



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Zuzana Peřtová

Modelování turbulence modelem WRF

Katedra fyziky atmosféry

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Michal Belda, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2017

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Ráda bych poděkovala Mgr. Michalu Beldovi, Ph.D. za zajímavé téma a za velikou ochotu a trpělivost při vedení této bakalářské práce.
Dále bych chtěla poděkovat rodičům a svému příteli za vytrvalou podporu během mého studia.

Název práce: Modelování turbulence modelem WRF

Autor: Zuzana Peštová

Katedra: Katedra fyziky atmosféry

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Michal Belda, Ph.D., Katedra fyziky atmosféry

Abstrakt: Tato práce se zabývá srovnáním výsledků simulací z modelu WRF za použití metody simulace velkých vírů (LES) a fyzikálních parametrizací v nižším rozlišení. První část je věnována turbulentnímu proudění a ve stručnosti Navier-Stokesovým rovnicím. Obsahuje též základní informace o metodách, kterými můžeme turbulentní proudění modelovat. Těmito metodami jsou DNS, RANS a LES. V další části jsou představeny atmosférické numerické modely a podrobněji je rozebrán model WRF, včetně popisu jeho spuštění. Hlavní část práce se zabývá popisem provedených simulací a porovnáním výsledků. Získané výsledky jsou srovnány nejprve s reálnými daty a poté pro jednotlivé simulace lišící se parametrizacemi.

Klíčová slova: model WRF, turbulence, simulace velkých vírů

Title: Turbulence modeling with WRF model

Author: Zuzana Peštová

Department: Department of Atmospheric Physics

Supervisor: Mgr. Michal Belda, Ph.D., Department of Atmospheric Physics

Abstract: This bachelor's thesis deals with the comparison of WRF simulation results using the Large Eddy Simulation (LES) and physical parametrization at lower resolution. The first part is dedicated to the turbulent flow and Navier-Stokes equations. This part also contains basic information on the methods by which we can model the turbulent flow. These methods are DNS, RANS and LES. In the next part, atmospheric numerical models are presented and the WRF model is described in more detail, including a description of its execution. The main part of the thesis deals with the description of the performed simulations and the comparison of the results. The results obtained are compared first with real data and then for individual simulations with different parameterizations.

Keywords: WRF model, turbulence, large-eddy simulation

Obsah

Seznam použitých zkratk	2
Úvod	3
1 Turbulentní proudění	4
1.1 Modelování turbulencí	5
1.2 Mezní vrstva	6
2 Numerické modely	7
2.1 Obecné informace	7
2.2 Model WRF	10
2.2.1 Stavba modelu a jeho spuštění	11
3 Experimentální nastavení	14
4 Výsledky	19
4.1 Srovnání s reálnými daty	19
4.1.1 Tlak na hladině moře	19
4.1.2 Průměrná denní teplota	19
4.1.3 Výškový průběh teploty a potenciální teploty	22
4.2 Výsledky simulací	25
4.2.1 Teplota ve 2 metrech	25
4.2.2 Potenciální teplota	30
4.2.3 Vítr	34
Závěr	40
Seznam použité literatury	42
Seznam obrázků	43
Seznam tabulek	44
Přílohy	45

Seznam použitých zkratek

ARW – Advanced Research WRF

CDO – Climate Data Operators

DNS – Direct Numerical Simulation

eMS – Elektronický meteorologický slovník

GFS – Global Forecast System

GrADS – Grid Analysis and Display System

LES – Large Eddy Simulation

MPI – Message Passing Interface

NCAR – National Center for Atmospheric Research

NMM – Nonhydrostatic Mesoscale Model

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes

WPS – WRF Preprocessing System

WRF – The Weather Research and Forecasting

OpenMP – Open Multi-Processing

Úvod

Díky relativně nedávnému rozvoji výpočetní techniky došlo, mimo jiné, i k rozvoji numerického modelování. Numerické modely obecně jsou založeny na řešení rovnic, které popisují modelovaný problém a ve fyzice atmosféry díky nim můžeme studovat vývoj atmosféry a atmosférické procesy. Jsme schopni například předpovídat počasí, studovat klimatické změny a jejich budoucí vývoj nebo modelovat procesy menšího měřítka.

S neustálým vývojem modelů narůstají jejich možnosti a význam - například v souvislosti se studiem vlivu lidské činnosti na klimatické změny. I tak ale zůstávají těžko simulovatelné a stále nedořešené problémy, například turbulentní proudění, které bývalo již v minulosti označováno za nejdůležitější nevyřešený problém klasické fyziky.

S turbulentním prouděním se setkáváme nejen ve fyzice atmosféry a v jiných vědních oborech, ale i v běžném životě. Ačkoliv je pro nás tento pojem přirozený a každý si pod ním nejspíš dovede něco představit, není snadné turbulence přesně definovat. Zjednodušeně mluvíme o nepravidelných a nestálých pohybech jak uvádí Arya (2001). Turbulence si můžeme představit jako chaotický systém vírů, které se navzájem překrývají a liší se velikostí a rychlostí. Problémem turbulencí je právě jejich chaotičnost a citlivost na počáteční podmínky.

Je pravděpodobné, že pokud bychom v numerických simulacích byli schopni turbulence dostatečně přesně reprezentovat, mohli bychom například předpovídat počasí přesněji a na delší časové období než je to možné nyní.

K jedné z nejčastěji používaných metod při počítačové simulaci turbulencí patří simulace velkých vírů (anglicky Large Eddy Simulation, dále jen LES). V této práci bude řeč právě o numerických simulacích a o tom, jaký vliv na výsledek bude mít použitá reprezentace turbulencí.

V první kapitole jsou uvedeny základní údaje o turbulentním proudění, mezní vrstvě a o několika metodách, pomocí kterých turbulentní proudění můžeme modelovat. Druhá kapitola poskytuje obecné informace o numerických modelech a podrobněji představuje model WRF, včetně stručného popisu jeho stavby a postupu při spouštění. Třetí kapitola se zabývá výsledky tří simulací právě z modelu WRF a skládá se ze čtyř částí. V prvních dvou jsou popsány základní informace o provedených simulacích - pro jaký čas a místo byly provedeny a čím se lišily. Poté jsou některé výsledky srovnány s reálnými daty z měření a na závěr jsou mezi sebou srovnány výsledky pro jednotlivé simulace.

1. Turbulentní proudění

Při popisu proudění využíváme Reynoldsovo číslo, které je dáno poměrem setrvačných a vazkých sil a můžeme ho vyjádřit jako

$$Re = \frac{vl}{\nu}$$

kde v je charakteristická rychlost, l charakteristická délka a ν kinematická viskozita tekutiny. Turbulentní proudění se v proudění tekutiny objeví, překročí-li Reynoldsovo číslo kritickou hodnotu. Ta se pro různé kapaliny a různé oblasti liší.

Při turbulentním proudění se v proudící tekutině vyskytují fluktuace rychlosti a turbulentní vířivé pohyby dosahující velikostí od několika milimetrů až do stovek metrů. V atmosféře vlivem turbulencí dochází k promíchávání vzduchu a s tím spojeným přenosem hybnosti, tepla, vodní páry a znečišťujících příměsí, viz eMS.

Proudění vazké tekutiny popisujeme pomocí Navier-Stokesových rovnic, což jsou parciální diferenciální rovnice druhého řádu. Pro viskózní nestlačitelnou Newtonovskou tekutinu s konstantní hustotou ρ a bez vlivu vnějších sil mají tvar

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

kde u_i je i -tá složka rychlosti, p tlak a ν kinematická viskozita, viz Benešová (2014).

Použití Navier-Stokesových rovnic s sebou ale nese několik problémů. V první řadě neznáme jejich obecné řešení v analytickém tvaru - rovnice jsou analyticky řešitelné pouze pro jednoduché případy proudění. Máme-li ale všechny potřebné počáteční a okrajové podmínky, jsme schopni najít řešení alespoň numericky a určit tak chování systému v požadovaném čase. Další nepříjemností jsou vlastnosti řešení a samotného turbulentního proudění - turbulentní proudění patří k systémům, které jsou velmi citlivé i na malé změny v okrajových či počátečních podmínkách. Tyto malé změny zapříčiní to, že i pro mírně odlišné počáteční podmínky dostaneme zcela jiné řešení a chceme-li tak například srovnat teoreticky získané výsledky s pozorováním, mohlo by se zdát, že naše výsledky vlastně nejsou správné. Systémy s velkou citlivostí na počáteční podmínky se zabývá teorie chaosu.

Hlavním problémem Navier-Stokesových rovnic je ale fakt, že ani dnes nevíme, za jakých podmínek jejich řešení existuje a zdali toto řešení bude jednoznačné. Tento problém je považován za tak důležitý, že patří dokonce mezi tzv. Problémy tisíciletí.

Navier-Stokesovy rovnice podrobněji rozebírá například Uruba (2009).

1.1 Modelování turbulencí

Díky numerické matematice a rozvoji výpočetní techniky můžeme dnes turbulence a procesy s nimi spojené počítačově simulovat. Pro provádění simulace je nutné úlohu v prostoru i v čase diskretizovat, a to tak, aby bylo s použitou metodou možné modelovat hodnoty gradientů všech potřebných veličin a zachytit chování modelovaných struktur. Využívá se navíc rozdělení veličin na její střední hodnotu a fluktuační hodnoty.

Mezi nejčastěji používané metody patří přímá numerická simulace (DNS), metoda Reynoldsovy středovaných Navier-Stokesových rovnic (RANS) nebo metoda velkých vírů (LES).

Metoda DNS řeší Navier-Stokesovy rovnice bez použití turbulentního modelu, takže řešení (a stejně tak diskretizace prostoru) musí obsáhnout pohyby všech měřítek. Tato metoda je vhodná pouze pro nízké hodnoty Reynoldsova čísla, protože pro vyšší hodnoty neúnosně narůstá výpočetní náročnost. Výsledky DNS sice poskytují detailní informace o proudění, ale právě z důvodu výpočetní náročnosti se používají většinou jen k teoretickému studiu turbulencí na geometricky jednoduchých oblastech a nikoliv třeba k průmyslovým aplikacím.

Metoda RANS je naopak v průmyslových aplikacích používána nejčastěji a na rozdíl od DNS se hodí i pro velmi vysoké hodnoty Reynoldsova čísla. Metoda využívá statistického přístupu a místo veličin zkoumá jejich odchylky od středních hodnot. Problém je, že obecně nevíme, jak tyto střední hodnoty získat. Reynolds ale navrhl alespoň pravidla, která by střední hodnoty měly splňovat. Tato pravidla podrobně rozebírá Benešová (2014). Výhodou RANS a použití středních hodnot jsou menší gradienty, díky čemuž nemusí být tak podrobná prostorová diskretizace studované oblasti a snižuje se výpočetní náročnost.

U metody LES dojde k rozdělení úlohy na dvě části - zvlášť jsou modelovány pohyby větších a pohyby menších měřítek. Tyto části ale nelze řešit odděleně. Větší struktury jsou simulovány přímo, tj. jako u DNS, a menší jsou modelovány jako v RANS. Pro menší struktury zde ale navíc máme tzv. subgrid model, který umí modelovat i procesy menší než jsou buňky v síti modelu. Díky rozdělení dosáhneme větší přesnosti než u RANS, kde známe jen střední hodnoty, a výpočetní náročnost bude menší než u DNS. Pokud ale například potřebujeme modelovat proudění na oblasti vyžadující velmi jemnou síť, může se výpočetní náročnost LES v některých částech přiblížit náročnosti DNS.

Rozdělení pohybů na větší a menší je provedeno pomocí filtrování, kdy pro získání filtrované hodnoty veličiny provedeme konvoluci této veličiny s tzv. filtrem. Mez mezi modelovanými pohyby a pohyby počítanými přímo je dána tzv. dálkovým parametrem, který musí být větší než je velikost kroku sítě modelu.

Podrobnější informace o zmíněných a dalších, např. hybridních RANS/LES modelech uvádí Benešová (2014).

1.2 Mezní vrstva

Mezní vrstva je dle Stull (1988) definována jako vrstva troposféry, která je přímo ovlivňována zemským povrchem a reaguje na impulsy z povrchu za časový úsek kratší než jedna hodina. Turbulence v ní vznikají převážně právě těmito impulsy, například nad zahřátým zemským povrchem vznikají tzv. termiky - výstupné proudy teplého vzduchu. Výška mezní vrstvy není konstatní a pohybuje se řádově od stovek metrů až po několik kilometrů. Zbývající část troposféry se nazývá volná atmosféra a i v té se turbulence mohou vyskytovat.

Turbulencemi a jinými jevy menších rozměrů v mezní vrstvě se zabývá mikrometeorologie, která ke studiu těchto jevů využívá reálná naměřená data a numerické či laboratorní simulace. Laboratorní simulace spočívají ve využití tzv. větrného tunelu, do kterého můžeme například postavit maketu města a studovat chování proudícího větru kolem ní.

V numerických simulacích se k popisu mezní vrstvy používají například výše uvedené metody RANS a LES. Dříve bylo nutné pro simulování dostatečně malých pohybů použít v mezoměřítkových modelech parametrizaci a ve vnořené mikroměřítkové simulaci LES, ale díky stupni vývoje výpočetní techniky dnes můžeme LES použít rovnou v mezoměřítkových modelech.

2. Numerické modely

2.1 Obecné informace

Ve fyzice atmosféry bychom jen těžko mohli simulovat chování celé atmosféry v laboratorních podmínkách, proto se k vysvětlení a studování pozorovaných jevů začaly s příchodem výkonných počítačů používat numerické modely.

Numerický model je tvořen dynamickým jádrem, souborem parametrizací, modelem zemského povrchu a schématem asimilace meteorologických dat, viz eMS.

Model nepracuje se spojitou oblastí, ale využívá rozdělení oblasti zájmu zpravidla na čtverce, čímž vznikne síť uzlových bodů. Velikost buněk sítě bývá většinou konstantní, ale existují i modely využívající adaptivní krok.

Při provádění simulací v modelu dochází k integraci tzv. řídicích rovnic v uzlových bodech sítě pokrývající oblast. Podle velikosti oblasti a účelu simulace se může lišit horizontální krok této sítě. S jemnějším krokem dostáváme podrobnější výsledky a můžeme studovat i jevy menších měřítek, cenou za to je ale větší výpočetní náročnost. K tomu, abychom mohli provádět simulace s dostatečně malým konstantním krokem a přesto s únosnou výpočetní náročností, slouží tzv. *nesting* (česky vnořování), kdy simulace s velkým rozlišením provádíme pouze na požadované oblasti s využitím dat z jiné simulace, která pokrývala větší oblast a měla rozlišení menší.

Zatímco v horizontálním směru používáme v síti konstantní krok, jako vertikální proměnná se nepoužívá nadmořská výška, ale nejčastěji atmosférický tlak. Tento souřadnicový systém se nazývá p-systém. Z něj můžeme odvodit další dva systémy - σ -systém, kde je vertikální souřadnice σ definována jako poměr tlaku v dané výšce ku hodnotě tlaku na zemském povrchu, a η -systém, jindy též tzv. hybridní, ve kterém zavádíme souřadnici η , jejíž hodnota je 1 na zemském povrchu a 0 na horní hranici atmosféry.

Zmíněné systémy patří mezi tzv. systémy kopírující terén - jednotlivé hladiny tedy nemají konstantní nadmořskou výšku.

Pro numerickou integraci řídicích rovnic je třeba dodat počáteční a okrajové podmínky. Ty mohou pocházet buď z reálných měření nebo, např. u zmiňovaného *nestingu*, z jiného předpovědního modelu, který obvykle mívá menší rozlišení, ale pokrývá větší oblast. Používáme-li jako počáteční a okrajové podmínky data pocházející z meteorologických měření, je třeba data nejprve shromáždit a zkontrolovat. Kontrolu je nutné provést proto, že při přenosu dat mohlo dojít ke vzniku chyb nebo se zde mohou vyskytovat chyby přímo z měření. Chyby jsme schopni odhalit buď díky tomu, že chybné hodnoty neleží v určitých očekávaných klimatologicky daných intervalech nebo lze využít faktu, že data na sobě nejsou nezávislá. Díky tomu můžeme data metodou nejmenších čtverců proložit tzv. kubickými spliny, jejichž konstrukcí se podrobně zabývá Bařka (2014). Při proložení pak sledujeme, je-li suma čtverců odchylek dostatečně malá - pokud není, jsou v datech chyby.

Jsou-li data již v pořádku, je třeba je přepočítat do příslušné sítě modelu, protože data z měření nebývají pravidelně rozmístěna po zemském povrchu. Tento

úkon se v předpovědních modelech nazývá objektivní analýza a je k němu využíván tzv. preprocessor, který bývá součástí modelu. Vidíme, že již zde mohou vznikat nepřesnosti, pokud nemáme pro některá místa data měřena dostatečně blízko u sebe. Největší problém s nedostatkem dat je nad oceány a na území rozvojových zemí - pro provádění simulace je tedy nutné data v oblastech bez měření nějakým způsobem doplnit. Ve snaze minimalizovat chyby se při tomto doplňování neinterpolují přímo naměřené hodnoty, ale vychází se z nějakého odhadovaného meteorologického pole a interpolují se pouze odchylky dané proměnné od příslušného pole, které se pak podle výsledků interpolace upraví.

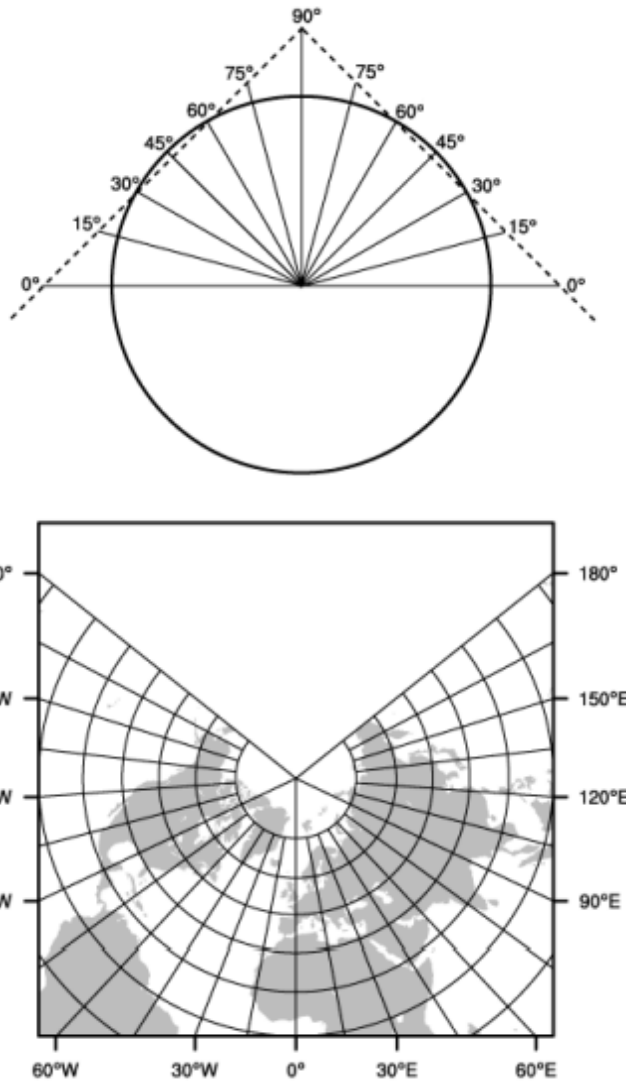
Pro větší přesnost výsledků předpovědních modelů byla navíc vyvinuta metoda asimilace dat, kdy se během integrace meteorologického modelu po daných časových intervalech (většinou po šesti hodinách) výsledky opraví dalšími naměřenými daty pro příslušný čas.

Modely můžeme podle velikosti oblasti, na které provádíme simulace, dělit na modely globální a na modely na omezené oblasti. Globální modely jsou řešeny na celé zeměkouli a není tak nutné zadávat laterální okrajové podmínky, jelikož jsou periodické. Pořád je ale nutné dodat podmínky na spodní a horní hranici simulované oblasti. Tyto modely používají buď sférické souřadnice a nebo rozdělení plochy na více šestiúhelníků, čímž na pólech odpadá problém s nahuštěním horizontálních souřadnic, viz eMS. Modely na omezené oblasti používají buď též sférické, nebo kartézské souřadnice a díky jemnějšímu rozlišení pomocí nich získáváme detailnější popis stavu atmosféry než z modelů globálních.

Použijeme-li libovolné ze zmíněných souřadnic, je nutné simulovanou oblast zobrazit do roviny za pomoci vhodného kartografického zobrazení. Vhodnost zobrazení určíme podle toho, na jaké oblasti provádíme simulace. Jiné zobrazení zvolíme pro oblasti pólů, jiné pro rovník či oblast v mírných šířkách. Pokud bychom vybrali zobrazení, které se pro danou oblast nehodí, dojde k příliš velkému zkreslení simulované oblasti, což nepříznivě ovlivní prováděnou simulaci.

Konkrétně pro mírné šířky, které budou zajímat nás, je ideální Lambertovo konformní zobrazení patřící mezi tzv. kuželová zobrazení. V tomto zobrazení se poledníky zobrazí jako svazek přímek vycházející z jednoho bodu (vrcholu příslušného kužele) a rovnoběžky jako kružnice se společným středem. Princip Lambertova konformního zobrazení je ukázán na obrázku 2.1.

Lambertovo konformní zobrazení je buď tečné nebo sečné. V tečném se kužel zeměkoule pouze dotýká, kdežto v sečném ji protíná. Je důležité správně vybrat místo dotyku, resp. místa, ve kterých bude kužel Zemi protínat, protože v těchto místech dochází k nejmenšímu kartografickému zkreslení. Je tedy vhodné v případě tečného zobrazení umístit bod dotyku do centrální části simulované oblasti a pro sečné zobrazení zvolit jeden bod severněji a druhý jižněji tak, aby se centrální část nacházela mezi nimi.



Obrázek 2.1: Princip Lambertova konformního zobrazení, převzato z Skamarock (2008)

Řídící rovnice, které se v modelu integrují a které popisují dynamické děje v atmosféře, jsou odvozeny na základě několika zákonů zachování:

- zákon zachování hmoty
- zákon zachování energie
- zákon zachování hybnosti
- zákon zachování vody v atmosféře
- zákony zachování různých příměsí v atmosféře

Jak uvádí Bařka (2014), zákony zachování můžeme popsat ve tvaru

$$u_t + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} f_j = 0,$$

který vyjadřuje závislost rychlosti změny u na toku vektorového pole f . Ke změnám u může docházet také v případech, kdy na pravé straně této rovnice je místo nuly tzv. zdrojová funkce vyjadřující například ztrátu tepla při radiálních procesech. Pouze u zákona zachování hmoty zdrojovou funkci neuvažujeme, jelikož se ukázalo, že úbytek je zde nepodstatný. Zdrojové funkce jsou dány parametizacemi modelu.

Zákony zachování hmoty, energie a hybnosti jsou základem pro dynamickou část modelu, ze které získáváme informace o vývoji termobarického pole (kombinované pole teploty a tlaku, viz eMS) a pole větru. Pokud by na pravé straně rovnic, které tyto zákony vyjadřují, byly nuly, zůstaly by všechny příslušné veličiny zachovány a do oblasti by nevtékal ani z ní nevytékal žádný vzduch. K tomu, aby se v oblasti měnila energie a hybnost, slouží právě parametizace.

Parametizace tedy vyjadřují změny stavu atmosféry způsobené vnějšími vlivy a používají se pro procesy menší než je krok horizontální sítě. Patří mezi ně například parametizace přítoku tepelné energie do atmosféry, konvekce, tření o zemský povrch a nebo srážky. Srážky jsou typickým procesem, který často probíhá na menší horizontální oblasti, než je použité rozlišení.

Parametizace praktický nezávisí na tom, jaká metoda je použita pro numerickou integraci v dynamické části modelu, viz Bařka (2014).

2.2 Model WRF

Simulace v této práci byly provedeny pomocí The Weather Research and Forecasting modelu (dále jen model WRF či WRF), který slouží pro atmosférické simulace a předpovědi počasí. Model WRF patří mezi nejpoužívanější regionální atmosférické numerické modely. Byl vyvinut za spolupráce několika organizací, z nichž k nejznámějším patří NCAR (National Center for Atmospheric Research) a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Při použití modelu WRF máme na výběr ze dvou dynamických výpočetních jader modelu - WRF NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) a WRF ARW (Advanced Research WRF). Zde je použita verze WRF ARW.

Kompletní informace o modelu WRF jsou k nalezení v Skamarock (2008) a podrobný návod jak WRF spustit a jak vizualizovat získané výsledky ukazuje Dudhia (2008).

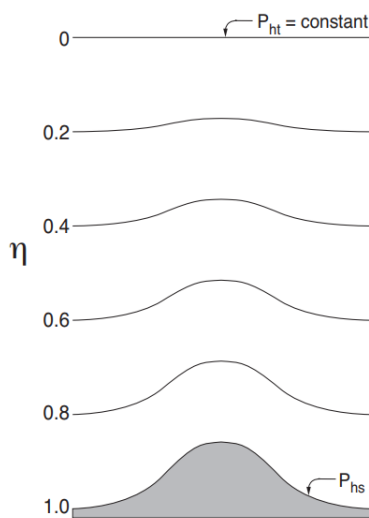
Jako vertikální souřadnice je použit výše zmíněný η -systém, ve kterém dolní hranici tvoří zemský povrch a horní hranici vrstva stálého tlaku. Souřadnice η je definována jako

$$\eta = (p_h - p_{ht})/\mu$$

kde

$$\mu = p_{hs} - p_{ht}$$

viz Skamarock (2008). p_h zde značí tlak v daném bodě a p_{hs} a p_{ht} tlak na dolní, resp. horní hranici. Hodnoty η se, jak jsme již uváděli, pohybují od 0 do 1 a chování souřadnice nad zemským povrchem je ilustrováno na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Průběh souřadnice η nad zemským povrchem, převzato z Skamarock (2008)

V horizontálním směru je síť dělena podle Arakawova schématu C-sítě (obrázek 2.3), ve kterém jsou složky rychlosti definovány ve středech stran buněk sítě a hmotnostní, termodynamické, skalární nebo chemické veličiny ve středech samotné buňky. Hodnota veličiny umístěné do středu buňky představuje průměrnou hodnotu pro celou buňku.

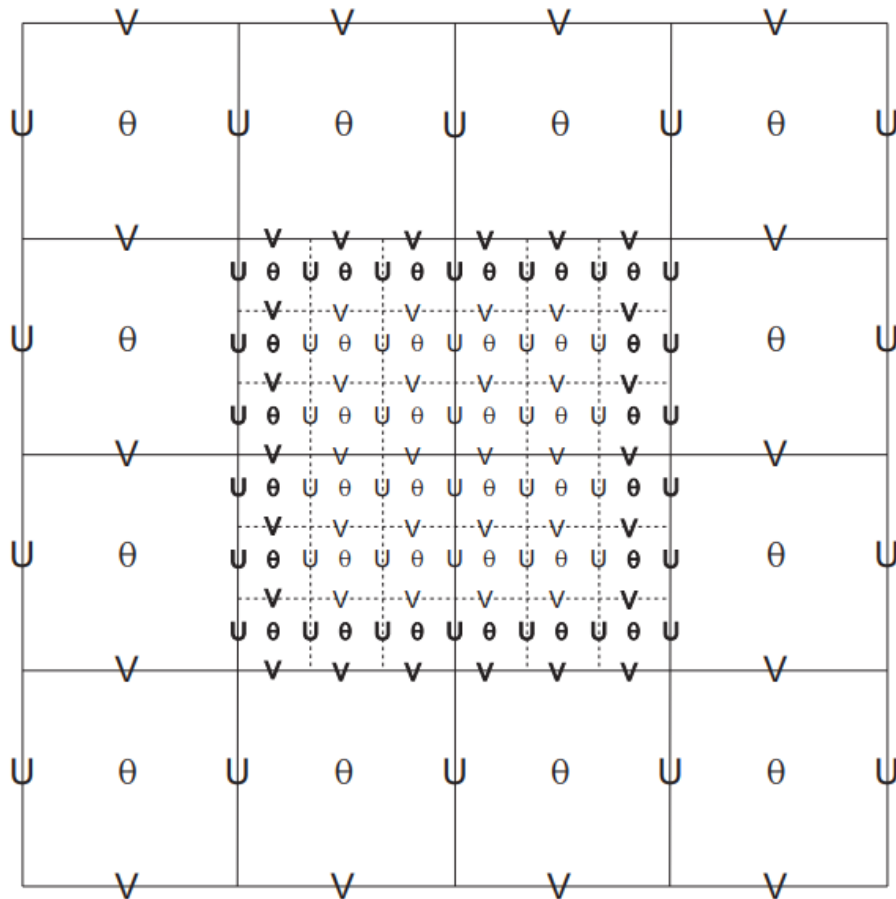
Zajímají-li nás při konečném zobrazování výsledků hodnoty pro konkrétní místo na zemském povrchu, máme k dispozici pouze průměrnou hodnotu z buňky sítě, ve které se požadované místo nachází.

Při realizaci simulací model WRF jako řídicí rovnice využívá plně stlačitelné Eulerovy nehydrostatické rovnice integrované za pomoci Runge-Kuttova schématu druhého a třetího řádu. Předpovídané proměnné jsou složky rychlosti v kartézských souřadnicích, perturbace potenciální teploty, perturbace geopotenciálu a perturbace tlaku suchého vzduchu na povrchu země.

2.2.1 Stavba modelu a jeho spuštění

Modelem WRF můžeme provádět buď idealizované simulace a nebo simulace založené na reálných datech. Budeme-li se bavit o druhé možnosti, je před samotným spuštěním modelu nutné mít vstupní data připravena do požadovaného tvaru. Na to slouží již dříve zmíněný preprocessor, v našem případě WPS (WRF Preprocessing System), který provede příslušnou interpolaci buď naměřených dat a nebo dat pocházejících z jiného modelu.

Než ale vůbec budeme data interpolovat, je třeba v souboru `namelist.wps` upravit časový úsek a oblast, na které chceme simulaci provádět. Tato oblast se zde nazývá doména a WRF umožňuje definovat více do sebe vnořených domén, tzv. *nesting*. Vnořená doména má jemnější rozlišení než větší tzv. rodičovská



Obrázek 2.3: Ilustrace horizontální sítě dle Arakawova schématu C-sítě pro oblast a vnořenou oblast s menším krokem sítě. Plné čáry tvoří síť pro větší oblast, přerušované pro oblast vnořenou. U a V značí složky rychlosti, θ značí termodynamické veličiny. Převzato z Skamarock (2008)

doména, díky čemuž můžeme simulace s velmi malým horizontálním krokem sítě provádět pouze na vybrané oblasti, což podstatně snižuje výpočetní náročnost. Menší doména si z větší bere data jako své okrajové podmínky a využíváme-li tzv. *two-way nesting*, je zpětně i větší doména ovlivněna výsledky simulace v doméně menší.

Kromě času a oblasti můžeme v souboru `namelist.wps` měnit například typ kartografického zobrazení, délku časového kroku nebo velikost kroku v horizontální síti. Máme-li vše nastaveno dle našich požadavků, můžeme začít s přípravou vstupních dat.

WPS se skládá ze tří částí, které se nazývají `geogrid.exe`, `ungrib.exe` a `metgrid.exe` a spouští se v uvedeném pořadí. Program `geogrid.exe` na oblasti, kterou jsme definovali v souboru `namelist.wps`, definuje gridové body výpočetní sítě - jejich vzájemnou polohu, polohu na Zemi a typ projekce - a zároveň interpoluje data nezávislá na čase - například informace o výšce terénu, typ půdy a její využívání nebo hodnotu albeda. `ungrib.exe` extrahuje meteorologická data a uloží je ve formátu, se kterým bude moci pracovat poslední část WPS - `metgrid.exe`. `metgrid.exe` horizontálně interpoluje extrahovaná meteorologická data do na počátku definovaných gridových bodů, čímž získáme třídímenzionální

obraz atmosféry. Podrobnější informace o přípravě vstupních dat uvádí Karlický (2010).

Po přípravě vstupních dat přichází čas na samotné spuštění - to se tentokrát bude skládat ze dvou kroků. Nejprve je ale třeba upravit soubor `namelist.input` analogicky jako jsme u WPS upravovali `namelist.wps`.

Prvním krokem spouštění pak je spustit jeden z inicializačních programů - `ideal.exe`, provádíme-li idealizované simulace, nebo `real.exe`, provádíme-li simulace s reálnými daty. Oba tyto programy vytvoří pro každou doménu soubor s počátečními podmínkami nutnými ke spuštění `wrf.exe`. Konkrétně `real.exe` vertikálně interpoluje data vytvořená programem `metgrid.exe` do modelových hladin a kromě souborů s počátečními podmínkami navíc vytvoří soubor s podmínkami okrajovými, který pro idealizované simulace není nutný. Druhým a zároveň posledním krokem je spuštění `wrf.exe`, což je program numerické integrace. Kvůli výpočetní náročnosti je vhodné - pokud máme k dispozici vícejádrový procesor nebo výpočetní cluster - při spouštění programu `wrf.exe` využít paralelizace, při které je oblast rozdělena na několik podoblastí a výpočet probíhá paralelně na zadaném počtu jader. Pro paralelizaci se používá specifikace MPI (Message Passing Interface) nebo rozhraní OpenMP (Open Multi-Processing). Obě možnosti umožňují komunikaci a synchronizaci mezi paralelně probíhajícími procesy. Popis MPI uvádí například Barney, podrobnosti k OpenMP pak <http://www.openmp.org/>.

`wrf.exe` při použití MPI sám zajistí správné rozdělení oblasti a následné spojení výsledků do jednoho výstupního souboru. Po úspěšném proběhnutí `wrf.exe` vznikne pro každou doménu jeden výstupní soubor.

Pro vizualizaci výsledků z výstupního souboru pak máme k dispozici několik možností. Zde konkrétně jsme nejprve pro úpravu dat použili ARWpost - ten převede data do formátu potřebného pro samotné zobrazení. Z výstupních dat navíc vypočte hodnoty dalších veličin, které by nás mohly zajímat, a provede jejich interpolaci do tlakových hladin či jiných zvolených vertikálních souřadnic. Ze vzniklých souborů pak můžeme obrázky vytvářet pomocí programu GrADS (Grid Analysis and Display System). Více informací o programu GrADS se nachází na <http://cola.gmu.edu/grads/>.

3. Experimentální nastavení

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.2.1, nejprve bylo třeba definovat oblasti, na kterých budeme provádět simulace. V našem případě jsme použili pět vnořených domén (značíme d01 až d05) zaměřených nad Prahu, jejichž rozlišení (resp. velikost horizontálního kroku) je pro přehlednost shrnuto v tabulce 3.1. Největší doména d01 pokrývá celou Evropu, domény d02 a d03 jsou zobrazeny v obrázku 3.1 a domény d04 a d05 v 3.2.

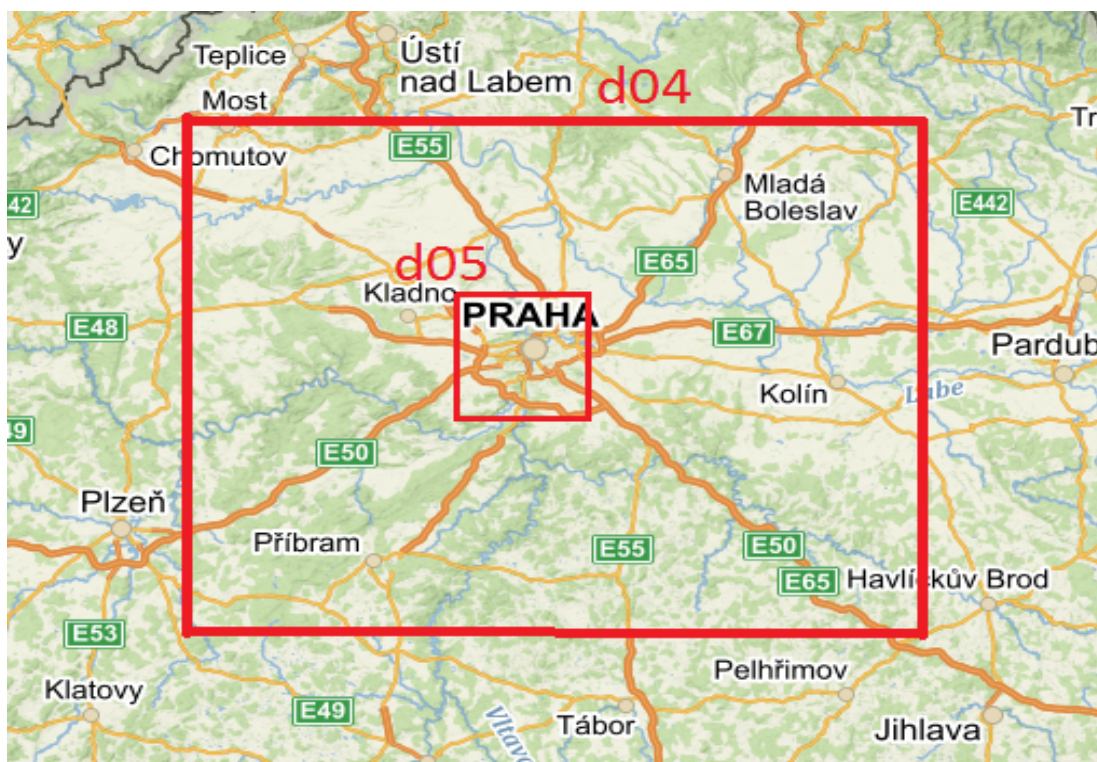
Doména	Rozlišení (m)
d01	30000,00
d02	10000,00
d03	3333,33
d04	1111,11
d05	222,22

Tabulka 3.1: Velikost horizontálního kroku v jednotlivých doménách



Obrázek 3.1: Poloha domén d02 a d03. Podkladová mapa byla převzata z <https://mapy.cz>

Ve větších doménách dochází vlivem malého horizontálního rozlišení ke zhlazení topografie, jak je vidět na obrázku 3.3, kde se v prvních čtyřech doménách zaměřujeme pouze na oblast d04. Vidíme, že zatímco v d01 toho o členitosti povrchu příliš nevíme, v d04 jsme z výškových rozdílů již schopni velmi přesně určit například kudy protéká Vltava. Pro přehlednost je ve všech doménách bílým bodem označen střed d05.



Obrázek 3.2: Poloha domén d04 a d05. Podkladová mapa byla převzata z <https://mapy.cz>

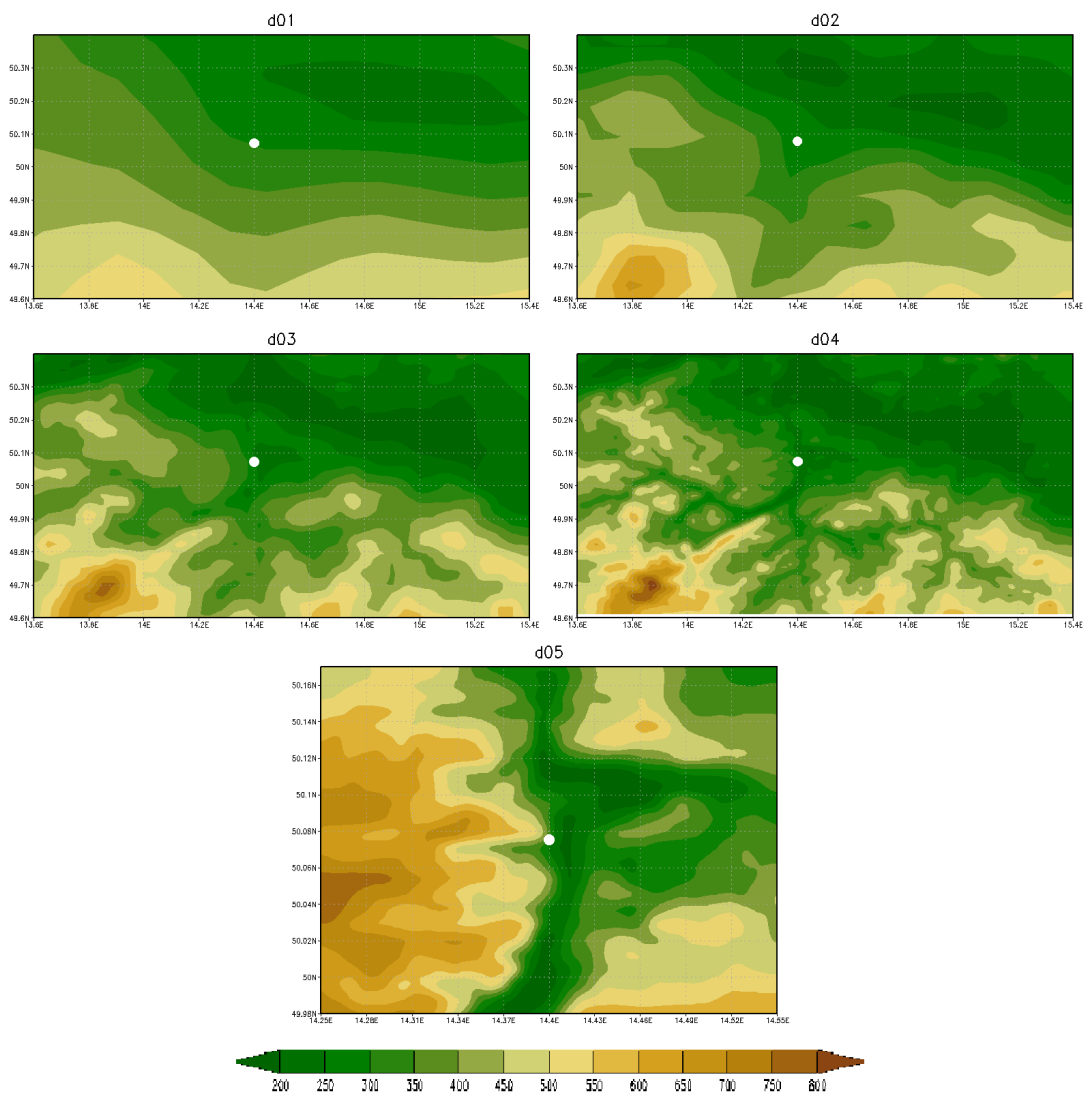
Jako počáteční a okrajové podmínky jsme použili data z modelu GFS dostupné na <http://www.emc.ncep.noaa.gov/index.php?branch=GFS>.

Simulace byly prováděny s daty za časové období od 28.5.2013 do 15.6.2013, avšak nikoliv pro celý úsek najednou, ale po jednotlivých, šedesát hodin dlouhých částech. Tyto části na sebe nenavazovaly, ale vždy se dvanácti hodinami překrývaly - tj. první simulace probíhala od 28.5. 00:00 do 30.5. 12:00, druhá od 30.5. 00:00 do 1.6. 12:00 atd. Z každé simulace jsme pak pomocí Climate Data Operators (CDO) vzali pouze data bez prvních dvanácti hodin, protože během nich v simulaci docházelo k interpolaci hrubých podmínek z větších rozlišení a ustanovovala se rovnováha, proto se pro vyhodnocení simulací nepoužívají.

Díky tomu, že jsme měli k dispozici výpočetní cluster se 24 jádry, bylo možné využít paralelizace. Na tu jsme použili Open MPI, což je volně dostupná implementace dříve zmíněného MPI. Podrobnosti o Open MPI jsou k nalezení na <https://www.open-mpi.org/>.

Pro ilustraci výpočetní náročnosti takovýchto simulací i s použitím paralelizace na 24 jádrech uvedme, že šedesátihodinová simulace pro čtyři největší domény trvala méně než 30 hodin. Po přidání páté domény došlo ale více než ke zdvojnásobení tohoto času - tj. šedesátihodinová simulace pro pět domén trvala průměrně cca šedesát hodin. Průměrně proto, že výpočetní náročnost se odvíjí i od konkrétního tvaru parametrizace.

V kapitole 4.2 budeme srovnávat výsledky tří simulací, které byly prováděny pro stejné domény a stejné období, ale lišily se parametrizacemi. V první simulaci



Obrázek 3.3: Srovnání topografie pro d01 až d05, [m]

bylo použito nastavení, které doporučuje Wang (2016) jako příklad parametrizace v páté kapitole. Pro d01 a d02 bylo použito nastavení b , pro zbývající menší domény nastavení a . Pokud bylo u některých hodnot vyžadováno, aby byly stejné pro všechny domény, bylo použito nastavení z větších domén, tj. b . Ve druhé simulaci zůstalo téměř stejné nastavení jako v první, rozdíl je pouze v nejmenší doméně, tedy doméně d05, kde jsme použili parametrizaci pro LES z podkapitoly 5/4.k viz Wang (2016). Pro poslední simulaci bylo použito nastavení, pomocí kterého je na KFA MFF UK od ledna roku 2016 denně počítána předpověď počasí (viz Nováková (2016)). Simulace v práci označujeme jako ab , LES a T .

Jako příloha je k této práci přiložena přesná podoba souboru `namelist.input` pro parametrizaci ab . V tabulce 3.2 jsou uvedeny pouze ty části nastavení, které se v jednotlivých parametrizacích lišily.

Nyní alespoň u těchto vybraných parametrů vysvětlíme, co se za nimi skrývá. Není-li uvedeno jinak, značí rozdílné číselné hodnoty různá schémata, která podrobněji popisuje Skamarock (2008).

	ab	LES	T
&physics			
mp_physics	8, 8, 8, 8, 8,	8, 8, 8, 8, 8,	3, 3, 3, 3, 3,
ra_lw_physics	4, 4, 4, 4, 4,	4, 4, 4, 4, 4,	1, 1, 1, 1, 1,
ra_sw_physics	4, 4, 4, 4, 4,	4, 4, 4, 4, 4,	1, 1, 1, 1, 1,
radt	15, 15, 10, 10, 10,	15, 15, 10, 10, 10,	30, 30, 30, 30, 30,
bl_pbl_physics	1, 1, 1, 1, 1,	1, 1, 1, 1, 0,	1, 1, 1, 1, 1,
cu_physics	3, 3, 0, 0, 0,	3, 3, 0, 0, 0,	1, 1, 1, 1, 1,
cudt	0, 0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0, 0,	5, 5, 5, 5, 5,
&dynamics			
diff_opt	1, 1, 1, 1, 1,	1, 1, 1, 1, 2,	1, 1, 1, 1, 1,
km_opt	4, 4, 4, 4, 4,	4, 4, 4, 4, 2,	4, 4, 4, 4, 4,

Tabulka 3.2: Rozdíly v nastavení mezi jednotlivými parametrizacemi

mp_physics – Mikroměřítkové jevy, konkrétně procesy spojené s vodní párou, mraky a srážkami. Možnost 3 je použito *WRF Single-Moment 3-class* schéma určené pro mezoměřítkové simulace, 8 je *New Thompson et al.* schéma vhodné i pro simulace s vysokým rozlišením.

ra_lw_physics – Dlouhovlnná radiace zahrnující infračervené a tepelné vyzařování absorbované a emitované povrchy nebo plyny. S 1 je použito *Rapid Radiative Transfer Model* schéma a s 4 jeho vylepšená verze *RRTMG*.

ra_sw_physics – Krátkovlnná radiace. Mezi schémata obsažené procesy patří absorpce, odraz a rozptyl slunečního záření. 1 značí Dudhiovo schéma, 4 krátkovlnné *RRTMG*.

radt – Počet minut mezi voláním radiačních rutin.

bl_pbl_physics – Mezní vrstva, popis vertikálních toků menších rozměrů než je dané měřítko. V páté doméně parametrizace *LES* je tato možnost vypnutá, protože používáme přímo nastavení pro simulaci velkých vírů. Jinde je použito schéma *Yonsei University*.

cu_physics – Vliv konvektivní a nízké oblačnosti. Nastavení 1 je schéma Kain-Fritschovo, 3 je schéma Grell-Freitasovo. S 0 je tato možnost vypnutá.

cudt – Počet minut mezi voláním rutin pro konvektivní procesy. 0 značí použití v každém časovém kroku. Jiné nastavení se používá jen pro `cu_physics=1`.

diff_opt – Difúze a turbulence. Možnost 1 značí výchozí a 2 pokročilejší nastavení, při kterém je hodnotou `km_opt` nastavena parametrizace turbulencí.

km_opt – Koeficient turbulentní difúze. Pro 4 značí pouze horizontální difúzi, jelikož o vertikální se stará `bl_pbl_physics`. Pro 2 se v `d05` s *LES* používá rovnice pro turbulentní kinetickou energii a týká se horizontálních i vertikálních procesů.

Kromě jednotlivých parametrizací budeme v některých případech porovnávat i výsledky simulací pro gridové body odpovídající rozdílným místům. Tato místa byla vybrána s ohledem na městskou zástavbu podle tří typických povrchů ve městě lišících se například drsností a albedem. Zmíněné povrchy jsou městská zástavba, les a pole. Vybraná místa jsou střed Prahy ($50,08^\circ$ s.š., $14,42^\circ$ v.d.), Kunratický les ($50,03^\circ$ s.š., $14,47^\circ$ v.d.), pole severozápadně od Průhonic ($50,01^\circ$ s.š., $14,53^\circ$ v.d.) a bod v centrální části Brd ($49,72^\circ$ s.š., $13,85^\circ$ v.d.).

Konkrétní názvy vybraných míst zde uvádíme spíše pro lepší představu o jejich poloze či pro pozdější přehlednost. V modelu WRF jsme nepoužili parametrizaci města a nemůžeme tedy uvažovat např. vliv uličních kaňonů. Model pouze ví, že se v dané oblasti nachází město resp. ví jak drsný je v daném místě povrch, jaká je hodnota albeda atd., viz Talbot (2012).

4. Výsledky

4.1 Srovnání s reálnými daty

Chceme-li s nějakým numerickým modelem provádět simulace na velkých i vnořených doménách, potřebujeme nejprve vyhodnotit jak dobře je model vůbec schopen modelovat velkoprostorovou simulaci. Pokud by již ve větších doménách byly výrazné rozdíly ve srovnání s reálnými daty, je jasné, že vnořené domény s větším rozlišením nemohou tuto počáteční odchylku napravit, jelikož během celé simulace z větších domén přebírají data v podobě okrajových podmínek.

V této kapitole tedy srovnáme výsledky většinou pouze pro parametrizaci *LES* s reálnými daty.

Není-li uvedeno jinak, pochází použitá reálná data z volně dostupné databáze E-OBS, verze 13.1, viz Haylock (2008) pro data obsahující teplotu a srážky a van den Besselaar (2011) pro tlak. Data mají podobu denních průměrů a jsou gridovaná, tj. upravená do pravidelné sítě a tak určena právě ke srovnávání s výstupy z mezoměřítkových simulací. Krok této sítě je 0,25 stupně a lepší data pro srovnání nemáme k dispozici.

4.1.1 Tlak na hladině moře

Nejprve srovnáme hodnoty tlaku na hladině moře. Na obrázku 4.1 vidíme srovnání pro pátý, desátý a patnáctý den simulace. Data ze simulací (vlevo) jsou brána z největší domény (d01) a jsou to vždy průměry vypočtené z hodnot tlaku pro daný den.

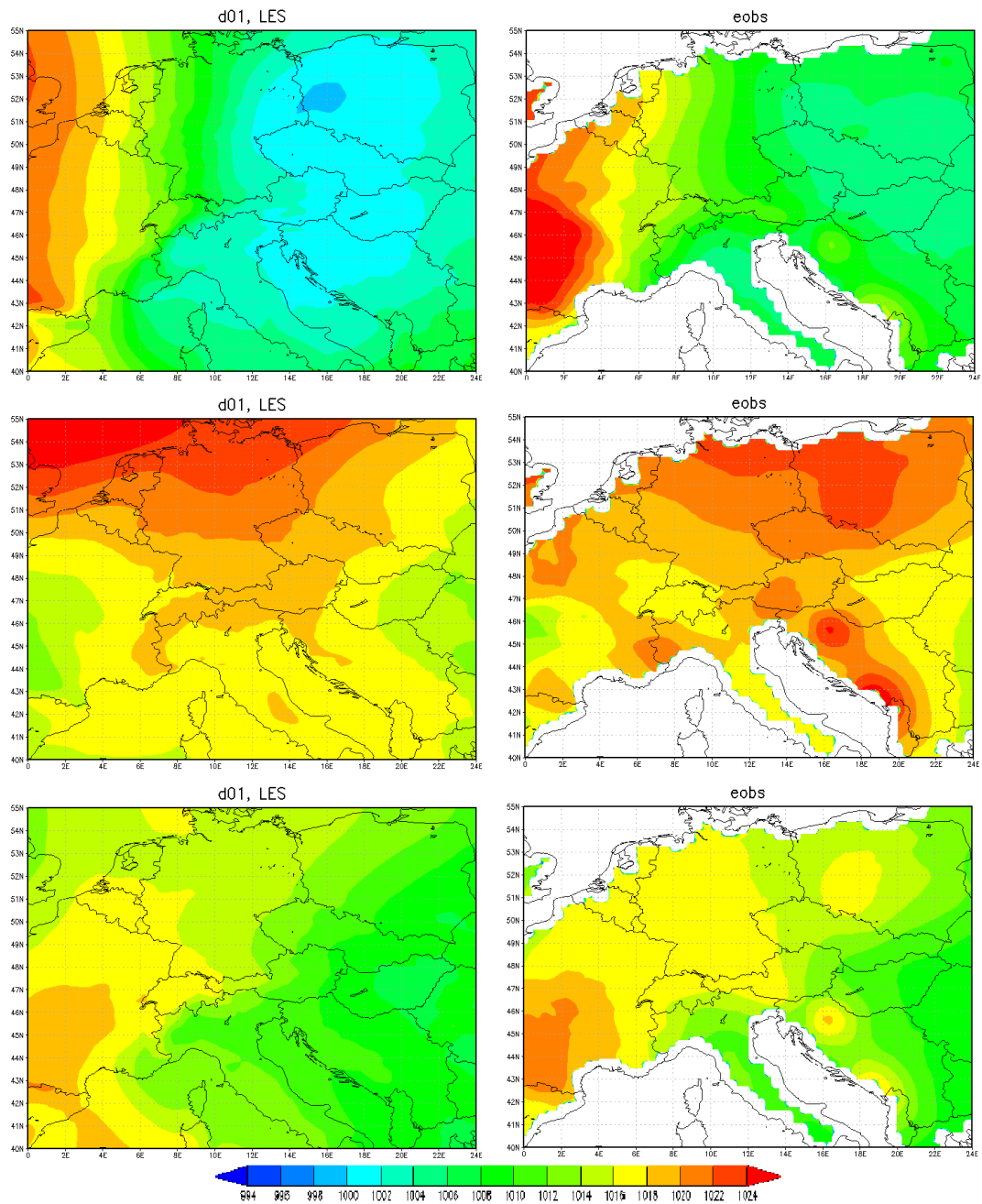
Vidíme, že polohy tlakových útvarů si pro simulaci i reálná data odpovídají, ale porovnáme-li rozdíly v hodnotách např. na území České republiky, liší se většinou přibližně o 2 až 6 hPa.

4.1.2 Průměrná denní teplota

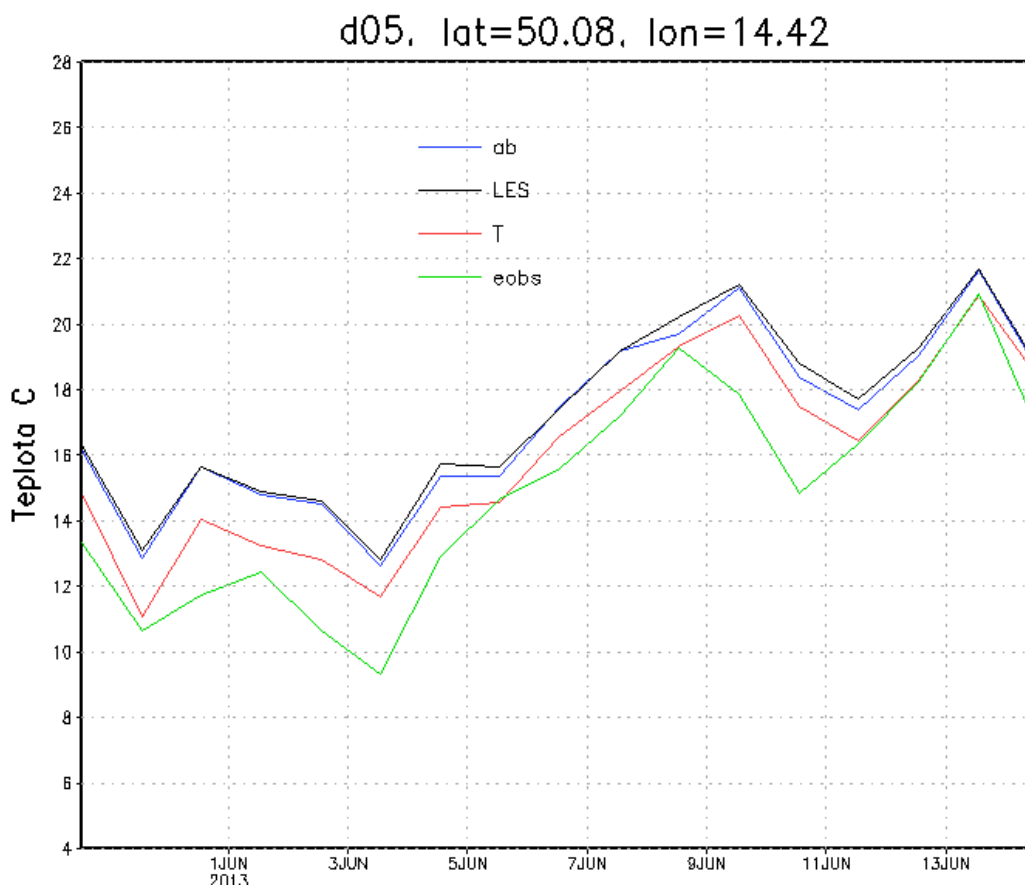
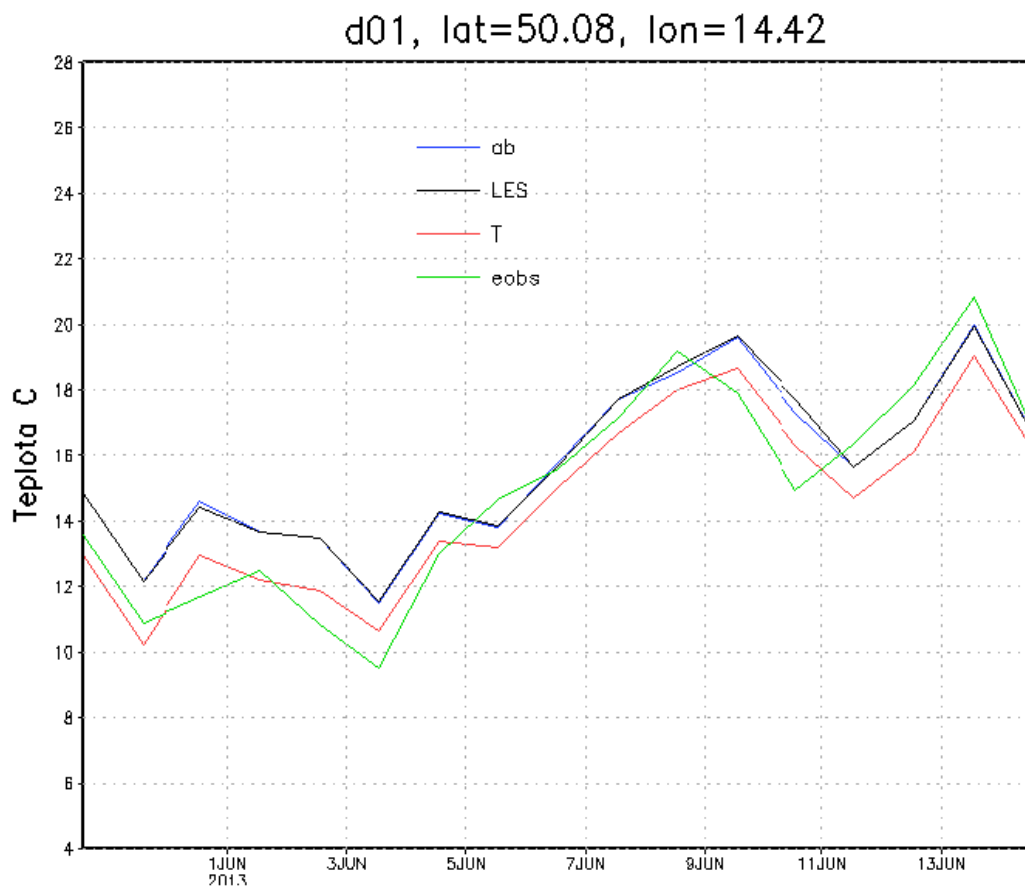
Časový průběh

Při srovnávání hodnot v konkrétním místě je třeba mít na paměti původní podobu naměřených dat, tj. hlavně fakt, že krok horizontální sítě použitých reálných dat je 0,25 stupně. Pro naše použití byla data zinterpolována do sítě modelu, což nám umožnilo jednoduše srovnat hodnoty v požadovaném místě, ale kvůli původnímu rozlišení jsou data příliš zhlazená - obzvláště porovnáme-li je s hodnotami z d05, která má rozlišení řádově jemnější. V měřených datech navíc z téhož důvodu nevidíme vliv města.

Na obrázku 4.2 jsou zobrazeny denní průměry teplot za celé simulované období z d01 resp. d05 pro všechny simulace a E-OBS na místě, které odpovídá centru Prahy. Vidíme, že při srovnání průměrných denních teplot nelze obecně říci, je-li lepší použít parametrizaci *ab* (resp. *LES* s téměř totožnými výsledky) či *T*. V první části simulovaného období se blíže měření drží *T*, později se ale jako lepší jeví naopak *ab* a *LES*. Pro d05 by se nám jako přesnější jevila parametrizace *T*, ale jak jsme již zmiňovali, je třeba uvážit jakým způsobem jsme upravili reálná data a má-li vůbec smysl srovnávat je s výsledky pro podstatně větší rozlišení.



Obrázek 4.1: Srovnání hodnot tlaku na hladině moře v pátý, desátý a patnáctý den simulace pro *LES* a data z databáze E-OBS, [hPa]



Obrázek 4.2: Srovnání průměrné denní teploty v d01 a d05 pro bod odpovídající centru Prahy mezi jednotlivými simulacemi a daty z databáze E-OBS

Plošné srovnání

Průměrnou denní teplotu srovnáme opět pro pátý, desátý a patnáctý den simulace. Obrázek 4.3 ukazuje, že povaha výsledků je obdobná jako u srovnání tlaku - rozložení oblastí s vyšší a nižší teplotou je pro reálná data a data ze simulace velmi podobné, konkrétní hodnoty se ale na většině míst liší o 1 – 2° C.

4.1.3 Výškový průběh teploty a potenciální teploty

Potenciální teplota je taková teplota, kterou by vzduch měl, kdybychom ho adiabatickým dějem (tj. bez dodání tepla) převedli do hladiny 1000 hPa. Potenciální teplotu θ můžeme vypočítat ze vztahu

$$\theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{R/c_p}$$

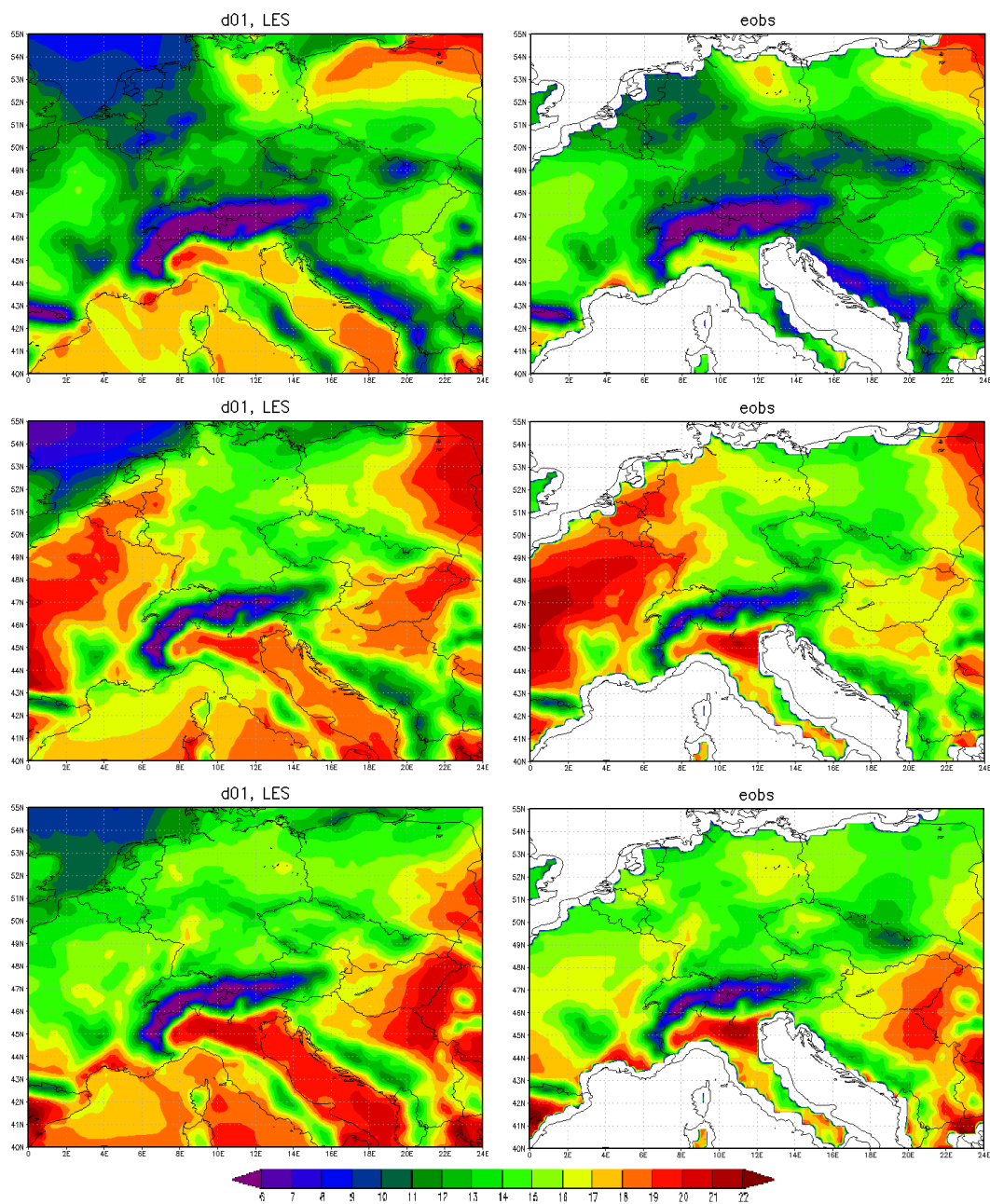
kde T je teplota vzduchu, p tlak vzduchu, R měrná plynová konstanta suchého vzduchu a c_p měrné teplo suchého vzduchu při stálém tlaku, viz eMS. Potenciální teplota se zachovává v adiabatických dějích v suchém vzduchu a, zjednodušeně řečeno, ukazuje stabilitu atmosféry.

Použitá reálná data pochází ze sondážních měření Českého hydrometeorologického ústavu.

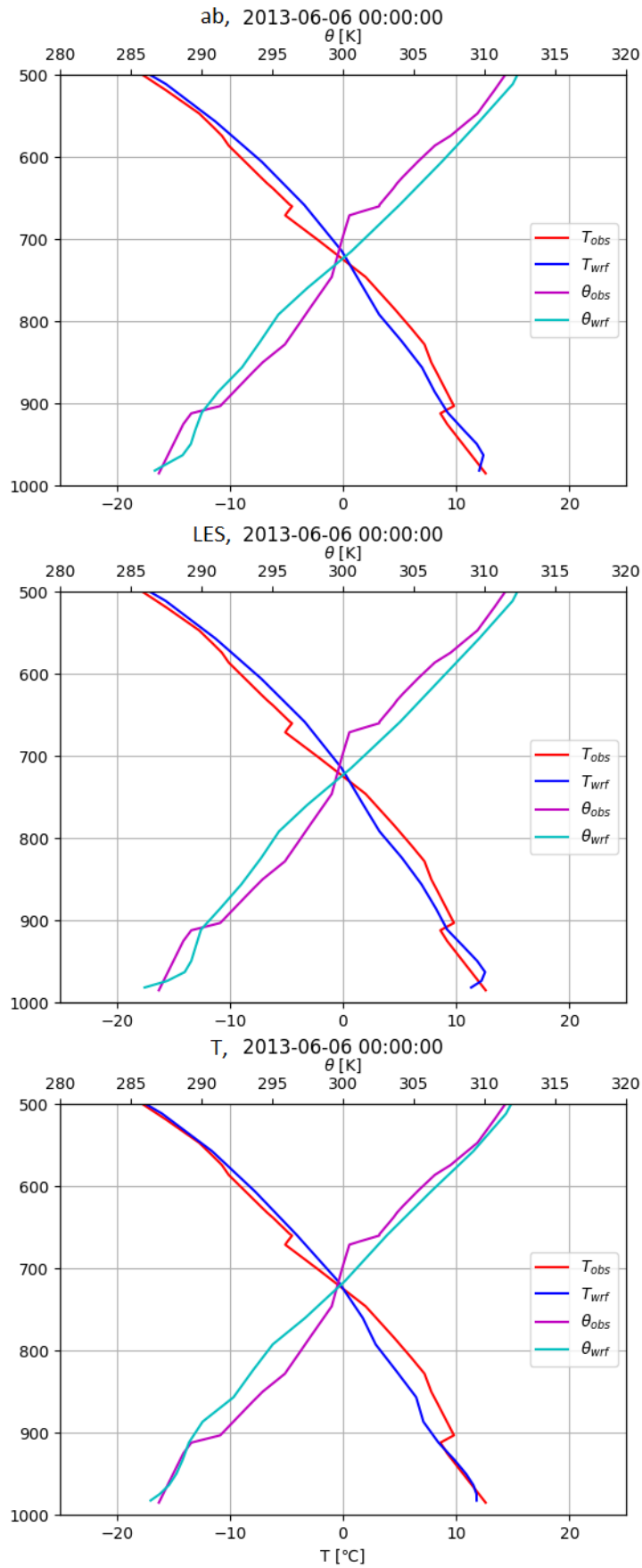
Na obrázku 4.4 ukazujeme srovnání průběhů pro parametrizace *ab*, *LES* a *T* na Libuši 6.6. 00:00. Vidíme, že ve vyšších hladinách se mezi simulacemi nevyskytují žádné výrazné rozdíly - to proto, že tato část výsledků je dána dynamickým jádrem modelu a rozdíly mezi parametrizacemi ji tak příliš neovlivní.

Parametrizace *LES* během celé simulace evidentně dává jiné výsledky než *ab*, neposkytuje ovšem žádné systematické vylepšení. V noci jsou většinou výsledky pro *LES* chladnější, dochází tedy snadněji ke vzniku inverzní vrstvy.

To, že nám *LES* výsledky nijak nevylepšuje, může být dáno už tím, že už velkoprostorová simulace je odchýlena od reálných hodnot.



Obrázek 4.3: Srovnání průměrné denní teploty v pátý, desátý a patnáctý den simulace pro *LES* a data z databáze E-OBS, [°C]



Obrázek 4.4: Výškový průběh teploty T a potenciální teploty θ na Libuši. T_{obs} a θ_{obs} značí reálná data, T_{wrf} a θ_{wrf} data ze simulací. Nahoře jsou data ze simulace *ab*, uprostřed z *LES* a dole z *T*.

4.2 Výsledky simulací

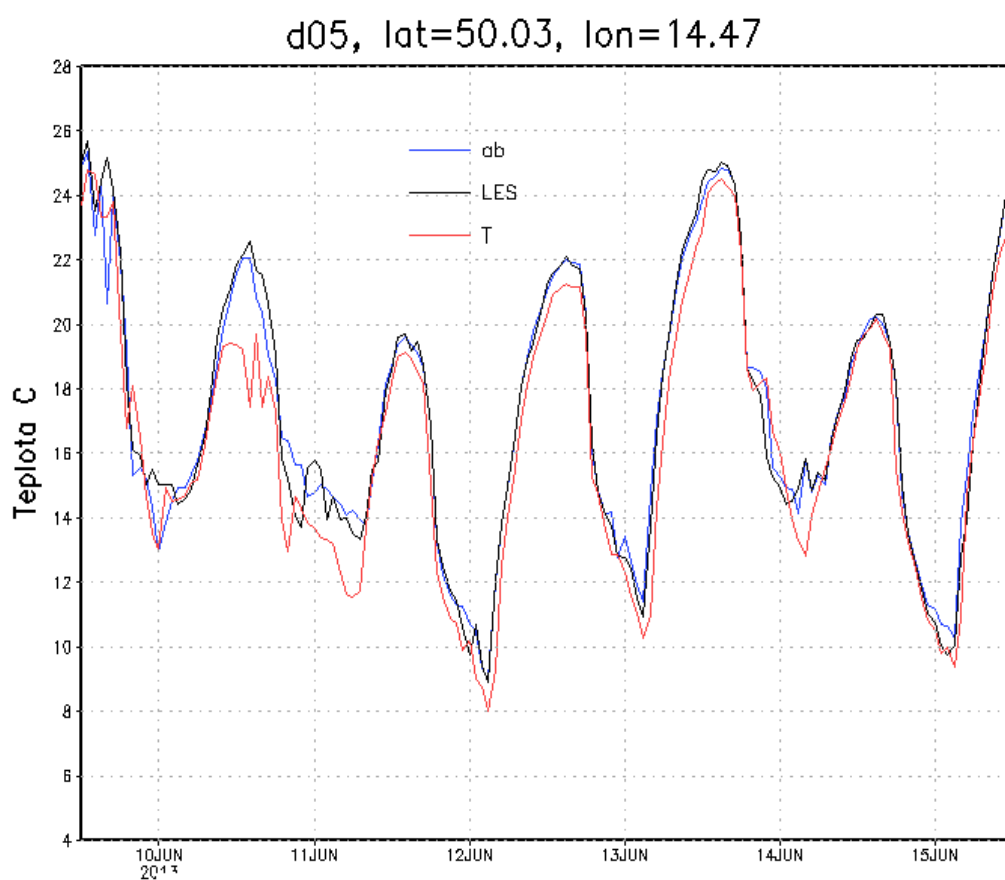
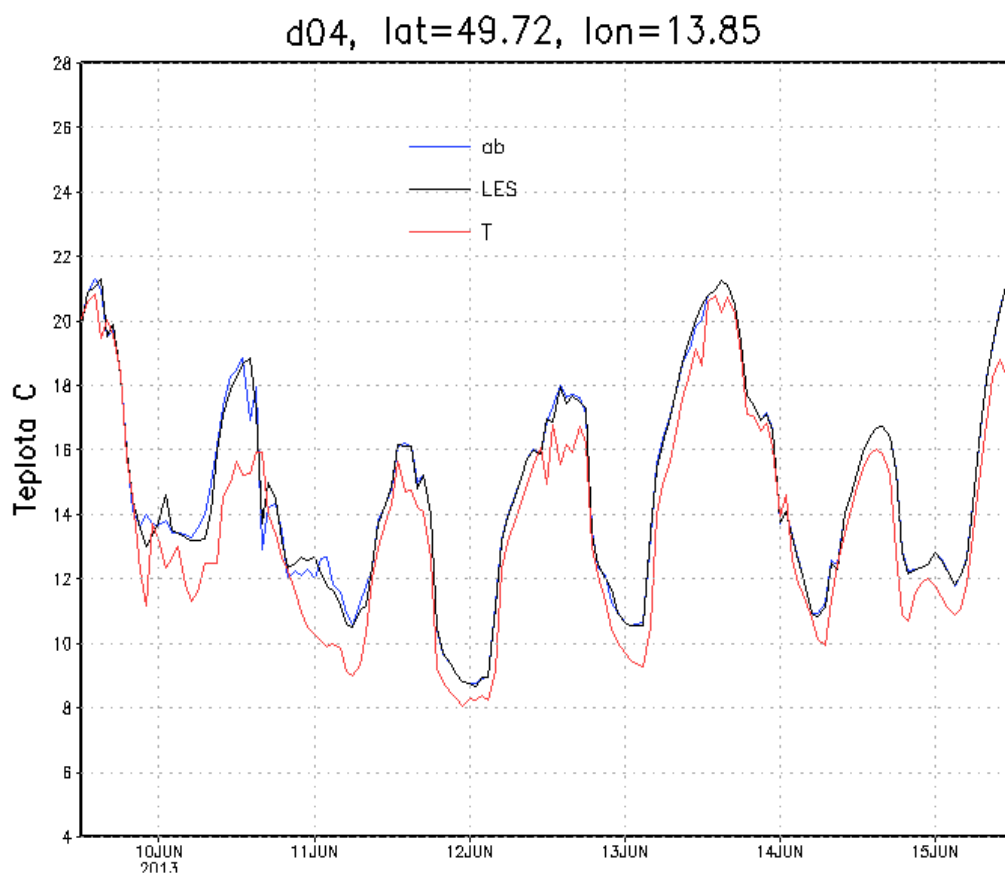
4.2.1 Teplota ve 2 metrech

Časový průběh

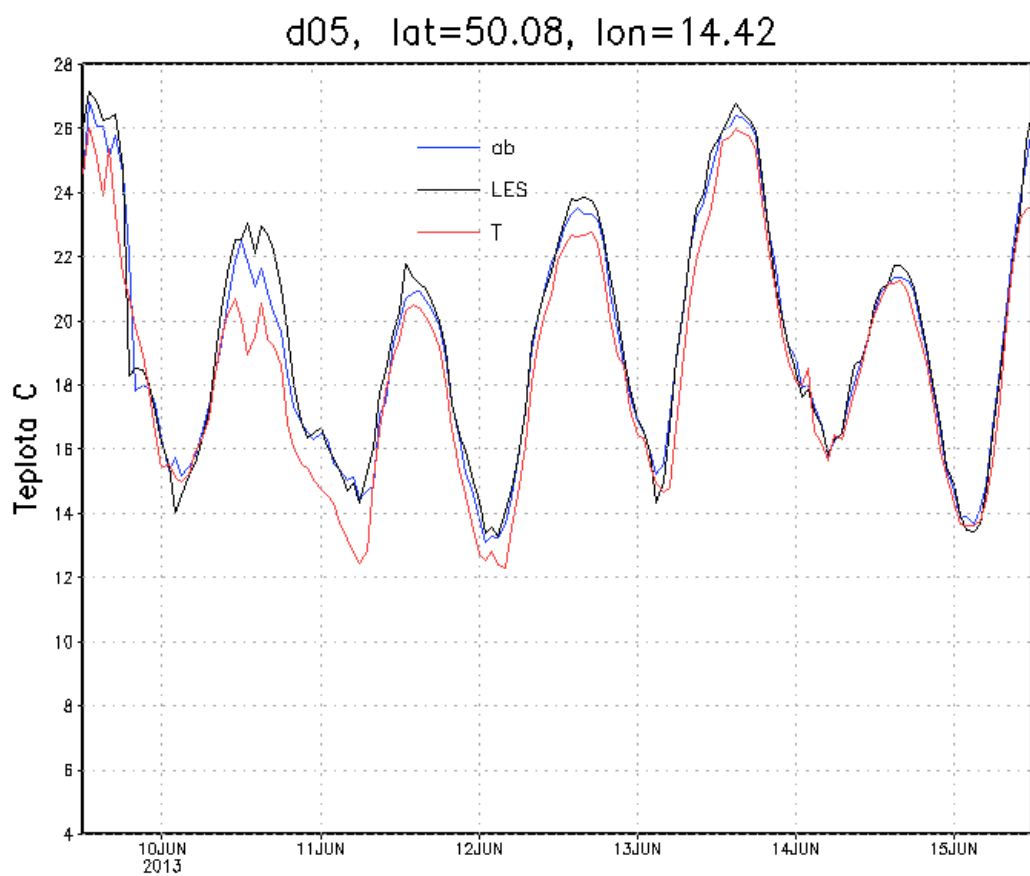
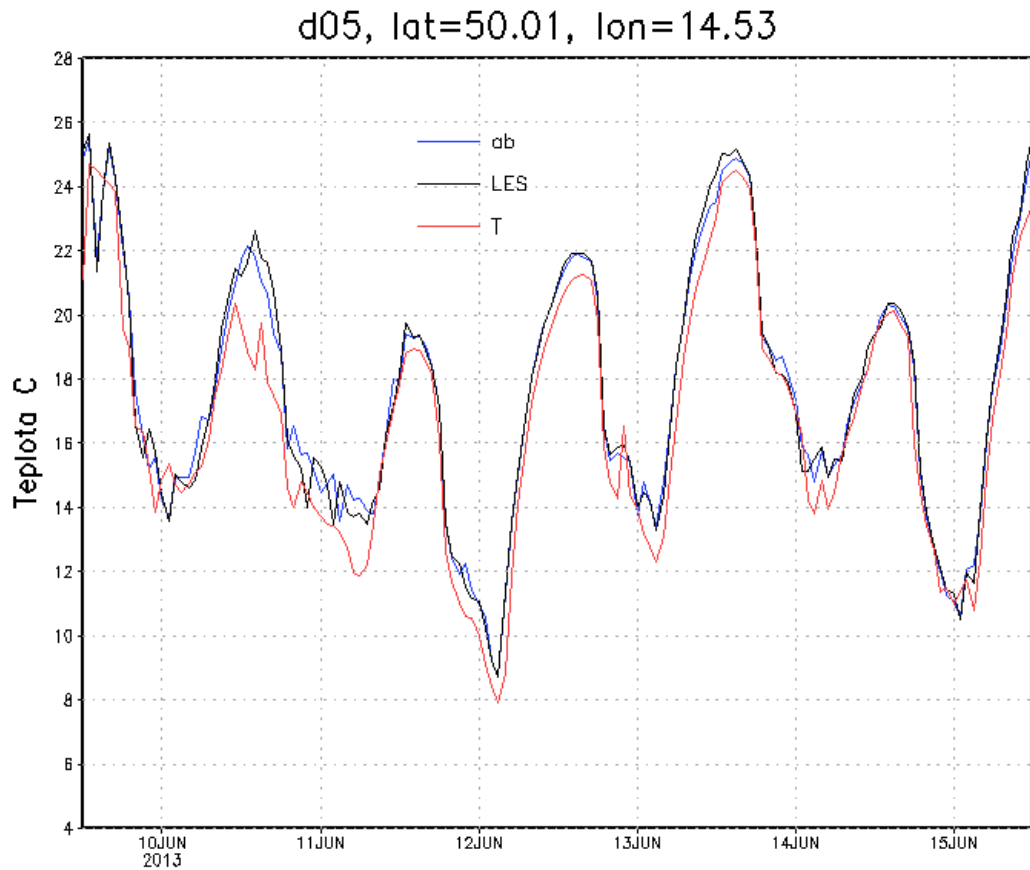
V této kapitole budeme porovnávat časový průběh teploty ve dvou metrech pro místa uvedená v kapitole 3. Kvůli délce simulace a množství dat uvedeme pro přehlednost srovnání pouze pro poslední třetinu výše zmíněného časového intervalu.

Rozdíly mezi parametrizacemi Nejprve se podíváme na rozdíly mezi výsledky pro různé parametrizace ve všech bodech uvedených v kapitole 3. Srovnání jsou zobrazena ve dvou obrázcích - 4.5 a 4.6. V 4.5 vidíme srovnání pro Brdy a les, v 4.6 pak pro pole a centrum Prahy. Pro všechna místa uvádíme data z nejmenší možné domény, tj. pro Brdy data z d04, protože d05 už tuto oblast nepokrývá (viz rozložení domén na obrázku 3.2). Vidíme, že pro parametrizaci T systematicky dostáváme nižší teplotu. Zajímavější jsou dle očekávání rozdíly mezi ab a LES - v noci jsou teploty z parametrizace ab vyšší než z LES , ve dne jsou naopak ve většině případů nižší.

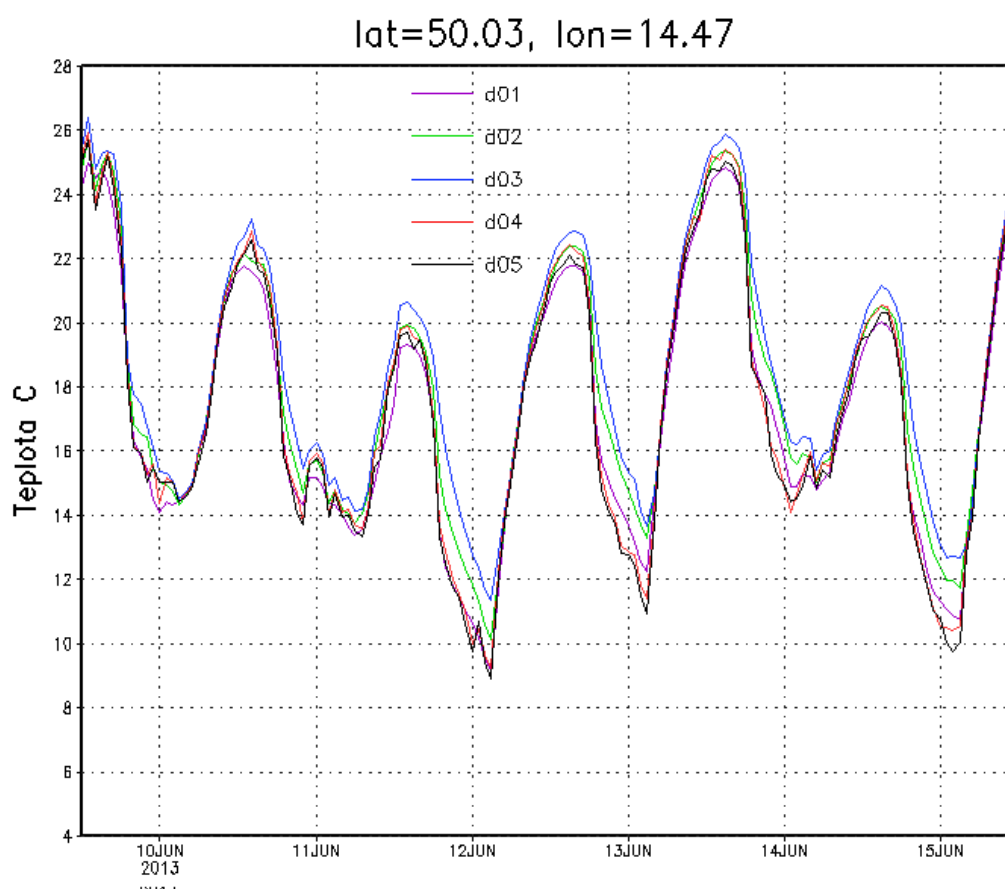
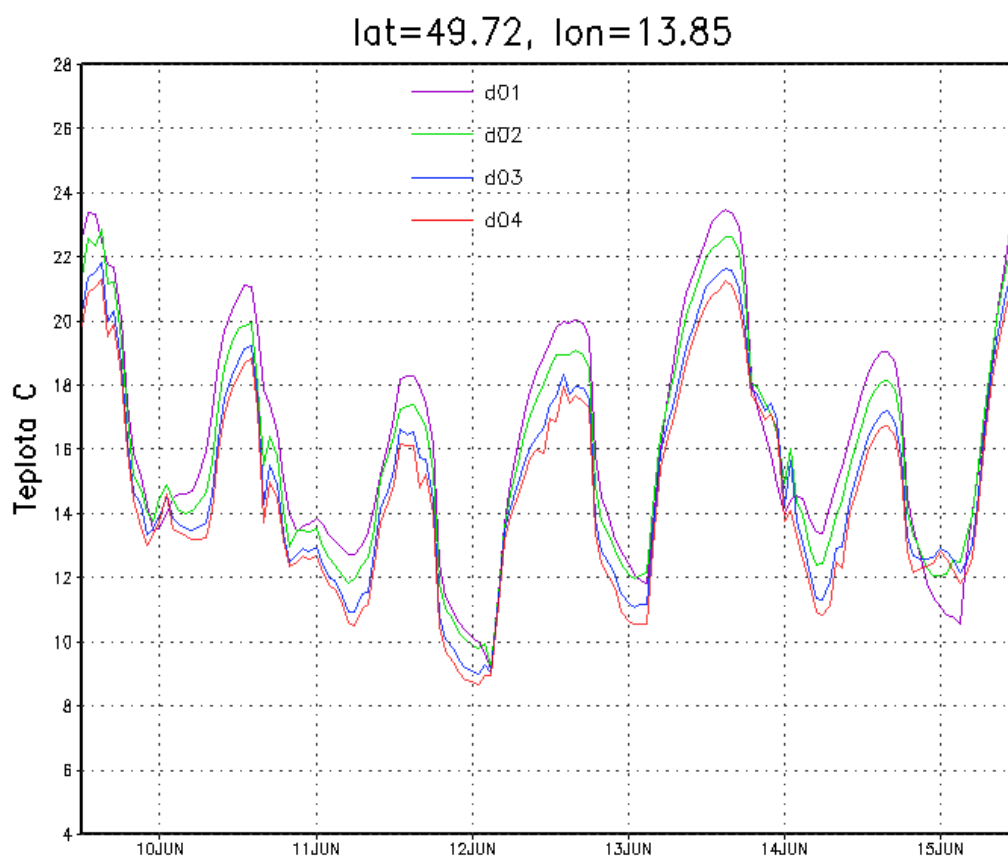
Rozdíly mezi doménami Obrázky 4.7 a 4.8 ukazují rozdíly mezi doménami opět v místech z kapitoly 3, ale pouze pro parametrizaci LES . Rozdíly mezi doménami jsou v každém z vybraných míst jiné a nelze je tedy shrnout nějakým obecně platným tvrzením. V oblasti Brd (obrázek 4.7 nahoře) se pro menší domény teplota postupně snižuje. V dolní části téhož obrázku ale vidíme, že pro zalesněnou oblast na okraji Prahy (Kunratický les) je teplota pro d02 a d03 nejprve vyšší než v d01, hlavně v nočních hodinách, ale v d04 a d05 se hodnoty opět přimknou k hodnotám z d01. U oblasti s vlastnostmi pole (obrázek 4.8 nahoře) žádné významné rozdíly mezi doménami nejsou. Ve spodní části obrázku dochází pro centrum Prahy k opačnému jevu než v oblasti Brd - teplota pro vnořené domény je v denních i nočních hodinách většinu času vyšší než teplota v d01 a d02.



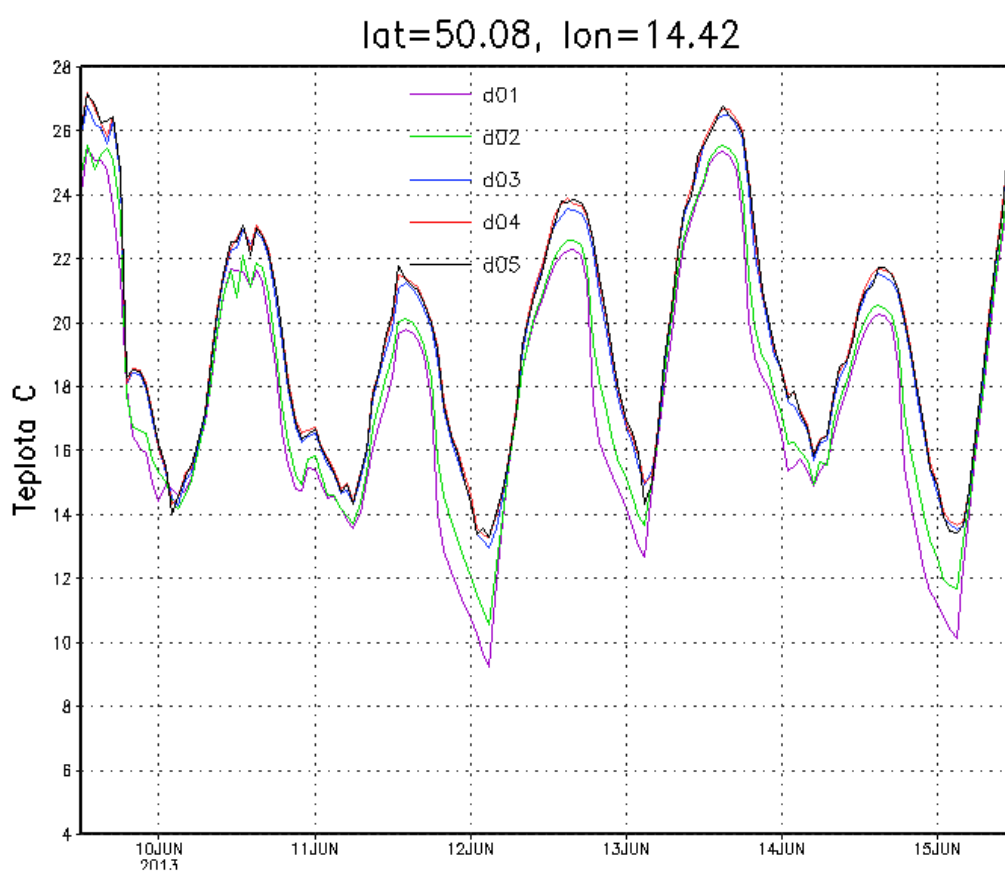
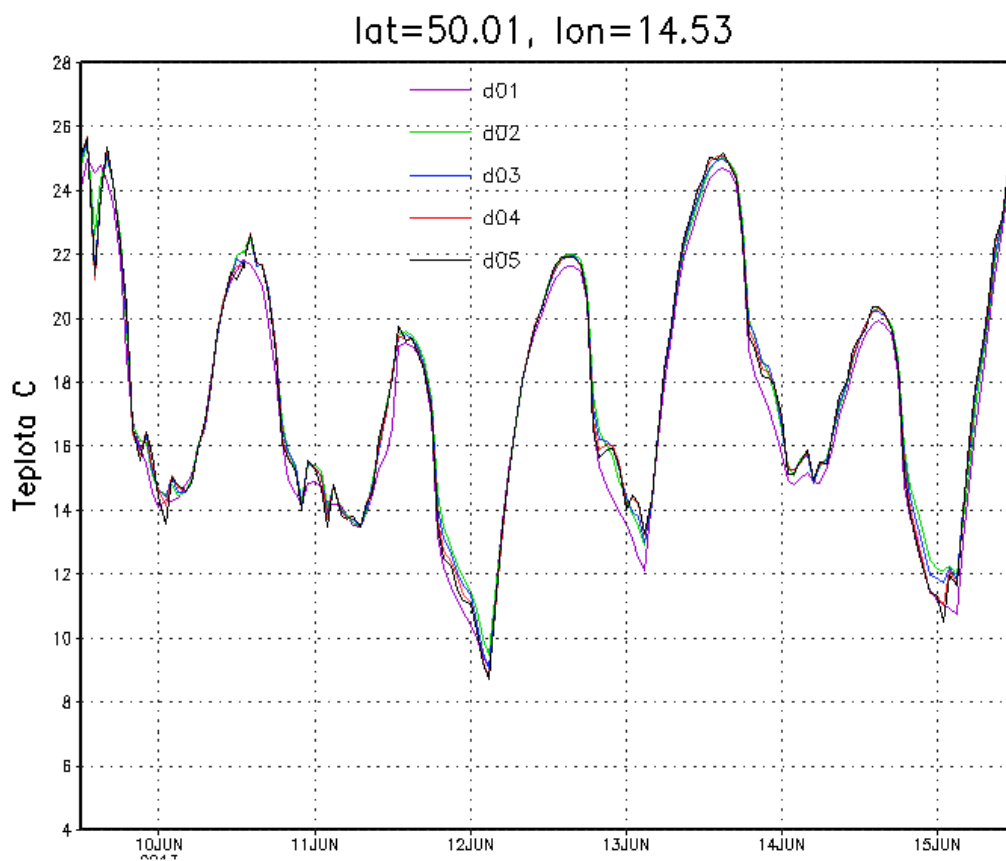
Obrázek 4.5: Průběh teploty pro Brdy (nahore) a les, srovnání pro různé parametrizace, [°C]



Obrázek 4.6: Průběh teploty pro pole (nahore) a centrum Prahy, srovnání pro různé parametrizace, [°C]



Obrázek 4.7: Průběh teploty pro Brdy (nahore) a les, srovnání hodnot z parametrizace LES pro různé domény, [°C]



Obrázek 4.8: Průběh teploty pro pole (nahore) a centrum Prahy, srovnání hodnot z parametrizace LES pro různé domény, [°C]

Průměrná teplota

Průměrná teplota byla pomocí CDO vypočtena zprůměrováním hodnot za celý čas simulace (viz začátek kapitoly 3). Výsledné hodnoty v nejmenší doméně (d05) pro všechny tři simulace jsou zobrazeny v obrázku 4.9. Na první pohled je zřejmé, že nejvýrazněji se odlišují výsledky parametrizace T , kde průměrná teplota na celé oblasti je přibližně o stupeň nižší než ve zbývajících dvou simulacích. Zajímavější výsledky dostaneme až porovnáme-li výsledky pro parametrizace ab a LES . Vidíme, že pro LES systematicky vychází nižší teplota pro centrální část města a vyšší teplota pro okraje města a jeho okolí.

Již dříve jsme v kapitole 2.2.1 zmiňovali tzv. *two-way nesting*, kdy kromě předávání informací z větších domén do menších dochází i zpětně k ovlivnění větších domén doménami vnořenými (viz Skamarock (2008)). Vliv tohoto nastavení můžeme pozorovat při srovnávání výsledků z parametrizace ab a LES , které se vzájemně liší pouze nastavením v doméně d05. Toto srovnání je zobrazeno v obrázku 4.10, kde srovnáváme data z d02, avšak pro větší přehlednost a viditelnější detaily pouze na oblasti odpovídající d04. Výsledky až z d02 srovnáváme proto, že v d01 nebyly kvůli zhlazení a nedostatečnému rozlišení rozdíly tak patrné. Rozdíly mezi ab a LES vidíme hlavně v místech s nejvyšší teplotou - pro LES i zde máme v oblasti města (tj. nahoře uprostřed) vyšší teplotu než pro ab .

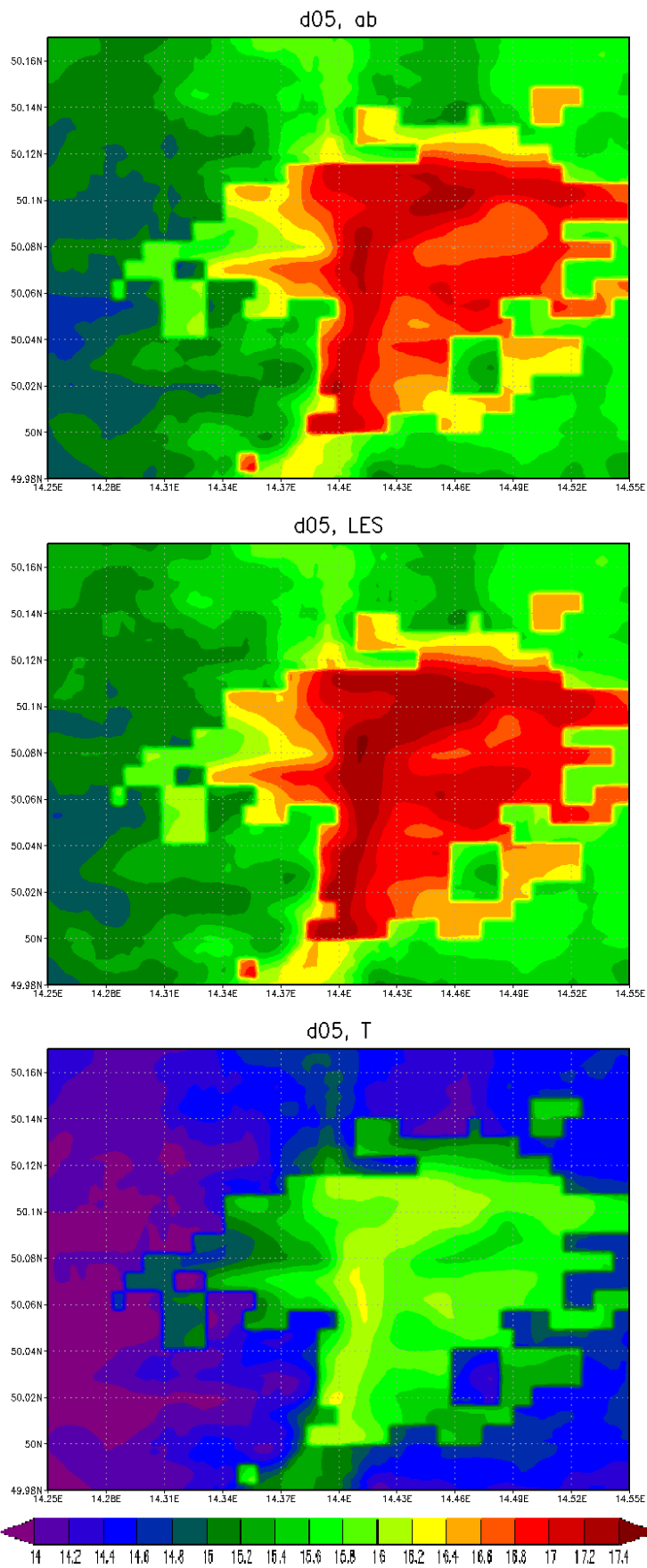
Hodnoty z parametrizace T jsou stejně jako v d01 zcela odlišné, jelikož se od zbývajících parametrizací liší nastavením ve všech doménách.

4.2.2 Potenciální teplota

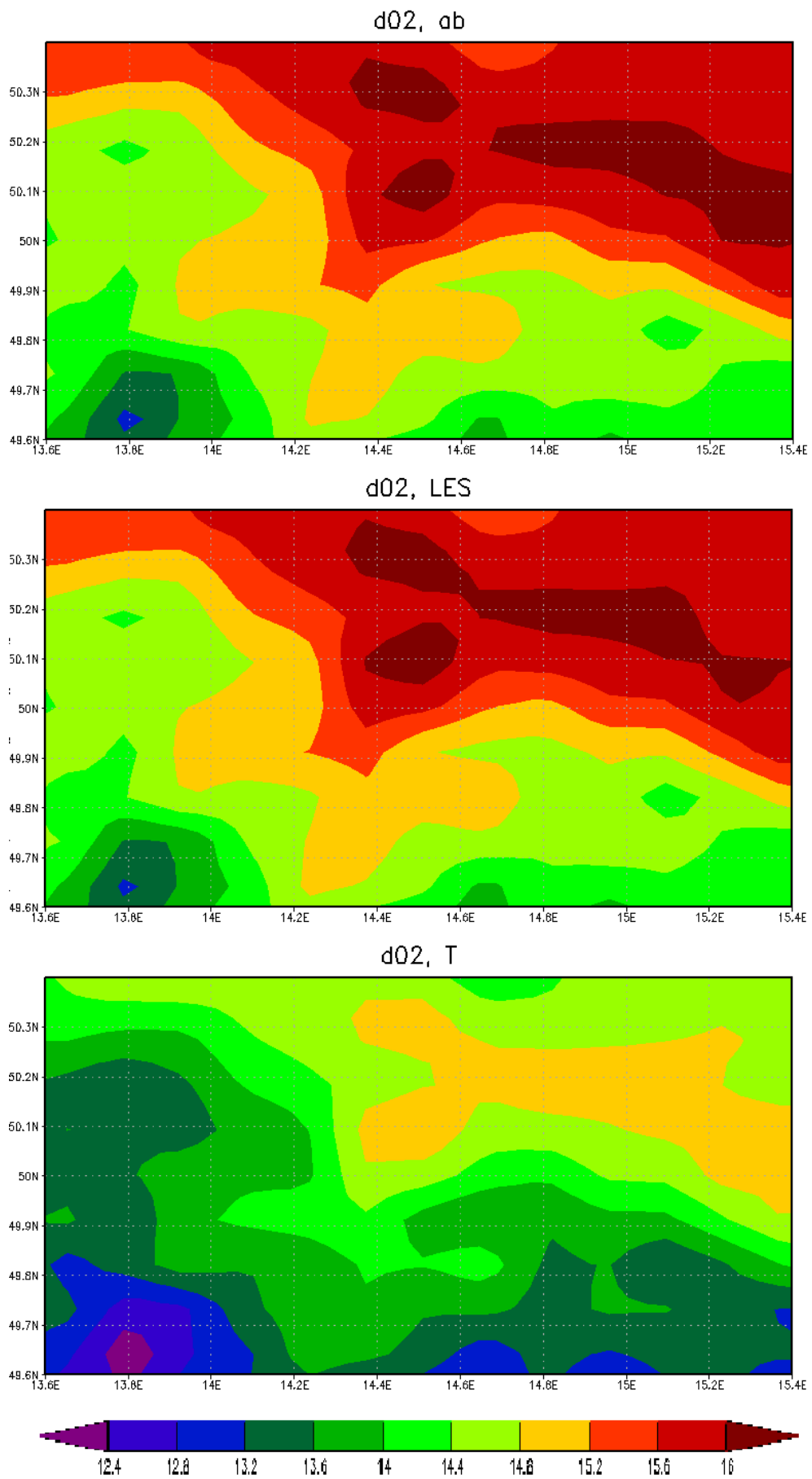
Rozdíly mezi parametrizacemi

V této podkapitole srovnáme výškový průběh potenciální teploty pro různé parametrizace ve všech dříve uvedených místech. Data pocházejí z 12.6. 12:00 a jsou zobrazena na obrázku 4.11. Průběh je znázorněn pouze pro pět hladin, protože chování ve velké výšce nás už příliš nezajímá a uvedením většího množství hladin by se podstatně zhoršila rozlišitelnost rozdílů mezi jednotlivými parametrizacemi. Za připomínku stojí fakt, že i přes způsob vykreslení nejsou hladiny ve skutečnosti ekvidistantní, protože WRF jako vertikální proměnnou používá hladiny hydrostatického tlaku kopírující zemský povrch, jak jsme již zmínili v kapitole 2.2.

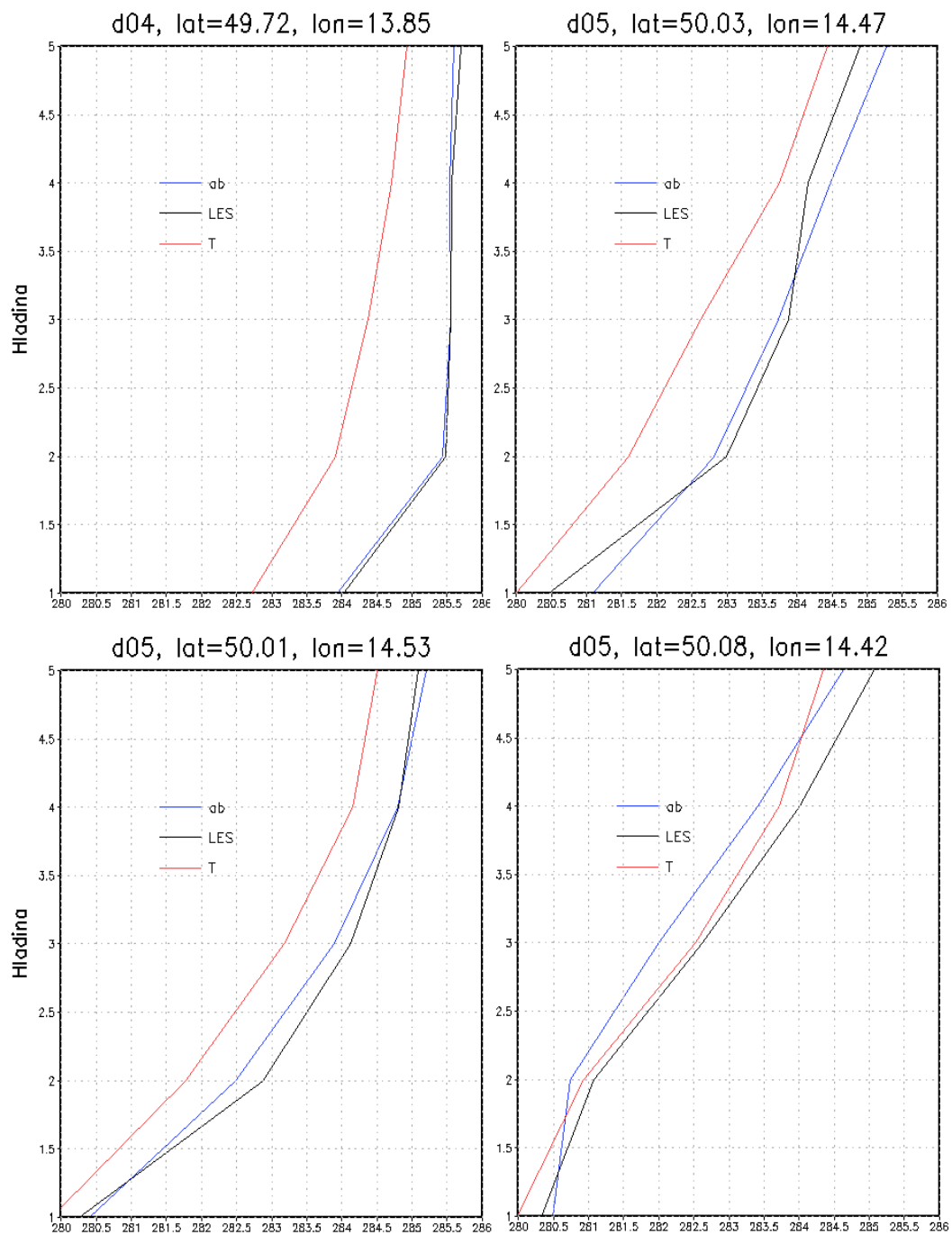
Ve srovnání vidíme, že stejně jako u průběhu teploty v kapitole 4.2.1, i zde se pro různá místa parametrizace chovají různě. V oblasti Brd, lesa a pole je teplota z T výrazně nižší, pro centrum města (vpravo dole) ale nikoliv. Hodnoty z ab a LES jsou pak pro Brdy (vlevo nahoře) téměř totožné. Pro les a pole (vpravo nahoře a vlevo dole) jsou hodnoty z LES nejprve vyšší než hodnoty z ab , potom na jisté části klesnou pod ab a nakonec zase vzrostou. Pro centrum Prahy (vpravo dole) jsou chování průběhů chaotičtější a hodnoty z T se v nejnižších hladinách nečekaně blíží LES více než ab .



Obrázek 4.9: Průměrná teplota ve 2 metrech v d05, [°C]



Obrázek 4.10: Průměrná teplota ve 2 metrech v d02, [°C]



Obrázek 4.11: Srovnání výškového průběhu potenciální teploty pro všechny parametrizace a čas 12.6. 12:00, [K]

Rozdíly mezi doménami

Stejně jako u teploty ve 2 metrech porovnáme i zde výsledky pro jednotlivé domény pouze pro *LES*. Data pocházejí opět z 12.6. 12:00. Na obrázku 4.12 vidíme, že chování průběhů z jednotlivých domén je opět na každém místě jiné. Nejmenší rozdíly jsou pro místo s povrchem pole (na obrázku vlevo dole) a velmi podobně vypadají i výsledky z různých domén pro les (vpravo nahoře). Rozdíly mezi Brdy (vlevo nahoře) a centrem Prahy (vpravo dole) mají opačný charakter, stejně jako tomu bylo u zmíněné teploty na obrázcích 4.7 a 4.8. V oblasti Brd dostáváme pro menší domény vyšší teplotu, pro vyšší hladiny ale tento rozdíl vymizí. V centru města pro menší domény dostáváme naopak nižší potenciální teplotu než v d01 a d02, přičemž ve vyšších doménách se závislosti opět sejdou a v nejnižších hladinách též dojde ke zmenšení tohoto rozdílu a závislosti se sobě alespoň z části přiblíží.

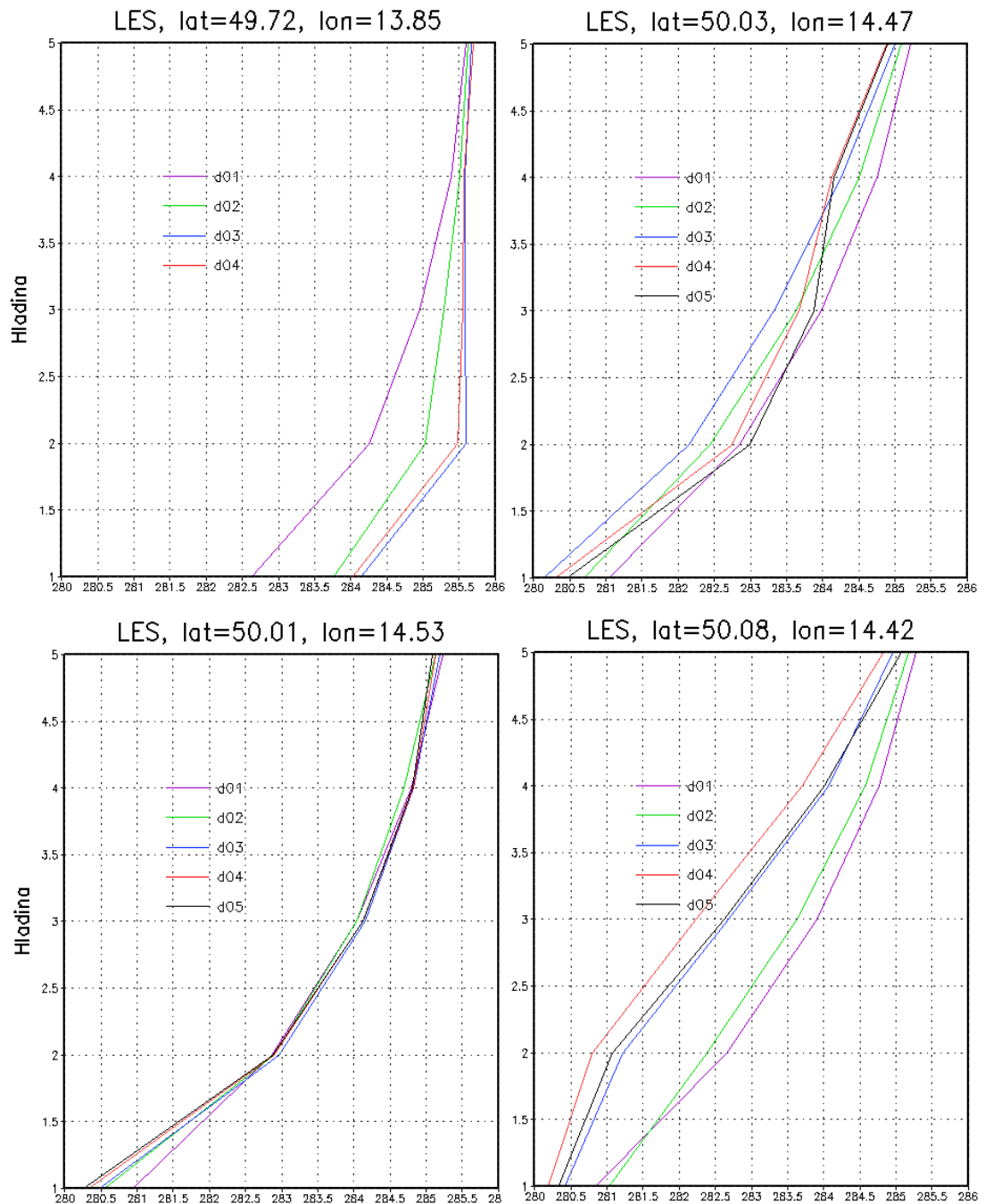
4.2.3 Vítr

Rychlost přízemního větru

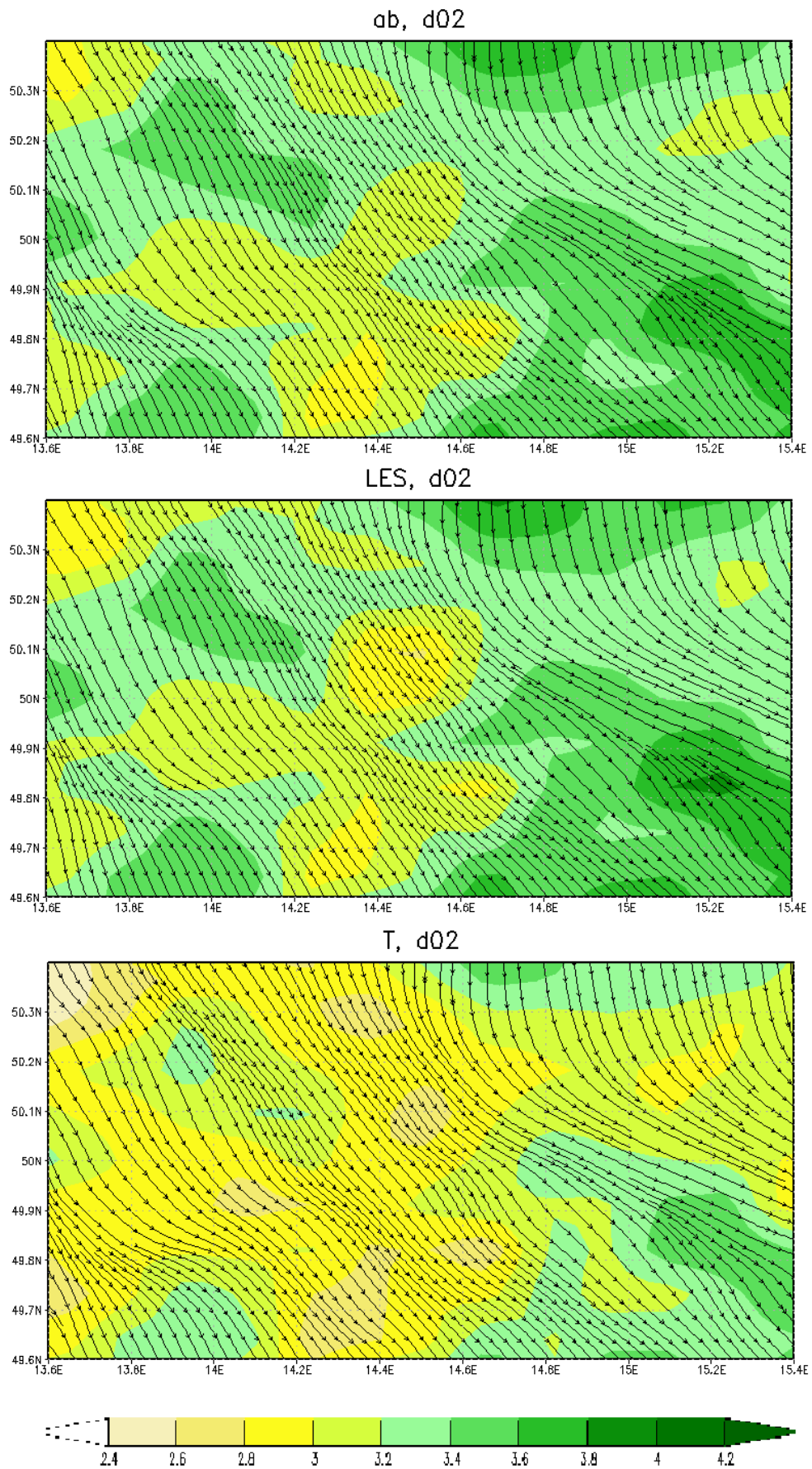
Přízemním větrem je vítr měřený ve výšce 10 metrů nad zemským povrchem, kde již je menší rušivý vliv místních překážek a terénu, viz eMS. Pro rychlost přízemního větru srovnáváme průměrné hodnoty za celé období pro všechny simulace. Na obrázku 4.13 stejně jako v kapitole 4.2.1 srovnáváme data z d02 na oblasti d04. Je zde opět patrný vliv *two-way nesting*, kdy parametrizace *LES* v d05 jako zpětně ovlivnila výsledky v d02 a způsobila v ní rozdíly mezi *ab* a *LES*. Parametrizace *T* zde poskytuje hodnoty přibližně o 1 *m/s* nižší než *ab* a *LES*. V d05 (viz obrázek 4.14) se ale průměrné hodnoty z *LES* od *ab* odchýlí a jsou naopak podobné *T*. Rozdíly mezi *ab* a *LES* jsou ale řádově pouze desetiny *m/s*, což pro oblast Prahy odpovídá i výsledkům v d02 na obrázku 4.13.

Rychlost větru v hladině 850 hPa

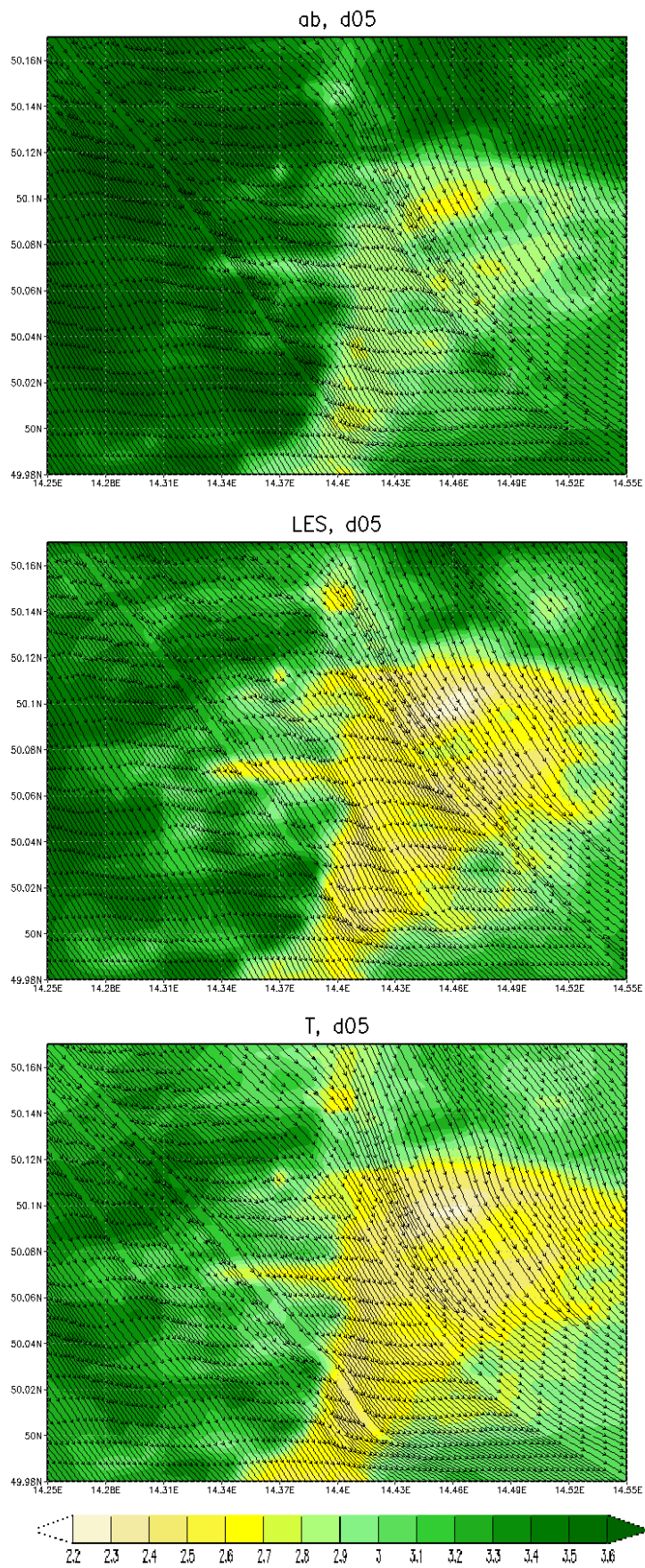
Pomocí programu ARWpost (viz Dudhia (2008)) jsme provedli interpolaci rychlosti větru do různých tlakových hladin. Kvůli množství dat srovnáme pouze hodnoty na hladině 850 *hPa* opět zprůměrované za celé období simulace. Na obrázku 4.15 ukazujeme rozdíl mezi parametrizacemi v d02 a na obrázku 4.16 v d05. Je zajímavé, že ačkoliv v předchozí kapitole při srovnání hodnot přízemního větru byly v doméně d05 velmi podobné výsledky pro parametrizace *LES* a *T*, nyní jsou opět hodnoty z parametrizace *T* výrazně odlišné a dle očekávání je větší podobnost (stejně jako např. u teploty v obrázku 4.9) mezi parametrizacemi *ab* a *LES*. Rozdíly mezi parametrizacemi se ale opět pohybují jen v řádu desetin *m/s*.



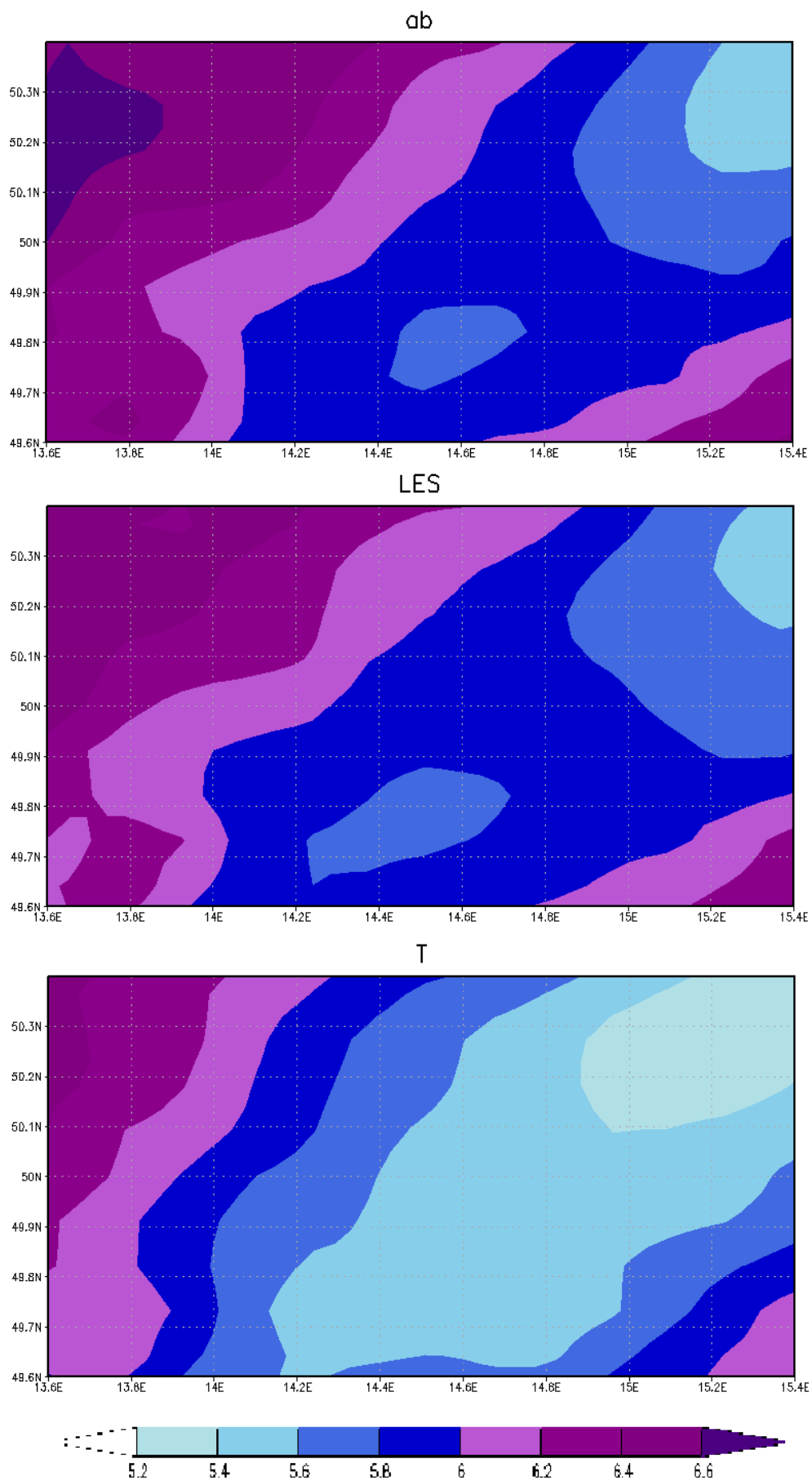
Obrázek 4.12: Srovnání výškového průběhu potenciální teploty v různých bodech pro parametrizaci LES a čas 12.6. 12:00, [K]



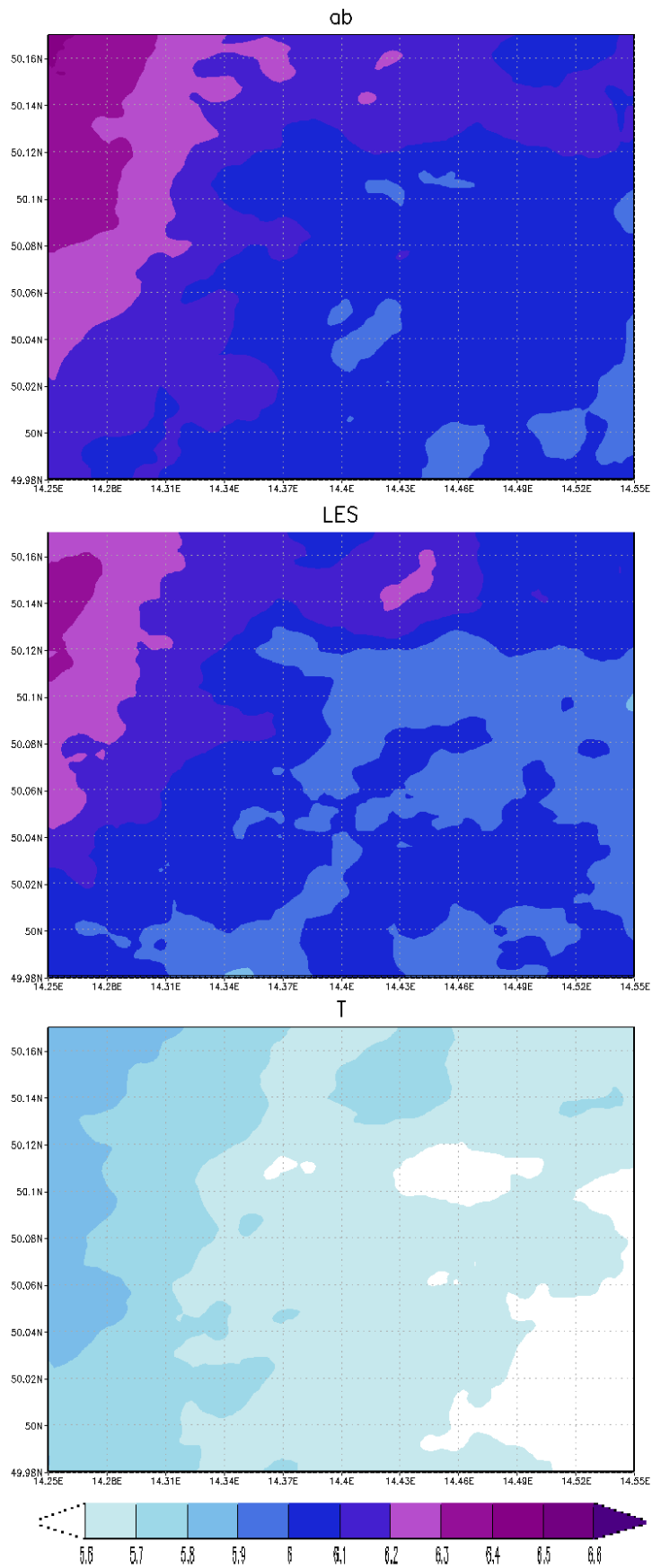
Obrázek 4.13: Průměrná rychlost přízemního větru v d02, [m/s]



Obrázek 4.14: Průměrná rychlost přízemního větru v d05, [m/s]



Obrázek 4.15: Průměrná rychlost větru na hladině 850 hPa v d02, [m/s]



Obrázek 4.16: Průměrná rychlost větru na hladině $850hPa$ v d05, [m/s]

Závěr

Proudění vazké tekutiny popisujeme pomocí Navier-Stokesových rovnic a Reynoldsovým číslem charakterizujeme chování proudící tekutiny, hlavně jedná-li se o proudění laminární nebo turbulentní. S pomocí numerické matematiky a výpočetní techniky můžeme turbulentní proudění počítačově simulovat numerickými modely. Mezi nepoužívanější metody při tomto simulování patří DNS, RANS a LES, lišící se principy a například výpočetní náročností.

Numerický model předpovědi počasí je tvořen dynamickým jádrem, souborem parametrizací, modelem zemského povrchu a schématem asimilace meteorologických dat. Pro provádění simulací je nutné mít k dispozici okrajové a počáteční podmínky buď z reálných dat nebo z jiného modelu. Dále je důležité například vybrat vhodné kartografické zobrazení, aby docházelo k co nejmenšímu zkreslení oblasti.

Dynamické jádro modelu vychází ze zákonů zachování hmoty, energie a hybnosti. Parametrizace pak v modelu vyjadřují změny stavu atmosféry způsobené vnějšími vlivy a používají se pro procesy menší než je krok horizontální sítě.

Jedním z atmosférických numerických modelů je model WRF. Díky rozsáhlé dokumentaci a uživatelské základně je tento model ideální pro seznámení se s numerickým modelováním.

Při provádění simulací nejprve definujeme oblasti, na kterých budeme simulace provádět, podle použitých dat určíme i simulovaný časový úsek a nastavíme parametrizace.

Po provedení simulace jsme nejprve výsledky porovnali s měřenými daty z gridované databáze E-OBS. Při srovnání s těmito daty jsme viděli, že výsledky z modelu na doméně d01 s rozlišením 30 km se od měřených dat odchyľují - pro tlak na hladině moře o 2 – 6 hPa, pro průměrnou denní teplotu o 1 – 2° C. Toto srovnání je důležité hlavně proto, že vnořená doména je na okrajích řízena výsledky vždy z příslušné větší domény. Jsou-li tedy v hlavní simulaci na největší doméně chyby, jsou jimi menší domény již od začátku ovlivněny

Srovnání výsledků pro jednotlivé parametrizace ukazuje, že pro jiné proměnné mohou být lepší jiné parametrizace. V našem případě máme u většiny ukázaných proměnných jasnou podobnost mezi výsledky z parametrizace *ab* a *LES*, ale u průměrné rychlosti přízemního větru v d05 si najednou více odpovídají výsledky pro *LES* a *T*. Při provádění simulací nastavujeme parametrizace podle shody modelu s vybranými měřenými daty, vidíme ale, že při vyladění modelu na určitých proměnných se mohou zhoršit výsledky pro jiné proměnné. Je tedy potřeba vždy mít na paměti jaké veličiny nás zajímají a podle toho nastavit parametrizaci.

Pro budoucí simulace v této oblasti by bylo vhodné porovnat více různých parametrizací, abychom již v doménách s nižším rozlišením dosáhli výsledků, které by více odpovídaly reálným hodnotám. V menších doménách se pak můžeme pokusit výsledky vylepšit podrobnějším rozlišením, protože ve srovnání s již provedenými simulacemi (viz Talbot (2012)) byl zde použitý horizontální krok sítě

několikanásobně větší.

V zájmu snížení výpočetní náročnosti by se v budoucnu nabízela možnost zvážit použití *two-way nesting*, jelikož například Talbot (2012) uvádí, že toto nastavení nepřineslo žádné výrazné zlepšení.

Seznam použité literatury

- ARYA, S. P. (2001). *Introduction to Micrometeorology*. Second Edition. Academic Press. ISBN 0-12-059354-8.
- BAŤKA, M. (2014). *Předpověď vývoje atmosféry objektivními metodami*.
- BARNEY. Message Passing Interface (MPI). URL <https://computing.llnl.gov/tutorials/mpi/>. Poslední přístup: 10.7. 2017.
- BENEŠOVÁ, S. (2014). DES modelování turbulence. *diplomová práce*.
- DUDHIA, J. A. K. (2008). WRF ARW OnLine Tutorial. (1). URL <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/index.htm>. Poslední přístup: 2.7. 2017.
- EMS. Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS). URL <http://slovník.cmes.cz/>. ČMeS, Poslední přístup: 8.7. 2017.
- HAYLOCK, M. A. K. (2008). A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res (Atmospheres)*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201.
- KARLICKÝ, J. (2010). Model wrf pro předpověď počasí. *bakalářská práce*.
- NOVÁKOVÁ, T. (2016). Testy a validace modelu WRF pro předpověď počasí. *bakalářská práce*.
- SKAMAROCK, W. A. K. (2008). A Description of the Advanced Research WRF, Version 3. URL http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf. Poslední přístup: 13.7. 2017.
- STULL, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers. ISBN 90-277-2768-6.
- TALBOT, C. A. K. (2012). Nested Mesoscale Large-Eddy Simulations with WRF: Performance in Real Test Cases. URL <http://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/JHM-D-11-048.1>. Poslední přístup: 13.7. 2017.
- URUBA, V. (2009). *Turbulence*. URL http://www.it.cas.cz/~uruba/docs/Aero/Turbulence_45.pdf.
- VAN DEN BESSELAAR, E. A. K. (2011). A European Daily High-resolution Observational Gridded Data set of Sea Level Pressure. *J. Geophys. Res.*, 116, D11110, doi:10.1029/2010JD015468.
- WANG, W. A. K. (2016). *User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3.8*. URL http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.8/contents.html. Poslední přístup: 13.7. 2017.

Seznam obrázků

2.1	Princip Lambertova konformního zobrazení, převzato z Skamarock (2008)	9
2.2	Průběh souřadnice η nad zemským povrchem, převzato z Skamarock (2008)	11
2.3	Ilustrace horizontální sítě dle Arakawova schématu C-sítě pro oblast a vnořenou oblast s menším krokem sítě. Plné čáry tvoří síť pro větší oblast, přerušované pro oblast vnořenou. U a V značí složky rychlosti, θ značí termodynamické veličiny. Převzato z Skamarock (2008)	12
3.1	Poloha domén d02 a d03. Podkladová mapa byla převzata z https://mapy.cz	14
3.2	Poloha domén d04 a d05. Podkladová mapa byla převzata z https://mapy.cz	15
3.3	Srovnání topografie pro d01 až d05, [m]	16
4.1	Srovnání hodnot tlaku na hladině moře v pátý, desátý a patnáctý den simulace pro <i>LES</i> a data z databáze E-OBS, [hPa]	20
4.2	Srovnání průměrné denní teploty v d01 a d05 pro bod odpovídající centru Prahy mezi jednotlivými simulacemi a daty z databáze E-OBS	21
4.3	Srovnání průměrné denní teploty v pátý, desátý a patnáctý den simulace pro <i>LES</i> a data z databáze E-OBS, [°C]	23
4.4	Výškový průběh teploty T a potenciální teploty θ na Libuši. T_{obs} a θ_{obs} značí reálná data, T_{wrf} a θ_{wrf} data ze simulací. Nahoře jsou data ze simulace <i>ab</i> , uprostřed z <i>LES</i> a dole z T	24
4.5	Průběh teploty pro Brdy (nahore) a les, srovnání pro různé parametrizace, [°C]	26
4.6	Průběh teploty pro pole (nahore) a centrum Prahy, srovnání pro různé parametrizace, [°C]	27
4.7	Průběh teploty pro Brdy (nahore) a les, srovnání hodnot z parametrizace <i>LES</i> pro různé domény, [°C]	28
4.8	Průběh teploty pro pole (nahore) a centrum Prahy, srovnání hodnot z parametrizace <i>LES</i> pro různé domény, [°C]	29
4.9	Průměrná teplota ve 2 metrech v d05, [°C]	31
4.10	Průměrná teplota ve 2 metrech v d02, [°C]	32
4.11	Srovnání výškového průběhu potenciální teploty pro všechny parametrizace a čas 12.6. 12:00, [K]	33
4.12	Srovnání výškového průběhu potenciální teploty v různých bodech pro parametrizaci <i>LES</i> a čas 12.6. 12:00, [K]	35
4.13	Průměrná rychlost přízemního větru v d02, [m/s]	36
4.14	Průměrná rychlost přízemního větru v d05, [m/s]	37
4.15	Průměrná rychlost větru na hladině 850 hPa v d02, [m/s]	38
4.16	Průměrná rychlost větru na hladině 850hPa v d05, [m/s]	39

Seznam tabulek

3.1	Velikost horizontálního kroku v jednotlivých doménách	14
3.2	Rozdíly v nastavení mezi jednotlivými parametrizacemi	17

Přílohy

Nastavení parametrizace pro simulaci *ab*

```
&time_control
run_days = 0,
run_hours = 60,
run_minutes = 0,
run_seconds = 0,
start_year = 2013, 2013, 2013, 2013, 2013,
start_month = 05, 05, 05, 05, 05,
start_day = 28, 28, 28, 28, 28,
start_hour = 00, 00, 00, 00, 00,
start_minute = 00, 00, 00, 00, 00,
start_second = 00, 00, 00, 00, 00,
end_year = 2013, 2013, 2013, 2013, 2013,
end_month = 05, 05, 05, 05, 05,
end_day = 30, 30, 30, 30, 30,
end_hour = 12, 12, 12, 12, 12,
end_minute = 00, 00, 00, 00, 00,
end_second = 00, 00, 00, 00, 00,
interval_seconds = 21600
input_from_file = .true.,.true.,.true.,.true.,.true.,
history_interval = 60, 60, 60, 60, 60,
frames_per_outfile = 1000, 1000, 1000, 1000, 1000,
restart = .false.,
restart_interval = 720,
io_form_history = 2
io_form_restart = 2
io_form_input = 2
io_form_boundary = 2
debug_level = 0
/
&domains
time_step = 90,
time_step_fract_num = 0,
time_step_fract_den = 1,
max_dom = 5,
e_we = 173, 148, 142, 121, 101
e_sn = 123, 118, 97, 94, 101
e_vert = 39, 39, 39, 39, 39
p_top_requested = 5000,
num_metgrid_levels = 27,
num_metgrid_soil_levels = 4,
dx = 30000, 10000, 3333.33, 1111.11, 222.22
dy = 30000, 10000, 3333.33, 1111.11, 222.22
grid_id = 1, 2, 3, 4, 5,
```

```

parent_id = 0, 1, 2, 3, 4,
i_parent_start = 1, 63, 52, 42, 45,
j_parent_start = 1, 37, 57, 42, 40,
parent_grid_ratio = 1, 3, 3, 3, 5,
parent_time_step_ratio = 1, 3, 3, 3, 5,
feedback = 1,
smooth_option = 0
/
&physics
mp_physics = 8, 8, 8, 8, 8,
ra_lw_physics = 4, 4, 4, 4, 4,
ra_sw_physics = 4, 4, 4, 4, 4,
radt = 15, 15, 10, 10, 10,
sf_sfclay_physics = 1, 1, 1, 1, 1,
sf_surface_physics = 2, 2, 2, 2, 2,
bl_pbl_physics = 1, 1, 1, 1, 1,
bldt = 0, 0, 0, 0, 0,
cu_physics = 3, 3, 0, 0, 0,
cudt = 0, 0, 0, 0, 0,
isfflx = 1,
ifsnow = 1,
icloud = 1,
surface_input_source = 1,
num_soil_layers = 4,
num_land_cat = 28,
sf_urban_physics = 0, 0, 0, 0, 0,
/
&fdda
/
&dynamics
w_damping = 0,
diff_opt = 1, 1, 1, 1, 1,
km_opt = 4, 4, 4, 4, 4,
diff_6th_opt = 0, 0, 0, 0, 0,
diff_6th_factor = 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12,
base_temp = 290.
damp_opt = 0,
zdamp = 5000., 5000., 5000., 5000., 5000.,
dampcoef = 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2,
khdif = 0, 0, 0, 0, 0,
kvdif = 0, 0, 0, 0, 0,
non_hydrostatic = .true., .true., .true., .true., .true.,
moist_adv_opt = 1, 1, 1, 1, 1,
scalar_adv_opt = 1, 1, 1, 1, 1,
/
&bdy_control
spec_bdy_width = 5,
spec_zone = 1,

```

```
relax_zone = 4,  
specified = .true., .false.,.false., .false., .false.,  
nested = .false., .true., .true., .true., .true.,  
/  
&grib2  
/  
&namelist_quilt  
nio_tasks_per_group = 0,  
nio_groups = 1,  
/
```