

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Füüsika Instituut

Tuule Määrsepp

**KONVEKTIIVSETE TORMIDE TUVASTAMINE EESTIS
ILMARADARI ANDMETEST**

Bakalaureusetöö (6 EAP)
Füüsika, keemia ja materjaliteadus

Juhendajad:
PhD Piia Post
MSc Tanel Voormansik

Tartu 2020

Konvektiivsete tormide tuvastamine Eestis ilmaradari andmetest

Töö käigus leiti sobivad parameetrid ja lävendid konvektiivsete tormide tuvastamiseks ilmaradari andmetest Eestis. Selleks kasutati välgudetektorite ja järelanalüüsi ERA5 andmeid. Konvektiivsete tormide eristamiseks sajualadest määrati sajuala peegelduvuse lävend 51 dBZ ja sajualale vastava konvektiivse potentsiaalse energia (CAPE) alampiiir 80 J/kg. Töös anti ülevaade tuvastatud konvektiivsetest tormidest Eestis aastatel 2010-2019. Kõige enam esineb konvektiivseid torme Mandri-Eesti edelosas ning 58% tormidest esineb kella 13 ja 19 vahel kohaliku aja järgi.

Märksõnad: konvektiivne torm, ilmaradar, CAPE, Eesti

CERCS: P500 — Geofüüsika, füüsikaline okeanograafia, meteoroloogia; T181 — Kaugseire

Detecting convective storms from weather radar data in Estonia

In the course of the thesis, suitable parameters and thresholds for detecting convective storms from weather data in Estonia were found. Data from both flash detectors and reanalysis ERA5 were used. To distinguish convective storms from rainfall areas, the rainfall reflectivity threshold was set at 51 dBZ and the lower limit of the convective potential energy (CAPE) was set at 80 J/kg. In addition, an overview of the identified convective storms in Estonia in 2010-2019 was provided. Most convective storms occur in the south-western part of mainland Estonia, and 58% of storms occur between 1 PM and 7 PM local time.

Keywords: convective storm, weather radar, CAPE, Estonia

CERCS: P500 — Geophysics, physical oceanography, meteorology; T181 — Remote sensing

Sisukord

Sissejuhatus	4
1 Teoreetiline taust	6
1.1 Konvektiivne torm	6
1.2 Konvektiivse tormi dünaamikat kirjeldavad parameetrid	8
1.2.1 Konvektiivne potentsiaalne energia - CAPE	8
1.2.2 Vertikaalne tuulenihe	8
1.3 Tormide tuvastamine	9
1.3.1 Sademed	9
1.3.2 Välgulöögid	10
1.4 Konvektiivsed tormid Euroopas ja Eestis	11
2 Andmed ja metoodika	13
2.1 Eeltöödeldud andmed	13
2.2 Andmed järelanalüüsist	15
2.3 Konvektiivsete tormide tuvastamine	15
2.4 Andmetöötlusvahendid	16
3 Tulemused ja analüüs	17
3.1 Välgulöögid ja sajualad	17
3.2 Konvektiivse tormi lävendite määramine	20
3.3 Lävendite kontroll	24
3.4 Konvektiivsed tormid Eestis aastatel 2010-2019 v.a. 2017	26
Kokkuvõte	30
Kirjandus	31
Lihtlitsents	34

Sissejuhatus

Konvektsioonist põhjustatud tormide ehk konvektiivsete tormidega kaasnevad sageli ohtlikud ilmastikunähtused nagu tugev vihm, rahe, tuul ning äike võivad põhjustada suurt kahju inimese tervisele ning varadele. Seetõttu on oluline teada nende tormide esinemise ning tekkeks vajalike tingimuste kohta, et oleks võimalik neid jälgida ning võimalikult vara prognoosida. Konvektiivset tormi iseloomustavad lühiajalisus ja väike ruumiline ulatus, mistõttu on keeruline hinnata konvektiivse tormi esinemist ja ajalist kulgemist vaid ilmajaamade andmete põhjal. Võimalik on kasutada kaugseire meetodeid, mis pakuvad paremat ajalist ja ruumilist lahutusvõimet, kuid eeldavad uuringuid nende kaudu tormide tuvastamiseks.

Laiemalt Euroopas on uuritud tormide klimatoloogiat ning ka konkreetseid tingimusi, mis on vajalikud nende tormide esinemiseks. Euroopa Ohtlike Ilmanähtuse Andmebaasist on võimalik saada infot tormide asukoha ja kellaaja kohta ning koostada üleeuroopaline klimatoloogia [1]. Samas uuringus on leitud tormide eristamiseks atmosfääri ebastabiilsuse, niiskuse ning tuulenihe parameetrid ja nende lävendid. Selleks, et Eestis tormide klimatoloogiat uurida, ei saa sama andmebaasi kasutada, sest Eesti alade kohta leiab sealt vaid kuni 100 kirjet aastas. Andmebaasi andmed põhinevad vabatahtlikel vaatlustel ning kuna vaatlejaid ei ole piisavalt, siis võivad nähtuste ruumilised jaotused olla ka moonutatud. Piisavate vaatluste korral on küll võimalik tormide esinemise kohta infot saada, kuid tormide prognoosimiseks ei piisa vaid esinemisstatistikast.

Juba enam kui kümme aastat on olemas kaugseirevahendid, et jälgida ja tuvastada tormidega kaasuvaid nähtusi Eestis. Põhjamaade välgudetektorite võrgustiku (NORDLIS, ingl *Nordic Lightning Information System*) andmeid kasutades on võimalik välkusid jälgida juba alates 2005. aastast. Nende andmete alusel on põhjalikult uuritud pilv-maa välkude klimatoloogiat ja nende ajalis-ruumilist jaotust ([2], [3]), aga ka välkude ning ilmapuustrite seoseid [4]. Samuti on Eestis olemas alates 2008. aastast kaksikpolarimeetritelised ilmaradarid, mis võimaldavad tuvastada tugevad sajualad. Seni on radarandmeid kasutatud ühe konkreetse tormi analüüsiks ning sünoptilise situatsiooni kirjeldamiseks [5] ning samuti on uuritud radarandmetest ohtlike nähtuste eristamine [14]. Konvektiivsete tormide tuvastamiseks ei piisa ainult välgu- või radarandmetest.

Kõik konvektiivset päritolu tormid ei sisalda välke ning osa välkudest on hoopis tsüklonaalset päritolu, mis tähendab, et tuleb leida lisaparameetreid konvektiivsete tormide tuvastamiseks. Euroopa jaoks leitud parameetreid ja lävendeid ei saa Eesti jaoks otse üle võtta ning seetõttu on vaja leida meetod tormide tuvastamiseks ning vastavate meteoroloogiliste tingimuste leidmiseks Eestis.

Bakalaureusetöö eesmärk on leida Eesti alade jaoks sobivad parameetrid ja nende lävendid konvektiivsete tormide tuvastamiseks ilmaradari andmetest. See tähendab ilmaradariga tuvastatud sajualadest sobivate lävenditega konvektiivsete tormide eristamist. Parameetrite ja lävendite leidmiseks tuleb arvestada nii protsessi kontseptuaalse mudeliga kui ka andmete kättesaadavusega. Töös kasutatakse Riigi Ilmateenistuse Sürgavere ilmaradari andmeid. Võrdlusandmeteks on NORDLISI välguandmed. Lähtuvalt algandmetest vaadeldakse töös tormi kui tugevate sademete ja võimaliku äikesega ilmanähtust ehk tormiga ei pea tingimata kaasnema tugev tuul. Sobivate parameetrite ja lävendite määramiseks kasutatakse järelanalüüsi ERA5 andmeid. Töös kontrollitakse, kas Kesk-Euroopa jaoks leitud lävendid kehtivad ka Eesti tormide jaoks.

Töö käigus antakse ülevaade konvektiivse tormi tekkeprotsessist ja sobivatest parameetritest selle protsessi hindamiseks. Kirjanduse ülevaates tutvustatakse Kesk-Euroopas kasutatud meetodeid konvektiivsete tormide uurimiseks ning Eestis läbi viidud pilv-maa välkude uuringute tulemusi. Töö uurimuslik osa sisaldab radarandmete ja välguandmete võrdlust, nendele vastavate parameetrite analüüsi ning ülevaadet konvektiivsete tormide ajalis-ruumilisest jaotusest Eestis aastatel 2010-2019.

Peatükk 1

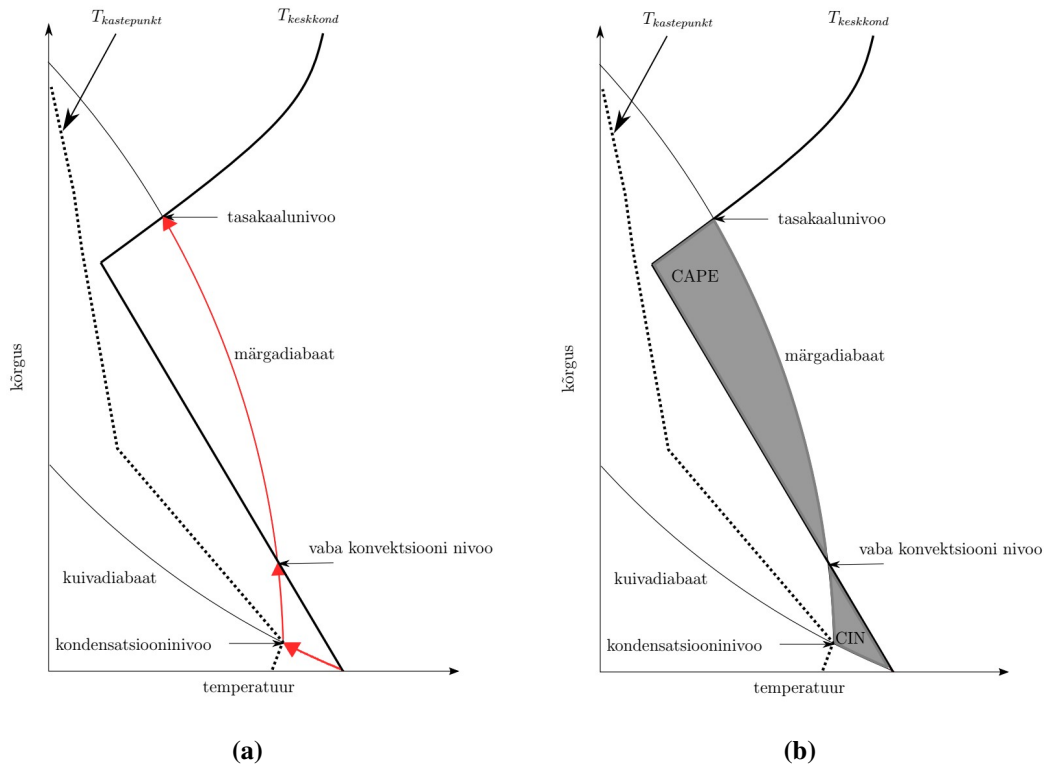
Teoreetiline taust

1.1 Konvektiivne torm

Konvektiivseks tormiks nimetatakse õhu püstvooluga kaasnevat tormi. Selline õhu liikumine võib olla põhjustatud atmosfääri ebastabiilsusest, niiskest ja soojast piirkihist või õhuvoolude konvergensist. Atmosfääri vertikaalse ebastabiilsuse hindamiseks tuleb vaadata keskkonna temperatuuri vertikaalset gradienti (γ) ja võrrelda seda tõusva õhu märgadiabaatilise (γ_a') ja kuivadiabaatilise temperatuuri gradiendiga (γ_a). Märg- ja kuivadiabaatilist gradienti eristatakse selle järgi, kas kõrgusega temperatuuri langemisel õhus olev niiskus kondenseerub välja või mitte. Kõrgust, mis tähistab märg- ja kuivadiabaatilise gradiendi piiri, nimetatakse kondensatsiooninivooks (vt. joonis 1.1 (a)). Tegemist on kõrgusega, kus tõusva õhu temperatuur saab võrdseks kastepunktiga ja tekib küllastus. Soojast piirkihist ja selles oleva õhu segunemisest tingitud üleslükkejõu tõttu kerkiv õhk jahtub kuivadiabaatiliselt kuni kondensatsiooninivooni. Sealt edasi toimub jahtumine märgadiabaatiliselt, kuni tõusva õhu temperatuur saab võrdseks ümbritseva õhu temperatuuriga. Selle kõrguseni jõudmine sõltub sellest, kas esialgne üleslükkejõud oli piisav. Vastavat kõrgust nimetatakse vaba konvektsiooni nivooks (LFC, ingl *level of free convection*), sest alates sellest kõrgusest saab tõusev õhk soojemaks ümbritsevast ning algab konvektsioon, mis ei sõltu enam esialgsetest piirkihi tingimustest. Märgadiabaatiline jahtumine jätkub kuni tõusva õhu temperatuur saab jälle võrdseks ümbritseva õhu temperatuuriga. Vastav kõrgus tähistab tasakaalunivood (EL, ingl *equilibrium level*). Õhu vertikaalne tõusmine lõpeb. Jooniselt 1.1 (a) on näha, et sellise olukorra tekkimiseks peab keskkonna vertikaalse temperatuuri gradiendi jaoks kehtima

$$\gamma_a' < \gamma \leq \gamma_a . \quad (1.1)$$

Vastava tingimuse korral loetakse atmosfäär tinglikult labiilseks. Õhu allavool tekib, kui küllastunud õhk pilve ülemises osas seguneb kuiva keskkonnaõhuga. [6]



Joonis 1.1: Lihtsustatud aeroloogiline diagramm. Punasega on märgitud tõusva õhu temperatuuri käik (a). Halliga on märgitud CAPE ja CIN väärtused kui pindalad aeroloogilisel diagrammil (b). [6]

Eelnev kirjeldus tõusva õhuvoolu tekkimisest kehtib individuaalse konvektiivse raku jaoks, mis sisaldab üht õhu ülesvoolu ja allavoolu. Konvektiivseks tormiks loetakse organiseerunud konvektiivseid rakke. Eraldi arvestatakse ka mesomastaapseid konvektiivseid süsteeme, kus torm on organiseerunud ühes suunas vähemalt 100 km suuruseks. [6]

Piisavate tingimuste korral võib vertikaalselt tõusva õhu kiirus ulatuda mitmekümne meetri sekundis. See tähendab õhu kiiret jahtumist ning sisalduva veeauru kondenseerumist, mille tagajärjel tekib kiiresti suur hulk sademeid. Tormide vertikaalne kasvamine tähendab ka seda, et nende horisontaalne ulatus on piiratud. Kõik eelnev viitab konvektiivsete tormide lühiajalisusele ja väikesele ruumilisele ulatusele. [6]

1.2 Konvektiivse tormi dünaamikat kirjeldavad parameetrid

1.2.1 Konvektiivne potentsiaalne energia - CAPE

Konvektsioon saab tekkida, kui atmosfääris on temperatuuri ja niiskuse kihistumisest tingitud potentsiaalset energiat. Seda energiat iseloomustavat suurust nimetatakse konvektiivseks potentsiaalseks energiaks (CAPE, ingl *convective available potential energy*). Atmosfääri kihistumine on konvektsiooni jaoks soodne, kui kehtib tingimus valemis 1.1. CAPE on defineeritud kui:

$$\text{CAPE} = \int_{\text{LFC}}^{\text{EL}} \left(\frac{F}{\rho} \right) dz , \quad (1.2)$$

kus F tähistab üleslükkejõudu ühikulise ruumalaga õhu jaoks, ρ tähistab õhu tihedust ning dz tähistab infinitesimaalset kõrguse muutust. Kasutades hüdrostaatika põhivõrrandit ning ideaalse gaasi võrrandit saab valemi 1.2 viia kujule

$$\text{CAPE} = R_d \int_{\text{EL}}^{\text{LFC}} d(\ln p) , \quad (1.3)$$

kus $R_d = 287 \text{ J}/(\text{K kg})$ tähistab kuiva õhu gaasi konstanti. CAPE ühik on J/kg . Valemi 1.3 tuletuskäik on toodud allikas [6]. Joonisel 1.1 (b) on näha, et kui aeroloogilisel diagrammil esitada kõrgus naturaallogaritmilises skaalas ja rõhuühikutes, siis tähistab CAPE väärtust pindala LFC nivoost EL nivooni ning õhu temperatuuri ja märgadiabaadi vahel. [6]

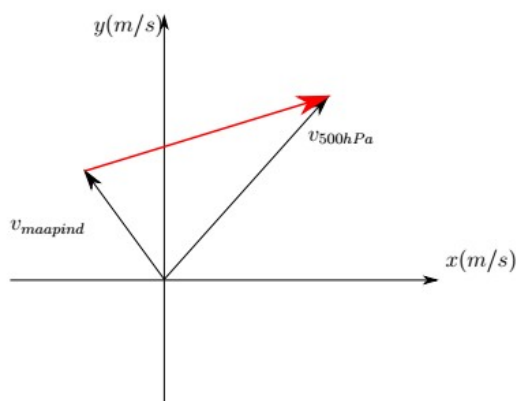
CAPE väärtuseid alla $1000 \text{ J}/\text{kg}$ loetakse väikeseks atmosfääri ebastabiilsuseks ning väärtuseid üle $4000 \text{ J}/\text{kg}$ ekstreemseks ebastabiilsuseks [7], kuid need piirid pole absoluutsed ja võivad olla erinevad regiooniti. Suur CAPE põhjustab tugeva õhu ülesvoolu, mis omakorda tekitab intensiivse õhu allavoolu kiire kondenseerumise tõttu. Seega on tugevad sademed korrelatsioonis suure CAPE väärtusega. [8]

Energiat, mida on vaja, et tõusev õhk jõuaks vaba konvektsiooni nivooni, nimetatakse konvektiivseks piiranguks (CIN, ingl *convective inhibition*). Omadustelt võib vaadata CINi kui negatiivset CAPEt. Nii nagu CAPEt saab ka CINi kujutada aeroloogilisel diagrammil pindalana (vt joonis 1.1 (b)). CINi väärtuseid, mis on suuremad kui $100 \text{ J}/\text{kg}$, loetakse piisavaks, et takistada konvektsiooni tekkimist. [6]

1.2.2 Vertikaalne tuulenihe

Konvektiivsete tormide arengut määrab vertikaalne tuulenihe. Vertikaalne tuulenihe on defineeritud kui maapinna lähedase ja mingi kõrgema nivoo tuulevektorite vahe (joonis 1.2).

Tuulenihe suuruse hindamiseks vaadatakse selle vektori pikkust. Mida suurem on tuulenihe, seda rohkem kaldu vajub konvektiivse tormi vertikaalne telg ning üles- ja allavoolud ei takista üksteist ning torm ei lagune nii kiiresti. Tulemuseks on pikema eluea, suurema pindala ja intensiivusega tormid. Tüüpiliselt kasutatakse kõrgema nivooa kõrgust 500 hPa. [6]



Joonis 1.2: Tuulenihe kui maapinna lähedase ja mingi kõrgema nivoo (nt 500 hPa) tuulevektorite vahe.

1.3 Tormide tuvastamine

1.3.1 Sademed

Konvektiivsete tormidega kaasnevad tugevad sademed, mida on võimalik tuvastada radariga. Radari tööpõhimõte seisneb kõrgsagedusliku signaali väljasaatmises ning selle sama signaali tagasipeegelduste vastu võtmises. Tagasipeegeldused sademetelt võimaldavad määrata nii sajuala asukohta, suurust kui ka sademete hulka. Tagasipeegeldunud signaali võimsus on võrdeline sajuala peegelduvusega ning pöördvõrdeline sajuala kauguse ruuduga. Peegelduvus z avaldub kujul:

$$z = c p_r r^2, \quad (1.4)$$

kus c on konstant ühikuga $\text{mm}^6/(\text{m}^3 \text{mW km}^2)$, p_r on tagasipeegeldunud signaali võimsus ühikuga mW ja r on sajuala kaugus kilomeetrites. Konstandis millimeetrite kuues aste tuleneb signaali hajumisest sfääriliselt objektilt, kus on arvestatud Rayleigh hajumisega. Peegelduvus sõltub osakeste arvust ja suurusest ühikruumalas ning seetõttu võivad peegelduvuse arväärtused muutuda vahemikus 0,001 kuni 36000000. Olukorra lihtsustamiseks on sisse

toodud logaritmiline peegelduvus Z , mida esitatakse ühikutes dBZ:

$$Z = 10 \log \left(\frac{z}{1 \text{ mm}^6/\text{m}^3} \right). \quad (1.5)$$

Valemite (1.4) ja (1.5) tuletuskäigud on toodud allikas [9].

Sademetehulga ja peegelduvuse seos on selgeks tehtud katseliselt:

$$z = A \cdot R^b, \quad (1.6)$$

kus R on sademetehulk ühikuga mm/h, z on peegelduvus (mm^6/m^3) ning A ja b on empiirilised konstandid. [9]

Radari tööraadiuse määrab radari võimsus ja antenni füüsiline suurus. Tuleb arvestada, et radarandmed sisaldavad ka valepeegeldusi ja müra. Samuti võivad interferentsi tekitada teised lähedal olevad radarid või muud saatjad. Arvestada tuleb ka radari lahutusvõimega. [10]

Selleks, et eristada radariga leitud sajualadest konvektiivsed tormid tuleb kasutada kõrget peegelduvuse lävendit. Radarandmete põhjal on kindlaks tehtud, et peegeldused on seda suuremad, mida suuremad on sademete diameetrid. Seetõttu on võimalik radari peegelduvuste järgi lisaks tormide tuvastamisele hinnata ka tormide intensiivsust. [11]

1.3.2 Välgulöögid

On teada, et kõik pilved on teatud määral elektriliselt polariseeritud, kuid just suure vertikaalse ulatusega konvektiivsed pilved on need, mille puhul tekkiv elektrivälja suudab ületada õhu läbilöögi-väljatugevust. Spetsiaalsete raadiosondeerimiste abil on kindlaks tehtud, et negatiivne laeng pilves on koondunud -10°C ja -20°C temperatuuri nivooade vahele. Sellest vahemikust kõrgemal on suurem osa positiivsest laengust ning väike osa positiivset laengu eksisteerib ka sellest vahemikust madalamal. Vaatlustulemusd on näidanud, et välg järgneb tugevale pilvesisesele rahe- või lumekruubisajule. Praeguse seisuga arvatakse, et pilve elektriline laadimine on põhjustatud pilveosakeste pörgetest. Nimelt pilve sees langevad rahe ja lumekruubi osakesed saavad kokkupõrkel väiksemate tõusvate pilveosakestege negatiivse laengu ja ning tõusvad osakesed positiivse laengu. Liikumised jätkuvad ning laeng koondub pilves vastavalt: positiivne üles ja negatiivne alla. Piisava elektrivälja tekkimisel tekib välg. See tähendab, et mida rohkem on suuri allalangevaid pilveosakesi, seda suurem on välgu tekkimise tõenäosus. Et vastavate pilveosakeste teke on otseselt seotud tugeva konvektiivsusega, saab kasutada ka välgude registreerimist tugevate konvektiivsete tormide tuvastamiseks. [6]

Välgulöövide ruumilised jaotused näitavad, et suurem osa neist esineb maismaa kohal. Selle

põhjus on maapinna soojenemine, mis suurendab CAPE väärtust. Et maapinna soojenemine jõuab oma maksimumi pärastlõunaks, siis on ka CAPE väärtuste ööpäevane jaotus sarnane välgulöökide jaotusele. [6]

1.4 Konvektiivsed tormid Euroopas ja Eestis

Ilma põhjustatud kahjustused on seotud konvektiivsete tormidega nii suures ulatuses, et mõisted ohtlik ilm ja ohtlik torm on üheselt arvatud konvektsiooniga seotuks [6]. Seetõttu võib Euroopa konvektiivsete tormide ülevaate jaoks vaadata ka töid, milles on uuritud ohtlikke ilmanähtusi (tugev vihm, rahe või tuul, tornaadod jne.). Kuna tegemist on üldjuhul lühiajaliste nähtustega, siis on kõige usalduväärsemaks allikaks vaatlused. Näiteks on võimalik kasutada Euroopa Ohtlike Ilmanähtuse Andmebaasi, nagu on tehtud Kesk-Euroopas läbiviidud töös [1], kus leiti, et CAPE alusel on võimalik eristada ohtlikke nähtusi, millega kaasnevad välgud ja millega mitte. CAPE väärtused määrati sagedusjaotuste põhjal eri tüüpi ohtlike ilmanähtuste jaoks. Selgus, et tugevate sademete ja tuulte korral on CAPE mediaan ligi 500 J/kg, mis viitab sellele, et eelpool pakutud madala CAPE piir (<1000 J/kg) ei vasta Euroopas kõigi juhtumite jaoks. Samas töös leiti, et tuulenihke väärtused tugevate sademete ja äikesetormide jaoks on enamasti alla 20 m/s. Austrias läbiviidud töös [12] valiti konvektiivsete tormide eristamiseks ilmaradari andmetest peegelduvuse lävendid 46 dBZ ja 54 dBZ ning konvektiivseks loeti päevi, mil keskpäevane CAPE uuritava ala keskpunktis oli >100 J/kg. Tuvastatud konvektiivsed tormid jagati nelja gruppi. Töö [1] CAPE ja tuulenihke sagedusjaotuste põhjal määrati lävendid, et eristada suure ja väikese CAPE ning tuulenihkega juhtumid. Väikeseks CAPEks loeti väärtust ≤ 250 J/kg, suureks CAPEks ≥ 600 J/kg ning tuulenihke jaoks vastavalt ≤ 5 m/s ja ≥ 15 m/s. Nelja gruppi jagamine toimus lävendite kombinatsioonide põhjal. See võimaldas leida tuulenihke ja CAPE mõju tormide kasvamisele. Töös tuvastati konvektiivsete tormide esinemine pigem pärastlõunasel ajal (ööpäeva maksimum kell 15 kohaliku aja järgi). Samuti leiti seosed konvektiivsete tormide ruumilise jaotuse ja uuritud ala pinnareljeefi ning üldiste õhuvoolu suundade vahel. Pinnareljeefi ja geograafilise asendi erinevustest võib eeldada, et lävendid konvektiivsete tormide jaoks on Eesti jaoks erinevad Kesk-Euroopa lävenditest.

Eesti alade jaoks on olemas ülevaated äikesesademetes esinemisest Eestis [13], pilv-maa välgulöökide arvu seosed tsirkulatsioonitüüpidega [4] ja äikesepäevade seosed tsirkulatsioonitüüpidega [2] erinevate ajaperioodide jaoks. Ligikaudu 99% pilv-maa välgulöökidest Põhja-Euroopas esineb soojadel kuudel maist-septembrini [3], mille alusel saab valida ka konvektiivsete tormide uurimiseks just selle perioodi. Välgulöökide ööpäevane jaotus Eesti erineb oluliselt maismaa ja mere kohal, kuid kuna konvektiivsust seostatakse maismaaga, siis vaadates jaotust maismaa kohal selgub, et pilv-maa välgulöökide maksimum on Eesti

suveaja järgi kella 14 ja 19 vahel [3]. Tsirkulatsioonitüüpidest analüüsist selgub, et kõige rohkem äikesepäevi esineb kagu-, lõuna- ja edelasuuna õhuvoolude puhul [2].

Eestis on numbriliselt modelleeritud üksiku mesomastaapse tormi evolutsiooni, milleks kasutati nii ilmaradariandmeid kui ka CAPE analüüsi, kuid seda vaid atmosfääri sondeerimise põhjal Tallinnas ja Jokioinenis (Soome) ning ajalise sammuga 12 tundi. Uuritud *derecho* (konvektiivse tormiga tekkinud tuultesüsteem) puhul jäid CAPE väärtused madalamaks võrreldes eeldatud 2000 J/kg. Samuti on kasutatud Eesti ilmaradari andmeid välgulöökide ja rahe tuvastamise parameetrite määramiseks sajualadest [14]. Töös kasutati sajualade lävendina peegelduvust 35 dBZ ning leiti, et rahet sisaldavate sajualade ööpäevane jaotuse maksimum langes kokku välgulöökide ööpäevase jaotusega.

Peatükk 2

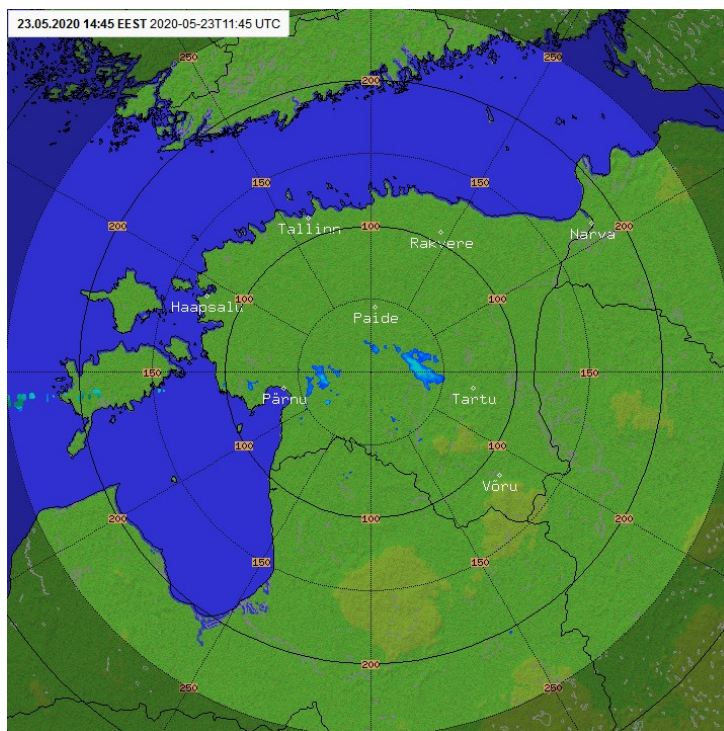
Andmed ja metoodika

2.1 Eeltöödeldud andmed

Töös kasutatud radarandmed ja välguandmed on eeltöödeldud Eesti Kindlustusseltside Liidu poolt tellitud uuringu “Tormiohu geoinfosüsteemi loomine” jaoks käesoleva töö juhendajate poolt. Radarandmed pärinesid Riigi Ilmateenistuse Sürgavere ilmaradarist Vaisala WRM200 (vt joonis 2.1) aastate 2010-2016 jaoks. Uuritav periood oli 1. maist 30. septembrini, sest ligikaudu 99% äikesepäevi esineb Eestis just nendel kuudel. Probleme esines 2012., 2014. ja 2016. aastal, mil igal aastal esines kuu, kus andmete kättesaadavus oli alla 90% (tabel 2.1). Uuringust jäi täielikult välja 2017. aasta, mil andmete kvaliteet oli radari tehniliste probleemide tõttu liiga madal.

Radarandmete eeltöötlus sisaldas endas radari madalaima skaneeringu valimist, sajualade keskmete leidmist arvutinägemise algoritmidega OpenCV Pythoni moodulist [15] ning sajualade selekteerimist lävendiga 35 dBZ. Madalaima skaneeringu peegelduvuse andmed teisendati polaarkoordinaadistikust ristkoordinaadistikku, kus saadud pikslite asukohad tuli seejärel siduda georefereeritud baasmatriksiga kasutades Pythoni moodulit Py-ART [16]. Valepeegelduste eemaldamiseks jäeti välja alla 5 km² pindalaga sajualad. Seega sisaldasid eeltöödeldud andmed sajuala keskme koordinaate, kuupäeva, kellaaega, sajuala pindala ja maksimaalset peegelduvust sajualas. Välguandmed pärinesid Põhjamaade välgudetektorite võrgustikust (NORDLIS), kust valiti pilv-maa välgulöögid Eesti ala jaoks (57,5°-59,8°N; 21,0°-28,5°E) samalt perioodilt radarandmetega. Välguandmed on Eesti jaoks saadaval alates 2005. aastast, kuid alates 2015. aastast on välkude detekteerimise piisav kvaliteet tagatud ka Lõuna-Eestis, mil lisati Leetu kaks välgudetektorit. See on oluline, sest pilv-maa välkude ruumilisest jaotusest Eesti aladel on teada, et välkude arvukus suureneb põhjast lõunasse [17]. Kuna radarandmete ajaline samm on tulenevalt skaneerimise kiirusest 15 minutit, siis välguandmete eeltöötlus tähendas välgu

kellaaja asendamist lähima veerandtunniga. See tagas sajuvalade ja välkude võrdlemise võimaluse. Käesoleva töö jaoks eeltöötles Tanel Voormansik lisaks tormiohu uuringus kasutatutele ka 2018. ja 2019. aasta andmed.



Joonis 2.1: Sürgavere radari asukoht (telgede ristumiskohas pildi keskel) ja selle 250 km tööraadius. Ringid on 50 km sammuga. Radari koordinaadid on 58,5°N, 25,5°E ja kõrgus merepinnast 156,5 m. [18]

Tabel 2.1: Töös kasutatud Sürgavere radarifailide kättesaadavus maksimaalsest võimalikust. Tabelis toodud andmed on protsendides.

aasta \ kuu	mai	juuni	juuli	august	september	keskmine
2010	99,73	99,31	99,90	99,83	99,90	99,73
2011	99,97	99,97	100,00	98,92	99,76	99,72
2012	69,49	99,06	100,00	99,60	99,31	93,49
2013	99,60	99,58	99,76	99,97	99,65	99,71
2014	32,43	97,71	93,95	97,24	96,56	83,58
2015	97,55	99,97	96,40	100,00	99,90	98,76
2016	100,00	99,76	99,06	29,67	99,90	85,68
2018	99,19	99,97	99,73	100,00	99,51	99,68
2019	98,86	99,97	100,00	94,19	100,00	98,60
kõik aastad	88,54	99,48	98,76	91,05	99,39	95,44

2.2 Andmed järelanalüüsist

Käesoleva töö CAPE ja tuulte andmed on pärit Euroopa Keskpikkade Ilmaennustuste Keskuse (ECMWF, ingl *The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) poolt pakutavatest järelanalüüsi andmebaasidest. Järelanalüüs on hiljutise kliima numbriline kirjeldus, mille arvutamiseks on kasutatud prognoosmudeleid ja vaatlusandmeid [19]. Kõige moodsam järelanalüüs on ERA5, mis pakub oma eelkäijast ERA-Interimist nii väiksemat ruumilist kui ka lühemat ajalist sammu (tabel 2.2). Käesolevas töös kasutatakse ERA5 andmeid [20].

Tabel 2.2: Järelanalüüsiste ERA5 ja ERA-Interim võrdlus. ERA-Interimi ajaline samm sõltub parameetri valikust. [21], [22]

	ruumiline samm	ajaline samm
ERA5	31km	1h
ERA-Interim	79km	3h-24h

Austria alade jaoks läbiviidud töös [12] kasutati konvektiivsete päevade eristamiseks ilmaradari andmetest CAPE keskpäevast väärtust uuritava ala keskpunktist ERA-Interimi järelanalüüsist. Käesolevasse töösse ei kuulu ECMWFi poolt pakutavate järelanalüüsiste võrdlus Euroopas, kuid hinnangu andmiseks Eesti ja Kesk-Euroopa parameetrite erinevusele vaadatakse ERA-Interimi [23] ja ERA5 väärtuseid Eesti alade jaoks. Kuna ERA-Interim pakub andmeid kuni 2019. augustini, siis uuriti ERA-Interimi ja ERA5 võrdlemiseks CAPE keskpäevaseid väärtuseid Eesti keskpunkti jaoks (58,5°N, 25°E) ajaperioodil 2010-2018. Selgus, et 90% päevadest jääb erinevus alla 130 J/kg ja maksimaalne erinevus oli 1936 J/kg. 81% juhtudest oli ERA-Interimi poolt pakutav väärtus kõrgem kui ERA5 analüüsis.

Uurides ERA5 poolt pakutavaid andmeid selgus, et CAPE ja tuulte andmed olid nii ajaliselt kui ruumiliselt pidevad, kuid CINi andmed mitte. Vaadates CIN ruumilisi graafikuid (vabavaralise programmiga Panoply [24]) esines anomaaliaid, mistõttu otsustati konvektiivsete tormide eristamiseks CINi mitte kasutada.

2.3 Konvektiivsete tormide tuvastamine

Ilmaradari tuvastatud sajualadest konvektiivsete tormide eristamiseks on vaja määrata sajuala peegelduvuse lävend ning CAPE alampiir konvektsiooni jaoks. Selleks, et kasutada maksimaalselt ERA5 poolt pakutavaid andmeid tuleb töös leida sajualadele vastava CAPE määramiseks parim viis. Ruumiliselt võrreldakse sajuala keskpunktile lähimat andmepunkti ning Eesti keskpunkti. Ajalise võrdluse jaoks tuleb uurida CAPE ööpäevase käigu erinevust sajualade ja välkude ööpäevase käiguga. Kuna CAPE väärtust on otseselt seostatud konvektiivsete tormide

tekkeprotsessiga, siis eeldatakse CAPE maksimumväärtuse seost ööpäevase jaotusega ja ka tugevaimate tormidega. CAPE ööpäevase käigu tarvis vaadeldakse kogu ajaperioodil vastava tunni maksimaalsete väärtuse keskmist. Tuulenihe arvutamiseks võeti ERA5 andmetest 10 m ja 500 hPa kõrguse lääne- ja lõunasuunalised tuule komponendid. Tuulenihe puhul pole ööpäevajaotused nii olulised, sest pole täheldatud eristuvat tuulenihe ööpäevast käiku. Sobiva peegelduvuse lävendi leidmiseks võrreldakse välja sisaldavate ja mittesisaldavate sajualade sagedusjaotust sõltuvalt peegelduvuse lävendist. Samuti on peegelduvuse lävendi määramisel oluline, et CAPE väärtused allesjäänud sajualade jaoks poleks liiga madalad ning alles jääks piisavalt sajualasid. CAPE alampiiri määramiseks vaadatakse CAPE sagedusjaotust sajualade jaoks pärast peegelduvuse lävendi rakendamist.

CAPE ja tuulenihe sagedusjaotuse põhjal defineeritakse suure ja väikese väärtusega juhtumid ning eristatakse neli konvektiivsete tormide gruppi vastavalt nendele väärtustele. See tähendab, et vaadatakse vaid CAPE ja tuulenihe äärmuslike väärtustega juhtumeid. Konvektiivse tormi tekkeprotsesside põhjal peaks sellise jaotamise põhjal ilmnema CAPE ja tuulenihe roll [12]. See võimaldab hinnata, kas määratud lävendid on piisavad konvektiivsete tormide eristamiseks tsüklonaalsetest.

2.4 Andmetöötlusvahendid

Andmete töötlemiseks ja esitlemiseks kasutati programmeerimiskeelt Python (versioon 3.7). Selleks kasutati Pythoni mooduleid numpy [25], pandas [26] ja matplotlib [27]. Järelanalüüsist saadud andmed olid NetCDF formaadis ning nende andmete jaoks kasutati Pythoni moodulit netCDF4 [28]. Ruumiliste jaotuste esitlemiseks kasutati vabavaralist programmi QGIS [29]. QGISis kasutatud 5 x 5 km kaardiruudustik pärineb Maa-ameti Geoportaalist [30].

Peatükk 3

Tulemused ja analüüs

Lähtuvalt eeltöödeldud andmetest on käesolevas töös uuritav periood 1. mai kuni 30. september aastatel 2010-2019 (v.a. 2017). Uuritav Eesti ala on defineeritud kui välguandmete ja radari tööraadiuse kattuv ala (joonis 3.1). Ööpäeva käikude esitlemisel on kasutatud Greenwichi aega (GMT, ingl *Greenwich Mean Time*).

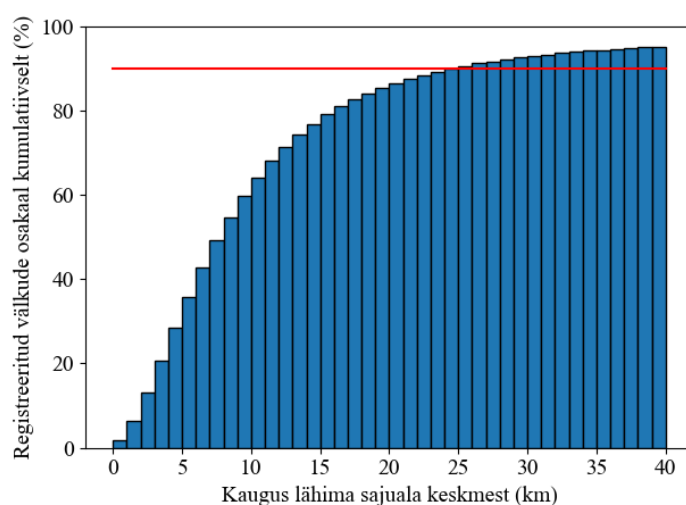


Joonis 3.1: Defineeritud uuritav ala käesoleva töö jaoks.

3.1 Välgulöögid ja sajualad

Uuritud ajaperioodil tuvastati Eesti alalt 692784 sajuala (eelselekteeritud lävendiga 35 dBZ). Siinkohal tuleb arvestada, et tegemist ei ole unikaalsete sajualadega vaid üht sajuala registreeriti ilmselt mitme järjestikuse skaneeringu korral [14]. Suurim tuvastatud sajuala pindala oli 7675

km². Suurim registreeritud peegelduvus 84,3 dBZ. Samal perioodil tuvastati Eesti alalt 395 459 välgulööki. Kuna välguandmed ja radarandmed pärinevad sõltumatutest allikatest, siis kontrolliti, kas välkudele leiduvad vastavad sajualad radarandmetest. Joonisel 3.2 on toodud välkude ja nende vastavate sajuala keskmete kauguste jaotus. 98,1 %-le välkudest leidub vastav sajuala kese lähemal kui kõue kuulmisulatus (40 km). Siinkohal tuleb arvestada, et 40 km on nii pikk vahemaa, et võib esineda olukordi, kus välk ei kuulu vastava sajuala keskmee juurde. Samuti mõjutab tulemusi välguandmete kellaegade muutmine lähima veerandtunnini. Välguga seotud sajuala kese võis tegelikult liikuda välgust kaugemale ja nii ei leidu välgule sajuala vastet 40 km raadiuses.



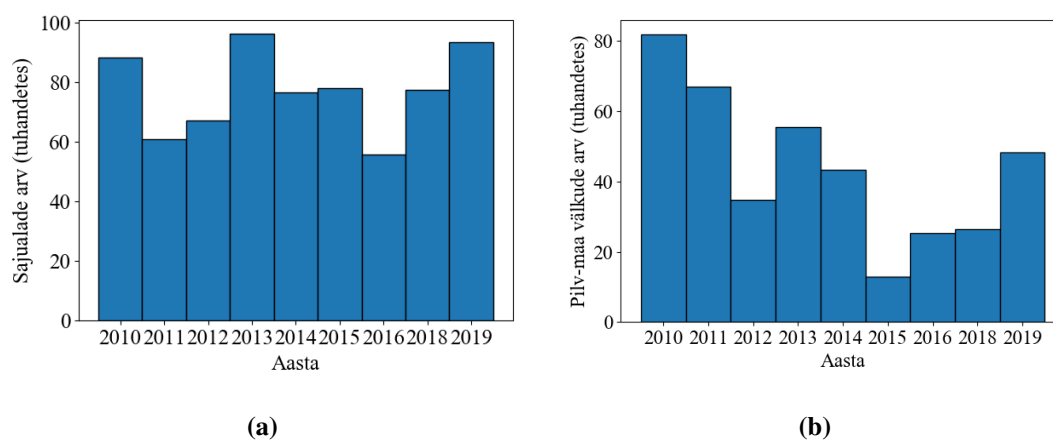
Joonis 3.2: Registreeritud välkude kumulatiivne jaotus sõltuvalt lähima sajuala keskmee kaugusest. Punase joonega on tähistatud 90% piir.

Sajuala loetakse välku sisaldavaks, kui lähim välk asus 25 km raadiuses, sest selle raadiuse sisse jääb 90% välkudest. Kõige ebatäpsemateks osutusid aastad 2014 ja 2016 (tabel 3.1), mis on põhjendatav, sest neil aastatel oli probleeme radarandmete kättesaadavusega (tabel 2.1).

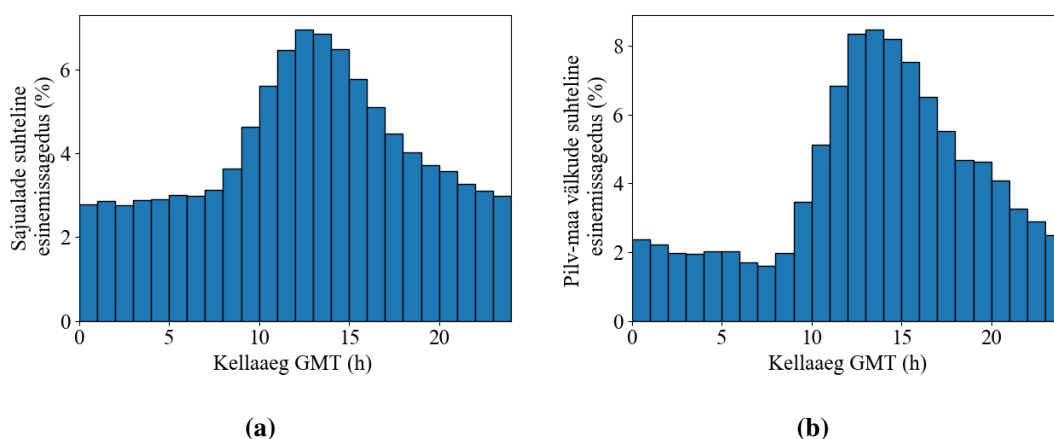
Tabel 3.1: Registreeritud välkude ja sajualade võrdlus aastate kaupa. Suhtarvud on kogu aasta sajualade kohta. Kollase taustaga on näidatud aastad, mil välgulööke ilma vastava sajualata oli üle 10 %.

aasta	lähim sajuala kese kaugemal kui 25km		lähim sajuala kese lähemal kui 25km		välgule ei leidu vastavat sajuala		välkusid kokku	
	arv	suhtarv	arv	suhtarv	arv	suhtarv	arv	suhtarv
2010	5755	7,04%	75384	92,2%	644	0,79%	81783	100%
2011	6135	9,14%	60236	89,8%	724	1,08%	67095	100%
2012	2403	6,90%	31997	91,8%	443	1,27%	34843	100%
2013	3157	5,68%	51968	93,4%	494	0,89%	55619	100%
2014	1583	3,66%	36758	84,9%	4938	11,41%	43279	100%
2015	401	3,09%	11464	88,4%	1107	8,53%	12972	100%
2016	969	3,84%	20350	80,7%	3894	15,44%	25213	100%
2018	773	2,92%	25222	95,4%	445	1,68%	26440	100%
2019	3010	6,24%	44957	93,2%	248	0,51%	48215	100%

Joonisel 3.3 toodud sajualade ja välkude aastased sagedusjaotused näitavad, et mõlema jaoks on läbi aastate muutlikkus suur ning selget seost sajualade ja välkude esinemisel ei ole. Samas ööpäevases käigus (joonis 3.4) langevad sajualade ja välkude jaotuste maksimumid samale kellaajale. Eeldades, et suur osa välkudest on konvektiivset päritolu, siis võiks algselt selekteeritud sajualade filtreerimise tulemusena graafikuni, mille kuju sarneneb välkude ööpäevase käiguga. Sellisel juhul tuleks välja arvata tsüklonaalset päritolu sajualad, mille ööpäevane jaotus on juhuslik ning nende osakaal esineb ööpäevases käigus justkui ühtlase foonina.



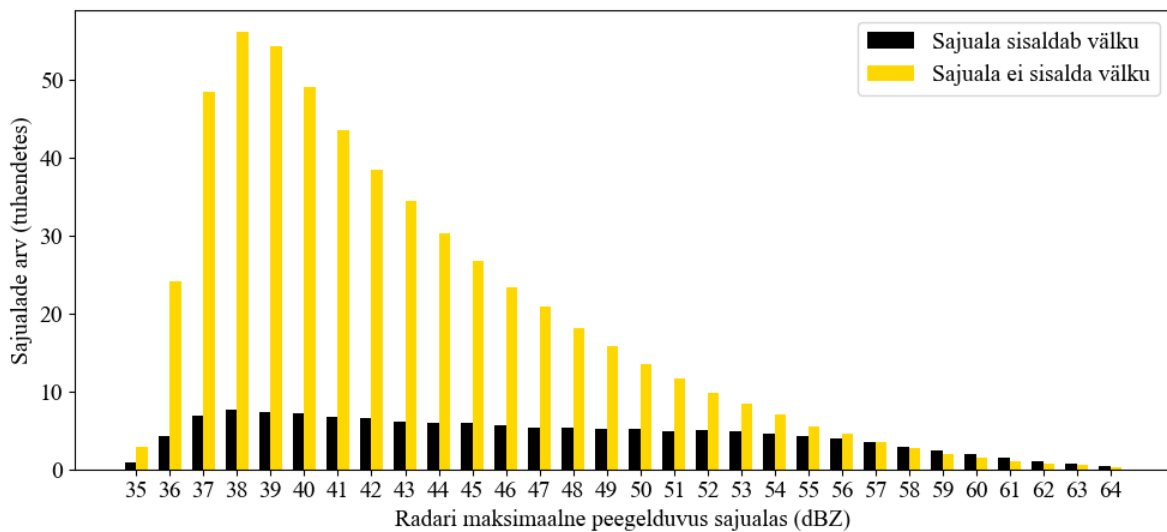
Joonis 3.3: Sajualade (a) ja pilv-maa välkude arvud (b) aastate kaupa.



Joonis 3.4: Sajualade (a) ja pilv-maa välkude (b) ööpäevased käigud. Suhtarvud on toodud eelselekteeritud sajualade koguarvu (a) ja registreeritud pilv-maa välkude koguarvu kohta (b).

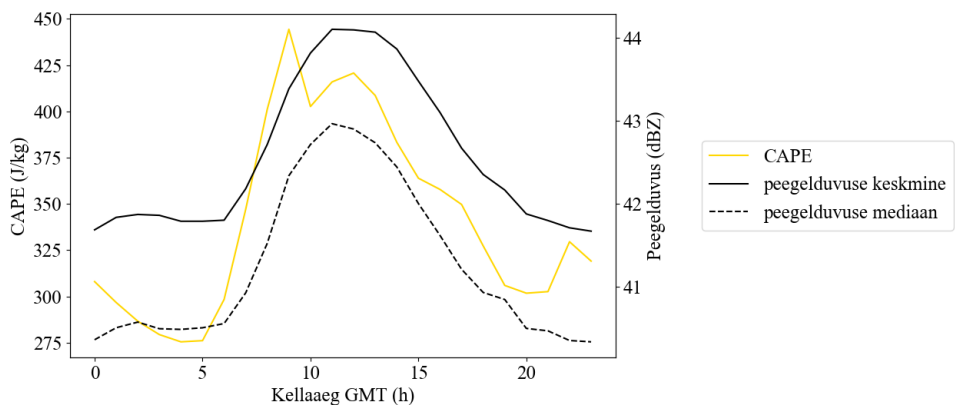
3.2 Konvektiivse tormi lävendite määramine

Selleks, et välguandmete põhjal eristada konvektiivseid tormi varem tuvastatud sajualadest, vaadeldi välku sisaldavate ja mittesisaldavate sajualade esinemissagedus sõltuvalt peegelduvusest. Kuna kõrgema peegelduvusega kui 64 dBZ esines vaid 316 sajuala, siis valiti uuritavaks peegelduvuste vahemikuks 35 dBZ - 64 dBZ. Jooniselt 3.5 on näha, et välku sisaldavate sajualade osakaal ületab ülejäänud sajualade osakaalu 57 dBZ juures (joonis 3.5) ning seda saaks kasutada ühe lävendina konvektiivsete tormide eristamiseks tsüklonaalsetest. Samas tuleb arvestada, et peegelduvuse põhjal lävendi seadmine välistab ka konvektiivse tormide tuvastamise nende algaasis, mil sademeid pole veel piisavalt tekkinud [14]. Seetõttu on igasugune peegelduvuse lävendi seadmine pigem ohtlike konvektiivsete tormide eristamine kõigist tormidest, nii tsüklonaalsetest kui lihtsalt konvektiivset päritolu sajualadest. See tähendab, et määraes CAPE alampiiri saame leida nii konvektiivsed sajualad kui ka konvektiivsed tormid, kuid kõrge peegelduvuse lävend on see, mis neid üksteisest eristab.



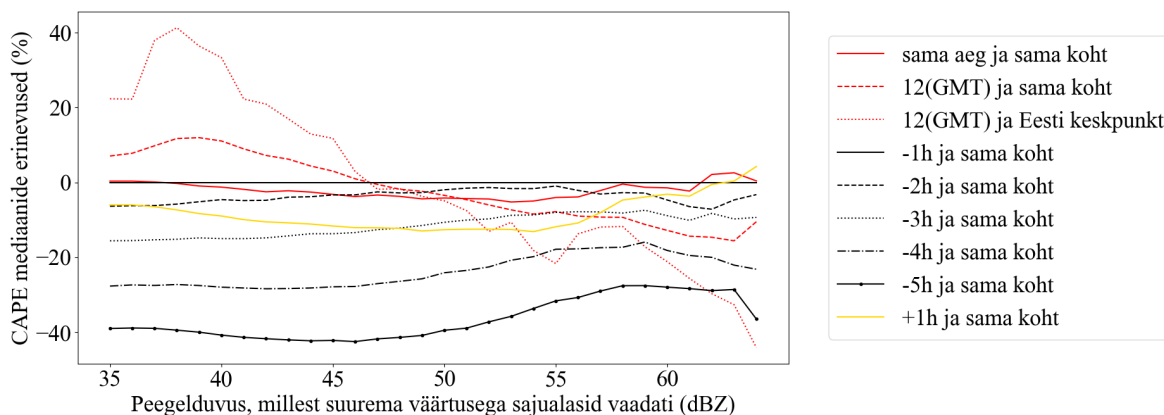
Joonis 3.5: Välku sisaldavate ja mittesisaldavate sajualade sagedusjaotus sõltuvalt radari peegelduvusest.

CAPE väärtuse põhjal peegelduvuse lävendi leidmiseks oli vaja määrata sobivaim kellaeg CAPE väärtuste valimiseks. Joonisel 3.6 on toodud CAPE ööpäevane käik. Võrdluseks toodud sajualade peegelduvuste keskmise ja mediaani sõltuvus kellaajast näitab, et tugevaimad sajualad esinevad suurema CAPE ajal. CAPE jaotuses eristuvad kaks lokaalset maksimumi kell 9 (GMT) ja kell 12 (GMT). Kuna sajualade ja välkude ööpäeva jaotuste (joonis 3.4) maksimumid on vahemikus kell 12-14 (GMT), siis tugevaima seose tuvastamiseks CAPE ja sajualade esinemise vahel leiti CAPE väärtused sajuala keskmise asukohas kuni 5 tundi varem ja 1 tund hiljem. Võrdlemiseks varasemalt läbi viidud töödega leiti ka CAPE väärtused kella 12 (GMT) jaoks nii sajuala keskmise asukohas kui ka Eesti keskpunkti jaoks (58,5°N, 25°E).



Joonis 3.6: CAPE väärtuste ööpäevase käigu võrdlus sajualade maksimaalsete peegelduvuste keskmise ja mediaani käiguga. Kõik väärtused keskmistatud üle üheksa aasta.

CAPE väärtuste võrdlemiseks kasutati jaotuste mediaani, sest Eesti aladel võis CAPE ühel kellaajal eri punktides olla kuni 5000 J/kg võrra erinev. Kõige tugevam seos sajuala tugevuse ja CAPE väärtuse vahel esineb, kui CAPE väärtus on leitud sajualale lähimast punktist, kuid tund aega varem, mis on põhjendatav sellega, et CAPE on potentsiaalne energia ning sajuala tekkimiseks on seda energiat juba kasutatud. Edaspidi on mõeldud sajualade CAPE mediaani (Me_{CAPE}) all just sellest punktist võetud väärtuste mediaani. Analüüsidest sajualadele vastavat Me_{CAPE} (joonis 3.7) leiti erinevad võimalused peegelduvuse lävendi leidmiseks lisaks eelpool toodud välkude põhjal leitud variandile (tabel 3.2). Lisatingimuseks valiti sajualade arv, mis jääks alles, kui vastavat lävendit kasutada. Meetodid 2 ja 5 välistati, sest Me_{CAPE} väärtus 186 J/kg on eelneva kirjanduse põhjal liiga madal konvektiivse tormi jaoks. Samas on nende meetoditega pakutud peegelduvuse lävend 47 dBZ sobiv konvektiivsete sajualade eristamiseks kõigist sajualadest, sest see on piir, millest alates keskpäevane CAPE väärtus on madalam, kui Me_{CAPE} . Konvektiivsete tormide jaoks on meetodite 1 ja 4 puhul sajualade arv liiga väike, arvestades seda, et CAPE järgi sajualade selekteerimist pole veel tehtud. Järele jäänud variantidest valiti meetodite 3 ja 7 põhjal konvektiivse tormi eristamiseks sajuala peegelduvuse lävend 51 dBZ.

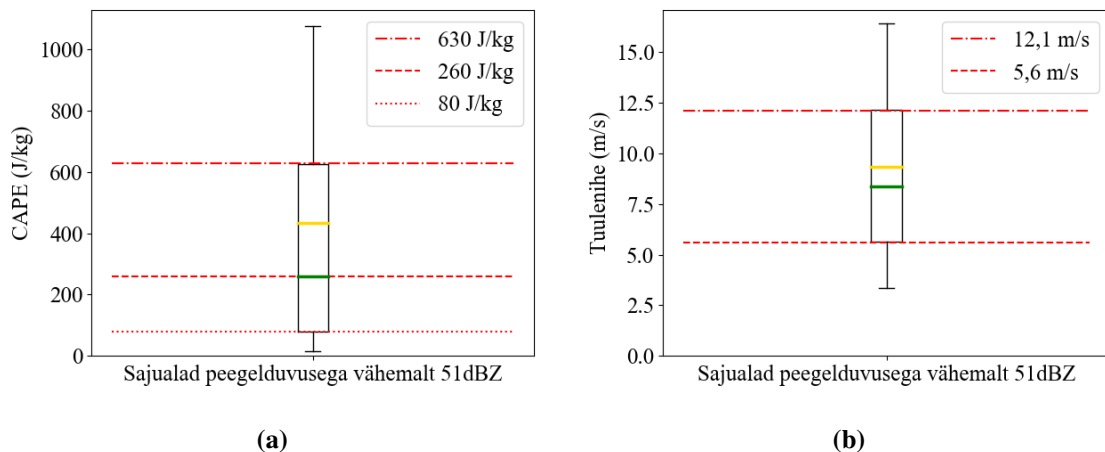


Joonis 3.7: Erinevate CAPE mediaanide sõltuvus sajuala peegelduvusest. CAPE väärtus pärineb sajualale lähimast punktist või Eesti keskpunktist. Ajaliselt varieeruvad väärtused alates 5 tundi enne sajuaja kuni 1 tund pärast või kell 12 (GMT).

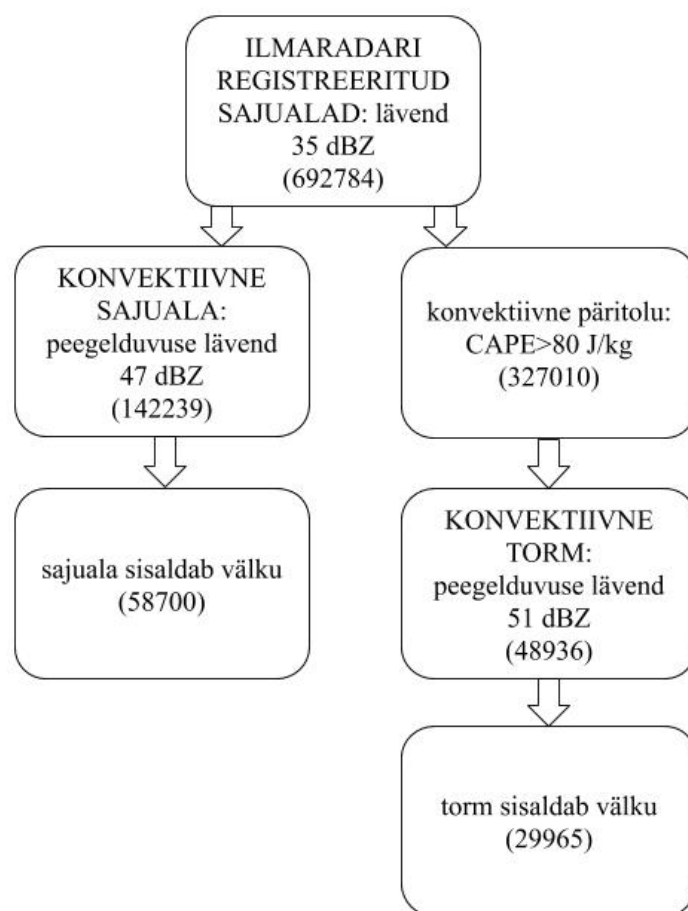
Tabel 3.2: Võimalikud meetodid peegelduvuse lävendi määramiseks, et eristada konvektiivseid torme sajualadest. Lävendid ja CAPE väärtused meetodite 2-7 jaoks pärinevad jooniselt 3.7.

nr	välgud	meetod			peegelduvuse lävend (dBZ)	Me_{CAPE} (J/kg)	sajualade arv
		CAPE valimise koht	CAPE valimise aeg	võrreldes Me_{CAPE} -ga			
1.	X				57	447	12131
2.		sajuala kese	kell 12	võrdne	47	186	142239
3.		sajuala kese	kell 12	5% madalam	51	259	65450
4.		sajuala kese	kell 12	10% madalam	58	490	8335
5.		Eesti keskpunkt	kell 12	võrdne	47	186	142239
6.		Eesti keskpunkt	kell 12	5% madalam	50	240	80643
7.		Eesti keskpunkt	kell 12	10% madalam	51	259	65450

CAPE lävendväärtuse määramiseks on joonisel 3.8 (a) toodud CAPE jaotuste karpdiagramm. Arvestades, et seni on taolistes töodes CAPE alampiirina kasutatud väärtust 100 J/kg, siis otsustati käesolevas töös võtta CAPE lävendiks jaotuse 25%-kvartiil väärtusega 80 J/kg. Ülevaade seatud lävenditest ja allesjäänud juhtumitest on toodud joonisel 3.9. See, kui paljud konvektiivsed sajualad või konvektiivsed tormid sisaldavad välke (vastavalt 41,3% ja 61,2%), näitab segelt, et ainult peegelduvuse alusel ei saa sajualadest konvektiivseid torme eristada.



Joonis 3.8: CAPE (a) ja tuulenihke(b) jaotuste karpdiagrammid sajualade kohta peegelduvusega vähemalt 51 dBZ. Diagrammidel vurrud tähistavad 10%- ja 90%-kvantiile, karbi ääred 25%- ja 75%-kvartiile, roheline on mediaan ning kollane aritmeetiline keskmine.



Joonis 3.9: Plokkskeem töös määratud lävenditest ja nende põhjal defineeritud terminitest. Sulgudes on toodud sajualade või tormide arvud.

3.3 Lävendite kontroll

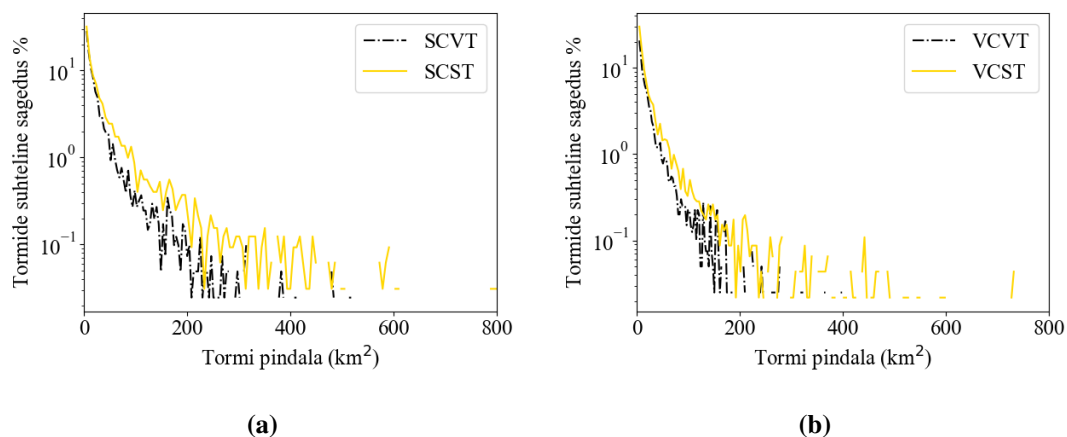
Käesolevas töös defineeritakse ilmaradarist tuvastatud sajuala konvektiivseks tormiks, kui sajuala peegelduvus on võrdne või suurem kui 51 dBZ ning CAPE väärtus sajualale lähimas punktis tund aega varem ületab 80 J/kg. Lävendite kontrolliks eraldati konvektiivsetest tormidest neli gruppi vastavalt tabelile 3.3.

Tabel 3.3: Konvektiivsetest tormidest äärejuhtumite eraldamine CAPE ja tuulenihe väärtuste põhjal. Sulgudes on toodud töös edaspidi kasutatavad lühendid.

CAPE \ tuulenihe	$\leq 260 \text{ J/kg}$	$\geq 630 \text{ J/kg}$
$\leq 5,6 \text{ m/s}$	väike CAPE, väike tuulenihe (VCVT)	suur CAPE, väike tuulenihe (SCVT)
$\geq 12,1 \text{ m/s}$	väike CAPE, suur tuulenihe (VCST)	suur CAPE, suur tuulenihe (SCST)

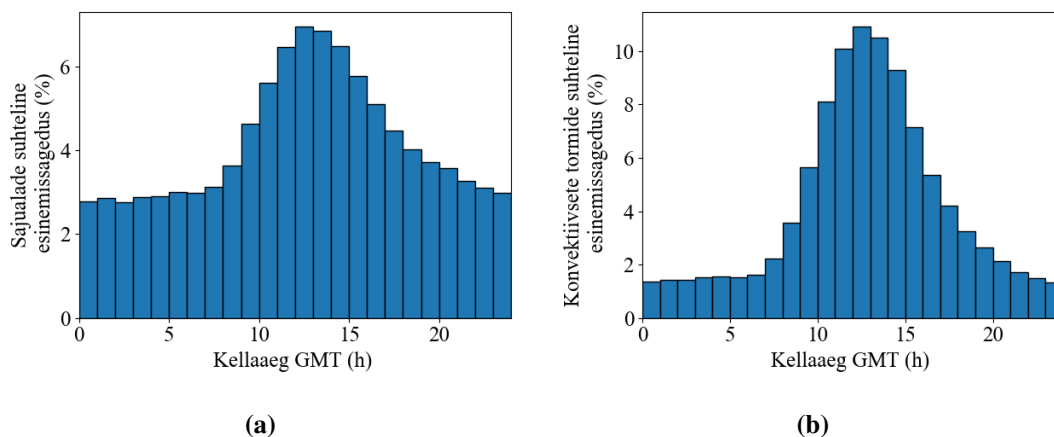
Joonisel 3.10 on toodud vastavate tormide sagedusjaotused pindala kohta. Nii suure kui ka väikese CAPEga on näha, et suure tuulenihe korral on tormi pindalad suuremad, kui väikese tuulenihe korral, mis on kooskõlas konvektiivsete tormide teoriaga. Samas on näha, et suure CAPE puhul ei ole tuulenihe roll enam nii suur, mis viitab tormide kasvamisel ikkagi tuulenihe teisejärgulisusele [12].

Võrreldes Kesk-Euroopas defineeritud väikese ja suure CAPE väärtustega (vastavalt $\leq 250 \text{ J/kg}$ ja $\geq 600 \text{ J/kg}$) on Eesti jaoks need piirid 5% suuremad [1], [12]. Tuleb arvestada, et CAPE piiride leidmiseks Kesk-Euroopa jaoks kasutati vaatlusandmeid [1] ning radarandmeid filtreeriti kõrgema lävendiga [12]. Põhjus võib olla ka selles, et CAPE väärtused valiti uuritava ala keskpunktist ja keskpäeval [12]. Olgugi et Eesti jaoks keskpäevane CAPE intensiivsemate tormide jaoks on enam kui 20% madalam võrreldes tund aega enne tormi esinemist (joonis 3.7), ei pruugi see kõikjal Euroopas nii olla.



Joonis 3.10: Konvektiivsete tormide suhteline sagedusjaotus sõltuvalt tormi pindalast. Kõrge CAPE väärtusega juhtumid (a) ja madala CAPE väärtusega juhtumid (b).

Teine kontrollmeetod on eelselekteeritud sajualade ja konvektiivsete tormide ööpäevaste käikude võrdlus (joonis 3.11). Nagu eelpool prognoositud, on konvektiivsete tormide ööpäevase käigu graafiku kuju sarnasem välkude ja ka CAPE ööpäevasele käigule ning tsükloonaalsete tormide foon on võrreldes sajualade jaotusega vähenenud.

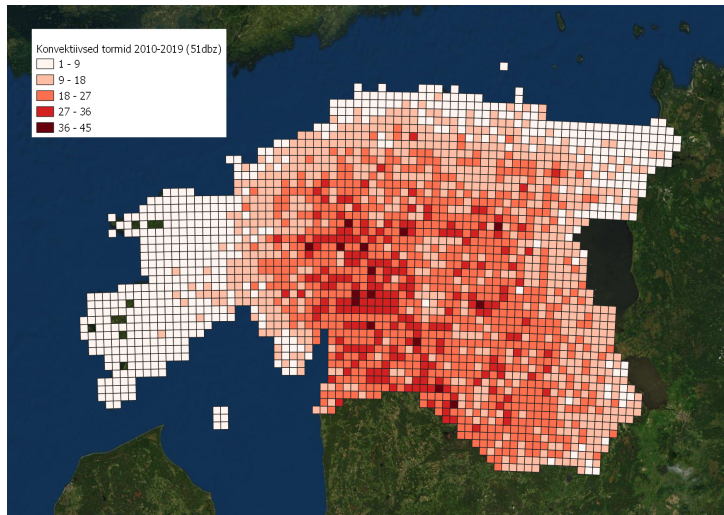


Joonis 3.11: Sajualade (a) ning konvektiivsete tormide (b) ööpäevased käigud. Suhtarvud on toodud eelselekteeritud sajualade koguarvu (a) ja tuvastatud konvektiivsete tormide koguarvu kohta (b).

3.4 Konvektiivsed tormid Eestis aastatel 2010-2019 v.a. 2017

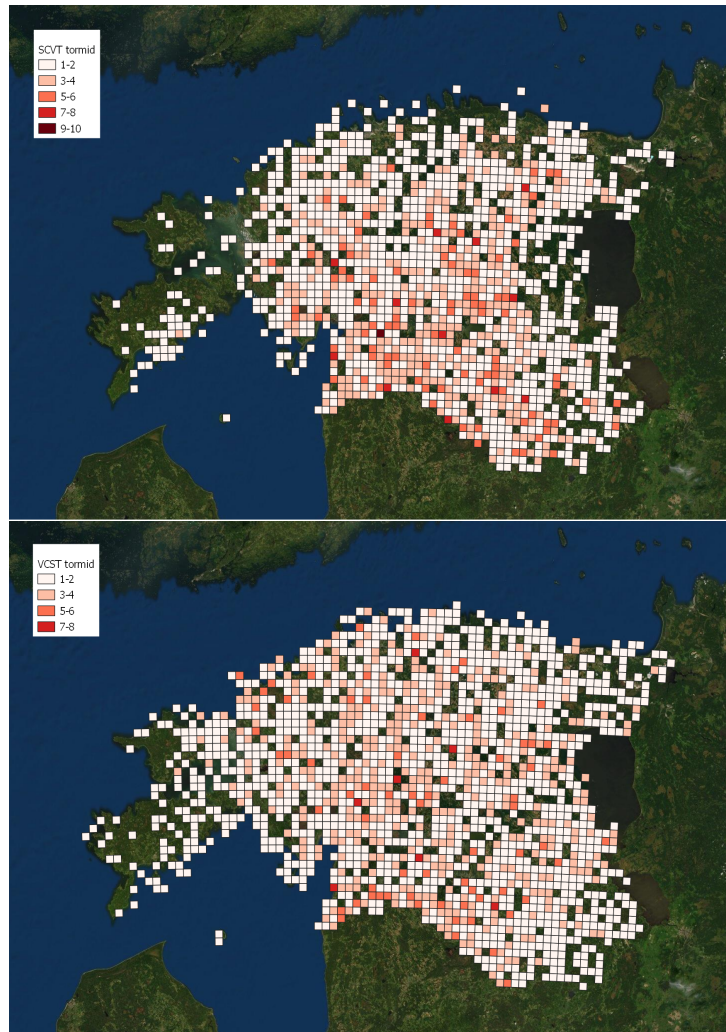
Valitud ajaperioodil esines uuritud alal 48936 konvektiivset tormi. Nendest 29965 ehk 61,2% sisaldasid vähemalt üht välku 25 km raadiuses sajualakeskmest. Konvektiivsete tormide ööpäevane sagedusjaotus (joonis 3.11) näitab, et 58% tormidest jääb kella 10 ja 16 GMT vahele (kell 13 ja 19 kohaliku aja järgi). Konvektiivsete tormide maksimum on kohaliku aja järgi kella 15 ja 16 vahel.

Konvektiivsete tormide ruumiline jaotus joonisel 3.12 näitab, et suurem osa tormidest esineb Mandri-Eesti edelaosas. See on põhjendatud, sest Baltimaade kohal domineerivad lääne- ja lõunasuunalised õhumassi liikumised, toovad sooja õhku, mis soodustab õhu segunemist piirkihis ning konvektsiooni [2].



Joonis 3.12: Konvektiivsete tormide esinemissagedus Eestis aastatel 2010-2019 (v.a 2017) Eesti põhikaardi 5 x 5 km ruudustikul.

Konvektiivsetest tormidest eraldati neli gruppi tabeli 3.3 alusel. Joonisel 3.13 on näha, et suure CAPE ja väikese tuulenihke korral on tormid valdavalt mandri kohal, mida põhjendab CAPE seotus just maapinna soojenemisega. Väikese CAPE ja suure tuulenihke korral on jaotus ühtlasem ning tormid esinevad ka rannikualadel, mida põhjustavad sealsed tugevamad tuuled. Samas tuleb arvestada, et radari lahutusvõime kaugusega kahaneb, mistõttu rannikualade, Kirde- ja Kagu-Eesti kõik sajualad pole ilmselt tuvastatud.

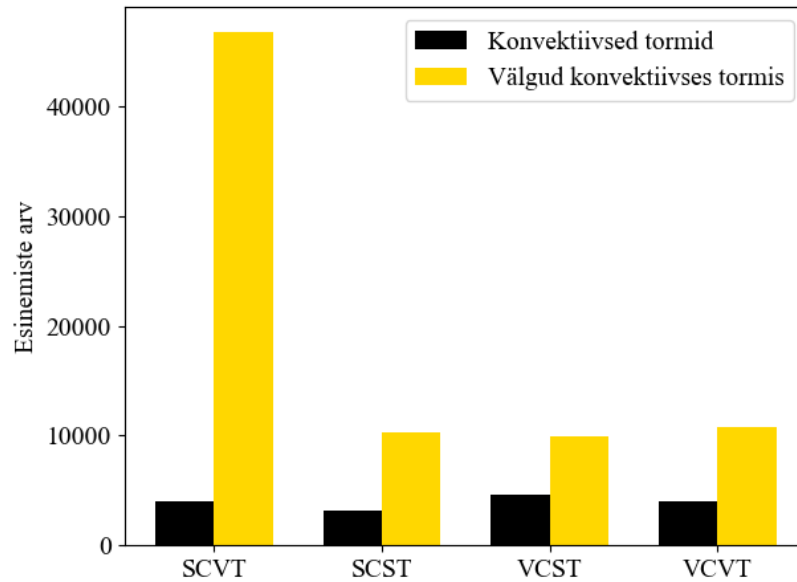


Joonis 3.13: Konvektiivsete tormide esinemissagudes Eestis aastatel 2010-2019 (v.a 2017) Eesti põhikaardi 5 x 5 km ruudustikul. SCVT konvektiivsed tormid (üleval) ja VCST konvektiivsed tormid (all).

Välkude jaotuste uurimisel tuleb arvestada, et konvektiivset päritolu välk võis esineda sajualas enne, kui torm jõudis muutuda nii intensiivseks, et ta mahuks käesolevas töös defineeritud konvektiivse tormi piiridesse. Seetõttu vaadeldakse kaht erinevat definitsiooni (joonis 3.9). Kui defineerida konvektsiooniga kaasnevaks välguks pilv-maa välk, mis esines konvektiivse tormi keskpunktist 25 km raadiuses, saab öelda, et 49,2% valitud ajaperioodil registreeritud välkudest olid konvektiivset päritolu. Kui defineerida konvektsiooniga kaasnevaks välguks pilv-maa välk, mis esines konvektiivses sajualas (peegelduvus > 47 dBZ), saab öelda, konvektiivsed olid 65,6% välkudest. Välja jäävad uuritava ala servas registreeritud välgud, mille korral sajuala kese võis asuda väljaspool uuritava ala. Samuti tuleb arvestada sellega, et uuritava ajaperioodi esimeses pooles polnud välkude detekteerimise kvaliteet Lõuna-Eestis piisav.

Joonisel 3.14 on näha, et konvektiivsete tormide jagamisel neljaks CAPE ja tuulenihke väärtuste alusel (tabel 3.3) ei eristu ükski keskkond. Samas välkude puhul on selgelt eelistatuimaks kõrge

CAPE väärtuse ning madala tuulenihkega keskkond, mis toetab teooriat, et väikese tuulenihke korral konvektiivse tormi telg ei vaju kaldu ning õhu üles- ja allavoolud takistavad üksteist ning see soosib välgude tekkimist.



Joonis 3.14: Konvektiivsete tormide ja konvektiivsetes tormides esinevate välgude esinemiste arv sõltuvalt CAPE ja tuulenihke keskkonnast. Kasutatud lühendite tähendused on toodud tabelis 3.3.

Kokkuvõte

Käesolevas töös määrati esmakordselt Eesti jaoks lävendid, mis võimaldavad ilmaradari andmetest tuvastada konvektiivseid tormi. Töö käigus leiti, et sobivaimad parameetrid konvektiivsete tormide eristamiseks tsüklonaalsetest on konvektiivne potentsiaalne energia (CAPE) ning sajuala peegelduvus. Tulenevalt Euroopa Keskpikkade Ilmaennustuste Keskuse poolt pakutavate järelanalüüsi andmete ruumilise ja ajalise sammu paranemisest uuriti põhjalikult CAPE ja ilmaradari poolt tuvastatud sajualade omavahelist seost. Selgus, et kõige tugevam seos CAPE väärtuste ja sajualade vahel on siis, kui CAPE väärtus valida sajualale kõige lähemast punktist tund aega enne sajuala registreerimist.

Konvektiivsete tormide eristamiseks tsüklonaalsetest määrati CAPE väärtuste jaotuste põhjal sobivaim sajuala peegelduvuse lävend ning samuti CAPE alampiir. Käesolevas töös defineeriti ilmaradari poolt registreeritud sajuala konvektiivseks tormiks, kui selle maksimaalne peegelduvus oli vähemalt 51 dBZ ning kui CAPE väärtus sajualale lähimas punktis tund aega varem oli vähemalt 80 J/kg. Lävendite sobivuse kontroll tuulenihke ja CAPE väärtuste põhjal näitas tuvastatud konvektiivsete tormide puhul tormi kontseptuaalse mudeli paikapidavust. Sama kinnitas ka konvektiivsete tormide ööpäevase käiguga võrdlus välgulöövide ööpäevase käiguga.

Töö käigus selgus, et võrreldes Kesk-Euroopaga on konvektiivsete tormide tuvastamise lävendid CAPE alusel erinevad vaid 5%. Kuna Eesti tormide jaoks puuduvad usaldusväärsed vaatlusandmed, siis kasutatud meetodika erineb Kesk-Euroopas kasutatud meetodikast. See tähendab, et Eesti jaoks tuli määrata lävendid konvektiivsete tormide eristamiseks kaudselt välguandmete ja atmosfääri konvektiivsuse parameetrite jaotuste põhjal. Tuleb ka arvestada, et Eesti ja Kesk-Euroopa jaoks kasutatud CAPE andmed pärinesid erinevatest järelanalüüsides.

Eesti aladel esines 2010.-2019. aastal 48936 konvektiivset tormi, millest 61,2% sisaldasid vähemalt ühte välku. Konvektiivsete tormide ruumiline jaotus näitas, et kõige suurem osa tormidest esineb Mandri-Eesti edelaosas. Konvektiivsete tormide ööpäevasest sagedusjaotusest selgus, et 58% tormidest jääb kella 15 ja 16 vahele kohaliku aja järgi. Samuti täheldati, et suurema sajuala ja pikema elueaga tormid esinevad pigem rannikualadel. Uuringust jäi välja aasta 2017, mil ilmaradari andmete kvaliteet ei olnud piisav.

Kirjandus

- [1] R. Kaltenböck, G. Diendorfer, N. Dotzek, “Evaluation of thunderstorm indices from ECMWF analyses, lightning data and severe storm reports,” *Atmospheric Research* 93, 381–396 (2009).
- [2] S.-E. Enno, P. Post, A. Briede, I. Stankunaitė, “Long-term changes in the frequency of thunder days in the Baltic countries, 1950–2004,” *Boreal Environment Research* 19, 452–466 (2014).
- [3] S.-E. Enno, “Thunderstorm and lightning climatology in the Baltic countries and in northern Europe,” doktoritöö, Tartu Ülikooli Ökoloogia ja Maateaduste Instituut, Geograafia osakond (Tartu: Tartu University Press, 2014).
- [4] L. Eiber, „Pilv-maa välgulöökide klimatoloogia ja seos tsirkulatsioonitüüpidega Eestis 2005–2013,” bakalaureusetöö, Tartu Ülikooli Ökoloogia ja Maateaduste Instituut, Geograafia osakond (2014).
- [5] V. Toll, „2010. aasta augustitormi analüüs: sirgäikesetormi dünaamika modelleerimine HARMONIE mudeliga,” magistritöö, Tartu Ülikooli Füüsika Instituut (2013).
- [6] J. M. Wallace, P. V. Hobbs, *Atmospheric Science*. (Elsevier, Canada, 2006).
- [7] The National Weather Service (NWS). Convective Parameters - Cape.
<https://www.weather.gov/fwd/convectiveparameterscape>
- [8] Haby, J. Skew-T: A look at CAPE.
<http://www.theweatherprediction.com/habyhints/305/>
- [9] R. E. Rinehart, *Radar for Meteorologists. Third Edition* (Rinehart Publications, Grand Forks, 1997).
- [10] M. I. Skolnik, “Radar,”
<https://www.britannica.com/technology/radar/Factors-affecting-radar-performance>
- [11] R. Kaltenboeck, A. Ryzhkov, “Comparison of polarimetric signatures of hail at S and C bands for different hail sizes,” *Atmospheric Research* 123, 323–336 (2013).

- [12] R. Kaltenboeck, M. Steinheimer, “Radar-based severe storm climatology for Austrian complex orography related to vertical wind shear and atmospheric instability,” *Atmospheric Research* 158-159, 216-230 (2015).
- [13] J. Kamenik, „Äikesesademete ajalis-ruumiline jaotus ja pikaajaline muutlikkus Eestis perioodil 1950-2005,” bakalaureusetöö, Tartu Ülikooli Ökoloogia ja Maateaduste Instituut, Geograafia osakond (2013).
- [14] T. Voormansik, P.J. Rossi, D. Moisseev, T. Tanilsoo, P. Post, “Thunderstorm hail and lightning detection parameters based on dual-polarization Doppler weather radar data,” *Meteorological Applications*, 24, pp. 521–530 (2017).
- [15] OpenCV package for Python. <https://pypi.org/project/opencv-python/>
- [16] J. J. Helmus, S. M. Collis, “The Python ARM Radar Toolkit (Py-ART), a library for working with weather radar data in the Python programming language,” *Journal of Open Research Software* 4 (2016).
- [17] S.-E. Enno, J. Sugier, R. Alber, M. Selzer, “Lightning flash density in Europe based on 10 years of ATDnet data,” *Atmospheric Research* 235, 104769 (2015).
- [18] Riigi Ilmateenistus. Sürgavere radar.
<http://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/radaripildid/surgavere-radar/>
- [19] European Centre for Medium-range Weather Forecast (ECMWF). Climate reanalysis.
<https://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis>
- [20] Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), 07.04.2020. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!home>
- [21] European Centre for Medium-range Weather Forecast (ECMWF). ERA5: data documentation.
<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation>
- [22] European Centre for Medium-range Weather Forecast (ECMWF). The ERA-Interim archive Version 2.0. <https://www.ecmwf.int/node/8174>
- [23] European Centre for Medium-range Weather Forecast (ECMWF) (2011): The ERA-Interim reanalysis dataset, Copernicus Climate Change Service (C3S) (accessed <08.05.2020>), available from <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/archive-datasets/reanalysis-datasets/era-interim>

- [24] National Aeronautics and Space Administration. Goddard Institute for Space studies. Panoply netCDF, HDF and GRIB Data Viewer. <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>
- [25] T. E. Oliphant. *A guide to NumPy* (USA: Trelgol Publishing, 2006).
- [26] W. McKinney, “Data Structures for Statistical Computing in Python,” in *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, pp. 51-56 (2010).
- [27] J. D. Hunter, “Matplotlib: A 2D Graphics Environment,” *Computing in Science & Engineering*, 9, 90-95 (2007).
- [28] UCAR Community Programs: Unidata. Network Common Data Form (NetCDF). <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>
- [29] QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.org>
- [30] Maa-amet: Geoportaal. Eesti topograafilise kaardi ruudustik 1:10000. <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Kaardilehtede-susteemid/Kaardiruudustikud-allalaadimiseks-p488.html>

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Tuule Mürsepp,

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

Konvektiivsete tormide tuvastamine Eestis ilmaradari andmetest,

mille juhendajad on PhD Piia Post ja MSc Tanel Voormansik, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. olen teadlik, et punktis 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tuule Mürsepp,

Tartu, 29. mai 2020. a.