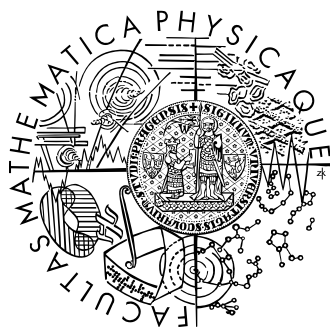


Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Jan Karlický

Model WRF pro předpověď počasí

Katedra meteorologie a ochrany prostředí

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Tomáš Halenka, CSc.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

2010

Chtěl bych poděkovat panu doc.RNDr.Tomáši Halenkovi, CSc., za podněty a cenné připomínky při vypracování této práce.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce.

V Praze dne

Jan Karlický

.....

Obsah

Abstrakt	4
Úvod	5
1. Numerické předpovědní modely.....	6
1. 1. Účel.....	6
1. 2. Základní principy	6
2. Stavba modelu WRF	8
2. 1. Základní informace o modelu	8
2. 2. Základní dynamické rovnice	10
3. Počítačová realizace modelu WRF	15
3. 1. Vstupní data	15
3. 2. Instalace a struktura modelu.....	19
3. 3. Výstupní data, posprocessing	21
3. 4. Možnosti a způsoby zobrazování výsledků.....	22
4. Ukázky implementace modelu	27
Závěr	35
Seznam použité literatury	36

Abstrakt

Název práce: Model WRF pro předpověď počasí

Autor: Jan Karlický

Katedra: Meteorologie a ochrany prostředí

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Tomáš Halenka, CSc.

e-mail vedoucího: tomas.halenka@mff.cuni.cz

Abstrakt: Tato práce je věnována využití numerických předpovědních modelů při předpovědi počasí, nejprve je popsán obecně jejich účel a princip, poté konkrétně numerický předpovědní model WRF. Je rozebrána jeho stavba, rovnice, které řeší, postup instalace a spouštění modelu z uživatelského hlediska. Část práce je věnována také grafickému zobrazování výsledků, což je důležité pro jejich prezentaci. V poslední kapitole této jsou uvedeny ukázky výsledků modelu WRF zobrazených pomocí grafického systému GrADS, zaměřené aktuálně na období extrémních srážek a povodní v květnu roku 2010 ve východní části území ČR.

Klíčová slova: numerický předpovědní model, model WRF, implementace modelu

Title: Model WRF for weather forecasting

Author: Jan Karlický

Department: Department of Meteorology and Environment Protection

Supervisor: doc. RNDr. Tomáš Halenka, CSc.

Supervisor's e-mail address: tomas.halenka@mff.cuni.cz

Abstract: This work is dealing with the use of numerical models in weather forecasting, first their purpose and principle is described generally, and then numerical weather forecast model WRF. Construction, governing equations, installation and running from user's perspective of the model is described. One part of this work is dedicated to graphics outputs of model results, which is important for their presentation. In the last chapter, there are illustrations of model results displayed by graphical system GrADS. These results show the case of extreme rainfall and floods in May 2010 in the east of Czech Republic.

Keywords: numerical weather forecast model, WRF model, implementation of model

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá numerickými předpověďmi počasí, nejprve v obecné rovině, kdy popisuje základní principy těchto předpovědí a jejich účel. V další kapitole je rozebrána stavba numerického předpovědního modelu WRF, a to z obecného hlediska a také z hlediska rovnic, které model používá. V další části je rozebírána počítačová realizace tohoto modelu, pojednává se zde o vstupních datech, instalaci a spouštění všech programů modelu až po grafickou prezentaci výsledků. V poslední kapitole jsou uvedeny v grafické podobě ukázky výsledků předpovědí modelu WRF.

Ukázky výsledků modelu WRF jsou zaměřeny na období extrémních srážek a následných povodní v květnu 2010 ve východní části našeho území. Některé hodnoty vešlé z předpovědi jsou konfrontovány s naměřenými daty, avšak hodnocení přesnosti předpovědi nebo jiné podobné závěry jsou mimo rozsah této práce.

Jelikož od prvního vypsání tématu této bakalářské práce k jejímu zadání a vypracování uběhl nějaký čas, nastala situace, že model ETA, se kterým se mělo v této bakalářské práci pracovat, již v současné době nebyl modernizován a není už také kompatibilní se všemi překladači. Proto se přešlo na jiný model, konkrétně na model WRF, který je nejméně stejně uznávaný, navíc na rozdíl od modelu ETA nehydrostatický a stále modernizovaný, tudíž perspektivnější. Veškeré informace o modelu WRF lze najít na internetových stránkách tohoto modelu: <http://wrf-model.org/>

1. Numerické předpovědní modely

1. 1. Účel

V současné době tvoří numerické předpovědní modely základ pro předpověď počasí na různě dlouhá období, krátkodobé (předpověď na 1. a 2. den) a střednědobé (předpověď na 3. až přibližně 8. den). Pro jednotlivé předpovědi se používá výstupů z více modelů, jak z důvodu porovnání výsledků, tak z důvodu rozdílného rozlišení modelů. Například Český hydrometeorologický ústav používá pro krátkodobou předpověď vlastní model ALADIN a lokální model Německé meteorologické služby, jak uvádí Šopko a kol. [1]. Výstupy těchto modelů jsou obvykle pole teplot a výšek různých tlakových hladin, přízemní tlak a teplota, úhrny srážek za různá časová období a další informace o stavu atmosféry. Tato data spolu s aktuálními daty o stavu atmosféry tvoří základní podklady pro meteorologa tvořícího předpověď, potřebnou pro veřejnost. Úspěšnost předpovědi je tedy z velké části dána přesností numerických předpovědních modelů.

Všechny výstupy z různých modelů mají pouze omezenou přesnost, ta je ovlivněna především velikostí horizontálního a vertikálního kroku výpočetní sítě, dále tím, že atmosférické pozorování se dějí pouze v určitých místech, které nejsou totožné s výpočetní sítí a proto je nutno tyto hodnoty přepočítat, což se neobejde bez chyb. Také z hlediska výpočetní techniky se jedná o náročné výpočty a za účelem snížení této náročnosti se přistupuje k aproximacím, které jsou však zdrojem dalších chyb. Všechny tyto chyby se zvětšují s rostoucí časovou vzdáleností od počátku, neboť atmosféra je nelineární dynamický systém, silně závislý na počátečních podmínkách a s rostoucím časem se postupně více odchyluje od skutečnosti, až se rozplyne v deterministickém chaosu, jak uvádí Janoušek [2].

1. 2. Základní principy

Princip všech numerických předpovědních modelů je numerická integrace prognostických rovnic za použití počátečních podmínek vzešlých buď z naměřených dat nebo z výstupů jiných modelů. Počáteční podmínky výpočtu tedy mají základ v měření meteorologických prvků na meteorologických stanicích, v měřeních sondážních a v asimilaci dat, např. z družicových systémů. Tato měření ovšem netvoří nějakou pravidelnou síť naměřených hodnot, meteorologické stanice jsou rozmístěny nepravidelně, taktéž ostatní měřicí systémy. Navíc se mění hustota pokrytí zemského povrchu těmito

nástroji, nejvyšší hustota je na souši v hustě obydlených oblastech a naopak nejnižší hustota je nad oceány.

Numerické modely však obvykle pracují s pravidelnou sítí bodů, je tedy nutné nějakým způsobem přepočítat hodnoty naměřených veličin do výpočetní sítě modelu. V současnosti se pro větší přesnost počátečních podmínek používá také dat z jiných předpovědních modelů, zpřesnění se projeví hlavně v oblastech s nižší hustotou meteorologických měření. Pro jednoznačné řešení je nutné znát také okrajové podmínky úlohy, ve vertikálním směru jsou tvořeny z jedné strany zemským povrchem a z druhé strany horním okrajem atmosféry, který je obvykle pevně zadán. Tato příprava počátečních a okrajových podmínek úlohy je obvykle oddělená součástí modelu a bývá nazývána nejčastěji preprocesing.

Dále je třeba znát podobu prognostických rovnic, které vyjadřují dynamické děje v atmosféře. K tomuto účelu se používá uzavřený systém rovnic zahrnující pohybové rovnice, rovnici kontinuity, první hlavní větu termodynamickou a stavovou rovnici. Tyto rovnice se obvykle ještě upravují do tvaru s modelovou vertikální souřadnicí. Následují prostředky numerické matematiky, pomocí nichž se derivace ve vztazích a integrace rovnic převádí na jednodušší operace, které jsou řešeny počítačovým systémem. Výsledkem jsou pak data o budoucím stavu atmosféry v modelové síti bodů.

Tím je běh vlastního modelu u konce, ale abychom mohli získané údaje nějak dále interpretovat či prezentovat, je potřeba tyto údaje nějakým způsobem zobrazit. To se obvykle děje pomocí dvou kroků, kdy je nutné nejprve získaná data upravit do tvaru, ve kterém je možné je prezentovat, tedy spočítat hodnoty těch veličin, které chceme dále zobrazovat z veličin používaných při výpočtu. Tento proces se obvykle označuje jako postprocesing. Poté je již možné vypočtená data prezentovat, tedy zobrazovat hodnoty a změny meteorologických veličin v prostoru a čase, k tomuto účelu existuje mnoho grafických programů.

2. Stavba modelu WRF

Model WRF (The Weather Research and Forecasting) je numerický předpovědní model sloužící jak k výzkumu, tak i k provozním aplikacím.. Byl vytvořen spoluprací více pracovišť za účelem lepšího přenesení nových poznatků výzkumu do provozu. Na jeho vývoji se podílely Oddělení Mesoscale and Mikroscale Meteorology (MMM) v National Center for Atmospheric Research's (NCAR), National Center for Environmental Prediction (NCEP) organizace National Oceanic Atmospheric Administration's (NOAA) a další. Model může být spouštěn na počítačích s velmi rozdílnými výkony, jeho kód může být konfigurován podle potřeby a je také možné měnit vstupní parametry. Jeho WRF-var (variační asimilační systém) je zkonstruován pro zpracování množství dat k vytvoření optimálních počátečních podmínek, program WRF-chem poskytuje možnost pro modelování chemických dějů v atmosféře. Dalšími součástmi modelu jsou WRF Preprocessing System (WPS), který poskytuje systém dat přizpůsobený dalšímu řešení (preprocessing), a vlastní dynamické výpočetní systémy Advanced Research WRF (ARW) a Nonhydrostatic Mesoscale Model (MMM). Model WRF je vhodný pro široké použití ve výzkumu, v provozu a k výuce, a v současnosti má více než 6 000 registrovaných uživatelů. Další informace o modelu WRF jsou k nalezení na internetových stránkách modelu WRF (<http://wrf-model.org>). Dále se již budu zabývat pouze systémem ARW, z jehož technického popisu [3] čerpá z velké části kapitola 2.

2. 1. Základní informace o modelu

Systém ARW, zahrnující podobně jako MMM různá fyzikální schémata, možnosti nastavení parametrů, inicializační procesy a asimilační program WRF-var, používá Eulerovy nehydrostatické rovnice, samozřejmě s možností nastavení hydrostatické verze. Jako předpovídané proměnné jsou použity složky rychlosti v kartézských souřadnicích, perturbace potenciální teploty, perturbace geopotenciálu, perturbace tlaku suchého vzduchu na povrchu země. Volitelně lze ještě nastavit turbulentní kinetická energie, směšovací poměr vodních par, směšovací poměr deště a sněhu, směšovací poměr vody a ledu v oblacích a chemické složení. Jako počáteční podmínky musí být dodány třídimensionální data. Okrajové podmínky se liší v horizontálním a vertikálním směru. Ve vertikálním směru je horní hranice prostoru modelu tvořena vrstvou stálého tlaku, dolní hranice je pak tvořena průběhem terénu. V horizontálním směru pak používá podle nastavení periodické, otevřené nebo symetrické okrajové podmínky. Horizontální

modelová síť je rozvržena podle Arakawova schématu C-sítě. Při časové integraci používá model Runge-Kuttovo schéma druhého a třetího stupně.

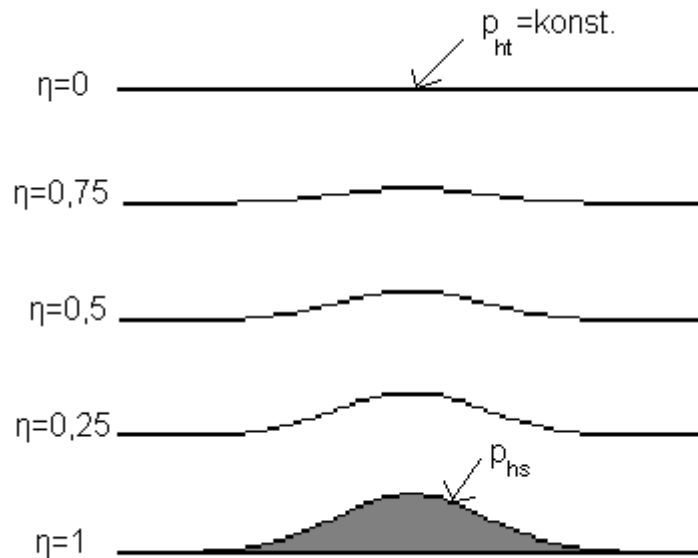
Vertikální síť je tvořena pomocí souřadnice σ typu. Tento typ vertikální souřadnice je používán mnoha atmosférickými modely, v našem případě se používá definice navržená Laprise [4]. Tato souřadnice, v tomto případě nazvaná η , je definována jako

$$\eta = \frac{(p_h - p_{ht})}{\mu}, \quad (2.1)$$

kde p_h je hydrostatický tlak v daném místě, p_{ht} je hodnota tlaku atmosféry na horní hranici počítaného prostoru. Veličina μ je pak dána rozdílem

$$\mu = p_{hs} - p_{ht}, \quad (2.2)$$

kde p_{hs} je tlak v na povrchu země pod daným místem. Souřadnice η nabývá hodnot od 1 (na zemském povrchu) po 0 (na horní hranici prostoru), ilustrace hodnot této souřadnice je na obrázku 2.1. Veličina μ popisuje tíhu vzduchového sloupce nad jednotkovou plochou povrchu země v daném místě.



Obr. 2.1: Ilustrace η souřadnice

Pokud jde o fyzikální vlastnosti, model je schopný počítat jak se suchým povrchem země, tak i s povrchem s vegetací a vlhkou půdou, sněhovou pokrývkou nebo zaledněným mořem. Dále pak zahrnuje radiační vlivy na počasí a jejich ovlivňování oblaky. Z hlediska

konstrukce softwaru jde o vysoce modulární, jednoduchý zdrojový kód za účelem snadné údržby, umožňující paralelizaci a sdílení paměti. Model podporuje různorodé programy spolu s ním instalované a různé formáty dat, umožňuje také sdružení s dalšími modely.

2. 2. Základní dynamické rovnice

Jak již bylo řečeno, model ARW integruje nehydrostatické Eulerovy rovnice, které jsou v diferenciální formě. Tyto rovnice ovšem nejsou použity jednoduše v kartézských souřadnicích, ale místo standardní vertikální souřadnice z je zde použita již zavedená souřadnice η , dále je pak třeba započítat vlivy vlhkosti vzduchu a projekce na sféru. Pomocí veličiny μ zavedené vztahem (2.2) se pak definují další později používané veličiny:

$$\vec{V} = \mu \vec{v} = (U, V, W), \quad \Omega = \mu \dot{\eta}, \quad \Theta = \mu \theta, \quad (2.3)$$

kde $\vec{v} = (u, v, w)$ jsou složky rychlosti, $\omega = \dot{\eta}$ je vertikální složka úhlové rychlosti a θ potenciální teplota. Dále se ještě objevují veličiny jako geopotenciál $\phi = gz$, tlak p a měrný objem $\alpha = \rho^{-1}$.

Pomocí těchto proměnných a souřadnic x, y, η lze přepsat Eulerovy hydrodynamické rovnice spolu s rovnicí zachování energie, rovnicí kontinuity a rovnicí popisující geopotenciál do tvaru používaného modelem:

$$\partial_t U + (\nabla \cdot \vec{V} u) - \partial_x (p \partial_\eta \phi) + \partial_\eta (p \partial_x \phi) = F_U \quad (2.4)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot \vec{V} v) - \partial_y (p \partial_\eta \phi) + \partial_\eta (p \partial_y \phi) = F_V \quad (2.5)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot \vec{V} w) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W \quad (2.6)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot \vec{V} \theta) = F_\Theta \quad (2.7)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot \vec{V}) = 0 \quad (2.8)$$

$$\partial_t \phi + \mu^{-1} [(\vec{V} \cdot \nabla \phi) - gW] = 0 \quad (2.9)$$

Rovnice (2.4) – (2.6) jsou standardní pohybové rovnice zahrnující navíc nehomogenitu geopotenciálu Φ a přepsané do souřadnic x, y, η . Rovnice (2.7) vyjadřuje zákon zachování pro veličinu Θ , (2.8) je rovnice kontinuity pro μ , (2.9) popisuje geopotenciální pole. Členy

na pravé straně rovnic jsou silové členy zahrnující zemskou rotaci, turbulentní tření a radiační působení. Tyto rovnice jsou ještě doplněny rovnicí hydrostatické rovnováhy

$$\partial_{\eta}\phi = -\alpha\mu, \quad (2.10)$$

a stavovou rovnicí

$$p = p_0 \left(\frac{R_d \theta}{p_0 \alpha} \right)^{\gamma}, \quad (2.11)$$

kde R_d je plynová konstanta suchého vzduchu, γ poměr tepelných kapacit c_p a c_v , p_0 a p počáteční a koncová hodnota tlaku vzduchu.

Při formulaci pro vlhký vzduch dojde k malým úpravám předchozích rovnic, přitom se počítá s veličinami pro suchý vzduch. Vertikální η souřadnice je definována tlaky suchého vzduchu. Při nasycení vznikají jevy související s přechodnými jevy a proto k sadě rovnic přibude rovnice vyjadřující změny v poměrech jednotlivých fází:

$$\partial_t U + (\nabla \cdot \vec{V}u) + \mu_d \alpha \partial_x p + (\alpha / \alpha_d) \partial_{\eta} (p \partial_x \phi) = F_U \quad (2.12)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot \vec{V}v) + \mu_d \alpha \partial_y p + (\alpha / \alpha_d) \partial_{\eta} (p \partial_y \phi) = F_V \quad (2.13)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot \vec{V}w) - g [(\alpha / \alpha_d) \partial_{\eta} p - \mu_d] = F_W \quad (2.14)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot \vec{V}\theta) = F_{\Theta} \quad (2.15)$$

$$\partial_t \mu_d + (\nabla \cdot \vec{V}) = 0 \quad (2.16)$$

$$\partial_t \phi + \mu_d^{-1} [(\vec{V} \cdot \nabla \phi) - gW] = 0 \quad (2.17)$$

$$\partial_t Q_m + (\nabla \cdot \vec{V}q_m) = F_{Q_m} \quad (2.18)$$

V těchto rovnicích je α_d měrný objem suchého vzduchu a α je měrný objem všech složek vzduchu, Q_m je definováno součinem $Q_m = \mu_d q_m$, kde q_m je směšovací poměr dané složky vzduchu. Rovnice hydrostatické rovnováhy má pro veličiny charakterizující suchý vzduch stejný tvar, stavová rovnice má obdobný tvar

$$p = p_0 \left(\frac{R_d \theta_m}{p_0 \alpha_d} \right)^\gamma, \quad (2.19)$$

kde $\theta_m = [1 + (R_v / R_d) q_v]$ je virtuální potenciální teplota, R_v a q_v označují plynovou konstantu a směšovací poměr vodních par.

Zatím byly všechny rovnice psány v pravoúhlých kartézských souřadnicích, ale povrch země lze aproximovat rovným povrchem jen do určité míry, kdy chyby ze zanedbání sférickosti povrchu země nepřevyšují chyby vzniklé jinými nedokonalostmi. Pro případy počítání na větších oblastech nebo na celé zemské sféře se používají projekce, které zobrazují část sféry na rovinu, na horizontální síť bodů. Čtyři takové projekce jsou podporovány modelem ARW. Tři z nich jsou izotropní projekce (Lambert conformal, polar stereografic, Mercator), tzn. s rovností poměrů mezi vzdálenostmi na síti a na zemi ve směru osy x a y . Anizotropní projekce podporována ARW je latitude-longitude. Všechny tyto projekce jsou ortogonální, což způsobuje, že poměry vzdáleností na síti ke skutečným závisí na poloze na síti. Tyto poměry jsou označeny jako m_x a m_y , ve směru souřadnice x a y . Pomocí těchto faktorů můžeme předefinovat veličiny závislé na poloze jako $U = \mu_d u / m_y$, $V = \mu_d v / m_x$, $W = \mu_d w / m_y$, $\Omega = \mu_d \dot{\eta} / m_y$ a přepsat sadu rovnic:

$$\partial_t U + m_x [\partial_x (Uu) + \partial_y (Vu)] + \partial_\eta (\Omega u) + \mu_d \alpha \partial_x p + (\alpha / \alpha_d) \partial_\eta (p \partial_x \phi) = F_U \quad (2.20)$$

$$\partial_t V + m_y [\partial_x (Uv) + \partial_y (Vv)] + (m_y / m_x) \partial_\eta (\Omega v) + \mu_d \alpha \partial_y p + (\alpha / \alpha_d) \partial_\eta (p \partial_y \phi) = F_V \quad (2.21)$$

$$\partial_t W + (m_x m_y / m_y) [\partial_x (Uw) + \partial_y (Vw)] + \partial_\eta (\Omega w) - m_y^{-1} g [(\alpha / \alpha_d) \partial_\eta p - \mu_d] = F_W \quad (2.22)$$

$$\partial_t \Theta + m_x m_y [\partial_x (U\theta) + \partial_y (V\theta)] + m_y \partial_\eta (\Omega \theta) = F_\Theta \quad (2.23)$$

$$\partial_t \mu_d + m_x m_y (\partial_x U + \partial_y V) + m_y \partial_\eta \Omega = 0 \quad (2.24)$$

$$\partial_t \phi + \mu_d^{-1} [m_x m_y (U \partial_x \phi + V \partial_y \phi) + m_y \Omega \partial_\eta \phi - m_y g W] = 0 \quad (2.25)$$

$$\partial_t Q_m + m_x m_y [\partial_x (Uq_m) + \partial_y (Vq_m)] + m_y \partial_\eta (\Omega q_m) = F_{Q_m} \quad (2.26)$$

Členy na pravé straně zahrnují členy Coriolisovy síly, turbulentního tření a radiačního působení upravené pomocí koeficientů m_x , m_y . Stavová rovnice a rovnice hydrostatické rovnováhy zůstávají nezměněny. Pro případ izotropní projekce $m = m_x = m_y$ mají členy Coriolisovy síly následující tvar:

$$F_{U_{cor}} = + \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) V - eW \cos \alpha_r - \frac{uW}{r_e}, \quad (2.27)$$

$$F_{V_{cor}} = - \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) U - eW \sin \alpha_r - \frac{vW}{r_e}, \quad (2.28)$$

$$F_{W_{cor}} = + e(U \cos \alpha_r - V \sin \alpha_r) + \frac{uU + vV}{r_e}, \quad (2.29)$$

kde α_r je lokální úhel natočení mezi osou y a poledníky, r_e poloměr země, $f = 2\Omega_e \sin \psi$, $e = 2\Omega_e \cos \psi$, přičemž ψ je zeměpisná šířka v daném bodě a Ω_e úhlová rychlost otáčení země.

Poslední úpravou dynamických rovnic je přepsání pomocí perturbací proměnných, což je výhodné z hlediska redukce numerických chyb při vlastním výpočtu. Vychází se z předpokladu, že veličiny jako tlak p , geopotenciál θ , měrná hmotnost α a veličina μ_d kolísají kolem jistých referenčních hodnot, označovaných pruhem, které splňují dané rovnice při ustáleném stavu atmosféry. Odchytky od těchto hodnot vyjadřují veličiny označené čárkou, lze tedy psát $p = \bar{p}(\bar{z}) + p'$, $\phi = \bar{\phi}(\bar{z}) + \phi'$, $\alpha = \bar{\alpha}(\bar{z}) + \alpha'$ a $\mu_d = \bar{\mu}_d(x, y) + \mu'_d$. Dynamické rovnice pak přejdou do konečného tvaru:

$$\begin{aligned} \partial_t U + m_x [\partial_x (Uu) + \partial_y (Vu)] + \partial_\eta (\Omega u) + (\mu_d \alpha \partial_x p' + \mu_d \alpha \partial_x \bar{p}) + \\ + (\alpha / \alpha_d) (\mu_d \partial_x \phi' + \partial_\eta p' \partial_x \phi - \mu'_d \partial_x \phi) = F_U \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} \partial_t V + m_y [\partial_x (Uv) + \partial_y (Vv)] + (m_y / m_x) \partial_\eta (\Omega v) + (\mu_d \alpha \partial_y p' + \mu_d \alpha \partial_y \bar{p}) + \\ + (\alpha / \alpha_d) (\mu_d \partial_y \phi' + \partial_\eta p' \partial_y \phi - \mu'_d \partial_y \phi) = F_V \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} \partial_t W + (m_x m_y / m_y) [\partial_x (Uw) + \partial_y (Vw)] + \\ + \partial_\eta (\Omega w) - m_y^{-1} g (\alpha / \alpha_d) [\partial_\eta p' - \bar{\mu}_d (q_v + q_c + q_r)] + m_y^{-1} \mu'_d g = F_W \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\partial_t \mu'_d + m_x m_y (\partial_x U + \partial_y V) + m_y \partial_\eta \Omega = 0 \quad (2.33)$$

$$\partial_t \phi' + \mu_d^{-1} [m_x m_y (U \partial_x \phi + V \partial_y \phi) + m_y \Omega \partial_\eta \phi - m_y g W] = 0 \quad (2.34)$$

Dvě zbývající rovnice zůstaly nezměněny:

$$\partial_t \Theta + m_x m_y [\partial_x (U\theta) + \partial_y (V\theta)] + m_y \partial_\eta (\Omega\theta) = F_\Theta \quad (2.35)$$

$$\partial_t Q_m + m_x m_y [\partial_x (Uq_m) + \partial_y (Vq_m)] + m_y \partial_\eta (\Omega q_m) = F_{Q_m} \quad (2.36)$$

3. Počítačová realizace modelu WRF

Rovnice uvedené v minulé kapitole jsou pomocí programů modelu numericky řešeny, pro konkrétní řešení je ovšem třeba znát počáteční a okrajové podmínky úlohy a také provést prostorovou a časovou diskretizaci – přepočítání hodnot spojitého pole do navržené horizontální a vertikální výpočetní sítě. Následují prostředky numerické matematiky, které jsou ovšem mimo rozsah této práce. O použitých metodách numerické matematiky se lze dočíst opět v technickém popisu modelu [3], z tohoto zdroje čerpá také následující kapitola. Další kapitoly pak popisují počítačovou realizaci modelu z uživatelského hlediska, od instalace po zobrazování výsledků.

3. 1. Vstupní data

Pro vlastní běh modelu ARW jsou důležitá vstupní data, z nichž se vytvářejí počáteční podmínky úlohy, bez kterých by se model neobešel. Model ARW je schopen pracovat s předpřipravenými počátečními podmínkami pro idealizované simulace nebo pro simulace založené na reálných datech, v tomto případě musí být interpolována data z jiných předpovědních modelů nebo naměřená data. Pro přípravu dat (preprocessing) se obvykle používá externí program WRF Preprocessing System (WPS), který přepočítává data do formátu přijatelného pro ARW. Tato data musí být dodána ve stejném horizontálním a vertikálním rozvržení bodů výpočetní sítě, pole hodnot veličin musí být rozdělena na referenční hladiny a jejich perturbace, musí obsahovat informace o datu, fyzikálních vlastnostech povrchu a o projekci. Jako vstupní data pro model ARW je možné použít i výstupní data vypočtená při jiném běhu téhož modelu. Jedním z hlavních úkolů programu WFS je přepočítat hodnoty veličin z jiných modelových sítí do výpočetní sítě modelu ARW, který jako prostorovou diskretizaci používá již dříve zmíněné uspořádání C-sítě. Nejprve tedy něco o této prostorové diskretizaci.

Síť bodů je dána souřadným systémem (x, y, η) , resp. příslušnými indexy (i, j, k) . Poloha v modelovém prostoru je tedy dána souřadnicemi $(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta\eta)$, kde horizontální vzdálenosti mezi body sítě $\Delta x, \Delta y$ jsou konstanty dané nastavením, změny vzdáleností spojené s projekcí na sféru jsou započítány pomocí mapových faktorů m_x a m_y popsanych v minulé kapitole. Vertikální vzdálenost mezi body $\Delta\eta$ není vždy konstantní, záleží na volbě uživatele, ovšem platí vždy, že $\eta = 1$ na povrchu země a $\eta = 0$ na horní hranici, přičemž hodnota η od povrchu země monotónně klesá. V hlavních bodech sítě,

označovaných jako body s hmotou, nebo kde jsou indexy celočíselné, jsou definovány veličiny jako potenciální teplota θ , směšovací poměry q , tlak p a měrný objem α . Dvoudimenzionálně v hlavních bodech sítě je také definována veličina μ_d , popisující tíhu sloupce vzduchu nad jednotkovou plochou povrchu země. Složky rychlosti jsou definovány mezi těmito body v příslušných bodech jednotlivých rychlostí, např. body složky rychlosti u jsou mezi hlavními body ve směru osy x , tj. mají neceločíselný index i , podobně body složek rychlostí v resp. w mají neceločíselný index j , resp. k . V bodech rychlosti w je navíc definován geopotenciál Φ .

Nyní je třeba přejít od spojitých hodnot popisovaných veličin k diskrétním, definovaným pouze v bodech sítě, tím se změní také dynamické rovnice, ve kterých zmizí derivace a spojitě veličiny a objeví se dělení a veličiny s indexy. Při úpravě rovnic, ve kterých se objevují jak veličiny definované v hlavních bodech sítě, tak i v bodech rychlostí, je třeba interpolovat hodnoty z hlavní sítě do bodů, kde jsou definovány rychlosti a naopak. Například složky horizontálních rychlostí se upraví na

$$U = \frac{\mu_d u}{m_y} \rightarrow \frac{\bar{\mu}_d^x u}{\bar{m}_y^x}, \quad V = \frac{\mu_d v}{m_x} \rightarrow \frac{\bar{\mu}_d^y v}{\bar{m}_x^y}, \quad (3.1)$$

kde \bar{a}^x značí lineární interpolaci, v případě konstantních gridových vzdáleností Δx a Δy se jedná o vztah

$$\bar{a}^x_{i+1/2} = (a_i + a_{i+1})/2. \quad (3.2)$$

Pro případ nekonstantního $\Delta\eta$ se jedná o složitější vztah

$$\bar{a}^\eta_{k+1/2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\eta_k}{\Delta\eta_{k+1/2}} \cdot a_{k+1/2} + \frac{\Delta\eta_{k+1}}{\Delta\eta_{k+1/2}} \cdot a_k \right). \quad (3.3)$$

V rovnicích v minulém odstavci, již upravených, se objevují právě tyto operátory, a to v členech na pravé i levé straně. Místo prostorových a časových derivací ∂_x , ∂_y , ∂_η a ∂_t se pak objevují operátory δ_x , δ_y , δ_η a δ_t , které znamenají v podstatě numerickou derivaci a aplikované na veličinu a dávají

$$\delta_x a = \Delta x^{-1} (a_{i+1/2} - a_{i-1/2}), \quad (3.4)$$

podobně v ostatních směrech.

Nyní se ale vraťme k přípravě počátečních podmínek pro program ARW. Jak již bylo řečeno, za tímto účelem se používá zvláštní program WPS, jehož výstup je ještě upraven

programem *real.exe*, který je už součástí systému ARW a generuje počáteční a postranní okrajové podmínky. Program WFS si tedy nejprve definuje gridové body výpočetní sítě, včetně pozice na zemi, vzdálenosti mezi body a typ projekce. Následuje interpolování statických polí do předepsané domény – výpočetní oblasti, zároveň probíhá proces interpolování meteorologických dat do zadané domény, výsledkem je pak tří-dimenzionální obraz atmosféry ve vybraném horizontálním gridovém rozvržení a vybraných časových intervalech. Tento výstup v sobě zahrnuje tří-dimenzionální pole teploty, relativní vlhkosti a horizontální složky rychlosti. Jako dvou-dimenzionální statická pole jsou dodávány tyto veličiny: albedo, Coriolisovy parametry, výška terénu, typ povrchu, typ půdy, parametry vegetace, mapové faktory, průměrná roční teplota a zeměpisná šířka a délka. Jako dvou-dimenzionální časově závislé pole jsou pak dodávány tyto veličiny: tlak na zemském povrchu, tlak přepočtený na hladinu moře, teplota půdy a vlhkost půdy, teplota povrchu a hladiny moře, výška sněhové pokrývky a mořského ledu.

Jak již bylo řečeno v minulé kapitole, je z výpočetního hlediska výhodné dělit některé veličiny na součet jejich referenčních hladin, kolem kterých kolísají, a perturbací. Referenční hladiny jsou definovány průběhem terénu a těmito konstantami: referenční tlak na hladině moře – $p_0 = 10^5$ Pa, referenční teplota na hladině moře – $T_0 = (270-300)$ K, teplotní rozdíl mezi tlakovými hladinami p_0 a $p_0/e - A = 50$ K. Pomocí těchto parametrů pak lze definovat referenční tlak suchého vzduchu na povrchu země jako

$$p_{dhs} = p_0 \cdot \exp\left(\frac{T_0}{A} + \sqrt{\left(\frac{T_0}{A}\right)^2 - \frac{2\phi}{A \cdot R_d}}\right), \quad (3.5)$$

kde Φ je geopotenciál na povrchu země a R_d plynová konstanta suchého vzduchu. Referenční tlak suchého vzduchu je pak dán jako jeho hydrostatická složka a lze stanovit vztahem

$$p_{dh} = \bar{p}_d = \eta(p_{dhs} - p_{dht}) + p_{dht}. \quad (3.6)$$

Referenční teplota je pak dána vztahem

$$T = T_0 + A \cdot \ln \frac{\bar{p}_d}{p_0}, \quad (3.7)$$

a referenční potenciální teplota pak vztahem:

$$\bar{\theta}_d = \left(T_0 + A \cdot \ln \frac{\bar{p}_d}{p_0} \right) \left(\frac{p_0}{\bar{p}_d} \right)^{\frac{R_d}{c_p}}. \quad (3.8)$$

Dále jsou ještě definovány referenční hodnota pro měrný objem α_d

$$\bar{\alpha}_d = \frac{1}{\bar{\rho}_d} = \frac{R_d \bar{\theta}_d}{p_0} \left(\frac{\bar{p}_d}{p_0} \right)^{\frac{c_v}{c_p}}, \quad (3.9)$$

a veličiny μ_d :

$$\bar{\mu}_d = p_{dhs} - p_{dht}. \quad (3.10)$$

Referenční hodnota geopotenciálu je pak dáno rovnicí hydrostatické rovnováhy:

$$\delta_\eta \bar{\phi} = -\bar{\alpha}_d \bar{\mu}_d. \quad (3.11)$$

Při preprocessingu se tedy podle zadané topografie spočtou nejprve referenční hodnoty veličin podle výše uvedených vztahů, pak po načtení tří-dimenzionálních dat jsou tato data vertikálně interpolována, a potom z rozdílů od referenčních hodnot je možno počítat perturbace. Např. pro veličinu μ_d je její perturbace dána rozdílem

$$\mu'_d = \mu_d - \bar{\mu}_d. \quad (3.12)$$

Pomocí předešlých vztahů se lze dostat i k perturbacím ostatních veličin, perturbace geopotenciálu je opět dána rovnicí hydrostatické rovnováhy, ale nyní obsahující i perturbace veličin:

$$\delta_\eta \phi' = -(\mu_d \alpha'_d + \mu'_d \bar{\alpha}_d). \quad (3.13)$$

Postranní okrajové podmínky v základním rozvržení sítě jsou generovány programem *real.exe*, výstup z něj zahrnuje údaje o rychlostech, potenciální teplotě, vlhkosti a perturbaci geopotenciálu a množství vzduchu nad jednotkou povrchu. Tyto hodnoty jsou vyčísleny jen v určitých časových okamžicích, pro vyčíslení hodnot v jiných časech se užívá členů vyjadřujících změnu těchto veličin v čase.

3. 2. Instalace a struktura modelu

O instalaci modelu se lze dozvědět na stránkách modelu WRF, konkrétně z WRF ARW on-line tutorialu [5], ze kterého z velké části čerpá i tato kapitola. Model WRF ARW zahrnuje dva inicializační programy (*ideal.exe* a *real.exe*), vlastní program numerické integrace (*wrf.exe*) a program na jednosměrné vnořování (*ndown.exe*). Jak už bylo řečeno, tento model podporuje různé možnosti použití, např. simulaci reálných či idealizovaných dat, různé boční okrajové podmínky, možnost hydrostatického a nehydrostatického modelování, jednosměrné či obousměrné vnořování s měněním centra oblasti modelování a různé aplikace na rozdílných vzdálenostech.

Po softwarové stránce model požaduje překladač jazyku Fortran 90 či 95 a překladač jazyku C, perl 5.04 nebo lepší a knihovny MPI či OpenMP. Model podporuje datové formáty netCDF, pnetCDF, Grib 1 a Grib 2. Pro spuštění simulace založené na reálných datech je navíc potřeba systém pro preproceing, resp. postproceing, a to WRF preprocessor system (WPS), resp. například ARWpost.

Pro modelování reálných dat je potřeba stáhnout nejlépe poslední verze modelů WRF ARW a WPS. Toto stažení je možné na stránkách modelu WRF po registraci bezplatně. Tyto stažené soubory ve formátu *tar* se umístí do adresáře *WRF* a rozbolí sérií příkazů, které v operačním systému Linux vypadají takto:

```
gunzip WRFV3.TAR.gz
tar -xf WRFV3.TAR
gunzip WPS.TAR.gz
tar -xf WPS.TAR
```

Tyto příkazy vytvoří adresáře *WRFV3* a *WPS* a příslušné soubory do nich rozbolí. Nyní je potřeba rozbalené programy konfigurovat a překládat. Je nutné přeložit nejprve programy ve *WRFV3* a potom až ve *WPS*, a to z důvodu sdílení společných procedur.

Adresář *WRFV3* obsahuje mnoho souborů a adresářů vztahujících se k programu, soubor *README* obsahuje uživatelské informace o nastavení a rozběhnutí modelu. Před konfigurováním modelu je nutné takové nastavení prostředí systému, které model vyžaduje, tedy *NETCDF*, což se nastavuje v Linuxu nejčastěji pomocí příkazu:

```
setenv NETCDF /usr/local/netcdf
```

Při konfiguraci pomocí skriptu *configure* je nabízeno mnoho možností ohledně kompilování, užití knihoven, rozmístění paměti, paralelizace nebo vnořování modelu. Je

potřeba vybrat odpovídající nastavení vzhledem k potřebám uživatele a vlastnostem počítače, resp. systému. Dále je potřeba pomocí skriptu *compile* přeložit zdrojový kód programů, zkontrolovat jeho úspěšnost pomocí souboru *compile.log*, při správném průběhu se objeví v adresáři *main* spustitelné soubory *real.exe* a *wrf.exe*, tyto soubory jsou pak dostupné i ze složky *run*, odkud bude spuštěn vlastní běh.

Po přeložení hlavního systému programů je již možné instalovat systém WPS. Ve složce *WPS* je opět množství souborů se zdrojovými kódy a skripty. Podobně jako v předchozím případě je potřeba mít nastavené prostředí *NETCDF*, při konfiguraci je potřeba vybrat správné možnosti, případně editovat soubor *configure.wps* a nastavit správný odkaz do složky *WRFV3*. Dále je potřeba opět pomocí skriptu *compile* přeložit zdrojové kódy, přitom se vytvoří spustitelné soubory *geogrid.exe*, *metgrid.exe*, *ungrib.exe* a další pomocné soubory, které se vytvoří v adresáři *util*.

Nyní je již možné postupně spouštění modelu, ještě je však nutné stáhnout vstupní data a správně nastavit domény. Tak se učiní před spuštěním jednotlivých programů systémů WPS a WRF ARW. Před spuštěním souboru *geogrid.exe* je potřeba stáhnout statická data o zemském povrchu, dále editovat soubor *namelist.wps*, tento soubor nabízí mnoho možností nastavení výpočtů, především ohledně hlavní a vnořených výpočetních oblastí – domén, nebo vzdálenostech mezi body výpočetní sítě a délky časového kroku. Pomocí souboru *namelist.wps* lze také nastavit typ mapové projekce s parametry a typ výstupních dat. Spuštěním souboru se vytvoří pro každou doménu zvláštní soubor ve tvaru *geo_em.dxx.nc*, kde *xx* označuje číslo domény. Úkolem tohoto programu je interpolovat různorodé data ohledně terénu, typech půdy, odrazivosti – albedu a dalších vlastnostech zemského povrchu do bodů výpočetní sítě.

Následuje program *ungrib.exe*, jehož účelem je rozbalit stažená meteorologická data a upravit je pro program *metgrid.exe* do přijatelného formátu. V souboru *namelist.wps* lze nastavit časové údaje vztahující se k datům. Před spuštěním je tedy nutné stáhnout časově odpovídající meteorologická data, editovat *namelist.wps*. Po spuštění *ungrib.exe* vzniknou soubory patřící jednotlivým časovým krokům. Tato data tvoří okrajové podmínky při běhu programu a je potřeba je mít pro celou dobu běhu programu.

Posledním programem v posloupnosti systému WPS je program *metgrid.exe*, který horizontálně interpoluje meteorologická data na zadané domény. Pro jeho spuštění je nutné editovat *namelist.wps* v části „share“ a „metgrid“, a je také nutné dřívější proběhnutí programů *geogrid.exe* a *ungrib.exe*, neboť jejich výstupy tvoří vstup pro program

metgrid.exe. Po spuštění vznikají soubory pro jednotlivé domény a časové kroky, ty již slouží jako vstupní soubory pro programy systému WRF ARW.

Systém WRF ARW se skládá ze dvou programů, a to *real.exe*, který vertikálně interpoluje data vytvořená programem *metgrid.exe* a tvoří počáteční a okrajové podmínky, a *wrf.exe*, který tvoří vlastní předpověď. Pro spuštění je potřeba zkopírovat soubory vytvořené programem *metgrid.exe* do složky, kde jsou umístěny tyto spustitelné soubory, dále pak editovat soubor *namelist.input*, přičemž nastavení domén a časových údajů musí být shodné s nastavením v souboru *namelist.wps*. Pomocí souboru *namelist.input* lze dále nastavit mnoho parametrů týkajících se fyzikálních schémat či jiných konstant, nebo například hydrostaticčnost či nehydrostaticčnost modelu. Podrobnější popis těchto parametrů lze dohledat na stránkách modelu WRF (<http://wrf-model.org>). Pak už stačí jen spustit postupně programy *real.exe* a *wrf.exe*, přitom se pro každou zadanou doménu vytvoří výsledný soubor ve tvaru *wrf_out_(počáteční čas)*.

Při opakovaném spuštění je při změně vstupních meteorologických dat potřeba opakovat posloupnost procesů, kromě stažení nových meteorologických dat vztahujících se k jinému datu je však nutné také reeditovat soubory *namelist.wps* a *namelist.input*, není ale potřeba spouštět program *geogrid.exe*. Naopak, při spuštění po změnách v nastavení domén není nutné spouštět program *ungrib.exe*.

3. 3. Výstupní data, postprocessing

Koncové soubory vzniklé při průběhu programu *wrf.exe* jsou ve formátu *netCDF*, což nemusí být pro některé zobrazovací systémy přijatelné. Další nevýhodou je, že v těchto souborech jsou data pouze o proměnných, se kterými model přímo počítá, ty se ale nemusí shodovat s těmi, jež chceme zobrazovat jako výsledky. Z těchto důvodů je dobré použít některý z podporovaných programů, které jsou schopné zobrazit data ve formátu *netCDF* a tedy i výstupní data z modelu. V současné době jsou to programy NCL, RIP4, ARWpost (GrADS nebo Vis5d), VAPOR, IDV, jak je uvedeno v Bruyere, C. a kol. [6]. Dále se budu zabývat jen možností ARWpost (GrADS), která se od např. IDV liší tím, že zatímco IDV zobrazuje rovnou data ve formátu *netCDF*, program ARWpost vytváří nové datové soubory ve formátu *dat*, které lze již zobrazit systémem GrADS (Grid Analysis and Display System) a navíc ARWpost při převodu dat spočítá také hodnoty dalších veličin, které jsou potřebné k vlastnímu zobrazování výsledků.

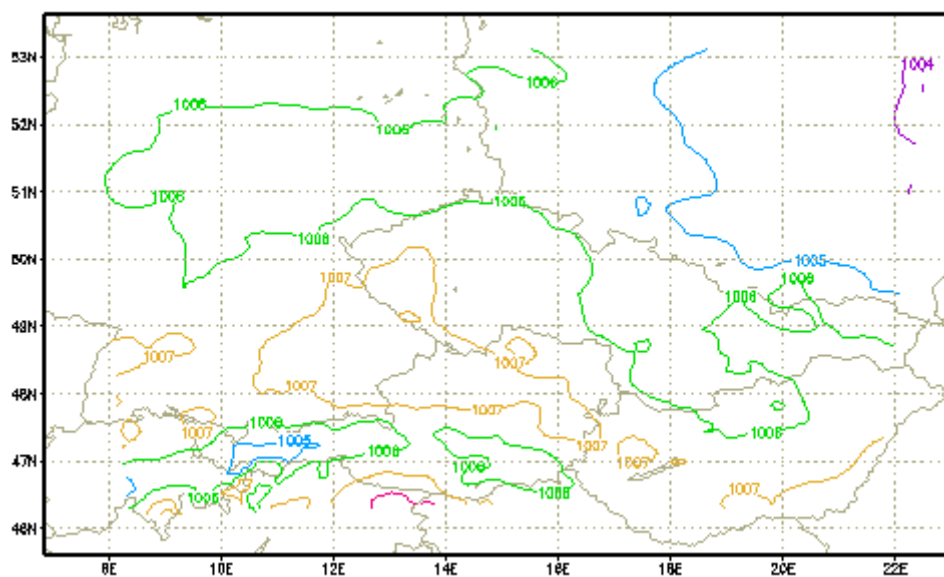
Jak již bylo řečeno, ARWpost je nástroj, který konvertuje data do formátu potřebného pro systémy GrADS či Vis5d, přičemž samotný ARWpost negeneruje žádnou grafiku, ta je produkována právě programy GrADS a Vis5d, které jsou volně stažitelné. ARWpost používá software WRF I/O API, který konvertuje data z formátů netCDF a GRIB 1. Jediným požadavkem je potom nástroj na zobrazování jím konvertovaných dat. Jeho další vlastností je, že konvertuje velké množství dat, dále může být zvolena vertikální interpolace na tlakové, výškové nebo modelem používané hladiny, v těchto hladinách je pak možno zobrazovat hodnoty tří-rozměrných veličin pomocí výše uvedených programů. ARWpost může také zpracovat data vystupující z programů *geogrid.exe* a *metgrid.exe*, nebo data z idealizovaných 3D, 2D či 1D simulací, jak uvádí Bruyere, C. a kol. [7].

Pro instalaci tohoto programu je nutné stáhnout soubor *ARWpost.TAR* a umístit jej do složky *WRF*. Pro jeho instalaci není nutná instalace systému GrADS. Rozběhnutí je ale potřeba na jednom z určitých typů kompilátorů a po předchozí instalaci programů ve složce *WRFV3*. Soubor *ARWpost.TAR* je tedy nutné rozbalit příkazy uvedenými v minulé kapitole, přitom vznikne adresář *ARWpost*, obsahující další soubory a skripty. Konfigurace programu se provede pomocí skriptu *configure*, přitom je potřeba vybrat správné volby nastavení podle potřeb uživatele. Při kompilování je nutné v souboru *configure.arwp* nastavit umístění programů systému WRF ARW, vlastní kompilace se spustí skriptem *compile*, který vytvoří spustitelný soubor *ARWpost.exe*, jak uvádí Bruyere, C. a kol. [7].

Pro spuštění postprocesingu je potřeba ještě editovat soubor *namelist.ARWpost*, což spočívá v nastavení časových údajů o modelu, nastavení názvu vstupního a výstupního souboru, nastavení formátu vstupních a výstupních dat, nastavení polí proměnných, které chceme dopočítat a nastavení vertikálních hladin. Možné volby nastavení jsou popsány v souboru *README*. Spuštění programu se pak provede pomocí příkazu *ARWpost.exe*, přitom vznikají soubory se zadaným jménem, v případě dat pro systém GrADS jsou to dva soubory, jeden s příponou *.dat*, obsahující vlastní data, a soubor s příponou *.ctl*, ve kterém jsou popsány názvy proměnných a další údaje o struktuře výsledků předchozího běhu modelu. Binární data ze souboru s příponou *.dat* jsou potom přímo zobrazovány systémem GrADS.

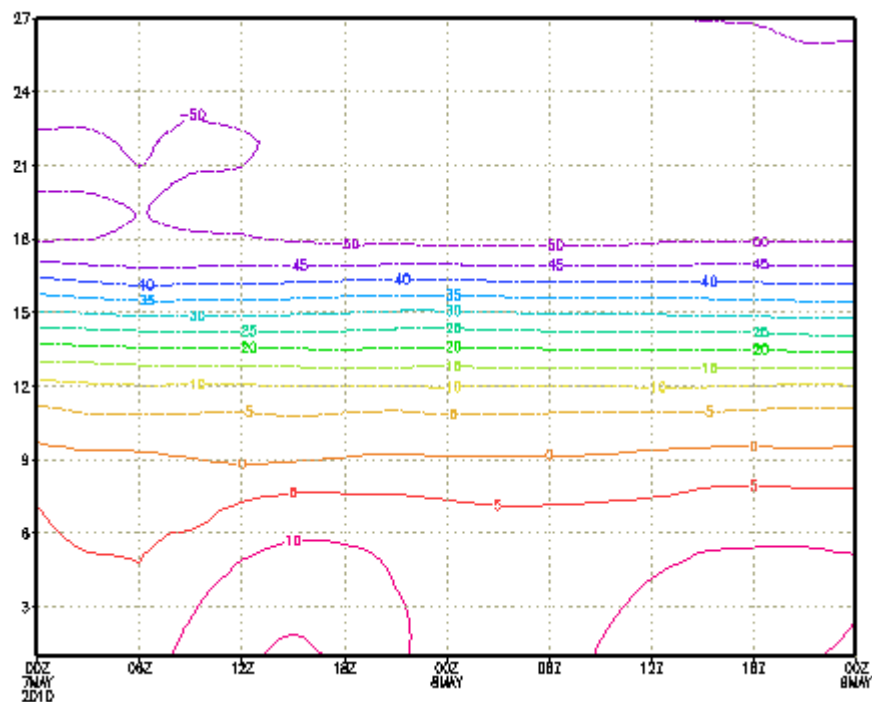
3. 4. Možnosti a způsoby zobrazování výsledků

Hodnoty meteorologických veličin obvykle závisí na třech prostorových souřadnicích a čase. Tyto veličiny jsou tedy funkcemi celkem 4 proměnných, při zobrazování na plochu lze však zobrazit hodnoty funkce maximálně dvěma proměnných. Dvě proměnné je nutné při zobrazení zafixovat, nejčastěji se tak děje pro časovou a vertikální souřadnici. (Obr. 3.1)



Obr. 3.1: Tlak na úrovni moře 7.5.2010 12:00 v závislosti na zeměpisné poloze

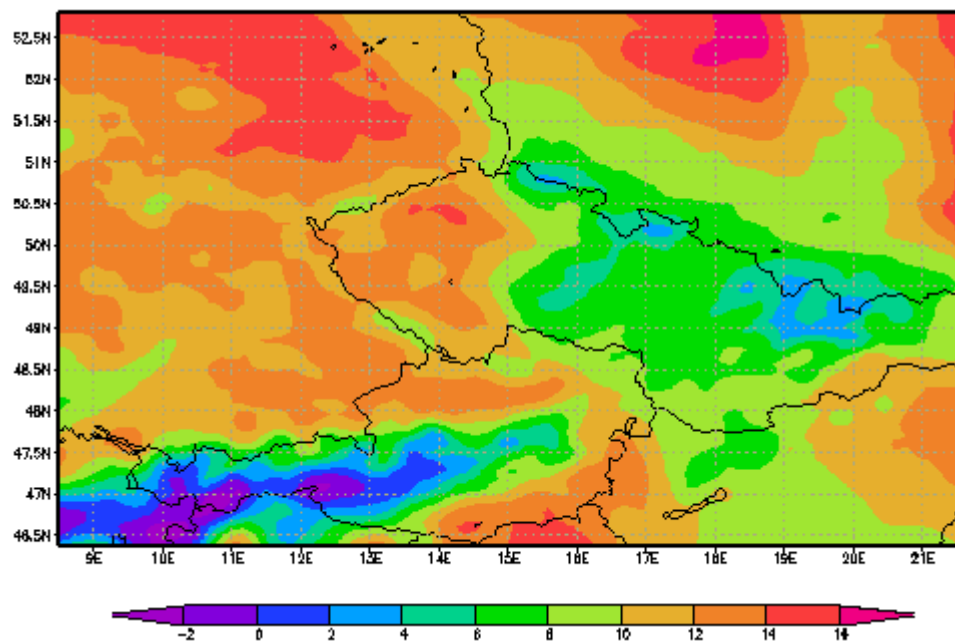
Ve výsledném grafu je pak zobrazená veličina funkcí dvou horizontálních prostorových proměnných za konstantního času a vertikální souřadnice. Časovou závislost je případně možné vyjádřit animací, tj. zobrazením série grafů v časové posloupnosti. Jsou však i jiné možnosti, například zobrazení vertikálního průběhu veličiny v čase nad určitým místem povrchu, tedy zafixování obou horizontálních souřadnic. (Obr. 3.2)



Obr. 3.2: Časový průběh vertikálního profilu teploty nad určitým místem povrchu (ve 27 vertikálních modelových hladinách)

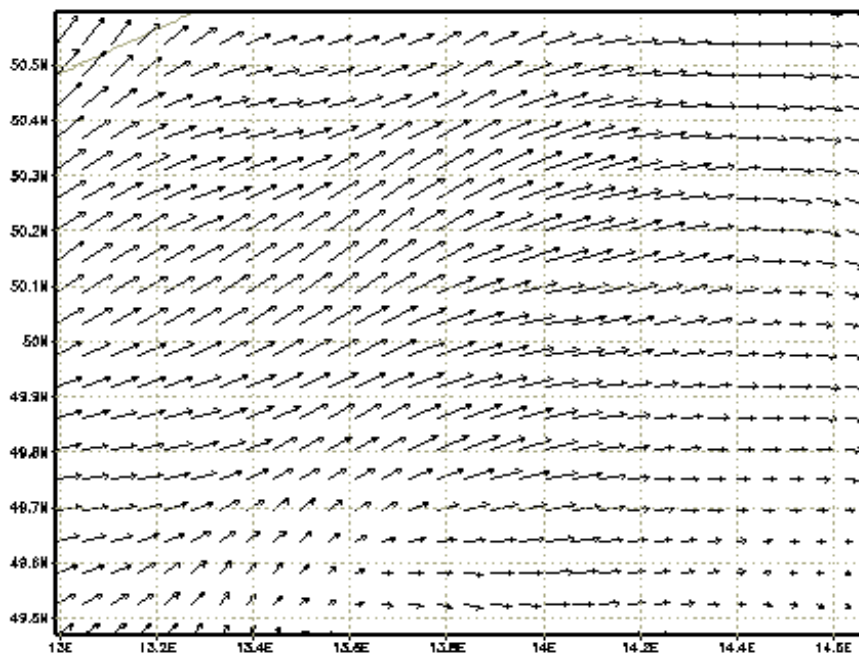
Jak ale zobrazit na plochu funkci dvou proměnných? V profesionální meteorologii je nejužívanější způsob pomocí izolinií, jak již bylo ukázáno na Obr. 3.1 a 3.2. Mezi další možnosti patří např. barevné škálování (Obr 3.3), pro vektorové veličiny pak pomocí vektorů (Obr 3.4) či větrných praporků v určitých bodech plochy nebo proudnic. Izolinie jsou křivky spojující oblasti se stejnou určitou hodnotou zobrazované veličiny a rozdělující prostor na oblast s vyšší a nižší hodnotou této veličiny. Pro izolinie lze užít barevné škálování vyjadřující hodnotu zobrazované veličiny. Názvy izolinií závisí na veličině, kterou zobrazují. Například izolinie popisující průběh tlaku se nazývají izobary, izolinie popisující průběh teploty izotermy, podobně pro měrnou vlhkost izogrammy a pro nadmořskou výšku izohypsy, jak uvádí Drobek, P. [8]. Zobrazení tlaku pomocí izobar je ilustrováno obrázkem 3.1.

Zobrazení pomocí barevného škálování je tvořeno tak, že je volena barevná škála s přiřazenými hodnotami zobrazované veličiny, přičemž zobrazovaná plocha se rozdělí na malé elementy s definovanou hodnotou této veličiny a jí příslušnou barvou. Ukázka tohoto způsobu zobrazení je na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Teplota (°C) ve 2 metrech nad povrchem 17.5.2010 ve 12:00 zobrazená pomocí barevného škálování

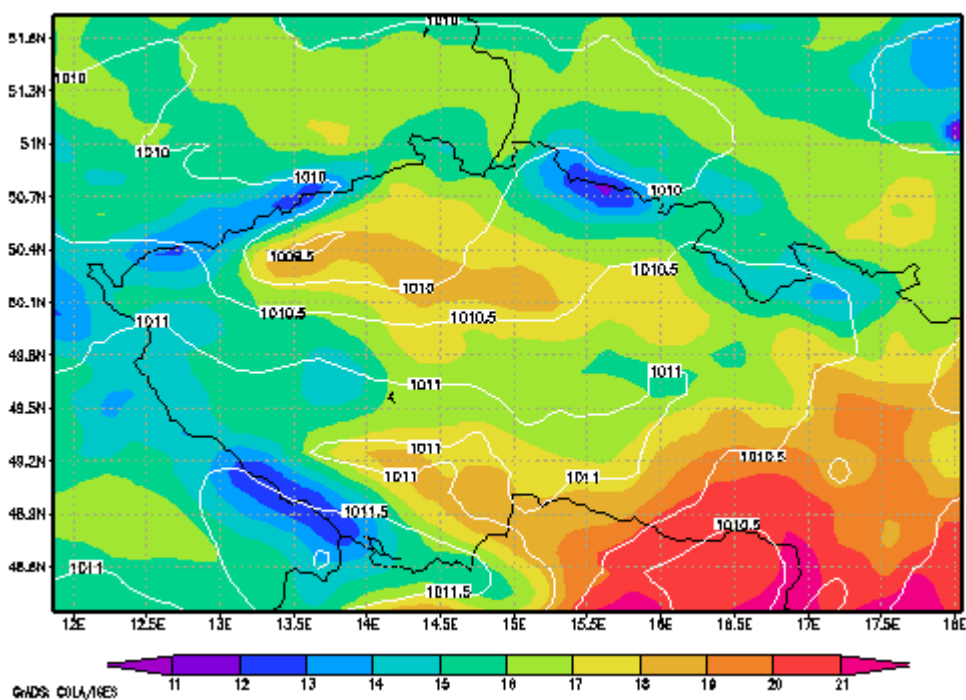
Zobrazení pomocí vektorů se tvoří podobným způsobem, opět je prostor rozdělen na malé čtverečky s definovanou hodnotou zobrazované vektorové veličiny, místo barvy se však umístí šipka vyjadřující velikost a směr této veličiny – obrázek 3.4:



Obr 3.4: Rychlosti a směr větru (v 10 m) pomocí vektorů, 7.5.2010 ve 12:00

Všechny tyto obrázky jsou vytvořeny systémem GrADS, který nejen představuje, ale i další způsoby zobrazování meteorologických dat umožňuje.

Pro účely další předpovědi se obvykle tvoří tzv. meteorologické mapy, což jsou horizontální řezy atmosférou v tlakových hladinách mezinárodně smluvených, tzv. standardních, pro hodnoty tlaku, které jsou, jak uvádí Drobek, P. [8], 1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPa. V těchto hladinách se udává obvykle teplota, teplota rosného bodu, horizontální a vertikální rychlost větru, geopotenciální výška a další parametry. Na zvláštní mapy se pak vyobrazují hodnoty veličin týkající se zemského povrchu, a to teplota vzduchu ve 2 metrech, teplota povrchu, rychlost a směr větru v 10 metrech, tlak přepočtený na hladinu moře, úhrny srážek za určité časové období a další prvky. Možné jsou i různé kombinace zobrazovaných veličin, tedy zobrazení dvou či více veličin do jedné mapy. Na obrázku 3.5 je vykreslen tlak na úrovni moře spolu s teplotou ve 2 metrech nad povrchem pro území ČR.

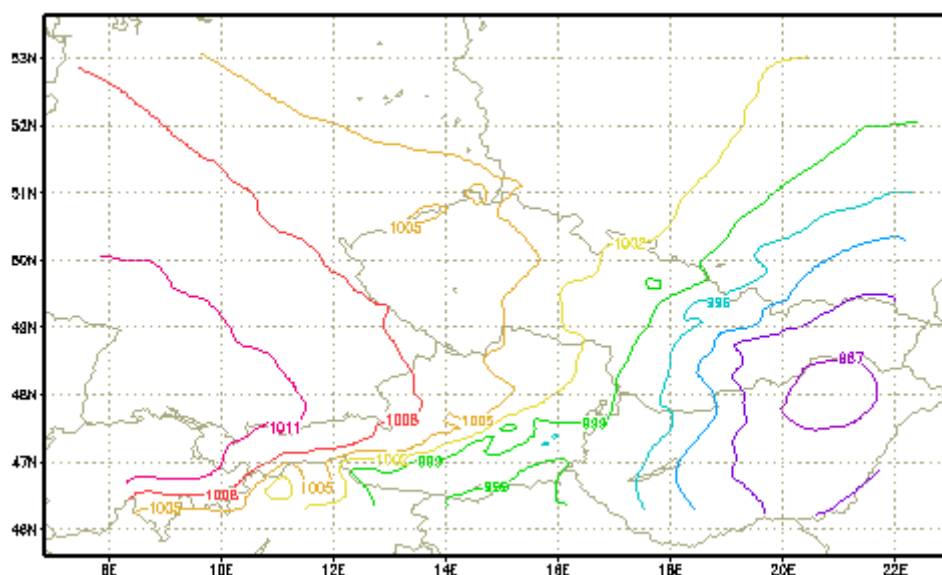


Obr. 3.5: Teplota ve 2 metrech nad povrchem (barevné škálování) spolu s tlakem na úrovni moře (izobary) 7.5.2010 ve 12:00

4. Ukázky implementace modelu

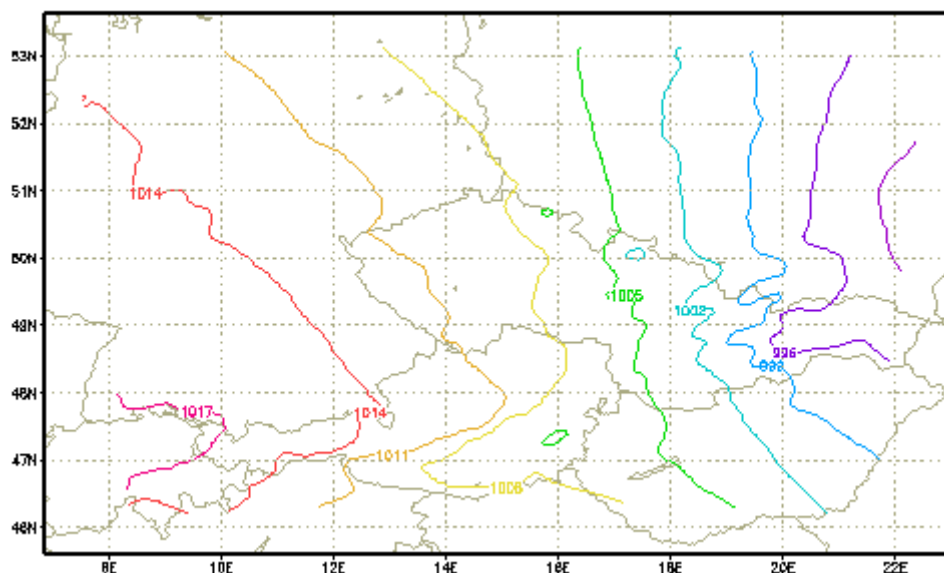
V této kapitole budou znázorněny a popsány některé výsledky modelu WRF, zobrazené pomocí systému GrADS. Jelikož se v závěru psaní této práce, kdy naše implementace modelu WRF byla již zcela funkční, vyskytla meteorologicky zajímavá epizoda s jedním z nebezpečných meteorologických jevů, a sice extrémními srážkami a následnými povodněmi ve východní části území České republiky, budou zobrazené výsledky popisovat hodnoty meteorologických prvků v čase největšího rozvoje těchto srážek, tedy ve dnech 16. a 17. května 2010.

Začněme nejprve zobrazením předpověděných tlakových polí z 15.5. 0 hodin UTC pro 16.5. 0 hodin UTC a 17.5. 0 hodin UTC na úrovni hladiny moře. (Pro získání našeho letního času je potřeba ke světovému času UTC přičíst 2 hodiny.)



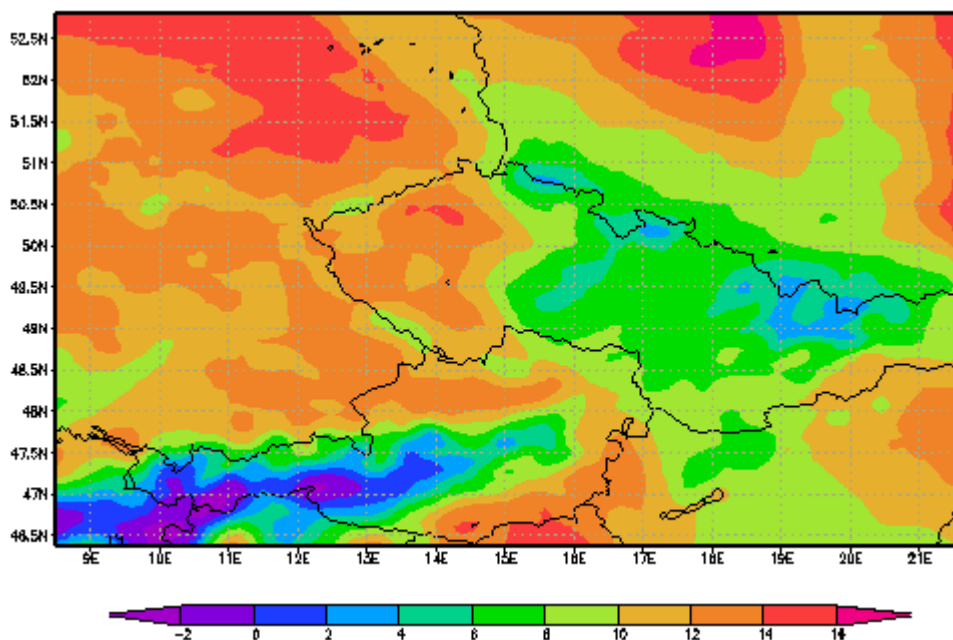
Obr. 4.1: Pole tlaku na úrovni moře pro 16.5.2010 0 hodin UTC

V pravé spodní části na Obr. 4.1 je vidět část tlakové níže, která počasí v tuto dobu ovlivňovala. Při předpovědi pro o 24 hodin pozdější čas (Obr. 4.2) je tlaková níže pravděpodobně mimo území zobrazené na obrázku.



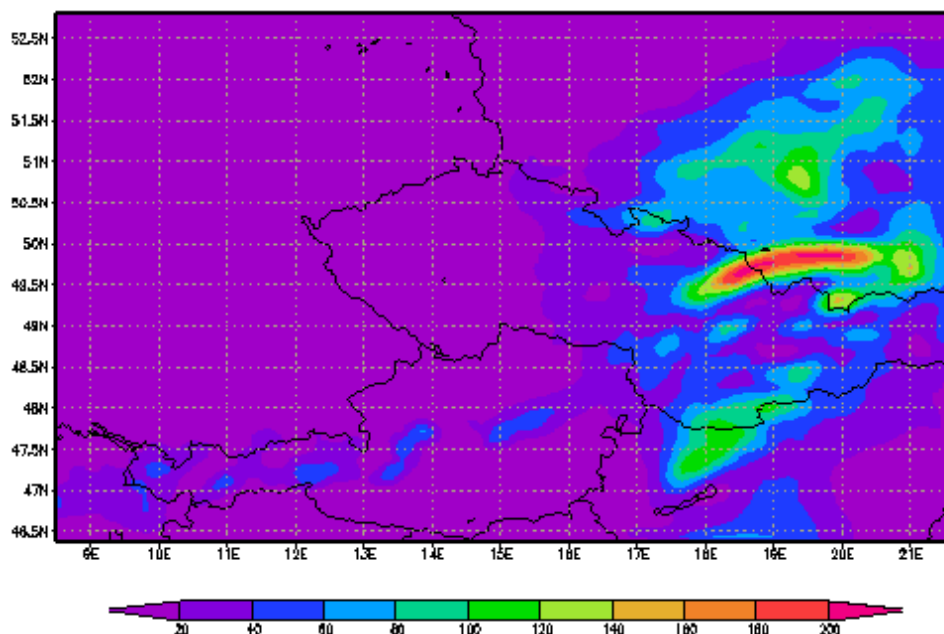
Obr. 4.2: Pole tlaku na úrovni moře pro 17.5.2010 0 hodin UTC

Na obrázku 4.3 je zobrazeno předpokládané pole teploty pro pondělí 17.5.2010 12 hodin UTC pomocí předpovědi z 16.5. 0 hodin. Je zde vidět, že teploty v oblastech extrémních srážek (východ ČR) jsou nízké s přihlédnutím k tomu, že jde o polovinu května a 14 hodin odpoledne našeho času, tedy dobu blízkou výskytu maxim denních teplot.



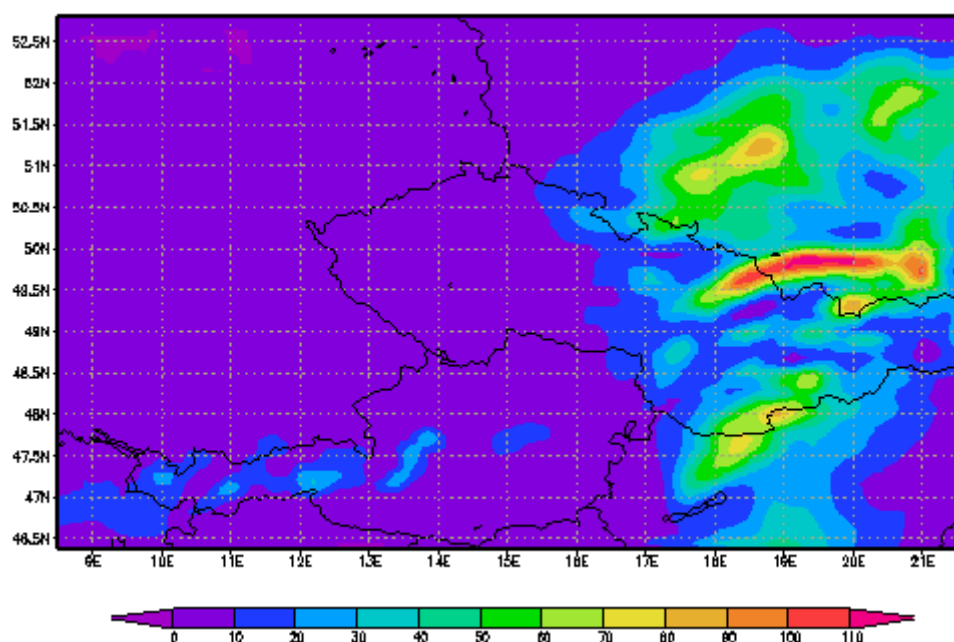
Obr. 4.3: Pole teploty ve 2 metrech pro 17.5.2010 12hod. UTC (ze 16.5. 0 h.)

Ze srážkových úhrnů se věnujme nejprve celkovému srážkovému úhrnu za 2 dny s největšími srážkami, a to 16.5. a 17.5., pomocí předpovědi z 16.5. 0 hodin UTC.



Obr. 4.4: Předpokládaný celkový srážkový úhrn pro dny 16.5. a 17.5.2010

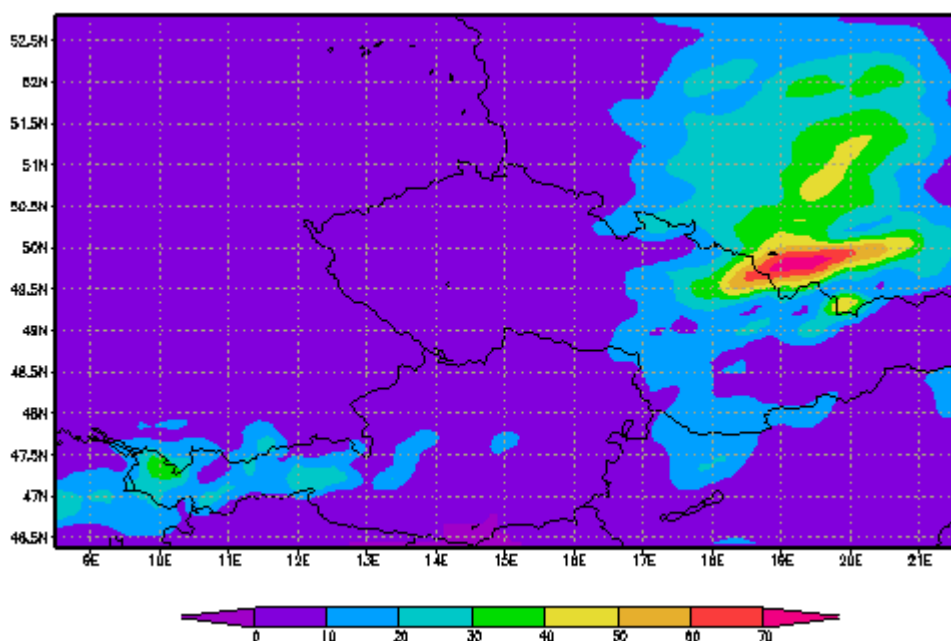
Na obrázku 4.4 je zřetelné, že srážkový úhrn v nejvíce postižených místech, tedy v Beskydech a jižním Polsku, měl překročit 200 mm. Dále se podíváme na úhrn srážek vycházejících ze stejné předpovědi pro období od neděle 16.5. 6 hodin UTC do pondělí 17.5. 6 hodin UTC, pro které jsou k dispozici ke srovnání naměřená data.



Obr. 4.5: Předpokládaný srážkový úhrn za 24 hodin do 17.5. 6 hod. UTC

Dle předpovědi srážkové úhrny za toto období měly činit v Beskydech okolo 100 – 110 mm. Naměřená data ve stejných dnech a v rozmezí od 7 do 7 hodin našeho času (od 5 do 5 hodin UTC) nám říkají, že celkové úhrny srážek dosáhly lokálně mnohem vyšších hodnot: Třinec 180 mm, Čeladná 179 mm, Lysá hora 150 mm, Morávka 136 mm, Ondřejník 129 mm, Šance přehrada 120 mm, Český Těšín 118 mm, Kozlovice 117 mm, jak uvádějí aktuální zprávy na stránkách Českého hydrometeorologického ústavu [9]. (Dále ČHMÚ)

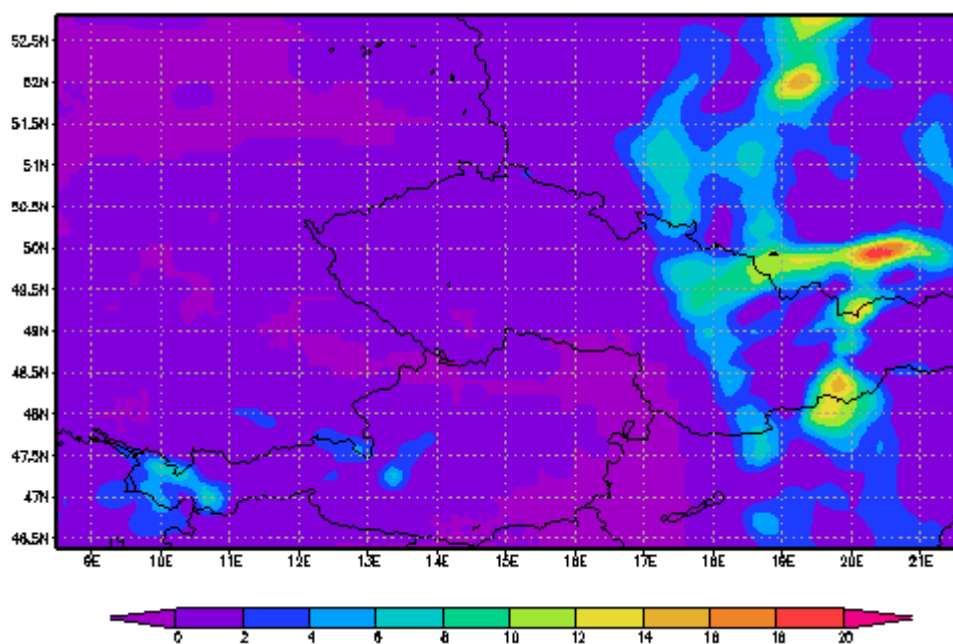
Následující obrázek uvádí identickou situaci o den později, tedy srážky od pondělního (17.5.) do úterního (18.5.) rána 6 hodin UTC, pomocí předpovědi ze 17.5. 0 hodin.



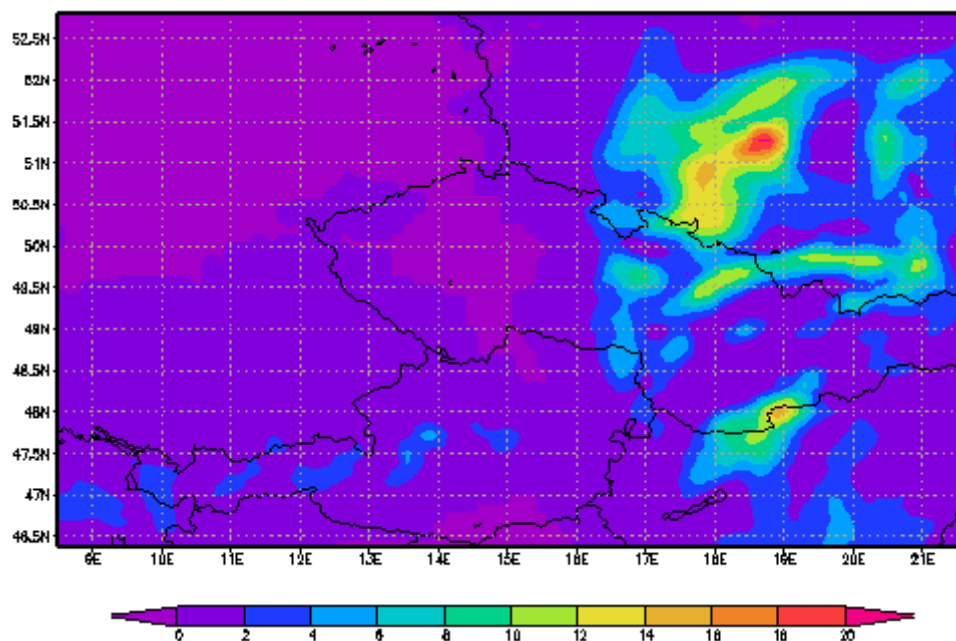
Obr. 4.6: Předpokládaný srážkový úhrn za 24 hodin do 18.5. 6 hod. UTC

Srážkové úhrny se měly v Beskydech pohybovat nejvýše mezi 60 a 70 mm, avšak opět ve stejném období byla naměřeny srážky i přes 100 mm, konkrétně v těchto místech: Morávka 115 mm, Třinec 103 mm, Lysá hora a Krásná – Visalaje 100 mm. V obou případech tedy srážkové úhrny dosáhly lokálně vyšších hodnot, než předpovídal model. Tento fakt může být způsoben malým horizontálním rozlišením modelu (12,5 km), kdy model potom počítá spíše průměrné srážky nad danými územími.

Nyní ještě zkusme porovnat vývoj předpověděných úhrnů srážek pro neděli 16.5. mezi 21 a 24 hodinami UTC, a to podle předpovědi z 15.5. a 16.5., v obou případech z 0 hodin UTC.

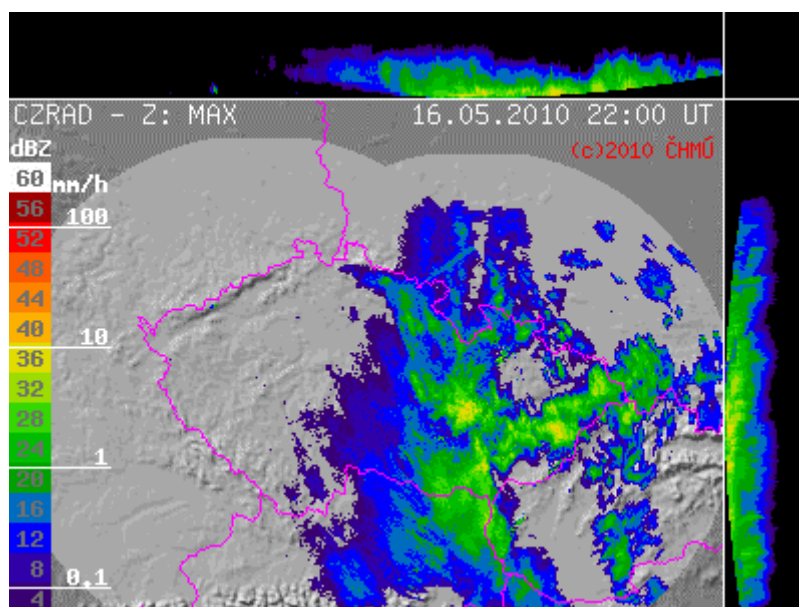


Obr. 4.7: Předpověď srážek na 16.5. mezi 21 a 24 hod. z 15.5. 0 hod. UTC

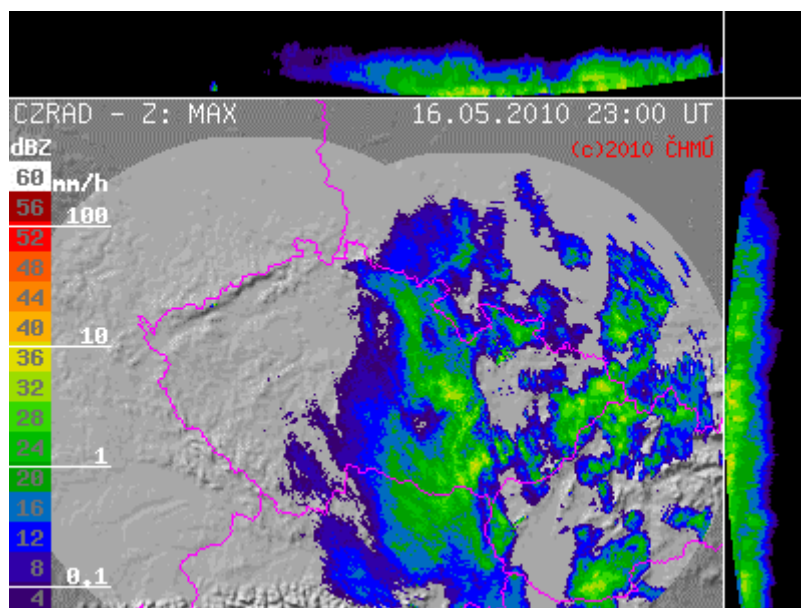


Obr. 4.8: Předpověď srážek na 16.5. mezi 21 a 24 hod. z 16.5. 0 hod. UTC

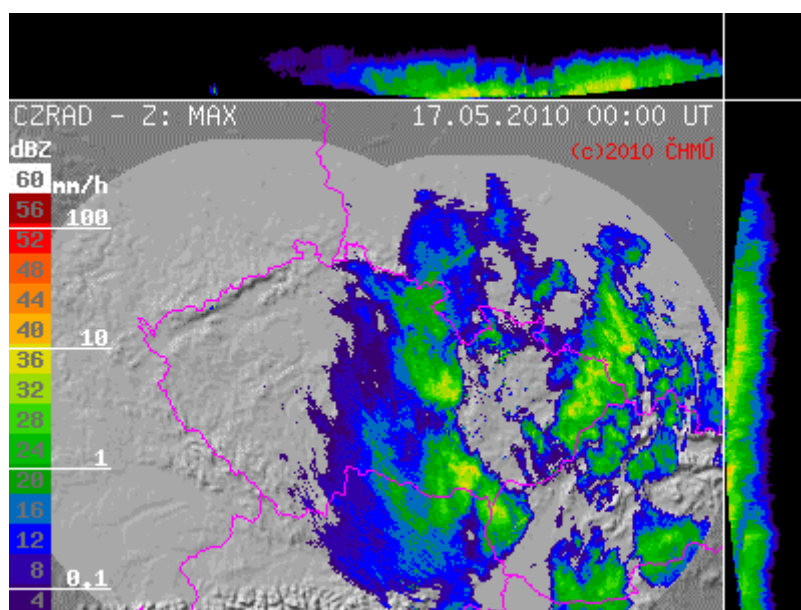
Jak je vidět z obrázků 4.7 a 4.8, vývoj předpovědi srážkových úhrnů je značný, vyvíjejí se množství srážek i oblasti, kde srážky vypadávají, pro východní část našeho území by to znamenalo více srážek. Tento vývoj může být částečně způsoben měnícím se časem příchodu srážek. Jak nakonec vypadaly srážky ve skutečnosti, můžeme usuzovat z radarových měření, které zobrazují přibližné intenzity srážek, zobrazených na obrázcích 4.9, 4.10 a 4.11, přejatých z aktuálních radarových dat na stránkách ČHMÚ [10]. Z těchto obrázků je vidět, že srážky o vysoké intenzitě nebyly pouze v Beskydech, ale na rozdíl od těchto hor v jiných částech ČR zřejmě nebyly srážky tak trvalé a vypadávající na stejná místa. Radarové snímky, které jsou běžně k dispozici, nám dávají údaje v jednom okamžiku, nikoliv úhrny srážek za několik hodin. Zřejmě ale poloha srážkového maxima v oblasti Beskyd na předpovědi z 16.5. je lépe vystižena, alespoň podle dostupných radarových údajů, než na starší předpovědi z 15.5.



Obr. 4.9: Intenzita srážek 16.5. ve 22 hodin UTC (ČHMÚ [9])

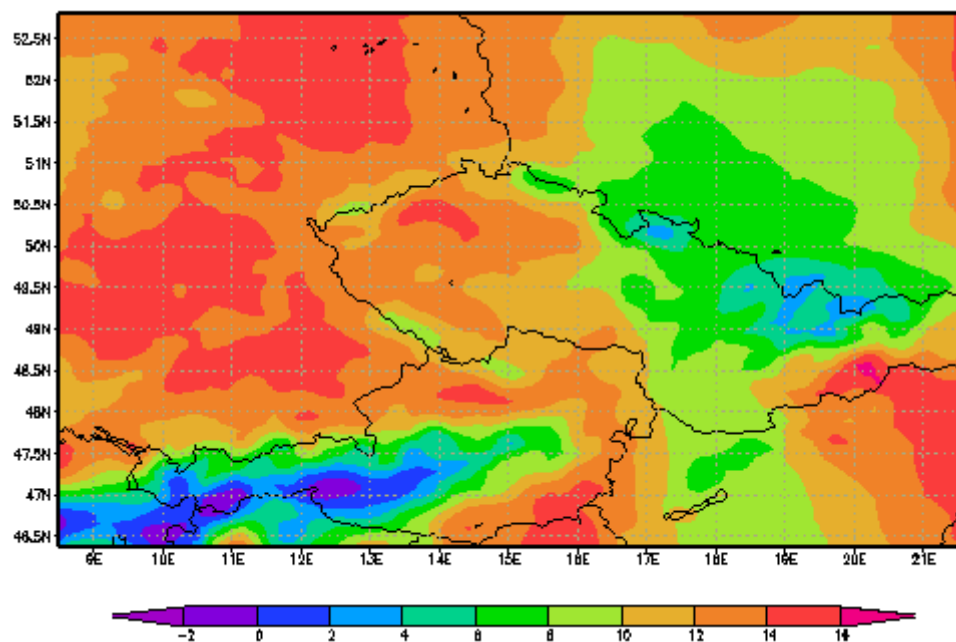


Obr. 4.10: Intenzita srážek 16.5. ve 23 hodin UTC (ČHMÚ [9])



Obr. 4.11: Intenzita srážek 17.5. ve 0 hodin UTC (ČHMÚ [9])

Zatímco vývoj předpovědi srážek, jak ukazují Obr. 4.7 a 4.8, je značný, tak naopak u předpovědi teplot se nijak velký vývoj v následujícím příkladu nekoná. Dříve uvedený Obr. 4.3 zobrazuje pole teplot pro 17.5. 12 hodin UTC pomocí předpovědi z 16.5. 0 hodin UTC, pro srovnání následující obrázek zobrazuje pole teplot pro stejný čas, avšak podle předpovědi ze 17.5. 0 hodin:



Obr. 4.12: Pole teploty ve 2 metrech pro 17.5.2010 12hod. UTC (ze 17.5. 0 h.)

Na závěr by bylo dobré uvést, že jakákoli hodnocení přesnosti předpovědi či jejího vývoje jsou mimo rozsah této práce, uvedené ukázky posloužily v první řadě k prezentaci znázornění výsledků modelu WRF. Všechny tyto ukázky se týkají situace kolem 16. a 17.5.2010, tedy v době největšího rozvoje srážek při povodních, které postihly východní část našeho území v květnu 2010. K porovnání jsou uvedena i některá naměřená data, hodnocení přesnosti předpovědi může být námětem k diskusi.

Závěr

V první kapitole této práce se pojednává obecně o numerických předpovědních modelech, je zde popsán jejich význam pro předpovídání počasí v dnešní době. Také je rozebrán základní princip všech numerických předpovědních modelů a vysvětlena jejich omezená přesnost, která je principiálně neodstranitelná. Jelikož data vzešlá z výpočtu modelu jsou obvykle prezentována v grafické podobě, je nedílnou součástí počítačové realizace i toto grafické zobrazování výsledků.

V další části práce se již přechází ke konkrétnímu modelu, a to modelu WRF, je rozebrána jeho struktura, používané proměnné a popsána je zde modelem užitá vertikální souřadnice. Dále jsou v této kapitole rozepsány a komentovány dynamické rovnice, které verze ARW modelu WRF používá při svých výpočtech. Tyto rovnice jsou uvedeny nejprve v základním stavu s proměnnými užívanými modelem, potom také v upraveném tvaru zahrnujícím vlhkost vzduchu, sférickost země a další prvky.

Následující kapitola je věnována počítačové realizaci modelu WRF. Je zde popsána prostorová diskretizace, příprava počátečních a okrajových podmínek, které jsou nutné pro jednoznačné řešení úlohy. Tato úloha spočívá v numerickém řešení soustavy diferenciálních rovnic popsaných v minulé kapitole, ovšem rozbor použitých metod numerické matematiky je mimo rozsah této práce. Dále je v této kapitole popsána instalace modelu, popsány funkce jednotlivých programů modelu a jejich spouštění. Nakonec jsou v této části rozepsány možnosti zobrazování výsledků modelu, a to jak v obecné rovině, tak i v rovině grafických programů. Z možných grafických programů je více rozebírán systém GrADS. Tento program vyžaduje postprocessing, tedy úpravu výsledných dat, o němž se v této části také pojednává.

V poslední kapitole jsou pak prezentovány některé výsledky modelu WRF zobrazené pomocí systému GrADS. Všechny zobrazené grafy v poslední kapitole se týkají povětrnostní situace, která byla v průběhů extrémních srážek a povodní v květnu 2010 ve východní části našeho území. Vyobrazené grafy se týkají především polí srážkových úhrnů, některé předpovědi jsou srovnávány s naměřenými daty. Naše implementace systému WRF je plně funkční a výsledky prezentované situace ukazují, že by mohla poskytovat realistické výstupy.

Seznam použité literatury

- [1] Šopko, F. a kol. (2002): Hodnocení výsledků numerických modelů pro předpovědi srážek
<http://www.chmi.cz/hydro/pov02/1etapa/3kapitola.pdf>, poslední přístup 12.5.2010
- [2] Janoušek, M. (2004): O numerické předpovědi počasí
<http://www.chmi.cz/meteo/ov/aladin/aboutnwp/index.php>, poslední přístup 12.5.2010
- [3] Skamarock, W. C. a kol. (2008): A Description of the Advanced Research WRF, Version 3
http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf, poslední přístup 22.4.2010
- [4] Laprise, R., 1992: The Euler equation of motion with hydrostatic pressure as independent coordinate. *Mon. Wea. Rev.*, 120 (1), 197-207.
- [5] Dudhia, J. a kol. (2008): WRF ARW OnLine Tutorial
<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/index.htm>, poslední přístup 15.4.2010
- [6] Bruyere, C. a kol. (2009): WRF model graphic tools
<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/graphics/WRF-post-processing.htm>, poslední přístup 12.5.2010
- [7] Bruyere, C. a kol. (2008): WRF model graphic tools: ARWpost
<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/graphics/ARWpost/ARWpost.htm>, poslední přístup 12.5.2010
- [8] Drobek, P. (2002): Současné metody interpretace numerických předpovědních modelů, diplomová práce
- [9] Aktuální zprávy na stránkách ČHMÚ
http://pocasi.chmi.cz/cgi-bin/zpravy_vu.scp?ARCHIV=aktual&Tlacitko=METEOROLOGICKEZPRAVY, poslední přístup 19.5.2010
- [10] Aktuální radarová data na stránkách ČHMÚ
http://www.chmi.cz/meteo/rad/rad_data.php, poslední přístup 18.5.2010