



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Leontína Brodnianska

Emise oxidů dusíku z blesků

Katedra fyziky atmosféry

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Mgr. Peter Huszár, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

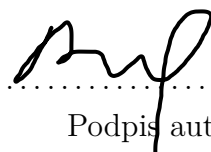
Studijní obor: Fyzika

Praha 2024

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

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 ..Prahe..... dne ..2.5.2024....



.....
Podpis autora

Som veľmi vďačná Doc. Petrovi Huszárovi za neoceniteľné vedenie a vytrvalú podporu počas písania tejto práce. Vaše odborné znalosti a podnety mali veľký význam pri tvorbe tejto práce.

Název práce: Emise oxidů dusíku z blesků

Autor: Leontína Brodnianska

Katedra: Katedra fyziky atmosféry

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Mgr. Peter Huszár, Ph.D., Katedra fyziky atmosféry

Abstrakt: Táto práca sa zaoberá bleskovou aktivitou a jej úlohou pri produkcii emisií oxidov dusíka (NO_x) pomocou numerického modelového prístupu. Blesk je významným zdrojom NO v troposfére, prispieva približne 10 % ku globálnym ročným emisiám NO. Prostredníctvom kombinácie údajov z pozorovaní a modelových simulácií sa skúmajú priestorové a časové zmeny konvektívnej dostupnej potenciálnej energie (CAPE), hustoty bleskov a emisií NO z bleskov (LNO). Modelové simulácie zachytávajú aj priemerný vertikálny profil za merané obdobie emisií LNO pre nami vybrané podoblasti celej domény, kde každá oblasť má iné klíma, iné konvektívne charakteristiky a teda aj odlišné rozloženie emisií. Porovnania medzi pozorovaniami a modelovými vstupmi a výstupmi ukazujú rozdielne zákonitosti v hustote bleskov, CAPE a emisiách NO_x , zdôrazňujúc potrebu presnejšieho opisu konvektívnej dynamiky v atmosférických modeloch. Zistenia zdôrazňujú potrebu zlepšenia metód parametrizácie bleskov v atmosférických modeloch.

Klíčová slova: blesk oxid dusíku emise modelování

Title: Emission of oxides of nitrogen from lightning

Author: Leontína Brodnianska

Department: Department of atmospheric physics

Supervisor: Doc. Mgr. Peter Huszár, Ph.D., Department of atmospheric physics

Abstract: This thesis investigates lightning activity and its role in the production of nitrogen oxide (NO_x) emissions using a numerical modelling approach. Lightning is a significant source of NO in the troposphere, contributing approximately 10 % to global annual NO emissions. Through a combination of observational data and model simulations, the spatial and temporal variations of convective available potential energy (CAPE), lightning density and lightning NO emissions (LNO) are investigated. The model simulations also capture the mean-vertical profile over the measured period of LNO emissions for our selected sub-regions of the whole domain, where each region has a different climate, different convective characteristic hence different distribution of emissions. Comparisons between observations and model inputs and outputs reveal different patterns in lightning density, CAPE, and NO_x emissions, highlighting the importance of more accurate representation of convective dynamics in atmospheric models. The findings emphasize the need for improved lightning parameterization methods in atmospheric models.

Keywords: lightning nitrogen oxides emission modelling

Obsah

Úvod	3
1 Blesky	5
1.1 Oblaky Cumulonimbus (Cb)	5
1.2 Základná teória vzniku bleskov	6
1.2.1 Globálny elektrický obvod	7
1.2.2 Nábojová separácia vnútri oblakov	8
1.2.3 Blesky medzi oblakom a zemou	9
2 Emisie NO_x z bleskov	12
2.1 Vznik NO _x z bleskov (LNO _x)	12
2.2 Potenciálny vplyv LNO _x na chemizmus atmosféry	13
2.3 Možnosti modelovania emisii LNO _x	13
2.3.1 Výška vrcholov oblakov (CTOP)	14
2.3.2 Konvektívna dostupná potenciálna energia (CAPE)	14
2.3.3 Hmotnostný tok výstupných konvektívnych pohybov (UMF)	15
2.3.4 Intenzita konvektívnych zrážok (CPR)	15
2.3.5 Kombinácia CAPE a CTOP	15
2.3.6 Produkcia NO na jeden blesk	16
3 Použitá metóda	17
3.1 Model WRF	17
3.2 Model Inox2.0	17
3.2.1 Blesky nad pevninou	17
3.2.2 Blesky nad oceánom	18
3.2.3 Výsledky modelu	18
3.3 Experimentálne nastavenia	18
3.4 Použité dáta	19
3.4.1 Pozorovania CAPE	19
3.4.2 Pozorovanie hustoty bleskov - ATDnet	20
4 Výsledky	21
4.1 Emisie LNO	21
4.1.1 Plošné rozloženie	21
4.1.2 Vertikálne rozloženie	22
4.1.3 Časový priebeh	24
4.1.4 Porovnanie s antropogennými emisiami	26
4.2 Modelové CAPE a zrovnanie s meraním	27
4.2.1 Plošné rozloženie	27
4.2.2 Mesačný cyklus - sondážne merania	30
4.3 Hustota bleskov a zrovnanie s meraním	31
4.3.1 Plošné rozloženie	31
4.3.2 Denný cyklus	32
4.3.3 Mesačný cyklus	33

4.4	Návrhy na úpravu modelu Inox2.0	34
4.4.1	Hustota bleskov	34
4.4.2	Emise LNO	36
	Záver	38
	Literatura	39
	Seznam obrázků	41
	Seznam tabulek	42
	Seznam použitých zkratk	43

Úvod

Blesk je prírodný jav, ktorý vzniká v dôsledku oddelenia a akumulácie opačného náboja v búrkových oblakoch Cumulonimbus (Cb). Tento elektrický jav sa prejavuje ako výmena nábojov buď medzi oblakmi (cloud-to-cloud) alebo medzi oblakom a zemou (cloud-to-ground). Blesky sa často vyskytujú počas rôznych prírodných udalostí ako sú búrky, sopečné erupcie, lesné požiare a hurikány (2). Ich vplyv na atmosféru je rozmanitý, ovplyvňujú chemické zloženie atmosféry, sú hlavnou príčinou neantropogénnych lesných požiarov, a zároveň vytvárajú vysokoenergetické žiarenie, ktoré má dopad na atmosférickú elektrinu ako aj na šírenie rádiových vln (3).

Blesky sa väčšinou vyskytujú v atmosférických oblakoch druhu Cb a častejšie sa objavujú nad pevninou než nad oceánom, pretože tu je silnejšie priťahovanie opačných nábojov (2). Mnohé pozorovania bleskovej aktivity naznačujú, že kľúčovú úlohu pri separácii náboja v búrkovom oblaku Cb zohrávajú vystupujúce konvektívne pohyby (updraft), ktoré ovplyvňujú kolízie snehových krúp a ľadových kryštálov vnútri oblaku (7). Oblaky druhu Cb vznikajú procesom nazývaným konvekcia, často z malých kopovitých oblakov vo vlhkom vzduchu nad horúcim povrchom, lebo je tu lepšia príležitosť pre vznik vertikálnej nestability. Konvekcia je vertikálny prenos tepla a vlhkosti v atmosfére, najmä prostredníctvom výstupných a zostupných konvektívnych pohybov v nestabilnej atmosfére. (2)

Vizuálne reprezentácie hustoty bleskov, ktoré zohľadňujú priestorové a časové charakteristiky, sú významné, pretože blesky majú priamy vplyv na chemické procesy v atmosfére. Modely chemického zloženia atmosféry sú kľúčové pre pochopenie rôznych meteorologických javov, ako je frekvencia a rozloženie extrémnych zrážok, a pre hodnotenie rizík a nebezpečenstiev (3). Modely, ktoré poskytujú priestorovo-časové odhady hustoty bleskov, využívajú parametrizáciu založenú na meteorologických premenných, ako sú napríklad výška vrcholu oblaku (CTOP), hmotnostný tok výstupných konvektívnych pohybov (UMF), intenzita konvektívnych zrážok (CPR) a konvektívna dostupná potenciálna energia (CAPE) (7).

CTOP sa často označuje ako výška vrcholu oblaku nad miestnym terénom alebo nad hladinou mora. Môže byť tiež definovaná ako vertikálna vzdialenosť od základne oblaku po jeho vrchol. Častejšie sa označuje ako hrúbka alebo hĺbka oblaku. (11)

UMF je vertikálny transport hmoty pre pole cumulových oblakov, ktorý je daný súčinom hustoty vzduchu a vertikálnej rýchlosti. UMF je rozdiel medzi výstupným hmotnostným tokom a zostupným hmotnostným tokom. Výstupný označuje vektorovú zložku, ktorá je kladná, keď smeruje nahor (záporná smerom nadol). (12)

CPR je akumulovaný úhrn zrážok vydelený dĺžkou obdobia akumulácie, ktorá závisí od získaných údajov. Pre tento parameter sú to dažďové a snehové zrážky, ktoré spadnú na zemský povrch. (13)

CAPE je celková práca, ktorú by vztlaková sila pôsobiaca smerom nahor (kladná) vykonala na balík vzduchu, ak by stúpala vertikálne celou atmosférou. Kladné CAPE spôsobí, že balík vzduchu stúpa, zatiaľ čo záporné CAPE spôsobí, že balík vzduchu klesá. Nenulová hodnota CAPE je indikátorom atmosférickej

nestability v danej vrstve atmosféry a to je nevyhnutnou podmienkou pre vznik oblakov Cb a búrky. (15)

Okrem toho je blesk kľúčovým zdrojom oxidu dusnatého (NO) v troposfére. Odhaduje sa, že tvorí približne 10 % globálneho ročného zdroja NO. Blesk je hlavným zdrojom NO priamo vo voľnej troposfére. Oxidáciou NO vzniká NO_2 a ich súčet sa označuje ako NO_x (5). Bleskové NO_x (LNO_x) majú neúmerne veľký vplyv na chemické zloženie hornej troposféry, čiastočne v dôsledku dlhšej životnosti NO_x v strednej a hornej troposfére narozdiel od povrchovej vrstvy. Pri modelových simuláciách sú dôležité odhady veľkosti zdroja LNO_x a jeho vertikálne a priestorové rozloženie. Kvôli ich vplyvu je nutné ich zahrnúť do chemicko-transportného modelovania. Sú naviazané väčšinou na numerické modely počasia a regionálne klimatické modely, preto je dôležité mať možnosť počítať emisie z LNO_x na základe dát z numerických modelov. S cieľom získať simulácie LNO_x vo veľkorozmernom trojrozmernom modeli sa zdroj LNO_x často parametrizuje ako funkcia meteorologických premenných citlivých na konvekciu, ktoré môžeme vidieť vyššie vypísané. (7)

Táto práca sa pokúša kvantifikovať dlhodobé emisie LNO_x pre desať ročné obdobie pre oblasť strednej Európy ako jedna z prvých takýchto štúdií u nás na základe meteorologických údajov z regionálneho klimatického modelu práve pomocou hodnôt vyššie uvedených veličín diagnostikovaných z výstupov modelu. Práca tiež navrhuje možné cesty vylepšenia použitého modelu emisií LNO_x na základe porovnaní s pozorovanými dátami.

1. Blesky

Tvorba bleskov je úzko spojená s oblakmi druhu Cumulonimbus, preto sa na začiatku tejto kapitole venujeme práve tvorbe a charakteristikám tohoto druhu oblaku. V ďalších podsekciiach sa venujeme tvorbe blesku.

1.1 Oblaky Cumulonimbus (Cb)

Oblak je súhrn častíc kvapalnej vody alebo ľadových kryštálikov, prípadne ich kombinácia, vznášajúcich sa vo vzduchu. Na to, aby bol oblak viditeľný, musia byť častice oblaku v dostatočne veľkej koncentrácii. (8)

Základná klasifikácia oblakov sa delí na 10 druhov, viz. (obr. 1.1). Mená základných oblačných druhov sú Cirrus, Cirrocumulus, Cirrostratus, Altopcumulus, Altostratus, Stratocumulus, Stratus, Nimbostratus, Cumulus, Cumulonimbus. Jednotlivé druhy oblakov sa dajú rozdeliť ďalej podľa výšky výskytu nad zemským povrchom do takzvaných výškových poschodí. V tomto rozdelení patria cirovité oblaky (Cirrus, Cirrocumulus, Cirrostratus) do najvyššieho poschodia. Altopcumulus a Altostratus do stredného poschodia a Stratus, Stratocumulus a Cumulus do nízkeho poschodia. U ostatných druhov oblakov nie je priradenie jednoznačné. Je oveľa spoľahlivejšie určiť zaradenie do poschodí podľa výšky základne, hlavne u oblakov s veľkým vertikálnym rozsahom ako je Cumulonimbus, ktorý spolu s Nimbostratom bývajú radené do nízkeho poschodia.

Táto práca je zameraná na skupinu cumulových oblakov, presnejšie na Cumulonimbus (Cb). V skutočnosti sa cumulové oblaky tvoria v dôsledku konvekcie, t.j. vertikálny prenos tepla a vlhkosti v atmosfére, najmä prostredníctvom výstupných a zostupných konvektívnych pohybov v nestabilnej atmosfére. Výstupné konvektívne pohyby súvisia s vertikálnym rozložením hustoty vzduchu, ktoré môžu za určitých podmienok podporovať pohyb vzduchových častíc zo spodných výškových hladín smerom nahor. Zostupné pohyby kompenzujú výstup vzduchu a v niektorých prípadoch môžu zosilniť v súvislosti s vypadávaním zrážok.

V atmosfére je stabilita alebo nestabilita podmienená najmä vertikálnym teplotným gradientom. Preto sa cumulové oblaky často označujú ako konvektívne oblaky, kde ich vertikálny rozsah je daný tzv. hĺbkou konvekcie. Konvektívne oblaky však vznikajú v nestabilnom vzduchu v dôsledku vztlaku, lebo výstupné konvektívne pohyby prebiehajú vlivom vztlakovej sily, ktorá pôsobí smerom nahor, ak je hustota daného objemu vzduchu menšia ako hustota vzduchu v jeho okolí. Príčinou poklesu hustoty je ohriatie vzduchu a horizontálne nerovnomerné rozloženie teploty. Stačí si len uvedomiť, že teplejší vzduch nad prehriatym povrchom je ľahší a vystupuje nahor. (9)

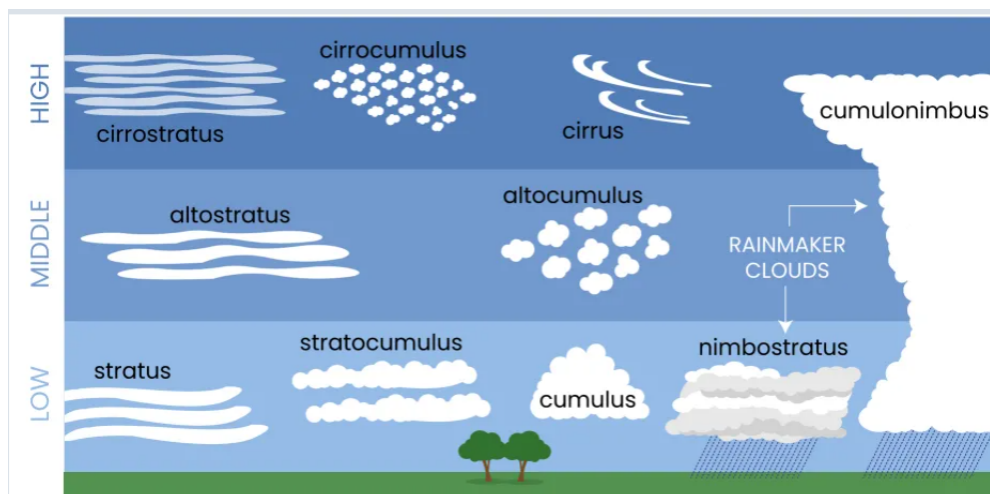
Príkladom cumulového oblaku je Cumulus humilis (Cu hum). Cumulus humilis je najmenší oblak z rodu Cumulus s vertikálnym rozsahom menej ako 1 km. Môže prekonať 'capping inversion', t.j. vrstva stabilného vzduchu/inverzie, ktorá bráni rozvoju búrok, a vyvinúť sa do o niečo vyššieho Cumulus congestus (Cu con), ak je atmosféra nad inverziou nestabilná. K tomuto rastu dochádza v priebehu dňa, ak Slnko naďalej zohrieva povrch, čo vedie k tepelne indukovaným výstupným pohybov. Cumulus congestus môžu vytvárať výdatné zrážky, najmä v trópoch.

Cumulus congestus sa môže ďalej rozvinúť do Cumulonimbu (Cb), ak sa atmo-

sféra stane ešte nestabilnejšou a oblak sa rozšíri dostatočne vysoko, kde sa tvoria ľadové kryštáliky. Časť vztlaku v Cumulonimboch pochádza z mrznutia kvapiek vody v oblaku na ľadové kryštáliky a s tým spojeného uvoľňovania latentného tepla, ktoré ohrieva oblak vzhľadom na jeho okolie, a tým spôsobuje ďalší pohyb smerom nahor. Keď Cb dosiahne teplotnú inverziu tropopauzy, t.j. tepelná inverzia 0,2 stupňa na 100 metrov, ďalšie stúpanie zastaví stabilná stratifikácia, t.j. teplotné zvrstvenie stratosféry. To spôsobuje sploštenie vrcholov a horizontálne rozprestretie oblaku, čo vedie k formovaniu takzvanej kovadliny. Oblaky Cumulonimbus, v ktorých sa vytvorila kovadlina, sa vyznačujú oblasťou aktívnej konvekcie. (8)

To nás privádza k definícii oblaku Cumulonimbu (Cb):

Cb je mohutný, hustý oblak veľmi značného vertikálneho rozsahu pripomína horu alebo obrovskú vežu, je zakončený vrcholom, ktorý je rozšírený do podoby kovadliny. Pod veľmi tmavou základňou oblaku sa často vyskytujú nízke roztrhané oblaky, ktoré môžu alebo nemusia s oblakom súvisieť a tiež sa tu vyskytujú zrážky. Je to zrážkový oblak, ktorý obsahuje častice kvapalnej vody aj ľadu. Je spojený so zrážkami vo forme prehánok, privalových zrážok a krupobitia. Sú pre neho charakteristické bleskové výboje. Obvyklý je výskyt aj nározoového vetra. Silné konvečné búrky sú spojené práve s vývojom Cb, ktorého základňa leží vo výške 600 až 1800m, ale môže siahať až do 2km. (9)



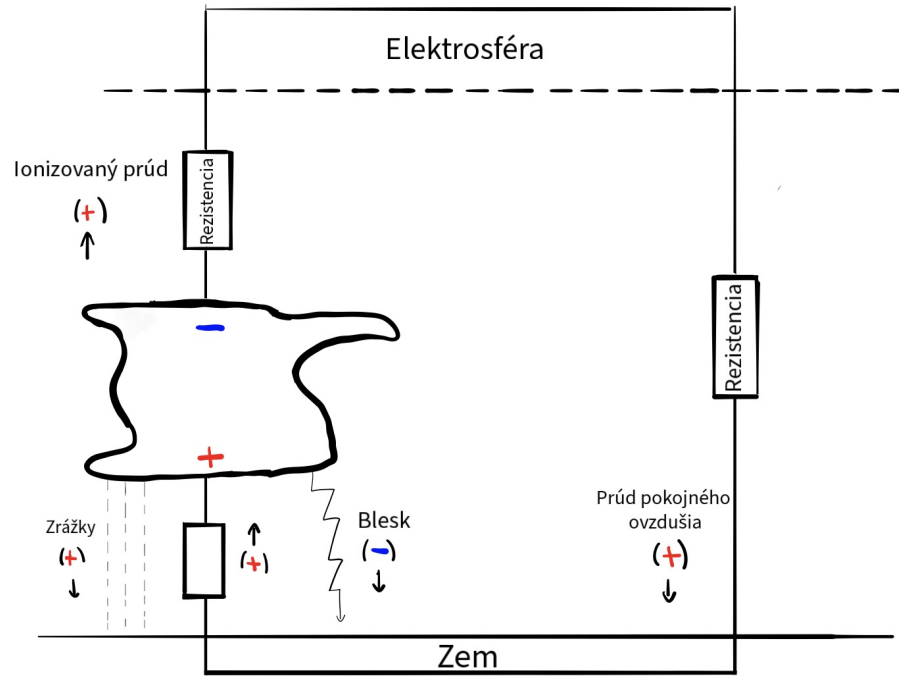
Obrázek 1.1: Klasifikácia oblakov (10).

1.2 Základná teória vzniku bleskov

Búrky sú sprevádzané bleskami. Vo všeobecnosti rozlišujeme blesk medzi oblakom a oblakom (cloud-to-cloud), blesk vnútri oblaku (intra-cloud) a blesk medzi oblakom a zemou (cloud-to-ground). Pre tvorbu blesku je nutná súčasna prítomnosť ľadovej a kvapalnej fázy v oblaku, a je nutné aby bol vrchol oblaku v rozmedzí izoterm -15°C až -20°C . Obidva kritéria sú splnené v Cb. Blesk je prenos náboja počas ktorého teplota môže dosahovať 30 000 K. Je sprevádzaný zvýšením tlaku, ktorý sprevádza zvuková vlna nazývaná sa hrom.

1.2.1 Globálny elektrický obvod

Pre vznik hromu a blesku je potrebné oddelenie nábojov. Typické rozloženie nábojov v búrke a ich úloha v globálnom elektrickom obvode sú znázornené na (obr. 1.2).



Obrázek 1.2: Schéma globálneho elektrického obvodu (8).

V globálnom elektrickom obvode sú elektrifikované búrkové oblaky generátormi. Atmosféra Zeme má nadol-smerujúci prúd pokojného ovzdušia (fair-weather current), ktorého horná hranica je ohraničená elektrosférou, ktorý prenáša celkový pozitívny náboj.

Elektrosféra je vrstva atmosféry začínajúca niekoľko kilometrov nad zemským povrchom a tiahne sa nahor až do ionosféry. Elektrosféra má vodivosť veľmi vysokú, preto vrstvy elektrosféry nesú konštantný elektrický potenciál. Vodivosť sa zvyšuje s nadmorskou výškou vďaka zvyšovaniu ionizácie z kozmického žiarenia a maximálne hodnoty dosahuje vodivosť v ionosfére. Ionosféra sa tiahne približne od 85 km do 600 km nad zemským povrchom a skladá sa z elektrónov, elektricky nabitých atómov a molekúl. Elektrónová hustota sa zvyšuje z 10^4 cm^{-3} v 85 km nad zemským povrchom na 10^6 cm^{-3} v 300 km nad zemským, kde nad 300 km sa hustota opäť znižuje kvôli znižovaniu hustoty vzduchu so zvyšujúcou sa výškou nad zemským povrchom.

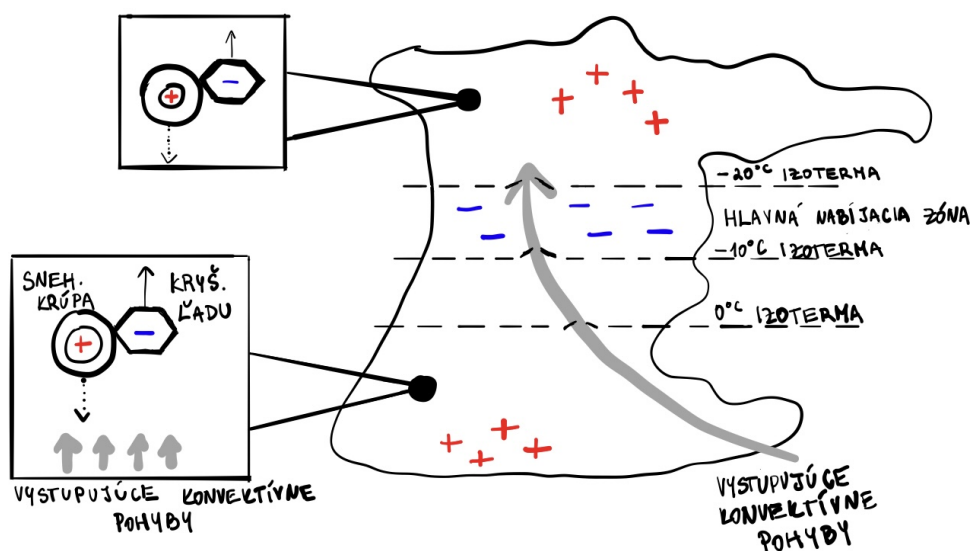
Zdrojom kladného elektrického náboja v elektrosfére je kladný náboj, ktorý uniká z vyšších vrstiev v búrke ako ukazuje ionizovaný prúd na (obr. 1.2). Základňa prúdu za pokojného ovzdušia (fair-weather current) je ohraničená zemským povrchom, ktorý nesie celkový záporný náboj, ktorý je udržiavaný hlavne bleskom. Podľa konvencie, globálny elektrický obvod je zobrazený na (obr. 1.2) pre propagáciu smeru kladného náboja. Záporný náboj vo forme volných elektrónov prúdi opačným smerom. V tomto obvode, kladne nabité častice prúdia

od hora elektrifikovaného búrkového mraku do elektrosféry, z ktorej následne pomocou prúdu za pokojného ovzdušia neprietržne uniká kladný náboj na zemský povrch.

Zrážkové častice sú polarizované elektrickým polom pokojného ovzdušia a elektrickým polom pod búrkou tak, že preferujú transportovať kladné ióny pri páde na zem. Preto prenášajú kladný náboj na zemský povrch. Teda blesk musí zásobovať zemský povrch so záporným nábojom, aby vyrovnal prúd pokojného ovzdušia a kladný náboj z padajúcich zrážkových častíc. (8)

1.2.2 Nábojová separácia vnútri oblakov

Aby sa blesk uskutočnil musí nastať oddelenie náboja. Predtým ako nastane blesk sa predpokladá, že Cb má trojpólovú štruktúru s kladným nábojom blízko vrcholu a základne oblaku. Vrstva s negatívnym nábojom sa nachádza v strede oblaku a nazýva sa hlavná nabíjacia zóna vyskytujúca sa medzi -10°C a -20°C izotermami znázornenými na (obr. 1.3).



Obrázek 1.3: Schematické zobrazenie vzniku náboja v dôsledku zrážky kryštálu ľadu s časticou snehového krúpu a separácie náboja (8).

Termoelektrická teória je prvým mechanizmom navrhnutým na vysvetlenie separácie nábojov. Odvoláva sa na generovanie náboja počas zrážok medzi snehovými krúpami a kryštálmi ľadu pri rôznych teplotách vo vnútri Cb. Termoelektrická teória sa používa najmä na vysvetlenie záporne nabitej vrstvy v strednej časti Cb a kladne nabitej oblasti v jeho hornej časti. Povrch častíc snehových krúp je teplejší ako okolité kryštáliky ľadu, pretože sa zrážajú s kvapôčkami kvapaliny, ktoré pri kontakte mrznú a uvoľňujú latentné teplo.

V ľade sú H^+ ióny pohyblivejšie ako OH^- ióny, takže H^+ ióny sa môžu presúvať z teplých častíc snehových krúp do chladných kolidujúcich kryštálov ľadu. To spôsobuje, že častice snehových krúp sú záporne nabité. Termoelektrická teória je limitovaná do teplôt pod -10°C , kde agregácia je nepravdepodobná a ľadové

kryštáli odskočia od snehových krúp po kolízi. Keď sú malé kladne nabité kryštáliky ľadu unášané vystupujúcimi konvektívnymi pohybmi (updraft), vytvára sa oddelenie náboja medzi vrstvou záporného náboja v strede oblaku a kladne nabitou oblasťou vo vyšších vrstvách.

Slabo kladne nabitá oblasť v blízkosti základne oblaku sa považuje za prvý krok k iniciácii blesku medzi oblakom a zemou. Jedným z vysvetlení prítomnosti tejto slabo kladne nabitej oblasti je riming, ale s teplými kryštálmi ľadu, ktoré sa zachytávajú na chladných časticách snehových krúpov. Preto sa ióny H^+ presúvajú z teplých ľadových kryštálov na studené častice snehových krúp. Alternatívne vysvetlenie kladne nabitej oblasti v blízkosti základne oblaku je, že je spôsobená topením ľadových častíc. Rast pomocou rimingu nastáva a je najúčinnejší, keď kryštály padajú zo studenej vrstvy vo výške (menej ako $-10^{\circ}C$) a dotýkajú sa pod ňou prechladených kvapiek vody v nasýtenej vrstve s teplotou 0 až $-10^{\circ}C$, čo spôsobuje zamrznutie kvapiek.

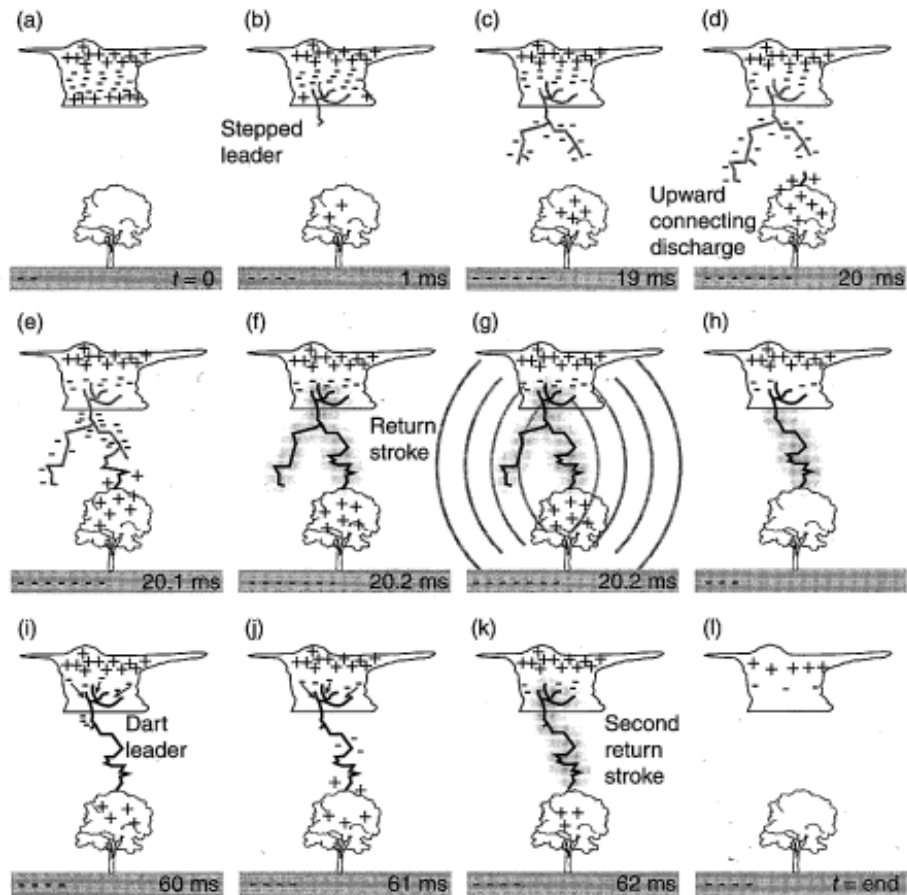
Novšie teórie spájajú vznik náboja s rozdielmi v rýchlosti difúzneho rastu častíc snehových krúpov a kryštálov ľadu. Vyžadujú zrážku ľadových kryštálov s časticami snehových krúpov počas prítomnosti kvapiek v oblaku. V súčasnosti nie je jasné, či teória o rýchlosti difúzneho rastu dokáže vysvetliť tripolárnu štruktúru vo väčšine prípadov. Preto túto štruktúru v búrke nemožno vysvetliť jediným mechanizmom separácie náboja, ale v rôznych oblastiach oblaku môžu byť dôležité rôzne mechanizmy. (8)

1.2.3 Blesky medzi oblakom a zemou

Keď je elektrické pole spôsobené oddelenými nábojmi silnejšie ako tzv. prierné pole ($> 400 \text{ kVm}^{-1}$), pravdepodobne dôjde k blesku, aby sa náboje vyrovnali. Elektrické pole je teraz dostatočne silné na to, aby lokálne ionizovalo vzduch v malom kanáli spojenom so silným zvýšením vodivosti. Prenos náboja potom prebieha prednostne cez tento kanál, viditeľný ako blesk.

Blesky medzi oblakom a zemou (cloud-to-ground) predstavujú len 25% všetkých bleskov. Sú častejšie v stredných zemepisných šírkach, kde je bod mrazu, a teda hlavná zóna nabíjania (obr. 1.3), v nižších nadmorských výškach ako v trópoch. Každý blesk pozostáva z niekoľkých úderov, ktoré sú potrebné na vyrovnanie náboja. V priemere sú na to potrebné tri až štyri údery na jeden blesk.

Bleskové údery prenášajú elektróny z oblaku na zem, zatiaľ čo spätné blesky prenášajú kladné náboje z objektov na povrchu Zeme do základne oblaku, ilustrované na (obr. 1.4) a zvýraznené na fotografii zobrazenej na (obr. 1.5). Blesky medzi oblakom a zemou, ktoré prenášajú záporné náboje na zem, pochádzajú zo spodnej, záporne nabitej časti oblaku. Tento výboj sa nazýva vodiaci výboj (stepped leader) (obr. 1.4b).



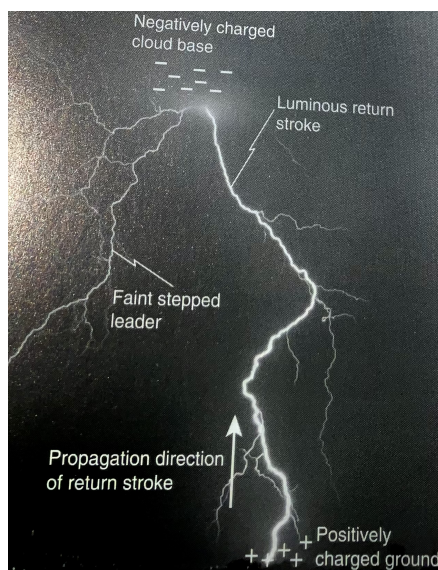
Obrázek 1.4: Schémy znázorňujúce proces vedúci k blesku medzi oblakom a zemou a s ním súvisiace časové kroky: (a) rozloženie náboja v oblaku (b) prvotní impuls v tvorbe elektrického výboja (c,d) vodiaci výboj (e) proces pripojenia (f,h) prvý spätný blesk (g) hrom (i,j) subsekventný výboj v kanáliu ionizovaného vzduchu, ktorý vytvoril vodiaci výboj (k) druhý spätný blesk (l) situácia po skončení svetelných bleskov (8).

Vodiaci výboj je iniciovaný lokálnym výbojom medzi malou kapsou kladných nábojov na základni C_b a spodnou časťou záporne nabitej oblasti.

Keď sa záporne nabitý vodiaci výboj približuje k zemi, indukujú sa kladné náboje na vysokých objektoch, ako sú vysoké budovy alebo stromy (obr. 1.4c). V ich blízkosti sa lokálne zvyšuje intenzita elektrického poľa. Keď sa vodiaci výboj nachádza vo vzdialenosti 10 - 100 m od zeme, vytvorí sa výboj pohybujúci sa od zeme smerom nahor, ktorý sa s vodiacim výbojom stretne (obr. 1.4d). Keď sa tento výboj spojí so vodiacim výbojom, intenzita prierazového poľa sa presiahne a do zeme prúdi veľké množstvo elektrónov (obr. 1.4e).

Potom sa vysoko žiarivý blesk šíri smerom nahor od zeme k oblaku po dráhe vodiaceho výboja (obr. 1.4f), ktorý sa nazýva spätný blesk. Spätný blesk s jeho jasným svetelným tokom je blesk viditeľný okom. Keďže bleskový úder trvá len niekoľko milisekúnd, je to príliš krátky čas na to, aby sa vzduch rozpínal. Namiesto toho sa tlak takmer okamžite zvýši na hodnoty 10 až 100-násobku atmosférického tlaku. Vzniká valcová rázová vlna (obr. 1.4g), ktorá sa šíri ako zvuková vlna a je počutá ako hrom.

Po prvom údere blesku môžu nasledovať ďalšie údery pozdĺž toho istého hlavného kanála, pokiaľ je elektrické pole dostatočne intenzívne. Ďalšie elektróny sú dodávané zo vzdialenejších oblastí záporne nabitých oblastí mraku. Záporne nabitý výboj, nazývaný subsekventný výboj (dart leader), sa potom pohybuje smerom nadol po tej istej dráhe a prenáša ďalšie elektróny na zem (obr. 1.4j). Po subsekventnom výboji nasleduje ďalší viditeľný blesk smerom od zeme do oblaku (obr. 1.4k). Tento proces pokračuje, kým sa náboje prevažne nevyrovnejú (obr. 1.4l). Proces oddelovania nábojov sa musí začať odznova a musí sa vytvoriť nové elektrické pole, aby mohla nastať ďalšia sekvencia bleskov. (8)



Obrázek 1.5: Fotografia blesku medzi oblakom a zemou (8).

2. Emisie NO_x z bleskov

Blesky sú hlavným zdrojom oxidov dusíka ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) v hornej časti troposféry (LNO_x). V tejto kapitole si predstavíme ich vznik, taktiež ich vplyv na chemizmus atmosféry, možnosti modelovania a produkciu na jeden blesk.

2.1 Vznik NO_x z bleskov (LNO_x)

Blesky prispievajú približne 10% do globálneho zdroj NO. Sú hlavným zdrojom NO vo voľnej troposfére. Oxidáciou NO vzniká NO_2 a ich súčet sa označuje ako NO_x . V strednej a hornej troposfére má NO_x dlhšiu životnosť a nepomerne väčší vplyv na troposféricky chemizmus ako emisie z povrchu. Oxidáciou sa NO rýchlo mení na NO_2 , až kým sa nedosiahne rovnováha. NO_2 fotolyzuje a vytvára atómový kyslík, ktorý reaguje s molekulou kyslíka (O_2) za vzniku ozónu, O_3 . Ozón pôsobí v atmosfére ako skleníkový plyn a je najsilnejší v hornej časti troposféry, kde sú najväčšie teplotné rozdiely medzi atmosférou a zemou. Blesky taktiež ovplyvňuje produkciu ozónu a hydroxylového radikálu (OH). (5)

Produkcia NO bleskom prebieha najmä prostredníctvom Zel'dovičovho mechanizmu počas bleskového výboja:



,kde $M = \text{O}_2$ alebo N_2 .

Jedným z dôsledkov bleskového výboja je ohmické ohrievanie okolitého vzduchu v blízkosti, ktorý v priebehu mikrosekúnd zvýši teplotu nad 3 000 K. Táto vysoká teplota okolia do značnej miery uľahčuje reakciu (2.2), ktorá je rýchlostne limitujúcim krokom v Zel'dovičovho mechanizmu.

Naopak, produkcia O_3 bleskom si nevyžaduje vysoké teploty a bola zistená už pri korónových výbojoch :



, kde e je elektrón.

Podobne ako v prípade O_3 , vznik HO_x je iniciovaný úderom elektrónov a disociáciou molekúl H_2O (6):



2.2 Potenciálny vplyv LNO_x na chemizmus atmosféry

NO sú kritickými zložkami troposféry, ktoré priamo ovplyvňujú množstvo ozónu (O₃) a hydroxylových radikálov (OH). Ozón je známy ako silný oxidant, silný absorbér ultrafialového žiarenia a skleníkový plyn. Ozón sa tvorí a ničí fotochémiou. Čistá intenzita produkcie závisí nelineárne od množstva prítomných NO_x. V oblastiach s nízkym obsahom NO_x, napr. v tropickej morskej hraničnej vrstve, vedie NO_x k deštrukcii O₃. V oblastiach s vyššou koncentráciou NO_x, napr. vo vyšších vrstvách troposféry, dominuje produkcia O₃. V oblastiach vzdialených od silného lokálneho znečistenia produkcia O₃ rastie s koncentráciou NO_x.

Koncentrácie HO_x vrátane OH, hydroperoxylového radikálu HO₂ a ďalších peroxydových radikálov tiež nelineárne závisia od množstva NO_x. V podmienkach čistého vzduchu OH vzniká najmä fotolýzou O₃ a reakciami vzniknutého atómového kyslíka s vodnou parou. V podmienkach viac znečistenej troposféry OH vzniká aj fotolýzou NO₂ počas oxidácie oxidu uholnatého (CO), metánu (CH₄) a nemetánových uhľovodíkov (NMHC). Vo veľmi znečistených oblastiach (v oblastiach nasýtených NO_x) sa zvýšením NO_x reakciami s HO₂ a NO₂ znižuje pomer HO₂/OH a miera produkcie O₃.

OH je kľúčovým faktorom oxidačnej kapacity atmosféry. OH ovplyvňuje životnosť veľkého počtu antropogénnych a prírodných zlúčenín. Pod pojmom životnosť máme na mysli pomer medzi množstvom daného druhu a jeho prepadmi. Príkladmi sú CO, SO₂, CH₄ a ďalšie prekursori O₃, aerosólov a iných plynov dôležitých pre klimatický systém, ktoré sa oxidujú reakciami s OH. V dôsledku toho zvýšenie NO_x spôsobuje nielen pozitívne radiačné pôsobenie, čo znamená otepľovanie prostredníctvom O₃, ale aj ochladzovanie prostredníctvom poklesu CH₄. (14)

2.3 Možnosti modelovania emisii LNO_x

V širšom kontexte vývoja reprezentácie simulácie emisii LNO_x v rámci veľkoplošného 3D modelu sa treba zameriavať na pochopenie vzťahu medzi meteorologickými parametrami a pozorovanou frekvenciou bleskov medzi oblakom a zemou počas konvektívnych udalostí. Systematická analýza fyzikálnych premenných poukazuje (7) na dôležitú úlohu sady parametrov, ako je konvektívna dostupná potenciálna energia (CAPE), výška vrcholov oblakov (CTOP), hmotnostný tok výstupných konvektívnych pohybov (UMF), intenzita konvektívnych zrážok (CPR), pri spresňovaní odhadu frekvencie bleskov. V rámci modelovania sú tieto parametre kľúčové pri formovaní vzťahu medzi atmosférickými podmienkami a bleskovej aktivity. V nasledujúcej časti se budeme venovať vzťahom medzi frekvenciou bleskov a uvedenými meteorologickými parametrami. Hodnoty frekvencie bleskov sa potom prevedú na hustotu bleskov na účely použitia v geografických zobrazeniach. Významu týchto parametrov sme sa venovali aj v úvode tejto práce.

2.3.1 Výška vrcholov oblakov (CTOP)

Výška vrcholu oblaku je užitočným parametrom na objasnenie vertikálneho rastu oblakov, ktorý často indikuje nepriaznivé počasie, ako sú privalové dažde a búrky.

Odhad frekvencie bleskov v závislosti od výšky vrcholu oblaku je nasledovný:

$$\text{Blesk nad pevninou } f = 3.44 \cdot 10^{-5} H^{4,9} \quad (2.8)$$

$$\text{Blesk nad oceánom } f = 6,2 \cdot 10^{-4} H^{1,73} \quad (2.9)$$

,kde f frekvencia je bleskov medzi oblakom a zemou v bleskoch za minútu a H je výška vrcholu oblaku v kilometroch. Hodnota H pre daný stĺpec mriežky je nadmorská výška, pri ktorej sa rýchlosť konvektívnych výstupných pohybov stáva nulovou.

Hodnoty frekvencie bleskov odvodené z rovníc (2.8) a (2.9) sa potom prevedú na hustotu zábleskov na účely použitia v geografických zobrazeniach. (7)

2.3.2 Konvektívna dostupná potenciálna energia (CAPE)

CAPE je celková práca, ktorú by vztlaková sila pôsobiaca smerom nahor (kladná) vykonala na balík vzduchu, ak by stúpala vertikálne celou atmosférou. Kladné CAPE spôsobí, že balík vzduchu stúpa, zatiaľ čo záporné CAPE spôsobí, že balík vzduchu klesá. Nenulová hodnota CAPE je indikátorom atmosférickej nestability v danej vrstve atmosféry a to je nevyhnutnou podmienkou pre vznik oblakov Cb a búrky. Vďaka tomu je CAPE dobrým nástrojom na predpovedanie frekvencie bleskov. (15)

Parametrizácia pomocou CAPE prinesie lepšiu odhad rozloženia frekvencie bleskov ako pomocou CTOP alebo UMF. Empirický vzorec, ktorý viaže frekvenciu bleskov a CAPE je nasledovný:

$$f = 1,7 E^{0,0069} \quad (2.10)$$

,kde f je frekvencia bleskov medzi oblakom a zemou v počet bleskov za minútu a E je CAPE v J/kg. (7)

CAPE existuje v relatívnej nestabilnej vrstve troposféry, vo voľnej konvektívnej vrstve (FCL), kde je stúpajúca vzduchová hmota teplejšia ako okolitý vzduch. Všeobecne sa CAPE vypočíta vertikálnou integráciou lokálneho vztlaku vzduchového balíka od úrovne voľnej konvekcie (LFC) po rovnovážnu úroveň (EL), čo je výška, v ktorej má stúpajúci balík vzduchu rovnakú teplotu ako jeho okolie. Vzduch tu dosiahne rovnovážnu úroveň a konvekcia sa zastaví. Táto hladina sa často nachádza v blízkosti tropopauzy a možno ju označiť ako miesto, kde sa nachádza takzvaná kovádlina búrky.

Výpočet CAPE je nasledovný:

$$\text{CAPE} = \int_{z_f}^{z_n} g \left(\frac{T_{v,\text{balík}} - T_{v,\text{okolie}}}{T_{v,\text{okolie}}} \right) dz \quad (2.11)$$

, kde z_f je výška úrovne voľnej konvekcie, z_n je výška rovnovážnej úrovne, $T_{v,\text{balík}}$ je virtuálna teplota špecifického balíka vzduchu, $T_{v,\text{okolie}}$ je virtuálna teplota okolia a g je gravitačné zrýchlenie. Tento integrál je práca vykonaná vztlakom.

kovou silou mínus práca vykonaná proti gravitácii, teda je to prebytočná energia, ktorá sa môže stať kinetickou energiou. (15)

2.3.3 Hmotnostný tok výstupných konvektívnych pohybov (UMF)

Intenzita UMF môže byť indikátorom nestabilného nepriaznivého počasia. Konkrétnejšie, výstupujúci konvektívny pohyb je kľúčovou zložkou elektrickej generácie, pretože poháňa vývoj snehových krúp a ľadových kryštálov, spolu s gravitačnou silou poskytuje prostriedok na oddelenie nábojov na úrovni oblaku. Predpokladá sa, že medzi celkovou aktivitou bleskov a UMF existuje korelácia, pretože výstupný konvektívny pohyb ovplyvňuje separáciu náboja v oblaku.

Empirický vzťah medzi frekvenciou bleskov a UMF je:

$$f = 0,697UMF^{0,38} \quad (2.12)$$

, kde f je frekvencia bleskov medzi oblakom a zemou v bleskoch za minútu a UMF je hmotnostný tok výstupných konvektívnych pohybov v $\text{kg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ pri tlaku 500 hPa. (7)

2.3.4 Intenzita konvektívnych zrážok (CPR)

CPR sa často hodnotí prostredníctvom rôznych meteorologických modelov a predpovedí, ktoré analyzujú atmosférické podmienky podnecujúce konvektívne procesy, ako je prítomnosť nestability, vlhkosti a vztlaku.

Empirický vzťah medzi pozorovanou frekvenciou bleskov a CPR je nasledovný:

$$f = 0,567R_c^{0,38} \quad (2.13)$$

, kde f je frekvencia bleskov medzi oblakom a zemou v bleskoch za minútu a R_c je modelové simulované CPR v mm h^{-1} . (7)

2.3.5 Kombinácia CAPE a CTOP

Na ďalšie zlepšenie parametrizácie je možné použiť dvojice parametrov (napr. CAPE a UMF, CAPE a CTOP, CTOP a UMF) a využiť ich regresiu frekvencie bleskov medzi oblakom a zemou. Aplikujeme vzťah mocninového zákona, kde zahrňame aj člen pre súčin dvojice parametrov:

$$f = a_0.x^{a_1} + a_2.x.y + a_3y^{a_4} \quad (2.14)$$

, kde f je frekvencia bleskov medzi oblakom a zemou v jednotkách blesky za minútu, x a y sú vybrané dvojice parametrov v rovnakých jednotkách ako v predchádzajúcich prípadoch. Koeficienty a_i , kde $i=\{0,1,2,3,4\}$, sa vyjadria regresívnou analýzou dostupných dát, tieto koeficienty sa obecné líšia pre rôzne geografické oblasti. (7)

2.3.6 Produkcia NO na jeden blesk

Produkcia NO na jeden blesk je skúmaná pomocou laboratórnych experimentov a teoretických predpokladov týkajúcich sa fyziky bleskov. Napriek tomuto úsiliu pretrváva veľká neistota, pokiaľ ide o produkciu NO na jeden blesk, ako aj o relatívnu produkciu pri bleskoch vnútri oblaku alebo medzi oblakmi a pri bleskoch medzi oblakom a zemou. Odhady produkcie LNO_x podľa dĺžky záblesku alebo na jeden záblesk sa v literatúre značne líšia.

Pri odhade globálnej produkcie LNO_x predpokladá (23), že blesk medzi oblakom a zemou vyprodukuje približne 1100 molov NO, a že blesk vnútri oblaku alebo medzi oblakmi vyprodukuje jednu desatinu NO ako blesk medzi oblakom a zemou.

Odhady produkcie na jednotku dĺžky záblesku sa pohybujú od 1,7 do $22 \cdot 10^{-3}$ mol $NO \cdot m^{-1}$ podľa (23). Pozorovania produkcie na jeden záblesk sa líšia aj o dva rády v literatúrach, v (14) odporúčajú priemernú hodnotu 250 mol NO na záblesk s rozsahom od 33 do 660 mol NO na záblesk.

Laboratórne merania však ukázali silnú závislosť LNO_x od tlaku. Keďže väčšia časť bleskového kanála bleskov vnútri oblaku alebo medzi oblakmi sa vyskytuje pri nižších tlakoch ako pri bleskoch medzi oblakom a zemou, závislosť od tlaku môže kompenzovať možný väčší rozptyl energie v bleskoch vnútri oblaku alebo medzi oblakmi z hľadiska produkcie NO.

3. Použitá metoda

3.1 Model WRF

Pre výpočet meteorologických podmienok, ktoré budú slúžiť pre samotný model emisí LNO (viz nižšie) boli použité výstupy zo simulácií modelu WRF-Chem (z jeho nechemickej časti). Model WRF-Chem je regionálny predpovedný model počasia a klimatický model so zahrnutou chémiou a je detailne popísaný v (I9). V tejto práci sme sa ale o jeho chemické výstupy nezaujímalí a použili iba meteorologické výstupy. Konfigurácia modelu včetně všetkých použitých parameterizácií (pre konvekciu, zrážky, hraničnú vrstvu, radiáciu a pre procesy na povrchu) je popísaná v článkoch (20; I8), ale podstatné informácie zopakujeme aj ďalej v rámci kapitoli 3.3.

3.2 Model Inox2.0

Pre modelovanie emisí LNO sme použili model Inox vo verzii 2.0 (Inox2.0), ktorý je poskytovaný ako emisný preprocessor spolu s chemicko transportným modelom CAMx (www.camx.com) a získať sa dá na adrese:

<https://www.camx.com/download/support-software/>.

Model Inox2.0 je vyvynutý na bázi Fortran 90 a pre výpočet LNO používa meteorologické dáta z modelu WRF, popísané vyššie. Na základe vybraných parametrov z výstupu modelu WRF, model Inox2.0 najprv spočítá rozloženie frekvencie bleskov, a následne vypočíta na základe znalostí emisí LNO na jeden blesk celkovú emisiu NO.

3.2.1 Blesky nad pevninou

Model Inox2.0 využíva pri parameterizácii frekvencie bleskov medzi oblakom a zemou nad pevninou dvojicu parametrov CAPE a CTOP a ich regresívny vzťah, využitím vzťahu (2.14) :

$$f = a_2 \cdot \text{CAPE} \cdot \text{CTOP} + a_3 \cdot \text{CTOP}^{a_4} \quad (3.1)$$

, kde f je tentokrát frekvencia bleskov medzi oblakom a zemou nad pevninou v bleskoch za hodinu pre danú bunku modelovej siete.

Možno si povšimnúť, že pôvodný vzťah (2.14) obsahoval aj člen $a_0 \cdot \text{CAPE}^{a_1}$, čo znamená, že by sa blesky mohli vyskytovať aj v bunkách výpočetnej siete, kde je sice nenulový CAPE, ale nevzniká búrková oblačnosť, čo býva častým prípadom.

CAPE sám o sebe nezaručuje konvekciu a tvorbu konvektívnej oblačnosti typu Cb pre niekoľko dôvodov. CAPE predstavuje potenciálnu energiu, ktorá je k dispozícii v atmosfére, ale nenaznačuje prítomnosť spúšťacieho mechanizmu, ktorý by inicioval konvekciu. Na vznik konvekcie je potrebná určitá forma vztľaku alebo nestability, ktorá vynesie vzduchové častice na úroveň voľnej konvekcie (LFC), kde môžu voľne stúpať a vytvárať oblaky, t.j ani vysoké hodnoty CAPE nemusia viesť ku konvekcii. Dalším faktorom je vlhkosť ovzdušia. CAPE nezohľadňuje prítomnosť vlhkosti v atmosfére. Dostatočná vlhkosť je rozhodujúca pre vznik oblakov a

zrážok. Celkovo je CAPE užitočným ukazovateľom potenciálu pre konvekciu, ale je len jedným kuskom skladačky. Na vznik konvekcie je potrebné zosúladiť ďalšie atmosférické podmienky a dynamické faktory, nielen CAPE.

Preto člen $a_0 \cdot \text{CAPE}^{a_1}$ bol z modelu Inox2.0 odstránený. Na základe týchto skutočností sa blesky prejavujú v len prítomnosti búrkových oblakov, takže zbývajúce parametre a_i , kde $i=\{2,3,4\}$ sú logickým dôsledkom tohto javu. Pôvodný model Inox2.0 predpokladal nasledujúce hodnoty pre bleskov medzi oblakom a zemou nad pevninou:

$$\begin{aligned} a_2 &= 6,35 \cdot 10^{-5} \\ a_3 &= -0,18 \\ a_4 &= 0,45 . \end{aligned}$$

3.2.2 Blesky nad oceánom

Nad oceánmi používa model Inox2.0 zjednodušenie vzťahu (2.14) pre frekvenciu bleskov medzi oblakom a zemou (hladinou oceánu):

$$f = a_3 \cdot \text{CTOP}^{a_4} \quad (3.2)$$

, kde f je frekvencia bleskov medzi oblakom a zemou (hladinou oceánu) nad oceánom v bleskoch za hodinu. Model Inox2.0 predpokladá hodnoty a_3 a a_4 :

$$\begin{aligned} a_3 &= 6,35 \cdot 10^{-5} \\ a_4 &= 1,73. \end{aligned}$$

Vo vzťahu (3.2) sa uvažuje iba závislosť na CTOP a nie na CAPE. V oceánskych konvektívnych modeloch merajúcich frekvenciu bleskov má CTOP prednosť pred CAPE z dôvodu obmedzeného vplyvu povrchového ohrevu nad oceánom. Absencia značného povrchového ohrevu znižuje význam CAPE. Teplejšie vrcholy oblakov sú spojené so silnejšími výstupnými konvektívnymi pohybmi (updraft) a intenzívnejšou konvekciou, čím sa CTOP stáva priamym ukazovateľom konvektívnych procesov vo vyšších vrstvách atmosféry.

3.2.3 Výsledky modelu

Výsledkom modelu je počet zábleskov v rámci modelovej siete s rozlíšením 36 km x 36 km za deň, ktorý model následne transformuje na hustotu bleskov za hodinu, vyjadrenú v jednotkách bleskov na kilometer štvorcový za hodinu (blesk/km²/hodina).

Model ďalej vypočítava pomer medzi bleskami v oblaku a bleskami medzi oblakom a zemou, ako uvádza (16). Tento pomer slúži ako kľúčový faktor pri určovaní celkovej frekvencie bleskov na kilometer štvorcový za hodinu.

Údaje o množstve bleskov získané touto metódou sa následne použijú na výpočet emisií NO za predpokladu, že jeden blesk vyprodukuje určité molárne množstvo NO, stanovené na 100 mol na blesk (100mol NO/blesk) podľa (17).

Posledným krokom je výpočet vertikálneho rozloženia týchto emisií podľa (17).

3.3 Experimentálne nastavenia

Numerický predpovedný model WRF, ako aj model Inox2.0 boli nakonfigurované na regionálnej doméne s rozlíšením 9 km x 9 km pri počte 189x165 uzlových

bodoch so stredom nad Prahou (14,44°E, 50,075°N). Ide o oblasť siahajúcu približne od Francúzska po Ukrajinu a od stredného Talianska po Dánsko. Model WRF bol nakonfigurovaný so 41 vertikálnymi hladinami až do výšky danej izobarou 50 hPa, zatiaľ čo model Inox2.0 uvažuje s troposférou len do výšky približne 12 km s 18 vertikálnymi hladinami, čo vertikálne pokrýva väčšinu búrkových situácií (v budúcnosti sa však uvažuje o zvýšení tejto hranice, aby zahŕňala najintenzívnejšie Cb).

WRF použil okrajové podmienky z ERA-Interim (22) a bol spustený s modelom Inox2.0 na obdobie rokov 2007 - 2016, pričom Inox2.0 bol riadený meteorologickými údajmi WRF (CAPE, CTOP a geometrická výška každej hladiny modelu) s hodinovou frekvenciou. Výstupom behu modelu Inox2.0 sú potom priemerné hodinové emisie LNO pre všetky uzlové bunky siete a všetky vertikálne vrstvy pre každú hodinu obdobia 2007 - 2016.

3.4 Použité dáta

Súčastou práce je aj validácia modelu Inox2.0: jeho vstupov (CAPE, CTOP), ale aj výstupov (hustota a frekvencia bleskov, samotné emisie LNO). Keďže sa nám podarilo získať relevantné údaje len pre CAPE a hustotu bleskov, v tejto podkapitole opisujeme tieto dáta.

3.4.1 Pozorovania CAPE

Pre porovnanie meteorologických údajov CAPE z modelu WRF sme použili údaje z reanalýzy dát ERA-Interim a zo sondážnych meraní v Prahe - Libuši. ERA-Interim so svojím globálnym pokrytím a rozsiahlymi údajmi ponúka pohľad vo veľkom meradle. Sondážne merania z pražskej Libuši zasa poskytuje lokalizované predpovede prispôbené konkrétne pre pražský región.

ERA-Interim je súbor údajov z reanalýzy klímy, ktorý pokrýva obdobie od roku 1979 do 31. augusta 2019. Skratka ERA znamená 'ECMWF Re-Analysis' a odkazuje na sériu výskumných projektov v ECMWF, v rámci ktorých vznikli rôzne súbory údajov (ERA-Interim, ERA-40 atď.). Údaje ERA-Interim sú voľne dostupné a voľne stiahnuteľné na všetky účely z archívu údajov ECMWF. ERA-Interim používa na tvorbu reanalyzovaných údajov fixnú verziu systému numerickej predpovede počasia (NWP) (IFS - CY31r2). Viac na webovej stránke:

<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/What+is+ERA-Interim>

Súbor údajov ERA-Interim obsahuje atmosférické a povrchové parametre:

- 6-hodinové atmosférické polia na modelových úrovniach, tlakových úrovniach, potenciálnu teplotu a potenciálnu vorticitu
- 3-hodinové povrchové polia a denné vertikálne integrály mesačné priemery denných priemerov
- Synoptické mesačné priemery v 00 UTC, 06 UTC, 12 UTC, 18 UTC

V Prahe - Libuši prebiehajú vertikálne sondážne merania pobočky CHMU. Aerologická stanica Praha - Libuš vykonáva merania trikrát denne pomocou aerologických sond. Aerologická sonda stúpa v atmosfére pomocou vodíkom plneného

meteorologického balóna do výšky približne 30 - 35 km. Merania sa vykonávajú o 00, 06 a 12 UTC. Prelet sondy atmosférou až po prasknutie rozpínajúceho sa balóna trvá približne 90 minút, takže samotné štartovanie predchádza týmto dátumom o 30 až 45 minút. Počas letu sonda meria tlak vzduchu, teplotu vzduchu, vlhkosť vzduchu a na základe jej polohy sa určuje smer a rýchlosť vetra v každej výške.

3.4.2 Pozorovanie hustoty bleskov - ATDnet

Pre porovnanie výstupov, t.j. hustoty bleskov, z modelu WRF sme využili výstupy z európskej dátovej siete ATDnet, pričom výsledky sú uvedené v článku [\(21\)](#).

Jedná sa o dáta detekcie bleskov zozbierané sieťou ATDnet, čo je systém lokalizácie bleskov s veľmi nízkou frekvenciou a dlhým dosahom, ktorý prevádzkuje Met Office. Sieť pozostáva zo snímačov, ktoré nepretržite monitorujú bleskovú aktivitu v jej priestorovom rozsahu a zisťujú elektromagnetické vlny v rozsahu veľmi nízkych frekvencií, ktoré vznikajú pri spätných bleskoch medzi oblakom a zemou a pri bleskoch medzi oblakmi alebo vnútri oblaku.

Súbor dát ATDnet obsahuje informácie o bleskoch vrátane dátumov, časov, miest a technických údajov o detekciách, ktoré sa používajú na štúdium hustoty bleskov, frekvencie búrok a ročného a denného rozloženia bleskov v Európe. Údaje ATDnet sa zhromažďovali počas 10-ročného obdobia od roku 2008 do roku 2017 (v článku vyššie sú prezentované údaje za uvedené obdobie, ale k dispozícii sú aj údaje za obdobie od roku 2007.).

4. Výsledky

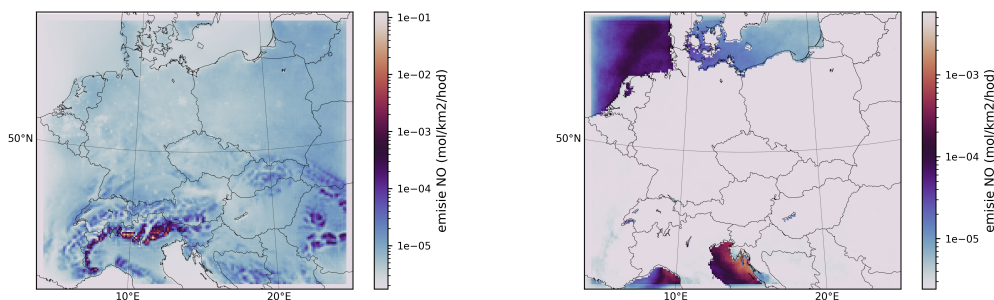
4.1 Emise LNO

Výsledkom behu modelu Inox2.0 sú hodinové emisie LNO pre celú sieť uzlových bodov (189 x 165 bodov v horizontálnom smere a 18 bodov (vrstiev) vo vertikálnom smere, pri horizontálnom rozlíšení 9 km x 9 km). Pre túto prácu sú dôležité plošné, vertikálne a časové rozloženia emisií LNO.

4.1.1 Plošné rozloženie

Pre plošné rozloženie použijeme priemer emisii LNO za leto (jún, júl, august) a zimu (december, január, február) za celé obdobie 2007-2016, pričom zohľadníme emisie tesne nad povrchom (prvá vrstva) a vertikálne integrované, t.j. súčet skrz všetky vrstvy. Emisie pri povrchu sú relevantné pre okamžitý vliv na kvalitu ovzdušia a chemizmu pri povrchu. Naopak, emisie vo vyšších výškach a integrované majú pri ich postupnom transporte do vzdialenejších oblastí význam pre dlhodobé zmeny v chemizme celkovej troposféry.

Farebné gradienty využité pri vizualizácii označujú intenzitu emisií LNO. Červené odtiene predstavujú vyššie úrovne emisií, zatiaľ čo modré odtiene označujú nižšie emisie. Táto vizualizácia prináša informácie o priestorovom rozložení LNO v regiónoch a identifikuje oblasti s potenciálne vyššou úrovňou výskytu bleskovej a konvektívnej činnosti.



(a) letné mesiace

(b) zimné mesiace

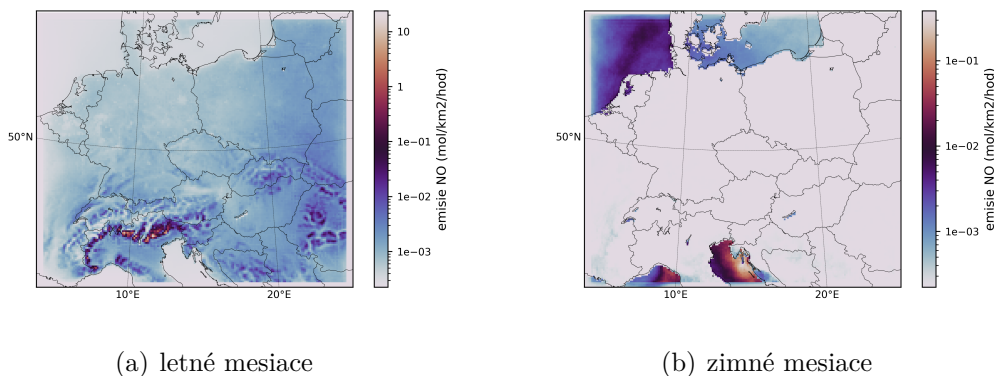
Obrázek 4.1: Plošné rozloženie emisií LNO pre prvú vrstvy (výška 0 až 48m).

Plošné rozloženie znázornené na (obr. 4.1) zobrazuje priemerné množstvo emisií LNO v prvej vertikálnej vrstve, ktorá siaha do výšky cca 48 metrov nad zemským povrchom. Rozloženie sme rozdělili do dvoch rôznych ročných období: letné (obr. 4.1a) a zimné mesiace (obr. 4.1b).

Počas letných mesiacov (obr. 4.1a) vizualizácia ukazuje, že väčšina emisií LNO sa sústreďuje v severnom Taliansku, Alpách a strednej Európe. V Alpách bola zaznamenaná najvyššia hodnota emisií LNO dosahujúca $0,12 \text{ mol km}^{-2} \text{ hod}^{-1}$.

Naopak, v zimných mesiacoch (obr. 4.1b) sa najvyššie emisie pozorujú v oblasti Severného a Jadranského mora, pričom najvyššia zaznamenaná hodnota emi-

sií LNO je $0,01 \text{ mol km}^{-2} \text{ hod}^{-1}$ nad Jadranským morom. Sezónne rozdiely v plošnom rozložení emisií zdôrazňujú dynamický charakter emisií LNO v skúmaných regiónoch.



Obrázek 4.2: Plošné rozloženie vertikálne integrovaných emisií LNO.

Plošné rozloženie znázornené na (obr. 4.2) predstavuje priemerné množstvo vertikálne integrovaných emisií LNO, ďalej rozdelené na letné (obr. 4.2a) a zimné mesiace (obr. 4.2b).

V lete je zrejmé, že oblasti, ktoré sa vyznačujú vyššími emisiami LNO v počiatočnej vizualizácii prvej vertikálnej vrstvy (obr. 4.1a), pretrvávajú aj v tejto analýze. Prostredníctvom vertikálnej integrácie pozorujeme zvýšené hodnoty emisií vo všetkých regiónoch. Maximálna hodnota emisií LNO počas leta dosahuje $23,84 \text{ mol km}^{-2} \text{ hod}^{-1}$ v Alpách.

Naopak, počas zimy sa objavujú podobné zákonitosti, pokiaľ ide o pretrvávanie regiónov s vyššími emisiami LNO. Celkové hodnoty emisií sú však v porovnaní s letom výrazne nižšie. Maximálna hodnota emisií LNO v zime dosahuje vrchol pri $0,38 \text{ mol km}^{-2} \text{ hod}^{-1}$ nad Jadranským morom.

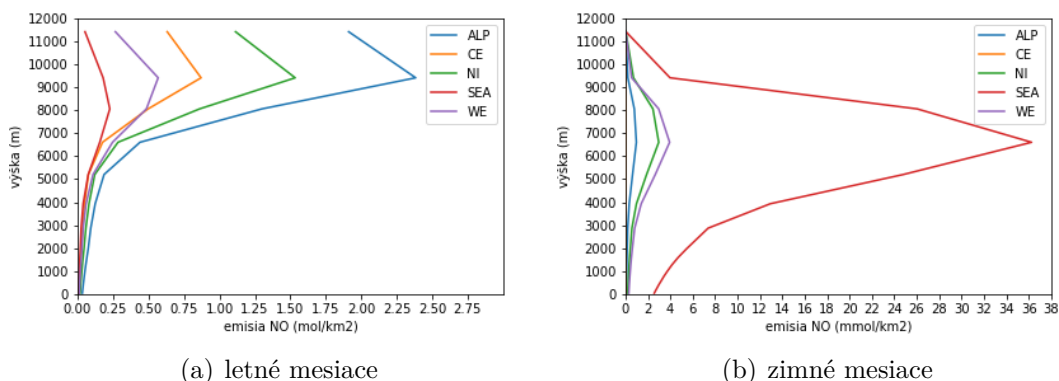
4.1.2 Vertikálne rozloženie

Vypočítali sme priemerný vertikálny profil emisií pre leto a zimu z vybraných podoblastí celej domény. Vybrali sme 5 podoblastí:

1. (NI) severné Taliansko: Zodpovedá podmienkam v južnej Európe.
2. (ALP) Alpy: Charakterizuje ju hornatý terén a oblačnosť.
3. (CE) okolie Prahy: Odráža mestské podmienky typické pre strednú Európu.
4. (WE) oblasť Holandska: Nachádza sa severnejšie a je v blízkosti Atlantiku ovplyvnená západným (zonálnym) prúdením.
5. (SEA) oblasť Severného mora: Oblasť priamo nad morom.

Motiváciou výberu týchto oblastí je, že každá z týchto oblastí má iné klíma vrátane konvektívnych charakteristík, takže sa očakáva odlišná veľkosť i rozloženie emisií LNO.

Priemerný vertikálny profil emisií LNO zpriemerovaný za leto a zimu cez vybrané podoblasti celej domény sú spracované pre lepšiu prehľadnosť v jednotkách mol km^{-2} pre leto a mmol km^{-2} pre zimu. Každá oblasť je na grafe odlíšena jedinečnou farebnou čiarou, čo uľahčuje porovnanie profilov emisií vo vybraných oblastiach.



Obrázek 4.3: Vertikálne rozloženie emisií LNO v Alpách, strednej Európe, severnom Taliansku, Severnom mori, západnej Európe v jednotkách mol km^{-2} pre leto a mmol km^{-2} pre zimu.

Vertikálne rozloženie zobrazené na (obr. 4.3) názorne ilustruje sezónne rozdiely v tvorbe emisií LNO.

V lete (obr. 4.3a) je dominujúca tvorba emisií LNO vo vyšších vertikálnych vrstvách, obzvlášť výrazná v oblasti Álp. Najmä 17. vertikálna vrstva (8050 - 9400 m) vykazuje najvyššie hodnoty pre oblasť Álp, severného Talianska, Prahy a Holandska, pričom v Alpách sa dosahuje celková maximálna hodnota $2,38 \text{ mol km}^{-2}$ naprieč všetkými oblasťami. Len v prípade oblasti Severného mora sa maximálna emisivita LNO presúva do 16. vertikálnej vrstvy (6600 - 8050 m), kde sa dosahuje hodnoty $0,56 \text{ mol km}^{-2}$. Vysoké hodnoty nad Alpami sú dané častejšiou konvekciou nad hornatým terénom.

Naopak, počas zimy (obr. 4.3b) je badateľný posun dominancie emisií LNO smerom k nižším vertikálnym vrstvám, konkrétne k 15. vertikálnej vrstve (6600 - 8050 m). Najväčšia tvorba emisií sa pozoruje prevažne v oblasti Severného mora s maximálnou hodnotou $36,26 \text{ mmol km}^{-2}$. Treba poznamenať, že v Alpách, v oblasti Prahy, v severnom Taliansku, v oblasti Severného mora a v oblasti Holandska sú všetky hodnoty emisií LNO výrazne nižšie ako v oblasti Severného mora. Okrem toho je dôležité zdôrazniť, že v zime sú celkové emisie LNO výrazne nižšie v porovnaní s emisiami pozorovanými v lete. Graf dobre ukazuje, že väčšina konvektívnych udalostí v Európe sa odohráva v zime nad morami.

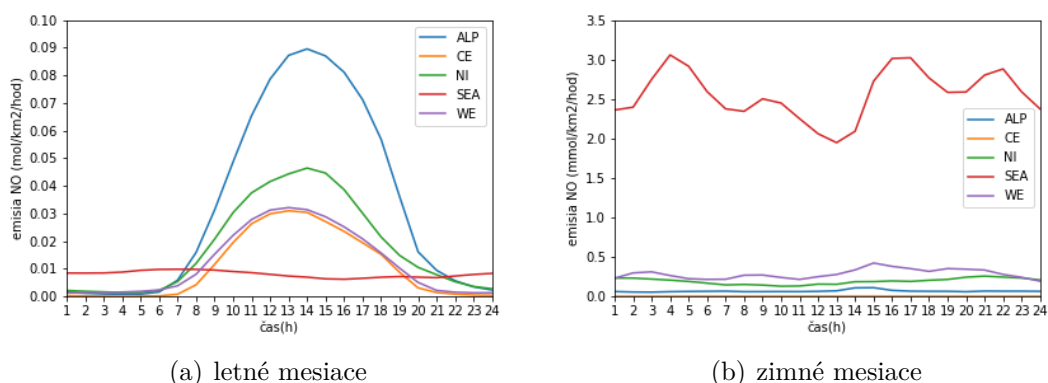
Pre porovnanie maximálnych hodnôt pre obidve ročné obdobia v nami určených oblastiach uvádzame tabuľku (4.1).

oblasť	WE	SEA	NI	CE	ALP
max hodnota leto (mol/km^2)	0,57	0,23	1,53	0,87	2,38
výška (km)	8,1-9,4	6,6-8,1	8,1-9,4	8,1-9,4	8,1-9,4
vertikálna vrstva	17	16	17	17	17
max hodnota zima (mmol/km^2)	3,93	36,26	2,96	0	0,96
výška (km)	5,2-6,6	5,2-6,6	5,2-6,6	0	5,2-6,6
vertikálna vrstva	15	15	15	0	15

Tabulka 4.1: Maximálne hodnoty pre vertikálne rozloženie emisií LNO v Alpách, strednej Európe, severnom Taliansku, Severnom mori, západnej Európe v jednotkách mol km^{-2} pre leto a mmol km^{-2} pre zimu.

4.1.3 Časový priebeh

Na grafoch znázorňujúcich denný cyklus emisií LNO pre nami určené oblasti (obr. 4.4, 4.5) os x predstavuje čas v hodinách, zatiaľ čo os y označuje emisie LNO merané v jednotkách $\text{mol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$ pre leto a $\text{mmol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$ pre zimu. Fluktuácie pozorované na grafoch sa pripisujú predovšetkým bleskovej a búrkovej činnosti.



Obrázek 4.4: Denný cyklus emisií LNO pre prvú vrstvu (0 - 48m) v Alpách, strednej Európe, severnom Taliansku, Severnom mori, západnej Európe v jednotkách $\text{mol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$ pre leto a $\text{mmol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$ pre zimu.

Graf na (obr. 4.4) znázorňuje denný cyklus emisií LNO v prvej vertikálnej vrstve (0 - 48 m) pre nami určené oblasti.

V lete (obr. 4.4a) sa v popoludňajších hodinách pozorujú jasné maximá v regiónoch Álp, severného Talianska, strednej Európy a západnej Európy. Najvyššia hodnota emisií LNO sa zaznamenáva v Alpách, dosahuje $0,09 \text{ mol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$. Naopak, v oblasti Severného mora je zrejmy relatívne konštantný priebeh emisií LNO s malými výkyvmi a miernym minimom v popoludňajších hodinách, čo je dôsledok faktu, že teplota povrchu oceánov ukazuje minimálny denný cyklus, a konvektívna aktivita je preto viac-menej rovnomerne rozložená počas dňa.

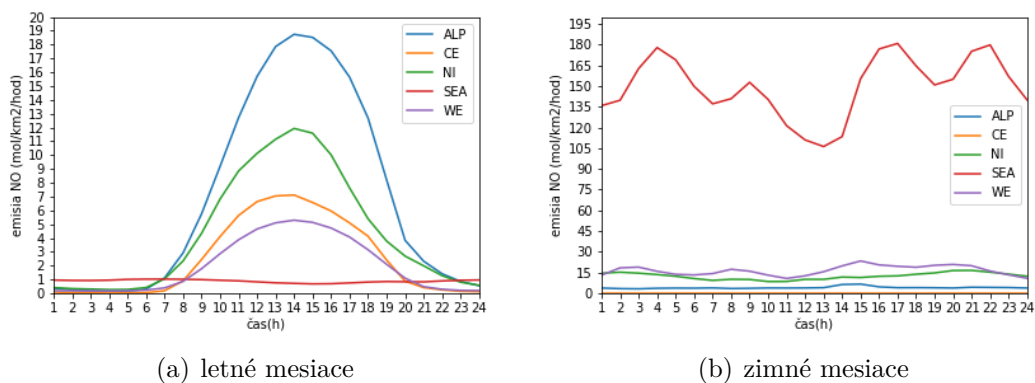
V zimných mesiacoch (obr. 4.4b) podlieha priebeh v oblasti Severného mora výrazným fluktuáciám a má s výrazne vyššie hodnoty v porovnaní s ostatnými usernameami. Maximálna hodnota emisií LNO v oblasti Severného mora dosahuje maximum $3,06 \text{ mmol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$. V zime sú celkové emisie LNO výrazne nižšie v

porovnaní s emisiami pozorovanými v lete. Menšie popoludňajšie maximum je pozorované pre oblasť WE, ktoré je čiastočne ovplyvnené denným chodom slnečného žiarenia a často sa nad ňou vďaka západnému prúdeniu nachádzajú labilnejšie morské vzduchové hmoty vedúce k častejšej tvorbe zimných búrok.

Prehľad maximálnych hodnôt pre naše oblasti je zaznamenaný v tabuľke (4.2).

oblasť	WE	SEA	NI	CE	ALP
max leto ($\text{mol}/\text{km}^2/\text{hod}$)	0,03	0,01	0,05	0,03	0,09
hodina	13:00	7:00	14:00	13:00	14:00
max zima ($\text{mmol}/\text{km}^2/\text{hod}$)	0,42	3,06	0,26	0	0,11
hodina	15:00	4:00	21:00	0	15:00

Tabuľka 4.2: Maximálne hodnoty pre denný cyklus emisii LNO pre prvú vrstvu (0 - 48m) v Alpách, strednej Európe, severnom Taliansku, Severnom mori, západnej Európe v jednotkách $\text{mol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$ pre leto a $\text{mmol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$ pre zimu.



Obrázek 4.5: Denný cyklus vertikálne integrovaných emisii LNO v Alpách, strednej Európe, severnom Taliansku, Severnom mori, západnej Európe v jednotkách $\text{mol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$ pre leto a $\text{mmol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$ pre zimu.

V prípade denného cyklu vertikálne integrovaných emisii LNO (obr. 4.5) pozorujeme priebeh, ktorý sa výrazne nelíši od priebehu v prvej vertikálnej vrstve (obr. 4.4). Ako sa dalo očakávať, hodnoty získané vertikálnou integráciou sú prirodzene vyššie v lete aj v zime.

V lete (obr. 4.5a) vykazuje pražská oblasť po vertikálnej integrácii vyššie hodnoty v popoludňajších hodinách v porovnaní s jej hodnotami v prvej vrstve (0 - 48 m), kde boli nižšie v prípade prvej vrstvy ako v oblasti Holandska. Najvyššia hodnota emisii LNO, ktorá bola zaznamenaná je $18,74 \text{ mol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$, a nachádza sa v Alpách.

V zimných mesiacoch (obr. 4.5b) zostáva priebeh po vertikálnej integrácii relatívne konzistentný s priebehom pri prvej vrstve (obr. 4.4b). Emisie LNO v Severnom mori stále vykazujú najvyššie hodnoty a silné výkyvy v porovnaní s relatívne konštantnými priebehmi v ostatných regiónoch. Celkovo sú hodnoty v zime stále nižšie ako v lete. Najvyššia zaznamenaná hodnota je $180,79 \text{ mmol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$.

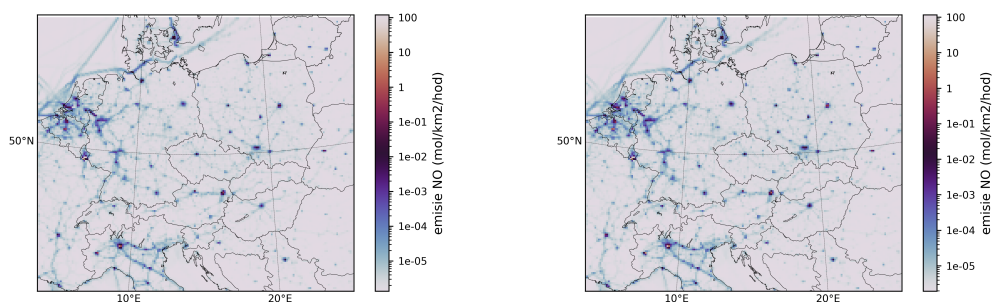
Maximálne hodnoty sme zaznamenali do tabuľky (4.3).

oblasť	WE	SEA	NI	CE	ALP
max leto (mol/km ² /hod)	5,29	1,02	11,93	7,11	18,74
hodina	14:00	7:00	14:00	14:00	14:00
max zima (mmol/km ² /hod)	23,37	180,79	16,54	0	6,62
hodina	15:00	17:00	21:00	0	15:00

Tabulka 4.3: Maximálne hodnoty pre denný cyklus vertikálne integrovaných emisií LNO v Alpách, strednej Európe, severnom Taliansku, Severnom mori, západnej Európe v jednotkách mol km⁻² hod⁻¹ pre leto a mmol km⁻² hod⁻¹ pre zimu.

4.1.4 Porovnanie s antropogennými emisiami

Ako sa spomína v úvode, LNO sú dôležitým prirodzeným zdrojom oxidov dusíka v troposfére. Na kvantifikáciu ich možnej relatívnej role je však užitočné porovnať ich veľkosť s antropogennými emisnými tokmi (t.j. emisiami z ľudských činností, ako je spaľovanie, doprava, chemická výroba, poľnohospodárstvo atď.). Tieto boli vypočítané na základe dát TNO-MACC-III (update staršej MACC-II databáze; [4]) pre rok 2011. Interpoláciu z pôvodnej siete do našej domény zaistil emisný preprocessor FUME [1].



(a) letné mesiace

(b) zimné mesiace

Obrázek 4.6: Plošné rozloženie priemerných emisií NO z antropogénnych činností za rok 2011.

Na základe priemerných emisií NO z antropogénnych činností v lete (obr. 4.6a) a v zime (obr. 4.6b) roku 2011, ktoré predstavujú viac-menej priemerné emisie za obdobie rokov 2007 - 2016, je zrejmé, že antropogénne emisie NO vykazujú počas roka pomerne konzistentné hodnoty. Malé rozdiely medzi letnými a zimnými emisiami s maximálnymi hodnotami 119,41 mol km⁻² hod⁻¹ v lete a 116,12 mol km⁻² hod⁻¹ v zime naznačujú stabilnú produkciu NO z ľudských zdrojov bez ohľadu na ročné obdobie. Pri porovnaní týchto antropogénnych emisií s NO generovaným bleskom (LNO) však vznikajú výrazné rozdiely. Emisie LNO, hoci sú vo všeobecnosti nižšie v porovnaní s antropogennými emisiami NO, vykazujú lokálne maximá, ktoré sú porovnateľné s antropogennými emisiami v určitých oblastiach ako je južná Európa, najmä nad Alpami.

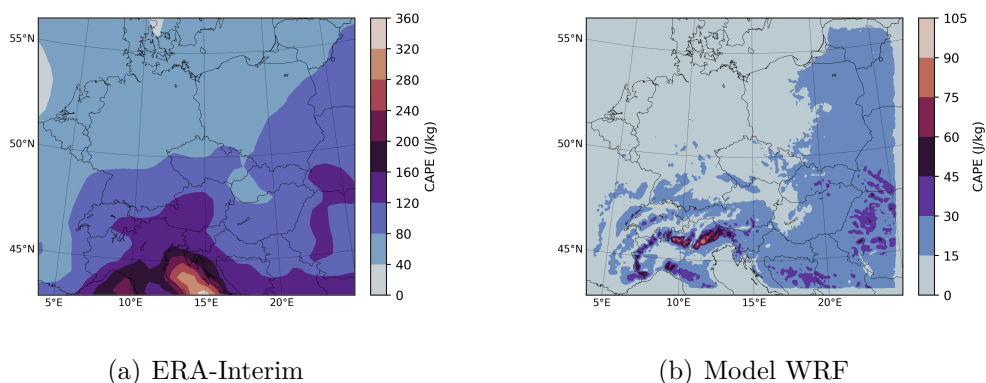
4.2 Modelové CAPE a zrovnanie s meraním

Kedže jedným zo vstupov je pre model Inox2.0 hodnota CAPE z modelu WRF, je žiadúce pre určenie spoľahlivosti výsledkov Inox2.0 porovnať modelové hodnoty CAPE s dostupnými datami popisujúcimi realitu. K tomu sme v najprv použili reanalýzu ERA-Interim (čím bol hnaný aj model WRF).

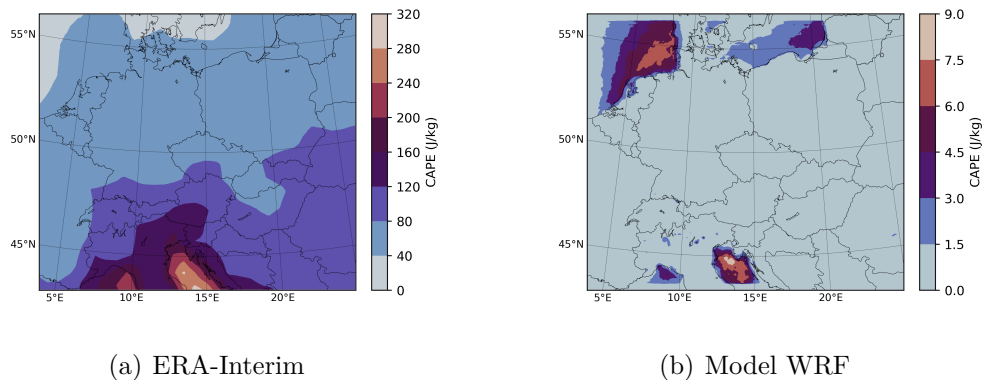
Porovnanie pozostáva zo spracovania plošného rozloženia priemernej hodnoty CAPE o 12:00 a 00:00 pre model WRF a ERA-Interim. Toto plošné rozloženie zahŕňa priemernú hodnotu CAPE za letné mesiace, ako aj za všetky mesiace. Zimné mesiace nie sú až také významné, pretože hodnoty CAPE sú v tomto období zvyčajne nízke, a tak sa na rozložení pre všetky mesiace podieľajú len minimálne. Preto sme ich do analýzy nezahrnuli.

Okrem toho vykonávame aj porovnanie mesačného cyklu priemernej hodnoty CAPE, kde dáta z modelu WRF porovnáme so sondážnymi meraniami z Libuši (Praha). Z modelu WRF boli dáta získané zo sieťového bodu, ktorý leží najbližšie k polohe merania z Libuši. Cieľom tohto porovnania je poskytnúť pohľad na dynamiku CAPE v okolí Prahy.

4.2.1 Plošné rozloženie



Obrázek 4.7: Plošné rozloženie priemernej hodnoty CAPE o 12:00 hodine pre všetky mesiace.



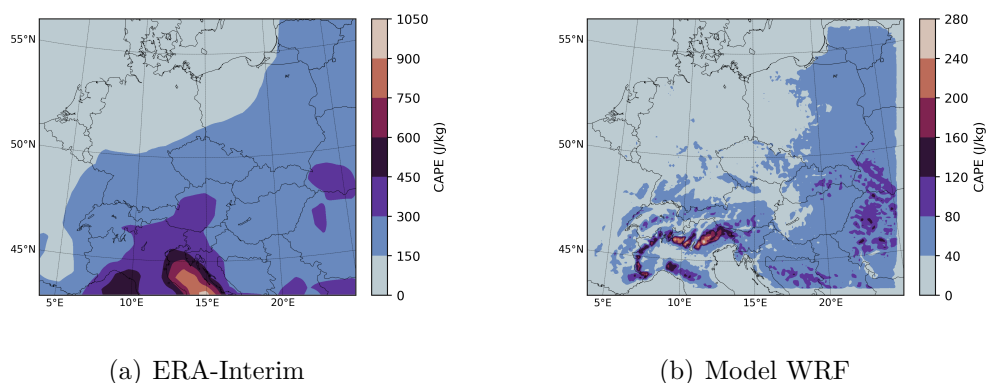
Obrázek 4.8: Plošné rozloženie priemernej hodnoty CAPE o 00:00 hodine pre všetky mesiace.

Na obrázkoch (obr. 4.7; 4.8) sa nachádza plošné rozloženie hodnôt CAPE o 12:00 a 00:00 priemerované skrz všetky mesiace. Okrem toho porovnanie rozloženia CAPE o 12:00 a 00:00 umožňuje preskúmať zmeny konvektívnej aktivity, čo objasňuje, ako sa priemerná hodnota CAPE vyvíja počas dňa.

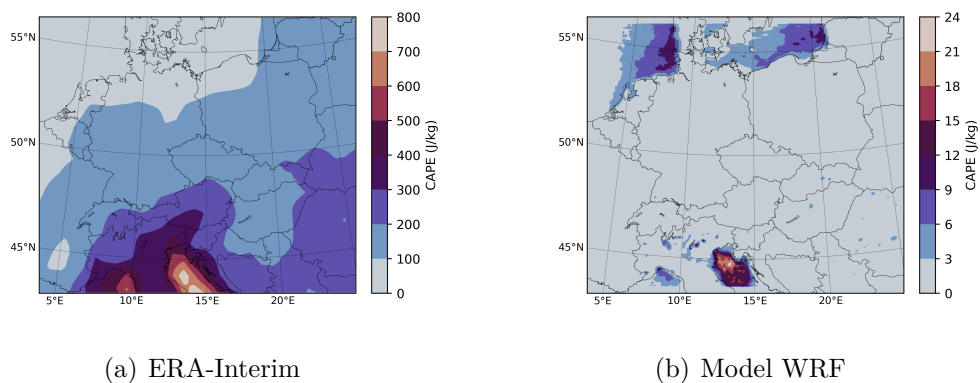
Porovnanie súboru údajov z reanalýzy ERA-Interim (obr. 4.7a; 4.8a) s modelom WRF (obr. 4.7b; 4.8b) odhaľujú rôzne trendy v rozložení priemernej hodnoty CAPE.

O 12:00 vykazujú ERA-Interim (obr. 4.7a) aj WRF (obr. 4.7b) odlišné priestorové trendy so zvýšenými hodnotami CAPE pozorovanými v určitých regiónoch. Medzi oboma súbormi údajov sú zjavné rozdiely vo veľkosti hodnôt CAPE, ERA-Interim vyказuje hodnoty približne trikrát vyššie ako WRF. Môžeme aj pozorovať, že ERA-Interim vyказuje najvyššie hodnoty v oblasti Jadranského mora, kde sa dosahuje maximálna hodnota 344 J/kg. Pričom model WRF neukazuje zvýšenú hodnotu CAPE v tejto oblasti. Model WRF nábýva maxima CAPE v oblasti Álp s hodnotou 91 J/kg.

Naopak, o 00:00 sa medzi ERA-Interim (obr. 4.8a) a WRF (obr. 4.7b) sa v priestorovom rozložení CAPE objavujú menej výrazné rozdiely, ale hodnotami sa nám model WRF a ERA-Interim líšia drasticky. ERA-Interim vyказuje približne tridstatpäťkrát vyššie hodnoty CAPE ako Model WRF. V oblasti Jadranského mora vyказujú aj model WRF aj ERA-Interim maximum CAPE s hodnotou 9 J/kg pre model WRF a 289 J/kg pre ERA-interim. Model WRF v oblasti Severného mora vyказuje zvýšené CAPE, pričom ERA-Interim túto skutočnosť nezachytáva.



Obrázek 4.9: Plošné rozloženie priemernej hodnoty CAPE o 12:00 hodine pre letné mesiace.



Obrázek 4.10: Plošné rozloženie priemernej hodnoty CAPE o 00:00 hodine pre letné mesiace.

V porovnaní súboru údajov ERA-Interim a modelu WRF (obr. 4.9a; 4.9b) pre plošné rozloženie priemerných hodnôt CAPE o 12:00 v lete, ERA-Interim (obr. 4.9a) vykazuje približne trikrát vyššie hodnoty v porovnaní s WRF (obr. 4.9b). Hodnota maxima priemeru CAPE v letných mesiacoch pre ERA-Interim je 962 J/kg a pre model WRF je 266 J/kg. ERA-Interim toto maximum nabýva v oblasti Jadranského mora, čo kontrastuje s maximom modelu WRF v oblasti Alp.

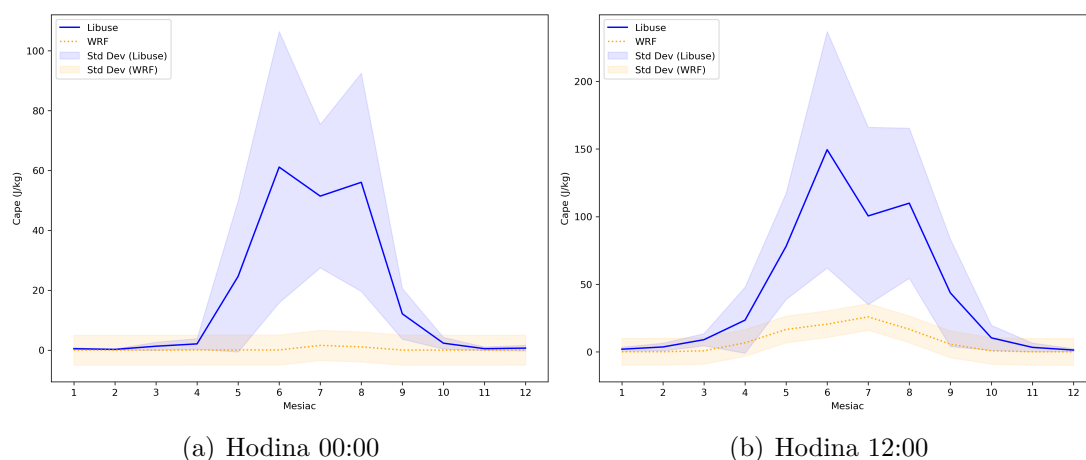
Napriek tomuto rozdielu vykazujú oba súbory údajov konzistentné priestorové charakteristiky CAPE, ktoré sa podobajú plošnému rozloženiu priemernej hodnoty CAPE skrz všetkých mesiacoch (obr. 4.7). Model WRF aj ERA-Interim naznačujú celkové zvýšenie priemernej hodnoty CAPE v porovnaní s priemernými hodnotami pozorovanými vo všetkých mesiacoch, čo naznačuje zvýšený konvektívny potenciál počas leta.

O 00:00 sú rozdiely medzi ERA-Interim (obr. 4.10a) a WRF (obr. 4.10b) znova konzistentné v priestorovej charakteristike s plošným rozložením počas všetkých mesiacov (obr. 4.8). Na druhej strane hodnoty sa nám drasticky odlišujú ako sa nám odlišovali aj pri plošnom rozložení priemernej hodnoty CAPE vo všetky

mesiace. ERA-Interim vykazuje približne tridsaťpäťkrát vyššie hodnoty v porovnaní s modelom WRF. Maximálna nadobudnutá hodnota CAPE je 767 J/kg pre ERA-Interim a 22 J/kg pre WRF. Oba nadobúdajú maximum v oblasti Jadranského mora. Okrem toho WRF aj ERA-Interim naznačujú celkové zvýšenie hodnôt CAPE v lete v porovnaní s priemernými hodnotami pozorovanými vo všetkých mesiacoch.

Môžeme jasne prísť k záveru, že model WRF silne podhodnotil hodnoty CAPE, čo môžeme vidieť hlavne v plošnom rozložení priemernej hodnoty CAPE o 00:00, či už vo všetkých mesiacoch (obr. 4.8) alebo letných mesiacoch (obr. 4.10).

4.2.2 Mesačný cyklus - sondážne merania



Obrázek 4.11: Mesačný cyklus priemernej hodnoty CAPE pre model WRF a zo sondážnych meraní Praha-Libuš s ich štandardnými odchylkami.

Mesačný cyklus priemernej hodnoty CAPE je znázornený na (obr. 4.11a; 4.11b), ktoré predstavujú výsledky pozorovaní o 00:00 a 12:00 pre model WRF a meranie v Prahe - Libuši spolu s ich štandardnými odchylkami.

Je zrejmé, že hlavne počas obdobia teplejších mesiacov (apríl až september) v oboch grafoch (obr. 4.11a; 4.11b) pozorujeme jasné podhodnotenie hodnôt CAPE modelu WRF v porovnaní s pozorovaniami zo sondážnych meraní. Maximálne hodnoty pre model WRF a Libuše sme zhrnuli do tabuľky (tab. 4.4). Okrem toho zahrnutie štandardných odchýliek do grafov (obr. 4.11a; 4.11b) umožňuje nahliadnuť do variability a neistoty spojenej s hodnotami CAPE pre obidva súbory údajov.

Záverom môžeme povedať, že model WRF silne podhodnotil hodnoty CAPE oproti sondážnym meraniam.

	model WRF		sondážne meranie	
hodina	0:00	12:00	0:00	12:00
maximálna hodnota CAPE (J/kg)	8	63	61	149
rok-mesiac	2010-07	2011-06	2007-06	2007-06

Tabuľka 4.4: Maximálne hodnoty pre mesačný cyklus priemernej hodnoty CAPE pre model WRF a Libuše.

4.3 Hustota bleskov a zrovnanie s meraním

Prechádzajúca analýza ukázala výrazné podhodnotenie parameteru CAPE v modeli WRF. Predpokladáme, že budú podhodnotené aj hodnoty hustoty a frekvencie bleskov v modeli Inox2.0, keďže CAPE je jedným z parametrov pre ich výpočet (popri CTOP). V tejto časti práce sa teda zameriame na porovnanie hustoty bleskov počítané modelom Inox2.0 s dostupnými dátami zo siete meraní bleskov ATDnet.

Hustota bleskov slúži ako kľúčový ukazovateľ pri pochopení atmosférickej elektricity a jej dôsledkov na emisie LNO. Porovnanie údajov z pozorovaní dátovej siete ATDnet a simulácií z modelu Inox2.0 poskytuje pohľad na korektnosť modelovanej bleskovej aktivity.

4.3.1 Plošné rozloženie

Analýza hustoty bleskov, znázornená prostredníctvom šiestich rôznych grafov (obr. 4.12) zobrazujúcich plošné rozloženie priemerných hodnôt hustoty bleskov, ponúka cenné poznatky o atmosférickej elektrickej aktivite.

Tieto plošné rozloženia zahŕňajú údaje z pozorovaní z dátovej siete ATDnet počas letných (obr. 4.12a) aj zimných (obr. 4.12c) mesiacov, ako aj simulácie odvodené z modelu Inox2.0 pre rovnaké sezónne obdobia (obr. 4.12b; obr. 4.12d). Uviedli sme aj priemerné plošné rozloženie hustoty bleskov pre všetky mesiace pre dátovú sieť ATDnet (obr. 4.12e) aj model Inox2.0 (obr. 4.12f).

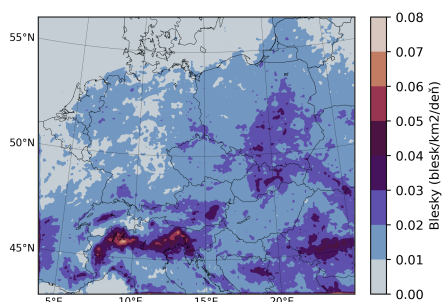
V letných mesiacoch (obr. 4.12; 4.12b) sa objavuje výrazný kontrast medzi hodnotami zo siete ATDnet a modelom Inox2.0, pričom ATDnet zaznamenáva približne desaťnásobne nižšie hodnoty hustoty bleskov v porovnaní s modelom. Obe vizualizácie zhodne zdôrazňujú Alpy ako oblasť s najvyššou bleskovou aktivitou, čo je v súlade s našimi predchádzajúcimi pozorovaniami v sekcii 4.1 týkajúcimi sa emisií LNO. Najvyššia priemerná hodnota počas letných mesiacov je 0,90 blesk $\text{km}^{-2} \text{deň}^{-1}$ pre model Inox2.0 a 0,07 blesk $\text{km}^{-2} \text{deň}^{-1}$ pre dáta zo siete ATDnet.

V zimných mesiacoch (obr. 4.12c; 4.12d) sú rozdiely v hodnotách hustoty bleskov medzi oboma súbormi údajov viac výrazné. Vizualizácie dát zo siete ATDnet aj modelu Inox2.0 zobrazujú najvyššiu hustotu bleskov v morskej oblasti, pričom model Inox2.0 navyše zachytáva hodnoty v oblasti Severného mora, čo je v kontraste s údajmi ATDnet. Znova môžeme pozorovať podobnú súvislosť ako v sekcii 4.1 týkajúcimi sa emisií LNO. Najvyššia priemerná hodnota počas zimných mesiacov je 0,002 blesk $\text{km}^{-2} \text{deň}^{-1}$ pre model Inox2.0 a 0,01 blesk $\text{km}^{-2} \text{deň}^{-1}$ pre dáta zo siete ATDnet. Môžeme z toho aj usúdiť, že model Inox2.0 jemne podhodnocuje hodnoty hustoty bleskov v zimnom období.

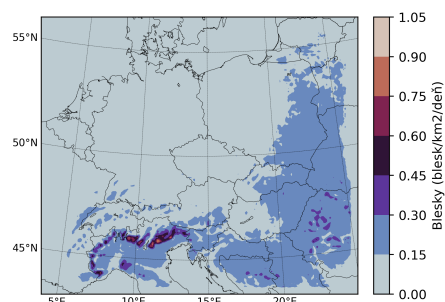
Vizuálna plošná rozloženie hustoty bleskov počas všetkých mesiacov (obr. 4.12e; 4.12f) odhaľuje, že model Inox2.0 vykazuje hodnoty približne desaťkrát vyššie ako hodnoty ATDnet. Región Álp vykazuje konzistentne najvyššie hodnoty hustoty bleskov. Pozoruhodné je, že vizualizácia údajov ATDnet odhaľuje zvýšenú hustotu bleskov v oblastiach ako Rumunsko, stredné Slovensko a južné Poľsko, ktoré sú v modeli Inox2.0 menej výrazné. Najvyššia priemerná hodnota počas všetkých mesiacov je 100,78 blesk $\text{km}^{-2} \text{rok}^{-1}$ pre model Inox2.0 a 9,21 blesk $\text{km}^{-2} \text{rok}^{-1}$ pre dáta zo siete ATDnet.

Záverom môžeme povedať, že model Inox2.0 nadhodnotil hodnoty priemernej

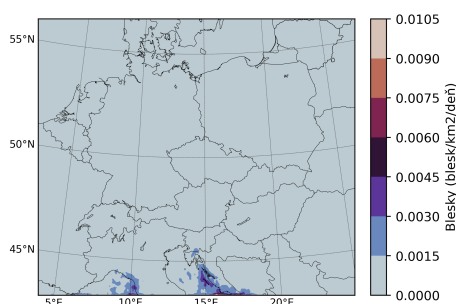
hustoty bleskov počas leta, čo je v rozpore s našim pôvodným predpokladom. Počas zimy, keď sa blesková aktivita koncentruje najmä na oblasť mora, naopak model InoX2.0 hodnoty jemne podhodnotil. Keďže je blesková aktivita počas leta výrazne vyššia ako v zime, spôsobilo nadhodnotenie hustoty bleskov v lete modelom InoX2.0 celkové nadhodnotenie počas všetkých mesiacov.



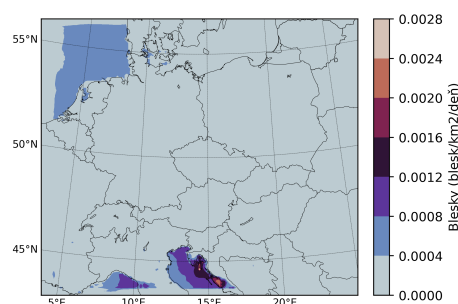
(a) ATDnet data v letných mesiacoch



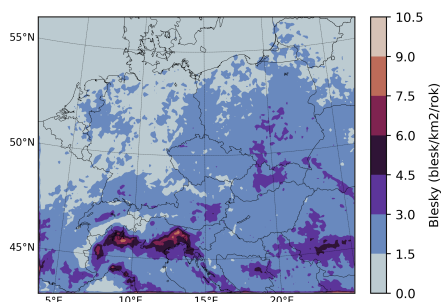
(b) Model InoX2.0 v letných mesiacoch



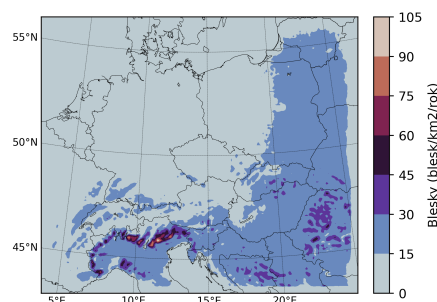
(c) ATDnet data v zimných mesiacoch



(d) Model InoX2.0 v zimných mesiacoch



(e) ATDnet data všetky mesiace

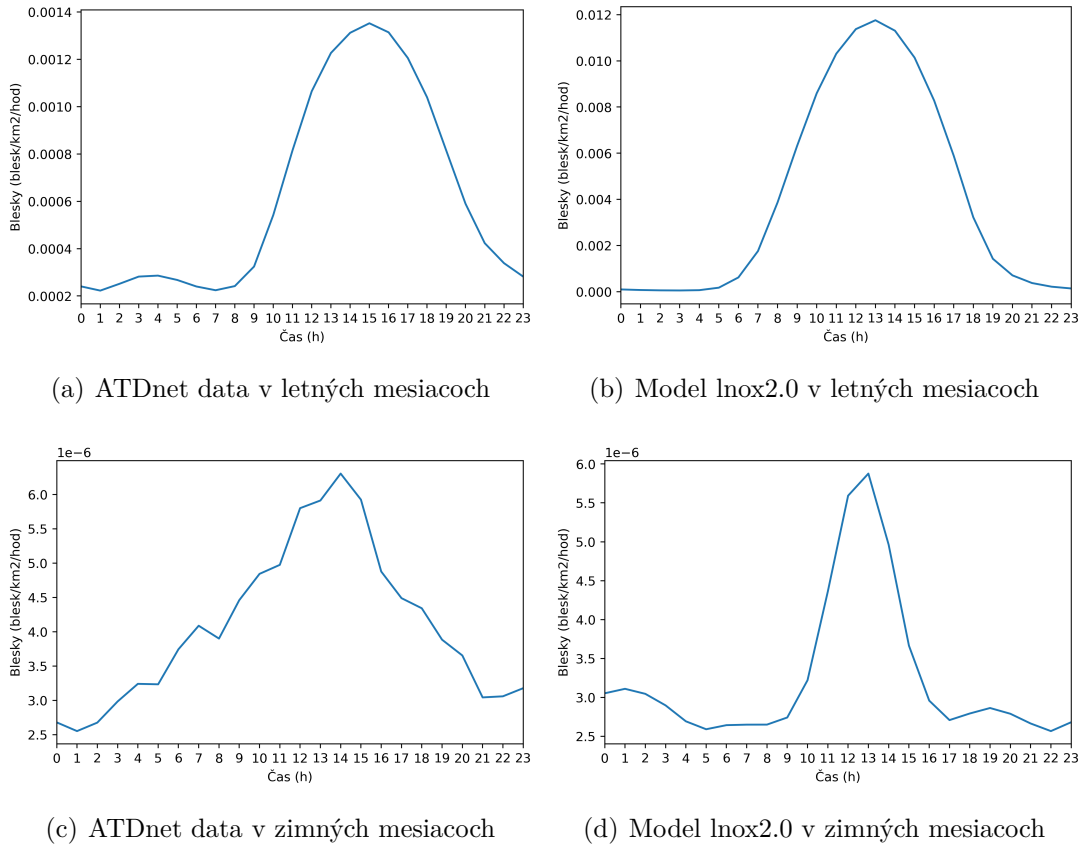


(f) Model InoX2.0 všetky mesiace

Obrázek 4.12: Plošné rozloženie priemernej hodnoty hustoty bleskov.

4.3.2 Denný cyklus

Skúmanie denného cyklu hustoty bleskov, ako je znázornené v grafoch (obr. 4.13, 4.14) pre údaje z dátovej siete ATDnet a modelové simulácie z InoX2.0, ponúka cenné poznatky o časovej premenlivosti bleskovej aktivity.



Obrázek 4.13: Denný cyklus hustoty bleskov.

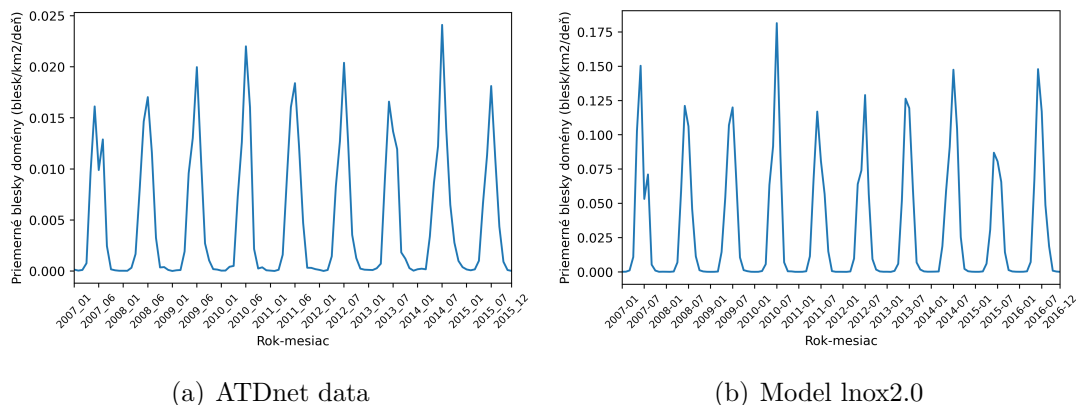
V letných mesiacoch sa v oboch súboroch údajov prejavujú maximá v hustote bleskov v popoludňajších hodinách, čo svedčí o zvýšenej konvektívnej aktivite. Maximá hustoty bleskov v lete sú $0,001 \text{ blesk km}^{-2} \text{ hod}^{-1}$ pre ATDnet a $0,01 \text{ blesk km}^{-2} \text{ hod}^{-1}$ pre model lnox2.0. Znova vidíme, že model lnox2.0 vykazuje desaťkrát vyššie hodnoty ako ATDnet.

Naopak, v zime vykazuje denný cyklus hustoty bleskov viac odlišností, pričom oba súbory údajov vykazujú nižšiu celkovú hustotu bleskov v porovnaní s letnými mesiacmi. Maximá hustoty bleskov v zime sú $6,30 \cdot 10^{-6} \text{ blesk km}^{-2} \text{ hod}^{-1}$ pre ATDnet a $5,88 \cdot 10^{-6} \text{ blesk km}^{-2} \text{ hod}^{-1}$ pre model lnox2.0. Z toho vidieť, že model lnox2.0 veľmi jemne podhodnotil výsledky v zime.

Napriek tomu podobnosti v načasovaní a rozložení vrcholov hustoty bleskov naznačujú mieru zhody medzi oboma súbormi údajov pri zachytávaní sezónnych zmien v bleskovej aktivite.

4.3.3 Mesačný cyklus

Porovnanie mesačných cyklov hustoty bleskov medzi dátami zo siete ATDnet (pokrývajúcimi obdobie od januára 2007 do decembra 2015) a modelovými simuláciami z lnox2.0 (pokrývajúcimi obdobie od januára 2007 do decembra 2016) odhaľuje pozoruhodné rozdiely v časovom rozložení bleskovej aktivity.



Obrázek 4.14: Mesačný cyklus priemernej hustoty bleskov.

Napriek podobnostiam vo všeobecných trendoch, ako je vyššia početnosť bleskov počas teplejších mesiacov, sa medzi oboma súbormi údajov objavujú významné rozdiely. Najmä údaje ATDnet konzistentne vykazujú nižšie hodnoty hustoty bleskov v porovnaní s modelom, čo naznačuje potenciálne nadhodnotenie modelu lnox2.0. Okrem toho maximum hustoty bleskov pozorovaný v júli 2014 s hodnotou $0,02 \text{ blesk km}^{-2} \text{ deň}^{-1}$ v údajoch ATDnet kontrastuje s hlavným vrcholom pozorovaným v júli 2010 s hodnotou $0,18 \text{ blesk km}^{-2} \text{ deň}^{-1}$ v simuláciách modelu lnox2.0.

4.4 Návrhy na úpravu modelu lnox2.0

Proces validácie, v ktorom sa porovnávali frekvencie bleskov vygenerované modelom s meraniami zo siete ATDnet, ako sa podrobne uvádza v štúdiu (21), odhalil značný rozpor. Zistilo sa, že počty bleskov v modeli lnox2.0 sú takmer desaťkrát vyššie ako počty pozorované v sieti ATDnet, a to najmä pre blesky nad pevninou, a nie nad oceánom. V dôsledku toho bolo nevyhnutné doladiť parametrizáciu tak, aby sa zosúladiła s pozorovaným vzťahom (3.1).

Vykonalí sme lineárnu regresiu s cieľom určiť optimálne hodnoty parametrov a_2 a a_3 . Cieľom tohto postupu bolo čo najpresnejšie zosúladiť ročnú priemernú hustotu bleskov medzi oblakom a zemou nad pevninou s odhadovanými hodnotami modelu. Výsledkom lineárnej regresie sú upravené parametre a_2 a a_3 s týmito hodnotami:

$$a_2 = 4,81 \cdot 10^{-5}$$

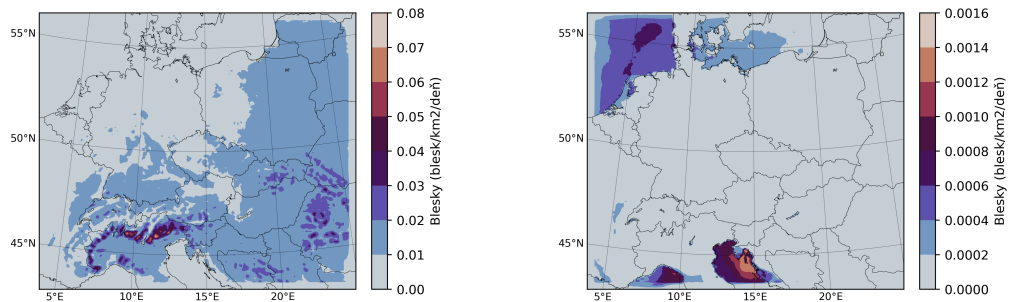
$$a_3 = 5,69 \cdot 10^{-3} .$$

Z týchto hodnôt je okamžite zjavné, že sú zhruba 10-krát nižšie ako v pôvodnej parametrizácii modelu, viz. sekcia 3.2. Na základe upravených parametrov sa prepočítala hustota blesku a množstvo emisií LNO, ktoré sú z toho dôvodu logicky približne 10-krát nižšie.

4.4.1 Hustota bleskov

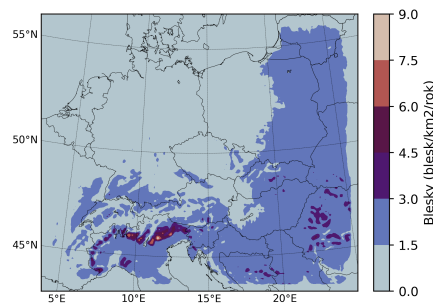
Vizualizácia plošného rozloženia hustoty bleskov pre 'nový' model lnox2.0 ponúka cenné poznatky o upravenom zobrazení bleskovej aktivity po procese lineárnej regresie.

Vizualizácia (obr. 4.15) zobrazuje plošné rozloženie priemernej hustoty bleskov pre leto (obr. 4.15a), zimu (obr. 4.15b) a všetky mesiace (obr. 4.15c), čím poskytuje komplexný prehľad o sezónnych zmenách bleskovej aktivity. Okrem toho porovnanie vizualizácií 'nového' modelu s pôvodným modelom lnox2.0 a dátami zo siete ATDnet (obr. 4.12) môže uľahčiť podrobnejšie zhodnotenie výkonnosti modelu a jeho schopnosti presne zachytiť atmosférické elektrické javy.



(a) v letných mesiacoch

(b) v zimných mesiacoch



(c) všetky mesiace

Obrázek 4.15: Plošné rozloženie priemernej hustoty bleskov upraveného modelu lnox2.0.

V letných mesiacoch môžeme vidieť, že 'nový' model lnox2.0 (obr. 4.15a) sa začína viac zhodovať s hodnotami dát zo siete ATDnet (obr. 4.12a), čo odráža účinnosť úprav lineárnej regresie. Vizualizácia znázorňuje zníženie hodnôt hustoty bleskov v porovnaní s pôvodným modelom lnox2.0 (obr. 4.12b), čo svedčí o úspešnej kalibrácii, ktorá lepšie zodpovedá pozorovanej bleskovej aktivite.

Táto lepšia zhoda medzi 'novým' modelom a dátami zo siete ATDnet počas letných mesiacov naznačuje, že úpravy vykonané prostredníctvom lineárnej regresie účinne zmiernili predtým zistené nezrovnalosti. Najvyššia zaznamenaná priemerná hodnota hustoty bleskov pre 'nový' model lnox2.0 počas letných mesiacov je $0,07 \text{ blesk km}^{-2} \text{ deň}^{-1}$. Táto hodnota sa nabýva v oblasti Álp.

V zimných mesiacoch (obr. 4.15b) 'nový' model lnox2.0 neprezentuje lepšiu zhodu v hodnotách hustoty bleskov, pričom 'starý' aj 'nový' model tieto hodnoty podhodnotil, v porovnaní s dátami z ATDnet (obr. 4.12c). Najvyššia zaznamenaná priemerná hustota bleskov pre model 'nový' lnox2.0 počas zimných mesiacov je $0,001 \text{ blesk km}^{-2} \text{ deň}^{-1}$ v oblasti Jadranského mora. Toto je dôsledok toho, že

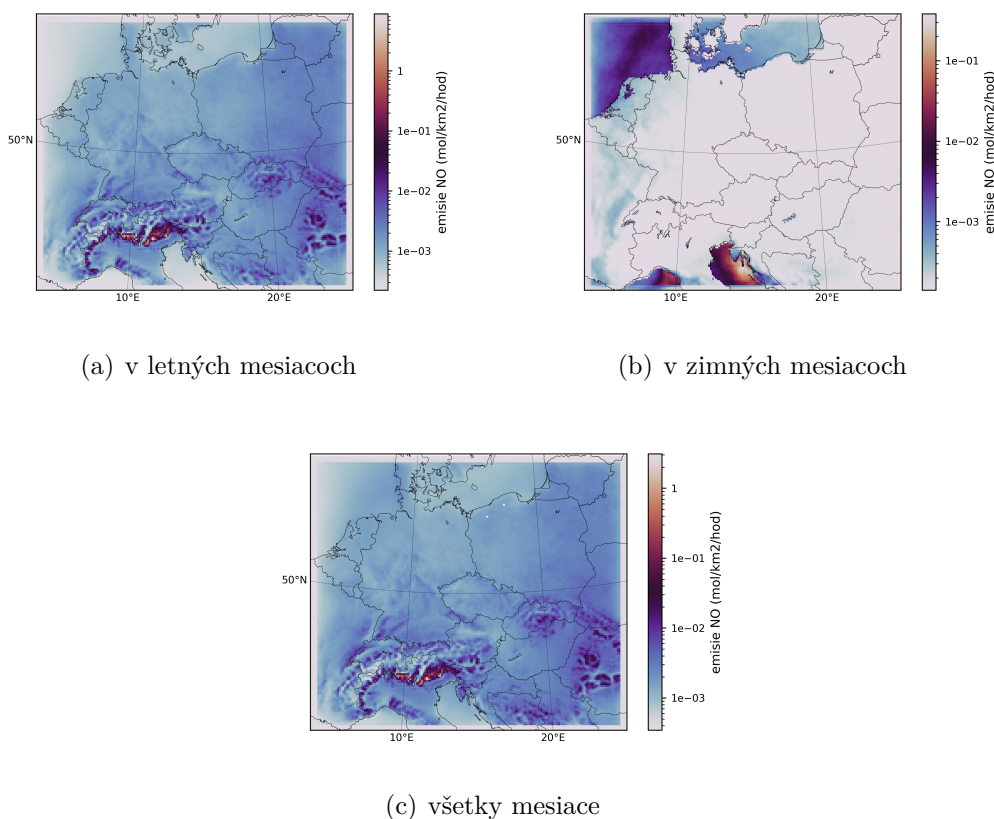
naša zmena parametrizácie sa vzťahovala len na blesky nad pevninou a nie nad oceánom. V zime sa sústreďuje väčšina bleskov nad morom.

Pri zohľadnení všetkých mesiacov (obr. 4.15c) hustota bleskov pre 'nový' model Inox2.0 preukazuje zlepšenú zhodu s dátami z ATDnet (obr. 4.12e). Najvyššia zaznamenaná priemerná hustota bleskov pre 'nový' model Inox2.0 počas všetkých mesiacov je $8,62 \text{ blesk km}^{-2} \text{ rok}^{-1}$ v oblasti Álp.

Tieto pozorovania zdôrazňujú zlepšenie zhody 'nového' modelu Inox2.0 v porovnaní s meraním, najmä počas letných mesiacov a všetkých mesiacov, v porovnaní s pôvodným modelom.

4.4.2 Emise LNO

Porovnaním vizualizácií plošného rozloženia vertikálne integrovaných emisií LNO zo 'starého' (obr. 4.1) a 'nového' (obr. 4.16) modelu sú zrejme nepatrné rozdiely. 'Nový' model po úpravách lineárnej regresie vykazuje mierne zmeny v súlade so simulovanými emisiami LNO zo 'starého' modelu.



Obrázek 4.16: Plošné rozloženie vertikálne integrovaných emisií LNO upraveného modelu Inox2.0

Konkrétne počas letných mesiacov (obr. 4.16a) vykazuje 'nový' model zhodu, čo sa týka priestorového rozloženia emisií nad oblasťami, so simulovanými emisiami LNO zo 'starého' modelu (obr. 4.1a). Naopak, 'starý' model mohol nadhodnotiť emisie LNO, čo viedlo k vyšším hodnotám v určitých regiónoch. Najvyššia hodnota vertikálne integrovaných emisií LNO v lete pre 'nový' model je $8,89 \text{ mol km}^{-2} \text{ hod}^{-1}$. Táto hodnota sa nabýva v oblasti Álp.

V zimných mesiacoch (obr. 4.16b) sa 'nový' model skoro zhoduje so simulovanými emisiami LNO zo 'starého' modelu (obr. 4.1b), ktoré sa prevažne sústreďujú nad morom. Maximálna hodnota vertikálne integrovaných emisií LNO počas zimy pre 'nový' model je $0,38 \text{ mol km}^{-2} \text{ hod}^{-1}$ nad Jadranským morom. V prípade zimných mesiacov sa môže zdať nezvyčajné, že naša najvyššia hodnota zodpovedá 'starému' modelu. Napriek tomu to nie je chyba, pretože počas zimy sa najvyššia emisivita zvyčajne vyskytuje nad morom, kde sme našu parametrizáciu nezmenili (viz. 4.4). Konkrétne sme nemenili parametrizáciu pre blesky nad oceánom, kde sa blesková aktivita sústreďuje počas zimných mesiacov.

Vo všetkých mesiacoch (obr. 4.16c) je najvyššia hodnota vertikálne integrovaných emisií LNO $3,10 \text{ mol km}^{-2} \text{ hod}^{-1}$. Táto hodnota sa nabýva v oblasti Álp.

Môžeme celkovo usúdiť, že kalibrácia parametrov v lineárnej regresii prebehla úspešne a podarilo sa nám získať modelové simulácie, ktoré sú bližšie hodnotám z meraní.

Záver

Táto práca sa snaží kvantifikovať emisie oxidov dusíka z bleskov (LNO) na báze jednoduchého numerického modelu (Inox2.0) pre výpočet emisií LNO na základe určených meteorologických parametrov, pričom sa zameriava najmä na zistenie ich časopriestorových zmien. Počnúc skúmaním základných mechanizmov, ktoré poháňajú konvektívne búrky a iniciáciu bleskov, ako je podrobne uvedené v kapitolách 1 a 2, sme položili základy pre pochopenie zložitosti týchto atmosférických procesov.

Naša analýza odhalila kľúčové poznatky o dynamike bleskovej aktivity a jej vplyve na emisie NO. Spojením pozorovacích údajov s modelovými simuláciami sme odhalili rôzne priestorové a časové zákonitosti, ktorými sa riadi hustota bleskov, konvektívna dostupná potenciálna energia (CAPE) a nakoniec emisie LNO.

Okrem toho porovnanie skúmaného modelovaného CAPE s údajmi z pozorovaní, ako je ukázané v kapitole 4, poskytlo cenné poznatky o výkonnosti modelu WRF. Napriek zachyteniu všeobecných trendov v rozložení CAPE sa v porovnaní s údajmi z pozorovaní ukázali výrazné rozdiely, najmä v hodnotách CAPE a ich priestorovom rozložení. To poukazuje na potenciál spresnenia parametrov modelu s cieľom zvýšiť presnosť predpovedí konvektívneho prostredia.

Okrem toho sme pri skúmaní hustoty bleskov, ako je uvedené v kapitole 4, zistili významné odchýlky medzi modelom Inox2.0 a údajmi z pozorovaní (zo siete ATDnet). Najmä model Inox2.0 neustále vykazoval desaťnásobne vyššiu aktivitu bleskov ako pozorovaná, čo zdôrazňuje nevyhnutnosť metodického zlepšenia parametrizácie bleskov v rámci atmosférických modelov.

V nadväznosti na tieto zistenia sme navrhli vylepšenia modelu Inox2.0 zamerané na lepšie zosúladenie bleskovej aktivity a emisií LNO s údajmi z pozorovaní. Tieto vylepšenia zahŕňajú úpravy parametrizácie modelu a prehodnotenie hustoty bleskov a emisií LNO, ako sa uvádza v kapitole 4.

Záverom možno konštatovať, že náš prístup priniesol cenné poznatky o zložitej súhre medzi konvektívnymi búrkami, bleskovou aktivitou a emisiami NO. Spojením údajov z pozorovaní a modelových simulácií sme posunuli naše chápanie atmosférických procesov a poukázali na možnosti zdokonalenia predpovedi týchto emisií. To bude mať obrovský potenciál pre modelovanie troposférickej chémie, keďže sa ukázalo, že LNO môže za určitých okolností predstavovať zdroj podobného rozsahu ako antropogénne emisie NO. Presnejší popis časového a priestorového rozloženia emisií LNO umožní lepšie kvantifikovať vplyv LNO na chemizmus atmosféry. To ponúka prirodzené rozšírenie tohto výzkumu, ktoré bude zahŕňať použitie chemicko-transportných modelov (napr. CAMx) na určenie chemického vplyvu LNO v troposfére (najmä na troposférický ozón).

Literatura

- [1] Belda, M., Benešová, N., Resler, J., Huszár, P., Vlček, O., Krč, P., Karlický, J., Juruš, P., and Eben, K.: FUME 2.0 – Flexible Universal processor for Modeling Emissions, EGUsphere [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2740>, 2024.
- [2] Sunita Verma, Pramod Kumar Yadava, D.M.Lal,R. K. Mall, Harshbardhan Kumar And Wagata Payra : Role of Lightning NOx in Ozone Formation: A Review.*Pure Appl. Geophys.* 178, 1425–1443, <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02710-5>,2021
- [3] Jbed O. Kaplan and Katie Hong-Kiu Lau: The WGLC global gridded lightning climatology and time series. *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 3219–3237, <https://doi.org/10.5194/essd-13-3219-2021>,2021
- [4] Kuenen, J. J. P., Visschedijk, A. J. H., Jozwicka, M., and Denier van der Gon, H. A. C.: TNO-MACCII emission inventory; a multi-year (2003–2009) consistent high-resolution European emission inventory for air quality modelling, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 10963–10976,<https://doi.org/10.5194/acp-14-10963-2014>, 2014.
- [5] D. L. Finney, R. M. Doherty, O. Wild, and N. L. Abraham: The impact of lightning on tropospheric ozone chemistry using a new global lightning parametrisation. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 7507–7522, <https://doi.org/10.5194/acp-16-7507-2016>, 2016
- [6] Jingqiu Mao¹ , Tianlang Zhao¹, Christoph A. Keller , Xuan Wang, Patrick J. McFarland, Jena M. Jenkins ,and William H. Brune: Global Impact of Lightning-Produced Oxidants. *J. Geophys. Res.* ,48 , e2021GL095740, <https://doi.org/10.1029/2021GL095740>,2021
- [7] Chao Luo, Yuhang Wang ,and William J. Koshak: Development of a self-consistent lightning NOx simulation in large-scale 3-D models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 3141–3154 <https://doi.org/10.1002/2016JD026225>, 2017
- [8] Ulrike Lohmann, Felix Lüönd and Fabian Mahrt: An Introduction to Clouds From the Microscale to Climate. United Kingdom, University Printing House, Cambridge CB2 8BS, 2016
- [9] Daniela Rezáčková, Petr Novák, Marek Kašpar, Martin Setvák : Fyzika oblaků a zrážek. Praha, Academia, 2007
- [10] Cloud Classification, Online obrázok, CENTER FOR SCIENCE EDUCATION, <https://scied.ucar.edu/learning-zone/clouds/cloud-types>
- [11] NASA, *Cloud Height*, Earth Data, <https://www.earthdata.nasa.gov/topics/atmosphere/clouds/cloud-properties/cloud-height>
- [12] The NERC Vocabulary Server, *Atmosphere net upward convective mass flux*, nerc, https://vocab.nerc.ac.uk/standard_name/atmosphere_net_upward_convective_mass_flux/,2010

- [13] Parameter Database, *Mean convective precipitation rate anomaly*, ECMWF, <https://codes.ecmwf.int/grib/param-db/173143>
- [14] U. Schumann and H. Huntrieser: The global lightning-induced nitrogen oxides source. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 3823–3907, <https://doi.org/10.5194/acp-7-3823-2007>, 2007
- [15] R.G. Barry and R.J. Chorley: *Atmosphere, weather and climate (7th ed)*, Routledge 1998, 80-81, ISBN 0-415-16020-0
- [16] Colin Price, David Rind : What determines the cloud-to-ground lightning fraction in thunderstorms? *J. Geophys. Res.*, 20, 463-466, <https://doi.org/10.1029/93GL00226>, 1993
- [17] Alex J. DeCaria, Kenneth E. Pickering, Georgiy L. Stenchikov, Lesley E. Ott, Lightning generated NO_x and its impact on tropospheric ozone production: A three-dimensional modeling study of a Stratosphere-Troposphere Experiment: Radiation, Aerosols and Ozone (STERA-O-A) thunderstorm, *J. Geophys. Res.*, 110, D14303, <https://doi.org/10.1029/2004JD005556>, 2005
- [18] Karlický, J., Rieder, H.E., Huszár, P., Peiker, J. and Sukhodolov, T.: A cautious note advocating the use of ensembles of models and driving data in modeling of regional ozone burdens, *Air. Qual. Atmos. Health*, <https://doi.org/10.1007/s11869-024-01516-3>, 2024.
- [19] Georg A. Grell , Steven E. Peckham , Rainer Schmitz , Stuart A. McKeen , Gregory Frost , William C. Skamarock , Brian Eder : Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmos. Environ.*, 37, 6957-6975, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.027>, 2005
- [20] Liaskoni, M., Huszar, P., Bartík, L., Prieto Perez, A. P., Karlický, J., and Vlček, O.: Modelling the European wind-blown dust emissions and their impact on particulate matter (PM) concentrations, *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 3629–3654, <https://doi.org/10.5194/acp-23-3629-2023>, 2023.
- [21] Sven-Erik Enno , Jacqueline Sugier , Regina Alber , Mark Seltzer :Lightning flash density in Europe based on 10 years of ATDnet data. *Atmos. Res.*, 235, 104769, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104769>, 2010
- [22] Simmons, A. J., Willett, K. M., Jones, P. D., Thorne, P. W., and Dee, D. P.: Low-frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature and precipitation: inferences from reanalyses and monthly gridded observational datasets, *J. Geophys. Res.*, 115, D01110, <https://doi.org/10.1029/2009JD012442>, 2010.
- [23] Lesley E. Ott, Kenneth E. Pickering, Georgiy L. Stenchikov, Dale J. Allen, Alex J. DeCaria, Brian Ridley, Rwei-Fong Lin, Stephen Lang, and Wei-Kuo Tao: Production of lightning NO_x and its vertical distribution calculated from three-dimensional cloud-scale chemical transport model simulations, *J. Geophys. Res.*, 115, D04301, <https://doi.org/10.1029/2009JD011880>, 2009.

Seznam obrázků

1.1	Klasifikácia oblakov (10).	6
1.2	Schéma globálneho elektrického obvodu (8).	7
1.3	Schematické zobrazenie vzniku náboja v dôsledku zrážky kryštálu ľadu s časticou snehového krúpu a separácie náboja (8).	8
1.4	Schémy znázorňujúce proces vedúci k blesku medzi oblakom a zemou a s ním súvisiace časové kroky: (a) rozloženie náboja v oblaku (b) prvotní impuls v tvorbe elektrického výboja (c,d) vodiaci výboj (e) proces pripojenia (f,h) prvý spätný blesk (g) hrom (i,j) subsekventný výboj v kanáli ionizovaného vzduchu, ktorý vytvoril vodiaci výboj (k) druhý spätný blesk (l) situácia po skončení svetelných bleskov(8).	10
1.5	Fotografia blesku medzi oblakom a zemou(8).	11
4.1	Plošné rozloženie emisií LNO pre prvú vrstvy (výška 0 až 48m).	21
4.2	Plošné rozloženie vertikálne integrovaných emisií LNO.	22
4.3	Vertikálne rozloženie emisií LNO v Alpách, strednej Európe, severnom Taliansku, Severnom mori, západnej Európe v jednotkách mol km^{-2} pre leto a mmol km^{-2} pre zimu.	23
4.4	Denný cyklus emisií LNO pre prvú vrstvy (0 - 48m) v Alpách, strednej Európe, severnom Taliansku, Severnom mori, západnej Európe v jednotkách $\text{mol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$ pre leto a $\text{mmol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$ pre zimu.	24
4.5	Denný cyklus vertikálne integrovaných emisií LNO v Alpách, strednej Európe, severnom Taliansku, Severnom mori, západnej Európe v jednotkách $\text{mol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$ pre leto a $\text{mmol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$ pre zimu.	25
4.6	Plošné rozloženie priemerných emisií NO z antropogénnych činností za rok 2011.	26
4.7	Plošné rozloženie priemernej hodnoty CAPE o 12:00 hodine pre všetky mesiace.	27
4.8	Plošné rozloženie priemernej hodnoty CAPE o 00:00 hodine pre všetky mesiace.	28
4.9	Plošné rozloženie priemernej hodnoty CAPE o 12:00 hodine pre letné mesiace.	29
4.10	Plošné rozloženie priemernej hodnoty CAPE o 00:00 hodine pre letné mesiace.	29
4.11	Mesačný cyklus priemernej hodnoty CAPE pre model WRF a zo sondážnych meraní Praha-Libuš s ich štandardnými odchýlkami.	30
4.12	Plošné rozloženie priemernej hodnoty hustoty bleskov.	32
4.13	Denný cyklus hustoty bleskov.	33
4.14	Mesačný cyklus priemernej hustoty bleskov.	34
4.15	Plošné rozloženie priemernej hustoty bleskov upraveného modelu Inox2.0.	35
4.16	Plošné rozloženie vertikálne integrovaných emisií LNO upraveného modelu Inox2.0.	36

Seznam tabulek

4.1	Maximálne hodnoty pre vertikálne rozloženie emisii LNO v Alpách, strednej Európe, severnom Taliansku, Severnom mori, západnej Európe v jednotkách mol km^{-2} pre leto a mmol km^{-2} pre zimu.	24
4.2	Maximálne hodnoty pre denný cyklus emisii LNO pre prvú vrstvu (0 - 48m) v Alpách, strednej Európe, severnom Taliansku, Severnom mori, západnej Európe v jednotkách $\text{mol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$ pre leto a $\text{mmol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$ pre zimu.	25
4.3	Maximálne hodnoty pre denný cyklus vertikálne integrovaných emisii LNO v Alpách, strednej Európe, severnom Taliansku, Severnom mori, západnej Európe v jednotkách $\text{mol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$ pre leto a $\text{mmol km}^{-2} \text{hod}^{-1}$ pre zimu.	26
4.4	Maximálne hodnoty pre mesačný cyklus priemernej hodnoty CAPE pre model WRF a Libuše.	30

Seznam použitých zkratek

- Cb Cumulonimbus
- LNO_x ang. lightning NO_x, sk. bleskové NO_x (anglický ekvivalent, slovensky ekvivalent)
- CTOP ang. cloud top height, sk. výška vrcholov oblakov (anglický ekvivalent, slovensky ekvivalent)
- UMF ang. updraft cloud mass flux, sk. hmotnostný tok výstupného konvekčného prúdu (anglický ekvivalent, slovensky ekvivalent)
- CPR ang. convective precipitation rate, sk. intenzita konvektívnych zrážok (anglický ekvivalent, slovensky ekvivalent)
- CAPE ang. convective available potential energy, sk. dostupná konvektívna potenciálna energia (anglický ekvivalent, slovensky ekvivalent)
- FLC ang. free convection layer, sk. úroveň voľnej konvekcie (anglický ekvivalent, slovensky ekvivalent)
- LFC ang. layer of free convection, sk. úroveň voľnej konvekcie (anglický ekvivalent, slovensky ekvivalent)
- EL ang. equilibrium layer, sk. úroveň rovnováhy (anglický ekvivalent, slovensky ekvivalent)
- WRF Weather Research and Forecasting Model
- CAMx Comprehensive Air Quality Model with extensions