

Tartu Ülikool
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Loodusgeograafia ja maastikuökoloogia õppetool

Reidar Sarapu

**MODELLEERIMISSÜSTEEMI WRF RAKENDAMINE ILMAENNUSTAMISEL
EESTIS JA TULEMUSTE VERIFITSEERIMINE**

Magistritöö

Juhendaja:
Jaak Jaagus, prof.

Tartu 2010

SISUKORD

SISSEJUHATUS	3
1. NUMBRILISED ILMAPROGNOOSI MUDELID	4
1.1. Ajalooline ülevaade	4
1.2. Ilmaprognoosi koostamine mudeliga	5
1.3. Ülevaade WRF mudelist	8
1.4. WRF modelleerimissüsteemi komponendid	9
2. WRF MUDELI KÄIVITAMINE	11
2.1. WRF eeltötlussüsteem	11
2.2. WPS käivitamine	12
2.3. WRF lahendaja käivitamine	16
2.4. Järeltöötlus	17
3. HINDAMISMEETODID	18
4. LÄHTEANDMED	20
4.1. WRF prognoosid	20
4.2. Vaatlusandmed	20
5. TULEMUSED	22
5.1. Hinnang 14.07.2008 sademete prognoosile	22
5.2. Hinnang 13.06.2009 sademete prognoosile	27
5.3. Hinnang 14.07.2008 õhurõhu, õhutemperatuuri ja tuulekiiruse prognoosile	31
5.4. Hinnang 13.06.2009 õhurõhu, õhutemperatuuri ja tuulekiiruse prognoosile	35
KOKKUVÕTE	38
SUMMARY	40
KIRJANDUS	41

SISSEJUHATUS

Ilmateenistuse põhiülesannete hulka kuulub ilmaprognooside koostamine, mis võimaldab ilmaolude poolt tekkivate kahjude ennetamist ning erinevate tegevusvaldkondade omavahelist koordineerimist, mis sõltuvad ilmastikuoludest. Eesti rahvusliku ilmateenistuse funktsioone täidab Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut (EMHI), kus toimub ilmavaatlusandmete operatiivne kogumine, töötlemine ja arhiveerimine ning koostatakse riiklike teenistuste kui ka laiemal avalikkuse huvidest lähtuvalt ilmaprognoose (Serebrijan, 2009).

Tänaseks on ilmaennustuse koostamise üheks abivahendiks numbriline ilmaennustusmudel, mis võimaldab sünoptikul jälgida ilmaprotsesside (näiteks äikesetorm võimalikku arengut ning sellega kaasnevat tugevat hoogsademeid) ajalist võimalikku arengut.

Alates 2003 aastast käivitus Eestis Tartu Ülikooli, EMHI ja Soome Meteoroloogia Instituudi (FMI) vaheline koostööprojekt. Projekti eesmärgiks oli kõrglahutusliku eksperimentaalse kvaasioperatiivse ilmaennustuskeskkonna käivitamine Eestis. Projekt baseerub piiratud ala numbrilisel ilmaennustusmudelil HIRLAM (*High Resolution Limited Area Model*) ja Tartu Ülikooli atmosfäärifüüsika labori juures arendataval mittehüdrostaatiliselt laiendusel. Projekti tulemusena käivitati EMHIs pidevas režiimis hüdrostaatiline (11 km lahutusega) ja mittehüdrostaatiline (3.3 km lahutusega) numbriline ilmaennustuskeskkond, kus ennustuste pikkuseks on 54 ja 36 tundi (Ilmatarga koduleheküljel; EMHI koduleheküljel).

Aastast 2007 on Eesti HIRLAMi konsortsiumi täisliige, mis on toonud kaasa kohustuse osaleda HIRLAMi teadus- ja arendustegevuses (EMHI koduleheküljel).

Ilmunud on mitmeid artikleid ja uurimustöid seoses HIRLAMi mudeli rakendamisega Eestis, näiteks HIRLAMi tuuleprognooside hindamine Läänemeres (Ansper, Fortelius; 2003), HIRLAMi õhutemperatuuri prognooside hindamine (Sarapu, Kadaja; 2004), 2005. aasta augusti ilmaolude modelleerimine HIRLAMi ja RegCM mudeli baasil (Tomingas, Sarapu; 2007), udu ennustamine ilmaennustusmudeliga HIRLAM (Pedassaar, Männik; 2010) ning 2003. aasta augustikuu tugevad hoogsademed Põhja-Eestis (Luhamaa, 2003).

Käesolevas uurimustöö eesmärgiks on seadud mesomastaapse ilmamudeli WRF käivitamine ning rakendamine ekstreemsete ilmasituatsioonide ennustamisel. Töö käigus on modelleeritud sademete, õhurõhu, õhutemperatuuri ja tuulekiiruse esinemist 14.07.2008 ja 13.06.2009 kuupäeval. Saadud tulemusi on võrreldud meteoroloogilistes vaatlusjaamades mõõdetud tulemustega.

1. NUMBRILISED ILMAPROGNOOSIMUDELID

1.1. Ajalooline ülevaade

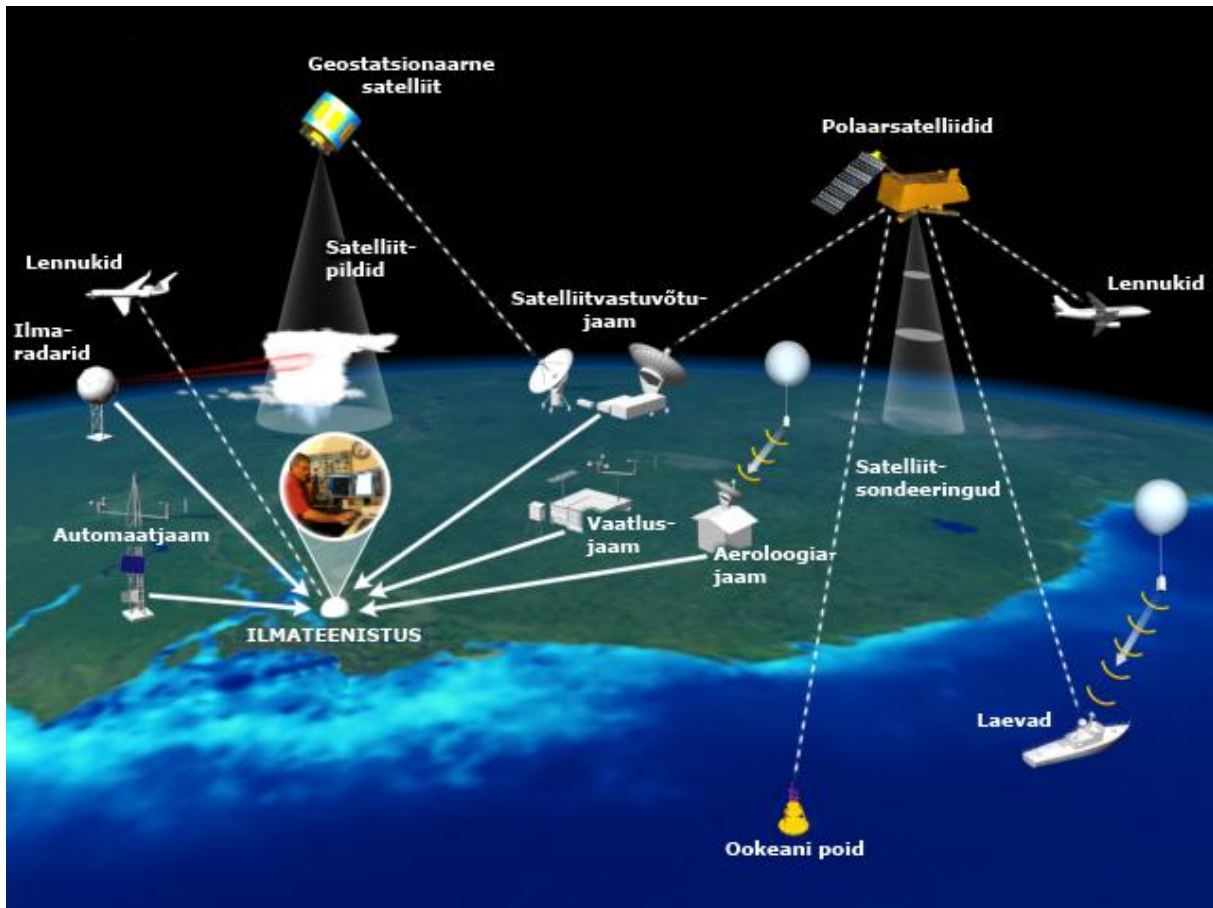
Idee luua atmosfääris toimuvate liikumiste matemaatiline mudel tekkis 20. sajandi algul. Norra teadlane Vilhelm Bjerknes defineeris probleemi esimesena 1904. aastal: prognoosimine pole midagi muud kui atmosfääri liikumisvõrrandite integreerimise probleem. Tema ise antud probleemi siiski lahendada ei püüdnud. Esimese katse numbriliste meetoditega ennustada ilma teostas inglise matemaatik Lewis Fry Richardson. Töö käigus pakkus ta välja idee, et hüdrodünaamika võrrandite süsteem tuleb lahendada ligikaudsete numbriliste meetodite abil. Numbrilise meetodi põhiidee seisneb selles, et lõpmata väikeste suurustega opereerimine – integreerimine ja tuletiste võtmine – asendatakse tehetega tegelike lõplike suurustega – liitmise ja lahutamisega. Sellisel moel taandub keeruline diferentsiaalvõrrandite süsteem lihtsamaks algebralisteks võrrandite süsteemiks (Männik, 2005).

Hinnanguliselt oleks Richardson 6-tunnise prognoosi arvutamiseks reaalajas vajanud 64000 assistendi abi. Tulemuseks sai Richardson katastroofilise olukorra – maapinna õhurõhu tendentsiks saadi 145 hPa kuue tunni kohta. Arvutuste läbiviimise jaoks oli Richardsonil kasutada ainult mõningad õhupalli sondeerimisandmed, millest jäi aga väheseks. Põhimõte, mida Richardson kasutas oli küll korrektne, kuid oma ajast liiga ees. Tema raamat “*Weather prediction by numerical process*” Võõrkeelsed sõnad peaks olema kursiivis (“Ilmaennustamine numbrilise meetodiga”) aastast 1922 on kasulik isegi tänapäeval (Richardson, 1922). Et saada paremaid tulemusi oli vaja rohkem informatsiooni kõrgemate õhukihtide kohta. Seega oli mudelite käikumineku eelduseks aeroloogajaamade tiheduse suurenemine ja arvutustehnika kasutusele võtmine.

Peale II Maailmasõda, mis tõi kaasa kiire tehnika arengu toimus meteoroloogiliste vaatlusjaamade laiendamine ning kasutusele võeti elektronarvutid. Esimene numbriline ilmaprognoos avaldati 1950. aastal Jule Charney, John von Neumanni ja Ragnar Fjortofti poolt. Eksperiment oli tehtud USAs Princetonis kasutades esimest elektronarvutit ENIAC ning tulemused olid head (Savijärvi, 1994).

1.2. Ilmaprognoosi koostamine mudeliga

Ilmaprognoosi koostamine on keeruline protsess, mille käigus prognoosija peab hoolikalt analüüsima erinevatest allikatest pärinevat meteoroloogilist informatsiooni (näiteks meteoroloogilised vaatlusandmed, joonis 1), sealhulgas numbriliste ilmaennustusmodelite tulemusi.



Joonis 1: WMO globaalne meteoroloogiliste vaatluste süsteem (Comet Program, 2010)

Ilmaennustamise numbrilise ilmaennustusmudeliga (NWP) jaotada üldjoones viieks osaks (joonis 2). Esimene osa hõlmavad eeltööd, mida tuleb teostada numbrilise ilmaennustusmudeli tööle rakendamiseks. Eeltöö seisneb meteoroloogiliste vaatlusandmete kogumises (joonis 1), mis on olulised atmosfääri hetkeseisundi määramisel. Andmed saadakse satelliitidelt, meteoroloogilistest vaatlusjaamadest, lennukitelt, aeroloogilistest vaatlusjaamadest (raadiosondi vaatlused ja pilootpallivaatlused). Kogutud vaatlusandmetega tuleb teostada erinevaid teste andmete kvaliteedi kontrolliks, millega välistatakse vigaste vaatlusandmete sattumine mudeli analüüsi. Seejuures on oluline roll andmete kvaliteedi

määramisel kogenud meteoroloogil. Antud protsessi läbiviimisel on määravaks piisava arvutusressursi olemasolu.

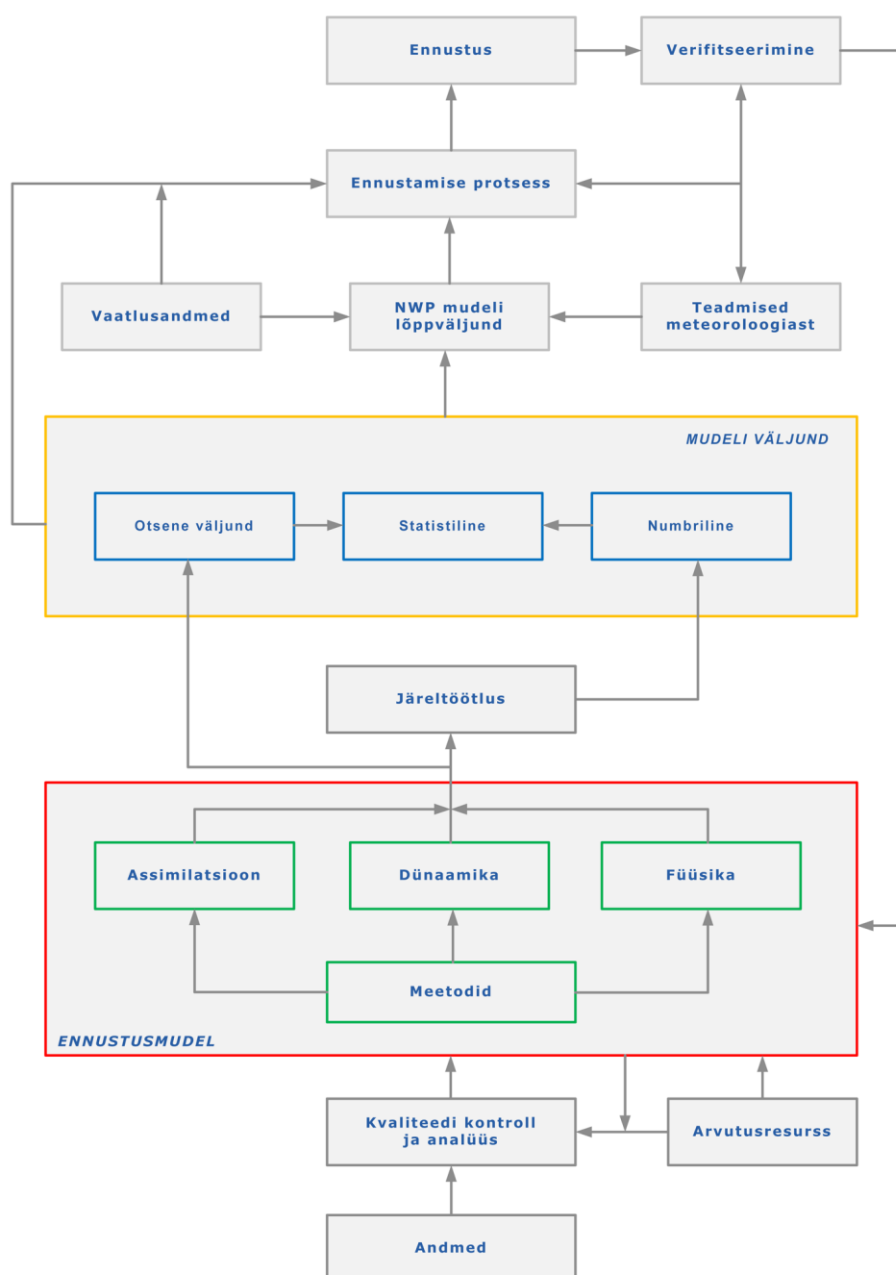
Teine osa seisneb mudel arvutuste teostamises, mille südamiku moodustavad: meetodid, andmete assimilatsioon, mudeli dünaamika ja füüsika osa. Andmete assimilatsioon (analüüs) on keeruline protsess (süsteem), mille käigus toimub meteoroloogiliste vaatlusandmete teisendamine mudeli poolt kasutatavale korrapärasele võrgustikule. Teisendusprotsessi käigus kasutatakse tavaliselt eelnevat ennustust, mida uuendatakse värskete meteoroloogiliste vaatlusandmetega. NWP mudeli dünaamika osa käsitleb eelkõige protsesse, mis on seotud õhu liikumisega ja selle poolt tekkivate jõudude (rõhu gradientjõud) kirjeldamisega vastavate võrrandite (horisontaalse ja vertikaalse liikumishulga, massijäävuse ja termodünaamika) abil. Mudeli füüsika osas kirjeldatakse protsesse, mille mõõtmed on väiksemad, kui mudeli enda lahusus, kuid kumulatiivne efekt on mudelis tajutav. Samuti kirjeldatakse füüsikalises osas protsesse, mis toimuvad atmosfääri ja erinevate väliste tegurite vahel ning pilvede ja sademete mikrofüüsikat. Mudeli neljas komponent (meetodid) määrab ära mudeli omadused:

- kuidas toimub matemaatiliselt prognoosivõrrandite lahendamine;
- millisel kujul ja kuidas on andmed mudelis esitatud;
- milline on modelleeritav domeen (uurimisala);
- milline on mudelis kasutatav koordinaatsüsteem.

Kolmandas osas toimub mudeli tulemuste järeltöötlus, mille käigus teostatakse järelarvutused ning mudeli väljund muudetakse loetavale kujule. Lisaks saadakse prognoositud muutujatest diagnostilised ja meteoroloogilised parameetrid ning saadud muutujad interpoleeritakse nii vertikaalselt (erinevatele rõhutasanditele) kui ka horisontaalselt mudeli võrgustiku sõlmpunktidesse.

Neljas osa käsitleb NWP mudeli väljundeid, mida võime jaotada piltlikult kolmeks: otsene, statistiline ja numbriline väljund. Otsese väljundi puhul on tegemist väljundandmetega, mis saadakse NWP mudelist ilma järeltöötlust läbimata. Saadud tulemused paiknevad vertikaalselt ja horisontaalselt mudeli võrgupunktides ning andmete interpoleerimist (näiteks võrgupunktide vahele) ei teostata. Väljundit võib kasutada eeskätt mudeli diagnostiliste produktide koostamiseks, mis annab ülevaate NWP mudeli sisupoolelt. Mudeli numbriline väljund on saadud järeltöötluse käigus, kus kasutatakse mudeli lahususega võrreldes erinevat lahusust. Sellist meetodit kasutades koostatakse geopotentsiaali, aluspinna temperatuuri ja merepinnale taandatud õhurõhu kaardid. Statistiline väljund koostatakse numbrilise ja mudeli otsese väljundi alusel selleks, et ennustada teatud ilmaolude esinemist, näiteks nähtavust ja äikesetormide esinemist.

Ennustuse koostamise viies etapp seisneb NWP mudeli lõppväljundi kombineerimisel värskete meteoroloogiliste vaatlusandmetega ning ennustuse koostaja (prognoosija) kogemustega erinevate ilmaprotsesside tekkimise ja arenemise kohta. Samuti oluline komponent on mudeli tulemuste verifitseerimine, mis võimaldab prognoosi koostajal arvestada mudeli puudujääkidega ilmaolude ennustamisel. Verifitseerimise tulemus võimaldab NWP mudelis teostada parandusi ja täiendusi mudeli tulemuste paremaks muutmisel.



Joonis 2: Ilmaprognoosi koostamise plokkskeem, kasutades numbrilist ilmaprognoosi mudelit.

1.3. Ülevaade WRF mudelist

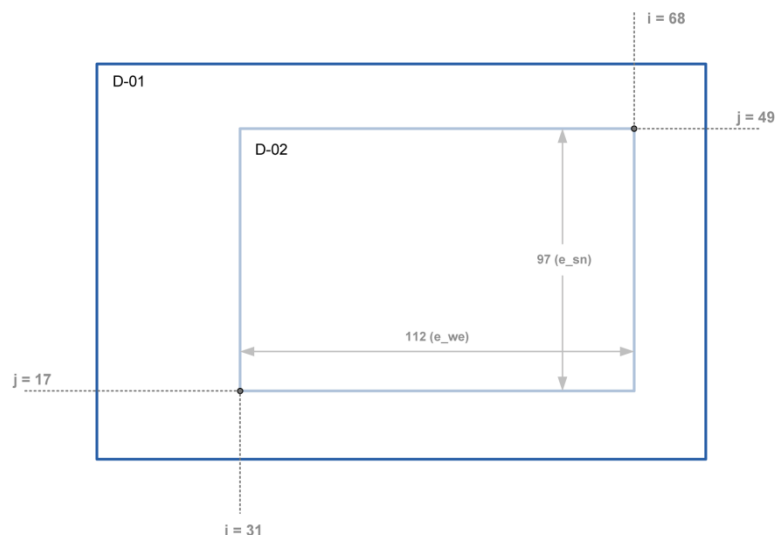
Mesoskaala mudeli MM5 (*Mesoscale Model 5*) järgmise põlvkonna mudeliks on WRF (*Weather Research and Forecasting*) mudel, mille esimene versioon 1.0 (beetaversioon) nägi ilmavalgust 2000. aastal. Esimene ametlik WRF mudeli versioon ilmus 2004. aastal, versiooninumbriga 2.0 ning alates 2010. aasta aprillikuust on WRF mudeli ametlikuks versiooninumbriks 3.2 (WRF users homepage, 2010).

Mesomudeli MM5 areng sai alguse 1960ndatel aastatel, kui Rick Anthes esitas 3-kihilist orkaani mudelit. Hetkel on mesomudeli MM5 versiooninumbriks 3 (MM5v3). Mesomudeli rakendus oli algselt seotud eelkõige uurimustööde läbiviimiseks, hiljem rakendati mudelit operatiivse ilmaennustuse juures.

WRF mudel oli juba algselt loodud operatiivseks ilmaennustuseks ja uurimustööde läbiviimiseks. Lisaks baseerub WRF mudel uuematel tehnoloogiatel ning seega on võimalik antud mudelit käivitada erinevatel arvutiplatvormidel (sülearvutist kuni superarvutini). Mudeli põhiomadusteks ja funktsiooni on:

- mudeli rakendamine hüdrostaatilisest ja mittehüdrostaatilisest (arvestab vertikaalset kiirendust) režiimis. Mittehüdrostaatiline töörežiim on oluline vertikaalselt arenevate ilmastiku nähtuste modelleerimisel;
- võimaldab pesastada (alamdomeenide kasutamine põhidomeenis, joonis 3) modelleeritavaid domeene;
- tänu innovaatilisele tarkvara arhitektuurile on kasutajatel lihtne teostada muudatusi lähtekoodis.

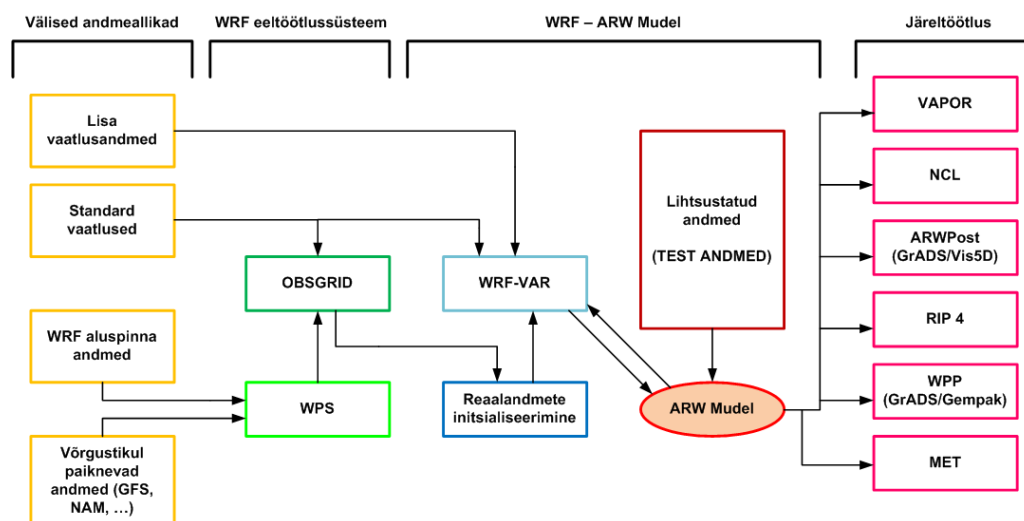
Mudeli arendustöö toimub koostöö projekti raamistikus, milles osalevad Rahvuslik Atmosfääriuurimiskeskus (*NCAR - National Center for Atmospheric Research*), Rahvuslik Keskkonnakaitse Keskus (*NCEP - National Centers for Environmental Prediction*), Ilmaennustussüsteemide Laboratoorium (*FSL - Forecast Systems Laboratory*), Õhujõudude Ilmaagentuur (*AFWA - Air Force Weather Agency*), Föderaalne Lennuamet (*FAA - Federal Aviation Administration*) ning lisaks mitmed suuremad ülikoolid nagu näiteks Oklahoma ülikool, Utah ülikool, Illinoisi ülikool (WRF koduleheküljel).



Joonis 3: Alamdomeeni (D-02) kasutamine põhidomeenis (D-01).

1.4. WRF modelleerimissüsteemi komponendid

WRF modelleerimissüsteem koosneb järgmistest komponentidest (joonis 4): WRF eeltöötlussüsteem (*WPS – WRF Preprocessing System*), variatsioonianalüüsisüsteem (WRF-VAR), WRF lahendaja, järeltöötlustarkvara.



Joonis 4: WRF-ARW modelleerimissüsteem ja selle komponendid: (1) WRF eeltöötlustarkvara, (2) variatsioonianalüüsitarkvara, (3) WRF lahendaja ja (4) järeltöötlus- ja visualiseerimistarkvara.

Eeltöötlussüsteem (WPS) on vajalik eeskätt reaalandmetel baseeruva simulatsiooni teostamiseks, mille põhifunktsioonideks on:

- modelleeritava ala (domeeni) defineerimine;
- maapealsete andmete interpoleerimine (maakasutus, aluspinnatüüpide määramine);
- meteoroloogiliste andmete interpoleerimine defineeritud domeeni (andmed võivad pärineda teistest mudelitest).

Variatsioonianalüüsi komponent on vajalik juhul, kui modelleerimisel soovitakse teostada vaatlusandmete interpoleerimist mudeli võrgustikule. WRF mudeli ametlikus versioonis (3.2) on kasutusel 3D-VAR variatsioonianalüüs.

Mudeli põhikomponendi (südamiku) moodustab WRF lahendaja, mis koosneb mitmest initsialiseerimisprogrammist, mida kasutatakse lihtsustatud kui ka reaalajas teostatavate modelleerimiste korral, numbrilisest integreerimisprogrammist ning ühe- ja kahesuunalist pesastamist võimaldavast programmist. Kokkuvõtlikult on võimalik mudeli abil koostada nii regionaalseid kui ka globaalseid rakendusi, rakendades mudelit hüdrostaatilises või mittehüdrostaatilises režiimis (vaikimisi toimib WRF mudel mittehüdrostaatilises režiimis).

Järeltöötlustarkvara koosneb rakendustest (tarkvarast), mis võimaldavad teostada mudeli tulemuste analüüsi ning andmete visualiseerimist. Järgnevalt on esitatud loetelu tarkvarast, mis võimaldavad tulemuste analüüsi ja visualiseerimist. Kuna mudel toetab NetCDF, GRIB-1/2, PHD-5, PnetCDF, BUFR andmeformaate, siis järeltöötlustarkvara peab samamoodi lugema ja kirjutama antud andmeformaate.

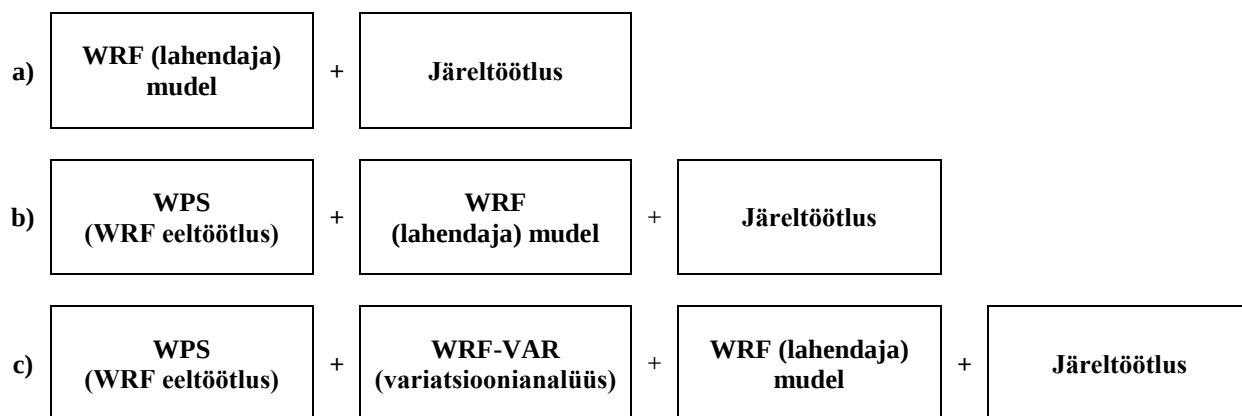
Üks levinumaid programme, millega on võimalik teostada mudeli väljundi analüüsi ja visualiseerimist on GrADS (*Grid Analysis and Display System*). Programm võimaldab lihtsat ligipääsu (sh. manipuleerimine ja visualiseerimine) erinevatele andmeformaatidele (nt. GRIB-1/2, NetCDF, BUFR). GrADS kasutab 5-mõõtmelist (5D) andmete paigutamise keskkonda. Parameetrid, mis defineerivad 4-mõõtmelise (4D) keskkonna on pikkus- ja laiuskraad, kõrgus ning aeg ning suurused mida kasutatakse võrgustikel ansambel ennustuste korral (5D). Andmeformaat on kirjeldatud GrADSi jaoks eraldi deskriptorfailis.

WRF mudeli installeerimisel on soovitatav installeerida arvutisse NCL (*NCAR Command Language*). Tegemist on interpreteeritava keelega, mis võimaldab teaduslike andmete visualiseerimiseks ja analüüsi. See toetab netCDF3/4, GRIB1/2, HDF-SDS, HDF4-EOS, binaarset ja ASCII formaate. Programm sisaldab mitmeid sisseehitatud analüüsiks vajalikke funktsioone. Võimaldab hõlpsasti luua erinevad graafilisi väljundeid.

2. WRF MUDELI KÄIVITAMINE

WRF mudelit on võimalik käivitada kolmes režiimis (joonis 5):

- (a) lihtsustatud režiim;
- (b) reaajas, ilma variatsioonianalüüsita;
- (c) reaajas, kasutades variatsioonianalüüsi.



Joonis 5: WRF mudeli käivitusrežiimid

Töö käigus toimub WRF mudeli käivitamine reaajas vastavalt joonisel 5-b esitatud skeemile. Antud skeemi kohaselt peab olema arvutisüsteemis edukalt installeeritud (kompileeritud) WRF mudeli järgmised komponendid:

1. WRF eeltötlussüsteem (WPS);
2. WRF lahendaja (mudeli põhikomponent);
3. tulemuste järeltötlustarkvara.

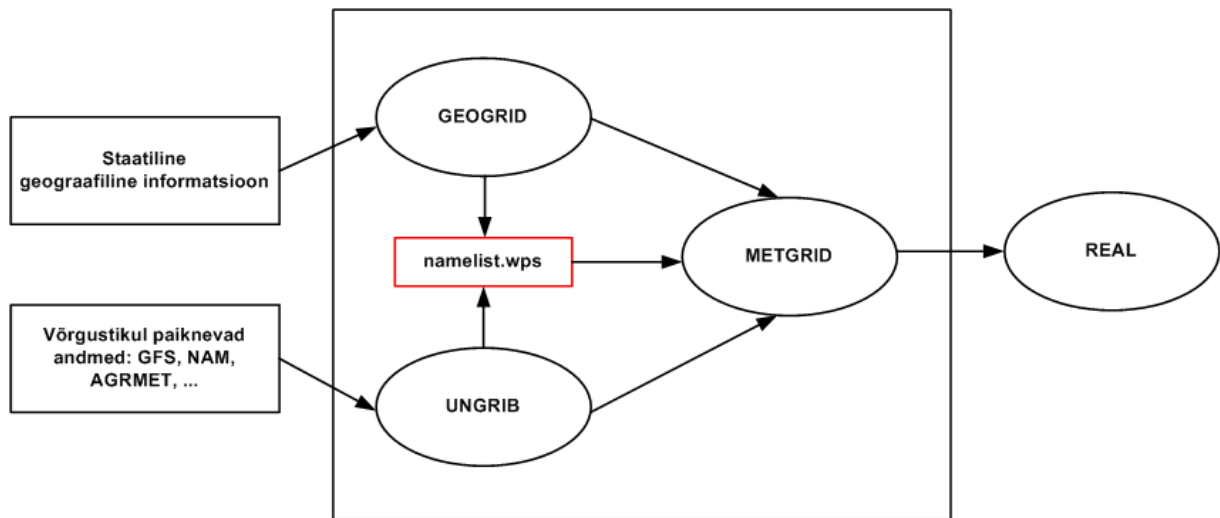
2.1. WRF eeltötlussüsteem

Eeltötlussüsteem koosneb kolmest erinevast komponendist (programmist), mille eesmärk on andmete ettevalmistamine reaajas modelleerimiseks, mida omakorda kasutab WRF mudeli põhikomponendi programm „real.exe“. Igal programmil on oma ülesanne:

- (a) **geogrid.exe** - programmi eesmärk on mudeli domeeni (ala) defineerimine ning staatiliste geograafiliste andmete interpoleerimine mudeli võrgustikule;
- (b) **ungrib.exe** – võimaldab lahti pakkida (ekstraheerida) GRIB formaadis olevaid meteoroloogilisi andmeid (välju);

(c) **metgrid.exe** – teostab ekstraheeritud meteoroloogiliste väljade (mida teostab ungrid.exe) horisontaalset interpoleerimist mudeli võrgustikule, mille defineerib geogrid.exe.

Programmide vahelist andmevahetust illustreerib joonis 6.



Joonis 6: WRF eeltötlussüsteemi komponentide vaheline andmevahetusskeem.

Jooniselt 6 on näha, et WRF eeltötlussüsteemi komponendid kasutavad ühist konfiguratsiooni/sätete faili „**namelist.wps**“. Antud fail sisaldab parameetreid, mis määravad ära WPS programmide töö. Lisaks „**namelist.wps**“ failile määravad programmide tööd veel erinevad tabelid:

- **geogrid.tbl**: tekstifail, mis sisaldab erinevaid parameetreid, millega määratakse andmete interpoleerimine geogrid.exe poolt;
- **metgrid.tbl**: tekstifail, mis sisaldab meteoroloogiliste väljade interpoleerimiseks vajalikke parameetreid metgrid.exe jaoks;
- **vtable**: erinevate andmeformaate (nt. GRIB-1/2) kodeeringutabelid.

2.2. WPS käivitamine

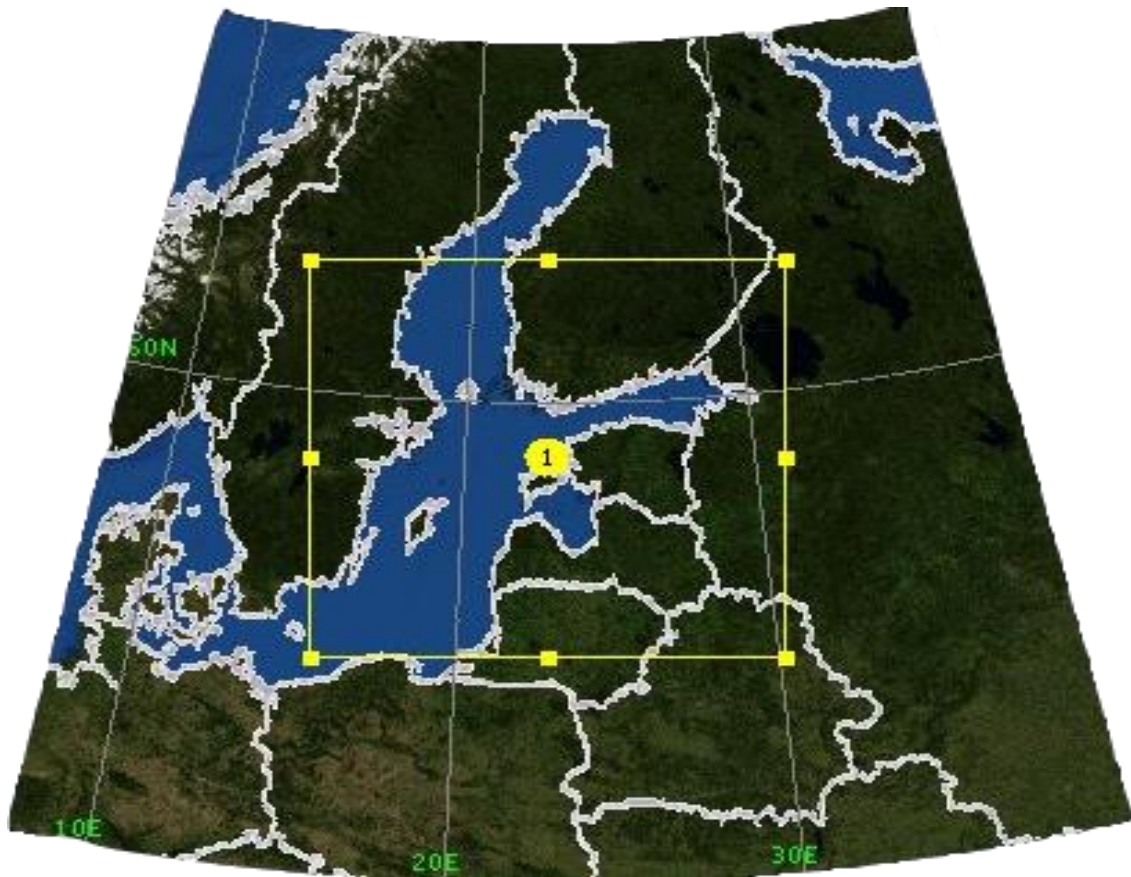
WRF eeltötlussüsteemi käivitamine toimub kolmes etapis:

1. tuleb defineerida modelleeritav domeen (geogrid);
2. meteoroloogiliste väljade ekstraheerimine GRIB andmetest (ungrid);
3. meteoroloogiliste väljade horisontaalne interpoleerimine (metgrid).

Mudeli domeen on defineeritud failis „namelist.wps“ alamseksioonis „geogrid“. Lisaks tuleb defineerida parameetrid alamseksioonis „share“ (antud sektsiooni kasutavad kõik WPS programmid – geogrid.exe, ungrib.exe ja metgrid.exe). Alljärgnevalt on esitatud faili „namelist.wps“ sektsiooni „geogrid“ konfiguratsioon, mida antud eksperimendi puhul kasutati:

```
&geogrid
parent_id           = 1,
parent_grid_ratio   = 1,
i_parent_start      = 1,
j_parent_start      = 1,
e_we               = 100,
e_sn               = 100,
geog_data_res       = '30s',
map_proj            = 'lambert',
ref_lat             = 58.824,
ref_lon             = 22.824,
truelat1           = 58.892,
truelat2           = 58.892,
stand_lon          = 22.824,
geog_data_path      = '/wrf.system/geo.data/geog'
dx                 = 9000,
dy                 = 9000,
/
```

Sektsiooni „geogrid“ esimesed neli rida määravad ära mitut domeeni eksperimendi käigus kasutati, antud juhul parameeter „parent_id“ väärtuseks on 1, seega kasutame ainult ühte domeeni. Parameeter „i(j)_parent_start“ määravad ära domeeni x ja y alguskoordinaadi. Kuna kasutame eksperimendi käigus ainult ühte domeeni, siis vaikeväärtus on 1. Parameetrid „e_we(sn)“ määravad ära domeeni lääne-ida (we) ja lõuna-põhja (sn) mõõtmed. Algandmete lahutus, mida geogrid kasutab staatilise aluspinna andmete interpoleerimisel, määratakse parameetriga „geog_data_res“ ning antud eksperimendi puhul kasutati algandmeid, mille orienteeruv lahutus on 9 kilomeetrit. Domeeni kaardiprojektsioon määratakse parameetriga „map_proj“ ning modelleeritava ala keskpunkti koordinaadid parameetritega „ref_lat(lon)“. Modelleeritava ala jaoks on valitud Lamberti konformne kooniline projektsioon ning ala keskpunkti koordinaadid on 58.824° põhjalaiust ja 22.824° idapikkust (joonis 7). Lisaks on määratud parameetrid „truelat_1(2)“ ning „stand_lon“ (pikkuskraad, mis on paralleelne y-teljega), mis on eksperimendis kasutatava kaardiprojektsiooni jaoks vajalikud.



Joonis 7: WRF poolt modelleeritav domeen (kujutatud kollase raamistikuga)

Enne geogrid programmi käivitamist tuleb defineerida ka faili „namelist.wps“ ühissektsioon „share“, kus tuleb määrata järgmised parameetrid:

- **wrf_core:** parameetriga määratakse, millist dünaamika mootorit kasutatakse, valikuteks on „ARW“ (vaike väärtus) ja „NMM“. Eksperimendis kasutame vaikeväärtust „ARW“;
- **max_dom:** määrab ära kasutatavate domeenide arvu. Kuna eksperimendis kasutame ühte domeeni, siis parameetri „max_dom“ väärtuseks märgime 1;
- **start_date:** eksperimendi alguskuupäev, koos kellaajaga (kuju: YYYY-MM-DD_HH:MM:SS);
- **end_date:** eksperimendi lõppkuupäev, koos kellaajaga;
- **interval_seconds:** ajaline intervall sekundites (nt. 10800 = 3 tundi);
- **io_form_geogrid:** millisel, kujul hoitakse geogrid andmed, vaikeväärtus 2 ehk andmed salvestatakse netCDF formaadis.

Kui failis „namelist.wps“ on muudatused tehtud, siis tuleb käivitada programm „geogrid.exe“, mille edukalt lõpetatud töö korral tekib WPS töökataloogi fail

„geo_em.dxx.nc“, kus „xx“ tähistab domeeni (nt. 01 – esimene domeen, 02 – teine domeen jne).

Järgmisena tuleb allalaadida GRIB formaadis olevad meteoroloogilised andmed ning ekstraheerida vajalikud väljad. Vajalikud GRIB andmed on võimalik allalaadida skriptiga „get_gfs.pl“, mis võimaldab alla laadida NCEP GFS mudeli andmeid. Lisaks tuleb redigeerida faili „namelist.wps“ sektsiooni „ungrib“. Eksperimendi käigus redigeeritud „ungrib“ sektsioon on järgmine:

```
&ungrib  
out_format = 'WPS',  
prefix = 'FILE',  
/
```

Sektsiooni parameeter „out_format“ määratakse programmi „ungrib.exe“ poolt kirjutatava vaheandmete formaadiga, mida hiljem „metgrid.exe“ suudab lugeda (vaikeväärtusena on soovitatav kasutada „**WPS**“ formaati). Kasutajal on võimalik määrata vahefailide asukoht ja failide prefiks (eesliide). Näiteks eksperimendi käigus oli „**prefix**“ parameetri väärtuseks määratud „**FILE**“ ning sellest lähtuvalt vaheandmete vahefailid nimetati ümber kujule:

FILE:YYYY-MM-DD_HH, kus YYYY-MM-DD_HH on andmete kehtivusaeg. Pärast muudatuste tegemist failis „namelist.wps“ tuleb linkida või kopeerida vastav „Vtable“ GRIB failide dekodeerimiseks.

Kuna töö käigus kasutati NCEP GFS andmeid, siis vastava „Vtable“ linkimine (kopeerimine) käib järgnevalt:

```
# ln -s ungrib/Variable_Tables/Vtable.GFS Vtable
```

Programm „ungrib.exe“ proovib lugeda GRIB faile GRIBFILE.AAA, GRIBFILE.BBB, ..., GRIBFILE.ZZZ. GRIB failide linkimise lihtsustamiseks tuleb kasutada C-kesta skripti „link_grib.csh“, mis käivitamisel vajab käsurea argumenti. Seega skripti käivitamine toimub järgmiselt:

```
# ./link_grib.csh gfs*
```

Skripti käivitamise tulemusena lingitakse WPS töökataloogi GFS andmed, mis on nimetatud ümber kujule GRIBFILE.AAA, GRIBFILE.BBB, ..., GRIBFILE.ZZZ. Kui eeltöö tehtud

tuleb käivitada programm „ungrib.exe“ ning edukalt lõpule viidud protsessi tulemusena tekivad WPS töökataloogi failid kujul FILE:YYYY-MM-DD_HH.

Viimaseks WRF eeltöötlussüsteemi tööetapiks on meteoroloogiliste väljade horisontaalne interpoleerimine mudeli võrgustikku. Interpoleerimiseks kasutatakse programmi „metgrid.exe“, kuid enne käivitamist tuleb redigeerida faili „namelist.wps“ sektsiooni „metgrid“. Töö käigus muudeti antud sektsiooni järgmiselt:

&metgrid

```
fg_name = 'FILE'  
io_form_metgrid = 2,  
/
```

Sektsiooni esimene parameeter „fg_name“ määrab ära vahefailide nimetuse prefiksi ning parameeter „io_form_metgrid“ määrab metgrid andmeformaadi (antud juhul kasutatav väärtus 2 näitab, et andmed on netCDF formaadis). Kui muudatused failis „namelist.wps“ on tehtud, tuleb käivitada programm „metgrid“:

./metgrid.exe

Pärast edukat käivitamist tekivad WPS töökataloogi failid kujul: met_em.dxx.YYYY-MM-DD_HH:MM:SS.nc, kus YYYY-MM-DD_HH:MM:SS tähistab andmete interpoleerimise kuupäeva.

2.3. WRF lahendaja käivitamine

Mudeli käivitamine toimub kahes etapis:

1. Programmi „real.exe“ käivitamine, mille eesmärk on failis met_em* andmete interpoleerimine vertikaalselt ning vajalike ääreväljade ja algtingimuste loomine;
2. Programmi „wrf.exe“ käivitamine eesmärgiga teostada mudeli arvutus.

Selleks, et käivitada programm „real.exe“, tuleb esmalt linkida/kopeerida vajalikud met_em* failid WRF töökataloogi. Failide linkimiseks tuleb käsureale sisestada käsk:

```
# ln -s ../WPS/met_em*.
```

Lisaks tuleb teostada faili „namelist.input“ redigeerimine. Muudatused teostame sektsioonides „time_control“ ja „domains“. Ülejäänud sektsioonides jätame vaikeväärtused. Põhilised

muudatused „time_control“ sektsioonis on seotud mudeli alg- („start_year(month, day)“) ja lõppkuupäevaga („end_year(month, day)“) ja kasutatava andmete intervalli („interval“) parameetriga. Sektsioonis „domains“ teostame muudatused parameetrites „time_step“ (töö käigus oli ajalise integreerimise ajasammuks määratud 60 sekundit), domeeni mõõtmetes lääne-ida ja lõuna-põhja suunas („e_we(sn)“) ja võrgupunktide vahekauguses meetrites („dx“ ja „dy“, mis eksperimendi käigus oli 9 kilomeetrit).

Kui muudatused failis „namelist.input“ on tehtud, siis tuleb käivitada programm „real.exe“, mille lõpptulemusena tekitab WRF töökataloogi failid „wrfinput_dxx“ ja „wrfbdy_dxx“. Seejärel tuleb käivitada mudeli põhiprogramm „wrf.exe“, mille tulemusena tekitatakse väljundfail „wrfout_dxx_YYYYMMDD_HH“.

2.4. Järeltöötlus

Antud töös kasutatakse andmete järeltöötluseks ARWPost tarkvara, mis võimaldab pärast tarkvara lähtekoodi kompileerimist tekitada WRF mudeli väljundfailidest (netCDF) GrADSi ja VIS5D tarkvara jaoks vajalikke sisendfaile.

Programmi („ARWpost.exe“) käivitamisel tuleb eelnevalt teostada muudatused failis „namelist.ARWpost“. Töö käigus teostame muudatused sektsioonides „datetime“ ja „io“. Sektsioonis „datetime“ tuleb määrata kolm parameetrid:

- a) andmete alguskuupäev ehk prognoosi alguskuupäev („start_date“);
- b) andmete lõpukuupäev ehk prognoosi lõppkuupäev („end_date“);
- c) sisendandmete ajaline intervall sekundites, mis eksperimendi käigus on kolm tundi („interval_seconds“).

Sisend-väljund („io“) sektsioonis tuleb määrata:

- a) sisendandmete kataloog („input_root_name“);
- b) väljundandmefaili kataloog ja nimetus („output_root_name“).

Kui muudatused on tehtud, siis tuleb käivitada programm „ARWpost.exe“, mille tulemusena genereeritakse ARWPost töökataloogi failid kujul <OUTPUT_ROOT_NAME>.dat ning <OUTPUT_ROOT_NAME>.ctl.

3. HINDAMISMEETODID

Prognoosi kvaliteedi määramiseks tuleb teostada prognoosi hindamine. Eesmärgid, milleks vajatakse prognoosi hindamist, võib jaotada üldjoones kolme põhigruppi:

- administratiivsed eesmärgid;
- diagnostiline eesmärk;
- ökonoomilised eesmärgid.

Administratiivse eesmärgi puhul võrreldakse omavahel erinevaid prognooside süsteeme või prognoosi andjaid.

Diagnostilise eesmärgi puhul leitakse prognoosijate või prognooside nõrgad ja tugevad küljed selleks, et viia sisse parandused, mis parandavad prognooside tulemusi.

Ökonoomiliste eesmärkide puhul saab kasutaja efektiivsemalt kasutada ära prognoosi tulemusi. Antud töös on kasutatud “Euromet” õppematerjalides (Course of Euromet, 2010) ja kirjanduses (Joliffe, 2003) esitatud prognooside hindamise metoodikat. Antud hindamismetoodikat kasutasid Ansper ja Fortelius HIRLAM tuuleprognooside hindamisel (Ansper; Fortelius, 2003), Sarapu ja Kadaja EMHI HIRLAM mudeli temperatuuriproagnoosi hindamisel (Sarapu; Kadaja, 2004). FMIs on teostatud ECMWF ilmaprognooside verifitseerimine (Kilpinen et al., 2008).

Käesoleva töö käigus hinnati WRF mudeli sademete, õhurõhu, õhutemperatuuri ja tuulekiiruse prognooside usaldatavust ja täpsust. Prognoosi usaldatavuse all mõeldakse prognoosi keskmist kõrvalekallet mõõdetud väärtusest ehk süstemaatilist viga. Süstemaatiline viga näitab, kas prognoosimisel on toimunud üle- või allahindamine. Usaldatavuse seisukohalt on ideaalse prognoosi korral süstemaatiline viga võrdne nulliga. Prognoosi usaldatavus on arvutatud keskmise vea (ME – *mean error*) valemi abil:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i) \quad (1)$$

kus N tähistab prognooside arvu; $i = 1, \dots, N$; F_i on prognoositud väärtus ning O_i on mõõdetud (vaadeldud) väärtus.

Täpsuse määramiseks kasutatakse põhiliselt kahte võimalust määramaks keskmist erinevust prognoosi ja faktiliste vaatlustulemuste vahel.

Esimene nendest on absoluutne viga (*MAE – mean absolute error*):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i|. \quad (2)$$

Teine võimalus täpsuse leidmiseks on keskmine ruutviga (*MSE – mean square error*):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2. \quad (3)$$

Ideaalse prognoosi korral on absoluutne viga (MAE) või keskmine ruutviga (MSE) võrdne nulliga. Mida suurem on kõrvalekalle, seda halvem tuleb prognoosi täpsus.

Sageli kasutatakse täpsuse karakteristikuna ruutkeskmist viga (RMSE), s.o. ruutjuur keskmisest ruutveast (MSE). Ruutkeskmine viga omab samasugust dimensiooni nagu originaalsuurus. Prognoos on täpne, kui ruutkeskmine viga on võrdne nulliga.

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}. \quad (4)$$

4. LÄHTEANDMED

4.1. WRF prognoosid

Mudeli ennustuste tulemused kirjutatakse (salvestatakse) binaarkujul netCDF (Rew et al., 2010) formaati, mida pole lihtne importida tabelarvutusprogrammi ega pole lihtne lugeda tekstiredaktoriga. Miks on viide netCDF formaadile siin, kui sellest on juttu olnud juba palju eespool? Selleks, et oleks võimalik teostada WRF mudeli prognooside hinnangut, tuleb netCDF andmeformaat konverteerida loetavale kujule või ekstraheerida andmeformaadist meile huvipakkuvad andmed. Andmete ekstraheerimiseks kasutame WRF järeltöötlustarkvara GrADS ning koostame vajalikud skriptid vaatlusjaamadesse andmete ekstraheerimiseks vastavalt nende geograafilisele asukohale. Töö käigus GrADS interpoleerib (Doty, 1995) võrgustikul paiknevad väärtused vastavalt geograafilistele koordinaatidele vaatlusjaamadesse ning väljund kirjutatakse ASCII tekstifaili, mida on lihtne importida tabelarvutusprogrammi.

4.2. Vaatlusandmed

Prognooside hindamisel on kasutatud Eesti ilmateenistuse (EMHI) 25 vaatlusjaama õhurõhu, õhutemperatuuri (mõõdetud 2 m kõrgusel maapinnast), tuulekiiruse (mõõdetud 10 meetri kõrgusel maapinnast) ning sademete tunniandmeid.

Joonisel 8 on esitatud sademete hindamisel kasutatud 21 vaatlusjaama andmeid, kuna 22 vaatlusjaamast 14.07.2008 kuupäeva seisuga puudusid andmed Tooma vaatlusjaamast (seoses jaama avamisega 2009 aasta juunikuus). 14.07.2008 puuduvad andmed kahes vaatlusjaamas: Sõrve ja Haapsalu. Sõrve vaatlusjaama puhul oli andmete puudumise põhjuseks sademeteanduri (RG13H) rike ning Haapsalu puuduvate andmete põhjuseks oli antud jaama ajutine sulgemine (alates septembrist 2008), seoses Haapsalu reoveepuhasti rekonstrueerimistöödega.

Joonisel 9 on kujutatud vaatlusjaamad, mille andmeid võrreldi õhurõhu, õhutemperatuuri ja tuulekiiruse prognooside hindamisel, mis on samuti koos mudeli tulemustega imporditud tabelarvutusprogrammi.



Joonis 8: Sademete hindamisel kasutatud vaatlusjaamade paiknemine



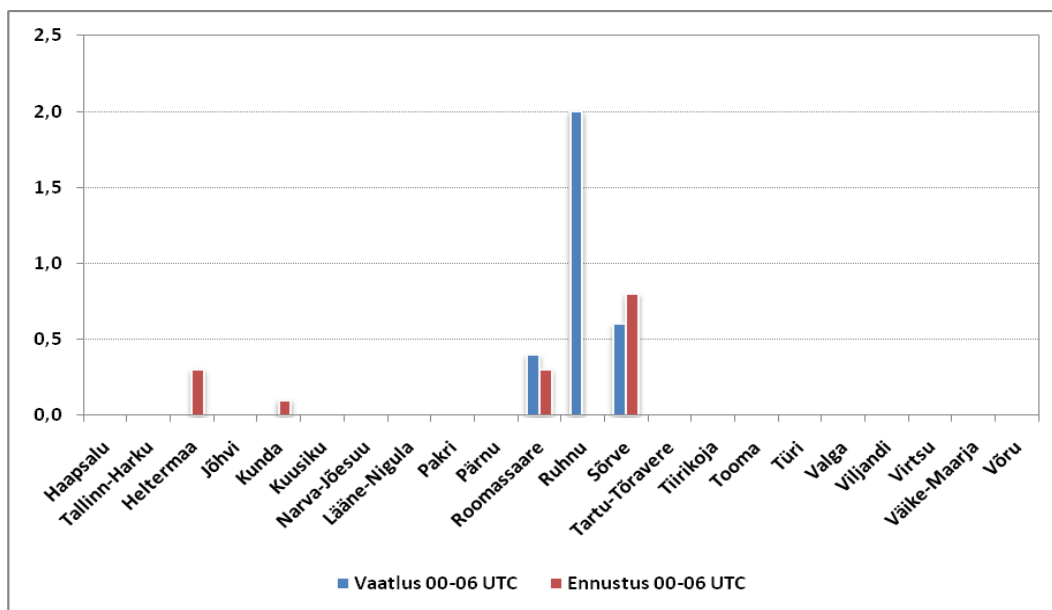
Joonis 9: Õhurõhu, õhutemperatuuri ja tuulekiiruse prognooside hindamisel kasutatud vaatlusjaamade paiknemine.

5. TULEMUSED

Töö käigus on võrreldud WRF mudeli sademete, õhutemperatuuri, õhurõhu (taandatud merepinnale) ja tuulekiiruse prognoose kuupäevadel 14.07.2008 ja 13.06.2009. Sademete prognooside võrdlemisel on lisaks eelpool nimetatud kuupäevadele võrreldud prognoose, mis on arvutatud eelnevate kuupäevade 13.07.2008 ja 12.06.2009 jaoks. Prognooside hindamisel on kasutatud usaldatavuse karakteristikuna keskmise vea (valem 1) ja täpsuse määramiseks ruutkeskmise vea karakteristikut (valem 4).

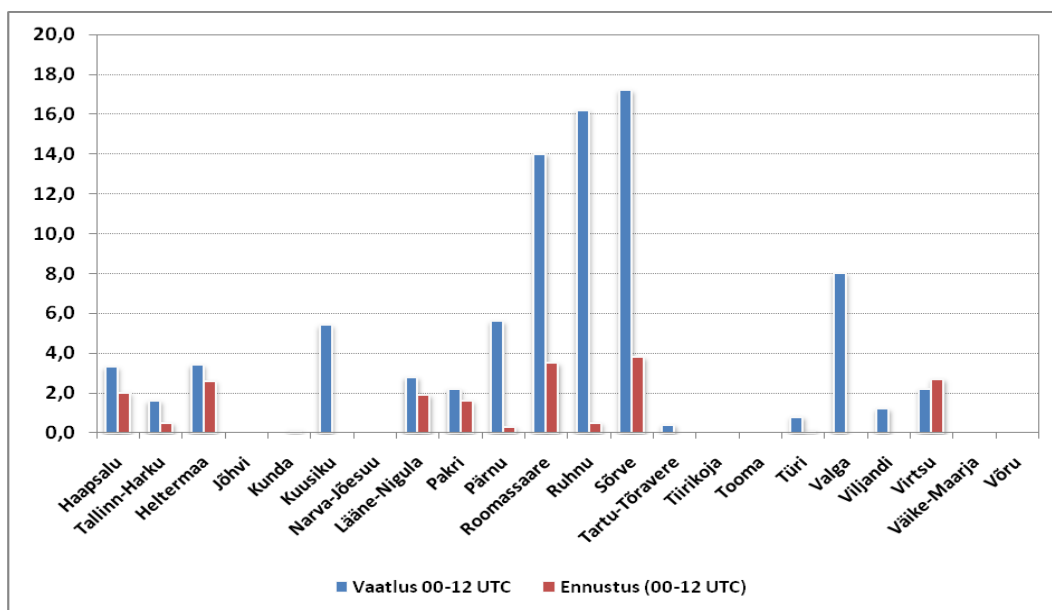
5.1. Hinnang 14.07.2008 sademete prognoosile

Prognoos, mis arvutatud 13. juulil (13.07.2008), näitab 14.07 kuupäeva seisuga häid tulemusi eelkõige 6-tunnise sademete prognoosi korral (joonis 10), kus erinevused prognoositud ja mõõdetud sajuhulga vahel on küllaltki väikesed. Suurim erinevus esines Ruhnu vaatlusjaamas, kus erinevus prognoositud (0.0 mm) ja mõõdetud (2.0 mm) sademete hulga vahe oli -2.0 mm. Heltermaa, Kunda ja Sõrve vaatlusjaamas on mudel prognoosinud rohkem sademeid, kui tegelikult vaatlusjaamas registreeriti. Roomassaare vaatlusjaamas on mudel prognoosinud 0.1 mm sademeid vähem, kui 6-tunni jooksul registreeriti. Ülejäänud 17 vaatlusjaama jaoks mudel sademeid ei prognoosinud ning sademete esinemist ei registreeritud.



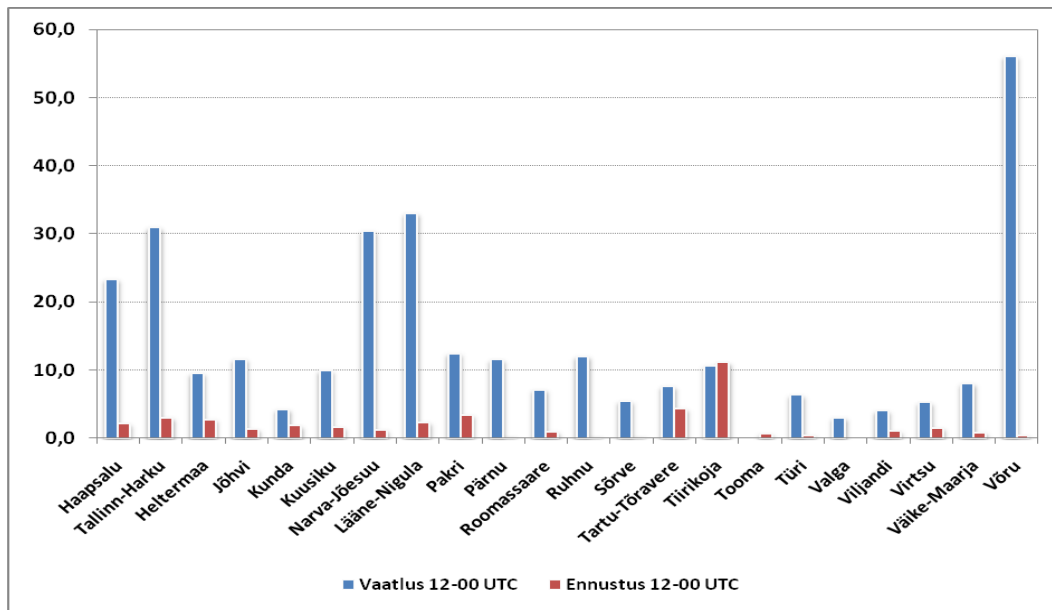
Joonis 10: Vaadeldud ja prognoositud (13.07.2008) 6-tunni sademete hulgad (mm) 14.07.2008.

Suurimad erinevused sademete prognoosimisel esines 12-tunniste prognooside korral (joonis 11). Suurimad erinevused esinevad Roomassaare, Ruhnu ja Sõrve vaatlusjaamas. Ruhnu vaatlusjaamas suurenes mõõdetud sademete hulk 6 tunni jooksul 14.2 mm võrra, mis kokku moodustas 12 tunni jooksul 16.2 mm. Prognoositud sajuhulk 12 tunni kohta Ruhnu vaatlusjaamas moodustas ainult 0.5 mm. Kui Sõrve vaatlusjaamas esimese 6 tunni prognoositud (0.8 mm) ja mõõdetud (0.6 mm) erinevus oli 0.2 mm, siis järgneva 6 tunni jooksul suurenes mõõdetud sajuhulk 16.6 mm võrra, kuid prognoositud sajuhulk suurenes 3 mm võrra moodustades 12 tunni kohta 3.8 mm sademeid.



Joonis 11: Vaadeldud ja prognoositud (13.07.2008) 12 tunni sademetehulgad (mm) 14.07.2008

Joonisel 12 on esitatud sajuhulgad ajavahemikul 12-00 UTC. Nagu joonisel näha, on peaaegu kõigis jaamades registreeritud sademeid. Suurim sademete hulga suurenemine esines Võrus (56.0 mm). Samuti suurimad sajuhulgad esinesid Lääne-Nigula (33.0 mm), Narva-Jõesuu (30.4 mm), Haapsalu (23.3 mm) ja Tallinn-Harku (30.9 mm) vaatlusjaamas. Mudeli prognoosid antud ajavahemikul näitasid küllaltki tagasihoidlikku sademete hulga suurenemist. Võru vaatlusjaamas näitas mudel 12 tunni sajuhulgaks ainult 0.3 mm, Narva-Jõesuus 1.2 mm, Lääne-Nigulas 2.3 mm, Haapsalus 2.1 mm ja Tallinn-Harku 3.0 mm.



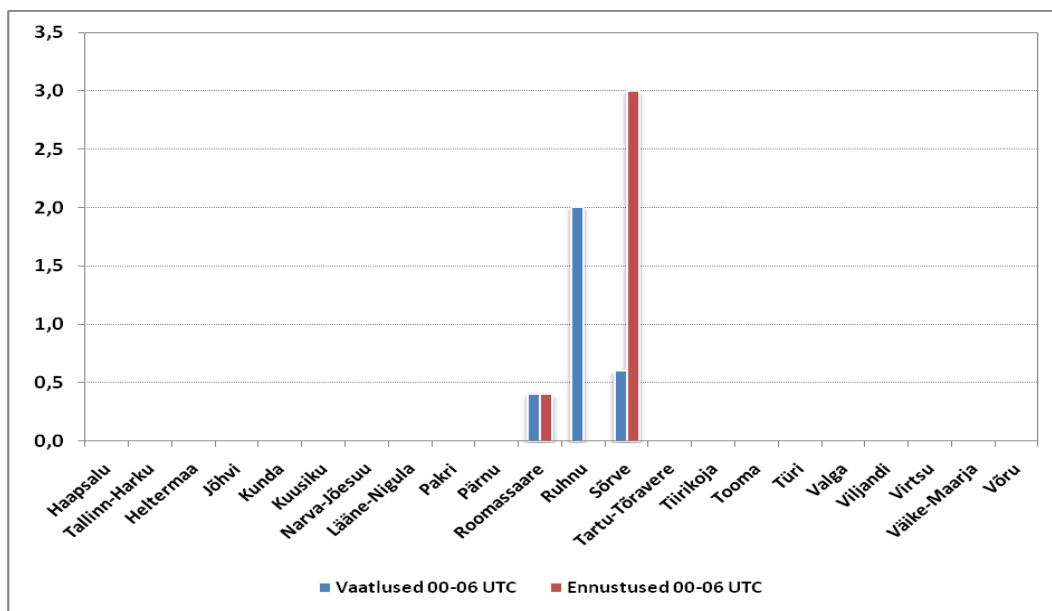
Joonis 12: Vaadeldud ja prognoositud (13.07.2008) 12 tunni sademetehulgad (mm) 14.07.2008

Kokkuvõttes sademete prognoosid, mis arvutati 13.07.2008 baasandmete alusel 14.07.2008 kuupäevaks, näitasid ainult esimese 6 tunnise prognoosi korral häid tulemusi. Järgmistel ajavahemikel 06-12 UTC ja 12-00 UTC mudeli prognoositud sajuhulgad rahuldavaid tulemusi ei andnud.

Joonisel 13 on esitatud vaatlusjaamades mõõdetud ja mudeli poolt prognoositud sademete hulgad 14.07.2008 kuupäevaks. Graafikult on näha, et sademete esinemist fikseeriti kolmes vaatlusjaamas: Roomassaare, Ruhnu ja Sõrve. Suurim viga prognoositud ja mõõdetud sajuhulga vahel esines Sõrve vaatlusjaamas, kus mudel prognoosis 2.4 mm mõõdetud sajuhulgast rohkem. Samuti halb tulemus sademete prognoosimisel esines Ruhnu vaatlusjaamas, kus mudel sademeid ei prognoosinud ning erinevus prognoositud ja mõõdetud sajuhulga vahel on -2.0 mm. Parim tulemus vaatlusjaamas, kus sademeid esines ja prognoositi, on Roomassaare. Erinevus prognoositud ja mõõdetud sajuhulga vahel on 0.0 mm. Ülejäänud vaatlusjaamades mudeli arvutused võrreldes mõõdetud tulemustega erinevust ei kajasta.

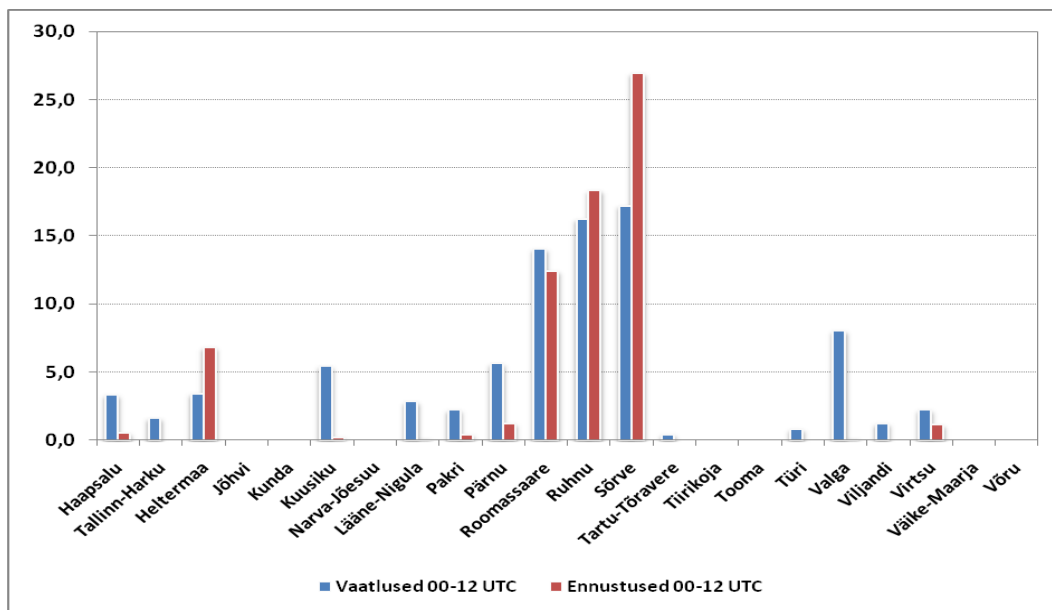
Võrreldes omavahel 13.07 ja 14.07 arvutatud prognoosi on mudeli prognoosides vastupidine olukord. Suurimad sajuhulgad esinevad 12 tunniste prognooside korral Roomassaare, Ruhnu ja Sõrve vaatlusjaamas, kuid prognoos, mis arvutati 13.07, näitab mõõdetud sajuhulga domineerimist (joonis 10). Prognoos, mis on arvutatud 14.07 algandmete alusel (joonis 14) näitab vastupidist olukorda, kus Ruhnu vaatlusjaamas ennustati 2.1 mm ja Sõrve

vaatlusjaamas 9.7 mm rohkem sademeid. Roomassaare vaatlusjaama mudel prognoos näitab erinevuseks -4.4 mm ehk antud juhul mudel ennustas 4.4 mm vähem mõõdetud sajuhulgast.

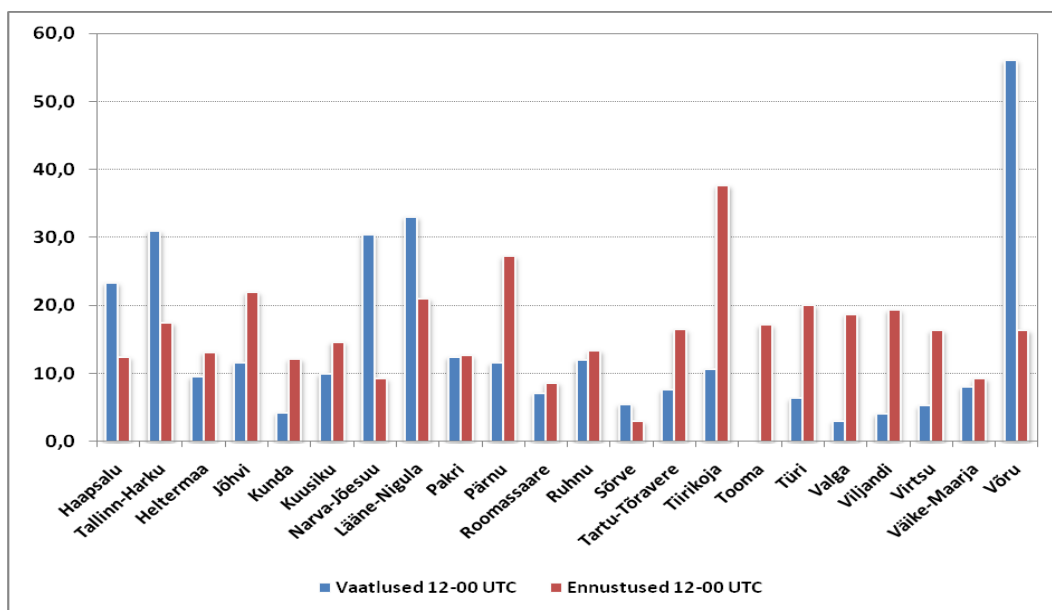


Joonis 13: Vaadeldud ja prognoositud sajuhulgad 14.07.08 ajavahemikul 00-06 UTC

Joonisel 15 on esitatud 14.07.2008 vaatlusjaamades mõõdetud ja prognoositud sajuhulgad ajavahemikul 12-00 UTC. Suurimad erinevused prognoositud ja mõõdetud sajuhulga vahel esinevad Võru vaatlusjaamas -39.7 mm, Tallinn-Harku -13.5 mm ja Narva-Jõesuu -21.2 mm. Võrreldes omavahel sademete prognoose ajavahemiku 12-00 UTC, mis on arvutatud 13.07 ja 14.07, siis esimesel juhul on mudel prognoosinud sademeid vähem ning teisel juhul on mudel sademeid rohkem prognoosinud.



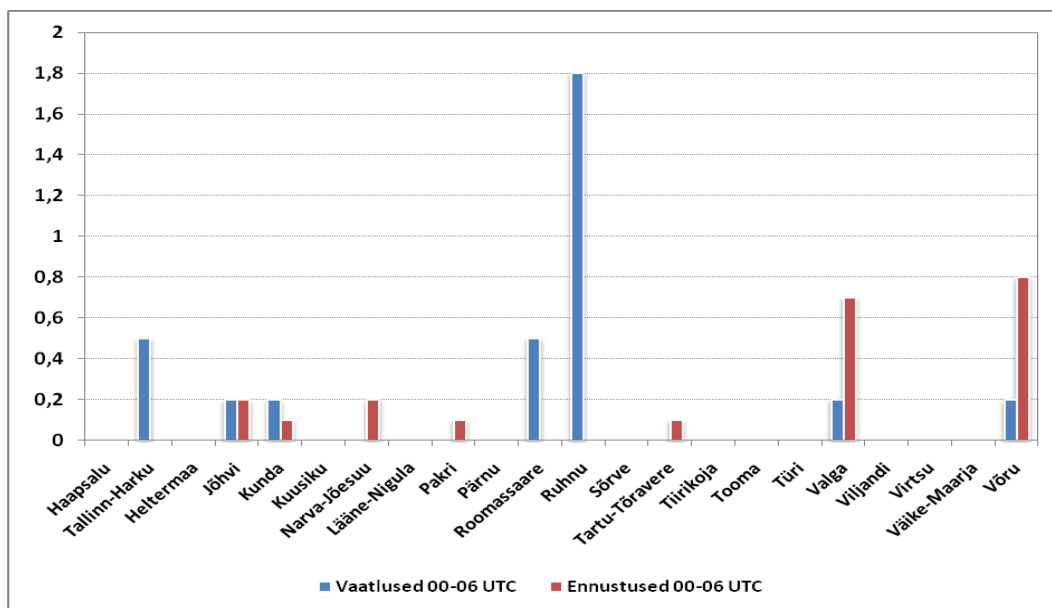
Joonis 14: Vaadeldud ja prognoositud sajuhulgad 14.07.08 ajavahemikul 00-12 UTC



Joonis 15: Vaadeldud ja prognoositud sajuhulgad 14.07.08 ajavahemikul 12-00 UTC

5.2. Hinnang 13.06.2009 sademete prognoosile

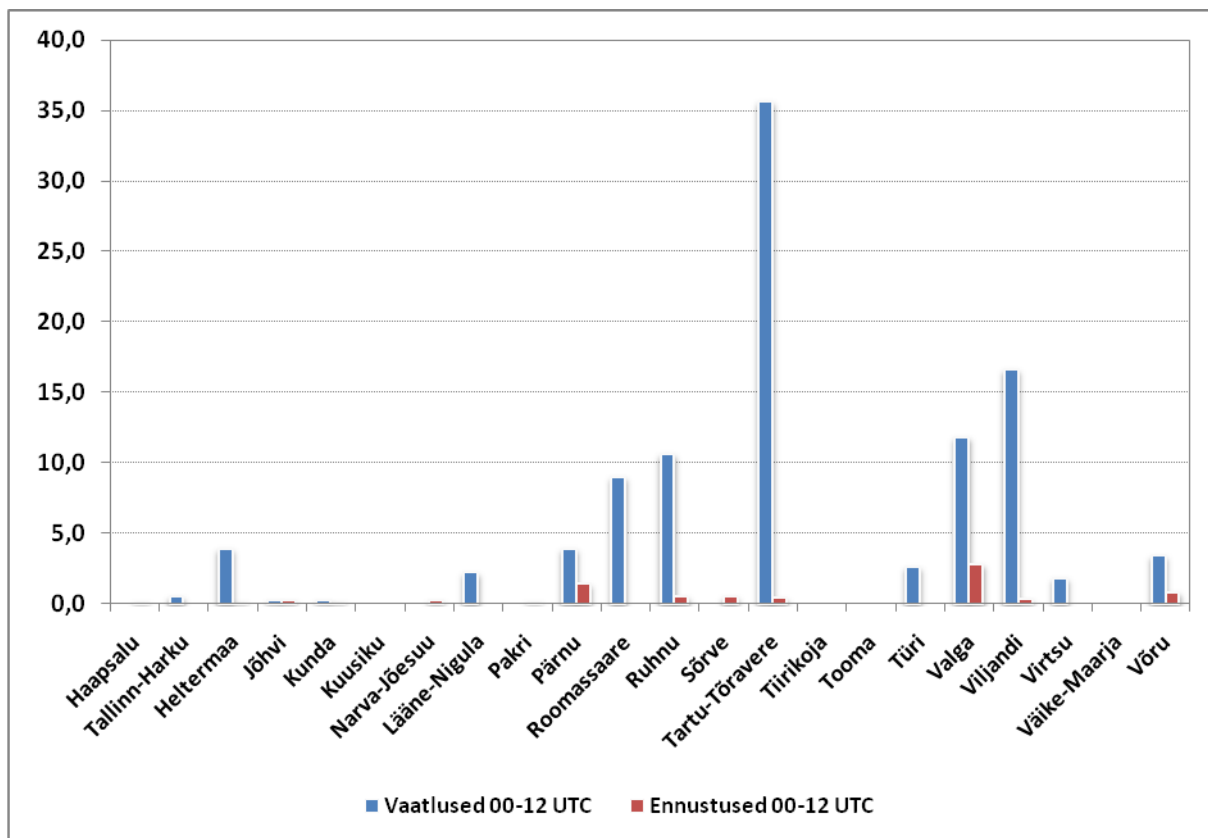
Joonistel 16-18 on esitatud prognoositud ja vaatlusjaamas mõõdetud sajuhulgad 13.06.2009 ning arvatatud 12.06.2009 baasaja järgi. Ajavahemikul 00-06 UTC esineb suurim prognoositud ja mõõdetud sajuhulga erinevus -1.8 mm esineb Ruhnu vaatlusjaamas. Samuti pole mudel prognoosinud Tallinn-Harku ja Roomassaare vaatlusjaamas mingit sadu.



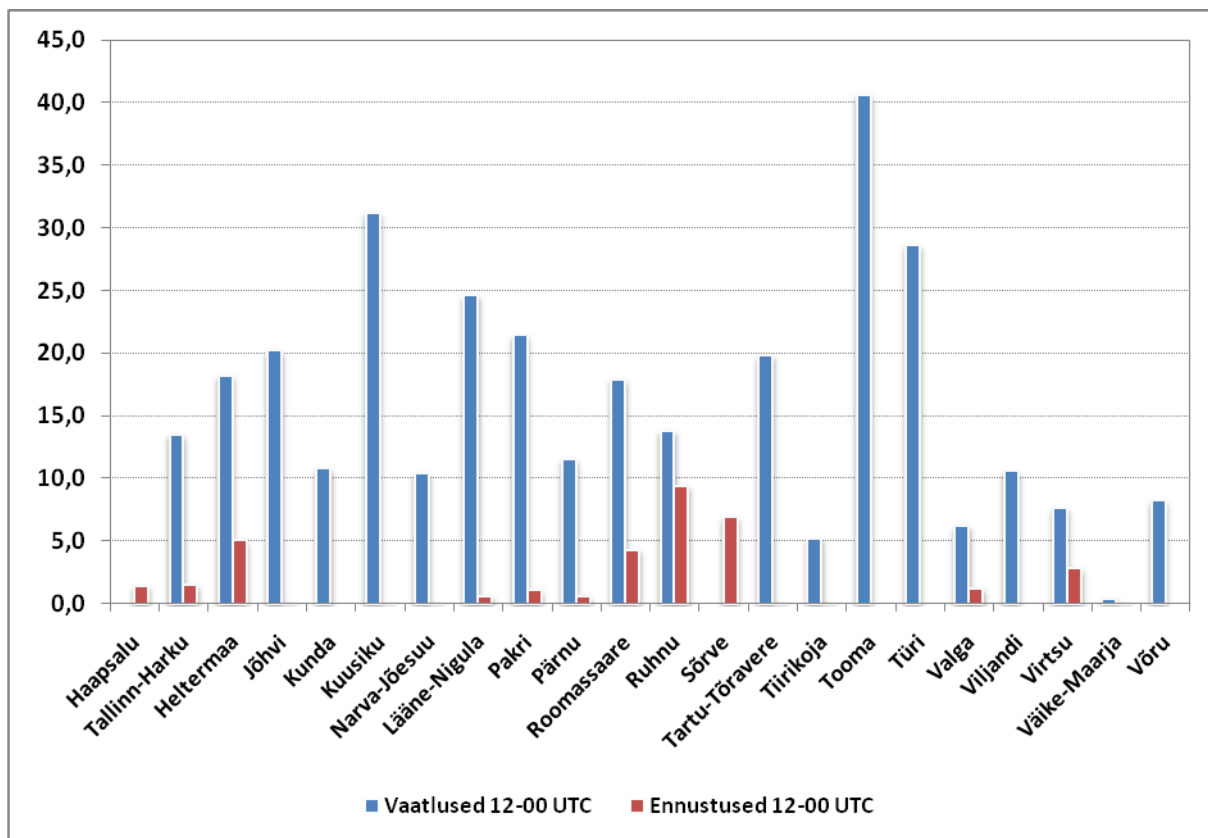
Joonis 16: Vaadeldud ja prognoositud sajuhulgad 13.06.09 ajavahemikul 00-06 UTC

Ajavahemiku 00-12 UTC (joonis 8) on selgelt näha mudeli sajuhulga prognoosimise puudujääk. Suurimad erinevused esinevad Tartu-Tõravere, Viljandi ja Valga vaatlusjaamas, kus mudel on prognoosinud vastavalt 35.2, 16.3 ja 9.0 mm vähem sademeid.

Järgneval ajavahemikul 12-00 UTC on enamikus vaatlusjaamades suurenenud mõõdetud sajuhulk, mis mitmes vaatlusjaamas ületab 15 mm. Suurim mõõdetud sademete hulk esineb Tooma (40.6 mm), Kuusiku (31.2 mm) ja Türi (28.6 mm) jaamas. Nimetatud vaatlusjaamades mudel sademete esinemist ei prognoosinud. Mudeli tulemused kõigi vaatlusjaamade kohta on kehvad.

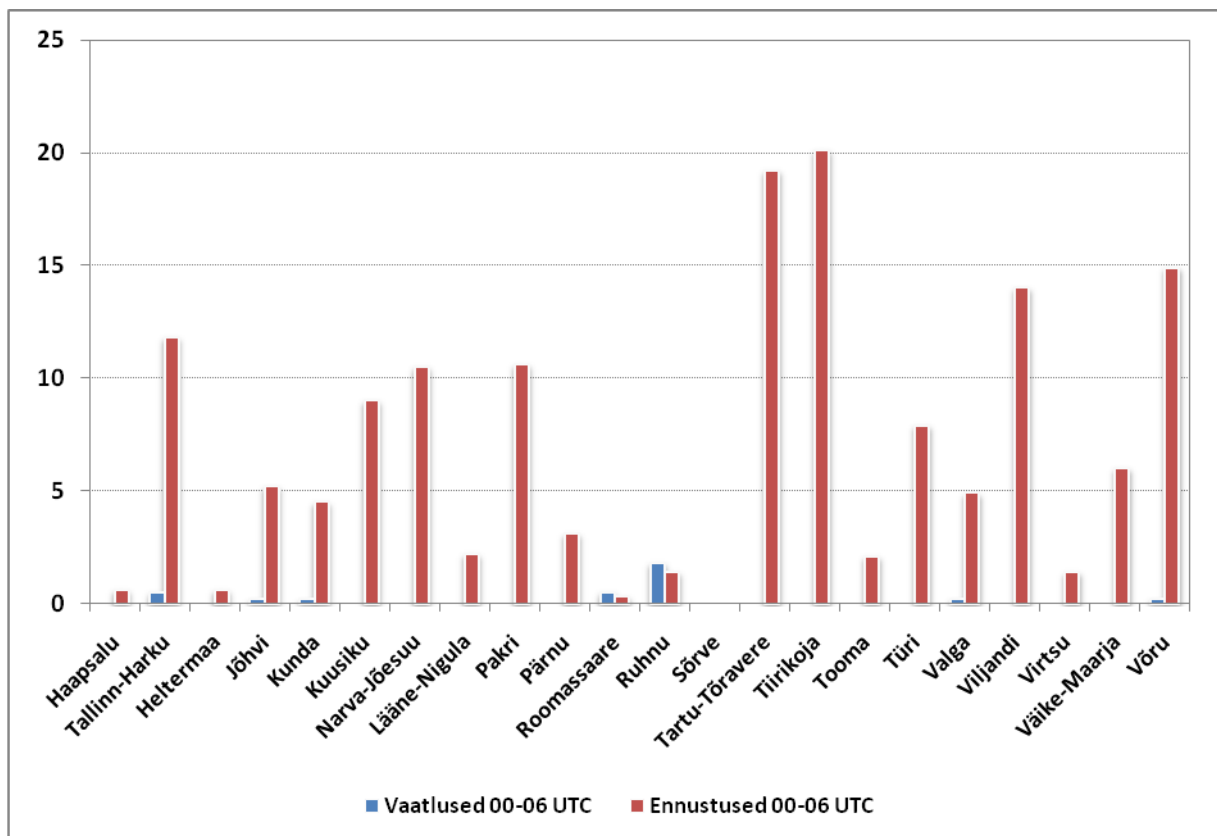


Joonis 17: Vaadeldud ja prognoositud sajuhulgad 13.06.09 ajavahemikul 00-12 UTC



Joonis 18: Vaadeldud ja prognoositud sajuhulgad 13.06.09 ajavahemikul 12-00 UTC

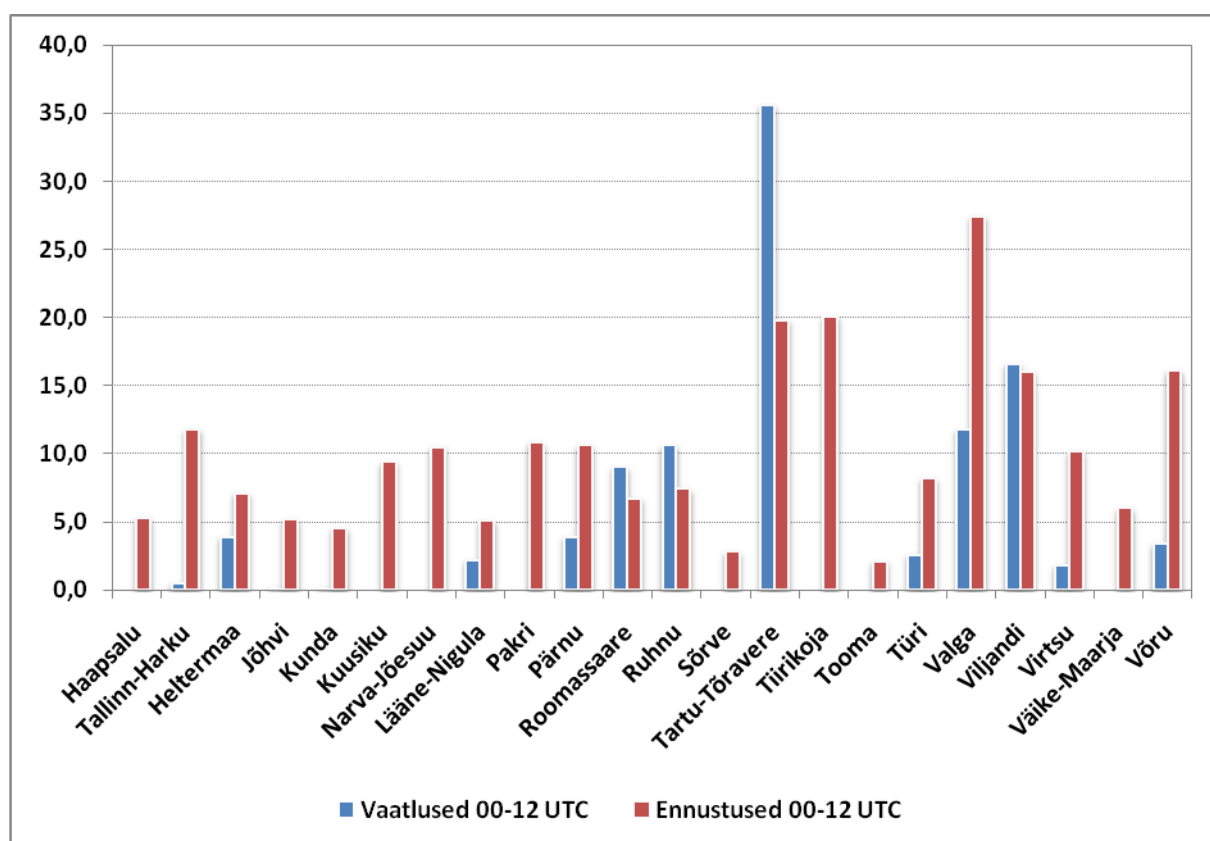
Sademe prognoosid 13.06.2009, mis on arvatatud sama kuupäeva algandmete alusel, näitab kõikidel ajavahemikel 00-06, 00-12 ja 12-00 UTC (joonis 19-21) mudeli poolset sademete üleprognoosimist. Ajavahemikul 00-06 UTC esines ainult Tallinn-Harku, Roomassaare ja Ruhnu vaatlusjaamas nõrk (0.5-1.8 mm) sadu. Mudeli prognoositud tulemused näitasid kõigis vaatlusjaamades rohket sajuhulka. Suurimad sajuhulkade üleprognoosimised esinevad Tiirikoja (20.1 mm), Tartu-Tõravere (19.2 mm), Võru (14.9 mm), Viljandi (14.0 mm) ja Tallinn-Harku (11.8 mm) vaatlusjaamas, kus reaalselt sademeid ei esine.



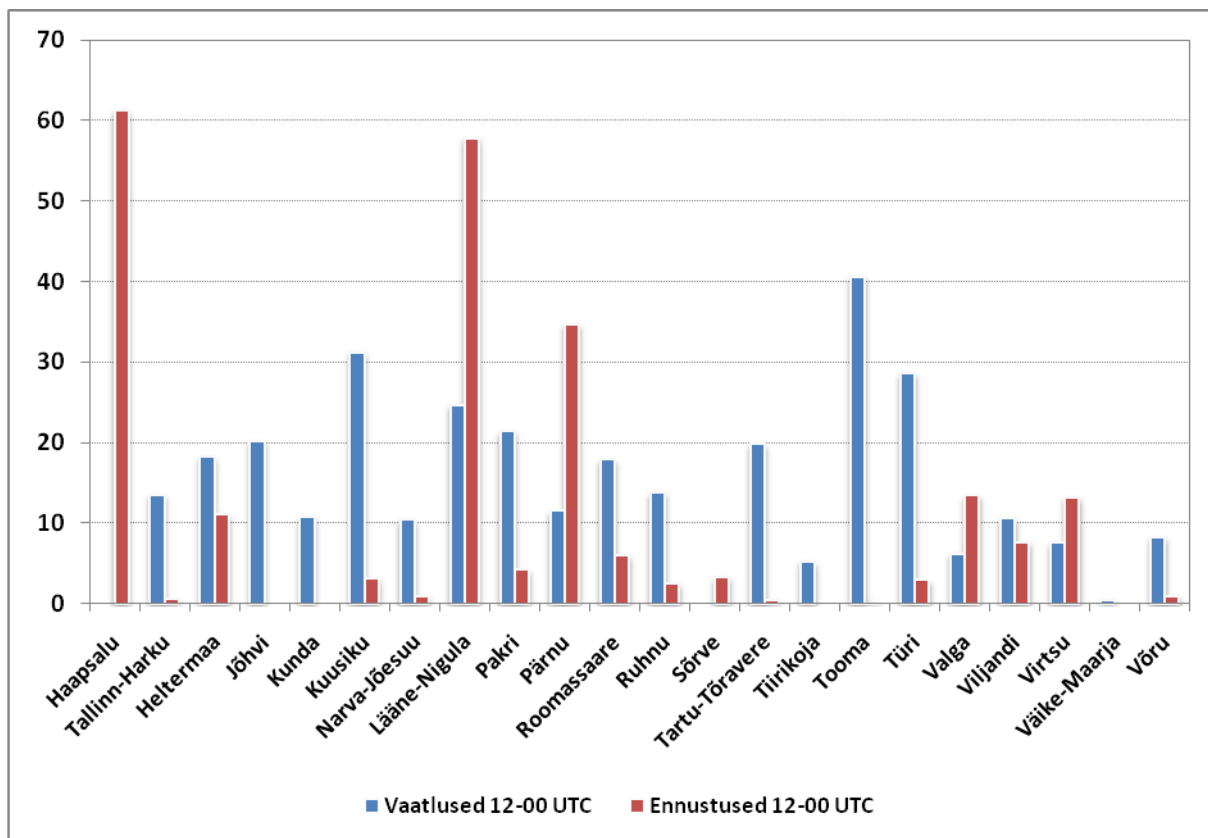
Joonis 19: Vaadeldud ja prognoositud sajuhulgad 13.06.09 ajavahemikul 00-06 UTC

Ajavahemikul 00-12 UTC on toimunud Tartu-Tõravere vaatlusjaamas mõõdetud sademete hulgas suur muutus. Nimelt vähem kui 6 tunni jooksul registreeriti sajuhulgaks 35.6 mm, samaaegselt prognoositud sajuhulga 6 tunni muutus oli ainult 0.6 mm. Küllatki suured erinevused prognoositud ja mõõdetud sademete koguses esines Tartu-Tõravere (-15.8 mm), Valga (-15.6 mm), Võru (-12.7 mm), Tiirikoja (-20.1 mm, võrreldes eelmise ajavahemikuga 00-06 UTC jäi tulemus muutumata) vaatlusjaamas.

Joonisel 21 on esitatud sajuhulgad vaatlusjaamades ajavahemikul 12-00 UTC 13.06.2009. Nagu jooniselt näha, on toimunud suur muutus prognoositud ja mõõdetud sademete hulgal Lääne-Nigula vaatlusjaamas, kus 12 tunni prognoosi kohaselt suureneb sademete kogus 57.8 mm. Mõõdetud sademete summa suureneb kuni 24.6 mm. Samuti toimus prognoositud sademete hulga suur muutus Pärnus, kus 12 tunni jooksul suures sademete hulk 24.1 mm võrra. Mõõdetud sajuhulga suur muutus esineb Tartu-Tõravere vaatlusjaamas, kus ajavahemikul 12-00 UTC suurenes sademete hulk 19.8 mm moodustades ööpäevaseks sademete koguseks 55.4 mm.



Joonis 20: Vaadeldud ja prognoositud sajuhulgad 13.06.09 ajavahemikul 00-12 UTC



Joonis 21: Vaadeldud ja prognoositud sajuhulgad 13.06.09 ajavahemikul 12-00 UTC

5.3.Hinnang 14.07.2008 õhurõhu, õhutemperatuuri ja tuulekiiruse prognoosidele

Tabelis 3 on esitatud 26 vaatlusjaamas prognoositud ja mõõdetud õhurõhkude erinevused (vahed) ajamomentidel kella 03-21 UTC. Lisaks on arvatud prognoosi usaldatavus üle kõikide vaatlusjaamade kõigil ajamomentidel. Kui anname hinnangu prognoosidele lähtudes usaldatavuse kriteeriumist, siis parima tulemuse ehk kõige väiksem kõrvalekalle esineb ajamomendil 03 UTC, kus erinevus prognoositud ja mõõdetud tulemuse vahel oli -0.02 hPa, mis ligilähedane ideaalse prognoosi tulemusele (0.0 hPa). Kuna kõigis jaamades esineb erinevusi õhurõhu prognoosis ja vaatlustes, siis antud vead (erinevused) mõjutavad ka prognoosi täpsust. Antud juhul on õhurõhu prognoosimisel mudel valdavalt ennustanud õhurõhku vähem, kui tegelikult jaamas mõõdeti. Suurimad õhurõhu prognoosi erinevused (vastavalt keskmisele väärtusele) esinevad Kundas (-3.1 hPa), Kuusikul (-2.2 hPa), Narva-Jõesuus (-2.1 hPa), kus mudel ennustab vähem võrreldes vaatlusandmetega. Suurim õhurõhu üleprognoosimine, vastavalt keskmisele väärtusele on toimunud Pakri vaatlusjaamas.

Tabel 3. Erinevus ennustatud ja mõõdetud õhurõhu vahel, 14.07.2008.

Vaatlusjaam	3	6	9	12	15	18	21	Keskmine
Haapsalu	0,3	-0,1	-0,2	0,0	0,0	-0,4	-1,5	-0,3
Tallinn-Harku	0,4	-0,2	0,0	-0,3	0,3	-1,1	-1,1	-0,3
Heltermaa	0,4	0,3	0,3	0,3	-0,5	-0,1	-1,5	-0,1
Jõgeva	-1,4	-1,7	-1,3	-2,3	-2,1	-2,4	-2,2	-1,9
Jõhvi	1,1	0,5	0,6	-0,1	-0,5	0,5	-0,9	0,2
Kihnu	0,5	0,1	-0,5	-0,2	-0,5	1,0	-1,0	-0,1
Kunda	-2,3	-3,0	-2,5	-3,2	-3,6	-3,0	-4,1	-3,1
Kuusiku	-1,4	-2,0	-2,1	-2,4	-2,4	-2,8	-2,4	-2,2
Narva-Jõesuu	-0,9	-1,4	-1,3	-1,9	-2,2	-3,8	-3,1	-2,1
Laane-Nigula	0,0	-0,5	-0,4	-0,5	-0,2	-0,7	-1,6	-0,6
Pakri	2,6	2,1	2,5	2,3	2,5	1,3	0,9	2,0
Pärnu	0,4	-0,1	-0,6	-0,8	0,0	0,4	-0,7	-0,2
Ristna	0,2	0,3	1,1	-0,3	-0,6	0,0	-1,3	-0,1
Rohuküla	-0,1	-0,4	-0,5	-0,3	-0,5	-0,5	-1,8	-0,6
Roomassaare	0,0	-0,1	-0,1	0,4	-0,8	-0,6	-1,6	-0,4
Ruhnu	0,3	-0,1	-0,2	0,3	1,0	-0,2	-1,4	-0,1
Sõrve	0,3	0,1	0,3	-0,1	-0,5	-0,5	-1,3	-0,2
Tartu-Tõravere	-0,4	-0,8	-0,7	-1,6	-2,1	-2,4	-1,4	-1,3
Tiirikoja	0,6	0,2	0,6	-0,3	-1,2	-1,7	-0,6	-0,3
Türi	-0,6	-1,2	-1,1	-1,8	-2,9	-2,3	-1,4	-1,6
Valga	0,2	-0,6	-0,5	-2,0	-2,0	-2,2	-1,3	-1,2
Viljandi	-0,1	-0,5	-0,3	-1,6	-4,2	-1,7	0,3	-1,1
Vilsandi	0,5	1,0	1,0	0,3	-0,4	-0,1	-1,1	0,2
Virtsu	-0,2	-0,6	-0,8	-0,2	-0,6	-0,2	-1,8	-0,6
Vaike-Maarja	-0,6	-1,0	-0,6	-1,4	-1,4	-1,0	-1,8	-1,1
Võru	-0,2	-0,8	-0,1	-0,5	-2,4	-2,4	-2,3	-1,2
ME	0,0	-0,4	-0,3	-0,7	-1,1	-1,0	-1,5	-0,7
RMSE	0,9	1,0	1,0	1,3	1,8	1,7	1,7	1,4

Lähtudes antud tulemustest, mis on esitatud tabelis 3, on mudel suutnud küllaltki hästi ennustada õhurõhku. Prognoosi keskmine usaldatavus kõigi vaatlusjaamade ja kõigi ajamomentide kohta on -0.7 hPa, täpsus 1.4 hPa.

Mudeli 2 meetri kõrgusel maapinnast arvatud õhutemperatuuri prognoosi hinnanguks kasutame tabelis 4 esitatud andmeid. Tabelist on näha, et kõige usaldusväärsemad prognoosid kõigis vaatlusjaamade esinevad kella 03 UTC prognoosidel, kus keskmine süstemaatiline viga on 0.0 °C. Samuti on näha, et valdavaks on olnud temperatuuri üleprognoosimine maksimaalselt 1.2 °C võrra (ajavahemikul 12-15 UTC). Kuna kella 15 UTC prognooside

korral esineb suuri kõrvale-kaldeid temperatuuri prognoosis, näiteks Jõgeval (5.0 °C), Tartu-Tõraveres (4.0 °C), Tiirikojal (4.6 °C) ja Võrus (7.1 °C), siis antud prognoosi täpsus väheneb. Arvutuste kohaselt kella 15 UTC prognooside täpsus on 2.6 °C. Vaadeldava perioodi lõpus (18-21 UTC) prognoosi usaldatavus varieerub 0.2-0.4 °C, kuid prognoosi täpsus suureneb, tõustes kella 21 UTC kuni 1.2 °C.

Mudeli tuulekiiruste prognooside ja vaatlusandmete erinevus (vahe) erinevatel ajamomentidel on esitatud tabelis 5. Nagu tabelist järeldub on valdavalt domineerinud tuulekiiruste üleprognoosimine, mis väljendub ka prognoosi usaldatavuses ja täpsuses. Parim tulemus usaldatuse ja täpsuse seisukohast saavutati kella 03 UTC prognooside korral. Arvutatud prognoosi usaldatavus on 1.4 m/s, mis tähendab mudeli seisukohast tuulekiiruse üleprognoosimist antud väärtuse võrra. Prognoosi täpsuseks on 1.7 m/s. Halvim usaldatavus ja täpsus esines kella 12 ja 15 UTC prognooside korral. Mõlemal juhul näitab mudel tuulekiiruse üleprognoosimist 3.5 m/s võrra. Kuna antud kellaaegadel (12 ja 15 UTC) esineb tuulekiiruse prognoosides suuri erinevusi, siis ka prognoosi täpsus keskmiselt kahanes 4.2 (12 UTC) ja 4.5 m/s (15 UTC) võrra.

Tabel 4. Ennustatud ja mõõdetud 2 m õhutemperatuuri erinevus, 14.07.2008

Vaatlusjaam	3	6	9	12	15	18	21	Keskmine
Haapsalu	-0,6	-1,7	-1,2	0,4	0,1	0,6	1,5	-0,1
Tallinn-Harku	0,4	-0,8	0,0	-0,7	-0,3	0,6	1,6	0,1
Heltermaa	1,5	-1,4	-1,8	-1,2	-0,2	0,7	1,9	-0,1
Jõgeva	1,3	-0,3	0,4	3,0	5,0	-1,3	-1,2	1,0
Jõhvi	2,7	-0,2	-0,6	1,5	0,8	-1,1	0,1	0,5
Kihnu	-1,1	-1,9	3,3	1,3	-3,2	-0,2	-0,2	-0,3
Kunda	-1,5	-0,6	-0,3	-0,1	0,9	-1,7	-0,3	-0,5
Kuusiku	0,6	-1,0	2,4	3,0	-0,7	-0,3	0,9	0,7
Narva-Jõesuu	-0,1	-1,2	-0,7	0,6	1,2	2,6	-1,1	0,2
Lääne-Nigula	-0,3	-0,6	-1,0	0,7	0,4	0,8	1,7	0,2
Pakri	0,1	-1,4	-1,5	-0,4	-0,7	1,1	1,3	-0,2
Pärnu	-2,0	0,2	4,4	4,3	-2,3	-1,1	0,3	0,5
Ristna	0,4	-0,6	-2,5	-0,5	0,8	0,7	1,4	0,0
Rohuküla	-2,2	-1,9	-1,5	0,4	0,4	0,4	0,9	-0,5
Roomassaare	-0,9	-1,5	-1,5	-0,4	0,3	-0,1	0,6	-0,5
Ruhnu	2,8	0,1	1,6	-0,3	-0,6	1,2	1,8	0,9
Sõrve	2,3	-1,0	0,2	0,5	0,2	-0,5	0,3	0,3
Tartu-Tõraverre	0,6	-2,3	1,3	2,7	4,0	1,3	-2,3	0,7
Tiirikoja	1,2	-2,1	-2,0	0,4	4,6	-0,9	-1,0	0,0
Türi	-1,0	-1,0	1,9	3,1	2,7	-0,4	1,2	0,9
Valga	-2,2	-0,8	3,8	5,4	4,1	1,8	0,1	1,7
Viljandi	-0,7	0,9	0,3	4,1	3,6	-1,3	-1,9	0,7
Vilsandi	-0,2	-2,1	-1,4	-0,1	-0,6	-0,2	0,4	-0,6
Virtsu	-0,8	-0,8	0,4	0,1	-0,2	0,1	0,4	-0,1
Väike-Maarja	-0,4	-1,6	0,8	1,6	2,9	-0,9	0,3	0,4
Võru	-0,5	-1,2	-0,2	0,7	7,1	3,9	0,7	1,5
Usaldatavus (ME)	0,0	-1,0	0,2	1,2	1,2	0,2	0,4	0,3
Täpsus (RMSE)	1,4	1,3	1,8	2,1	2,6	1,3	1,2	1,7

Suurim erinevus tuulekiirustes esines perioodil 03-21 UTC Ruhnu vaatlusjaamas, kus maksimaalne erinevus ennustuse ja vaadeldud tulemuse vahel esines kell 12 UTC 8.7 m/s ning kell 15 UTC, erinevuseks 8.6 m/s. Samuti on ööpäeva keskmine viga (kõrvalekalle) Ruhnu jaamas teiste vaatlusjaamadega võrreldes maksimaalne 5.0 m/s. Ruhnu jaamas on kogu ööpäeva jooksul esinenud tuulekiiruse üleprognoosimine. Parimad tulemused keskmise vea alusel esinevad Kundas (0.2 m/s), Jõhvis (0.8 m/s) ja Väike-Maarjas (0.8 m/s), seega jäävad tabeli 5 alusel halvimal tuulekiiruse prognoosid Lääne- ja Edela-Eestisse ning parim tulemus Kirde-Eestisse.

Tabel 5. Ennustatud ja mõõdetud tuulekiiruste erinevus, 14.07.2008

Vaatlusjaam	3	6	9	12	15	18	21	Keskmine
Haapsalu	1,5	1,6	3,8	4,3	2,4	-1,4	0,6	1,8
Tallinn-Harku	2,2	1,2	1,8	5,0	4,8	4,0	2,6	3,1
Heltermaa	2,6	4,0	3,4	3,9	3,8	0,0	3,9	3,1
Jõgeva	0,2	0,0	1,1	1,6	0,4	3,6	2,1	1,3
Jõhvi	1,1	0,0	-1,3	1,3	0,7	1,3	2,6	0,8
Kihnu	2,7	1,4	3,4	4,7	10,1	2,0	0,1	3,5
Kunda	0,6	0,9	-1,4	1,3	0,8	0,1	-0,7	0,2
Kuusiku	1,4	0,7	0,0	1,0	4,5	1,7	1,2	1,5
Narva-Jõesuu	1,2	-0,1	-1,9	0,5	-0,6	1,9	4,7	0,8
Lääne-Nigula	1,3	1,2	2,6	2,8	3,0	0,2	1,5	1,8
Pakri	3,9	2,8	5,5	6,4	3,8	0,9	2,7	3,7
Pärnu	1,1	-0,8	0,4	-0,1	5,2	1,9	0,9	1,2
Ristna	2,7	4,9	2,4	4,6	3,0	2,7	3,5	3,4
Rohuküla	1,5	3,2	6,2	7,8	6,5	1,1	1,6	4,0
Roomassaare	0,9	4,7	2,4	2,7	1,0	-1,1	-0,4	1,5
Ruhnu	3,1	2,5	4,9	8,7	8,6	4,4	2,8	5,0
Sõrve	1,8	4,4	4,5	5,2	0,9	1,0	2,5	2,9
Tartu-Tõravere	-0,2	0,1	2,0	4,2	3,7	0,0	-0,2	1,4
Tiirikoja	0,9	0,1	0,3	1,8	3,4	6,1	3,2	2,2
Türi	0,6	-0,5	1,2	3,3	4,8	6,2	2,0	2,5
Valga	0,6	1,2	3,5	5,2	6,2	4,2	3,4	3,5
Viljandi	0,8	0,5	1,5	4,5	7,0	3,6	2,8	3,0
Vilsandi	0,9	5,3	0,6	3,3	-1,4	1,1	3,8	1,9
Virtsu	2,0	0,4	4,9	5,5	5,1	-0,6	0,0	2,5
Väike-Maarja	0,6	0,8	-0,4	0,8	0,7	1,7	1,7	0,8
Võru	0,2	1,1	0,4	1,2	3,0	2,8	2,9	1,7
Usaldatavus (ME)	1,4	1,6	2,0	3,5	3,5	1,9	2,0	2,3
Täpsus (RMSE)	1,7	2,4	2,9	4,2	4,5	2,7	2,4	3,0

5.4. Hinnang 13.06.2009 õhurõhu, õhutemperatuuri ja tuulekiiruse prognoosile

Tabelis 6 on esitatud prognoositud ja mõõdetud õhurõhu erinevus 25 vaatlusjaamas. Kui vaatlеме õhurõhu prognoosi usaldatavust (valem 1), siis tabelist on näha, et ööpäeva (03-21 UTC) kõige usaldatavam prognoos esines kohaliku aja järgi kella 15 (12 UTC), kus mudeli keskmine kõrvalekalle kõigi jaamade kohta oli -0.2 hPa ning kella 18 (15 UTC) ajal, mil mudeli prognooside keskmine kõrvalekalle oli 0.2 hPa. Kuid prognooside täpsus antud kellaajal oli 1.2 – 1.3 hPa, kuna mõningates jaamades esines suuremaid õhurõhu erinevusi, näiteks Kuusiku -2.5 hPa (12 UTC) ja -3.7 hPa (15 UTC) ning Kunda -2.9 (12 UTC) ja -2.3 hPa (15 UTC).

Ööpäeva parim tulemus õhurõhu keskmise vea alusel (0.1 hPa) esines Tallinn-Harku vaatlusjaamas, kus ideaalsed tulemused esinesid ajavahemikel kella 03-06 UTC, mil prognoositud ja mõõdetud tulemuse erinevus oli 0.0 hPa. Suurim erinevus Tallinn-Harku vaatlusjaamas esines kella 21 UTC prognoosil, kus erinevuseks oli 2.5 hPa.

Prognoosi täpsuse seisukohast esinevad täpsemad prognoosid ajavahemikul 03-09 UTC, mil arvutatud täpsus (valem 4) oli 1.2 hPa. Prognoosi usaldatavus suurenes vahemikus -0.6 (03 UTC) kuni -0.4 (09 UTC).

Tabel 6. Ennustatud ja mõõdetud õhurõhu erinevus, 13.06.2009

Vaatlusjaam	3	6	9	12	15	18	21	Keskmine
Haapsalu	0,0	0,0	-0,3	-0,3	-0,7	-0,2	2,5	0,1
Tallinn-Harku	0,1	0,3	0,3	0,9	0,2	0,6	3,3	0,8
Heltermaa	-1,6	-2,2	-1,5	-1,3	-1,1	1,0	1,1	-0,8
Jõgeva	0,2	0,3	0,0	0,8	2,0	1,4	2,6	1,0
Jõhvi	0,0	0,0	0,7	0,6	1,1	2,5	3,6	1,2
Kihnu	-2,9	-2,8	-3,3	-2,9	-2,3	-2,7	-0,7	-2,5
Kunda	-1,7	-2,0	-1,8	-2,5	-3,7	-0,1	1,6	-1,4
Kuusiku	-1,9	-1,5	-1,8	-0,6	0,2	-0,4	0,2	-0,8
Narva-Jõesuu	-0,1	-0,2	-0,1	0,0	-0,6	0,5	2,9	0,3
Lääne-Nigula	2,1	2,3	2,1	2,1	1,3	1,6	4,0	2,2
Pakri	0,1	-0,1	0,4	0,1	0,3	2,5	3,5	1,0
Pärnu	0,2	0,2	0,2	0,9	0,2	-0,1	2,7	0,6
Ristna	-0,2	-0,1	-0,1	0,4	-0,2	0,5	2,9	0,5
Rohuküla	-0,2	-0,1	0,0	0,3	0,5	1,2	3,2	0,7
Roomassaare	0,0	0,0	0,6	0,5	0,9	1,7	3,5	1,0
Ruhnu	-0,1	-0,1	0,2	0,6	0,9	1,2	3,1	0,9
Sõrve	-1,9	-1,9	-1,5	-2,0	0,9	1,3	1,0	-0,6
Tartu-Tõravere	-0,4	-0,6	0,0	0,7	1,5	2,2	2,4	0,8
Tiirikoja	-1,0	-1,4	-1,4	-2,0	-1,1	1,2	2,4	-0,5
Türi	-1,4	-0,7	-0,6	-0,4	1,1	1,2	1,1	0,0
Valga	-0,5	-0,8	-0,5	-1,4	0,9	2,1	2,2	0,3
Viljandi	0,3	0,3	0,6	1,0	0,9	1,4	3,9	1,2
Vilsandi	-0,3	0,0	-0,1	0,0	0,7	1,4	3,5	0,7
Virtsu	-1,3	-1,5	-1,6	-1,1	-0,4	0,3	1,7	-0,6
Väike-Maarja	-2,0	-0,9	-1,4	-0,3	1,5	0,7	0,3	-0,3
Usaldatavus (ME)	-0,6	-0,5	-0,4	-0,2	0,2	0,9	2,3	0,2
Täpsus (RMSE)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,4	2,7	1,4

Õhutemperatuuri prognoositud ja mõõdetud tulemuste erinevus vaatlusjaamades on esitatud tabelis 7. Usaldatavuse kriteeriumi järgi parimad prognoosid esinevad kohaliku ajajärgi kell 12-15 (09-12 UTC), kus arvutatud prognoosi keskmine kõrvalekalle oli -0.1 °C. Samas kõigis jaamades esinevate suurte erinevuste (vigade korral) prognoosi täpsus on vähenenud 1.9 °C. Täpsuse seisukohast parim tulemus õhutemperatuurile esineb ajavahemikul 03 UTC, kus arvutatud täpsus on 1.3 °C. Suurimad ebatäpsused on esinenud ajavahemikul 15-21 UTC, mil prognoosi täpsus varieerus vahemikus 2.2-2.4 °C.

Tabel 7. Prognoositud ja mõõdetud õhutemperatuur, 13.06.2009

Tabel 8

Vaatlusjaam	3	6	9	12	15	18	21	Keskmine
Haapsalu	-0,6	-0,6	-0,8	-0,1	0,7	2,8	-2,6	-0,2
Tallinn-Harku	-1,0	-1,3	-1,6	-1,4	-2,2	-1,2	-2,5	-1,6
Heltermaa	-0,9	2,0	2,9	2,8	5,0	-0,9	-1,8	1,3
Jõgeva	0,6	2,3	1,6	0,4	3,0	2,4	-2,7	1,1
Jõhvi	-1,7	-1,5	-1,3	-1,8	-1,4	-1,6	-1,5	-1,5
Kihnu	-1,1	0,5	-0,1	0,6	1,0	4,6	0,9	0,9
Kunda	-1,5	-1,7	-1,0	2,7	5,1	-2,2	-3,5	-0,3
Kuusiku	-0,5	2,5	3,1	1,5	-0,1	1,8	-2,8	0,8
Narva-Jõesuu	-1,5	-1,8	-2,0	-0,6	-2,2	-0,6	-3,3	-1,7
Lääne-Nigula	-0,9	-0,7	-1,4	-0,5	1,0	1,8	0,0	-0,1
Pakri	-2,0	-1,7	-1,3	-1,6	-2,6	-3,9	-3,6	-2,4
Pärnu	0,7	-1,1	-1,7	-1,3	-1,0	-1,1	-1,4	-1,0
Ristna	-2,4	-2,4	-2,3	-2,1	-2,7	-1,9	-2,4	-2,3
Rohuküla	-0,5	-0,8	-0,9	-0,8	-1,0	-1,6	-2,4	-1,1
Roomassaare	-0,4	-0,6	-1,1	-0,3	-0,4	-0,5	-0,3	-0,5
Ruhnu	-1,4	-0,6	-1,6	-1,2	-0,7	-0,6	-0,8	-1,0
Sõrve	-1,3	0,7	3,3	5,0	-3,7	-2,5	-0,7	0,1
Tartu-Tõravere	-0,2	2,7	1,3	0,4	2,3	0,2	-2,7	0,6
Tiirikoja	-1,7	-1,8	2,3	3,4	1,6	-0,4	-4,4	-0,1
Türi	-1,5	-1,6	-2,3	-1,8	-1,5	-0,8	-0,7	-1,5
Valga	-1,9	-2,8	-0,8	-0,3	-2,9	-5,3	-1,8	-2,3
Viljandi	-0,9	-0,7	-1,0	-1,0	-0,7	-1,1	-1,4	-1,0
Vilsandi	-2,4	-2,3	-1,7	-2,4	-2,7	-2,6	-3,7	-2,5
Virtsu	-1,5	0,3	1,8	0,1	0,4	1,1	-4,3	-0,3
Väike-Maarja	-0,3	-0,4	2,9	-2,9	-4,0	-1,2	-0,8	-0,9
Usaldatavus (ME)	-1,1	-0,5	-0,1	-0,1	-0,4	-0,6	-2,0	-0,7
Täpsus (RMSE)	1,3	1,6	1,9	1,9	2,4	2,2	2,4	2,0

Nagu tabelist 7 on näha on valdavalt kõikides jaamades mudeli poolt ennustatud madalamat õhutemperatuuri, kui seda on mõõdetud. Üksikutes vaatlusjaamades on mudel ennustanud kindlal ajamomendil tunduvalt kõrgemat õhutemperatuuri, kui mõõdetud. Näiteks Kuusiku vaatlusjaamas kella 15 UTC prognoos näitab 5.1 °C mõõtmis-tulemustest rohkem, samuti

Tartu-Tõravere vaatlusjaamas kella 12 UTC prognoos oli 5.0 °C kõrgem tegelikust õhutemperatuurist.

Tuulekiiruse prognooside kohta kasutame hinnangu andmiseks andmeid esitatud tabelis 9 ja lisas 6a ja 6b esitatud hajuvusdiagramme.

Tabelist 8 on näha, et arvutatud prognoosid ajavahemikel 03-21 UTC 25 vaatlusjaamas olid valdavalt üleprognoositud võrreldes vaatlustulemustega. Kui vaatluse prognoosi hindamisel usaldatavuse karakteristikut, siis parim tulemus esines kella 18 UTC prognooside korral, mil keskmine viga oli keskmisest tuulekiirusest 0.9 m/s kõrgem. Madalam prognoosi usaldatavus esines kella 12 UTC prognooside korral, kus mudeli ennustus on 2,3 m/s keskmisest tuulekiirusest kõrgem. Vaadeldes täpsust, siis parima tulemuse saame 03 UTC prognooside korral, mil arvutatud täpsus väikeste vigade (erinevuste) korral on 1.5 m/s.

Tabel 8. Prognoositud ja mõõdetud tuulekiiruste erinevused, 13.06.2009

Vaatlusjaam	3	6	9	12	15	18	21	Keskmine
Haapsalu	0,1	2,9	2,8	-0,1	4,2	0,4	4,5	2,1
Tallinn-Harku	2,7	2,7	2,7	3,0	3,4	3,1	1,5	2,7
Heltermaa	-0,9	0,7	0,3	3,2	0,9	1,2	0,4	0,8
Jõgeva	0,9	1,3	0,7	0,6	-0,6	1,1	-2,8	0,2
Jõhvi	1,0	3,0	2,5	4,0	2,7	1,1	-0,3	2,0
Kihnu	1,2	1,9	2,9	3,7	5,0	-0,1	1,6	2,3
Kunda	-0,4	0,9	0,2	1,6	2,6	-1,9	3,3	0,9
Kuusiku	1,4	0,6	1,3	-1,6	-1,5	-1,0	0,8	0,0
Narva-Jõesuu	0,2	0,7	1,4	2,3	2,4	0,7	4,0	1,7
Lääne-Nigula	-1,2	2,5	1,7	1,4	4,2	-1,2	2,7	1,4
Pakri	1,7	1,7	0,7	1,4	1,5	0,8	-0,5	1,0
Pärnu	1,1	1,4	1,8	4,2	5,3	6,9	2,7	3,4
Ristna	0,2	2,1	1,9	0,7	2,9	0,8	4,9	1,9
Rohuküla	1,0	0,7	-1,2	1,0	-0,1	-0,2	2,1	0,4
Roomassaare	1,5	3,0	2,5	6,0	5,3	2,0	1,5	3,1
Ruhnu	0,9	0,9	-1,6	0,5	1,1	0,0	-2,4	-0,1
Sõrve	2,3	1,6	1,8	2,9	4,0	1,3	1,0	2,1
Tartu-Tõravere	1,8	2,7	2,5	3,4	0,2	2,4	0,7	2,0
Tiirikoja	0,9	2,3	2,0	5,0	1,6	2,4	1,2	2,2
Türi	3,9	2,5	2,6	3,1	2,7	1,8	1,3	2,6
Valga	2,5	2,7	1,1	3,4	2,7	2,6	0,8	2,3
Viljandi	-0,1	0,5	-3,3	1,4	1,1	0,5	-1,0	-0,1
Vilsandi	0,0	0,5	0,6	1,7	-0,6	-2,0	2,9	0,4
Virtsu	0,4	1,2	0,8	1,0	2,4	-0,6	-0,3	0,7
Väike-Maarja	2,6	0,4	1,3	3,7	2,5	1,5	1,4	1,9
Usaldatavus (ME)	1,0	1,6	1,2	2,3	2,2	0,9	1,3	1,5
Täpsus (RMSE)	1,5	1,9	1,9	2,9	2,9	2,0	2,3	2,2

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö eesmärgiks oli numbrilise ilmaennustusmudeli WRF käivitamine ja ekstreemsete ilmastike olude modelleerimine ning saadud tulemuste verifitseerimine 14.07.2008 ja 13.06.2009 kuupäeval. Töö käigus on teostatud verifitseerimine sademete, õhurõhu, õhutemperatuuri ja tuulekiiruse prognoosidele.

Sademete verifitseerimisel on võrreldud prognoose, mis on arvutatud kuupäevadel 13.07 ja 14.07.2008 ning 12.06 ja 13.06.2009. Hindamise käigus on võrreldud sademeid, mis esinesid ajavahemikel 00-06, 00-12 ja 12-00 UTC.

Analüüsist on näha, et parimad tulemused 14.07 prognoosidel esinevad ajavahemikul 00-06 UTC, kus enamus vaatlusjaamades sademeid ei registreeritud ning mudel ei prognoosinud. Suurim erinevus prognoositud sademete ja mõõdetud sademete vahel esines Ruhnu vaatlusjaamas. Ajavahemike 00-12 ja 12-00 UTC sademete puhul on selgesti nähtav mudeli sademete prognoosi puudujääk. Väga suured kõrvalekalded ajavahemiku 12-00 UTC puhul esinesid Lääne-Nigula, Narva-Jõesuu, Haapsalu, Tallinn-Harku ja Võru vaatlusjaamas. Suurim mudeli sademete prognoosimise viga, kuni 56 mm esineb Võru vaatlusjaamas.

Sademete prognoosimisel 13.06.2009 on mudeli tulemused samuti küllaltki kehvad. Esimesel juhul, kui prognoos 13.06 arvutati 12.06.2009 andmetel oli domineerivaks ajavahemikel 00-12 ja 12-00 UTC vaatlusjaamades mõõdetud sademete kogus. Suurim viga prognoositud ja mõõdetud sademete vahel esineb Tartu-Tõravere vaatlusjaamas, kus 24 tunni mõõdetud sademet hulgaks registreeriti 55.5 mm, kuid tegelik prognoos näitas ainult 0.5 mm sadu. Teisel juhul, kui sademete prognoos arvutati 13.06.2008 oli tegemist valdavalt sademete ülehindamisega. Suurimad kõrvalekalded esinesid nii 6 ja 12 tunniste prognooside korral Haapsalu, Lääne-Nigula, Tartu-Tõravere, Tiirikoja ja Võru vaatlusjaamas.

14.07.2008 arvutatud õhurõhu prognooside korral on selgesti nähtav meteoolelemendi allahindamine ehk tegelikult ennustab mudel õhurõhku vähem, kui mõõdeti. Parim tulemus (ideaali lähedane) esines 03 UTC prognoosil, kus arvutatud prognoosi usaldatavus jaamades oli -0.02 hPa (0.0 hPa). Halvim usaldatavus esineb 21 UTC prognoosil, kus arvutatud keskmine viga oli -1.5 hPa. Prognoosi täpsuse seisukohalt esines parim tulemus (0.9 hPa) samuti 03 UTC ja halvim täpsus (1.8 hPa) 15 UTC prognoosil.

Õhutemperatuuri ja tuulekiiruse prognoosides domineerib mudeli poolne ülehindamine. See tähendab, et mudel on ennustanud vaadeldud tulemusest rohkem. Õhutemperatuuride juures esineb parim tulemus 03 UTC prognoosil, kus keskmine viga on 0,0 kraadi. Ühel juhul on mudeli ennustus keskmiselt temperatuuri ennustanud 1,0 kraadi vähem. Üldjuhul

õhutemperatuuri prognooside keskmine viga on 0,7 kraadi. Halvim prognoosi täpsus esines 15 UTC prognoosil, kus ruutkeskmine viga oli 2,6 kraadi. Üldine prognooside täpsus on 1,7 kraadi. Tuulekiiruse prognoosides esineb usaldatavuse seisukohast lähtuvalt parim tulemus 03 UTC ennustusel, kus keskmine viga on 1.4 m/s, mis omakorda on ka kõige täpsem prognoos (ruutkeskmine viga 1.7 m/s). Kõige ebatäpsemad tuulekiiruse prognoosid esinevad 12 ja 15 UTC, kus ruutkeskmine viga arvutuste kohaselt oli 4.2 ja 4.5 m/s.

13.06.2009 arvutatud õhurõhu prognoosides esineb 12-tunni tulemustes allahindamine mudeli poolt. Ajavahemikul 15-21 UTC esineb õhurõhu üleprognoosimine. Parima usaldatavusega prognoosid esinevad 12 UTC (ME = -0.2 hPa) ja 15 UTC (ME = 0.2 hPa), samuti antud prognoose võib lugeda täpseteks. Üldine prognooside usaldatavus jaamades oli 0.2 hPa ja täpsus 1.4 hPa. Õhutemperatuuri prognoosides on selgesti märgatav temperatuuri allahindamine. Usaldatavus varieerub vahemikus -0.1 kuni -2.0 kraadi. Parim prognoosi usaldatavus (ME = 0.1) esines kella 09 ja 12 UTC prognoosis. Tuulekiiruse prognoosides on domineerivaks tuulekiiruse ülehindamine mudeli poolt. Parim prognoosi usaldatavus esines kella 18 UTC ajal, kus keskmine viga oli 0.9 m/s. Parima täpsusega prognoos esines 03 UTC ajal, kus ruutkeskmine viga oli 1.5 m/s.

Kokkuvõttes oli valitud perioodidele iseloomulik rohkete hoogsademetes esinemine ning võimalus katsetada mudeli kvaliteeti eelkõige sademete prognoosimisel Eestis. Tulemused näitavad, et mudeli sademete prognoosimine on puudulik, seda eeskätt hoogsademetes domineerimise korral. Õhurõhu, õhutemperatuuri ja tuulekiiruse prognoosid hindamisel suuri kõrvalekaldeid ei näidanud ning antud tulemused on rahuldavad.

SUMMARY

Title of this master thesis is "Implementing and verifying WRF modelling system for weather forecasting in Estonia".

The aim of this thesis is to implement and run Weather Research and Forecast (WRF) modelling system and to verify weather conditions in 14.07.08 and 13.06.09. Additional observation data is essential to verify WRF model output. Observation data for pressure, temperature and windspeed is available from 25 and precipitation data is available from 21 weather stations.

Precipitation verification involved forecast from 13.07-14.07.08, 12.06-13.06.09 and selected time range 00-06, 00-12 and 12-00 UTC. In all cases the best results occur at 00-06 UTC. For time ranges 00-12 and 12-00 UTC precipitations by model were enormously under- or overestimated. Largest difference between forecasted and measured values occurred on 14.07.2008 in Võru (-56 mm) and 13.06.2009 in Lääne-Nigula (33.2 mm).

In pressure, temperature and windspeed WRF model showed good results. In 14.07.08 model tends to underestimate pressure and overestimate temperature and windspeed. Calculated mean error for pressure forecast varies between -0.02 to -1.5 hPa, mean error for temperature varies from -1.0 to 1.2 °C and mean error for windspeed varies between 1.7 to 4.5 m/s. For forecasts 13.06.09 model tends to underestimate temperature, overestimating pressure and windspeed. In this case mean error for pressure varies between -0.6 to 2.3 hPa, mean error for temperature -2.0 to -0.1 °C and windspeed mean error 0.9 to 2.3 m/s.

Verification results display WRF model deficiencies in forecasting precipitations which are probably associated with the parametrization of convective processes.

KIRJANDUS

- Adams, M. D., 2006. JasPer Software reference manual (version 1.900.1). Department of Electrical and Computer Engineering, University of Victoria, Canada.
- Ansper, I., 2001. HIRLAM mudeli tuuleprognoosi hindamine ja kasutamine Läänemerel. Bakalaureusetöö. Eesti Mereakadeemia, Tallinn.
- Ansper, I., Fortelius, C., 2003. HIRLAM-mudeli tuuleprognooside hindamine Läänemerel. Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis, 93, 195-205.
- ARW Modelling System version 3, 2010. Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research.
- Comet Program MetEd kodulehekül <http://www.meted.ucar.edu/>
- Cozens, S., Wainwright, P., 2000. Beginning Perl, 1st Edition. Wrox Press.
- Doty, B., 1995. The Grid Analysis and Display System documentation, Institute of Global Environment and Society (IGES) / Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies (COLA)
- EMHI kodulehekül <http://www.emhi.ee> (Ilmaprognoosid > HIRLAM mudel).
- Grads Documentation <http://grads.iges.org/grads/gadoc/index.html> (13.04.2010)
- Holton, R., 1972. Introduction to Dynamic Meteorology. Second edition. Academic Press.
- Holton, R., 2004. Introduction to Dynamic Meteorology. Fourth edition. Academic Press
- Ilmatarga kodulehekül: <http://meteo.physic.ut.ee/ilmatark> (24.07.2010).
- Jolliffe, I. T., Stephenson, D. B., 2003. Forecast verification – A practitioner's guide in atmospheric science, Wiley.
- Kalnay, E., 2002. Atmospheric Modelling, Data Assimilation, and Predictability. Cambridge University Press.
- Luhamaa, A., 2003. Modeling a heavy rainfall case in North-East Estonia, August 2003. Influence of model resolution. HIRLAM Newsletter No.48 Article24
- Männik, A. 2005. Ilma ennustavad arvutid. Veismann, U., Veskimäe, R. (toim.) Universum valguses ja viimas, 194-199.
- Männik, A., Rõõm, R., 2009. Current situation with NH HIRLAM. HIRLAM Newsletter No 41 Article 19.
- Männik, A., Rõõm, R., Non-Hydrostatic adiabatic kernel for HIRLAM Part III: Semi-implicit semi-Lagrangian scheme.
- Männik, A., Rõõm, R., Luhamaa, A., 2006. Non-Hydrostatic adiabatic kernel for HIRLAM Part IV: Semi-implicit semi-Lagrangian scheme. University of Tartu.

- Niklus, I., 2000. Ilmasituatsiooni analüüs numbrilise ilmaennustusmodeliga HIRLAM. Bakalaureusetöö. Tartu Ülikooli Geograafia Instituut.
- Nurmi, P., Heiskanen, M., Arvola, E., Frisk, M., 2000. Forecast verification Report, FMI.
- Pedassaar, E., 2010. Udu ennustamine numbrilise ilmaennustusmodeliga HIRLAM“. Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool.
- Richardson, L. F., 1922. Weather Prediction By Numerical Process, Cambridge University Press.
- Rio, J., 2009. Application and verification of ECMWF products, Instituto de Meteorologia.
- Sarapu, R., 2004. Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudis töötava ilmaennustus-mudeli HIRLAM õhutemperatuuri prognooside hindamine. Diplomitöö, Eesti Mereakadeemia.
- Sarapu, R., Tomingas, O., 2007. 2005. aasta augusti ilmaolude modelleerimine HIRLAM ja RegCM mudeli baasil. Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis, 102, 117-130.
- Savijärvi, H., 1994. Numerical Models of the Atmosphere, Lecture notes. Käsikirjaline loengukonspekt. Tartu Ülikool, Keskkonnanäüüsika Instituut.
- Serebrijan, J., 2009. Satelliidipõhine hetkeennustusesüsteem Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudis“. Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool.
- WRF kodulehekül: <http://www.wrf-model.org/index.php> (20.05.2010).
- Course of Euromet kodulehekül: <http://euromet.meteo.fr/> (02.08.2010).