



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

## ROZPTYLOVÉ STUDIE PRO LOGISTICKÉ MODELY

DISPERSION STUDIES FOR LOGISTIC PROBLEMS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Jan Dvořáček**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Martin Pavlas, Ph.D.**

**BRNO 2018**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství  
Student: **Bc. Jan Dvořáček**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Procesní inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Martin Pavlas, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Rozptylové studie pro logistické modely

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zaměřuje na problematiku modelování šíření emisí ze stacionárních zdrojů znečištění. Pozornost bude zaměřena na hodnocení negativních i pozitivních efektů budoucí realizace zařízení pro energetické využití odpadů. Pozitivním efektem se rozumí snížení produkce emisí ze stávajících zdrojů, které dodávají teplo a elektřinu do stejné sítě (zejména síť CZT), do jaké může potenciálně dodávat teplo zařízení pro energetické využití odpadů. Práce bude založena na využití dostupných programových nástrojů (např. SYMOS), zajištění nezbytných vstupů a zvládnutí konkrétního software. Důležitým aspektem bude tvůrčí přístup, který umožní postupně generovat výsledky, tyto podrobit analýze s cílem definovat potenciál využití těchto nástrojů při přípravě dat pro komplexní logistické úlohy. Přitom bude zvolena vhodná úroveň detailu a volba zjednodušení.

### Cíle diplomové práce:

- Seznámit se s problematikou modelování emisí ze stacionárních zdrojů a osvojení si nezbytných teoretických poznatků
- Volba vhodného modelovacího prostředí a zvládnutí základů práce v tomto prostředí
- Sběr vstupních dat
- Definování cíle výpočtů a nutných zjednodušujících předpokladů
- Diskuze a interpretace výsledků

### Seznam doporučené literatury:

ČR, Zákon č. 201/2012 Sb. Zákon o ochraně ovzduší, Sbírka zákonů ČR, částka 69/2012.

ČR, Vyhláška č. 415/2012 Sb. Vyhláška o přípustné úrovni znečištění a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší, Sbírka zákonů ČR, částka 151/2012.

BUBNÍK, J., KEDER, J., MACOUN, J., MAŇÁK, J., SYMOS'97 Systém modelování stacionárních zdrojů - Metodická příručka, Český hydrometeorologický ústav, Praha, 1998 (aktualizace 2014)

European Union IPPC: Best Available Techniques (BAT) Reference Document on Waste Incineration - Drafted Document. Květen 2017. Dostupné na [www:](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/WI/WI_5_24-05-2017_web.pdf)

[http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/WI/WI\\_5\\_24-05-2017\\_web.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/WI/WI_5_24-05-2017_web.pdf)

NEVRLÝ, V., ŠOMPLÁK, R., GREGOR, J., PAVLAS, M., POPELA, P., KLEMEŠ, J., Impact on the Population from the Transportation of Waste based on Emission Models, In Proceedings of SDEWES 2017 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems, October 4-8, 2017, Dubrovnik, Croatia, paper no.: 0312, ISSN 1847-7178

US Environmental Protection Agency, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Stationary Point and Area Sources. vol. 1, fifth ed., 1995.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Předložená diplomová práce se zabývá možnostmi využití metod matematického modelování šíření emisí ze stacionárních zdrojů jako potenciálního nástroje pro přípravu dat pro komplexní logistické úlohy. V tomto případě je jako stacionární zdroj uvažováno zařízení energetického využití odpadu. Práce je rozdělena na dvě stěžejní části, a to teoretickou a výpočtovou. Jako první je věnována pozornost emisním zdrojům a znečišťujícím látkám vznikajícím při procesu termického zpracování odpadů. Následně je uveden přehled legislativy spojené s problematikou znečištění ovzduší, jsou diskutovány rozptylové studie a kvalita ovzduší na území ČR. Závěrečná pasáž teoretické části se zabývá principy výpočtů rozptylu znečišťujících látek a disperzními modely. V úvodu výpočtové části práce je představen použitý software SYMOS'97, hlavní pozornost je pak věnována provedené sérii modelových výpočtů, při kterých byl vyšetřován vliv kapacity zdroje, rozptylových podmínek a terénu na výsledné hodnoty imisních koncentrací. Právě kapacita a zadaná větrná růžice se ukázaly jako parametry zásadně ovlivňující výsledek. Závěrečné zhodnocení ukázalo, že využitý disperzní model jeví dobrý potenciál pro jeho možné využití při řešení komplexních logistických úloh.

## **Summary**

Presented diploma thesis deals with the application of dispersion modelling of emissions from stationary sources of pollution as a potential tool which can be used for data preparation in reverse logistic models. In this case, the stationary source is represented by a waste-to-energy plant. The thesis consists of two main parts – theoretical and computational. Firstly, emission sources and pollutants originating in thermal waste treatment are discussed. In the second chapter, legislation linked to the problem of air pollution is listed and the topics of current air quality in the Czech Republic and dispersion studies are outlined. Closing section of the theoretical part provides information about the principals of dispersion calculations and classification of dispersion models is given. In the computational part, the used dispersion software SYMOS'97 is introduced and the series of conducted calculations is presented. The calculations investigated the influence of plant capacity, dispersion conditions and terrain on the results. The input data of plant capacity and wind rose were indicated as key parameters in the calculation. The final evaluation revealed a good potential of the used dispersion model as a support tool in reverse logistic models.

## **Klíčová slova**

disperzní model, síťový model, energetické využití odpadů, rozptylová studie, SYMOS'97, znečištění ovzduší

## **Keywords**

dispersion model, reverse logistic model, waste-to-energy, dispersion study, SYMOS'97, air pollution

**Bibliografická citace**

DVOŘÁČEK, J. *Rozptylové studie pro logistické modely*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 138 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D.

**Prohlášení**

Prohlašuji, že předloženou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a pod vedením vedoucího diplomové práce pana Ing. Martina Pavlase, Ph.D.

V Brně dne 25. 5. 2018.

---

Bc. Jan Dvořáček

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Martinu Pavlasovi, Ph.D. za čas, ochotu, energii, trpělivost a cenné připomínky, které mi při řešení dané problematiky věnoval.

Dále bych rád poděkoval svým rodičům, kteří mě během celého studia ochotně podporovali a bez kterých by mé studium nebylo možné. Velké díky patří i všem mým přátelům, kteří udělali moje studijní léta vsutku nezapomenutelná.

# Obsah

Úvod	10
<b>1 Znečišťování ovzduší</b>	<b>12</b>
1.1 Emisní zdroje	12
1.2 Klasifikace znečišťujících látek	14
1.2.1 Sloučeniny síry	14
1.2.2 Sloučeniny dusíku	15
1.2.3 PM	16
1.2.4 Anorganické sloučeniny uhlíku	17
1.2.5 Těžké kovy	18
1.2.6 Halogenvodíky	18
1.2.7 VOCs	18
1.2.8 POPs	19
<b>2 Kvalita ovzduší v ČR</b>	<b>20</b>
2.1 Přehled legislativy	20
2.1.1 Národní legislativa	20
2.1.2 Evropská legislativa	21
2.2 Emise a imise v ČR	22
2.2.1 Vývoj emisí	22
2.2.2 Současná imisní situace	23
2.2.3 Imisní limity	24
2.3 Rozptylové studie	25
<b>3 Modelování znečištění ovzduší</b>	<b>31</b>
3.1 Koncept šíření znečištění v atmosféře	33
3.1.1 Eulerovský přístup	34
3.1.2 Lagrangeovský přístup	36
3.2 Druhy emisních zdrojů	37
3.3 Prostorové měřítko	39
3.4 Rozdělení matematických modelů	40
3.4.1 Gaussovské modely	41
3.4.2 Lagrangeovské modely	43
3.4.3 Eulerovské modely	44
3.4.4 CFD	44
3.4.5 Statistické modely	45
<b>4 SYMOS'97</b>	<b>46</b>
4.1 Charakteristika modelu	46
4.2 Vstupní data	47
4.2.1 Údaje o emisích	47
4.2.2 Meteorologické a klimatické údaje	49
4.2.3 Geografické údaje	51



---

4.3	Alternativní disperzní modely . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Zařízení energetického využití odpadů (ZEVO)</b>	<b>53</b>
5.1	Popis technologie . . . . .	53
5.2	ZEVO v ČR . . . . .	55
5.3	Modelový zdroj ZEVO . . . . .	57
<b>6</b>	<b>Výpočtová část</b>	<b>60</b>
6.1	Modelový výpočet . . . . .	60
6.1.1	Vstupní data a jejich sběr . . . . .	61
6.1.2	Nastavení výpočtu . . . . .	66
6.1.3	Zpracování výsledků . . . . .	67
6.1.4	Diskuze a interpretace výsledků . . . . .	68
6.2	Variantní výpočty . . . . .	72
6.2.1	Diskuze a interpretace výsledků . . . . .	73
6.3	Implementace do komplexní logistické úlohy . . . . .	80
	<b>Seznam použitých zdrojů</b>	<b>86</b>
	<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b>	<b>93</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>96</b>
	<b>Seznam tabulek</b>	<b>99</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>100</b>
	<b>Příloha A</b>	<b>101</b>
	<b>Příloha B</b>	<b>105</b>
	<b>Příloha C</b>	<b>107</b>
	<b>Příloha D</b>	<b>109</b>
	<b>Příloha E</b>	<b>118</b>
	<b>Příloha F</b>	<b>138</b>

# Úvod

Problematika nakládání s odpady patří mezi jeden z klíčových environmentálních, ekonomických a sociálních problémů současnosti. Jen v Evropské unii (EU) bylo za rok 2014 vyprodukováno téměř 2,5 miliard tun odpadu [1]. Tvorba odpadu a jeho následné nesprávné zpracování způsobuje znečištění všech složek životního prostředí, přispívá k fenoménu globálního oteplování, plýtvání primárními zdroji surovin a má také vážné dopady na lidské zdraví. Zároveň je nakládání s odpady spojeno se značnými finančními náklady na činnosti s ním spojené [2]. Pro zmírnění zmíněných negativních dopadů je třeba nastavit komplexní a účinnou strategii odpadového hospodářství. Jelikož jsou vazby mezi jednotlivými oblastmi odpadového hospodářství obecně složité a tudíž obtížně řešitelné pouhou intuicí, nabízí se k tomuto účelu využít nástroje pracující s matematickými optimalizačními metodami, pomocí kterých lze na základě řady vstupních informací řešit i takto komplexní úlohy. Jeden z těchto nástrojů, nesoucí název NERUDA, je vyvíjen i na Ústavu procesního inženýrství Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně (ÚPI FSI VUT v Brně).

NERUDA je modulární systém označující komplexní logistickou úlohu, která má za úkol simulovat tok odpadu na vymezeném území [3]. Na základě výsledků tohoto optimalizačního výpočtu lze objektivně posoudit některé ze zásadních problémů odpadového hospodářství a nalézt odpovědi na s nimi spojené otázky – například určení vhodné lokality pro výstavbu zařízení pro nakládání s odpady a návrh jejich optimální kapacity nebo navrhování logistického řetězce spojeného s nakládáním s odpady. Kompletní popis systému NERUDA a rozsah jeho aplikací je představen v [4] a [5].

Při řešení úloh podobných té v systému NERUDA bylo doposud obecně zohledňováno zejména kritérium ekonomické s důrazem na minimalizaci nákladů spojených s nakládáním s odpadem. Jako neméně podstatné hledisko se však stále rostoucím důrazem na ekologii ve všech sférách lidské aktivity stává i hledisko environmentální. Jelikož je celý systém NERUDA výhradně vystavěn na ekonomickém základu i on je v současnosti rozšiřován o toto hledisko. V [3] Ferdan představil první z modulů ekologické optimalizace zohledňující vliv zařízení pro nakládání s odpady na životní prostředí pomocí metodiky Life Cycle Assessment (LCA) a indikátoru Global Warming Potential (GWP). Jako další z možných kritérií pro hodnocení vlivu na životní prostředí a zejména lidské zdraví se nabízí zohlednění lokálního dopadu znečišťujících látek vznikajících v různých fázích procesu zpracování odpadu – ať už v rámci logistického řetězce, tak při samotném zpracování v různých druzích zařízení. V [6] Nevrlý prezentoval úvodní studii hodnotící lokální vliv imisí na populaci, vznikajících v důsledku transportu na definované trase logistické sítě toku odpadů.

Předložená diplomová práce je v kontextu ekologické optimalizace systému NERUDA zaměřena na dopad druhé z uvedených fází zpracování odpadu, specificky pak na téma hodnocení lokálního vlivu znečišťujících látek (emisí) vznikajících v zařízeních pro energetické využití odpadu (ZEVO). Pojem energetické využití odpadu (EVO) je také obecně známý jako waste-to-energy (WtE). Jak může tento název napovědět, jde o technologii termického zpracování odpadů doprovázenou produkcí tepla, elektřiny nebo obojího. Technologie WtE je robustní a prověřená, fungující jako čistý a částečně obnovitelný zdroj

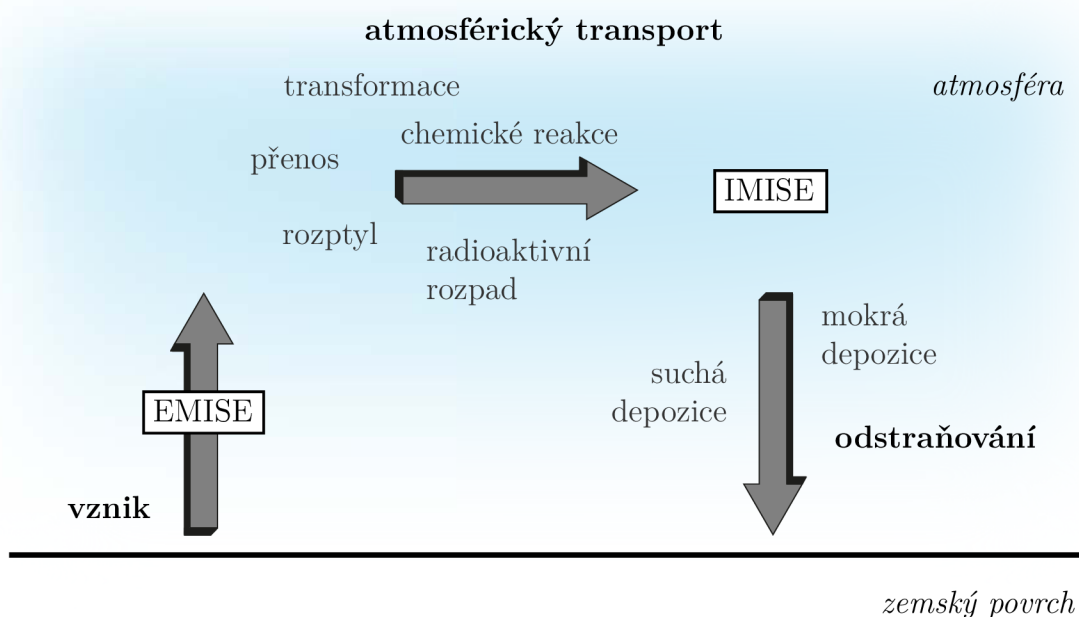
energie se stovkami aplikací na území EU [6]. Důvody, proč je nutné v optimalizační úloze zohlednit i vlivy spojené s šířením znečišťujících látek v ovzduší, vychází z rizik spojených s realizací ZEVO [6]. Každý z investičních projektů těchto zařízení je totiž doprovázen často silnými protesty ze strany veřejnosti. Mezi hlavní argumenty proti realizaci projektů ZEVO obvykle patří obavy z dopadů na lidské zdraví a životní prostředí, snížení kvality ovzduší nebo například lokální zvýšení intenzity dopravy [7]. Na základě zahrnutí vstupních dat týkajících se těchto otázek je očekáváno dosažení ještě lepších výstupů komplexní logistické úlohy řešené systémem NERUDA.

Předložená práce je koncepčně zpracovaná jako úvod do problematiky šíření emisí ze stacionárních zdrojů, což je právě klasifikace odpovídající zdroji ZEVO. K popisu šíření znečištění ovzduší jsou standardně využívány matematické modely, často označované jako tzv. disperzní modely. V praxi existuje nepřehledné množství jejich variant, lišících se přesností, přijatou mírou zjednodušení nebo například náročností na vstupní data. V této práci je využit Gaussovský disperzní model SYMOS'97, který patří mezi jeden z referenčních disperzních modelů stanovených legislativou České republiky (ČR). Hlavní náplní této práce je na základě řady modelových výpočtů provedených v příslušném softwaru zhodnotit lokální vliv příspěvků imisních koncentrací od ZEVO na stávající úroveň znečištění ovzduší, indikovat vliv jednotlivých vstupních parametrů na dosažené výsledky a následně definovat potenciál matematického disperzního modelování pro přípravu nezbytných vstupních dat do komplexní logistické úlohy.

Úvodní část práce je věnována procesu znečišťování ovzduší, tedy vypouštění emisí do ovzduší. Je v ní uvedena klasifikace emisních zdrojů a také přehled jednotlivých znečišťujících látek souvisejících s procesem termického zpracování odpadů. Následně je diskutována současná kvalita ovzduší na území ČR, důraz je přitom kladen na související národní i evropskou legislativu a zpracování rozptylových studií. Ve třetí kapitole předložené práce je rozebrán význam a účel modelování znečištění ovzduší, stručně jsou v ní nastíněny základní koncepty přístupů k matematickému popisu šíření znečištění ovzduší a nechybí také přehled nejpoužívanějších druhů disperzních modelů. Čtvrtá z kapitol se zabývá disperzním modelem SYMOS'97 a jeho požadavky na vstupní data, přičemž v závěru kapitoly je pozornost věnována alternativním modelům, které by bylo možno použít pro řešení uvedené problematiky. Předposlední kapitola této práce poskytuje stručný popis ZEVO a je v ní formulován modelový zdroj ZEVO použitý v praktické části. V šesté kapitole jsou uvedeny hlavní cíle výpočtové části práce a dále jsou detailně popsány všechny provedené modelové výpočty, jejichž výsledky jsou následně podrobně diskutovány a interpretovány. V závěrečné části této kapitoly jsou pak dosažené výsledky zhodnoceny v kontextu možnosti jejich využití při řešení komplexních logistických úloh, jako je například systém NERUDA.

# 1 Znečišťování ovzduší

Znečištění ovzduší je komplexem vzájemně neoddelitelných jevů a procesů probíhajících v atmosféře a na zemském povrchu. Na obr. 1.1 je vyobrazeno schéma reprezentující životní cyklus znečišťujících látek v atmosféře. Celý cyklus začíná vznikem a vypuštěním znečišťujících látek do ovzduší. Tento proces je jedním z primárních zájmů studia znečištění ovzduší [8] a bude mu proto věnována náležitá pozornost. Při přechodu emise na receptor (příjemce) nebo při jejich kontaktu se z ní stává imise. V průběhu této přeměny jsou emise v atmosféře součástí různých procesů – dochází k jejich přenosu, rozptylu, k chemickým reakcím a různým transformacím. Cyklus se pak uzavírá depozicí neboli odstraňováním znečišťujících látek na zemský povrch.



**Obrázek 1.1:** Životní cyklus znečišťujících látek.

Pro správnost řešení zvolené problematiky, v případě této práce posouzení environmentálního vlivu ZEVO prostřednictvím modelování znečištění ovzduší, je nutné pochopit tento komplex nejen jako celek, ale zároveň získat představu o jeho dílčích částech a jejich vzájemných vazbách. Tato kapitola se podrobněji věnuje počáteční fázi tohoto cyklu – znečišťování ovzduší. V první části je pozornost věnována zdrojům polutantů, jejich rozdělení a klasifikaci. Dále jsou v kontextu řešené problematiky rozebrány vybrané znečišťující látky a uvedeny některé z jejich následků na lidské zdraví a životní prostředí.

## 1.1 Emisní zdroje

Znečišťující příměsi jsou do ovzduší vypouštěny z nejrůznějších zdrojů. Povaha a charakteristiky těchto zdrojů nabývají zejména pro modelování znečištění ovzduší velkého vý-

znamu, neboť ovlivňují důležitou část celého výpočtu – vstupní data. To, z jakého zdroje jsou polutanty vypouštěny, je důležité také z hlediska jejich dalšího osudu v atmosféře.

V tab. 1.1 je uvedeno shrnutí klasifikace emisních zdrojů dle různých hledisek. Jedno ze základních rozdělení je dle typu původu znečišťujících látek. Přírozené zdroje vypouštějí znečišťující látky v důsledku přírodních pochodů probíhajících mezi atmosférou a dalšími zemskými sférami (např. hydrosférou, litosférou). Naopak zdroje antropogenní souvisejí s lidskou činností, zejména pak s produkcí tepla, elektřiny, zemědělskou činností nebo dopravou. Tyto zdroje bývají zpravidla koncentrovány v místech s vysokou intenzitou lidské činnosti, jako jsou průmyslové oblasti nebo celá města. Tento fakt vede k tomu, že emisní zátěž takových míst je podstatně vyšší než oblastí odlehlých.

**Tabulka 1.1:** Klasifikace emisních zdrojů dle různých hledisek [8].

hledisko	rozdělení	příklady
původ	přírozené	sopečná činnost, bakteriální procesy
	antropogenní	elektrárny, doprava, likvidace odpadu
umístění	přízemní	automobilová doprava, zemědělská činnost
	vyvýšené	komíny elektráren, průmyslových podniků
	výškové	letecká doprava
uspořádání (podkap. 3.2)	bodové	komín vypouštějící spaliny
	liniové	doprava po silnici
	plošné	hustě zastavěná oblast se spalovacími zdroji
	objemové	jaderný výbuch
stálost povahy	stacionární	komín ZEVO, stojící kolona aut
	mobilní	jedoucí nákladní automobil
doba trvání	kontinuální	vypouštění SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> z elektrárny
	diskontinuální	vypouštění prachu při čištění odlučovačů v elektrárně

Dle umístění lze emisní zdroje rozdělit na přízemní, vyvýšené a výškové. První z těchto skupin je charakteristická tím, že znečišťující látky jsou vypouštěny v bezprostřední blízkosti zemského povrchu a blízko dýchací zóny. Vyvýšené emisní zdroje emitují polutanty v určité výšce nad zemským povrchem (běžně se jedná o výšku průmyslových komínů), a to z důvodu zabránění zamoření bezprostřední blízkosti těchto zdrojů. Tímto opatřením však zároveň přispívají k dálkovému přenosu a šíření znečištění i do odlehlejších oblastí. Jako výškový zdroj lze označit zdroje operující ve značné výšce (několik set až tisíce metrů) nad zemským povrchem, např. letadla. Klasifikace z hlediska uspořádání je detailněji probrána v podkapitole 3.2, protože je zvláště podstatná pro výpočty pomocí disperzních modelů.

K rozdělení emisních zdrojů podle stálosti povahy a doby trvání je vždy nutné nejprve definovat prostorové, případně časové měřítko, podle kterého jsou takové zdroje posuzovány. Stacionární zdroje oproti zdrojům mobilním nemění svoji polohu v prostoru a čase. Jako kontinuální jsou označovány zdroje, které vypouštějí znečišťující příměsi nepřetržitě. Naopak zdroje diskontinuální emitují tyto látky pouze v určitém časovém úseku. Pro rozlišení těchto dvou druhů je zvláště důležité zmíněné časové měřítko. Zástupci obou skupin mezi sebou mohou volně přecházet podle toho, zda jsou řešeny studie mapující akutní, krátkodobou nebo dlouhodobou situaci znečištění ovzduší.

Modelový zdroj ZEVO uvažovaný v praktické části této práce lze s ohledem na prostorová a časová měřítka problematiky definovat jako antropogenní, stacionární, kontinuální bodový zdroj vyvýšeného charakteru.

## 1.2 Klasifikace znečišťujících látek

Stejně jako jejich zdroje i emise se dají klasifikovat na základě různých hledisek. Fundamentální rozdělení plyne z faktu, že po vypuštění znečišťujících příměsí do atmosféry může docházet k jejich dalším chemickým a fyzikálním přeměnám, viz obr. 1.1. V případě, že se jedná o látky, které jsou vypouštěny přímo ze zdrojů a nepodléhají dalším změnám, mluví se o emisích z primárních zdrojů (polutanty primární). Do této skupiny patří například CO nebo SO<sub>2</sub>. Mezi emise ze sekundárních zdrojů (polutanty sekundární), které nemají definovaný žádný přímý zdroj a vznikají až na základě procesů transformace či chemickou reakcí z primárních polutantů, pak patří například O<sub>3</sub> a NO<sub>2</sub>. Další hlediska, podle kterých lze emise rozdělit, je jejich skupenství nebo chemické složení. V případě dalšího textu bude preferováno právě rozdělení dle chemické povahy polutantů. Zároveň bude kladen důraz na znečišťující příměsi vznikající při spalovacím procesu v ZEVO. Přehled těchto látek je uveden v tab. 1.2.

Mezi znečišťujícími látkami nejčastěji produkovány v ZEVO lze najít běžné polutanty vznikající při každém spalovacím procesu jako oxid uhelnatý nebo oxidy síry, tak látky specifické pro spalování odpadu, např. dioxiny či furany. Jako v případě každého spalovacího procesu i při spalování odpadu ovlivňuje finální skladbu emisí hned několik faktorů [10]. Záleží nejen na složení vstupního materiálu, ale i na povaze zvolené technologie a zejména na podmínkách, při kterých ke spalování dochází. V ZEVO mohou vzniknout znečišťující látky prakticky třemi způsoby [11]. První možností je to, že jsou obsaženy přímo ve vstupním odpadu, druhou je jejich vznik jako produkt nedokonalého spalování ve spalovací komoře a třetí pak jejich zformování při procesech následujících po spalování (při chlazení spalin, jejich čištění apod.). Z hlediska negativního efektu na lidské zdraví nebo životní prostředí jsou zvláště nebezpečné látky obsahující prvky S, N, halogeny a těžké kovy [8]. Při pohledu na tab. 1.2 je zřejmé, že mnoho látek vypouštěných ze ZEVO mezi takové látky patří.

### 1.2.1 Sloučeniny síry

Hlavními zástupci této skupiny jsou SO<sub>2</sub> a SO<sub>3</sub>, pro hromadné označení oxidů síry se používá sumární vzorec SO<sub>x</sub>. Tyto oxidy vznikají stejně jako v případě fosilních paliv

spalováním vstupní suroviny. Mezi složky směšného komunálního odpadu (SKO), který se v ZEVO běžně zpracovává, přispívající ke vzniku těchto sloučenin patří odpadní papír, sádrokarton (obsahuje  $\text{CaSO}_4$ ) a různé kaly. Spaliny vstupující do systému čištění spalin běžně obsahují přibližně 5%  $\text{SO}_3$  [10].

Oxid siřičitý má dráždivé účinky na oči a dýchací soustavu, jeho vysoké koncentrace mohou způsobit respirační potíže. Zvláště citliví jsou k působení  $\text{SO}_2$  lidé trpící astmatem nebo chronickým onemocněním plic [12], [13]. Zbytkové množství oxidů síry vypouštěné komínem působí negativně na životní prostředí, a to zejména vlivem procesu acidifikace [11].

**Tabulka 1.2:** Typická skladba emisí produkovaných ZEVO [9], [10].

skupina	zástupci
sloučeniny síry	$\text{SO}_x$ ( $\text{SO}_2$ , $\text{SO}_3$ )
sloučeniny dusíku	$\text{NO}_x$ ( $\text{NO}$ , $\text{NO}_2$ ), $\text{NH}_3$
PM <sup>1</sup>	různé velikosti [ $\mu\text{m}$ ]
anorganický uhlík	$\text{CO}$ , $\text{CO}_2$
těžké kovy	Hg, Cd, Tl, As, Ni a Pb
halogenvodíky	HF, HCl, HBr, HI
VOCs <sup>2</sup>	methan, nemethanové, halogenované uhlovodíky, oxosloučeniny
POPs <sup>3</sup>	dioxiny, furany, polychlorované bifenyly

<sup>1</sup> tuhé znečišťující látky (angl. Particulate Matter)

<sup>2</sup> organické těkavé látky (angl. Volatile Organic Compounds)

<sup>3</sup> perzistentní organické látky (angl. Persistent Organic Pollutants)

## 1.2.2 Sloučeniny dusíku

Stejně jako v případě sloučenin síry i v této skupině jsou nejvýznamnějšími zástupci oxidy.  $\text{NO}_x$  souhrnně označují oxidy dusíku, z nichž nejvýznamnější jsou  $\text{NO}$  a  $\text{NO}_2$ . Tuto dvojici pak doplňuje  $\text{NH}_3$ .

Ve spalovacích zařízeních vznikají  $\text{NO}_x$  dvěma způsoby [10]. Jednou z možností je vznik reakcí mezi dusíkem a kyslíkem ve spalovacím vzduchu. Takto zformované oxidy jsou označovány jako termické  $\text{NO}_x$ . Při přímé oxidaci chemicky vázaného dusíku ve vstupním odpadu pak vznikají  $\text{NO}_x$  palivové. V ZEVO převažuje vznik druhým ze zmíněných mechanismů. Formace termického  $\text{NO}_x$  je totiž podmíněna vysokou teplotou a vyšším obsahem kyslíku ve spalovacím vzduchu. Podíl termických  $\text{NO}_x$  nabývá na významu při výdrži nad teplotou přibližně 1000 °C [11], které však ve standardní spalovně dosaženo není. Oproti tomu vznik palivového  $\text{NO}_x$  je teplotně méně závislý a jeho produkce je podmíněna zejména dostatečnou lokální koncentrací kyslíku a složením vstupního odpadu. Celkové množství vzniklého  $\text{NO}_x$  lze ovlivnit správným návrhem spalovací komory

a nastavením vhodných podmínek, za kterých spalování probíhá. Poměr NO vůči NO<sub>2</sub> ve spalinách opouštějících ZEVO je běžně 95 % ku 5 % [10]. Množství oxidu dusičitého opouštějící přímo jeho zdroj je tedy velmi malé. Jelikož se však jedná i o polutant sekundární, množství tohoto oxidu vzniká až po vypuštění do atmosféry, a to fotochemicky aktivovanou reakcí NO s O<sub>3</sub> [14]. Z hlediska vlivu na lidské zdraví je z oxidů dusíku nejvýznamnějším NO<sub>2</sub>, který postihuje dýchací systém. Jeho působení je navíc spojeno se zvýšením kardiovaskulární a respirační úmrtnosti [13]. Oxidy dusíku jsou skleníkovými plyny přispívající k efektu globálního oteplování a způsobující nadměrnou eutrofizaci půd a vod [10].

Emise NH<sub>3</sub> jsou výsledkem špatného nastavení technologie čištění spalin, vznikají zejména při předávkování redukčními činidly. Stejně jako NO<sub>x</sub> přispívají k nadměrné eutrofizaci a acidifikaci.

### 1.2.3 PM

Jemné tuhé a kapalné částice rozptýlené v atmosféře jsou souhrnně označovány jako částice suspendované, v literatuře a v praxi poté často pouze zkratkou PM. Směs těchto částic se vzduchem tvoří tzv. atmosférický aerosol [15]. Názvosloví spojené s touto problematikou nicméně není jednotné. Pod pojmem aerosol je často rozuměna pouze část částicová, tedy bez nosného plynu [16]. Pod zkratkou PM jsou také někdy myšleny pouze pevné částice. V tomto významu bude také PM chápáno v dalším textu.

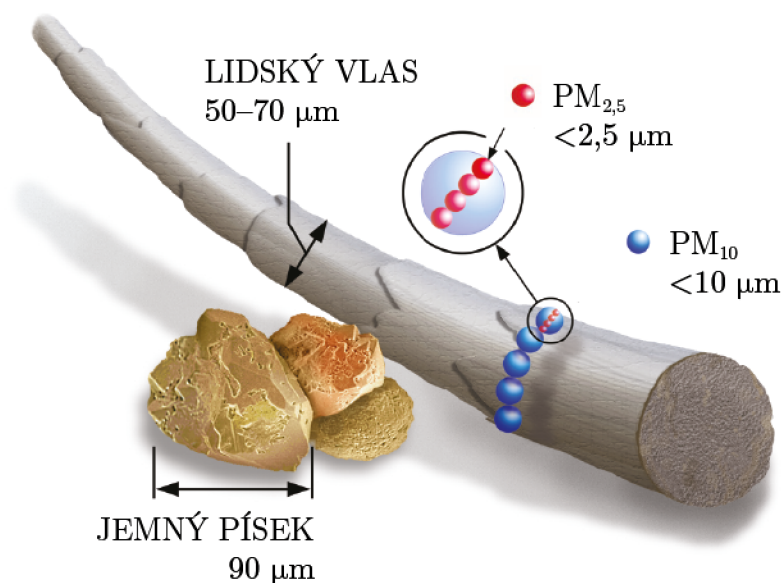
Velikosti částic zastoupených v PM se liší. Některé z nich jsou viditelné lidským okem, jiné lze naopak zobrazit pouze pomocí elektronového mikroskopu. Dle definice v [15] se orientačně jedná o částice nepřesahující velikost 10 μm. Právě dle velikosti jsou tyto částice dále rozděleny na různé frakce. Běžně jsou monitorovány dvě velikostní frakce PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub>. Označení PM<sub>2,5</sub> zahrnuje všechny pevné částice, jejichž aerodynamický průměr je menší nebo roven 2,5 μm. Frakce PM<sub>10</sub> pak analogicky indikuje všechny částice, jejichž aerodynamický průměr je menší nebo roven velikosti 10 μm. PM<sub>2,5</sub> je tedy současně podskupinou PM<sub>10</sub>. Představu o velikosti takových částic lze získat z obr. 1.2. Tuhé znečišťující látky lze dále rozdělit dle způsobu vzniku na primární (např. prach, saze) a sekundární (např. NH<sub>4</sub>SO<sub>4</sub>). Význam tohoto dělení lze chápat stejně, jak bylo uvedeno v úvodu podkapitoly.

PM má ze všech polutantů pravděpodobně největší dopady na lidské zdraví, způsobuje totiž vážná kardiovaskulární a respirační onemocnění [18]. Problémem není jen malá velikost částic, díky které jsou schopny proniknout až do oběhového systému, ale také to, že na sebe poměrně snadno navazují další vysoce toxické látky. Obecně platí, že čím jemnější frakce, tím škodlivější PM pro lidské zdraví jsou [18]. Velikost částic také ovlivňuje dobu jejich setrvání v atmosféře, větší částice zpravidla opouštějí atmosféru dříve. Naopak částice menší setrvávají v atmosféře podstatně déle a mohou být transportovány do vzdáleností až několika stovek kilometrů [19]. Tyto znečišťující příměsi ovlivňují i životní prostředí, jako běžně se vyskytující příklad lze uvést výrazně sníženou viditelnost [10].

V zařízení pro EVO vznikají tuhé znečišťující látky dvojího druhu – jde o nespalitelné prachové částice přítomné ve vstupním odpadu (minerální a kovové) a dále saze vzniklé při spalovacím procesu. Část těchto látek opouští spalovací komoru společně se spalinami, zbytek pak propadáva spalovacím roštem ve formě popela. Většina pevných částic pří-



tomných ve spalínách je včetně na ně navázaných látek zpravidla úspěšně odstraněna v systému čištění spalin [10].



**Obrázek 1.2:** Porovnání velikostí základních frakcí PM s tloušťkou lidského vlasu. Převzato z [17] a upraveno.

#### 1.2.4 Anorganické sloučeniny uhlíku

Oxid uhličitý, nejvýznamnější antropogenní skleníkový plyn [18], je produktem každého spalovacího procesu a jinak tomu tedy není ani v případě spalování odpadu. Spálením jedné tuny SKO je do atmosféry uvolněno přibližně 0,7–1,7 t CO<sub>2</sub> [10].

Významnější anorganickou sloučeninou uhlíku je však z hlediska znečištění ovzduší CO, což je bezbarvý toxický plyn bez zápachu vznikající při nedokonalém spalování vstupního odpadu. Koncentraci CO ve výstupních spalínách lze tedy považovat za dobrý indikátor efektivity, stability a obecně správného nastavení spalovacího procesu [9]. Příčinou jeho nadměrného vzniku může být nedostatečná lokální koncentrace kyslíku (v důsledku špatného promíchání vzduchu ve spalovací komoře), nedostatek O<sub>2</sub> ve spalovacím vzduchu nebo příliš nízká teplota spalování, kdy nedojde k plné oxidaci uhlíku obsaženého v odpadu až na CO<sub>2</sub>. Nízká koncentrace CO ve výstupních spalínách zároveň znamená nízkou výstupní koncentraci VOCs (a naopak), o kterých je pojednáno dále v textu. Dalším důvodem proč věnovat CO pozornost je to, že jeho vyšší koncentrace (nad dolní mezí výbušnosti) mohou tvořit ve spalínách nebezpečné výbušné směsi [10]. Po vypuštění CO do atmosféry dojde za určitý čas k jeho transformaci na CO<sub>2</sub>.

Oxid uhelnatý se váže na krevní barvivo hemoglobin lépe než kyslík a při jeho zvýšených koncentracích dochází ke snížení kapacity krve pro přenos kyslíku. Nejvíce citliví

jsou tudíž vůči jeho působení lidé s kardiovaskulárními onemocněními [11]. Z hlediska působení na životní prostředí může CO přispívat ke vzniku přízemního ozonu [13].

### 1.2.5 Těžké kovy

Vstupní odpad může na základě jeho složení obsahovat celou řadu těžkých kovů, mezi nejčastěji se vyskytující se řadí Hg, Cd, Tl, As, Ni, Cr nebo Pb. Řada těchto kovů je i ve stopových množstvích prokazatelně velmi toxická, karcinogenní a schopná bioakumulace, s vážnými dopady jak na lidské zdraví, tak na životní prostředí. Těžké kovy nelze odstranit samotným spálením a do atmosféry jsou vypouštěny v různých formách, nejčastěji jako oxidy nebo chloridy, které jsou vázány na prachové částice ve spalinách. Většina z nich se dá poměrně úspěšně odstranit pomocí systému čištění spalin [11]. Obecně se dá konstatovat, že jejich koncentrace ve výstupních spalinách jsou vysoce ovlivněny složením vstupního odpadu.

### 1.2.6 Halogenvodíky

Halogenvodíky jsou sloučeniny skládající se z atomu vodíku a atomu prvku sedmnácté skupiny periodické soustavy prvků – halogenu. V SKO se nachází řada složek, které tyto prvky obsahují.

Chlor je obsažen ve vstupním odpadu v podobě chlorovaných organických látek nebo chloridů (zhruba 50 % chloridů v SKO pochází z PVC) [10]. Při procesu spalování vzniká z těchto látek chlorovodík, který může dále reagovat s kovovými prvky. Podobným způsobem jako HCl vzniká při spalování fluorovodík. Fluor je ve vstupním palivu obsažen ve formě fluorovaných plastů a textilií. HF i HCl jsou vysoce rozpustné ve vodě a ovlivňují růst rostlin.

Další dva zástupci této skupiny, HI a HBr jsou v SKO zastoupeny spíše výjimečně a svým charakterem patří do problematiky spalování nebezpečných odpadů. Pokud jsou ovšem ve vstupním materiálu přítomny, mohou způsobit zabarvení výstupní kouřové vlečky. Obě tyto sloučeniny mohou mít na člověka toxické a dráždivé účinky [10].

### 1.2.7 VOCs

VOCs je zkratka označující celou řadu organických těkavých látek. Během spalování organické složky SKO probíhá současně množství složitých chemických reakcí, přičemž některé z nich neproběhnou až do konce. Výsledkem je vznik stopových množství komplexních organických sloučenin. Některé z těchto látek jsou skleníkové plyny (např. CH<sub>4</sub>), jiné dále reagují v atmosféře a způsobují různé negativní dopady jako například vznik troposférického ozonu. Individuální měření těchto sloučenin jsou téměř nemožná, a proto jsou monitorována jako celek. Při správně nastaveném spalovacím procesu a dostatečně vysoké teplotě nicméně dochází k jejich účinné destrukci již při samotném spalování [10].

### 1.2.8 POPs

Další důležitou skupinou znečišťujících látek jsou perzistentní organické látky. Mezi její nejznámější zástupce patří dioxiny (PCDD), furany (PCDF) a polychlorované bifenyly (PCBs). Všechny tyto látky jsou charakteristické dlouhým setrváním v životním prostředí, schopností kumulace a představují vysoké riziko pro lidské zdraví. Zároveň jsou to chemické sloučeniny velmi těkavé a náchylné vůči kondenzaci na pevných částicích a tím pádem schopné dálkového transportu atmosférou [14]. Mnoho z těchto látek je vysoce toxických a karcinogenních.

Nejběžnějším zdrojem dioxinů a furanů, společně označovaných jako PCDD/F, je spalování plastů (např. PVC). Jejich emise byly po mnoho let předmětem diskuze právě ve spojitosti se spalovnami odpadů [10]. V ZEVO dochází dle [11] k jejich vzniku hned třemi způsoby. Mohou být přítomny ve vstupním odpadu, přičemž k jejich tvorbě dojde v důsledku jejich nedostatečného termického zpracování. Dále mohou vzniknout reakcí z jiných přítomných sloučenin anebo rekombinační reakcí chloru, kyslíku a uhlíku (tzv. de novo syntéza). Stejně jako v případě VOCs je lze odstranit přímo samotným spalováním, podmínkami jsou dostatečně vysoká teplota (hodnota se odvíjí od způsobu jejich vzniku) a správně nastavené podmínky spalování [11].

## 2 Kvalita ovzduší v ČR

Kvalitu vnějšího ovzduší lze definovat jako „úroveň znečištění vnějšího ovzduší, která může svými účinky ovlivňovat lidské zdraví, vegetaci, celé ekosystémy i materiály [20].“ Některé z těchto účinků byly popsány v předešlé kapitole. Kvalitě ovzduší je v současnosti věnována velká pozornost, a to na národní, evropské i celosvětové úrovni. To se projevuje například stále se zpřísňujícími emisními limity, legislativními požadavky na přechod k obnovitelným zdrojům energie, ale i stálým rozvojem a vylepšováním sítí imisního monitoringu. Zohlednění enviromentálního vlivu výstavby ZEVO na ovzduší při simulacích v optimalizačním nástroji NERUDA je ostatně také výsledkem této tendence.

V následujícím textu je uveden přehled národní i evropské legislativy zabývající se problematikou kvality ovzduší. Dále je stručně shrnut emisní vývoj, současná imisní situace a stav monitoringu kvality ovzduší v ČR. Velká pozornost je pak věnována rozptylovým studiím, což je jeden z dokumentů nezbytných pro úspěšné dokončení schvalovacího procesu výstavby nových významných emisních zdrojů.

### 2.1 Přehled legislativy

Legislativa hraje v případě řešení problematiky znečištění ovzduší a jeho ochrany podstatnou roli – mimo jiné určuje závazné emisní a imisní limity. Přímo tedy ovlivňuje i projekty výstavby nových emisních zdrojů, mezi které se přirozeně řadí i ZEVO. Znalost aktuální legislativní situace v oblasti ochrany ovzduší je proto velmi užitečná, ne-li nezbytná i při hodnocení vlivu těchto zařízení na kvalitu ovzduší.

#### 2.1.1 Národní legislativa

Hlavní úřední orgán, zabývající se otázkami ochrany a kvality ovzduší v ČR, je Ministerstvo životního prostředí (MŽP). Základními právními předpisy ČR v oblasti ochrany ovzduší jsou zákon č. 201/2012 Sb. ze dne 2. května 2012, o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů (dále pouze jako zákon o ochraně ovzduší) [21], novela zákona o ochraně ovzduší zákon č. 369/2016 Sb. ze dne 19. října 2016, kterým se mění zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů a zákon č. 634/2004 Sb., o správních poplatcích, ve znění pozdějších předpisů [22] a zákon č. 73/2012 Sb. ze dne 7. února 2012, o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu, a o fluorovaných skleníkových plynech, ve znění pozdějších předpisů [23]. Prováděcí předpisy, které tyto zákony doplňují, jsou jak ve formě nařízení vlády, tak vyhlášek MŽP [20].

Zákon o ochraně ovzduší pojednává o povinnostech a právech provozovatelů emisních zdrojů, uvádí nástroje ke snižování množství znečišťujících látek a definuje působnost správních orgánů, opatření k nápravě a v neposlední řadě sankce. Prováděcí předpisy související s tímto zákonem jsou následující:

- vyhláška č. 415/2012 Sb. ze dne 21. listopadu 2012, o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší [24],

- vyhláška č. 330/2012 Sb. ze dne 8. října 2012, o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích [25] a
- vyhláška č. 83/2017 Sb. ze dne 17. března 2017, kterou se mění vyhláška č. 330/2012 Sb., o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích [26].

Druhý ze zmíněných zákonů určuje práva a povinnosti osob a působnost správních úřadů v otázkách ochrany ozonové vrstvy a klimatického systému Země před nepříznivými účinky vybraných škodlivých látek (např. fluorovaných skleníkových plynů). Zákon je doplněn jediným prováděcím právním předpisem, a to vyhláškou č. 257/2012 Sb. ze dne 12. července 2012, o předcházení emisím látek, které poškozují ozonovou vrstvu, a fluorovaných skleníkových plynů [27].

MŽP dále upřesňuje výklad jednotlivých zákonů a prováděcích předpisů pomocí metodických pokynů vydávaných ve Věstníku MŽP. Tyto pokyny jsou určeny zejména podřízeným orgánům ochrany ovzduší (Česká inspekce životního prostředí, krajské a obecní úřady) a dále pak například autorizovaným osobám řešícím tuto problematiku.

## 2.1.2 Evropská legislativa

Znečištění ovzduší patří od konce 70. let 20. století k primárním politickým a environmentálním zájmům EU [28]. Hlavním nástrojem pro zlepšení standardů kvality ovzduší je řada směrnic, které jsou postupně implementovány v národních předpisech členských států. Významný orgán zabývající se problematikou znečištění ovzduší je Evropská agentura pro životní prostředí (EEA).

Legislativním stavebním kamenem ochrany ovzduší v EU se v roce 2008 stala směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/50/ES ze dne 21. května 2008, o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduší pro Evropu [29], která nahradila původní směrnici 96/62/ES (Air Quality Framework Directive) a zároveň sdružila dceřinné směrnice 1999/30/ES (First Daughter Directive), 2000/69/ES (Second Daughter Directive) a 2002/3/ES (Third Daughter Directive).

Mezi další významné směrnice, nařízení a rozhodnutí v oblasti ochrany ovzduší patří [28]:

- směrnice Evropského parlamentu a Rady 2004/107/ES ze dne 15. prosince 2004, o obsahu arsenu, kadmia, rtuti, niklu a polycyklických aromatických uhlovodíků ve vnějším ovzduší (Fourth Daughter Directive) [30],
- směrnice Komise (EU) 2015/1480 ze dne 28. srpna 2015, kterou se mění několik příloh směrnice Evropského parlamentu a Rady 2004/107/ES a 2008/50/ES, kterými se stanoví pravidla pro referenční metody, ověřování údajů a umístění míst odběru vzorků při posuzování kvality vnějšího ovzduší [31],
- rozhodnutí Rady 97/101/ES ze dne 27. ledna 1997, kterým se zavádí vzájemná výměna informací a údajů monitorovacích sítí a jednotlivých stanic měřících znečištění vnějšího ovzduší v členských státech (EoI Decision) [32],

- prováděcí rozhodnutí Komise 2011/850/EU ze dne 12. prosince 2011, kterým se stanovují pravidla pro směrnice Evropského parlamentu a Rady 2004/107/ES a 2008/50/ES, pokud jde o vzájemnou výměnou informací a podávání zpráv o kvalitě vnějšího ovzduší [33],
- nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1005/2009 ze dne 16. září 2009, o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu [34] a
- nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 517/2014 ze dne 16. dubna 2014, o fluorovaných skleníkových plynech a o zrušení nařízení (ES) č. 842/2006 [35].

Průmyslovými emisemi se zabývá směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU ze dne 24. listopadu 2010, o průmyslových emisích (integrováné prevenci a omezování znečištění) [36], národní emisní stropy pro některé znečišťující látky pak ukládá směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 2001/81/ES ze dne 23. října 2001, o národních emisních stropích pro některé látky znečišťující ovzduší [37].

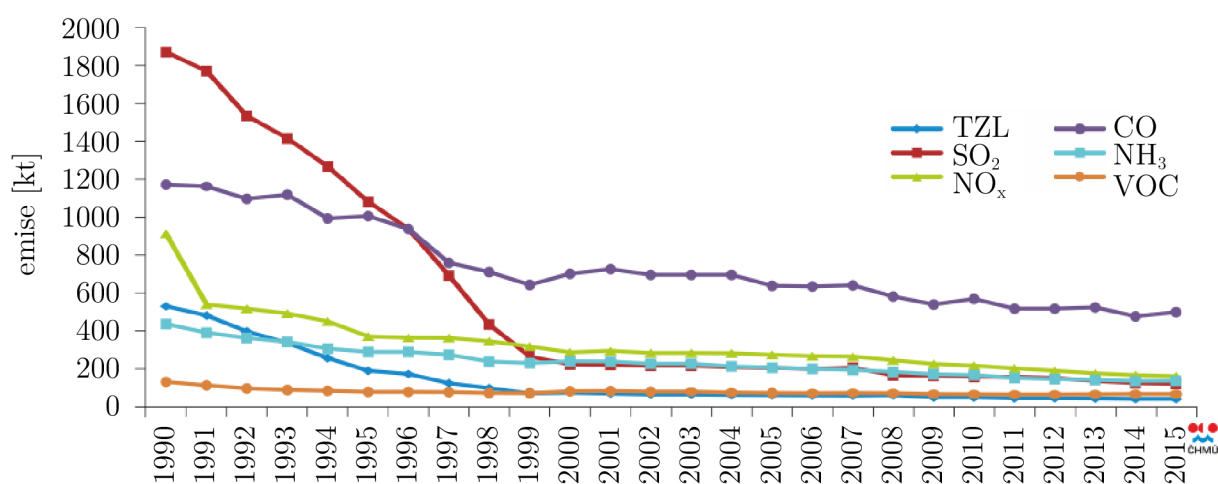
## 2.2 Emise a imise v ČR

Kvalita ovzduší na celém území ČR je v souladu s legislativními požadavky sledována pomocí sítě měřících stanic – imisního monitoringu, jejímž provozem MŽP pověřilo Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). Data získaná tímto měřením jsou archivována v imisní databázi Informačního systému kvality ovzduší (ISKO). Mimo ČHMÚ do této databáze přispívají i další subjekty podílející se na sledování úrovně znečištění ovzduší, jako zdravotní ústavy nebo městské úřady [8]. ISKO je koncipován jako integrovaná soustava sdružující informační agendy související s hodnocením kvality území na celém území ČR. Kromě již zmíněné imisní databáze sdružuje i Registr emisí a zdrojů znečištění ovzduší (REZZO) a archiv chemického složení srážek [8]. Správou tohoto systému je rovněž pověřen ČHMÚ. Každoročním výstupem z ISKO je publikace Znečištění ovzduší na území České republiky. Ta v souladu s platnou legislativou poskytuje ucelený přehled informací o kvalitě ovzduší na celém území republiky a hodnotí jeho stav, dále monitoruje vývoj množství vypouštěných emisí a identifikuje hlavní znečišťující látky a lokální problémy. Naměřená imisní data jsou v této publikaci prezentována jak ve formě grafické – v podobě map znečištění, tak tabelární. Tyto ročenky jsou volně dostupné na webu ČHMÚ, viz [13] a [38].

### 2.2.1 Vývoj emisí

Obecně je vývoj úrovně znečištění ovzduší úzce spojený s ekonomickou, společensko-politickou situací a rozvojem poznání v oblasti životního prostředí. K výraznému zlepšení stavu kvality ovzduší došlo v ČR během 90. let 20. století. Toto období je spjato s přijetím tehdy nových emisních limitů a s tím spojenou investicí mnoha finančních prostředků do snížení množství vypouštěných emisí, zejména pak z velkých zdrojů jako jsou tepelné elektrárny. Dále bylo přijato několik dalších opatření, například zvýšení sazby za vypouštění látek nebo podpora domácností pro vytápění elektřinou [13]. S přelomem století

se v důsledku rozvoje průmyslu a nárůstu dopravy situace opět mírně zhoršila, nicméně úroveň znečišťování rok od roku stále klesá [13]. Tohoto trendu bylo docíleno mimo jiné i vstupem ČR do EU v roce 2004 a následnou implementací závazných evropských směrnic do české legislativy. Vývoj vybraných celkových vypouštěných emisí v ČR mezi lety 1990 až 2015 lze vidět v grafu na obr. 2.1. Současným cílem z hlediska snižování produkovaných emisí jsou pro ČR emisní limity dané legislativními závazky uložené směrnicí Evropského parlamentu a Rady (EU) 2016/2284 ze dne 14. prosince 2016, o snížení národních emisí některých látek znečišťujících ovzduší, o změně směrnice 2003/35/ES a o zrušení směrnice 2001/81/ES a revizí Göteborgského protokolu. K roku 2020 je cílem snížení emisí  $PM_{2,5}$  o 17 %,  $SO_2$  o 45 %,  $NO_x$  o 35 %, VOC o 18 % a  $NH_3$  o 7 % a k roku 2030  $PM_{2,5}$  o 60 %,  $SO_2$  o 66 %,  $NO_x$  o 64 %, VOC o 50 % a  $NH_3$  o 22 % oproti hodnotám z roku 2005 [13].



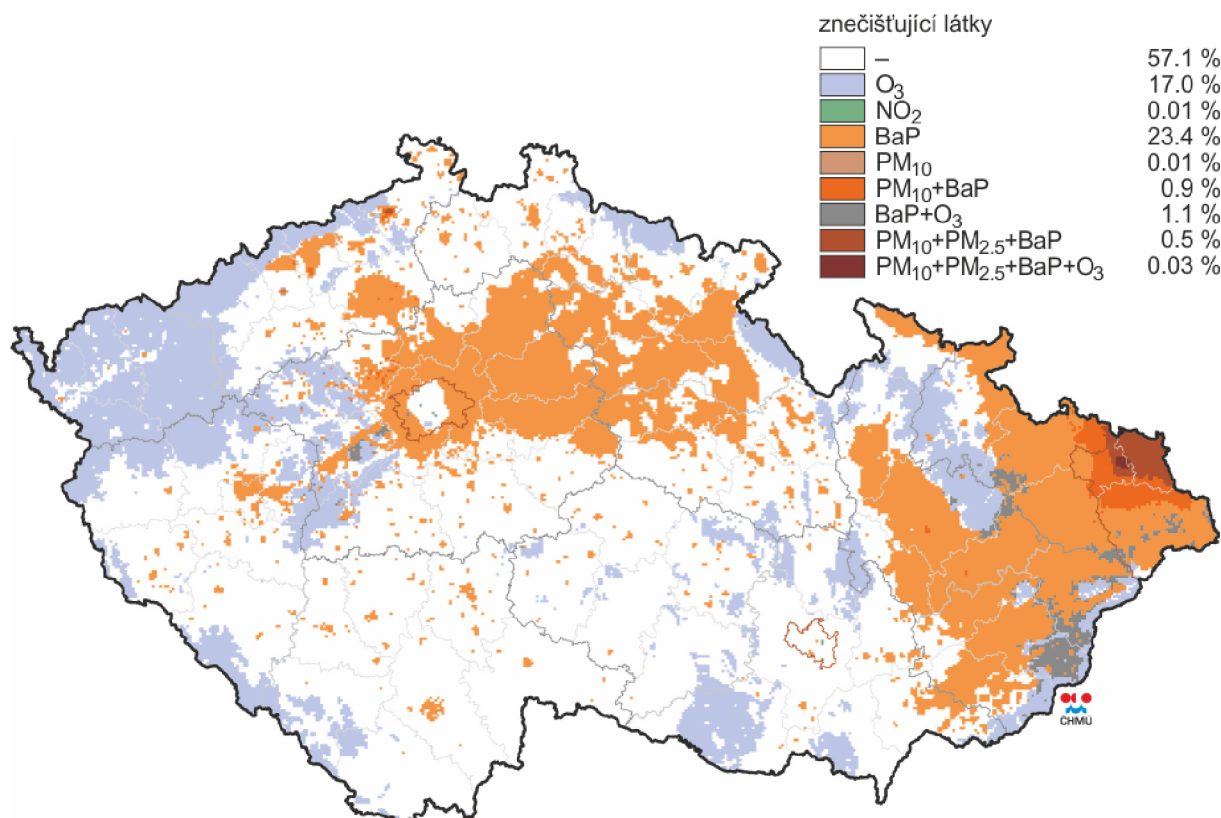
**Obrázek 2.1:** Vývoj znečišťování ovzduší v ČR mezi lety 1990 až 2015. Převzato z [13] a upraveno.

Údaje o emisních zdrojích jsou v souladu se zákonem o ovzduší archivovány a prezentovány v emisní databázi REZZO. Zdroje znečišťování ovzduší jsou rozděleny celkově do čtyř skupin, tak jak je uvedeno v tab. A.1 přílohy A. Kategorie REZZO 1–3 zahrnují stacionární zdroje různých velikostí, REZZO 4 pak sdružuje zdroje mobilní. Zařízení pro EVO spadají do skupiny REZZO 1.

## 2.2.2 Současná imisní situace

Na úroveň znečištění ovzduší v daném roce mají kromě množství vypuštěných emisí vliv také převažující rozptylové a meteorologické podmínky. Dle poslední ročenky Znečištění ovzduší na území České republiky z roku 2016 [13] představují hlavní problémy kvality ovzduší ČR suspendované částice frakcí  $PM_{10}$  a  $PM_{2,5}$  a na ně vázané polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU), hlavně benzo[a]pyren. V některých oblastech ČR jsou v letních měsících překračovány také imisní limity přízemního ozonu. Významnými zdroji znečišťujících látek jsou veřejná a průmyslová energetika, zemědělství a v případě suspendovaných částic a PAU zejména vytápění domácností pevnými palivy a doprava. Konkrétní podíly jednotlivých zdrojů emisí na imisní situaci jsou v různých oblastech ČR odlišné, záleží

totiž nejen na specifiku skladby zdrojů v dané oblasti, ale také na míře přenosu znečišťujících látek z jiných oblastí. Oblasti, kde byly v roce 2016 překročeny imisní limity pro ochranu zdraví jsou znázorněny na obr. 2.2. Ten zároveň indikuje nejvíce postiženou oblast v ČR, kterou je v lokálním až regionálním měřítku dlouhodobě aglomerace Ostrava, Karviná a Frýdek-Místek. V té jsou vysoké imisní koncentrace vybraných znečišťujících látek důsledkem nejen emisí českých, ale i polských zdrojů. Vysoká koncentrace průmyslové výroby, hustá zástavba s vysokým podílem vytápění pomocí pevných paliv a rozvinutá dopravní infrastruktura jsou totiž společné charakteristiky pro obě strany státní hranice.



**Obrázek 2.2:** Vyznačení oblastí s překročenými imisními limity pro ochranu zdraví vybraných skupin znečišťujících látek v roce 2016. Převzato z [13] a upraveno.

Kvalita ovzduší v ČR obecně dlouhodobě nevyhovuje požadavkům stanoveným národní, potažmo evropskou legislativou pro ochranu zdraví lidí a ekosystémů. Na základě tohoto faktu a požadavků EU byl pro ČR zpracován koncepční dokument s názvem Střednědobá strategie (do roku 2020) zlepšení kvality ovzduší v ČR, který shrnuje výstupy Národního programu snižování emisí ČR a deseti programů zlepšování kvality ovzduší zpracovaných pro základní jednotky pro řízení kvality ovzduší v ČR, tzv. zóny a aglomerace (viz obr. 2.3).

### 2.2.3 Imisní limity

Imisní limity jsou v ČR stanoveny zákonem o ochraně ovzduší, v platném znění a vyhláškou č. 330/2012 Sb. Aktuální hodnoty těchto limitů jsou shrnuty v příloze A v tab. A.2.



Samotné imisní limity, příslušná doba průměrování a maximální povolené počty jejich překročení byly pro jednotlivé znečišťující látky stanoveny individuálně na základě směrných (doporučených) hodnot Světové zdravotnické organizace (WHO) [13]. Ty byly získány na základě řady epidemiologických studií a jejich přehled je uveden v tab. A.3 přílohy A. Při porovnání předložených hodnot v tabulkách A.2 a A.3 lze nicméně vidět, že některé z imisních limitů stanovené legislativou jsou vyšší než ty doporučené WHO. Tato odlišnost je způsobena tím, že WHO při sestavování imisních limitů vychází pouze ze zdravotních dopadů znečištění ovzduší a neuvažuje další důležité aspekty – například politické, sociální faktory nebo technické a ekonomické podmínky splnitelnosti daných limitů.



**Obrázek 2.3:** Zóny a aglomerace pro posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění ovzduší dle zákona o ochraně ovzduší, v platném znění. Převzato z [13] a upraveno.

## 2.3 Rozptylové studie

Dle metodického pokynu MŽP ČR pro vypracování rozptylových studií uvedeném v [39] je rozptylová studie „dokument, který na základě vypočtených modelových hodnot znečištění hodnotí vliv stávajících nebo plánovaných zdrojů znečišťování ovzduší na stávající úroveň znečištění v lokalitě.“ Taková studie je podle zákona o ochraně ovzduší povinným podkladem k řízením o vydání závazného stanoviska krajským úřadem nebo MŽP, k řízením o změně povolení provozu a k řízením podle jiného právního předpisu (např. stavebního zákona). Rozptylovou studii je nutno zpracovat v následujících případech [21]:

- vydání závazného stanoviska k umístění stavby pozemní komunikace v zastavěném území obce o předpokládané intenzitě dopravního proudu 15 tisíc a více vozidel za

24 hodin v návrhovém období nejméně 10 let nebo parkoviště s kapacitou nad 500 parkovacích stání (§ 11 odst. 1 písm. b),

- vydání závazného stanoviska k umístění stacionárních zdrojů specifikovaných ve sloupci A, přílohy č. 2 zákona o ochraně ovzduší (§ 11 odst. 2 písm. b),
- k řízení o změně povolení provozu, při které dochází k navýšení projektovaného výkonu nebo kapacity anebo ke zvýšení emisí, u stacionárního zdroje označeného ve sloupci A, přílohy č. 2 zákona o ochraně ovzduší,
- pro stacionární zdroje využívající technologii, která doposud nebyla na území ČR provozována, pokud je tak stanoveno v rozhodnutí o kvalifikaci typu stacionárního zdroje vydávaného MŽP podle § 11 odst. 1 písm. c zákona o ochraně ovzduší.

Naopak rozptylovou studii není nutno zpracovat pro:

- spalovací stacionární zdroje označené kódy 1.1. až 1.4. v příloze č. 2 zákona o ochraně ovzduší spalující výlučně zemní plyn o celkovém jmenovitém tepelném příkonu do 5 MW včetně,
- spalovací stacionární zdroje označené kódy 1.2. a 1.3. v příloze č. 2 zákona o ochraně ovzduší o celkovém jmenovitém tepelném příkonu do 5 MW včetně těch spalující plynné nebo kapalné palivo, pokud slouží jako záložní zdroje energie a jejich provozní hodiny nepřekročí 300 h v kalendářním roce,
- stacionární zdroje označené kódem 3.1. v příloze č. 2 zákona o ochraně ovzduší spalující výlučně zemní plyn o celkovém jmenovitém tepelném příkonu do 1 MW,
- případy, kdy dochází k navýšení projektovaného výkonu nebo kapacity, ale nepochybně nedochází ke zvýšení příspěvku stacionárního zdroje k úrovni znečištění.

Rozptylové studie sloužící k výše zmíněným řízením musí být zpracovány autorizovanou osobou podle § 32 odst. 1 písm. e zákona o ochraně ovzduší. V ČR bylo k datu 25. 7. 2017 autorizováno devadesát jedna subjektů [40]. Obsahové náležitosti studie jsou poté specifikovány přílohou č. 15 vyhlášky č. 415/2012 Sb. Jednotlivé části rozptylových studií jsou uvedeny a stručně charakterizovány níže [24], [39]:

## 1. Zadání rozptylové studie

Specifikuje, z jakého důvodu je rozptylová studie zpracovávána a o jaký záměr se jedná. Může jít o umístění nového zdroje znečištění, či úpravu nebo náhradu stávajícího zdroje. V případě, že studie řeší více variant, uvede se jejich přehled.

## 2. Použitá metodika výpočtu

V této sekci je nutno uvést použitý typ, verzi a krátkou charakteristiku výpočtového modelu, který byl pro výpočet použit. Referenční metody pro modelování znečištění ovzduší

v ČR, uvedené v příloze č. 6 vyhlášky č. 330/2012 Sb., o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích [25], jsou shrnuty v tab. 2.1, níže.

Při použití modelů SYMOS'97 (o němž je pojednáno dále v kap. 4) a ATEM uvnitř městské zástavby pod úrovní střech není zohledněno obtékání budov a jiných překážek. Pokud by i přes to byly tyto modely použity, je třeba tuto skutečnost zhodnotit při interpretaci výsledků a určit, zda toto zanedbání bude mít významný vliv, či ne.

Disperzní modely uvedené v tab. 2.1 dále nejsou vhodné pro výpočet znečištění látkami s krátkou dobou setrvání v atmosféře, sekundárními nebo rychle reagujícími (např. troposférický ozon). Jedinou výjimkou je  $\text{NO}_2$ , což je sekundární polutant, pro který obsahují modely SYMOS'97 i ATEM speciální modul.

Pro vypracování rozptylové studie lze využít i jiné než uvedené referenční modely. V daném případě je však dle § 32 odst. 6 zákona o ochraně ovzduší na posouzení MŽP, zda je zvolená výpočtová metoda vyhovující.

**Tabulka 2.1:** Referenční metody pro modelování znečištění ovzduší [25].

název modelu	oblast použití	výpočetní oblast	znečišťující látky
SYMOS'97	venkovské oblasti (všechny zdroje znečišťování)	do 100 km od zdroje	$\text{SO}_2$ , $\text{NO}_x$ , $\text{NO}_2$ , CO, benzen, tuhé částice (vč. frakcí $\text{PM}_{10}$ a $\text{PM}_{2,5}$ ), látky vázané na částice včetně kovů (Pb, As, Ni, Cd) a benzo[a]pyren
ATEM	městské oblasti nad úrovní střech budov		
AEOLIUS	městské oblasti v uličních káňonech (silniční motorová vozidla)	jednotlivé ulice	znečišťující látky vypouštěné mobilními zdroji

### 3. Vstupní údaje

Z hlediska samotného modelového výpočtu jsou jednotlivé vstupní údaje rozebrány detailněji v podkap. 4.2. Níže následuje jejich přehled z hlediska formálních požadavků příslušné legislativy:

#### 3.1 Umístění záměru

Obsahuje popis řešeného území, popis a mapu umístění zdroje ve vztahu k obytné a jiné zástavbě a popis reliéfu území. Dále musí být identifikován použitý souřadnicový systém a nesmí také chybět informace o použitém digitálním výškopisu. Mapové podklady musí být opatřeny měřítkem a legendou.

### 3.2 Údaje o zdrojích

- a) Popis technologického vybavení zdroje a souvisejících technologií, počet provozních hodin daného zařízení,
- b) podkladové údaje o emisích a výduších a
- c) údaje o intenzitě dopravy (denní a maximální hodinová intenzita, údaje o pojezdech vozidel) a složení dle kategorií a emisních tříd vozidel v případě emisí z mobilních zdrojů.

### 3.3 Meteorologické podklady

Je nezbytné uvést větrnou růžici, která odpovídá dané lokalitě a která byla použita při výpočtu, a to jak v grafické podobě, tak tabelární s četností výskytu jednotlivých tříd stability a tříd rychlostí větru k rozptylovým podmínkám v atmosféře. Dále je třeba popsat, jak byla větrná růžice spočítána, kdo byl jejím autorem, období, pro které byla zpracována a v neposlední řadě definovat její souřadnice.

### 3.4 Popis referenčních bodů

Dále je třeba specifikovat síť referenčních bodů, pro které je výpočet prováděn. Ty by měly být voleny tak, aby byla vyhodnocena maximální úroveň znečištění v místě dotyku kouřové vlečky s terénem, resp. v místě dosažení výpočtové (respirační) výšky. Rozsah modelovaného území je třeba definovat tak, aby zohledňoval umístění zdroje i výškový profil území – tedy například při umístění zdroje v údolí obsahuje zvolený rozsah vrcholy kopců, kterými je údolí ohraničeno. Nezbytné je také zvolit specifické referenční body, zohledňující místa s nejvyšší koncentrací obyvatel (nejbližší obytná zástavba) a citlivé skupiny obyvatel (zejména vzdělávací a zdravotnická zařízení). Všechny výpočtové body se zobrazí v mapě tak, aby bylo zřejmé jejich rozložení s ohledem na obytnou zástavbu v okolí zdroje znečištění nebo ve zvoleném zájmovém území.

### 3.5 Znečišťující látky a příslušné imisní limity.

Tato sekce obsahuje přehledný seznam relevantních znečišťujících látek vypouštěných zdrojem a jejich imisních limitů, včetně typu počítaných koncentrací – hodinové, denní, roční průměrné koncentrace, denní maxima klouzavého osmihodinového průměru atd. Rozsah znečišťujících látek a jejich imisních limitů je dán body 1 až 3 přílohy č. 1 zákona o ochraně ovzduší (viz tab. A.2 přílohy A).

### 3.6 Hodnocení úrovní znečištění v předmětné lokalitě

Pro zhodnocení současné úrovně znečištění v předmětné lokalitě se vychází z map úrovní znečištění, které jsou každoročně zveřejňovány MŽP prostřednictvím internetových stránek ČHMÚ (dostupné z [41]). Tyto mapy jsou konstruovány v čtvercové síti 1 km × 1 km a jsou poskytovány ve formátech ESRI Shapefile (.shp) nebo Portable Network Graphics (.png). Každému čtverci této sítě je přiřazena hodnota klouzavého pětiletého průměru koncentrací pro jednotlivé znečišťující látky, které mají stanovený imisní limit (kromě ozonu a CO). Kromě toho je nutné přihlídnout k dostupným reprezentativním koncentracím znečišťujících látek naměřených na nejbližších stanicích státní sítě imisního monitoringu v zájmovém území.

#### 4. Výsledky rozptylové studie

Výsledky rozptylové studie jsou prezentovány v následujících formách:

- a) Slovní popis a vyhodnocení určené budoucí úrovně znečištění ovzduší v předmětné lokalitě a předpoklad plnění imisních limitů s ohledem na stávající úroveň znečištění území.
- b) Tabulka výsledků s čísly referenčních bodů, jejich souřadnicemi ve zvoleném souřadnicovém systému a vypočtenými koncentracemi relevantních znečišťujících látek. V případě velké hustoty pravidelné sítě referenčních bodů stačí uvést ty body, ve kterých byly vypočteny maximální hodnoty a dále specifické referenční body, jak byly definovány výše. Kompletní výsledky se přikládají ve formě textového souboru na libovolném datovém nosiči.
- c) Výsledky jsou dále znázorňovány kartograficky pomocí mapy s grafickou reprezentací imisních příspěvků jednotlivých škodlivin, včetně umístění zástavby v předmětné oblasti, podobně jako na obr. 2.4. Tyto mapy musí splňovat základní kartografické zásady, tedy obsahovat měřítko, legendu, souřadnicový systém, severku a srozumitelné, čitelné popisky.
- d) Pro některé zdroje může být souhlasné stanovisko vydáno i v případě, že provozem dojde k překročení daných legislativních limitů nebo jsou již v předmětné oblasti imisní limity překročeny. Podmínkou vydání takového stanoviska je pak i současné uložení tzv. kompenzačních opatření. Tato opatření mohou vést jak ke snížení množství vypouštěných emisí (instalace efektivnějšího systému čištění spalin, použití bezemisního zdroje tepla), tak k odstranění znečištění (výsadba izolační zeleně nebo pravidelné čištění ulic). Vyhodnocení nutnosti jejich uložení se provádí dle odst. 5 § 11 zákona o ochraně ovzduší.

#### 5. Návrh kompenzačních opatření

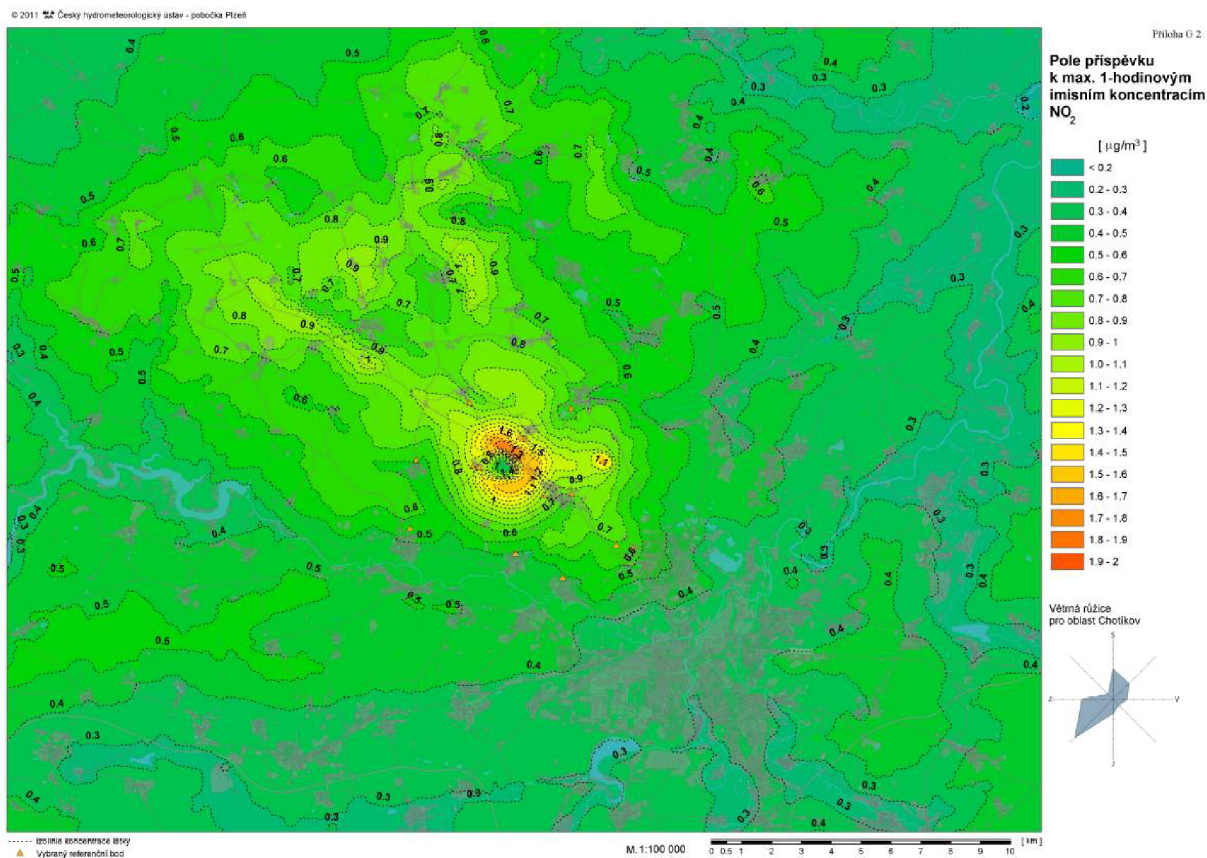
Pokud dojde k uložení kompenzačních opatření, je třeba v rozptylové studii detailněji specifikovat jejich podobu. Jmenovitě je třeba uvést, pro které znečišťující látky jsou kompenzační opatření uložena a přesně identifikovat zdroje znečištění, kterých se tato opatření týkají. Dále je nutné popsat detaily jednotlivých kompenzačních opatření, včetně termínu jejich realizace, případně časového plánu jejich opakování (např. čištění komunikací). Nesmí chybět ani rozbor s výpočtem, který dokazuje dostatečnost těchto opatření. Další informace popisující hodnocení a uplatňování kompenzačních opatření jsou uvedeny v § 27 vyhlášky č. 415/2012 Sb. a odst. 7 § 11 zákona o ochraně ovzduší.

#### 6. Závěrečná zhodnocení

V závěru rozptylové studie jsou běžně uvedeny určené příspěvky zdroje znečištění a hodnocení plnění imisních limitů v předmětné oblasti při uvažování stávající úrovně znečištění. Nakonec jsou shrnuta výše diskutovaná kompenzační opatření a jejich efekt na hodnotu znečištění ovzduší v dané oblasti.

## 7. Seznam použitých podkladů

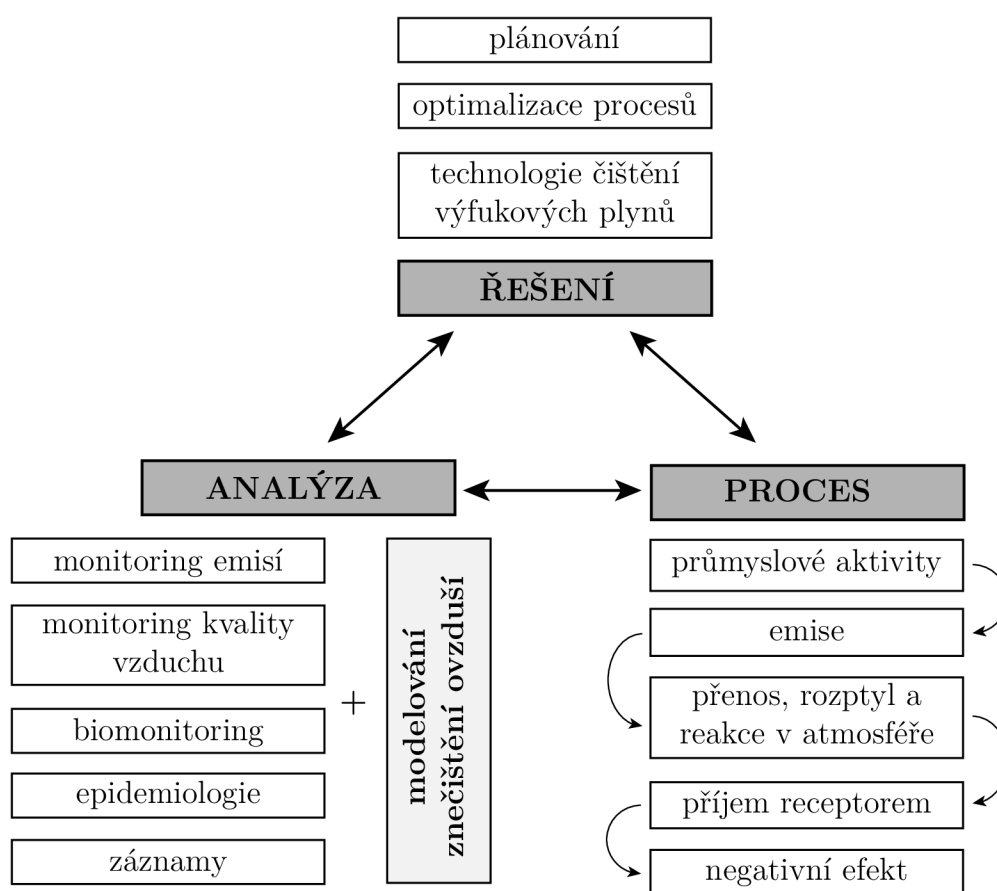
Uvádí seznam všech podkladů, s jejichž pomocí byla rozptylová studie vypracována. Jde zejména o podkladové materiály a data, která sloužila jako vstupní data do výpočtu, tedy informace o povaze zdroje, množství vypouštěných emisí, použitá geografická a meteorologická data atd.



**Obrázek 2.4:** Příklad kartografického výstupu rozptylové studie ZEVO Chotíkov. Dostupné z [42].

### 3 Modelování znečištění ovzduší

Problém znečištění ovzduší lze volně definovat jako překročení přijatelných hodnot koncentrací znečišťující látky v určité lokalitě. Tato hranice může být stanovena pro každou oblast individuálně a dle různých požadavků, běžně je dána legislativními předpisy (podkap. 2.1) nebo například toxikologickými a ekotoxikologickými limity [18]. Velmi často je však potřeba znát nejen pouze hodnoty koncentrací znečišťujících látek, ale i informace o jejich prostorovém rozložení nebo například o budoucím vývoji znečištění. Pomocí praktických nástrojů, jako monitoring stavu kvality ovzduší s využitím různých měřicích přístrojů nebo analýza satelitních snímků, lze postihnout pouze omezenou část tohoto rozsahu [8], neboť jevy spojené s šířením znečišťujících látek v atmosféře jsou velmi obtížně přímo měřitelné. Jako efektivní alternativa k řešení problematiky spojené s šířením znečištění ovzduší se pak nabízí modelování [18].



**Obrázek 3.1:** Kontext modelování v procesu, analýze a řešení znečištění ovzduší.

Ze schématu na obr. 3.1 uvedeném výše je zřejmé, že problém znečištění ovzduší nelze uvažovat jako izolovanou událost, ale že je vždy produktem určitého řetězce událostí – od vzniku emise, například při spalovacím procesu, přes jeho atmosférický transport a s ním spojené jevy, až po příjem receptorem, na něhož má určitý negativní efekt. V tomto případě si lze pod pojmem receptor představit například obyvatele dýchající znečištěný vzduch, případně rostlinu absorbující škodlivé látky. Negativním efektem

pak mohou být zdravotní problémy osoby, úhyn rostliny, ale i obecné snížení kvality života obyvatelstva v dané lokalitě [18]. Ze schématu také plyne, jakou roli hraje modelování znečištění ovzduší v širším kontextu procesu, analýzy a řešení problému znečištění ovzduší. Modelování je vedle čistě praktického monitorování stavu ovzduší další (a velmi významnou) metodou pro získání ucelené informace o stavu znečištění ovzduší v předmětné lokalitě. Oba tyto nástroje se vzájemně velmi dobře doplňují a kompenzují si některé z jejich nevýhod. Modelování poskytuje finančně příznivou alternativu k investičně i provozně drahým rozsáhlým sítím měřících přístrojů a naopak monitoring zohledňuje i zjednodušující předpoklady, které i sebedokonalejší modely musí přijmout, a podobně [8].

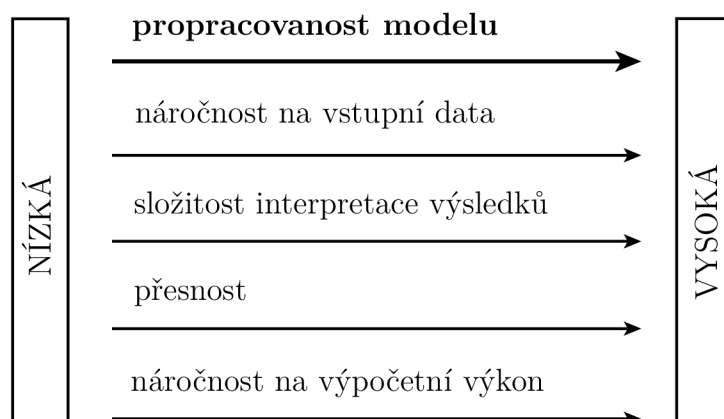
V případě znečištění ovzduší jsou využívány dva způsoby modelování – fyzikální a matematické. První ze zmíněných využívá speciálně konstruovaná zařízení, zejména nízkorychlostní (tzv. environmentální) tunely nebo vodní tanky, které simulují procesy probíhající v atmosféře ve zmenšeném měřítku. Tato zařízení jsou výhradně součástí laboratorních zařízení, v ČR například na Ústavu termomechaniky Akademie věd ČR (AV ČR). Tento způsob modelování je vhodný zejména pro řešení problémů předmětných oblastí se složitou geometrickou (městská zástavba) nebo ortografickou strukturou (horský terén), při kterých lze navíc zanedbat působení Coriolisovy síly [8]. Jelikož byly při zpracování této diplomové práce využity pouze matematické modely, nebude fyzikálním modelům věnována další pozornost. Více informací o fyzikálním modelování lze najít například v literatuře [43] a [44].

Matematické modely jsou obecně založeny na řešení rovnice difuze neboli transportní rovnice, případně na statistických teoriích a jsou zastoupeny v drtivé většině praktických aplikací. Tyto modely jsou nazývány disperzní nebo rozptylové (angl. dispersion model, air quality model) a většinou jsou reprezentovány počítačovými programy, pomocí kterých lze generovat řadu numerických i grafických výstupů. V [18] je uvedeno hned několik důvodů, proč jsou v praxi hojně využívány:

- Není prakticky možné monitorovat kvalitu ovzduší ve všech místech a v každém momentu – zejména z toho důvodu, že by to vyžadovalo vysoké investiční i provozní náklady.
- Modely mohou sloužit jako prostředek pro určení budoucího vývoje stavu znečištění v předmětné oblasti, který může být výrazně ovlivněn například změnou množství produkce emisí (výstavba ZEVO), či změnou prostorového rozložení zdrojů (výstavba dálnice). Tato aplikace je stěžejní pro zpracování rozptylových studií, o nichž bylo pojednáno v podkap. 2.3, a se kterou souvisí i cíle této práce.
- V případě zjištění znečištění, které překračuje povolené hodnoty, lze pomocí rozptylových modelů určit zdroje tohoto znečištění.
- Pomocí modelování lze určit míru potřebné redukce produkovaných emisí tak, aby zdroj splňoval potřebné limity.
- Disperzní modely lze využít pro vypracování krizových plánů pro případ průmyslových havárií (únik toxických chemických látek) nebo například vojenských konfliktů.



Matematických modelů, pomocí nichž lze řešit problémy spojené s otázkou znečištění ovzduší, existuje celá řada. Ty se liší hned v několika ohledech – přesností, mírou zjednodušení, náročností na vstupní data, na složitost interpretace získaných výsledků či náročností na výpočetní výkon. Závislost mezi těmito parametry ilustruje schéma na obr. 3.2. Z praktického hlediska však platí, že nejvyšší přesnost získaných výsledků bude dosažena v případě správné volby modelu, a to s ohledem na charakter řešeného problému, schopnosti a dostupné prostředky uživatele. Jinými slovy lze říci, že volba nejpracovnějšího modelu automaticky v žádném případě neznamená dosažení nejpřesnějších výsledků [18]. Podrobné rozdělení disperzních modelů je uvedeno dále v textu, konkrétně v podkap. 3.4.



Obrázek 3.2: Vlastnosti matematických modelů znečištění ovzduší.

### 3.1 Koncept šíření znečištění v atmosféře

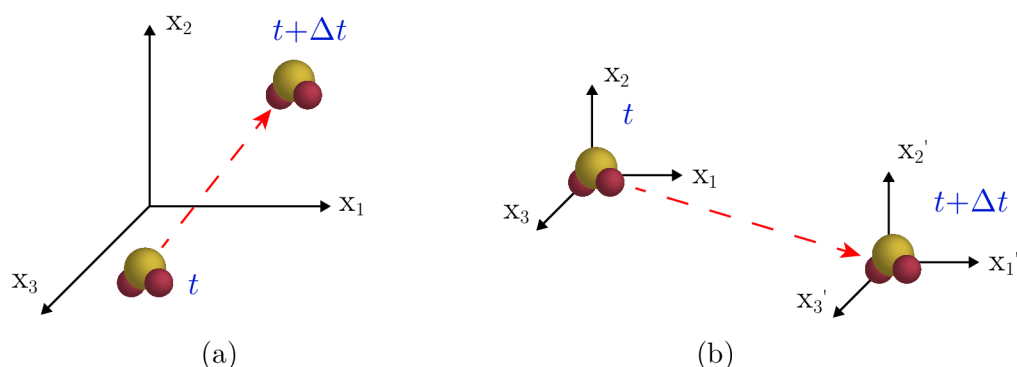
Znečišťující látky se do atmosféry uvolňují různými způsoby, z výfukových plynů automobilů, během různých průmyslových výrobních procesů, ze spalovacích procesů – ať už vznikají v domácím krbu nebo v teplárně, ale i v důsledku různorodých přírodních pochodů. Při pohledu na emise vystupující z komína lze pozorovat následující jevy. Po výstupu emisí z komína dochází ke vznosu vlečky a následné stabilizaci osy vlečky v určité výšce, kdy již nestoupá ani neklesá. Vzнос vlečky je způsoben dvěma příčinami, a to jednak hybností plynů opouštějících komín, tak vztlakovou silou, která vzniká v důsledku toho, že horký proud spalin je lehčí než okolní vzduch. Druhý z těchto způsobů je většinou mechanismem převažujícím [18]. Vlečka se následně pohybuje ve směru proudění větru a zároveň se rozšiřuje, a to jak v horizontálním, tak vertikálním směru, přičemž tvar vlečky se náhodně proměňuje. Tento proces je schématicky znázorněn na obr. 3.5 v podkap. 3.4.

Dochází tedy k přenosu a rozptylu znečišťujících látek v atmosféře (souhrnně označováno jako šíření znečišťujících látek). Proces přenosu znečišťujících látek ve směru proudění v atmosféře se nazývá advekce [18]. Z hlediska vzdálenosti lze přenos rozdělit na lokální a dálkový. Lokální je omezen vzdáleností přibližně do 100 km, naopak při dálkovém přenosu dochází k ovlivnění imisní zátěže na značnou vzdálenost od zdroje znečištění.

Rozptyl znečišťujících látek lze chápat jako snižování jejich koncentrací v ovzduší, a to zejména působením turbulentní difuze. To je proces, který vzniká v ovzduší důsledkem turbulentního charakteru atmosféry. V literatuře se lze setkat i s označením atmosférická difuze [16]. Tento pojem je nutné odlišovat od difuze molekulární, neboť oba jevy mají jinou fyzikální podstatu. Detailněji je o turbulentní difuzi pojednáno v podkap. 4.2 v souvislosti s meteorologickými vstupními údaji.

Kromě přenosu a rozptylu znečišťujících látek dochází i k dalším jevům [45] – často komplexním chemickým reakcím mezi těmito látkami nebo polutantem a atmosférou, případně k jejich transformacím (např. NO na NO<sub>2</sub>) nebo radioaktivnímu rozpadu prvků. V neposlední řadě dochází i k depozici neboli odstraňování polutantů ze vzduchu na zemský povrch. Při suché depozici se polutant zachycuje přímo na zemský povrch, při mokré depozici je pak polutant unášen společně se srážkami. Úkolem disperzních modelů je simulovat právě popsané jevy, dle úrovně propracovanosti modelů a přijaté míry jejich zjednodušení pak mohou být zahrnuty všechny nebo jen jejich část [45].

Stěžejní pro matematické vyjádření šíření znečištění je právě popis zmíněného jevu turbulentní difuze. Jelikož mají víry, vznikající turbulentním prouděním vzduchu v zemské atmosféře, zcela náhodný charakter, není možné nikdy s jistotou určit přesné rozložení koncentrací znečišťujících látek v daném okamžiku. A i přestože byly formulovány základní rovnice popisující tento jev, neexistuje žádný matematický model postihující všechny vstupní podmínky [16]. Pro potřebu praktických výpočtů jsou proto využívány různé aproximační teorie. Obecně lze jev turbulentní difuze popsat pomocí dvou přístupů – Eulerovského a Lagrangeovského. První ze zmíněných (obr. 3.3a) pracuje se souřadným systémem pevně spojeným se zemským povrchem a změny koncentrací jsou vyšetřovány v daném, pevně zvoleném bodě. V Lagrangeovském pojetí je naopak souřadný systém spjatý s individuální částicí (obr. 3.3b) a sledovány jsou změny na této konkrétní částici. Obě tato pojetí přistupují k popisu daného problému pomocí jiných matematických vztahů. Lze však dokázat, že tyto vztahy jsou vzájemně příbuzné [16].



**Obrázek 3.3:** (a) Eulerovský a (b) Lagrangeovský přístup k popisu turbulentní difuze.

### 3.1.1 Eulerovský přístup

Metoda výpočtu dle Eulerova je založena na sestavení materiálové bilance infinitesimálního objemu pevně zafixovaného v prostoru a následného odvození prakticky využitelné rovnice,

označované jako rovnice difúze nebo také transportní rovnice (v zahraniční anglicky psané literatuře se lze setkat i s pojmem advection-diffusion equation).

Prvním krokem k jejímu sestavení je vyjádření rovnice kontinuity. Při uvažování  $N$  znečišťujících látek v ovzduší, musí pro jejich koncentrace v uzavřeném objemu platit rovnost [16]:

$$\underbrace{\frac{\partial c_i}{\partial t}}_1 + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j}(u_j c_i)}_2 = D_i \underbrace{\frac{\partial^2 c_i}{\partial x_j \partial x_j}}_3 + R_i(c_1, \dots, c_N, T) + S_i(\mathbf{x}, t), \quad (3.1)$$

$$i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, 3,$$

kde

- $c_i$  koncentrace znečišťující látky  $i$  v daném objemu,
- $u_j$   $j$ -tá složka rychlosti vzduchu,
- $D_i$  koeficient molární difúze znečišťující látky  $i$  ve vzduchu,
- $R_i$  člen charakterizující vznik polutantu  $i$  chemickou reakcí (závislý na teplotě média  $T$ ),
- $S_i$  zdrojový člen charakterizující vznik látek  $i$  v místě  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$  a v čase  $t$ .

Kromě této rovnice navíc musí platit i rovnice charakterizující zákon zachování hybnosti (Navier-Stokesova) a energie – změny jednotlivých veličin  $u_j$ ,  $c_i$  a  $T$  se musí projevit ve všech těchto rovnicích. V případě řešení znečištění atmosféry, kdy jsou koncentrace znečišťujících látek velmi malé, je možné zavést předpoklad o tom, že přítomnost těchto látek téměř neovlivní meteorologické podmínky v atmosféře. Tudíž je možné řešit rov. (3.1) nezávisle od rovnic zachování hybnosti i energetických rovnic. Následovně lze také konstatovat, že  $u_j$  a  $T$  jsou veličiny nezávislé na koncentraci znečišťující látky  $c_i$  ve vzduchu. Význam jednotlivých členů ve výše zmíněné rov. (3.1) lze popsat následovně: člen 1 vyjadřuje změnu koncentrace znečišťující látky  $i$  v kontrolní objemu v čase  $t$ , člen 2 pak přenos této látky  $i$  advekcí a člen 3 výměnu hmoty molekulární difúzí.

Rovnici (3.1) je však třeba dále upravit. Jednou z podstatných skutečností, které je třeba uvažovat, je například to, že rychlost větru je nezbytné definovat jako sumu dvou složek, časově průměrné a její odchylky způsobené turbulencemi. Obdobně je nutné zavést koncentraci jako veličinu průměrnou. Tyto a další úpravy vedou k výslednému tvaru rovnice Eulerovského popisu turbulentní difúze (v textu není uvedena). Tato rovnice je bohužel pro praktické výpočty nepoužitelná, a to z toho důvodu, že při pokusu o její řešení dochází k problému uzávěru (angl. closure problem).

Pro odvození tvaru rovnice využitelné pro praktické výpočty (již zmíněné rovnice difúze) je potřeba aplikovat aproximační teorii – v tomto případě tzv. K-teorii (angl. mixing-length theory). Kompletní postup jejího odvození, včetně detailního popisu, je uveden v [16]. Výsledný tvar rovnice difúze, včetně uvažování průběhu chemických reakcí, je následující:

$$\underbrace{\frac{\partial \langle c_i \rangle}{\partial t}}_{\text{I}} + \underbrace{\bar{u}_j \frac{\partial \langle c_i \rangle}{\partial x_j}}_{\text{II}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left( K_{jj} \frac{\partial \langle c_i \rangle}{\partial x_j} \right)}_{\text{III}} + R_i(\langle c_1 \rangle, \dots, \langle c_N \rangle) + S_i(\mathbf{x}, t); \quad (3.2)$$

$$i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, 3,$$

kde

$\langle c_i \rangle$  průměrná koncentrace znečišťující látky  $i$ ,

$\bar{u}_j$   $j$ -tá časově průměrná složka rychlosti vzduchu,

$K_{jj}$  koeficient turbulentní difuze,

$R_i$  člen charakterizující vznik polutantu  $i$  chemickou reakcí (pro průměrnou koncentraci polutantu),

$S_i$  zdrojový člen charakterizující vznik látek  $i$  v místě  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$  a v čase  $t$ .

Jako v předchozím případě je vhodné uvést popis významu jednotlivých členů rov. (3.2): význam členů I a II je podobný jako členů 1 a 2 rov. (3.1). Člen III pak vyjadřuje rozptyl způsobený turbulentní difuzí. Lze si všimnout, že oproti původní rov. (3.1), chybí člen zastupující molekulární difuzi. Ten je možné zanedbat, a to z toho důvodu, že její vliv na změnu koncentrace polutantu je oproti vlivu turbulentní difuze zanedbatelný.

Analytické řešení výsledné rov. (3.2), z kterého vychází například Gaussovské disperzní modely, je možné pouze při zavedení značné řady zjednodušujících předpokladů (předpoklad homogenity a izotropnosti koeficientu turbulentní difuze, konstantnosti pole proudění v čase i prostoru apod.). Druhou možností je řešit tuto rovnici numericky. Praktické aspekty použití Eulerovských modelů jsou diskutovány dále v textu, viz podkap. 3.4.

### 3.1.2 Lagrangeovský přístup

Druhý z přístupů k popisu turbulentní difuze je svázán s chováním individuálních částic ve vzduchu. Při sestavení základní rovnice se vychází z hustot pravděpodobnosti. Hustotu pravděpodobnosti, že se částice přítomná v turbulentním poli bude v čase  $t$  nacházet v místě  $\mathbf{x}$ , lze vyjádřit jako

$$\Psi(\mathbf{x}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q(\mathbf{x}, t | \mathbf{x}', t') \Psi(\mathbf{x}', t') \, d\mathbf{x}', \quad (3.3)$$

kde

$\mathbf{x}$  uvažovaná poloha,

$t$  čas,

$Q(\mathbf{x}, t | \mathbf{x}', t')$  je hustota pravděpodobnosti (funkce), která vyjadřuje, že se částice z polohy  $\mathbf{x}'$  v čase  $t'$  přesune do polohy  $\mathbf{x}$ , kterou zaujme v čase  $t$ ,

$\Psi(\mathbf{x}', t')$  hustota pravděpodobnosti, že částice byla v čase  $t'$  v počáteční poloze  $\mathbf{x}'$ ,

přičemž z definice hustoty pravděpodobnosti dále vyplývá, že

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(\mathbf{x}, t) d\mathbf{x}' = 1.$$

Hustota pravděpodobnosti vyjádřená rov. (3.3) je definovaná pro jednu částici. Reálně však bude ve zkoumaném prostoru přítomno mnohem více částic. Při uvažování libovolného počtu přítomných částic  $m$ , jejichž pozice jsou definovány hustotami pravděpodobnosti  $\Psi_i(\mathbf{x}, t)$ , lze určit průměrnou koncentraci znečišťující látky  $\langle c(\mathbf{x}, t) \rangle$  v bodě  $\mathbf{x}$  sumací hustot pravděpodobnosti všech částic:

$$\langle c(\mathbf{x}, t) \rangle = \sum_{i=1}^m \Psi_i(\mathbf{x}, t). \quad (3.4)$$

Základní rovnice Lagrangeovského popisu, uvažující i prostorové rozložení původních částic a časově prostorové rozložení částic vycházejících ze zdroje, nabývá podoby

$$\begin{aligned} \langle c(\mathbf{x}, t) \rangle = & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q(\mathbf{x}, t | \mathbf{x}_0, t_0) \langle c(\mathbf{x}_0, t_0) \rangle d\mathbf{x}_0 \\ & + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{t_0}^t Q(\mathbf{x}, t | \mathbf{x}', t') S(\mathbf{x}', t') dt' d\mathbf{x}', \end{aligned} \quad (3.5)$$

kde

$S(\mathbf{x}', t')$  zdrojový člen.

První ze členů rovnice na pravé straně reprezentuje ty částice, které jsou přítomny v počátečním čase  $t_0$ , druhý z výrazů pak ty částice, které přibýly ze zdroje v časovém intervalu od  $t_0$  do  $t$ .

Rovnice (3.5) by se dala při znalosti hustoty pravděpodobnosti  $Q(\mathbf{x}, t | \mathbf{x}', t')$  jednoduše použít. To však v praxi není možné, a to hned ze dvou důvodů. Prvním z nich je nutnost zavedení předpokladu o tom, že uvažované částice nepodstupují žádné chemické reakce, k čemuž však ve skutečnosti dochází. Druhým důvodem je pak to, že k získání funkce  $Q$  by bylo nutné dokonale znát charakter turbulentního proudění – tato znalost je však vyjma nejjednodušších případů nedostupná. Stejně jako u Eulerovského popisu je tedy nutné použít určitou aproximační teorii. V případě Lagrangeovského popisu jde o statistickou teorii, založenou na chování částic při stacionární a zároveň homogenní turbulenci. Za těchto idealizovaných podmínek lze totiž říci, že průměrná koncentrace je normálního (Gaussova) rozdělení a hustota pravděpodobnosti  $Q$  závisí pouze na přesunu částice v prostoru a čase a ne na tom, kdy a kde byla uvedena do proudu vzduchu, tzn.  $Q(\mathbf{x}, t | \mathbf{x}', t') = Q(\mathbf{x} - \mathbf{x}'; t - t')$ .

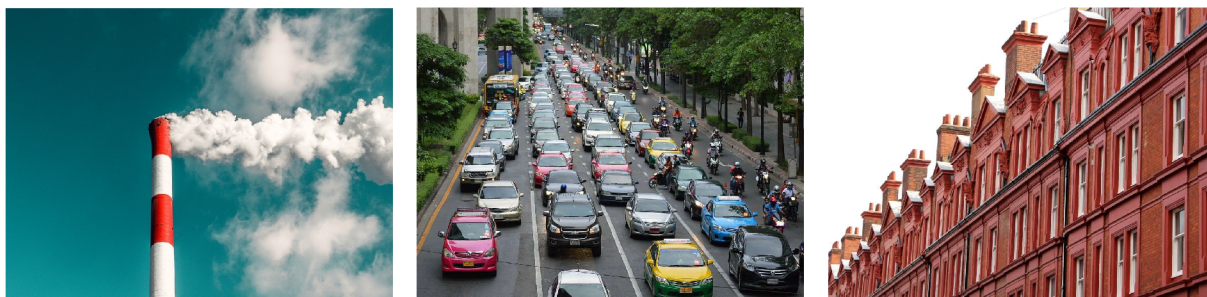
## 3.2 Druhy emisních zdrojů

Klasifikací emisních zdrojů se již zabývala úvodní kapitola 1. Pro modelování znečištění ovzduší je zvláště důležité rozdělení zdrojů znečišťujících příměsí dle jejich uspořádání. To, zda se jedná o zdroj bodový, liniový, plošný nebo objemový totiž ovlivňuje nejen potřebné vstupní údaje, ale zejména pak samotný průběh výpočtu (tvar odvozených rovnic).

### Bodové emisní zdroje

Dle [8] lze emisní zdroj, ze kterého jsou vypouštěny znečišťující látky, považovat za bod, pokud platí, že „lineární rozměr emitující plochy (například průměr ústí komína) je zanedbatelný s lineárními měřítky daného problému.“ Typickým zástupcem této skupiny je jakýkoliv komín, např. teplárny, jako je ilustrovaný na obrázku 3.4a. Ten je specifikován pomocí tří výšek – stavební výšky komína  $H$ , která je dána jeho konstrukcí, výškou vzhledu vlečky  $\Delta H$  a tzv. efektivní výškou komína (zdroje)  $h$ . Vzájemný vztah mezi těmito výškami je zřejmý z obr. 3.5 v podkap. 3.4.

Mezi nezbytná vstupní data, zadávaná do výpočtového modelu, charakterizující bodový zdroj, patří intenzita emisního toku (udává množství emitované látky za čas, běžně v  $[\text{g} \cdot \text{s}^{-1}]$ ), stavební výška komína (zdroje), nadmořská výška paty zdroje a další parametry, pomocí kterých je možno dopočítat výšku vzhledu vlečky – typicky tepelná vydatnost zdroje nebo trojice údajů průměr ústí komína, teplota a výstupní rychlost spalin. Efektivní výška zdroje je pak v některých případech výstupem výpočtu. Podrobně jsou tyto vstupní údaje rozebrány v podkap. 4.2.



(a) bodový [46]

(b) liniový [47]

(c) plošný [48]

**Obrázek 3.4:** Klasifikace emisních zdrojů dle jejich uspořádání.

### Liniové emisní zdroje

Liniové se od bodových zdrojů odlišují tím, že jeden z jejich rozměrů je již zanedbatelně velký vůči lineárním měřítkům daného problému, standardně jde přitom o délku. Tento způsob modelování zdrojů je častý pro výpočet emisního znečištění od dopravní emise z automobilového provozu na silnicích (obr. 3.4b). Dále jej lze využít třeba pro parametrizaci emisí pocházejících z materiálu dopravovaného dlouhým dopravníkem (např. doprava žhavého popela nebo strusky z elektrárenských kotlů). Nezbytně nutnou informací pro výpočet znečištění od liniových zdrojů je intenzita emisního toku na jednotku délky (běžně v  $[\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]$ ) [8].

### Plošné emisní zdroje

V případě, že je plocha zdroje emisí zanedbatelná s rozlohou řešeného území, je nezbytné modelovat tyto zdroje jako plošné. V praxi se takto běžně počítá vliv vysokého počtu malých bodových zdrojů, které jsou umístěny v definovaném území. Celková produkovaná emise takové plošného zdroje se určí jako součet příspěvků od jednotlivých bodových

zdrojů, jeho stavební výška je pak dána průměrnou hodnotou stavebních výšek zdrojů dílčích. Jako názorný příklad lze uvést výpočet příspěvku emisí od lokálního vytápění v hustěji zastavěných oblastech (obr. 3.4c). Počítat příspěvek od každého jednotlivého komínu zástavby by bylo z hlediska výpočtu nepřijatelné – zanedbat jejich příspěvek je však z hlediska přesnosti výpočtu také nepřijatelné. Přijatelným kompromisem mezi efektivitou a přesností výpočtu je tedy sdružení jednotlivých bodových zdrojů do určitých celků. Tyto celky jsou standardně ve tvaru čtverce, jehož strany jsou rovnoběžné s osami definovaného souřadnicového systému řešené úlohy a jako zdroj emisí se považuje celá plocha čtverce. Ideálně by také mělo být rozložení bodových zdrojů uvnitř této plochy homogenní. V případě plošných zdrojů je nutné definovat intenzitu emisního toku, tentokrát vztaženou na jednotku plochy (běžně v  $[g \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}]$ ), délku strany definovaného čtverce a průměrnou stavební výšku [8].

### Objemové emisní zdroje

Model objemového zdroje se používá, pokud emise vycházejí z určitého definovaného objemu. To může být například halda vysypaného žhavého popela nebo doutnající uhelná halda v blízkosti uhelných dolů. Při výpočtu krizových scénářů nejrůznějších havárií lze tímto způsobem modelovat i např. jaderný výbuch [45]. Opět je nutné znát intenzitu emisního toku, nyní vztaženou na jednotku objemu (běžně v  $[kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-3}]$ ) a celkový objem zdroje [8].

## 3.3 Prostorové měřítko

Ačkoliv by se na první pohled mohlo zdát, že rozdělení výpočtů do kategorií dle velikosti řešené oblasti je spíše formalitou, opak je pravdou. V případě modelování znečištění ovzduší hraje zvolený rozsah řešení zásadní roli [8]. To, na jaké úrovni je problém řešen, totiž ovlivňuje hned několik aspektů výpočtu, mimo jiné volbu samotného modelu (podrobnosti uvedeny v podkap. 3.4). V následujícím textu jsou uvedena běžně uvažovaná měřítko, a to sestupně, v pořadí od rozsahem největšího po nejmenší.

### Globální měřítko

Řešení problému v tomto měřítku je problémem nejnáročnějším, ovlivňuje jej totiž obrovské množství parametrů, jejichž relevantní hodnoty je těžké získat. Za problémy globálního měřítka lze považovat například následující: vznik a šíření radiačně aktivních plynů jako  $CO_2$ ,  $CH_4$ , jejich následná kumulace v atmosféře a související jev globálního oteplování, produkce plynů zeslabujících ozonovou vrstvu a následný vznik nebezpečných ozonových děr. Jako další vhodný příklad lze uvést dálkové šíření radioaktivních látek při haváriích. Šíření znečišťujících látek v tomto případě probíhá na obrovské transportní vzdálenosti v řádech desítek tisíců kilometrů.

### **Kontinentální měřítko**

Při transportních vzdálenostech v rozsahu několika set až tisíců kilometrů jde o řešení problémů kontinentálního měřítka. V tomto případě se jedná o fenomény typu kyselá dešť nebo letní fotochemický smog. Na evropském kontinentu se řešením takových problémů a jejich imisním monitoringem zabývají dva mezinárodní programy. Prvním z nich se nazývá European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP), kterého se za Českou republiku aktivně účastní ČHMÚ [49]. Druhým je pak European Long Range Tracer Experiment (ETEX), o jehož průběžných výsledcích je pojednáno v [50].

### **Regionální měřítko**

Při výpočtu znečištění ovzduší na území přibližně o velikosti jednoho státu, případně jeho podstatné části se jedná o problémy regionálního měřítka. Ty jsou často úzce specifikované pro danou oblast. Ilustračně lze pro území ČR uvést vznik a šíření znečištění v oblasti uhelných pánví v severozápadních Čechách nebo v oblasti Ostravska. I v rámci této úrovně řešení problému lze najít problém s mezinárodním přesahem, například tzv. Černý trojúhelník, symbol znečištění v severních Čechách, který se týkal hned tří států, a to ČR, Německa a Polska [8].

### **Městské (venkovské) měřítko**

Při hodnocení úrovně znečištění oblastí o velikosti měst a jejich přilehlého okolí, průmyslových podniků a jejich okolí a územích o lineárních rozměrech v řádech kilometrů až desítek kilometrů, se jedná o měřítko městské (venkovské). Na této úrovni byl proveden i výpočet v rámci praktické části této diplomové práce. Právě toto měřítko zohledňuje naprostá většina rozptylových studií, které jsou zpracovávány za účelem poskytnout potřebné informace v rozhodovacích procesech příslušných orgánů státní správy.

### **Mikro měřítko**

Posledním ze zástupců je modelování znečištění ovzduší v úzce specifikovaném prostoru, jako jsou například uliční kaňony, křižovatky, nejrůznější konfigurace městské zástavby apod. Rozvoj tohoto typu výpočtu byl umožněn se zvýšením dostupnosti výpočetního výkonu a provádí se zejména pomocí nástroje numerické analýzy Computational Fluid Dynamics (CFD). Na FSI VUT v Brně se této problematice věnuje doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

## **3.4 Rozdělení matematických modelů**

Nejběžnější zástupci matematických modelů jsou Gaussovské modely, Lagrangeovské modely, Eulerovské modely, CFD a modely statistické.



### 3.4.1 Gaussovské modely

Gaussovské disperzní modely jsou v drtivé většině praktických aplikací nejvhodnějším a nejpoužívanějším typem modelu [18]. Zároveň se jedná o nejjednodušší z prezentovaných modelů, používaných pro popis šíření znečišťujících látek v atmosféře [8]. Tento typ modelu je také implementován v softwaru použitém při řešení praktické části této diplomové práce, a proto mu bude věnována vyšší pozornost než ostatním typům modelů.

Jak již bylo uvedeno dříve v podkap. 3.1, Gaussovské disperzní modely jsou založeny na analytickém řešení rovnice difuze. To lze provést pouze při přijetí určitých zjednodušujících, v tomto případě poměrně silných předpokladů [51]:

- spojitá tvorba emisí

Zdroj znečištění je bodový (viz klasifikace v podkap. 3.2) a kontinuálně produkuje konstantní množství emisí, které je neměnné v čase.

- zachování hmoty

Předpokládá se, že veškeré znečišťující látky zůstávají během jejich šíření od zdroje k cíli přítomny v atmosféře. Nedochozí tedy k chemickým reakcím mezi látkou a povrchem, vzájemným reakcím dvou rozptýlených látek ani k jejich usazování vlivem gravitace. Pokud dojde vlivem turbulentního proudění k rozptylu znečišťujících látek blízko k povrchu, jsou tyto látky opět vzneseny do prostoru pomocí jiné turbulence (angl. eddy reflection).

- ustálený stav

Rychlost, směr větru a atmosférická turbulence jsou v prostoru a čase konstantní a neměnné (homogenní).

- koncentrační profil je reprezentován normálním rozdělením

Průměrné koncentrační profily (pro  $t > 1$  h) jsou v libovolné vzdálenosti a ve směru proudění v příčném i podélném směru kolmém na směr šíření (v ose  $y$  a  $z$ ) charakterizovány normálním (Gaussovým) rozdělením, viz obr. 3.5.

Je třeba dodat, že tyto podmínky nemohou být reálně nikdy splněny [18]. Lze však říci, že Gaussovský disperzní model je přibližně platný, pokud jsou tyto podmínky alespoň přibližně splněny.

Analytické řešení rov. (3.2) nabývá při uvažování těchto předpokladů tvaru:

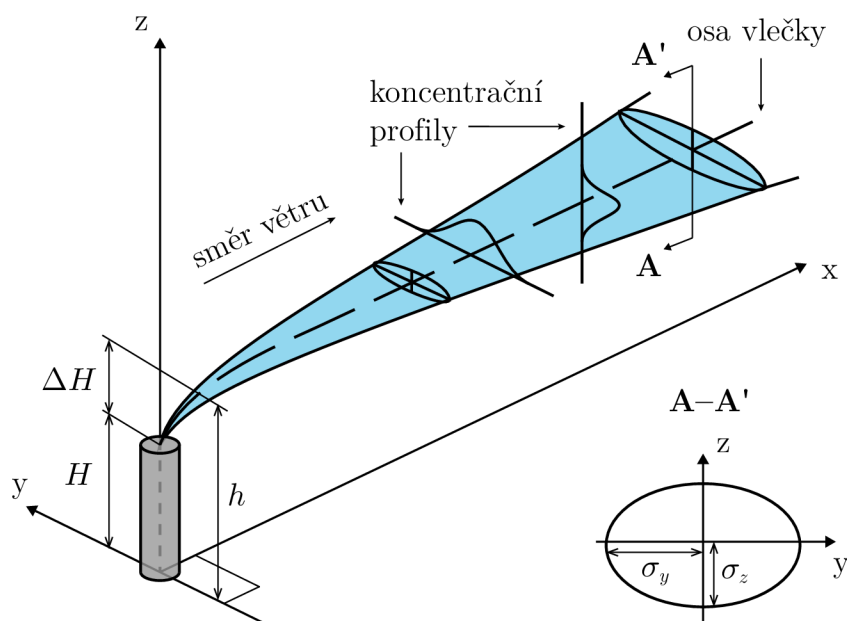
$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}, \quad (3.6)$$

kde

$x$  souřadnice ve směru proudění větru (horizontální směr),

$y$	souřadnice ve směru proudění bočního větru (horizontálně příčný směr),
$z$	souřadnice ve vertikálním směru (vertikálně příčný směr),
$c(x, y, z)$	průměrná koncentrace v určitém místě daném souřadnicemi,
$Q$	zdrojový člen,
$u$	rychlost větru v koruně komína,
$\sigma_y, \sigma_z$	koeficienty disperze, které jsou funkcí vzdálenosti od zdroje a meteorologických podmínek kvantifikují jaká je intenzita rozptylu znečišťujících látek ve směru os $y$ a $z$ v atmosféře,
$h$	efektivní výška zdroje (viz obr. 3.5).

Ve výchozím stavu tedy rov. (3.6) nepočítá se suchou ani mokrou depozicí, gravitačním usazováním, chemickými reakcemi ani radioaktivním rozpadem. V praxi jsou nicméně některé z Gaussovských modelů často doplňovány o různé empirické korelace zahrnující i tyto vlivy. Vnesením těchto doplňujících vztahů do výpočtu lze vylepšit přesnost a rozšířit pole použitelnosti modelu [18].



**Obrázek 3.5:** Gaussovský vlečkový model. Převzato z [51] a upraveno.

Největší výhodou Gaussovských vlečkových modelů je jejich jednoduchost, nízká náročnost na dostupnost vstupních dat a na výpočetní výkon [18]. Jsou vhodné zejména pro výpočet koncentrací znečišťujících látek v předmětných oblastech s homogenním podkladem a nepříliš strukturovaným terénem. Přesnost obdržených výsledků má dle [18] tendenci rychle klesat ve vzdálenostech zhruba 10–20 km od zdroje znečištění, modely jsou tedy vhodné pro výpočty předmětných oblastí zhruba jednoho okresu (městské měřítko, do několika set  $\text{km}^2$ ) [8]. Mezi jejich slabé stránky patří nízká adaptabilita vůči nehomogennímu podkladu a komplexnímu terénu a dále také nemožnost zahrnutí změn v produkci emisí nebo meteorologických podmínek v čase. Těžisko jejich využití leží v určení

dlouhodobých průměrných hodnot koncentrací (měsíčních, sezónních, ročních), které jsou potřebné například pro zpracování rozptylových studií, sloužících pro predikci budoucího vývoje znečištění v závislosti na změně struktury zdrojů v dané oblasti [8].

### 3.4.2 Lagrangeovské modely

Tento typ modelů je založen na Lagrangeovském pojetí popisu turbulentní difuze – souřadný systém se pohybuje společně s jednotlivými částicemi znečišťujících látek, které se šíří po určitých trajektoriích (viz dříve, obr. 3.3b). Z konečného rozložení znečišťujících částic v prostoru pak lze odhadnout výslednou podobu koncentračního pole. V praxi jsou dále dle charakteru pojetí výpočtu rozlišovány dva poddruhy těchto modelů – puff modely a stochastické částicové modely.

#### Puff modely

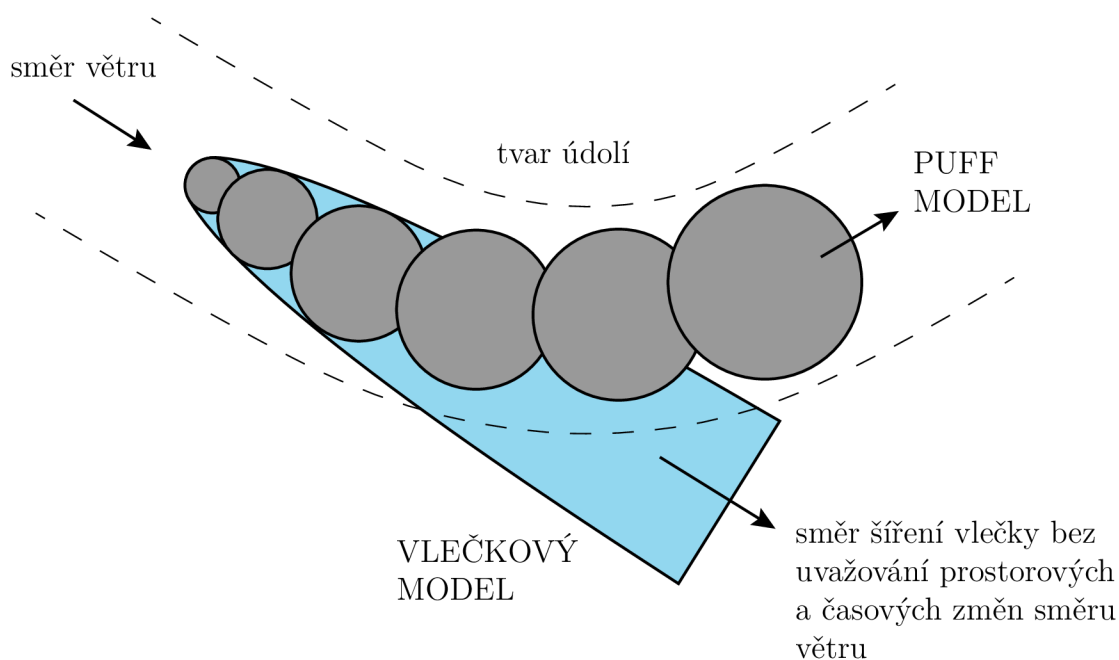
Tyto modely (angl. slovo puff lze volně přeložit jako výdech, či bafnutí) stojí na rozhraní Gaussovských a Lagrangeovských modelů. Jejich název je odvozen od způsobu parametrizace vlečky znečištění vycházející z komína. Masa znečišťujících látek vystupujících ze zdroje je rozdělena na množství jednotlivých puffů (výdechů). Tímto způsobem parametrizace lze při výpočtu uvažovat i vliv časové a prostorové změny směru a rychlosti proudění vzduchu. Osa vlečky znečištění tedy již nebude přímkou jako v případě Gaussovských modelů (obr. 3.5), ale obecně křivkou. Na druhou stranu je stále zachován předpoklad o normálním rozdělení koncentrací uvnitř jednotlivých výdechů [45]. Rozdíl mezi vlečkovými a puff modely je ilustrován na obr. 3.6, zobrazená situace vystihuje šíření vlečky znečištění v údolí. Pomocí klasického vlečkového modelu by popis šíření znečištění nebyl přesný, neboť nedokáže postihnout změny směru větru v čase ani prostoru.

Koncentrace v daném bodě prostoru je v případě tohoto typu modelu dána superpozicí normálních rozdělení koncentrací všech výdechů překrývajících se v daném místě [18]. Puff modely jsou přesnější než modely vlečkové a poskytují dobré výsledky při modelování šíření znečištění až na vzdálenost přibližně 200 km [18].

#### Stochastické částicové modely

Jedná se o modely založené na stochastické simulaci šíření velkého množství jednotlivých částic znečištění, které reprezentují celkovou masu vypouštěnou zdrojem. Předpokládají, že se každá částice šíří samostatně po náhodné trajektorii okolo průměrného vektoru proudění vzduchu. Výsledná koncentrace je určena rozložením těchto částic v prostoru, resp. jejich součtem v daném objemu. V případě těchto modelů je již upuštěno od Gaussovských předpokladů a vliv turbulentní difuze je vyhodnocován v každém kroku výpočtu trajektorie částice zvlášť. Jejich hlavní nevýhodou je to, že k získání spolehlivých výsledků je třeba vypočítat obrovské množství trajektorií individuálních částic (od desítek tisíc po miliony v závislosti na řešeném problému), což mnohdy obnáší významné zvýšení výpočtového času a náročnosti na výpočetní výkon [45]. Na druhou stranu jsou vhodnými kandidáty pro výpočet šíření znečištění na dlouhé vzdálenosti (i několik set km) [16]. Při takových výpočtech již není možné popisovat vlečku nebo výdechy jako jednotlivé entity, a proto je využití standardních vlečkových nebo puff modelů nevhodné. Lagrangeovské

modely je možné obecně použít pro výpočet ve složitém terénu. Mezi jejich významné praktické aplikace dále patří i zpětné určení zdroje znečištění z naměřených hodnot koncentrací [45].



**Obrázek 3.6:** Rozdíl mezi klasickým vlečkovým a puff modelem.

### 3.4.3 Eulerovské modely

Hlavní podstata Eulerovských modelů spočívá v numerickém řešení rov. (3.2) [45]. Výpočet probíhá na mřížce definované a zafixované v prostoru, přičemž v uzlových bodech mřížky jsou vyšetřovány vlastní změny koncentrací znečišťujících látek. Hlavní výhodou Eulerovských oproti jiným typům modelů je to, že do výpočtového algoritmu lze snadno zahrnout i velmi komplexní simulace chemismu atmosféry. To je v případě jednodušších modelů buď nemožné nebo složité. Stejně jako Lagrangeovské modely mohou být Eulerovské modely s přijatelnou přesností použity i pro výpočet šíření znečištění na velké vzdálenosti. Jejich hlavní nevýhodou je to, že pro získání výsledků vysoké přesnosti je nutné zvolit velmi jemné rozlišení výpočtové sítě – s rostoucí hustotou mřížkových bodů však rapidně narůstají nároky těchto modelů na výpočetní výkon a čas. Tyto modely také nelze použít pro určení koncentrací v těsné blízkosti zdroje, neboť přestávají platit předpoklady K-teorie použité k odvození rovnice difuze (viz podkap. 3.1) [18]. Praktickým omezením těchto modelů je zejména jejich vysoká náročnost na vstupní data a na již zmíněný výpočetní výkon.

### 3.4.4 CFD

Jak bylo zmíněno v podkap. 3.3, někdy je třeba problém šíření znečištění ovzduší řešit i v malém měřítku, například na úrovni uličních kaňonů. I když se Lagrangeovské i Eu-

lerovské modely z hlediska šíření polutantů na různé vzdálenosti jeví velmi univerzálně, v takových případech je využít nelze. Důvodem je nedostupnost reprezentativních meteorologických dat (pole určující rychlost a směr větru apod.) pro místa s komplexní geometrií a množstvím překážek, jako je již zmíněný uliční kaňon, kde jsou navíc zdroje znečištění a receptory vzdáleny pouze několik desítek až stovek metrů [45]. Řešením tohoto problému je využití univerzálního nástroje pro simulaci proudění – CFD. Ten je založen na numerickém řešení Navier-Stokesovy rovnice, která charakterizuje proudění newtonovské nestlačitelné tekutiny. Klíčovými částmi CFD disperzního modelu jsou mřížka, která s daným rozlišením pokrývá celou řešenou oblast, samotný řešič, určený k řešení Navier-Stokesovy a dalších potřebných rovnic, a model turbulence [45]. S rostoucím rozlišením mřížky stejně jako v případě Eulerovských modelů vzrůstá výpočtová cena. Disperzní modely založené na CFD jsou v praxi široce využívány pro předpověď kvality ovzduší na úrovni mikro měřítka. Další možností je jejich využití jako nástrojů k vytvoření vstupních meteorologických dat do upravených Lagrangeovských a Eulerovských modelů.

### 3.4.5 Statistické modely

Statistické modely na rozdíl od výše zmíněných disperzních modelů nevycházejí z řešení rovnice difuze, ale z různých statistických metod. V současné době jsou tyto typy modelů nejčastěji založeny na výpočtu pomocí neuronových sítí nebo Kalmanově filtru. V praxi jsou využívány pro modelování problémů, jejichž numerické řešení by bylo příliš výpočtově náročné a složité. Příkladem takového problému je předpověď vzniku smogových situací v určité oblasti. Jejich hlavní výhodou je velmi rychlá odezva, nevýhodou naopak to, že jsou často vytvořeny na míru pro danou oblast nebo místo a tím pádem jsou jen velmi těžko přenositelné a univerzálně aplikovatelné.

## 4 SYMOS'97

SYMOS'97 je Gaussovský disperzní model, uvedený v české legislativě [25] zabývající se šířením znečištění ovzduší, jako jeden z referenčních modelů (tab. 2.1), pomocí kterého lze hodnotit kvalitu ovzduší. S ohledem na problematiku řešenou v této práci se jeví z hlediska aspektů jeho použitelnosti jako nejvhodnější z referenčních modelů používaných v ČR.

Samotný model byl sestaven na základě metodiky Systému modelování stacionárních zdrojů (SYMOS), která vznikla v rámci řešení dvou projektů Státního programu péče o životní prostředí MŽP ČR (ev. č. GA/3224/93 a ev. č. 49/6.2/1/95) [52]. Od prvního vydání této metodiky v roce 1998 byly prováděny různé dílčí úpravy a změny, její poslední aktualizace proběhla v roce 2013, viz [53]. Pro praktické využití byla metodika naprogramována jako model SYMOS'97. Ten je firmou IDEA-ENVI, s.r.o. distribuován, včetně grafického rozhraní, jako komerční software [54]. Vlastní programové vybavení metodiky zpracoval po její poslední aktualizaci také ČHMÚ. Model SYMOS ČHMÚ se v některých aspektech výpočtu mírně liší, nicméně jej lze pod licencí General Public Licence (GNU) volně získat z webu ČHMÚ [52]. V praktické části byla pro výpočet použita komerční varianta tohoto modelu.

### 4.1 Charakteristika modelu

O Gaussovských disperzních modelech a jejich podstatě bylo pojednáno v podkap. 3.4. Základní rovnice, pomocí které jsou v tomto disperzním modelu počítány koncentrace znečišťujících látek, je upravenou verzí rov. (3.6). Model SYMOS'97 je především určen jako nástroj pro zpracování rozptylových studií a podkladů pro hodnocení kvality ovzduší. Metodika pro výpočet znečištění ovzduší je koncipována tak, že umožňuje [53]:

- výpočet znečištění ovzduší plynnými i tuhými látkami z bodových, liniových i plošných zdrojů,
- výpočet znečištění od většího počtu zdrojů a v těsné blízkosti zdroje,
- zahrnutí terénu do výpočtu,
- stanovení charakteristik znečištění v husté geometrické síti referenčních bodů umožňující následné názorné kartografické zpracování výsledků výpočtů,
- vzít při výpočtu v úvahu statistické rozložení směru a rychlosti větru vztažené ke třídám stability mezní vrstvy ovzduší podle klasifikace Bubníka a Koldovského (viz dále),
- odhadnout imisní koncentrace znečišťujících látek při bezvětří a pod inverzní vrstvou ve složitém terénu,
- částečně (v prvním přiblížení) zohlednit depoziční a transformační procesy probíhající v atmosféře a snížení znečištění ve vyšších nadmořských výškách,
- určit koncentraci a depozici „těžkého“ prachu (tj. částic, u kterých nelze zanedbat pádovou rychlost).

Hlavní omezení navržené metodiky naopak spočívají v následujícím:

- Rovnice uvedené v metodice jsou použitelné pouze do vzdálenosti 100 km od zdroje znečištění (dle [55] je doporučována maximální vzdálenost přibližně 50 km).
- Výpočtové rovnice není možné použít pro výpočet uvnitř městské zástavby pod úrovní střech budov (tedy např. uličních kaňonů nebo křižovatek).
- Metodika nepočítá se stávajícím pozadovým znečištěním a vypočtené imisní koncentrace jsou pouze příspěvky imisních koncentrací způsobené emisními zdroji zahrnutými do výpočtu.

Samotným výpočtem lze pak získat tyto výsledky a charakteristiky:

- imisní koncentrace znečišťujících látek maximální možné hodinové (s, nebo bez ohledu na třídy rychlosti větru a stability ovzduší), maximální možné osmihodinové, dvacetičtyřhodinové hodnoty imisních koncentrací a roční průměrné,
- dobu trvání imisních koncentrací, které převyšují určité předem zadané hodnoty (např. imisní limity dané legislativou), a dobu překročení zvolených imisních koncentrací pro zdroj se sezónně proměnnou emisí,
- podíl zdrojů znečištění ovzduší na celkovém znečištění v dané oblasti,
- potřebnou výšku komína s ohledem na splnění imisních limitů,
- spad prachu a rozptyl exhalací vypouštěných chladícími věžemi.

## 4.2 Vstupní data

Vstupní data, která je třeba zadat do modelu, lze rozdělit do tří hlavních oblastí: údaje o zdrojích, jimi vypouštěných emisích a imisních limitech, meteorologické a klimatické údaje a údaje o terénu a topografickém rozložení referenčních bodů. V následujícím textu jsou v kontextu práce s modelem SYMOS'97 tyto skupiny údajů rozvedeny detailněji.

### 4.2.1 Údaje o emisích

#### Údaje o zdrojích

Množství potřebných údajů v této kategorii se odvíjí od typu uvažovaného zdroje (bodový, plošný, liniový, chladící věž). V případě spalovacího provozu jako ZEVO se jedná o bodový zdroj, dále tedy budou uvedeny pouze charakteristiky spjaté s tímto typem zdroje. Přehled údajů, které je potřebné zadat pro plnou definici bodové zdroje je uveden v tabulce 4.1. Všechny tyto údaje lze většinou získat z technologických schémat provozů, popř. je dopočítat na základě rovnic běžně využívaných v inženýrské praxi. Podrobný rozbor všech uvedených parametrů a různé způsoby určení jejich hodnot jsou explicitně uvedeny v metodice [53].

**Tabulka 4.1:** Vstupní údaje o bodovém zdroji.

název veličiny	značení	jednotka	poznámky
poloha zdroje	$x_z$	[m]	dle použitého souřadnicového
	$y_z$	[m]	systému
nadmořská výška terénu v místě zdroje	$z_z$	[m]	
výška koruny komína nebo konce výduchu	$H$	[m]	nad terénem, může být i veličinou určenou
relativní roční využití	$\alpha$	[-]	určí se z roční provozní doby $P_r$ [h]
denní využití zdroje	$P_d$	[h · d <sup>-1</sup> ]	
objemový tok spalin	$V_s$	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> ]	udává se za NP (0 °C; 101,325 kPa), lze určit dopočtem z $t_s$ , $D_v$ a $w_0$
teplota spalin	$t_s$	[°C]	
vnitřní průměr komína	$D_v$	[m]	lze určit dopočtem z $V_s$ , $t_s$ a $w_0$
výstupní rychlost spalin	$w_0$	[m · s <sup>-1</sup> ]	lze určit dopočtem z $V_s$ , $t_s$ a $D_v$
množství znečišťující látky	$M$	[g · s <sup>-1</sup> ]	vztažené na referenční spaliny (referenční obsah O <sub>2</sub> )

Veličiny  $V_s$ ,  $t_s$  a  $M$  jsou v případě spalovacích procesů určovány pro jmenovitý výkon zdroje. Se zadáváním vstupního údaje o množství vypouštěných pevných částic se pojí určitá specifika. Pokud jde o frakce PM<sub>10</sub> a menší, jsou do výpočtu zadávány jako veličina typu plyn. Pokud jde o částice větší, je nutné použít zadání pomocí veličiny typu prach – u těchto částic je totiž nutné zohlednit jejich pádovou rychlost. V praxi je běžně známa pouze celková hodnota emise prachových částic (PM). V tom případě je nutné zadat tzv. prachovou skupinu, která je charakterizována procentuálním rozdělení frakcí PM a jejíž typické poměry jsou uvedeny v metodickém pokynu MŽP pro zpracování rozptylových studií (v současnosti jde o Věstník MŽP 2013/08 [39]). Dále je nezbytné definovat i hustotu prachových částic  $\rho_c$  v [kg · m<sup>-3</sup>]. Oxidy dusíku NO<sub>x</sub> jsou zadávány v ekvivalentu NO, přičemž do výpočtu lze zadat podíl NO<sub>2</sub> na celkovém množství. Ten lze pro vybrané stacionární spalovací zdroje a průmyslové procesy nalézt opět v [39].

### Údaje o imisních limitech a přípustných referenčních koncentracích

V rámci výpočtu lze pro orientaci provést porovnání vypočtených imisních příspěvků definovaných zdrojů s imisními limity nebo přípustnými referenčními koncentracemi. Imisní limity jsou pro vybrané škodliviny stanoveny příslušnou legislativou, viz podkap. 2.2 a tab. A.2 přílohy A. Přípustné referenční koncentrace jsou stanoveny Státním zdravotním ústavem (SZÚ) pro ostatní znečišťující látky, které nemají definovaný imisní limit. Seznam takových látek a přípustných referenčních koncentrací je uveden na webových stránkách SZÚ, dostupné z [56].



## 4.2.2 Meteorologické a klimatické údaje

Pro zaručení reprezentativnosti výpočtu jsou meteorologické a klimatické podklady pro modelování šíření znečištění v atmosféře většinou průměrné hodnoty pro období několika let. Zároveň je důležité, aby tyto informace byly dostatečně charakteristické pro zvolenou zájmovou oblast. Posouzení vhodnosti těchto vstupních údajů pro daný výpočet je však záležitost značně komplikovaná a je spíše předmětem odborných odhadů v klimatologii [8]. Při těchto hodnoceních je třeba brát v úvahu hned několik faktorů, jako příklad lze zmínit to, ze které meteorologické nebo klimatické stanice data pochází, nebo to, jaká je topografie terénu [53]. Pro výpočet znečištění od zdrojů, jejichž charakteristiky nejsou přímo ovlivněné meteorologickými podmínkami (neplatí pro chladící věže), je hlavním vstupním klimatickým údajem tzv. větrná růžice rozlišená dle tříd rychlosti větru a teplotní stability atmosféry. Pro lepší pochopení toho, co tato větrná růžice reprezentuje, je vhodné uvést teoretické pozadí, ze které její konstrukce vychází. Rychlost rozptylu znečištění v atmosféře je ovlivněna zejména dvěma veličinami, a to rychlostí větru a intenzitou termické turbulence [53]. To, že tyto veličiny mají na výpočet zásadní význam lze ostatně vidět i z rov. (3.6).

Rychlost větru je určována ve standardní meteorologické výšce 10 m nad zemí. Metodika [53] rozděluje rychlost větru do tří tříd tak, jak je uvedeno v tab. 4.2, níže.

**Tabulka 4.2:** Definice tříd rychlosti větru. Převzato z [53].

třída rychlosti větru	rozmezí rychlostí $u_{10}$ [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	třídní rychlost $u_{10}$ [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
1. slabý vítr	$0 < u_{10} \leq 2,5$	1,7
2. mírný vítr	$2,5 < u_{10} < 7,5$	5,0
3. silný vítr	$u_{10} > 7,5$	11,0

Jelikož se rychlost větru se změnou výšky mění, je nutno rychlost  $u_{10}$  dále korigovat a přepočítat. Do samotného výpočtového vzorce je dosazována rychlost v efektivní výšce komína (výduchu). Kromě rychlosti větru je důležitý i jeho směr. Ten se v metrologii udává podle toho, odkud vítr fouká. Například východní vítr způsobí rozptyl znečišťujících látek v západním směru. Směr větru se označuje ve stupních, přičemž začíná od severu a postupně se zvětšuje ve směru hodinových ručiček. V pravouhlé soustavě by tedy osa X mířila k východu a osa Y k severu. Rozlišuje se osm základních směrů větru – severovýchodní (pro další směry obdobně zkráceno) SV ( $45^\circ$ ), V ( $90^\circ$ ), JV ( $135^\circ$ ), J ( $180^\circ$ ), JZ ( $225^\circ$ ), Z ( $270^\circ$ ), SZ ( $315^\circ$ ), S ( $360^\circ$ ) a bezvětří ( $0^\circ$ ). Pokud je pro definici sítě referenčních bodů použit jiný než tento souřadnicový systém (viz dále), je nutno sjednotit všechny tyto souřadnicové systémy v jeden.

Intenzita termické turbulence ovlivňuje výpočet zejména formou různých koeficientů a konstant. Závisí na ní například rozptylové koeficienty  $\sigma_y$  a  $\sigma_z$ . Obecně lze dle způsobu vzniku rozlišit dva druhy turbulence – mechanickou a termickou (konvekční) [16]. První z nich vzniká v důsledku vertikálního stříhu větru, při obtékání překážek a nerovností (např. vegetace, zástavby), třením vzduchových částic o zemský povrch a ve volné

atmosféře např. v blízkosti atmosferických diskontinuit. Její vznik přitom není závislý na teplotních podmínkách v ovzduší. Oproti tomu termická turbulence vzniká následkem horizontálních teplotních nehomogenit. V závislosti na těchto teplotních rozdílech se mění hustota vzduchu a dochází ke vzniku vztlakových sil – teplý vzduch stoupá vzhůru a naopak těžší studený vzduch klesá. Intenzita termické turbulence velmi silně závisí na tzv. termické stabilitě atmosféry. Na základě znalosti teplotní stability atmosféry lze rozhodnout o tom, zda bude k rozptylu znečišťujících látek v ovzduší docházet snadno, obtížně, nebo vůbec. Tato stabilita přímo souvisí s teplotním zvrstvením atmosféry, které lze charakterizovat pomocí teplotních gradientů. Vertikální teplotní gradient, definovaný rov. (4.1), udává skutečnou změnu teploty připadající na 100 m atmosféry:

$$\gamma = \frac{\partial T(z)}{\partial z}, \quad (4.1)$$

kde

$z$                       výška,  
 $T(z)$                  teplota vzduchu závisící na výšce.

Teplota atmosféry standardně s rostoucí výškou klesá ( $\gamma > 0$ ), může však i růst ( $\gamma < 0$ ) (tento stav je označován jako inverze) a nebo zůstat stálá ( $\gamma = 0$ ). Termické zvrstvení atmosféry je o to větší, čím klidnější je ovzduší. V metodice je použita stabilitní klasifikace dle Bubníka-Koldovského odvozená v ČHMÚ [53].

**Tabulka 4.3:** Stabilitní klasifikace podle Bubníka a Koldovského. Převzato z [53].

třída stability	vertikální teplotní gradient [°C na 100 m]	popis
I. superstabilní	$\gamma < -1,6$	silné inverze velmi špatné rozptylové podmínky
II. stabilní	$-1,6 \leq \gamma < -0,7$	běžné inverze špatné rozptylové podmínky
III. izotermní	$-0,7 \leq \gamma < 0,6$	slabé inverze, izotermie nebo malý kladný teplotní gradient často se vyskytují mírně zhoršené rozpty- lové podmínky
IV. normální	$0,6 \leq \gamma \leq 0,8$	indiferentní teplotní zvrstvení běžný případ dobrých rozptylových pod- mínek
V. konvektivní	$\gamma > 0,8$	labilní teplotní zvrstvení rychlý rozptyl znečišťujících látek

Z tab. 4.3 lze vidět, že tento způsob klasifikace rozlišuje pět tříd stability atmosféry. V zahraniční literatuře se lze setkat i s jinými způsoby rozlišení, například univerzálně

používanou klasifikací Pasquill-Gifford (podrobnosti lze nalézt v [18] nebo [51]). Rozdělení stability atmosféry dle Bubníka-Koldovského představuje národní specifikum ČR. K rychlému rozptylu znečišťujících látek bude docházet během jasného slunečního dne při silném větru. Opačný extrém, tedy když bude zvrstvení stabilní, vznikne za jasných nocí při slabém větru. Za těchto podmínek totiž dojde ke vzniku inverze (záporný teplotní gradient  $\gamma$ ) a znečišťující látky se budou rozptylovat velmi obtížně. Jednotlivé třídy stability se vyskytují pouze v určitých třídách rychlosti. Tato závislost je dána tab. 4.4. Z ní plyne, že celkově se může vyskytnout jedenáct kombinací tříd stability a tříd rychlostí větru.

**Tabulka 4.4:** Rozmezí rychlostí větru a výskyt jednotlivých tříd rychlosti větru pro jednotlivé třídy stability ovzduší. Převzato z [53].

třída stability	rozmezí vyskytující se rychlosti větru [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	výskyt tříd rychlostí větru
I. superstabilní	0–2,5	1
II. stabilní	0–5,0	1,2
III. izotermní	rychlost není omezena	1,2,3
IV. normální	rychlost není omezena	1,2,3
V. konvektivní	0–5,0	1,2

Větrná růžice (jejíž příklad je uveden v příloze D na obr. D.1 a v tab. D.1), která je meteorologickým a klimatickým vstupem do výpočtu modelem SYMOS'97, pak s ohledem na výše uvedené informace vyjadřuje relativní četnosti směru větru z osmi základních směrů pro jedenáct kombinací rozptylových podmínek, včetně četnosti bezvětří pro každou ze tříd stability. Tyto četnosti se udávají v procentech s přesností na dvě desetinná místa. Součet všech těchto četností dává 100 %. Jak bylo zmíněno dříve, větrné růžice jsou sestavovány pro delší průměrná období (např. 5 let) a pro zachování reprezentativnosti výpočtu musí být charakteristické pro zvolenou lokalitu. Větrné růžice pro daný rok jsou pro vybrané imisní stanice, resp. kraje uváděny v tabelární ročence ČHMÚ (dostupné z [57]). Větrné růžice zprůměrované a sestavené na míru zvolené lokality a charakteru emisního zdroje lze v ČR za poplatek objednat například od ČHMÚ. Důležité je podotknout, že v samotné výpočtové proceduře je větrná růžice použita pro určení průměrných ročních koncentrací znečišťujících látek.

### 4.2.3 Geografické údaje

Výpočty imisních koncentrací znečišťujících látek jsou prováděny v referenčních bodech, které jsou definovány souřadnicemi  $x_r$  [m] a  $y_r$  [m] ve zvoleném souřadnicovém systému, výškou terénu  $z_r$  [m] v daném místě a výškou  $l$  [m] nad terénem. V praxi se výpočet provádí na generované pravidelné, případně nepravidelné síti referenčních bodů. Z polohy a nadmořských výšek jednotlivých referenčních bodů v této síti je zároveň vyhodnocován tvar a charakteristiky terénu v zájmové oblasti. Výsledné hodnoty imisních koncentrací jsou totiž závislé i na tvaru terénu mezi zdrojem a zvoleným referenčním bodem. Pro přesnost

výpočtu profilu terénu je proto nutné zvolit dostatečně hustou výpočtovou síť tak, aby dokázala postihnout všechny podstatné terénní odchylky. Topografické údaje jsou v případě programu SYMOS'97 zadány pomocí výškopisu s určitým rozlišením (např. 50 m × 50 m). Po vygenerování sítě referenčních bodů lze těmto bodům automaticky přiřadit třetí souřadnici  $z_r$  právě z tohoto výškopisu. Soubory s výškopisy jsou standardně generovány z geografických informačních systémů (GIS) za pomoci nejrůznějších programů. Při výpočtu je třeba dbát na to, aby údaje o nadmořských výškách všech zdrojů i referenčních bodů byly odečteny ze stejného výškopisu [55].

Pro práci s výškopisy nebo sítě referenčních bodů je nutné si zvolit souřadnicový systém – těch existuje celá řada. Výběr souřadnicového systému závisí jak na dané aplikaci, tak preferenci samotného uživatele. Závazné geodetické systémy na území ČR jsou dány nařízením vlády č. 430/2006 Sb., o stanovení geodetických referenčních systémů a státních mapových děl závazných na území státu a zásadách jejich používání [58]. Mezi tyto vybrané souřadnicové systémy patří například Souřadnicový systém jednotné trigonometrické sítě katastrální (S-JTSK), označovaný také jako Křovákův, Evropský terestrický referenční systém (ETRS), Světový geodetický systém 1984 (WGS84) nebo Souřadnicový systém 1942 (S-42/83). Všechny tyto souřadnicové systémy jsou podporované v prohlížečích a stahovacích službách Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (ČÚZK) [59].

### 4.3 Alternativní disperzní modely

Pro potřeby zpracování této diplomové práce byl zvolen jeden z referenčních modelů pro ČR – SYMOS'97, který je v praxi běžně využíván a jehož licence je zakoupena na ÚPI FSI VUT v Brně. Disperzních modelů schopných řešit danou problematiku nicméně existuje nepřehledné množství, jen v databázi disperzních modelů European Topic Centre on Air and Climate Change (EIONET) jich bylo k říjnu 2017 evidováno 142 [60]. Tyto modely jsou zpravidla vyvíjeny univerzitami, či národními institucemi jako hydrometeorologické ústavy. S ohledem na uvedenou databázi disperzních modelů lze konstatovat, že prakticky každá ze zemí vyvíjí na národní úrovni nejméně jeden vlastní disperzní model, který je zpravidla zároveň i modelem referenčním pro danou zemi. V rámci teoretické části této diplomové práce byl zpracován přehled dvaceti disperzních modelů/komerčních programů potenciálně využitelných pro řešení problematiky šíření emisí na ÚPI FSI VUT v Brně. Ty byly zvoleny subjektivně, důraz byl při výběru kladen zejména na celosvětově nejrozšířenější zástupce a dále pak na modely/software využívané v sousedních státech a dalších členských zemích EU. Tento přehled byl zpracován jako sešit aplikace Microsoft Excel a je k této práci přiložen jako elektronická příloha (viz příloha F, `prehled_disperznich_modelu.xlsx`). Kompletní verze přehledu obsahuje jak základní informace o typu a původu modelů, tak licenční podmínky, ceny a dále stručnou charakteristiku jejich funkčnosti. Zkrácená verze tohoto přehledu je uvedena v příloze B, v tab. B.1.

## 5 Zařízení energetického využití odpadů (ZEVO)

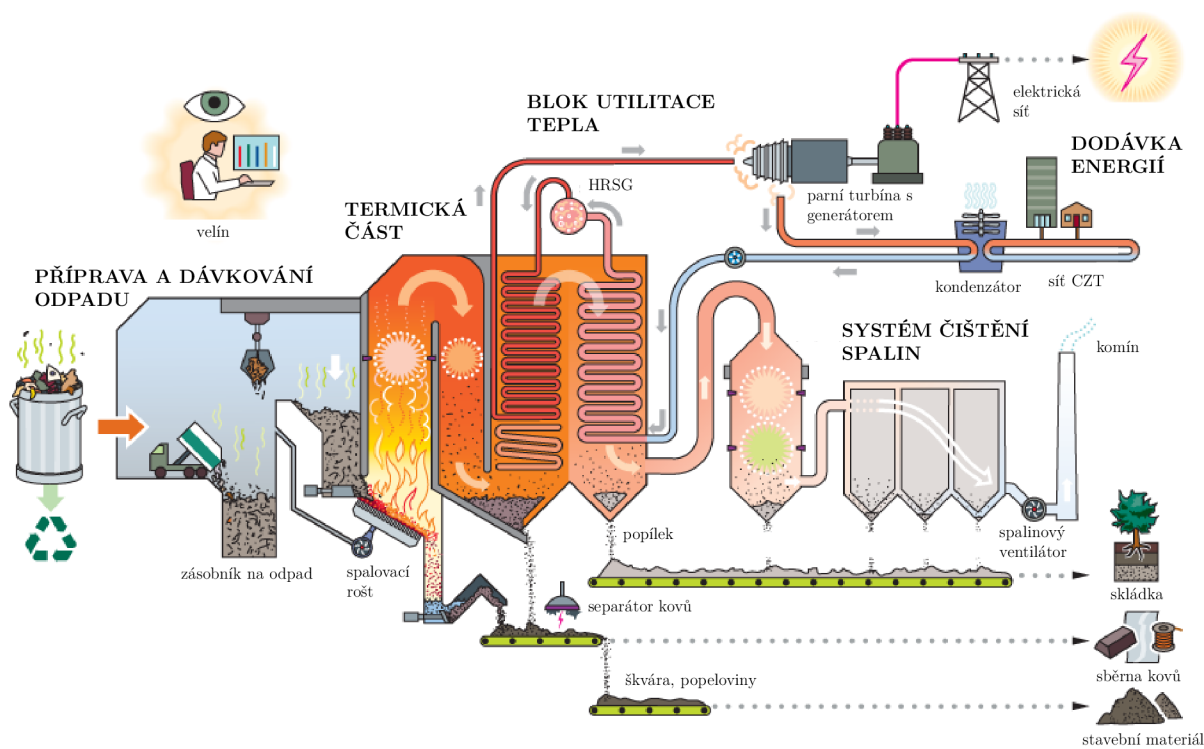
Jedním z běžných způsobů nakládání s odpadem je jeho termické zpracování. Toho je s výhodou využito v ZEVO, ve kterých je energie uvolněná při tomto procesu přeměněna na tepelnou a elektrickou energii. Odpad lze tedy v tomto případě považovat za cenovou surovinu, která je využívána jako zdroj energie. To, kdy je možné spalovnu odpadů klasifikovat jako zařízení EVO, je stanoveno zákonem o odpadech [62]. Jako rozhodující kritérium byla definována tzv. energetická účinnost R1 (angl. Energy Efficiency R1), která se vypočítá dle vztahu uvedeného v příloze č. 12 zákona o odpadech a která musí v případě zařízení EVO nabývat hodnoty vyšší než 0,65 [62]. Pokud tato podmínka splněna není, jde o způsob nakládání s odpady odstraňováním (skupina D10 – spalování na pevnině).

Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, EVO je jeden ze způsobů nakládání s odpady zohledněný v komplexní logistické úloze NERUDA. Svým charakterem je ZEVO stacionárním zdrojem emisí, a proto mu při hodnocení lokálního dopadu emisí na životní prostředí a lidské zdraví musí být věnována náležitá pozornost.

### 5.1 Popis technologie

Technologická koncepce ZEVO je na první pohled ve všech případech podobná, při bližším zkoumání se však mohou jednotlivé dílčí subsystémy a použité technologie významně lišit. S ohledem na cíle práce a její rozlišovací úroveň tento detail není řešen. Ke stručnému popisu běžného technologického uspořádání těchto zařízení je využito schéma na obr. 5.1. Zařízení EVO lze obecně rozdělit do čtyř základních technologických celků, a to část pro přípravu a dávkování odpadu, termickou část, blok utilizace uvolněného tepla a systém čištění spalin. Ty jsou zpravidla doplněny o další technologie, jako například zařízení pro zpracování tuhých a kapalných odpadních produktů (čistírna vody, separace kovů, atd.) a soubory měření a řízení procesů. Seznam nejlepších dostupných technologií, provozních podmínek a dalších doporučení, které jsou souhrnně pojmenovány jako tzv. Best Available Techniques (BAT), je prezentován v referenčním dokumentu Best Available Techniques Reference Document (BREF) vydávaném EU [10].

Vstupní surovinou je ve většině případů ZEVO SKO, což je zbytkový odpad, který zůstane po vytrídění všech využitelných frakcí KO. Ten je dle zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů (dále jen zákon o odpadech) [62] definován jako „*veškerý odpad vznikající na území obce při činnosti fyzických osob a který je uveden jako komunální odpad v Katalogu odpadů, s výjimkou odpadů vznikajících u právnických osob nebo fyzických osob oprávněných k podnikání.*“ Odpad je do ZEVO standardně dovážen pomocí nákladních automobilů a po zvážení ukládán do zásobníku na odpad. V tom je vstupní surovina důkladně promíchána a zároveň jsou odstraněny nadrozměrné kusy nevhodné pro spalování. V zásobníku je trvale udržován mírný podtlak, který zabraňuje úniku škodlivých emisí či nepříjemného zápachu do okolí. Homogenizovaný odpad je do termické části dopravován pomocí násypek, do kterých je odpad dávkován pomocí jeřábů s drapáky.



**Obrázek 5.1:** Vzorové schéma ZEVO. Převzato z [61] a upraveno.

Samotné spalování odpadu probíhá v kotli. Těch může být v závislosti na nominální kapacitě ZEVO instalováno hned několik. Oxidační reakce hoření odpadu probíhající za přebytku vzduchu je svým charakterem silně exotermní a je doprovázena uvolněním tepelné energie. Při spalovacím procesu je nezbytné dosáhnout teploty minimálně 850 °C, která spolu s dostatečným setrváním odpadu ve spalovacím prostoru zajistí podmínky vhodné pro samotnou oxidační reakci a termický rozklad většiny škodlivých látek (viz podkap. 1.2).

Uvolněná tepelná energie ve spalinách je ve většině ZEVO využívána v kotli na odpadní teplo (angl. Heat Recovery Steam Generator (HRSG)). V tom je běžně vyráběna přehřátá pára, přičemž dle [10] se její typické parametry pohybují v rozmezí tlaku 4–4,5 MPa a teploty 380–420 °C. Generovaná pára je následně využita k produkci tepelné a/nebo elektrické energie. Vliv využití zvýšených parametrů vyráběné páry na produkovanou energii byl diskutován v [63]. Dle charakteru produkce energie lze zařízení ZEVO rozdělit do tří skupin, a to orientované na výrobu elektřiny, na výrobu tepla nebo kombinovanou výrobu elektřiny a tepla (KVET). Zvolená orientace pak ovlivňuje uspořádání a výběr technologie části spalovny spojené s produkcí energie. Přehřátá pára je odváděna na turbínu sloužící k výrobě elektrické energie. Běžně jsou zastoupeny dva druhy turbín, a to protitlaká nebo kondenzační odběrová turbína. Expandovaná pára je v případě první z nich odebírána za turbínou, v případě kondenzační odběrové turbíny v odběru a běžně je dále využita k dodávce tepla do sítě centrálního zásobování teplem (CZT).

Posledním z významných technologických celků ZEVO je systém čištění spalin. Ten zaručuje efektivní odstranění naprosté většiny škodlivých látek obsažených ve spalinách

vznikajících při procesu hoření odpadu. Přehled znečišťujících látek spojených s procesem termického zpracování odpadu byl uveden v tab. 1.2. Samotný systém je standardně navrhován v několika stupních, instalovaných v různých částech ZEVO. Konkrétní podoba instalovaných technologií je specifikum jednotlivých zařízení. Dle BREF [10] jsou jednotky systému čištění spalin rozděleny do následujících skupin:

- k odstranění emisí PM, kovů a metaloidů,
- kyselých složek spalin HCl, HF, SO<sub>2</sub>,
- sloučenin dusíku NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> a CO,
- organických sloučenin,
- POPs a
- rtuti.

Vyčištěné spaliny jsou odváděny komínem do ovzduší. Hladiny jednotlivých znečišťujících látek jsou pravidelně monitorovány tak (velká část kontinuálně), aby ZEVO plnilo předepsané emisní limity. Na základě naměřených hodnot jsou pomocí řídicích systémů dávkovány chemikálie používané v systému čištění spalin, případně jsou upravovány jednotlivé provozní podmínky.

Výše uvedený text uvádí pouze velmi stručný přehled technologie ZEVO, podrobný popis těchto zařízení není s ohledem na cíle práce uveden. Detailní informace o technologiích ZEVO lze nalézt například v [64] nebo v již zmíněném dokumentu BREF [10].

## 5.2 ZEVO v ČR

Nakládání s odpady pomocí termického zpracování má v ČR dlouhou historii. Již v roce 1904 byla v Brně započata výstavba první ze spaloven odpadů v tehdejší Rakousku-Uhersku. Jednalo se přitom o jednu z prvních moderních spaloven v Evropě [65]. V současnosti však ČR, v porovnání s většinou zemí západní části Evropy, v nakládání s SKO pomocí jeho termického zpracování spíše zaostává a většina tohoto druhu odpadu je skládkována [66]. Této situaci nenahrává ani fakt, že EVO je v současnosti ekonomicky horší variantou právě k levnější alternativě skládkování. Další důvod lze hledat v již zmíněném odporu veřejnosti při plánování projektů výstavby nových ZEVO. Situace by se nicméně v budoucnosti mohla změnit, nasvědčuje tomu například novela zákona o odpadech z počátku roku 2018 [62], která mimo jiné stanovuje to, jaký odpad nebude možné od roku 2024 ukládat na skládky. Nadějně jsou v tomto ohledu i plány odpadového hospodářství jednotlivých krajů ČR, které zmiňují možná umístění nových ZEVO [3].

V současnosti jsou na území ČR v provozu čtyři ZEVO pro zpracování SKO. Jejich přehled a základní informace o nich jsou shrnuty v tab. 5.1. V celkovém součtu by tato zařízení měla dodat ročně do sítě přibližně 3100 TJ tepelné energie a 165 GWh energie elektrické. Nejstarší spalovnou je ta v Brně, kapacitně největší pak ZEVO Malešice zpracovávající SKO zejména z hlavního města Prahy. V ČR je kromě zmíněných ZEVO i řada

kapacitně menších spaloven, které zpracovávají průmyslový a zdravotnický odpad. V současnosti je projednáván záměr ZEVO Mělník, jehož navrhovaná kapacita je  $320 \text{ kt} \cdot \text{r}^{-1}$ . V souvislosti s projektem byl zahájen proces EIA, který je momentálně ve stavu veřejného projednání [67].

**Tabulka 5.1:** Přehled ZEVO zpracovávajících SKO na území ČR.

název	ZEVO Malešice	ZEVO Brno	ZEVO Liberec	ZEVO Chotíkov
provozovatel	Pražské služby, a.s.	SAKO Brno, a.s.	TERMIZO a.s.	Plzeňská teplárenská, a.s.
umístění	hlavní město Praha	Brno, Jihomoravský	Liberec, Liberecký	Chotíkov, Plzeňský
rok	1999	1989	1999	2016
nominální kapacita [ $\text{kt} \cdot \text{r}^{-1}$ ]	330	248	96	95
dodané teplo [ $\text{TJ}$ ] <sup>1</sup>	1000	1000	700	400
dodaná elektřina [ $\text{GWh}$ ] <sup>1</sup>	70	46	13	36
systém čištění spalin				
1	SNCR	SNCR	SNCR	rozprašovací sušárna
2	elektrostatický odlučovač	aktivní uhlí	elektrostatický odlučovač	tkaninový filtr
3	DeNO <sub>x</sub> /DeDiox	polosuchá vypírka	REMEDIA D/F <sup>TM</sup>	dvoustupňová pračka
4	mokrý vypírka	textilní filtr	mokrý vypírka	DeNO <sub>x</sub> /DeDiox (SCR)
zdroje	[3]	[68], [65]	[69]	[70]

<sup>1</sup> Jedná se o přibližné hodnoty dodávaného množství za rok.



### 5.3 Modelový zdroj ZEVO

Pro praktickou část této práce a výpočet pomocí zvoleného disperzního modelu bylo nutné sestavit modelový stacionární bodový zdroj. V tomto případě vycházely požadavky na složitost takového modelu a parametry, které bylo nezbytné určit, z náročnosti zvoleného disperzního modelu na vstupní data. O těch již bylo pojednáno dříve v podkap. 4.2, jejich přehled byl uveden v tab. 4.1. S ohledem na to, že návrh technologického schématu modelové spalovny potřebný k rigoróznímu určení těchto parametrů by výrazně přesahoval cíle této práce, byl modelový zdroj částečně sestaven na základě provozních a konstrukčních dat reálného ZEVO v ČR.

Nominální kapacita modelové spalovny byla stanovena na  $100 \text{ kt} \cdot \text{r}^{-1}$  (dále v textu označována pouze jako modelová spalovna 100 kt). Tato hodnota byla zvolena ze dvou hlavních důvodů. Prvním z nich bylo to, že se jedná o kapacitu dvou ze čtyř ZEVO v ČR (viz tab. 5.1). Druhým pak to, že jednotlivé linky (kotle) jsou obvykle dimenzovány právě na tuto kapacitu. Vzhledem k téměř totožné zpracovatelské kapacitě byla jako vzor pro modelový zdroj vybrána spalovna v Liberci, kterou provozuje společnost TERMIZO a.s. Další důvody pro výběr právě tohoto ZEVO byly následující. Liberecká spalovna je moderní spalovnou odpadů, využívající prověřené technologie BAT a disponující efektivním systémem čištění spalin, který zaručuje to, že všechny z vypouštěných znečišťujících látek plní s často vysokou rezervou předepsané emisní limity. Provoz spalovny je navíc dlouhodobě stabilní a výdělečný [71]. V tab. 5.2 jsou shrnuty všechny navržené parametry modelové spalovny.

**Tabulka 5.2:** Navržené parametry modelové spalovny 100 kt.

název veličiny	značení	jednotka	hodnota	poznámka/zdroj
nominální kapacita	k	$[\text{kt} \cdot \text{r}^{-1}]$	100	zvoleno
poloha zdroje	$x_z$	[m]	-536234	S-JTSK
	$y_z$	[m]	-1139563	(East North)
nadmořská výška terénu v místě zdroje	$z_z$	[m]	206,84 <sup>1</sup>	dopočtem z výškopisu
výška koruny komína	$H$	[m]	88	dle Termizo a.s. [71]
relativní roční využití	$\alpha$	[%]	0,929	dle Termizo a.s. [71]
denní využití zdroje	$P_d$	$[\text{h} \cdot \text{d}^{-1}]$	22,3	dle Termizo a.s. [71]
objemový tok spalin za NP	$V_s$	$[\text{m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	17,73	dle Termizo a.s. [71]
teplota spalin	$t_s$	[°C]	60	dle Termizo a.s. [71]
vnitřní průměr komína	$D_v$	[m]	1,66	dopočtem
výstupní rychlost spalin	$w_0$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	10	zvoleno
množství znečišťující látky	$M$	$[\text{g} \cdot \text{s}^{-1}]$	tab. 5.3	dle Termizo a.s. [71]

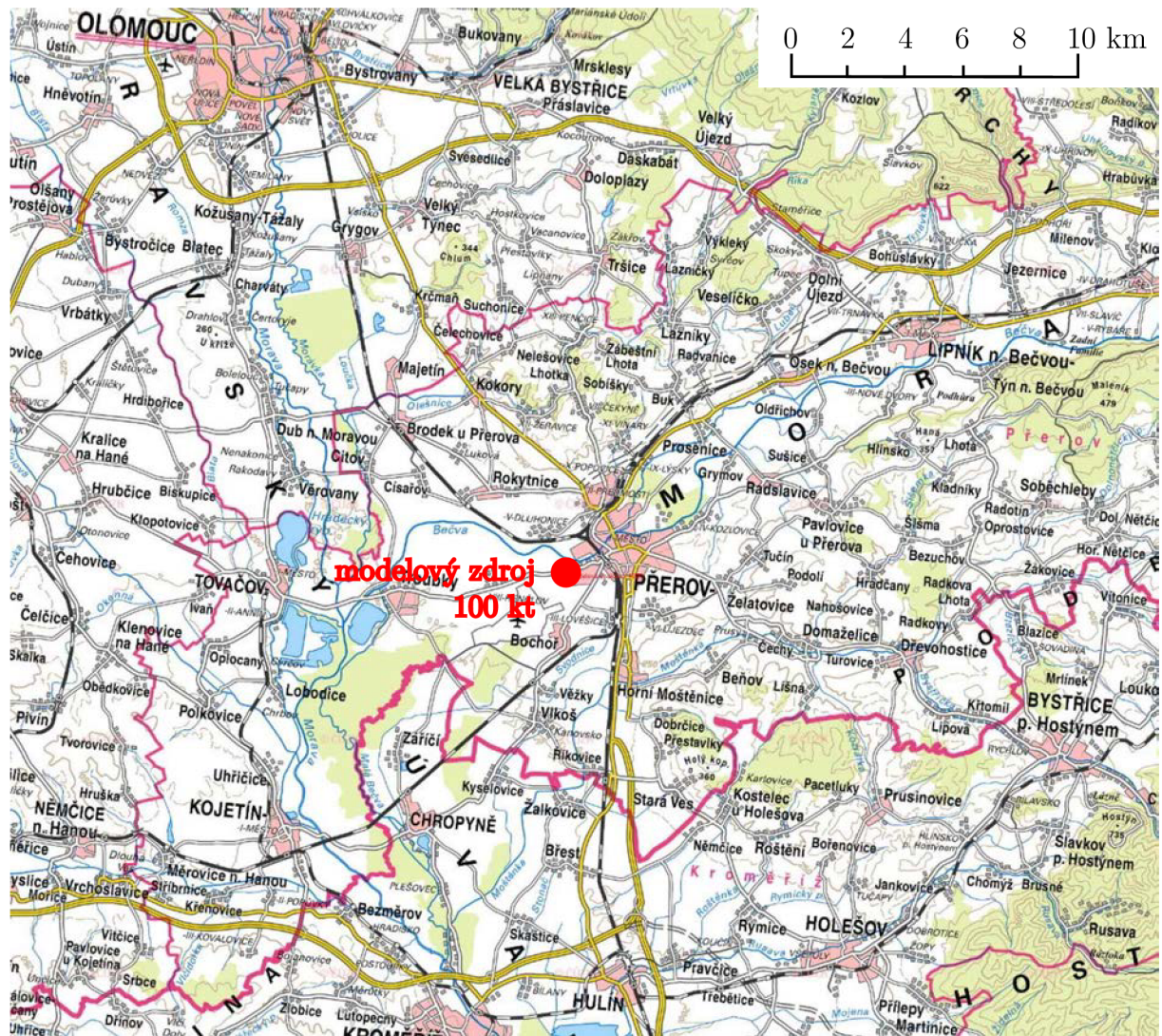
<sup>1</sup> Nadmořská výška terénu v místě zdroje byla určena automatickým dopočtem ze zadaného výškopisu.

Umístění spalovny bylo zvoleno v Olomouckém kraji, v blízkosti teplárny města Přerov, o kterém se dlouhodobě uvažuje jako o možné lokalitě pro výstavbu zařízení pro termické zpracování odpadů [73]. Tato lokalita se jeví vhodná i vzhledem k možnosti napojení na síť CZT. Na obr. 5.2 lze vidět zákres navržené polohy modelového zdroje do podkladové topografické mapy, v příloze C na obr. C.1 je pak zákres proveden do podkladové orthofotomapy. Souřadnice zdroje v souřadnicovém systému S-JTSK (East North) odpovídající této poloze jsou uvedeny rovněž v tab. 5.2. Parametry týkající se vypouštěných spalin a komína spalovny, tedy výška koruny komína  $H$ , objemový tok spalin  $V_s$ , teplota spalin  $t_s$ , výstupní rychlost spalin  $w_0$  a vnitřní průměr komína  $D_v$ , byly určeny s ohledem na reálné konstrukční a provozní hodnoty liberecké spalovny a instalovanou technologii čištění spalin. Údaje o provozu spalovny, tedy relativní roční využití zdroje  $\alpha$  a denní využití zdroje  $P_d$ , byly určeny průměrem z údajů o ročním provozu liberecké spalovny mezi lety 2013–2017. Obdobným způsobem byly stanoveny hodnoty vypouštěných emisí, které jsou uvedeny v tab. 5.3. Součástí této tabulky je také srovnání hodnot vypouštěných emisí s příslušnými legislativními emisními limity (tab. A.4 a A.5 přílohy A). Z uvedených hodnot plnění emisního limitu lze názorně vidět, že systém čištění spalin je opravdu účinný a technologie spalovny vhodně nastavena. Informace o instalované technologii, provozních datech a vypouštěných emisích byly čerpány z webových stránek věnovaných spalovně [69] a ročních zpráv o provozu spalovny [71].

**Tabulka 5.3:** Emise vypouštěné z modelové spalovny 100 kt.

veličina	jednotka	hodnota (dle Termizo a.s. [71])	emisní limit [24]	plnění emisního limitu [%]
SO <sub>2</sub>	[mg · m <sup>-3</sup> ]	2,350	50 <sup>1</sup>	<b>4,70</b>
NO <sub>x</sub> jako NO <sub>2</sub>	[mg · m <sup>-3</sup> ]	142,600	200 <sup>1</sup>	<b>71,30</b>
TZL (PM <sub>10</sub> )	[mg · m <sup>-3</sup> ]	0,110	10 <sup>1</sup>	<b>1,10</b>
TOC	[mg · m <sup>-3</sup> ]	0,050	10 <sup>1</sup>	<b>0,50</b>
HCl	[mg · m <sup>-3</sup> ]	0,020	10 <sup>1</sup>	<b>0,20</b>
HF	[mg · m <sup>-3</sup> ]	0,309	1 <sup>1</sup>	<b>30,90</b>
CO	[mg · m <sup>-3</sup> ]	10,80	50 <sup>1</sup>	<b>21,60</b>
Hg	[mg · m <sup>-3</sup> ]	0,007	0,05	<b>14,50</b>
Cd+Tl	[mg · m <sup>-3</sup> ]	0,004	0,05	<b>8,90</b>
Sb+As+Pb+Cr+ Co+Cu+Ni+Mn+V	[mg · m <sup>-3</sup> ]	0,056	0,5	<b>11,20</b>
PCDD/F	[ng <sub>TEQ</sub> · m <sup>-3</sup> ]	0,035	0,1	<b>35,00</b>

<sup>1</sup> Jedná se o emisní limit půlhodinového průměru na hladině spolehlivosti 97 %.



Obrázek 5.2: Zvolené umístění modelového zdroje zakreslené na podkladu topografické mapy. Mapové podklady dostupné z [72].

## 6 Výpočtová část

Praktická část této diplomové práce je zaměřena na práci s disperzním modelem SYMOS'97 a jeho konkrétní aplikaci při modelování šíření znečištění ze stacionárního bodového zdroje. V tomto případě je bodovým stacionárním zdrojem modelový zdroj ZEVO, který byl definován v předchozí kapitole. Cíle výpočtové části jsou následující:

### 1. Sestavení a provedení modelového výpočtu

Jedním z cílů předložené práce je volba vhodného modelovacího prostředí a zvládnutí základů práce v něm. Splnění tohoto cíle diplomové práce je demonstrováno provedením výpočtu šíření znečištění z modelového zdroje ZEVO a následným zpracováním výsledků. Ty byly dále podrobeny analýze – konkrétně byl vyhodnocen vývoj imisního znečištění s rostoucí vzdáleností od zdroje, vypočtené imisní koncentrace byly srovnány s příslušnými legislativními imisními limity a byl také zhodnocen vliv příspěvků imisních koncentrací od ZEVO na stávající úroveň znečištění v zájmové oblasti. Modelový výpočet je popsán v podkap. 6.1.

### 2. Analýza vlivu vybraných parametrů na výpočet

Dalším z cílů praktické části této práce je analyzovat vliv vybraných parametrů zdroje, meteorologických podmínek a geografických poměrů na výsledky obdržené výpočtem pomocí zvoleného disperzního modelu. Toho bylo docíleno v podkap. 6.2. Konkrétně byl vyšetřen vliv větrné růžice, která udává rozptylové podmínky, dále vliv terénu a kapacity modelového zdroje ZEVO. Volba těchto tří parametrů vycházela z dalšího z cílů práce (bodů 3), uvedeného níže.

### 3. Zhodnocení použitelnosti disperzních modelů pro přípravu dat pro komplexní logistické úlohy (např. NERUDA)

Zhodnocení možností implementace nástrojů disperzního modelování, resp. použitého softwaru, do řešení komplexních logistických úloh patří mezi fundamentální cíle této práce. V případě úlohy řešené systémem NERUDA hraje mimo jiné podstatnou roli parametr kapacita ZEVO. Dále je kladen důraz na to, aby byl výpočet co nejefektivnější, čehož lze dosáhnout např. zavedením správné míry zjednodušení při zadávání jednotlivých vstupů. K tomuto zhodnocení, které je uvedeno v podkap. 6.3, bylo tedy s výhodou možné použít právě výsledky a dílčí závěry z bodů 1 a 2.

## 6.1 Modelový výpočet

V následující podkapitole je detailně popsán postup sestavení výpočtu v prostředí programu SYMOS'97 a zvolený způsob zpracování získaných výsledků. Dále je okomentována volba jednotlivých nastavení výpočtu a všechna přijatá zjednodušení. V neposlední řadě jsou uvedena konkrétní data použitá pro výpočet.

### 6.1.1 Vstupní data a jejich sběr

Prvním krokem výpočtu byl sběr vstupních dat a jejich zadání do programu SYMOS'97. V tom je celý výpočet koncipován jako projekt rozdělený dle povahy zadávaných vstupních dat do několika dílčích částí. Uspořádání dalšího textu kopíruje strukturu takového projektu, kterou lze názorně vidět na obr. 6.1 v levé části. Kapitola je dále vystavěna na teoretických základech položených v podkap. 4.2. V té byl kladen důraz na obecnou charakteristiku a význam jednotlivých vstupních dat a byly v ní uvedeny zdroje, ze kterých jsou vstupní data běžně čerpána.

#### Popis projektu

Úvodním krokem projektu je zadání dat informativního charakteru – název projektu, jeho popis a jméno autora. Důležité je dále indikovat souřadnicový systém, který je při výpočtu použit. V tomto případě padla volba na Křovákův souřadnicový systém S-JTSK (East North), v němž kladné hodnoty X narůstají směrem východním a kladné hodnoty osy Y směrem severním, a je tedy v souladu s definicí směru větru v metodice. Pro zaručení správnosti výsledků je nutné zadávat všechny další geografické údaje v projektu právě v těchto souřadnicích.

SYMOS97 verze 2013 - [E:\Documents\FSI VUT\2017-2018\Diplomová práce\10-SYMOS\02-vypocty\2018.04.30 Modelový výpočet\2018-04-30 Modelovy\_vypocet.s97]

Soubor Nástroje Nápožďla

Popis projektu

Větrné růžice

Seznam větrných růžic

Počet směrů	Popis
8	WR Rovnoměrná
8	WR 31

Hodnoty četnosti výskytu větru - větrná růžice [%]

Směr větru:	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	CALM	Součet
<b>I. třída stability - velmi stabilní</b>										
1,70 m/s	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,8	8,48
5,00 m/s	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11,00 m/s	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>II. třída stability - stabilní</b>										
1,70 m/s	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,76	7,48
5,00 m/s	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	0	11,52
11,00 m/s	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>III. třída stability - izotermní</b>										
1,70 m/s	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	0,88	10,48
5,00 m/s	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	0	13,44
11,00 m/s	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>IV. třída stability - normální</b>										
1,70 m/s	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0	7,68
5,00 m/s	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	0,88	10,48
11,00 m/s	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	0	13,44
<b>V. třída stability - konvektivní</b>										
1,70 m/s	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0	7,68
5,00 m/s	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,68	5,48
11,00 m/s	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0	3,84
<b>Celková růžice</b>										
1,70 m/s	4,92	4,92	4,92	4,92	4,92	4,92	4,92	4,92	2,44	41,8
5,00 m/s	4,92	4,92	4,92	4,92	4,92	4,92	4,92	4,92	1,56	40,92
11,00 m/s	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	0	17,28
součet	12	12	12	12	12	12	12	12	4	100

Připraven

Obrázek 6.1: Grafické prostředí použitého programu SYMOS'97. V levé části lze vidět strukturu standardního projektu.

## Výškopisy

Dalším z kroků je definice výškopisu. Při výpočtu byl použit kompletní výškopis ČR, definovaný ve výše uvedeném souřadnicovém systému v rastru  $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ , který byl vyhotoven na základě veřejných dat získaných při výškovém mapování Země raketoplánem Endeavour v roce 2000. Samotné údaje o výškách byly do projektu načteny z externího datového binárního souboru (`.bin`), který je poskytován společně s licenci k použitému softwaru. Rastr výškopisu, který obsahuje celkově 74385090 výšek, je pro rozlišovací úroveň této práce dostačující.

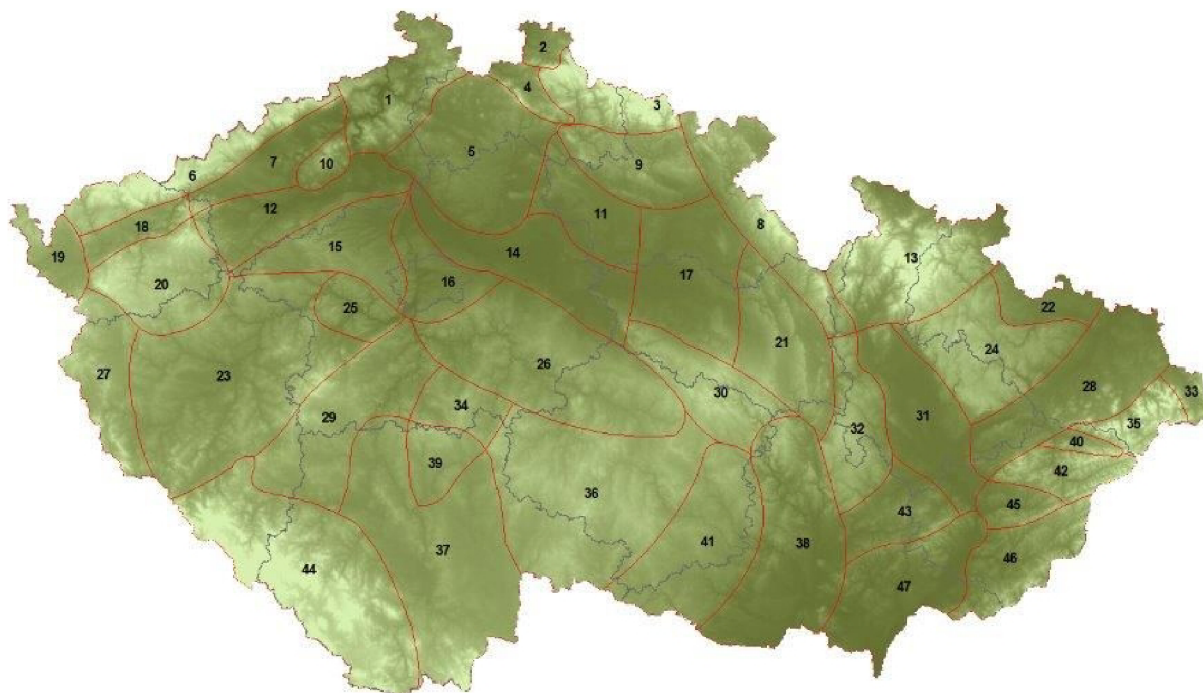
## Větrné růžice

Pro výpočet byla použita standardní větrná růžice rozlišená dle tříd rychlosti větru a teplotní stability atmosféry podle Bubníka a Koldovského, charakterizující hodnoty četnosti výskytu větru v osmi základních směrech. Území ČR lze dle vlivu povětrnostních podmínek rozdělit na 47 oblastí, viz obr. 6.2, přičemž každá z těchto oblastí je charakterizována příslušnou větrnou růžicí [74]. Dle zvoleného umístění spadá modelová spalovna do oblasti vlivu charakterizovaného větrnou růžicí 31 (v textu dále označenou jako WR31). Je nutné zdůraznit, že pro detailní výpočty a obzvláště předmětné lokality se složitým terénním profilem je nutné pro výpočet použít větrné růžice úzce specifikované pro danou oblast. S ohledem na rozlišovací úroveň této práce a na to, že terén v okolí modelového zdroje je rovinnatého charakteru, lze však pokládat uvedenou větrnou růžici za dostatečně reprezentativní.

Součástí přílohy D je grafická interpretace příslušné růžice z hlediska jak stabilitních tříd (obr. D.1a), tak rychlostí větru (obr. D.1b) a dále tabelární vyjádření růžice s jednotlivými hodnotami četností kombinací stabilitních tříd a rychlostí (tab. D.1). Větrná růžice byla sestavena na základě dat z let 2008-2012.

## Veličiny

V další kartě projektu je nutno definovat znečišťující látky, jejichž imisní koncentrace budou při výpočtu počítány. Při jejich zadávání lze vybrat ze tří typů znečišťujících látek, a to plyn, prach nebo oxidy dusíku  $\text{NO}_x$ . Každá z těchto veličin je určena základními vlastnostmi konkretizujícími název, zkratku, přiřazenou větrnou růžici, případně koncentraci pro výpočet doby překročení (imisní limit) a dále speciálními vlastnostmi, které se různí v závislosti na typu veličiny. Z hlediska množství generovaných výstupů a zachování přehlednosti práce byl výpočet proveden pro dvě veličiny – oxidy dusíku  $\text{NO}_x$  a  $\text{PM}_{10}$ . V tab. 6.1 je uvedeno zadané nastavení základních i speciálních vlastností obou veličin. Výpočet doby překročení není pro tento výpočet žádaným výstupem, a proto nebylo nutné zadávat hodnoty imisních limitů. Jak již bylo nastíněno v podkap. 4.2, výpočet rozptylu částic  $\text{PM}_{10}$  a menších se dle metodiky [53] z důvodu jejich zanedbatelné sedimentační rychlosti zadává jako výpočet veličiny typu plyn. Dále se předpokládá, že definované modelové ZEVO vypouští emise tuhých částic frakce  $\text{PM}_{10}$ .



**Obrázek 6.2:** Klasifikace území ČR dle vlivu povětrnostních podmínek [74].

**Tabulka 6.1:** Seznam veličin zadaných do výpočtu.

typ	zkratka	větrná růžice	krok výpočtu [°]	doba setrvání v atmosféře
NO <sub>x</sub>	NO <sub>2</sub>	WR31	1	6 dní
plyn	PM <sub>10</sub>	WR31	1	6 dní

## Zdroje

Dalším krokem je definice zdrojů znečištění. Výběr je možný ze tří typů zdrojů, a to bodového, liniového a plošného. Modelový zdroj ZEVO, který byl podrobně popsán v podkapitole 5.3, je svým charakterem zdroj bodový. Do výpočtu jsou zadávány jednak údaje charakterizující základní a specifické vlastnosti bodového zdroje, korespondující s parametry v tab. 5.2, tak údaje o množství vypouštěných veličin v  $[g \cdot s^{-1}]$  definovaných v předchozím kroku. Zadaná množství vypouštěných znečišťujících látek jsou uvedena v tab. C.1 přílohy C.

S výpočtem veličiny NO<sub>x</sub> se pojí určitá specifika. Disperzní model SYMOS'97 umožňuje částečně zahrnout vliv transformace NO na NO<sub>2</sub> v atmosféře – při výpočtu je tedy za účelem obdržení přesnějšího výsledku možné specifikovat poměry těchto sloučenin v celkovém NO<sub>x</sub>. Dle [10] a [39] je typickým podílem pro ZEVO 95 % NO vůči 5 % NO<sub>2</sub>, a proto byl takový poměr zadán i při tomto výpočtu. Emise oxidů dusíku, resp. NO jsou navíc běžně (včetně legislativních emisních limitů) vyjadřovány v ekvivalentu NO<sub>2</sub>, obdobně je tomu i v tomto případě. NO se jako ekvivalent NO<sub>2</sub> určí podle vztahu:

$$NO_{2, \text{ ekv.}} = NO_{\text{sku}} \frac{M_{NO_2}}{M_{NO}},$$

kde

$NO_{2, \text{ ekv.}}$  množství NO v ekvivalentu  $NO_2$ ,

$NO_{\text{sku}}$  množství NO,

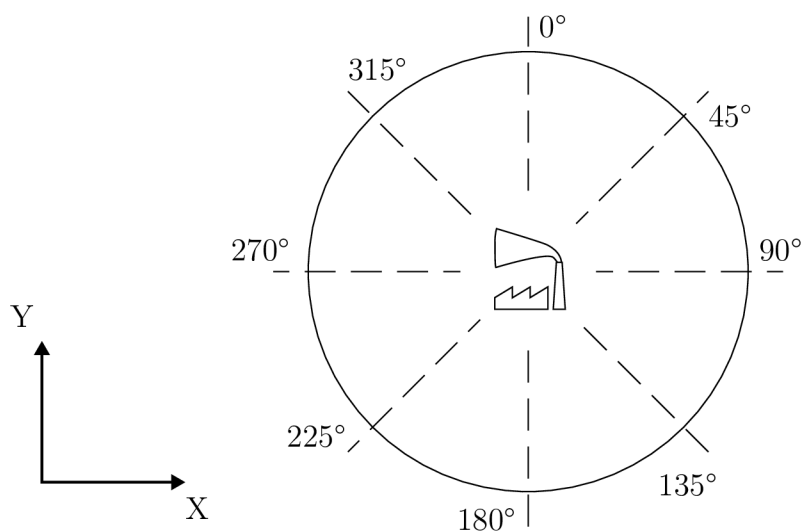
$M_{NO_2}$  molární hmotnost  $NO_2$ ,

$M_{NO}$  molární hmotnost NO.

Dále v textu, pokud není jinak specifikováno, je pracováno právě s tímto ekvivalentem.

### Referenční body

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, jedním z hlavních cílů tohoto modelového výpočtu je získat představu o vývoji imisních koncentrací s rostoucí vzdáleností od ZEVO. Vhodným způsobem, jak tuto závislost vyšetřit, je vypočítat hodnoty imisních koncentrací v referenčních bodech definovaných v libovolném směru a ty poté vynést v závislosti na vzdálenosti od zdroje znečištění. Jelikož je při výpočtu používána standardní větrná růžice, která je definovaná pro základních osm směrů (viz podkap. 4.2), byly imisní koncentrace vyšetřovány právě v těchto osmi směrech. Na obr. 6.3 jsou tyto směry vyznačeny ve vztahu k uvažovanému bodovému zdroji znečištění a zvolenému souřadnicovému systému.



**Obrázek 6.3:** Osm základních směrů, ve kterých byly zjišťovány imisní koncentrace. Vyznačený osový kříž indikuje použitý souřadnicový systém.

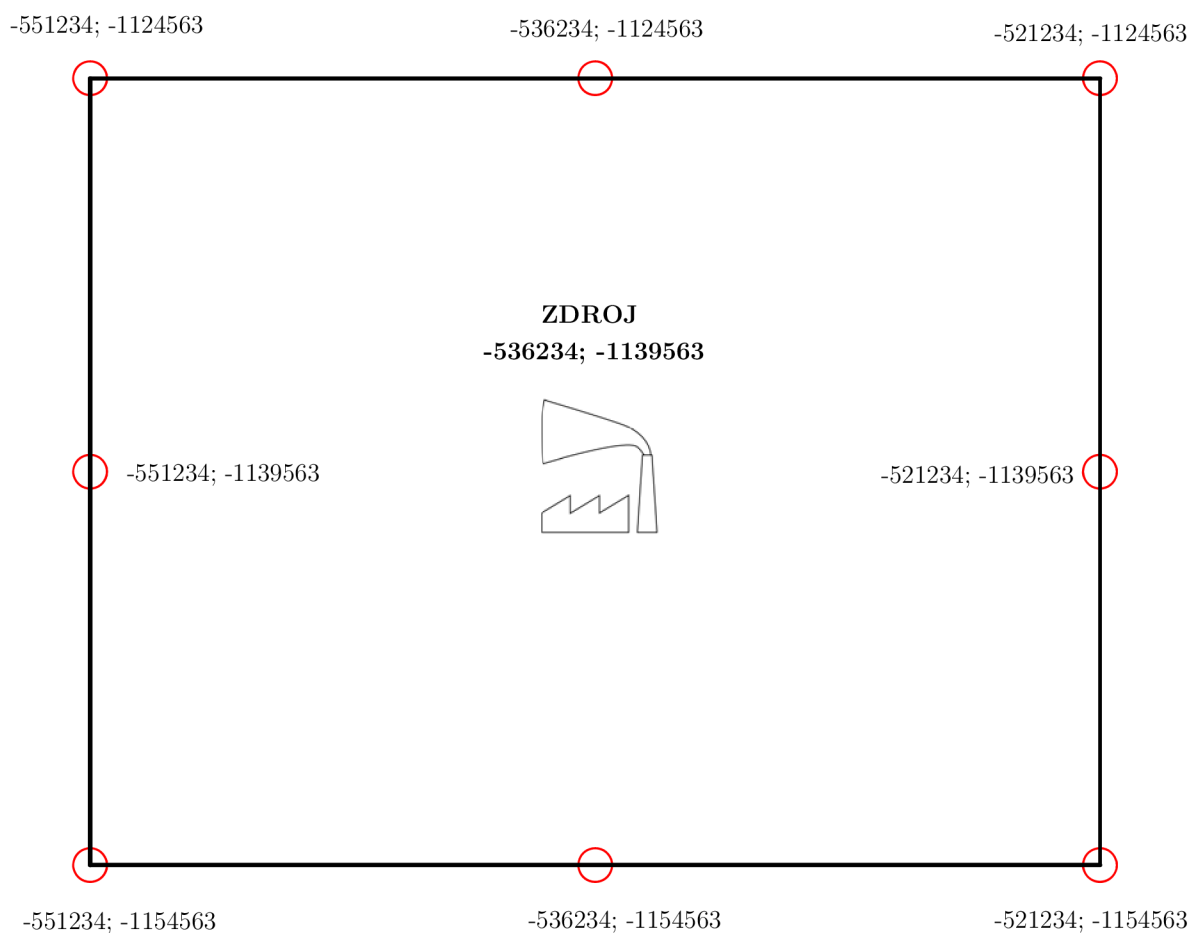
Referenční body, ve kterých jsou imisní koncentrace počítány, jsou určeny třemi souřadnicemi v prostoru. Pro účely uživatelsky přívětivého a přehledného generování sítě referenčních bodů byl vytvořen sešit aplikace Microsoft Excel s makry s názvem `data_vypocet.xlsx`, který je přiložen jako elektronická příloha F této práce. Součástí



tohoto sešitu je makro `GenerovaniSouradnic` naprogramované v jazyce Visual Basic for Applications (VBA), umožňující následující:

- na základě souřadnic  $x_z, y_z$  určujících polohu bodového zdroje, požadovaného počtu referenčních bodů, vzájemné vzdálenosti těchto bodů v [m] a zadané výpočtové výšce v [m] generovat jednotlivé referenční body čtvercové sítě v osmi základních směrech,
- zobrazit rozsah zájmové oblasti v kontextu umístění zdroje, tak jako na obr. 6.4,
- exportovat údaje o referenčních bodech do souboru v datovém formátu Comma-separated Values (.csv).

### Rozsah souřadnic



**Obrázek 6.4:** Zájmová oblast s vyznačenou polohou zdroje.

Při tomto výpočtu bylo v každém ze směrů vygenerováno 300 bodů v rastru čtvercové sítě 50 m. Ve směrech  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  a  $270^\circ$  jsou tedy imisní koncentrace vyšetřovány do vzdálenosti 15 km od zdroje znečištění, v ostatních směrech do vzdálenosti přibližně 21,2 km.

Výpočtová výška byla ve všech referenčních bodech stanovena na 1,5 m nad terénem, což přibližně odpovídá výšce dýchací zóny.

Makrem vygenerovaný datový soubor se souřadnicemi referenčních bodů lze snadno načíst do programu SYMOS'97, podobně jako v případě výškopisu. Posledním nezbytným krokem je určení třetí ze souřadnic referenčních bodů – výškové souřadnice  $z_r$ . K tomu lze využít funkci programu, která automaticky doplní výšky terénu v jednotlivých referenčních bodech z načteného výškopisu. Na obr. 6.5 jsou všechny vygenerované referenční body zobrazeny v topografické mapě. Krajiní referenční body v každém ze směrů mají souřadnice stejné jako na obr. 6.4 a zároveň tak udávají hraniční body zájmové oblasti, ve které jsou imisní koncentrace vyšetřovány. Na obr. D.2 přílohy D jsou referenční body vyznačeny v podkladové orthofoto mapě.

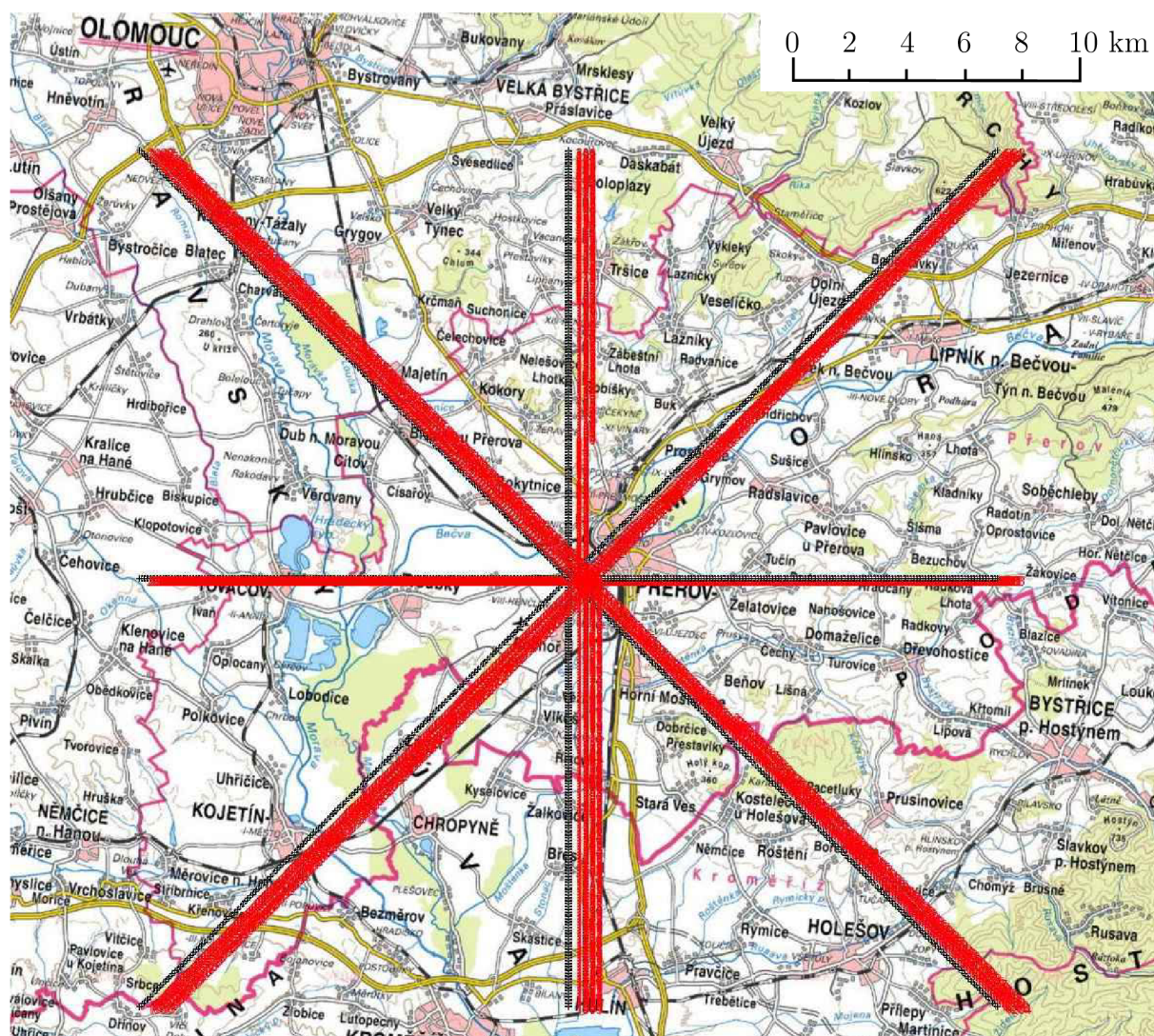
## Mapa

Do projektu lze nahrát podkladovou mapu, ve které lze zobrazit například polohu zdroje nebo referenčních bodů. Kromě toho může být tato mapa využita ke generování kartografických výstupů výpočtu, potřebných při zpracování rozptylových studií (viz podkap. 2.3). Pro potřeby tohoto modelového výpočtu byly použity podkladové mapy topografická a orthofoto. V nich byly zobrazena poloha zdroje i referenčních bodů, viz obr. 5.2, 6.5, C.1 a D.2.

### 6.1.2 Nastavení výpočtu

Po zadání nezbytných vstupních dat je možné přistoupit k nastavení výpočtu. Nejdůležitějším nastavením je v tomto případě to, jaké imisní koncentrace (denní maximální, průměrné roční nebo maximální) mají být počítány. V tomto případě jde o to zjistit průměrné roční imisní koncentrace. Dále je možné specifikovat dodatečná nastavení. Vzdálenost vnitřních bodů výškopisu by měla odpovídat rozlišení použitého výškopisu, nastavena tedy byla na 50 m. Natočení větrné růžice zlepšuje orientaci větrné růžice v použitém souřadnicovém systému, přičemž hodnoty tohoto natočení ve stupních se liší dle polohy zdroje a lze je odečíst z mapy dostupné z [75]. Vzhledem k poloze zdroje byla nastavena hodnota  $5,7^\circ$ . Způsob stanovení výšky bodu z výškopisu byl zvolen interpolací, což znamená, že jsou výšky jednotlivých bodů určovány interpolací z výšek okolí bodu. Tento způsob určování je sice výpočtově náročnější, vzhledem k nízkému počtu referenčních bodů je však vliv tohoto nastavení z hlediska výpočtového času zanedbatelný. Poslední z nastavených voleb byla přepočítání koeficientů TDZ, která zajistí přepočítání koeficientů použitých při výpočtu pro každou kombinaci referenční bod a zdroj znečištění.

Po spuštění výpočtu jsou pro zvolené veličiny vypočítány v určených referenčních bodech požadované roční průměrné imisní koncentrace. Výsledky jsou nativně ukládány ve formátu XML, který však lze snadno převést pomocí šablon do libovolných formátů datových souborů. V tomto případě byl zvolen nativní formát aplikace Microsoft Excel (.xls).



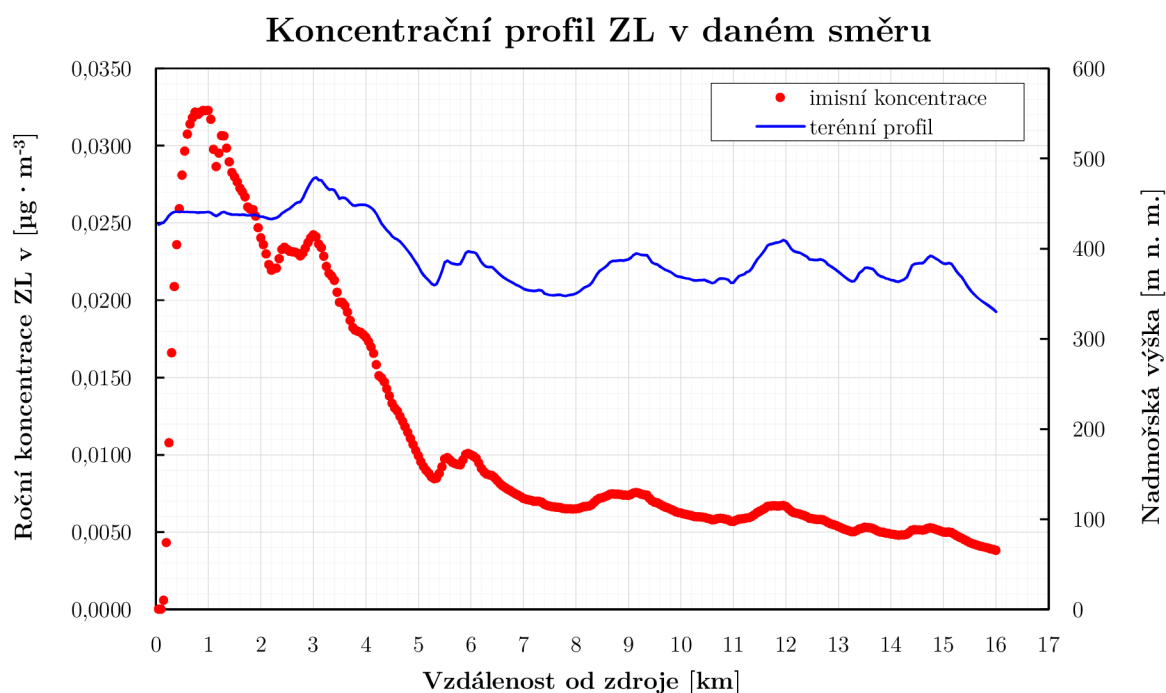
Obrázek 6.5: Referenční body výpočtu vyznačené na podkladu topografické mapy. Mapové podklady dostupné z [72].

### 6.1.3 Zpracování výsledků

Způsob zpracování výsledků byl již naznačen výše v textu. Příklad grafu zobrazujícího vypočítané imisní koncentrace v závislosti na vzdálenosti od zdroje je na obr. 6.6. Hodnoty v jednotlivých referenčních bodech, vyznačené červenými body, společně tvoří koncentrační profil dané znečišťující látky pro zvolený směr. Jelikož jsou vypočítané imisní koncentrace mimo jiné závislé na tvaru terénu, byly do grafu kromě nich vyneseny i nadmořské výšky jednotlivých referenčních bodů. Modrá křivka v grafu na obr. 6.6 tedy představuje přibližný tvar terénního profilu ve zvoleném směru.

Pro snadné generování grafů a uživatelsky přívětivý post-processing byla vytvořena dvě makra, která jsou součástí stejného sešitu Excel `data_vypocet.xlsx` (viz příloha F) použitého dříve pro tvorbu referenčních bodů. První z maker `NactiXLS` slouží k načtení získaných výsledků a jejich zformátování. Druhé z maker s názvem `AktualizujGrafyXLS` sestaví požadované grafické závislosti, resp. koncentrační profily – těch je celkově osm, pro

každý ze směrů jeden. Součástí zmíněného sešitu je i list s tabelárním přehledem získaných výsledků.

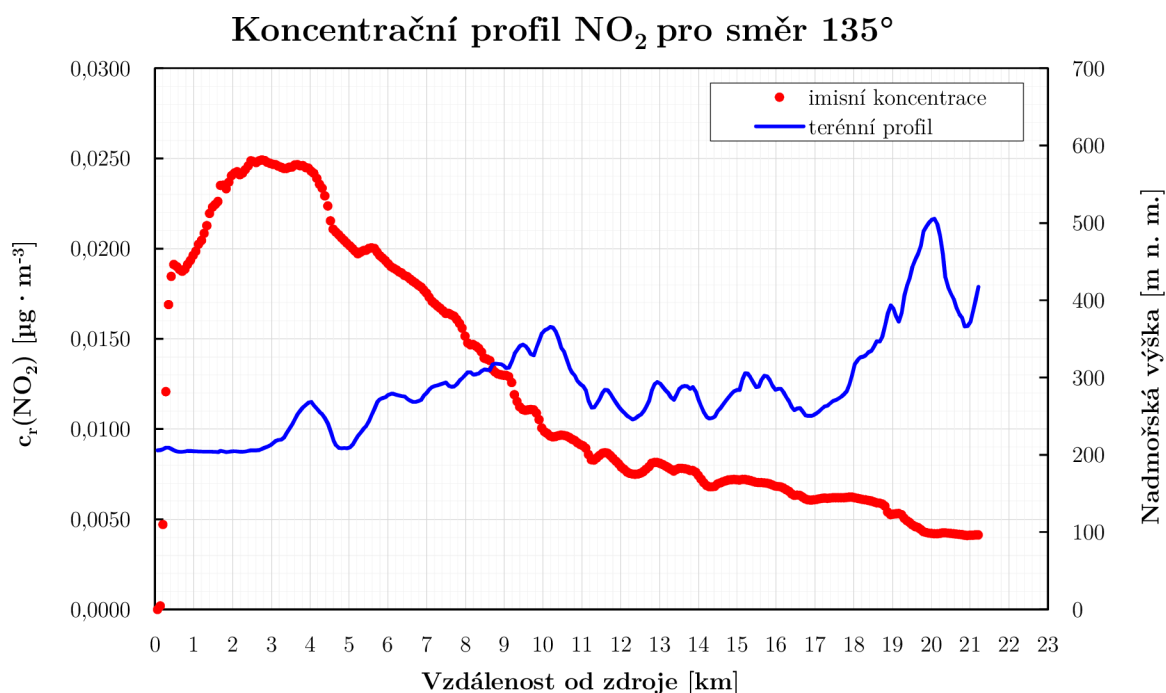


**Obrázek 6.6:** Vzorový graf zobrazující imisní koncentrace vybrané znečišťující látky (ZL) vypočítané v referenčních bodech v závislosti na vzdálenosti od zdroje znečištění pro zvolený směr.

#### 6.1.4 Diskuze a interpretace výsledků

V následujícím textu jsou rozebrány a okomentovány výsledky získané výše popsaným modelovým výpočtem. Pro zachování přehlednosti a srozumitelnosti bude detailně popsána analýza získaných výsledků pouze pro veličinu  $\text{NO}_2$  a jeden z vyšetřovaných směrů. Jako reprezentativní směr byl v tomto případě vybrán směr jihovýchodní, odpovídající  $135^\circ$  ve zvoleném souřadnicovém systému. Graf zobrazující koncentrační profil  $\text{NO}_2$  v tomto směru lze vidět na obr. 6.7, koncentrační profily pro ostatní směry jsou uvedeny v příloze D na obr. D.3, D.4, D.5, D.6, D.7, D.8 a D.9.

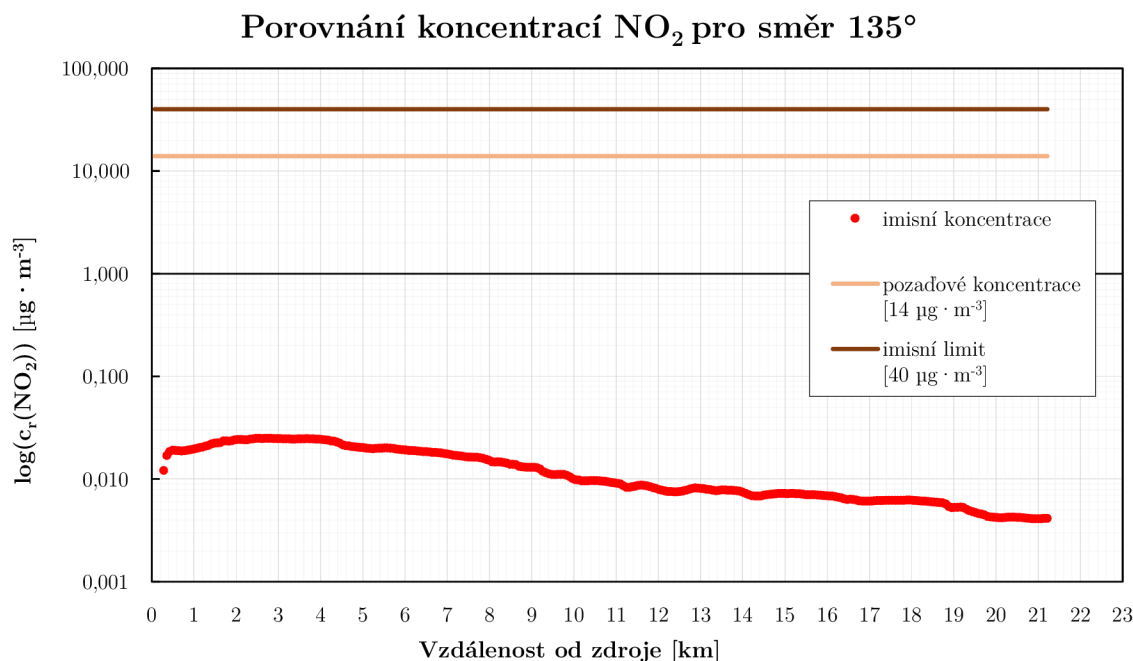
Jako první bude zhruba zhodnocen tvar získaného koncentračního profilu. Z obr. 6.7 lze vidět, že po vypuštění emisí ze zdroje nejprve imisní koncentrace znečišťující látky prudce narůstají a v určité vzdálenosti dosahují maximálních hodnot. Poté již imisní koncentrace s rostoucí vzdáleností od zdroje klesají, přičemž jejich vzájemné rozdíly se postupně zmenšují až dosahují téměř konstantních hodnot. Obdobný průběh lze pozorovat i ve všech ostatních směrech. K určení toho, proč nabývají koncentrační profily právě tohoto tvaru a které z parametrů jej ovlivňují, byla provedena série variantních výpočtů. Těm se věnuje následující podkap. 6.2, ve které je zároveň uveden podrobnější komentář.



**Obrázek 6.7:** Koncentrační profil  $\text{NO}_2$ , směr  $135^\circ$ , větrná růžice WR31, zdroj 100 kt.

Dále je pozornost věnována vyhodnocení vlivu imisních příspěvků od modelové spalovny 100 kt na imisní situaci v zájmové oblasti a porovnání výsledků s příslušnými legislativními imisními limity. Jak bylo uvedeno v podkap. 2.3, informace o požadových koncentracích, které se běžně vyjadřují jako klouzavé pětileté průměry pro jednotlivé znečišťující látky, jsou dostupné z webu ČHMÚ [41]. V tomto případě byly využity mapy znečištění ve formátu Portable Network Graphics (.png), zachycující pětileté průměry pro roky 2012-2016. Tyto mapy jsou zpracovány zvláště pro každý z krajů ČR. Z obr. 6.5 je patrné, že zvolená zájmová oblast zasahuje do oblastí dvou krajů, požadové koncentrace ročních průměrů  $\text{NO}_2$  jsou proto zachyceny pomocí dvou map jako obr. D.10 a D.11 přílohy D. Obě z map znečištění byly zkonstruovány ve čtvercové síti  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ , přičemž každý ze čtverců určuje příslušnou imisní koncentraci pro dané místo. Z obou map znečištění lze dále odečíst, že v zájmové oblasti se roční průměrné požadové imisní koncentrace  $\text{NO}_2$  pohybují v rozmezí přibližně od 11 do  $20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . Tyto hodnoty se liší zejména v závislosti na hustotě zástavby v daném místě. Jako průměrná imisní koncentrace pro směr  $135^\circ$  byla vzhledem k odečteným hodnotám stanovena konzervativní hodnota  $14 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Z koncentračního profilu na obr. 6.7 je patrné, že maximální dosahované roční průměrné koncentrace  $\text{NO}_2$  ve směru  $135^\circ$  jsou přibližně na úrovni  $0,0250 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . Ve vzdálenosti cca 21 km od zdroje klesly imisní koncentrace přibližně na pětinu nejvyšší dosažené koncentrace, tedy  $0,0050 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . Legislativou stanovený imisní limit pro roční průměr  $\text{NO}_2$  je uveden v tab. A.2 a činí  $40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . Na první pohled je tedy zřejmé, že příspěvek  $\text{NO}_2$  od modelového ZEVO s kapacitou  $100 \text{ kt} \cdot \text{r}^{-1}$  ke stávajícím imisním koncentracím v oblasti i k imisnímu limitu je zanedbatelný. Na obr. 6.8 jsou vypočtené imisní koncentrace srovnány s uvedenou přibližnou hodnotou stávajících koncentrací a imisním limitem.



**Obrázek 6.8:** Porovnání vypočítaných imisních koncentrací NO<sub>2</sub> s požadovými imisními koncentracemi v zájmové oblasti a imisním limitem.

V tab. 6.2 jsou pak vyjádřeny procentuální zastoupení přibližných maximálních a minimálních dosahovaných koncentrací z požadových koncentrací a imisního limitu. Situace je obdobná i pro ostatní vyšetřované směry, ve kterých jsou navíc hodnoty dosahovaných maximálních i minimálních imisních koncentrací ještě nižší. Lze navíc předpokládat, že podobné výsledky by byly získány i při srovnání imisních koncentrací ostatních znečišťujících látek s jejich imisními limity, případně požadovými koncentracemi. Tento předpoklad lze podložit analýzou výsledků výpočtu provedeného pro druhou z veličin – PM<sub>10</sub>.

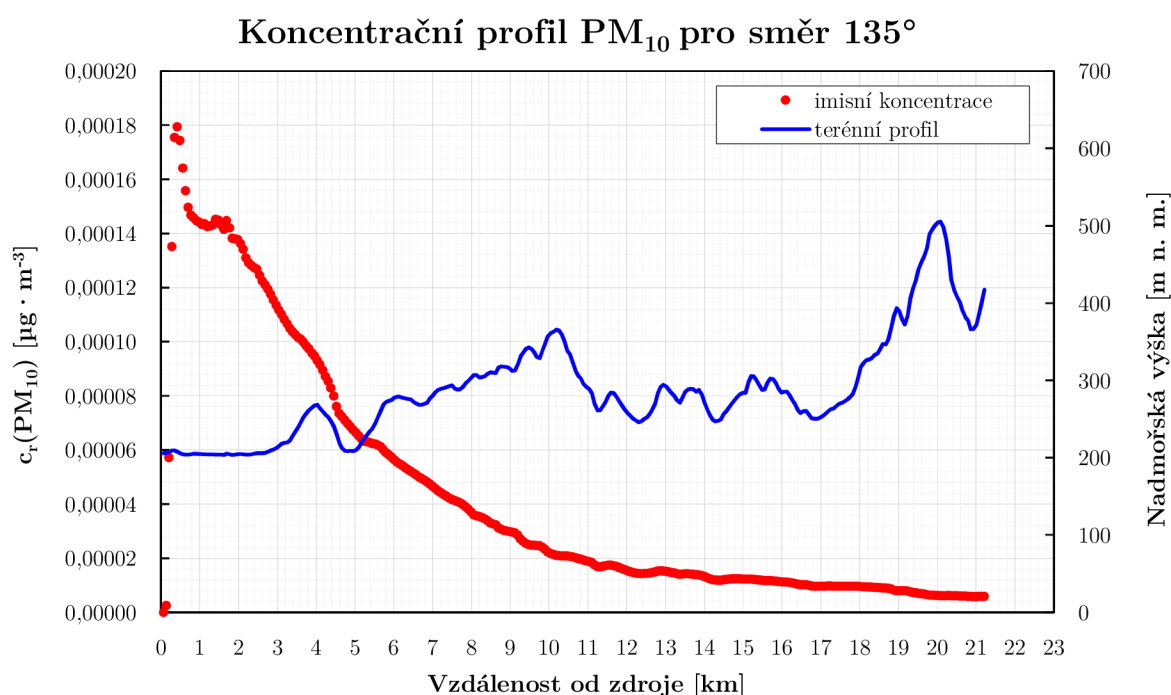
**Tabulka 6.2:** Vliv příspěvků imisních koncentrací NO<sub>2</sub> od modelové spalovny 100 kt.

maximální imisní koncentrace	požadové koncentrace		imisní limit	
	[μg · m <sup>-3</sup> ]	[%]	[μg · m <sup>-3</sup> ]	[%]
0,0250 μg · m <sup>-3</sup>	14	0,179	40	0,063
maximální imisní koncentrace	požadové koncentrace		imisní limit	
	[μg · m <sup>-3</sup> ]	[%]	[μg · m <sup>-3</sup> ]	[%]
0,0050 μg · m <sup>-3</sup>	14	0,036	40	0,013

Koncentrační profil PM<sub>10</sub> sestavený pro směr 135° lze vidět na obr. 6.9. Koncentrační profily pro ostatní směry mají obdobný průběh jako u veličiny NO<sub>2</sub>, a proto nejsou přiloženy. Stejně jako v případě NO<sub>2</sub> lze z map znečištění dostupných z [41] určit stávající hodnotu požadových koncentrací PM<sub>10</sub>. Ta činí ve směru 135° pro období let 2012-2016 přibližně

$27 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . Hodnota imisního limitu  $\text{PM}_{10}$  pro dobu průměrování jednoho kalendářního roku odečtená z tab. A.2 nabývá  $40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . Stejně jako v případě  $\text{NO}_2$  lze dále vyjádřit procentuální poměry dosahovaných koncentrací  $\text{PM}_{10}$  vůči stávající úrovni znečištění a imisnímu limitu, viz tab. 6.3. Z té vyplývá, že v případě příspěvků imisních koncentrací  $\text{PM}_{10}$  je jejich vliv ještě řádově nižší než v případě  $\text{NO}_2$ .

Na základě předložených výsledků pro oxidy dusíku, tuhé znečišťující látky a předpokladu získání obdobných výsledků i pro ostatní znečišťující látky lze konstatovat, že výstavba modelového ZEVO by jen zanedbatelně přispěla ke stávající úrovni znečištění v zájmové lokalitě. Je však třeba podotknout, že v případě tohoto výpočtu jsou uvažovány pouze příspěvky spojené se samotným termickým zpracováním odpadu a nejsou zohledněny další zdroje emisí, jako například logistika spojená s přepravou odpadů.



**Obrázek 6.9:** Koncentrační profil  $\text{PM}_{10}$ , směr  $135^\circ$ , větrná růžice WR31, zdroj 100 kt

**Tabulka 6.3:** Vliv příspěvků imisních koncentrací  $\text{PM}_{10}$  od modelové spalovny 100 kt.

maximální imisní koncentrace	požadové koncentrace		imisní limit	
	$[\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$	$[\%]$	$[\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$	$[\%]$
$0,00018 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	27	0,00067	40	0,000450
maximální imisní koncentrace	požadové koncentrace		imisní limit	
	$[\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$	$[\%]$	$[\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$	$[\%]$
$0,000006 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	27	0,00002	40	0,000015

## 6.2 Variantní výpočty

Dalším z cílů této práce je indikovat to, jaký vliv mají některé z parametrů výpočtu na hodnoty určených imisních koncentrací a na tvar koncentračních profilů. Pomocí série výpočtů byl vyšetřován vliv celkově tří parametrů. Jedním z faktorů ovlivňujících velikosti vypočtených imisních koncentrací je přirozeně množství vypouštěných emisí, přičemž v tomto případě lze tento parametr ztotožnit s *kapacitou* modelového ZEVO. Z výsledků modelového výpočtu lze vyvodit, že tvar koncentračních profilů a hodnoty imisních koncentrací jsou dále ovlivněny zadanou *větrnou růžicí* a také *terénním profilem* v zájmové oblasti. Přehled variant výpočtů, které kombinují různá nastavení těchto tří parametrů, je uveden v tab. 6.4, níže.

**Tabulka 6.4:** Varianty výpočtu.

varianta	větrná růžice	terén	kapacita [ $\text{kt} \cdot \text{r}^{-1}$ ]
1	rovnoměrná WR	NE	100
2	WR31	NE	100
3	rovnoměrná WR	ANO	100
4	WR31	ANO	200
5	WR31	ANO	50 až 400

Na základě porovnání variant 1 a 2 byl vyšetřován zejména vliv větrné růžice, z výpočtu varianty 3 vliv terénu a variant 4 a 5 kapacity. Naprostá většina vstupních dat, nastavení výpočtu i způsob zpracování výsledků byly u všech variantních výpočtů stejné jako v případě modelového výpočtu. V závislosti na zvolené kombinaci došlo pouze k obměnám zvolených parametrů.

Varianty větrných růžic byly použity dvě. První z nich byla větrná růžice WR31 použitá při modelovém výpočtu, druhá pak rovnoměrná větrná růžice (dále označovaná jako WRR). Grafickou reprezentaci druhé z růžic lze vidět na obr. E.1a a E.1b v příloze E, její tabelární vyjádření je pak uvedeno v tab. E.1 stejné přílohy. Z uvedených údajů je zřejmé, že četnosti výskytu větru jsou v případě rovnoměrné větrné růžice ve všech osmi základních směrech rovnocenné. Je nutné podotknout, že tato větrná růžice je čistě teoretickým případem, který se v přírodě nevyskytuje.

Dalším z měněných parametrů bylo to, zda je při výpočtu zahrnut terén, či nikoliv. Při uvažování vlivu terénu na výpočet byl použit stejný výškopis jako v případě modelového výpočtu. Naopak při zanedbání vlivu terénu byly všechny výšky nastaveny na hodnotu 0 m n.m.

Poslední z uvažovaných proměnných byla kapacita ZEVO. Při následujících výpočtech bylo uvažováno celkově sedm variant kapacit ZEVO, a to 50, 100, 150, 200, 250, 300 a 400 kt. Všechny z těchto variant vycházely z modelového zdroje definovaného v podkap. 5.3. Se změnou kapacity bylo přirozeně nutné upravit některé z parametrů, jmenovitě objemový tok spalin  $V_s$ , vnitřní průměr komína  $D_v$  a množství vypouštěných znečišťujících látek  $M$ . Pro určení hodnot těchto parametrů pro různé kapacity byl aplikován jednoduchý předpoklad, že s rostoucí (klesající) kapacitou ZEVO přímo (nepřímo) roste (klesá)



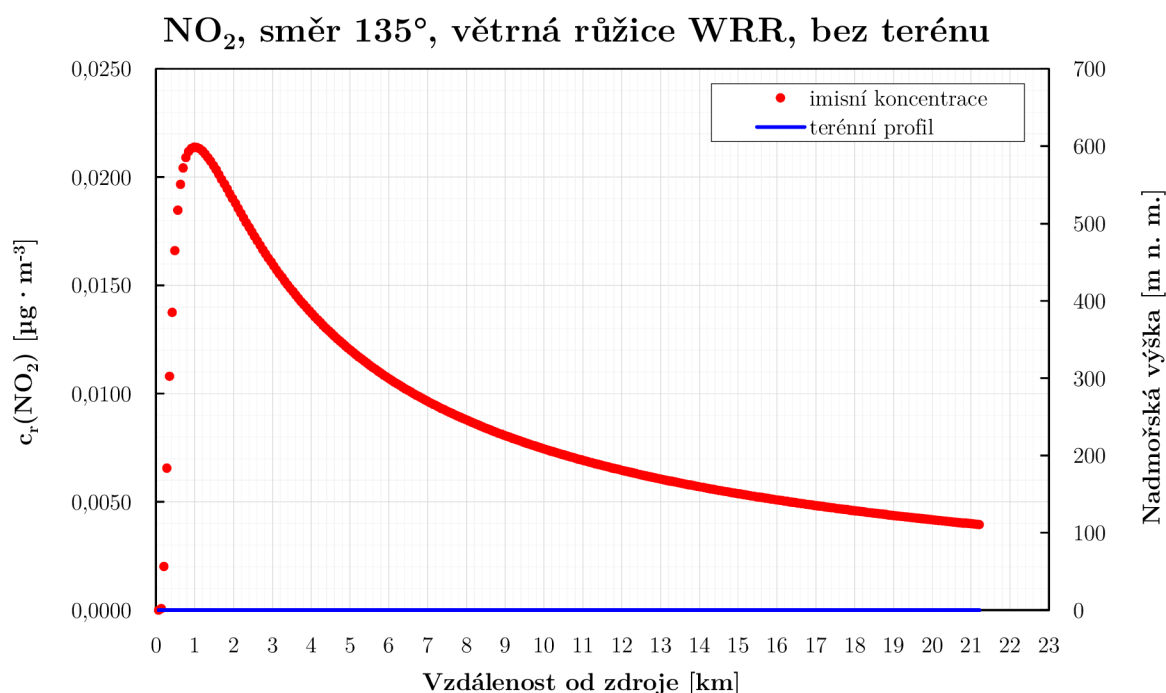
objemový tok spalin a množství vypouštěných látek. Vnitřní průměr komína byl individuálně dopočítán pro každou z kapacit za předpokladu, že návrhová výstupní rychlost spalin  $w_0$  nabývá hodnoty  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Přehled hodnot parametrů závislých na kapacitě jednotlivých variant ZEVO uvádí tab. C.1 v příloze C. Ostatní parametry zůstávají pro všechny kapacity neměnné a korespondují tedy s hodnotami uvedenými v tab. 5.2.

### 6.2.1 Diskuze a interpretace výsledků

V následujících odstavcích jsou uvedeny výsledky obdržené pomocí jednotlivých variantních výpočtů. Ty byly podrobeny analýze, vzájemnému srovnání a následně byly vyvozeny dílčí závěry o vlivu tří vybraných parametrů.

#### Varianta 1

První z variant přináší největší zjednodušení – zanedbává terén a pracuje s teoretickou rovnoměrnou větrnou růžicí. Tvar koncentračního profilu a vypočtené hodnoty imisních koncentrací  $\text{NO}_2$  pro směr  $135^\circ$  zachycuje obr. 6.10. Jak lze vidět ze srovnání obr. 6.10 s obr. E.2, E.3, E.4, E.5, E.6, E.7 a E.8 v příloze E, koncentrační profil i vypočítané hodnoty imisních koncentrací jsou v tomto případě ve všech směrech takřka totožné. Tvar křivky se v případech  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  a  $315^\circ$  od ostatních směrů nepatrně liší, to je však dáno pouze odlišným rozsahem na ose x.



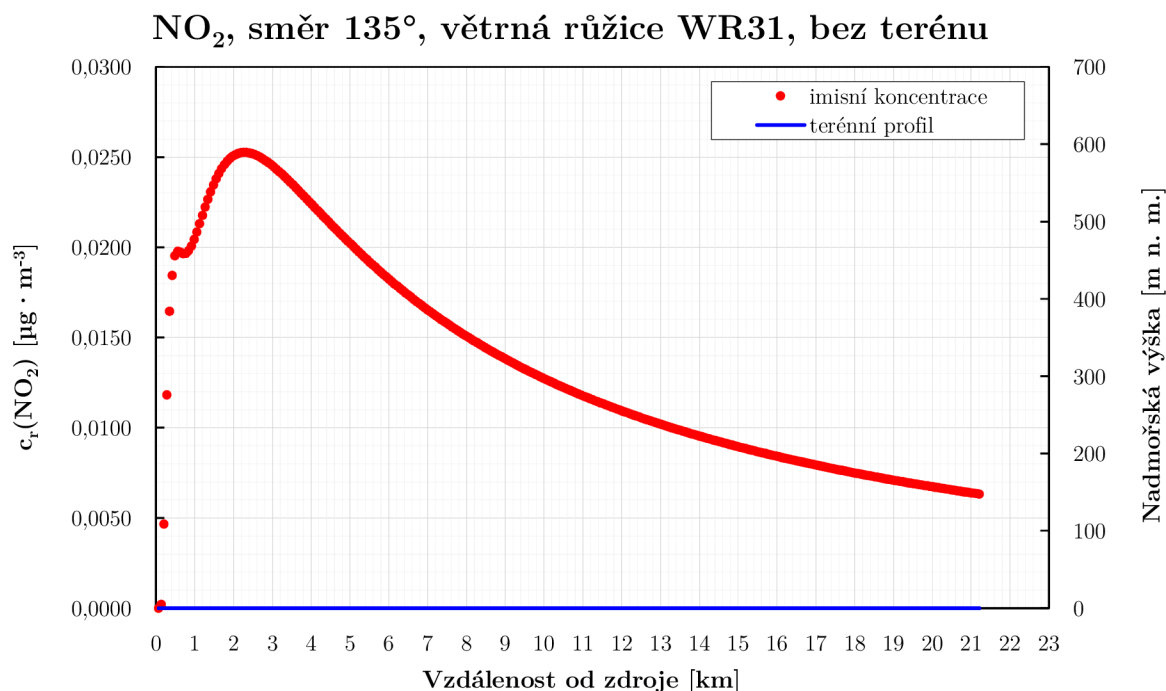
**Obrázek 6.10:**  $\text{NO}_2$ , směr  $135^\circ$ , větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, bez terénu.

Tvar koncentračního profilu, tedy vývoj hodnot imisních koncentrací v závislosti na vzdálenosti od zdroje, byl již stručně okomentován v předchozí podkapitole – v určité vzdále-

nosti dosáhnou hodnoty imisních koncentrací svého maxima, přičemž následně dochází k jejich poklesu. Přirozeně by se dalo očekávat, že maximálních koncentrací bude dosaženo hned po vypuštění emisí z komína. To je pravda, ale pouze pokud jsou imisní koncentrace vyšetřovány přímo v ose vlečky (viz obr. 3.5). V tomto případě však graf na obr. 6.10 zobrazuje koncentrace přízemní. Maximální hodnoty imisních koncentrací jsou dosaženy až když vlivem rozptylu znečišťujících látek (zejména vertikálního) dojde k jejich transportu blíže k zemskému povrchu. Vlivem jejich dalšího rozptylu (vertikálního, bočního i horizontálního) dochází následně s rostoucí vzdáleností od zdroje ke snižování hodnot imisních koncentrací. To, že je tvar koncentračních profilů ve všech směrech stejný jako na obr. 6.10 lze přisoudit faktu, že ve všech směrech panují stejné rozptylové podmínky dané rovnoměrnou větrnou růžicí. To, jak se tvary koncentračních profilů pro různé směry s různými rozptylovými podmínkami změnil, bylo posouzeno pomocí varianty 2.

## Varianta 2

V druhé z variant je opět zanedbán vliv terénu, ale výpočet již pracuje s reálnou větrnou růžicí – v každém ze směrů tedy panují odlišné rozptylové podmínky. Tvar koncentračního profilu a vypočtené hodnoty imisních koncentrací  $\text{NO}_2$  pro směr  $135^\circ$  v tomto případě zachycuje obr. 6.11. Koncentrační profily v dalších směrech jsou uvedeny v příloze E jako obr. E.9, E.10, E.11, E.12, E.13, E.14 a E.15.



**Obrázek 6.11:**  $\text{NO}_2$ , směr  $135^\circ$ , větrná růžice WR31, zdroj 100 kt, bez terénu.

Jak lze vidět z porovnání obr. 6.10 a 6.11, odlišné rozptylové podmínky způsobily jak změnu tvaru koncentračního profilu (např. vzdálenost, ve které je dosaženo maxima), tak i maximální a minimální dosahované hodnoty imisních koncentrací. Obdobně tomu je ve

všech vyšetřovaných směrech. Je tedy možné konstatovat, že rozptylové podmínky mají zásadní vliv na to, jakých hodnot budou vypočítané imisní koncentrace znečišťujících látek dosahovat. Nejvyšší imisní koncentrace byly dosaženy ve směru  $135^\circ$  (obr. 6.11). Jak lze vidět z obr. D.1a a D.1b reprezentujících větrnou růžici WR31 zadanou při výpočtu, tento výsledek koresponduje s nejvyšším výskytem četnosti větru. Je třeba mít na paměti, že vítr fouká ze směru, ve kterém je definován – SZ vítr tedy ovlivní rozptyl ve směru  $135^\circ$ .

Z porovnání výsledků výpočtů variant 1 a 2 lze vyvodit důležitý dílčí závěr – větrná růžice reprezentující meteorologická data, resp. rozptylové podmínky významně ovlivňuje výsledný tvar koncentračních profilů a vypočtené hodnoty imisních koncentrací. Sestavení a výběr větrné růžice, která bude dostatečně přesně reprezentovat rozptylové podmínky v zájmové lokalitě, je tedy zásadní pro získání kvalitních výsledků a identifikaci prostorového rozložení imisí v zájmové oblasti.

### Varianta 3

Pomocí varianty třetí je vyšetřován vliv terénu. Nastavena byla v tomto případě opět WRR a byl zahrnut vliv terénu. Získaný koncentrační profil ve směru  $135^\circ$  lze vidět na obr. 6.12, pro další směry pak na obr. E.16, E.17, E.18, E.19, E.20, E.21 a E.22 přílohy E.

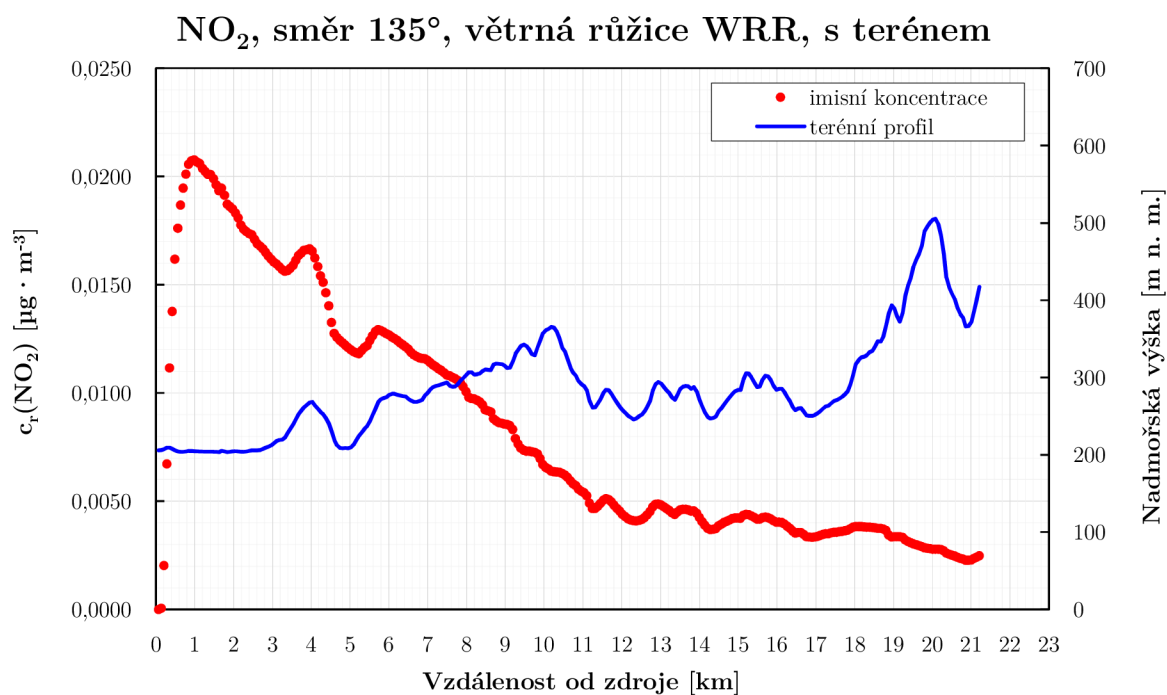
Při pohledu na obr. 6.12 lze vidět, že tvar koncentračního profilu prakticky kopíruje terénní změny, přičemž jejich vliv s rostoucí vzdáleností od zdroje a snižujícími se hodnotami imisních koncentracemi postupně klesá. Vliv terénu se tedy na hodnotách imisních koncentrací projevuje lokálně – dle charakteru změny terénního profilu způsobuje buď jejich zvýšení nebo snížení. Obdobný vliv mají změny nadmořské výšky terénu i v případě, že je výpočet proveden s větrnou růžicí WR31. Taková varianta výpočtu je shodná s nastavením modelového výpočtu, viz podkap. 6.1, a jím získanými výsledky – obr. 6.7 a obr. D.3, D.4, D.5, D.6, D.7, D.8, D.9.

Porovnáním obr. 6.10 a 6.12 lze zhodnotit významnost vlivu terénu na získané hodnoty imisních koncentrací. Velikosti lokálních změn těchto koncentrací v důsledku změn nadmořské výšky jsou ve srovnání s dosahovanými imisními příspěvky od modelového ZEVO zanedbatelné. Na druhou stranu je však třeba pamatovat na omezení Gaussovských disperzních modelů uvedených v teoretické části této práce a na to, že reálně může být vliv terénních změn podstatnější. Dále je potřeba přihlídnout k faktu, že zájmová lokalita je výrazně rovinatého charakteru.

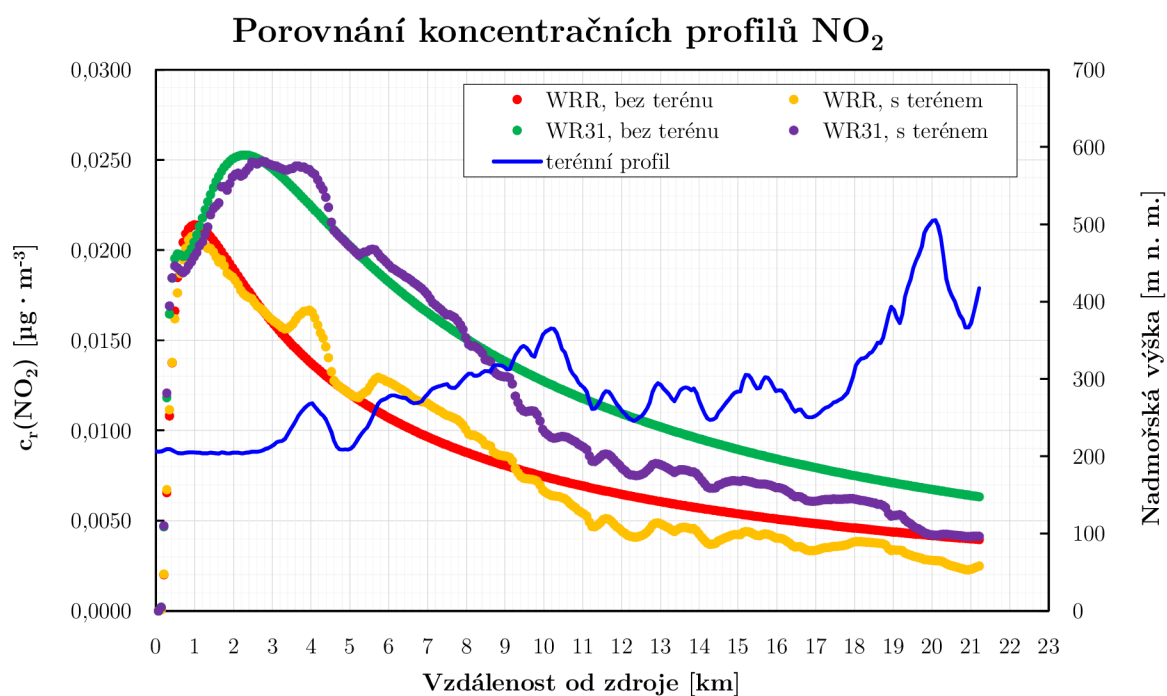
Na obr. 6.13 jsou pak pro přehlednost shrnuty získané koncentrační profily pro varianty 1 až 3 a výsledek modelového výpočtu. Z grafu jsou názorně vidět výše popsané odchylky vzniklé změnou kombinací parametrů výpočtu větrná růžice a vliv terénu.

### Varianta 4

Předposlední varianta výpočtu vychází ze stejného nastavení jako bylo použito při modelovém výpočtu – modelové ZEVO má však v tomto případě dvojnásobnou kapacitu, tedy 200 kt. Koncentrační profil pro směr  $135^\circ$  je zachycen na obr. 6.14. Profily pro další směry jsou uvedeny v příloze E jako obr. E.23, E.24, E.25, E.26, E.27, E.28 a E.29.

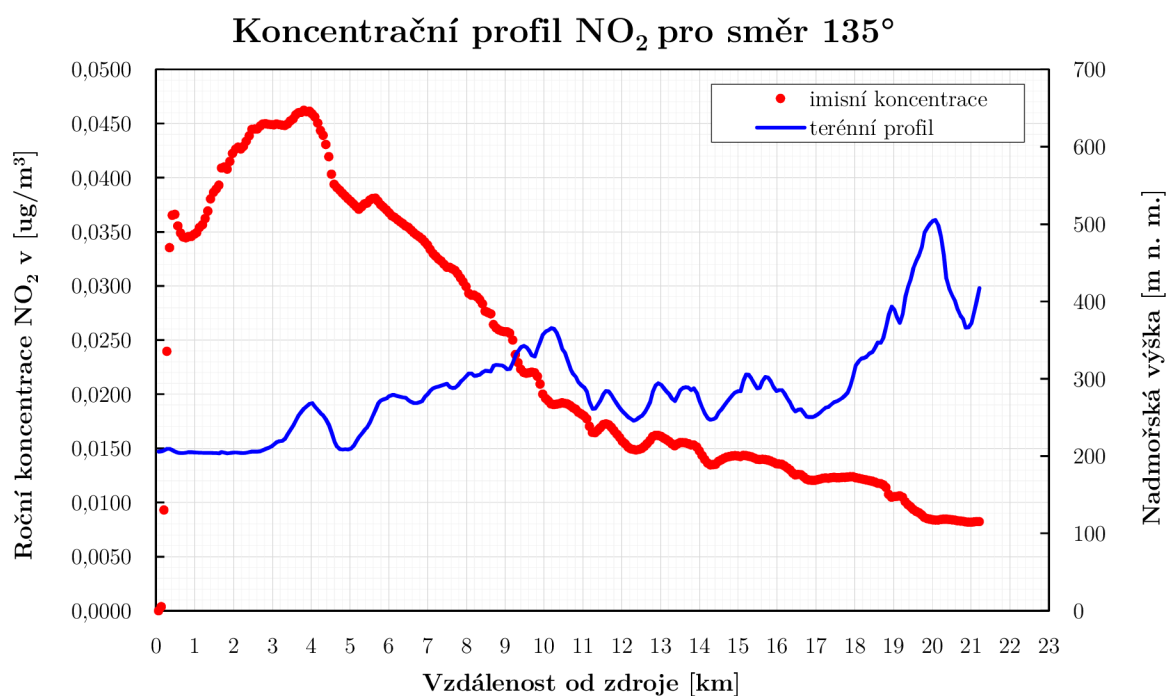


Obrázek 6.12: NO<sub>2</sub>, směr 135°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, s terénem.



Obrázek 6.13: Porovnání výsledků výpočtů variant 1 až 3 a modelového výpočtu pro veličinu NO<sub>2</sub>.

Vliv zvýšení kapacity lze pozorovat při srovnání obr. 6.7 a obr. 6.14. V případě kapacity 200 kt došlo ke zvýšení dosahovaných hodnot imisních koncentrací ve všech referenčních bodech v daném směru. Hodnoty maximálních dosahovaných imisních koncentrací se zvýšily přibližně o  $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . Při srovnání tvaru obou křivek lze dále vidět, že došlo k zvýraznění lokálních změn vlivem terénu. Změna kapacity tedy výrazně ovlivňuje hodnoty vypočítaných imisních koncentrací.



**Obrázek 6.14:**  $\text{NO}_2$ , směr  $135^\circ$ , větrná růžice WR31, zdroj 200 kt, s terénem.

### Varianta 5

Předchozí variantní výpočet indikoval, že kapacita má zásadní vliv na jeho výsledky. Otázkou je, zda mezi změnou kapacity a vypočítanými hodnotami imisních koncentrací existuje nějaký jednoduše popsatelný vztah. V poslední z variant proto byly provedeny výpočty pro všechny zbývající kapacity uvedené v tab. C.1 a jejich výsledky byly následně vyneseny do jednoho grafu, viz obr. 6.15. V tom jsou srovnány hodnoty vypočítaných imisních koncentrací pro všechny předepsané kapacity ZEVO pomocí parametru relativní odchylky, která je definována jako:

$$\Delta c_{r,\text{rel}} = \frac{c_{r,i} - c_{r,100}}{c_{r,100}} \cdot 100 [\%], \quad (6.1)$$

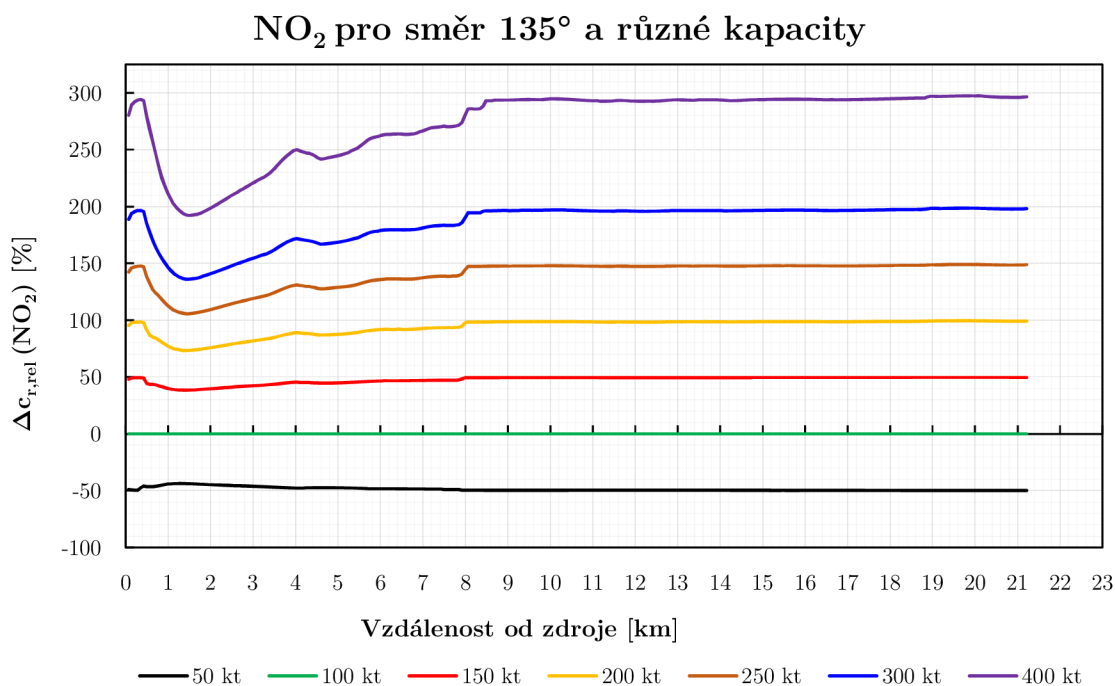
kde

$\Delta c_{r,\text{rel}}$  relativní odchylka průměrné roční koncentrace,

$c_{r,i}$	roční průměrná imisní koncentrace pro ZEVO o kapacitě $i$ ,
$c_{r,100}$	roční průměrná imisní koncentrace pro ZEVO 100kt
$i$	varianta kapacity ZEVO $i = \{50, 100, 150, 200, 250, 300, 400\}$

Jako referenční byla zvolena kapacita 100 kt a v grafu je proto reprezentována nulovou hodnotou. Z grafu na obr. 6.15 lze vyvodit tyto dílčí závěry:

- Od určité vzdálenosti, v tomto případě přibližně 8 km od zdroje znečištění, je rozdíl mezi hodnotami vypočtených příspěvků imisních koncentrací od jednotlivých kapacit vůči hodnotám odpovídajícím referenční kapacitě přibližně konstantní. Dále lze vidět, že hodnoty těchto konstant se mění přibližně lineárně se změnou kapacity ZEVO.
- Citlivost lokálních změn tvaru koncentračních profilů, vyvolaných změnami terénního profilu, se s rostoucími (klesajícími) hodnotami imisních koncentrací, resp. kapacity zdroje zvyšuje (snižuje). Tento fakt plyne z porovnání tvarů získaných závislostí pro jednotlivé kapacity – relativní odchylka se v oblasti dosažení maxima přízemních imisních koncentrací (ve vzdálenosti přibližně 1,5 km od zdroje) s rostoucí (klesající) kapacitou zmenšuje.



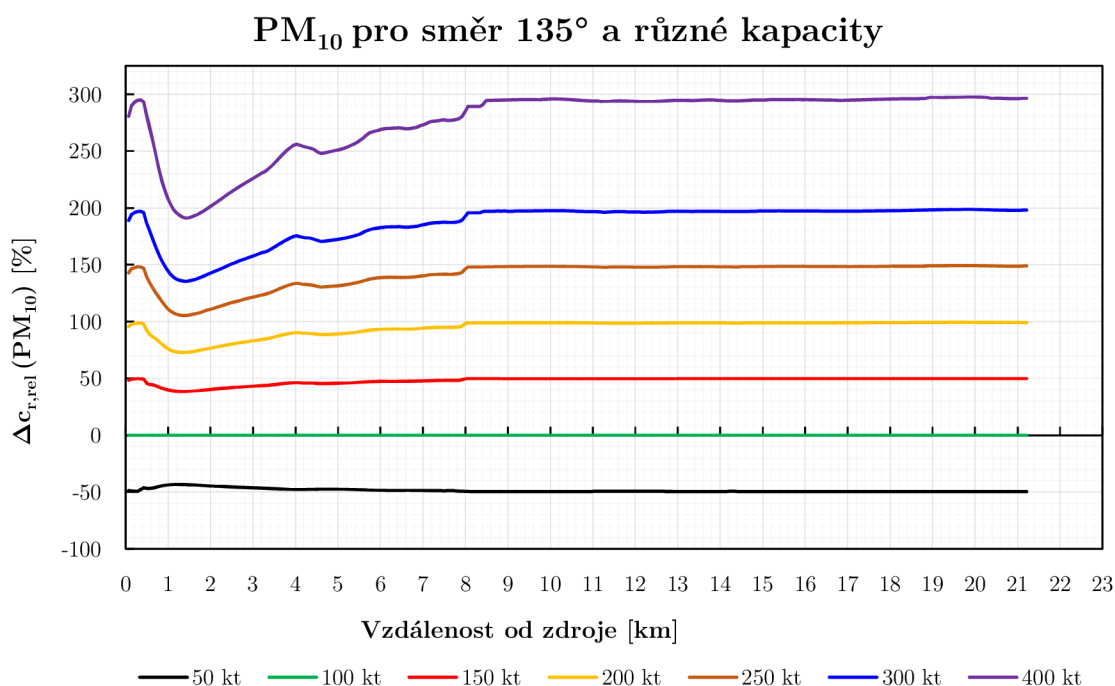
**Obrázek 6.15:** Procentuální srovnání vypočítaných hodnot imisních koncentrací NO<sub>2</sub> ve směru 135° pro varianty kapacit 50, 100, 150, 200, 250, 300 a 400 kt.

Otázkou je, zda by bylo možné tyto dílčí závěry aplikovat obecně pro všechny ze znečišťujících látek. Pro vyšetření této hypotézy byl výpočet variant 1 až 5 pro dané kombinace

parametrů větrná růžice, terén a kapacita (viz tab. 6.4) proveden ve stejném rozsahu i pro druhou znečišťující látku, a to  $PM_{10}$ . Dílčí závěry variant 1 až 4 byly potvrzeny i pro  $PM_{10}$ , a proto nejsou prezentovány a grafy koncentračních profilů nejsou z důvodu rozsáhlosti přiloženy. Výsledek výpočtu varianty 5, tj. srovnání vypočítaných imisních koncentrací pro všechny předepsané kapacity ZEVO pomocí parametru relativní odchylky, je zpracován v grafu na obr. 6.16.

Z porovnání grafů na obr. 6.15 a 6.16 je zřejmé, že imisní koncentrace se v obou případech mění s rostoucí vzdáleností od zdroje takřka totožně. Lze tedy zavést předpoklad, že závěry uvedené v textu výše budou obecně platné pro libovolnou znečišťující látku.

Pro zajímavost byly na závěr do společných grafů pro obě znečišťující látky vyneseny vypočtené hodnoty příspěvků imisních koncentrací od všech kapacit, hodnoty pozadových koncentrací a imisní limit. Jde tedy o obdobu grafu na obr. 6.8, uvedeného při diskuzi výsledků modelovém výpočtu. Z obou grafů uvedených v příloze E na obr. E.30 ( $NO_2$ ) a obr. E.31 ( $PM_{10}$ ) lze vidět, že i imisní příspěvky od nejvyšší z uvažovaných kapacit (400 kt), kterou již lze řadit mezi ZEVO vysokých zpracovatelských kapacit, stále tvoří jen zlomky imisního limitu i stávajících pozadových koncentrací.



**Obrázek 6.16:** Procentuální srovnání vypočítaných hodnot imisních koncentrací  $PM_{10}$  ve směru  $135^\circ$  pro varianty kapacit 50, 100, 150, 200, 250, 300 a 400 kt.

### 6.3 Implementace do komplexní logistické úlohy

Následující text je věnován jednomu z hlavních cílů této práce – zhodnocení použitelnosti disperzních modelů a příslušného software (v tomto případě SYMOS'97) jako nástroje využitelného pro přípravu dat komplexních logistických úloh. Standardně jsou disperzní modely v praxi využívány především pro zpracování rozptylových studií (viz podkap. 2.3), které jsou v případě zařízení jako ZEVO nepostradatelným podkladem pro získání závazných stanovisek od různých orgánů státní správy (např. proces EIA). Běžně jsou tedy tyto nástroje aplikovány až v pokročilejších stádiích projektů. Využití rozptylových analýz pro komplexní optimalizaci v lokačních úlohách v koncepčních fázích projektů, jako je volba lokality pro výstavbu nových zařízení pro nakládání s odpady, je prozatím pole neorané. Při pohledu na rov. (3.6) využívanou v Gaussovských disperzních modelech a parametry v ní vystupující je zřejmé, že implementace už tak značně zjednodušeného vztahu do obsáhlých optimalizačních úloh (např. systém NERUDA) vyžaduje značnou míru vynalézavosti, důvtipu a zejména dalších nezbytných zjednodušení. Na základě výsledků modelových výpočtů, které byly analyzovány výše v této kapitole a dílčích závěrů z nich vyvozených lze nastínit cesty, kterými by se proces implementace měl ubírat. Dále v textu jsou rozebrány některé ze stěžejních bodů, které je třeba při tomto procesu zahrnout.

#### Obyvatelstvo

Vhodný způsob, jak pro různé varianty lokalit objektivně vyhodnotit vliv emisí vypouštěných ze stacionárních zdrojů na životní prostředí a lidské zdraví, je vztáhnout jejich dopady na obyvatelstvo, které jimi bude postihnuto. Z toho důvodu je nutné zabývat se následujícími informacemi:

- Data o přítomnosti obyvatel v souřadnicích GPS. Pro jejich určení lze vyjít z databáze popisných čísel domů a bytových jednotek a dále odhadu počtu osob je obývajících z dat Českého statistického úřadu (ČSÚ).
- Vzdálenost uvažovaného bodového stacionárního zdroje od jednotlivých reprezentantů (zjištěných popisných čísel). Zde je nutné brát v potaz zakřivení Země.
- Mezní hodnotu vzdálenosti, pro kterou je ještě nutné dopad na obyvatele uvažovat je vhodné určit z hlediska výpočtové náročnosti.
- Vzhledem k tomu, že provoz ZEVO je plánován v časovém horizontu několika desítek let, je nutné nezanedbat demografický vývoj v okolí plánovaného emisního zdroje. Ideální by bylo do výpočtu zahrnout i dočasnou pracovní a studijní migraci mezi regiony – jako příklad lze uvést situaci, kdy podstatnou část lidí vyskytujících se v hlavním městě Praha v průběhu pracovního dne tvoří obyvatelé Středočeského kraje, viz [79].

#### Imisní zátěž z potenciálního ZEVO

Pro určení samotných imisních koncentrací a tedy podstatné skupiny vstupních dat jednoho z modulů komplexní logistické úlohy je možné využít výpočtu pomocí obdobného



software, jako byl použit v této práci (např. SYMOS'97). Na základě dílčích závěrů uvedených při diskuzi získaných výsledků (modelový výpočet, varianty 1 až 5) lze vliv jednotlivých vstupních dat ohodnotit následovně:

- Rozptylové podmínky panující v definovaném zájmovém území mají vysoký dopad na výsledné hodnoty zjištěných průměrných ročních imisních koncentrací. Větrná růžice definující tyto podmínky je esenciálním parametrem pro určení toho, jakou měrou bude emisemi od ZEVO obyvatelstvo zatíženo. Pro vybrané lokality uvažované v komplexní optimalizační úloze je nutné určit dostatečně přesné a reprezentativní větrné růžice.
- Vliv terénu má na výsledky spíše minoritní vliv, a to zejména v případě ZEVO, kdy vypočtené imisní příspěvky tvoří pouze zanedbatelný zlomek stávajícího znečištění (viz tab. 6.2 a 6.3). Lze předpokládat, že vliv terénu není nutné uvažovat a tím úlohu zjednodušit. Pro jednoznačné potvrzení tohoto předpokladu je nicméně nutné provést další série výpočtů, zejména v lokalitách se složitějším terénem.
- Kapacita navrhovaného ZEVO je pro vyhodnocení dopadu emisní zátěže na obyvatelstvo klíčovým parametrem. Výpočty dopadu emisní zátěže na obyvatelstvo je nutné provést pro určitý kapacitní rozsah, obvykle 100–400 kt · r<sup>-1</sup> s krokem 50 kt · r<sup>-1</sup>.
- Při přípravě dat ve zvoleném software by bylo vhodné použít nástroje GIS (např. pro generování referenčních bodů).

Po určení dopadu emisního dopadu na obyvatelstvo je nutné vzniklé body popisující vazbu mezi kapacitou ZEVO a emisním dopadem na obyvatele proložit vhodnou regresní funkcí. Výsledky výpočtu varianty 5 nasvědčují, že data by mohla být připravena pouze pro jednu referenční kapacitu (např. 100 kt · r<sup>-1</sup>) a následně pomocí předepsané lineární závislosti jednoduše přepočítána pro kapacity ostatní (viz grafy 6.15 a 6.16). Tento postup by postačoval pro získání orientační představy. Jako vhodná funkce pro detailnější popis se jeví funkce mocninná ve tvaru  $y = a \cdot x^b$ , kde  $y$  popisuje emisní zátěž obyvatelstva,  $x$  udává kapacitu ZEVO a parametry  $a$  a  $b$  jsou regresní koeficienty.

### Lokalita pro výstavbu ZEVO

Uvažovaná lokalita pro nové ZEVO hraje v celém výpočtu podstatnou roli:

- Pro výstavbu ZEVO jsou vhodné lokality s adekvátní poptávkou po teple (zejména napojením do CZT), které tvoří klíčový prvek pro finanční rentabilitu investice. V rámci ČR se jedná o desítky lokalit, z toho cca 10 (především krajská města) je vhodných pro ZEVO vyšších kapacit, tj. 100 kt · r<sup>-1</sup> a více. Ostatní lokality představují především okresní města, kde je možné uvažovat o kapacitách do 40 kt.
- Z pohledu hodnocení emisní zátěže je podstatným faktorem i současný typ stacionárního zdroje v uvažované oblasti. Nahrazením či omezením výroby současných zdrojů na fosilní paliva prostřednictvím ZEVO přinese s vysokou pravděpodobností kýžený kladný efekt pro životní prostředí a zdraví obyvatelstva. To lze tvrdit mimo jiné s ohledem na určené hodnoty imisních koncentrací, které tvoří pouze zanedbatelný příspěvek s ohledem na stávající hodnoty znečištění a imisní limity. Současně lze toto tvrzení podložit faktem, že

moderní spalovny odpadů s přehledem plní předepsané emisní limity (viz tab. 5.3). Pro objektivní vyjádření zmíněného pozitivního efektu by bylo nutné provést výpočty situací před a po výstavbě ZEVO a vypočítané emisní zátěže mezi sebou srovnat (fosilní zdroje totiž většinou není možné zcela nahradit, ale spíše omezit jejich provoz pouze na vykrývání špiček poptávky po teple). Zároveň by bylo nutné zohlednit i další zdroje emisí spojené s jejich provozem (logistika vstupních surovin atd.). Na závěr je možno dodat, že v případě nahrazení/omezení provozu uhelné teplárny (popř. elektrárny) lze očekávat vyšší pozitivní efekt, než v případě zdrojů spalujících plyn.

- Vzhledem k zachování objektivity při posuzování emisního dopadu při výstavbě ZEVO by se také nemělo zapomenout na aktuální situaci nakládání s odpady, tj. v ČR většinou skládkováním. I tento proces, který by byl výstavbou ZEVO omezen, má negativní dopad na životní prostředí a jeho nahrazení by se opět projevilo pozitivním ekologickým efektem.
- Při výběru lokality je vhodné uvažovat i logistiku spojenou s přepravou odpadu a s ní spojenou produkcí emisí, viz [6].

# Závěr

Předložená diplomová práce se zabývá možnostmi využití metod matematického modelování šíření emisí ze stacionárních zdrojů jako potenciálního nástroje pro přípravu dat pro komplexní logistické úlohy. Obdobnou úlohu představuje i unikátní systém NERUDA, který je dlouhodobě vyvíjen na akademické půdě ÚPI FSI VUT v Brně a který lze efektivně využít například při konceptuálním plánování odpadového hospodářství. Primární motivací pro zpracování této práce bylo zahrnutí ekologických aspektů do tohoto nástroje, konkrétně části zabývající se hodnocením lokálního dopadu emisí majících původ v ZEVO. Celá práce byla koncipována jako úvod do dané problematiky a mimo jiné měla za úkol nastínit možnosti dalšího postupu pro zohlednění daného kritéria do výpočtu – využití podobných nástrojů při řešení komplexních logistických úloh je totiž jedinečné a dle vědomí autora práce dosud neaplikované.

V úvodní části práce byl rozebrán proces znečišťování ovzduší. Jako první byla představena klasifikace emisních zdrojů. Dále byly popsány jednotlivé znečišťující látky, které se pojí s provozem ZEVO a termickým zpracováním odpadů. Pro jednotlivé skupiny látek byly uvedeny mechanismy jejich vzniku a negativní důsledky, které tyto látky mají na životní prostředí a lidské zdraví.

Kapitola druhá byla věnována kvalitě ovzduší. Bylo zjištěno, že důležitou roli při hodnocení kvality ovzduší hraje legislativa, která stanovuje například závazné emisní a imisní limity (shrnuty v příloze A) nebo povinné součásti dokumentace, týkající se povolování nových emisních zdrojů jako je ZEVO. Původ současné národní legislativy plyne zejména z evropských směrnic, jejichž cíle jsou závazné pro všechny členské státy EU. Další část této kapitoly byla věnována imisní a emisní situaci v ČR. Nejvyšší imisní zátěž na území ČR v současnosti představují suspendované částice frakcí  $PM_{10}$  a  $PM_{2,5}$  a na ně vázané PAU (zejména benzo[a]pyren). Notná pozornost byla také zaměřena na rozptylové studie, jakožto dokument, ke kterému jsou hojně využívány právě metody matematického modelování šíření znečištění ovzduší a který je nezbytnou složkou projektové dokumentace potřebné k získání závazných stanovisek od institucí státní správy.

V kapitole třetí byl vysvětlen koncept šíření znečištění v atmosféře, na kterém jsou vystavěny disperzní modely. Ve stručnosti byly uvedeny dva přístupy využívané k matematickému popisu jevu turbulentní difuze, který je z největší části zodpovědný za rozptyl znečišťujících látek – přístupy Eulerovský a Lagrangeovský. Podstatná část kapitoly poté byla věnována rozdělení matematických modelů, jmenovitě byly rozebrány jednotlivé charakteristiky modelů Gaussovských, Lagrangeovských, Eulerovských, CFD a statistických.

Další z kapitol se zabývala Gaussovským disperzním modelem SYMOS'97, což je jeden z referenčních modelů předepsaných českou legislativou. Tato kapitola byla důležitým teoretickým základem pro stanovení nezbytného rozsahu vstupních dat potřebných pro výpočtovou část práce. Postupně byly diskutovány zadávané údaje o emisích, meteorologické a klimatické údaje a geografické údaje. Parametry bodového zdroje, které je nutné při výpočtu specifikovat jsou shrnuty v tab. 4.1. Hlavním meteorologickým vstupem do výpočtu je větrná růžice rozlišená dle tříd rychlosti větru a teplotní stability atmosféry podle Bubníka-Koldovského. Z hlediska zadávání geografických dat je nezbytné zvolit pracovní souřadnicový systém, v tomto případě byl ve výpočtové části práce použit Křovákův S-JTSK (East North). Dále byly uvedeny zdroje, ze kterých lze tato data běžně

čerpat. V rámci zpracování této kapitoly byl také sestaven podrobný přehled alternativních disperzních modelů, jehož zkrácená verze je uvedena v tab. B.1 přílohy B. Tento seznam byl sestaven zejména pro interní potřeby ÚPI FSI VUT v Brně.

V kapitole páté byla popsána technologie ZEVO, její nosná část pak byla věnována sestavení modelového zdroje využitého při provedených výpočtech. Ten byl zformulován na základě reálných technologických a provozních dat liberecké spalovny odpadů. Navržená kapacita modelového ZEVO byla  $100 \text{ kt} \cdot \text{r}^{-1}$  a její umístění zvoleno ve městě Přerov v Olomouckém kraji, které je potenciálně uvažovanou lokalitou pro umístění zdroje pro termické zpracování odpadů. Všechny technologické parametry modelového ZEVO jsou shrnuty v tab. 5.2, údaje o vypouštěných emisích pak v tab. 5.3.

Výpočtová část práce byla rozdělena do tří sekcí, přičemž každá z nich se zabývala jedním z dílčích cílů praktické části této práce. V první z těchto sekcí byl popsán modelový výpočet, pomocí kterého byla mimo jiné demonstrována schopnost efektivně pracovat ve zvoleném software. Postupně byla uvedena všechna vstupní data zadaná do výpočtu, byl okomentován jejich původ a byly popsány pomocné nástroje využitě pro jejich generování (viz příloha F). Dále byla uvedena metodika zpracování výsledků a jejich diskuze a interpretace. Důraz byl přitom kladen na vypočtené hodnoty imisních koncentrací veličin  $\text{NO}_2$  a  $\text{PM}_{10}$  a jejich porovnání se stávající úrovní znečištění v zájmové lokalitě a předepsanými imisními limity. Druhá ze sekcí výpočtové části popisovala sérii pěti variantních výpočtů, které měly za úkol analyzovat vliv větrné růžice, resp. rozptylových podmínek, terénu a kapacity modelového ZEVO na výsledné tvary koncentračních profilů a vypočítané hodnoty imisních koncentrací. Stěžejní závěry, které byly ze všech provedených výpočtů vyvozeny, jsou stručně shrnuty v následujících bodech:

1. Příspěvky ročních průměrných imisních koncentrací  $\text{NO}_2$  a  $\text{PM}_{10}$  od ZEVO jsou v porovnání se stávajícími hodnotami imisního znečištění a předepsanými imisními limity zanedbatelné, viz tab. 6.2 a 6.3. Lze předpokládat, že tento závěr bude platit i pro ostatní znečišťující látky na většině území ČR
2. Vliv větrné růžice má na hodnoty průměrných ročních imisních koncentrací vysoký vliv a musí jim proto být věnována náležitá pozornost. Naopak vliv terénu na výsledné hodnoty je spíše minoritní, viz varianty 1 až 3 a porovnání koncentračních profilů na obr. 6.13. Opět lze předpokládat obecnou platnost tohoto tvrzení pro všechny znečišťující látky.
3. Kapacita uvažovaného ZEVO má na vypočítané hodnoty ročních průměrných koncentrací zásadní vliv, což bylo prokázáno výpočty variant 4 a 5 (obr. 6.15, 6.16, E.30 a E.31).

Poslední a zároveň velmi důležitá sekce praktické části byla věnována samotnému zhodnocení možností implementace získaných poznatků a použitých nástrojů do komplexní logistické úlohy, jakou je např. systém NERUDA. Lze konstatovat, že disperzní modelování jeví dobrý potenciál k tomu být vhodným nástrojem k přípravě dat pro komplexní logistické úlohy. Další možností tohoto nástroje je jej využít k sestavení aproximačních matematických funkcí, které bude možné snadněji a efektivněji implementovat do těchto úloh.

Předložená diplomová práce poskytuje úvod do problematiky disperzního modelování emisí ze stacionárních zdrojů, která jeví potenciál dalšího využití i v na první pohled nesouvisejících oblastech lidského poznání – v tomto případě odpadového hospodářství. Práce bude dále využita jako podklad pro navazující výzkumnou činnost spojenou s ekologickou optimalizací nástroje *NERUDA* na ÚPI FSI VUT v Brně.

# Seznam použitých zdrojů

- [1] Generation of waste by economic activity. In: *EU Eurostat* [online]. 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/graph.do?tab=graph&plugin=1&pcode=ten00106&language=en&toolbox=data>
- [2] Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive). *European Union: Environment* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/>
- [3] FERDAN, T. *Efektivní využití komunálních odpadů v energetice*. Brno, 2017, 91 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
- [4] ŠOMPLÁK R., PAVLAS M., KROPÁČ J., PUTNA O. a PROCHÁZKA V., *Logistic model-based tool for policy-making towards sustainable waste management*, Clean Technologies and Environmental Policy, 16, s. 1275 - 1286, 2014.
- [5] PAVLAS M. a ŠOMPLÁK R., *Predikování budoucích nákladů za zpracování odpadů s využitím nástroje NERUDA.*, Týden výzkumu a inovací pro praxi 2015 - symposium Odpadové fórum, s. 1-12, ISBN: 978-80-85990-26- 3, 2015.
- [6] NEVRLÝ, Vlastimír, Radovan ŠOMPLÁK, Jiří GREGOR, Martin PAVLAS a KLEMEŠ. Impact assessment of pollutants from waste-related operations as a feature of holistic logistic tool. *Journal of Environmental Management*. 2018, **220**, 77-86. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.05.003. ISSN 03014797. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479718305164>
- [7] REN, Xiangyu, Yue CHE, Kai YANG a Yun TAO. Risk perception and public acceptance toward a highly protested Waste-to-Energy facility. *Waste Management* [online]. 2016, 48, 528-539 [cit. 2018-05-17]. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.10.036. ISSN 0956053X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X15301847>
- [8] BRANIŠ, Martin a Iva HŮNOVÁ, ed. *Atmosféra a klima: aktuální otázky ochrany ovzduší*. V Praze: Karolinum, 2009. ISBN 978-80-246-1598-1.
- [9] *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory: Guidebook 2016* [online]. European Environment Agency, 2016 [cit. 2018-03-17]. ISBN 978-92-9213-806-6. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016>
- [10] *European Union IPPC: Best Available Techniques (BAT) Reference Document on Waste Incineration – Drafted Document* [online]. European Union, 2017 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/WI/WI\\_5\\_24-05-2017\\_web.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/WI/WI_5_24-05-2017_web.pdf)

- 
- [11] COMMITTEE ON HEALTH EFFECTS OF WASTE INCINERATION. *Waste incineration and public health*. 1. Washington, D.C.: National Academy Press, 2000. ISBN 03-090-6371-X.
- [12] Factsheet no. 313: Ambient (outdoor) air quality and health. *WHO* [online]. 2016 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>
- [13] Znečištění ovzduší na území České republiky: Grafické ročenky. *Český hydrometeorologický ústav: ISKO* [online]. 2017 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/grafroc\\_CZ.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/grafroc_CZ.html)
- [14] COLLS, Jeremy. *Air pollution*. 2nd ed. New York: Spon Press, 2002. ISBN 04-152-5564-3.
- [15] Aerosol atmosférický: definice. In: *Meteorologický slovník výkladový a terminologický* [online]. EMS 3.1. Česká meteorologická společnost, 2017 [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/>
- [16] SEINFELD, John H. a Spyros N. PANDIS. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: J. Wiley, 2006. ISBN 978-0-471-72018-8.
- [17] Size comparisons for PM particles. In: *United States Environmental Protection Agency* [online]. [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- [18] DE VISSCHER, Alex. *Air dispersion modeling: foundations and applications*. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-07859-4.
- [19] Ambient Concentrations of Particulate Matter. In: *EPA's Report on the Environment* [online]. United States Environmental Protection Agency (EPA), 2015 [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <https://cfpub.epa.gov/roe/indicator.cfm?i=9>
- [20] *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Ministerstvo životního prostředí, 2018 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <https://www.mzp.cz/>
- [21] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší. In: *Sbírka zákonů*. 2012, 69/2012. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201>
- [22] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 369/2016 Sb., kterým se mění zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů, a zákon č. 634/2004 Sb., o správních poplatcích, ve znění pozdějších předpisů. In: *Sbírka zákonů*. 2016, 147/2016. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-369>
- [23] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 73/2012 Sb., o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu, a o fluorovaných skleníkových plynech. In: *Sbírka zákonů*. 2012, 28/2012. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-73>

- [24] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečištění a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: *Sbírka zákonů*. 2012, 151/2012. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415>
- [25] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. 330/2012 Sb., o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích. In: *Sbírka zákonů*. 121/2012. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-330>
- [26] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. 83/2017 Sb., kterou se mění vyhláška č. 330/2012 Sb., o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích. In: *Sbírka zákonů*. 2017, 30/2017. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2017-83>
- [27] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. 257/2012 Sb., o předcházení emisím látek, které poškozují ozonovou vrstvu, a fluorovaných skleníkových plynů. In: *Sbírka zákonů*. 2012, 87/2012. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-257>
- [28] Air Quality – Existing Legislation. European Commission – Environment [online]. Environment Directorate-General of the European Commission, 22.09.2017 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: [http://ec.europa.eu/environment/air/quality/existing\\_leg.htm](http://ec.europa.eu/environment/air/quality/existing_leg.htm)
- [29] EU. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/50/ES ze dne 21. května 2008 o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduší pro Evropu. In: *Úřední věstník*. 2008. Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0050-20150918&from=EN>
- [30] EU. Směrnice Evropského parlamentu a Rady ze dne 15. prosince 2004 o obsahu arsenu, kadmia, rtuti, niklu a polycyklických aromatických uhlovodíků ve vnějším ovzduší. In: *Úřední věstník*. 2004. Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:02004L0107-20150918&from=EN>
- [31] EU. Směrnice Komise (EU) 2015/1480 ze dne 28. srpna 2015, kterou se mění několik příloh směrnice Evropského parlamentu a Rady 2004/107/ES a 2008/50/ES, kterými se stanoví pravidla pro referenční metody, ověřování údajů a umístění míst odběru vzorků při posuzování kvality vnějšího ovzduší. In: *Úřední věstník*. 2015. Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L1480&from=EN>
- [32] EU. Rozhodnutí Rady 97/101/ES ze dne 27. ledna 1997, kterým se zavádí vzájemná výměna informací a údajů monitorovacích sítí a jednotlivých stanic měřících znečištění vnějšího ovzduší v členských státech. In: *Úřední věstník*. 2001. Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32001D0752&from=CS>



- [33] EU. Prováděcí rozhodnutí Komise 2011/850/EU ze dne 12. prosince 2011, kterým se stanovují pravidla pro směrnice Evropského parlamentu a Rady 2004/107/ES a 2008/50/ES, pokud jde o vzájemnou výměnou informací a podávání zpráv o kvalitě vnějšího ovzduší. In: *Úřední věstník*. 2011. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011D0850&from=CS>
- [34] EU. Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1005/2009 ze dne 16. září 2009 o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu. In: *Úřední věstník*. 2009. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R1005&from=CS>
- [35] EU. Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 517/2014 ze dne 16. dubna 2014 o fluorovaných skleníkových plynech a o zrušení nařízení (ES) č. 842/2006. In: *Úřední věstník*. 2014. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&from=EN>
- [36] EU. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU ze dne 24. listopadu 2010, o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezování znečištění). In: *Úřední věstník*. 2010. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0075&from=CS>
- [37] EU. Směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 2001/81/ES ze dne 23. října 2001, o národních emisních stropích pro některé látky znečišťující ovzduší. In: *Úřední věstník*. 2001. Dostupné také z: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/5723340b-4d97-4a75-86bc-e47910295a27/language-cs>
- [38] Znečištění ovzduší na území České republiky: Tabelární ročenky. *Český hydrometeorologický ústav: ISKO* [online]. 2017 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab\\_roc/tab\\_roc\\_CZ.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/tab_roc_CZ.html)
- [39] *Věstník MŽP* [online]. Ministerstvo životního prostředí ČR, 2013, **XIII**(8) [cit. 2018-01-30]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/D4BF2B39B58E4DD3C1257BE800498CA7/\\$file/ATTGLZH6.pdf](https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/D4BF2B39B58E4DD3C1257BE800498CA7/$file/ATTGLZH6.pdf)
- [40] Autorizované osoby ke zpracování rozptylových studií. In: Ministerstvo životního prostředí [online]. MŽP ČR, 2017 [cit. 2018-02-01]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/autorizovane\\_osoby\\_rozptylove\\_studie/\\$FILE/OOO-Seznam\\_rozptylove\\_studie-20170726.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/autorizovane_osoby_rozptylove_studie/$FILE/OOO-Seznam_rozptylove_studie-20170726.pdf)
- [41] Pětileté průměrné koncentrace. *ČHMÚ* [online]. 2017 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/ozko/ozko\\_CZ.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/ozko/ozko_CZ.html)
- [42] Závod na energetické využití komunálního odpadu Chotíkov (ZEVO Chotíkov): text dokumentace. In: *Informační systém EIA* [online]. CENIA, 2011 [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: [https://portal.cenia.cz/eiasea/detail/EIA\\_PLK1595](https://portal.cenia.cz/eiasea/detail/EIA_PLK1595)

- [43] CERMAK, J. E., A.G. DAVENPORT, E.J. PLATE a D.X. VIEGAS. *Wind climate in cities*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1995. NATO ASI series, no. 277. ISBN 978-0-7923-3202-2.
- [44] JAŇOUR, Zbyněk. *Modelování mezní vrstvy atmosféry*. Praha: Karolinum, 2001. ISBN 978-802-4603-308.
- [45] LAGZI, Istvan, Robert MESZAROS, Gyorgyi GELYBO a Adam LEELOSSY. *Atmospheric Chemistry* [online]. Eötvös Loránd University Faculty of Science Institute of Geography and Earth Science, 2013 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: [http://ttktamop.elte.hu/sites/ttktamop.elte.hu/files/tananyagok/atmospheric\\_chemistry.pdf](http://ttktamop.elte.hu/sites/ttktamop.elte.hu/files/tananyagok/atmospheric_chemistry.pdf)
- [46] Chimney: photo by veeterzy. In: *Unsplash* [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <https://unsplash.com/photos/UwBrS-qRMHo>
- [47] Traffic. In: *Pxhere* [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <https://pxhere.com/es/photo/873405>
- [48] Residential area. In: *Pxhere* [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <https://pxhere.com/en/photo/676110>
- [49] *The European Monitoring and Evaluation Programme* [online]. EMEP, 2016 [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <http://www.emep.int/>
- [50] FRANCIS A. SCHIERMEIER, SVEN-ERIK GRYNING, ed. *Air Pollution Modeling and Its Application XI*. Boston, MA: Springer US, 1996. ISBN 978-146-1376-781.
- [51] TURNER, D. Bruce. *Workbook of atmospheric dispersion estimates: an introduction to dispersion modeling*. 2nd ed. Boca Raton: Lewis Publishers, 1994. ISBN 15-667-0023-X.
- [52] MODEL SYMOS. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. 2017 [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/aktualni-situace/stav-ovzdusi/modelovani-kvality-ovzdusi/model-symos>
- [53] BUBNÍK, Jiří, Josef KEDER, Jan MACOUN a Jan MAŇÁK. *SYMOS'97 Systém modelování stacionárních zdrojů: Metodická příručka* [online]. Aktualizace únor 2014. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 1998 [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zpracovani\\_rozptylovych\\_studii\\_metodika/\\$FILE/000-Metodicka\\_priruckaSYMOS97unor2014-20140320.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zpracovani_rozptylovych_studii_metodika/$FILE/000-Metodicka_priruckaSYMOS97unor2014-20140320.pdf)
- [54] SYMOS'97. *IDEA - ENVI* [online]. 2017 [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: <https://www.idea-envi.cz/symos-97.html>
- [55] VLČEK, Ondřej. Metodika SYMOS: Principy a fungování metodiky SYMOS'97. In: *Český hydrometeorologický ústav* [online]. 2017 [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/ome/modely/Metodika\\_SYMOS\\_prezentace.pdf](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/ome/modely/Metodika_SYMOS_prezentace.pdf)

- [56] Referenční koncentrace vydané SZÚ [online]. SZÚ [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: [http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/ovzdusi/dokumenty\\_zdravi/ref\\_konc\\_2003.pdf](http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/ovzdusi/dokumenty_zdravi/ref_konc_2003.pdf)
- [57] Tabelární ročenka 2016: Větrné růžice na imisních stanicích. ČHMÚ [online]. 2017 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab\\_roc/2016\\_enh/pollution\\_wrose/wrose\\_CZ.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2016_enh/pollution_wrose/wrose_CZ.html)
- [58] ČESKÁ REPUBLIKA. Nařízení vlády č. 430/2006 Sb., o stanovení geodetických referenčních systémů a státních mapových děl závazných na území státu a zásadách jejich používání. In: *Sbírka zákonů*. 2006, 138/2006. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-430>
- [59] Souřadnicové systémy. *Geoportál ČÚŽK* [online]. 2010 [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: [http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(ux3hhrkv2bjdgqnavv4t1b2w\)\)/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=sit.trans&text=souradsystemy](http://geoportal.cuzk.cz/(S(ux3hhrkv2bjdgqnavv4t1b2w))/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=sit.trans&text=souradsystemy)
- [60] Model's catalogue. European Topic Centre on Air and Climate Change [online]. *EIONET*, 2017 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20171014134324/http://pandora.meng.auth.gr/mds/stquery.php?wholedb>
- [61] Waste-to-Energy: How It Works. In: *Deltaway: Waste and Biomass Power Plant Design and Operation* [online]. Deltaway Energy [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.deltawayenergy.com/wte-tools/wte-anatomy/#/tip4>
- [62] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů. In: *Sbírka zákonů*. 2001, 71/2001. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185>
- [63] PAVLAS, Martin, Michal TOUŠ, Petr KLIMEK a Ladislav BÉBAR. Waste incineration with production of clean and reliable energy. *Clean Technologies and Environmental Policy* [online]. 2011, **13**(4), 595-605 [cit. 2018-05-19]. DOI: 10.1007/s10098-011-0353-5. ISSN 1618-954X. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10098-011-0353-5>
- [64] STEHLÍK, P. *Up-to-Date Waste-to-Energy Approach: From Idea to Industrial Application*. 1. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2016, 115 s. ISBN 978-3-319-15467-1.
- [65] SAKO Brno [online]. SAKO Brno, 2013 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.sako.cz/>
- [66] UCEKAJ, V. *Analýza možností nakládání s komunálními odpady v rámci mikroregionu*. Brno, 2010, 153 s. Disertační práce. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.

- [67] Zařízení pro energetické využití odpadu v lokalitě Mělník - ZEVO Mělník. *Informační systém EIA* [online]. 2018 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: [https://portal.cenia.cz/eiasea/detail/EIA\\_MZP476](https://portal.cenia.cz/eiasea/detail/EIA_MZP476)
- [68] *Brožura: Spalovna odpadu v Brně*. SAKO Brno, 2014. Dostupné také z: <http://www.sako.cz/upload/1444914938.pdf>
- [69] Termizo a.s. [online]. 2018 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://tmz.mvv.cz/>
- [70] *ZEVO Plzeň* [online]. 2017 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://www.zevoplzen.cz/princip>
- [71] Roční zprávy o provozu. Termizo a.s. [online]. 2018 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://tmz.mvv.cz/technologie/rocnizpravy-o-provozu/>
- [72] Topografické mapy ČÚZK. ©Český úřad zeměměřičský a katastrální. 2018. Dostupné také z: <https://geoportal.gov.cz/web/guest/map>
- [73] *Studie proveditelnosti – Integrovaný systém nakládání s komunálními odpady v Olomouckém kraji včetně možnosti energetického využití zbytkových směsných odpadů: návrhová část* [online]. FITE a.s. a Institut pro udržitelný rozvoj měst a obcí a.p.s., 2012 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: [http://www.spolecneproprerov.cz/wp-content/uploads/studie\\_proveditelnosti\\_navrhova\\_cast.pdf](http://www.spolecneproprerov.cz/wp-content/uploads/studie_proveditelnosti_navrhova_cast.pdf)
- [74] Konzultace s RNDr. Leošem Pelikánem, Centrum dopravního výzkumu. Brno, 25. 4. 2018.
- [75] Stanovení natočení větrné růžice pro souřadný systém JTSK. IDEA-ENVI [online]. 2017 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://www.idea-envi.cz/symos-natoceni.html>
- [76] Orthofoto mapy ČÚZK (aktuální). ©Český úřad zeměměřičský a katastrální. 2018. Dostupné také z: <https://geoportal.gov.cz/web/guest/map>
- [77] BEDNÁŘ, Jan, Josef BRECHLER a Vladimír FUKA. Modelování atmosférické turbulence. *Vesmír* [online]. VESMÍR, 2012, 91(9) [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2012/cislo-9/modelovani-atmosfericke-turbulence.html>
- [78] Pětileté roční průměry NO<sub>2</sub> 2012-2016 v Olomouckém kraji. In: ČHMÚ [online]. 2017 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/ozko/16petileti/png/NO2/16NO2\\_regM.png](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/ozko/16petileti/png/NO2/16NO2_regM.png)
- [79] Praha a Středočeský kraj – území intenzivních vztahů. Český statistický úřad [online]. ČSÚ [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: [https://www.czso.cz/csu/czso/101362-09-2000\\_\\_2008-5\\_hodnoceni\\_vztahu\\_mezi\\_prahou\\_a\\_stredocesky\\_krajem\\_na\\_zaklade\\_vybranych\\_problemu](https://www.czso.cz/csu/czso/101362-09-2000__2008-5_hodnoceni_vztahu_mezi_prahou_a_stredocesky_krajem_na_zaklade_vybranych_problemu)

# Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka	Význam
AV ČR	Akademie věd České republiky
BAT	Best Available Techniques
BREF	Best Available Techniques Reference Document
CFD	Computational Fluid Dynamics
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
ČÚZK	Český úřadu zeměměřičský a katastrální
ČSÚ	Český statistický úřad
CZT	centrální zásobování teplem
EU	Evropská unie
EEA	Evropská agentura pro životní prostředí
EIA	Environmental Impact Assessment
EIONET	European Topic Centre on Air and Climate Change
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
ETRS	Evropský terestický referenční systém
ETEX	European Long Range Tracer Experiment
EVO	energetické využití odpadů
FSI	Fakulta strojního inženýrství
GIS	geografický informační systém
GNU	General Public Licence
GUI	Graphical User Interface
GWP	Global Warming Potential
HRSG	Heat Recovery Steam Generator
ISKO	Informační systém kvality ovzduší
KVET	kombinovaná výroba elektřiny a tepla
LCA	Life Cycle Assessment
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
NP	normální podmínky
PM	tuhé znečišťující látky
POPs	perzistentní organické látky
REZZO	Registr emisí a zdrojů znečištění ovzduší
S-42/83	Souřadnicový systém 1942

S-JTSK	Souřadnicový systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
SKO	směsný komunální odpad
SYMOS	Systém modelování stacionárních zdrojů
TZL	tuhé znečišťující látky
ÚPI	Ústav procesního inženýrství
VBA	Visual Basic for Applications
VOCs	organické těkavé látky
VUT	Vysoké učení technické
WGS84	Světový geodetický systém 1984
WHO	Světová zdravotnická organizace
WtE	waste-to-energy
WR	větrná růžice
ZEVO	zařízení energetického využití odpadu
ZL	znečišťující látka

Symbol	Význam	Jednotka
$c_i$	koncentrace znečišťující látky $i$ v daném objemu	$[\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$
$c_r$	průměrná roční koncentrace znečišťující látky	$[\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$
$\langle c_i \rangle$	průměrná koncentrace znečišťující látky $i$	$[\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$
$\langle c(\mathbf{x}, t) \rangle$	průměrná koncentrace znečišťující látky	$[\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$
$D_i$	koeficient molární difuze znečišťující látky $i$ ve vzduchu	
$D_v$	vnitřní průměr komína	[m]
$h$	efektivní výška komína	[m]
$H$	výška koruny komína nebo konce výduchu	[m]
$K_{jj}$	koeficient turbulentní difuze	
$l$	výpočtová výška	[m]
$M$	množství znečišťující látky	$[\text{g} \cdot \text{s}^{-1}]$
$M_{\text{NO}}$	molární hmotnost NO	$[\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}]$
$M_{\text{NO}_2}$	molární hmotnost NO <sub>2</sub>	$[\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}]$
$\text{NO}_{2, \text{ekv.}}$	množství NO v ekvivalentu NO <sub>2</sub>	$[\text{g} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\text{NO}_{\text{sku}}$	množství NO	$[\text{g} \cdot \text{s}^{-1}]$
$P_d$	denní využití zdroje	$[\text{h} \cdot \text{d}^{-1}]$
$P_r$	roční provozní doba	[h]
$Q(\mathbf{x}, t   \mathbf{x}', t')$	hustota pravděpodobnosti (funkce), která vyjadřuje, že se částice z polohy $\mathbf{x}'$ v čase $t'$ přesune do polohy $\mathbf{x}$ , kterou zaujme v čase $t$	

$R_i$	člen charakterizující vznik polutantu $i$ chemickou reakcí (závislý na teplotě média $T$ )	
$S_i$	zdrojový člen charakterizující vznik látek $i$ v místě $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$ a v čase $t$	
$S(\mathbf{x}', t')$	zdrojový člen	
$t$	čas	[s]
$t_s$	teplota spalin	[°C]
$T(z)$	teplota vzduchu závisící na výšce	[°C]
$u_{10}$	rychlost ve výšce 10 m nad zemí	[m · s <sup>-1</sup> ]
$u_j$	složka rychlosti vzduchu v $j$ -tém směru	[m · s <sup>-1</sup> ]
$\bar{u}_j$	časově průměrná složka rychlosti vzduchu v $j$ -tém směru	[m · s <sup>-1</sup> ]
$V$	objemový tok spalin	[m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> ]
$V_s$	objemový tok spalin za NP	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> ]
$w_0$	výstupní rychlost spalin	[m · s <sup>-1</sup> ]
$\mathbf{x}$	vektor uvažované polohy	
$x_r$	souřadnice referenčních bodů	[m]
$x_z$	poloha zdroje	[m]
$y_r$	souřadnice referenčních bodů	[m]
$y_z$	poloha zdroje	[m]
$z$	výška	[m]
$z_r$	výška terénu v místě referenčního bodu	[m]
$z_z$	nadmořská výška terénu v místě zdroje	[m]
$\alpha$	relativní roční využití	[-]
$\gamma$	vertikální teplotní gradient	[°C na 100 m]
$\Delta c_{r,rel}$	relativní odchylka průměrné roční koncentrace	[%]
$\Delta H$	výška vznosu vlečky	[m]
$\rho_c$	hustota prachových částic	[kg · m <sup>-3</sup> ]
$\sigma_y, \sigma_z$	koeficienty disperze	[m]
$\Psi(\mathbf{x}', t')$	hustota pravděpodobnosti, že částice byla v čase $t'$ v počáteční poloze $\mathbf{x}'$	
$\Psi_i(\mathbf{x}, t)$	hustotami pravděpodobnosti $i$ -té částice	

# Seznam obrázků

1.1	Životní cyklus znečišťujících látek. . . . .	12
1.2	Porovnání velikostí základních frakcí PM s tloušťkou lidského vlasu. Převzato z [17] a upraveno. . . . .	17
2.1	Vývoj znečišťování ovzduší v ČR mezi lety 1990 až 2015. Převzato z [13] a upraveno. . . . .	23
2.2	Vyznačení oblastí s překročenými imisními limity pro ochranu zdraví vybraných skupin znečišťujících látek v roce 2016. Převzato z [13] a upraveno. . . . .	24
2.3	Zóny a aglomerace pro posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění ovzduší dle zákona o ochraně ovzduší, v platném znění. Převzato z [13] a upraveno. . . . .	25
2.4	Příklad kartografického výstupu rozptylové studie ZEVO Chotíkov. Dostupné z [42]. . . . .	30
3.1	Kontext modelování v procesu, analýze a řešení znečištění ovzduší. . . . .	31
3.2	Vlastnosti matematických modelů znečištění ovzduší. . . . .	33
3.3	(a) Eulerovský a (b) Lagrangeovský přístup k popisu turbuletní difuze. . . . .	34
3.4	Klasifikace emisních zdrojů dle jejich uspořádání. . . . .	38
3.5	Gaussovský vlečkový model. Převzato z [51] a upraveno. . . . .	42
3.6	Rozdíl mezi klasickým vlečkovým a puff modelem. . . . .	44
5.1	Vzorové schéma ZEVO. Převzato z [61] a upraveno. . . . .	54
5.2	Zvolené umístění modelového zdroje zakreslené na podkladu topografické mapy. Mapové podklady dostupné z [72]. . . . .	59
6.1	Grafické prostředí použitého programu SYMOS'97. V levé části lze vidět strukturu standardního projektu. . . . .	61
6.2	Klasifikace území ČR dle vlivu povětrnostních podmínek [74]. . . . .	63
6.3	Osm základních směrů, ve kterých byly zjišťovány imisní koncentrace. Vyznačený osový kříž indikuje použitý souřadnicový systém. . . . .	64
6.4	Zájmová oblast s vyznačenou polohou zdroje. . . . .	65
6.5	Referenční body výpočtu vyznačené na podkladu topografické mapy. Mapové podklady dostupné z [72]. . . . .	67
6.6	Vzorový graf zobrazující imisní koncentrace vybrané znečišťující látky (ZL) vypočítané v referenčních bodech v závislosti na vzdálenosti od zdroje znečištění pro zvolený směr. . . . .	68
6.7	Koncentrační profil NO <sub>2</sub> , směr 135°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt. . . . .	69
6.8	Porovnání vypočítaných imisních koncentrací NO <sub>2</sub> s pozadovými imisními koncentracemi v zájmové oblasti a imisním limitem. . . . .	70
6.9	Koncentrační profil PM <sub>10</sub> , směr 135°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt . . . . .	71
6.10	NO <sub>2</sub> , směr 135°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, bez terénu. . . . .	73
6.11	NO <sub>2</sub> , směr 135°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt, bez terénu. . . . .	74
6.12	NO <sub>2</sub> , směr 135°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, s terénem. . . . .	76
6.13	Porovnání výsledků výpočtů variant 1 až 3 a modelového výpočtu pro veličinu NO <sub>2</sub> . . . . .	76
6.14	NO <sub>2</sub> , směr 135°, větrná růžice WR31, zdroj 200 kt, s terénem. . . . .	77



6.15	Procentuální srovnání vypočítaných hodnot imisních koncentrací NO <sub>2</sub> ve směru 135° pro varianty kapacit 50, 100, 150, 200, 250, 300 a 400 kt. . . . .	78
6.16	Procentuální srovnání vypočítaných hodnot imisních koncentrací PM <sub>10</sub> ve směru 135° pro varianty kapacit 50, 100, 150, 200, 250, 300 a 400 kt. . . . .	79
C.1	Zvolené umístění modelového zdroje zakreslené na podkladové orthofoto mapě. Mapové podklady dostupné z [76]. . . . .	107
D.1	(a) Stabilitní a (b) rychlostní větrná růžice 31 dle klasifikace na obr. 6.2 pro období dat 2008–2012. . . . .	109
D.2	Referenční body výpočtu vyznačené na podkladové orthofoto mapě. Mapové podklady z [76]. . . . .	111
D.3	Koncentrační profil NO <sub>2</sub> , směr 0°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt. . . . .	112
D.4	Koncentrační profil NO <sub>2</sub> , směr 45°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt. . . . .	112
D.5	Koncentrační profil NO <sub>2</sub> , směr 90°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt. . . . .	113
D.6	Koncentrační profil NO <sub>2</sub> , směr 180°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt. . . . .	113
D.7	Koncentrační profil NO <sub>2</sub> , směr 225°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt. . . . .	114
D.8	Koncentrační profil NO <sub>2</sub> , směr 270°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt. . . . .	114
D.9	Koncentrační profil NO <sub>2</sub> , směr 315°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt. . . . .	115
D.10	Mapa pětiletých průměrných imisních koncentrací NO <sub>2</sub> pro období 2012-2016 (Olomoucký kraj). Červený obrys přibližně ohraničuje zájmovou oblast. Dostupné z [41]. . . . .	116
D.11	Mapa pětiletých průměrných imisních koncentrací NO <sub>2</sub> pro období 2012-2016 (Zlínský kraj). Červený obrys přibližně ohraničuje zájmovou oblast. Dostupné z [41]. . . . .	117
E.1	(a) Stabilitní a (b) rychlostní rovnoměrná větrná růžice. . . . .	118
E.2	NO <sub>2</sub> , směr 0°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, bez terénu. . . . .	120
E.3	NO <sub>2</sub> , směr 45°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, bez terénu. . . . .	120
E.4	NO <sub>2</sub> , směr 90°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, bez terénu. . . . .	121
E.5	NO <sub>2</sub> , směr 180°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, bez terénu. . . . .	121
E.6	NO <sub>2</sub> , směr 225°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, bez terénu. . . . .	122
E.7	NO <sub>2</sub> , směr 270°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, bez terénu. . . . .	122
E.8	NO <sub>2</sub> , směr 315°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, bez terénu. . . . .	123
E.9	NO <sub>2</sub> , směr 0°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt, bez terénu. . . . .	124
E.10	NO <sub>2</sub> , směr 45°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt, bez terénu. . . . .	124
E.11	NO <sub>2</sub> , směr 90°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt, bez terénu. . . . .	125
E.12	NO <sub>2</sub> , směr 180°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt, bez terénu. . . . .	125
E.13	NO <sub>2</sub> , směr 225°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt, bez terénu. . . . .	126
E.14	NO <sub>2</sub> , směr 270°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt, bez terénu. . . . .	126
E.15	NO <sub>2</sub> , směr 315°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt, bez terénu. . . . .	127
E.16	NO <sub>2</sub> , směr 0°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, s terénem. . . . .	128
E.17	NO <sub>2</sub> , směr 45°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, s terénem. . . . .	128
E.18	NO <sub>2</sub> , směr 90°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, s terénem. . . . .	129
E.19	NO <sub>2</sub> , směr 180°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, s terénem. . . . .	129
E.20	NO <sub>2</sub> , směr 225°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, s terénem. . . . .	130
E.21	NO <sub>2</sub> , směr 270°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, s terénem. . . . .	130
E.22	NO <sub>2</sub> , směr 315°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, s terénem. . . . .	131

---

E.23	NO <sub>2</sub> , směr 0°, větrná růžice WR31, zdroj 200 kt, s terénem. . . . .	132
E.24	NO <sub>2</sub> , směr 45°, větrná růžice WR31, zdroj 200 kt, s terénem. . . . .	132
E.25	NO <sub>2</sub> , směr 90°, větrná růžice WR31, zdroj 200 kt, s terénem. . . . .	133
E.26	NO <sub>2</sub> , směr 180°, větrná růžice WR31, zdroj 200 kt, s terénem. . . . .	133
E.27	NO <sub>2</sub> , směr 225°, větrná růžice WR31, zdroj 200 kt, s terénem. . . . .	134
E.28	NO <sub>2</sub> , směr 270°, větrná růžice WR31, zdroj 200 kt, s terénem. . . . .	134
E.29	NO <sub>2</sub> , směr 315°, větrná růžice WR31, zdroj 200 kt, s terénem. . . . .	135
E.30	Porovnání vypočítaných hodnot příspěvků imisních koncentrací NO <sub>2</sub> od všech předepsaných kapacit ZEVO společně s požadovými imisními koncentracemi v zájmové oblasti a imisním limitem. . . . .	136
E.31	Porovnání vypočítaných hodnot příspěvků imisních koncentrací PM <sub>10</sub> od všech předepsaných kapacit ZEVO společně s požadovými imisními koncentracemi v zájmové oblasti a imisním limitem. . . . .	137

# Seznam tabulek

1.1	Klasifikace emisních zdrojů dle různých hledisek [8]. . . . .	13
1.2	Typická skladba emisí produkovaných ZEVO [9], [10]. . . . .	15
2.1	Referenční metody pro modelování znečištění ovzduší [25]. . . . .	27
4.1	Vstupní údaje o bodovém zdroji. . . . .	48
4.2	Definice tříd rychlosti větru. Převzato z [53]. . . . .	49
4.3	Stabilitní klasifikace podle Bubníka a Koldovského. Převzato z [53]. . . . .	50
4.4	Rozmezí rychlostí větru a výskyt jednotlivých tříd rychlosti větru pro jednotlivé třídy stability ovzduší. Převzato z [53]. . . . .	51
5.1	Přehled ZEVO zpracovávajících SKO na území ČR. . . . .	56
5.2	Navržené parametry modelové spalovny 100 kt. . . . .	57
5.3	Emise vypouštěné z modelové spalovny 100 kt. . . . .	58
6.1	Seznam veličin zadaných do výpočtu. . . . .	63
6.2	Vliv příspěvků imisních koncentrací NO <sub>2</sub> od modelové spalovny 100 kt. . . . .	70
6.3	Vliv příspěvků imisních koncentrací PM <sub>10</sub> od modelové spalovny 100 kt. . . . .	71
6.4	Varianty výpočtu. . . . .	72
A.1	Rozdělení zdrojů znečišťování podle způsobu sledování emisí v databázi REZZO [13]. . . . .	101
A.2	Imisní limity pro ochranu zdraví dle zákona o ochraně ovzduší, v platném znění a vyhlášky č. 330/2012 Sb. [21], [25]. . . . .	102
A.3	Doporučené hodnoty imisních koncentrací znečišťujících látek pro ochranu lidského zdraví dle WHO [12]. . . . .	103
A.4	Emisní limity pro znečišťující látky zjišťované primárně kontinuálním měřením dle přílohy č. 4 vyhlášky 415/2012 Sb. [24]. . . . .	104
A.5	Emisní limity pro znečišťující látky zjišťované primárně jednorázovým měřením dle přílohy č. 4 vyhlášky 415/2012 Sb. [24]. . . . .	104
B.1	Přehled disperzních modelů/software (zkráceno). . . . .	105
C.1	Přehled parametrů a příslušných emisí jednotlivých kapacit ZEVO. . . . .	108
D.1	Tabelární vyjádření větrné růžice 31 dle klasifikace na obr. 6.2 pro období dat 2008–2012. . . . .	110
E.1	Tabelární vyjádření rovnoměrné větrné růžice. . . . .	119

# Seznam příloh

Příloha A

Příloha B

Příloha C

Příloha D

Příloha E

Příloha F

# Příloha A

**Tabulka A.1:** Rozdělení zdrojů znečišťování podle způsobu sledování emisí v databázi REZZO [13].

---

druh zdroje	vyjmenované stacionární zdroje	stacionární zdroje	nevyjmenované stacionární zdroje	stacionární zdroje	mobilní zdroje
kategorie	REZZO 1, REZZO 2	REZZO 3	REZZO 3	REZZO 3	REZZO 4
obsahuje	stacionární zařízení ke spalování paliv o celkovém tepelném příkonu vyšším než 0,3 MW, spalovny odpadů, jiné zdroje (technologické spalovací procesy, průmyslové výroby, apod.)	stacionární zařízení ke spalování paliv o celkovém tepelném příkonu do 0,3 MW, nevyjmenované technologické procesy (použití rozpouštědel v domácnostech apod., stavební práce, zemědělské činnosti)	stacionární zařízení ke spalování paliv o celkovém tepelném příkonu do 0,3 MW, nevyjmenované technologické procesy (použití rozpouštědel v domácnostech apod., stavební práce, zemědělské činnosti)	stacionární zařízení ke spalování paliv o celkovém tepelném příkonu do 0,3 MW, nevyjmenované technologické procesy (použití rozpouštědel v domácnostech apod., stavební práce, zemědělské činnosti)	silniční, železniční, lodní a letecká doprava osob a přeprava nákladu, otěry brzd a pneumatik, abraze vozovky a odpary z palivových systémů benzínových vozidel, provoz nesilničních strojů a mechanismů, údržba zeleně a lesů, apod.
způsob evidence	sledované jednotlivě	sledované hromadně	sledované hromadně	sledované hromadně	sledované hromadně

---

**Tabulka A.2:** Imisní limity pro ochranu zdraví dle zákona o ochraně ovzduší, v platném znění a vyhlášky č. 330/2012 Sb. [21], [25].

znečišťující látka	doba průměrování	dolní mez pro posuzování [ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	horní mez pro posuzování [ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	hodnota imisního limitu [ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
SO <sub>2</sub>	1 hodina	–	–	350 (max. 24 x za rok)
	24 hodin	50 (max. 3 x za rok)	75 (max. 3 x za rok)	125 (max. 3 x za rok)
NO <sub>2</sub>	1 hodina	100 (max. 18 x za rok)	140 (max. 18 x za rok)	200 (max. 18 x za rok)
	kalendářní rok	26	32	40
CO	max. denní 8h průměr	5000	7000	10000
benzen	kalendářní rok	2	3,5	5
PM <sub>10</sub>	24 hodin	25 (max. 35 x za rok)	35 (max. 35 x za rok)	50 (max. 35 x za rok)
	kalendářní rok	20	28	40
PM <sub>2,5</sub>	kalendářní rok	12	17	25
Pb	kalendářní rok	0,25	0,35	0,5
As	kalendářní rok	0,0024	0,0036	0,006
Cd	kalendářní rok	0,002	0,003	0,005
Ni	kalendářní rok	0,010	0,014	0,020
benzo[a]pyren	kalendářní rok	0,0004	0,0006	0,001
O <sub>3</sub>	max. denní 8h průměr	–	–	120 (25 x v průměru za 3 roky)

Údaje v závorkách udávají maximální počty překročení uvedených limitů za dané časové období. Maximální denní osmihodinová průměrná koncentrace se stanoví posouzením osmihodinových klouzavých průměrů počítaných z hodinových údajů a aktualizovaných každou hodinu.

**Tabulka A.3:** Doporučené hodnoty imisních koncentrací znečišťujících látek pro ochranu lidského zdraví dle WHO [12].

znečišťující látka	doba průměrování	směrná hodnota [ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
SO <sub>2</sub>	10 minut	500
	24 hodin	20
NO <sub>2</sub>	1 hodina	200
	1 kalendářní rok	40
CO	1 hodina	30000
	8 hodin	10000
benzen	–	N/A
PM <sub>10</sub>	24 hodin	50
	1 kalendářní rok	20
PM <sub>2,5</sub>	24 hodin	25
	1 kalendářní rok	10
Pb	1 kalendářní rok	0,5
As	–	N/A
Cd	–	0,005
Ni	–	N/A
benzo[a]pyren	–	N/A
O <sub>3</sub>	8 hodin	100

Pro látky, které jsou karcinogenní pro lidský organismus, je směrná hodnota uvedena jako N/A, protože nelze stanovit žádnou bezpečnou úroveň koncentrace.

**Tabulka A.4:** Emisní limity pro znečišťující látky zjišťované primárně kontinuálním měřením dle přílohy č. 4 vyhlášky 415/2012 Sb. [24].

znečišťující látka	denní průměr [mg · m <sup>-3</sup> ]	půlhodinový průměr [mg · m <sup>-3</sup> ] (97%)	půlhodinový průměr [mg · m <sup>-3</sup> ] (100%)
SO <sub>2</sub>	50	50	200
NO <sub>x</sub> jako NO <sub>2</sub>	200	200	400
TZL	10	10	30
TOC	10	10	20
HCl	10	10	60
HF	1	2	4
CO	50	–	100

**Tabulka A.5:** Emisní limity pro znečišťující látky zjišťované primárně jednorázovým měřením dle přílohy č. 4 vyhlášky 415/2012 Sb. [24].

znečišťující látka	emisní limit	jednotka
Cd+Tl a jejich sloučeniny	0,05	[mg · m <sup>-3</sup> ]
Hg a její sloučeniny	0,05	[mg · m <sup>-3</sup> ]
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V a jejich sloučeniny	0,5	[mg · m <sup>-3</sup> ]
PCDD/F	0,1	[ng <sub>TEQ</sub> · m <sup>-3</sup> ]



# Příloha B

**Tabulka B.1:** Přehled disperzních modelů/software (zkráceno).

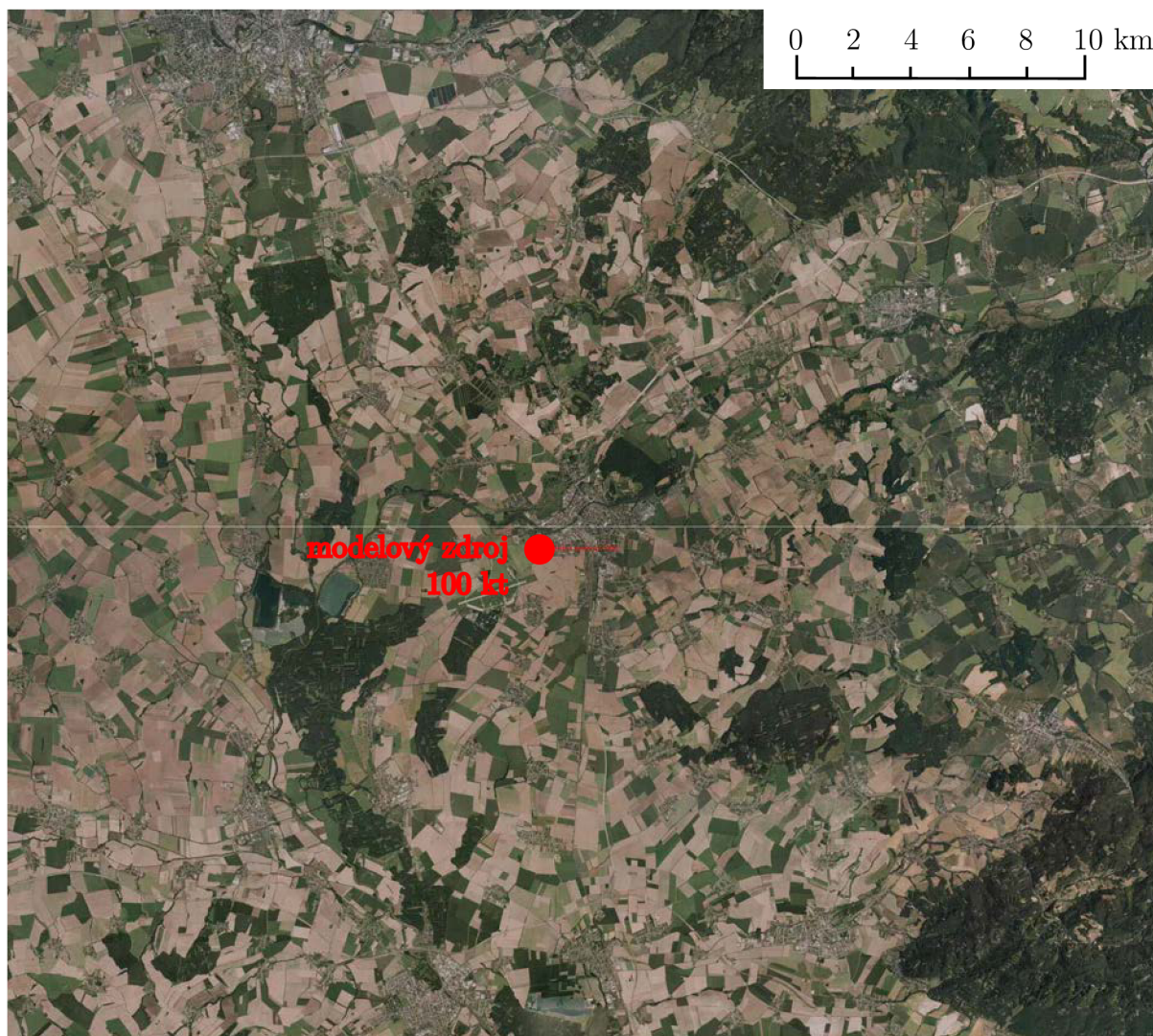
název	země <sup>1</sup>	typ	organizace	verze	cena [EUR]	GUI <sup>2</sup>	základní informace
SYMOS'97	CZE	Gaussovský	IDEA- -ENVI.s.r.o.	2013	2290	•	plynné a prachové částice bodové, liniové a plošné zdroje (i velký počet) do 100 km od zdroje, městské a venkovské oblasti, větrné růžice dle Bubníka a Koldovského, hustá síť referenčních bodů, vhodné pro generování kartografických výsledků, částečně depozice a transformace NO <sub>2</sub>
AEM	CZE	Gaussovský	AEM s.r.o.	2015	1340	•	bodové, liniové a plošné zdroje (i velký počet) do 100 km od zdroje, městské a venkovské oblasti, větrné růžice dle Bubníka a Koldovského pro libovolné oblasti v síti referenčních bodů, hustá síť referenčních bodů, vhodné pro generování kartografických výsledků (do GIS)
AERMOD	USA	Gaussovský	U.S. EPA	16216	zdarma		ustálený stav, stacionární bodové, plošné, objemové zdroje (i velký počet), přízemní, vyvýšené zdroje, výpočet do cca 50 km, městské a venkovské oblasti, efekty zástavby (budov), downwash, chemické transformace pro ozon, suchá/mokrá depozice plyných i pevných látek
ADMS5	GBR	Gaussovský	Cambridge Environmental Research Consultants	5.2.2	1600 (roční re- search verze)	•	stacionární bodové, liniové, plošné, objemové zdroje (do 300 celkem) transformace NO <sub>2</sub> , reakce NO a ozonu, čpavek, radioaktivní rozpad, puff model, depozice, efekty zástavby

název	země <sup>1</sup>	typ	organizace	verze	cena [EUR]	GUI <sup>2</sup>	základní informace
AUSTAL2000	DEU		Lagrangeovský UBA	2.6.11	zdarma (GNU)	•	bodový, liniový, plošný, objemový zdroj, komplexní terén efekty zástavby, depozice, chemické reakce prvního řádu
GRAL	AUT		Lagrangeovský University of Graz	18.1	zdarma	•	bodové, liniové, plošné zdroje a dopravní tunely, efekty zástavby, downwash, komplexní terén, depozice, sedimentace, z chemismu pouze konverze NO <sub>2</sub>

<sup>1</sup> kód země dle ISO-3

<sup>2</sup> grafické uživatelské prostředí (angl. Graphical User Interface)

# Příloha C

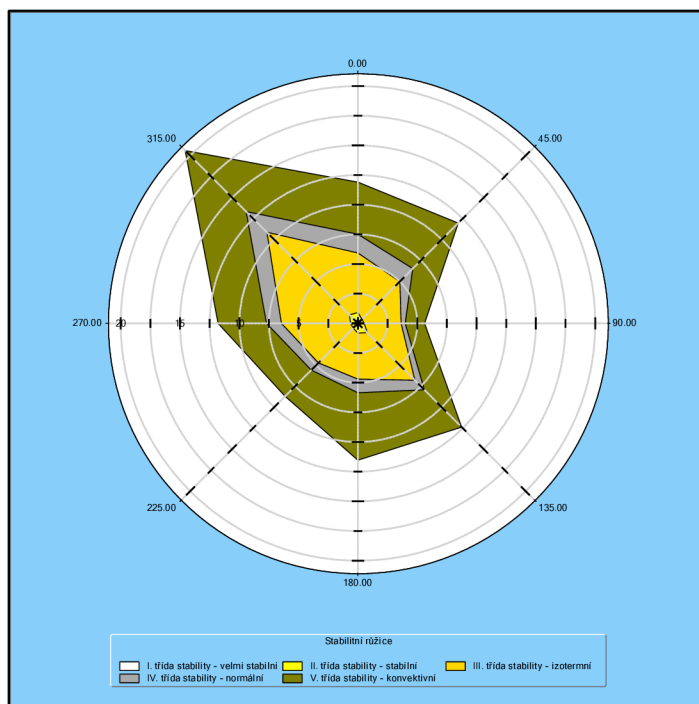


Obrázek C.1: Zvolené umístění modelového zdroje zakreslené na podkladové orthofoto mapě. Mapové podklady dostupné z [76].

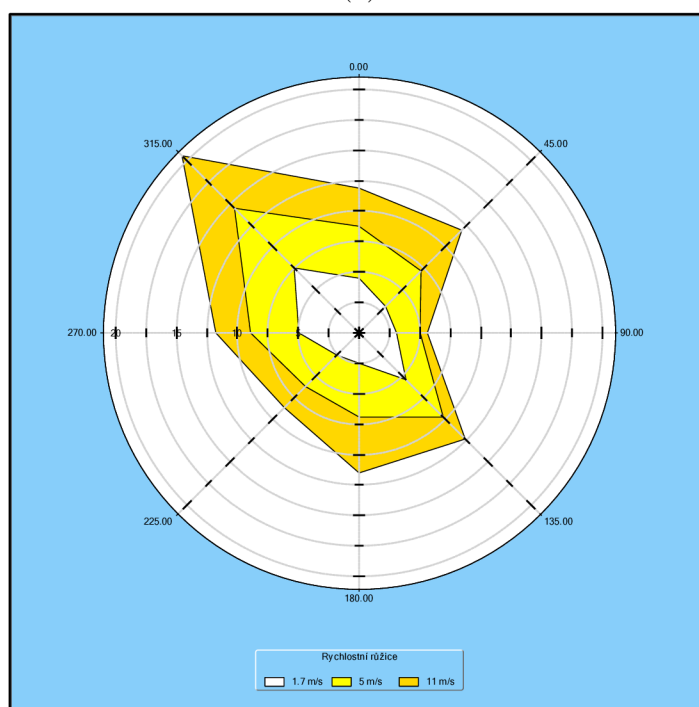
**Tabulka C.1:** Přehled parametrů a příslušných emisí jednotlivých kapacit ZEVO.

veličina/zkratka	jednotka	hodnoty						
název varianty	–	50 kt	100 kt	150 kt	200 kt	250 kt	300 kt	400 kt
kapacita $k$	[kt · r <sup>-1</sup> ]	50	100	150	200	250	300	400
objemový tok spalin za NP $V_s$	[m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> ]	8,87	17,73	26,60	35,46	44,33	53,19	70,92
objemový tok spalin $V$	[m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> ]	10,81	21,63	32,44	43,25	54,06	64,88	86,50
průměr komína $D_v$	[m]	1,17	1,66	2,03	2,35	2,62	2,87	3,32
SO <sub>2</sub>	[g · s <sup>-1</sup> ]	0,02083	0,04167	0,06250	0,08333	0,10417	0,14583	0,16667
NO <sub>x</sub> jako NO <sub>2</sub>	[g · s <sup>-1</sup> ]	1,26419	2,52838	3,79257	5,05675	6,32094	8,84932	10,11351
TZL (PM <sub>10</sub> )	[g · s <sup>-1</sup> ]	0,00098	0,00195	0,00293	0,00390	0,00488	0,00683	0,00780
TOC	[g · s <sup>-1</sup> ]	0,00044	0,00089	0,00133	0,00177	0,00222	0,00310	0,00355
HCl	[g · s <sup>-1</sup> ]	0,00018	0,00035	0,00053	0,00071	0,00089	0,00124	0,00142
HF	[g · s <sup>-1</sup> ]	0,00274	0,00548	0,00822	0,01096	0,01370	0,01918	0,02191
CO	[g · s <sup>-1</sup> ]	0,09575	0,19149	0,28724	0,38298	0,47873	0,67022	0,76596
Hg	[g · s <sup>-1</sup> ]	0,00006	0,00013	0,00019	0,00026	0,00032	0,00045	0,00051
Cd+Tl	[g · s <sup>-1</sup> ]	0,00004	0,00008	0,00012	0,00016	0,00020	0,00028	0,00032
Sb+As+Pb+Cr+ Co+Cu+Ni+Mn+V	[g · s <sup>-1</sup> ]	0,00050	0,00099	0,00149	0,00199	0,00248	0,00348	0,00397
PCDD/F	[g · s <sup>-1</sup> ]	3,10E-10	6,21E-10	9,31E-10	1,24E-09	1,55E-09	2,17E-09	2,48E-09

# Příloha D



(a)

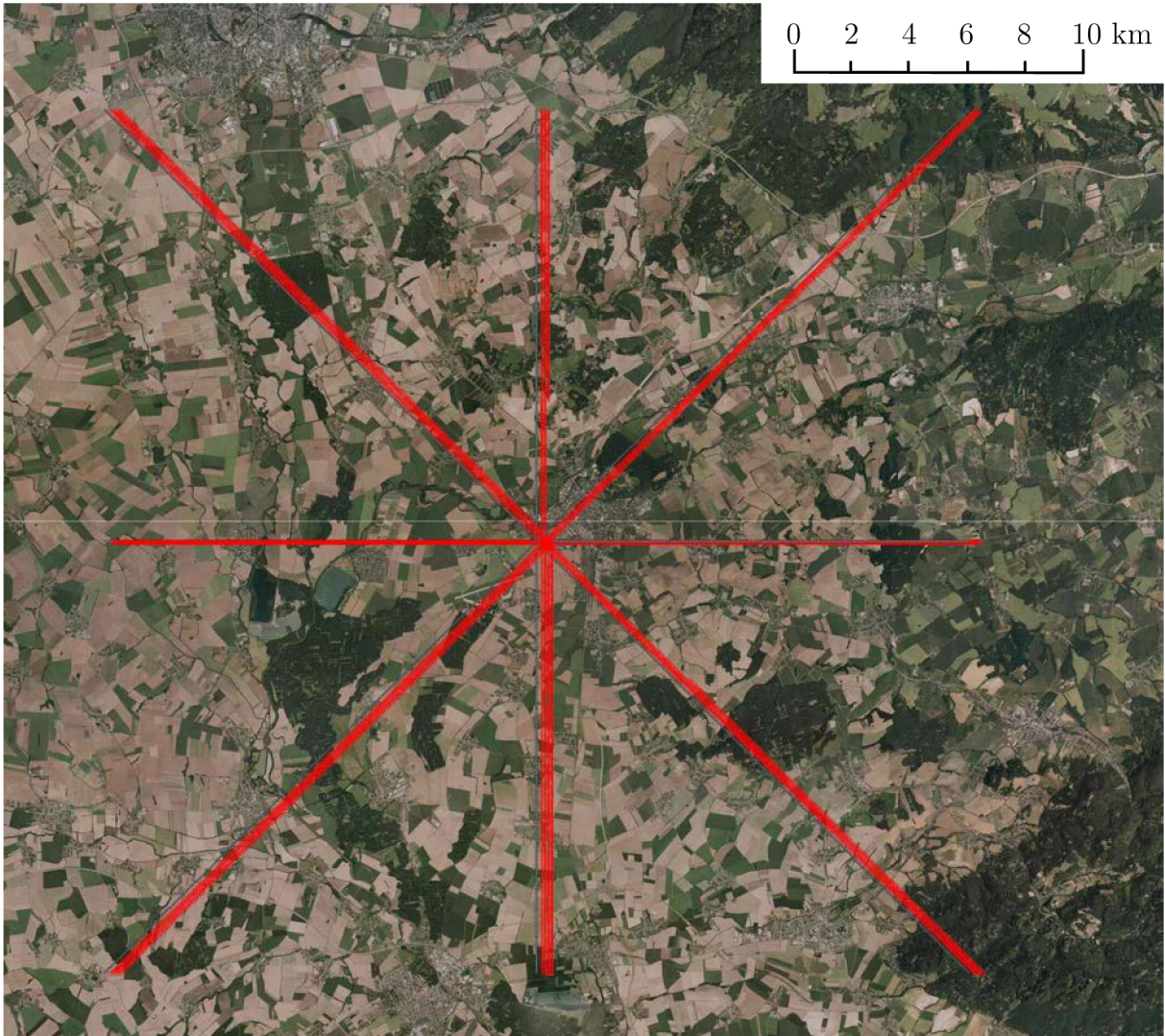


(b)

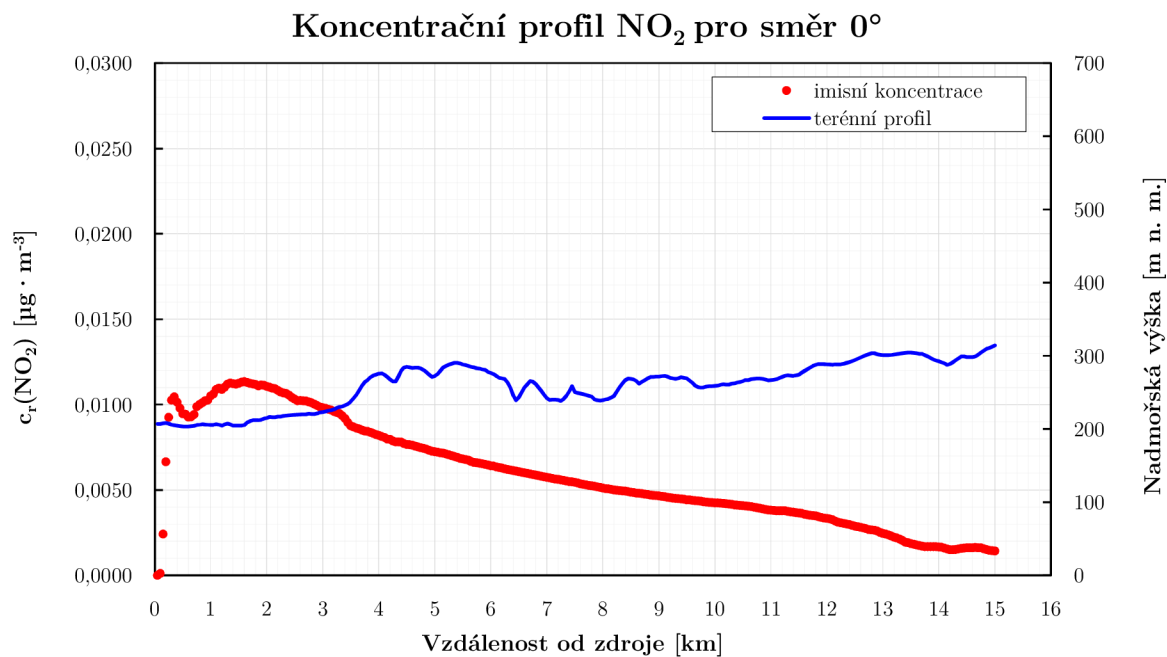
Obrázek D.1: (a) Stabilitní a (b) rychlostní větrná růžice 31 dle klasifikace na obr. 6.2 pro období dat 2008–2012.

**Tabulka D.1:** Tabelární vyjádření větrné růžice 31 dle klasifikace na obr. 6.2 pro období dat 2008–2012.

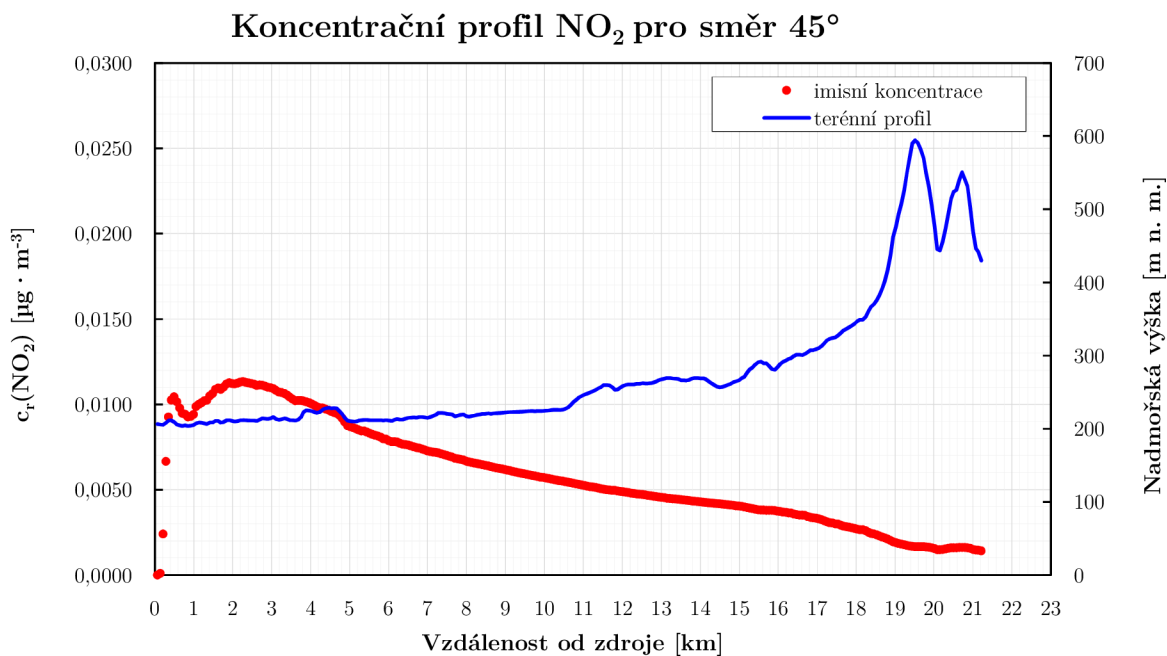
Směr:	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	CALM	Součet
I. třída stability - velmi stabilní										
1,70 m/s	0,07	0,06	0,03	0,04	0,05	0,08	0,06	0,10	0,10	0,59
5,00 m/s	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11,00 m/s	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
II. třída stability - stabilní										
1,70 m/s	0,83	0,39	0,49	1,02	0,67	0,44	0,55	0,89	1,41	6,69
5,00 m/s	0,01	0,02	0,01	0,05	0,10	0,05	0,01	0,02	0,00	0,27
11,00 m/s	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
III. třída stability - izotermní										
1,70 m/s	3,56	2,62	2,55	4,31	1,40	2,02	4,12	6,12	2,86	29,56
5,00 m/s	1,46	1,90	0,55	1,35	2,47	2,12	1,70	3,71	0,00	15,26
11,00 m/s	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
IV. třída stability - normální										
1,70 m/s	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,02	0,05	0,07	0,00	0,20
5,00 m/s	0,61	0,32	0,24	0,64	0,18	0,20	0,44	0,70	0,21	3,54
11,00 m/s	0,96	1,21	0,10	0,49	0,91	0,63	0,77	1,70	0,00	6,77
V. třída stability - konvektivní										
1,70 m/s	0,03	0,00	0,00	0,08	0,32	0,02	0,17	0,36	0,00	0,98
5,00 m/s	2,19	1,89	1,15	2,28	1,67	1,28	1,82	2,51	1,12	15,91
11,00 m/s	2,17	3,52	0,49	2,08	3,68	1,82	2,08	4,39	0,00	20,23
Celková růžice										
1,70 m/s	4,49	3,07	3,07	5,45	2,50	2,58	4,95	7,54	4,37	38,02
5,00 m/s	4,27	4,13	1,95	4,32	4,42	3,65	3,97	6,94	1,33	34,98
11,00 m/s	3,13	4,73	0,59	2,57	4,59	2,45	2,85	6,09	0,00	27,00
součet	11,89	11,93	5,61	12,34	11,51	8,68	11,77	20,57	5,70	<b>100</b>



**Obrázek D.2:** Referenční body výpočtu vyznačené na podkladové orthofoto mapě.  
Mapové podklady z [76].

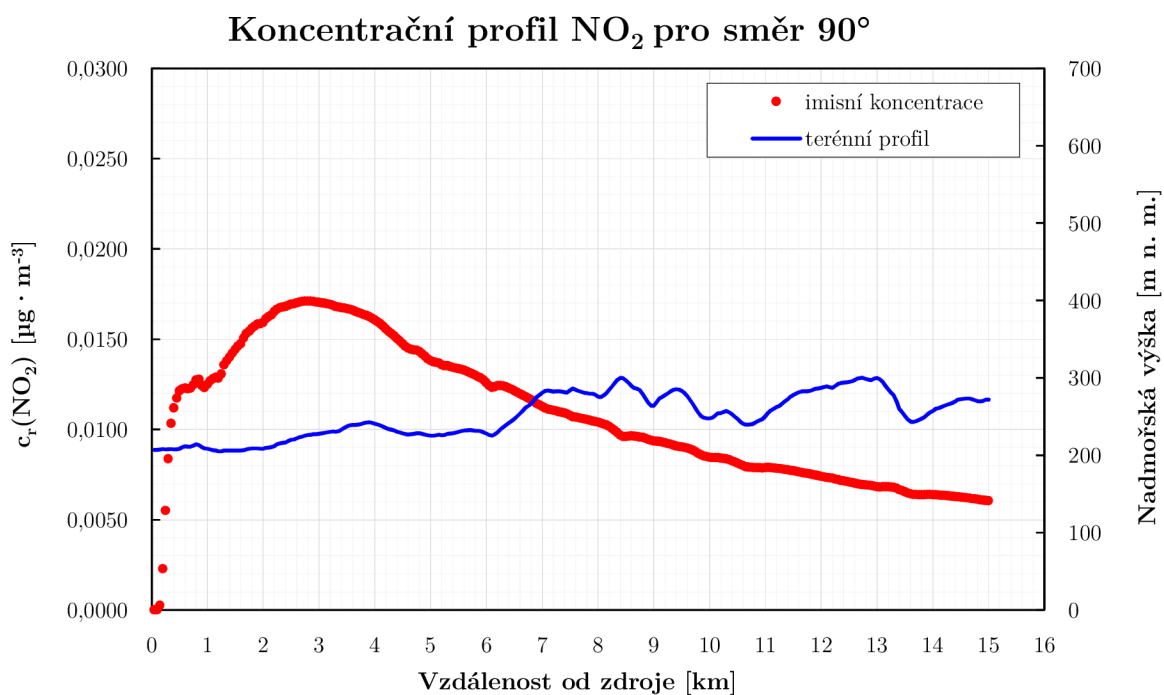


Obrázek D.3: Koncentrační profil NO<sub>2</sub>, směr 0°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt.

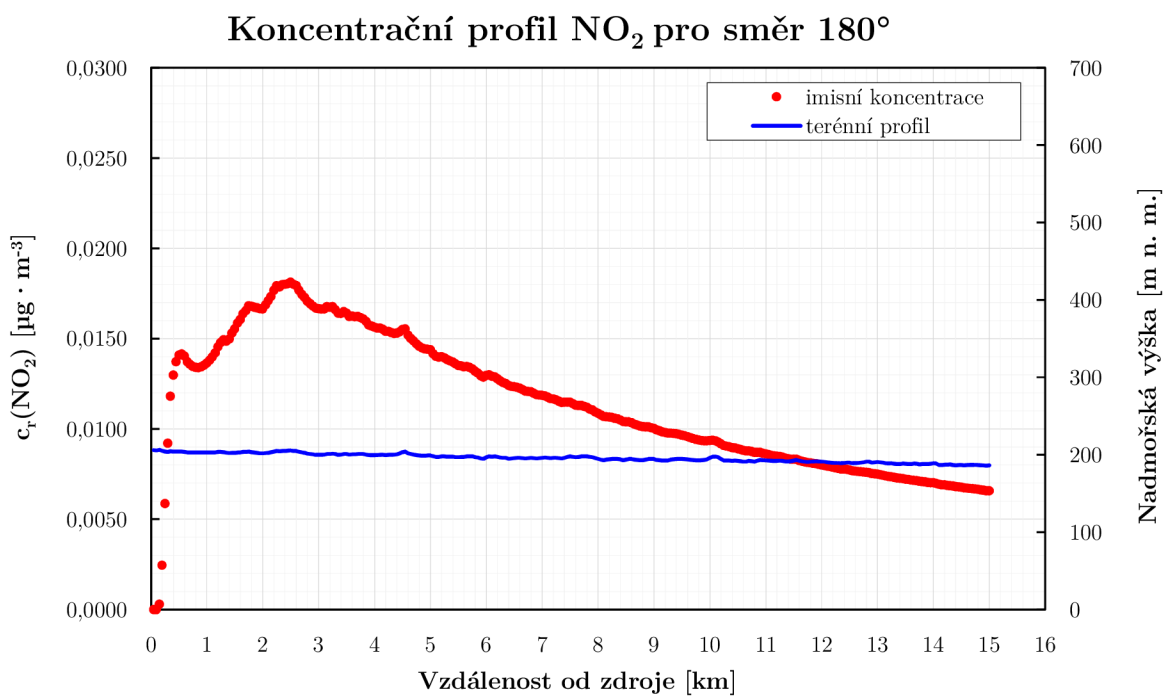


Obrázek D.4: Koncentrační profil NO<sub>2</sub>, směr 45°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt.

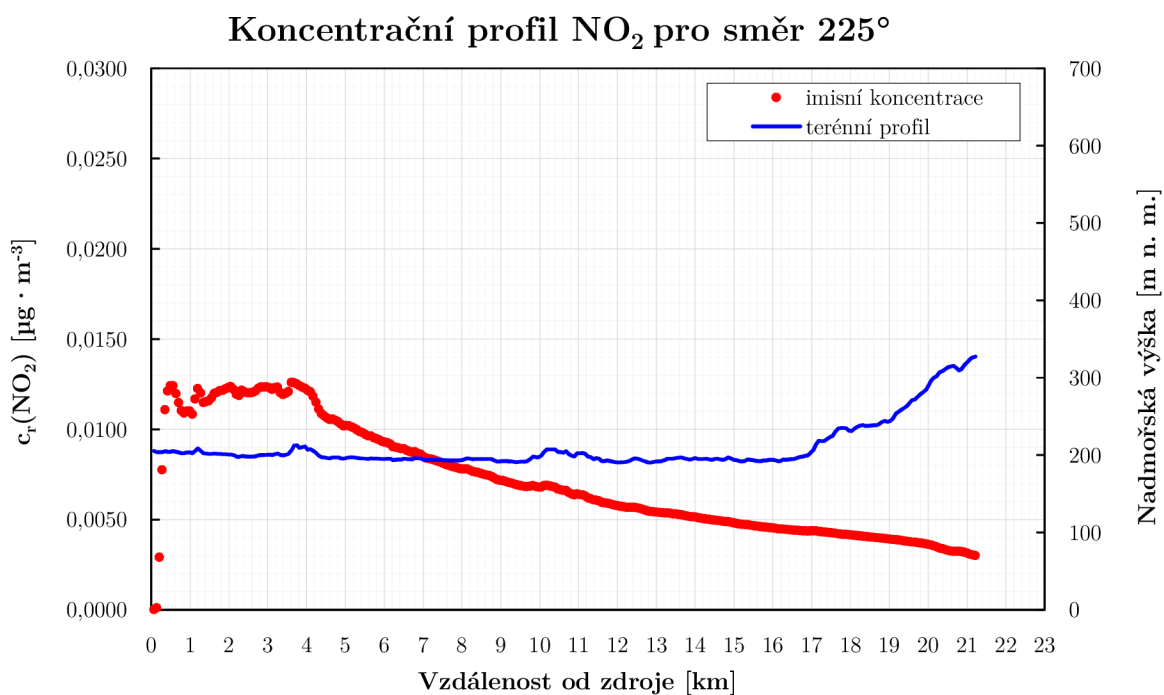




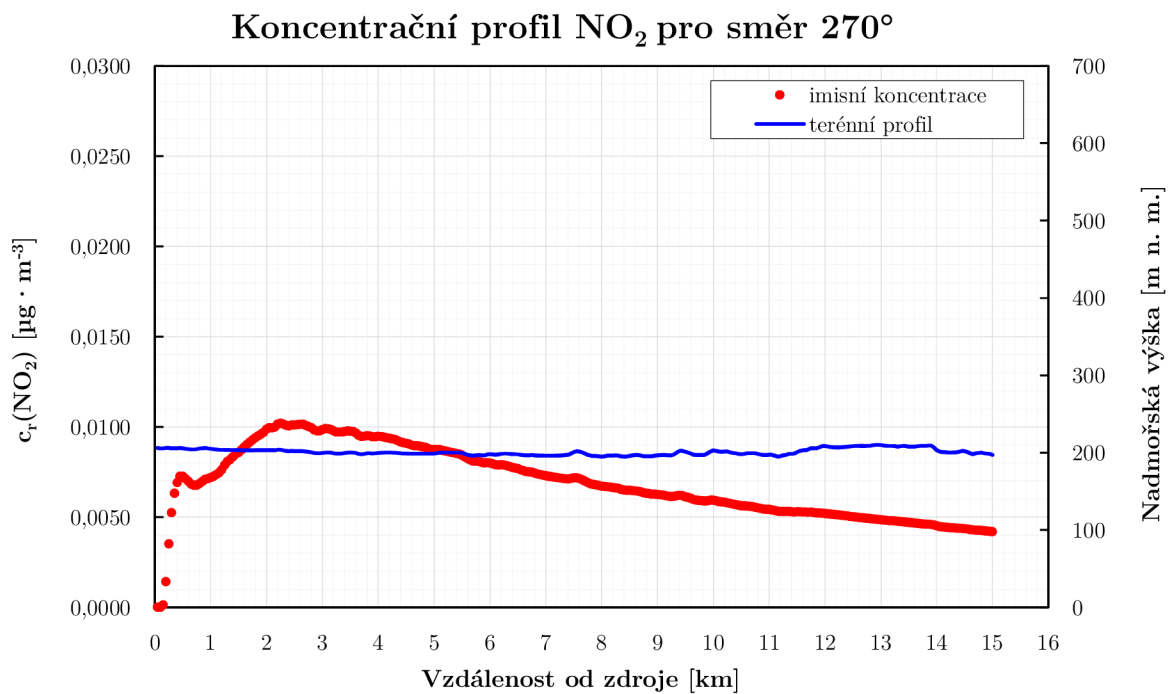
Obrázek D.5: Koncentrační profil NO<sub>2</sub>, směr 90°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt.



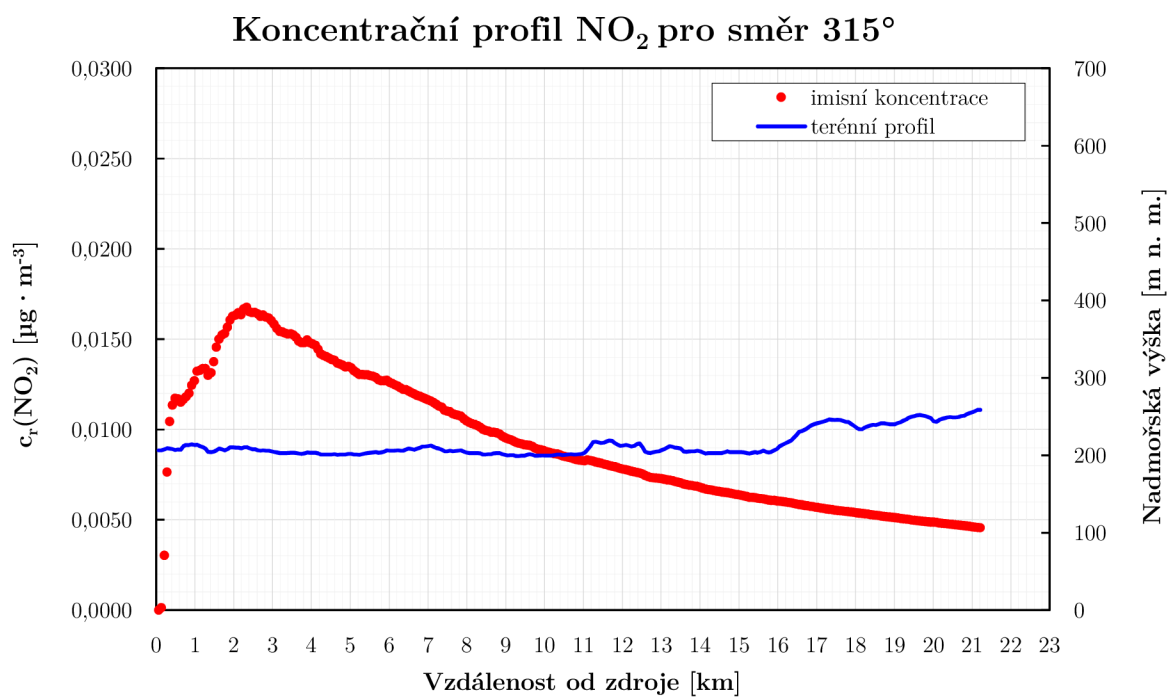
Obrázek D.6: Koncentrační profil NO<sub>2</sub>, směr 180°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt.



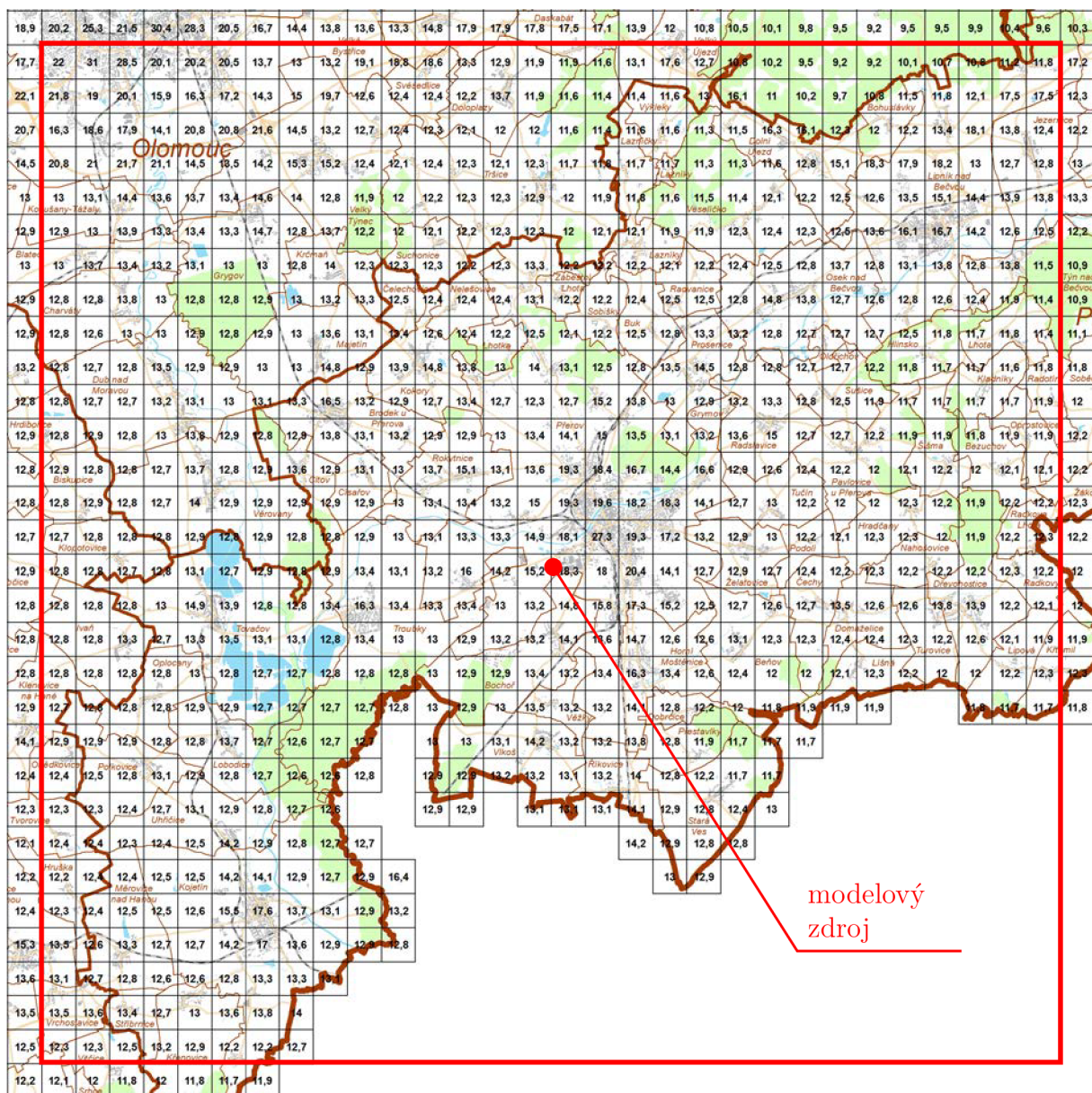
Obrázek D.7: Koncentrační profil NO<sub>2</sub>, směr 225°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt.



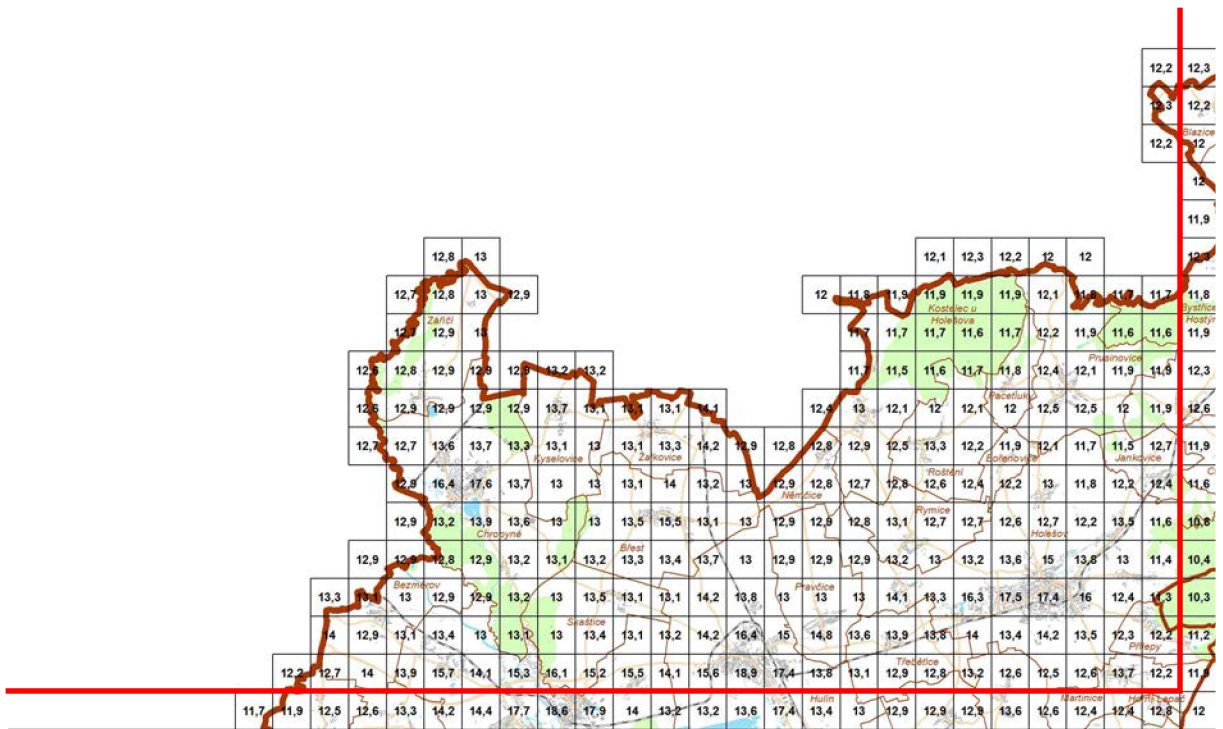
Obrázek D.8: Koncentrační profil NO<sub>2</sub>, směr 270°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt.



**Obrázek D.9:** Koncentrační profil NO<sub>2</sub>, směr 315°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt.

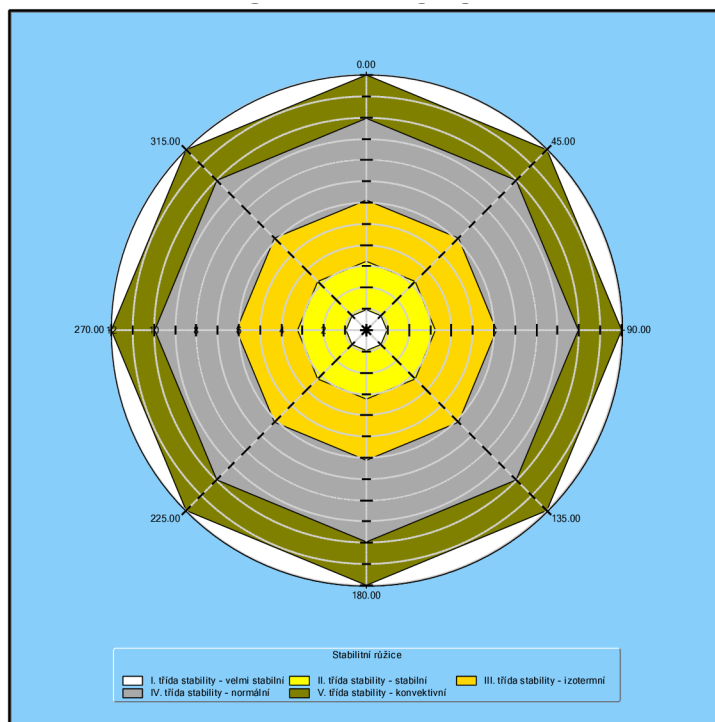


Obrázek D.10: Mapa pětiletých průměrných imisních koncentrací NO<sub>2</sub> pro období 2012-2016 (Olomoucký kraj). Červený obrys přibližně ohraničuje zájmovou oblast. Dostupné z [41].

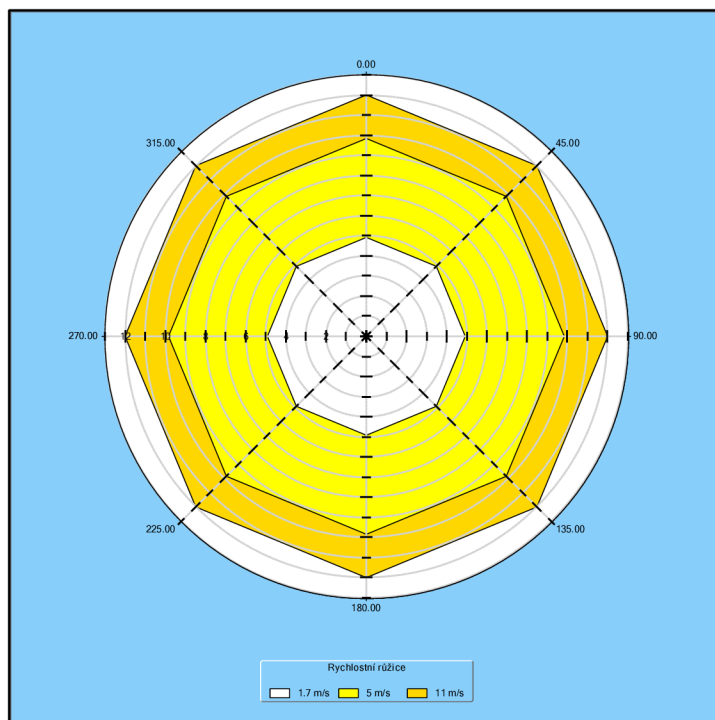


**Obrázek D.11:** Mapa pětiletých průměrných imisních koncentrací NO<sub>2</sub> pro období 2012-2016 (Zlínský kraj). Červený obrys přibližně ohraničuje zájmovou oblast. Dostupné z [41].

# Příloha E



(a)

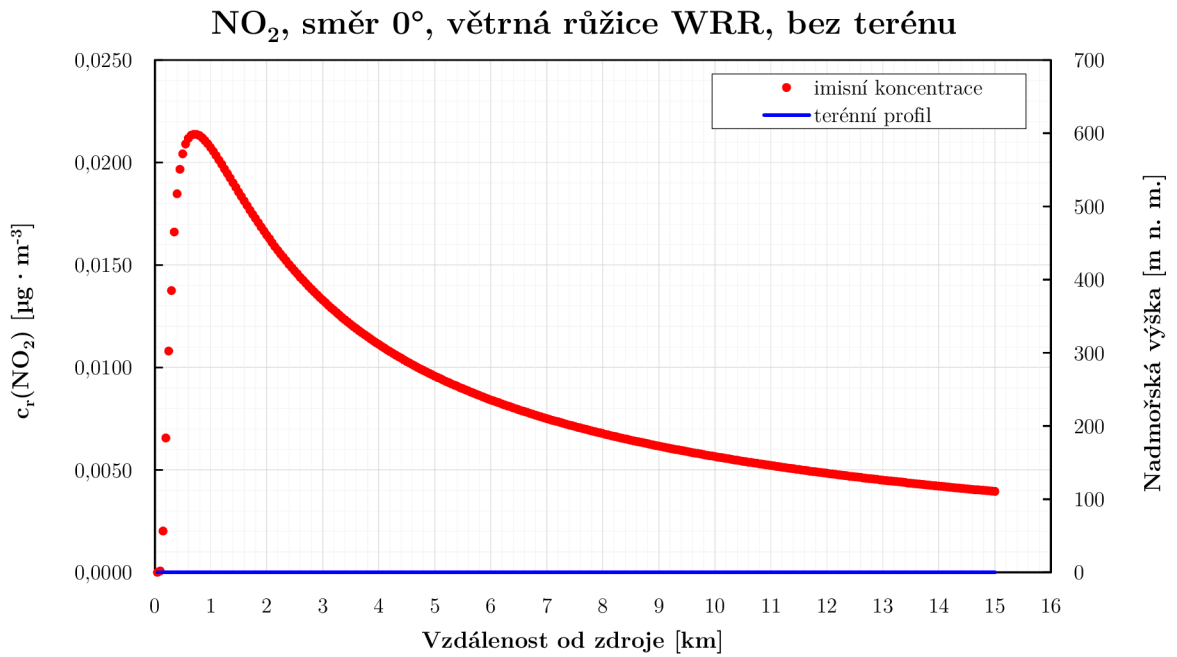


(b)

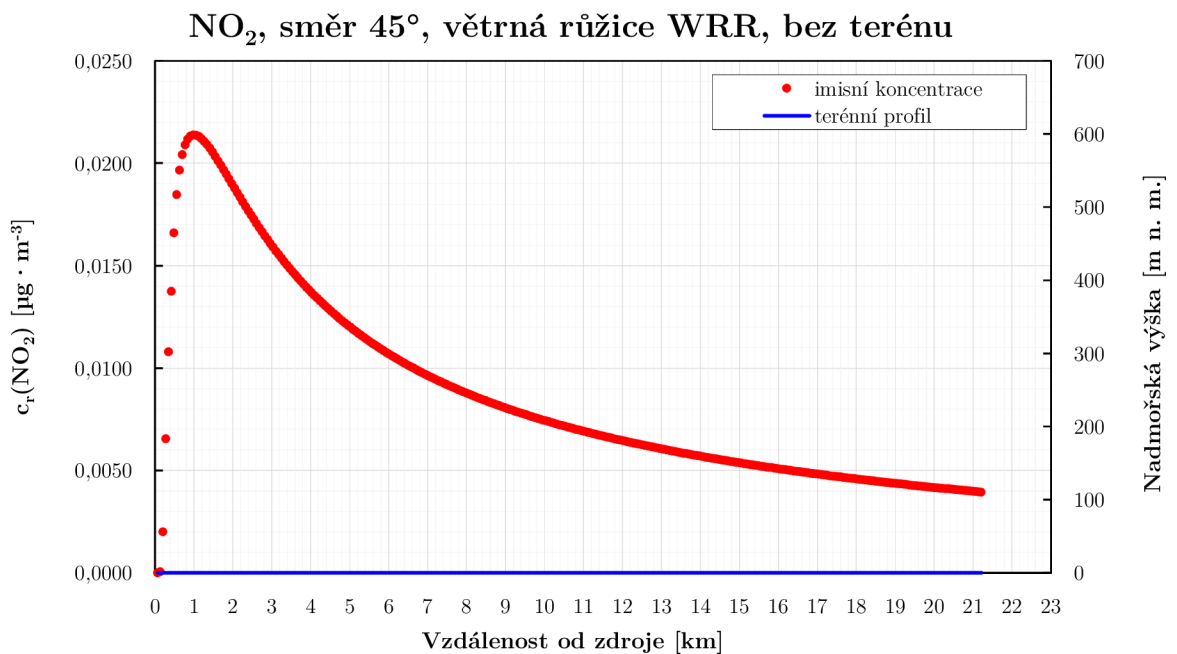
Obrázek E.1: (a) Stabilitní a (b) rychlostní rovnoměrná větrná růžice.

**Tabulka E.1:** Tabelární vyjádření rovnoměrné větrné růžice.

Směr:	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	CALM	Součet
I. třída stability - velmi stabilní										
1,70 m/s	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,80	8,48
5,00 m/s	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11,00 m/s	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
II. třída stability - stabilní										
1,70 m/s	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,76	7,48
5,00 m/s	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	0,00	11,52
11,00 m/s	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
III. třída stability - izotermní										
1,70 m/s	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	0,88	10,48
5,00 m/s	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	0,00	13,44
11,00 m/s	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
IV. třída stability - normální										
1,70 m/s	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,00	7,68
5,00 m/s	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	0,88	10,48
11,00 m/s	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	0,00	13,44
V. třída stability - konvektivní										
1,70 m/s	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,00	7,68
5,00 m/s	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,68	5,48
11,00 m/s	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,00	3,84
Celková růžice										
1,70 m/s	4,92	4,92	4,92	4,92	4,92	4,92	4,92	4,92	2,44	41,80
5,00 m/s	4,92	4,92	4,92	4,92	4,92	4,92	4,92	4,92	1,56	40,92
11,00 m/s	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	0,00	17,28
součet	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	4,00	<b>100,00</b>

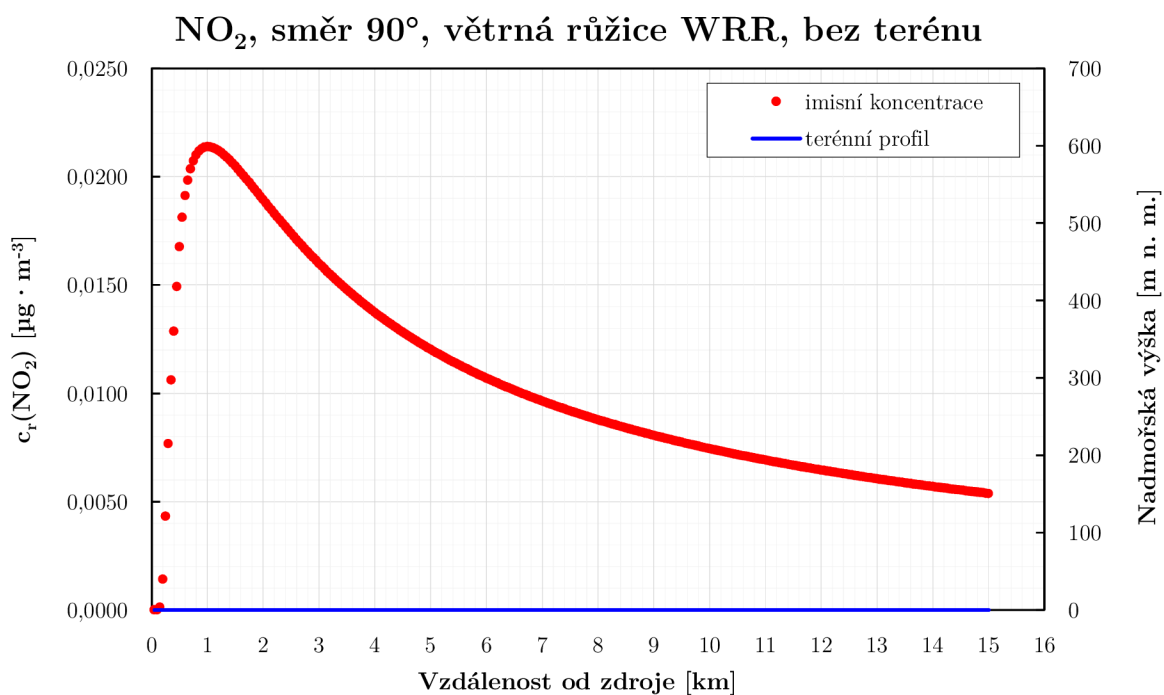


**Obrázek E.2:** NO<sub>2</sub>, směr 0°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, bez terénu.

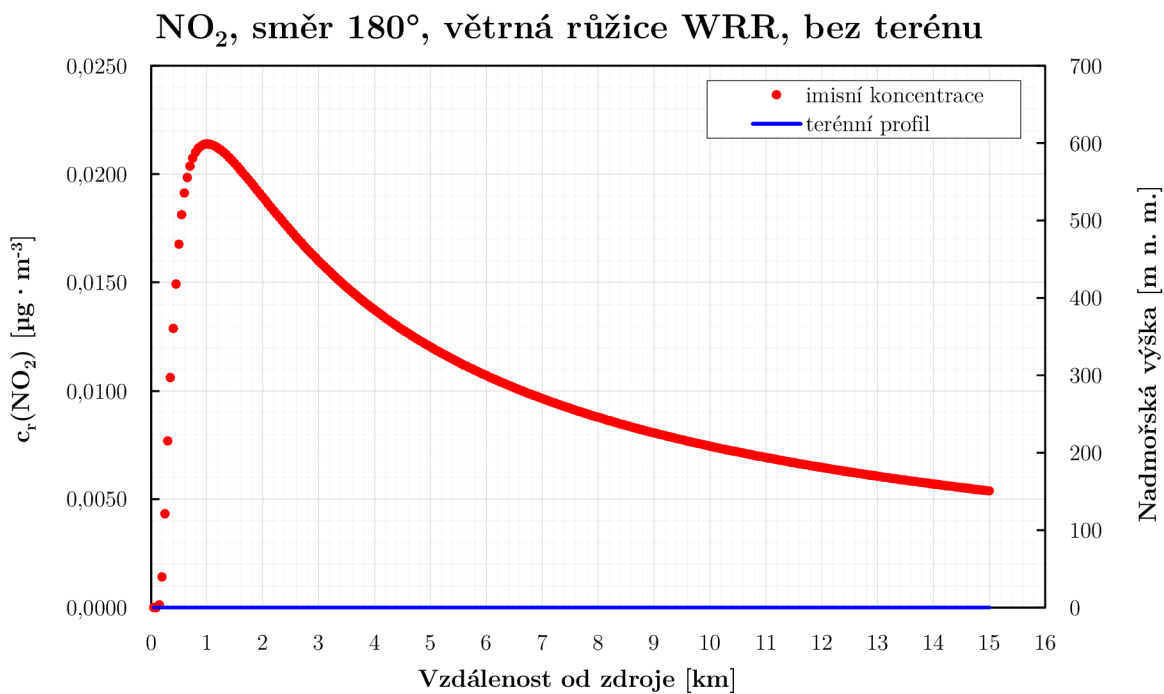


**Obrázek E.3:** NO<sub>2</sub>, směr 45°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, bez terénu.

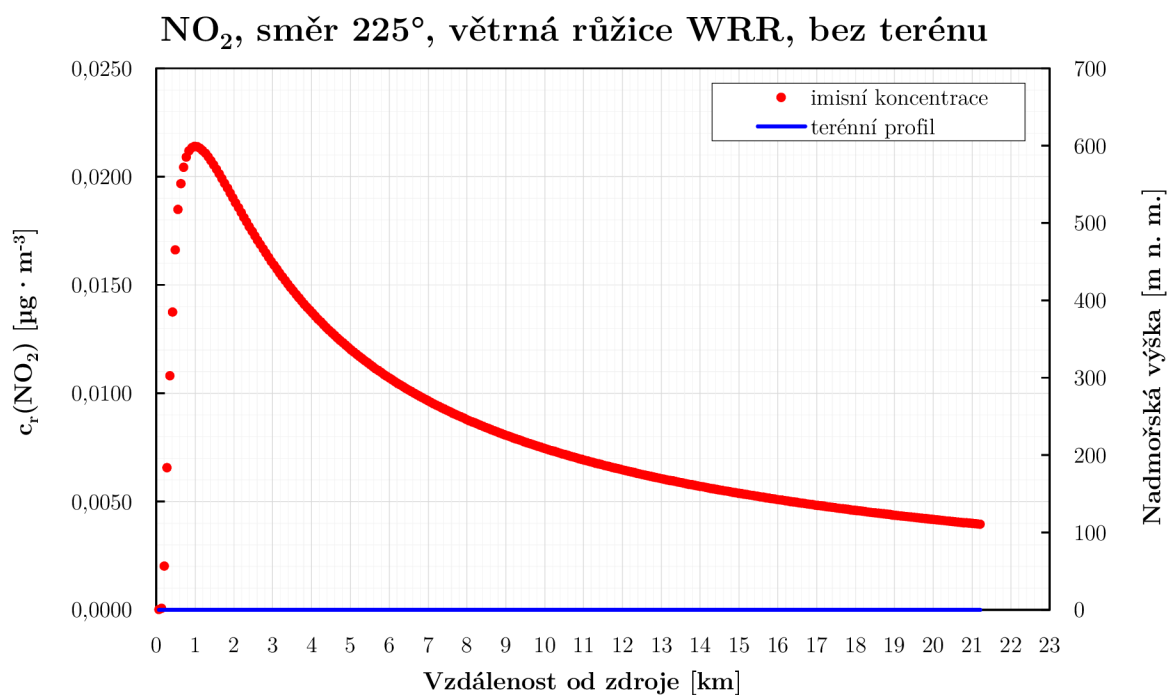




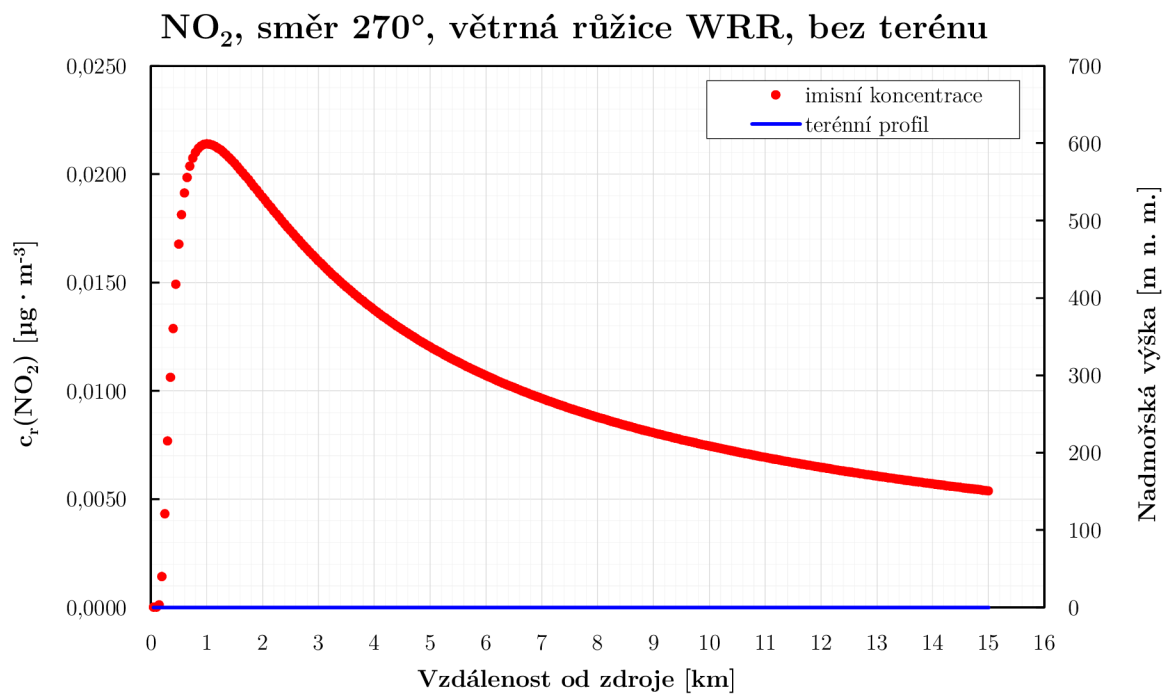
**Obrázek E.4:** NO<sub>2</sub>, směr 90°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, bez terénu.



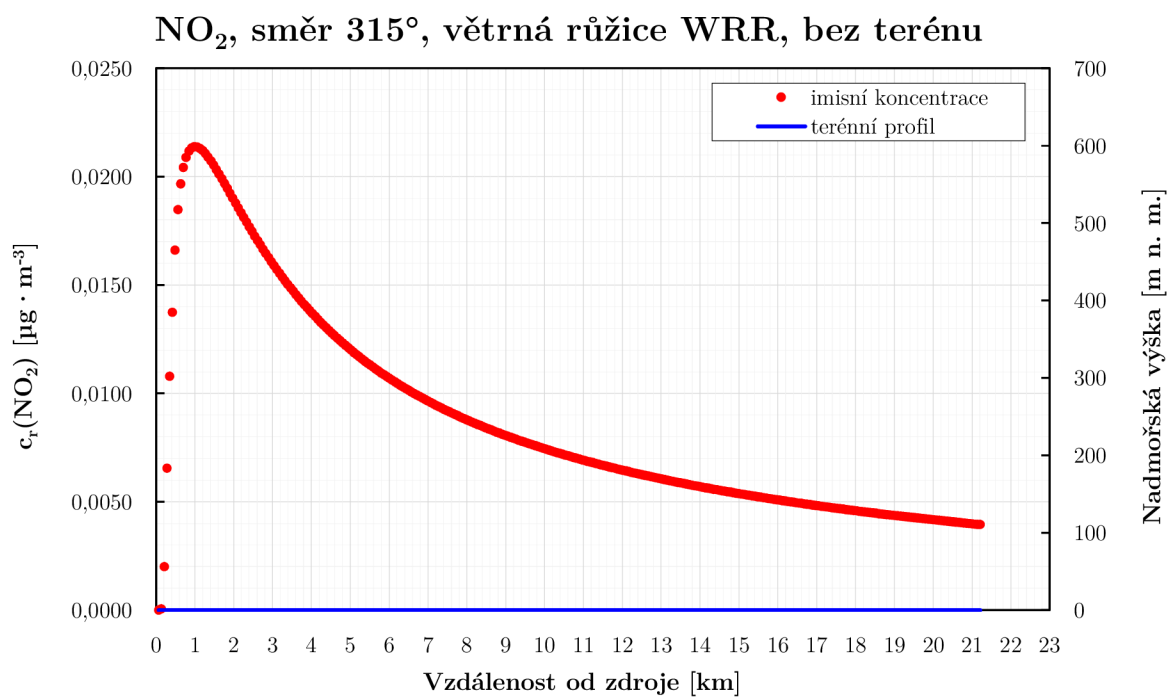
**Obrázek E.5:** NO<sub>2</sub>, směr 180°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, bez terénu.



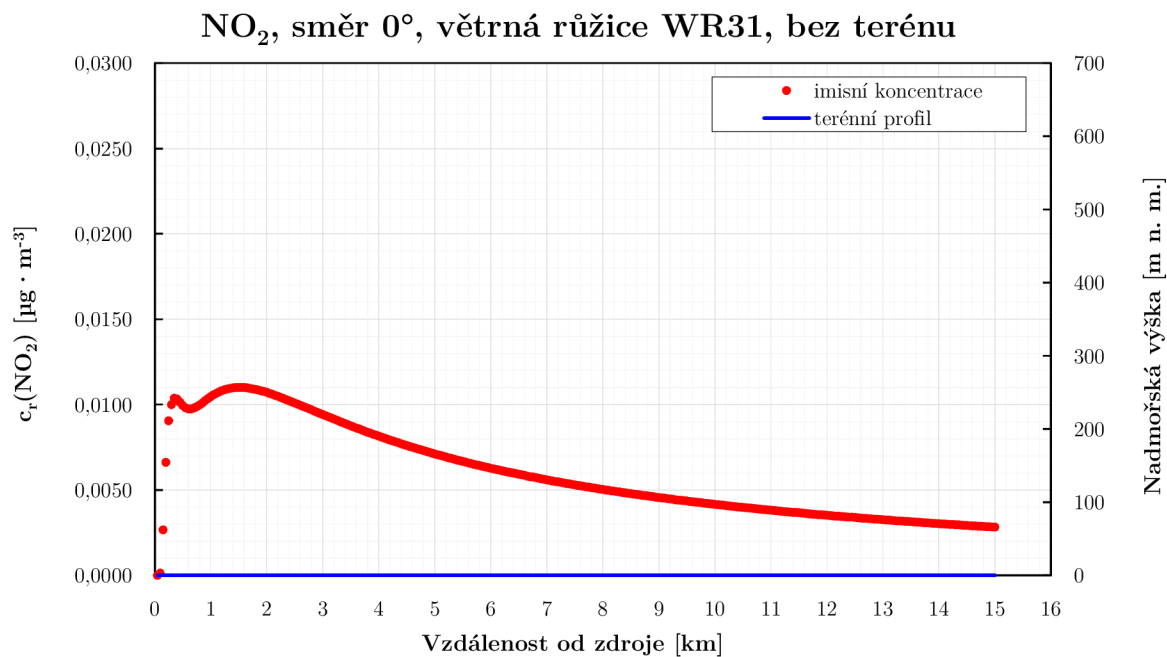
Obrázek E.6: NO<sub>2</sub>, směr 225°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, bez terénu.



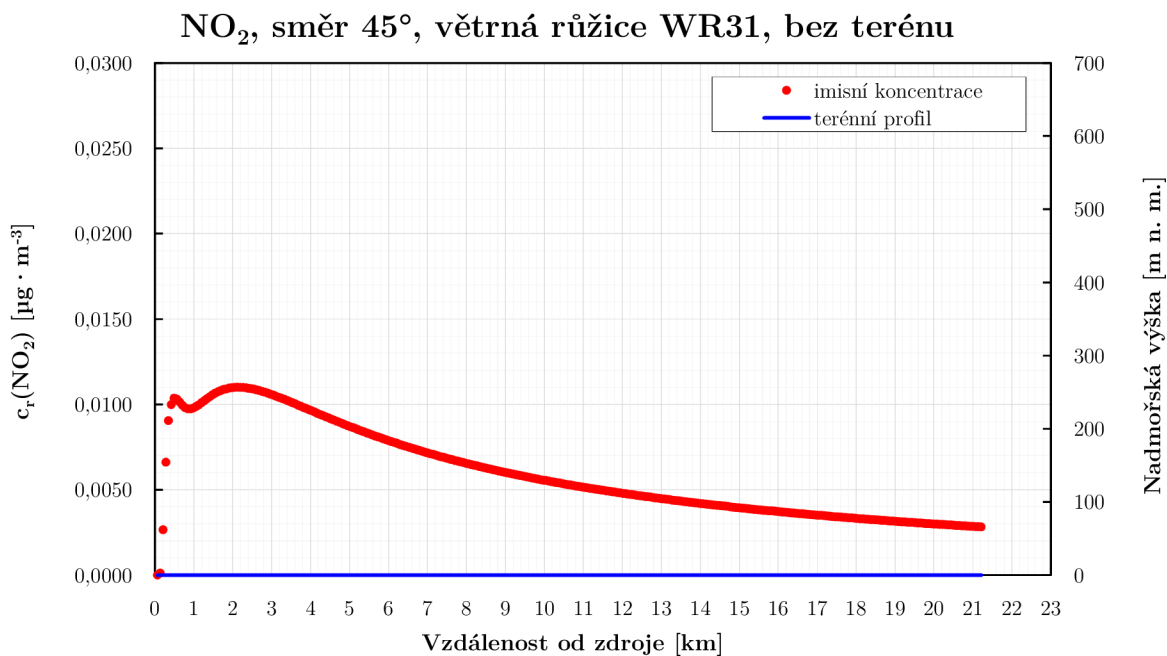
Obrázek E.7: NO<sub>2</sub>, směr 270°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, bez terénu.



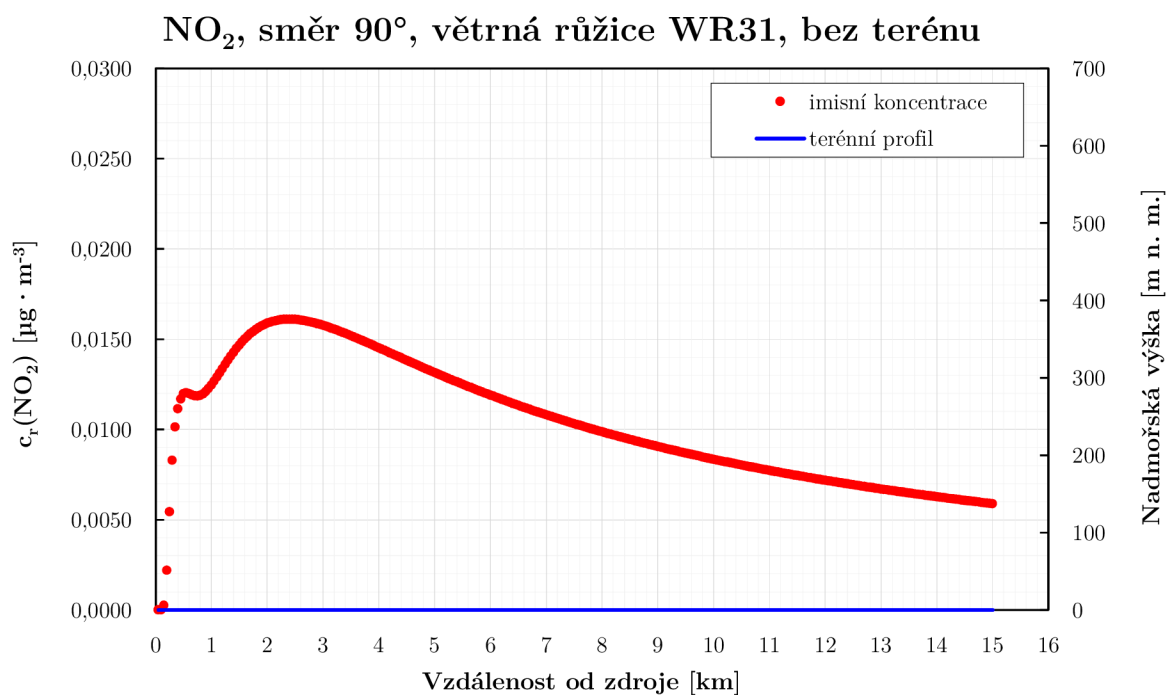
**Obrázek E.8:** NO<sub>2</sub>, směr 315°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, bez terénu.



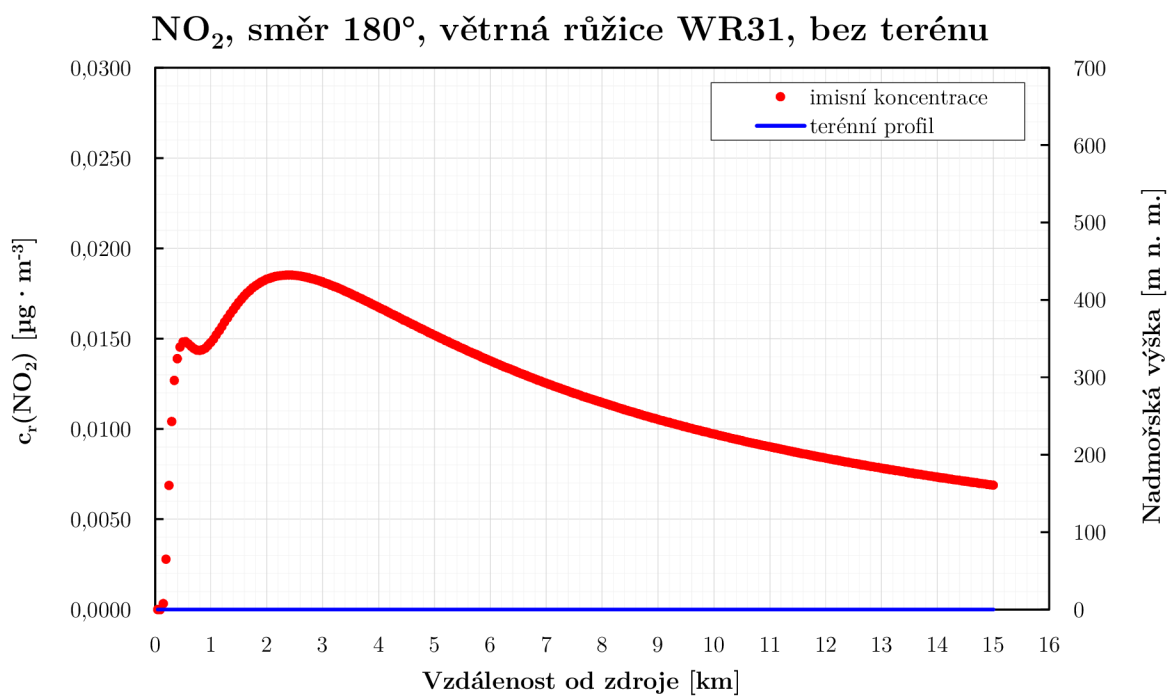
Obrázek E.9: NO<sub>2</sub>, směr 0°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt, bez terénu.



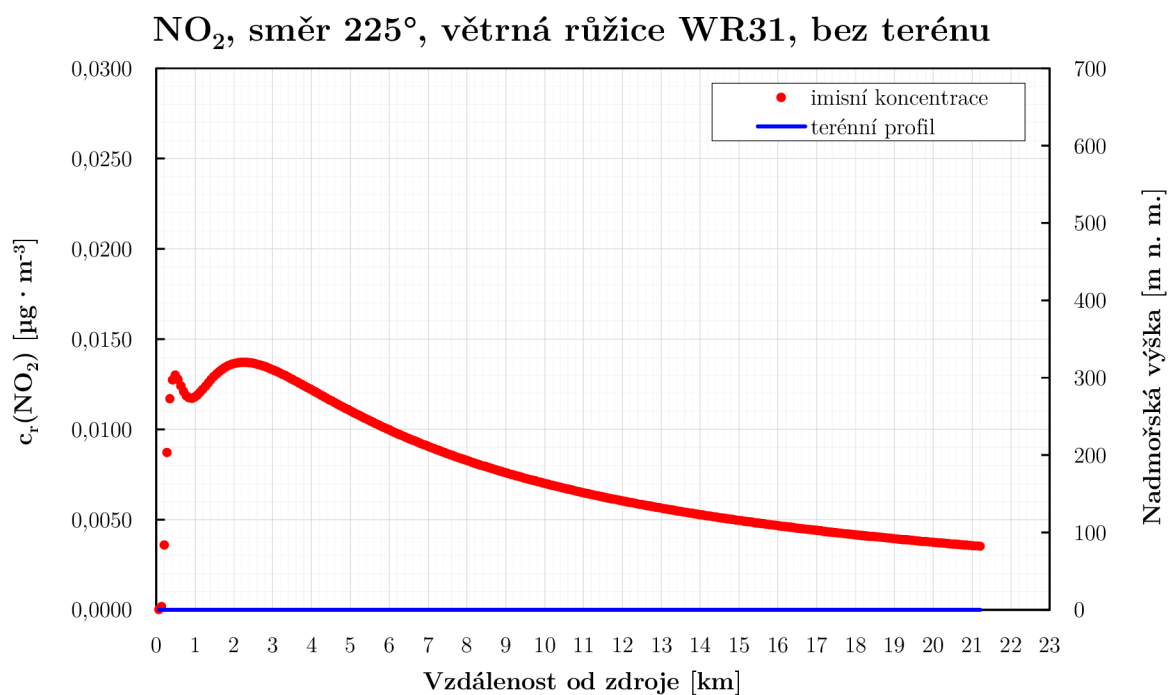
Obrázek E.10: NO<sub>2</sub>, směr 45°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt, bez terénu.



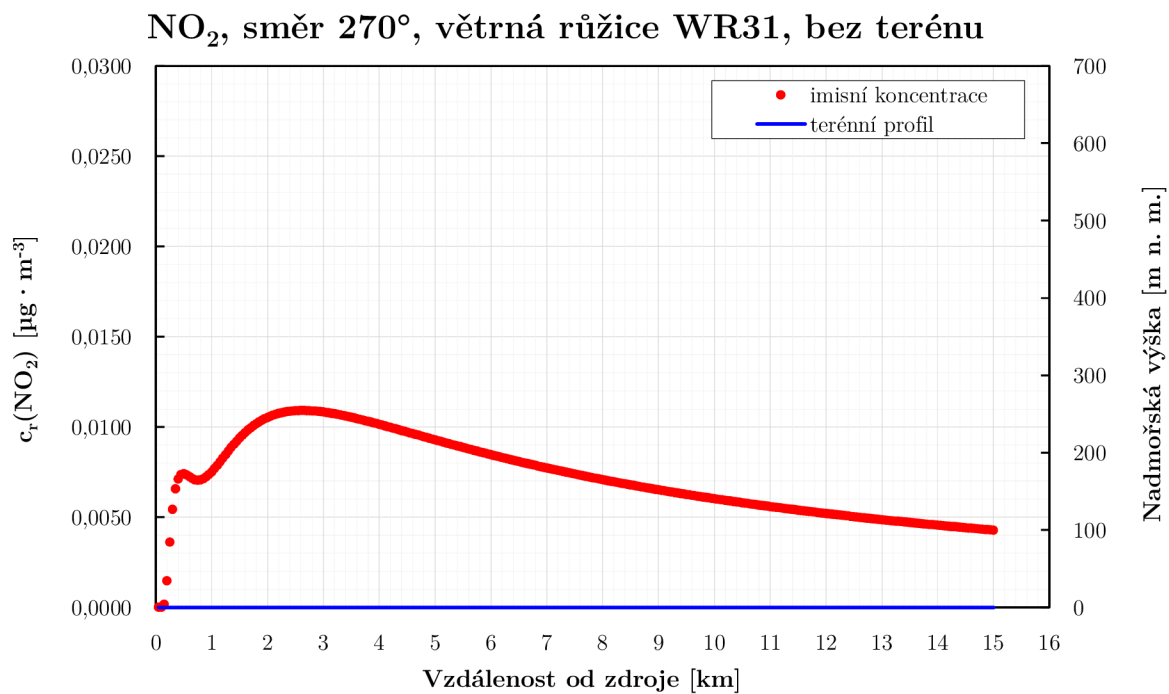
**Obrázek E.11:** NO<sub>2</sub>, směr 90°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt, bez terénu.



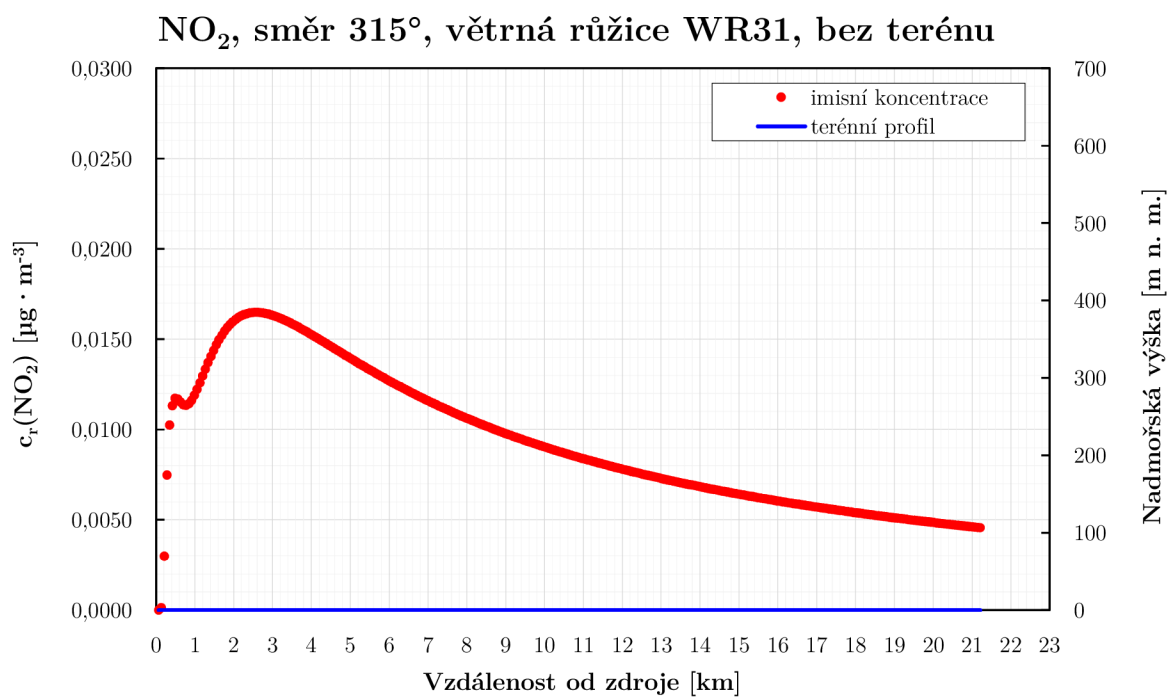
**Obrázek E.12:** NO<sub>2</sub>, směr 180°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt, bez terénu.



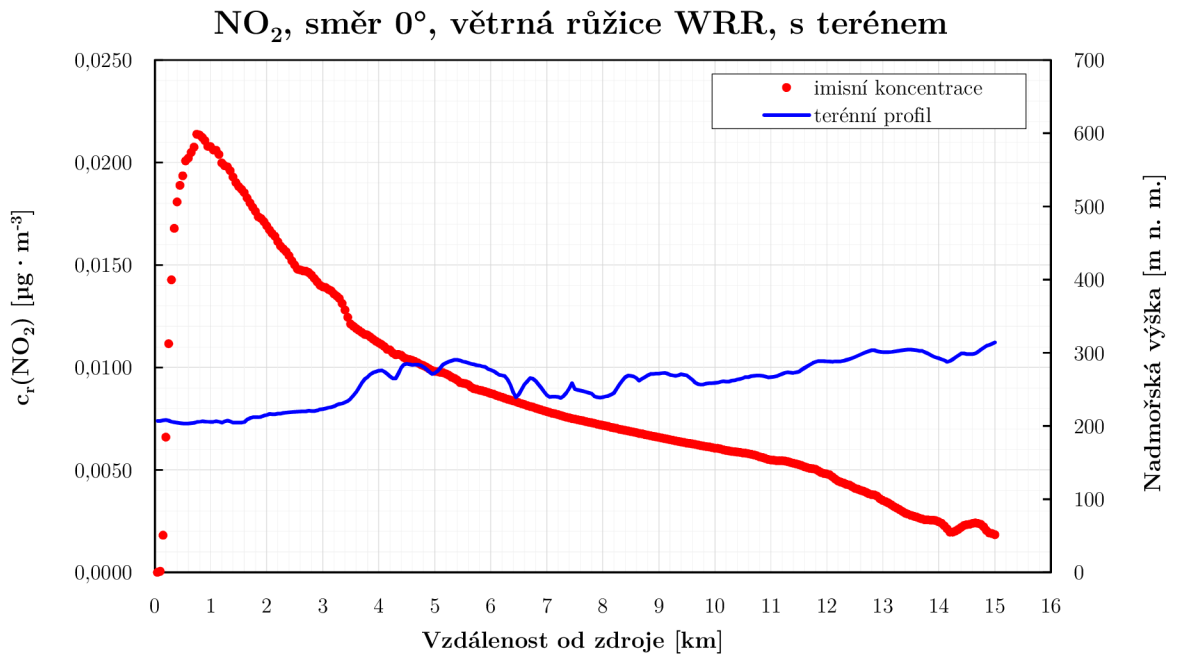
Obrázek E.13: NO<sub>2</sub>, směr 225°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt, bez terénu.



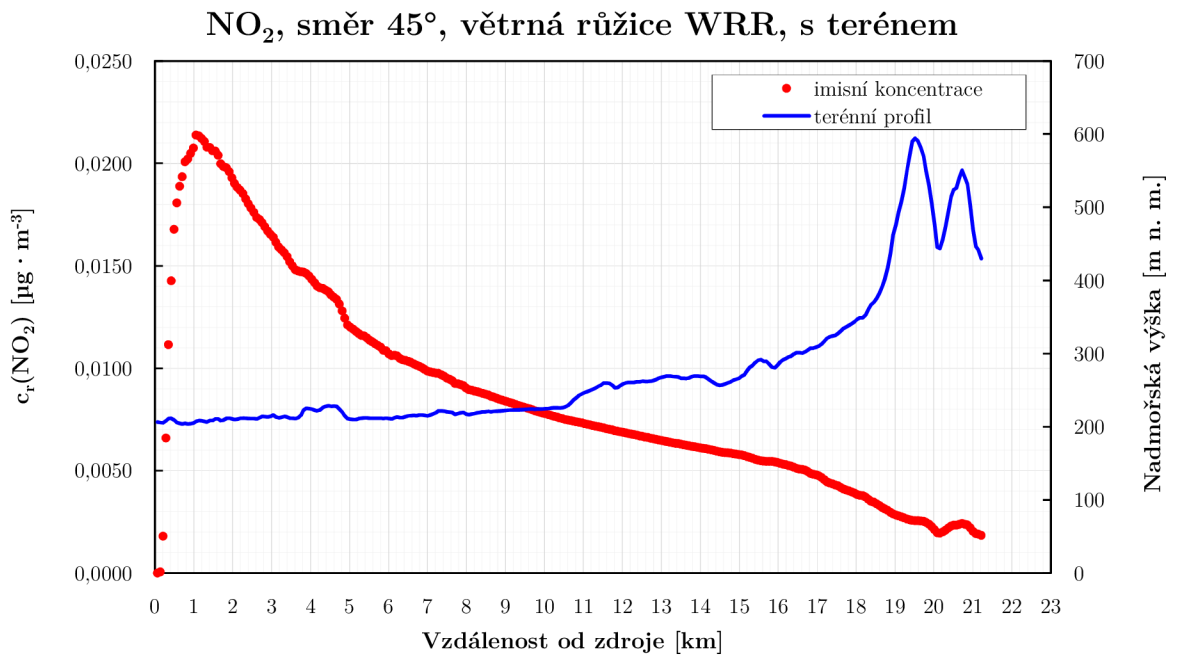
Obrázek E.14: NO<sub>2</sub>, směr 270°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt, bez terénu.



Obrázek E.15: NO<sub>2</sub>, směr 315°, větrná růžice WR31, zdroj 100 kt, bez terénu.

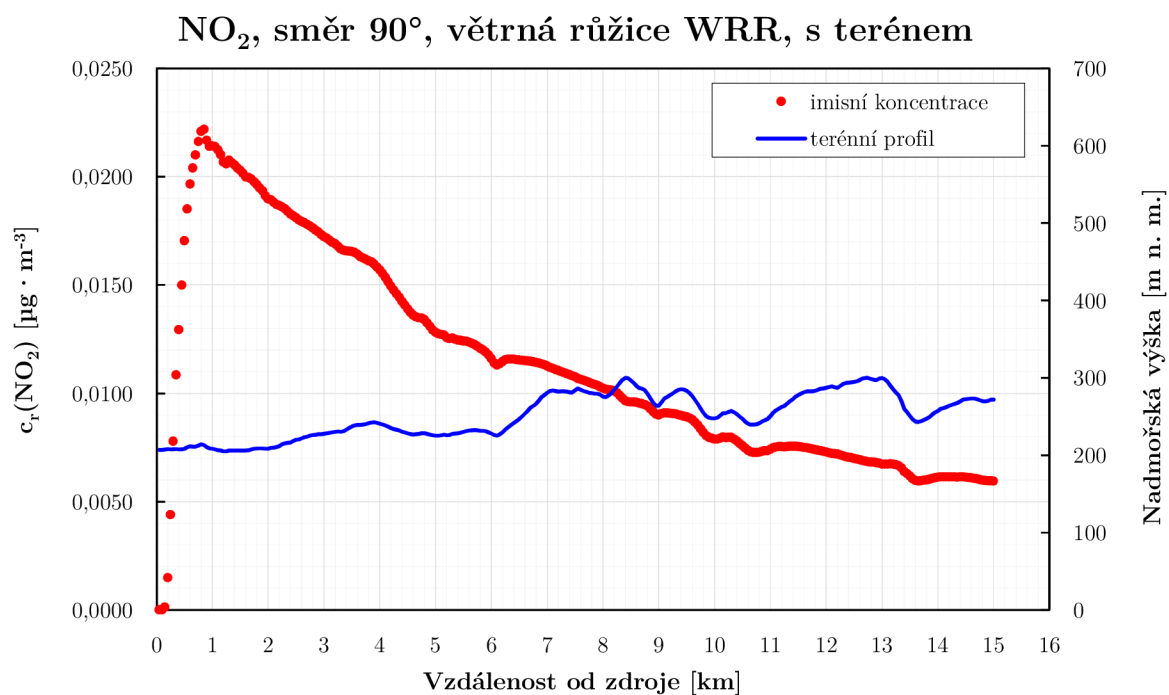


**Obrázek E.16:** NO<sub>2</sub>, směr 0°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, s terénem.

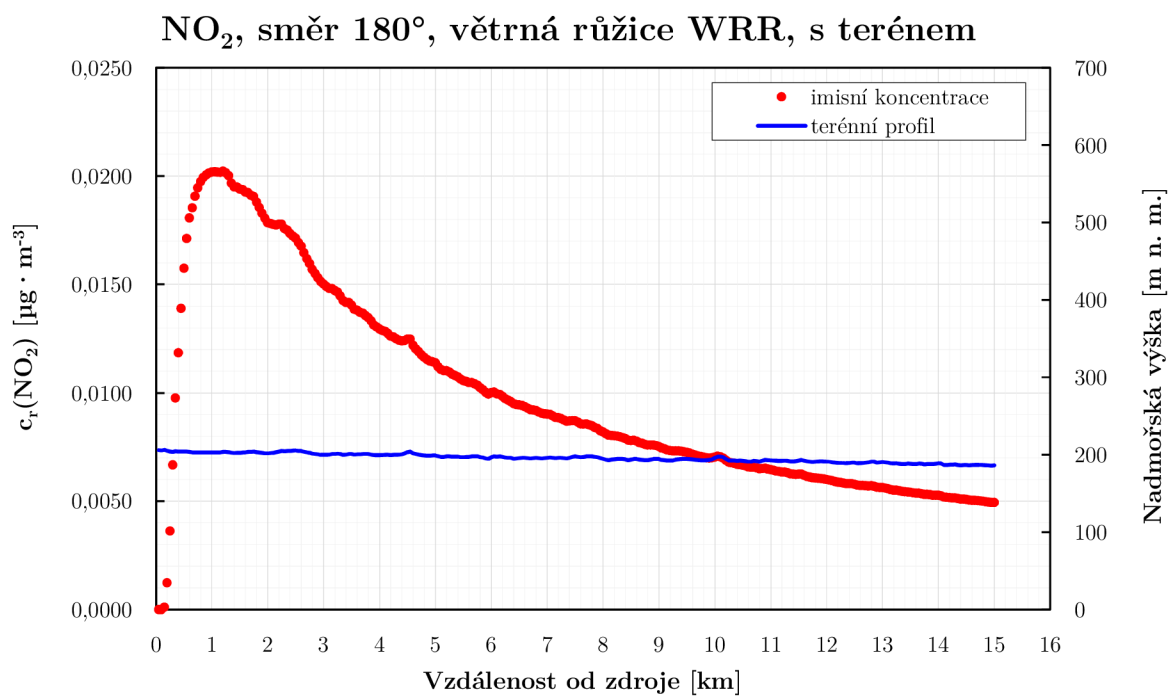


**Obrázek E.17:** NO<sub>2</sub>, směr 45°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, s terénem.

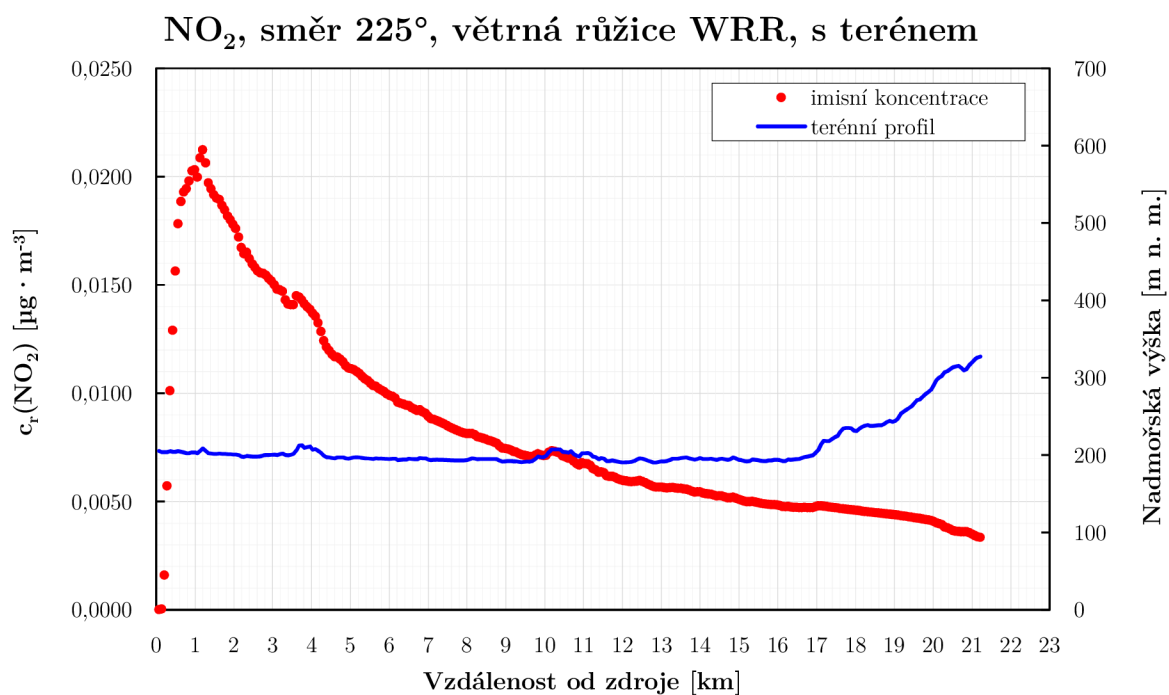




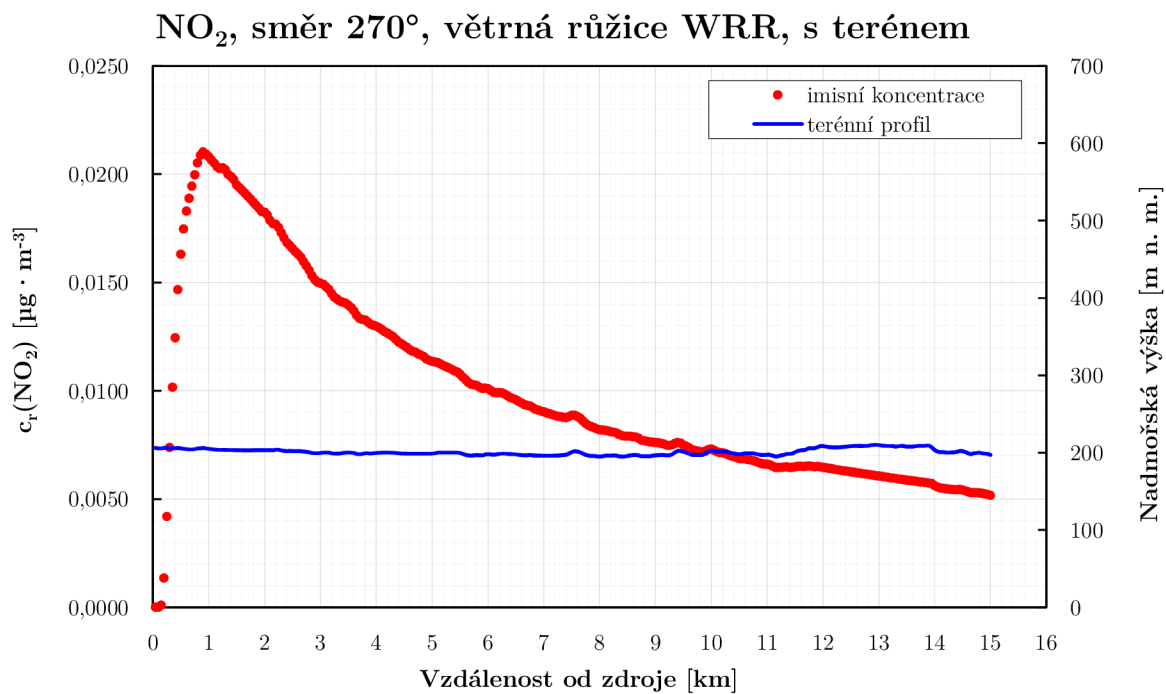
Obrázek E.18: NO<sub>2</sub>, směr 90°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, s terénem.



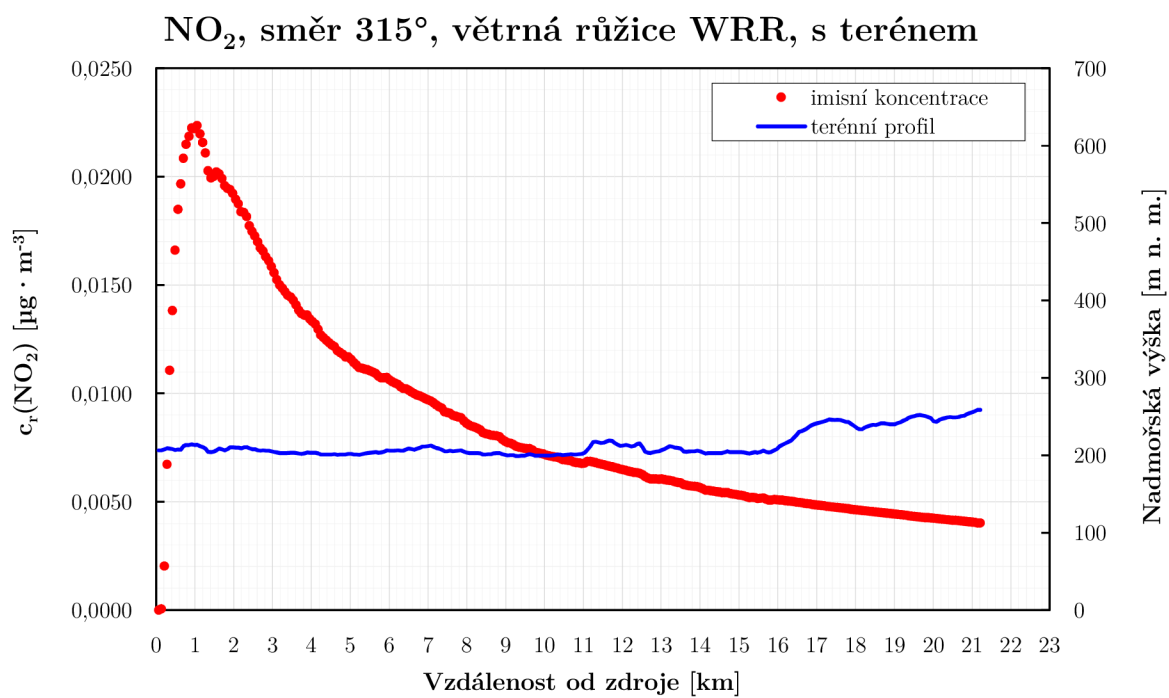
Obrázek E.19: NO<sub>2</sub>, směr 180°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, s terénem.



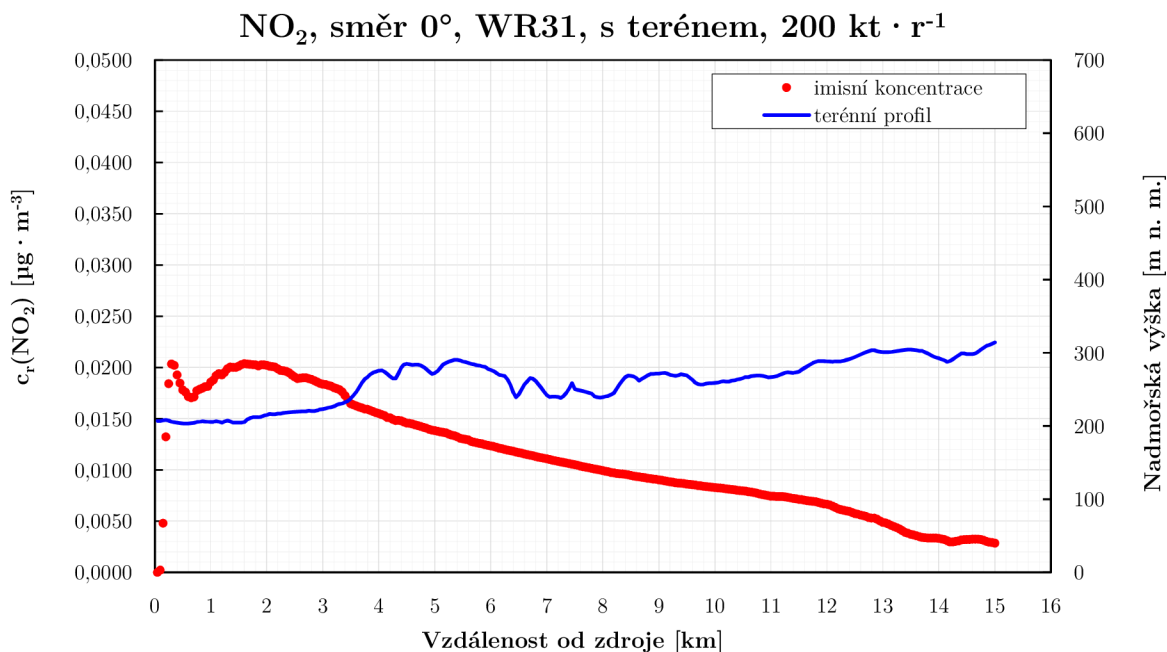
Obrázek E.20: NO<sub>2</sub>, směr 225°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, s terénem.



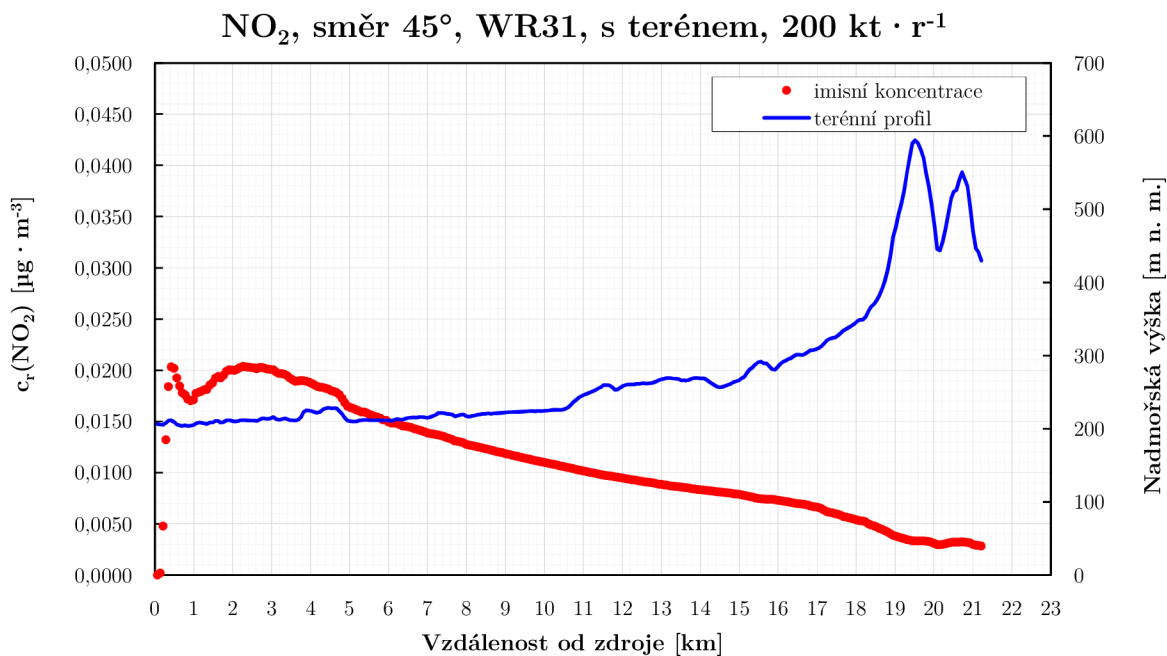
Obrázek E.21: NO<sub>2</sub>, směr 270°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, s terénem.



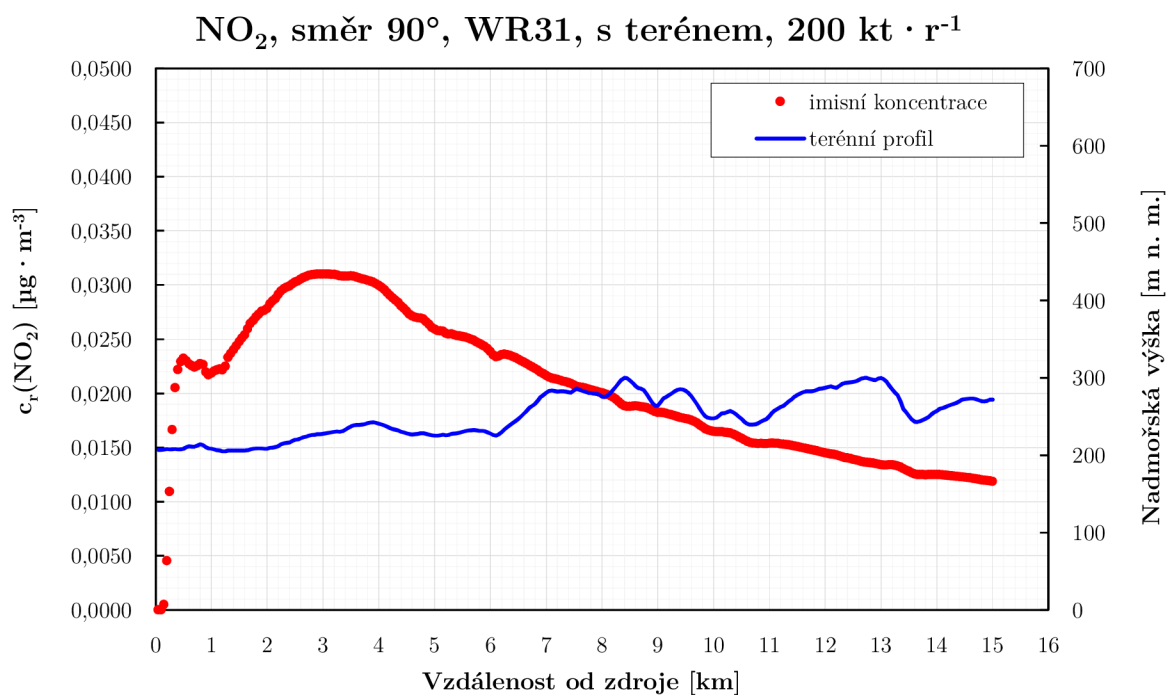
**Obrázek E.22:** NO<sub>2</sub>, směr 315°, větrná růžice WRR, zdroj 100 kt, s terénem.



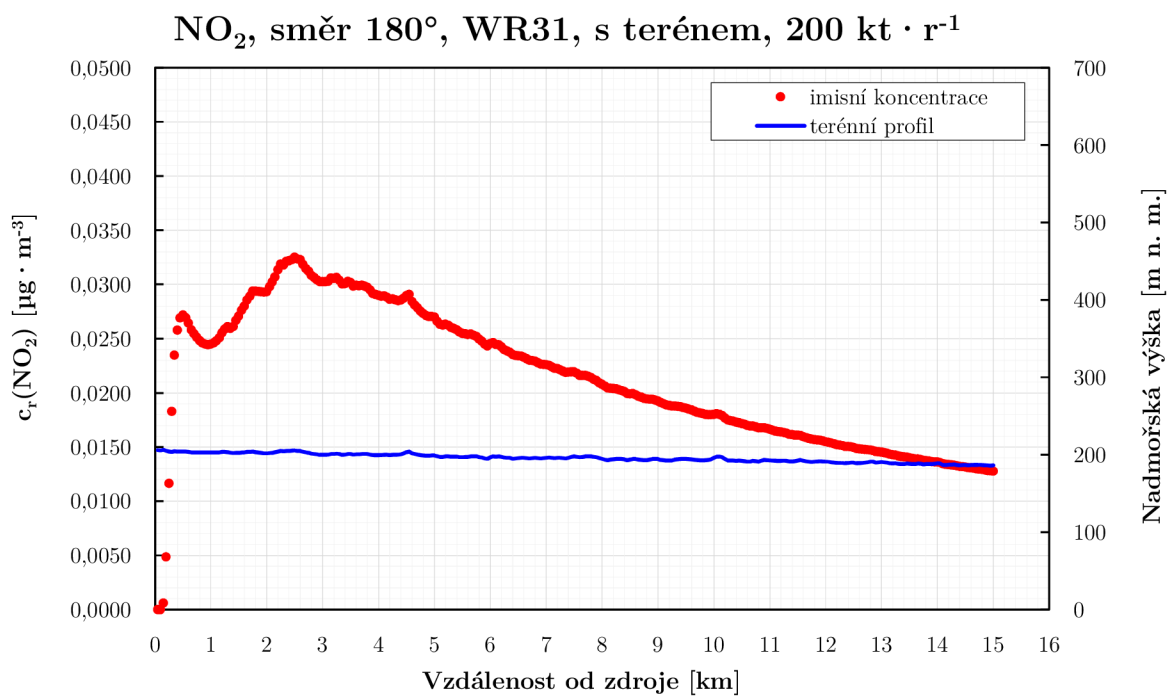
Obrázek E.23: NO<sub>2</sub>, směr 0°, větrná růžice WR31, zdroj 200 kt, s terénem.



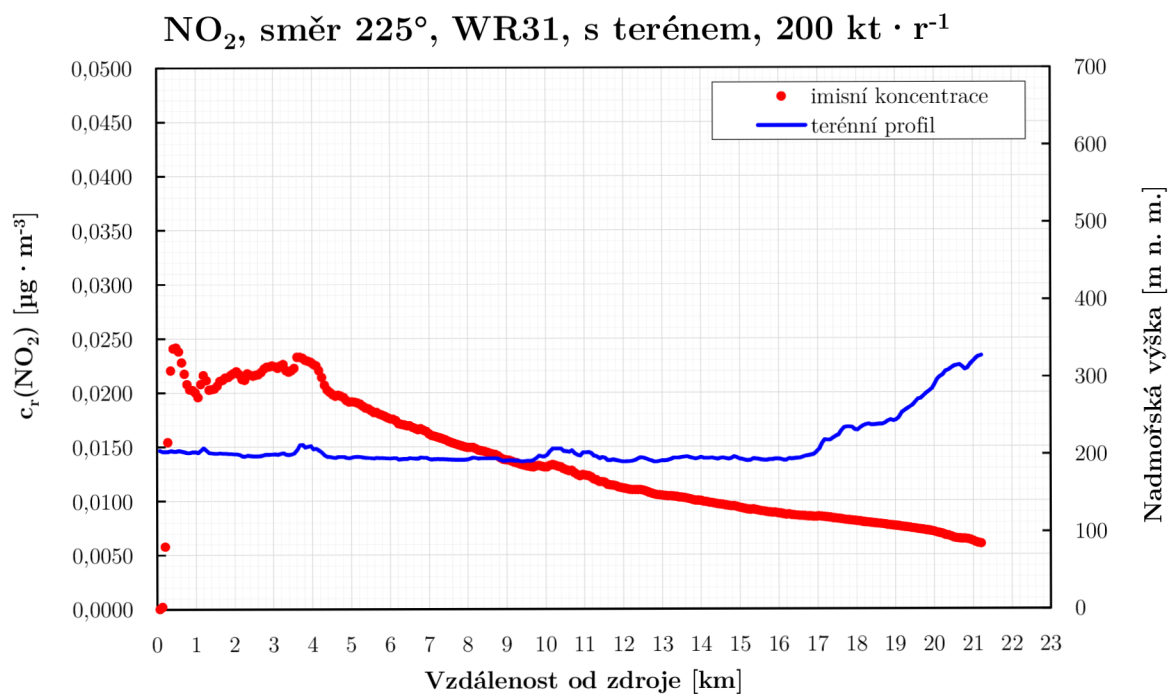
Obrázek E.24: NO<sub>2</sub>, směr 45°, větrná růžice WR31, zdroj 200 kt, s terénem.



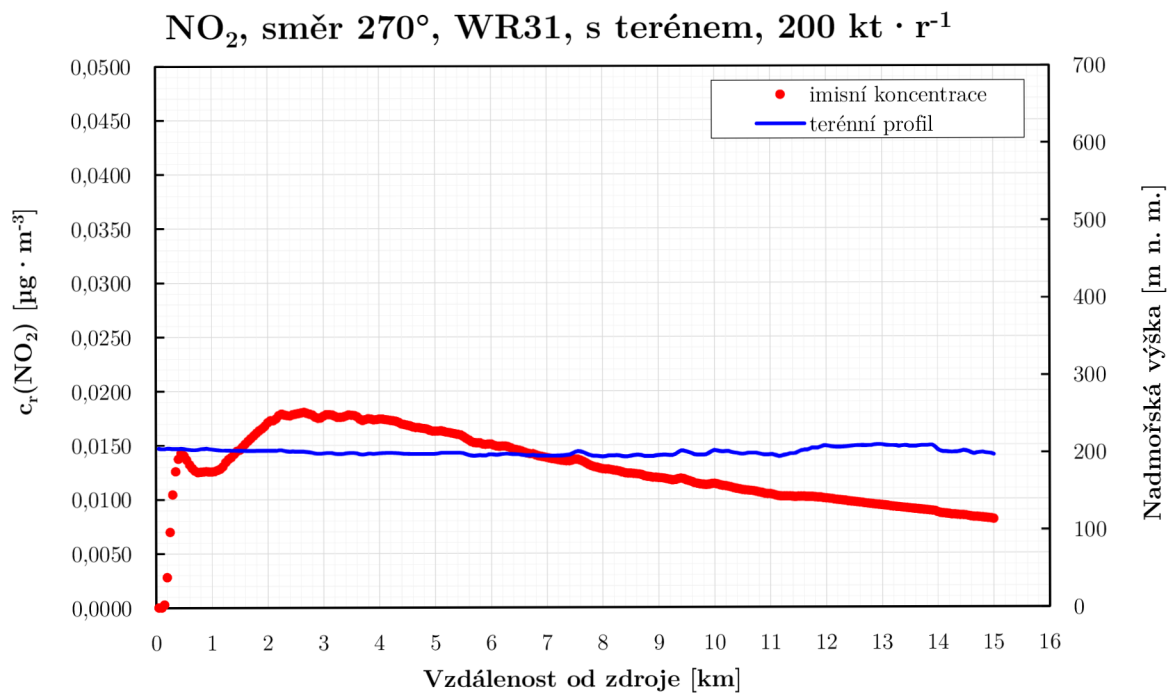
**Obrázek E.25:** NO<sub>2</sub>, směr 90°, větrná růžice WR31, zdroj 200 kt, s terénem.



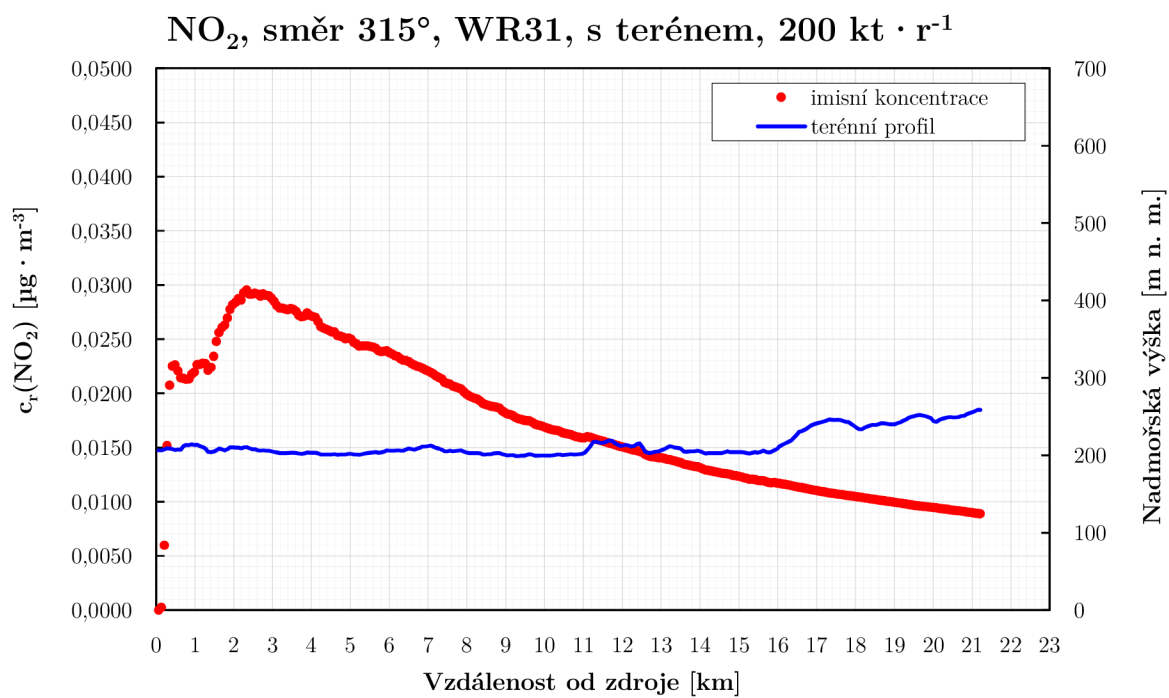
**Obrázek E.26:** NO<sub>2</sub>, směr 180°, větrná růžice WR31, zdroj 200 kt, s terénem.



Obrázek E.27: NO<sub>2</sub>, směr 225°, větrná růžice WR31, zdroj 200 kt, s terénem.

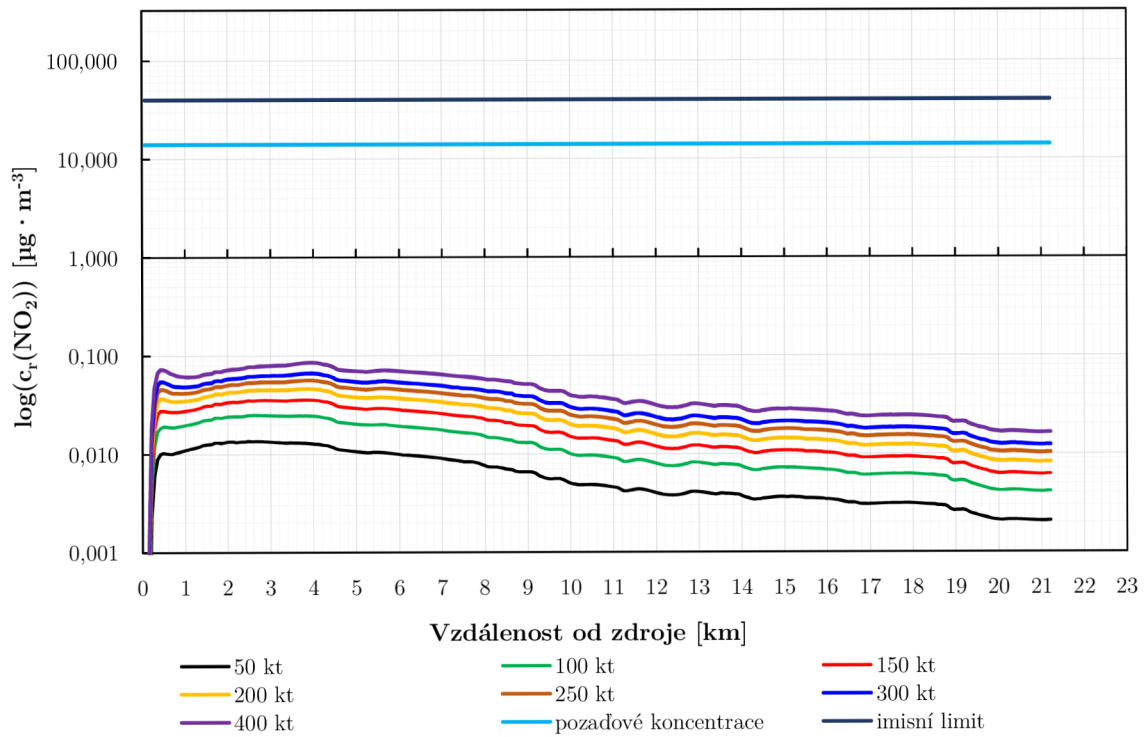


Obrázek E.28: NO<sub>2</sub>, směr 270°, větrná růžice WR31, zdroj 200 kt, s terénem.



**Obrázek E.29:** NO<sub>2</sub>, směr 315°, větrná růžice WR31, zdroj 200 kt, s terénem.

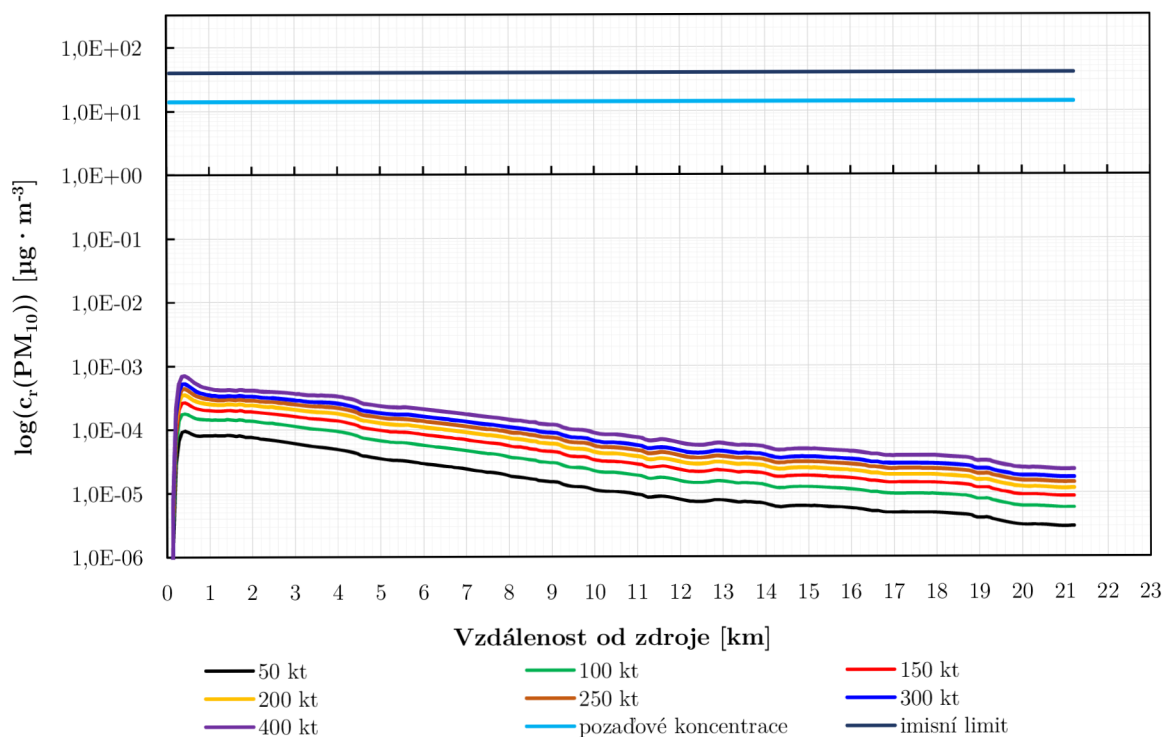
### Porovnání koncentrací NO<sub>2</sub> pro směr 135° a různé kapacity



**Obrázek E.30:** Porovnání vypočítaných hodnot příspěvků imisních koncentrací NO<sub>2</sub> od všech předepsaných kapacit ZEVO společně s požadovými imisními koncentracemi v zájmové oblasti a imisním limitem.



### Porovnání koncentrací PM<sub>10</sub> pro směr 135° a různé kapacity



**Obrázek E.31:** Porovnání vypočítaných hodnot příspěvků imisních koncentrací PM<sub>10</sub> od všech předepsaných kapacit ZEVO společně s požadovými imisními koncentracemi v zájmové oblasti a imisním limitem.

# Příloha F

Elektronické přílohy této diplomové práce jsou následující:

- `prehled_disperznich_modelu.xlsx`

Přehled alternativních disperzních modelů/software k použitému disperznímu modelu SYMOS'97 (viz podkap. 4.3). Zkrácená verze tohoto přehledu je uvedena v příloze B v tab. B.1.

- `data_vypocet.xlsm`

Sešit aplikace Microsoft Excel s makry, který slouží ke generování souřadnic referenčních bodů v souřadnicovém systému S-JTSK East North, jejich exportu v datovém souboru (`.csv`) a následnému grafickému zpracování výsledků získaných výpočtem v SYMOS'97 ve formátu (`.xls`)

Všechny elektronické přílohy jsou nahrány na datovém nosiči přiloženém k této práci.