

PROGRAMMI VALDKONDLIKU TEADUS- JA ARENDUSTEGEVUSE TUGEVDAMINE (RITA) TEGEVUSE
1 TEENUSE OSUTAMISE LEPING nr 7.8-3/18/17

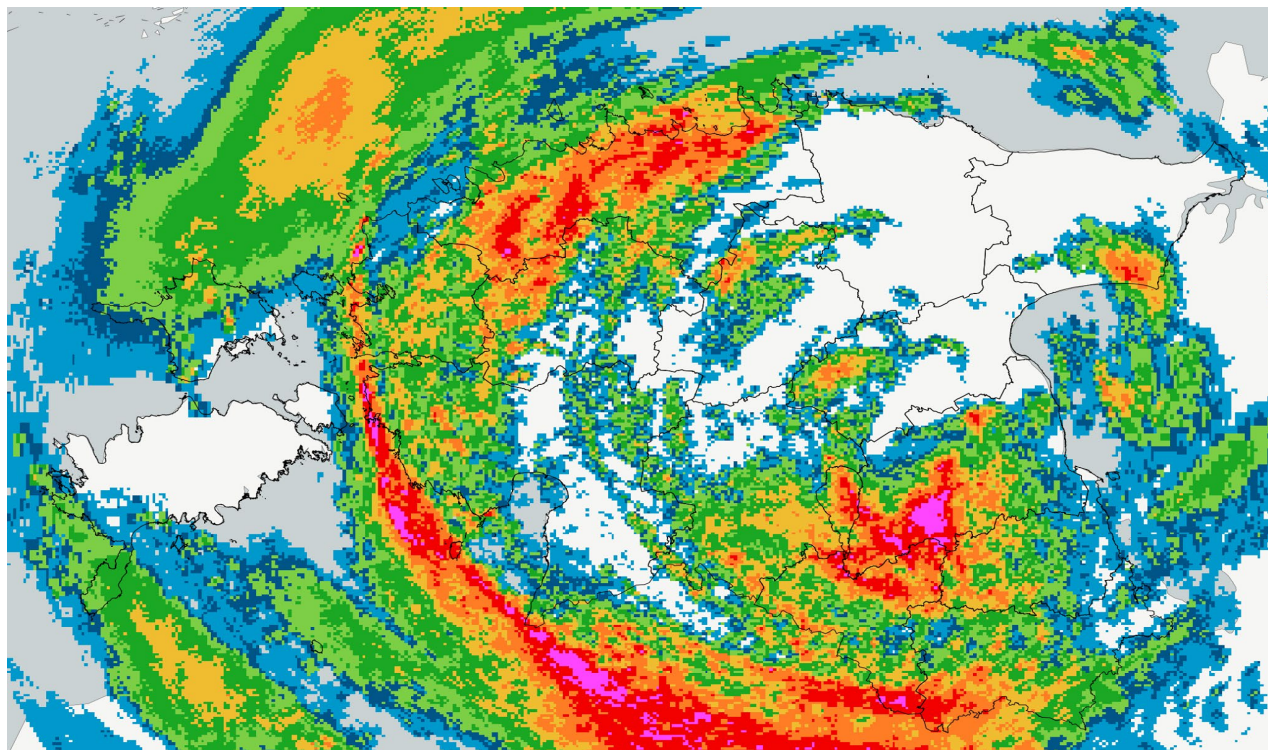
Kaugseire andmete kasutuselevõtt avalike teenuste väljatöötamisel ja arendamisel

Lisa 5

DOI: [10.23673/re-257](https://doi.org/10.23673/re-257)

Sademe täppiskaardistamine

LÕPPARUANNE



Dokumendi koostasid: Piia Post, Velle Toll, Jorma Rahu, Tanel Voormansik

Tartu 2020



Euroopa Liit
Euroopa
Regionaalarengu Fond



KESKKONNAMINISTEERIUM



SISEMINISTEERIUM



MAJANDUS- JA
KOMMUNIKATSIOONI-
MINISTEERIUM



MAAELUMINISTEERIUM

Sademetete täppiskaardistamine

RITA1/02-52 meteoroloogia alamteema raames töötati välja Eesti oludesse sobiv kõrge ajalis-ruumilise lahutusega sademetete täppiskaardistamise meetodika. Peamiseks andmeallikaks olid Eesti Keskkonnaagentuuri (KAURi) sademejaamade ning Sürgavere radari andmed aastate 2013-2019 (va 2017) kohta. Töötati välja meetodika täppissademetete arvutamiseks, analüüsi lähteandmete ning tulemi täpsust ning hinnati sademetete täppiskaardistamise produkti edasise arenduse võimalusi.

Hea ajalis-ruumilise lahutusega sademevälju oli antud projekti käigus tarvis nii satelliitkaugseire signaali täpsustamiseks põllumajandussüsteemide arendamisel (Lisa 3) kui ka võimalike üleujutuste prognoosis (Lisa 2), eelkõige aga olid täpsed sademeväljad vajalikud tuleohu kaartide koostamisel (Lisa 1). Meie laiuskraadil pole satelliite, mille instrumentidest saaks täppissademevälju sagedamini kui kord paari päeva jooksul, mis pole eelpoolmainitud rakendusteks piisav. Seepärast lähtume parimast kättesaadavast maapealse kaugseire tehnoloogiast – ilmaradari ning maapealsete sademejaamade vaatluste lõimimisest.

Praegune radari- ja jaamaandmete lõimitud produkt annab kinnitust, et ka antud sademejaamade arvu ning mõõtmisrutiini puhul annab keskmise kõrvalekalde meetod RITA KAUGSEIRE projekti rakendusteks oluliselt parema sademeprodukti kui ükskõik kumb meetod eraldiseisvalt. Tulekahjude riskihinnanguks on sellisel tasemel saavutatud tulemit võimalik kasutada.

1 Meetodika

1.1 Radari ja sademejaamade andmete lõimimine

Järgnevalt kirjeldame meetodikat, millega kombineeriti ilmaradari ning automaatjaamade poolt mõõdetud sademed ühtseks täppissademetete produktiks Eesti ala jaoks. Täppissademetete e sademetete täppiskaardistamise all mõistame me ajas ja ruumis kõrglahutuslikke sademevälju, mille ruumiline samm on vähemasti 1 km ja ajasamm kümne minuti suurusjärgus.

Kaksikpolarimeetrilised ilmaradarid on maapealse kaugseire kõige pikemaajaliselt arendatud tehnoloogia, mis võimaldab saada 1 km ruumilise sammuga ning skaneerimisstrateegiast sõltuvalt kuni paariminutise ajalise sammuga sademevälju. Radar registreerib tagasipeegelduvusi atmosfäärist ning aluspinnalt ning selle signaali kaudu saadud kvantitatiivseid sademeid on mõistlik korrigeerida tegelike maapeal mõõdetud sademehulkadega. Sademeväljade kvaliteet sõltub mitmetest teguritest, millest olulisemad on radari tehniline korrasolek, mittemeteoroloogiliste häirituste olemasolu väljas, aga ka maapealsete meteojaamade arv. On mitmeid algoritme, mille abil liidetakse kokku sadememõõtjate ning radari andmed, kasutades ära mõlema instrumendi tugevusi ning kompenseerides nõrkusi. On küll olemas kasutusvalmis

meetodid, aga need kõik on välja töötatud konkreetsetes geograafilises piirkonnas, konkreetsete omadustega radarit ning sademejaamade tihedust ning töörežiimi arvestades. Eesti jaoks polnud selliseid uuringuid eelnevalt tehtud.

Goudenhoofdt ja Delobbe (2009) analüüsisid mitmete lõimimistehnoloogiate rakendamist Belgia tingimuste korral ning leidsid, et iga järjest keerulisema tehnoloogia kasutamine parandas sademeprodukti, võrreldes ainult radariandmete kasutamisega, kuid kõige suurema produkti paranemise tõid kaasa kõige lihtsamad lõimimismeetodid. Samas esitas iga keerukam meetod lisanõudeid kasutatavate andmete kvaliteedile ning lisandunud protseduurid ei tarvitsenud anda mõistlikku lisandväärtust. Seepärast oli mõistlik alustada kõige lihtsamatest meetoditest.

Kahe andmehulga lõimimine viidi läbi keskmise kõrvalekalde meetodiga (*MFB – Mean Field Bias*). See põhineb kogu radari sademevälja korrigeerimisel koefitsiendiga, mis baseerub jaamade asukohapikslites registreeritud radariandmete võrdlusel jaamades mõõdetud andmetega. Sademete täppiskaardistamise produktiks ongi siis maapealsete jaamade andmetega korrigeeritud radarprodukt, ehk kõrge ruumiline lahutus saadakse radari heast ruumilisest lahutusest, viies selle kvantitatiivsed väärtused kooskõlla maapealsete vaatlustega.

Kõigepealt leiti kogu radari välja peegelduvusandmetest sademete intensiivsused klassikalise Marshall-Palmeri Z-R seose (Marshall and Palmer, 1948) kaudu:

$$Z = 200 \cdot R^{1,6}, \text{ kus} \quad (1)$$

Z on radari peegelduvusväärtus ja R on saju intensiivsus (mm/h).

Järgmise sammuna viidi läbi kahe andmehulga lõimimine keskmise kõrvalekalde meetodiga. Selleks leiti radar-jaam samaaegsete sademeintensiivsuste paarid R_i ja G_i . R_i on i -nda jaama asukohas radariga registreeritud sademete intensiivsus ning G_i samas jaamas mõõdetud sama perioodi intensiivsus. Neid intensiivsuste üheaegseid väärtusi kombineerides saadaksegi keskmise kõrvalekalde koefitsient

$$C_{MFB} = \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{\sum_{i=1}^N R_i}, \text{ kus} \quad (2)$$

N on kindlatele nõuetele vastavate radar-jaam mõõtmistulemuste paaride arv. Radari ja jaamade sademesummade suhe ongi koefitsient C_{MFB} , millega korrutatakse läbi kõik radari sademevälja väärtused (Goudenhoofdt and Delobbe, 2009). Koefitsient määratakse iga ajasammu jaoks eraldi.

Ideaalne oleks juhus, kui koefitsient C_{MFB} oleks võrdne 1-ga, st et kahel moel mõõdetud saju intensiivsus on summaarselt üle kogu välja võrdsed. Sel puhul radari sademevälja parandamist ei toimu. Reaalselt aga radar enamasti alahindab sajukoguseid, võrreldes maapealsete jaamade mõõtmistulemustega, mistõttu üldiselt keskmise kõrvalekalde meetod tõstab radari sajukoguseid. Keskmise kõrvalekalde meetodi abil on võimalik vähendada erineva iseloomuga probleeme andmetes, näiteks radari tehniliste kalibratsiooniparameetrite kõrvalekaldeid või sajuhulkade arvutamisel kasutatud $Z - R$ suhte (1) ebatäpsete koefitsientide mõju

(Goudenhoofd and Delobbe, 2009). Samas parandab skeem radarisademeid ühtlaselt üle kogu välja.

1.2 Metoodika rakendamine Eesti tingimustes

Eelpooltoodud sademete täppiskaardistamise metoodika rakendamise edukus sõltub konkreetsetest andmetest, nende kvaliteedist, olemasolust ning ka hulgast. Kirjeldame nüüd täpsemalt kuidas nägi välja andmete ettevalmistamine, töötlus ning ka produkti loomine. Üldisem plokkskeem andmete töötlustest ja metoodika rakendamise erinevatest etappidest on toodud joonisel 1.

Alustame kaugseire meetodil saadud sademeandmetest. Projektis kasutatud ilmaradari andmed pärinevad Riigi Ilmateenistuse Sürgavere radarilt. Radari algandmete ruumiline lahutusvõime on 1° asimuudis ja 300 m radiaalsuunas. Radari mõõtmisulatus on 250 km radari asukohast. Ehkki Eestis on kaks sademeradarit, kasutati antud projektis andmeid vaid Sürgavere radarist, millel on parem asukoht Mandri-Eesti suhtes ja võrreldes Harku radariga vähem kiirguslikke häireid. Kasutati vaid 0,5° ehk kõige madalama skaneerimisnurga mõõtmisi. Skaneeringud toimusid iga 15 min järel.

Enne radariandmete kasutamist viidi läbi eeltöötlus, mille käigus püüti eemaldada väga tugevate peegelduvusväärtustega kiired (täpsemalt pt 2.1). Sellised häired on enamasti põhjustatud väliste raadioseadmete mõjust, mille töösagedus sarnaneb ilmaradari signaali sagedusega. Leitud probleemsed kiired tasandatakse naaberkiirte väärtuste keskmisega. Tehnilistel põhjustel tühjadeks jäänud kiired asendati samuti naaberkiirte keskmiste väärtustega peale ebarealistlike kiirte eemaldamist, et vältida vigade edasikandumist järgmistesse andmete töötlemise etappidesse. Edasine töötlus seisnes üldises müra eemaldamises mõõdetud pikslite asetuse põhjal, kasutades Gabella filtrit (Gabella et al., 2002). Eelkõige saab sellisel moel lahti ruumiliselt väikestest mõõtmisvigadest, kus kõrvuti on mõned üksikud pikslid. Atmosfääris on väga väikeste sajualade tekkimine ebarealistlik, mistõttu käsitletakse selliseid mõõtmisandmeid mürana. Pärast andmete eeltöötlust eemaldati kolme tunni akumulieritud radariandmetest kõik pikslid, mille väärtused ületasid 78 mm ning 24 tunni andmetest kõik pikslid, mille väärtused ületasid 106 mm. Need lävendid pärinevad KAURi sademejaamade andmetest leitud maksimumidel.

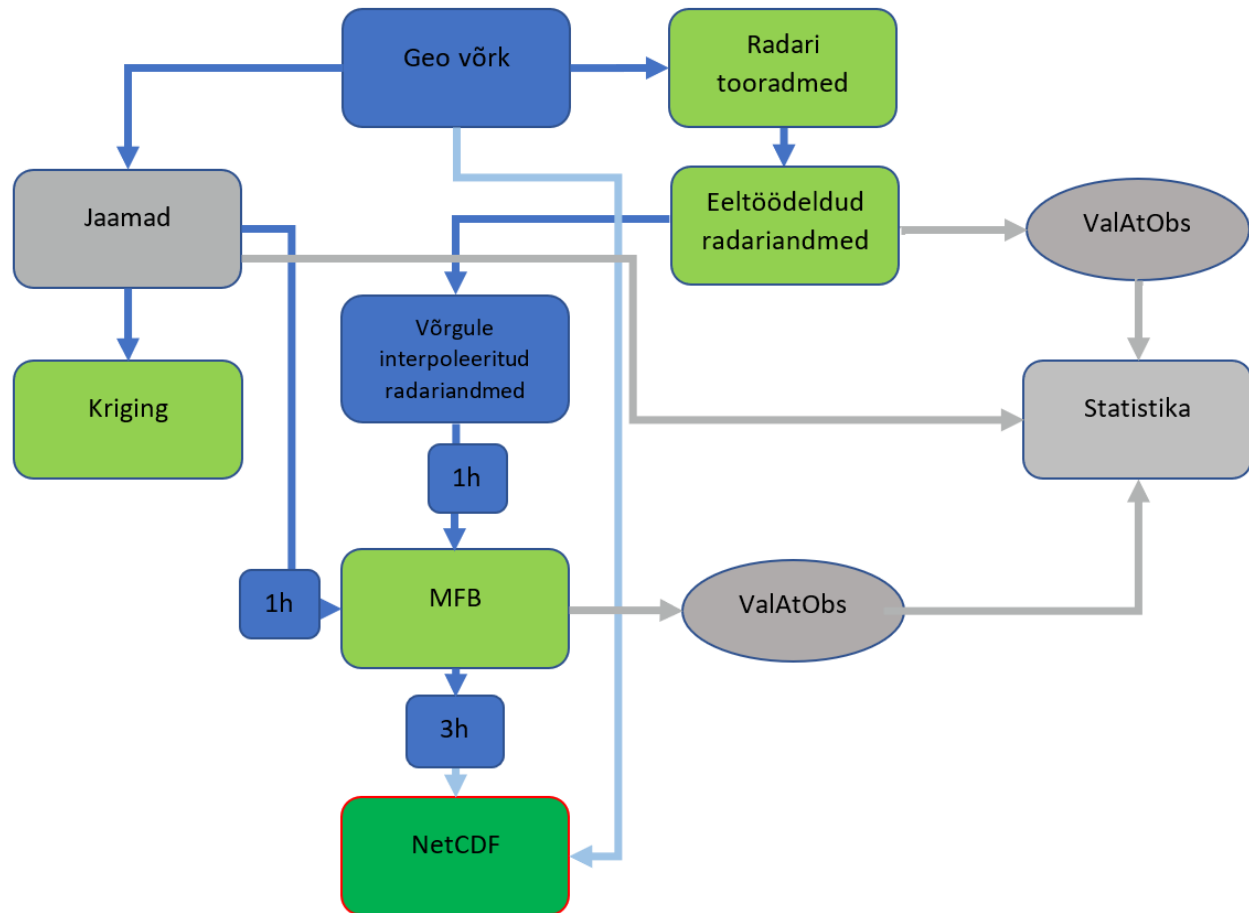
Eestis on umbes 50 kohas KAURi sademejaamad ning lisaks veel mitmed teised meteojaamade võrgud, kus mõõdetakse sademeid. Kõigepealt viidi läbi sademejaamade andmete eeltöötlus ning kvaliteedikontroll. Kuna antud ülesandeks on tarvis kontrollitud kvaliteediga kvantitatiivseid andmeid, siis välistati teised võrgud peale KAURi jaamade, sest mitmetes võrkudes on sademete registreerimine vaid kvalitatiivne. Lõplikult jäid kasutusse vaid 36 jaama andmed, sest meetodi verifitseerimise perioodil (2010-2018) toimus nii jaamade sulgemisi kui ka uute jaamade avamist. Maapealsete jaamade sademesummasid sai kasutada vaid 1-tunnise sammuga, sest KAURis oli neile tehtud kogu perioodi ulatuses kriitiline kvaliteedikontroll, mistõttu nende usaldusväärsus

peaks olema suurem kui 1-minuti või 10-minuti toorandmete puhul. Kasutatud jaamade nimekiri on toodud tabelis 1. Massumõisa jaama ei saanud kasutada 2019. aasta jaoks, sest see suleti.

Tabel 1. Töös kasutatud jaamad tähestikulises järjekorras.

Haapsalu meteoroloogiajaam	Otepää sademete mõõtejaam	Tooma soojaam
Heltermaa rannikujaam	Pajusi hüdroomeetriaam	Tudu sademete mõõtejaam
Jõgeva meteoroloogiajaam	Pakri meteoroloogiajaam	Türi meteoroloogiajaam
Jõhvi meteoroloogiajaam	Pärnu-Sauga meteoroloogiajaam	Tuulemäe sademete mõõtejaam
Kihnu rannikujaam	Piigaste sademete mõõtejaam	Väike-Maarja meteoroloogiajaam
Koodu sademete mõõtejaam	Roomassaare rannikujaam	Valga meteoroloogiajaam
Korela hüdroomeetriaam	Ruhnu rannikujaam	Vanaküla hüdroomeetriaam
Kunda rannikujaam	Sõrve rannikujaam	Vihterpalu hüdroomeetriaam
Kuusiku meteoroloogiajaam	Tallinn-Harku aeroloogiajaam	Viljandi meteoroloogiajaam
Lääne-Nigula meteoroloogiajaam	Tartu-Tõravere meteoroloogiajaam	Vilsandi rannikujaam
Massumõisa sademete mõõtejaam (v.a. 2019)	Tiirikoja järvejaam	Virtsu rannikujaam
Narva meteoroloogiajaam	Tõlliste hüdroomeetriaam	Võru meteoroloogiajaam

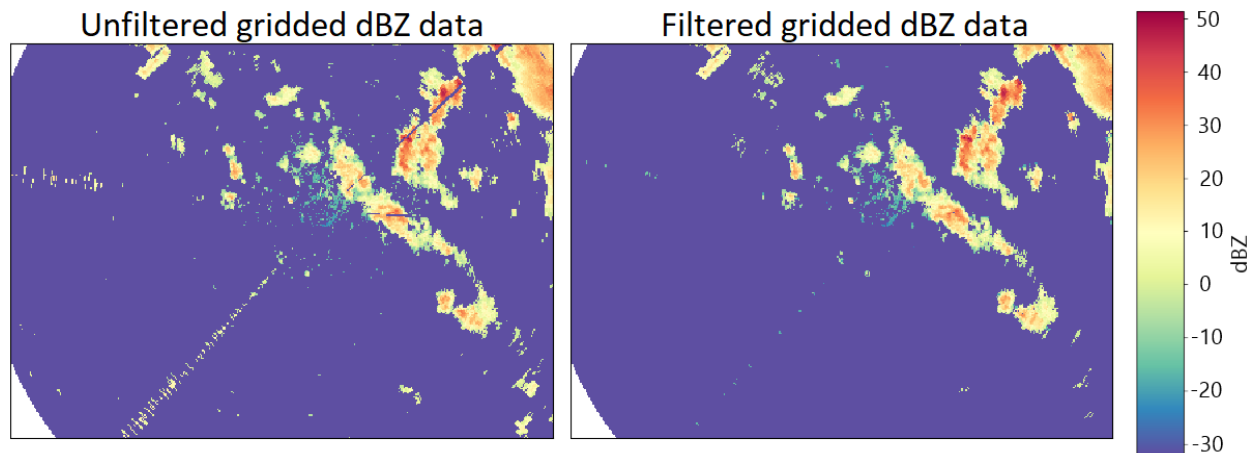
Radariandmetest leiti jaamade geograafilistele asukohtadele kõige lähemal asuvad radariandmete sademesummad R (mm/h), kasutades 15-min sammuga mõõdetud radariandmevälju. 15-minutilised sajuintensiivsused akumuleeriti omakorda tunnisummadeks. Saadud tunnisummad on võrreldavad maapealsete jaamade tunnisummadega. Kahe andmehulga lõimimine keskmise kõrvalekalde meetodiga teostati tunnisummade tasemel. See ajaline samm tuleneb jaama andmete ajalisest lahtusest. Saadud parandatud tunniandmed summeeriti kolmetunnisteks sademesummadeks, mis on sisendiks tuleohu indeksite arvutustele. Samuti toimus meetodi valideerimine üle pika ajaperioodi sama meetodika järgi, ehk võrreldi maapealsete jaamade punktandmeid ja radariandmetest jaamale lähimaid punktandmeid.



Joonis 1. Radari ja maapealsete sademejaamade andmete töötlemise skeem.

1.3 Tarkvaralise töövoo kirjeldus

Andmete töötlemiseks kasutati vabavaralist Pythoni programmeerimiskeelt ning erinevaid andmetöötlusteikke, millest tähtsamad on: numpy, pandas, scipy, matplotlib, cartopy, netCDF4 ja wradlib. Suurem osa funktsioone radariandmete töötlemiseks pärineb wradlib paketist. Wradlibi sisselugemisefunktsioonid võimaldavad Eesti radariandmete arhiveerimisel kasutatavat Vaisala SIGMET IRIS RAW vormingus failide efektiivset lugemist. Radariandmete eeltöötlemise käigus püüti eemaldada väga kõrge peegelduvusväärtusega kiiri, mis on tingitud välistest raadiolaineallikatest. Selleks otsiti polaarkujul toorandmetest anomaalselt kõrgeid summeeritud väärtusi (`scipy.signal.find_peaks()`). Ebasoovitavad kiired eemaldati andmetest täielikult, ning asendati kahe kõrvalpaikneva kiire aritmeetilise keskmisega. Järgnevalt kasutati Gabella filtrit (`wradlib.clutter.filter_gabella()`) maapinnapeegelduse ja muu ebamäärase (statistiliselt mittemeteoroloogiliseks kvalifitseeruva) signaaliga müra eemaldamiseks. Tehnilistel põhjustel puuduvad üksikud kiired täideti külgnivate kiirte aritmeetilise keskmisega. Kombineeritud eeltöötlemise mõju näide on esitatud joonise 2 parempoolsel paneelil, kus on näha nii kiirte eemaldamine, müra eemaldamine kui ka kadunud kiirte täitmine.



Joonis 2. Radari peegelduvusandmete eeltöötuse näide. Vasakul on töötlemata toorandmed, paremal on eemaldatud tugevamad välised raadiohäired ja muud üksikud mittemeteoroloogilised andmepunktid.

15-minutilise sammuga radariandmed summeeriti ühe tunni kaupa, et neid saaks kasutada koos maapealsete jaamade tunnisummadega. Radariandmetest leiti automaatjaamade geograafilistele koordinaatidele lähimad pikslid (`wradlib.adjust.RawAtObs()`), mis esindavad hinnanguliselt jaama kohal olnud sadu. Kokkuvõtvalt valiti välja iga tunni kohta maapealsete jaamade arvuga võrdne arv radaripikslite väärtusi. Saadud tunnipõhiste radar-jaam andmepaaride väärtuste põhjal leiti keskmise kõrvalekalde parameeter (`wradlib.adjust.AdjustMFB()`), millega korrutati kasutatav radari andmematriks. Korrigeeritud radariandmestik interpoleeriti eeldefineeritud regulaarsele võrgustikule, mis ühtis projektis kasutatud meteoroloogiliste mudelite andmestikega. Korrigeeritud ja sobivale võrgule interpoleeritud radariandmestik salvestati NetCDF andmevormingusse (`netCDF4.Dataset()`).

2. Testimine ja veahinnangud

2.1 Radariandmete kvaliteediprobleemid ning nende parandamise võimalused

Suurimad veavõimalused on antud produkti loomisel seotud ilmaradari väljundi ebapiisava kvaliteediga, seepärast kirjeldame ilmaradari andmete kvaliteediprobleeme ning nende parandamise võimalusi. Esmalt võib need kvaliteediprobleemid seostada sisemiste ja väliste faktoritega (Holleman et al., 2006). Sisemised faktorid on seotud andmete kvaliteeti mõjutavate radarisüsteemi omadustega. Välised faktorid on süsteemist sõltumatud. Selline jaotus on mõnevõrra meelevaldne, kuna sisemised ja välised mõjurid võivad olla üksteisega seotud. Sisemistest teguritest tähtsaim on radari asukoht, millest sõltuvad ka paljud välised mõjurid. Samas on radari asukoht kõige püsivama loomuga ja sellest põhjustatud probleeme (näiteks elektromagnetlainete leviku teed takistavad lähedalasuvad objektid ja mittemeteoroloogiline peegelduvus (ik. *clutter*)) saab parandada ainult osaliselt. Sisemiste faktorite alla kuuluvad veel radari laineala (sellest sõltub signaali sumbumine ja tundlikkus), radarikiire läbimõõt (ik. *beam width*), antenni suunatuse täpsus (nii kõrguse kui asimuudi suunaline) ja radari

elektromagnetilise kalibratsiooni vead. Kahte viimast kalibreeritakse regulaarselt ka KAURis, aga kuna kalibratsioon on oma olemuselt mitte-ideaalne protseduur, jäävad ka seejärel andmetesse sisemised vead, mida ei ole võimalik üles märkida ja andmetöötles arvestada. Seega on oluline radariandmete kvaliteedile tähelepanu pöörata ka regulaarse füüsilise kalibratsiooni järel ja neid võimalusel andmetöötles abil taas kalibreerida. Selles osas pakuvad häid võimalusi kaksikpolarimeetriliste radarite andmed. Horisontaaltasandi peegelduvust Z_h saab kalibreerida kasutades teadmist, et see peab olema kooskõlas teiste peamiste kaksikpolarimeetriliste andmeväljadega. Meetod on põhjalikult kirjeldatud Gorgucci jt (1992) ja Gourley jt (2009) poolt. Kuna see lähenemine eeldab üksikasjalikku andmete filtreerimist ja mitme-etapilist töötlust, on selle operatiivseks kasutuseks sobitamine keerukas. Täiendava variandina on horisontaaltasandi peegelduvust võimalik kalibreerida, võrreldes ja monitoorides vähemalt kahe radari kattuv alal olevaid peegelduvuse väärtusi. Näiteks on selline meetod operatiivses kasutuses Soome Meteoroloogia Instituudis, kus tänu meetodi efektiivsusele on loobutud regulaarsest füüsilisest kalibreerimisest.

Välised kvaliteeti mõjutavad faktorid võib jagada kolme suuremasse klassi:

- 1) mittemeteoroloogilised objektid (interferents, tuulepargid, laevad, maapinna peegeldused, linnud, putukad);
- 2) radarikiire levikuga seotud probleemid (kiire laienemine ja mittetäielik täitmine, kiire üleminek sademetest, sumbumine, "üleulatuvad sademed" (*overhanging precipitation* - radar näitab kaugel aladel sademeid, mis tegelikult maapinnani ei jõua);
- 3) peegelduvuse ja sademete intensiivsuse vaheline seos.

Mittemeteoroloogiliste objektide eemaldamine radariandmetest on oluline nii andmete operatiivse kasutuse seisukohast (langeks andmete väär interpreteerimise tõenäosus erineva tasemega kasutajate poolt), kui ka mitmete muude rakenduste tarbeks (näiteks radariandmetepõhised ekstreemsete sademete korduvusperioodide arvutused, mis võivad mittemeteoroloogiliste objektide tõttu näidata kallutatud tulemusi). Ka mittemeteoroloogiliste objektide eemaldamisel andmestikest pakuvad täiendavaid võimalusi kaksikpolarimeetrilised radarid. Mitmed põhjalikel teadustöödel baseeruvad algoritmid on saadaval vabavaraliste radariandmete töötlusteekide kaudu, nagu näiteks Py-ART (Helmus ja Collis, 2016) ja Wradlib (Heistermann et al., 2013).

Radarikiire levikuga seotud probleemid on teatud määral andmetöötles abil parandatavad. Näiteks on võimalik täpsustada radarikiire sumbumise efekti, võttes arvesse kaugete alade sajuhinnanguid. Samas kuulub siia alla mitmeid probleeme, mida lahendab ainult täiendavate radarite lisamine radarivõrku. Näiteks radarikiire sajast ülemineku korral, mida aasta külmal ajal juhtub Eestis suurtel aladel, aitaks ainult tihedam radarivõrgustik. Ka sumbumise efekti saab leevendada ainult seni, kuni on olemas piisavalt kvaliteetne signaal.

Pegelduvuse ja sademete intensiivsuse vaheline seos sõltub kasutatavast radaritehnikast ja paiga sademete klimatoloogiast. Sademete klimatoloogiast on oluline teada sademete

(vihmapiiskade) suurusjaotust ehk distromeetrist saadavaid andmeid ja võimalikult paljude maapealsete sademejaamade kvaliteedikontrollitud sademete (võimalikult lühiajalisi) summasid. Peegelduvuse ja sademete intensiivsuse vahelise seose täpsustamine oleks kasulik ka Eesti tingimuste jaoks. Kusjuures tuleks uurida kaksipolarimeetriliste andmete lisamist horisontaaltasandi peegelduvusele sademete intensiivsuse arvutustes ja selle operatiivsesse kasutusse võtmist, sest on näidatud, et see pakub suuremat täpsust intensiivsete sademete korral (Wang ja Chandrasekar, 2010; Chang et al., 2016; Montopoli et al., 2017; Cao et al., 2018).

2.2 Sademete täppiskaardistamise produkti testimine

Lõimimismetoodika mõju radariandmetest arvatud sademeproduktile hinnati võimalikult pika perioodi jaoks aastatel 2013-2018 (v.a 2017). Meetodit rakendati vaid soojal aastaajal, mil eelduste kohaselt enamus sademetest pilves on vedelas faasis. Valik tulenes ka eeldusest, et talvel on tulerisk suvega võrreldes oluliselt madalam. Sisuliselt pole takistusi, et toota vastavat radariprodukti ka talveperioodil, kui valdavalt esineb sademete tahke faas, kuid siin lisandub väljakutseid radari peegelduvuse andmetest sajuintensiivsuste hindamisele. Lume ja vee peegelduvused on väga erinevad ning nende vastavusse seadmine sademehulgaga eeldab kõigepealt sademe faasi teadmist. Teiseks asuvad lumepilved vihmapiilvedest madalamal, mistõttu on talvel suurem tõenäosus sajupilvedest radariga “üle vaadata” (efektiivne tööraadius sisuliselt väheneb). Samuti võib tuul sadava lumehelbe puhuda oluliselt eemale sellest kohast, kus ta õhus detekteeriti.

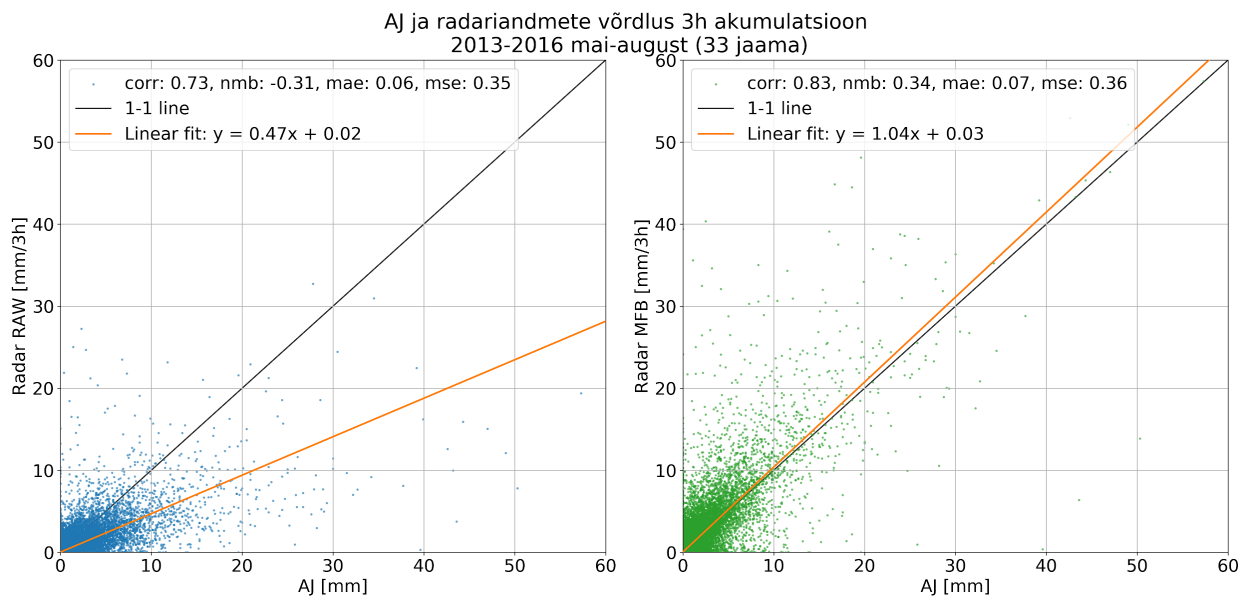
Sürgavere radaril esinesid 2017. aasta mitme suvekuu vältel tehnilised probleemid, mistõttu oli sel ajal signaali ja müra eristamine võimatu. Klimatoloogilisteks uuringuteks selliseid andmeid ei sobi ning kogu 2017. aasta jäeti andmestikust välja.

Produkti testimine on esitatud neljal hajuvusdiagrammil (joonised 3-6), kus on võrreldud jaamades mõõdetud sademesummasid otse radariandmetest (nn toorandmed) ning lõimimismetoodikaga parandatud sademesummadega. Valitud on 3-h ja 24-h sademete akumulatsiooniperioodid. Esialgne meetodi testimine toimus aastate 2013-2016 andmetel (joonised 3 ja 4) ning hilisem produkt koostati 2018. ja 2019. aasta jaoks (joonised 5 ja 6). Joonistel 3-6 on kasutatud järgnevaid statistilisi karakteristikuid:

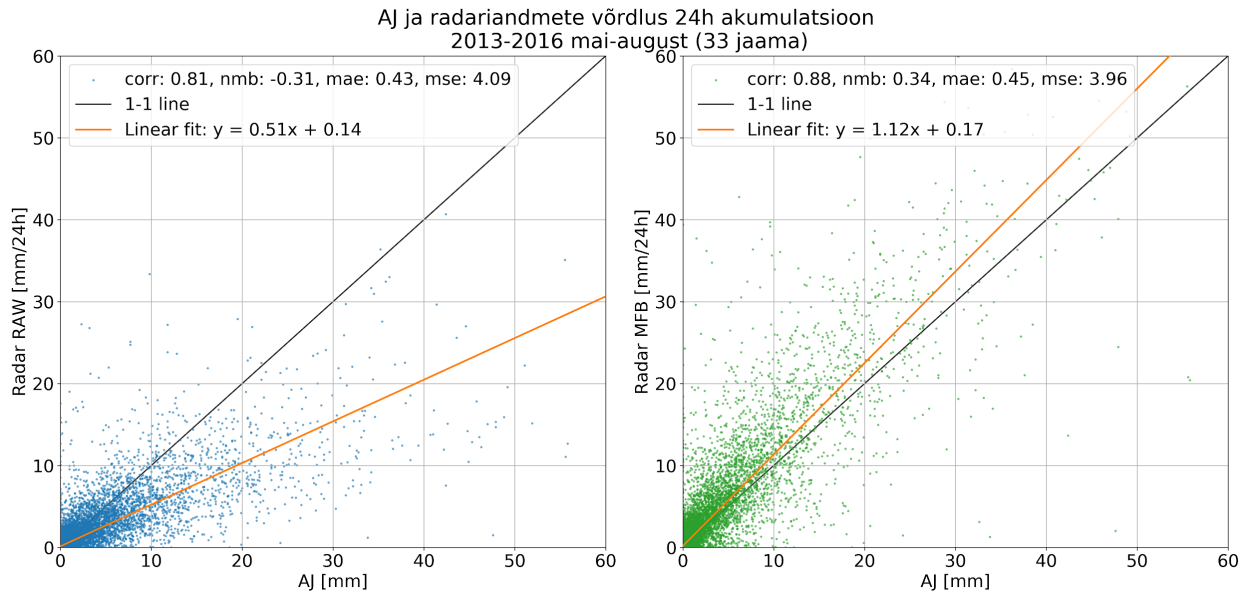
- Corr - korrelatsioonikoefitsient;
- nmb (*Normalised Mean Bias*) - normaliseeritud keskmine kõrvalekalle;
- mae (*Mean Absolute Error*) - absoluutne keskmine viga;
- mse (*Mean Squared Error*) - ruutkeskmine viga.

Joonise 3 vasakpoolsel toorandmete paneelil on näha sajukoguste tugevat alahindamist radari poolt, eriti tugevamate sadude puhul. Keskmise kõrvalekalde meetodiga töödeldud andmed paremal paneelil näitavad, et radar hindab sademesummasid liiga kõrgeks. Seda illustreerib ka andmete normaliseeritud keskmine kõrvalekalle, mis näitab töötlemata radariandmete puhul

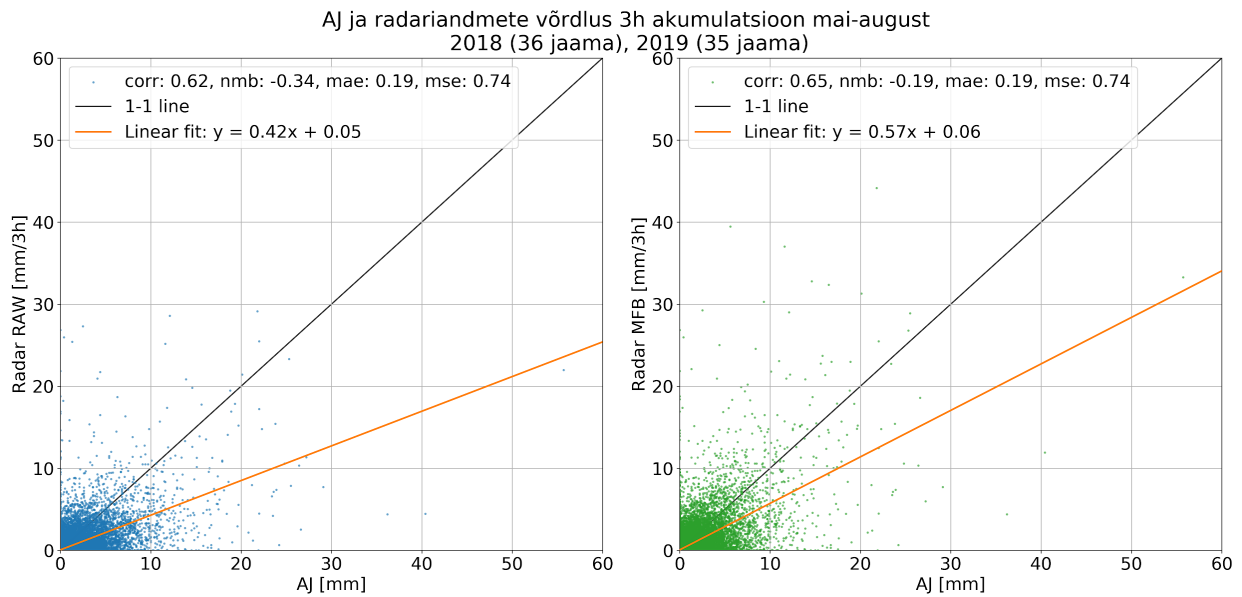
nmb=-31%, kuid lõimitud andmete korral nmb=34%. Normaliseeritud keskmise kõrvalekalde nmb väärtuse määravad ära suured kõrvalekalded, mistõttu mõni üksik suur kõrvalekalle võib oluliselt tõsta selle parameetri arvvaartust. Seda kinnitab asjaolu, et absoluutne keskmine viga ja ruutkeskmine viga on mõlemal juhul samas suurusjärgus. Siiski on MFB meetodiga parandatud radariandmed 10% võrra kõrgema korrelatsioonikoefitsiendiga, mis näitab, et kasutatud meetodil on radari ja jaama andmete lõimisel positiivne mõju olnud. Sarnane mõju on jälgitav nii 3-tunni (joonis 3) kui ka 24-tunni (joonis 4) akumulatsioonide andmetes, kuid 24-tunni summades on MFB meetodi ülekorrigeerimine tugevama mõjuga. Pikema perioodi summades on näha, kuidas töödeldud andmete punktipilv ümbritseb 1-1 joont tihedamalt kui toorandmete puhul. Kuna tuleohu kaartide loomisel kasutatakse 24-tunni ja veelgi pikema ajavahemiku sademesummasid, tõstab MFB meetodi kasutamine radariandmete usaldusväärsust tuleohu riskihinnangute tegemisel. 2018.-2019. aastate kohta tehtud joonistel 5 ja 6 on tulemused kooskõlas eelneva pikema perioodi (2013-2016) andmetega. Lühema perioodi tõttu on andmete hajuvus suurem, kuid sajuhinnangute paranemine MFB meetodi kasutamise tulemusena on siiski näha.



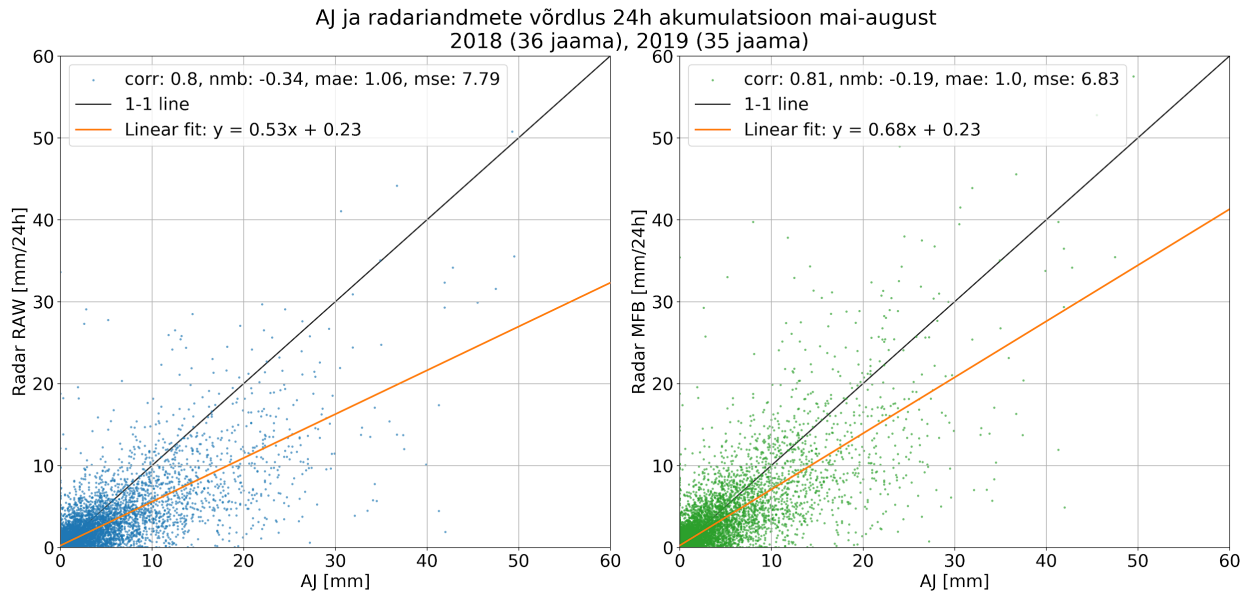
Joonis 3. Radari ja maapealsete sademejaamade 3-tunni sademesummade võrdlus, vasakul toorandmed, paremal mfb meetodiga töödeldud andmed 2013-2016.



Joonis 4. Radari ja maapealsete sademejaamade 24-tunni sademesummade võrdlus, vasakul toorandmed, paremal mfb meetodiga töödeldud andmed 2013-2016.



Joonis 5. Radari ja maapealsete sademejaamade 3-tunni sademesummade võrdlus, vasakul toorandmed, paremal MFB meetodiga töödeldud andmed 2018-2019.



Joonis 6. Radari ja maapealsete sademejaamade 24-tunni sademesummade võrdlus, vasakul toorandmed, paremal MFB meetodiga töödeldud andmed 2018-2019.

Kasutatav radari ja jaama andmete töötlusfunktsioon (`wradlib.adjust.AdjustMFB()`) kontrollib alati enne funktsiooni rakendamist valideeritud radar-jaama andmepaaride sisu ning jätab välja need punktid, kus paari üks väärtustest on null. Sellisel moel jäi välja 2,6% andmepunkte, kus radariandmetes polnud sadu registreeritud, kuid jaamas oli ja 3,9% oli seis vastupidine. Sellise kontrolli tõttu jäi paranduskoefitsiendi arvutustest välja 6,5% kõikidest andmepaaridest aastatel 2013-2019 (v.a 2017 aasta andmed). Paraku korrutatakse jaamades mitteregistreeritud sademete puhul nullist erinevad radarpikslid paranduskoefitsiendiga läbi, mille kaudu tekib neis asukohtades veelgi tugevam sademete ülehindamine. Sellised pikslid võivad olla tingitud eelpooltoodud (2.1) faktoritest, mis veelkord rõhutab radarprodukti kvaliteedi olulisust.

Keskmise kõrvalekalde meetodi negatiivne omadus on, et sademevälja korrigeerimist teostatakse kogu andmematriksi kohta täpselt sama kaaluga. Kuna radar ei mõõda oma mõõteulatuse lõikes sademeid ühesuguse tundlikkusega, tähendab see juba meetodi olemuslikult võimalikke vigu lõpptulemuses. Parimad tulemused selle meetodiga saavutatakse olukorras, kus esineb ühtlane laussadu väga suurel alal. Kui sajab mõõdukalt üle väga suure ala, siis saadakse radariandmete korrigeerimiseks suurem kogus valideeritud andmepaare, (radar-jaam), ning välditakse suuremaid vigu ja kõrvalekaldeid meetodi töös. Olukord on probleemne, kui radarist väga kaugel esineb tugev hoogsadu. See tähendab, et radar näeb rünksajupilve ülemist osa, kus peegelduvusväärtused võivad tulla nõrgemad, kui nad tuleksid sama sajupilve alumisest osast. Maapinnal võib aga taoline kõrge rünksajupilv väga tugevat sadu põhjustada. Sellest lähtuvalt võib keskmise kõrvalekalde koefitsient tulla väga suur, ning selle ühe n-ö eksliku andmepaari põhjal saab kogu radari andmematriksi tugevalt ülekorregeeritud.

3. Soovitused tulevikuks

Praegune radari- ja jaamaandmete lõimitud produkt annab kinnitust, et ka antud sademejaamade arvu ning mõõtmisrutiini puhul annab keskmise kõrvalekalde meetod RITA KAUGSEIRE projekti rakendusteks oluliselt parema sademeprodukti kui ükskõik kumb meetod eraldiseisvalt.

Radariandmetest sajakoguste täpsete kvantitatiivsete hinnangute saamisel mängib andmete eeltöötlus suurt rolli ning vajab tulevikus kindlasti rohkem tähelepanu. Antud projekti eesmärk polnud arendada süvitsi eeltöötlust, vaid uurida kahe andmehulga lõimimise võimalusi, seetõttu on siin hoitud eeltöötlus võimalikult lihtsana. Loomulikult tõstab madalam häirituste arv ja müravaba andmestik lõpp-produkti usaldusväärsust, kuid antud juhul kasutatud kahe erineva andmestiku kasutamine eeldab kvaliteetsest sisendit mõlema andmehulga puhul. Seega on oluline, et andmete kvaliteedi parandamine toimuks iga kasutatava andmeallika osas. Praegu on kasutatud vaid üht Eesti radaritest, sest atmosfäärifüüsika labori töörühm on oma aastatepikkuste Eesti sademete radarklimatoloogia uuringute käigus kontrollinud ja arvutuslikult kalibreerinud vaid Sürgavere radari kogu andmestiku. Antud projekti lühiduse tõttu polnud teostatav Harku radari andmete kvaliteedi põhjalik kontroll ja eeltöötlus ning seetõttu puudus võimalus neid andmeid tulemissse kaasata. Samuti on kontrollimata kahe radari komposiitandmestiku kvantitatiivsete sademete kvaliteet, sealhulgas pole uuritud ka erinevate komposiitimismeetodite mõjusid. Harku radari andmete kaasamises peitub üks võimalusi parandada radarprodukti ruumilist katvust just Eesti põhjarannikul, samuti saaks sel puhul kasutada kahe radari andmete kattuvusalal vastatikkust kalibratsiooni. Radarisignaali parema kvaliteedi tagamiseks KAURis soovitame kaaluda radarsignaali kalibreerimist kasutades kaksipolarimeetriliste karakteristikute omavahelist kooskõla. Kõik see eeldab aga põhjalikku algoritmide testimist ja andmete analüüsi. Põhjalik eelnev analüüs on vajalik, et mitte eemaldada andmetest töötamise käigus ka päris sademeid - see piir on sageli väga õrn ja sellega peab igasuguse täiendava töötamise korral arvestama.

Praegune KAURi maapealsete sademeandmete kogumise korraldus ei võimalda lõimimismeetodit oluliselt parandada, sest tagatud on vaid 1-tunniste sademeandmete kvaliteedikontroll. Mida lühemaid akumulatsioone korrigeerida, seda täpsem saab olema väljund (Voormansik jt 2020), seega on tarvis parema ajalise lahutusega sademejaamade andmeid. See ei nõua suuri rahalisi investeeringuid, sest juba praegu mõõdavad instrumendid 6 korda suurema sagedusega. Radari ja jaamade andmete optimaalsema võrdluse osas on oluline, et jaamade andmed oleksid samuti 15-minutilise (või väiksema) sammuga.

Eesti hõre sademejaamade võrgustik esitab lõimimismeetoditele lisaväljakutseid, sest meetodite valideerimine sõltub sõltumatute andmete hulgast (Voormansik et al. 2017). Radarandmeid efektiivselt kasutavate riikidega võrreldes, on sademejaamade hulk Eestis 1 km² kohta väga madal. Belgias MFB meetodi rakendamiseks tehtud uuringus (Goudenhoofdt ja Delobbe, 2009) kasutati radari 120 km maksimaalset ulatust, kuhu sisse jäi 110 maapealset sademete

mõõtmisjaama. See tähendab ühte jaama 135 km² kohta. Meie uuringus on keskmiselt vaid üks jaam 1000 km² kohta ning vaatlusvõrgu andmete maksimaalseks rakendamiseks tuli kasutada kogu radari ulatust (250 km), mis ei ole radariandmete kvaliteedi suhtes optimaalne. Selliste tingimustega oli meil kasutada kokku 36 jaama andmeid. Jaamade vähesus piirab ka antud meetodi edasiarendust regionaalseks. Eriti oluline oleks jaamade lisamine radarist kaugematel aladel.

4. Kasutusala

Tulekahjude riskihinnanguks on sellisel tasemel saavutatud tulemit võimalik kasutada. Tulevikus on sarnast radari- ja jaamaandmete lõimitud produkti võimalik kasutada ka põllumajandus-, siseveekogude äravoolude arvutamise, toitainete ärakande arvutuste ja muude rakenduste jaoks.

Ilmaradari suurimaks probleemiks on andmete kvaliteet, kuna häirivaid sisemisi ja välimisi faktoreid on mitmeid. Samas, probleemidest üle saades, on rakendusvaldkondi väga palju. Näiteks usaldusväärsemad looduslike tulekahjude riskihinnangud, paremad põllumajanduslike aga ka metsanduse tegevuste hinnangud (näiteks sademete jälgimine taimede kasvuperioodil, viljakoristuse võimalikkus), täpsemad sademete klimatoloogilised uuringud (linnade sadeveesüsteemide projekteerimine, tugevate tormide korduvusperioodide arvutamine), aga ka detailsemad hinnangud ehitus- ja transpordisektori igapäevatoos. Kuna potentsiaalsete kasusaajate hulk seotud andmestikega on suur, on soovitus selline produkt KAURis operatiivselt kasutusele võtta. Tartu Ülikooli füüsika instituudi atmosfäärifüüsika labori teadlased näevad mitmeid võimalusi, kuidas seda produkti on võimalik ka Eesti tingimustes edasi arendada ning KAURiga koostöös selline produkt töösse rakendada.

5. Andmed

Sademevälja lõplikud väljundandmed antakse NetCDF formaadis. Kolme tunni summad on arvutatud kolme erineva alghetke põhjal: 00.00 UTC, 01.00 UTC ja 02.00 UTC. Nõnda saadakse vastavalt esimesel juhul summad 00.00-03.00; 03.00-06.00; ... UTC; teisel juhul 01.00-04.00; 04.00-07.00; ... UTC ning kolmandal juhul 02.00-05.00; 05.00-08.00; ... UTC. 24h sademesummad akumulēeriti ainult 0 UTC baasiga andmetest ajavahemikule 06.00-06.00 UTC. Andmed on saadaval kas ühe NetCDF failina, kus kogu kaheaastase perioodi vastavad ajahetked (3h või 24h) on koos ühes failis, näiteks merged3h_b1.nc või merged24h_b0.nc. Teine võimalus on, et iga ajahetke kaart on eraldi NetCDF vormingus. Eraldi salvestatud failid on antud kõik eraldi alamkataloogides b0, b1 ja b2 vastavalt üleval kirjutatud loogikale baashetke summeerimisest. Üksikute ajahetkede failinimed on järgnevas formaadis: SURYYMMDDHHmm.nc, kus SUR on Sürgavere radari kolmetäheline akronüüm, YY kahekohaline aastaarv (näiteks 18 või 19), MM on kuu, DD on päev, HH on tund, mm on minutid. Faili nimes olev ajahetk tähistab summeerimise lõppaega (eelnevad 3 või 24 tundi), nii et see ajahetk ise summas pole. Näiteks SUR1805241600.nc tähendab kuupäeva 24.05.2018 kell 16.00, kus sademed on summeeritud

ajavahemikus 13.00-15.59. Selline summa on arvatud baasiga 1h, seega oleks antud fail leitav alamkataloogist b1.

Andmed on interpoleeritud samale korrapärasele WGS84 võrgustikule nagu projektis kasutusel olnud meteoroloogiliste mudelandmete andmed. Mõlema andmehulga ruumiline lahutus on 1 km x 1 km x- ja y-suunas. Võrk on antud koordinaatidest 21,5896 – 28,3712 kraadi pikkuskraadides (393 sammu, pikkusega 0.0173 kraadi), ning 57,4327 – 59,9035 kraadi laiuskraadides (285 sammu, pikkusega 0,0087 kraadi).

Viited

Cao, Q., Knight, M. and Qi, Y., 2018. Dual-pol radar measurements of Hurricane Irma and comparison of radar QPE to rain gauge data, In Proceed. of the 2018 IEEE Radar Conference, Oklahoma City, OK, USA, 23-27 April 2018, 0496-0501, <https://doi.org/10.1109/RADAR.2018.8378609>

Chang, W.Y., Vivekanandan, J., Ikeda, K. and Lin, P.L., 2016. Quantitative precipitation estimation of the epic 2013 Colorado flood event: Polarization radar-based variational scheme, J. Appl. Meteorol. Climatol., 55, 1477-1495, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0222.1>

Gabella, M., Notarpietro, N., 2002. Ground clutter characterization and elimination in mountainous terrain. In Use of radar observations in hydrological and NWP models, 305–311. Katlenburg-Lindau, 2002. Copernicus. URL: <https://porto.polito.it/1411995/>.

Gorgucci, E., Scarchilli, G., and Chandrasekar, V., 1992. Calibration of radars using polarimetric techniques, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 30, 853-858, <http://doi.org/10.1109/36.175319>.

Goudenhoofdt, E. and Delobbe, L., 2009. Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates, Hydrol. Earth Syst. Sci., 13, 195-203, <https://doi.org/10.5194/hess-13-195-2009>.

Gourley, J.J., Illingworth, A.J., and Tabary, P., 2009. Absolute calibration of radar reflectivity using redundancy of the polarization observations and implied constraints on drop shapes, J. Atmos. Ocean. Technol., 26, 689-703, <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1152.1>.

Heistermann, M., Jacobi, S., and Pfaff, T., 2013. Technical Note: An open source library for processing weather radar data (wradlib), Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 863-871, doi:10.5194/hess-17-863-2013

Helmus, J.J. and Collis, S.M., 2016. The Python ARM Radar Toolkit (Py-ART), a Library for Working with Weather Radar Data in the Python Programming Language, J. Open Res. Softw., 4(1), <http://doi.org/10.5334/jors.119>

Holleman, I., Michelson, D., Galli, G., Germann, U., Peura M., 2006. Quality information for radars and radar data. OPERA 2 deliverable OPERA2005 19, EUMETNET: Brussels. Available from:

https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/067/378/original/opera_wp12_v6.pdf?1495620742

Marshall, J. S. and Palmer, W. M. K., 1948. The distribution of raindrops with size, *J. Meteorol.* **5**, 165–166

Montopoli, M., Roberto, N., Adirosi, E., Gorgucci, E., and Baldini, L., 2017. Investigation of Weather Radar Quantitative Precipitation Estimation Methodologies in Complex Orography, *Atmosphere*, **8**, 34, <https://doi.org/10.3390/atmos8020034>

Voormansik, T., Rossi, P.J., Moisseev, D., Tanilsoo, T. and Post, P., 2017. Thunderstorm hail and lightning detection parameters based on dual-polarization Doppler weather radar data. *Meteorological Applications*, **24**(3), pp.521-530.

Voormansik, T., Cremonini, R., Post, P. and Moisseev, D., 2020. Use of dual-polarization weather radar quantitative precipitation estimation for climatology. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, pp.1-14.

Wang, Y. and Chandrasekar, V., 2010. Quantitative precipitation estimation in the CASA X-band dual-polarization radar network, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **27**, 1665-1676, <https://doi.org/10.1175/2010JTECHA1419.1>