



JÄÄTUVA VIHMA JA TEISTE JAHEDA PERIOODI SADEMETÜÜPIDE PROGNOOSIMISE
GRAAFILISTE MEETODITE KASUTATAVUSE HINDAMINE EESTI TINGIMUSTES

Bakalaureusetöö

Üliõpilane: Katriin Käärik

Üliõpilaskood: 206816YAFB

Juhendaja: Aarne Männik, Meresüsteemide Instituut, kaasprofessor teneuris, osakonnajuhataja

Õppekava: YAFB02/20 - Rakendusfüüsika

Tallinn 2023

Autorideklaratsioon

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

Autor: Katriin Käärik

22.05.2023

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Juhendaja: Arne Männik

22.05.2023

Töö on lubatud kaitsmisele.

Kaitsmiskomisjoni esimees: [nimi]

[allkiri ja kuupäev]

Sisukord

Sissejuhatus.....	6
1. Sademete tüübid Eestis	8
1.1 Erinevad sademete tüübid	8
1.2 Jäätuv vihm ja - uduvihm.....	10
2. Meetodid sademete tüübi prognoosimiseks.....	12
2.1 Numbrilised ilmaennustusmudelid	12
2.2 Geopotentsiaalsete paksuste ehk TREND meetod	13
2.3 850hPa meetod: sademetüübi sõltuvus isobaarpinna temperatuurist ja geopotentsiaalsest kõrgusest	15
3. Andmed	17
3.1 Raadiosondeerimine Eestis	17
3.2 ERA5	18
4. Analüüs ja tulemused	19
4.1 Geopotentsiaalsete paksuste ehk TREND meetod	19
4.2 850hPa meetod: sademetüübi sõltuvus isobaarpinna temperatuurist ja geopotentsiaalsest kõrgusest	24
5. Juhtumianalüüs: jäätuv vihm Eestis 21.-23.02.2021	30
5.1 Ülevaade ilmast.....	30
5.2 Sünoptiline olukord	30
5.3 Atmosfääri vertikaalse temperatuuriprofiili areng.....	32
5.4 Graafiliste meetodite rakendamine.....	34
Kokkuvõte.....	37
Tänuavaldused.....	38
Kasutatud kirjandus.....	39

Annotatsioon

Antud töös on uuritud kahe graafilise meetodi rakendatavust külmal perioodil sademetüübi prognoosimiseks Eesti tingimustes raadiosondi andmete põhjal, analüüsides Tallinn-Harku aeroloogiajaama 2003.-2022. aasta oktoobri- kuni aprillikuu andmeid. Sademete tüüpidest on vaadeldud vihma, lund, vihma koos lumega, jääkruupe ja jäätuvat vihma. Meetodite tuletamiseks Eesti tingimustes ning nende rakendatavuse hindamiseks on arvatud nähtuste esinemise statistilised karakteristikud ning koostatud hajuvusdiagrammid ja soojusgraafikud. Lisaks on läbi viidud juhtumiuuring, millele on rakendatud uuritud graafilisi meetodeid.

Esimeseks uuritavaks meetodiks on TREND meetod, mis määrab sademete tüübi maapinna lähedaste 700-850hPa ja 850-1000hPa õhukihtide geopotentsiaalsete paksuste põhjal. Eesti andmetel tuletatud graafik erineb oluliselt algsest Põhja-Carolinas, USAs, koostatud graafikust. Saadud graafik suudab üldistatult näidata sademete tüüpidele iseloomulikke esinemispiirkondasid, kuid ei ole võrreldav mudelprognoosiga.

Teiseks uuritavaks meetodiks on 850hPa isobaarpinna geopotentsiaalse kõrguse ja temperatuuri meetod, mille graafik pärineb Keskkonnaagentuurist. Töö näitab, et nimetatud parameetrite, põhiliselt 850hPa isobaarpinna temperatuuri, põhjal saab ligikaudselt määrata sademete tüüpe (v.a. jäätuvat vihma), kuid sademete tüüpidele iseloomulikud piirkonnad ei ühti algse graafikuga.

Juhtumiuuringus on vaadeldud sündmuseid perioodil 21.-23.02.21, mil Eestis sadas ulatuslikult jäätuvat vihma. Käsitletud on atmosfääri vertikaalset profiili ja sünoptilist olukorda. Analüüs näitab, et jäätuv vihm tekkis klassikaliselt sooja nina tõttu, mille olemasolu tagas külm front. Graafilistest meetoditest näitas TREND meetod jäätuva vihma edukat prognoosimisvõimet 21. veebruaril.

Võtmesõnad: meteoroloogia, raadiosond, sademetüüp, geopotentsiaalne paksus, jäätuv vihm

Abstract

In the following paper the validity of two graphical methods used to forecast precipitation types during the cold period are assessed in Estonian conditions by analysing radiosonde data from Tallinn-Harku weather station from the period 2003-2022 during the months October till April. The following precipitation types are explored: rain, snow, rain with snow, ice pellets and freezing rain. To derive these methods for Estonian conditions and assess their validity, statistical characteristics for the occurrences of precipitation types are calculated and scatterplots and heat maps created. In addition, a case study is made, to which the mentioned methods are applied.

The first studied method is the TREND method, which determines precipitation types using the geopotential thicknesses of low-level atmospheric layers 700-850hPa and 850-1000hPa. The graph derived from Estonian data differs significantly from the original graph made in North Carolina, USA. The resulting graph can generally define the characteristic occurrence areas of precipitation types but is not comparable with numerical weather prediction models.

The second studied method is the 850hPa method, which depends on the geopotential height and temperature of the 850hPa isobaric surface and originates from Estonian Environment Agency. It is shown that mentioned parameters, especially temperature, can approximately define precipitation types (except freezing rain), but the characteristic occurrence areas do not match with the original graph.

The case study focuses on the events of 21-23 February 2021, when there was extensive freezing rain in Estonia. The vertical profiles of the atmosphere and synoptic situation are investigated. The analysis shows that freezing rain developed due to the existence of a warm nose, which was caused by a cold front. From the graphical methods, TREND was capable of successfully forecasting freezing rain for February 21.

Key words: meteorology, radiosonde, precipitation type, geopotential thickness, freezing rain

Sissejuhatus

Sademetüübi määramine ja ohtlike ilmastikunähtuste prognoosimine on osa igapäevastest ilmaennustustest. Sademeid on mitmesuguseid, kõige tavalisemad neist lumi, lörts ja vihm, mis mõõduka intensiivsuse ja tuule puhul enamasti ilmastikuolusid ei raskenda. Talvisel hooajal valmistavad aga nii liiklusele kui ka inimestele muret lume ladestus, piiratud nähtavus tuisu tõttu, objektide jäätumine ja teede libedus.

Libeduse ja jäite tekke saab jaotada järgnevalt: (1) sajuta olukord, kus õhutemperatuur langeb alla 0°C ning maapind külmub ja (2) sademete olemasolul olukord, kus õhutemperatuur maapinna lähedases kihis tingib veepiiskade allajahtumise ja kokkupuutel maapinnaga, mille temperatuur on alla 0°C, külmumise. Viimasena kirjeldatud olukorda nimetatakse jäätuvaks vihmaks või uduvihmaks. Tegemist on küllaltki mittesagedase nähtusega, mis enda harvast esinemisest hoolimata siiski palju kahju tekitab. Lisaks infrastruktuuri kahjudele, mis tekkivad jäitekihi ladestuse tõttu, raskendavad libedad tänavad liiklustingimusi jalakäijatele ja autoomanikele. Näiteks suurenes 2021. aasta eriliselt jäisel veebruaril liiklusõnnetuste arv eelneva aasta sama kuuga võrreldes 73% (Saarniit, 2021). Artiklis räägiti ka lähemalt 23. veebruarist, mil jäätuva vihma ulatus oli suurim ning aset leidis 350 liikluskindlustusjuhtumit, mille kogukahju ulatus ligikaudu poole miljoni euronit. Lisaks autoõnnetustele esines ka palju kukkumistraumasid ja Ida-Tallinna keskhaigla erakorralise meditsiini osakonna koormus neljakordistus.

Üks näide infrastruktuurist, mida isegi väikseim kogus jäätuvat vihma mõjutab, on tuuleturbiinid, sest isegi kerge jääkate tiivikulabadel põhjustab pinnakaredust, mis vähendab oluliselt nende aerodünaamilist tõhusust (Wallenius, Lehtomaki, 2015). Kui jäätumine on sage, võib kogu tuulepargi aastane tootlikus väheneda rohkem kui 20% võrra, mis omakorda vähendab elektri müümiselt saadavat tulu. Ohtlikemaks jääliigiks turbiinide puhul on jäide, mis on iseloomulik nullilähedastele temperatuuridele ja niiskele õhumassile (Gao, Liu, Zhou, Hu, 2019). Kuna pinnakaredus kujuneb sellisel juhul eriti suureks, on ka saadud elektrikogus ja tulu väikseimad.

Eesti ilmaprognoos, mis kirjeldab muuhulgas ka oodatavat sademete tüüpi ja intensiivsust, põhineb valdavalt ECMWF ja Soome, Rootsi ning Norra koostööl arendatud MetCoOp mudelitel. Keskkonnaagentuuris kasutusel olevad mudelite väljundid eristavad üksteisest lund, vihma, lörtsi ja jäävihma, jäätuvale vihmale väljundit pole. Jäätuv vihm on aga üks keerulisemaid meteoroloogilisi nähtuseid, mida prognoosida, sest isegi väikseim variatsioon temperatuuris võib eristada jäätuvat vihma näiteks lumest või lörtsist.

Antud töös testitakse kahe mitmel pool tuleva sademetüübi määramiseks kasutatud leidnud meetodi rakendatavust Eestis. Kuigi sademete tüüp on määratav toetudes vaid mudeliandmetele, on asjakohane võrrelda mudeliväljundeid üldisemate reeglite või lihtsustatud meetoditega. Tihti esineb olukordasid, kus ECMWF ja MetCoOp prognoosivad erinevaid sademete tüüpe ning sünoptik peab kummagi kasuks otsuse tegema. Sellisel juhul tuleb kasuks mudelivälise meetodika olemasolu ja kasutus. Tasub arvestada ka olukorraga, kus mudeliandmete kättesaadavus on häiritud, näiteks sõjaolukorras, millisel juhul peab prognoosi koostamiseks rakendama mudeliväliseid meetodeid.

Lisaks on lähemalt uuritud 2021. aasta veebruari lõpus Eestis olnud ekstreemset jäätuva vihma juhtumit, et saada parem ettekujutus nähtuse tekkepõhjustest ja et testida vaadeldud meetodite rakendatavust olukorrale. Joonisel 1 on näidatud ohtlikku olukorda Tallinna tänavatel 23. veebruaril.



Joonis 1: Kiilasjääd Tallinna tänavatel 23.02.2023 (Õunapuu, 2021).

Töö eesmärk on uurida erinevate meetodite kasutatavust Eestis tuleva ööpäeva sademete tüübi määramiseks kuudel oktoober kuni aprill, põhirõhuga jäätuva vihma prognoosimisel. Meetoditest on vaatluse all maapinnalähedaste õhukihtide (850-1000hPa ja 700-850hPa) geopotentsiaalsete paksuste ehk TREND meetod ning 850hPa meetod, mis põhineb isobaarpinna geopotentsiaalsel kõrgusel ja temperatuuril. Lähemalt on käsitletud jäätuva vihma olukorda Eestis 21.-23. veebruaril 2021. aastal.

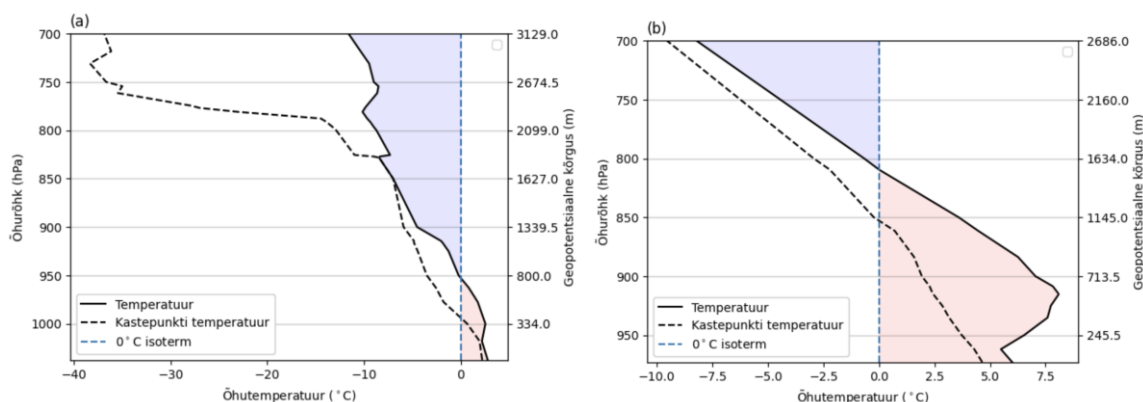
1. Sademete tüübid Eestis

Kuigi Eestis on sademeterohkeimaks aastaajaks suvi, on talvine hooaeg sademete tüüpide poolest oluliselt mitmekesisem. Üldiselt saab sademeid defineerida kui atmosfääris tekkinud kondensatsiooni ja sadestumise produkte, mis võivad olla vedelas, tahkes või vedela ja tahke faaside kombineeritud olekus ning mis langevad gravitatsioonijõu mõjul (AMS, 2021a). Antud töös on lisaks jäätuvale vihmale ja uduvihmale vaadeldud ka järgneva sademete tüüpe: hooglumi, lumi, hoogvihm, uduvihm, teralumi, vihm, jäävihm, jääkrubid, lumelörts ja vihm koos lumega. Nähtuste valik on tingitud ilmasensori poolt registreeritud nähtustest. Antud peatükis on pikemalt lahti seletatud erinevad sademete tüübid, nende tekkepõhjused ja neile iseloomulikud atmosfääriseisundid.

1.1 Erinevad sademete tüübid

Uduvihmaks nimetatakse sademeid, mis koosnevad veepiisakestest, mille diameeter on väiksem kui 0.5mm. Uduvihm langeb tavapäraselt madalatest kihtpilvedest ning tihti kaasneb sellega vähenenud nähtavus (AMS, 2023). *Vihmaks* nimetatakse vedelaid sademeid, mis on eristatavad uduvihmast suuruse põhjal: nende diameeter on suurem kui 0.5mm (AMS, 2012a). *Hoogvihma* iseloomustab sademete äkiline algus ja lõpp, samuti kiired muutused intensiivsuses ning reeglina sajab seda konvektiivsetest pilvedest (AMS, 2012b).

Faasi alusel saab uduvihma, vihma ja hoovihma liigitada ühisesse kategooriasse. Sellest tulenevalt on andmete töötlusel ja jooniste koostamisel kirjeldatud sademed üheselt grupeeritud kui „vihm“. Nagu eelnevalt mainitud on vihm vedelas olekus, mis tähendab, et langedes maapinnale peab see läbima piisavalt sooja õhukihi, et kas täielikult sulada (juhul kui õhutemperatuur on ülemistes õhukihtides varasemalt põhjustanud jäätumise) või et jääda vedelasse olekusse. Joonisel 2 on näidatud õhutemperatuuri ja kastepunkti käik atmosfääri vertikaalses läbilõikes päeval, kus on sadanud vihma. Andmed pärinevad Tallinn-Harku aeroloogiajaama raadiosondilt. Näitena on vasakpoolisel joonisel kasutatud raadiosondi andmeid kuupäevast 19.03.2022, parempoolisel 8.04.2022, kus mõlemal juhul sadas Tallinnas (ja ka mitmel pool mujal Eestis) vihma.

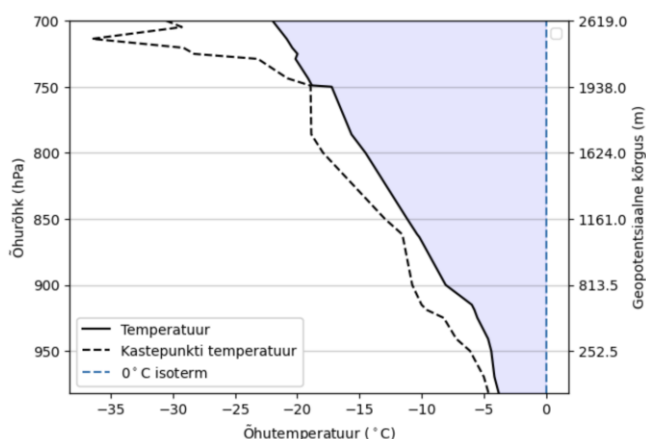


Joonis 2: Temperatuuri ja kastepunkti käik atmosfääri vertikaalses profiillis vihma sadanud päeval a) 19.03.22, b) 8.04.22. Sinise ja punase värviga on tähistatud õhumassi temperatuurid vastavalt alla ja üle 0°C.

Joonistelt on näha, et mõlemal juhul on ülemistes õhukihtides külm õhumass, mis on külmale aastaajale iseloomulik, ning et õhutemperatuur on maapinna lähedases õhukihis olnud üle 0°C. Joonised 2.a ja 2.b erinevad üksteisest sooja õhukihi paksuse poolest: 2.a puhul on soe õhukiht ulatunud vaid 950hPa kõrgusele, 2.b puhul aga 850hPa-ni. Mõlemal juhul on aga sadanud vihma, mis viitab muude parameetrite mõjudele.

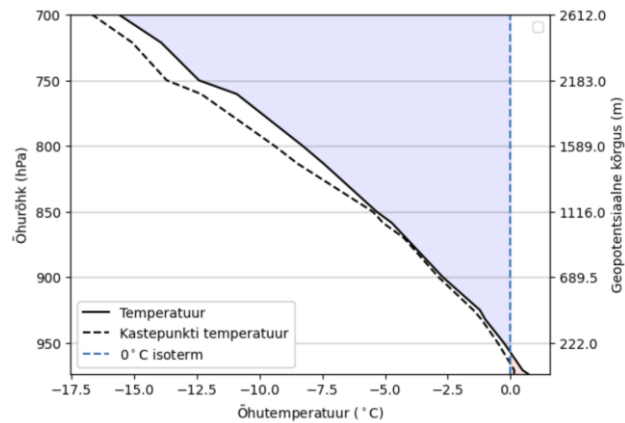
Lumeks nimetatakse valgeid või poolläbipaistvaid jääkristalle, millel on kindel kuju ja mis on tavaliselt ühinenud lumehelvesteks (AMS, 2013). *Hooglumi* on lume erijuht, mida iseloomustab lühike sajuperiood ja võimalik intensiivsuse muut (AMS, 2012c). *Lumekruubid* koosnevad valgetest, valdavalt ümmargustest jäätunud osakestest, mille struktuur on sarnane lumega. Lumekruupide diameeter jääb 2-5mm vahemikku (AMS, 2016a). *Teralumi* erineb lumekruupidest enda lapiku ja piklikuma kuju ning väiksema (<1mm) suuruse poolest (AMS, 2012d).

Lumi, hooglumi, lumekruubid ja teralumi on tahked sademed, mille faas püsib valdavalt muutumatuna nende trajektoorigil pilvedest maapinnani. Selle omaduse alusel on nähtused andmete töötlusel ja jooniste koostamisel ühiselt grupeeritud kui „lumi“. Joonis 3 illustreerib temperatuuri ja kastepunkti käiku atmosfääri vertikaalses profiilis lund sadanud päeval, näitena on kasutatud radiosondi andmeid kuupäevast 06.04.2022.



Joonis 3: Temperatuuri ja kastepunkti käik atmosfääri vertikaalses profiilis lund sadanud päeval 06.04.2022. Sinise ja punase värviga on tähistatud õhumassi temperatuurid vastavalt alla ja üle 0°C.

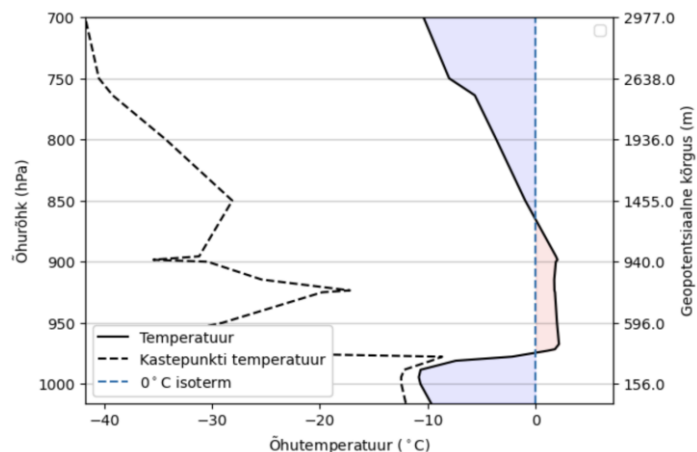
Lörtsiks nimetatakse vihma ja märja lume segusademeid (AMS, 2012e), mida ilmasensor registreerib kui „vihm koos lumega“. Vihm koos lumega esineb, kui maapinna lähedases atmosfäärikihis on temperatuur 0°C ligidane nagu on illustreeritud joonisel 4, mis põhineb 05.04.2022 andmetel.



Joonis 4: Temperatuuri ja kastepunkti käik atmosfääri vertikaalses profiilis kuupäeval 05.04.2022. Sinise ja punase värviga on tähistatud õhumassi temperatuurid vastavalt alla ja üle 0°C.

Jääkruupideks nimetatakse sademeid, mis koosnevad läbipaistvatest või poolläbipaistvatest jääteradest, mille diameeter on väiksem kui 5mm (AMS, 2016b). *Jäävihm* erineb jääkruupidest suuruse poolest: jäävihma terade diameeter jääb vahemikku 1-3mm, mis on väiksem kui jääkruupidel (Sõnaveeb, 2021a).

Jäävihm ja -kruubid tekivad, kui lumi läbib enne maapinnani jõudmist külmumistemperatuurist kõrgema õhutemperatuuriga atmosfäärikihi, kuid külmub uuesti külma maapinnalähedase kihi läbimisel. Algne külmunud olek pole teooria kohaselt vajalik, kuid on talvisele perioodile iseloomulik ning eelduse kohaselt peavad sademed olema eelnevalt piisavalt allajahtunud, et need maapinna lähedases kihis külmuksid. Joonisel 5 on näidatud temperatuuri ja kastepunkti käiku atmosfääri vertikaalses ristlõikes päeval, kus on sadanud jäävihma. Näitena on kasutatud andmeid kuupäevast 10.12.2021.



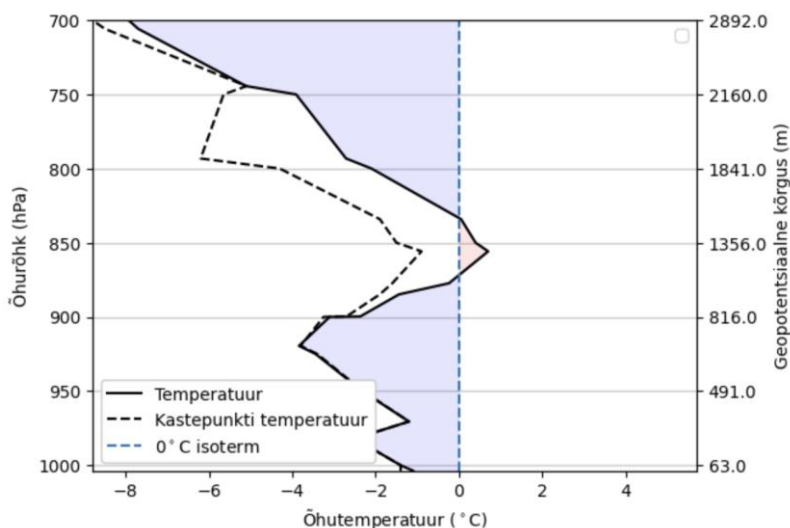
Joonis 5: Temperatuuri ja kastepunkti käik atmosfääri vertikaalses profiilis jäävihma sadanud päeval 10.12.2021. Sinise ja punase värviga on tähistatud õhumassi temperatuurid vastavalt alla ja üle 0°C.

1.2 Jäätuv vihm ja - uduvihm

Jäätuv vihm on nähtus, kus vedelal kujul langevad piisakesed külmuvad kokkupuutel pinnaga ning moodustavad sellele jääkihi. Objektide ja maapinna lähedane õhutemperatuur peab nähtuse

tekkeks olema alla 0°C või selle lähedane ning veepiisakesed jahutatud allapoole faasisiirde temperatuuri (AMS, 2021b). *Jäätuv uduvihm* on jäätuva vihma erijuht, kus allajahtunud sademete puhul on tegemist uduvihmaga (AMS, 2021c). Jääkihti, mis tekib jäätuva vihma ja uduvihma tulemusena pindadele, nimetatakse *jäiteks* (AMS, 2012f). *Kiilasjääd* on jäite liigiks, mis esineb vaid maapinnal (Sõnaveeb, 2021b).

Joonisel 6 on näidatud temperatuuri ja kastepunkti käiku atmosfääri vertikaalses lõikes kuupäeval 27.11.2019, mil Tallinnas sadas jäätuvat vihma. Sarnaselt jäävihma profiilile on näha kahe külma õhukihi vahel kõrgema õhutemperatuuriga kihti. Nähtused erinevad üksteisest selle poolest, et jäävihm ja -kruubid külmuvad enne maapinnani jõudmist kas osaliselt või täielikult, jäätuv vihm jääb aga vedelasse allajahtunud olekusse ning külmub alles kokkupuutel maapinnaga. Võrreldes omavahel jooniseid 5 ja 6, on näha, et joonisel 5 toimub maapinnalähedases kihis kiire õhutemperatuuri langus kuni -10°C-ni ning et selle kohal olev soojem õhukiht on paksem. Joonisel 6 on õhutemperatuuri langus maapinna lähedal väiksem, kuid soe õhukiht selle kohal on oluliselt õhem. Saab järeldada, et õhukihtide temperatuuri profiilide põhjal on võimalik jäävihma ja -kruupe jäätuvast vihmast eristatada.



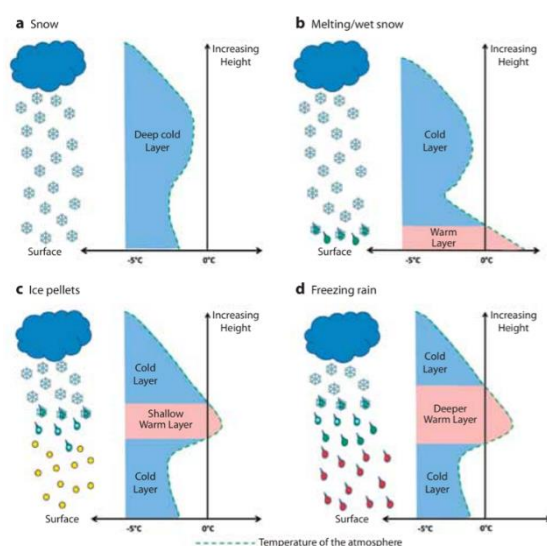
Joonis 6: Temperatuuri ja kastepunkti käik atmosfääri vertikaalses profiillis jäätuvat vihma sadanud päeval 27.11.2019. Sinise ja punase värviga on tähistatud õhumassi temperatuurid vastavalt alla ja üle 0°C.

Tihti aetakse uudiskirjade kajastuses omavahel segamini või kasutatakse vaheldumisi väljendeid jäävihm ja jäätuv vihm. Sademete tüübid on küll nimelt sarnased, kuid omadustelt siiski erinevad. Enamasti saab lähema kirjelduse põhjal selgeks teha kummaga on tegu, näiteks, kui artiklis räägitakse maapinna libedusest, on reeglina juttu jäätuvast vihmast.

2. Meetodid sademete tüübi prognoosimiseks

2.1 Numbrilised ilmaennustusmudelid

Esmane sademete tüüpide prognoosimine toimub rahvusvaheliselt numbriliste ilmaennustusmudelite põhjal. Mudelid kaasavad arvutustesse suurema hulga parameetreid, kui lihtsamad meetodid suudaksid kirjeldada, mille tõttu on mudelitel parem ennustusvõime. Eestis sademetüübi prognoosimiseks oluline ECMWF mudel arvestab enda töös järgmisi parameetreid: pilvisene sademete faas, atmosfääri temperatuuri ja niiskuse profiilid, advektsioon, faasisiirded ja piiskade/osakeste lõppkiirused (Forbes, Tompkins, 2011). Nendest parameetritest tulenevalt eristab ECMWF mudel maapinnale jõudvat vihma, vihma ja lume segu, (märga ja kuiva) lund, jäätuvat vihma ja jääkruupe (Owens, Hewson, 2018). Alloleval joonisel on toodud mudelis kasutusel olevad temperatuuri profiilid, mis omavad sarnasusi eelmises peatükis Eesti näitel toodud sademete tüüpide profiilidega.



Joonis 7: ECMWF atmosfääri vertikaalne temperatuuri profiil määramaks sademete tüüpi: (a) lund, (b) sulalund, (c) jääkruupe ja (d) jäätuvat vihma (Owens, Hewson, 2018).

Kuigi ilmaennustusmudelid on esimeseks valikuks prognooside tegemisel, peab valmis olema olukorraks, kus mudelitele toetuda ei saa, näiteks kui on probleeme kohaliku internetiühendusega või on häiritud ECMWF-i enda töö ja seetõttu ka mudelandmete väljastus. Lisaks mudelandmete puudumisele võib ette tulla olukordi, kus mudelite väljundid erinevad üksteisest piisavalt, et on vaja olukorra kirjeldamiseks lisainformatsiooni väljaspoolt mudeleid. Seetõttu on kasulik teada meetodeid, mille kasutus oleks võimalikult lihtne ning mis vajaksid enda rakendamiseks selliseid parameetreid, millele on võimalik ligi pääseda ka siis, kui mudelandmetele ligi ei pääse. Antud töös on lähemalt vaadeldud geopotentsiaalsete paksuste ehk TREND meetodit ja 850hPa meetodit, mis vajavad rakendamiseks raadiosondeerimise andmeid.

2.2 Geopotentsiaalsete paksuste ehk TREND meetod

Geopotentsiaalsete paksuste meetod määrab maapinnani jõudvate sademete tüübi, tuginedes kahe üksteise peal oleva õhukihi geopotentsiaalsetele paksustele. Järgnevas alapeatükis on lähemalt selgitatud geopotentsiaali mõistet ja õhukihtide valikut.

Atmosfääriteadustes kasutatakse sagedasti vertikaalse kõrguse hindamisel geopotentsiaalset kõrgust. Geopotentsiaalse kõrguse rakendamine annab nii kohalikes kui ka rahvusvahelistes arvutustes eelise, sest arvestab õhukogumile mõjuva gravitatsioonijõu erinevusega sõltuvalt laiuskraadist ja kõrgusest merepinnalt.

Geopotentsiaaliks nimetatakse ühikmassi potentsiaalset energiat antud kõrgusel keskmise merepinna taseme suhtes. Füüsikaline suurus iseloomustab töö hulka, mis kulub keha tõstmiseks keskmiselt merepinnalt antud kõrgusele ja avaldub valemiga

$$\phi(z) = \int_0^z g \, dz,$$

kus ϕ ($J \cdot kg^{-1}$) on geopotentsiaal, z (m) vertikaalne kõrgus ja g ($m \cdot s^{-2}$) raskuskiirendus, mis on funktsioon sõltuvusega laiuskraadist ja kõrgusest merepinnalt (AMS, 2017).

Geopotentsiaalne kõrgus on punkti kõrgus atmosfääris, mis on võrdeline keha geopotentsiaaliga antud kõrgusel keskmisest merepinnast (AMS, 2018). Vertikaalne ja geopotentsiaalne kõrgus on omavahel seotud järgneva võrrandiga

$$Z = \frac{1}{g_0} \int_0^z g \, dz,$$

kus Z (m) on geopotentsiaalne kõrgus ja $g_0 = 9.80665 \, m \cdot s^{-2}$ üldistatud raskuskiirendus maapinnal. Ligikaudselt saab ühe geopotentsiaalse meetri võrdsustada 0.98 meetriga (AMS, 2018). Sellest järeldub, et maapinna lähedases kihis on suurused umbkaudselt samaväärsed, kuid kõrgemate atmosfääri kihtide käsitlusel suuruste erinevus akumulereub ja vertikaalse kõrguse kasutus muudab arvutused vähem täpseks.

Hüpsomeetiline võrrand seob omavahel õhukihi virtuaalse temperatuuri ja geopotentsiaalse paksuse. See on kombineeritud ideaalse gaasi seadusest ja hüdrosstaatilise tasakaalu võrrandist ning on esitatud kujul:

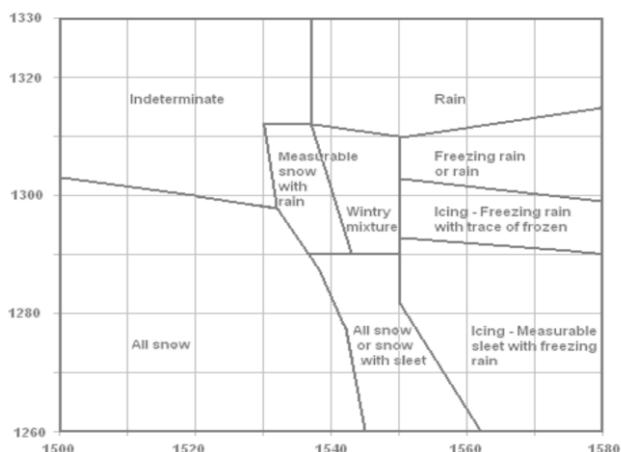
$$Z_2 - Z_1 = \frac{R_d \bar{T}_v}{g_0} \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right),$$

kus Z_2 ja Z_1 (m) on õhukihti piiravate isobaarpindade geopotentsiaalsed kõrgused, R_d ($J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$) kuiva õhu gaasi konstant, \bar{T}_v (K) kahe geopotentsiaalse kõrguse vahel oleva õhukihi virtuaalne temperatuur ning p_1 ja p_2 (Pa) õhukihti piiravad isobaarilised pinnad (Stull, 2017). Virtuaalseks temperatuuriks nimetatakse temperatuuri, mille omandaks kuiv õhk, kui selle rõhk ja tihedus oleksid võrdsed vaadeldava niiske õhu väärtustega (AMS, 2012). Isobaariliseks pinnaks nimetatakse pinda, mille igas punktis on õhurõhk võrdväärne vaadeldava rõhuga. Väljade vahelist vertikaalset kaugust nimetatakse geopotentsiaalseks paksuseks. Hüpsomeetrisest võrrandist lähtub, et isobaarpindade vaheline geopotentsiaalne paksus on lineaarselt seotud nende vahel oleva atmosfäärikihi virtuaalse temperatuuriga: mida kõrgem on temperatuur, seda paksem on õhukiht. Järelikult saab õhukihti piiravate isobaariliste

pindade geopotentsiaalsete kõrguste erinevust ehk geopotentsiaalset paksust kasutada õhukihi temperatuuri hindamiseks.

Tüüpilisteks vaadeldavateks isobaarpindadeks maapinna lähedases kihis on 1000hPa, 850hPa ja 700hPa. 1000hPa pinda kasutatakse iseloomustamiseks rõhku maapinnal — selle väärtus on ligikaudselt võrdne standardatmosfääriga ehk 1013,25hPa-ga. 850hPa pind asub umbes 1,5km kõrgusel maapinnast. Eeldatakse, et 850hPa kõrgusel on temperatuur sõltumatu maapinna mõjudest ning on iseloomulik õhumassile. Selle põhjal hinnatakse näiteks päevast maksimaalset temperatuuri maapinnal. Lähestikused isotermid ehk samatemperatuurijooned 850hPa isobaarpinnal võivad viidata fronti olemasolule. Üldiselt kasutatakse 1000hPa ja 850hPa vahelist õhukihti hindamiseks maalähedase õhumassi temperatuuri. 700hPa pinda käsitletakse kui atmosfääri alumise kihi ülemist piiri. Kuna pind asub ligikaudselt 3km kõrgusel maapinnast, eeldatakse, et see on vaba maapinna mõjudest ning et pinna niiskuse sisalduse põhjal saab teha eelduse kogu õhumassi niiskuse kohta. 850hPa ja 700hPa vaheline õhukiht on ligikaudselt madalate- ja keskmiste pilvede ülemineku ala, millest tulenevalt, iseloomustab selle geopotentsiaalset paksust õhukihi temperatuuri pilvekihis. Kuna sademete faas sõltub õhu temperatuurist, võiksid 850-1000hPa ja 700-850hPa õhukihtide temperatuurid olla heaks indikaatoriks langevatele sademete tüüpidele.

TREND ehk *Technique using the Partial Thickness Predominant P-type Nomogram* on meetod, mida kasutatakse mõnel määral Ameerika Ühendriikides Carolinas ja Virginias talvetormide 6-tunni ülekaaluka sademete tüübi määramiseks (NWS Trend, n.d.). TREND on välja töötatud empiiriliselt kasutades Greensboro meteoroloogiajaama raadiosondeerimise andmeid ja ilmastikunähtuste logisid (Keeter, Cline, 1991). Joonisel 8 on toodud TREND graafik, mis näitab sademetüüpi funktsioonina 850-1000mb ja 700-850mb isobaarpindade geopotentsiaalsetest paksustest (NWS Trend, n.d.). Eelnevalt isobaarpindade ühikuna kasutatud hektopaskalid on võrdsed antud meetodis kasutatud millibaaridega.



Joonis 8: Väljavõte TREND graafikust, mis kujutab valdava sademetüübi sõltuvust 700-850mb ja 850-1000mb õhukihtide geopotentsiaalsetest paksustest (NWS Trend, n.d.).

Joonis 8 x-teljel on 700mb ja 850mb isobaarpindade vaheline geopotentsiaalsete kaugus meetrites, mida käsitletakse 700-850mb õhukihi geopotentsiaalsete paksusena, y-teljel on 850mb ja 1000mb isobaarpindade vaheline kaugus meetrites ehk 850-1000mb õhukihi geopotentsiaalsete paksus.

Joonisel on välja toodud piirkonnad, mis on iseloomulikud kindlatele sademete tüüpidele ja nende kooslustele.

TREND meetod arendati algselt välja 1991. aasta Keeter ja Cline uurimistööst „*The Objective Use of Observed and Forecast Thickness Values to Predict Precipitation Type in North Carolina*“ ning on tänapäeval pidevas arenduses. TREND on lokaalne meetod: see on koostatud kohalike andmete põhjal ning seda rakendatakse vaid ümbritsevale piirkonnale (NWS Trend, n.d.).

Kuna TREND on lokaalne meetod, võib oodata erinevusi algse ja Eesti andmetele tuletatud graafikute vahel. Esmane erinevus on kummagi paiga kaugus ekvaatorist. Põhja-, Lõuna-Carolina ja Virginia osariigid jäävad laiuskraadide vahemikku 33-38°N, Eesti asub aga oluliselt põhja pool, ligikaudselt 59°N laiuskraadil (Google, n.d.). Tingitud laiuskraadide erinevusest, erinevad talvekuudel valitsevad õhumassid: Põhja-Carolina puhul on valdavalt tegemist mandrilise arktilise, mandrilise - ja merelise polaarse ning merelise troopilise õhumasside mõjualaga (Ahrens, 2007). Eesti ilma mõjutavad talvel mandriline ja mereline polaarne, kuid ka mandriline ja mereline arktiline õhumass (Krauklis, Draveniece, 2004). Samuti saab asukohti võrrelda topograafiliste erinevust põhjal: Põhja-Carolina keskmine kõrgus merepinnast on 165 m ja kõrgeim tipp ~2000 m (Britannica, n.d.). Eesti keskmine kõrgus merepinnast on vaid 61 m ja kõrgeim tipp 318 m. Erinevused topograafias, valitsevates õhumassides ja laiuskraadides viitavad sellele, et käsitledes Eesti andmeid TREND meetodi eeskujul, võib oodata mingisugust tulemuste kallet või erinevust.

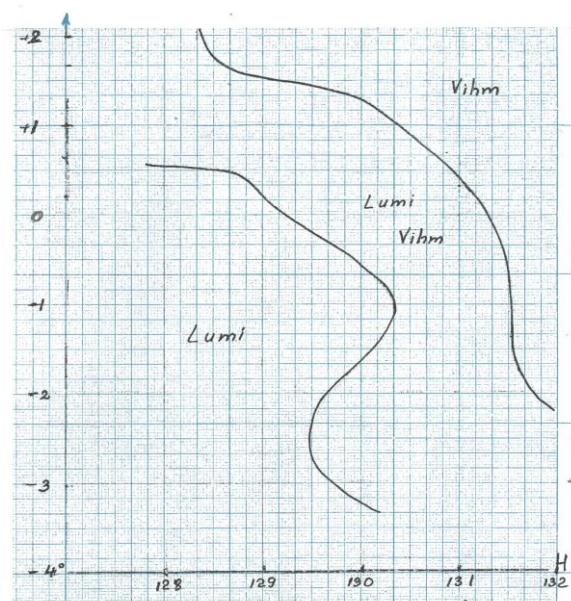
Graafiku tuletamisel Eesti tingimustes kujuneb esimeseks probleemiks harv raadiosondi väljalase. Algne TREND graafik määrab sademete tüübi järgnevas 6 tunniks, kuid kuna Eestis lastakse raadiosond õhku vaid keskööl, pole 6-tunnine öine aken kuigi informatiivne. Sel põhjusel on andmeid töödeldud tingimusel, et õhumassi profiil püsib järgneva 24 tunni jooksul suuremate muutusteta. 6-tunnine prognoositavus on oluline kiiresti arenevate talvetormide puhul, kuid talviseid torme toovate tsüklonitega kaasnevad valdavalt frontaalsüsteemid, mis õhumassi omadusi (k.a. vertikaalset profiili) muudavad. Kui õhumass muutub, siis olenevad raadiosondi andmed oluliselt seadme lennuajast ja süsteemide liikumisest. Kuna frontaalsüsteemid ei liigu n-ö seinana, vaid jõuavad ülemistesse õhukihtidesse varem kui maapinnale, võib raadiosond lennu jooksul läbida erinevaid liikumises olevaid õhumasse, millest tulenevalt määratakse sademete tüüp tingimustel, mille püsivuse ajaline aken on väike. Juhul kui raadiosondi lennuaeg on mõned tunnid enne frontaalsüsteemi, muutub õhumass järgnevate tundide jooksul ning raadiosondi poolt koostatud vertikaalne profiil ei kirjelda enam olukorda. Sellest tulenevalt, kui kasutada raadiosondeerimise andmeid antud meetodil sademete tüübi määramiseks, peaks frontaalsüsteemide olemasolul Eesti kohal või ligiduses suurendama sondi lennutamise sagedust.

2.3 850hPa meetod: sademetüübi sõltuvus isobaarpinna temperatuurist ja geopotentsiaalsest kõrgusest

850hPa isobaarpinna kasutus on praktilises meteoroloogias levinud meetod hindamaks õhumassi omadusi. Sellest tulenevalt võiks olla seos ka sademete tüüpide ja 850hPa isobaarpinna omaduste vahel: antud juhul on uuritud sademetüübi seost isobaarpinna temperatuuri ja geopotentsiaalse kõrgusega.

Joonis 9 pärineb Keskkonnaagentuuri ilmaprognooside osakonna töölaualt. Joonise kasutus sünoptikute töös on aja jooksul vähenenud mudelite kiire arengu tõttu, kuid on üldistuste tegemiseks ja kahtluste elimineerimiseks käeulatusse jäänud. Lähemal vaatlusel selgus, et joonis on eestikeelseks ümber joonistatud teosest „РУКОВОДСТВО ПО КРАТКОСРОЧНЫМ ПРОГНОЗАМ ПОГОДЫ: Часть 1“, mis on välja antud Nõukogude liidu Hüdrometeoroloogia Instituudi poolt aastal 1986. Joonis koostati Nõukogude Liidu Euroopa alade aeroloogiliste andmete analüüsil ja määrab tulevat sademete tüüpi 850hPa isobaarpinna temperatuuri ja geopotentsiaalse kõrguse põhjal. Viimast saab käsitleda kui maapinna ja 850hPa isobaarpinna vahelise õhukihi geopotentsiaalset paksust ehk õhukihi virtuaalset temperatuuri iseloomustavat väärtust. Selle eest õhutemperatuur 850hPa kõrgusel on iseloomulik valitsevale õhumassile endale ja võib teatud juhtudel iseloomustada ka pilvesisest temperatuuri. Kuna joonis leiab mingil määral kasutust Eestis sademete tüübi prognoosimiseks, võeti eesmärgiks testida selle meetodi rakendatavust esmase huviga jäätuva vihma kontekstis, mida algsel joonisel välja toodud pole.

Joonise 9 x-teljel on kujutatud 850hPa isobaarpinna geopotentsiaalset kõrgust maapinnast dekameetrites, y-teljel 850hPa isobaarpinna õhutemperatuur kraadides (°C). Joonisel on piiritletud kolm piirkonda, eraldamaks lume, vihma ja nende segusademetete esinemist sõltuvalt 850hPa isobaarpinna kõrgusest ja temperatuurist.



Joonis 9: Lume, lume ja vihma ning vihma nähtuste valdavalt esinemispiirkonnad sõltuvalt 850hPa isobaarpinna geopotentsiaalsest kõrgusest (x-teljel, dam) ja temperatuurist (y-teljel, °C). Joonis on kohandatud Keskkonnaagentuuri ilmaprognooside töölaualale teosest „РУКОВОДСТВО ПО КРАТКОСРОЧНЫМ ПРОГНОЗАМ ПОГОДЫ: Часть 1“.

3. Andmed

Antud töös kasutatud raadisondi ja ilmasensori andmestikud on saadud päringuna Keskkonnaagentuurist, millest on vaadeldud 2003.-2022. aasta oktoobri- kuni aprillikuude vahemikku. Andmed algavad 2003. aastast, sest sellest varasemaid ilmasensori andmeid Harku jaamast saadaval pole. Antud töös on Tallinn-Harku aeroloogiajaama ilmavaatleja logide asemel võetud kasutusel ilmasensori andmed, sest ilmavaatleja logidest puuduvad nähtusena jäätuv vihm ja uduvihm, mis on töö üheks fookuseks. Kuna ilmasensor on automaatsensor, peab arvestama võimalike valemõõtmistega. Raadisondeerimise andmetest on kasutusel geopotentsiaalne kõrgus, õhurõhk, kastepunkt ja temperatuur, ilmasensori logidest sademete tüüp.

Töös on vaadeldud ka mõningaid spetsiifilisi kuupäevi, mille raadisondeerimise andmed on saadud kuupäevapõhise päringuna Keskkonnaagentuuri süsteemist. Nendest on samuti kasutusel geopotentsiaalne kõrgus, õhurõhk, kastepunkt ja temperatuur. Samuti on juhtumianalüüsis kasutatud ERA5 andmebaasist laius- ja pikkuskraadi, geopotentsiaali, õhurõhu, ja temperatuuri andmeid.

3.1 Raadisondeerimine Eestis

Raadisondiksi nimetatakse seadet, mis õhupalli abil lendu lastakse, ning mis edastab maapinnal asuvasse serverisse mitmesuguseid andmeid. Raadisondeerimine kui aeroloogiline mõõtmine annab informatsiooni atmosfääri vertikaalse profiili kohta mõõtes järgnevaid atmosfääriseisundit iseloomustavaid suuruseid erinevatel geopotentsiaalsetel kõrgustel: tuule kiirus ja suund, temperatuur ja kastepunkti, õhurõhk ja õhuniiskus. Kogutud andmed on tähtsad mudelite tööle ja arendamisele, samuti on ülemiste õhukihtide andmed hädavajalikud aviatsioonile. Järjest enam kasutatakse lennukeid atmosfääri ülemiste kihtide andmete mõõtmiseks, kuid raadisondeerimine on endiselt kõrgemate õhukihtide peamiseks informatsiooniallikaks. Raadisondeerimisel kogutud andmeteta poleks võimalik andmeid koguvaid lennukeid õhku saata puuduliku informatsiooni tõttu, mis halvemal juhul võiks kujuneda pardal olijatele ohtlikuks.

Eestis on raadisondeerimist tehtud alates 1953. aastast (Ilmateenistus, 2020). Vaadeldud andmete vahemikus on Tallinn-Harku raadisondeerimises toimunud kaks suuremat muutust: 2009. aasta 20. oktoobril mindi üle sondile, mis edastab infot iga 2 sekundi tagant. Varasemalt kogus sond andmeid iga 30 sekundi järelt (Ilmateenistus, 2020), mille tulemusena oli andmepunkte harvemalt. Andmete interpoleerimisele tähendab see suuremat veahinnangut. 2020. aastal läks Keskkonnaagentuur üle täisautomaatsele süsteemile, mis saadab sondi lendu igal ööl automaatselt inimese abita, kuid iga paari kuu tagant on vaja süsteemi jaoks kokku panna raadisondi palli ja sondi komplektid. Uuel süsteemil on veelgi tihedam andmeside sondiga, millest tulenevalt on sond võimeline tegema veelgi rohkem mõõtmiseid (Ilmateenistus, 2020), kuid mille andmerekad on esitatud harvemalt. Joonisel 10 on näidatud Tallinn-Harku aeroloogiajaama uut raadisondeerimise automatjaama.



Joonis 10: Tallinn-Harku aeroloogiajaama automaatne raadiosondijaam (Ilmateenistus, 2020).

Kuigi raadiosondeerimine võimaldab täpseid mõõtmisi atmosfääri vertikaalses lõikes, veab sondi õhupall, mis tuulega horisontaalselt kaldub. Kuna antud töös on vaatluse all isobaarpinnad, mille orienteeruv kõrgus on 1,5-3 km kõrgusel, siis eeldatakse, et horisontaalne nihe on niivõrd väike, et Tallinn-Harku aeroloogiajaama kohal olev õhumass on sarnane mõõdetud vertikaalse profiiliga. Eestis ei paikne ilmajaamad niivõrd tihedalt, et kasutada Tallinna ümber asuvate jaamade sensoreid: raadiosond ei jõua nendeni vaadeldud kõrgusvahemiku saavutamisel. Võimalik oleks kasutada Tallinnas ja ümbritseval alal asuvaid teeilmajaamasid ilmastikunähtuste andmeallikatena, kuid kuna need ei vasta WMO nõutele, on nende mõõtmised vähem usaldusväärsed.

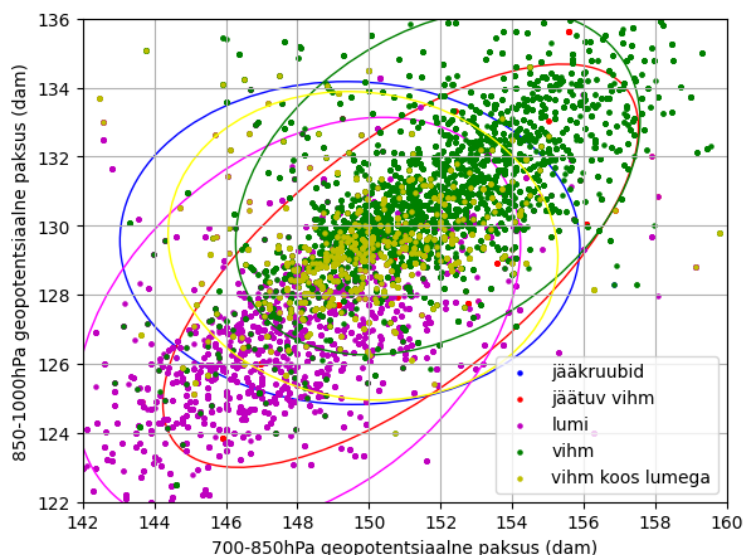
3.2 ERA5

ERA5 on ECMWF reaanalüüsi andmestik, mis võimaldab ligipääsu andmetele alates 1940. aastast. ERA5 töötab andmete assimilatsiooni põhimõttel: omavahel kombineeritakse mudelandmed reaalseste mõõtmistega, et võimaldada parimat võimalikku kirjeldust atmosfääri seisundile (Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, 2023). Antud töös on kasutatud ERA5 andmeid jäätuva vihma juhtumianalüüsis. Kuna ERA5 arvutab vertikaalse kõrguse asemel geopotentsiaali, on andmete analüüsiks nendest tuletatud geopotentsiaalne kõrgus.

4. Analüüs ja tulemused

4.1 Geopotentsiaalsete paksuste ehk TREND meetod

TREND meetodi põhimõttel on koostatud joonis 11, mis kujutab andmepunktide sõltuvust õhukihtide geopotentsiaalsetest paksustest: x-teljel on 700-850hPa, y-teljel 850-1000hPa õhukihtide geopotentsiaalsed paksused dekameetrites. Erinevate värvidega on tähistatud erinevad sademete tüübid. Andmepunktid on saadud kasutades lineaarset interpolatsiooni leidmaks 1000, 850 ja 700hPa isobaarpindade geopotentsiaalsed kõrgused ning nende vahede kaudu on avaldatud vastavad geopotentsiaalsed paksused. Saadud andmetabel on kombineeritud ilmasensori logidest ja raadiosoneerimise andmetest: raadiosondeerimise andmetest tuletatud andmepunktile on antud sademetüübi parameeter ilmasensori logidest kuupäeva alusel. Andmepunktide arv sõltub sondi andmete sisse lugemisel toimuvast filtreeringust. Kuna raadiosond võib ilmastikuolude tõttu enneaegselt alla kukkuda on andmeridasid, kus sond ei tõuse 700hPa-ni või selle ligidusse. Seetõttu on rakendatud tingimust, et sondi poolt mõõdetud õhurõhk peab olema jõudnud vähemalt 750hPa-ni, kust saab interpolatsiooni teel välja arvutada ka 700hPa isobaarpinna geopotentsiaalse kõrguse. Antud ajavahemikus vähendab selline tingimus andmetega päevade arvu vaid mõnekümne võrra.

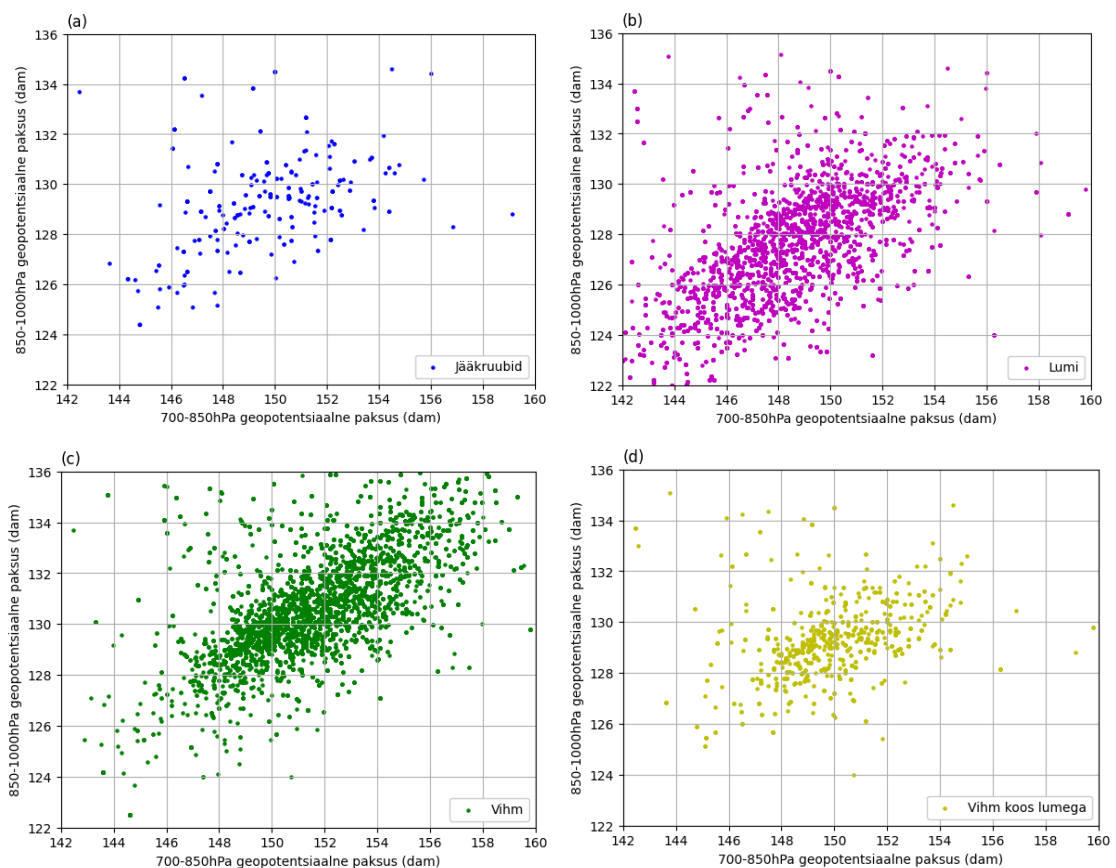


Joonis 11: Sademetüübi sõltuvus 700-850hPa õhukihi geopotentsiaalsest paksusest (x-telg) ja 850-1000hPa õhukihi geopotentsiaalsest paksusest (y-telg). Erinevate värvidega on tähistatud erinevad sademete tüübid. Vastavate värvidega joonistatud usaldusellipsid näitavad piirkonda, kus leidub ~95% värviga tähistatud nähtusest.

Hindamiseks sademete tüüpidele iseloomulike piirkondade paiknemist on joonise 11 hajuvusdiagrammile joonistatud usaldusellipsid. Ellipsite tegemiseks on kasutatud Matplotlibi funktsiooni, mis leiab kahedimensioonilistele andmestikele usaldusellipsid tuginedes Pearsoni korrelatsioonikordajatele, andmestike keskpunktidele ja standardhälvetele (Hunter et al, n.d.). Ellipsi raadius sõltub sellest mitme standardhälbe jagu andmeid tahetakse ellipsiga kirjeldada (Shelp ,n.d.). Ülaltoodud joonisel on ellipsite tegemiseks kasutatud kahte standardhälvet, mis tähendab, et ellipsid katavad nähtuse põhiselt ära ~95% sündmustest. Kuna aga erinevate sademete tüüpide standardhälbed on piisavalt suured, et nende põhjal koostatud ellipsid katavad ära üksteise keskväärtused, kattuvad ellipsite pindalad suures ulatuses.

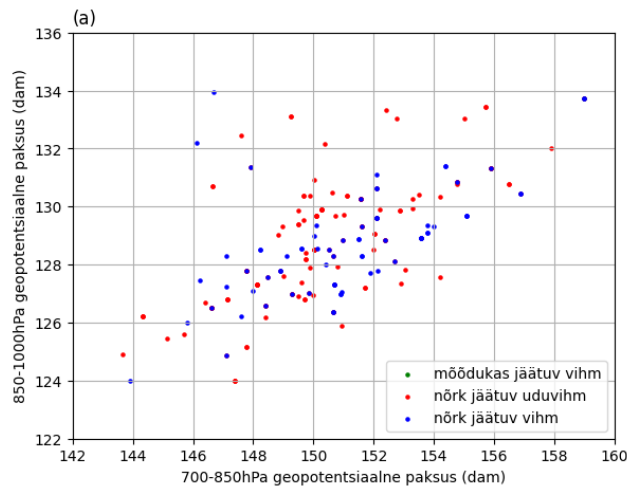
Jooniselt 11 paistab välja õhukihtide omavaheline lineaarne sõltuvus. Seda kinnitavad positiivne kovariatsiooni väärtus ja Pearsoni korrelatsioonikordaja väärtusega 0.556, mis viitab mõõdukale sõltuvusele. Järelikult ei saa valitud õhukihtide geopotentsiaalseid paksuseid käsitleda kui sõltumatuid muutujaid.

Joonise 11 puuduseks on andmepunktide kattumine. Õhukihtide paksuste andmed on raadiosondeerimistest tulenevalt kogu päeva ulatuses konstantsed, sademete tüüp võib päeva jooksul aga muutuda. Sellest tuleneb andmepunktide kattumine, kus joonisele jääb ööpäeva viimase sademetüübi värviga tähistatud andmepunkt. Vähendamaks andmepunktide kattuvusest raskendatud analüüsi on koostatud joonised 12-13 iga sademetüübi kohta eraldi.



Joonis 12: Nähtuste a) jääkruubid, b) lumi, c) vihm, d) vihm koos lumega sõltuvus 700-850hPa õhukihi geopotentsiaalsest paksusest (x-telg) ja 850-1000hPa õhukihi geopotentsiaalsest paksusest (y-telg).

Alates 2003. aastast on ilmasensor Tallinnas registreerinud 152 nõrga, 3 mõõduka jäätuva vihma ja 86 nõrga jäätuva uduvihma sündmust. Mõõdukat jäätuvat uduvihma ega intensiivselt tugevat jäätuvat vihma või uduvihma sensori poolt registreeritud pole. Juhtumianalüüsis käsitletud kuupäevadest registreeris sensor nõrka jäätuvat vihma 23. veebruaril ajavahemikus 08-10UTC. Registreeritud 241 sündmusest on 126 toimunud erinevatel kuupäevadel, 31-l päeval on esinenud rohkem kui ühte tüüpi sündmusi (nt jäätuv vihm, millele järgnes jäätuv uduvihm). Ilmasensori andmete kombineerimisel raadiosondi andmestikuga kaovad mõned andmepunktid, sest raadiosondeerimise andmed pole kõigil neil kuupäevadel kätte saadavad. Jäätuva vihma geopotentsiaalsete paksuste graafik on toodud joonisel 13.



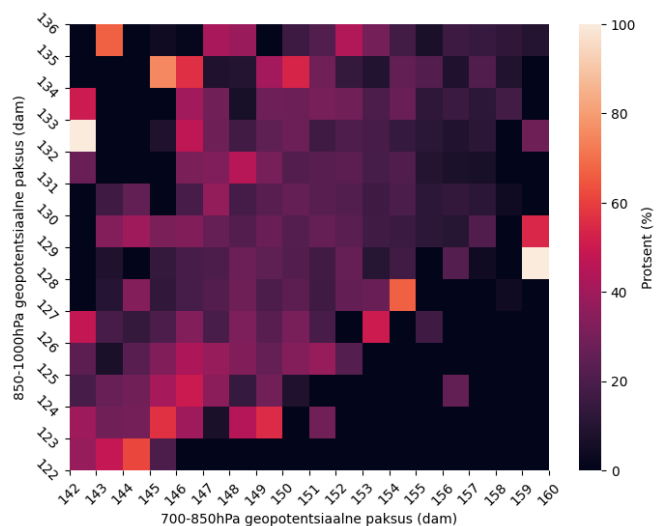
Joonis 13. Jäätuv vihma sõltuvus 700-850hPa õhukihi geopotentsiaalsest paksusest (x-telg) ja 850-1000hPa õhukihi geopotentsiaalsest paksusest (y-telg).

Tabel 1: Nähtuste mõned statistikumid (keskmine, mediaan, standardhälve, variatsioonikordaja), kus sulu vasakpoolne väärtus iseloomustab statistikut x-telje (700-850hPa geopotentsiaalse paksuse), parempoolne y-telje (850-1000hPa geopotentsiaalse paksuse) sihis.

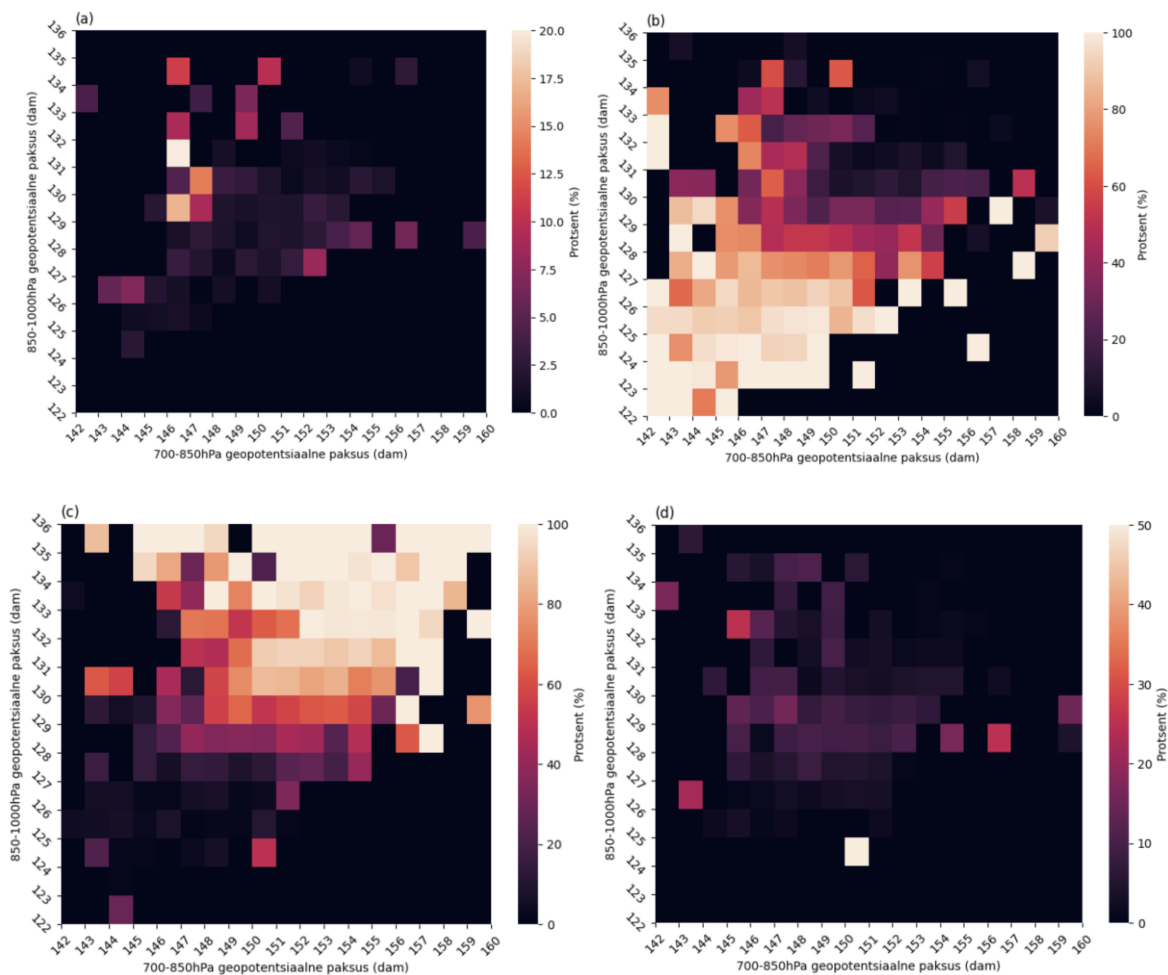
Nähtus	Keskmine	Mediaan	Standardhälve	Variatsioonikordaja
jääkruubid	(149.47, 129.5)	(149.66, 129.34)	(3.21, 2.33)	(2.15, 1.8)
jäätuv vihm	(150.89, 128.84)	(150.68, 128.53)	(3.32, 2.92)	(2.2, 2.26)
lumi	(148.03, 127.17)	(148.05, 127.0)	(3.1, 2.98)	(2.1, 2.35)
vihm	(151.93, 131.28)	(151.9, 130.9)	(2.83, 2.51)	(1.86, 1.91)
vihm koos lumega	(149.83, 129.42)	(149.76, 129.17)	(2.72, 2.23)	(1.82, 1.73)

Ülaltoodud tabel näitab erinevate nähtuste statistikumid. Variatsioonikordajad iseloomustavad andmete hajutatust: need näitavad standardhälve ja keskmise väärtuse protsentuaalset suhet (UCLA, n.d.). Kuna variatsioonikordaja on dimensioonitu suurus, saab selle alusel omavahel võrrelda erinevate andmemassiivide hajutatust. Antud variatsioonikordajate põhjal saab öelda, et nähtuste hajumised on joonistel 11-13 ligikaudselt samaväärsed. Jääkruupide ja vihm koos lumega nähtuste puhul on märgata suuremat hajuvust x-telje sihis, teiste nähtuste puhul y-telje sihis.

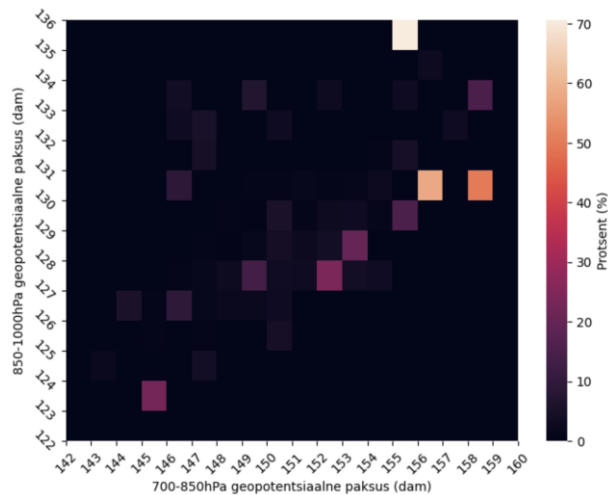
Lisaks hajuvusdiagrammidele on koostatud soojuskaardid, mis on toodud joonistel 14-16, kus andmepunktid on jagatud 1x1dam andmeruutudesse. Joonis 14 võtab aluseks kogu ajaperioodi jooksul andmeruudule vastanud geopotentsiaalsete paksuste tundide arvu ning näitab protsentuaalselt mitu tundi sellest ajast on sadanud (ükskõik millist tüüpi sademeid). Selle põhjal saab hinnata geopotentsiaalsete paksuste piirkondi, kus valdavalt ei saja. Joonistel 15 ja 16 näitab andmeruudu värv valitud nähtuse protsentuaalset esinemist kõigist selle andmeruudus registreeritud nähtustest. Joonistelt 15.b ja 15.c paistab välja, et vihma ja lume sündmused on geopotentsiaalsete paksuste andmeruutudesse jagamisel kõige paremini määratavad ulatudes ruuduti kuni 100%-ni. Kuigi jääkruubid, -vihm ja vihm koos lumega moodustavad hajuvusdiagrammil eristatavad klastrid, ei väljendu need joonistel 15.a, 15.d ja 16. Järelikult, sõltumata sellest, et nende sündmuste puhul saab geopotentsiaalsete paksuste põhjal välja tuua esinemispiirkonnad, on nende esinemissagedused antud piirkondades võrreldes teist tüüpi sademetega siiski väikesed.



Joonis 14. Soojuskaart, mis näitab sademete esinemistõenäosust igas 1x1dam andmeruudus. Protsendi leidmiseks on kasutatud tundide arvu, kus andmed olid andmeruudu piires ja esines sademeid, ning kõigi tundide arv, kus andmed olid andmeruudu piires.

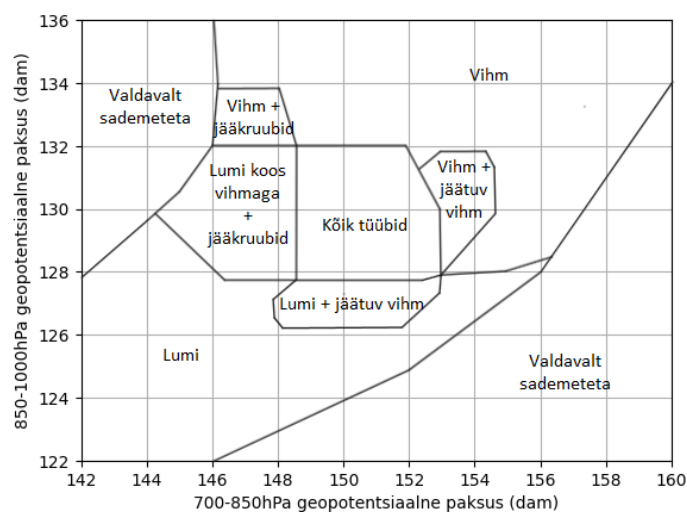


Joonis 15. Soojuskaardid, mis näitavad a) jääruupide, b) lume, c) vihma ja d) vihma koos lumega sündmuste esinemisprotsenti kõigist antud 1x1dam andmeruudus esinenud sademete juhtumitest. Protsendi leidmiseks on kasutatud tundide arvu, kus andmed olid andmeruudu piires ja esines konkreetset tüüpi nähtust, ning tundide arv, kus andmed olid andmeruudu piires ja esines sademeid.



Joonis 16. Soojuskaart, mis näitab jäätuva vihma sündmuste esinemisprotsenti kõigist antud 1x1dam andmeruudus esinenud sademete juhtumitest. Protsendi leidmiseks on kasutatud tundide arvu, kus andmed olid andmeruudu piires ja sadas jäätuvat vihma, ning tundide arv, kus andmed olid andmeruudu piires ja esines sademeid.

Kuna lume ja vihma sündmused on võrreldes teistega oluliselt ülekaalukamad, on keeruline hinnata TREND-ile sarnaselt kindlatele sademete tüüpidele ja nende kooslustele iseloomulikke andmevahemikke. Võttes vaatluse alla vahemiku (148-152dam, 128-130dam), mis on andmepunktide poolest tihedaim, näitavad tulemused, et kõigist selles vahemikus toimunud sündmustest moodustavad lumi ja vihm vastavalt 38,7% ja 49%, jääkruubid, jäätuv vihm ja vihm koos lumega vastavalt 1,6%, 1,9% ja 8,8%. Samas kui vaadelda seda, et millise protsendi moodustavad andmevahemikus esinenud juhtumid kõigist nähtuste juhtumitest, järeldeb, et antud vahemikus on 22,6% kõigist jääkruupide, 18,5% jäätuva vihma, 17,14% lume, 18,4% vihma ja 41,4% vihma koos lumega sündmustest. Kuigi jääkruubid, jäätuv vihm ja vihm koos lumega moodustavad kõigist esinenud sündmustest väikese osa, on see nähtuste põhiselt neile iseloomulik geopotentsiaalsete paksuste vahemik. Sellest tulenevalt ei saa Eestile TREND graafiku koostamisel kasutada vaid ühte liiki jooniseid, vaid peab kombineerima erinevaid väljundeid.



Joonis 17. Eesti tingimuste iseloomulike modifitseeritud sademetüüpide piirkondade sõltuvus 700-850hPa õhukihi geopotentsiaalsest paksusest (x-telg) ja 850-1000hPa õhukihi geopotentsiaalsest paksusest (y-telg). Antud vahemikud on leitud hajuvusdiagrammide, usaldusellipsite ja soojuskaartide visuaalsel analüüsil.

Joonis 17 näitab ligikaudseid vahemikke, millele vastavad sademete tüübid ja kooslused on iseloomulikud. Siinkohal ei saa piirkondade defineerimisel välja tuua kindlat protsentuaalset väärtust, sest nähtuste esinemissagedused on niivõrd erinevad. Sellest tulenevalt on võetud vihma või lume sagedasem esinemine andmeruudus algseks eristavaks parameetriks. Sellele on lisatud piirkonnad, kus teiste nähtuste esinemisprotsent oli suurim. Joonise keskele moodustuvale alale, mille tekkimist võis ennustada juba ellipsite põhjal, on iseloomulikud igat tüüpi sademed. Piirkondade paigutus on mõnevõrra sarnane TRENDi graafikuga (lumi alumises vasakus nurgas, vihm ülemises paremas nurgas jne), kuid piirkondade ulatused ja suurused varieeruvad algsest TREND graafikust. Oluliseks erinevuseks on ka peamiselt sademete vabad alad, mis moodustuvad alumisse paremasse ja ülemisse vasakusse nurka.

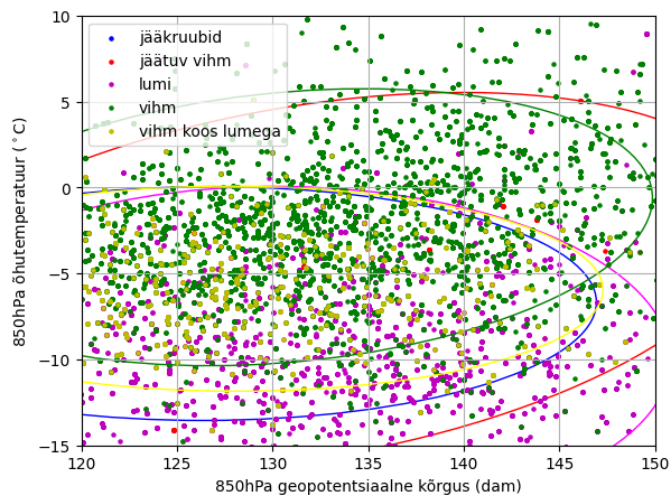
Joonis 17 on üldistus tehtud TREND graafiku näitel ning ei vasta otseselt arvulistele väärtustele, vaid nende visuaalsele analüüsile. Sellest tulenevalt võiks kasutust leida pigem hajuvusdiagrammid (koos usaldusellipsitega) ja soojusgraafikud, mis näitavad sademetüüpide jaotust täpsemalt. Edasi saaks tööd arendada koostades graafikud eraldi kuude lõikes: oktoobrist aprillini on pikk periood, mille jooksul valitsevad õhumassid mõnevõrra varieeruvad. Kuude põhisel käsitlusel võiks nähtuste hajuvus väheneda. Samuti oleks huvitav võrrelda saadud tulemusi asendades ilmasensori logid ilmavaatleja omadega. Ka antud töös kaaluti ilmavaatleja logide kasutust, sest need on ilmasensori registreeringutest usaldusväärsemad, kuid kuna ilmavaatleja ei registreeri nähtusena jäätuvat vihma, siis on töö tehtud ilmasensori logide põhjal.

4.2 850hPa meetod: sademetüübi sõltuvus isobaarpinna temperatuurist ja geopotentsiaalsest kõrgusest

Sarnaselt joonisele 9 on koostatud sademetüüpide esinemise diagramm 850hPa isobaarpinna meetodi jaoks, mis on esitatud joonisel 18 ning kujutab andmepunktide sõltuvust 850hPa isobaarpinna geopotentsiaalsest kõrgusest (x-telg) ja temperatuurist (y-telg). Andmed on taas kombineeritud ilmasensori logidest ja raadiosoneerimise andmetest. Lineaarse interpolatsiooni teel on leitud 850hPa isobaarpinna geopotentsiaalne kõrgus ja temperatuur. Kuna aluspinnal on geopotentsiaalne kõrgus võrdne 0-ga, väljendab 850hPa isobaarpinna geopotentsiaalne kõrgus maapinna ja 850hPa isobaarpinna vahelise õhukihi geopotentsiaalset paksust.

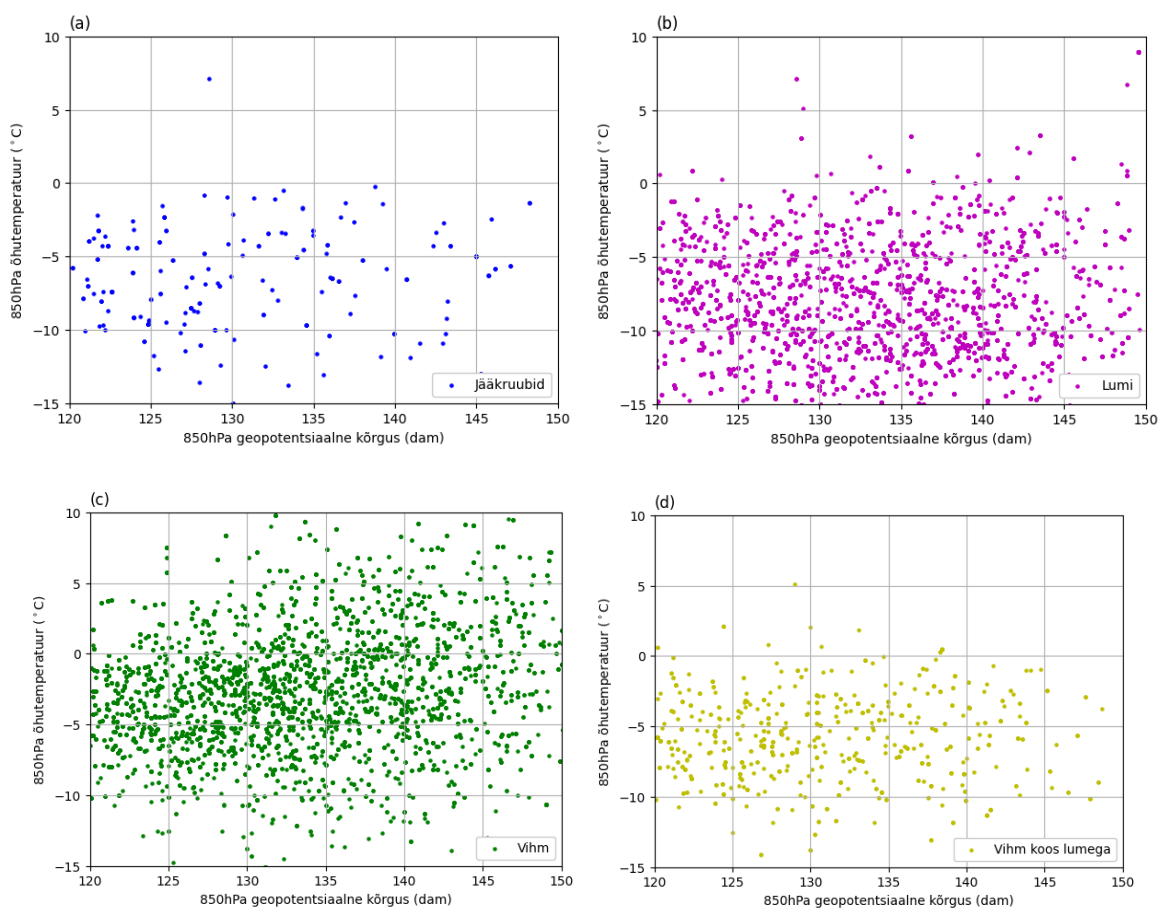
Hindamaks sademete tüüpidele iseloomulike piirkondade paiknemist, on hajuvusdiagrammile joonistatud usaldusellipsid, mille jaoks on kasutatud spetsiaalset Matplotlib funktsiooni. Joonisel 18 on ellipsite tegemiseks kasutatud kahte standardhälvet, mis tähendab, et ellipsid katavad nähtuse põhiselt ära ~95% sündmustest. Kuna aga erinevate sademete tüüpide standardhälved on piisavalt suured, et nende põhjal koostatud ellipsid katavad ära üksteise keskväärtused, on sarnaselt geopotentsiaalsete paksuste meetodile ellipsite alade omavaheline kattuvus suur.

Kui geopotentsiaalide meetodi puhul torkas silma muutujate omavaheline sõltuvus, siis esmapilgul seost 850hPa isobaarpinna geopotentsiaalse kõrguse ja temperatuuri vahel ei paista. Muutujate vaheline kovariatsiooni väärtus on positiivne, kuid väike. Eeldades lineaarset sõltuvust, on leitud Pearsoni korrelatsioonikordaja väärtus, mille ligikaudne väärtus 0.06. See viitab nõrgale või puudulikule sõltuvusele.

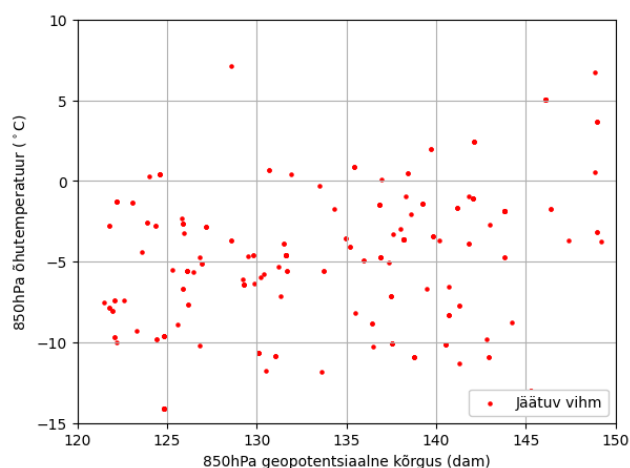


Joonis 18: Sademetüübi sõltuvus 850hPa õhukihi geopotentsiaalsest kõrgusest (x-telg) ja temperatuurist (y-telg). Erinevate värvidega on tähistatud erinevad sademete tüübid. Vastavate värvidega joonistatud usaldusellipsoidid näitavad nähtuse piirkonda, kus leidub ~95% sellest nähtusest.

Vähendamaks andmepunktide kattuvust on koostatud joonised 19-20 iga sademetüübi kohta eraldi. Joonistelt paistab välja sademete tüübi tugevam sõltuvus y-teljest, ehk 850hPa isobaarpinna temperatuurist, kui x-teljest, ehk isobaarpinna geopotentsiaalsest kõrgusest.



Joonis 19: Nähtuste a) jääkruubid, b) lumi, c) vihm, d) vihm koos lumega sõltuvus 850hPa isobaarpinna geopotentsiaalsest paksusest (x-telg) ja temperatuurist (y-telg).



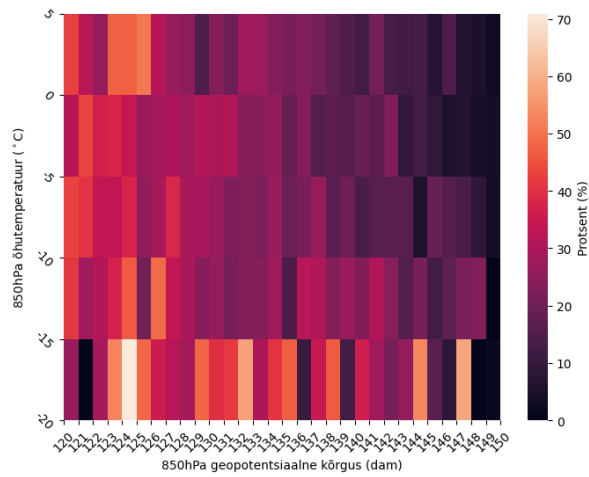
Joonis 20 Jäätuva vihma sõltuvus 850hPa isobaarpinna geopotentsiaalsest paksusest (x-telg) ja temperatuurist (y-telg).

Tabel 2: Nähtuste mõned statistikud (keskmine, mediaan, standardhälve, variatsioonikordaja), kus sulu vasakpoolne väärtus iseloomustab statistikut x-telje (850hPa isobaarpinna geopotentsiaalse kõrguse, dam), parempoolne y-telje (850hPa isobaarpinna temperatuuri, K) sihis.

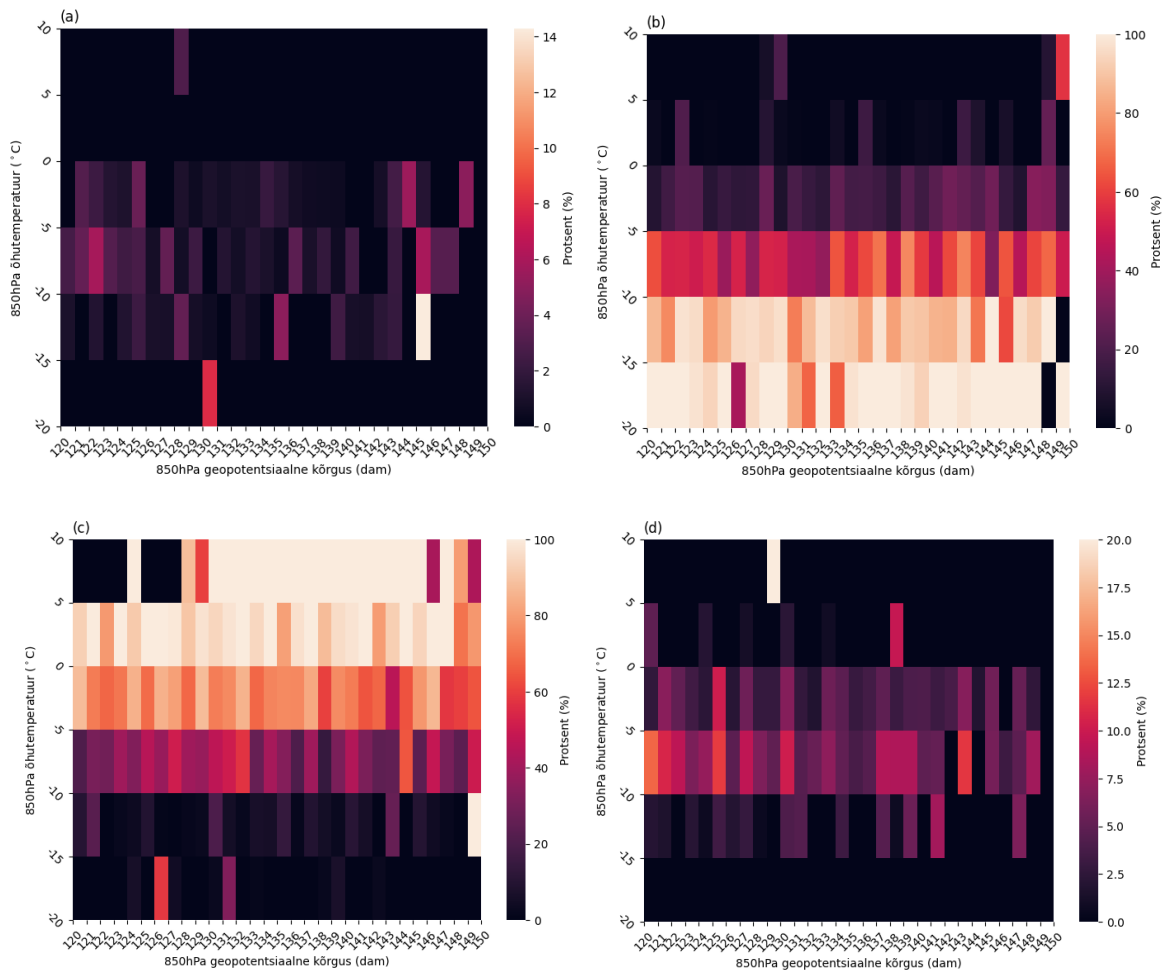
Nähtus	Keskmine	Mediaan	Standardhälve	Variatsioonikordaja
jääkruubid	(126.59, 266.4)	(125.6, 266.57)	(10.16, 3.39)	(8.02, 1.27)
jäätuv vihm	(131.81, 267.65)	(133.83, 268.53)	(11.8, 5.5)	(8.95, 2.06)
lumi	(130.92, 263.51)	(131.26, 263.46)	(9.94, 4.85)	(7.6, 1.84)
vihm	(130.73, 270.84)	(131.19, 270.7)	(9.57, 4.03)	(7.32, 1.49)
vihm koos lumega	(127.94, 267.26)	(127.6, 267.29)	(9.67, 2.98)	(7.56, 1.11)

Ülaltoodud tabel näitab nähtuste statistikuid. Kuna temperatuuri puhul on tegemist nullilähedaste arvudega, on statistikute arvutamisel õhutemperatuur teisendatud Celsiuse skaalalt absoluutse temperatuuri skaalale. Graafiliselt ei muuda see andmepunktide jaotust üksteise suhtes, sest tegemist on konstandi liitmisega, mis vaid tõstab y-telje väärtuseid 273,15 kraadi võrra. Variatsioonikordajad erinevad x- ja y-telgede suhtes: y-telje sihiline variatsioonikordaja on kõigi sademete tüüpide korral väiksem, mis tähendab, et y-telje ehk temperatuuri väärtuste põhiselt on sademete tüübid vähem hajutatud. Nähtuste väiksemad hajutatused, tähendavad, et muutused temperatuuris eristavad paremini erinevaid sademete tüüpe kui muutused geopotentsiaalses kõrguses.

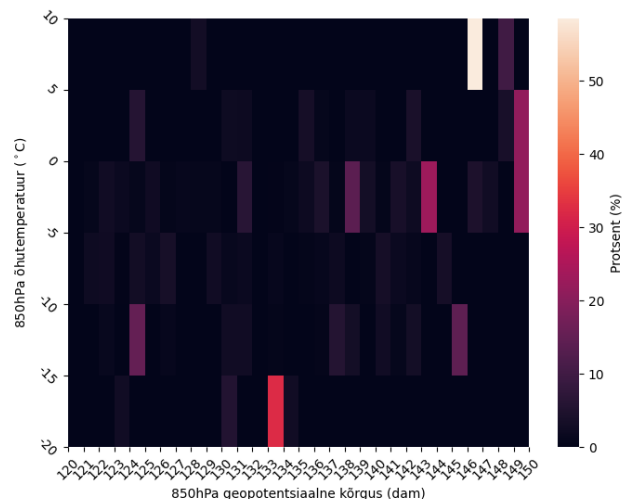
Lisaks hajuvusdiagrammidele on andmed esitatud ka soojuskaartidena joonistel 21-23, kus andmepunktid on jagatud 1dam x 5°C andmeruutudesse. Joonisel 21 on näidatud sademete esinemistõenäosust kui 850hPa isobaarpinna geopotentsiaalne kõrgus ja temperatuur on olnud antud andmeruudu piires. 850hPa meetodi puhul on sademed jaotunud joonise piires ühtlasemalt kui geopotentsiaalsete paksuste meetodi puhul. Joonistel 22 ja 23 näitab andmeruudu värv valitud nähtuse protsentuaalset esinemist kõigist selle andmeruudus registreeritud nähtustest. Joonistelt 22.b ja 22.c paistab välja, et vihma ja lume sündmused on muutujate põhjal andmeruutudesse jagamisel kõige paremini määratavad ulatudes ruuduti kuni 100%-ni. Ka vihm koos lumega joonisel 22.d on eristatav temperatuurist sõltuv vahemik, kus nähtuse protsentuaalne esinemine on suurim. Kuigi jääkruubid ja jäätuv vihm moodustavad hajuvusdiagrammidel mingisugused klastrid, ei väljendu need sama hästi soojuskaartidel 22.a ja 23.



Joonis 21: Soojuskaart, mis näitab sademete esinemistõenäosust igas 1dam x 5°C andmeruudus. Protsendi leidmiseks on kasutatud tundide arvu, kus andmed olid andmeruudu piires ja esines sademeid, ning kõigi tundide arv, kus andmed olid andmeruudu piires.



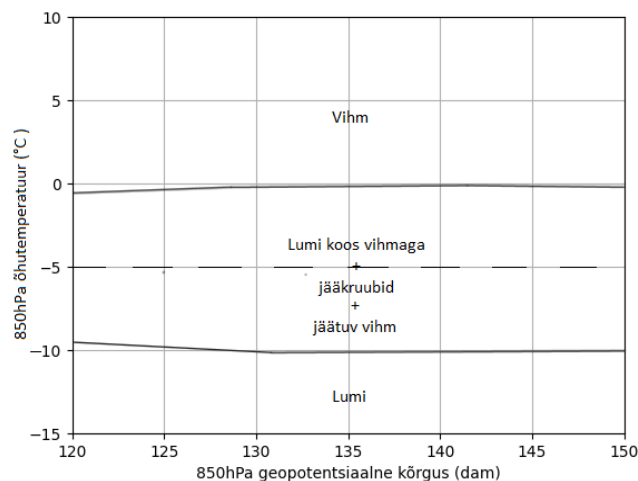
Joonis 22. Soojuskaardid, mis näitavad a) jääruupide, b) lume, c) vihma ja d) vihma koos lumega sündmuste esinemisprotsenti kõigist antud 1dam x 5°C andmeruudus esinenud sademete juhtumitest. Protsendi leidmiseks on kasutatud tundide arvu, kus andmed olid andmeruudu piires ja esines konkreetset tüüpi nähtust, ning tundide arv, kus andmed olid andmeruudu piires ja esines sademeid.



Joonis 23. Soojuskaart, mis näitab jäätuva vihma sündmuste esinemisprotsenti kõigist antud 1dam x 5°C andmeruudus esinenud sademete juhtumitest. Protsendi leidmiseks on kasutatud tundide arvu, kus andmed olid andmeruudu piires ja sadas jäätuvat vihma, ning tundide arv, kus andmed olid andmeruudu piires ja esines sademeid.

Joonistelt 22-23 paistab välja -5°C temperatuurijoone tähtsus. Protsentuaalne enamus lume juhtumitest jääb alla selle joone, vihma sündmusest üle -5°C joone. Vihm koos lumega sündmused on koondunud mõttelise temperatuurijoone ümber, natukene suurem on alla -5°C sündmuste osakaal. Jäätuva vihma kohta on antud meetodil keeruline järeldusi teha, sest sündmused on niivõrd hajutatud. Siiski saab hajuvusdiagrammi ja ühe standardhälve põhise usaldusellipsi põhjal öelda, et ka jäätuva vihma sündmused jäävad -5°C joone ümber.

Taaskord on lume ja vihma nähtused arvuliselt piisavalt ülekaalukad, et vaid soojusgraafikutelt on teiste nähtuste kohta keeruline informatsiooni saada. Et koostada, sarnaselt joonisele 9, sademetüüpidele iseloomulikud piirkonnad, on analüüsitud hajuvusdiagramme, usaldusellipseid ja soojusgraafikuid.



Joonis 24. Modifitseeritud sademetüüpide piirkondade sõltuvus 850hPa isobaarpinna geopotentsiaalsest kõrgusest (x-telg) ja temperatuurist (y-telg). Püsiva joonega eraldatud vahemikud on leitud hajuvusdiagrammide, usaldusellipsite ja soojuskaartide visuaalsel analüüsil. Katkendjoonega on eraldatud valdavalt vihma ja lume esinemispiirkonnad

Ilmneb suur erinevus algselt pakutud joonise 9 ja saadud joonise 24 vahel. Kui algne joonis näitas sademetüüpide sõltuvust nii 850hPa isobaarpinna kõrgusest (x-teljest) kui ka temperatuurist (y-

teljest), siis saadud joonise põhjal sõltub sademete tüüp antud vahemikus valdavalt vaid temperatuurist ehk y-teljest. Saadud joonis eristab hästi vihma ja lund, mille vaheline temperatuurijoon on tähistatud katkendjoonega, ning nende ülemineku ala, mis ühtib jääkruupidega. Samas ei saa antud parameetrite põhjal määrata kindlat jäätuvale vihmale iseloomulikku piirkonda: saab öelda, et üldistatult jäävad jäätuva vihma sündmused -10°C ja 0°C vahele, kuid nende protsentuaalne esinemine on võrreldes teiste nähtustega väike.

Järgnevalt on lähemalt uuritud konkreetset jäätuva vihma juhtumit Eestis, millele on rakendatud uuritud graafilisi meetodeid.

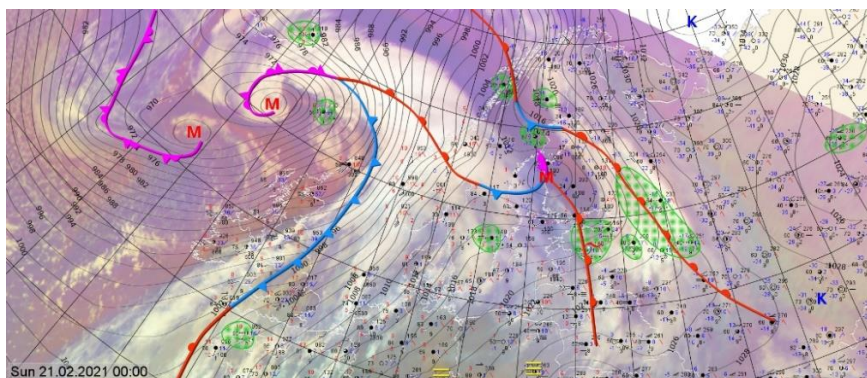
5. Juhtumianalüüs: jäätuv vihm Eestis 21.-23.02.2021

5.1 Ülevaade ilmast

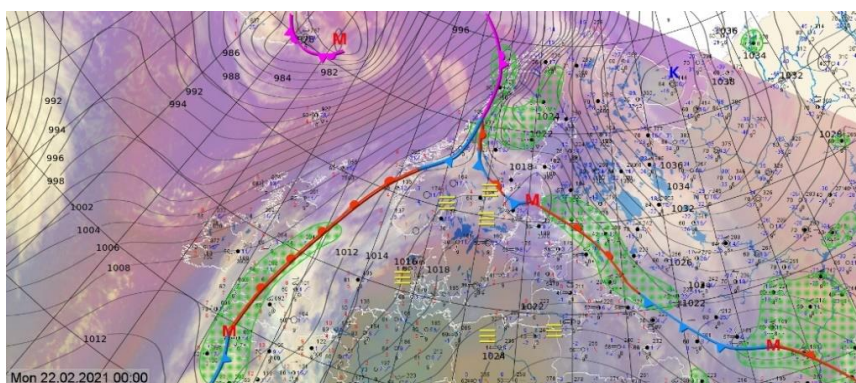
21.-23. veebruaril 2021. aastal sadas Eestis ulatuslikult jäätuvat vihma. Keskkonnaagentuuri vaatlusandmete põhjal, registreeriti esmalt jäätuvat vihma ja uduvihma Kirde-Eestis 21. veebruari õhtul. 22. veebruari hommikul esines valdavas osas Mandri-Eestis udu. Põhja-Eestis, kus 2 meetri kõrgusel mõõdetud õhutemperatuur langes alla 0°C, registreeriti mitmetes linnades jäätuvat vihma ja uduvihma. Õhtuks langes õhutemperatuur alla 0°C ka ülejäänud mandril ning jäätuvat vihma registreeriti veel mitmes linnas. Öö vastu 23. veebruarit oli valdavalt sajuta, kuid 23. veebruari hommikul ja päeval registreeriti taas jäätuvat vihma. Valdav osa nähtustest esines Ida-Eestis, kus 2 meetri kõrgusel mõõdetud õhutemperatuur püsis kogu päeva vältel alla 0°C. Lääne-Eestis õhutemperatuur tõusis ning mandrile laienes udu. Ida-, valdavalt Kirde-Eestis, registreeriti jäätuvat vihma 24. veebruari öötundideni.

5.2 Sünoptiline olukord

21. veebruaril 00UTC oli SYNOP (*Surface Synoptic Observations*) välja järgi Põhjalahe kohal osatsükloni kese. Joonisel 25 on kujutatud Keskkonnaagentuuri koostatud ringikaarti, millele on lisatud frondid, rõhkkondade keskmehed ja (rohelistega märgitud) sajualad. Kuna väli on koostatud UTC aja järgi, peab talvisel perioodil Eesti aja saamiseks liitma sellele +2 tundi. 22. veebruari 00UTC ringikaart (joonis 26) näitas kõrgrõhuala lähenemist Eestile kirdest. Eesti kohal püsis kahe ööpäeva vältel soe front, mis ulatus Läänemerelt Baltimaade ja Ida-Venemaa kohale.

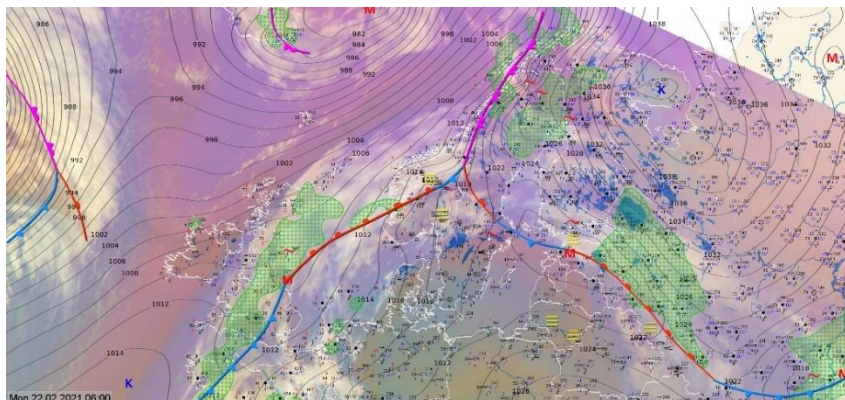


Joonis 25: 21.02.2021 00UTC ringikaart



Joonis 26: 22.02.2021 00UTC ringikaart

22. veebruari 06UTC ringikaardi järgi (joonis 27) oli osatsükloni kese jõudnud Läänemerelt Eesti kohale. Kell 12UTC (joonis 28) oli madalrõhkkond välja kohaselt liikunud üle Eesti kagu suunas. Madalrõhkkonna liikumisest põhjustatud tuulte pöördumisel tekkis Eesti kohale külm front, mis Valge mere kohal valitsevast kõrgrõhualast Eestisse külma õhumassi lükkas.

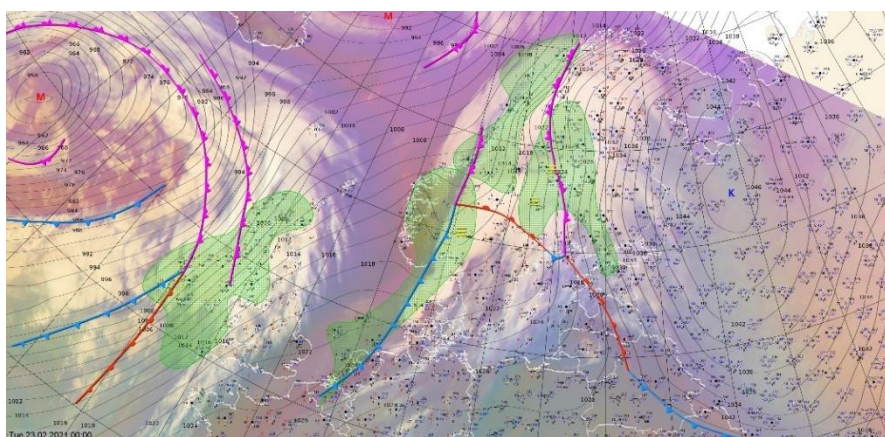


Joonis 27: 22.02.21 06UTC ringikaart



Joonis 28: 22.02.21 12UTC ringikaart

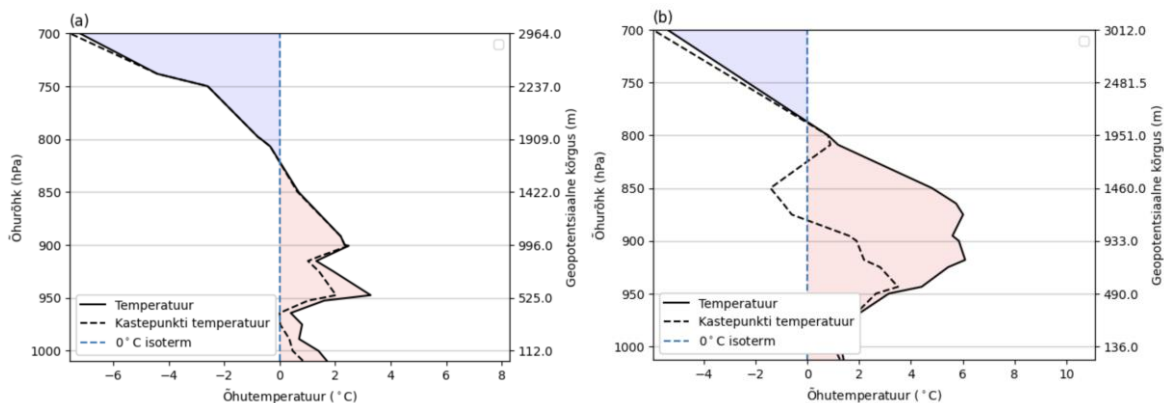
23. veebruari 00UTC ringikaardi (joonis 29) põhjal liikus madalrõhkkond kaugemale kagusse. Loode-Venemaa kõrgrõhuala külmema õhumassiga jätkas liikumist lõunasse, millest tulenevalt õhutemperatuuri - ja õhurõhu gradiendid Eestis suurenesid.



Joonis 29: 23.02.21 00UTC ringikaart

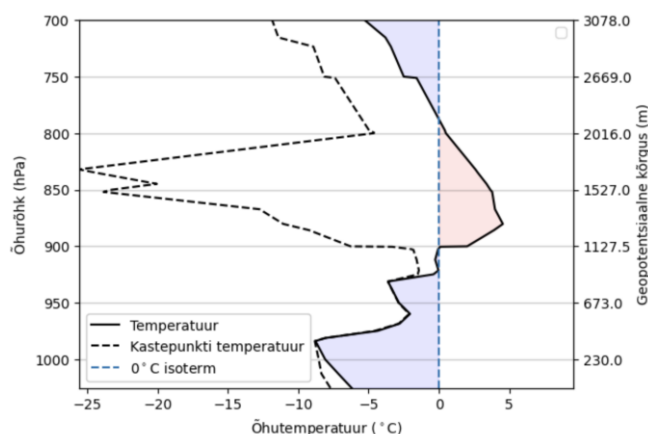
5.3 Atmosfääri vertikaalse temperatuuriprofiili areng

Analüüsimeks temperatuuri käiku atmosfääri vertikaalses läbilõikes, on kesköiste Tallinn-Harku raadiosondi andmete põhjal koostatud temperatuuri vertikaalsed profiilid. Joonisel 30 on näha sooja õhukihti maapinna lähedases kihis 21. ja 22. veebruaril, mis ulatub ligi 2000m kõrgusele. Mõlemal kuupäeval on märgata õhutemperatuuri kasvu kõrgusega ehk inversioonikihti, 22. veebruaril ulatub inversioonikiht oluliselt kõrgemale. Selline vertikaalne profiil on kooskõlas Eesti kohale paiknenud sooja frondiga: soe õhk on libisemas külmemas õhumassi kohale.



Joonis 30: Atmosfääri vertikaalne profiil, mis näitab temperatuuri (°C) ja geopotentsiaalse kõrguse sõltuvust (m) kuupäevadel a) 21.02.21 ja b) 22.02.21 Harjumaal.

Joonis 31, mis näitab 23. veebruari profiili, erineb oluliselt kahe eelneva ööpäeva omadest. Madalrõhkkonna liikumisel tekkinud külm front on alumistesse õhukihtidesse toonud külmemas õhumassi. Alla 0°C-ne õhutemperatuur ulatub kuni 900hPa rõhupinnani, sellele järgneb soojem õhukiht, mille geopotentsiaalne paksus on ligi 1000 m. Mainitud sooja õhukihti nimetatakse „soojaks ninaks“. Selle olemasolu kirjeldab põhilist jäätuva vihma tekkemehhanismi.

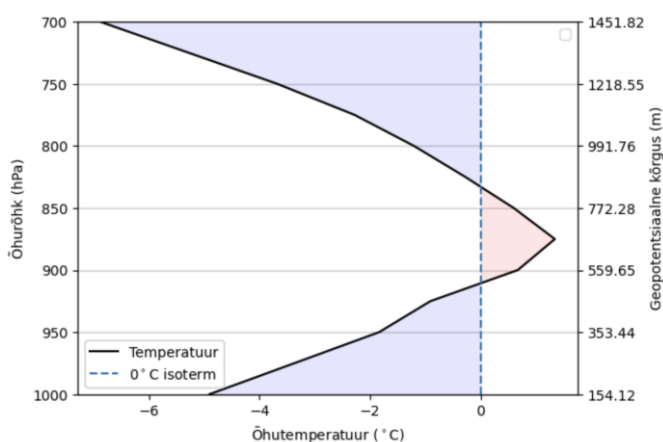


Joonis 31: Atmosfääri vertikaalne profiil, mis näitab temperatuuri (°C) ja geopotentsiaalse kõrguse sõltuvust (m) kuupäeval 23.02.21 Harjumaal.

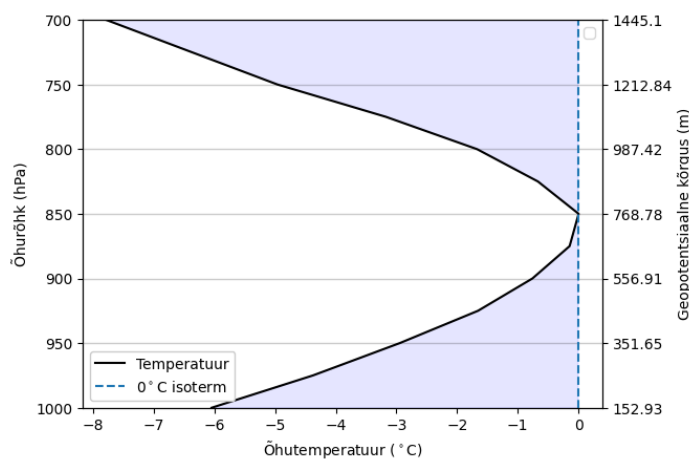
Tallinn-Harku raadiosondi andmete põhjal on atmosfääri vertikaalne profiil jäätuva vihma tekkeks sobiv vaid 23. veebruaril. Ometi registreeriti jäätuvat vihma Kirde- ja Ida-Eestis juba 21. veebruari õhtul. Siinkohal peab arvestama atmosfääri vertikaalsete profiilide erinevusega horisontaalses lõikes. Eestis tehakse raadiosondi mõõtmiseid vaid Tallinn-Harku jaamast, mis tavalistel tingimustel on piisav tegemaks üldistusi kogu Eesti kohta. Antud olukorras, kus üle Eesti kulgeb front, ei saa aga

eeldada, et Tallinn-Harku sondi keskõised mõõtmised on piisavad iseloomustamiseks tingimusi kogu Eestis terve ööpäeva vältel. Hindamiseks atmosfääri vertikaalset läbilõiget Kirde-Eestis, kus sadas enim jäätuvat vihma, on kasutatud ERA5 järelanalüüsil põhinevaid andmeid. Täpsemalt on vaatluse all Narva ja Kunda linnad, mis võiksid iseloomustada Kirde-Eesti ida ja lääne servasid. Kuna ERA5 andmed on lahutusega 0.5 laius- ja pikkuskraadi, on Narva puhul kasutatud andmepunkti, mis asub linnast linnulennul 13km kaugusel maismaal, Kunda andmepunkt asub linna enda lääneservas.

Esmane jäätuva vihma sündmus registreeriti Kundas 21. veebruaril kell 17UTC. Joonisel 32 on näidatud atmosfääri vertikaalset profiili Kunda kohal ERA5 andmete põhjal sel ajahetkel. Joonisel 33 on näidatud õhumassi profiili Narva ligiduses kell 22UTC, mil registreeriti Narvas jäätuvat vihma. Kunda profiilis on näha sooja nina olemasolu, Narva profiilis on soe nina alles moodustumas, järgneval tunnil kujunes andmete põhjal soe nina ka Narva kohale.



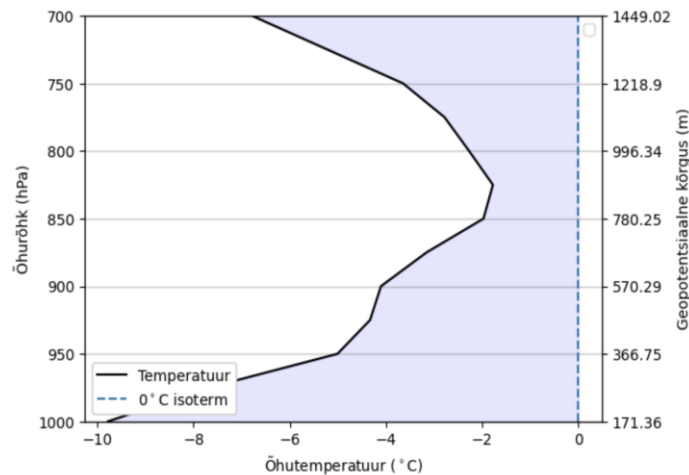
Joonis 32: Atmosfääri vertikaalne profiil, mis näitab temperatuuri (°C) ja geopotentsiaalse kõrguse sõltuvust (m) Kundas 21.02.21 17UTC.



Joonis 33: Atmosfääri vertikaalne profiil, mis näitab temperatuuri (°C) ja geopotentsiaalse kõrguse sõltuvust (m) Narva ligiduses 21.02.21 22UTC.

Vaadates atmosfääri profiile Kunda kohal alates 21. veebruari keskööst tunni kaupa, püsib linna kohal soe nina kuni kella 07UTC-ni 22. veebruari hommikul, pärast mida langeb temperatuur kõigil isobaarpindadel alla 0°C. Peale mainitud ajahetke ei registreeritud Kundas jäätuvat vihma.

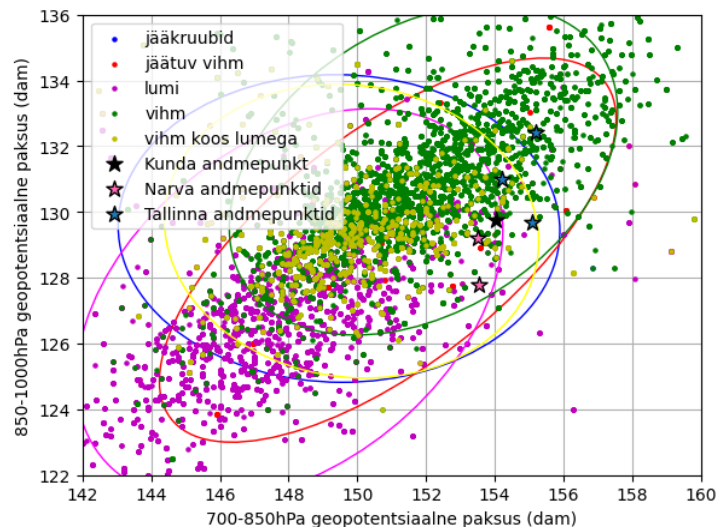
Narva kohale atmosfääri moodustus soe nina ajutiselt 22. veebruari keskööst hommikul 05UTC-ni, peale mida õhutemperatuur kogu atmosfääri lõikes taas alla 0°C langes. Samas registreeriti jäätuvat vihma ka mõned tunnid hiljem, 08UTC, mil atmosfääri vertikaalne profiil vastas joonisele 34. Selle põhjal võib järeldada, et kas (1) jäätuv vihm ei vaja enda tekkeks tingimata õhukihti, mille temperatuur oleks üle 0°C ja piisab ligilähedastest temperatuuridest või (2) ilmasensori poolt registreeritud jäätuva vihma nähtus polnud sel juhul usaldusväärne.



Joonis 34: Atmosfääri vertikaalne profiil, mis näitab temperatuuri (°C) ja geopotentsiaalse kõrguse sõltuvust (m) Narva ligiduses 22.02.21 08UTC.

5.4 Graafiliste meetodite rakendamine

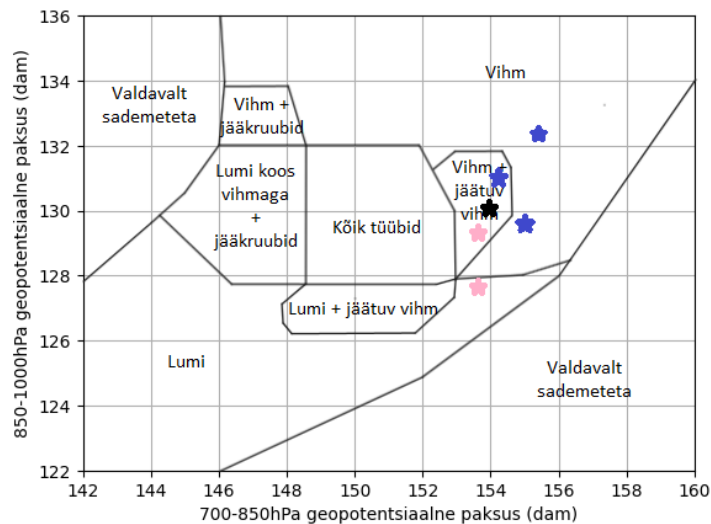
Järgevalt on andmepunktid, mis vastavad eelnevalt koostatud jooniste kuupäevadele ja kellaegadele, välja toodud graafilistel meetoditel. Kunda ja Narva andmepunktid on saadud ERA5 andmetest, mis tähendab, et meetodi rakendatavuse hindamiseks need ei sobi. Siiski illustreerivad need jäätuva vihma jaotust. Tallinna kolm andmepunkti põhinevad kolme järjestikuse ööpäeva 21.-23. veebruari raadiosondeerimise andmetel.



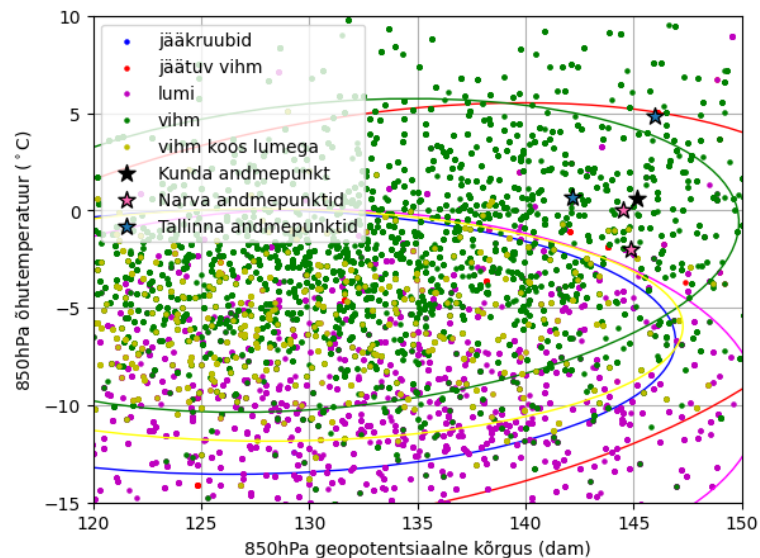
Joonis 35: Sademetüübi sõltuvus 700-850hPa õhukihi geopotentsiaalsest paksusest (x-telg) ja 850-1000hPa õhukihi geopotentsiaalsest paksusest (y-telg). Erinevate värvidega on tähistatud erinevad sademete tüübid. Vastavate värvidega

joonistatud usaldusellipsid näitavad piirkonda, kus leidub ~95% vastava värviga tähistatud nähtusest. Eriliste tähistega on näidatud juhtumianalüüsis käsitletud ajahetkede andmed.

Jooniselt 35 on näha, et kõik andmepunktid jäävad jäätuvale vihmale iseloomuliku usaldusellipsi piiridesse. Kui vaadelda andmepunkte joonisel 36 ilmneb, et Kunda, üks Narva (21.02 22UTC) ja Tallinna (21.02) andmepunktidest jäävad jäätuva vihma peamisse esinemispiirkonda. Teised andmepunktid on kahe standardhälbega defineeritud ellipsi piirides, kuid jäävad suurima esinemissagedusega piirkonnast napilt välja.

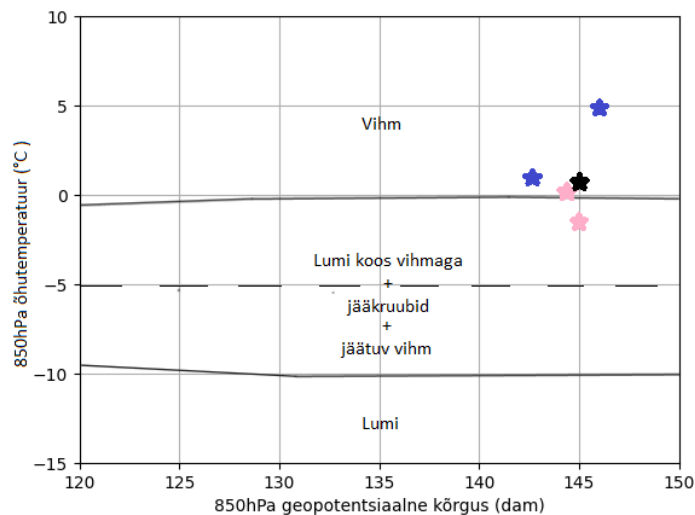


Joonis 36: Eesti tingimustele iseloomulike modifitseeritud sademetüüpide piirkondade sõltuvus 700-850hPa õhukihi geopotentsiaalsest paksusest (x-telg) ja 850-1000hPa õhukihi geopotentsiaalsest paksusest (y-telg). Antud vahemikud on leitud hajuvusdiagrammide, usaldusellipsite ja soojuskaartide visuaalsel analüüsil. Eriliste tähistega on näidatud juhtumianalüüsis käsitletud ajahetkede andmed.



Joonis 37: Sademetüübi sõltuvus 850hPa õhukihi geopotentsiaalsest kõrgusest (x-telg) ja temperatuurist (y-telg). Erinevate värvidega on tähistatud erinevad sademete tüübid. Vastavate värvidega joonistatud usaldusellipsid näitavad nähtuse piirkonda, kus leidub ~95% nähtusest. Eriliste tähistega on näidatud juhtumianalüüsis käsitletud ajahetkede andmed.

Andmepunktide esitamisel 850hPa meetodil ilmneb, et valdav osa juhtumianalüüsi sündmustest asuvad küll joonisel 37 näidatud usaldusellipsi piirides, kuid jäävad joonisel 38 väljaspoole defineeritud jäätuva vihma ala. Siinkohal tasub uuesti välja tuua, et jäätuva vihma usaldusellips on antud meetodi puhul niivõrd suure ulatusega, et selle defineerimine pole eriti informatiivne. Jäätuv vihm lisati joonistele 24 ja 38 vaid seetõttu, et kõrgemaid protsentuaalsed väärtused sademetüübi esinemistest jäid ligikaudselt sinna vahemikku. Kokkuvõtlikult saab öelda, et jäätuvat vihma sel meetodil prognoosida ei saa.



Joonis 38: Modifitseeritud sademetüüpide piirkondade sõltuvus 850hPa isobaarpinna geopotentsiaalsest kõrgusest (x-telg) ja temperatuurist (y-telg). Püsiva joonega eraldatud vahemikud on leitud hajuvusdiagrammide, usaldusellipsite ja soojuskaartide visuaalsel analüüsil. Katkendjoonega on eraldatud valdavad vihma ja lume esinemispiirkonnad. Eriliste tähistega on näidatud juhtumianalüüsis käsitletud ajahetkede andmed.

Graafilistelt meetoditelt järeldub, et juhtumianalüüsi puhul raadiosondi poolt mõõdetud ja ERA5 poolt arvutatud parameetrid vastavad ligikaudselt TREND meetodiga tuletatud piirkonnale, 850hPa meetodile toetuda ei saa. Võttes arvesse ainult Tallinn-Harku raadiosondeerimise andmeid, oleks 21. veebruaril TREND meetodi põhjal saanud Eestis jäätuvat vihma prognoosida. Jäätuv vihm esines sel ööpäeval küll Kirde-Eestis ja mitte Tallinnas, kuid võrreldes konkreetset Tallinna andmepunkti Narva ja Kunda andmepunktidega, paistavad välja nende lähedased väärtused. Olenemata sellest, et Tallinna puhul ei joonistunud sel kuupäeval vertikaalses profiilis välja sooja nina, olid õhukihtide geopotentsiaalsete paksuste väärtused Kundale, kus esines soe nina, sarnased.

Saab väita, et TREND meetodiga oleks antud olukorras võimalik olnud prognoosida jäätuvat vihma 21. veebruaril ning usaldusellipsite arvestamisel oleks kahtlus nähtuse tekkeks püsinud ka järgneval kahel ööpäeval. Siiski oleks kahel viimasel päeval pidanud tuginema ka mudelandmete.

Kokkuvõte

Töös uuriti kahe graafilise meetodi rakendatavust külmal perioodil sademetüübi prognoosimiseks Eesti tingimustes, tuginedes Tallinn-Harku aeroloogiajaama 2003.-2022. aasta oktoobri- kuni aprillikuu andmetele. Esimeseks meetodiks oli maapinna lähedaste geopotentsiaalsete paksuste ehk TREND meetod ja teiseks 850hPa isobaaripinna geopotentsiaalse kõrguse ja temperatuuri meetod. Analüüsi erinevate sademetüüpide esinemise statistilisi karakteristikuid sõltuvalt kummagi meetodi parameetritest ning koostati Eesti peamiste registreeritavate sademetüüpide esinemise soojusgraafikud ja hajuvusdiagrammid demonstreerimaks sademetüüpide jaotust. Samuti vaadeldi Eestis esinenud jäätuva vihma juhtumiuuringut.

Töös koostati TREND ning 850hPa geopotentsiaalse kõrguse ja temperatuuri meetodite näitel Eesti tingimustes kasutatavad versioonid ja hinnati nende praktilist rakendatavust sademetüüpide prognoosimiseks. Selgus, et kuigi Eesti versioonis asetsevad sademete tüüpidele iseloomulikud piirkonnad TREND graafikuga sarnaselt, olid nende ulatused erinevad. Koostatud joonis 17 suudab hästi eristada lund ja vihma, kuid nende nähtuste üleminekuosas, kus kattuvad ka jäätuvale vihmale ja jääkruupidele iseloomulikud piirkonnad, on keeruline neid üksteisest eraldada. Joonistelt 11-13 järeldub nähtuste suur hajuvus, mis tähendab, et vaid geopotentsiaalsete paksuste väärtuste põhjal sademetüübi prognoosimine ei ole täpne. Samas, on võimalik lisaks lumele ja vihmale eraldada piirkondi, kus vähem sagedaste sademete tüüpide esinemise tõenäosus (jääkruubid ja jäätuv vihm) on tavapärasest kõrgem.

Algselt pakutud joonis 9 määramaks sademetüüpe 850hPa isobaaripinna geopotentsiaalse kõrguse ja temperatuuri põhjal erines oluliselt saadud Tallinn-Harku andmete põhjal koostatud joonisest 24. Meetodi puhul kujunes oluliseks määrajaks temperatuur, täpsemalt -5°C temperatuurijoon, mis eraldab üksteistest valdavaid lume ja vihma piirkondi ning -10° ja 0°C vaheline ala, mis demonstreerib faaside üleminekut ja segusademeid. Meetod võimaldab määrata mainitud sademetüüpidele ja jääkruupidele iseloomulikke piirkondi, kuid on ebatäpsem jäätuva vihma prognoosimisel.

Kuigi uuritud graafilised meetodid ei võistle numbrilise prognoosiga, võivad need aidata otsustada prognoosi koostamisel sademetüüpide vahel juhul, kui mudelite prognoosid üksteisest erinevad. Samuti võivad need kujuneda kasulikuks kriitilistes olukordades, kui puudub ligipääs mudelitele. Sellisel juhul on raadiosondeerimine ainukene meetod, et saada informatsiooni kõrgemate õhukihtide kohta, mis on hädavajalik sademetüüpide määramiseks.

Antud töös viidi läbi ka juhtumiuuring 21-23.02.21 kohta, mil üle Eesti sadas jäätuvat vihma ning mille tulemusena suurenes hüppeliselt liiklusõnnetuste arv. Juhtumiuuringu käigus demonstreeriti, et jäätuva vihma teke oli sel juhul tihedalt seotud külma frontide olemasolul tekkinud sooja ninaga. Käsitatud kuupäevade ja tundide andmete esitamine graafilistel meetoditel näitas, et geopotentsiaalide meetodil oleks perioodi esimesel ööpäeval saanud Eestis jäätuvat vihma prognoosida. Teistel päevadel pidi aga toetuma mudelandmetele. Samuti järeldus, et sellise ekstreemse ilmastikunähtuse puhul pole vaid ööpäevased Tallinn-Harku aeroloogiajaama raadiosondi andmed piisavad kirjeldamiseks olukorda kogu Eestis. Juhul kui tekib kriisiolukord ning suureneb raadiosondeerimise tähtsus, peaksid mõõtmised toimuma mitu korda ööpäevas ning soovitatavalt Eesti erinevatest punktidest.

Tänuavaldused

Bakalaureusetöö autor tänab juhendajat Aarne Männik mitmekülgse juhendamise, põhjaliku tagasiside, panustatud aja ja motiveerivate sõnade eest. Samuti tänab autor Taimi Paljakut 850hPa meetodi tutvustamise ja Keskkonnaagentuuri ringikaartide kasutamise võimaluse eest. Suured tänud Miina Krabbile ja Külli Loodlale erinevate andmete osas konsulteerimise ning Keskkonnaagentuuri ilmasensori ja raadiosondi andmete kasutamise võimaluse eest.

Kasutatud kirjandus

Ahrens, C. Donald. (2007). *Meteorology today : an introduction to weather, climate, and the environment*. Belmont, CA :Thomson/Brooks/Cole.

American Meteorological Society. (2023). *Drizzle*. Glossary of Meteorology. <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Drizzle>

American Meteorological Society. (2021b). *Freezing rain*. Glossary of Meteorology. https://glossary.ametsoc.org/wiki/Freezing_rain

American Meteorological Society. (2021c). *Freezing drizzle*. Glossary of Meteorology. https://glossary.ametsoc.org/wiki/Freezing_drizzle

American Meteorological Society. (2017). *Geopotential*. Glossary of Meteorology. <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Geopotential>

American Meteorological Society. (2018). *Geopotential height*. Glossary of Meteorology. https://glossary.ametsoc.org/wiki/Geopotential_height

American Meteorological Society. (2012f). *Glaze*. Glossary of Meteorology. <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Glaze>

American Meteorological Society. (2016b). *Ice pellets*. Glossary of Meteorology. https://glossary.ametsoc.org/wiki/Ice_pellets

American Meteorological Society. (2021a). *Precipitation*. Glossary of Meteorology. <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Precipitation>

American Meteorological Society. (2012a). *Rain*. Glossary of Meteorology. <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Rain>

American Meteorological Society. (2012e). *Rain and snow mixed*. Glossary of Meteorology. https://glossary.ametsoc.org/wiki/Rain_and_snow_mixed

American Meteorological Society. (2012b). *Shower*. Glossary of Meteorology. <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Shower>

American Meteorological Society. (2013). *Snow*. Glossary of Meteorology. <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Snow>

American Meteorological Society. (2012d). *Snow grains*. Glossary of Meteorology. https://glossary.ametsoc.org/wiki/Snow_grains

American Meteorological Society. (2016a). *Snow pellets*. Glossary of Meteorology. https://glossary.ametsoc.org/wiki/Snow_pellets

American Meteorological Society. (2012c). *Snow shower*. Glossary of Meteorology. https://glossary.ametsoc.org/wiki/Snow_shower

American Meteorological Society. (2018). *Virtual Temperature*. Glossary of Meteorology. https://glossary.ametsoc.org/wiki/Virtual_temperature

Britannica. (n.d). Mount Mitchell. In *Britannica.com* dictionary. Retrieved May 16 2023, from <https://www.britannica.com/place/Mount-Mitchell>

Catto, J. L., Jakob, C., Berry, G., and Nicholls, N. (2012). *Relating global precipitation to atmospheric fronts*. *Geophysical Research Letters*, vol. 39. doi:10.1029/2012GL051736

Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store. (2023). *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S), Climate Data Store (CDS). doi: 10.24381/cds.adbb2d47

Gao L., Liu Y., Zhou W., Hu H. (2019) *An experimental study on the aerodynamic performance degradation of a wind turbine blade model induced by ice accretion process*. *Renewable Energy*, Volume 133, 2019, p 663-675. doi: 10.1016/j.renene.2018.10.032

Google. (n.d.) [Google Maps coordinates for Estonia]. Retrieved May 15 2023, from <https://www.google.com/maps/@58.2529942,24.7186608,5.95z>

Google. (n.d.) [Google Maps coordinates for North Carolina]. Retrieved May 15 2023 from <https://www.google.com/maps/@35.6195473,-81.8674302,6z>

Hu H., Gao L. (2021). *Wind turbine icing characteristics and icing-induced power losses to utility-scale wind turbines*. doi: 10.1073/pnas.2111461118

Ilmateenistus. (2020). *Keskkonnaagentuuri Ilmateenistus võttis kasutusele automaatsondeerimisjaama*. <https://www.ilmateenistus.ee/2020/03/keskkonnaagentuuri-ilmateenistus-vottis-kasutusele-automaatsondeerimisjaama/>

Keeter, K. K., Cline J.W. (1991) *The objective use of observed and forecast thickness values to predict precipitation type in North Carolina*. *Weather and Forecasting*. 6. p456-469. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1991\)006<0456:TouOOA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1991)006<0456:TouOOA>2.0.CO;2)

Krauklis A., Draveniece A. (2004). *Landscape seasons and air mass dynamics in Latvia*. *Geografiski Raksti/ Folia Geographica*, 2004, XII, pp. 16-48. https://www.foliageographica.lu.lv/fileadmin/user_upload/LU.LV/Apaksvietnes/Fakultates/www.gzzf.lu.lv/Folia_Geographica/FG_raksti_2004/2004Geografiskie_raksti_XII_2.pdf

National Weather Service, Raleigh NC. (n.d.). *Forecasting Predominate Precipitation Type Trends (TREND)*. North Carolina State University Collaborations. http://web.archive.org/web/20210422162538/https://projects.ncsu.edu/atmos_collaboration/nwsfo/storage/trend/

Owens R., Hewson T. (2018). *ECMWF Forecast User Guide*. ECMWF. doi:10.21957/m1cs7h

R. Forbes, A. Tompkins. (2011). *An improved representation of cloud and precipitation*. ECMWF Feature article from Newsletter Number 129 – Autumn 2011. doi: 10.21957/nfgulzhe

Hunter J., Dale D., Firing E., Droettboom M., the Matplotlib development team. *Plot a confidence ellipse of a two-dimensional dataset*. https://matplotlib.org/stable/gallery/statistics/confidence_ellipse.html

- NN. (2021). *Jäine ja talvine veebruar tõi liikluskahjude rekordi*. Postimees. <https://www.postimees.ee/7193499/jaine-ja-talvine-veebru-uar-toi-liikluskahjude-rekordi>
- Ордена Ленина Гидрометеорологический научно-исследовательский центр СССР. (1986). *Руководство по Краткосрочным Прогнозам Погоды: Часть 1*. Государственный Комитет СССР по Гидрометеорологии и Контролю Природной Среды.
- Saarniit A. (2021) *Jäävihm tõi erakorralise meditsiini keskusesse rekordhulga pöördumisi*. Postimees. <https://www.postimees.ee/7188494/jaavihm-toi-erakorralise-meditsiini-keskusesse-rekordhulga-poordumisi>
- Salby M. L. (2012) *Physics of the Atmosphere and Climate*. Cambridge University Press.
- Schalp C. (n.d.) *An Alternative Way to Plot the Covariance Ellipse*. CarstenSchelp.github.io. https://carstenschelp.github.io/2018/09/14/Plot_Confidence_Ellipse_001.html
- Stull R. (2017). *Hypsometric Equation*. Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science, p17. https://www.eoas.ubc.ca/books/Practical_Meteorology/prmet102/Ch01-atmos-v102b.pdf
- Sõnaveeb. (2021a). Jäävihm. In Sõnaveeb.ee dictionary. Retrieved May 14 2023, from <https://sonaveeb.ee/search/unif/dlall/dsall/j%C3%A4%C3%A4vihm/1>
- Sõnaveeb. (202b). Kiilasjäa. In Sõnaveeb.ee dictionary. Retrieved May 14 2023, from <https://sonaveeb.ee/search/unif/dlall/dsall/kiilasj%C3%A4%C3%A4/1>
- UCLA Statistical Consulting Group. (n.d.) *FAQ: WHAT IS THE COEFFICIENT OF VARIATION?* <https://stats.oarc.ucla.edu/other/mult-pkg/faq/general/faq-what-is-the-coefficient-of-variation/>
- Wallenius T., Lehtomaki V. (2015). *Overview of cold climate wind energy: challenges, solutions, and future needs*. WIREs Energy Environ. doi: 10.1002/wene.170
- Õunapuu A. (2021). *Jäätunud kõnnitee Tallinnas Tõnismäel tänavu 23. veebruaril*. ERR. <https://www.err.ee/1608430403/haridusamet-soovitab-tallinna-koolijuhtidel-jaavihma-tottu-too-umber-korraldada>