

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND

Füüsika instituut

Jorma Rahu

***OPTICAL FLOW* MEETODI KASUTAMINE PARANDAMAKS
RADARVAATLUSTE AJALIST LAHUTUSVÕIMET**

Magistritöö (30 EAP)

Juhendajad: Tanel Voormansik, MSc,

Riigi Ilmateenistuse peaspetsialist, TÜ doktorant

Piia Post, PhD TÜ dotsent

Tartu 2018

Infoleht

***Optical flow* meetodi kasutamine parandamiseks radarvaatluste ajalist lahutusvõimet**

Sademed on jaotunud ajas ja ruumis ebaühtlaselt, mistõttu on sajuhulkade usaldusväärne hindamine ja määramine keeruline ülesanne. Mitmel elualal on aga sellekohane informatsioon hädavajalik. Eestis koostatakse ametlikke sademekaarte sademejaamade andmete põhjal. Kuna nende võrgustik on hõre, pole saadud kaardid piisava ruumilise ja ajalise lahutusvõimega. Paremate sademekaartide koostamiseks oleks võimalik kasutada ilmaradarite registreeritud andmeid. Eesti ilmaradarid skaneerivad 15-minutilise intervalliga, kuid selline mõõterežiim ei pruugi olla usaldusväärsete sademehinnangute tegemiseks piisav. Magistritöös uuriti, millist mõju avaldab *optical flow* meetodiga arvutuslikult töödeldud radariandmete kasutamine sademehinnangule. Interpoleerides radari mõõtetulemusi simuleeriti olukord, nagu radar oleks skaneerinud üheminutilise vahega. Arvutuslikult saadud andmeid võrreldi juhtumipõhiselt nii radari kui ka sademejaamade registreeritud tulemustega. Lisaks koostati radariandmete ja simuleeritud andmete põhjal tervet Eesti territooriumi katvad akumulatsioonikaardid.

Märksõnad: ilmaradar, *optical flow*, sademekaart, pilditöötlus

CERCS: Geofüüsika, füüsikaline okeanograafia, meteoroloogia (P500), Kaugseire (T181), Pilditehnika (T111)

Enhancement of radar rainfall estimates for Estonian territory through *optical flow* temporal interpolation

Precipitation is distributed very unevenly both in time and space, making their estimation a challenging task. For many applications, however, such information is crucial. Present Estonian official precipitation maps are based on rain gauge data. As the gauge network is sparse, these maps are usually lacking in spacial and temporal resolution. Weather radar data can be used for improved precipitation maps. Estonian radars perform scans every 15 minutes but in many cases such temporal resolution can be insufficient for reliable quantitative precipitation estimation. Image processing method *optical flow* was used in order to investigate the effect of using processed radar data to make precipitation estimations. For specific precipitation events, original and computationally simulated radar data was compared with rain gauge data. In addition to this, longer period precipitation accumulation maps, covering entire Estonian territory, were made.

Keywords: weather radar, optical flow, precipitation map, image processing

CERCS: Geophysics, physical oceanography, meteorology (P500), Remote sensing (T181), Imaging, image processing (T111)

Sisukord

Kasutatavad lühendid	4
1 Sissejuhatus	5
2 Kirjanduse ülevaade	7
2.1 Sademehulkade hindamise võimalustest Eesti aladel	7
2.2 <i>Optical flow</i> meetod	8
2.2.1 Matemaatiline tuletus	11
2.2.2 Proesmans <i>et al</i> meetod	14
2.3 <i>Optical flow</i> teised kasutusala radariandmete töötlus	15
3 Seadmete kirjeldus ja uuritavate sajujuhtumite valik	16
3.1 Ilmaradarid	16
3.1.1 Ilmaradari andmed ja nende määramatused	17
3.2 Maapealsed automaatjaamad	19
3.3 Uuritud sajujuhtumid	20
4 Metoodika	22
5 Tulemused ja arutelu	25
5.1 Jaamapõhised tunnisummad ja nende ajalised käigud	25
5.2 Radariandmete akumulatsioonikaart	30
6 Kokkuvõte	35
7 Tänuõnad	36
8 Kasutatud kirjandus	37

Kasutatavad lühendid

ARM – *Atmospheric Radiation Measurement* – atmosfääri kiirgusmõõtmiste programm

BCC – *Brightness Constancy Constraint* – heleduse konstantsuse piirang

CSV – *Comma Separated Values* – komaga eraldatud väärtused (vorming)

I/O – *Input/Output* – sisend/väljund

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers* – Elektri- ja Elektroonikainseneride Instituut

PPI – *Plan Position Indicator* – konstantse kõrgusnurga panoraamvaade

Py-ART – *Python ARM Radar Toolkit* – Pythoni ARM radari tööriistakast

QPE – *Quantitative Precipitation Estimation* – kvantitatiivne sademete hinnang

QPF – *Quantitative Precipitation Forecast* – kvantitatiivne sademete prognoos

RLAN – *Radio Local Area Network* – raadio kohtvõrk

UTC – *Universal Time Coordinated* – maailmaaeg

WIFI – *Wireless Fidelity* – traadita kohtvõrk

WRM – *Weather Radar Magnetron* – magnetroniga (kiirgust tekitav element) ilmaradar

1 Sissejuhatus

Erinevates meteoroloogia ja hüdroloogiaga seotud valdkondades, nagu ilmaprognoos, põllumajandus, päästeteenistus, transport (eelkõige laeva- ja lennuliiklus), on oluline roll täpse ja usaldusväärse sademekaardi olemasolul. Sademete jaotus sõltub tugevasti orograafiast (pinnamoe mõju) ja kliimast ning seetõttu ei eksisteeri universaalseid meetodeid kõrge lahutusvõimega kaartide koostamiseks. Sademekaardi loomiseks on tarvis teada kvantitatiivseid sademete hinnanguid (QPE – *Quantitative Precipitation Estimation*). Sademehinnanguid võib saada mitmete mõõteseadmete andmete alusel: sadememõõtjad, ilmaradarid, seadmed satelliitidel. Kuna igal mõõtemetodil on omad eelised ja puudused, võib parimaid tulemusi anda just eri meetodite omavaheline sidumine.

Eestis kasutatakse hetkel sademeakumulatsiooni hindamiseks vaid maapealsete automaatjaamade sadememõõtjate registreeritud tulemusi. Mõõtmisi teostavad ka ilmaradarid, kuid nende infot kasutatakse operatiivses ilmaennustuses kvalitatiivse teabena. Radariandmetest akumulatsioonikaartide tegemine eeldaks põhjalikke uuringuid ja arendustööd.

Radarite QPE kontrollimiseks võrreldakse neid enamasti maapealsete sadememõõtjate tulemustega [1]. Eestis skaneerivad radarid 15-minutilise intervalliga. Selline ajavahemik võib olla piisav, et hinnata sademeakumulatsiooni ulatuslike ning aeglaselt liikuvate kihtsajupilvede korral, kus jaamade ja radari mõõdetud andmed võivad rahuldaval määral kokku langeda. Samas ei pruugi kiiremal arenevate konvektiivsete (tugeva vertikaalse arenguga) tormide korral olla tulemused enam kooskõlas. [2] Konvektiivsete tormirakkude ruumiline ulatus on võrdlemisi väike ning tõenäosused, et sajualad üldse üle mõõtejaamade liiguvad, on palju väiksemad kui kihtsajupilvede korral. Teiseks võib tugevate tuulte korral konvektiivse saju rakk liikuda üle jaama täpselt radari kahe skaneeringu vahele jääval ajal, mistõttu sadememõõtja tulemuste põhjal esinev suur sadu ei ilmne radari mõõteandmete akumulatsioonist. See aga põhjustab andmete võrdluses märkimisväärseid erinevusi. Ühe lahendusena sellele probleemile oleks radari mõõtmisstrateegia muutmine selliselt, et skaneeringuid teostataks lühemate ajavahemike tagant, näiteks 5-minutilise intervalliga. Samas ei ole mõõtmiste tihedamaks muutmisest kasu juba olemasolevate andmete ajalise lahutusvõime parandamiseks. Seega on seni mõõdetud andmete põhjal klimatoloogiliste uuringute paremaks läbiviimiseks võimalik neid vaid arvutuslikult töödelda.

Käesoleva töö eesmärgiks oli uurida digitaalse pilditöötlusmeetodiga *optical flow* töödeldud radariandmeid ning hinnata protsessi mõju saadud sademehinnangu ajalisele ja ruumilisele täpsusele. *Optical flow* meetodiga on võimalik ajaliselt järjestatud piltide põhjal hinnata kaadris toimunud liikumiste iseloomu. Meetodi eesmärk on leida igale pikslile vastav liikumisvektor. Leitud liikumisvektoritest moodustub kogu pildi ulatuses terviklik liikumisväli (kiirusväli). Vastava liikumisvälja vektoreid saab kasutada kaadritevaheliste hetkede interpoleerimiseks.

Tegemist on arvutusülesandega suurandmetest. Selleks tuli esiteks luua arvutusteks vajalik keskkond Tartu Ülikooli Füüsika instituudi Atmosfäärifüüsika labori serverisse, sest arvutusmahud olid suured. Teiseks tuli rakendada *optical flow* meetodit andmete interpoleerimiseks, radariandmed eelnevalt ristkoordinaadistikku teisendades. Teostamiseks maapealsete sadememõõtjate ning radari mõõdetud andmete võrdlust tuli viimased georefereerida ning kõik kvantitatiivsed sademehulgad viia samasse akumulatsiooniperioodi. Lisaks uuriti *optical flow* meetodiga radaripiltide interpoleerimise mõju sademete ajalise-ruumilise jaotuse hindamistäpsusele, milleks tuli koostada mõõdetud ja interpoleeritud radariandmetest Eesti territooriumi hõlmavad sademete akumulatsioonikaardid.

Töö algab Eesti aladel sademete hinnangute tegemisel esinevate probleemide ülevaatega. Seejärel kirjeldatakse radariandmete töötamiseks kasutatavat pilditöötlusmeetodi teoreetilist poolt ning selle rakendamise eesmärkidest. Järgnevas eksperimentaalses osas tutvustatakse põhjalikumalt kasutatavaid seadmeid ning nende andmeid. Peale seda kirjeldatakse lähemalt töös kasutatavat metoodikat ning saavutatud tulemusi.

2 Kirjanduse ülevaade

2.1 Sademehulkade hindamise võimalustest Eesti aladel

Sademed on ajaliselt ja ruumiliselt kõige ebaühtlasemalt jaotunud meteoroloogiline element, mistõttu on sajuhulga hindamine keeruline probleem. Täpsemate tulemuste saamiseks kombineeritakse erinevate seadmetega, nagu maapealsed ilmajaamad, ilmaradarid ja satelliidid, saadud mõõtmiste andmeid. Selline lähenemine sajuhulga hindamise täpsuse tõstmiseks on muutunud viimaste aastate jooksul aktuaalsemaks, kuna seadmete tehnoloogilised võimalused ja inimeste teoreetilised teadmised on järjest paremad [1].

Eesti aladel on satelliitmõõtmiste ruumiline ja ajaline lahutusvõime piiratud mõõtetehnoloogiliste puudujääkide tõttu. Geostatsionaarsete satelliitide ruumiline lahutusvõime Eesti laiuskraadidel on võrreldes ekvaatorilähedaste aladega kordades halvem, ning nende mõõtetulemuste abil sademehulkade hindamine pole mõistlik [3]. Lisaks on vaja kasutada ülalt vaates saadud andmete põhjal sajuhulkade täpselt hindamiseks keerulisi algoritme. Polaarorbiidi satelliidid on ruumilise lahutusvõime osas oluliselt paremad, kuid ülelennud Eesti aladest toimuvad ajaliselt liiga harva ning sademete suure muutlikkuse tõttu ei võimaldaks sellised mõõtmised isegi päevaseid akumulatsioone usaldusväärselt arvutada.

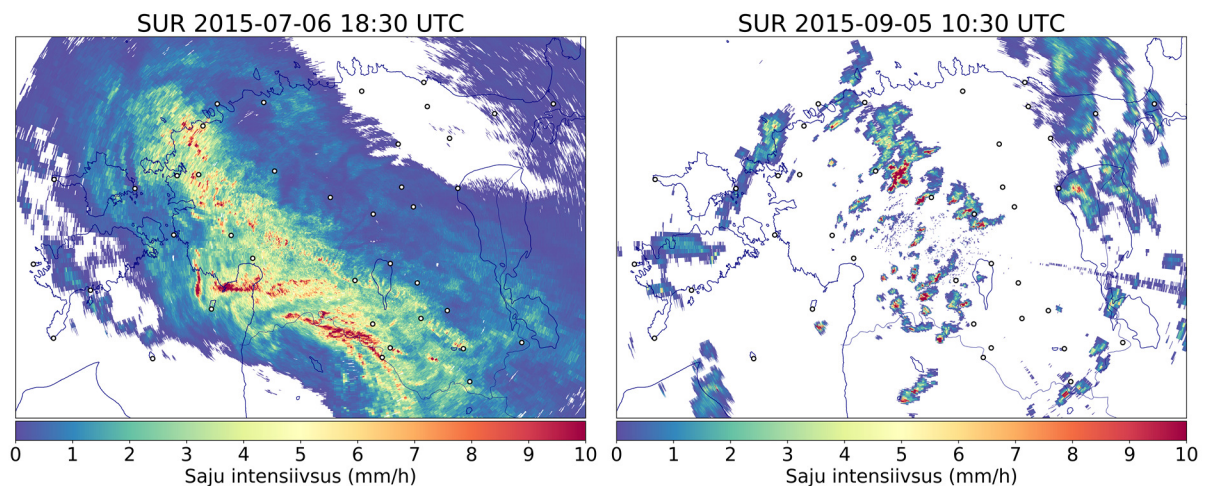
Maapealsete sadememõõtjate punktmõõtmistena saadud tulemused on olulisel kohal ilmavaatluses, sest need annavad piisava täpsusega hinnanguid sademehulkade kohta konkreetses mõõtepunktis. Puudujäägiks on aga nende võrgustiku ruumiline hõredus, mistõttu puudub terviklik informatsioon kogu Eesti territooriumi kohta [4]. Seadme sademeid koguva ava pindala on 200 cm² ning jaamad asuvad lähimast naaberjaamast keskmiselt paarikümne kilomeetri kaugusel. Sealjuures on alasid, kus sademejaamad asuvad üksteisele lähemal, ning nende võrgustik on lokaalselt tihedam, kuid on ka probleemsemaid alasid, näiteks Mandri-Eesti edelaosa ja Põhja-Eesti keskosa, kus suure maa-ala peale pole ühtegi jaama.

Kuna satelliitide ning ka maapealsete ilmajaamade mõõtmistest saadud andmete põhjal pole võimalik anda täielikku hinnangut sajuhulkade kohta Eesti aladel, võivad lahenduseks olla sademete radarmõõtmised. Eelnevalt kirjeldatud meetoditega võrreldes on ilmaradaritel oluliselt parem ruumiline ja ajaline lahutusvõime. Samas võivad radariandmed sademejaamade mõõtmistulemustest oluliselt erineda. See on osaliselt tingitud sellest, et radar mõõdab sademeid pilvedes, mistõttu võib esineda olukordi, kus radaripildilt on näha potentsiaalset sajuala, kuid kuna maapinnale sademed ei jõua, siis sademejaamad sadu ei registreeri [4].

Seetõttu on oluline radariga mõõdetud tulemuste kontrollimine. Satelliitmõõtmiste tehniliste puudujääkide tõttu on Eesti aladel omavahel tinglikult võrreldavad vaid maapealsed sadememõõtmised ning radarvaatlused. Kuigi meetodid on täiesti erineva iseloomuga, nähakse neid teineteist täiendavatena ning nende ühendamine on vaatamata erinevatele veaallikatele teostatav [5].

Sademed pärinevad peamiselt kahest eri pilveliigist: kihtsajupilved ja rünksajupilved. Kihtsajupilved on suhteliselt aeglase dünaamikaga pilved, mille eluiga ulatub tundidesse. Kihtsajupilvede tekkimine on seotud soojade ja niiskete õhumasside adveksiooniga (õhu horisontaalne liikumine) külmemate õhumasside peale, kus õhu tõustes ja temperatuuri langedes vesi kondenseerub ning võib langeda maapinnale vihmamana. Sadu on enamasti ühtlase ja rahulikuma iseloomuga, võrreldes konvektiivsete sadudega. Kihtsajupilved võivad olla väga ulatusliku katvusega (üle 100000 km², näide joonisel 1). [6,7]

Rünksajupilved on kõige pikema elueaga (45 minutit kuni mõni tund) vertikaalse arenguga pilved. Rünksajupilved võivad moodustada ka tormide süsteeme, tuues tihti kaasa nii tugevaid vihmasadusid, rahet kui ka äikest. Intensiivsete jahtumisprotsesside tõttu on nendes pilvedes vedela vee hulk suur: (1,5 – 4,5) $\frac{g}{m^3}$. [7] Rünksajupilvede tekkimist, arengut ja ajalist kulgemist on võimalik jälgida ka radaripiltidelt, kus konvektiivsed tormirakud on eristatavad väiksemate ulatustega võrdlemisi kõrgete peegelduvusväärtusega laikudena (joonis 1).



Joonis 1 Kihtsajupilve poolt tekitatud sajuala ilmaradari pildil (vasakul). Konvektiivsed rakud Kesk-Eestis (paremal).

2.2 Optical flow meetod

Liikumise tajumise kirjeldamine on aktuaalne mitmetes valdkondades, alustades psühholoogiast ja lõpetades arvutiteaduste ning masinõppimise rakendustega. Samas on tegu väga keerulise ülesandega. Üheks kasutatavaks võimaluseks on *optical flow* meetodi

rakendamine. *Optical flow* idee pärineb psühholoogia ja füsioloogia valdkonnast, kus see on seotud inimese ja loomade nägemismehhanismidega ning liikuvate objektide tuvastamise ja tajumisega. Eraldi uurimissuund ongi elusorganismide nägemistaju uurimine liikumistaju suhtes, sest inimesed/loomad on liikumise analüüsi osas eriti hästi kohanenud, kuid liikumise tuvastamise protsessi kirjeldamine ja põhjendamine on äärmiselt keeruline. [8]

Arvutinägemise valdkonnas on liikumisega seotud protsesside uurimine väga lai teadusharu, kus üheks kesksemaks lähenemiseks on *optical flow* meetod [9]. Ühe olulisema algoritmi lõi Horn ja Schunk (1981). Nad defineerisid *optical flow* digitaalsete piltide heledusmuustrite näivate liikumiste (voolamiste) kiirusväljade jaotusena, mis võivad tekkida objekti ja vaatleja suhtelisest liikumisest (ainult objekt liigub, ainult kaamera liigub, mõlemad liiguvad). Selle kohaselt on ajaliselt järjestatud piltidelt võimalik saada informatsiooni vaadeldava objekti ruumilise jaotuse ja selle jaotuse muutumise kiiruse kohta [10]. Pildilt saadav kahemõõtmeline liikumisväli kujutab endast kolmemõõtmelise liikumise projektsiooni pildi tasapinnale. Seega on võimalik liikumise vektorvälja kaudu hinnata tegelikku kolmemõõtmelist liikumist, mida piltidel on kujutatud. [11]

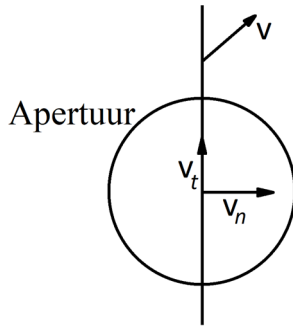
Matemaatiliselt kirjeldatuna on üldine idee leida vastavus kahe järjestikuse pildi pikslite intensiivsuste $I_1(x, y)$ ja $I_2(x + u, y + v)$ vahel. *Optical flow* on meetod, mis hindab selles mudelis kiiruste vektorvälja (u, v) . [9] Kuigi antud meetodil on suur potentsiaal, on see arvutinägemise valdkonnas populaarsust kogunud alles viimase paarikümne aasta jooksul. Seda seetõttu, et arvutite arvutusvõimsused polnud esialgsete meetodite avaldamise hetkel piisavad sellise mahuga arvutuste tegemiseks. [12,13]

Seos *optical flow* ja tegeliku reaalses maailmas toimuva kolmemõõtmelise liikumise vahel ei pruugi tingimata olla üheselt mõistetav. *Optical flow* kirjeldab liikumisest tekkinud muutusi järjestikustel piltidel mingi aja dt jooksul, kus *optical flow* väli on kiiruste vektorväli (*velocity field*), mis kirjeldab objekti kolmemõõtmelist liikumist kahemõõtmelisel pildil. Selline üldistus võib aga kaasa tuua erinevaid probleeme. Saadud liikumisväli peaks ideaalis sisaldama ainult neid liikumisi, mis on edaspidises töötluses vajalikud ja olulised, ning välja peaksid olema jäetud tausta või teiste mittehuvitavate piirkondade, nagu näiteks varjude, liikumised. Lisaks sellele võib valetulemusi põhjustada ka kaamera liikumine, mistõttu leitakse liikumisväli ka siis, kui objektid tegelikult ei liigu. Siin peitubki üks suurimaid probleeme *optical flow* defineerimisel, mille kirjeldamiseks kasutasid Horn ja Schunck järgmist mõttekonstruktsiooni: valgusallikas ja kaamera on statsionaarsed, ning kaadris pöörleb ühtlaselt mati pinnaga kera.

Kuna sellise kera pind valgust ei peegelda, ei registreerita mingit liikumisvälja, kuigi tegelik liikumine on olemas. Vastupidine on olukord siis, kui seesama kera seisab paigal, aga liigutatakse valgusallikat selle kera ümber. Sellisel juhul tuvastatakse nullist erinev liikumiste väli (tekitatud varjude poolt), kuigi tegelikult objekt eksperimendi vältel ei liikunud. See ilmestab elavalt asjaolu, et kuigi meetodi eesmärgiks on leida tegelikkusele vastav liikumiste väli, pole selle eristamine näivate liikumiste hulgast alati kerge. [10,14]

Digitaalsed pildid koosnevad pisikestest pildielementidest ehk pikslitest. Igal pikslil on kindel diskreetne heledusväärtus. Pikslitest moodustatud ruudustik ehk maatriks moodustab mõistetava pildi (või stseeni). Liikumist saab pildi tasandil kirjeldada pikslite heledusväärtuste muutumise kaudu, võrreldes kahte teatud ajavahemikuga tehtud pilti. Nagu eelpool kirjeldatud, ei pruugi aga heledusväärtuste muutumine vastata alati liikumisele, sest piksli väärtust võivad muuta lisaks objekti liikumisele ka teised tegurid, näiteks kaadri valgustatus (objektile langev päikesekiirgus ja teistelt objektidelt peegeldunud valgus). Siinkohal tehakse vahet kahel mõistel: liikumisväli (*motion field*), mis kujutab tegelikku kolmemõõtmelist liikumist, mis on projekteeritud pildi tasandile ja *optical flow* väli, mis kirjeldab pikslite heledusväärtuste „voolamist“ üle pildi tasandi. Kui liikumised on väikesed ja liikuv objekt pildil ei muutu, siis need kaks välja kattuvad. Praktikas selline olukord aga enamasti puudub. [15]

Täpse liikumisvälja arvutamist takistab ka niinimetatud ava probleem (*aperture problem*), mille tõttu pole uuritava piirkonna ulatuses võimalik üheselt määrata objekti tegelikku liikumissuunda. (Näiteks lokaalsete gradientmeetodite puhul liigutakse üle pildi kindla suurusega maskiga (või kerneliga) (näiteks 3×3 pikslit, 5×5 jne), kui objekt (või selle liikumise kiirus kaadrite vahel) on sellest alast suurem, võivad tekkida vead *flow*-välja täpsel hindamisel.) See tuleneb sellest, et määratav on ainult näiva liikumise suunaga risti olev kiiruse komponent, see aga ei pruugi tegeliku liikumise suunaga kokku langeda. Joonisel 2 on näha liiga pisikese apertuuri korral suure objekti liikumise hindamisest tekkivat probleemi. Objekti tegelik liikumise suund on määratud vektoriga v , kuid apertuuri ulatuses on võimalik üheselt määrata ainult näiva liikumise suunaga risti olev v komponent v_n . [11]



Joonis 2 Apertuuri probleemi illustratsioon, vertikaalne joon on liikuv objekt, või selle äär, ringjoon kujutab ava suurust. Objekti tegelik liikumise suund näidatud vektoriga v . v_n ja v_t vastavalt normaal- ja tangentsiaalkomponent. Ava ulatuses on üheselt määratav ainult kiirusvektori normaalkomponent. [11]

Sellest lähtuvalt pole olemas ühte universaalset ja töökindlat *optical flow* meetodit. Sobilik meetod tuleb valida sõltuvalt probleemi iseloomust. Meetodi täpsus võib tugevalt sõltuda liikuva objekti kujust ja kiirusest, kaadrisagedusest (*framerate*), stseeni keerukusest (taust), varjude olemasolust ja paljust muust. [14]

2.2.1 Matemaatiline tuletus

Vedeliku või gaasi massi jäävuse printsiipi kirjeldatakse matemaatiliselt pidevuse võrrandiga.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{c}) = 0 \quad (1)$$

ρ – keskkonna tihedus; \vec{c} – osakeste kiirusväli; $\frac{\partial}{\partial t}$ – ajalise osatuletise operaator; $\vec{\nabla}$ – nabla operaator

Seos kirjeldab asjaolu, et mingis ruumipiirkonnas oleva gaasi või vedeliku tiheduse ajaline muutus sõltub sellesse ruumipiirkonda lisanduva või lahkuva aine voost. [16] Sarnast konstruktsiooni rakendatakse ka *optical flow* tuletamisel, kus massi asemel eeldatakse pildi pikslite heledusväärtuste $I(x, y, t)$ konstantsust ajas (BCC - *Brightness Constancy Constraint*) [10]. Fleet ja Weiss on kirjeldanud heledusväärtuste jäävust (*intensity conservation*) valemiga:

$$\frac{\partial I}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (I \vec{c}) = 0, \quad (2)$$

I – pikslite heledusväärtused; \vec{c} – pikslite kiirusväli

mis on massi jäävuse seaduse analoog [17].

Eeldatakse, et kõikide objektide pinnad stseenil on sõltumata vaatamise nurgast sama heledusega (Lamberti eeldus) [9]. Tegelikuses ei ole see eeldus peaaegu kunagi tõene, sest kõikvõimalikud müraallikad ja stseeni keerukusest tulenevad probleemid võivad seda tingimust väga kergesti rikkuda. Siiski on heleduse konstantsuse eeldus praktikas *flow*-välja hindamiseks tähtsal kohal ning enamikul juhtudel sobiv. [17]

Seega tehakse *optical flow* meetodi puhul esmalt eeldus, et liikuva objekti pikslite intensiivsused esimeses ja järgmises kaadris on muutumatud:

$$I(x, y, t) = I(x + dx, y + dy, t + dt) \quad (3)$$

x – pildi x -koordinaat; y – pildi y -koordinaat; t – aeg kahe pildi vahel; d * - muutus vastava muutuja (*) suhtes

Arendades selle võrduse parema poole Tayloriga, saab järgneva seose:

$$I(x + dx, y + dy, t + dt) = I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial I}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial I}{\partial t} \frac{dt}{dt} + O(\partial^2). \quad (4)$$

$O(\partial^2)$ – Tayloriga lähenduse kõrgemat järku liikmed

Eelmainitud eeldus heleduse konstantsuse kohta lubab võrrandi vasaku ja parema poole esimese liikme välja taandada. Lisa-eeldus, et liikumised kahe kaadri vahel on väikesed (suurusjärgus 1 piksel), lubab ka kõrgemat järku liikmed $O(\partial^2)$ võrrandist välja jätta, sest nende mõju võib sel juhul lugeda piisavalt väikeseks. Meetodi eesmärk on leida kiirused, mida saab tähistada järgnevalt: $u = \frac{dx}{dt}$ ja $v = \frac{dy}{dt}$ ehk $\vec{c} = \left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}\right) = (u, v)$. Järelejäänud liikmetest saab pidevuse võrrandi ehk seose: [10]

$$-\frac{\partial I}{\partial t} = \frac{\partial I}{\partial x} u + \frac{\partial I}{\partial y} v = \vec{\nabla} I \cdot \vec{c}. \quad (5)$$

Matemaatiliselt pole see võrrand lahenduv (aladefineeritud võrrandisüsteem), sest üks võrrand sisaldab kahte tundmatut, kiiruseid u ja v . Seetõttu tuuakse sisse lisakitsendused, mis muudavad kiiruste leidmise võimalikuks. [10]

Kui iga piksel liigub kaadrites iseseisvalt, pole kiiruste leidmine mõistlik. Kuna enamasti vaadeldakse läbipaistmatute objektide ühtlast kindlasuunalist liikumist või nendega toimuvaid deformatsioone, siis eeldatakse, et erinevad objektid asuvad punktid omavad sarnast liikumisevälja. See tähendab, et liikumine mingis suuremas alas on ühesugune. Selline ülesehitus ei sobi aga okludeerunud piirkondade (kahe pildi vahel liigub üks objekt teise peale, ning varjab mingi osa liikumisest) kiirusväljade usaldusväärseks hindamiseks. [10]

Ühe moodusena sellist ühtlase liikumise piirangut ehk liikumisväljade sileduse eeldust kasutada pakkusid Horn ja Schunck kiirusvektorite gradientide ruutude $\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2$ ja $\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2$ minimeerimist [10]. Kokkuvõtvalt defineerisid nad energia funktsiooni, mida minimeeritakse üle kiirusväljade $u(x, y)$ ja $v(x, y)$:

$$\begin{aligned}
 E_{HS}(u, v) &= \sum_{x,y} \left(\frac{\partial I}{\partial x} u + \frac{\partial I}{\partial y} v + \frac{\partial I}{\partial t} \right)^2 \\
 &\quad + \lambda \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right) \quad (6) \\
 &= E_{andmed}(u, v) + \lambda E_{siledus}(u, v)
 \end{aligned}$$

λ – reguleerimisparameeter

Parameeter λ määrab kui tugevalt mõjutab silumise tingimus algoritmi. Mida suurem on λ väärtus, seda ühtlasemaks *flow*-välja muudetakse. [9]

Võrrandite minimeerimiseks kasutatakse variatsioonarvutust, kus lahendatakse vastavad lineaarsed Euler-Lagrange'i võrrandid samaaegselt kõikide pikslite jaoks. Antud juhul avalduvad need evolutsioonivõrrandid järgmiselt: [9]

$$\lambda \nabla^2 u = \left(\frac{\partial I}{\partial x} \right)^2 u + \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial y} v + \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial t} \quad (7)$$

$$\lambda \nabla^2 v = \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial y} u + \left(\frac{\partial I}{\partial y} \right)^2 v + \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial I}{\partial t} \quad (8)$$

Diferentsiaalvõrrandite lahendamiseks kasutatakse numbriliselt tuletiste leidmiseks diferentsvalemeid ning võrrandisüsteemi lahendamiseks Gauss-Seideli iteratiivset meetodit. Mõlemad lähenemised sõltuvad tugevalt arvutite numbrilisest täpsusest, sest väikesed vead algoritmi alguses võivad kuhjuda piisavalt suureks, et lõpptulemust oluliselt mõjutada. [10]

Horni ja Schuncki pakutud sileduse funktsiooni peamine eelis on see, et kuna kiirusväli leitakse kõikide pikslite kohta, saadakse mõistlik väli ka nendes piirkondades, kus kiiruste leidmine pole üheselt võimalik. Näiteks tasastel aladel, kus lokaalne heledusgradient on peaaegu null. Seega aitab see efektiivselt vältida apertuuri probleemi. Teisalt kehtib Taylori lähendus ainult sellisel puhul, kui liikumised kaadrite vahel on väga väikesed, ehk pildid peavad olema omavahel juba algselt väga sarnased. [9]

Suuremate liikumiste kompenseerimiseks on mitmeid meetodeid. Üks enim rakendatavaid võtteid on Lagrange'i püramiidide kasutamine ehk teisisõnu hierarhiline lähenemine [18].

Selleks skaleeritakse pildid mitmeid kordi väiksemaks (antud töös teguriga 0,5), mistõttu muutuvad ka näivad liikumised neil piisava lähedusega väikesteks. Skaleerimisega saadakse pildid mitmel erineval tasemel (erineva suurusega pildid). Oodatav kiiruste vektor (u, v) peaks kõige alumisel tasemel jääma ühe piksli suurusjärku. Kui vastav tase on leitud, arvutatakse liikumisväli, ning kasutatakse saadud infot, et leida liikumisväli üks aste kõrgemal tasemel. Samas tuleb meele pidada, et madalama taseme liikumisväljasid ei saa otse kasutada kõrgemal tasemel, sest vastavate vektorite pikkused pole omavahel võrreldavad. Seetõttu moonutatakse kõrgema taseme teine pilt esimese pildi poole kahekordse madalama taseme vektorite võrra. See tagab, et kõrgemal tasemel leitav kiirusväli on piisavalt väike, et Taylori lähendus kehtiks. Sellist järjestikust kiirusväljade parandamist tehakse seni, kuni jõutakse algsele lahutusvõime tasemele tagasi. Lõplik kiirusväli püramiidmeetodil avaldub järgmiselt:

$$(u, v) = \sum_{k=0}^N 2^k (u, v)^{(k)} \quad (9)$$

N – püramiidide tasemete arv; k – taseme indeks [9]

2.2.2 Proesmans *et al* meetod

Apertuuri probleemi lahendasid võrdlemisi edukalt Horn ja Schunck, tuues sisse *flow*-välja sileduse funktsiooni. Samas tekitas see lähenemine vastupidise probleemi: kui pildil on rohkem objekte, mis liiguvad teineteise suhtes sõltumatult eri suundades, tekib probleem, kui sundida ühesugust siledust peale kogu alale. [19]

Töös kasutatav Proesmans'i meetod on Horni ja Schuncki algoritmi edasiarendus, mille etapid võib jagada kolmeks:

- esialgse kiirusvälja leidmine Horni ja Schuncki diferentsiaalsel meetodil;
- liikumisväljade leidmisel kahepoolse väljade võrdluse (edasi ja tagasi väljad) lisamine. Uurides mõlemaid liikumisväljasid paistavad silma just need piirkonnad, kus on toimunud liikumine. See tähendab, et suurimad ebatäpsused liikumisväljades (kahe suuna vahel) on kontsentreeritud nendes kohtades, kus on objektide ääred või piirkonnad, kus objektid kattuvad;
- kahepoolsest skeemist saadud ebaühtluse informatsiooni sisestamine mittelineaarselt esialgsesse kiirusväljade arvutamise skeemi, andes kaalud vastavatele piirkondadele eelmisest punktist. See rakendab tugevamalt siledusefunktsiooni pildi ühtlastel aladel,

kuid piirab sileduse tingimust liikumise äärtel. Sellise skeemiga suudetakse rekonstrueerida täpsem *flow*-väli, kui algse diferentsiaalse meetodiga. [19]

2.3 *Optical flow* teised kasutusvaldkonnad radariandmete töötlemises

Optical flow'l on radariandmete töötlemises ka teisi kasutusvaldkondi. Üks levinumaid rakendusi on sajualade lühiennustuse tegemine (*nowcasting*), mille põhjal koostatakse ka sademete kvantitatiivset ennustust (QPF – *Quantitative Precipitation Forecast*). *Optical flow* meetodi kasutamine on antud valdkonnas aktuaalne, kuna numbrilistel ilnamudelitel esinevad initsieerimisprobleemid (ebastabiilsused mudeli esimestel tundidel), millest tulenevalt pole lähituleviku ennustused usaldusväärsed. [4]

Ühe näitena on Peura ja Hohti kasutanud *optical flow*'d radariandmete tulevikku ekstrapoleerimiseks. Nende meetodis arvutati ühe või mitme eelneva ajahetke põhjal liikumisväli, mida ajas edasi „pikendades“, saadi ennustus lähituleviku sajualade asukohtade jaoks. [20] Selline lähenemine simuleerib atmosfääris toimuvat adveksiooni, kuid ei arvesta mikrofüüsikalisi ja dünaamilisi protsesse. Ekstrapoleerimispõhiste meetoditega on võimalik saada võrdlemisi täpseid ennustusi umbes 20 minutit tulevikku. Pikemaajaliste ennustuste tegemisel aga kahaneb meetodi täpsus kiiresti. [21]

Arvestamiseks mikrofüüsikalisi ning dünaamilisi protsesse on välja töötatud ka erinevaid meetodeid radariandmete ja ilnamudelite kombineerimiseks. Tänu sellele on võimalik kompenseerida puudusi, mis ainult radariandmete või ilnamudelite kasutamisel esineksid. Bechini ja Chandrasekar kirjeldavad meetodit, kus seoti omavahel radari peegelduvusandmete *optical flow* meetodiga ekstrapoleeritud andmed, radari mõõdetud tuuleandmed ning lisaks numbrilise pilvemudeli andmed. Viimased tagavad füüsikalise järjepidevuse tuule- ja sademeandmete vahel. Välja töötatud meetodi põhjal koostati sõltuvalt meteoroloogilisest situatsioonist parameetiline mudel, mis teatavate eeldustega andis juhtumipõhise uurimuse jaoks parema ennustuse kui ainult adveksiooniskeem. [21]

Optical flow'd on kasutatud ka näiteks konvektiivsete tormide saabumise või tekkimise tõenäosuse ennustamiseks. Seda on uurinud Cheung ja Yeung, kes täiendasid antud meetodiga varasemat korrelatsioonipõhist Hong Kongi lennujaama hoiatussüsteemi. Väljaarendatud tarkvara koostab vastavalt konvektiivsete tormirakkude asukohtadele ja intensiivsustele kaardi, kus on märgitud, millistest suundadest on lennujaamale lähenemine tormide tõttu ohtlik. [22]

3 Seadmete kirjeldus ja uuritavate sajujuhtumite valik

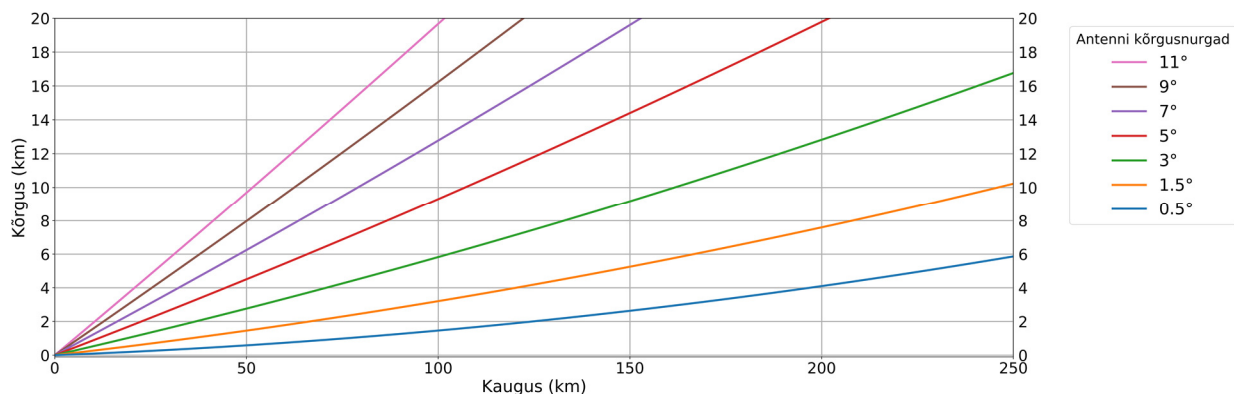
3.1 Ilmaradarid

Ilmaradarid on spetsiifilise ülesandega kaugseire seadmed, mis mõõdavad täpselt troposfääris esinevatelt sademetelt tagasipeegeldunud kiirgust. Saadud andmete põhjal on võimalik hinnata sajuintensiivsusi maapinnal. [5] Kiire leviku Doppleri efekti kaudu on võimalik saada informatsiooni ka radari suhtes radiaalsuunaliselt puhuva tuule tugevuse kohta. [23]

Eestis on võimalik sademehulga hindamiseks kasutada kahte C-riba (4-8 GHz, IEEE) kaksikpolarimeetrilist ilmaradarit Vaisala WRM200. Üks ilmaradar asub Harjumaal Harkus (59,39767° N, 24,60210° E) ning teine Viljandimaal Sürgaveres (58,48231° N, 25,51866° E). Antud töös kasutatakse ainult Sürgavere radari mõõteandmeid, sest seadme geograafilise asukoha tõttu katab selle mõõtepiirkond paremini Eesti maismaa osa. Kahe radari andmete koos kasutamisel tuleks arvesse võtta ka mõlema radari kalibratsioonist tekkivaid lahknevusi, mis polnud antud töö eesmärk. Sürgavere radari kõrgus merepinnast on 156,5 m [24].

Sürgavere radar skaneerib erinevatel kõrgusnurkadel (0,5°, 1,5°, 3°, 5°, 7°, 9°, 11°), tehes igal kõrgusel täisringi ümber oma telje. Teostatavate radarmõõtmiste ajaline vahe on 15 minutit, millest reaalsed skaneeringud võtavad ligikaudu 8 minutit. Sooritatakse kahte erinevat liiki skaneeringud: pikad (250 km raadiusega) ja lühikesed (125 km raadiusega). Viimaste eesmärgiks on võrreldes pikkade skaneeringute puhul saadavate tulemustega registreerida paremaid tuuleandmeid radarilähedastelt aladelt. Sürgavere radari ruumiline lahutusvõime on 1° asimuudis (360 kiirt) ja 300 m ulatuses (*range*), kokku 830 väravat (*gate*). Mõõtmistulemused visualiseeritakse PPI (*Plan Position Indicator*) graafikuna, mis moodustatakse ühelt või rohkematelt skaneeringutelt pärinevate andmete põhjal.

Kuigi Sürgavere radari signaal ulatub ligikaudu 300 km kaugusele radari asukohast (*unambiguous range*), saadakse kõige kvaliteetsem informatsioon umbes 150 km raadiusest, sest kauguse suurenedes kasvab ka kiire kõrgus, mistõttu kaugematel aladel saadakse peegelduvusi oluliselt kõrgemalt troposfäärist [25]. Antud töös kasutatakse mõõtetulemusi, mis on kogutud kuni 250 km raadiuses, kus ka kõige madalama kõrgusnurga kiire kõrgus maapinnast võib sõltuvalt atmosfääri olukorrast ulatuda umbes 6 kilomeetrini (joonis 3). Kiire kõrguse kasv kauguse suurenedes on ka põhjus, miks antud uurimistöös kasutatakse andmeid ainult kõige madalama kõrgusnurgaga skaneeringutest (0,5° kõrgusnurk).



Joonis 3 Radarikiire teoreetiline tõus kauguse suurenedes erinevatel antenni kõrgusnurkadel

3.1.1 Ilmaradari andmed ja nende määramatused

Radarilt saadavad andmed on salvestatud radari tootjafirma poolt väljatöötatud RAW formaadis, mille sisu moodustatakse vastavalt kasutaja vajadustele. Andmefail võib sisaldada nii üksikute skaneeringute kui ka kõikide kõrgusnurkade mõõtmiste ehk ruumala (*volume*) mõõtmisi. Lisaks on võimalik failina talletada ka muid radari poolt salvestatud andmeid, nagu radarispetsiifilised metaandmed geograafilisest asukohast, kõrgusest ning muu mõõtetehniline informatsioon. [26]

Radari mõõtmistulemuste ajaline informatsioon on salvestatud UTC ajas, kuid sõltuvalt kasutajapoolsetest sätetest, võib see sisaldada ka lokaalset aega. Selleks, et hoida kokku arvuti mäluressurssi, on kõik andmed salvestatud pakitud kujul. [26] Peegelduvuse andmed on salvestatud polaarkoordinaadistikus maatriksina mõõtmega (360, 830), ehk täisring on kiirte (täisringi sektorite) kaupa reas.

Käesolevas töös teisendati radari mõõdetud peegelduvusväärtused (Z) sajuintensiivsusteks (R) kasutades empiirilist Marshall-Palmeri $Z - R$ suhet:

$$Z = aR^b \Rightarrow R = \left(\frac{Z}{a}\right)^{\frac{1}{b}}, \quad (10)$$

kus $a = 200$ ja $b = 1,6$, $[Z] = [1 \text{ dBZ}]$. [27]

Peegelduvusi kirjeldatakse ühikuga 1 dBZ, mis kirjeldab logaritmilises skaalas radarikiire ekvivalentset peegelduvustegurit Z_e , $[Z_e] = \left[1 \frac{\text{mm}^6}{\text{m}^3}\right]$. Logaritmiline skaala on valitud seetõttu, et peegelduvusteguri väärtused ulatuvad üle 8 suurusjärgu. [28]

Toodud $Z - R$ seos eeldab peaaegu eksponentsiaalset sademete suurusjaotust troposfääris. Eeldatakse, et väiksemaid vihmapiisku esineb oluliselt rohkem kui suuremaid. [29] Töös

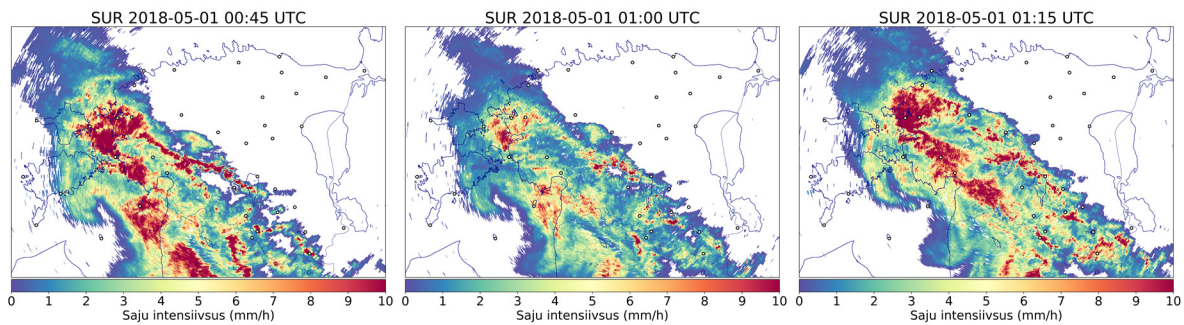
kasutati kirjandusest leitud konstantide a ja b väärtusi, sest Eesti alade kohta pole sademete distromeetrilisi mõõtmisi teostatud. Peegelduvusväärtustest sajuhulkade hindamine empiirilise valemiga on üks potentsiaalseid veakohti QPE hindamiseks, sest kirjandusest leitud väärtused ei pruugi olla kõige realistlikumad.

Kasutades maapealsete sadememõõtjate ja radariandmete võrdlust, on loodud ka statistilisi meetodeid konstantide a ja b optimaalsemaks väärtustamiseks $Z - R$ suhtes. [30]

Konstantidele a ja b omistatakse sõltuvalt rakendustest erinevaid väärtusi. Konstandi a väärtus võib varieeruda vahemikus mõnest kümnest paari sajani, suurus b on aga rangemalt piiritletud, jäädes vahemikku $1 \leq b \leq 3$. Näiteks kasutatakse Ameerikas tugevate konvektiivsete tormide täpsemaks hindamiseks väärtusi $a = 300$, $b = 1,4$. Teisalt troopiliste tormide jaoks soovitatakse kasutada väärtusi $a = 250$, $b = 1,2$. Üldiselt kasutatakse kihtsajupilvede põhjustatud sadude korral väiksemaid parameeter a väärtusi ning konvektiivsete sadude korral suuremaid. Parameeter b puhul aga vastupidi. [30,31]

Ilmaradari andmed sisaldavad endas väga erineva päritoluga ja iseloomuga vigu ning määramatusi. Näiteks mõõtmistehnoloogiast tulenevad vead võivad tekkida juba seadme kalibreerimistäpsusest. Kiire levikul atmosfääris võivad tekkida valepeegeldused maapinnalt (*ground clutter*) või atmosfääri temperatuuri inversiooni nähtuse korral võib kiir isegi tagasi maapinna suunas murduda (*ducting*). Seadme suure tööraadiuse ja maakera kumeruse tõttu registreeritakse kaugematel aladel peegeldusi maapinnast oluliselt kõrgemalt, kui radarilähedastel aladel. Ühtlasi muutub radarikiir kauguse suurenedes ka laiemaks, mistõttu saadakse peegelduvuse signaalid kaugematelt aladelt võrreldes radarilähedaste aladega oluliselt suurematelt ruumaladelt. Tugevamate tormide korral võib radarikiir suurema veepiiskade tihedusega ruumipunktides sumbuda, mistõttu pole tugeva saju piirkonnast kaugemale jäävate alade peegeldused enam mõõdetavad. Lisaks sellele võivad radarikiire ette jääda ka teised, mittemeteoroloogilised objektid, nagu linnud ja putukad. [5,31]

Täiendavalt kõigele muule võivad ilmaradari tööd segada ka kohalikud ilmaolud. Joonisel 4 on näha 1. mail 2018. aastal mõõdetud andmete reas esinev häiritus. Kell 01:00 registreeritud skaneering on märkimisväärselt nõrgemate peegelduvusväärtustega, kui 15 minutit varasema ja hilisema tulemused.



Joonis 4 Märja kupli poolt põhjustatud signaali sumbumise näide radaripiltidelt.

Tegemist on märjast kuplist tingitud signaali sumbumisega (*wet radome attenuation*). Kuppel on vajalik, et radar oleks töökorras kõikide ilmastikutingimuste korral. Kuplid on enamasti tehtud vetthülgavast materjalist, et vähendada vee mõju radari signaalile. Siiski võib tugevamate sadude korral kuplile langevast veest põhjustatud signaali sumbumine olla olulise mõjuga mõõtmiste kvaliteedile. Eriti keeruline on olukord, kui lisaks tugevatele sadudele esinevad ka tugevad tuuled, mille tõttu ei pruugi olla kuppel kogu ulatuses sama märg, põhjustades ühe skaneeringu ulatuses väga suuri ebatäpsusi andmetes. [32]

Üha enam mõjutavad radarmõõtmiste täpsusi ka inimeste kodudes või ettevõtetes kasutatavad RLAN ja WIFI lahendused. Viimased kasutavad radariga sarnaseid lainepikkusi, ning piisavalt suurte võimsuste korral põhjustavad sellised seadmed radaripiltides interferentsinähtusi. [33,34]

3.2 Maapealsed automaatjaamad

Töös kasutatud maapealsete sademejaamade andmed pärinevad üle-eestilisest automaatilmajaamade võrgustikust, mille mõõtetulemused on salvestatud Riigi Ilmateenistuse sademeandmete arhiivis. Andmed on arhiivi talletatud iga jaama kohta 10-minutiliste akumulatsioonidena CSV vormingus. Mõõtmised on esitatud UTC ajas.

Sadememõõtjate võrgustiku tihedus Eesti alal on võrdlemisi hõre: aritmeetilise keskmisena ligikaudu üks jaam 1100 km² kohta. Hetkel registreerib andmeid operatiivselt 39 jaama, mis on kahe jaama võrra rohkem kui 2015. ja 2016. aastal, mil töötas 37 maapealset sademejaama. Töös võrreldi vaid kogu perioodi kohta olemasolevate, kokku 36 jaama andmeid.

Eesti territooriumil mõõdavad sajuhulkasid kahe erineva tootja seadmed: OTT Pluvio² ja Vaisala VRG-101. Mõlema tootjafirma seadmete tööpõhimõte on aga sama, baseerudes täpse kaalumise tehnoloogial. Antud tehnoloogia seisneb selles, et teatud ajavahemike järel

kaalutakse seadmes olevas anumus vedeliku massi. Anumas on alati mingi kogus vedelikku, mis koosneb veest ja antifriisist. Viimane on vajalik selleks, et seade oleks töökorras ka negatiivsetel temperatuuridel. Vihmapiiskade anumasse kukkumisel suureneb anumus oleva vedeliku mass, mille muutust saab registreerida. Vältimaks valetulemuste salvestamist, nagu kuivadel perioodidel vedeliku tavapärasest aurustumisest tingitud vedeliku massi vähenemine anumus, registreeritakse mõõtetulemusi alates kindlast kaaluerinevuse väärtusest.

3.3 Uuritud sajujuhtumid

Töös uuriti sajurohkemaid juhtumeid aastatel 2015, 2016 ja 2018. 2017. aasta sademejuhtumeid ei vaadeldud, kuna radari mõõtetulemused selle perioodi kohta on antud uurimistööks kasutuskõlbmatud, sest seadmel esinesid tehnilised tõrked, mistõttu on andmed suures osas müra. Sademejuhtumite valik tehti kahe erineva iseloomuga sadude vahelt: konvektiivste pilvede ning kihtsajupilvede poolt tekitatud sajud. Kriteeriumiks oli ka see, et sadu kataks suure osa Eesti maismaast. Vastasel juhul poleks radari mõõdetud andmeid võimalik maapealsete sademejaamade andmetega võrrelda.

Uuritavate sadude toimumise ajad on järgnevas tabelis (kõik ajad esitatud UTC-s):

Tabel 1 Uuringus kasutatud sajuperioodid

1.	06.07.15 kl 07.00 – 07.07.15 kl 04.00
2.	08.07.15 kl 03.00 – 08.07.15 kl 14.00
3.	09.07.15 kl 22.00 – 11.07.15 kl 06.00
4.	18.07.15 kl 07.00 – 19.07.15 kl 00.00
5.	28.07.15 kl 20.00 – 30.07.15 kl 00.00
6.	30.07.15 kl 03.00 – 31.07.15 kl 16.00
7.	27.08.15 kl 15.00 – 28.08.15 kl 18.00
8.	05.09.15 kl 00.00 – 05.09.15 kl 20.00
9.	07.09.15 kl 00.00 – 08.09.15 kl 02.00
10.	02.07.16 kl 10.00 – 04.07.16 kl 22.00
11.	03.09.16 kl 04.00 – 04.09.16 kl 04.00
12.	30.04.18 kl 20.00 – 01.05.18 kl 07.00

Külmadel perioodidel esineb radaripiltidel tihti nähtus, kus 0 °C isothermist natukene allpool hakkab lumi sulama. See aga põhjustab radaripiltidel oluliselt kõrgemaid peegelduvusväärtusi

(keskmiselt kahe- kuni viiekordne ülehindamine natuke madalamate kihtide peegelduvuse suhtes) sellest piirkonnast. Radaripildilt paistab selline heleriba nähtus ümbruskonnast heledama alana (*bright band*). Kuna selle efekti tõttu on radariandmed lume ja jää korral oluliselt raskemini interpreteeritavad, valiti kõik uuritavad juhtumid perioodidest, kus radari mõõtmispiirkonnas esinesid ainult positiivsed temperatuurid (Celsiuse skaalal). [31]

4 Metoodika

Töös teostatud arvutusteks kasutati programmeerimiskeelt *Python* [35]. Radariandmete sisselugemiseks kasutati spetsiaalselt radariandmete töötluks arendatud vabavaralist *Python ARM Radar Toolkit*-i (*Py-ART*) [36]. *Optical flow* algoritmide komplekt on kokku pandud Seppo Pulkkineni poolt [37]. Joonised on koostatud *Matplotlib* [38] vahenditega, aluskaart *Basemap* [39] teegi abil.

Radariandmed loeti sisse RAW vormingus failidest kasutades *Py-ART*'i I/O tööriistu. Radari mõõteandmetest kasutati pika ulatusega skaneeringu kõige madalama kõrgusnurga horisontaalse peegelduvuse tulemusi. Enne andmete edasist kasutamist kontrolliti, kas failist loetud andmetes on olemas 360 kiirt. See oli vajalik, sest tehnilistel põhjustel võivad mõnel skaneeringul üksikud kiired puududa. Kui puuduvaid kiiri oli vähe, siis täideti puuduolevad andmed esimese ja viimase kiire lineaarse interpolatsiooniga, sest andmete sisselugemiseks kasutatav funktsioon eemaldas mittetäielikud kiired, kuid ei öelnud, kust täpselt kiired eemaldati. Neil juhtudel, kui andmerekas puudus vähemalt üks fail, jäeti arvutustest välja kogu seda ajahetke puudutav tund (kokku 4 faili). Seejärel arvutati peegelduvusväärtustest sajuintensiivsused eelmainitud $Z - R$ suhet silmas pidades. Madalamad sajuintensiivsused kui $0,05 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$ eemaldati *optical flow* algoritmis vigade tekkimise vähendamiseks.

Radari 15-minutilise intervalliga mõõdetud andmeid töödeldi *optical flow* meetodiga. Töös kasutati Proesmans *et al.* *optical flow* meetodit, mis on täiendatud diferentsiaalsete meetod, kus pikslite heledusväärtuste muutumiste kiiruste arvutamisel kasutatakse tuletiste leidmiseks numbrilisi diferentsvalemite. Tuletiste leidmise lihtsustamiseks ning heledusväärtuste muutumistes (teravad ääred) suurte hüpote vältimiseks, töödeldi kogu pilti Gaussi madalpääsufiltriga, kus standardhälve $\sigma = 3,0$. Seejärel teisendati pildimatriks arvutusliku efektiivsuse parandamiseks baaitidesse, ning leiti liikumisvektorite väljad.

Töös uuriti erinevaid Horni ja Schuncki algoritmis tutvustatud siledusfunktsiooni reguleerimisparameetri λ väärtusi, mille tulemusena leiti, et liiga suure kaalu korral ($\lambda = 25,0$) kaob väga palju informatsiooni sajualade maksimumide osas (pilti siluti liialt), ning samas liiga madala väärtuse korral ($\lambda = 3,0$) ei olnud objektide liikumine enam piisavalt sujuv (sarnanes väga 15 minuti andmetele). Antud tulemuste põhjal valiti parameetrina uuritud väärtuste vahelt keskmine: $\lambda = 12,4$.

Selleks et kompenseerida *optical flow* algoritmis suurtest liikumistest tekkivaid vigu, kasutati püramiidskeemi. Selle põhjal skaleeritakse pilti astmeliselt alla, ning leitakse igal kõrgemal sammul madalamate sammude poolt parandatud kiirusväljade abil parandatud kiirusväljad. Töös arvatati liikumisi seitsmel astmel ehk kõige madalama pildi mõõtmed olid 13×13 pikslit. Mida suuremaks tasemete arvu viia, seda parema kiirusvälja peaks kõrgeimal (algne suurus) tasemel saavutama. Samas suureneb iga taseme lisamisega arvutuskooormus, ning alates mingist tasemest ei paranda enam lisanduv informatsioon tulemust märkimisväärselt.

Tuletistest moodustatud Euler-Lagrange'i diferentsiaalvõrrandite lahendamiseks kasutataval Gauss-Seideli iteratsioonimeetodil lasti arvutada 124 iteratsiooni. Suuremate iteratsioonide korral peaks lõpptulemusena leitud kiirusväli olema täpsem, kuid selle parameetri suurendamisel kasvab hüppeliselt ka arvutusteks kuluv aeg. Ühtlasi pole otstarbekas minna ühe aspektiga liiga täpseks, kui erinevaid veaallikaid eelnevatest töötluse sammudest on palju. Viimase sammuna radaripiltide töötluses interpoleeriti leitud kiirusväljade kaudu 14 vahesammu ehk tekitati 1-minutilise ajalise lahutusega radaripildid.

Selleks, et radari mõõtetulemusi saaks võrrelda maapealsete jaamade andmetega, on vajalik andmete kogumine sama asukohakoordinaadiga punktidest. Maapealsete jaamade asukohad on antud geograafiliste koordinaatide pikkus- ja laiuskraadidena. Selleks, et radari mõõteandmeid koguda samadest punktidest, tuli esmalt radarilt saadud toorfailides polaarkoordinaadistikku pakitud huvipakkuvad andmed teisendada ümber ristkoordinaadistikku. Saadud ristkoordinaadistikku teisendatud radarimaatriksi pikslite asukohad tuli seejärel siduda georefereeritud baasmaatriksiga. Polaarkoordinaatides baasmaatriks oli radari toorandmetega kaasas, ning need on arvatatud radari mõõtmisstrateegia põhjal, võttes keskpunktiks radari seadme geograafilised koordinaadid, ning arvatatud 360 kiirt 830 väravaga, iga värav vastavusega 300 m. Vajalik oli ka selle polaarkoordinaatides baasmaatriksi teisendus ristkoordinaatidesse.

Jaamade täpsete geograafiliste koordinaatide põhjal arvatati geograafiliste koordinaatide võrgust pöördteisenduse kaudu välja, millised radari mõõteandmetest koostatud piltide pikslid asuvad jaamale kõige lähemal. Nende pikslite väärtusi kasutati sademehulkade arvutamiseks, mida võrreldi maapealsete sademejaamade vastavate tulemustega. Statistiliste vigade vähendamiseks ei kasutatud arvutustes ainult ühe piksli väärtust, vaid väärtust, mis saadi jaamale vastava piksli ümbrusest leitud lokaalse 5×5 maatriksi pikslite (kokku 25 pikslit) aritmeetilise keskmisena. Selline lähenemine ei ole kindlasti täpne, sest täpse maatriksi suuruse

valimine on keeruline, samas on see usaldusväärsem kui ühe piksli väärtuse kasutamine, sest ka maapealne sademejaam, näiteks tugevate tuulte tõttu, ei mõõda alati sademeid otse jaama kohalt.

Teades jaamade asukohti, leiti eelnevalt saadud radaripiltidelt kõikide jaamade kohta vastavad sajuhulgad. Need väärtused kirjutati eraldi faili hilisemaks töötluseks. Sama lähenemist kasutati nii 15 minuti, kui 1 minutini interpoleeritud andmete korral. Salvestati ka kogu uuritava juhtumi perioodi ulatuses koguakumulatsiooni produkt ning ka kõik vahehetked hilisemaks ajaliseks uurimiseks.

Radar ja maapealsed sademejaamad ei teosta mõõtmisi samadel aegadel. Seetõttu oli nende tulemuste omavaheliseks võrdlemiseks vaja viia kõik andmed (jaamade mõõdetud, radarite mõõdetud ja *optical flow* meetodiga arvutatud) ühetunnilistele sademete akumulatsioonidele: summeeriti ühe tunni jooksul mõõdetud sademehulgad. Radariandmed töödeldi veel lisaks vastavalt andmepunktide hulgale ehk 15 minuti andmete puhul liideti neli andmepunkti, ning saadud tulemus jagati neljaga. Üheminutiliste sammude puhul liideti vastavalt 60 andmepunkti ning tulemus jagati 60-ga. Eeldati, et radar mõõdab vastava ajaperioodi lõikes konstantset sadu.

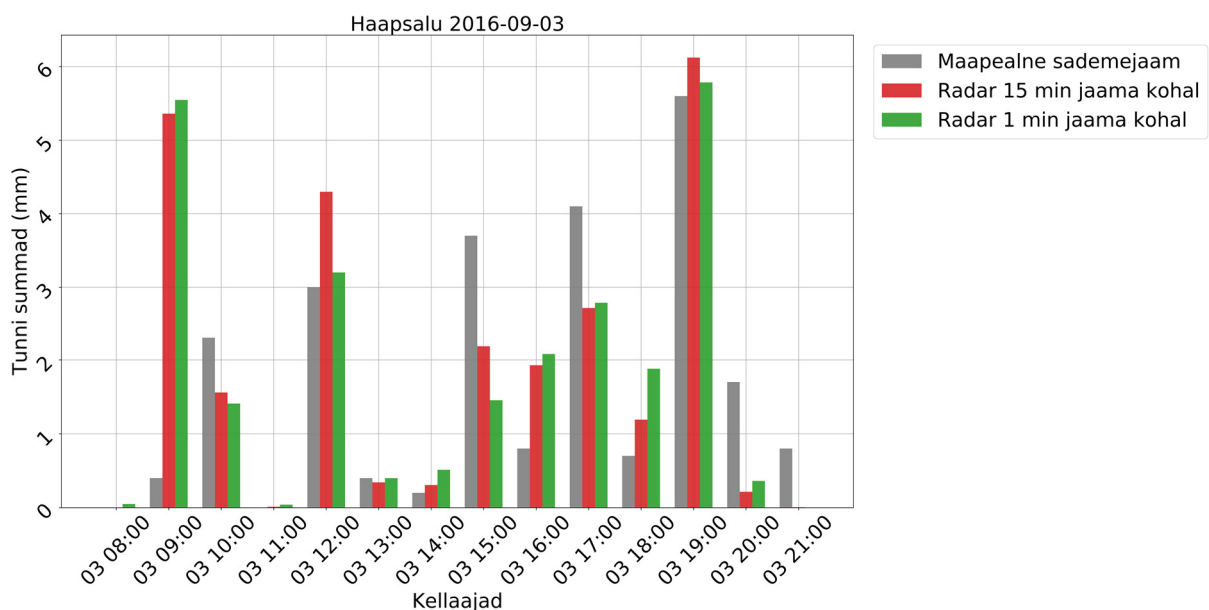
5 Tulemused ja arutelu

Arvutuslikult saadud sademehulkade väärtuste kokkulangevuse hindamiseks analüüsiti iga juhu (kokku 12 juhtu, Tabel 1) puhul (lühikene periood), mil määral erinevad tulemused maapealsetes sademejaamades mõõdetud ja jaamade asukohtadest saadud radari andmetest arvutatud sademehulkade väärtused. Seejärel uuriti kõikide juhtumite ning kõikide jaamade (kokku pikem periood) suhtes sademete tunnisummade kokkulangevust radariandmete ja jaamaandmete vahel. Lõpuks vaadeldi ka iga juhtumi lõikes kogu sademete akumulatsiooni, ning võrreldi ruumilist jaotust radariandmetest saadud tulemuste ja ainult jaama andmetest koostatud saajusummade produkti vahel.

5.1 Jaamapõhised tunnisummad ja nende ajalised käigud

Kuna maapealsete sadememõõtjate ja radari tööpõhimõtted on väga erinevad, on ootuspärane, et nende mõõtetulemused ei ole üks-ühele kokkulangevad. Radar tuvastab maapinnast kõrgemal asuvaid osakesi, mistõttu võib näiteks madalamate sajuintensivsuste korral radar näidata sadu, kuigi tegelikkuses sademed maapinnale ei jõua (virga). See aga tingib, et maapealsed sademejaamad sadu ei registreeri ning kahe seadme vastavad mõõteandmed ei lange kokku.

Radari ja jaamade mõõdetud andmete eeldatavaid erinevusi ilmestab joonis 5, millel on toodud lühikese perioodi andmetest saadud tunniakumulatsioonid ühe jaama kohta.



Joonis 5 Haapsalu jaama tunniakumulatsioonid (mm) 16-09-03 kell 08:00 kuni kell 21:00

Joonisel 5 on toodud lisaks maapinnal mõõdetud andmetest saadud sademe tunniakumulatsioonidele ka 15-minutiliste intervallidega mõõdetud radariandmetest ja nende interpoleerimise tulemusena saadud üheminutilise vahega andmetest saadud tunni sademeakumulatsioonid.

Jooniselt 5 on näha, et valdaval osal juhtudest hindavad radariandmed sajuhulki maapinnal mõõdetud sajuhulkadest suuremaks. Eriti kontrastne näide on 09.03 kella 9:00-ne tunnisumma, kus tulemuste erinevus on ligikaudu kümnekordne. Interpoleeritud andmed, võrreldes algsete radariandmetega, erinevad sademejaamade mõõtetulemustest numbriliselt aga veelgi enam. Samas pole interpoleeritud andmete erinevus radari originaalandmetest märkimisväärne.

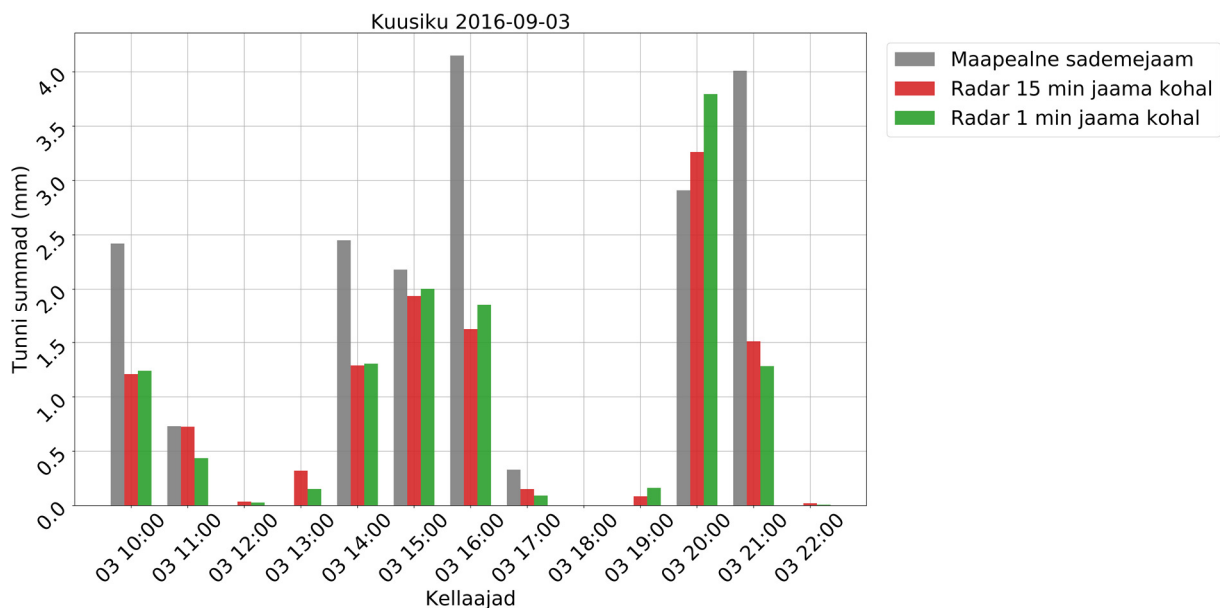
Interpoleerimise mõju radariandmetele pole üheselt kirjeldatav. Näiteks joonisel 5 toodud sademete tunniakumulatsioonides on punktis 12:00 interpoleeritud andmed võrreldes radari originaalandmetega, mis ülehindavad sademehulka, sademejaama mõõtetulemusega paremas kooskõlas. Samas punktis 15:00 on olukord vastupidine: 15 minuti radariandmed alahindavad võrreldes sademejaama tulemusega oluliselt sademete tunniakumulatsiooni ning interpoleeritud andmete puhul on alahindamine veelgi suurem.

Kirjeldatud ühe jaama aegrida ilmestab seda, et lühikese perioodi erinevate meetoditega saadud sajuhulgad ei lange enamasti kokku, andmed võivad olla nii oluliselt üle- kui ka alahinnatud. Tulemused jaotuvad juhuslikult, sõltudes sellest, kuidas täpselt sajuala üle sademejaama on liikunud. Põhjustena võib välja tuua asjaolu, et sademejaamade võrgustik on liiga hõre, ning seetõttu on radari- ja jaamaandmeid keeruline usaldusväärsetl ühendada. Lisaks võib olla radari kahe skaneeringu ajaline intervall liiga pikk (15 minutit). Selle tõttu võib palju olulist informatsiooni sajuala arenemisest ja liikumisest jääda registreerimata. Liiga pikk reaalsete mõõtmiste ajaline vahe on ilmselt ka põhjuseks, miks interpoleerimine üheminutilise ajasammuni ei toonud loodetud tulemusi. Reaalset mõõtmist ei saa ühegi arvutusliku meetodiga asendada, pigem jaotatakse arvutusliku meetodiga andmed lihtsalt ajas ja ruumis ümber. Töös kasutatud interpoleerimismeetodi efektiivsus sajuhinnangute parandamiseks on piiratud 15-minutiliste vahedega registreeritud algandmete täpsusega. Interpoleerimise tulemusena tekib andmetesse ajahetki juurde, mille abil on võimalik hinnata sajualade advektsiooni, kuid mitte sajualade dünaamikat ja intensiivsust kirjeldavaid andmeid.

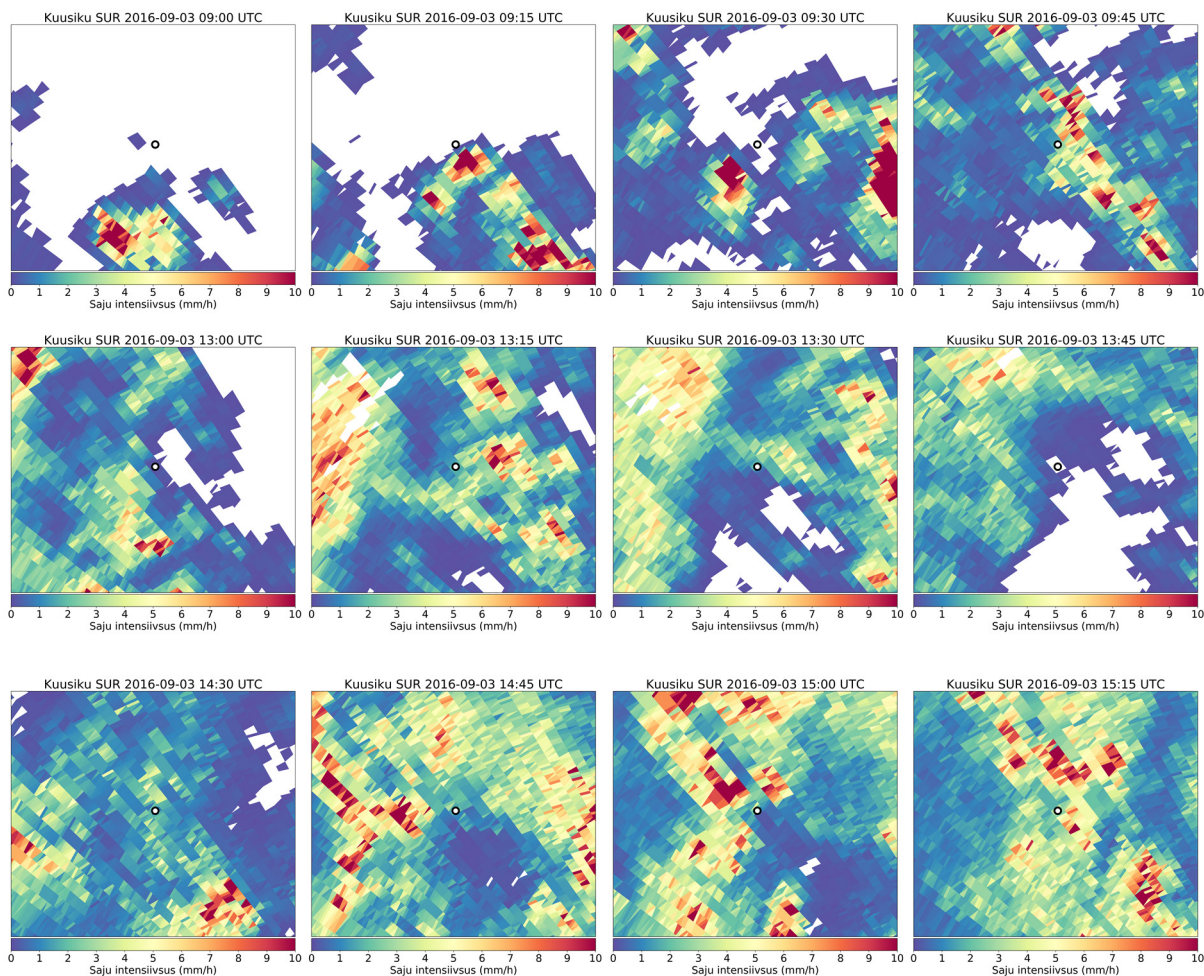
Nagu peatükis 3.2 on toodud, tuleb radariandmetest tunniakumulatsioonide arvutamisel leida tunni vältel registreeritud andmepunktide keskväärtns. Seetõttu on oluline, et mida rohkem ajahetki andmetesse interpoleerimismeetodiga tekitada, seda rohkem andmeid keskmistatakse:

radari 15 minuti mõõteandmete puhul keskmistatakse neli väärtust, kuid üheminutiliste vahedeni interpoleeritud andmete puhul 60 väärtust. See võib tulemustes tekitada aga hoopis madalamaid sajuhulcade väärtusi, kui radari poolt algselt registreeriti. Näiteks olukorras, kus radari 15-minutilistes andmetes on näha, et sajuala liigub vaevalt üle jaama, võib interpoleerimise tulemusena see informatsioon rohkem hajuda.

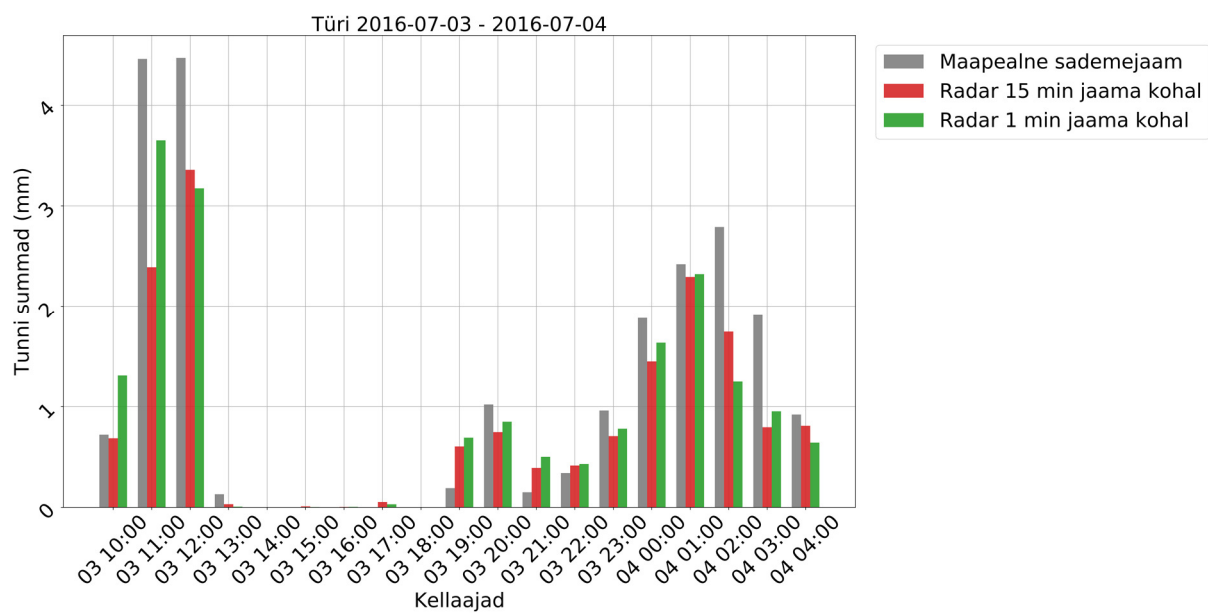
Joonis 6 iseloomustab veel ühte suurt ebakõla, mis esineb radari ja jaamade mõõdetud andmete vahel. Nimelt radariandmete puhul alahinnatakse tugevalt sajumaksimume. Tundidel 10:00, 14:00, 16:00 ja 21:00 on jaama poolt registreeritud mõõdukas sadu, kuid radariandmetest arvatud sajusummad selliseid hinnanguid ei anna. Uurides radaripiltidel antud perioodi, on Kuusiku jaama ümbruses (mõned ajahetked on toodud joonisel 7) näha ruumiliselt üsna väikese, kuid võrdlemisi suurt sajuintensiivsust omava sajualaga jaama asukoha vahetus läheduses. Radari skaneeringute kaupa on jaama kohal sajuala muutumine ebahütlane, ning tugevama saju intensiivsusega alad (tumepunased) ei sattunud kordagi täpselt sademejaama kohale – suuremad sajuhulgad jaama andmetes jäävad radariandmetes alahinnatud.



Joonis 6 Kuusiku jaama andmete võrdlus perioodil 16-09-03 kell 10:00 kuni kell 22:00



Joonis 7 Detailsem näide Kuusiku jaama (must rõngas) ümbrusest, kus radari skaneeringute vahel liigub sajuala üle jaama. Vaatevälja koordinaadid pikkuskraadid: 24.46° - 25.0°, laiuskraadid: 58.85° - 59.09°

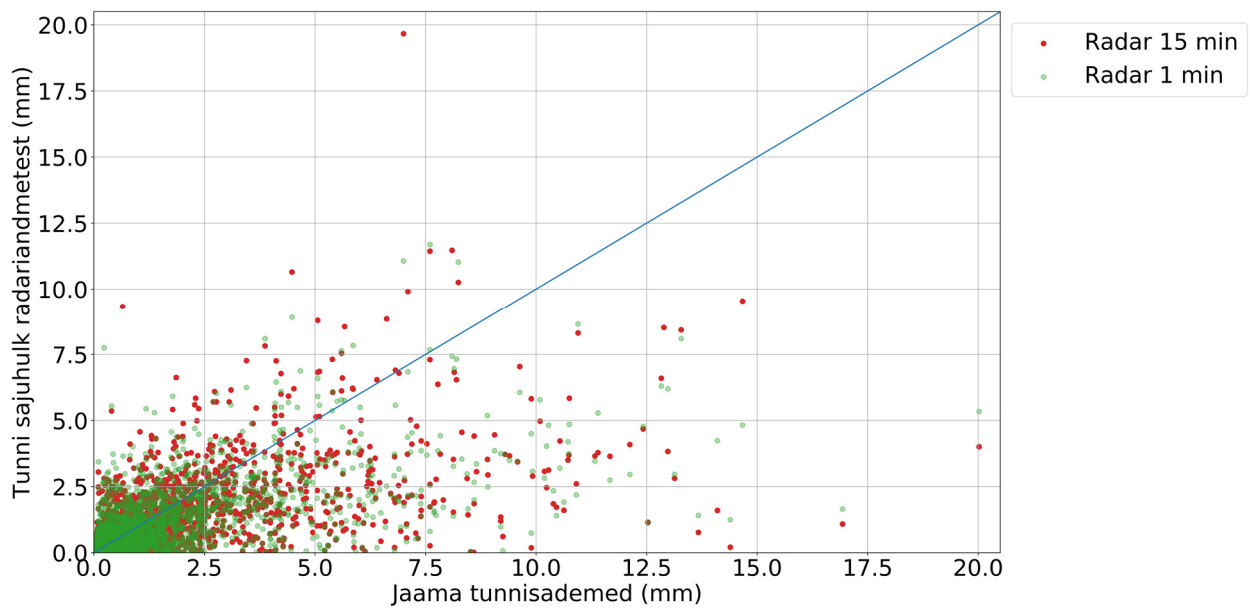


Joonis 8 Türi jaama ajaline sademete tunnisumma perioodil 16-07-03 kell 10:00 kuni 07-04 kell 04:00

Joonisel 8 on toodud ka üks näide, kus nii radariandmed kui ka interpoleeritud andmed langevad võrdlemisi hästi kokku jaamade mõõtetulemustega. On näha, et enamasti radariandmed alahindavad jaama mõõdetud sajuhulkasid, kuid saju esinemine on ajaliselt mõlema seadmega võrdlemisi sarnaselt registreeritud. Alahindamine võib tekkida ebatäpsest seadme kalibratsioonist, tehnilistest probleemidest (näiteks kiire sumbumine) või andmete töötlustest (näiteks $Z - R$ suhe). Radaripiltidelt uurides oli tegu sadudega kihtsajupilvedest, ehk Türi jaama kohal oli joonisel 8 kujutatud perioodi jooksul rahulikult liikuv sajuala. Erinevate radari skaneeringute jooksul ei olnud andmetes suuri muutusi ega hüppeid.

Sademejaamade ja radariandmete võrdluse muudabki keeruliseks jaamade hõre paiknemine, ning maapealsete seadmete väike sademete kogumise pindala (200 cm^2). Selleks, et radariandmed kattuksid ajaliselt hästi jaamade andmetega, peaks radar nägema sajuala täpselt samal hetkel jaama kohal, kui skaneering toimub. Selline tingimus on aga paremini täidetud just kihtsajupilvede sadude korral, sest sajualad püsivad kauem samal alal. Konvektiivsete sajurakkude puhul on see tingimus aga enamasti täitmata. Siin peitubki radarimõõtmiste üks eelis maapealsete sademejaamade mõõtmiste ees: radaripiltidelt on võimalik jälgida konvektiivsete sajurakkude nii ruumilist kui ka ajalist arengut. Protsessi on kirjeldatud tulemuste analüüsi viimases osas (peatükk 4.2).

Võrreldes kõikide olemasolevate jaamade ja radari 15 min. ning 1 min. tunnisummasid, oli sajusummade üle- või alahindamine pigem juhuslik. Absoluutsed erinevused maapealsete jaamade ja radariandmete ning jaamade ja interpoleeritud radariandmete vahel olid kõikide juhtumite lõikes peaaegu sama suured. Interpolatsiooni mõju pole üheselt välja toodav (joonis 9).



Joonis 9 Kõikide jaamade tunnisummade võrdlus kõikide uuritud juhtumite lõikes

Jooniselt 9 on näha, et jaamade poolt registreeritud tugevamate sadude korral on radariandmetes näha teatavat alahindamist sajuhulkades. Tegemist on C-riba radarite tehnilise probleemiga, kus radarikiir sumbub tugevamate sadude korral kiiremini. Antud probleem on tõsisem piirkondades, kus esineb tihti tugevaid vihmasadusid (troopilised tormid). [40]

5.2 Radariandmete akumulatsioonikaart

Kogu perioodi sajuhulkade ruumilise jaotuse hindamiseks koostati radari reaalistest mõõteandmetest ning interpoleeritud andmetest akumulatsioonikaardid. Saadud kaarte võrreldi omavahel. 15-minuti andmete põhjal koostatud sademekaardi puhul paistavad välja väikesed hüpped andmetes, mis tulenevad radari mõõtmismetoodikast. See ilmestab taaskord asjaolu, et senine mõõtmiste ajaline samm, 15 minutit, on liiga pikk ning ei sobi isegi pikaajaliste akumulatsioonikaartide tegemiseks (võrdle jooniseid 10 ja 12, 11 ja 13). Taolist pikema perioodi ruumilist jaotust uurides aitaks tihedam mõõtmiste intervall selliseid lünkasid vältida.

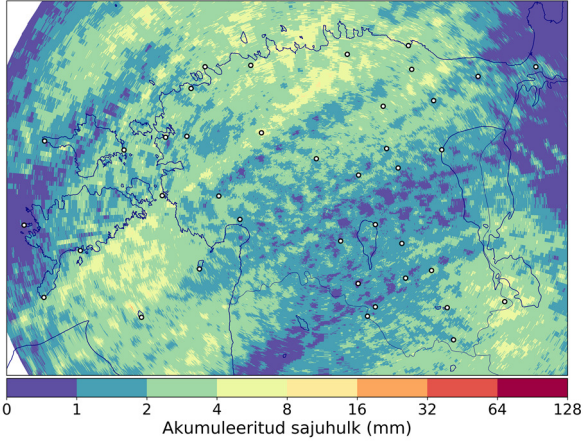
Üheminutiliste andmete akumulatsioonil saadud sademekaardil on sajualade liikumisel tekkinud ruumiline jaotus oluliselt ühtlasem (joonised 12 ja 13). Kadunud on andmete lüngad ja sajualade piirid on selgemini välja joonistunud. Samas on andmete *optical flow* meetodiga töötlemise järel ära kadunud radari poolt mõõdetud tugevama peegelduvusega lokaalsed maksimumid, mis tugevamate konvektiivsete tormide olukorras võivad tähendada rahet (võrdle jooniseid 11 ja 13, ühe näitena näha halliga piiratud alas).

Tulemusi on võrreldud ka ainult Eesti alal olevate sademejaamade mõõtmisandmete akumulatsioonikaardiga, mis koostati kahemõõtmelise splaini meetodiga interpoleerides jaamade mõõtmistulemusi, kasutades tarkavara ArcGIS.

Võrreldes ainult jaamadepõhiselt koostatud sademekaarti ning radariandmetest moodustatud sademekaarti, on sademete ruumilise jaotuse detailsuse erinevus märkimisväärne. 2015. aasta 8. juuli (joonised 10, 12, 14) puhul pole tegu väga sajurohke juhtumiga, ning laias laastus kattuvad omavahel jaamade- ja radaripõhised akumulatsioonikaardid. Oluline on aga tähelepanu pöörata radaripildil Põhja-Eestis paikneva tugevamale sajualale (4–8 mm), mis ulatub napilt Raplamaal asuva Kuusiku sademejaamani, mille tõttu on jaamapõhisel akumulatsioonikaardil näha tugevama saju piirkonda, mis on interpoleeritud kogu Põhja-Eestis selle hetke sajupiirkonna ümbrusesse. Sajuala natuke teistsuguse liikumise korral oleks suure tõenäosusega jaam sellest sajust puutumatuks jäänud, ning akumulatsiooniproduktil oleks kajastatud oluliselt erinevam tulemus.

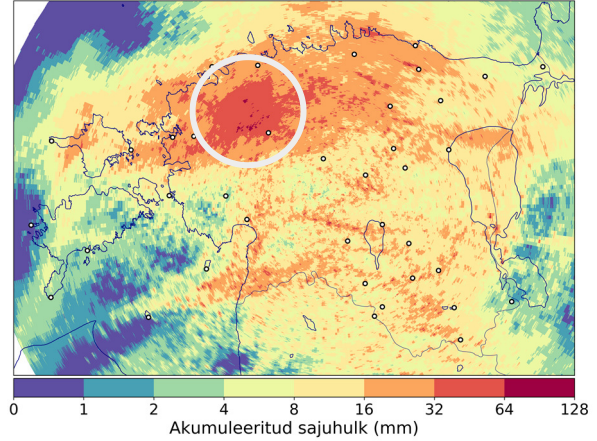
2015. aasta 30.–31. juuli puhul uuritud juhtumil (joonised 11, 13, 15) võib jaamadepõhise ja radariandmete sademeproduktid samuti üldiselt kattuvaks lugeda, sest tugevamad sajupiirkonnad paiknevad sarnaselt. Samas esineb nende kahe kaardi vahel huvitav ebakõla. Sademejaamade andmetest koostatud kaardil on Edela-Eestisse hinnatud võrdlemisi suure katvusega tugevam sajuala. Radariandmed sellist jaotust ei toeta. Radariandmetest koostatud kaardil on näha antud piirkonnas triibuline sademejaotus, mis viitab konvektiivsete tormirakkude olemasolule, mis ei ole ruumiliselt nii ulatuslikud, kui seda on hinnanud jaamapõhine interpoleerimine. Selline triibuline ala katab tegelikkuses praktiliselt kogu Lõuna-Eesti piirkonda, millest nähtub, et jaamapõhine sademekaart pole tegelikku sademejaotust hinnata suutnud.

15 min andmed 2015 07-08 03:00 - 07-08 14:00



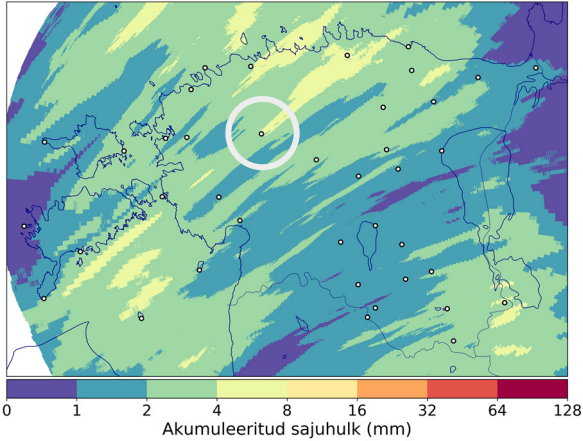
Joonis 10 15-minuti andmed, sademete akumulatsioon perioodil 2015-07-08 kell 03:00 kuni kell 14:00.

15 min andmed 2015 07-30 03:00 - 07-31 16:00



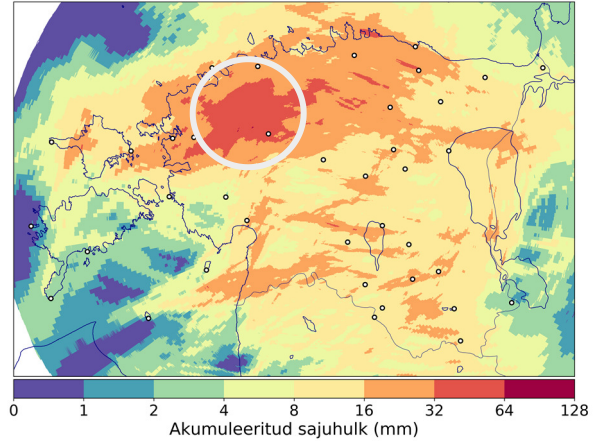
Joonis 11 15-minuti andmed, sademete akumulatsioon perioodil 2015-07-30 kell 03:00 kuni 07-31 kell 16:00. Halli rõngaga alas nähtavad tugevama sajuga alad.

1 min andmed 2015 07-08 03:00 - 07-08 14:00

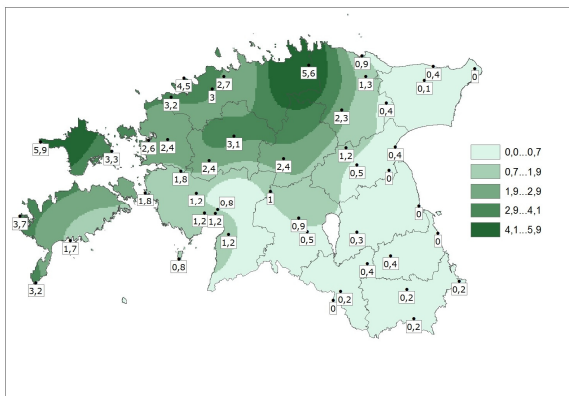


Joonis 12 1-minuti andmed, sademete akumulatsioon perioodil 2015-07-08 kell 03:00 kuni kell 14:00. Kuusiku automaatjaam märgitud halli rõngaga.

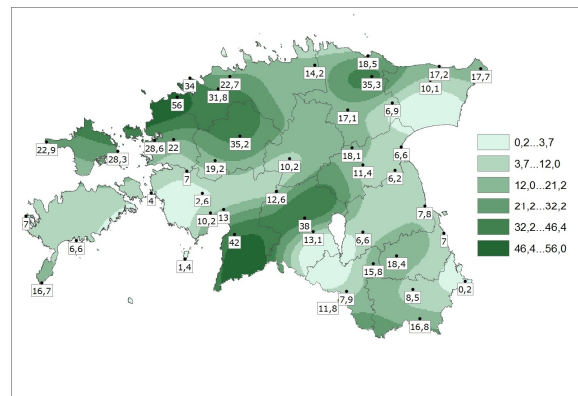
1 min andmed 2015 07-30 03:00 - 07-31 16:00



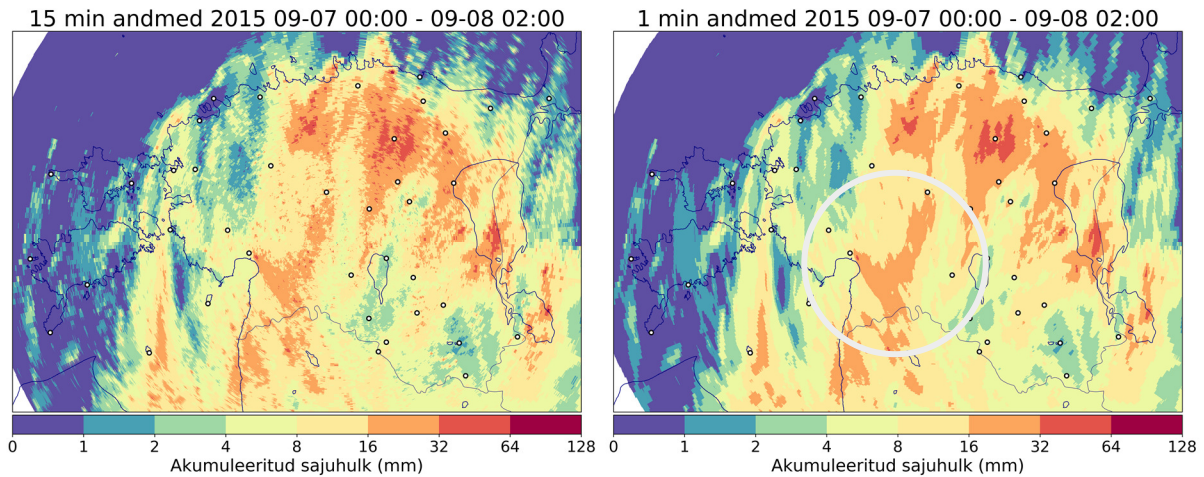
Joonis 13 1-minuti andmed, sademete akumulatsioon perioodil 2015-07-30 kell 03:00 kuni 07-31 kell 16:00. Halli rõngaga näidatud alas kaotatud sajumaksimumid.



Joonis 14 Sademejaamade andmetel koostatud sademete akumulatsioon perioodil 2015-07-08 kell 03:00 kuni kell 14:00.

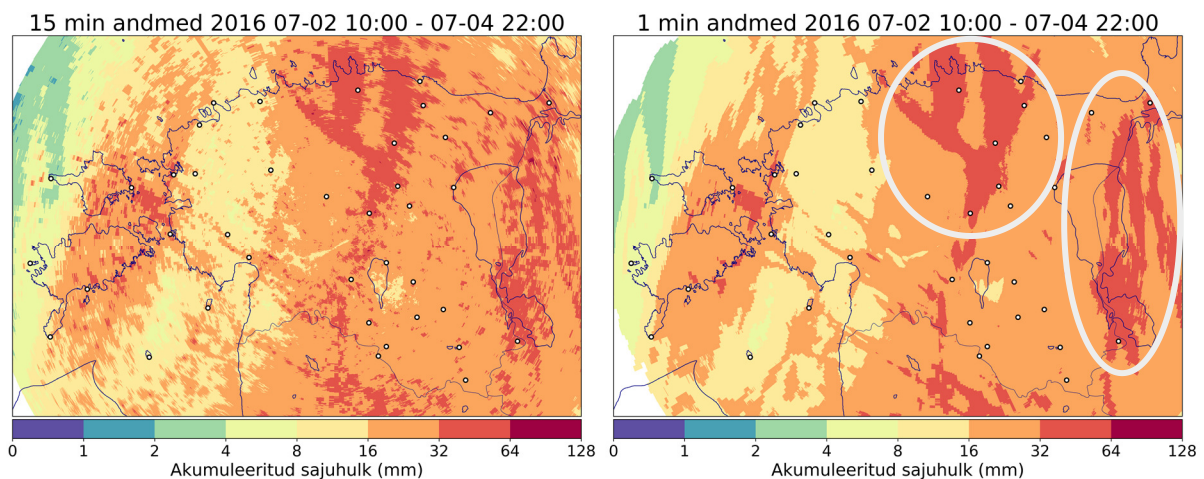


Joonis 15 Sademejaamade andmetel koostatud sademete akumulatsioon perioodil 2015-07-30 kell 03:00 kuni 07-31 kell 16:00.



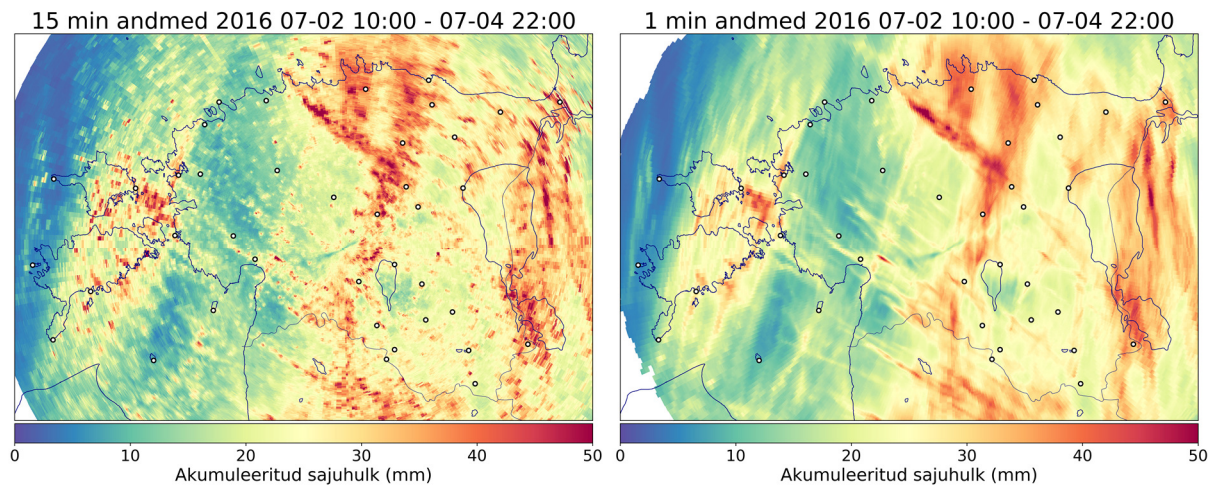
Joonis 16 Sademesumma perioodil 2015-09-07 kell 00:00 kuni 09-08 kell 02:00. Näitena halli rõngaga piiratud tugevam sajuala, mille alla ei jää ühtegi ametlikku sademejaama.

Joonisel 16 on oluline tähele panna eelmise juhtumiga sarnast olukorda. Suurema sajuhulgaga piirkonnas Edela-Eestis (piiratud halli rõngaga), ei jää selle alla ühtegi ametlikku sademejaama.



Joonis 17 Sademete akumulatsioon perioodil 2016-07-02 kell 10:00 kuni 07-04 kell 22:00. Huvitavam sajumaksimumide jaotus piiratud hallide rõngastega.

Joonisel 17 on sademete akumulatsioonipilt perioodil 02.07.16 kuni 04.07.16. Tegemist on 2016. aasta juuli alguses toimunud laastava tormiga [41]. Akumulatsioonikaartidel on kujutatud hinnatav sajualade jaotus radariandmete põhjal, millelt on näha, et terves Ida-Eestis (aga ka saartel) on esinenud tugev sadu sellel perioodil. Samuti on võimalik akumulatsioonikaartide põhjal määrata selle perioodi suuremate sajumaksimumide jaotus (näitena toodud hallide rõngastega piiratud alad).



Joonis 18 Sademete akumulatsioon perioodil 2016-07-02 kell 10:00 kuni kell 22:00. Konvektiivsete tormide rajad nähtavad peenikeste joontena 1 min. andmetest koostatud sajusummade pildil.

Kui andmete astmelist normeerimist mitte kasutada, on pikemaajalises akumulatsioonis väga hästi eristatavad konvektiivsete tormide rajad, mis paistavad pildilt tugevamate peegelduvustega peenete triipudena. Jooniselt 18 on näha, et enamus sellistest triipudest pole kattunud maapealsete sademejaamade asukohtadega ehk ilmateenistuse ametlikul sademekaardil need ei kajastu.

Analüüsitud juhtumite baasil tulevad selgelt esile radariandmete kasutamise eelised koostamaks sajuhulkade hinnanguid, võrreldes maapealsete sademejaamade mõõtetulemustega. Jaamade vähesusest tingituna ei ole keerulisemate sademejaotuste korral võimalik täpselt tegelikku sademete jaotust kirjeldada. Seda seetõttu, et suure tõenäosusega ei ole paljud troposfääris arenenud sajualad liikunud üle sademejaama. Rahuldavaid tulemusi on võimalik saada, kui Eesti alalt liiguvad üle sajud kihtsajupilvedest, mis on oma iseloomult ühtlasemad, liiguvad aeglasemalt ning annavad üldiselt nõrgemaid sademeid. Konvektiivsete tormide hindamisel on samas radariandmete kasutamine ainus meetod nende operatiivseks tuvastamiseks ja jälgimiseks. Lisaks, toetudes eelnevalt toodud tulemustele, võib väita, et radariandmete kasutamisega on võimalik tugevamate tormirakkude trajektoore väga hästi piiritleda. Seega on *optical flow* meetodiga radariandmete töötlemises palju potentsiaali, et koostada täpsemaid ja usaldusväärsemaid pikaajalisi sajukaarte.

6 Kokkuvõte

Sajuhulkade täpne hindamine on oluline protsess mitmes tegevusvaldkonnas, näiteks põllumajanduses ning transpordis. Sademete ebaühtlase ajalise ja ruumilise jaotumise tõttu on tegu nõudliku ülesandega. Eestis koostab Riigi Ilmateenistus ametlikke sademekaarte maapealsete sademejaamade mõõteandmete põhjal. Viimaste võrgustik on aga hõre: üks jaam umbes 1100 km² kohta, mistõttu ei pruugi saadud sademekaardid olla piisavalt täpsed.

Käesolevas töös uuriti, kas sajuhulkade hindamist on võimalik parandada, kasutades selleks ilmaradarite mõõdetud andmeid. Ilmaradarid on keerulised seadmed sademete tuvastamiseks pilvedes, mille abil on võimalik teha hinnanguid maale langevate sajuhulkade kohta. Eestis on kaks ilmaradarit, mis teostavad skaneeringuid 15-minutilise intervalliga. Selline mõõtmiste intervall võib aga teatud juhtudel, sõltuvalt saju liigist, olla ebapiisav.

Radariandmete ajalise lahutusvõime parandamiseks kasutati antud magistritöös nende töötlemiseks arvutuslikku *optical flow* meetodit. Tegemist on pilditöötlusmeetodiga, mille eesmärk on tuvastada ajaliselt järjestatud piltidelt liikumisi. Leitud kiirusväljade põhjal on võimalik interpoleerida kahe ajahetke vahele oletatavaid ajahetki. Töös arvutati *optical flow* meetodiga 15-minutiliste radaripiltide vahele 14 ajahetke, tänu millele paranes andmete ajaline lahutusvõime ühe minutini.

Arvutuslikult saadud andmeid võrreldi juhtumipõhiselt nii mõõdetud radariandmetega kui ka maapealsete sademejaama mõõtetulemustega. Lisaks võrreldi omavahel ka radari ja sademejaamade mõõteandmeid. Andmete omavaheliseks võrdlemiseks leiti iga juhu puhul vastavad tunniakumulatsioonid. Tulemuste põhjal võib väita, et interpoleerimise tulemusena saadud radariandmed ei ole võrreldes originaalsete radariandmetega sademejaamade mõõtetulemustega paremas kooskõlas. Põhjuseks võib tuua asjaolu, et olemasolev maapealsete sadememõõtjate võrgustik on liiga hõre, ning radari 15-minutiline mõõtestrateegia pole piisav, et kirjeldada täpselt ja usaldusväärselt erineva iseloomuga sajujuhtumeid.

Töö käigus loodi ka kogu Eesti territooriumi hõlmavad pikemaajalised (suurusjärgk ööpäev) sajujuhtumeid kirjeldavad akumulatsioonikaardid. Võrreldes originaalsete radariandmetega loodud kaartidega, saavutati interpoleeritud radariandmetega kaartidel oluliselt parem sajualade ruumiline jaotus. Kokku uuriti töös kahteteist sajujuhtumit aastatest 2015, 2016 ja 2018.

Radariandmetest moodustatud sademete akumulatsioonikaarti on võimalik rakendada edasiarendusena tuleohutuskaardi täienduseks Eesti territooriumi kohta.

7 Tänuõnad

Töö autor soovib tänada ennekõike oma juhendajaid Tanel Voormansikut ning Piia Posti, kes on töö idee väljapakumise hetkest igakülgsest selles protsessis toeks olnud. Samuti lähevad tänuõnad Riigi Ilmateenistuse Ilmavaatlusosakonna juhatajale Miina Krabbile, kes vastas alati küsimustele ja aitas jõuda õigete inimesteni. Eraldi tuleb tänada sama osakonna spetsialist-meteoroloog Kairi Vinti, kes joonistas sademejaamade andmete põhjal sademekaardid ning Riina Pärge, kes jagas lahkelt sademejaamade andmeid.

Eriline tänu kuulub Ida Rahule, kes aitas hoida töömoraali ka kõige keerulisematel hetkedel.

8 Kasutatud kirjandus

1. C. Cristian and C. Oana, "An objective approach for comparing radar estimated and rain gauge measured precipitation," *Meteorol. Appl.* **23**, 683–690 (2016).
2. S.-S. Yoon, A. T. Phuong, and D.-H. Bae, "Quantitative Comparison of the Spatial Distribution of Radar and Gauge Rainfall Data," *J. Hydrometeorol.* **13**, 1939–1953 (2012).
3. A. Bracher and B.-M. Sinnhuber, "Principles of Satellite Remote Sensing," http://www.iup.uni-bremen.de/~bms/remote_sensing/remote_sensing_chap5.pdf.
4. K. Nagata, "Quantitative precipitation estimation and quantitative precipitation forecasting by the Japan meteorological agency," *RSMC Tokyo-Typhoon Cent. Tech. Rev.* **13**, 37–50 (2011).
5. E. Goudenhoofd and L. Delobbe, "Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates," *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **13**, 195–203 (2009).
6. C. Liu and E. J. Zipser, "The global distribution of largest, deepest, and most intense precipitation systems," *Geophys. Res. Lett.* **42**, 3591–3595 (2015).
7. W. R. Cotton, G. Bryan, and S. C. van den Heever, *Storm and Cloud Dynamics*, 2nd ed. (Academic Press, 2010), Vol. 99.
8. J. J. Gibson, *The Perception of the Visual World* (Houghton Mifflin Company, The Riverside Press, 1950).
9. R. J. Radke, *Computer Vision for Visual Effects* (Cambridge University Press, 2013).
10. B. K. P. Horn and B. G. Schunck, "Determining optical flow," *Artif. Intell.* **17**, 185–203 (1981).
11. J. L. Barron, S. S. Beauchemin, and D. J. Fleet, "On optical flow," in *Proceedings of the Sixth Artificial Intelligence and Information-Control Systems of Robots*, I. Plander, ed. (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1994), pp. 3–14.
12. D. Sun, S. Roth, and M. J. Black, "Secrets of optical flow estimation and their principles," in *Proceedings of the 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Workshops* (IEEE, 2010), pp. 2432–2439.
13. S. Baker, S. Roth, D. Scharstein, M. J. Black, J. P. Lewis, and R. Szeliski, "A Database and Evaluation Methodology for Optical Flow," in *Proceedings of the 2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision* (IEEE, 2007), pp. 1–8.

14. M. Sonka, V. Hlavac, and R. Boyle, *Image Processing: Analysis and Machine Vision*, 2nd ed. (CL Engineering, 1998).
15. B. Jähne, *Digital Image Processing*, 6th ed. (Springer-Verlag, 2005).
16. J. R. Holton, *An Introduction to Dynamic Meteorology* (Academic Press, 2004).
17. D. Fleet and Y. Weiss, "Optical Flow Estimation," in *Handbook of Mathematical Models in Computer Vision*, N. Paragios, Y. Chen, and O. D. Faugeras, eds., 1st ed. (Springer Science+Business Media, Inc., 2006), pp. 237–257.
18. E. Meinhardt-Llopis, J. S. Pérez, and D. Kondermann, "Horn-Schunck Optical Flow with a Multi-Scale Strategy," *Image Process. Line* **3**, 151–172 (2013).
19. M. Proesmans, L. J. V. Gool, E. J. Pauwels, and A. Oosterlinck, "Determination of Optical Flow and Its Discontinuities Using Non-Linear Diffusion," in *Proceedings of the Third European Conference on Computer Vision*, J.-O. Eklundh, ed., ECCV '94 (Springer-Verlag, 1994), Vol. 2, pp. 295–304.
20. M. Peura and H. Hohti, "Motion Vectors in Weather Radar Images," in *Proceedings of the Seventh International Winds Workshop* (EUMETSAT, 2004).
21. R. Bechini and V. Chandrasekar, "An Enhanced Optical Flow Technique for Radar Nowcasting of Precipitation and Winds," *J. Atmospheric Ocean. Technol.* **34**, 2637–2658 (2017).
22. P. Cheung and H. Y. Yeung, "Application of optical-flow technique to significant convection nowcast for terminal areas in Hong Kong," presented at the 3rd WMO International Symposium on Nowcasting and Very Short-Range Forecasting (WSN12), Rio de Janeiro, Brazil, 6–10 Aug. 2012.
23. S. Sinha, T. V. C. Sarma, and M. R. Lourde, "Doppler Feature Based Classification of Wind Profiler Data," *J. Phys. Conf. Ser.* **787**, 1–7 (2017).
24. J. Saar, "EMHI sai uue võimsa ilmaradari," *Riigi Ilmateenistus* (2008).
25. V. Lakshmanan, C. Karstens, J. Krause, and L. Tang, "Quality Control of Weather Radar Data Using Polarimetric Variables," *J. Atmospheric Ocean. Technol.* **31**, 1234–1249 (2014).
26. *IRIS Programmer's Manual* (Vaisala Oyj, 2014).
27. J. S. Marshall, W. Hirschfeld, and K. L. S. Gunn, "Advances in Radar Weather," in *Advances in Geophysics*, H. E. Landsberg, ed. (Academic Press Inc., 1955), Vol. 2, pp. 1–56.
28. G. R. North, J. A. Pyle, and F. Zhang, eds., "Radar," *Encycl. Atmospheric Sci. Second Ed.* **6**, 415–421 (2014).

29. J. S. Marshall and W. M. K. Palmer, "The distribution of raindrops with size," *J. Meteorol.* **5**, 165–166 (1948).
30. E. Morin, W. F. Krajewski, D. C. Goodrich, X. Gao, and S. Sorooshian, "Estimating Rainfall Intensities from Weather Radar Data: The Scale-Dependency Problem," *J. Hydrometeorol.* **4**, 782–797 (2003).
31. G. Villarini and W. F. Krajewski, "Review of the Different Sources of Uncertainty in Single Polarization Radar-Based Estimates of Rainfall," *Surv. Geophys.* **31**, 107–129 (2010).
32. M. Frech, "The effect of a wet radome on dualpol data quality," presented at the 34th Conference on Radar Meteorology, Williamsburg, VA, 5–9 Oct. 2009.
33. E. Saltikoff, J. Y. N. Cho, P. Tristant, A. Huuskonen, L. Allmon, R. Cook, E. Becker, and P. Joe, "The Threat to Weather Radars by Wireless Technology," *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **97**, 1159–1167 (2015).
34. P. Joe, J. Scott, J. Sydor, A. Brandão, and A. Yongacoglu, "Radio Local Area Network (RLAN) and C-Band Weather Radar Interference Studies," presented at the 32nd AMS Radar Conference on Radar Meteorology, Albuquerque, New Mexico, 24–29 Oct. 2005.
35. G. Rossum, *Python Reference Manual* (CWI (Centre for Mathematics and Computer Science), 1995).
36. J. Helmus and S. Collis, "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**, 1–6 (2016).
37. S. Pulkkinen, "C++/Python implementations of optical flow algorithms," <https://github.com/pulkkins>.
38. J. D. Hunter, "Matplotlib: A 2D Graphics Environment," *Comput. Sci. Eng.* **9**, 90–95 (2007).
39. J. Whitaker, "Matplotlib Basemap Toolkit Documentation," <https://matplotlib.org/basemap/#>.
40. I. Crisologo, G. Vulpiani, C. C. Abon, C. P. C. David, A. Bronstert, and M. Heistermann, "Polarimetric rainfall retrieval from a C-Band weather radar in a tropical environment (The Philippines)," *Asia-Pac. J. Atmospheric Sci.* **50**, 595–607 (2014).
41. K. Kula, "Lõuna-Eesti äikesetorm kahjustas laias ulatuses riigimetsa," *Tartu Postimees* (2016).

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Jorma Rahu,

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

Optical flow meetodi kasutamine parandamiseks radarvaatluste ajalise lahutusvõimega,

mille juhendajad on Tanel Voormansik ja Piia Post,

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2. 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.

Tartus, **04.06.2018**