil võib oluliselt erineda Tõravere mõõtmistest.

Kasutatud kirjandus

- [Keskonnaagentuur 2026] : *Keskonnaagentuur*. 2026. – URL <https://www.keskkonnaagentuur.ee/>. – Zugriffsdatum: 2026-05-07
- [Abreu u. a. 2023] Abreu, Edgar F. ; Gueymard, Christian A. ; Canhoto, Paulo ; Costa, Maria J.: Performance assessment of clear-sky solar irradiance predictions using state-of-the-art radiation models and input atmospheric data from reanalysis or ground measurements. In: *Solar Energy* 252 (2023), März, S. 309–321. – URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X23000592>. – Zugriffsdatum: 2026-05-27. – ISSN 0038092X
- [Hartmann 2016] Hartmann, Dennis L.: *Global Physical Climatology*. Elsevier, 2016. – URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20090000300>. – Zugriffsdatum: 2026-05-26. – ISBN 978-0-12-328531-7
- [Kalnay 2012] Kalnay, Eugenia: *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*. 7. print. Cambridge University Press, 2012. – ISBN 978-0-521-79179-3 978-0-521-79629-3
- [Kopp und Lean 2011] Kopp, Greg ; Lean, Judith L.: A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance: *FRONTIER*. 38 (2011), Nr. 1, S. n/a–n/a. – URL <http://doi.wiley.com/10.1029/2010GL045777>. – Zugriffsdatum: 2026-05-25. – ISSN 00948276
- [Mallick u. a. 2015] Mallick, K. ; Jarvis, A. ; Wohlfahrt, G. ; Kiely, G. ; Hirano, T. ; Miyata, A. ; Yamamoto, S. ; Hoffmann, L.: Components of Near-Surface Energy Balance Derived from Satellite Soundings – Part 1: Noontime Net Available Energy. 12 (2015), Nr. 2, S. 433–451. – URL <https://bg.copernicus.org/articles/12/433/2015/>. – Zugriffsdatum: 2026-05-27. – ISSN 1726-4189
- [NASA 2026] NASA: *Aerosol Robotic Network (AERONET)*. 2026. – URL <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>. – Zugriffsdatum: 2026-05-07
- [Rontu u. a. 2017] Rontu, Laura ; Gleeson, Emily ; Räisänen, Petri ; Pagh Nielsen, Kristian ; Savijärvi, Hannu ; HansenŠass, Bent: The HIRLAM Fast Radiation Scheme for Mesoscale Numerical Weather Prediction Models. 14 (2017), S. 195–215. – URL <https://asr.copernicus.org/articles/14/195/2017/>. – Zugriffsdatum: 2026-03-12. – ISSN 1992-0636
- [Russak und Kallis 2003] Russak, Viivi ; Kallis, Ain: *Eesti Kiirguskliima Teatmik*. Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut, 2003. – URL https://ilmateenistus.ee/wp-content/uploads/2013/01/eesti_kiirguskliima_teatmik.pdf
- [Savijärvi 1990] Savijärvi, Hannu: Fast Radiation Parameterization Schemes for Mesoscale and Short-Range Forecast Models. 29 (1990), Nr. 6, S. 437–447. – URL [http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0450\(1990\)029<0437:FRPSFM>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0450(1990)029<0437:FRPSFM>2.0.CO;2). – Zugriffsdatum: 2026-03-12. – ISSN 0894-8763, 1520-0450
- [Syed u. a. 2019] Syed, F.Š. ; Latif, M. ; Al-Maashi, A. ; Ghulam, A.: Regional Climate Model

RCA4 Simulations of Temperature and Precipitation over the Arabian Peninsula: Sensitivity to CORDEX Domain and Lateral Boundary Conditions. 53 (2019), Nr. 11, S. 7045–7064. – URL <http://link.springer.com/10.1007/s00382-019-04974-z>. – Zugriffsdatum: 2026-04-26. – ISSN 0930-7575, 1432-0894

[Warner 2010] Warner, Thomas T.: *Numerical Weather and Climate Prediction*. 1. Cambridge University Press, 2010. – URL <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9780511763243/type/book>. – Zugriffsdatum: 2026-03-12. – ISBN 978-0-521-51389-0 978-0-511-76324-3

Lisa 1 - Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Ott-Matis Aun

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Regionaalse kliimamudeli Päikese otsekiirguse parametrizeerimisskeemi võrdlev analüüs.

mille juhendaja on Arne Männik.

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

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

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

27.05.2026

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