

**Tartu Ülikool, Füüsika-keemiateaduskond  
Keskkonnanfüüsika instituut**

*Läbi vaadatud:*

**Tartu Ülikooli Füüsika-keemiateaduskonna nõukogu  
Dekaan Prof. Peeter Burk  
10. märts 2004**

**Täiustatud integreerimisskeemiga kõrglahutuslik  
mittehüdrostaatiline atmosfääridünaamika regionaalmodel**

Teadussuund: *Täppisteadused*

**Sihtasutuse Eesti Teadusfond  
GRANDIPROJEKTI nr 4700 LÕPPARUANNE**

**Rein Rõõm**

9.märts 2004 ...../allkiri/

Projekti algus 01.01.2001 a  
Lõpp 31.12.2003 a

Grandi üldsumma: 300 tuhat krooni

**Tartu  
2004**

## Sisukord

Annotatsioon	3
Annotation	3
1. Sissejuhatus	4
2. Töö kirjeldus	7
2.1. Mittehüdrostaatiline osaliselt ilmutamata pool-Lagrange'i integreerimisskeem atmosfääridünaamika võrrandeile rõhukoordinaatides (NHSISL)	7
2.2. Mittehüdrostaatilisel rõhukoordinaatmudelil rajaneva HIRLAMi rakendamine EMHI-s	31
3. Kokkuvõte	37
4. Kirjandusviited	38
5. Projekti põhitäitjate nimekiri	39
6. Finantsaruanne (vorm 10)	40
6.1. Ostetud seadmed koos maksumusega	41
6.2. Välislähetused	41
6.3. Töötasufondi ja stipendiumi kasutamine	42
7. Grantiga seotud teaduspublikatsioonid (bibliograafiline loend)	43
8. Granti raames kaitstud magistri- ja doktoritööd	44
9. Grantiga seotud teaduspublikatsioonid (separaadid)	45

## **Annotatsioon**

Eesti ilma ja kliimaga seotud regionaalprobleemide uurimiseks on loodud suure lahutusega, mittehüdrostaatiline (NH), rõhukoordinaatesitusel baseeruv, osaliselt ilmutatud pool--Lagrange'i integreerimisskeemi (SISL = semi-implitsiidne semi-Lagrange'i) kasutatav atmosfäärinäamika numbriline mudel NHSISL. Loodud mudel on realiseeritud Põhjamaade ühismudeli HIRLAM keskkonnas ja moodustab HIRLAMi kõrglahutusliku mittehüdrostaatilise laienduse. Loodud kompleksne tarkvarakeskkond HIRLAM + NHSISL on tööle pandud Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudis eeloperatsioonilises režiimis, kus ühelt poolt toimub NHSISL katsetamine reaalses tingimustes, teiselt poolt aga toodetakse regulaarselt kõrglahutuslikku numbrilist ilmaennustust Eesti tarbeks.

## **Annotation**

High-resolution, non-hydrostatic (NH), semi-implicit, semi-Lagrangian (SISL) numerical model of atmospheric dynamics NHSISL is created for investigation of regional weather and climate problems of Estonia. NHSISL is numerically implemented in the framework of local area model HIRLAM and represents the high-resolution extension of HIRLAM. Joint model HIRLAM + NHSISL is applied for pre-operational tests at Estonian Meteorological and Hydrological Institute. This provides excellent opportunity to test the new model software in real condition, and simultaneously contributes to dissemination of modern weather forecast methods in Estonia.

## 1. Sissejuhatus

Atmosfääridünaamika, atmosfääris toimuvate protsesside ja nähtuste uurimine on oluline keskkonnateaduste alalõik, mis võimaldab selgust tuua võimalikesse kliimatrendidesse, ennustada erakordseid ilmanähtusi ja hinnata inimtegevuse mõju loodusesse. Ka on atmosfääridünaamika täpse ja õigeaegse ilmaennustuse aluseks. Suur nõudmine adekvaatsete dünaamikamudelite järele (õigemini küll mudeli väljundi, so ennustuste ja prognoosi järele) on tunnetatult olemas ka eesti keskkonnateadlaste ja -spetsialistide hulgas.

Põhimeetod atmosfääri dünaamilise käitumise uurimisel, ilmaennustuses ja kliimatrendide väljaselgitamisel on numbriline modelleerimine. Oluline ja aktuaalne kogu maailma atmosfääriteaduse seisukohalt on atmosfääridünaamika mudelite täpsuse ja usaldusväärsuse tõstmine, mis on pidev protsess, toimunud lakkamatult ja intensiivselt kogu numbrilise atmosfääridünaamika viiekümneaastase ajaloo vältel.

Varasematel aegadel oli numbriliste mudelite kvaliteedi tõstmisel peamiseks meetodiks mudeli lahutuse suurendamine (võrgusammu vähendamine), mis toimus käsikäes arvutustehniliste võimaluste (mälu maht ja kiirus) arenguga.

*Mudeli lahutuse määrab tema horisontaalne võrgusamm. Keskmise ja madala lahutusega hüdrostaatilistel mudelitel on see suurem kui 10 km, mudeleid võrgusammuga alla 10 km - mis nõuavad juba mitterhüdrostaatilist dünaamikat - arvatakse suure lahutusega mudeliteks.*

Madalate lahutuste piirkonnas on lahutuse suurendamine toimunud hüdrostaatilise dünaamika paradigma raames. Lahutustest ca 10 km alates suuremate lahutuste poole on tarvilik baasmudeli füüsika ja matemaatika kardinaalne revisjon. Enim muutuvad dünaamikavõrrandid, kuna varasem hüdrostaatikalähend ei ole enam kehtiv ja tarvitusele tuleb võtta mittehüdrostaatilised võrrandid. See toob kaasa uued nõuded kasutatavatele numbrilistele lahendusmeetoditele. Samuti osutub tarvilikuks rakusiseste füüsikaprotsesside käsitlemise täiustamine, sest paljud varasemad parametriseeritult arvesse võetud protsessid saavad dünaamiliselt ilmutatuks. Tarvilik on kaasata uusi algandmeid ja uusi andmehõive tehnikaid. Oluliselt detailsemat käsitlust on vaja aluspinna ja atmosfääri vastasmõju kirjeldamisel. Tegemist on suure väljakutsega numbrilistele modelleerijatele, milles kombineeruvad uus füüsika, matemaatika ja uued numbrilised meetodid. Vaatamata keerukusele on huvi mittehüdrostaatilise modelleerimise vastu suur tema olulise rolli tõttu uue põlvkonna ilmaennustuses. Mittehüdrostaatiline mudel on arenduses enamikus Euroopa suuremates ilmakeeskustes: *UK Meteorological Office* Inglismaal, *Meteo-France* Prantsusmaal, *Deutsche Wetterdienst* Saksamaal ja *HIRLAM Konsortsium* Põhja-Euroopas (*HIRLAM = High Resolution Limited Area Model* on ühisprojekt, kus osalevad Põhjamaad, Iirimaa, Island, Holland ja Hispaania ning assotsieerunud liikmena *Meteo-France*).

Tartu Observatooriumi dünaamilise meteoroloogia töörühmas alustati (1998) ja TÜ Keskkonnanfüüsika instituudis on (alates 2002. aastast) jätkatud tervikliku kontseptuaalse atmosfääridünaamika mudeli loomist ja arendamist, mis kasutab mittehüdrostaatilise dünaamika kirjeldamisel rõhuruumi rõhukoordinaate). Mudel baseerub Miller-Pearce (1974), White'i (1989) ja Rõõmu (1989, 1990, 1998) teoreetilistel uurimustel. Tegemist on universaalse mudeliga, mis kirjeldab ühesuguse eduga nii hüdrostaatilist liikumist kui ka mittehüdrostaatilisi efekte skaalapiirkonnas 100 meetrist kuni planetaarse mastaabiga liikumiseni (Rõõm, Männik 1999).

Teoreetilises plaanis on rõhukoordinaatesitus dünaamika kirjeldamisel atraktiivne: võrrandid on lihtsad ja elegantsed, kirjeldades atmosfääri kui rõhuruumis kokkusurumatut vedelikku. Sellega välistatakse sisemised häälelained, mis aeglastel protsessidel moodustaksid (mudeli kvaliteeti vähendava) ebasoovitava müra. Välistest häälelainetest (nn. Lambi lainetest, mis on ookeani pindlainete analoog atmosfääris), mis samuti ei ole reaalses atmosfääris ergastatud, on võimalik vabaneda sel teel, et rakendatakse aluspinnarõhule vertikaalselt integreeritud massi detailse bilansi tingimust. Tulemuseks on mittehüdrostaatiline mudel, milles prognostiliste (evolutsiooniliste) võrrandite arv on isegi ühe võrra väiksem kui hüdrostaatilises tavamudelis, sisaldades vaid kolme võrrandit -- kahte tuule horisontaalsetele komponentidele ja ühte temperatuurile.

Suur on rõhuesituse rakenduslik väärtus. Nimelt võimaldab rõhuruumi kasutamine rõhukoordinaatidel baseeruvatele hüdrostaatilistele mudelite (aga sellised on praegused dünaamikamudelid, sealhulgas ilmaennustuses kasutatavad, valdavas enamuses) vahetut mittehüdrostaatilist üldistust. Seejuures on võimalik kogu varasem "hüdrostaatiline" tarkvara, mis puudutab algandmete analüüsi ja initsialiseerimist, füüsikalist parametriseerimist, järelanalüüsi ja visualiseerimist, uude mudelisse üle võtta (tõsi küll, füüsikaline parametriseerimine tahab olulist kohendamist, kuid vähemasti ei pea alustama tühjalt kohalt). Siin on majanduslik efekt väga suur -- hinnanguliselt alandab selle meetodi kasutamine hüdrostaatiliselt mittehüdrostaatilisele mudelile siirdumise maksumust ca kümme korda.

Arendatud teoreetilist kontseptsiooni rakendati numbrilise mudeli HIRLAM mittehüdrostaatilise kõrglahutusliku versiooni (,kõrglahutusliku jätku') tegemisel.

Aastatel 1997 - 200 loodi mittehüdrostaatiline adiabaatiline tuum Euleri muutujates ilmaennustusmudelile HIRLAM (Männik ja Rõõm 2001, Rõõm 2001, Rõõm ja Männik 2001, ETF grant 2624, 1997 - 2000), mis 'Tartu Mudeli' nime all kuulub HIRLAMi arendusmudelite hulka. See on hübriidkoordinaatmudel. Üläpiir on paigutatud lõpmata kõrgele (tasemele  $p = 0$  rõhuruumis), külgedel rakendatakse hüdrostaatilise HIRLAMi relaksatsioonitsooni, mis tagab prognoositavate väljade ühildumise äärtel etteantud välistingimustega.

Algne integreerimisskeem oli **ilmutatud Euleri skeem**. Tänu häälelainete täielikule filtratsioonile saavutati vaatamata ilmutatud skeemi rakendamisele märkimisväärne ajasamm, võrreldav hilisema poolilmutatud Euleri skeemi omaga.

Edasi, veel grant 2624 raames loodi ja testiti nn. **poolilmutatud Euleri skeem**, mis oli oluline edasimineku varasemaga võrreldes, võimaldades ühelt poolt suuremaid ajasamme ja ruumlahutusi ning olles teiselt poolt täpsem ja stabiilsem.

### **Seda arendustegevust on jätkatud käesoleva grandiprojekti raames.**

Areng on toimunud kahes suunas.

1. On jätkatud numbrilise skeemi arendamist. Konkreetselt on loodud uus originaalne integreerimisskeem NHSISL - mittehüdrostaatiline, rõhukoordinaatidel baseeruv, pool-ilmutatud, pool- Lagrange'i kahe-ajatasemeline numbriline integreerimisskeem (NHSISL = Non-Hydrostatic, Semi-Implicit Semi-Lagrangian model). Mudelit tuntakse HIRLAM-projekti raames ka üldnimetuse 'Tartu mudel' all.

2. Loodud kõrglahutuslikku mudelit on asunud rakendada konkreetsete, Eestile aktuaalsete probleemide lahendamisel. Läbi on viidud mudeli programmikoodi paralleeliseerimine (klastritel ja superarvutitel rakendamiseks) ning saadud tarkvara on installeeritud Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudi (EMHI) 12-protsektorilisele klastrile. Täielikult on rakendatud poolilmutatud Euleri skeem, mille abil toimub regulaarne 36-tunni ennustus Eesti jaoks lahutustel 11 km ja 3.3 km. Kuigi mudel toimib ametlikult nn eel-operatsioonilises katsetuste režiimis, toimub

temaga tegelikult juba regulaarne ilmaennustus Eesti ja lähiümbruse kohta ning tulemusi kasutatakse igapäevase, jooksva sünoptilise prognoosi koostamisel.

Installeeritud ja katsetustega alustatud on ka mudeliga NHSISL. Nagu esmased testimised näitavad, on see skeem väga täpne suhteliselt sileda aluspinnaga (nagu Eesti) aladel. Kuna ta võimaldab mitmekordset arvutuslikku jõudlust eelnevate integreerimisskeemidega (ilmutatud Euler, poolilmutatud Euler) võrreldes, olles samal ajal väga täpne, siis saab ta olema perspektiivis EMHI numbrilise ilmaennustuse baasmudeliks.

Kogu kirjeldatud rakenduslik töö on toimunud HIRLAM projekti egiidi all ja heakskiidul ning tihedas koostöös Soome Meteoroloogiainstituudi ja EMHI-ga.

Järgneva aruande eesmärk on anda ülevaade kahel nimetatud põhisuunal toimunud uurimistööst, selle käigus saadud põhitulemustest ning uurimistöö rakenduslikest väljundeist.

## 2 Töö kirjeldus

### 2.1 Mittehüdrostaatiline osaliselt ilmutamata pool-Lagrange'i integreerimisskeem atmosfääridünaamika võrrandele rõhukoordinaatides (NHSISL)

#### Tähistused

$t$  - aeg

$\Delta t$  - ajasamm

$\Delta t_k$  - kriitiline ajasamm ( $\Delta t_k = \Delta x/U$ )

$\omega = dp/dt$ ,  $\omega_{k+1/2}$ ,  $\omega_{ijk+1/2}$  - 'omegakiirus', rõhu muutumise kiirus materiaalses osakeses

$\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{v}_k$ , - horisontaalse kiiruse (tuule) vektor

$u$ ,  $u_k$ ,  $u_{i+1/2,jk}$ ,  $v$ ,  $v_k$ ,  $v_{ij+1/2,k}$ , - tuule komponendid

$k$  - täisarvulise  $\eta$ -taseme indeks

$k + 1/2$  - poolarvulise  $\eta$ -taseme indeks

$\eta_k$ ,  $\eta_{k+1/2}$  - täis ja poolarvulised  $\eta$ -tasemed

$T$ ,  $T_k$  - temperatuur

$R$ ,  $c_v$ ,  $c_p$ ,  $\kappa = R/c_p$  - kuiva õhu gaaskonstandid

$\bar{p}^n = (p_{k-1/2} + p_{k+1/2})/2$  - vertikaalse keskmistamise operatsioon

$\langle \dots \rangle$  - keskmine üle isobaarpinna antud orograafia korral

$\{ \dots \}^0$  - keskmine üle isobaarpinna ühtlase aluspinnarõhu  $p_s = \text{PNULL}$  (= 900 - 1000 hPa) korral

#### 2.1.1 Meetodi esitlus

Pool-Lagrange'i integreerimismeetodi aluseks on väljade jälgimine ja arvutus materiaalses aineosakeses selle liikumisel piki individuaalset trajektoori ühe ajasammu jooksul ning saadavate väljaväärtuste interpoolimine regulaarsele võrgule iga ajasammu lõpul.

Meetod on ühesugune sõltumata konkreetsest dünaamikamudelist (hüdrostaatiline (HS), mittehüdrostaatiline (NH) vms). See on rakendusteks väga mugav asjaolu, kuna võimaldab näiteks kogu HS mudeli trajektooriarvutuse üle võtta muutumatul kujul NH mudelisse.

Väljade muudu jälgimine osakese liikumisel piki trajektoori koosneb tegelikult kolmest osast, kolmest suhteliselt iseseisvast allprobleemist:

- A Trajektooriarvutus ühe ajasammu ulatuses
- B Liikumis/tendentsivõrrandite integreerimine piki trajektoori
- C Algpunktis (mis ei ole regulaarne võrgupunkt) leitud/arvutatud väljade interpoleerimine võrgupunktidesse.

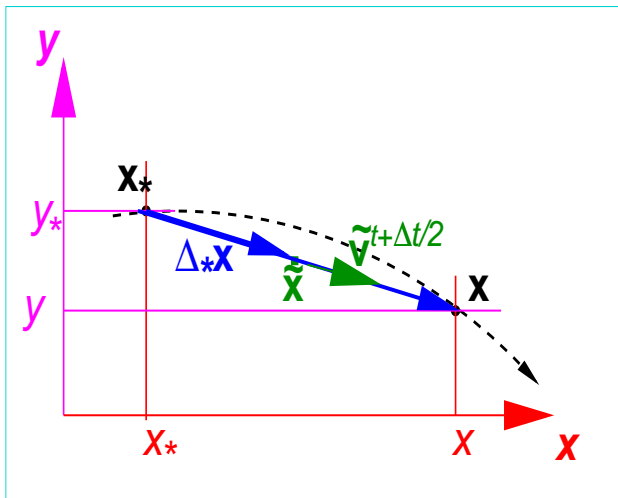
**Trajektooriarvutus.** See toimub nagu skemaatiliselt kujutatud Joonisel 1. Lõpp-punkt on võrgupunkt  $\mathbf{x}$  hetkel  $t + \Delta t$ , lähtepunkt  $\mathbf{x}_*$  hetkel  $t$  tuleb leida. Aluseks on asjaolu, et kiirusväli  $\tilde{\mathbf{v}}^{t+\Delta t/2}$  vahepunktis

$$\tilde{\mathbf{x}} = \frac{\mathbf{x} + \mathbf{x}_*}{2}$$

on teada ning kehtib seos

$$\mathbf{x}_* = \mathbf{x} - \Delta t \tilde{\mathbf{v}}[(\mathbf{x} + \mathbf{x}_*)/2, t + \Delta t/2].$$

Tegemist on mittelineaarse võrrandiga  $\mathbf{x}_*$  suhtes, mis lahendatakse numbriliselt ning lahendatakse iteratiivselt. Vastav programmikood on HIRLAM süsteemil olemas ja seda kasutatakse ka NH arendustes.



**Joonis 1.**

Selgituseks integreerimis-  
meetodi juurde.

Punktiiriga on näi-  
datud tegelik trajektoori  
lähtepunktist  $\mathbf{x}_*$  lõpp-  
punkti  $\mathbf{x}$ . Integraalide  
lähendamisel kasutatakse  
vaid funktsioonide vää-  
rtusi alg- ja lõpp-punktides  
Vahepunkt  $\tilde{\mathbf{x}}$  on tarvilik  
vaid trajektoori enese  
leidmisel.

**Integraalid piki trajektoore.** Vaatame Lagrange'i võrrandit  $u(x, t)$ -  
le,

$$\frac{du}{dt} = F,$$

mille integraal piki trajektoori punktist  $\mathbf{x}_*$  punkti  $\mathbf{x}$  on

$$u^{t+\Delta t} - u_*^t = \int_t^{t+\Delta t} F dt .$$



kus tärn tähendab väärtust lähtepunktis, ajahetk  $t$  on näidatud ülaindeksiga ja  $u^{t+\Delta t}$  on välja väärtus lõpp-punktis  $\mathbf{x}$  ajahetkel  $t + \Delta t$ .

Olgu  $F$  pealiikme (vahel nimetatud ka lineaarseks) ja häiritusliikme (mitte-lineaarse liikme) summa:

$$F = P + H .$$

Siis

$$u^{t+\Delta t} - u_*^t = \int_t^{t+\Delta t} (P + H) dt .$$

Lähendame integraale järgmiselt:

$$\int_t^{t+\Delta t} P dt \rightarrow \frac{1 - \varepsilon}{2} P_*^t + \frac{1 + \varepsilon}{2} P^{t+\Delta t} ,$$

$$\int_t^{t+\Delta t} H dt \rightarrow \frac{1 - \varepsilon}{2} H_*^{t+\Delta t/2} + \frac{1 + \varepsilon}{2} H^{t+\Delta t/2} ,$$

kus  $\varepsilon \ll 1$  on väike detsentreerimisparameeter. Selle tulemusena

$$u^{t+\Delta t} = \hat{u} + \frac{\Delta t_+}{2} P^{t+\Delta t} ,$$

kus

$$\frac{\Delta t_{\pm}}{2} = \Delta t \frac{1 \pm \varepsilon}{2} ,$$

$$\hat{u} = \left( u^t + \frac{\Delta t_-}{2} P^t + \frac{\Delta t_-}{2} H^{t+\Delta t/2} \right)_* + \frac{\Delta t_+}{2} H^{t+\Delta t/2} .$$

Siin  $\hat{u}$  on nn ilmutatud osa  $u$  lõppväärtusest ja  $\frac{\Delta t_+}{2} P^{t+\Delta t}$  on ilmutamata areng (mille tegelikuks arvutamiseks peab teadma tema sõltuvust väljast  $u$  lõpp-punktis ja lõpphetkel, so  $u^{t+\Delta t}$ -st).

**Interpoleerimine lähtepunktis.** Nagu nähtub, tuleb oluline osa (ümarsulgudes paiknev osa) ilmutatud arengust  $\hat{u}$  leida lähtepunktis  $\mathbf{x}_*$ , mis ei ole regulaarne võrgupunkt. Seepärast on siin tarvilik leitud välja (ümarsulgudes oleva avaldise) interpoolimine võrgupunktidelt punkti  $\mathbf{x}_*$ . Ka seda on võimalik sooritada olemasolevate HS HIRLAM rutiinide abil.

### 2.1.2 Lähtevõrrandid

Diskreetse lõppvõrrandite süsteemi tuletamine toimub mitmes järgus. Kõigepealt diskretiseeritakse võrrandid vertikaaldimensioonis. Seejärel eraldatakse neis välja peaosad ja häiritusliikmed. Sel viisil ette valmistatud mudelis viiakse läbi lõplik diskretiseerimine ajas ja ruumis (horisontaalkoordinaatide järgi).

Pideval juhul on lähtevõrrandid toodud töös (Rõõm, 2001). Oluline erinevus on aga siiski olemas: nimelt kasutame käesoleval juhul kohastumata aluspinnarõhku ja selle arengut kirjeldab aluspinnarõhu evolutsioonivõrrand. Varem kasutasime kohastunud aluspinnarõhuga mudelit, mis võimaldas elimineerida kiired pinnalained aluspinnarõhule ja suurendada ajasammu. See oli võimalik, kui ajasamm ei olnud liialt pikk ja ei ületanud üht kriitilist  $\Delta t_k = \Delta x/U$  ( $\Delta x$  -võrgusamm,  $U$  - maksimaalne kiirus). Kriitiline ajasamm on Euleri skeemide puhul absoluutne ülempiir igal juhul kriitiline ajasamm. Ilmutatud-kohastunud mudeli puhul on see ca  $0.4\Delta t_k$ -d ja ilmutamata Euleri puhul ca  $0.8\Delta t_k$ -d.

Teoreetiline uurimine lineaarse mudeliga näitab (Marko Zirgi magistritöö teema), et kriitilise ajasammu ületamisel muutub kohastunud aluspinnarõhuga mudel vastuoluliseks, mis ilmneb kõrgemate horisontaalsete spektraalmoodide katkevas käitumises aluspinnal. See on peapõhjus, miks käesolevas uurimuses on loobutud aluspinnarõhu kohastumise kitsendavast tingimusest. Alustame sellest, et esitame lähtevõrrandid kohe vertikaalselt diskretiseeritud juhul. Adiabaatilises lähendis need on:

**Vertikaalkiiruse võrrand**  $\eta$ -tasemel  $k + 1/2$

$$\frac{d\omega}{dt} = -W\Delta\phi + a_\omega^0, \quad (1a)$$

**Horisontaalkiiruse (tuule) võrrand**  $\eta$ -tasemel  $k$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\hat{\mathbf{G}}(\phi + \varphi) - \mathbf{f} \times \mathbf{v}, \quad (1b)$$

**Soojusvõrrand**  $\eta$ -tasemel  $k$

$$\frac{dT}{dt} = S\bar{\omega}^\eta \quad (1c)$$

**Aluspinnarõhu võrrand**  $\eta$ -tasemel  $Nlev + 1/2$

$$\frac{dp_s}{dt} = \omega|_{p=p_s}, \quad (1d)$$

**Pidevusvõrrand** (voolamise solenoidaalsuse tingimus)  $\eta$ -tasemel  $k$

$$\hat{\mathbf{G}}^+ \cdot \mathbf{v} + \frac{\Delta\omega}{\Delta p} = 0, \quad (1e)$$

Siin  $\varphi$  on hüdrostaatiline geopotentsiaal

$$\varphi_k = \varphi_s + \sum_{k+1}^N (\alpha RT)_j + \frac{1}{2}(\alpha RT)_k = \varphi_s + \Gamma_k(RT), \quad (1f)$$

ning võrrandite koeffitsiendid on

$$W_{k+1/2} = \left( \frac{p^2}{H^2 \Delta p^\eta} \right)_{k+1/2}, \quad (a_\omega^0)_{k+1/2} = \left( \frac{c_v \omega^2}{c_p p} \right)_{k+1/2}, \quad S = \left( \frac{\varkappa T}{\bar{p}^\eta} \right)_k, \quad (1g)$$

$$\alpha_k = \ln \left( \frac{p_{k+1/2}}{p_{k-1/2}} \right) \approx 2 \frac{p_{k+1/2} - p_{k-1/2}}{p_{k+1/2} + p_{k-1/2}} = \frac{\Delta p_k}{\bar{p}_k^\eta}.$$

Alumise ääretingimusena mittehüdrostaatilisele geopotentsiaalile vaatame lineaarsest mudelist järelduvat seost rõhufluktuatsiooni  $p'_s = p_s - \bar{p}_s$  ja baarilise (mittehüdrostaatilise) geopotentsiaali vahel:

$$\frac{p'_s}{\bar{p}_s} = \frac{\Phi'_s}{C^2} = \frac{\phi_s}{C^2},$$

kus  $\Phi'_s$  on kogupotentsiaalihälve keskmisel aluspinnal, mis termilise potentsiaalihälbe nulliksmuutumise tõttu on võrdne baarilise potentsiaaliga selsamal tasemel  $\phi_s$  ja suurus

$$C^2 = (RT)_s$$

on isohoorse häälekiiruse ruut. Esituse

$$p_s = \bar{p}_s \left( 1 + \frac{p'_s}{\bar{p}_s} \right)$$

abil tuleb seos aluspinnarõhu ja baaarilise geopotentsiaali vahel kujule

$$p_s = \bar{p}_s \left( 1 + \frac{\phi_s}{C^2} \right). \quad (2)$$

### 2.1.3 Pea- ja häiritusliikmete lahutamine võrrandis

See seisneb kõikides võrrandis (1a) – (1f) horisontaalselt homogeenise osa ning temperatuurivõrrandi S-liikmes  $\varkappa T$  konstantse osa kuulutamises peaosaks ning ülejäänu lugemises häirituseks (häirituse üldtähis olgu a). Võrrandis (1a) on aluseks lahutus

$$W = W^0 + W', \quad W^0 = \left( \frac{p^2}{H^2 \Delta p^\eta} \right)^0, \quad W' = W - W^0 \quad (3a)$$

(see on siiski vaid orienteeruv esitus  $W^0$ -ile, täpse kuju saame allpool tingimustest et hilisem  $\hat{M}$ -liige tuleks diagonaalne).

$p$ -horisontaalse gradiendi jagame

$$\hat{\mathbf{G}} = \nabla + \hat{\mathbf{G}}', \quad (3b)$$

termilise geopotentsiaali esitub

$$\begin{aligned} \varphi_k &= \varphi_k^0 + \varphi_k', \\ \varphi_k^0(T) &= \sum_{k+1}^N (\alpha^0 R^0 T)_j + \frac{1}{2} (\alpha^0 R^0 T)_k \equiv R^0 \Gamma_k^0(T), \\ \varphi_k' &= \varphi_k - \varphi_k^0. \end{aligned} \quad (3c)$$

Liikme  $S$  esitame

$$S = S^0 + S', \quad S^0 = \varkappa^0 T^0 \frac{\alpha^0}{\Delta p^0}, \quad S' = S - S^0, \quad T^0 = const. \quad (3d)$$

Muutusteta (kaheks jagamata) jätame pidevusvõrrandi ja aluspinnarõhu võrrandi. Tulemusena, võrrandid (1) tulevad kujule

$$\frac{d\omega}{dt} = -W^0 \Delta \phi + a_\omega, \quad (4a)$$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla(\phi + \varphi^0) - \mathbf{a}_v, \quad (4b)$$

$$\frac{dT}{dt} = S^0 \overline{\omega}^\eta + a_T, \quad (4c)$$

$$\frac{dp_s}{dt} = \omega_s, \quad (4d)$$

$$\hat{\mathbf{G}}^+ \cdot \mathbf{v} + \frac{\Delta\omega}{\Delta p} = 0, \quad (4e)$$

kus

$$a_\omega = \frac{c_v \omega^2}{c_p p} - W' \Delta\phi, \quad a_T = S' \bar{\omega}^\eta, \quad (4f)$$

$$\mathbf{a}_v = \left[ \hat{\mathbf{G}}(\phi + \varphi) \right]' + f \mathbf{k} \times \mathbf{v} \equiv \hat{\mathbf{G}}(\phi + \varphi) - \nabla(\phi + \varphi^0) + f \mathbf{k} \times \mathbf{v}. \quad (4g)$$

Alumise ääritingimusena on muutumatult jõus (2).

### 2.1.4 Ilmutamata Lagrange'i esitus

Rakendame võrrandeile (4a) - (4d) alapunktis 2.1.1, 'Meetodi kirjeldus' esitletud metodoloogiat. Detailselt on toodud vertikaalkiiruse ( $\omega$ ) võrrandi diskretiseerimine, ülejäänud juhtudel esitame vaid lõpptulemuse.

#### 1. $\omega$ võrrand

Pooltasemel  $k + 1/2$  kasutame järgmist detsentreeritud esitust

$$\begin{aligned} \frac{\omega^{t+\Delta t} - \omega_*^t}{\Delta t} &= -\frac{1-\varepsilon}{2} (W^0 \Delta\phi^t)_* - \frac{1+\varepsilon}{2} W^0 \Delta\phi^{t+\Delta t} + \\ &\frac{1-\varepsilon}{2} (a_\omega)_*^{t+\Delta t/2} + \frac{1+\varepsilon}{2} (a_\omega)^{t+\Delta t/2}, \end{aligned}$$

Siit järeldub

$$\omega^{t+\Delta t} = \hat{\omega} - W^0 \Delta\xi^{t+\Delta t}, \quad (5a)$$

$$\hat{\omega} = \left[ \omega^t - \frac{\Delta t_-}{\Delta t_+} W^0 \Delta\xi^t + \frac{\Delta t_-}{2} a_\omega^{t+\Delta t/2} \right]_* + \frac{\Delta t_+}{2} a_\omega^{t+\Delta t/2}, \quad (5b)$$

kus

$$\xi^{t+\Delta t} = \frac{\Delta t_+}{2} \phi^{t+\Delta t}. \quad (5c)$$

#### 2. Kiiruse võrrand

Kiiruse võrrand on

$$\frac{\mathbf{v}^{t+\Delta t} - \mathbf{v}_*^t}{\Delta t} = -\frac{1-\varepsilon}{2} (\nabla(\phi + \varphi^0)^t + \mathbf{a}_v^{t+\Delta t/2})_*$$

$$-\frac{1+\varepsilon}{2} (\nabla(\phi + \varphi^0)^{t+\Delta t} + \mathbf{a}_v^{t+\Delta t/2}) .$$

See annab  $\mathbf{v}^{t+\Delta t}$  prognoosimiseks avaldise

$$\mathbf{v}^{t+\Delta t} = \hat{\mathbf{v}} - \nabla \left( \xi + \frac{\Delta t_+}{2} \varphi^0 \right)^{t+\Delta t} , \quad (6a)$$

kus

$$\hat{\mathbf{v}} = \left[ \mathbf{v}^t - \nabla \left( \frac{\Delta t_-}{2} \varphi^0 + \frac{1-\varepsilon}{1+\varepsilon} \xi \right)^t - \frac{\Delta t_-}{2} \hat{\mathbf{a}}_v^{t+\Delta t/2} \right]_* - \frac{\Delta t_+}{2} \hat{\mathbf{a}}_v^{t+\Delta t/2} . \quad (6b)$$

### 3. Temperatuurivõrrand

Temperatuurivõrrand annab

$$T^{t+\Delta t} = \hat{T} + \frac{\Delta t_+}{2} S^0(\bar{\omega}^\eta)^{t+\Delta t} , \quad (7a)$$

$$\hat{T} = T_*^t + \frac{\Delta t_-}{2} \left[ S^0(\bar{\omega}^\eta)^t + a_T^{t+\Delta t/2} \right]_* + \frac{\Delta t_+}{2} a_T^{t+\Delta t/2} . \quad (7b)$$

### 4. Aluspinnarõhu võrrand

Võrrand (4d) on diskretiseeritult

$$\frac{(p_s)^{t+\Delta t} - (p_s)_*^t}{\Delta t} = \frac{1-\varepsilon}{2} (\omega_{klev+1/2})_*^t + \frac{1+\varepsilon}{2} (\omega_{klev+1/2})^{t+\Delta t} ,$$

millest (5a) abil saab

$$(p_s)^{t+\Delta t} = \hat{p}_s - \frac{\Delta t_+}{2} (W^0 \Delta \xi^{t+\Delta t})_{klev+1/2} , \quad (8a)$$

kus

$$\hat{p}_s = \left( p_s + \frac{\Delta t_-}{2} \omega_{klev+1/2} \right)_*^t + \frac{\Delta t_+}{2} \hat{\omega}_{klev+1/2} . \quad (8b)$$

### 5. Ääritingimus baarilisele geopotentsiaalile aluspinnal

Võrrandit (8a) saab kasutada, kui parem pool on teada, selleks peab aga eelnevalt sedasama võrrandit kasutama ääritingimusena  $\xi$ -le. Selleks avaldame (8a) vasema poole (2) abil

$$\mathcal{B}\xi \equiv \left( \frac{\bar{\xi}^\eta}{(\Delta t_+/2)C^2} + \frac{\Delta t_+}{2\bar{p}_s} W^0 \Delta \xi \right)_{klev+1/2}^{t+\Delta t} = \frac{\hat{p}_s - \bar{p}_s}{\bar{p}_s} \equiv b . \quad (9)$$

Tegu on mittehomogeense segaääretingimusega (Ei Dirichlet' ega Neumanni ääretingimus, vaid nende segu)  $\xi$ -le, mis on üsna erinev varasemates Euleri mudelites rakendatud kohastunud 'integraalsest' ääretingimusest.

### 6. Referentspotentsiaali $\varphi^0$ avaldamine $\xi^{t+\Delta t}$ kaudu.

Valemiga(3c) määratud, tegelikust temperatuurist sõltuv potentsiaal  $(\varphi^0)^{t+\Delta t}$  kuulub võrrandis (6a) koos  $\xi^{t+\Delta t}$ -ga ilmutamata liikmete tulka. Osutub,  $(\varphi^0)^{t+\Delta t}$  saab esitada  $\xi^{t+\Delta t}$  kaudu, redutseerides sel teel ilmutamata funktsioonide arvu ühele funktsioonile, milleks on  $\xi^{t+\Delta t}$ . Selleks vaatleme (3c)-d hetkel  $t + \Delta t$ . Rakendades seal valemeid (13) ja (5), saame

$$\frac{\Delta t_+}{2}(\varphi^0)^{t+\Delta t} = Q - \hat{M}(\xi) , \quad (10a)$$

kus

$$\hat{M}(\xi) = \frac{(\Delta t_+)^2}{4} R^0 \hat{\Gamma}^0 (S^0 \overline{W^0 \Delta \xi^{t+\Delta t} \eta}) , \quad (10b)$$

$$Q = \frac{\Delta t_+}{2} R^0 \hat{\Gamma}^0 \left( \hat{T} + \frac{\Delta t_+}{2} S^0 \overline{\omega}^\eta \right) . \quad (10c)$$

Nõuame, et kehtiks seos (sellega defineerime uuesti ja veidi erinevalt (3a)-st referentsseisundile vastava  $W^0$ )

$$R^0 W_{k+1/2}^0 = N^2 \frac{1}{\alpha^0 S_{k+1/2}^{\eta} \overline{\omega}^\eta} , \quad (11a)$$

kus konstantne Väisälä sagedus on

$$N^2 = \frac{g^2}{c_p T^0} , \quad (11b)$$

siis (vt. Lisa 1) kehtib suure täpsusega

$$\hat{M}_k(\xi) = \nu^2 (\overline{\xi}_{Nlev+1/2}^\eta - \xi_k) , \quad (12a)$$

kus on tähistatud

$$\nu^2 = \left( \frac{\Delta t_+ N}{2} \right)^2 . \quad (12b)$$

Esituse (10a) abil saab liikumise prognoosivõrrandi (6a) kirjutada kujul

$$\mathbf{v}^{t+\Delta t} = \hat{\mathbf{v}} - \nabla Q - \nabla \left( (1 + \nu^2) \xi_k - \nu^2 \overline{\xi}_{N+1/2}^\eta \right)^{t+\Delta t} . \quad (13)$$

### 2.1.5 Võrrand $\xi$ -le

Kõik prognoosid (13), (5a), (7a), (8a) sisaldavad ilmutamata kujul  $\xi$ -d ajatasemel  $t + \Delta t$ . Selle funktsiooni ilmutamiseks kasutame solenoidaalsustingimust (4e). Võrrandeile (5a) ja (13) tingimuse (1d) rakendamine ajatasemel  $t + dt$  annab ( $t + \Delta t$  on alljärgnevais võrrandis ära jäetud)

$$\mathcal{L}_p \xi + (1 + \nu^2) \mathcal{L}_h \xi - \nu^2 \mathcal{L}_h \xi_{N+1/2} = A_\xi - \mathcal{L}_h(Q) , \quad (14a)$$

kus

$$\mathcal{L}_h = (\hat{\mathbf{G}}^+) \cdot \nabla , \quad (14b)$$

$$\mathcal{L}_p \xi = \frac{\Delta(W^0 \Delta \xi)}{\Delta p} , \quad (14c)$$

$$A_\xi = (\hat{\mathbf{G}}^+) \cdot \hat{\mathbf{v}} + \frac{\Delta \hat{\omega}}{\Delta p} . \quad (14d)$$

See on elliptiline mittehomogeenne (üldistatud Laplace'i) võrrand  $\xi = \xi^{t+\Delta t}$  le. Siin operaatorid on rangelt võttes ilmutamata, antud ajatasemel  $t + \Delta t$ . Järgnevas kirjeldatav lahendusalgoritm, mis kasutab häiritusarvutust, lubab sellest raskusest mööda hiilida.

### 2.1.6 Elliptilise võrrandi lahendamine iteratsioonimeetodil

Elliptilise võrrandi lahendamine on üsna analoogiline Euleri skeemides rakendatud algoritmiga (Männik ja Rõõm 2001, Rõõm ja Männik 2002). Ainult alumine ääritingimus on erinev, selleks on (9).

Eraldame välja häirituse, mida vaatame iteratsioonitasemel (i-1)

$$\overline{\mathcal{L}}_p \xi^{(i)} + (1 + \nu^2) \nabla^2 \xi^{(i)} - \nu^2 \nabla^2 \xi_{N+1/2}^{(i)} = A^{(i)} , \quad (15a)$$

$$A^{(i)} = A_\xi - \mathcal{L}_h(Q) - \mathcal{L}'_p \xi^{(i-1)} - (1 + \nu^2) \mathcal{L}'_h \xi^{(i-1)} + \nu^2 \mathcal{L}'_h \xi_{N+1/2}^{(i-1)} , \quad (15b)$$

kus

$$\nabla^2 = \overline{\mathcal{L}}_h .$$

Ääreväärtuse võtame vaatlusse lisamuutujana:

$$\nu^2 \overline{\xi}_{klev+1/2}^\eta = \rho .$$



Ruumallikatele lisame pindallika aluspinnal  $\gamma\delta_{N+1,k}$ , mis võtab (baasi kasutamiseiga lahendamisel) arvesse alumist ääretingimust. Seetõttu on lahendamisele tulev süsteem

$$(\overline{\mathcal{L}}_p \xi^{(i)})_k + (1 + \nu^2) \nabla^2 \xi_k^{(i)} = (A^{(i)})_k + \nabla^2 \rho^{(i)} + \gamma \delta_{N+1,k} , \quad (16a)$$

$$\mathcal{B} \xi^{(i)} = b, \quad (16b)$$

$$\mathcal{D} \xi^{(i)} \equiv \nu^2 (\overline{\xi}_{N+1/2}^\eta)^{(i)} = \rho^{(i)} . \quad (16c)$$

Lahendi 3D spekter on (Spektraalesituse detailid: vt. Rõõm ja Männik 2002, esitatud separaadina ka käesoleva aruande lisas)

$$\tilde{\xi}_{qrs} = \frac{(\lambda_q^x + \lambda_r^y) d_s \tilde{\rho}_{qr} - \tilde{\gamma}_{qr} E_{sNlev}^{-1} - \tilde{A}_{qrs}}{(1 + \nu^2)(\lambda_q^x + \lambda_r^y) + \lambda_s^\eta} , \quad (17)$$

kus

$$d_s = \sum_k E_{sk}^{-1} .$$

See võimaldab lahendi 2D (horisontaalse) spektraalteisenduse kirjutada

$$\hat{\xi}_{qrk} = \tilde{\rho}_{qr} \xi_{qrk}^\rho - \tilde{\gamma}_{qr} \xi_{qrk}^\gamma - \xi_{qrk}^A, \quad (18a)$$

kus

$$\xi_{qrk}^\rho = (\lambda_q^x + \lambda_r^y) \sum_s \frac{E_{ks} d_s}{(1 + \nu^2)(\lambda_q^x + \lambda_r^y) + \lambda_s^\eta} , \quad (18b)$$

$$\xi_{qrk}^\gamma = \sum_s \frac{E_{ks} E_{sNlev+1}^{-1}}{(1 + \nu^2)(\lambda_q^x + \lambda_r^y) + \lambda_s^\eta} . \quad (18c)$$

$$\xi_{qrk}^A = \sum_s \frac{E_{ks} \tilde{A}_{qrs}}{(1 + \nu^2)(\lambda_q^x + \lambda_r^y) + \lambda_s^\eta} . \quad (18d)$$

Pannes selle lahendi tingimuste (16b), (16c) spektraalesitustesse, saame võrrandid koefitsientide  $\rho$  ja  $\gamma$  jaoks

$$\tilde{\rho}_{qr}^{(i)} (\mathcal{B} \xi^\rho) - \tilde{\gamma}_{qr}^{(i)} (\mathcal{B} \xi^\gamma) = (\tilde{b} + \mathcal{B} \xi^A)^{(i)} , \quad (19a)$$

$$\tilde{\rho}_{qr}^{(i)} (\mathcal{D} \xi^\rho - 1) - \tilde{\gamma}_{qr}^{(i)} (\mathcal{D} \xi^\gamma) = (\mathcal{D} \xi^A)^{(i)} . \quad (19b)$$

Siit leiame konstandid  $\rho_{qr}$  ja  $\gamma_{qr}$ , peale mida lahendi (18a) parem pool on lõplikult teada ja  $\xi$  leidmiseks on veel vaid tarvis sooritada lahendi (18a) tagasiteisendus spektraalesitusest tavaruumi.

### 2.1.7 Rakendamine

Ühe sammu prognoos arvutatakse peale elliptilise võrrandi lahendamist ja  $\xi^{t+\Delta t}$  leidmist valemeist (5a), (7a), (8a) ja (13).

Skeem on kahe-ajatasemeline: sammu tulemusel minnakse ajatasemelt  $t$  üle ajatasemele  $t + \Delta t$ .

Tõsi küll, vaheväljade arvutamiseks ajatasemel  $t + \Delta t/2$  Adams-Bashfordi meetodil on tarvis abiks võtta ka väljad ajatasemel  $t - \Delta t$ , aga et need (vaheväljad) ei ole leitud otsese prognoosi tulemusel, vaid on ekstrapoolitud varasematelt ajatasemetelt, siis on seda meetodit kokkuleppeliselt hakatud siiski nimetama kahe-ajatasemeliseks skeemiks.

Kogu kirjeldatud algoritm on programmeeritud paralleelarvutuse režiimis HIRLAM keskkonnas. Arvutusalgoritm kujutab enesest HS HIRLAMi laiendust, mis lülitatakse sisse loogilise võtmega *nhdyn =.t*. HIRLAM käivitamisel. Programmeerimiskeel on FORTRAN (HIRLAMi standard). Üks NHSISL versioonidest on käima pandud referents-HIRLAM 5.1.0 baasil Tartu Observatooriumi 8-protssessorilisel klasterarvutil. Tegemist on horisontaalsuundades 114x100 võrgupunkti ja vertikaalselt 31-kihilise mudeliga. Teine, uuem versioon HIRLAM 6.1.0 baasil on rakendatud EMHI 12-protssessorilisel klasteril. Sel juhul on horisontaalne võre 110x104 ja vertikaalis on mudelil 40 kihti.

### 2.1.8 Lisa 1

#### Integraali $\Gamma^0(S^0 \overline{W^0 \Delta \xi^{t+\Delta t}^\eta})$ lihtsustamine

$$\hat{\Gamma}^0(S^0 \overline{W^0 \Delta \xi^\eta}) = \sum_{k+1}^N (\alpha^0 S^0 \overline{W^0 \Delta \xi^\eta})_j + \frac{1}{2} (\alpha^0 S^0 \overline{W^0 \Delta \xi^\eta})_k =$$

=====

$$= \frac{1}{2} \sum_{k+1}^N (\alpha^0 S^0)_j [(W^0 \Delta \xi)_{j+1/2} + (W^0 \Delta \xi)_{j-1/2}] +$$

$$+ \frac{1}{4} (\alpha^0 S^0)_k [(W^0 \Delta \xi)_{k+1/2} + (W^0 \Delta \xi)_{k-1/2}] =$$

=====

$$= \frac{1}{2} \sum_{k+1}^N (\alpha^0 S^0)_j (W^0 \Delta \xi)_{j+1/2} + \frac{1}{2} \sum_k^{N-1} (\alpha^0 S^0)_{j+1} (W^0 \Delta \xi)_{j+1/2} +$$

$$+ \frac{1}{4} (\alpha^0 S^0)_k [(W^0 \Delta \xi)_{k+1/2} + (W^0 \Delta \xi)_{k-1/2}] =$$

=====

$$= \frac{1}{2} \sum_k^{N-1} (\alpha^0 S^0)_j (W^0 \Delta \xi)_{j+1/2} + \frac{1}{2} \sum_k^{N-1} (\alpha^0 S^0)_{j+1} (W^0 \Delta \xi)_{j+1/2} +$$

$$+ \frac{1}{2} (\alpha^0 S^0)_N (W^0 \Delta \xi)_{N+1/2} - \frac{1}{2} (\alpha^0 S^0)_k (W^0 \Delta \xi)_{k+1/2} +$$

$$+ \frac{1}{4} (\alpha^0 S^0)_k [(W^0 \Delta \xi)_{k+1/2} + (W^0 \Delta \xi)_{k-1/2}] =$$

$$= \sum_k^{N-1} \overline{\alpha^0 S^0}^\eta_{j+1/2} (W^0 \Delta \xi)_{j+1/2} + \frac{1}{2} (\alpha^0 S^0)_N (W^0 \Delta \xi)_{N+1/2} -$$

$$- \frac{1}{4} (\alpha^0 S^0)_k [(W^0 \Delta \xi)_{k+1/2} - (W^0 \Delta \xi)_{k-1/2}].$$

Nüüd nõuame seose (15d), so

$$R^0 W_{k-1/2}^0 = N^2 \frac{1}{\alpha^0 S^0_{k-1/2}^\eta},$$

kehtimist. Sel juhul

$$\sum_k^{N-1} \overline{\alpha^0 S^0}^\eta_{j+1/2} (W^0 \Delta \xi)_{j+1/2} = \frac{N^2}{R^0} \sum_k^{N-1} (\Delta \xi)_{j+1/2} = \frac{N^2}{R^0} (\xi_N - \xi_k)$$

ning

$$\begin{aligned} \hat{\Gamma}^0(S^0 \overline{W^0 \Delta \xi}^\eta) &= \frac{N^2}{R^0} (\xi_N - \xi_k) + \frac{1}{2} (\alpha^0 S^0)_N (W^0 \Delta \xi)_{N+1/2} - \\ &\quad - \frac{1}{4} (\alpha^0 S^0)_k [(W^0 \Delta \xi)_{k+1/2} - (W^0 \Delta \xi)_{k-1/2}]. \end{aligned} \quad (L.2)$$

=====  
Kui eeldada, et on jätkatud

$$(\alpha^0 S^0)_{N+1} = (\alpha^0 S^0)_N, \quad (L.3)$$

siis saame aluspinnaliikmete jaoks

$$\frac{N^2}{R^0} \xi_N + \frac{1}{2} (\alpha^0 S^0)_N (W^0 \Delta \xi)_{N+1/2} = \frac{N^2}{R^0} \overline{\xi}_{N+1/2}.$$

Viimases sulgavaldises kasutame rittaarendusi

$$\frac{a_k}{a_k + a_{k\pm 1}} = \frac{a_k}{2a_k \pm \Delta a_{k\pm 1/2}} \approx \frac{1}{2} \left( 1 \mp \frac{1}{2} \frac{\Delta a_{k\pm 1/2}}{a_k} \right).$$

Kui võtta  $a = \alpha^0 S^0$  ja arvestada  $W$  struktuuri, on eelnev valem

$$(\alpha^0 S^0)_k W_{k\pm 1/2}^0 = \frac{1}{2} \left( 1 \mp \frac{1}{2} \frac{\Delta (\alpha^0 S^0)_{k\pm 1/2}}{(\alpha^0 S^0)_k} \right).$$

Järgnevate arenduste (ja ka seniste algoritmide) jaoks on ülitähtis, et kõigil tasemeil kehtiks tingimus

$$\left| \frac{1}{2} \frac{\Delta (\alpha^0 S^0)_{k\pm 1/2}}{(\alpha^0 S^0)_k} \right| \ll 1 \quad (L.4)$$

Kui nii on, siis

$$(\alpha^0 S^0)_k W_{k\pm 1/2}^0 \approx \frac{1}{2} \quad (L.5)$$

ja

$$\begin{aligned} \frac{1}{4}(\alpha^0 S^0)_k [(W^0 \Delta \xi)_{k+1/2} - (W^0 \Delta \xi)_{k-1/2}] &= \frac{1}{8}(\Delta \xi_{k+1/2} - \Delta \xi_{k-1/2}) \\ &= \frac{1}{8}(\xi_{k+1} + \xi_{k-1} - 2\xi_k) = \frac{1}{8}\Delta_{\eta\eta}\xi_k. \end{aligned}$$

Seega annab (L.2) tehtud eeldustel avaldise

$$\hat{\Gamma}^0(S^0 \overline{W^0 \Delta \xi^\eta}) = \frac{N^2}{R^0} \left( \bar{\xi}_{N+1/2}^\eta - \xi_k - \frac{1}{8}\Delta_{\eta\eta}\xi_k \right).$$

Tavaliselt me eeldame et

$$|\Delta_{\eta\eta}\xi_k| \ll |\xi_k|, \quad (L.6)$$

seetõttu lõplikult

$$\hat{\Gamma}^0(S^0 \overline{W^0 \Delta \xi^\eta}) = \frac{N^2}{R^0} \left( \bar{\xi}_{N+1/2}^\eta - \xi_k \right). \quad (L.7)$$

## 2.1.9. NHSISL testimine mudelvoolamistel

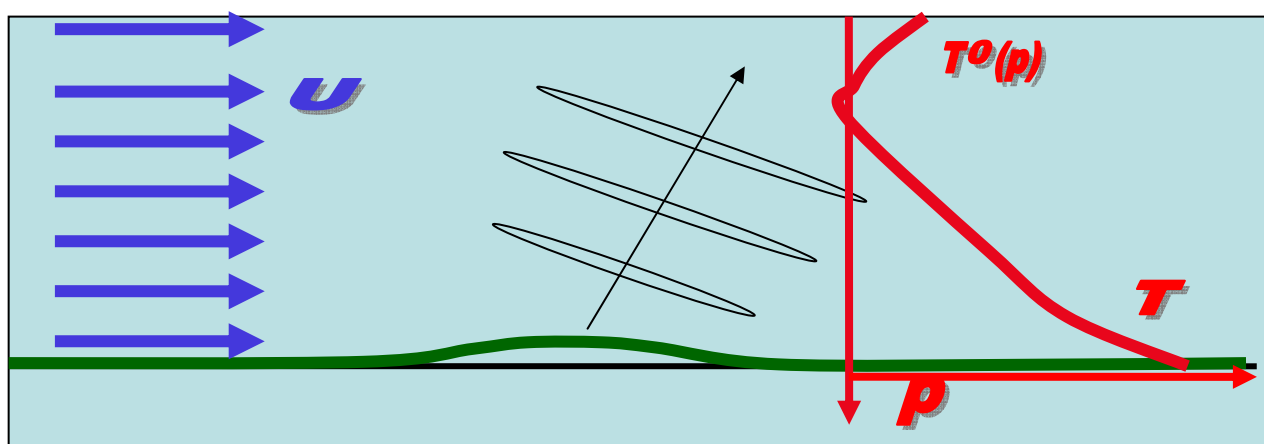
Esmane testimine on läbi viidud Tõravere klastril realiseeritud versiooniga (Referents-HIRLAM 5.1.0 + NHSISL).

Testimise ülesanded ja eesmärgid olid:

- (1) vigade (nii algoritmi kui programmeerimisvead) otsimine ja elimineerimine
- (2) mudeli kvaliteedi (täpsuse) kontroll
- (3) mudeli suutlikkuse väljaselgitamine (maksimaalne ajasamm)

Üheks ja tegelikult põhilisemaks testiks oli kunstlike voolurežiimide simuleerimine, mille korral on teoreetiliselt teada täpne lahend. Need on lihtsad lineaarsed ühtlase vooluväljaga voolamised üle siledate madalate küngaste. Sisehõõre piirkhis ning kiirguse ja veeauruga seotud füüsikalised protsessid (nn 'füüsikaline parametrizeerimine') on seejuures välja lülitatud ja testitakse 'puhast' adiabaatilist dünaamikat.

Skemaatiliselt on sedalaadi eksperiment kujutatud joonisel 2



Joonis 2

### Ideaalse ülemäevoolamise eksperiment.

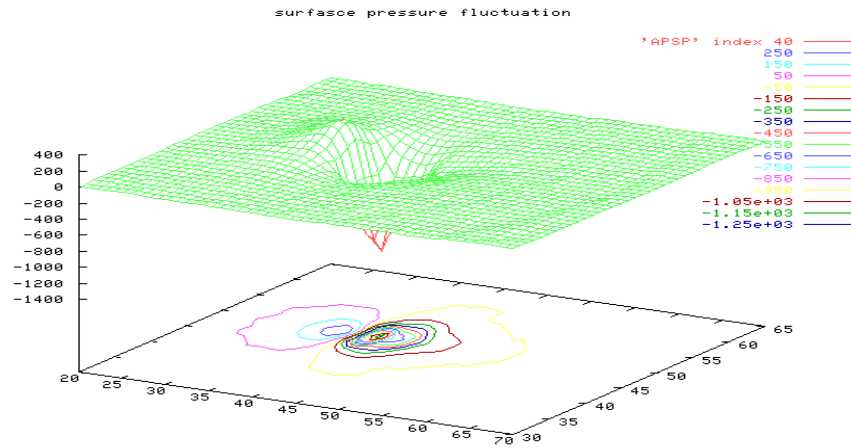
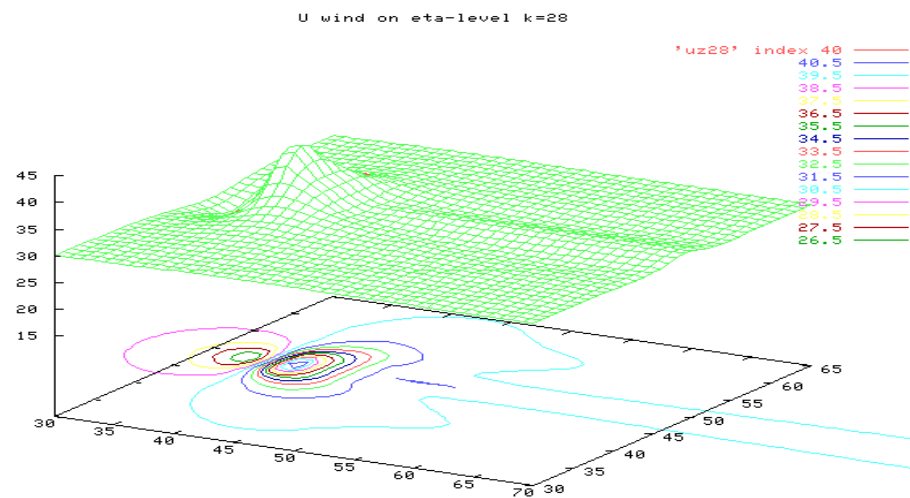
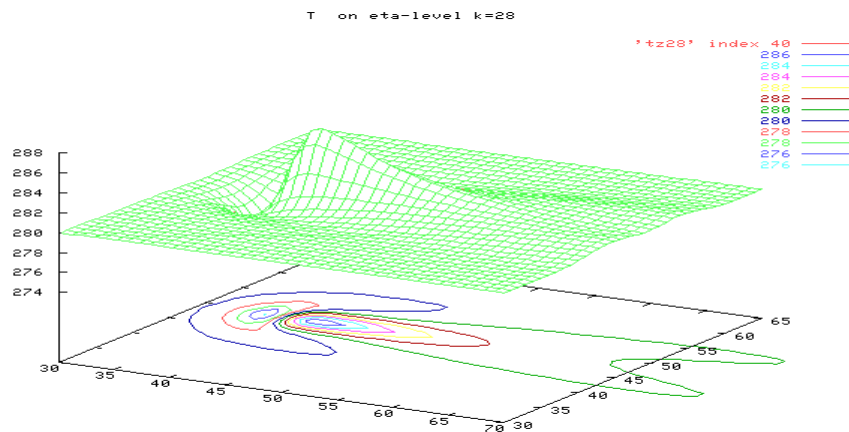
Vasemalt siseneb alasse ühtlane õhuvoog kiirusega  $U$ . Ette on antud (algne) temperatuuri kõrguskäik  $T^0(p)$ . Aluspinna ebatasasus (küngas) produtseerib laineid atmosfääris, mida võrreldakse teoreetiliste tulemustega.

Orograafia antakse tavaliselt (kuigi see ei ole kitsendav ega kohustuslik) nn Agnesi nõia (witch of Agnesi) profiilina

$$h(x, y) = \frac{h_0}{1 + \left(\frac{x - x_0}{a_x}\right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{a_y}\right)^2},$$

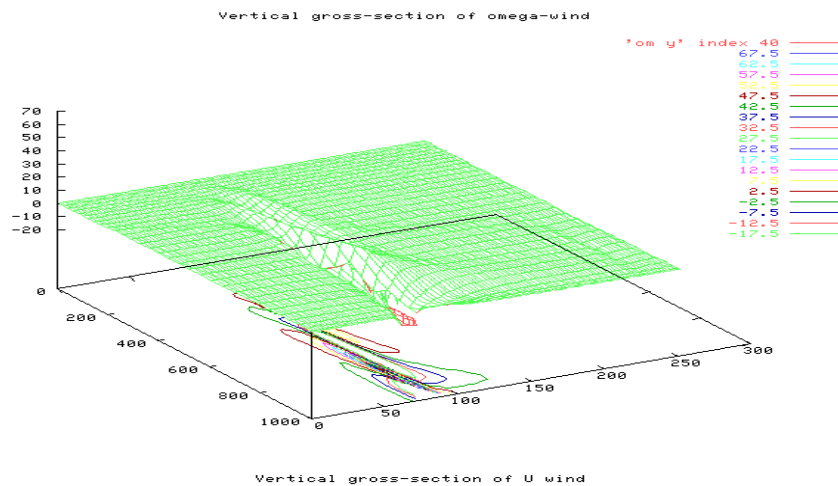
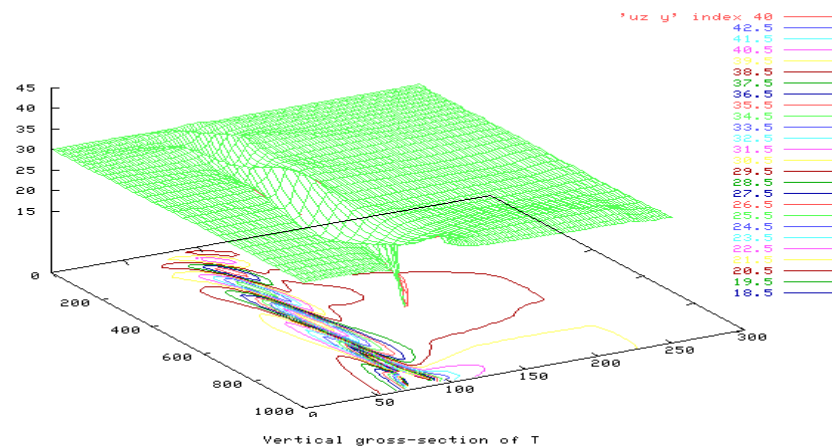
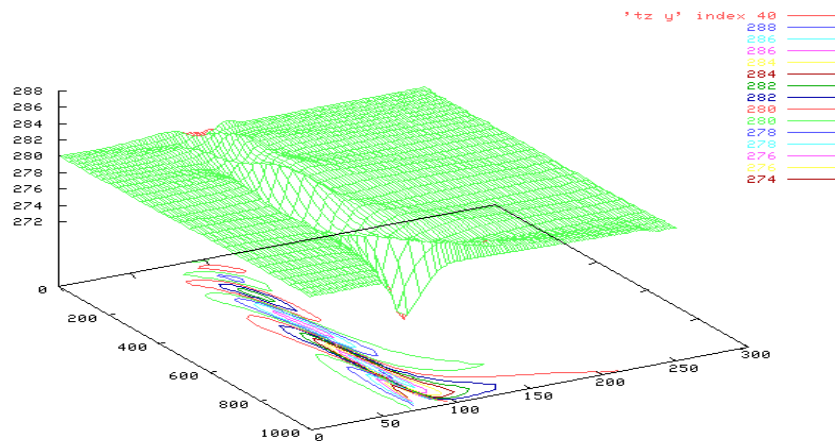
kus  $h_0$  on künka kõrgus ja  $a_x, a_y$  on künka poolaiused  $x$  ja  $y$  telgede sihis.

Mudeli sisendparameetrid on  $U, T(p), h_0, a_x, a_y$  ning muidugi horisontaalne võrgusamm  $\Delta x, \Delta y$  ja vertikaalne stratifikatsioon  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{Nlev}$ .

**A****B****C****Joonis 2.**

Stationsaarsed vooluväljad peale 120.-dat ajasammu (2 tundi arengut algeisust reaajas) aluspinnarõhu hälbele **(A)** ning kiirusvälja  $U$ -komponendile **(B)** ja temperatuurile  $T$  **(C)** eta-tasemel  $k=28$ . Vertikaaltelgedel on modelleeritavate väljade väärtused SI ühikutes, horisontaaltelgedel – võrgupunktide numbrid. *Mudel:*

$$U = 30 \text{ m/s}, \quad T^0 = 280 \text{ K}, \quad \Delta x = \Delta y = 2,2 \text{ km}, \quad a_x = a_y = 5 \text{ km}, \quad h_0 = 1 \text{ km}.$$

**A****B****C****Joonis 3.**

Statsionaarsete vooluväljade vertikaallõiked peale 120.-dat ajasammu (2 tundi arengut algseisust reaalajas) omega-kiirusele (**A**), horisontaalse kiirusvälja  $U$ -komponendile (**B**) ja temperatuurile  $T$  (**C**). Lõige on tehtud künkatelge läbivas  $x$ -telje sihiliselt orienteeritud vertikaaltasandis. Graafikute vertikaalteljel on modelleeritavate väljade väärtused SI ühikutes,  $x$ -teljel – vahemaa kilomeetrites, ja  $y$ -teljel – kaugus atmosfääri ülapiirist rõhukoordinaadis mõõdetuna hektopaskaalides (hPa).

*Mudel:*

$$U = 30 \text{ m/s}, \quad T^0 = 280 \text{ K}, \quad \Delta x = \Delta y = 2,2 \text{ km}, \quad a_x = a_y = 5 \text{ km}, \quad h_0 = 1 \text{ km}.$$



**Tabel 1**

**Maksimaalne ajasamm  $\Delta t / \Delta t_k$  kriitilise ajasammu  $\Delta t_k = \Delta x / U$  ühikutes ja ühe ajasammu jooksul osakese poolt keskmisel läbitud tee.**

$U,$ $m/s$	$T^0,$ $K$	$\Delta x,$ $km$	$\Delta t_k = \frac{\Delta x}{U}$	$\Delta t / \Delta t_k$	Läbitud tee, $km$
20	const	5.5	275	1.3	7.2
40	const	5.5	137.5	2.0	11
40	real	5.5	137.5	2.6	14
40	real	2.2	90	1.6	3.5
40	const	2.2	110	2.0	4.4

Nagu näitavad joonised 2 ja 3, on eksperimentides üle etteantud orograafiaga aluspinna voolamistel mudeli kvaliteet hea – arvutatud väljad on siledad ning puuduvad moonutused või väljalöögid ala piiridel (nii külgedel kui ka põhjas ning tipus). Mudeli moonutustevaba käitumist on nimelt kõige raskem saavutada just ala äärtel, kusjuures peamiseks potentsiaalseks moonutusteallikaks seal on vajadus välu ekstrapoolida üle ala piiride.

Võrdlused analüütilise lineaarse mudeli statsionaarse lahendiga (ei ole siin toodud) näitavad samuti mudeli korrektset käitumist ja tulemuste väga head kokkulangevust teoreetiliste ennustustega.

Oluliseks mudeli kvaliteedi, täpsemalt – mudeli arvutusliku suutlikkuse – näitajaks on saavutatav ajasamm  $\Delta t$  suurus, mille korral veel säilib üldine kvaliteet ja prognoosi täpsus pikematel (24 tundi ja üle selle) prognoosidel. Ses suhtes on SISL-mudelite ja Euler-skeemil baseeruvate mudelite käitumine täiesti erinev. Euler mudelitel on küllaltki täpselt fikseeritav maksimaalne ajasamm. Ilmutatud skeemiga kohastunud aluspinnarõhuga mudelis on see ca  $0,4\Delta t_k$ , Ilmutamata skeemiga Euleri puhul -  $0,8\Delta t_k$ .

SISL mudelites on aga ajasamm ülalt tõkestamata (lineaarsel erijuhul saab seda ka rangelt tõestada). Praktiliselt jaguneb ajasammu väärtuste piirkond kaheks – need on **füüsikaliselt mõistlike väärtuste piirkond** (MP) ja **ebafüüsikaliste väärtuste piirkond** (EP). MP-s on lahendi käitumine füüsikaliselt korrektne ja lahend ise sõltub ajasammu pikkusest väga vähe (praktiliselt üldse mitte). EPs on lahend küll

matemaatiliselt stabiilne, kuid füüsikaliselt vale. Näiteks võib tekkida aluspinnalt ujulainete kiirgumine, mida tegelikkuses pole. Üldiselt MP ja EP vahel terav piir puudub ja üleminek ühest teise sõltub ühelt poolt alg- ja ääritingimuste siledusest (mida siledamad need on, seda pikema ajasammu saab valida), teiselt poolt aga ka algseisundi enese 'mõistlikkusest'. Kui ikka algseis on väga kunstlik ja ebatasakaaluline, siis on areng alguses küllaltki plahvatuslik ning sellega kaasneb hulgaliselt kiirete ujulainete genereerimist ja kiirgumist modelleeritavast alast välja. Witch-eksperimendid on just sellised – algseis saadakse nii, et alghetkel tekitatakse künegas mis lükkab ühtlase (konstantse kiirusega  $U$  toimuva voolamise) vooluvälja künka kohal ülespoole, jättes samal ajal temperatuuri algseisu endiseks. Tabelis 1 toodud mõistliku maksimaalse ajasammu piirangud on seetõttu piiratud peaaesjalikult just sellisest alustusest determineerituna. Sellel vaatamata on need arvestatavalt suured, kõikides jämedalt piirides  $1.5 - 2.5 \Delta t_k$  keskmise väärtusega  $ca 2.0 \Delta t_k$  juures. See tähendab  $ca$  4-kordset ajavõitu ilmutatud (ning kohastunud) Euleri skeemiga ja 2-kordset poolilmutamata Euleri skeemiga võrreldes.

## 2.1.10. NHSISL testimine reaalses tingimustes

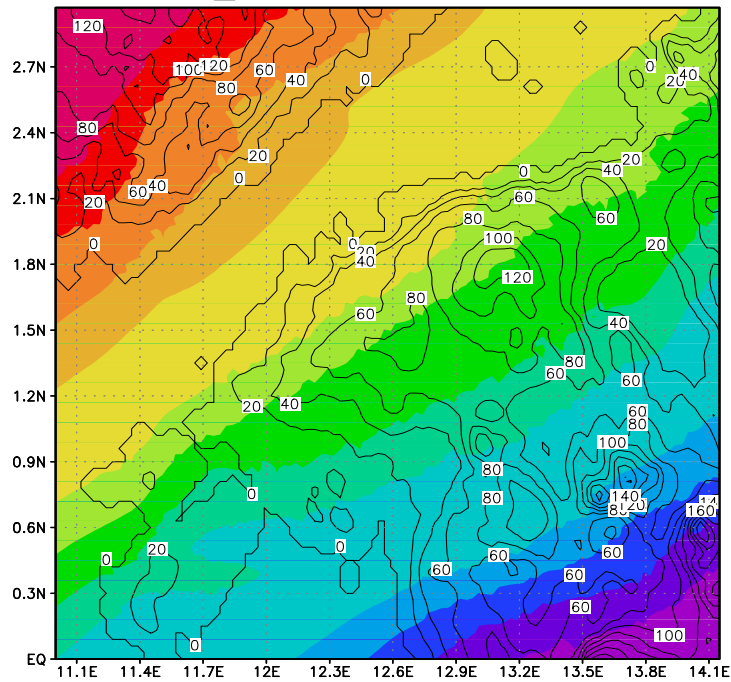
Testarvutused reaalses tingimustes viidi läbi 3.3-kilomeetrise lahutusega ja 40-kihilise mudeliga alas ETB. Baasmudeliks oli HIRLAM referents-versioon 6.1.0. Modelleeriti atmosfääri evolutsiooni 36 tunni jooksul (36-tunni ennustus). Seejuures võrreldi NHSISL poolt ennustatavaid välju samades tingimustes hüdrostaatilise HIRLAM-iga saadud ennustustulemustega. Ennustustulemuste võrdlus aluspinnarõhule on toodud joonisel 4 ja tuulevälja lääne-idasuunalise komponendi  $U$  vertikaallõikele fikseeritud idapikkuse korral - joonisel 5.

Nagu neist joonistest näha, on NH ja HS kokkulangevus väga hea (õigem oleks öelda *suur*) – joonised HS ja NH korral on peaaegu identsed. Siin saab teha ühe rõõmustava ja ühe kurvastava järelduse. Rõõmustav on, et kokkulangevus on nii suur, kuna see viitab loodud mudeli NHSISL heale kvaliteedile ja usaldusväärsusele. Ja kurvastav on seesama suur kokkulangevus, mis viitab asjaolule, et vähemasti siledade ja madala orograafiaga alade korral ei anna NH mudeli kasutamine HS juhuga võrreldes arvestatavaid erinevusi ja efekte. Kindlasti muutub olukord NH mudeli eelistamise kasuks, kui vaadata tugeva konvektsiooniga seotud nähtusi nagu äikesetormid ja frondid ning liikuda veelgi suuremate ruumlahutuste piirkonda.

Teine tüüpsituatsioon, kus hüdrostaatiline ja mittehüdrostaatiline mudel võivad anda arvestatavalt erinevaid tulemusi, on seotud mägistega aladega ja õhumasside liikumisega mäestike kohal. Selliseid eksperimente ja testimisi on läbi viidud Norra mägedega ala korral (nn Norra ala, vt. Joonis 6). Baasmudeliks oli 31 kihiline HIRLAM 5.1.0 horisontaalse lahutusega 11.1 km horisontaalvõrgul 156x156 võrgupunkti. Testimine seisnes siingi hüdrostaatilise ja mittehüdrostaatilise mudeli ennustuste võrdlemises identsusel alg- ja ääritingimustel.

Nagu testimine sel juhul on esile toonud, erinevad NH ja HS siin päris arvestatavalt, vaatamata sellele et mudelite lahusus (11.1 km) vastab olukorrale, kus tugevaid NH efekte ei tohiks veel olla. Üldiselt on voolamised küllaltki lähedased ala sees (sisepunktides) nii kiirus- kui temperatuuriväljad on üsna ühtmoodi (väiksemaid erinevusi detailides muidugi esineb) kõikidel vertikaallõigetel (illustratsioonid pole toodud, kuid olukord on suhteliselt sarnane joonisel 5 tooduga). Mis aga arvestatavalt erinevad, on aluspinnarõhk. Joonisel 6 on näidatud merepinna taandatud aluspinnarõhu väljad, arvutatud nii HS kui NH mudeliga identsusel alg- ja

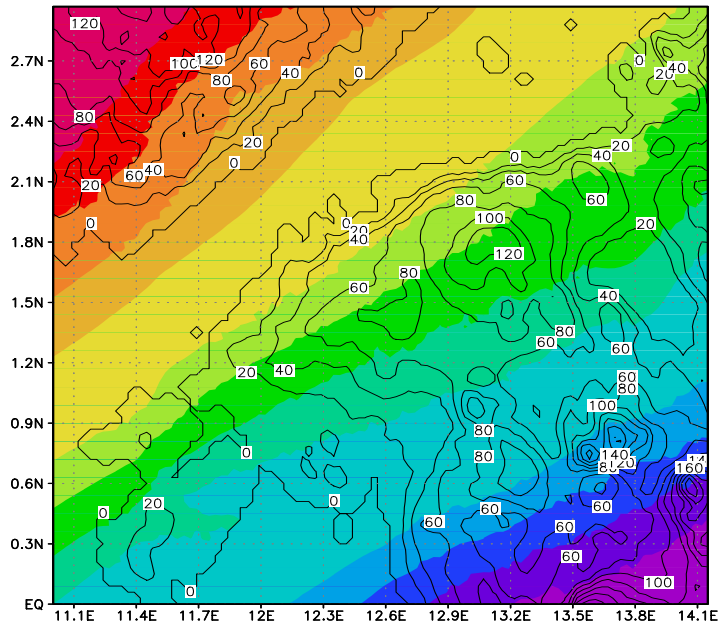
NHSISL: P\_sl, 2003.10.20.00+36



GRADS: COLA/IGES

2004-02-27-17:48

HS SISL: P\_sl, 2003.10.20.00+36



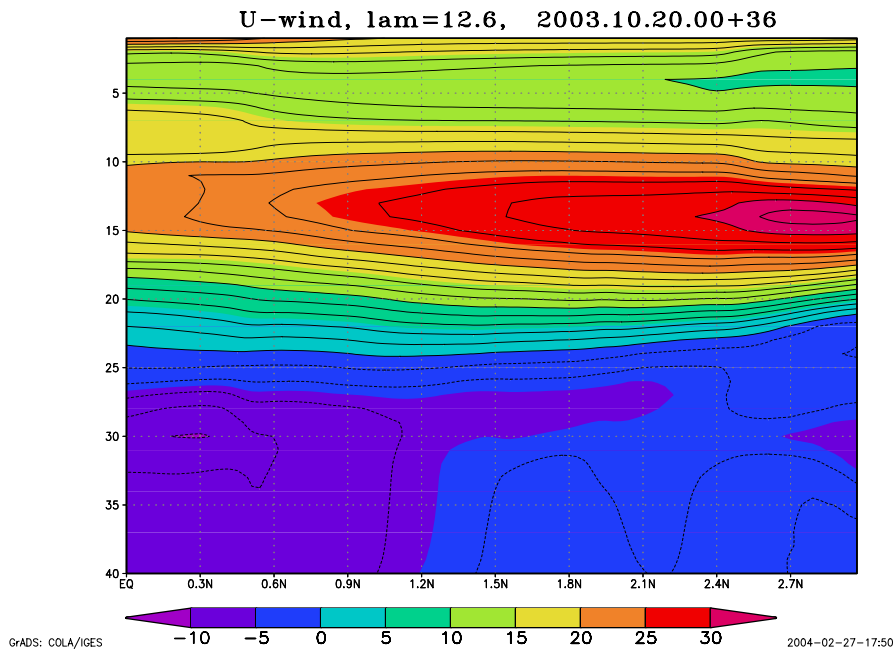
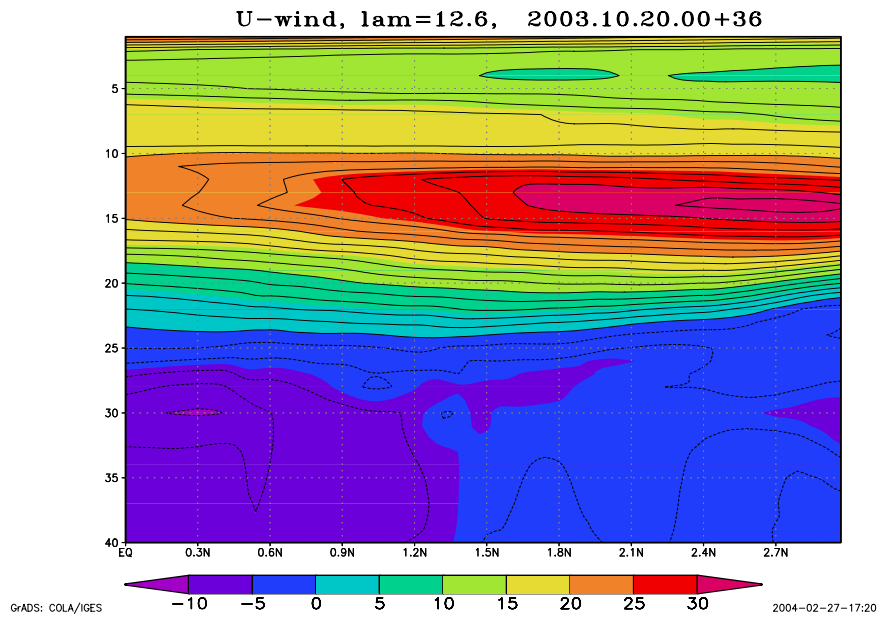
GRADS: COLA/IGES

2004-02-26-17:15

**Joonis 4**

36 tunniline ennustus aluspinnarõhule mudeliga ETB. Ülemine paneel – ennustus NHSISL abil. Alumine paneel – sama ennustus hüdrostaatilise HIRLAM-iga. Ajasamm, alg- ning ääritingimused ja füüsikalised parameetrid on mõlemal juhul täpselt ühesugused.

Mustad kontuurid tähistavad aluspinna samakõrgusjooni. Näha on Soome lõunarannik Helsingi piirkonnas ning Eesti põhjarannik koos saartega. Diagonaalne sile ala on Soome laht.. Värviliselt on kujutatud merepinna tasemele taandatud aluspinnarõhk hPa-des.



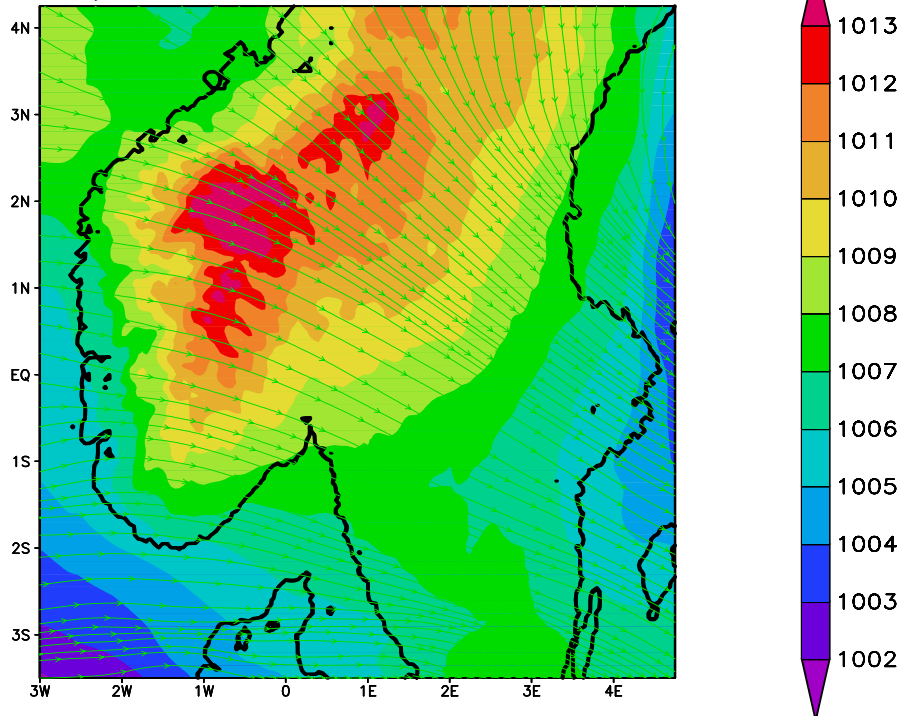
### Joonis 5

Tuule u-komponendi jaotus vertikaaltasandis idapikkusel 12.6 E .36 tunni möödudes peale modelleerimise algust.

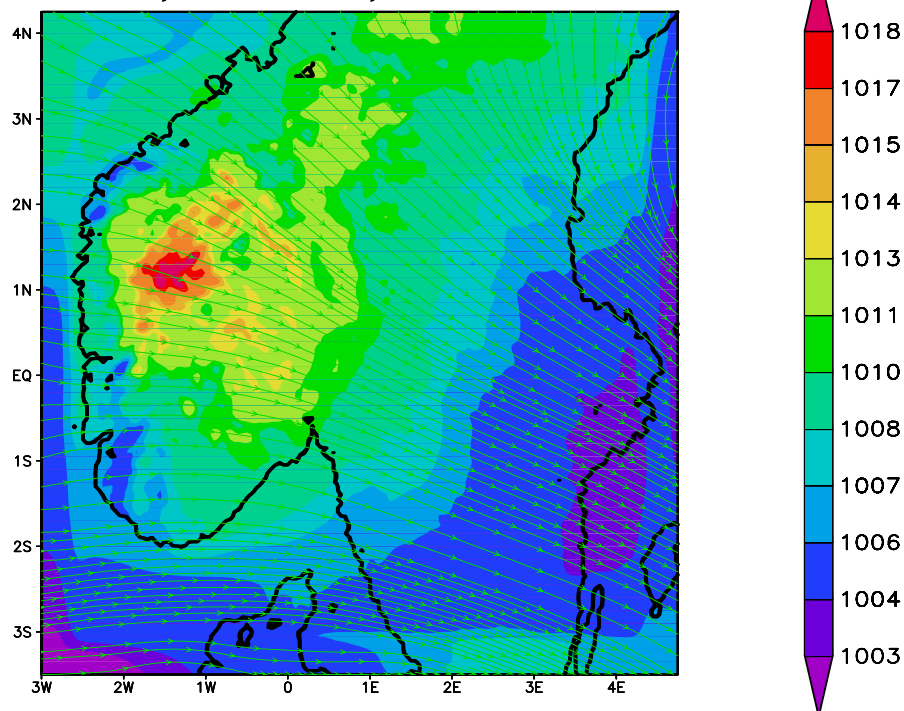
Ülemine paneel – hüdrostaatilise mudeli ennustus, alumine paneel – mittehüdrostaatilise mudeli NHSISL ennustus.

Tuule kiirus on ühikutes *m/s*. Vertikaalteljel on eta-koordinaadi (vertikaalse atmosfäärikihi) number tipust alates. Horisontaalteljel – vahemaa kaarekraadides piki meridiaani (suhteline põhjalaius).

Pmsl, stream15 2001.03.22.00+06



Pmsl, stream15, 2001.03.22.00+06



### Joonis 6

#### Mäestikutingimustes modelleerimine: Norra mäed.

Merepinnale taandatud aluspinnarõhk (värviliselt) ja voolujooned eta-tasemel 15 peale 6-tunnilist mudelarengut identsetest alg- ja ääritingimustest.

Ülemine paneel – HS mudel. Alumine paneel - NHSISL.

Horisontaallahutus on 11 km, vertikaalselt on mudelis 31 kihti.

ääretingimustel. Silma torkab suurem aluspinnarõhu amplituud mittehüdrostaatilise mudeli korral. Üldiselt on teada, et mägede kohal tekib merepinnale taandatud aluspinnarõhus kõrgrõhkkond. See on tõepoolest ka jälgitav joonisel 6 nii HS kui NH juhul. Kuid NH juhul, nagu me näeme, on see amplituud tunduvalt (ca 5 – 6 hPa) suurem kui HS mudelis. Seda on natuke liialt palju jätmaks teda tähelepanuta. Esialgu me veel ei tea, mis on sellise suure amplituudi põhjuseks NH juhul. Igal juhul on tegemist väga püsiva omadusega, kuna kõik katsed mudelit modifitseerida nii, et rõhu amplituud väheneks, ei ole seni tulemusi andnud. Tegemist on tõsise probleemiga, kuna me ei saa NHSISL mudelit rakendada mägesid sisaldavates piirkondades niikaua, kuni probleemi pole lahendatud ja vale rõhuamplituudi kõrvaldatud.

## **2.2. Mittehüdrostaatilisel rõhukoordinaatmudelil rajaneva HIRLAMi rakendamine EMHIs**

Aastal 2003 sõlmiti Tartu Ülikooli, EMHI ja Soome Meteoroloogia Instituudi (FMI) vahel koostööleping, mille peamiseks eesmärgiks on eksperimentaalse kõrge lahutusega numbrilise ilmaennustuskeskkonna loomine EMHI-s, sealhulgas NH HIRLAM 'Tartu mudeli' rakendamine ja testimine eel-operatsioonilistes tingimustes.

Ilmaennustuskeskkonna ülesandeks on pakkuda igapäevaselt (operatiivselt) kõrge lahutusega mudeli väljundit, mida oleks siis võimalik kasutada täpseks ilmaennustuseks või keskkonna monitooringul. Ennustused arhiveeritakse ja seejuures moodustuv väärtuslik andmebaas võib olla aluseks edasistele meteoroloogia ja klimatoloogia alastele uuringutele või rakendustele. Tartu Ülikooli rolliks selles koostöös on keskkonna loomine ja arendustegevus. FMI ülesandeks on tagada mudelile tarvilike ääreväljade olemasolu ja ka nõustav funktsioon. Ääreväljad saadakse soomlaste operatsioonilisest ilmaennustusmudelitest, mis põhineb samuti HIRLAM-il. Leping on olulise tähtsusega mitte ainult kitsamast rakenduslikust ilmaennustuslikust aspektist vaid ka arenguperspektiive silmas pidades. Numbriline ilmaennustuse olemasolu Eestis aitab koolitada vastava eriala spetsialiste ja on väärtuslikuks lisainformatsiooniks teistele teadusharudele, mis kasutavad meteoroloogilisi andmeid.

Ilmaennustusmudeli töös hoidmine vajab suuri arvutusvõimsusi. Üheks efektiivsemaks (hind-võimsus suhtes) mooduseks arvutusvõimsuste tõstmiseks on klasterarvutite kasutamine. EMHI-s on installeeritud 12 sõlmest koosnev arvutite klaster. Iga sõlm kujutab endast 1.6 GHz Pentium IV protsessoriga arvutit millel on 1GB muutmälu(RAM). Sõlmed on omavahel ühendatud Gigabit Ethernet võrgukaartidega. Arvutitele on installeeritud operatsioonisüsteem RedHat Linux 7.3 ja selleks, et panna sõlmesid toimima ühtse paralleelarvutina kasutatakse LAM-MPI tarkvara. Klasterarvutit, nii nagu ta EMHI-s üles seatud on võib naha fotol 1. Klasterarvutite kasutamine on hetkel Eestis praktiliselt ainuke võimalus arvutusmahukate ülesannete lahendamiseks. Praktika käigus selgunud puudusena tuleb EMHI klasteri juures nimetada protsessoritevahelise kommunikatsiooni aeglust. Ehkki Gigabit Ethernet-i läbilaskvus on parem tavaliselt klasterite puhul rakendatavast Fast Ethernetist, jääb see siiski ilmaennustusmudeli jaoks liiga kitsaks. See tingib suuremate võrkude puhul olukorra, kus protsessorid ei saa täisvõimsusel töötada ja ootavad andmevahetuse järele. Tulevikus tuleks klasteri arendamiseks üle minna paremate läbilaskvusega tehnoloogiatele nagu Scali või Myrinet, mis on aga kahjuks üsna kallid.

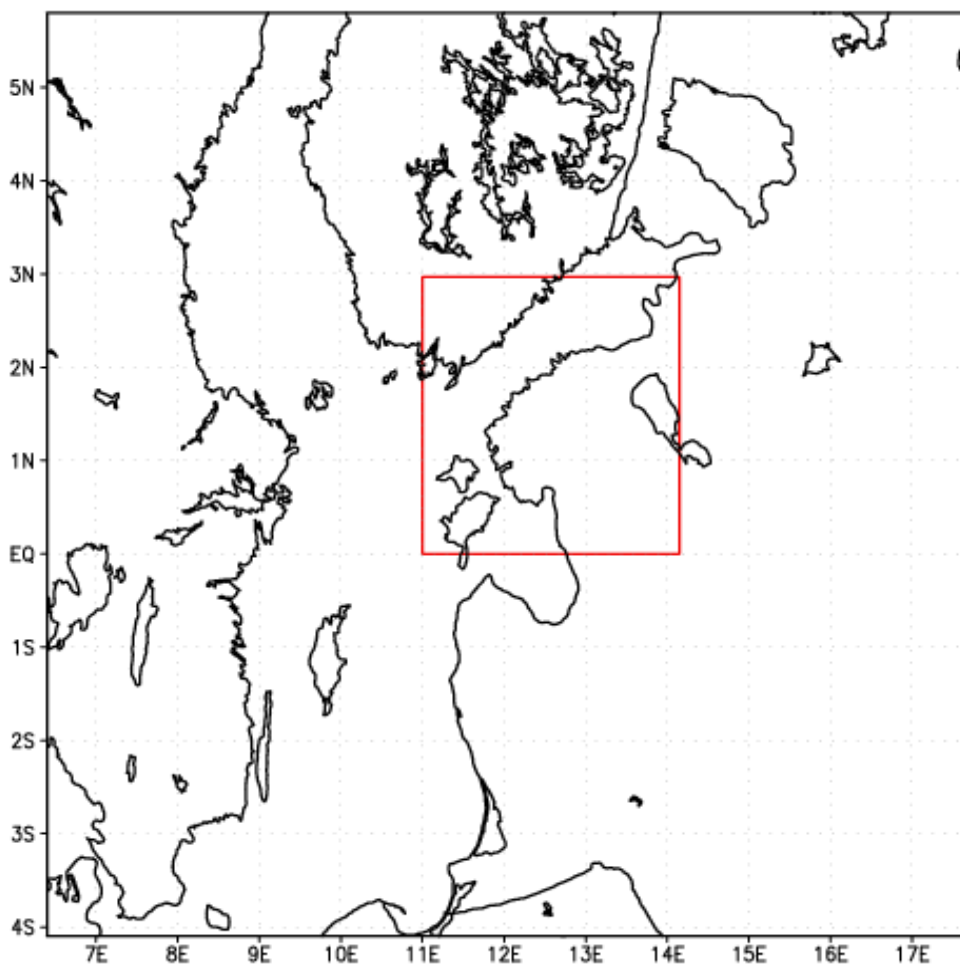
Kõrge lahutusega ilmaennustuskeskkonna baasmudeliks on Tartu Ülikooli juures välja arendatud mittehüdrostaatiline HIRLAM-i laiendus. Kõrge lahutuse puhul on

üsna oluline just mittehüdrostaatilise mudeli kasutamine hüdrostaatilise asemel. Üldtunnustatud arusaam atmosfääriuurijate hulgas on, et mittehüdrostaatilise dünaamika efektid on olulised konveksiooninähtuste kirjeldamisel ja kõrge lahutuse üheks oluliseks eeliseks on konvektiivsete süsteemide täpsem kirjeldamine. Seega oleks kõrglahutuslikust mudelist abi loota lisaks lokaalsete efektide täpsemale kirjeldusele just konveksiooniga seotud ilmanähtuste paremal esitamisel. Probleemi olulisuse rõhutamiseks on sobilik ära märkida, et Eesti piirkonnas on kõige suuremad tormikahjustused seotud just konvektiivsete tormide ja sademetega.



**Foto 1.**  
**EMHI klasterarvuti.**

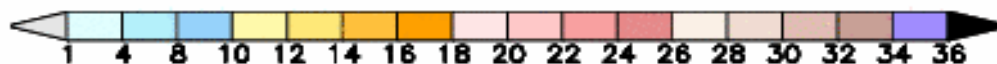
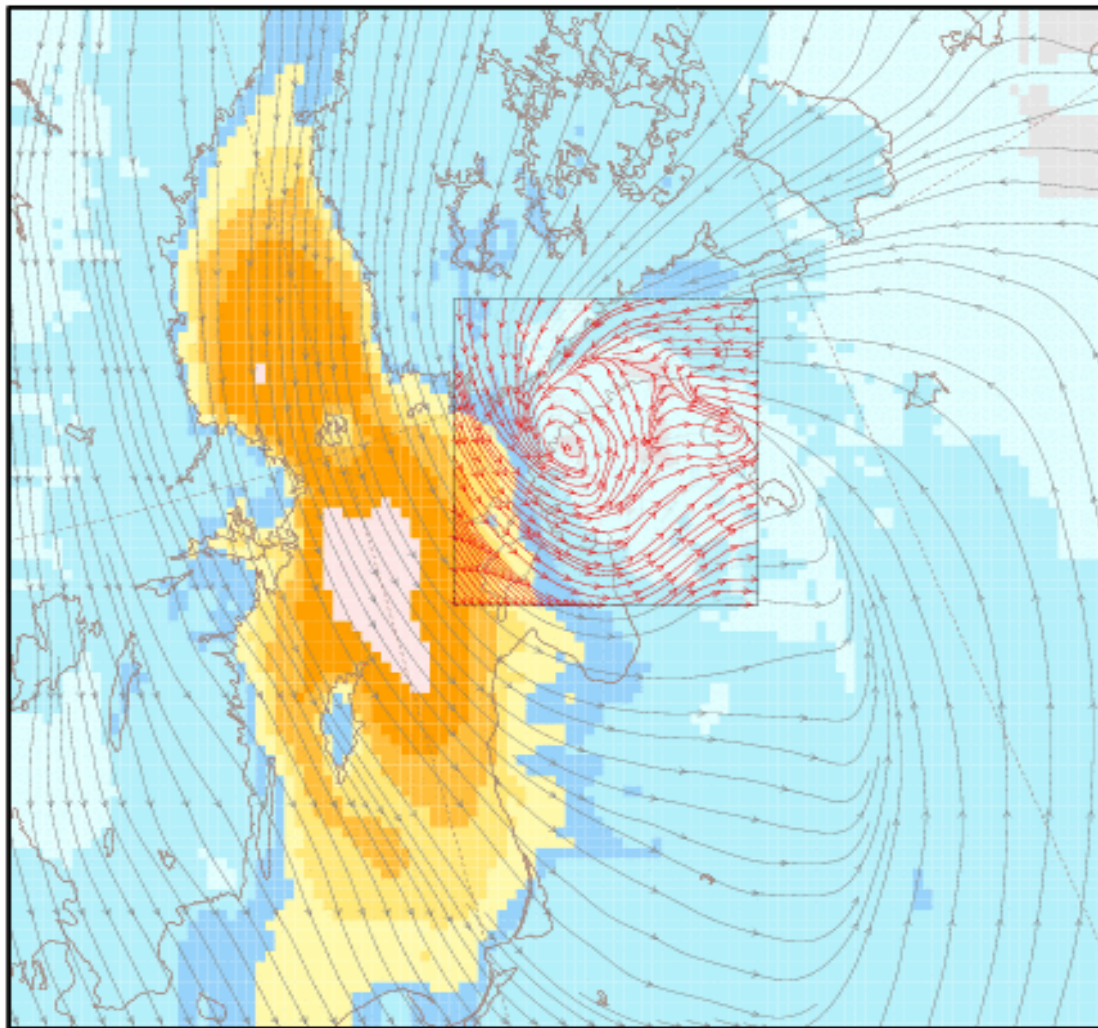
Ehkki ilmaennustuskeskkonna loomisel oleks loomulik eeldada, et kogu huvipakkuv ennustuspiirkond on kaetud kogu piirkonna ulatuses ühesuguse lahutusega võrguga, osutusi EMHI arvutusvõimsused kõrglahutusliku mudeli jaoks ebapiisavateks. Seetõttu tuli esialgse ja ajutise lahendusena ilmaennustuskeskkond üles ehitada kaheastmelisena. EMHI ilmaennustuskeskkond koosneb kahest integreerimispiirkonnast, tinglike nimetustega ETA ja ETB, nii et kõrgema lahutusega ala ETB on asetatud madalama lahutusega ala ETA sisse. Kujundlikult väljendades võiks öelda, et ETB ala toimib ETA ala luubina. Mõlemad integreerimispiirkonnad on näha joonisel 7. Kogu ilmaennustuskeskkond on üles ehitatud tuginedes HIRLAM-i versioon 6.1.0 mudelile. Mittehüdrostaatiline mudel kujutab endast lihtsalt laienduspaketti referentsmudelile. Arvutustel rakendatakse HIRLAM-i füüsikaliste parametriseringute paketti muutmata kujul. Siinjuures tuleb märkida, et HIRLAM-i füüsika ei ole kohandatud tööks nii kõrgete lahutustega. Ei ole küll otseselt vale füüsikapaketi rakendamine muutmata kujul kuid tulevikus on siin oluline arenguruum ja tarvilik uurimistöö kvaliteedi tõstmiseks.



**Joonis 7.**

EMHI numbrilise ilmaennustuskeskkonna integreerimispiirkonnad.  
Suur ruut on ETA ja väike punane ruut on ETB piirkond.





### Joonis 8.

Tsüklon Läänemere kohal 2. märtsil 2004. 21h ennustus algusega 00 GMT. Esitatud on voolujooned ja tuule kiirus (m/s) 10m kõrgusel. (Pildi autor EMHI andmete põhjal on Carl Fortelius, FMI).

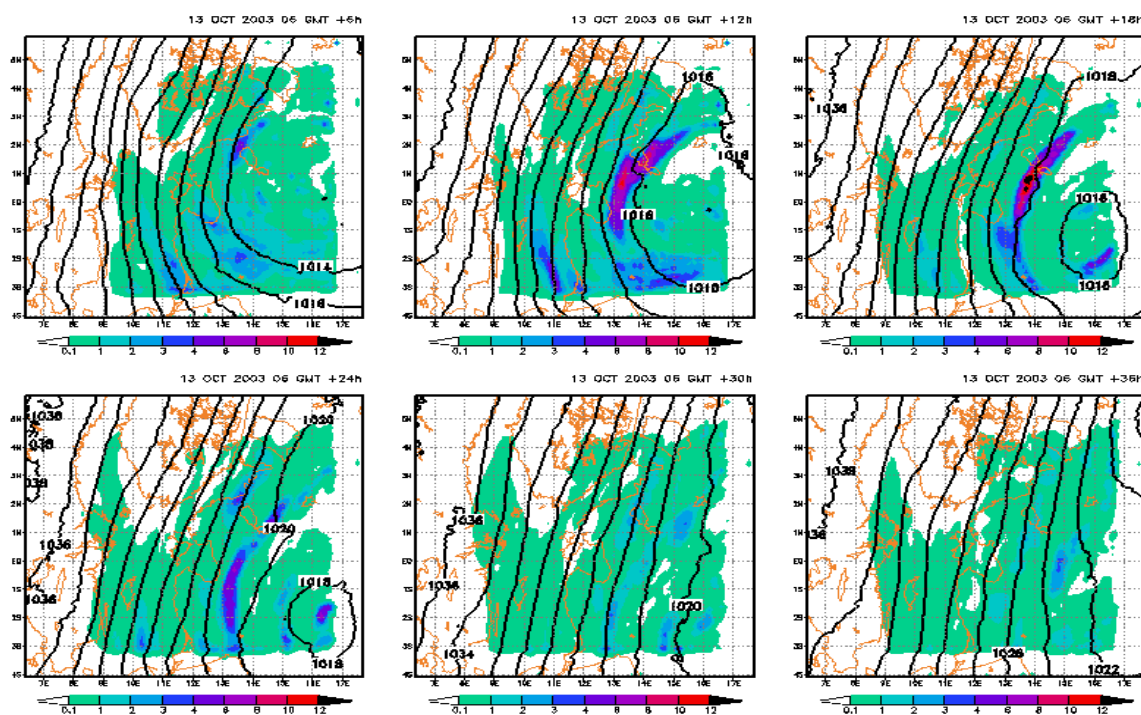
ETA ala on realiseeritud 114x100 võrgul horisontaalse lahutusega 0.1 kaarekraadi (11.1 km). Vertikaalsuunas on mudelil 40 taset. Võrgulahutus 11.1 km on üsna madal selleks, et mittehüdrostaatilised efektid olulist rolli mängiksid. Mudel kasutab seetõttu ajaliseks integreerimiseks hüdrostaatilist poolilmutatud pool-Lagrange'i skeemi ajasammuga 180s. Oleme siin ETA ala lahutust mittehüdrostaatiliste efektide seisukohast ja võrdluses ETB-alaga madalaks nimetatud. Siiski tuleb kindlasti rõhutada, et horisontaalne võrgulahutus 11.1 km on rakenduslike ilmaennustusmudelite kontekstis vägagi kõrge. Sellise lahutusega mudeleid on praktilistes ilmaennustusrakendustes kasutusel veel üsna vähe.

Ääreväljadena kasutatakse FMI operatsioonilise mudeli väljundit, mis saabuvad EMHI-sse 6h intervalliga. ETA alas tehakse kaks korda päevas 36h ennustusi alghetkega 00 ja 06 GMT.

ETB ala kasutab 106x100 võrku horisontaalse lahutusega 0.03 kaarekraadi (3.3 km). Vertikaalsuunas on mudelil 40 taset. ETB alas kasutatakse mittehüdrostaatilist mudelit poolilmutatud Euleri ajalise integreerimisskeemiga. Ajasammuks on 30s. Ääreväljadena on loomulikult kasutusel ETA mudeli ennustused ajalise lahutusega 3h. ETB alaga tehakse päevas üks 36h ennustus algushetkega 00 GMT.

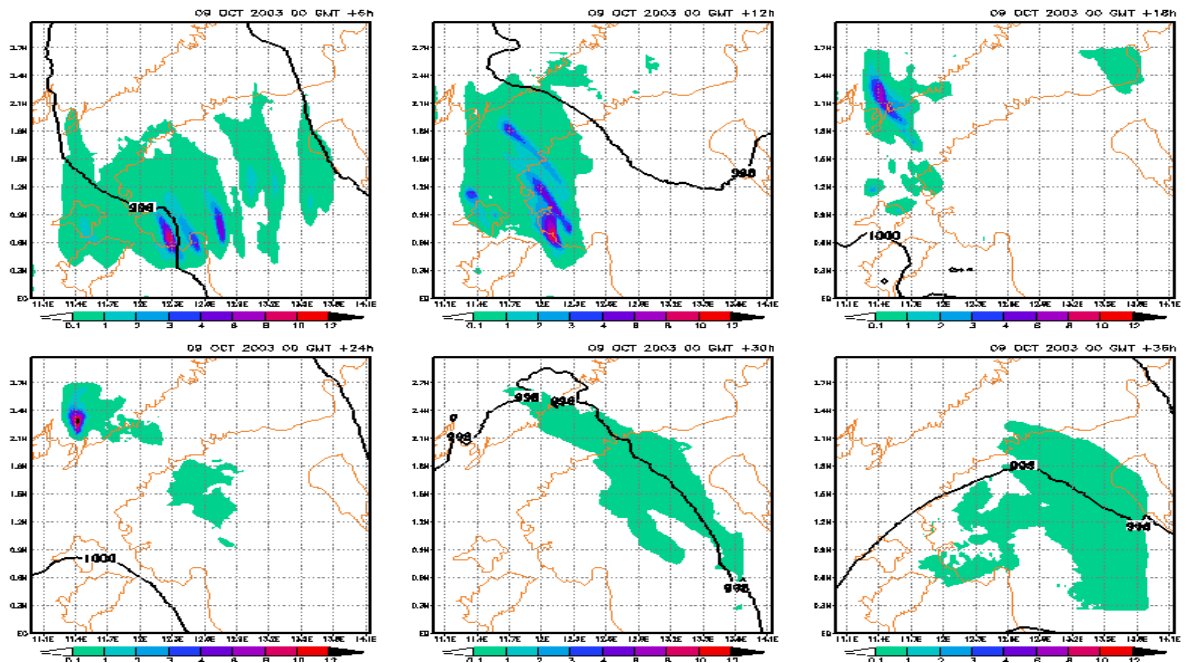
Mudelite töö näidisenähtisena võib joonisel 8 näha 2. märtsi ennustuste põhjal koostatud 10m tuulte kiiruste ja voolujoonte diagrammi. Selgelt on näha Läänemere kohal tormi põhjustanud tsüklon keskmega Tallinna kohal ja selle esitamine mõlema mudeli poolt.

Mudelite väljundi jälgimiseks (visualiseerimiseks ja vaatlemiseks) on Tartu Ülikoolis välja arendatud veebikeskkond EHradar. EHradar kasutab ennustuste väljundi visualiseerimiseks tarkvarapaketti GRaDS, mille abil automaatselt genereeritakse ilmakaartide komplektid sünoptikutele olulisemate meteoparameetritega. Seejärel tehakse kaardid veebikeskkonnas sünoptikule kättesaadavaks. EHradari väljundi näidised on esitatud joonisel 9 ja 10. Lisaks meteoparameetrite kaartidele on teist tüüpi väljunditeks meteogrammid, kus esitatakse mingi geograafilise punkti jaoks olulisemate meteoparameetrite komplekti ajaline areng. Meteogramme genereeritakse üle terve Eesti olulisemate ilmajaamade jaoks. Meteogrammi näidis on esitatud joonisel 11.



**Joonis 9.**

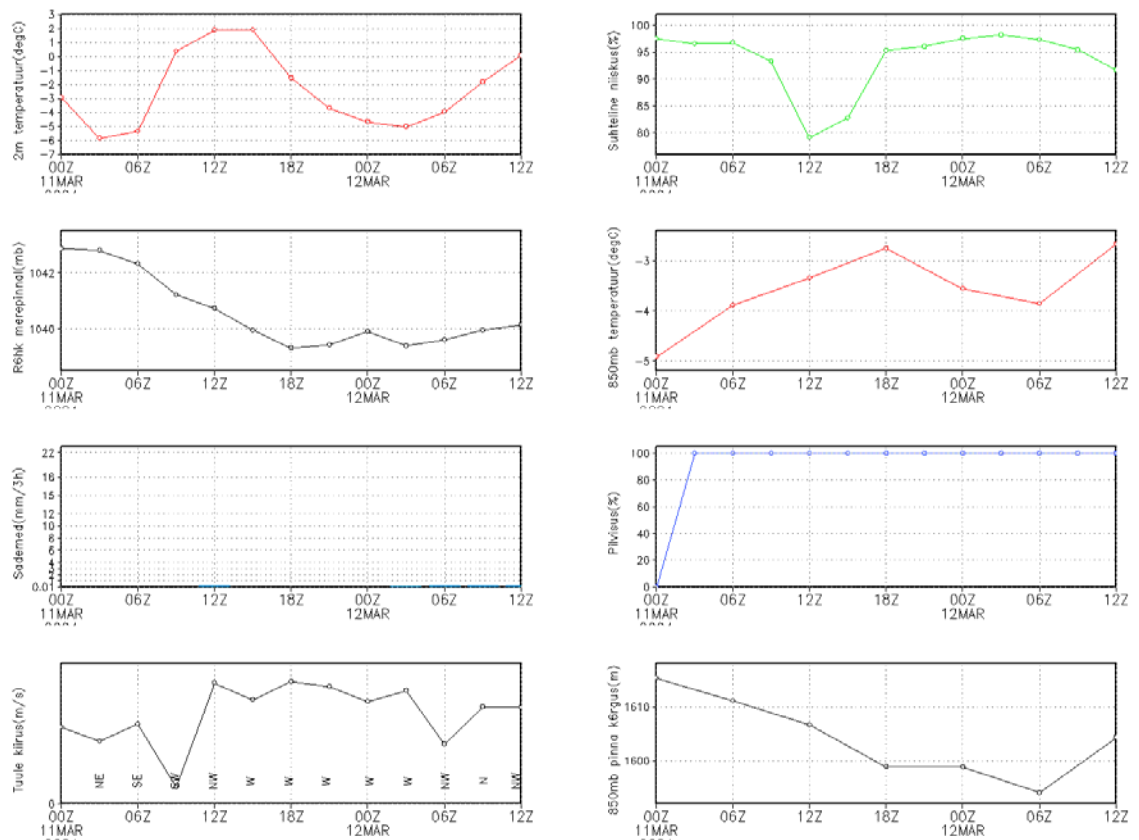
Näidiseväljund ETA ala kohta EMHI numbrilisest ilmaennustus-keskkonnast. Kaardil on antud aluspinnarõhu isojooned ja sademetehulk.



**Joonis 10.**

Näidiseväljund ETB ala kohta EMHI numbrilisest ilmaennustus-keskkonnast. Kaardil on antud aluspinnarõhu isojooned ja sademetehulk.

Tõravere meteogramm



**Joonis 11.**

Näidiseväljund EMHI numbrilisest ilmaennustus-keskkonnast. Ennustuse meteogramm Tõravere meteorologiajaamale.

Siiani on kirjeldatud numbrilise ilmaennustuse keskkonna kvaliteeti hinnatud subjektiivselt lähtudes olemasolevate kaartide ja ennustuse meteogrammide kokkulangevusest reaalse situatsioonina. Tegelikult kvaliteedi hindamiseks tuleks siiski lähtuda süstemaatilistest võrdlustes vaatlusandmetega. Seetõttu on vajalik vastava tarkvaralahenduse loomine. Alustuseks peaks sobima ka HIRLAM-i standardtarkvara, mille käivitamine on siiani tehniliste probleemide tõttu viibinud. Samas on HIRLAM-i standardvahendid välja töötatud lähtudes eeldusest, et mõõtmiste hulk on suur. EMHI ilmaennustuskeskkonna integreerimispiirkondade väiksuse tõttu on see eeldus paljuski rikutud ja tulevikus on vajalik kvaliteedi hindamise meetodika ümbervaatamine kohalikest vajadustest lähtuvalt. Kõrglahutuslike mudelite kvaliteedi hindamine on tegelikult ka laiem teaduslik probleem. Hajusalt paiknev vaatlusjaamade võrk on ebapiisav väikese mastaabiga ilmastikunähtuste adekvaatseks esitamiseks ja seetõttu on siin vajalik moodsamate meetodite väljatöötamine ja kasutuselevõtt.

Kirjeldatud pool-operatsiooniline ilmaennustuskeskkond on töötanud pidevas režiimis 2003 aasta oktoobrist alates. Mittehüdrostaatiline mudel rakendati tööle sama aasta detsembrikuus. Iga ennustuse alguses produtseeritakse meteoroloogilise informatsiooni analüüs. See kujutab endast mõnda varasemat ennustust, mida on korrigeeritud vastava ajahetke vaatlusandmetega. Sisuliselt on analüüs parim kättesaadav lähendus atmosfääri tegelikule olukorrale ja seda kasutatakse numbrilise mudeli alghetkena. 2004 aasta veebruarist produtseeritakse analüüsi iga 6 tunni tagant. Arhiveerituna kujutavad need analüüsikaardid suurepäraselt meteoroloogilist andmebaasi, kus on kuuetunnise intervalliga esitatud täielik informatsioon kogu Eesti piirkonna kõikide olulisemate meteoroloogiliste parameetrite kohta.

Numbriline ilmaennustuskeskkond on EMHI-s töölerakendatud ja produtseerib igapäevaselt prognoosikaarte. Siiski ei tohiks seda ilmaennustuskeskkonda vaadelda kui valmisprodukti operatiivseks prognoosiks. Tegemist on ennekõike eksperimentaalse prototüübiga, mis nõuab pidevat arendustegevust ja kvaliteedi hindamist. Samas on pidevas režiimis töötav mudel suurepärase teadusliku informatsiooni allikas. Seda informatsiooni on võimalik ära kasutada nii mudeli enda arendamiseks kui ka meteoroloogilist informatsiooni tarbivate rakenduste tõstmiseks uuele tasemele. Mudeliarenduse seisukohast võiks isegi öelda, et eeloperatsioonilise ilmaennustuskeskkonna käivitamine oli Tartu mittehüdrostaatilise mudeli edasiseks arendamiseks hädavajalik eeltingimus. Mudeli tegelik väärtus ja probleemsed kohad ilmnevad ju ennekõike pikaajalises praktilises töös. Kunstlikud eksperimendid ja üksikjuhtumite modelleerimised on olulised mudeli vigade silumisel, kuid edu korral viitavad pelgalt mudeli kasutamiskõlblikkusele.

Ilmaennustuskeskkonna käivitamisel ja töös hoidmisel on ilmnunud mitmeid rakenduslikke kitsaskohti. Üheks oluliseks probleemiks on olnud arvutusressursside nappus. Kõrgetele lahutustele üleminek toob endaga kaasa vajaduse suurendada võrgupunkide arvu, mis loomulikult tõstavad nõudeid arvutitele. Lisaks võrgupunktide arvu kasvuga kaasnevale võrgusammu vähenemisele peab vähenema ka integreerimisel kasutatav ajasamm, mis nõuab arvutustes rohkemate ajasammude tegemist. Ehkki probleemi saaks lahendada kulutades raha arvutusvõimsuste suurendamiseks, on siiski võimalik seda kitsaskohta leevendada ka arvutuslikult efektiivsemate meetodite rakendamisega. Poolilmutatud pool-Lagrange'i integreerimisskeemiga mittehüdrostaatilise mudeli rakendamine oleks siinjuures oluliseks võiduks kuna see skeem võimaldab oluliselt pikemaajaste ajasammude võrreldes Euleri skeemidega suurendades ainult pisut nõudeid arvutusressurssidele. Esimesed katsetused poolilmutatud Euleri skeemil põhineva mudeli asendamiseks NHSISL-iga on ilmaennustuskeskkonnas juba tehtud. Esialgsed tulemused on olnud julgustavad, kuna katsetes on NHSISL näidanud hüdrostaatilise pool-Lagrange'i skeemiga

võrdväärset kvaliteeti. Tulemused olid esitatud joonistel 4 ja 5. Esimestele katsetele tuginedes on planeeritud ilmaennustuskeskkonna ETB NHSISL-ile üleviimine 2004 aasta esimesel poolel.

Vaatamata mitmetele tehnilistele kitsaskohtadele ja lahendamist vajavatele probleemidele tuleb EMHI-s käivitatud numbrilise ilmaennustuskeskkonna projekti lugeda edukaks ja perspektiivikaks. Oma lühikese tööaja jooksul on ilmaennustuskeskkond näidanud head täpsust meteoparameetrite prognoosimisel. Mudeli väljunditest moodustuv andmebaas on oluline abivahend Eesti ilmastiku analüüsiks. Suurt huvi andmestiku ja prognooside vastu on juba üles näidanud ka teiste teadusala esindajad. Märkimisväärne potentsiaal on sellel keskkonnal ka kommertsrakenduste käivitamisel, kuid selleks on vajalik eelnevalt Eestil liituda HIRLAM konsortsiumiga. Töö keskkonna arendamiseks jätkub kindlasti ka tulevikus.

### 3. Kokkuvõte

Kokkuvõttes oleme tehtuga rahul. Arvame, et oleme päris tublit tööd teinud ja arvestatavaid tulemusi saanud. Erilist heameelt teeb meile, et enamus teoreetilisi tulemusi ja meetodiarendusi on jõudnud rakendustesse Eesti jaoks aktuaalsetel suundadel. Oleme käima pannud mittehüdrostaatilise kõrglahutusliku ilmennustustarkvara EMHIs, mis kvaasioperatsioonilises režiimis täitsa töötab ja väljastab regulaarselt ilmaennustust Eesti kohta (kusjuures ennustuse kvaliteet – detailsus ja täpsus - on juba praegu parim, mis kunagi Eesti ilma jaoks tehtud on või saadaval on olnud). Selles osas on projekti raames ära tehtud rohkemgi, kui algselt planeeritud sai ja oli.

On ka lahendamata probleeme, millest esikohal on kindlasti antitsüklonite ülevõimendumine mägi piirkondades. Siin on tarvilik edasine töö mudeliga, mis kindlasti jätkub ka peale granti nominaalkestvuse lõppu.

Perspektiivsete edasiarendustena näeme vajadust arendada ja täiustada füüsikaplokki (füüsikalisi parametriseringuid), tuues need paremasse vastavusse kõrglahutusliku adiabaatilise tuuma poolt pakutavate nõudmiste ja võimalustega. Tööd selles suunas on juba alanud, mille üheks olulisemaks peegelduseks on käesoleva uurimistöö jätkuna käivatud jätkugrant *ETF Grant 5711*.

#### 4. Kirjandusviited

Unden, P. et al., HIRLAM-5 Scientific Documentation. HIRLAM- Project, SMHI, SWEDEN, 2002, 144 p.

Källén, E. (Editor), 1996: HIRLAM Documentation Manual. Norrköping 1996, 200 p.

McDonald, A., 1994: The HIRLAM two-level, three dimensional semi-Lagrangian, semi-implicit, limited area, grid point model of the primitive equations. *HIRLAM Technical Report No. 17*, Norrköping, march 1995, 25 p.

Miller, M. J., Pearce, R. P., 1974: A three-dimensional primitive equation model of cumulonimbus convection. *QJRMS*, 100, 133—154.

Miranda, P. M. A., James, I. N., 1992: Non-linear three-dimensional effects on gravity-wave drag: splitting flow and breaking waves. *QJRMS*, 118, 1057—1081.

White, A. A., 1989: An extended version of nonhydrostatic, pressure coordinate model. *QJRMS*, 115, 1243 -- 1251.

Männik, A., Rõõm, R., 2001: Nonhydrostatic adiabatic kernel for HIRLAM. Part II. Anelastic, hybrid-coordinate, explicit-Eulerian model. *Hirlam Technical Report No 49*, 53 p.

Rõõm, R., 2001: Nonhydrostatic adiabatic kernel for HIRLAM. Part I. Fundamentals of nonhydrostatic dynamics in pressure-related coordinates. *Hirlam Technical Report No 48*, 25 p.

Rõõm, R., A. Männik, 2002: Nonhydrostatic adiabatic kernel for HIRLAM. Part III. Semi-implicit Eulerian scheme. *HIRLAM Technical Report*, 55, 29p.

Rõõm R., 1999: Least action principle for general, nonhydrostatic, compressible, acoustically non-filtered pressure-coordinate model. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, v. 125, 1903 - 1907.

Rõõm R., A. Männik, 1999: Responses of different nonhydrostatic, pressure-coordinate models to orographic forcing. *J. Atm. Sci.*, v. 56, No 15, 2553 - 2570.

Rõõm, R., 1998: Acoustic filtering in nonhydrostatic pressure coordinate dynamics: A variational approach. *J. Atm. Sci.*, v. 55, No 4, 654 - 668.

Rõõm, R., 1990: General form of non-hydrostatic equations of atmospheric dynamics in isobaric coordinates (In Russian). *Proc. Soviet Acad. Sci., Atm. Ocean Physics*. v. 26, 17 - 26.

Rõõm, R., 1989: General equations of atmospheric dynamics in isobaric coordinates. *Proc. Estonian Acad. Sci., Phys.- Math.*, v. 38, 368 - 371.

Robert, A. J., 1966: The integration of a low order spectral form of the primitive meteorological equations. *J. Met. Soc. Japan*, 44, 237 -- 245.

Robert, A. J., 1969: The integration of a spectral model of the atmosphere by the implicit method. *Proc. WMO-IUGG Symposium on NWP*, Tokyo, Japan Meteorological Agency, VII, 19 - 24.

## 5. Projekti põhitäitjate nimekiri

<b>Nimi</b>	<b>Akadeemiline kraad</b>	<b>Töökoht</b>	<b>Osalusperiood</b>
Rein Rõõm	F-M kandidaat	TO(2001) TÜ(2002-2003)	2001 -2003
Aarne Männik	PhD	TÜ FKKF	2001 -2003
Marko Kaasik	PhD	TÜ FKKF	2002
Andres Luhamaa	MSc	TÜ FKKF	2001 – 2003
Ivar Ansper*	BSc	EMHI	2001

\* Vastavalt tollastele reeglitele tohtis põhitäitja olla ka BSc kraadiga (magistrant).

## 6. Finantsaruanne

### Vorm 10

#### Grandiprojekti nr 4700 kulude aruanne\* 2001 - 2003 a\*

	1.aasta 2001	2.aasta 2002	3.aasta 2003	Kokku
Töötasu	13686	0	5600	19286
Sotsiaalmaks ja ravikindlustus (33% töötasust)	4516	0	1848	6364
Töötuskindlustusmaks	68	0	28	96
Stipendiumid	11470	30000	34000	75470
Asutuse üldkululõiv	20074	12000	9600	41674
Aparatuur	11427	33800	38266	83493
Kirjastamine	0	0	9422	9422
Välislahetused	28151	0	0	28151
Muud kulud	10608	614	24822	36044
<b>Kokku</b>	<b>100000</b>	<b>76414</b>	<b>123586</b>	<b>300000</b>

\*Tabelis palume esitada iga aasta tegelikud kulutused (ka lisaeraldused Teadusfondilt).

*„Kinnitan kuluaruande õigsust aastal 2001”*

Tartu Observatooriumi pearaamatupidaja \_\_\_\_\_ Liidia  
Meier

Allkiri ja kuupäev

*„Kinnitan kuluaruande õigsust aastatel 2002 - 2003”*

TÜ pearaamatupidaja \_\_\_\_\_ Anne  
Iher

Allkiri ja kuupäev



## 6.1. Ostetud seadmed koos maksumusega

Soetamisaeg	Seade	Maksumus (EEK)	Kasutus
2001	PC Pentium 4 baasil	11427	Server „Uranos”
2002	PC Microlink, Laptop	33800	Süsteemiadministraatori töökoht (Aarne Männik)
2003	PC ML AMD Athlon	10496	Töökoht (Andres Luhamaa)
2003	PC Pentium M Centrino	27770	Töökoht (Rein Rõõm)
<b>Kokku</b>		<b>83493</b>	

## 6.2. Välislähetused

Lähetatu	Üritus	Aeg ja koht	Ülesanne	Maksumus (EEK)
R. Rõõm A. Männik	HIRLAM aastakonverents 2001	5 – 9 mai 2001, Reykjavik, Island	NH HIRLAM arenduste tutvustamine, teaduslikud ettekanded, sektsiooni töö juhtimine	28151
<b>2001-2003 Kokku</b>				<b>28151</b>

### 6.3 Töötasufondi ja stipendiumide kasutamine

#### 2001

Tasustatud isik	Tööülesanne	Summaarne töötasu	Summaarne stipendium
Kalju Annuk	HIRLAM paralleelarvutus-süsteemi haldamine	2000	0
Krista Kallis	Tõlketööd	420	0
Andres Luhamaa, FKKF, põhiõpe ja magistrantuur	NH HIRLAM uurimistöö	8266	5735
Ivar Ansper, geograafia põhiõpe ja magistrantuur	NH HIRLAM uurimistöö	2000	5735
Aarne Männik	NH HIRLAM uurimistöö	1000	0
<b>2001 kokku</b>		<b>13686</b>	<b>11470</b>

#### 2002

Tasustatud isik	Tööülesanne	Summaarne töötasu	Summaarne stipendium
Andres Luhamaa	Õppimine ja teadustöö magistrantuuris	0	15000
Ivar Ansper	Õppimine ja teadustöö magistrantuuris	0	15000
<b>2002 kokku</b>		<b>0</b>	<b>30000</b>

#### 2003

Tasustatud isik	Tööülesanne	Summaarne töötasu	Summaarne stipendium
Marko Zirk	NH HIRLAM uurimistöö	5600	10000
Andres Luhamaa	Õppimine ja teadustöö magistrantuuris	0	12000
Ivar Ansper	Õppimine ja teadustöö magistrantuuris	0	12000
<b>Kokku 2003</b>		<b>5600</b>	<b>34000</b>

## 7. Grantiga seotud teaduspublikatsioonide bibliograafiline loend

### ***CC ja võrdsustatud väljaanded:***

**Rõõm, R., Männik, A.,** 2001: Acoustic filtration in pressure-coordinate models. Basic concepts and applications in non-hydrostatic modeling. In: P. F.Hodnett (Ed.), IUTAM Symposium on Advances in Mathematical Modelling of Atmosphere and Ocean Dynamics. Kluwer Academic Publishers (298 p.), 221 - 226.

**Männik A., Rõõm R., and Luhamaa A.** Nonhydrostatic generalization of pressure-coordinate based hydrostatic model with implementation in HIRLAM: Validation of adiabatic core. - Tellus A, 2003, 55, 219 - 231.

### ***Muud eelretsenseeritavad:***

**Rõõm, R., A. Männik,** Nonhydrostatic adiabatic kernel for HIRLAM. Part III. Semi-implicit Eulerian scheme. HIRLAM Technical Report, 2002, 55, 29p.

Unden, P. , .... **R. Rõõm,** et al., HIRLAM-5 Scientific Documentation. HIRLAM-Project, SMHI, SWEDEN, 2002, 144 p.

**Kaasik, M.,** Influence of Underlying Surface Forest Fraction to the Meso-Scale Wind Fields and Dispersion Conditions. IN: Ed. B. Sportisse, Pollution Modelling and Simulation. Springer, 2002, 355 – 360.

### ***Dissertatsioonid:***

**Männik, A.** Implementation and validation of the nonhydrostatic adiabatic core of the numerical weather prediction model HIRLAM, Dissertationes Geophysicales Universitatis Tartuensis, Tartu Ülikool, TÜ kirjastus, 2003

### ***Muud publikatsioonid:***

Rõõm, R., Männik, A., 2001: Semi-implicit Eulerian version of nonhydrostatic HIRLAM. HIRLAM Newsletter No 38, 156 - 161.

Männik, A., Rõõm, R., 2001: Forecasting experiments with acoustically filtered non-hydrostatic pressure-coordinate model. Geoph. Res. Abstr., Vol. 3, 4106.

Rõõm, R., Miranda, P., Männik, A., 2001: Surface pressure adjustment and surface pressure alance. Application in hydrostatic and nonhydrostatic NWP and GC models. Geoph. Res. Abstr. Vol. 3, 8179.

Männik, A., Rõõm, R., 2001: Modeling with NH HIRLAM. HIRLAM Newsletter No 38, 162 - 165.

Männik A., R. Rõõm, Current situation with the NH HIRLAM. HIRLAM Newsletter, 2002, 41, 114 - 118.

## 8. Kaitstud doktori ja magistritööd

Doktorikraad (PhD) omistatud:

**Aarne Männik**, doktoritöö atmosfääridünaamikas:

Numbrilise ilmaennustusmudeli HIRLAM mittehüdrostaatilise adiabaatilise tuuma teostus ja testimine (Implementation and validation of the nonhydrostatic adiabatic core of the numerical weather prediction model HIRLAM)

Kaitstud TÜ füüsikaosakonna doktorikaitsemisnõukogu ees 29. septembril 2003. a.

Magistrikraad (MSc) omistatud:

**Andres Luhamaa**, magistritöö keskkonnafüüsikas:

Pool-Lagrange'i kahe-ajatasemeline integreerimisalgoritm atmosfääri potentsiaalse pöörisvälja võrrandile.

Kaitstud TÜ füüsikaosakonna magistrikaitsemisnõukogu ees 15. juunil 2003. a..

## **9. Grantiga seotud teaduspublikatsioonide separaadid**