

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD  
KATEDRA GEOMATIKY

**Základní výpočet a následné zobrazení znečištění  
ovzduší zapříčiněného dopravní intenzitou**

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
**Tomáš Andrš**

Vedoucí práce:  
Ing. Karel Jedlička, Ph.D.

Plzeň, 2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta aplikovaných věd  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš ANDRŠ**  
Osobní číslo: **A21N0015P**  
Studijní program: **N3602 Geomatika**  
Studijní obor: **Geomatika**  
Téma práce: **Základní výpočet a následné zobrazení znečištění ovzduší zapříčiněného dopravní intenzitou**  
Zadávací katedra: **Katedra geomatiky**

## Zásady pro vypracování

1. Rešerše přístupů k výpočtu znečištění ovzduší způsobeného dopravní intenzitou.
2. Rešerše přístupů k vizualizaci jevů měnících se v čase i prostoru.
3. Příprava dat: vytvoření základního dopravního modelu z volně dostupných dat, vytvoření topografického modelu zájmového území z volně dostupných dat.
4. Návrh a implementace zvoleného algoritmu pro výpočet znečištění ovzduší (v prostředí GIS).
5. Návrh a realizace vhodné vizualizace dopravního znečištění pro území zájmové oblasti.

Rozsah diplomové práce: **cca 45 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- WANGA, Yi, W.Y. SZETO, Ke HAND a Terry L. FRIESZ. Dynamic traffic assignment: A review of the methodological advances for environmentally sustainable road transportation applications. *Transportation Research Part B: Methodological* [online]. 2018, 2018(111), 370-394 [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.03.011>
- *DOPRAVNĚ INŽENÝRSKÁ DATA PRO KVANTIFIKACI VLIVŮ AUTOMOBILOVÉ DOPRAVY NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ* [online]. Plzeň: Ministerstvo dopravy, 2019 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: [http://www.pjpk.cz/data/USR\\_001\\_2\\_8\\_TP/TP\\_219\\_2019.pdf](http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_219_2019.pdf)
- SHARMILAA, G. a T. ILANGO. Vehicular air pollution based on traffic density – A case study. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, 2022(52), 532-536 [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.278>.
- *Methodology for Calculating Transport Emissions and Energy Consumption* [online]. Transport Research Laboratory [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/meet.pdf>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Karel Jedlička, Ph.D.**  
Katedra geomatiky

Datum zadání diplomové práce: **11. listopadu 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2023**



**Doc. Ing. Miloš Železný, Ph.D.**  
děkan



**Doc. Ing. Karel Janečka, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 11. listopadu 2022

## **Prohlášení**

Předkládám k posouzení a obhajobě diplomovou práci na téma „Základní výpočet a následné zobrazení znečištění ovzduší zapříčiněného dopravní intenzitou“, kterou jsem vypracoval na závěr magisterského studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením vedoucího práce a výhradně s využitím uvedených zdrojů.

V Plzni dne .....

.....

Tomáš Andrš

## **Poděkování**

Chtěl bych velmi poděkovat vedoucímu práce Ing. Karlu Jedličkovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc a rady při zpracování této práce.

## **Abstrakt**

Cílem práce je základní výpočet a následný návrh vhodného zobrazení množství látek znečišťujících ovzduší zapříčiněných dopravou. Text práce popisuje současné metody výpočtu emisí škodlivin pocházejících ze silniční dopravy a jejich následnou disperzi do okolí. Jsou zde zároveň shrnuty zobrazovací techniky, které se pro předání těchto informací využívají. Na základě provedené rešerše byl v práci navržen algoritmus pro výpočet a šíření škodlivých látek z dopravní intenzity. Dosažené výsledky jsou prezentovány prostřednictvím interaktivních vizualizací vystavěných na principech tematické kartografie a využívajících dvou i trojdimenzionálních modelů, které jsou dostupné v online prostředí. Práce obsahuje podrobný postup od přípravy a zpracování dat až po jejich výslednou vizualizaci.

## **Klíčová slova**

emise, emisní modelování, disperzní modelování, dopravní intenzity, dopravní model, vizualizace, GIS, 3D

## **Abstract**

The main goal of this thesis is basic calculation and visualization of air pollution caused by traffic intensity. The text describes different methods that are nowadays used for calculating pollutants from road traffic and their dispersion. The text also sums up visualization techniques that are used for displaying the amount of pollutants. The algorithm for calculating pollution and its dispersion was proposed based on the conducted research. The results are presented through interactive visualisations based on the principles of thematic cartography. These visualisations use two and three-dimensional models and are available online. The thesis contains a detailed description of data engineering, exploration and final visualization.

## **Key words**

emission, emission modeling, dispersion modeling, traffic intensity, traffic model, visualization, GIS, 3D

# Obsah

<b>Seznam zkratk</b> .....	<b>10</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>11</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>14</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>15</b>
<b>1 Různé přístupy k výpočtu znečištění ovzduší způsobeného dopravou</b> .....	<b>17</b>
1.1 Emisní modely .....	18
1.1.1 Modely založené na emisních faktorech .....	18
1.1.2 Modely průměrné rychlosti .....	19
1.1.3 Modální modely .....	19
1.1.4 Modely založené na množství paliva .....	20
1.1.5 Modely založené na detailní informaci o dopravní situaci .....	20
1.1.6 Modely založené na detailním popisu pohybu vozidel .....	20
1.1.7 Modely okamžitých emisí .....	21
1.2 Disperzní modelování .....	22
1.2.1 Krabicové modely .....	22
1.2.2 Gaussovské disperzní modely .....	22
1.2.3 Lagrangeovy disperzní modely .....	23
1.2.4 Modelování proudění látek (CFD) .....	24
1.2.5 Modelování pomocí jádrových funkcí .....	25
1.3 Shrnutí a volba emisního a disperzního modelu .....	27
<b>2 Přehled zobrazovacích metod vhodných pro zobrazení škodlivých látek</b> .....	<b>29</b>
2.1 Zobrazení zdroje emisí na liniových prvcích .....	29
2.1.1 Využití 2D map .....	30
2.1.2 Využití třetího rozměru .....	32
2.2 Zobrazení šíření jevu do prostoru .....	34
2.2.1 Využití 2D map .....	34
2.2.2 Využití třetího rozměru .....	37

2.3 Shrnutí a volba zobrazovacích metod.....	39
<b>3 Příprava dopravního modelu pro výpočet znečištění ovzduší.....</b>	<b>40</b>
3.1 Použité technologie .....	40
3.2 Obohacení dopravního modelu .....	41
3.2.1 Vstupní data.....	43
3.2.2 Úprava dopravního modelu OTM .....	43
3.2.3 Výpočet denních variací intenzit.....	45
3.2.4 Výpočet dopravní skladby.....	47
3.2.5 Výpočet výškové členitosti .....	49
<b>4 Vytvoření topografického 3D modelu zájmového území z volně dostupných dat.....</b>	<b>51</b>
4.1 Popis využitých dat .....	51
4.2 Vytvoření 3D topografického modelu.....	52
4.2.1 Příprava dat v 2D mapě .....	53
4.2.2 Konverze do 3D scény .....	55
4.2.3 Tvorba 2,5D budov.....	56
4.2.4 Využití možností procedurálního modelování .....	58
4.3 Nahrání topografického modelu do online prostředí ArcGIS Online.....	59
<b>5 Výpočty.....</b>	<b>61</b>
5.1 Výpočet emisí.....	61
5.2 Výpočet disperze .....	63
<b>6 Vizualizace dosažených výsledků.....</b>	<b>65</b>
6.1 Případy užití .....	65
6.2 Vizualizace výsledků emisního modelování .....	66
6.2.1 Časová osa.....	66
6.2.2 Space-time cube .....	68
6.2.3 Liniový stuhový kartodiagram 2D.....	70
6.2.4 Liniový stuhový kartodiagram 3D.....	74
6.3 Vizualizace výsledků disperzního modelování .....	77



6.3.1 Časová osa .....	77
6.3.2 Space-time cube .....	80
6.3.3 Výška buňky nad terénem .....	81
6.4 Vizualizace výsledků kombinací zobrazovacích metod.....	83
<b>7 Diskuze .....</b>	<b>85</b>
7.1 Zpřesnění výpočtu .....	85
7.2 Vizualizace .....	85
<b>Závěr .....</b>	<b>87</b>
<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>88</b>
<b>Příloha A – Rešerše CFD modelování .....</b>	<b>97</b>
<b>Příloha B – Obsah příloženého CD.....</b>	<b>100</b>
<b>Příloha C – Výsledná struktura vypočítaných dat.....</b>	<b>101</b>

## **Seznam zkratek**

- 2D – Dvourozměrný
- 2,5D – Dvouapůlrozměrný
- 3D – Trojrozměrný
- AGP – ArcGIS Pro
- AGOL – ArcGIS Online
- CFD – Computational Fluid Dynamics
- CSD – Celostátní sčítání dopravy
- GIS – Geografický informační systém
- GUI – Graphic User Interface
- DMP – Digitální model povrchu
- DMR – Digitální model reliéfu
- LOD – Level of detail
- nDMP – Normalizovaný digitální model povrchu
- OSM – Open Street Map
- OTM – Open Transport Map
- PGE – People Grams Exposure
- STC – Space-time cube
- TIN – Triangulated Irregular Network
- VKT – Vehicle Kilometer Traveled

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Zájmové území. ....	16
Obrázek 2: Struktura VERSIT+ modelu [22]. ....	21
Obrázek 3: Přehled Gaussovského modelu [27]. ....	23
Obrázek 4: Roční průměr koncentrace NO <sub>2</sub> ve městě Pamplona [31]. ....	24
Obrázek 5: Příklad vizualizace s využitím nástroje <i>Airflow Analyst</i> [32]. ....	25
Obrázek 6: Výpočet hustoty jevu s využitím jádrové funkce (Gaussův druh). Nahoře jsou zobrazena vstupní data. Uprostřed jsou zobrazeny jádrové funkce pro jednotlivé vstupní body. Dole je zobrazena výsledná jádrová funkce [33]. ....	26
Obrázek 7: Jednotlivé druhy jádrových funkcí (jader) [33]. ....	27
Obrázek 8: Vážená jádrová funkce [33]. ....	27
Obrázek 9: Zobrazení dopravní intenzity v aplikaci <i>Traffic Modeller</i> [36]. ....	30
Obrázek 10: Hodinová dopravní intenzita na hlavních silničních tazích v USA vyjádřená v podobě lidského oběhového systému [37]. ....	31
Obrázek 11: Zobrazení příspěvku k znečištění ovzduší ze silničních úseků [38]. ....	31
Obrázek 12: Koncentrace škodlivin PM <sub>2.5</sub> ve městě Quito (čtvrť Mariscal). Odlišná barva liniových prvků popisuje rozdíly v koncentraci škodlivin [39]. ....	32
Obrázek 13: Hluk emitovaný silniční sítí s použitím STC [40]. ....	33
Obrázek 14: Distribuce CO <sub>2</sub> na silničním úseku v Utahu z dat měřených na pohyblivé laboratoři. Výška sloupce vyjadřuje množství škodlivin [41]. ....	34
Obrázek 15: Hustota škodlivin CO v jednotkách [g/m <sup>2</sup> ] [4]. ....	35
Obrázek 16: Distribuce koncentrací mědi způsobené dopravou pro oblast Stockholmu a okolí [42]. ....	36
Obrázek 17: Zobrazení kvality ovzduší ve webové mapové aplikaci <i>BreezoMeter</i> [38]. ....	36
Obrázek 18: Městský model znečištění ovzduší ve službě <i>MappAir</i> [44]. ....	37
Obrázek 19: Koncentrace NO <sub>2</sub> v Londýně pro rok 2020. Množství emisí je vyjádřeno pomocí výšky a barvy sloupce ve dvacetimetrové mříži [46]. ....	38
Obrázek 20: Zobrazení škodlivin O <sub>3</sub> pomocí metody STC pro oblast Houston v Texasu [47]. .	38
Obrázek 21: UML diagram činností popisující postup úpravy dopravního modelu. ....	42

Obrázek 22: Vznik pseudouzlu. ....	44
Obrázek 23: UML diagram činností popisující tvorbu topografického 3D modelu. ....	53
Obrázek 24: Příprava dat ve 2D mapě. ....	54
Obrázek 25: Nepravidelná trojúhelníková síť vytvořená z rastru DMR. ....	55
Obrázek 26: Panel <i>Contents</i> znázorňující rozdělení 2D a 3D vrstev ve 3D scéně. ....	56
Obrázek 27: 3D scéna s vytvořenými 2,5D budovami. ....	57
Obrázek 28: Různé úrovně detailu [65]. ....	58
Obrázek 29: Různé druhy střech [67]. ....	59
Obrázek 30: Budovy vytvořené procedurálním modelováním. ....	59
Obrázek 31: Funkcionalita nástroje <i>Kernel Density</i> pro liniové prvky [71]. ....	64
Obrázek 32: Struktura atributových dat pro vytvoření časové osy. Tabulka A ukazuje strukturu tabulky po výpočtu emisí podle podkapitoly 5.1. Tabulka B ukazuje strukturu vhodnou pro časovou osu. ....	67
Obrázek 33: Vizualizace emisí na liniových prvcích prostřednictvím časové osy. ....	68
Obrázek 34: Zobrazení časoprostorové variace emisí pomocí metody STC. ....	69
Obrázek 35: Druhy liniových stuhových kartodiagramů [73]. ....	70
Obrázek 36: Celkový příspěvek emisí od osobních automobilů (modrá) a nákladních vozů (červená) zobrazený prostřednictvím součtového liniového kartodiagramu. Část A zobrazuje celý Prešovský kraj. Část B zobrazuje detail v oblasti Tatranského národního parku. ....	72
Obrázek 37: Zobrazení procentuálního příspěvku emisí od osobních automobilů (modrá) a nákladních vozů (červená) prostřednictvím strukturního liniového kartodiagramu. ....	73
Obrázek 38: Detail liniového strukturního kartodiagramu ve 2D. Osobní automobily (modrá), nákladních vozy (červená). ....	73
Obrázek 39: Pomocný obrázek pro vytvoření stuhového liniového kartodiagramu ve 3D. ....	75
Obrázek 40: Celkový příspěvek emisí od osobních automobilů (modrá) a nákladních vozů (červená) zobrazený prostřednictvím součtového liniového kartodiagramu ve 3D. ....	76
Obrázek 41: Zobrazení procentuálního příspěvku emisí od osobních automobilů (modrá) a nákladních vozů (červená) prostřednictvím strukturního liniového kartodiagramu ve 3D. ....	76
Obrázek 42: Příprava dat pro vytvoření časové osy. ....	78
Obrázek 43: Vizualizace šíření emisí prostřednictvím časové osy. ....	79

Obrázek 44: Zobrazení šíření emisí metodou STC. ....	81
Obrázek 45: Vizualizace celkového množství emisí pomocí metody “Výška buňky nad terénem”.....	83
Obrázek 46: Vizualizace celkových emisí kombinovanou metodou na podkladu topografického 3D modelu.....	84

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Převodní tabulka klasifikací mezi vrstvou OTM a dokumentem CSD.....	44
Tabulka 2: Denní variace intenzit dopravy v běžný pracovní den, vozidla celkem [55]. .....	47
Tabulka 3: Klasifikace vozidel uvedená v dokumentu CSD. Šedou barvou je vyznačena klasifikace podle TP 170.....	48
Tabulka 4: Procentuální vyjádření dopravní skladby vozidel v Prešovském kraji. ....	49
Tabulka 5: Struktura tabulky obsahující profily úseků.....	50
Tabulka 6: Množství emisí CO <sub>2</sub> pro jednotlivé skupiny vozidel v jednotkách g/km [68],[70]. .	62

## Úvod

Téměř třetina všech škodlivin ovlivňující životní prostředí v Evropské unii (EU) je způsobena dopravou [1]. Z dopravního sektoru je pak největším znečišťujícím odvětvím právě silniční doprava, která je podle Evropské agentury pro životní prostředí odpovědná za pětinu všech emisí. Tyto škodlivé látky přispívají ke změnám klimatu a mají dopad na lidské zdraví. Řada studií se věnuje hledání vazby mezi chorobami a znečištěním zapříčiněným dopravou [2],[3]. Právě z těchto důvodů je potřeba emise nepřetržitě monitorovat a analyzovat. Na základě provedených analýz je pak možné stanovit kroky pro redukci, či úplné odstranění emisí. Tímto trendem se řídí i EU, která pro snížení emisí zavádí právní nařízení, vedoucí k nulovým emisím pro nové osobní a lehké užitkové automobily v roce 2035. Aby bylo možné analýzy provádět, je potřeba dosažené výsledky srozumitelně zobrazit, a právě to je jedním z hlavních témat, kterým se autor ve své práci věnuje.

První část práce popisuje různé metody, které jsou v současnosti využívány pro výpočet emisí zapříčiněných dopravní intenzitou. Kromě výpočtu emisí se tato část věnuje také popisu disperzního modelování, které slouží k určení šíření emisí do okolí. Na konci této části je také proveden výběr metod, které jsou v práci pro výpočet emisí a jejich disperzi využity.

Ve druhé části práce je provedena rešerše zobrazovacích metod vhodných pro zobrazení škodlivin. Jsou zde uvedeny vizualizační techniky využité v člancích a studiích s podobným zaměřením. V závěru rešerše bylo provedeno zhodnocení jednotlivých zobrazovacích metod z pohledu jejich vhodnosti pro zobrazení emisí z dopravy a jejich šíření a zvoleny metody, které byly použity v praktické části práce.

Třetí, praktická část práce se nejprve věnuje přípravě dat, která jsou pro výpočet a zobrazení emisí využita. Všechna data popsána v této části jsou volně dostupná. Autor zde popisuje přípravu dopravního modelu pro výpočet emisí a také vytvoření topografického modelu, který je využit pro výsledné vizualizace. Dále je v této části popsán navržený algoritmus, na základě kterého probíhá výpočet emisí a jejich šíření do okolí. Nakonec jsou zde popsány a zobrazeny výsledné vizualizace, jež byly v rámci práce vytvořeny. V závěru práce jsou diskutována omezení použitých výpočetních i zobrazovacích metod, která mohou následovníkům práce usnadnit další postup.

Zájmové území, pro které je diplomová práce vypracována, je uvedeno na obrázku 1. Jedná se o oblast Prešovského kraje, nacházející se ve Slovenské republice. Území bylo vybráno na základě výškové členitosti, která je v oblasti Tatranského národního parku, nacházejícího se na severozápadě kraje, značná.



Obrázek 1: Zájmové území.



# 1 Různé přístupy k výpočtu znečištění ovzduší způsobeného dopravou

Pro výpočet znečištění ovzduší způsobeného dopravou, je nejprve potřeba znát celkové množství znečištění za jednotku času. K tomu se využívá emisní modelování. Emise způsobené vozidlem lze rozdělit do 3 základních skupin: výfukové emise, evaporativní emise a emise z nespalovacích procesů [4].

Výfukové emise jsou způsobené spalováním různých druhů paliv [4]. Jejich množství je ovlivněno právě druhem paliva a jeho spotřeby, dále také však členitostí terénu a tím pádem i stylu jízdy vozidla. Výfukové emise je dále možné rozdělit na emise při studeném a zahřátém motoru (*hot and cold emissions*). Právě tento druh emisí se při emisním modelování využívá nejčastěji.

Druhou skupinou emisí jsou tzv. evaporativní emise a dochází k nim v době kdy vozidlo stojí a motor neběží [4]. Patří sem emise způsobené například výparem z paliva nádrže, nebo uvolňování znečišťujících látek po tom, co vozidlo zastaví a motor je po nějakou dobu stále zahřátý.

Poslední skupinou jsou emise z nespalovacích procesů, které jsou způsobené obroušováním namáhaných součástí (např. brzd, nebo pneumatik) [5]. Patří sem i emise způsobené stářím vozidla, kde je hlavní příčinou škodlivin koroze některých částí vozidla [4].

V práci se autor zaměřuje pouze na výpočet výfukových emisí, jelikož má tento druh emisí na znečištění životního prostředí největší vliv. Mezi nejdůležitější škodliviny a výfukové plyny produkované dopravou patří: oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ), uhlovodík (HC), oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ ), oxid uhelnatý (CO) a prachové částice (PM) (více viz [4],[6]). V rámci práce se autor zabývá pouze výpočtem škodlivin  $\text{CO}_2$ .

V případě potřeby je dále možné doplnit emisní modely o disperzní modely. Tyto modely slouží k popisu atmosférických, fyzikálních a chemických vlastností zkoumaného území, díky čemuž umožňují přesnější popis stavu ovzduší a také umožňují modelovat šíření škodlivin do okolí [4].

Oba druhy modelů, emisní i disperzní, je dále možné klasifikovat podle velikosti zkoumaného území, a to konkrétně na makroskopické a mikroskopické modelování.

V případě využití mikroskopického modelování je zkoumané území spíše menší rozlohy, tj. ulice, případně část města a je zkoumán vliv způsobený pouze jedním vozidlem. Při tomto modelování může být zkoumáno více druhů vozidel, důležité je však, že v rámci jednoho pokusu, je měřeno znečištění způsobené vždy právě jedním vozidlem. Často je zde využito tzv. výpočetního modelování proudění látek (*Computational Fluid Dynamics = CFD*) [7], dále je také možné využít Lagrangeův, či Gaussův model. Do výpočtu pak vstupují data týkající se nejen

emisí, ale také proudění částic vzduchu v předem definovaném území, díky čemuž dochází k přesnějším výsledkům [4].

Makroskopické modelování se na druhou stranu zaměřuje na území větší rozlohy, tj. celé město, či region a je zkoumán vliv způsobený všemi vozidly na vozovce. Pro výpočet se zde využívá zejména znalosti dopravní intenzity (tj. počet vozidel na silničním úseku) a rozložení dopravy. Výhodou je zde zejména rychlost výpočtu, výpočty však nedosahují stejné přesnosti jako v případě mikroskopického modelování [4].

Tato kapitola se věnuje klasifikaci různých druhů modelování a jejich využití v projektech s podobným zaměřením.

## 1.1 Emisní modely

Emisní modely slouží pro reprezentaci reálného systému produkujícího emise. Primárně slouží k popisu množství, rozmístění a časové variace emisí z předem definovaných zdrojů [8]. Pro modelování emisí byla v minulosti navržena celá řada emisních modelů. Tato podkapitola se věnuje klasifikaci emisních modelů podle vstupních dat a způsobu výpočtu. U jednotlivých druhů modelů jsou také uvedeny studie, ve kterých byl model využit.

### 1.1.1 Modely založené na emisních faktorech

Modely založené na emisních faktorech (*Emission factor models*) jsou jedny z nejjednodušších modelů využívaných pro výpočet znečištění způsobeného dopravou. Jejich výhodou je, že nevyžadují velké množství vstupních dat. Odhad emisí je zde počítán pomocí emisního faktoru stanoveného pro jedno vozidlo a jeho způsob jízdy (specifikovaný hlavně na základě typu vozovky ve smyslu dálnice, silnice I. třídy atd.). Emisní faktor se určuje na základě průměrných hodnot emitovaných látek vypočítaných z opakovaného měření. Výsledky jsou udávány v jednotkách množství emitované látky za jednotku délky [9].

Nejčastěji jsou tyto modely využívány pro národní a regionální odhady, čímž spadají spíše do skupiny makroskopických modelů. Model s názvem *the Mobile* byl v minulosti využíván převážně pro výpočet emisí různých látek (uhlovodíku – HC, oxidů dusíku – NO<sub>x</sub> atd.) v USA a Kanadě [10]. Tento model však přestal být od roku 2004 využíván z důvodů nemožnosti využití modelu pro mikroskopické modelování a jeho celkové nepřesnosti [11],[12].

V článku [13] je také využito emisních faktorů pro výpočet znečištění způsobené dopravou na dálnici mezi dvěma velkými městy v Srbsku. Vstupními parametry jsou: provoz (v závislosti na typu dálnice), celkový počet vozidel, emisní faktory, spotřeba paliva a meteorologické parametry.

Tento typ modelu je mimo jiné využíván pro výpočet emisí způsobených automobilovou dopravou v Národním atmosférickém emisním inventáři (NAEI) ve Spojeném království. Emisní faktory jsou zde počítány pro šest kategorií vozidel, které se dále rozdělují podle druhu paliva. Spotřeba paliva a emisní faktory jsou udávány v gramech paliva, nebo tunách emisí na jednotku ujeté vzdálenosti pro každou kategorii vozidla [14]. Pro jejich výpočet je pak využíváno dvou různých zdrojů:

- Data poskytnuta z *Transport Research Laboratory*, kde dochází k měření emisí pro různá vozidla v závislosti na jejich jízdním cyklu.
- Data poskytnuta od výrobců automobilů. Zde jsou zahrnuty převážně CO<sub>2</sub> emise.

### 1.1.2 Modely průměrné rychlosti

Modely průměrné rychlosti (*Average speed models*) jsou nejčastěji využívány pro výpočet emisí v závislosti na silničním provozu [15]. Výpočet probíhá pomocí aplikace emisního faktoru pro konkrétní druh vozidla, jeho průměrné rychlosti a typu paliva. Průměrné množství emisí pro daný silniční úsek může být odhadnuto na základě tzv. *Vehicle Kilometer Traveled* (VKT) parametrů vozidel, která daným úsekem projela, a na základě hodnoty emisního faktoru pro danou rychlost vozidla. Model je opět vhodný pro národní a regionální účely [16] a řadí se tedy do skupiny makroskopických modelů. Výhodou je zde zejména malé množství vstupních dat potřebných k výpočtu: hustota dopravy, průměrná rychlost vozidel a délka úseku. Limitací je však přesnost modelů.

Jedním z nejznámějších zástupců modelů průměrné rychlosti je model COPERT využívaný převážně pro evropské země [17],[4]. Model umožňuje kromě výpočtu výfukových emisí také výpočet evaporativních emisí. Obsahuje emisní faktory pro více než 450 druhů vozidel.

### 1.1.3 Modální modely

Skupina modálních emisních modelů (*Modal emission models*) obsahuje komplexnější modely, které částečně navazují na předchozí modely, jelikož kromě průměrné rychlosti zde vstupuje do výpočtu také informace o plynulosti (chodu) dopravy. Plynulost dopravy je odvozena na základě chodu motoru vozidla, který je ovlivněn typem jízdy. Rozlišuje se zejména, jestli vozidlo pouze popojíždí (tj. je v zácpě = *Stop and Go*), volně se pohybuje (tj. normální provoz = *Free flow*), rozjíždí se (např. z křižovatky = *Acceleration*) a zpomaluje [7].

Jedním z přístupů k výpočtu emisí pomocí modálního modelování je tzv. matice rychlosti/zrychlení. Pomocí této matice je možné odhadnout množství emisí pro různé typy jízdy. Pokud je následně matice roznásobena s maticí obsahující typ jízdy vozidel na jednotlivých

dopravních úsecích, lze odhadnout celkové emise způsobené různým typem jízdy. V tomto výpočtu se však nezohledňují silniční třídy, zrychlení, apod [18].

Dalším přístupem je využití tzv. emisní mapy, která je založena na výkonu motoru a rychlosti. Do výpočtu je možné zahrnout také akceleraci [18].

Modální modelování emisí používá tzv. *Comprehensive Modal Emission Model* (CMEM) navržený na Kalifornské univerzitě [18].

#### **1.1.4 Modely založené na množství paliva**

Modely založené na množství paliva (*Models relying on fuel quantities*) jsou jedny z nejjednodušších modelů, jelikož do výpočtu vstupují pouze data o prodeji pohonných hmot. Tento postup vede k velké generalizaci odhadu a lze ho využít pouze pro makroskopické modelování [7].

Podobný model byl využit pro výpočet emisních faktorů v Mexico city v roce 2005 [19].

#### **1.1.5 Modely založené na detailní informaci o dopravní situaci**

Modely založené na detailní informaci o dopravní situaci (*Models Implying detailed description of traffic situation*) využívají kromě průměrné rychlosti, která vstupuje do výpočtu v modelech průměrné rychlosti, (viz sekce 1.2.1) také informaci o dopravní situaci. Tyto modely umožňují výpočet výfukových i evaporativních emisí. Jsou využívány převážně pro makroskopické modelování, modely je však možné využít i pro výpočty na územích větších měřítek [20]. Do výpočtu vstupuje podobně jako v sekce 1.1.2 i informace o VKT.

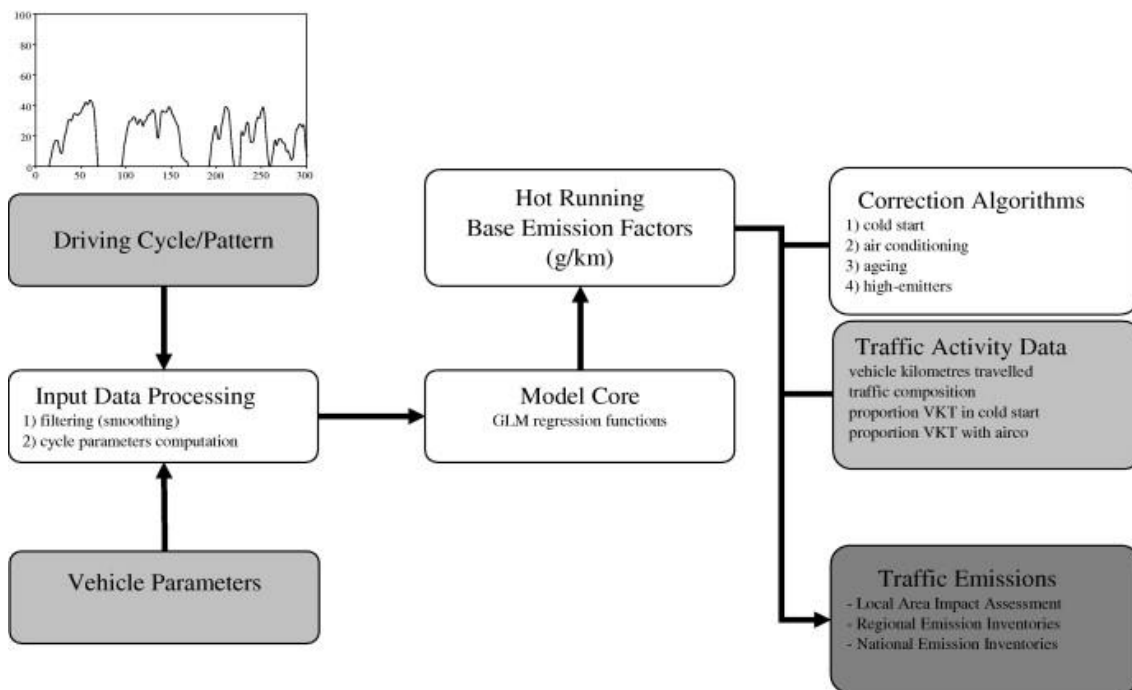
Zástupcem těchto modelů je model HBEFA (*Handbook on Emissions Factors for road transport*) [21]. Jedná se o databázi obsahující emisní faktory, která je vyvíjena některými evropskými státy (Německo, Švýcarsko, Rakousko, Švédsko a Norsko). Emisní faktory jsou zde vypočítávány na základě druhu vozidel, silniční třídy a dopravní situace. Druh vozidel je odvozen podle evropských emisních standardů, silniční třídy jsou rozlišeny na dálnice, hlavní komunikace, sekundární komunikace, místní komunikace a rezidenční (obytné) silnice. Dopravní situace je odvozena z průběhu dopravy a její rychlosti na čtyři základní třídy: normální provoz, pomalejší provoz, zhuštěný provoz, jízda v koloně [4].

#### **1.1.6 Modely založené na detailním popisu pohybu vozidel**

Modely založené na detailním popisu pohybu vozidel (*Model representing a detailed description of speeds experienced*) využívají pro odhad způsobených emisí testování velkého množství vozidel a jejich různých jízdních cyklů. Při měření je stanoveno množství různých parametrů, jako jsou např: rychlost, počet zastávek na km atd. Pro každou znečišťující látku

a třídu vozidel je aplikován regresní model. Aby bylo možné tyto modely využít, je potřeba velkého množství podrobných dat o pohybu vozidel, které je možné získat z mikroskopických dopravních modelů.

Zástupcem těchto modelů je model VERSIT+ [21],[22]. Struktura celého modelu je zobrazena na obrázku 2. Na obrázku jsou světle šedou barvou označena vstupní data, bílou procesy v modelu a tmavě šedou výstupní data. Je tedy možné pozorovat, že výstupem jsou emise vypočítané pro různě velká území (od lokální úrovně až po celostátní).



Obrázek 2: Struktura VERSIT+ modelu [22].

### 1.1.7 Modely okamžitých emisí

Modely okamžitých emisí (*Instantaneous models*) jsou založeny na stanovení množství emisí při různých stavech provozu vozidla (klid, zrychlení, zpomalení a jízda). Pro každý stav je pak stanoveno množství emisí pro dané vozidlo a škodlivou látku. Celkové emise jsou vypočteny na základě času, který vozidlo stráví v daném stavu. Některé modely využívají také informaci o síle motoru, rychlosti a zrychlení ovlivněné stavem provozu. Tyto modely je možné spojit s dynamickými dopravními modely. Využívají se pro mikroskopické modelování [7].

Zástupcem je model VeTESS, který odhaduje emise na základě podrobného měření jednoho vozidla. Do výpočtu vstupují specifické rychlostní profily, volba převodových stupňů atd. Model využívá 3D mapy motoru pro výpočet odhadu emisí [23].

Při úspěšné aplikaci jednoho z modelů popsaných v této podkapitole lze získat informaci o množství emisí. Tato informace je však vztažena převážně ke konkrétnímu místu (případně

k linii, či jednomu vozidlu). Aby bylo možné zjistit, jak se škodliviny šíří do okolí, je potřeba využít disperzního modelování. Tomuto tématu se věnuje následující podkapitola.

## 1.2 Disperzní modelování

Pro určení přesnější kvality ovzduší lze doplnit emisní modelování o disperzní modelování. Disperzní modely používají matematické výpočty pro popis atmosférických, chemických a fyzikálních procesů odehrávajících se v atmosféře. Umožňují stanovit kvalitu ovzduší na konkrétním místě [4],[24].

Tato podkapitola se věnuje využití disperzních modelů využívaných pro modelování znečištění způsobeného dopravou.

### 1.2.1 Krabicové modely

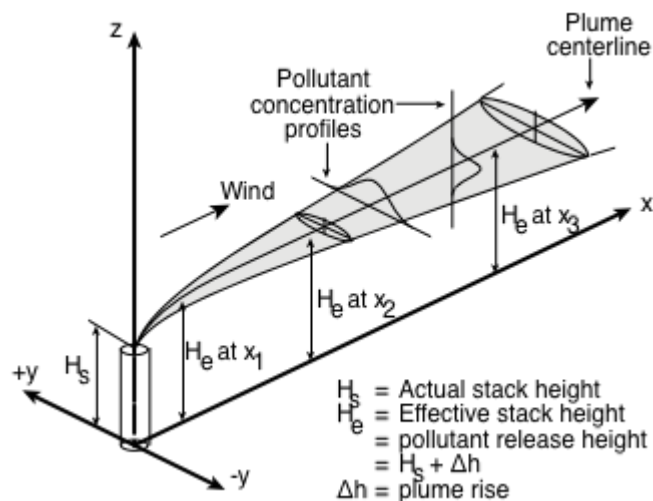
Krabicové modely (*Box models*) uvažují homogenní koncentraci látek uvnitř sledované oblasti (boxu nebo krabice) [7]. Do krabice jsou vpuštěny škodliviny, které následně podléhají chemickým a fyzikálním procesům [25]. Vstupními parametry jsou meteorologické vlastnosti okolí a množství emisí. Vnitřek boxu není definovaný. Uvažuje se, že jsou škodliviny v boxu rozmístěny rovnoměrně. Právě kvůli tomu není tento typ modelů v dnešní době příliš využívány.

Tento druh disperzního modelování je využit v modelu AURORA. Jedná se o model kvality ovzduší využívaný pro výpočet koncentrace škodlivin v městských oblastech. Jako krabice je zde uvažován tzv. silniční kaňon (*street canyon*) definovaný délkou, šířkou a výškou [26]. Silniční kaňon lze chápat jako tunel, který je ohraničen budovami obklopujícími danou silnici.

Dalším zástupcem je model GEOMET využívaný pro výpočet průměrné koncentrace  $\text{NO}_2$  s využitím jednoduchého algoritmu pro odhadnutí reakce  $\text{NO}$  s ozonem. Výpočet je aplikovaný na silniční kaňon pro tři různé větrné podmínky [25].

### 1.2.2 Gaussovské disperzní modely

Gaussovské modely (*Gaussian dispersion models*) jsou založeny na distribuci škodlivých látek řídicí se normálním rozdělením ve vertikálním i horizontálním směru [25]. Gaussovské modely patří mezi vlečkové modely, jelikož modelují tvar kouřových vleček na základě různých pohledů na horizontální a vertikální rozptyl příměsí [24]. Přehled Gaussovského vlečkového modelu je zobrazen na obrázku 3.



Obrázek 3: Přehled Gaussovského modelu [27].

Tento typ modelování využívají pro výpočet disperze emisí modely CALINE4 a HIWAY2. V obou případech je jako vstup do výpočtu uvažována linie jako nekonečný zdroj dopravy. Linie je rozdělena na jednotlivé elementy, které jsou orientovány kolmo na směr větru. Model CALINE4 uvažuje mechaniku a termální turbulenci způsobenou pohybem vozidel. Model HIWAY2 uvažuje pouze mechanické vlivy [25].

Dalším zástupcem je finský model CAR-FI navržený pro výpočet hodinových koncentrací emisí (CO, NO, NO<sub>2</sub> atd.) způsobených dopravou [25].

Gaussovský model byl dále využit pro výpočet velkoměřítkových emisních map vypočtených z dopravy. Informace o dopravě byla převzata z kamerových záznamů. Pro modelování disperze látek byl využit model RapidAir [28].

### 1.2.3 Lagrangeovy disperzní modely

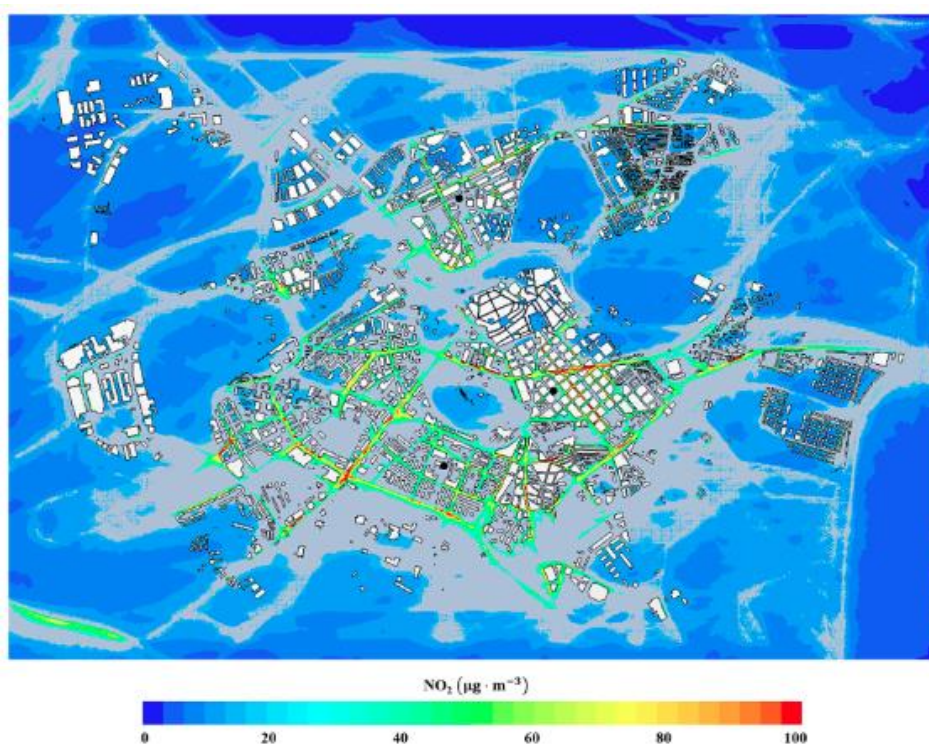
Lagrangeovy modely (*Lagrangian dispersion models*), také nazývané trajektorové, jsou podobné krabicovým modelům, jelikož uvažují výpočet v předem definované oblasti (boxu nebo krabici), která obsahuje škodlivé látky. Krabice je následně posouvána proti směru větru a Lagrangeovy modely sledují trajektorii krabice. Mezi parametry ovlivňující výpočet patří změny v koncentraci látek způsobené rychlostí látky, turbulencí větru a molekulární difuzí. Modely lze využít jak pro homogenní podmínky napříč plochému terénu, tak pro nehomogenní podmínky v členitém terénu [25].

Model GRAL byl využit pro výpočet znečištění způsobeného dopravou na silnici A10 v Rakousku [29]. Model počítá koncentrace škodlivin pro liniové a bodové prvky, dále je pomocí něj možné počítat i hodnoty z tunelů. Model byl také využit pro výpočet škodlivin pro město Modena v Itálii [30].

### 1.2.4 Modelování proudění látek (CFD)

Jedním z nástrojů pro modelování proudění vzduchu a šíření škodlivin je výpočetní modelování proudění látek (CFD). Při využití CFD modelování pro znečištění na úrovni jedné ulice se často využívá silničních kaňonů (*street canyon*), ve kterých se proudění vzduchu modeluje [4].

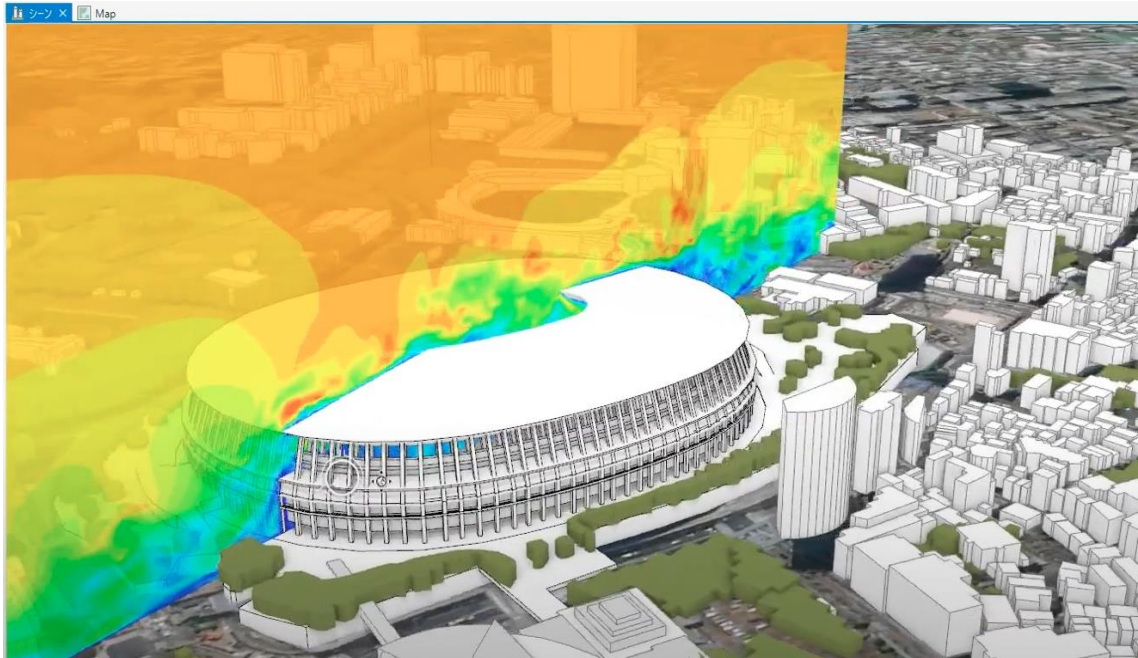
Jedním ze zástupců CFD modelů je studie *CFD modelling of air quality in Pamplona City (Spain)*, která se věnuje výpočtu ročních a sezónních map zobrazujících koncentraci  $\text{NO}_x$  škodlivin [31]. Výsledná mapa zobrazující roční průměry koncentrace  $\text{NO}_2$  ve městě Pamplona je zobrazena na obrázku 4.



Obrázek 4: Roční průměr koncentrace  $\text{NO}_2$  ve městě Pamplona [31].

Nástroj *Airflow Analyst* umožňuje modelování CFD v rámci geografického informačního systému (GIS). Jedná se o doplněk do softwaru ArcGIS Pro. Doplněk slouží pro simulaci proudění vzduchu ve vnějších prostorech, kde do výpočtu vstupuje terén a budovy na něm. Pomocí nástroje lze modelovat silné větry, problémy s ventilací vzduchu, rozpad látek atd. Z důvodu složitých výpočtů je ale potřeba nástroj spustit na superpočítači [32]. Výsledek modelování proudění vzduchu je zobrazen na následujícím obrázku 5.



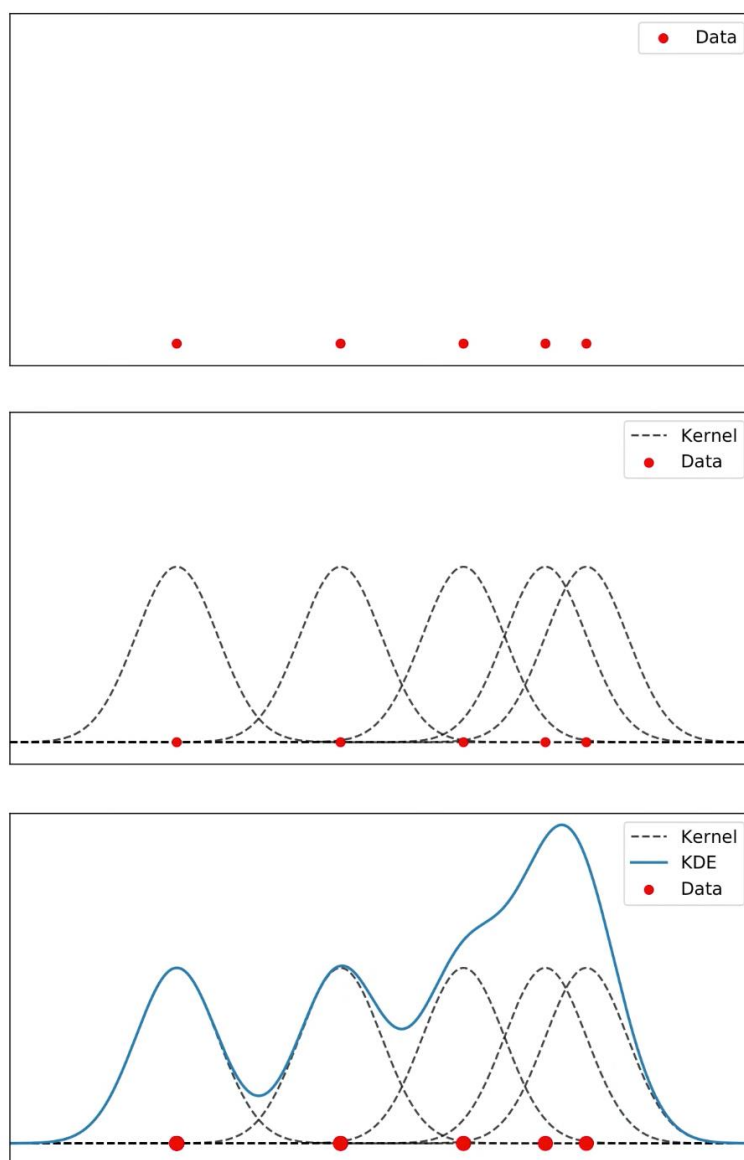


Obrázek 5: Příklad vizualizace s využitím nástroje *Airflow Analyst* [32].

Autor se v rámci práce věnoval problematice CFD modelování ve větší míře. Veškeré získané poznatky jsou z důvodu jednotnosti textu práce uvedeny jako příloha práce (viz příloha A – Rešerše CFD modelování).

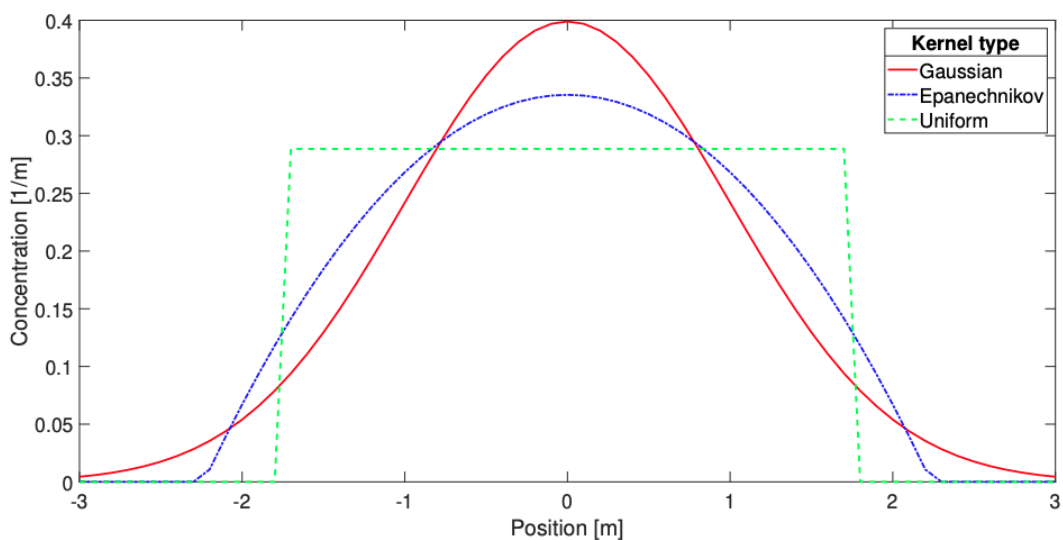
### 1.2.5 Modelování pomocí jádrových funkcí

Modelování pomocí jádrových funkcí (*kernel function*) lze využít jako zjednodušení disperzních modelů, jelikož je díky nim možné vypočítat pravděpodobnou hustotu jevu kolem sledovaných prvků (šíření škodlivin do okolí). Výpočet pravděpodobné hustoty jevu probíhá ve dvou krocích. Nejprve se definuje jádrová funkce (jádro) pro každý bod. Následně jsou tyto funkce sečteny, čímž je vypočítána pravděpodobnost hustoty sledovaného jevu [33]. Postup je zobrazen na obrázku 6.

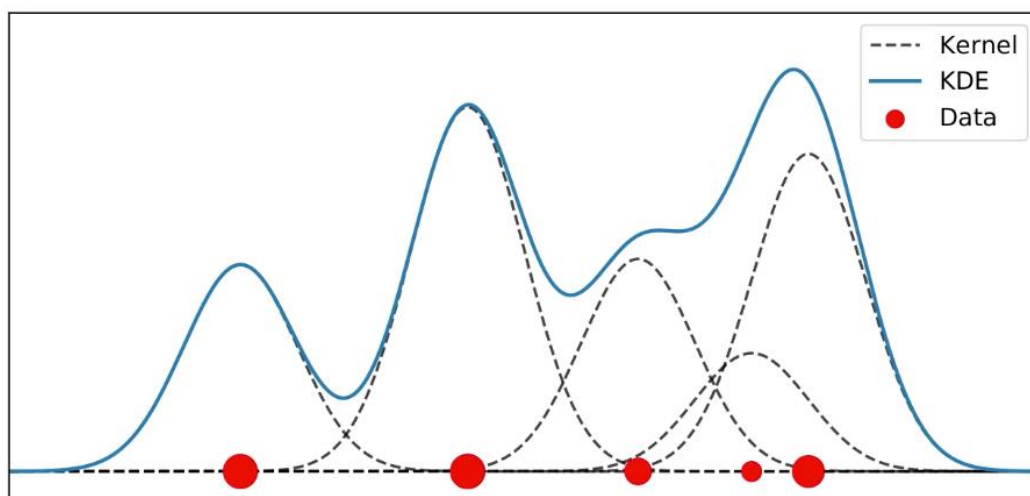


Obrázek 6: Výpočet hustoty jevu s využitím jádrové funkce (Gaussův druh). Nahoře jsou zobrazena vstupní data. Uprostřed jsou zobrazeny jádrové funkce pro jednotlivé vstupní body. Dole je zobrazena výsledná jádrová funkce [33].

Jádrovou funkcí může být jakákoliv funkce. Mezi nejvyužívanější však patří uniformní (neboli krabicové) jádro, Epanechnikovo (neboli parabolické) jádro a Gaussovské jádro [4]. Jednotlivé druhy jsou zobrazeny na následujícím obrázku 7. Klíčovým parametrem při výpočtu odhadu je vzdálenost, do které se sledovaný jev bude šířit. Funkce v jednotlivých bodech je také možné vážit podle hodnoty, která se v daných bodech vyskytuje (viz obrázek 8).



Obrázek 7: Jednotlivé druhy jádrových funkcí (jader) [33].



Obrázek 8: Vážená jádrová funkce [33].

Jádrovým funkcím se při výpočtu atmosférické disperze věnuje studie s názvem *Kernel density estimators as a tool for atmospheric dispersion models* [34].

### 1.3 Shrnutí a volba emisního a disperzního modelu

Předchozí podkapitoly se věnovaly stručnému popisu modelů, které se využívají pro výpočet emisí způsobených silniční dopravou (emisní modelování) a jejich šíření do okolí (disperzní modelování). Oba druhy modelování lze rozdělit podle velikosti zkoumaného území na makroskopické a mikroskopické.

Emisní modely, které jsou popsány v podkapitole 1.1 slouží primárně k popisu množství, rozmístění a časové variace emisí. V minulosti byla navržena řada emisních modelů. Z hlediska práce patří mezi zajímavé modely zejména makroskopické emisní modely, kam patří např. modely založené na emisních faktorech (sekce 1.1.1), či modely průměrné rychlosti (sekce 1.1.2).

Disperzní modelování, popsané v podkapitole 1.2, slouží ke stanovení přesnější kvality ovzduší. Tyto modely využívají matematických vztahů pro popsání šíření jevů do okolí. Některé modely jsou vhodné pouze pro mikroskopické modelování (CFD modelování – viz sekce 1.2.4) a to zejména z důvodu jejich výpočetní náročnosti. Alternativně je ale možné využít jednodušších modelů, kterými jsou např. modely využívající jádrových funkcí (viz sekce 1.2.5).

Autor se v praktické části práce věnuje navržení jednoduchého algoritmu pro výpočet znečištění a jeho šíření. Pro emisní modelování využívá autor některé vlastnosti modelů průměrné rychlosti (viz sekce 1.1.2), jelikož je tento druh modelů vhodný pro regionální účely, což se shoduje se zájmovým územím této práce. Shodná jsou také vstupní data, která má autor k dispozici (druh vozidel, silniční třídy, průměrná spotřeba paliva).

Pro disperzní modelování je v práci využito jádrových funkcí. Důvodem je zejména jednoduchost výpočtu a nízká náročnost na vstupní data. Pro využití ostatních druhů disperzních modelů by v některých případech bylo z důvodu náročnosti výpočtu potřeba využití superpočítače. Další limitací těchto modelů je pak zájmové území, jelikož se tyto modely využívají převážně pro mikroskopické účely.

## 2 Přehled zobrazovacích metod vhodných pro zobrazení škodlivých látek

Předchozí kapitola stručně popisuje některé přístupy k výpočtu znečištění ovzduší způsobeného dopravou. Dosažené výsledky je v dalším kroku potřeba vhodně zobrazit a předat tak informaci o množství emisí srozumitelnou formou. Tato kapitola popisuje různé vizualizační metody a přístupy, které byly použity v projektech a studiích s podobným zaměřením.

Jako zdroj emisí je v práci využívána dopravní intenzita na silničních úsecích. Silniční úseky jsou vyjádřeny pomocí liniových prvků v mapě. Jednou ze základních zobrazovacích metod je vyjádření množství emisí pomocí linie. Práce se dále věnuje šíření vzniklých emisí do prostoru, které je možné vyjádřit více způsoby. Převážně je však využíváno rastrů, ve kterých je množství emisí vyjádřeno hodnotou buňky v rastru.

Zdroj a šíření emisí jsou jevy, které se mění v prostoru a v čase. Právě z tohoto důvodu vzniká problém při předávání informace skrze 2D obrazovku počítače<sup>1</sup>. Uživatelé nemohou být jednoduše předávány informace měnící se v prostoru a v čase najednou. Při vizualizaci je proto obvyklé jednu variabilitu (buď prostorovou, nebo časovou) potlačit a zaměřit se na tu druhou [35]. Případně využít třetí dimenzi, pomocí které lze zobrazit další proměnnou.

Jednotlivé zobrazovací metody jsou v kapitole rozděleny nejprve podle dimenze, ve které jsou jevy modelovány. První skupinou jsou metody, které pro zobrazení zdroje emisí využívají liniových prvků (1D) a zobrazují výsledek emisního modelování. Druhou skupinou jsou metody, které pro zobrazení šíření emisí do prostoru využívají převážně rastrových vrstev (2D), pomocí kterých zobrazují výsledky disperzního modelování. Každá skupina je dále rozdělena podle dimenze zobrazovaného modelu reálného světa na 2D a 3D metody.

### 2.1 Zobrazení zdroje emisí na liniových prvcích

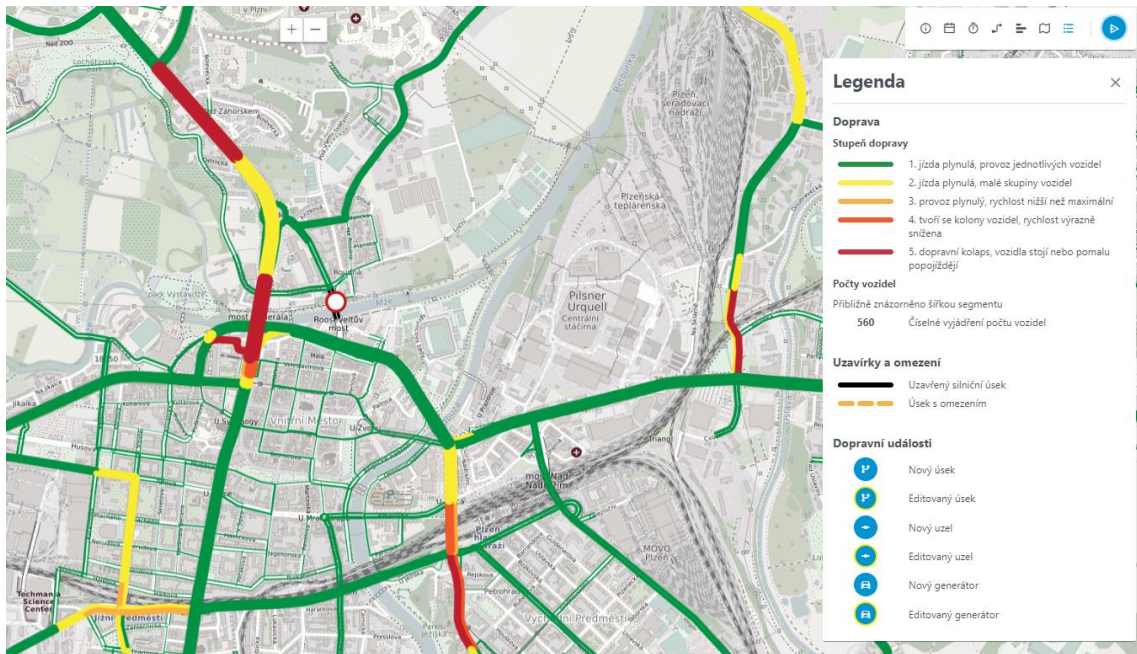
Jak je již zmíněno výše, hlavním zdrojem pro výpočet množství emisí je dopravní intenzita na silničních úsecích, které jsou v mapě vyjádřeny pomocí liniových prvků ve formě vektorových dat. Tato podkapitola popisuje jednotlivé příklady zobrazení emisí a dopravních intenzit pomocí liniových prvků v mapě. Zobrazovací metody jsou rozděleny do dvou základních skupin. První skupinou jsou metody, které pro předání informace využívají pouze dva rozměry. Druhou skupinou jsou metody, které využívají třetí dimenzi.

---

<sup>1</sup> Zobrazováním jevů měnících se v prostoru a čase, řešil autor v práci *Metody zobrazení časoprostorových jevů na příkladu agroklimatických faktorů* [35]

## 2.1.1 Využití 2D map

Liniových prvků využívá pro zobrazení dopravních intenzit například aplikace *Traffic Modeller*, která slouží pro modelování dopadů plánovaných dopravních uzavírek na plynulost dopravy [36]. Aplikace umožňuje prohlížení plánovaných dopravních staveb, dále také umožňuje zobrazení intenzity a stupně dopravy za ideálního stavu bez omezení. Dopravní intenzita je zde vyjádřena pomocí barvy a šířky linie, jak je vidět na obrázku 9. K prohlížení časové variace zmínovaných jevů slouží kalendář a posuvná časová osa.



Obrázek 9: Zobrazení dopravní intenzity v aplikaci *Traffic Modeller* [36].

Další zajímavou vizualizaci dopravní intenzity nabízí webová aplikace *Hourly Traffic on the US Interstate, Visualized as a Living Circulatory System* [37]. Doprava na hlavních silničních tazích v USA je zde zobrazena podobně jako lidský oběhový systém (viz obrázek 10). Časová variace je zde vyřešena pomocí posuvné časové lišty.



Obrázek 10: Hodinová dopravní intenzita na hlavních silničních tazích v USA vyjádřená v podobě lidského oběhového systému [37].

Webová aplikace *BreezoMeter* [38] poskytuje informace o množství různých škodlivin. Příspěvek emisí z liniových prvků (silnic) je zobrazen jejich zbarvením. Aplikace však zobrazuje i celkovou kvalitu ovzduší (viz podkapitola 2.2). Aplikace dále umožňuje posun v čase. Uživatel má tak možnost sledovat, jak se kvalita ovzduší mění v čase. Příklad vizualizace je zobrazen na následujícím obrázku 11. V případě většího přiblížení se v aplikaci zobrazí jako podklad 3D model z důvodu lepší orientace v prostoru, samotné jevy jsou zobrazeny pouze ve 2D.



Obrázek 11: Zobrazení příspěvku k znečištění ovzduší ze silničních úseků [38].

Článek *Urban Air Pollution Mapping and Traffic Intensity: Active Transport Application* sleduje znečištění ovzduší v centrální části města Quito v Ekvádoru [39]. Znečištění je vypočítáno na základě korelace koncentrace škodlivin  $PM_{2.5}$  s dopravními daty. Koncentrace škodlivin je zde zobrazena pomocí zbarvení liniových prvků ulic, na kterých se pohybují vozidla. Článek se také věnuje disperzi škodlivin do prostoru (viz podkapitola 2.2). Příklad vizualizace je zobrazen na obrázku 12.



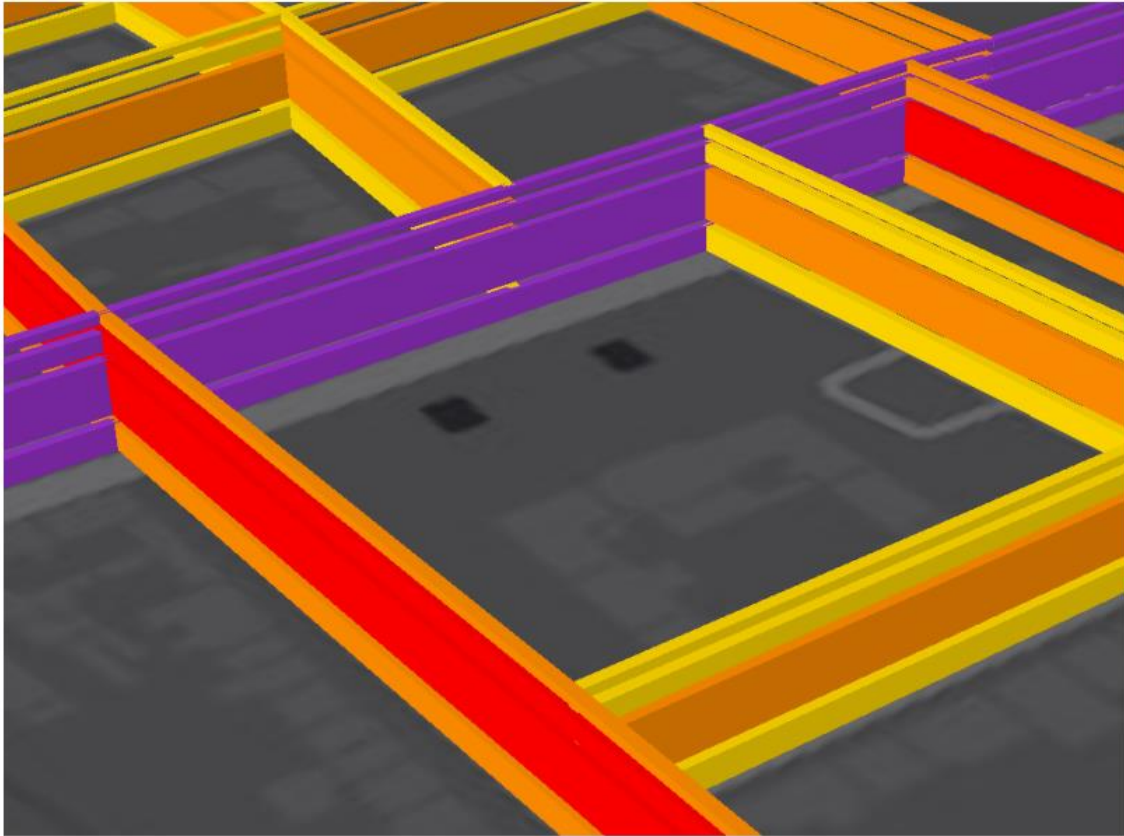
Obrázek 12: Koncentrace škodlivin  $PM_{2.5}$  ve městě Quito (čtvrť Mariscal). Odlišná barva liniových prvků popisuje rozdíly v koncentraci škodlivin [39].

### 2.1.2 Využití třetího rozměru

Ve všech dosud zmíněných zobrazovacích metodách byla řešena časová variace jevů pomocí časové osy, s výjimkou článku [39], kde je znečištění zobrazeno pouze staticky. Pomocí časové osy je však možné zobrazit jev pouze pro jeden časový interval najednou. Není tak například možné najednou porovnávat, jak se hodnoty jevu lišily v různých časových obdobích. Jednou z možností, jak zobrazit časovou a prostorovou variaci najednou, je metoda *space-time cube* (STC). Metoda využívá třetího rozměru pro zobrazení změny jevu v závislosti na čase. Metoda STC je využita i v článku *The Third Dimension in Noise Visualization – a Design of New Methods for Continuous Phenomenon Visualization* [40]. Metoda se zde využívá pro vizualizaci hluku v městské zástavbě. Samotná vizualizace je v práci důkladně popsána. Hluk je zde vizualizován různými způsoby (linie, izopásma, body). Zajímavým přístupem je zejména liniové vyjádření, kde je míra hluku vyjádřena pomocí zbarvení linie, a časová složka, tedy rozdělení do čtyř

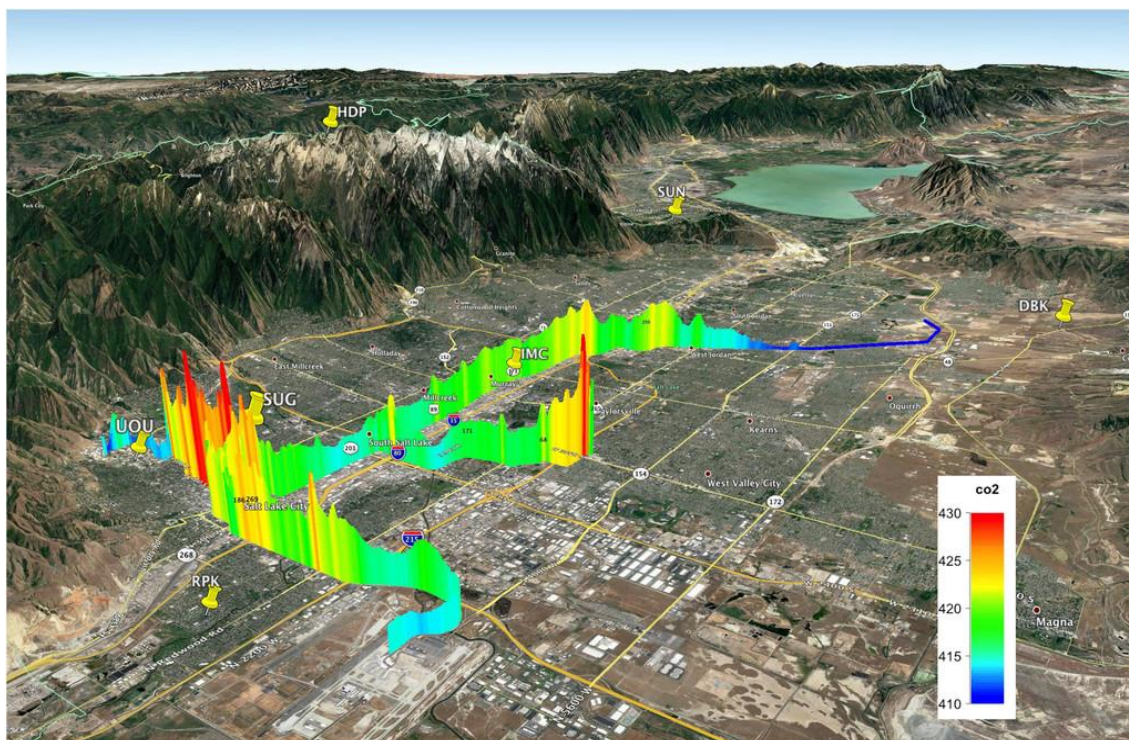


intervalů v průběhu dne, je vyjádřeno pomocí výšky 3D linie. Příklad vizualizace je vidět na obrázku 13.



Obrázek 13: Hluk emitovaný silniční sítí s použitím STC [40].

Článek s názvem *CO<sub>2</sub> and Carbon Emissions from Cities* [41] je příkladem využití třetí dimenze pro liniové prvky. Oproti předchozímu příkladu, kde byla třetí dimenze využita k vyjádření časové variace, je zde třetí rozměr využit pro vyjádření množství škodlivin CO<sub>2</sub> na silnicích využívaných pro tranzitní dopravu. Data jsou měřena pomocí pohyblivé laboratoře, která se skládá z dodávky a řady senzorů pro měření kvality ovzduší. Data jsou následně zprůměrována na 40 metrů dlouhé úseky a množství škodlivin je vyjádřeno pomocí výšky sloupce nad daným úsekem (viz obrázek 14). Kromě výšky sloupce je míra znečištění vyjádřena barevnou stupnicí.



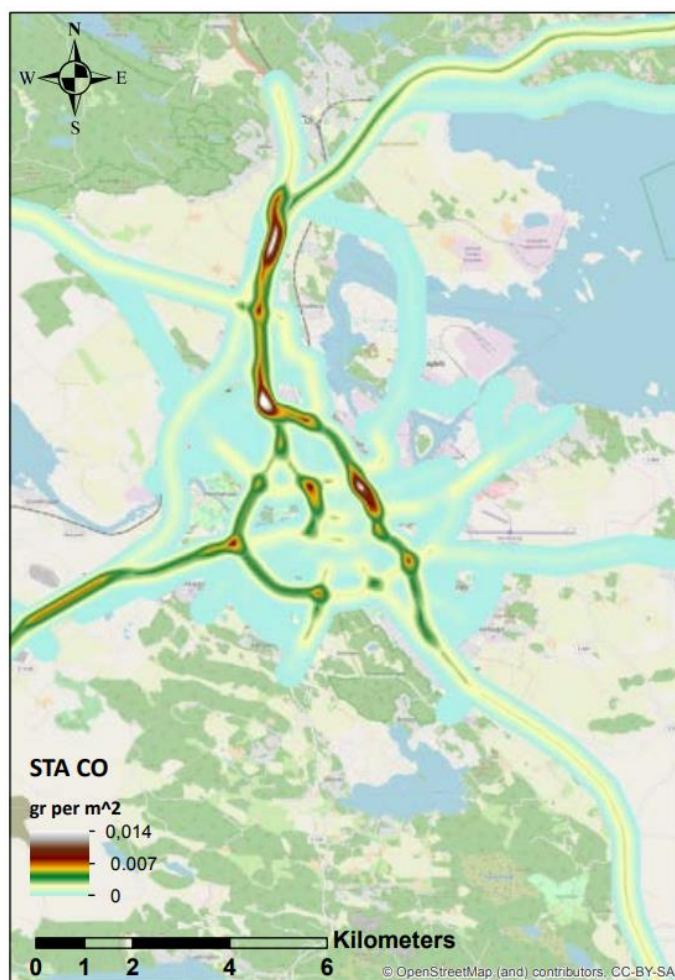
Obrázek 14: Distribuce CO<sub>2</sub> na silničním úseku v Utahu z dat měřených na pohyblivé laboratoři. Výška sloupce vyjadřuje množství škodlivin [41].

## 2.2 Zobrazení šíření jevu do prostoru

Dosud zmíněné zobrazovací metody předávají informaci o zdroji emisí na liniových prvcích. Práce se dále věnuje šíření emisí do prostoru, které bývá vyjádřeno prostřednictvím rastrových vrstev. Tato podkapitola stručně popisuje některé přístupy pro zobrazení šíření emisí do prostoru. Podobně jako v předchozí podkapitole jsou i zde jednotlivé metody rozděleny do dvou skupin na 2D a 3D metody.

### 2.2.1 Využití 2D map

Již zmiňovaná studie *Emission estimation based on traffic models and measurements* [4] využívá pro zobrazení hustoty CO v zájmovém území rastrové vrstvy v mapě. Hustota šíření látek je zde počítána pomocí jádrových funkcí a hodnota každé buňky v rastru vyjadřuje hustotu CO v jednotkách [g/m<sup>2</sup>]. Dosažené výsledky jsou zobrazeny na obrázku 15. Ve studii je podobnou metodou zobrazen kromě šíření znečištění také jev nazývaný *People Grams Exposure* (PGE). K jeho výpočtu je potřeba rastr, jehož buňky obsahují hodnotu o počtu obyvatel na m<sup>2</sup>. Pokud mají oba rastry stejné rozlišení, je možné rastry vynásobit a dostat tak výsledný jev PGE pro zájmové území. Tento jev slouží k odhalení lokalit, ve kterých je velké množství obyvatel vystaveno vysokým emisím.

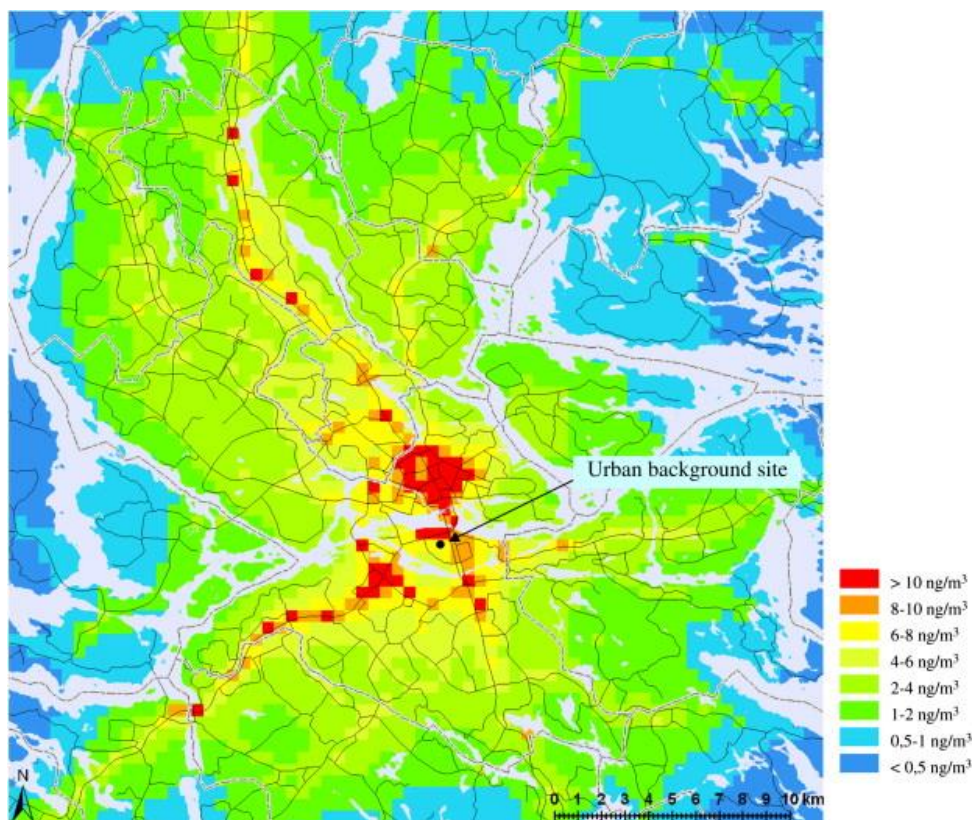


Obrázek 15: Hustota škodlivin CO v jednotkách [g/m<sup>2</sup>] [4].

Již zmiňovaný článek *Urban Air Pollution Mapping and Traffic Intensity: Active Transport Application* [39] využívá pro zobrazení disperze škodlivin rastrové vrstvy. Disperze do prostoru byla vypočítána pomocí prostorové interpolace, kde byla využita metoda Kriging. Příklad vizualizace je vidět na obrázku 12.

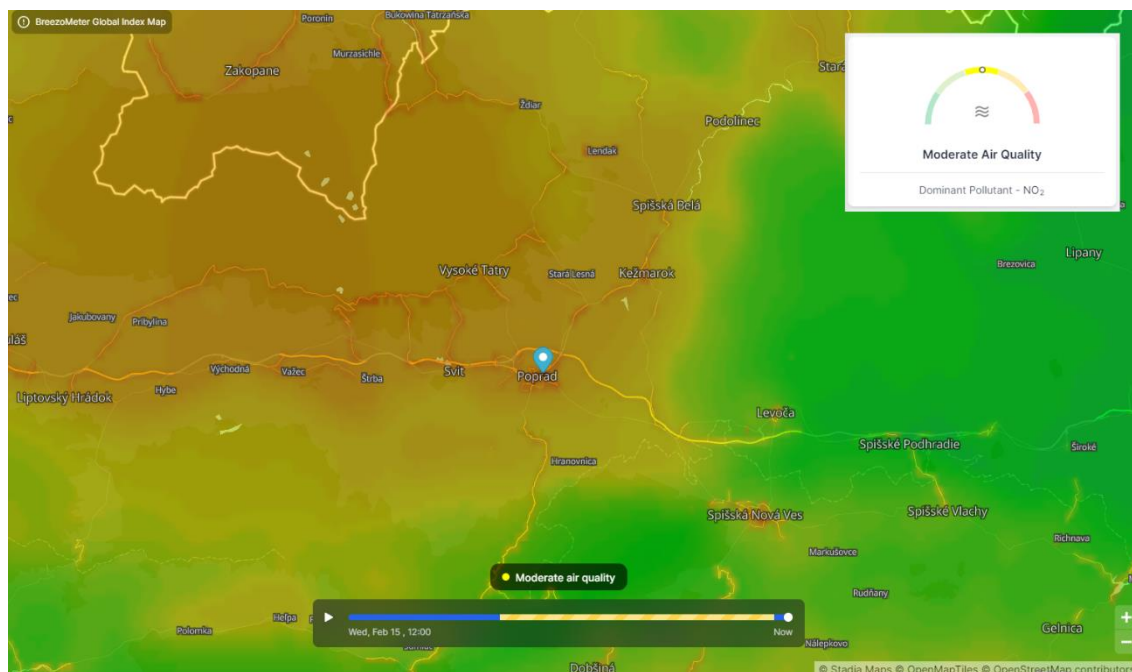
Článek *Road traffic emission factors for heavy metals* se věnuje výpočtu dopravních emisních faktorů pro těžké kovy [42]. Příspěvek dopravy k celkové míře znečištění byl vypočítán na základě měření v různých výškách (ulice, střecha). Výsledky pro jednotlivé kovy byly porovnány s hodnotami v místě tzv. *Urban background*<sup>2</sup>. Největších rozdílů dosahuje měď. Pro zobrazení distribuce koncentrace mědi je zde využito rastrových vrstev (viz obrázek 16). Informace o koncentraci škodlivin je vyjádřena pomocí zbarvení buněk rastru.

<sup>2</sup> Urban background – Jedná se o termín, který slouží k indikaci skutečnosti, že měření koncentrace škodlivin ovzduší, bylo provedeno v městské oblasti, ve které je míra expozice reprezentativní pro běžnou městskou populaci (viz - <https://www.insee.fr/en/metadonnees/definition/c2193>).



Obrázek 16: Distribuce koncentrací mědi způsobené dopravou pro oblast Stockholmu a okolí [42].

Rastrové vrstvy využívá pro zobrazení kvality ovzduší také již zmíněná aplikace *BreezoMeter* [38]. Kvalita ovzduší je zde rozdělena do pěti základních skupin a zobrazena pomocí zbarvení buněk. Příklad vizualizace je zobrazen na obrázku 17.



Obrázek 17: Zobrazení kvality ovzduší ve webové mapové aplikaci *BreezoMeter* [38].

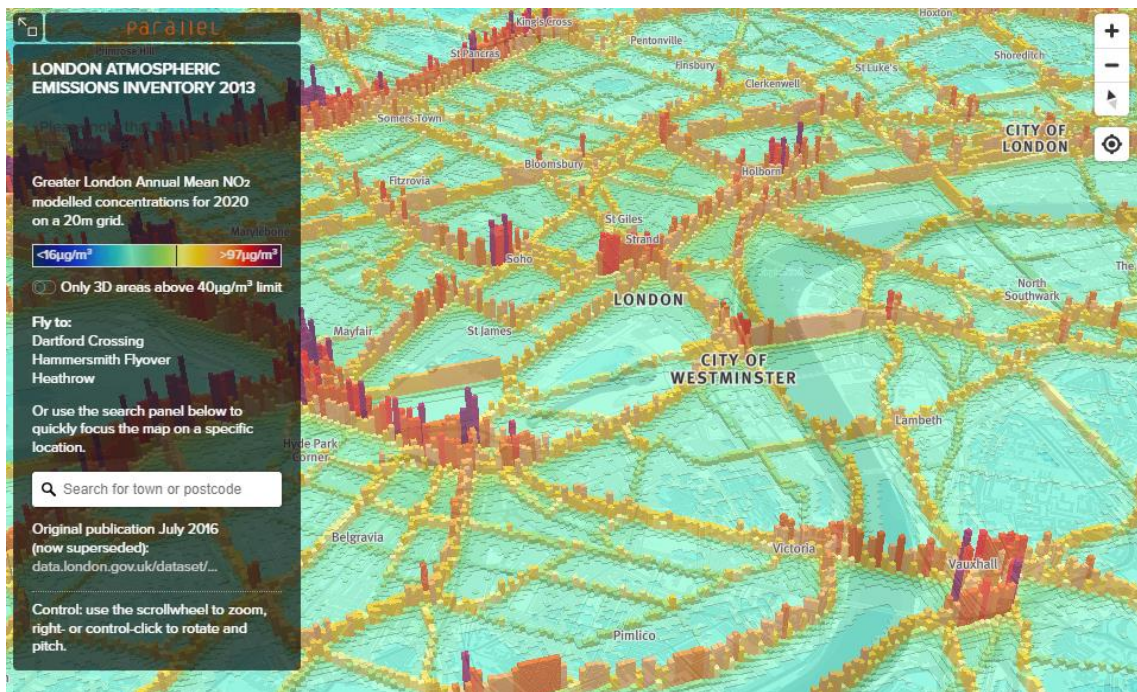
### 2.2.2 Využití třetího rozměru

Obdobně jako u liniových prvků je i zde možné pro vizualizaci jevu využít třetí rozměr. Aplikace *EartSense* poskytuje služby pro monitorování, modelování a správu kvality ovzduší. Jednou z těchto služeb je *MappAir* poskytující roční průměrná data o koncentraci různých škodlivin ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ ) [43]. Data jsou poskytována ve formě globálních a národních modelů a podle toho také v různých rozlišeních. Jedním z produktů *MappAir* je městský model s rozlišením až 2 metry. Pro výpočet je využito CFD modelování (viz sekce 1.2.4) a detailní informace o využití půdy. Výsledky je pak možné zobrazit spolu s 3D modelem města (viz obrázek 18). Veškerá data jsou poskytována za úplatu.



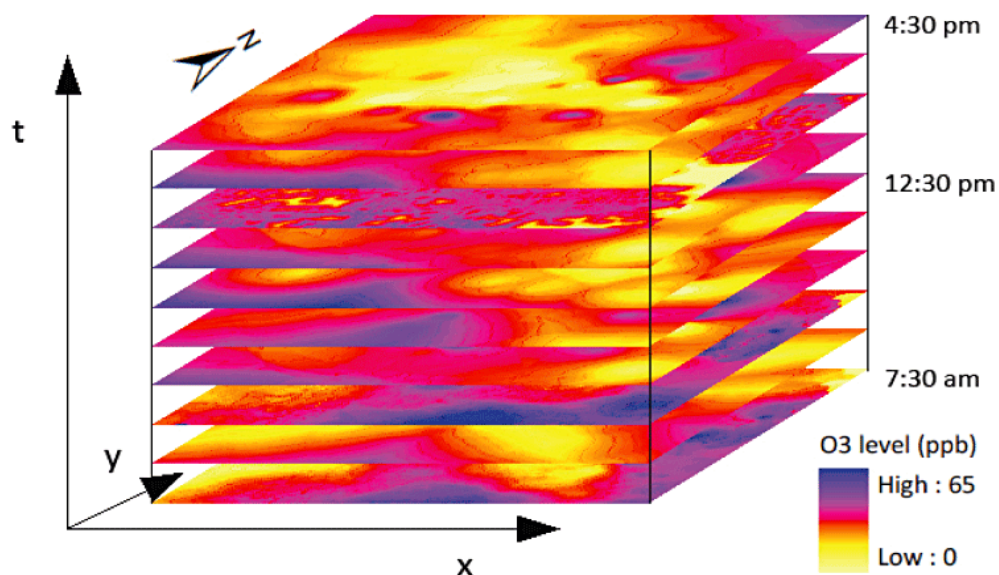
Obrázek 18: Městský model znečištění ovzduší ve službě *MappAir* [44].

Dalším příkladem využití třetího rozměru pro vizualizaci emisí je databáze *London Atmospheric Emissions Inventory*, která obsahuje georeferencované datasey popisující emise a jejich zdroje v Londýně [45]. Projekt byl vytvořen v roce 2013 a emise jsou zde zobrazeny pro tento rok, zároveň také jako predikce pro roky 2020, 2025 a 2030. Kvalita ovzduší je zde počítána z různých zdrojů (doprava, průmysl, domácnosti atd). Databáze obsahuje 2D mapy různých druhů škodlivin. Kromě těchto map byla vytvořena webová aplikace zobrazující průměrné roční koncentrace emisí  $\text{NO}_2$  v roce 2020 [46]. Množství emisí je zobrazeno pomocí výšky a barvy sloupců ve dvacetimetrové mříži (viz obrázek 19).



Obrázek 19: Koncentrace  $\text{NO}_2$  v Londýně pro rok 2020. Množství emisí je vyjádřeno pomocí výšky a barvy sloupce ve dvacetimetrové mříži [46].

Podobně jako u liniových prvků je i pro šíření emisí možné využít metodu STC a využít tak třetí rozměr pro zobrazení časových variací jevu. Tato metoda byla využita v článku *Constructing a Near Real-time Space-time Cube to Depict Urban Ambient Air Pollution Scenario* pro zobrazení úrovně  $\text{O}_3$  škodlivin [47]. V článku jsou pro vizualizaci jednotlivých časových vrstev využity rastry (viz obrázek 20). Jako časové vrstvy je ale možné uvažovat i jiné druhy dat (např. body, 2,5D Grid síť atd.). Různé způsoby využití STC jsou uvedeny v práci [48]. Mimo jiné jsou zde zmíněny i některé nedostatky jednotlivých metod.



Obrázek 20: Zobrazení škodlivin  $\text{O}_3$  pomocí metody STC pro oblast Houston v Texasu [47].

## 2.3 Shrnutí a volba zobrazovacích metod

Předchozí podkapitoly stručně popisují jednotlivé zobrazovací metody, které byly využity v pracích a studiích s podobným zaměřením. Jak bylo zmíněno výše, zdroj i disperze emisí, jsou jevy, které se mění v prostoru a v čase. Aplikace *BreezoMeter* [38] a *Traffic Modeller* [36] využívají pro vyjádření časové variace časovou osu. Její výhodou je zejména jednoduchost v interpretaci uživatelem a dále také možnost dynamického přehrávání dat v po sobě jdoucích časových intervalech.

Jiným přístupem pro sledování časové variace jevů je metoda STC. V této metodě je pro zobrazení času využita třetí dimenze. Různé způsoby využití této metody jsou popsány v práci [48]. Metoda je využita i pro vizualizaci hluku v článku [40], kde je metoda aplikována na liniové prvky. Oproti časové ose, umožňuje STC zobrazení hodnoty jevu v různých časových okamžicích najednou, čímž je možné předávat současně informace o změně v prostoru i v čase. V některých případech však může dojít k nepřehlednosti zobrazovaných jevů, které vzniknou např. v případě zobrazení rastrových vrstev nad sebou. Dojde tak k překrytí spodních vrstev, takže viditelná je vždy pouze vrchní vrstva.

Třetí dimenze může být kromě času využita i pro předání informace o samotné hodnotě jevu. Hodnota je vyjádřena pomocí výšky a barvy sloupce nad sledovaným prvkem. Tato metoda je využita pro liniové prvky v článku [41]. Podobným způsobem je metoda využita i pro předání informace o disperzi škodlivin v prostoru, v aplikaci, kterou poskytuje *London Atmospheric Emissions Inventory* [46].

Zajímavá zobrazovací metoda je využita v aplikaci *MappAir* [43], kde je množství škodlivin zobrazeno na podkladu 3D topografického modelu, který slouží k lepší orientaci v prostoru. S využitím topografického modelu však nastávají problémy z hlediska interpretace zobrazovaných jevů z důvodu proměnlivého měřítka a také možného překrývání objektů ve 3D scéně [49].

### 3 Příprava dopravního modelu pro výpočet znečištění ovzduší

Jak bylo již zmíněno v podkapitole 1.1, zabývající se emisními modely, znalost dopravní intenzity a rozložení dopravy je klíčovým vstupem pro makroskopické modelování znečištění ovzduší způsobeného dopravou. Tyto informace lze získat z tzv. dopravního modelu. Dopravním modelem se rozumí matematický model popisující stav dopravy na jednotlivých dopravních sítích [50]. Obecně se dopravní modelování věnuje různým typům dopravy, jako je např. silniční, letecká, či železniční. Tato práce je zaměřená pouze na silniční dopravu.

Dopravní modely silniční dopravy lze rozdělit na statické a dynamické [51]. Statické dopravní modely se používají k odhadu přetížení dopravních sítí. Jejich výhodou je zejména v rychlosti a jednoduchosti výpočtu. Tyto vlastnosti vedou k jejich využití zejména při výpočtu v rozsáhlejších sítích.

Dynamické dopravní modelování se využívá pro řízení a plánování dopravy. Tyto modely lze využít ke generování časově proměnlivého dopravního toku v dopravní síti [51]. Oproti statickým modelům je jejich výpočet složitější, a tak se využívají spíše v sítích o menší rozloze. Autor v rámci práce využívá pouze statického dopravního modelování z důvodu rozsáhlosti zájmového území a jednoduchosti výpočtu.

Tato kapitola se věnuje přípravě dopravního modelu, který je následně využit jako vstup do výpočtu znečištění ovzduší. Veškerá data využitá pro přípravu modelu jsou volně dostupná, díky čemuž je možné aplikovat celý postup výpočtu pro jiné libovolné území. Na úvod jsou v kapitole shrnuty použité technologie, které autor v praktické části práce využívá.

#### 3.1 Použité technologie

Celá praktická část práce, od přípravy a zpracování dat až po výpočet a výslednou vizualizaci, probíhá v softwaru ArcGIS Pro (AGP) od společnosti Esri [52]. Jedná se o desktopový geografický informační systém, který slouží pro tvorbu a správu prostorových dat, jejich analýzu a vizualizaci. V době zpracování byly využity verze softwaru 3.0.0 a 3.1.0.

Velkou výhodou tohoto softwaru je možnost automatizace. Jednotlivé geoprocessingové nástroje je tak možné pouštět dávkově, případně prostřednictvím skriptování vytvářet nástroje vlastní. Pomocí skriptů je také možné automatizovat opakované pracovní postupy. Ke skriptování využívá software AGP programovací jazyk Python. V práci byl pro proces obohacení dopravního modelu a následný výpočet emisí napsán skript, který je uveden v příloze diplomové práce (viz příloha B – Obsah příloženého CD). V případě potřeby výpočtu emisí pro jiné území je možné



změnit vstupní data a proces zopakovat. Celý skript byl napsán prostřednictvím technologie ArcGIS Notebooks<sup>3</sup>, kterou software AGP disponuje.

Skript obsahuje celou řadu geoprocessingových nástrojů, ty stěžejní jsou uvedeny a popsány v jednotlivých krocích pracovního postupu. Pro práci s daty je často využíván kurzor<sup>4</sup>. Jedná se o objekt, který lze využít pro přístup k datům. Prostřednictvím kurzoru je možné procházet jednotlivé řádky tabulky a měnit v nich hodnoty, případně lze přidávat řádky nové. V případě, že je kurzor vytvořen nad geografickou vrstvou, představují řádky tabulky jednotlivé prvky v geografické vrstvě. Kurzor v tomto případě umožňuje přístup k jednotlivým prvkům ve vrstvě.

Pro publikaci výsledků je v práci využit webový software ArcGIS Online (AGOL) [53], který umožňuje nejen publikaci 2D webových map, ale také 3D webových scén. V rámci AGOL je možné vytvářet interaktivní webové aplikace, které jsou veřejně přístupné. Tvorba těchto aplikací probíhá prostřednictvím nástroje ArcGIS Experience Builder<sup>5</sup>, kterým disponuje webový software AGOL.

## 3.2 Obohacení dopravního modelu

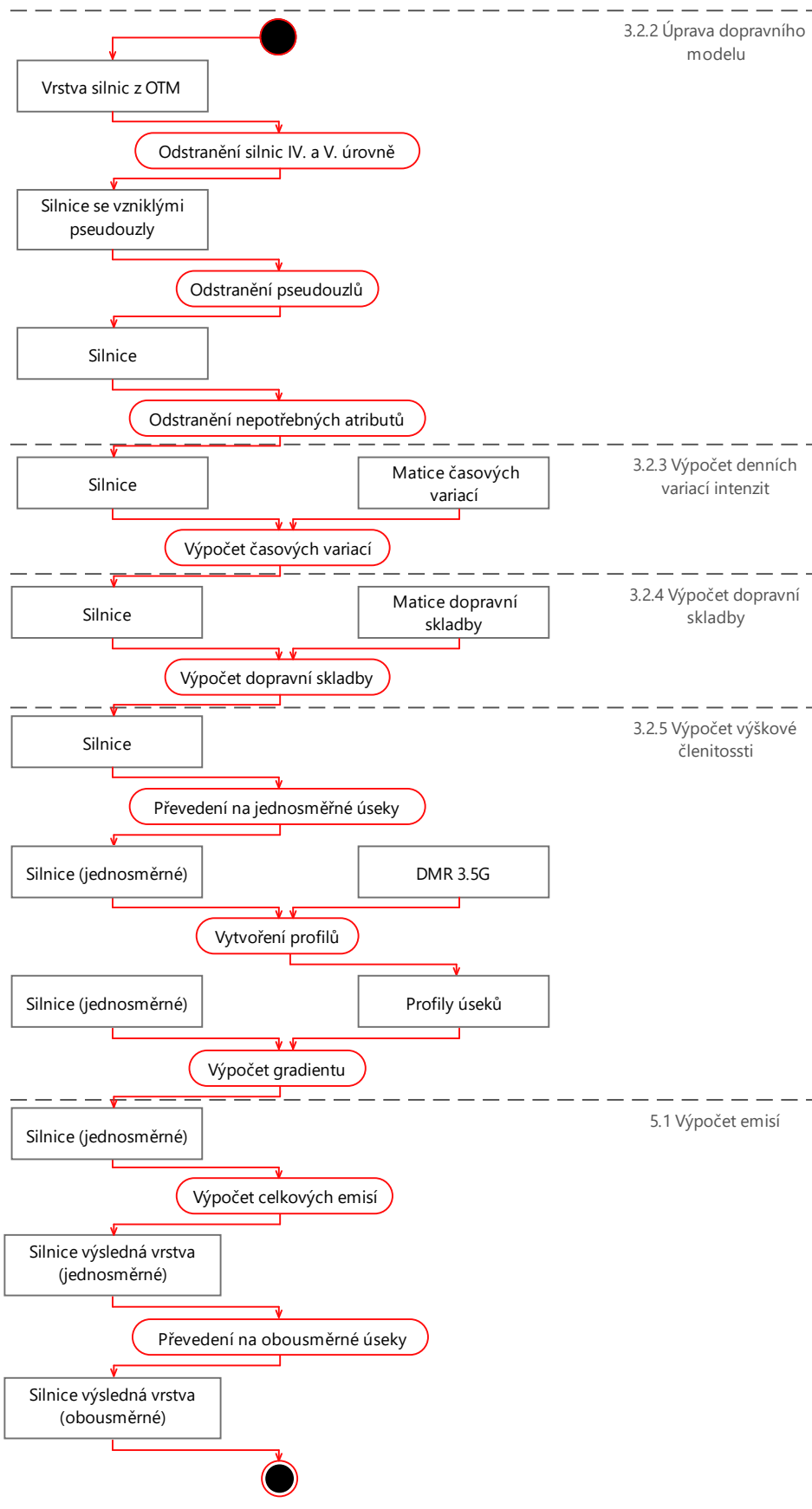
Tato podkapitola se věnuje podrobnému popisu obohacení dopravního modelu pomocí níže zmíněných dat (viz sekce 3.2.1). Na obrázku 21 je znázorněn UML diagram činností, který popisuje celý postup spolu se vstupními daty. Jednotlivé činnosti jsou na obrázku rozděleny podle sekcí. Podrobnější popis stěžejních kroků je popsán v jednotlivých sekcích. Celý postup je plně automatizovaný a probíhá pomocí autorem napsaného skriptu (viz Příloha B – Obsah příloženého CD). V případě potřeby obohacení modelu na jiném území stačí změnit vstupní parametry.

---

<sup>3</sup> ArcGIS Notebooks - <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/get-started/pro-notebooks.htm>

<sup>4</sup> Kurzor - <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/get-started/data-access-using-cursors.htm>

<sup>5</sup> ArcGIS Experience Builder - <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-experience-builder/overview>



Obrázek 21: UML diagram činností popisující postup úpravy dopravního modelu.

### 3.2.1 Vstupní data

Jako vstupní dopravní model je v následujícím postupu uvažován model z *Open Transport Map* (OTM). Jedná se o volně dostupný zdroj dat, který je vhodný pro vizualizaci intenzity dopravy na hlavních tazích i regionálních komunikacích států Evropské unie [54]. OTM byla vytvořena v rámci projektu *OpenTransportNet*. Data jsou zde dostupná ve formátu shapefile, případně jako webová mapová služba (WMS), nebo jako webová služba vzhledů (WFS). Jedná se o liniovou reprezentaci silniční sítě obsahující celou řadu atributů, mezi které patří např. právě dopravní intenzita. Data z OTM jsou na stránce dostupná ke stažení podle evropských regionů NUTS-3<sup>6</sup>. Pro stažení byla vybrána oblast Prešovského kraje.

V OTM jsou však atributová data vypočítaná pouze jako průměrné hodnoty za celý den. Průměrnou denní hodnotu lze rozpočítat do časových intervalů o délce jedné hodiny. K tomu byly v práci využity tabulky dostupné z článku *Stanovení intenzit dopravy na pozemních komunikacích, Technické podmínky* [55].

Dopravní model je dále z hlediska výpočtu nutné doplnit informací o dopravní skladbě. Dopravní skladbou se rozumí procentuální vyjádření výskytu různých typů dopravních prostředků na jednotlivých silničních třídách. Pro výpočet dopravní skladby byl využit dokument s názvem *Celostátní sčítání dopravy na Slovensku* (CSD) z roku 2015 obsahující informace o dopravní skladbě v celé Slovenské republice [56].

Do výpočtu znečištění je zahrnuta také informace o členitosti terénu. Členitost terénu je v práci u liniových prvků (silnic) vyjádřena pomocí gradientu jednotlivých úseků, který je vypočítán na základě digitálního modelu reliéfu (DMR). Posledním vstupem pro tvorbu modelu je tedy DMR Slovenské republiky dostupný ze slovenského geoportálu [57]. Jedná se DMR3.5 s rozlišením 10 m.

### 3.2.2 Úprava dopravního modelu OTM

Výše zmíněná vrstva silnic z OTM byla stažena ve formátu shapefile (.shp) a následně nahrána do softwaru AGP. Silnice jsou ve vrstvě reprezentovány jako liniové prvky. V atributových datech vrstvy jsou pak dostupné různé informace. Z hlediska výpočtu znečištění je však primárně důležitá pouze průměrná dopravní intenzita (název atributu = *trafficvol*) na jednotlivých silničních úsecích, dále informace o silničních třídách (název atributu = *functional*) a také atribut vyjadřující jednosměrný, či obousměrný provoz (název atributu = *direction*).

Vrstva z OTM obsahuje jinou klasifikaci silničních tříd než dokument CSD, podle kterého se následně určuje dopravní skladba. V dalším kroku bylo tedy potřeba definovat přechodnou

---

<sup>6</sup> NUTS - <https://cs.wikipedia.org/wiki/NUTS>

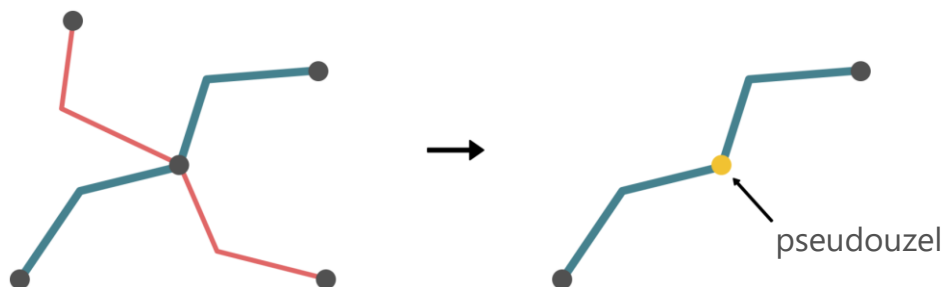
tabulku mezi klasifikacemi (viz tabulka 1). Ve vrstvě silnic je zachována původní klasifikace v anglickém jazyce.

Tabulka 1: Převodní tabulka klasifikací mezi vrstvou OTM a dokumentem CSD.

Klasifikace podle OTM	Klasifikace podle CSD
<i>mainRoad</i>	diaľnica, rýchlostná cesta
<i>firstClass</i>	cesta I. triedy
<i>secondClass</i>	cesta II. triedy
<i>thirdClass</i>	cesta III. triedy
<i>fourthClass</i>	Třída není uvedena
<i>fifthClass</i>	Třída není uvedena

Ve vrstvě silnic z OTM jsou uvedeny hodnoty dopravní intenzity pouze pro dálnice a silnice I. až III. třídy. Silniční úseky IV. a V. třídy zahrnují místní, či účelové komunikace, kam patří mimo jiné také chodníky, cyklotrasy atd., tudíž se na nich ani žádná vozidla nemusí pohybovat. Z tohoto důvodu bylo potřeba tyto silnice z vrstvy odstranit. V případě jejich odstranění však dojde v softwaru AGP k vytvoření velkého množství tzv. pseudouzlů, které jsou pro následující výpočet nežádoucí a je nutné vyřešit jejich odstranění.

Pseudouzle se vyskytuje na místě, kde se jedna linie spojuje sama se sebou (viz obrázek 22). Na levé straně je červenou barvou označena silnice IV. nebo V. třídy a modrou zbytek. Napravo je znázorněna situace po odstranění silnic IV. či V. třídy a vznik pseudouzlu.



Obrázek 22: Vznik pseudouzlu.

V softwaru AGP existuje více způsobů, které vedou k odstranění pseudouzlů. Jednou z možností je vytvoření souborové geodatabáze a následná aplikace topologického pravidla. Topologická pravidla umožňují definovat vzájemné vztahy mezi prvky, či vrstvami v databázi. Jednotlivé vztahy lze aplikací těchto pravidel kontrolovat a vyšetřovat chyby a výjimky.

V případě, že se v datech vyskytuje chyba, která je v rozporu s definovaným topologickým pravidlem, je možné chybu eliminovat pomocí nástroje *Error Inspector*. Pro odhalení pseudouzlů bylo v práci využito topologického pravidla s názvem *Must not have pseudo-nodes* (Nesmí obsahovat pseudouzly), které ve vrstvě silnic odhalí pseudouzly. Pomocí nástroje *Error inspector* je následně možné vzniklé pseudouzly odstraňovat. Proces odstraňování pseudouzlů je však iterativní. V každé iteraci dojde ke spojení linií obsahující pseudouzly. Pokud linie obsahují více pseudouzlů, je potřeba proces opakovat znovu. S rostoucí velikostí sítě roste i počet pseudouzlů, tím pásem i počet iterací. Při spojování linií zároveň dochází k ošetření atributových hodnot. Pokud mají linie, které jsou spojené pseudouzlem, rozdílné atributové hodnoty, dojde při odstranění daného pseudouzlu k uložení atributových hodnot pouze jedné linie, přičemž uživatel nemůže kontrolovat, jaké hodnoty to jsou. Z důvodu těchto skutečností, je tedy proces odstranění pseudouzlů pomocí topologických pravidel nevhodný.

Druhou možností, jak odstranit pseudouzly, je využití nástroje s názvem *Merge Lines By Pseudo Node*. Nástroj umožňuje spojení linií, na kterých se vyskytují pseudouzly, zcela automatizovaně. Není tedy potřeba zásah uživatele, navíc odstranění probíhá v jednom kroku. Další výhodou je možnost volby atributu, který je pro spojení využit. Díky tomu je výše zmíněný problém s rozdílnými atributovými hodnotami sousedních linií vyřešen. V případě, že jsou hodnoty atributů linií spojených pseudouzlem rozdílné, k jejich odstranění nedojde a jsou zachovány správné údaje. V práci byl pro odstranění pseudouzlů využit tento postup.

Kromě již zmíněných atributů *trafficvol*, *functional* a *direction*, obsahují atributová data celou řadu dalších informací, které jsou však z hlediska výpočtu znečištění nepodstatné. V dalších krocích zároveň dojde k výpočtu a přidání dalších atributů, čímž dojde k nárůstu atributové tabulky. Z těchto důvodů je dalším krokem odstranění nepotřebných atributů. K odstranění atributů je využit nástroj *DeleteField\_management*.

### 3.2.3 Výpočet denních variací intenzit

Jak je již zmíněno výše, z dat OTM je k dispozici pouze informace o celkové průměrné intenzitě vozidel za jeden den. Aby bylo možné vypočítat, jak se doprava mění v průběhu dne, je potřeba celkovou intenzitu rozložit do hodinových intervalů.

Výpočtu variací dopravy se věnuje článek [55]. V článku jsou variace intenzit rozděleny na základě druhu komunikace do sedmi následujících skupin:

- Dálnice
- Silnice I. třídy – rychlostní silnice
- Silnice I. třídy se statutem mezinárodní silnice

- Silnice I. třídy bez statutu mezinárodní silnice
- Silnice II. a III. třídy
- Místní komunikace a účelové komunikace
- Komunikace napojující parkoviště obchodních zařízení

Dále jsou v článku variace klasifikovány podle druhu vozidel na:

- Osobní automobily
- Motocykly
- Nákladní automobily
- Autobusy
- Nákladní soupravy

Je zde ale uvedena i sumarizovaná hodnota pro všechny druhy vozidel. Poslední klasifikací je klasifikace podle ročního období:

- Jarní
- Prázdninové
- Podzimní
- Zimní

Variace dopravy je zde uvedena nejen pro hodinové intervaly, ale také pro týdenní a měsíční intervaly.

V práci je pro výpočet variací využito tabulky obsahující informace o denních variacích intenzit v běžný pracovní den v jarním období (viz tabulka 2). Druhy komunikace jsou vybrány tak, aby odpovídaly klasifikaci v tabulce 1, konkrétně tedy: Dálnice, Silnice I. třídy a Silnice II. a III. třídy. Rozdělení podle druhu vozidel zde není uvažováno, takže do výpočtu vstupuje sumarizovaná hodnota pro všechny druhy vozidel. V případě nutnosti větší podrobnosti modelu je možné rozdělit variace i podle druhu vozidel nebo ročního období. Alternativně je také možné využít přímo naměřená data ze silničních úseků.

Tabulka 2: Denní variace intenzit dopravy v běžný pracovní den, vozidla celkem [55].

Komunikace / Hodiny	D	R	E	I	II-H	II-S	II-R-L	II-R-Z	M	Z
Označení v grafu	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
0-1	0,89	0,69	0,60	0,38	0,29	0,21	0,32	0,29	0,29	0,22
1-2	0,71	0,51	0,48	0,28	0,20	0,16	0,21	0,19	0,19	0,17
2-3	0,66	0,49	0,50	0,29	0,20	0,21	0,19	0,14	0,17	0,15
3-4	0,77	0,63	0,65	0,48	0,32	0,32	0,31	0,25	0,29	0,16
4-5	1,16	1,20	1,35	1,29	1,16	1,17	1,07	0,71	0,88	0,23
5-6	2,60	2,88	3,52	3,67	3,95	3,91	3,42	1,98	2,69	0,43
6-7	5,46	5,48	5,55	5,69	5,89	5,83	5,23	3,96	4,91	1,10
7-8	6,92	7,06	6,45	6,66	6,79	6,74	6,08	5,62	6,60	2,49
8-9	7,17	7,10	6,52	6,67	6,63	6,66	6,26	6,28	6,73	4,27
9-10	6,17	6,37	6,30	6,51	6,34	6,50	6,45	7,16	6,71	5,89
10-11	5,51	5,77	6,07	6,31	6,17	6,36	6,44	7,01	6,58	7,11
11-12	5,50	5,57	5,93	6,20	5,84	5,92	6,10	6,93	6,46	7,49
12-13	5,60	5,70	6,03	6,31	5,95	6,10	6,31	6,80	6,44	7,19
13-14	5,96	6,03	6,40	6,69	6,55	6,76	6,67	7,22	6,85	7,24
14-15	6,35	6,48	6,93	7,31	7,41	7,93	7,28	7,72	7,51	8,03
15-16	6,74	6,88	7,21	7,48	7,74	8,17	7,87	8,12	7,98	8,95
16-17	6,84	6,95	6,93	6,98	7,32	7,33	7,61	7,68	7,52	9,59
17-18	6,58	6,46	6,19	6,12	6,43	6,15	6,59	6,78	6,41	9,45
18-19	5,59	5,42	5,12	4,90	5,12	4,88	5,34	5,43	5,09	8,09
19-20	4,30	4,17	3,85	3,60	3,68	3,46	3,92	3,88	3,67	5,80
20-21	3,14	3,01	2,79	2,47	2,41	2,25	2,62	2,48	2,50	3,41
21-22	2,33	2,20	2,04	1,72	1,75	1,48	1,80	1,73	1,69	1,63
22-23	1,76	1,61	1,45	1,17	1,21	0,98	1,16	1,00	1,11	0,63
23-24	1,29	1,34	1,14	0,82	0,65	0,52	0,75	0,64	0,73	0,28

Tabulka 2 je do skriptu převedena ve formě matice časových variací (viz vzorec 1), kde sloupce vyjadřují druh silnice a řádky hodinové intervaly. Rozměr matice je tedy po zjednodušení 3x24 a prvky v matici vyjadřují procentuální rozložení dopravy. Pro výpočet časových variací bylo nejprve do atributové tabulky přidáno 24 nových atributů pro každý časový interval. Atributy byly následně vyplněny pomocí kurzoru, kde se pro každý prvek vyhodnotilo, o jaký druh silnice se jedná (byl využit atribut *functional*), a podle toho byla vypočítána dopravní intenzita v danou hodinu. Pro některé vizualizace popsané v kapitole 6 jsou využívány jiné časové intervaly. K jejich výpočtu došlo pouze agregací matice časových variací podle zvolených intervalů.

$$VariationMatrix = \begin{bmatrix} 0.89 & 0.38 & 0.29 \\ 0.71 & 0.28 & 0.20 \\ 0.66 & 0.29 & 0.20 \\ 0.77 & 0.48 & 0.32 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1.29 & 0.82 & 0.65 \end{bmatrix} \quad (1)$$

### 3.2.4 Výpočet dopravní skladby

V dalším kroku přípravy dopravního modelu je potřeba rozpočítat celkovou hodnotu dopravní intenzity způsobenou různými skupinami vozidel. Pro výpočet je využit dokument CSD [56], ve kterém je uvedeno procentuální rozložení různých skupin vozidel na silničních třídách pro

celou Slovenskou republiku. Klasifikace silničních tříd, která je v dokumentu využívána, je uvedena již v tabulce 1. V prvním kroku došlo nejprve k agregaci dat týkajících se pouze Prešovského kraje.

V následujícím kroku došlo ke sloučení a odstranění některých skupin vozidel. Dokument CSD obsahuje klasifikaci podobnou s klasifikací uvedenou v dokumentu *Technické podmínky 170 Navrhování vozovek pozemních komunikací (TP 170)* [58]. TP 170 uvažuje pro klasifikaci pouze osm skupin nákladních vozidel a dokument CSD [56] je doplněn o čtyři další skupiny vozidel. Celková klasifikace vozidel je uvedena v následující tabulce 3.

Tabulka 3: Klasifikace vozidel uvedená v dokumentu CSD. Šedou barvou je vyznačena klasifikace podle TP 170.

N1	Lehká nákladní vozidla (hmotnost do 3 tun)
N2	Střední nákladní vozidla (hmotnost 3 - 10 tun)
PN2	Prívěsy středních nákladních vozidel
N3	Těžká nákladní vozidla (hmotnost nad 10 tun)
PN3	Prívěsy těžkých nákladních vozidel
NS	Návěsové soupravy
A	Autobusy
PA	Prívěsy autobusů
TR	Traktory
O	Osobní vozidla
M	Motocykly
C	Cyklisté

Klasifikace v tabulce 3 byla zjednodušená tak, aby byla totožná s klasifikací využívanou pro emisní výpočty v dokumentu *Technické podmínky 219 Dopravně inženýrská data pro kvantifikaci vlivů automobilové dopravy na životní prostředí* [59]. Výsledná klasifikace spolu s procentuálním zastoupením jednotlivých skupin na celkové dopravní intenzitě je uvedena v následující tabulce 4. Vypuštěna byla tedy pouze skupina *Cyklisté*. Ostatní skupiny byly zařazeny do čtyř základních skupin (viz tabulka 4).



Tabulka 4: Procentuální vyjádření dopravní skladby vozidel v Prešovském kraji.

Skupiny vozidel	Osobní	Lehká nákladní	Střední a těžká nákladní	Autobusy	Celkem
	<i>O,M</i>	<i>N1,N2</i>	<i>PN2,N3,PN3,NS,TR</i>	<i>A,PA</i>	
Dálnice	75,60	12,63	11,09	0,68	100
I. třída	84,76	7,86	5,89	1,49	100
II. třída	87,32	7,67	3,56	1,45	100
III. třída	88,49	6,87	2,76	1,88	100

Výpočet intenzity pro jednotlivé druhy vozidel probíhal podobně jako výpočet časových variací. Tabulka 4 byla nejprve převedena do matice dopravní skladby (viz vzorec 2), následně se do atributové tabulky přidaly čtyři nové atributy. Nad vrstvou byl vytvořen kurzor, který přiřadil hodnoty dopravní intenzity podle druhu silnice a skupiny vozidel.

$$TrafficMatrix = \begin{bmatrix} 75.60 & 12.63 & 11.09 & 0.68 \\ 84.76 & 7.86 & 5.89 & 1.49 \\ 87.32 & 7.67 & 3.56 & 1.45 \\ 88.49 & 6.87 & 2.76 & 1.88 \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 3.2.5 Výpočet výškové členitosti

Jak je již zmíněno výše, do výpočtu množství emisí vstupuje i informace o členitosti terénu. Na základě této znalosti lze do výpočtu zanezt informaci o zvýšení spotřeby paliva způsobené zvýšením otáček motoru vozidla při překonávání členitého terénu. V místech s větší členitostí terénu bude docházet k větší spotřebě paliva a tím pádem i k tvorbě většího množství emisí [60].

Pro zvýšení spotřeby paliva na základě výškové členitosti je uvažována informace převzatá z článku *Modeling of vehicle fuel consumption and carbon dioxide emission in road transport* [61]. V článku je uvedeno, že pokud vozidlo překonává úsek s gradientem o velikosti 1 %, tak se spotřeba paliva zvýší přibližně o 3.2 %. Pro výpočet výškové členitosti je tedy nutné určit gradient jednotlivých úseků, na základě kterého bude spotřeba zvýšena.

Většina úseků ve vrstvě silnic je obousměrná (tj. oba směry jsou vyjádřeny pouze jednou linií). Pokud by byl vypočítán gradient nad obousměrnými úseky, došlo by k výpočtu gradientu pouze v jednom směru. Prvním krokem postupu výpočtu výškové členitosti je tedy vytvoření jednosměrných úseků.

Pro vytvoření jednosměrných úseků jsou nejprve pomocí atributu *direction* vybrány všechny obousměrné úseky (*bothDirections*). Z vybraných úseků je vytvořena samostatná vrstva, která je následně duplikována. Výsledkem jsou dvě identické vrstvy se stejnou geometrií a stejným směrem. Pomocí nástroje *Flip* je následně u jedné z těchto vrstev otočena orientace. U obou vrstev je v dalším kroku nutné přepočítat atributy. K tomu je využit kurzor, který rozdělí pouze vybrané atributy na polovinu. V posledním kroku dojde ke spojení nově vytvořených vrstev s vrstvou obsahující původní jednosměrné úseky. K tomu je využit nástroj *Merge*.

Dalším krokem výpočtu výškové členitosti je využití nástroje *Stack Profile*, do kterého vstupuje vrstva jednosměrných silnic a DMR. Nástroj určí profily pro jednotlivé úseky na základě DMR a výsledek uloží do tabulky. Struktura tabulky je podobná struktuře v následující tabulce 5. Počet řádků pro jeden úsek je závislý na délce daného úseku, a může se tedy lišit.

Tabulka 5: Struktura tabulky obsahující profily úseků.

Vzdálenost	Výška	Originální ID
0	650	1
10	655	1
20	700	1
0	450	2
10	455	2

V následujícím kroku je vytvořen kurzor nad vrstvou jednosměrných silnic. Kurzor vybere vždy jeden úsek, pro který je následně vypočítán průměrný gradient z tabulky profilů. Gradient je spočten pouze pro ty části úseku, které v daném směru směřují do kopce. Kromě průměrného gradientu je ke všem úsekům vypočítána i délka, kterou vozidlo ujede do kopce, a také celková délka úseku.

Vrstva jednosměrných silnic je výsledkem obohacení dopravního modelu. Obsahuje atributy vyjadřující dopravní skladbu, časovou variaci a výškovou členitost. Vrstvu je tedy možné využít jako vstup pro výpočet znečištění (viz kapitola 5).

## 4 Vytvoření topografického 3D modelu zájmového území z volně dostupných dat

Předchozí kapitola popisuje postup přípravy dopravních dat, které jsou následně využity pro výpočet emisí. Druhým krokem přípravy dat je tvorba trojrozměrného (3D) topografického modelu, který je v práci použit pro zobrazení výsledných emisí, jako tomu je v člancích s podobným zaměřením (viz kapitola 2). Tato kapitola se věnuje popisu procesu tvorby topografického 3D modelu z volně dostupných dat.

Celý proces tvorby topografického 3D modelu probíhá opět v aplikaci AGP. Narozdíl od předchozí kapitoly, kde je proces obohacení modelu plně automatizovaný, probíhá tvorba modelu pouze pomocí grafického uživatelského rozhraní (*Graphic User Interface* = GUI). V případě potřeby tvorby modelu na vlastních datech je možné postupovat podle jednotlivých kroků uvedených v této kapitole.

Software AGP obsahuje dva různé přístupy pro práci s trojrozměrnými daty: Globální a Lokální scénu [62]. Globální scéna slouží pro zobrazení prostorových dat na povrchu zeměkoule (resp. koule, která je založena na celosvětovém souřadnicovém systému WGS84). Využívá se zejména pro zobrazení jevů, které se vztahují k celé zeměkouli, tedy jevy jako jsou např. počet obyvatel, cesty přepravních lodí atd. Kromě toho je také možné využít globální scénu pro zobrazení jevů vztahujících se k větším územním celkům (stát, kraj). Globální scéna však umožňuje i zobrazení dat na úrovni města, nebo jednotlivých budov.

Oproti tomu lokální scéna umožňuje využít libovolný zobrazovací souřadnicový systém (*projected coordinated system*) [62]. Vrstvy jsou zobrazeny na rovinném povrchu, a není uvažováno zakřivení země. Lokální scéna se využívá zejména pro zobrazení jevů na menších územních celcích (na úrovni města), a je tedy vhodná zejména pro územní plánování.

Jelikož je většina dosažených výsledků prezentována na webu (viz kapitola 6), kapitola se také stručně věnuje problematice nahrání vytvořeného modelu na web prostřednictvím webové aplikace AGOL [53].

### 4.1 Popis využitých dat

Jak avizuje název kapitoly 4, tvorba topografického modelu probíhá z volně dostupných dat. Základním zdrojem dat jsou vrstvy dostupné z *Open Street Map* (OSM)<sup>7</sup>. Vrstvy z OSM ve formátu (.shp) byly získány z portálu *geofabrik.de* [63], kde je možné stáhnout aktuální verzi

---

<sup>7</sup> OSM - <https://www.openstreetmap.org/>

OSM pro celý stát (z hlediska zájmového území se jedná o Slovenskou republiku). Stažený balík obsahuje celou řadu vrstev. Pro potřeby práce byly využity pouze následující vrstvy:

- *landuse* – využití půdy (polygonová vrstva)
- *water bodies* – vodní plochy (polygonová vrstva)
- *water ways* – vodní toky (liniová vrstva)
- *buildings* – budovy (polygonová vrstva)

Jelikož jsou získané vrstvy vztaženy k celému státu, ale zájmovým územím je pouze Prešovský kraj, je potřeba vrstvy oříznout. K oříznutí je využita databáze základního administrativního členění získaná ze slovenského geoportálu [57]. Databáze obsahuje polygonové vrstvy, které člení území na kraje, katastrální území, obce, okresy a celou Slovenskou republiku.

Pro tvorbu 3D terénu je využit již zmiňovaný digitální model reliéfu 3. generace (DMR3.5), který byl získán opět ze slovenského geoportálu [57]. DMR je zde dostupný ve formě rastru o různých rozlišeních. Pro tvorbu modelu byl využit rastr s rozlišením 10 m.

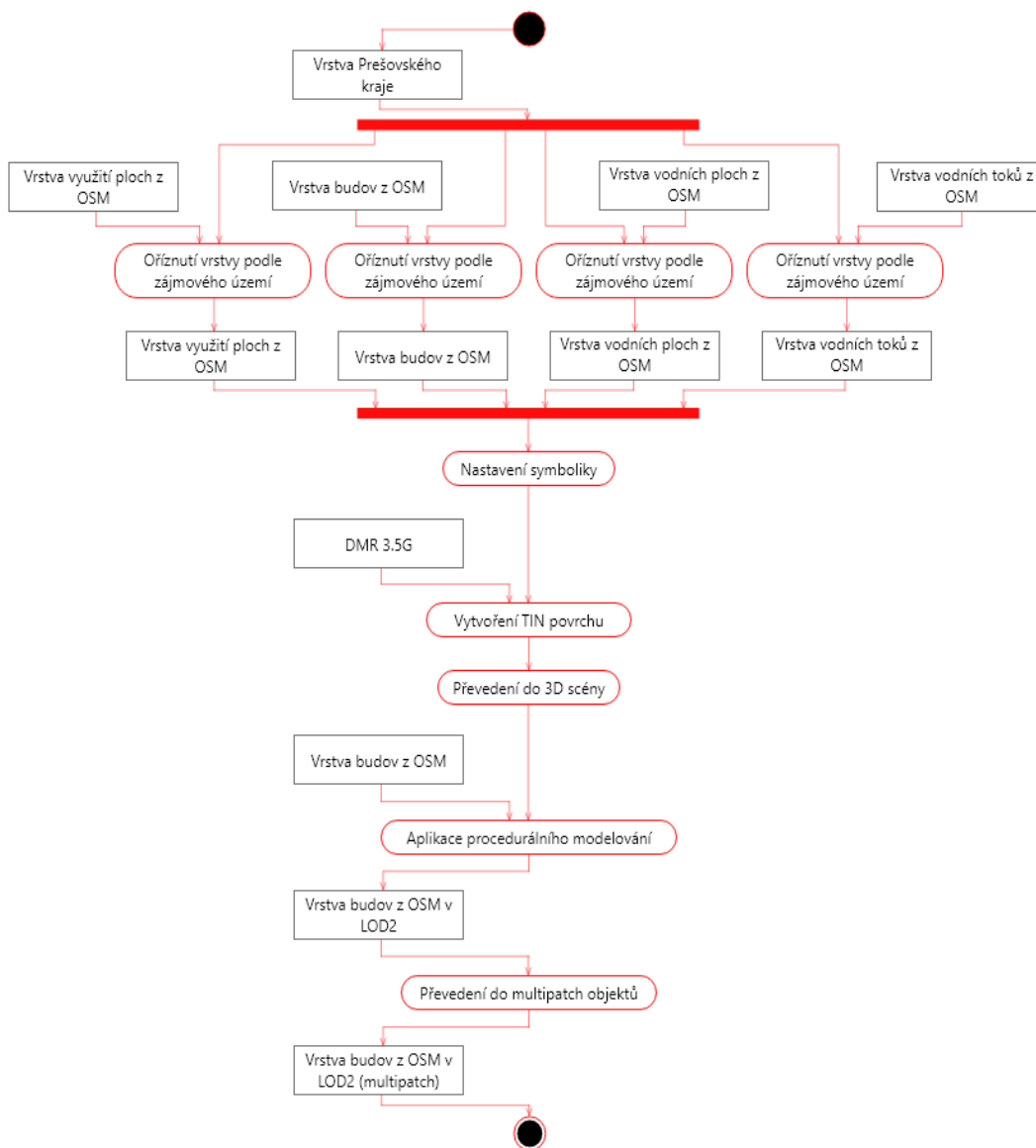
Všechna výše zmíněná data jsou volně dostupná. V případě potřeby vytvoření modelu pro jiné území, je z hlediska tematických vrstev možné využít libovolný stát či jiné území na portálu *geofabrik.de*. Výšková data jsou pro celou Evropu volně dostupná například v rámci EU-DEM 1.1<sup>8</sup>. Jedná se o evropský digitální model reliéfu ve formě rastru s rozlišením 25 m. Alternativně je také možné využít integrovaný terén v softwaru AGP.

## 4.2 Vytvoření 3D topografického modelu

Tato podkapitola popisuje postup tvorby topografického 3D modelu. Jak již bylo zmíněno výše, celý proces probíhá pouze prostřednictvím GUI a v případě potřeby tvorby modelu pro jiné území je možné opakovat jednotlivé kroky s jinými daty. Celý postup s jednotlivými kroky je zobrazen na následujícím UML diagramu činností (viz obrázek 23). Stěžejní kroky jsou podrobněji popsány v jednotlivých sekcích.

---

<sup>8</sup> EU-DEM - <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1>



Obrázek 23: UML diagram činností popisující tvorbu topografického 3D modelu.

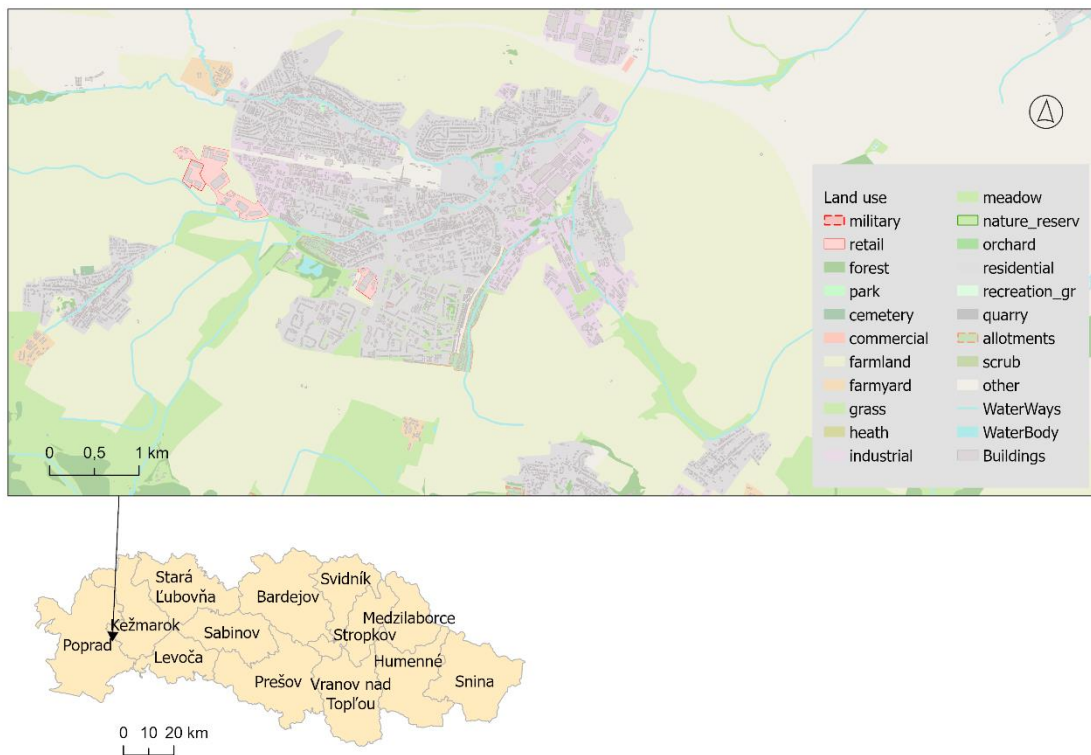
#### 4.2.1 Příprava dat v 2D mapě

Jelikož je v softwaru AGP možné vytvořit 3D scénu převedením 2D vrstev do 3D, je prvním krokem tvorby modelu příprava všech 2D vrstev.

Jak bylo zmíněno, vrstvy získané z OSM jsou vztaženy k celé Slovenské republice. Po nahrání vrstev do softwaru tedy došlo nejprve k jejich oříznutí pomocí nástroje *Clip*. K oříznutí byl využit polygon Prešovského kraje získaný ze slovenského geoportálu. Obdobným způsobem byl oříznut i digitální model reliéfu, jehož využití je popsáno v následující sekci 4.2.2. V tomto případě se však jedná o rastr, k oříznutí byl tedy využit nástroj vhodný pro ořezávání rastrů (*Clip raster*).

V následujícím kroku došlo k nastavení symboliky pro jednotlivé vrstvy. Symbolika u vrstvy využití ploch byla nastavena podle atributu *fclass* popisující třídu plochy. Tento atribut obsahuje dvacet různých tříd ploch. Definice všech ploch spolu s jejich názvy je uvedena v dokumentaci vydávané portálem *geofabrik.de* [63]. Z důvodu velkého množství tříd byl do softwaru přidán soubor obsahující symbolické styly pro OSM. Soubor nese příponu (.style) a byl získán z webové stránky *OpenStreetMap for ArcGIS* [64]. Nahrání souboru značně urychlí nastavování symboliky pro jednotlivé třídy ploch. Některé třídy zde však nejsou obsaženy, takže se jejich symbolika musí nastavit ručně. Symbolika ostatních vrstev byla nastavena obdobným způsobem, jelikož soubor obsahuje i styly pro vodní plochy, vodní toky a budovy.

Výsledná podoba připravených dat ve 2D mapě s nastavenou symbolikou je zobrazena na následujícím obrázku 24.

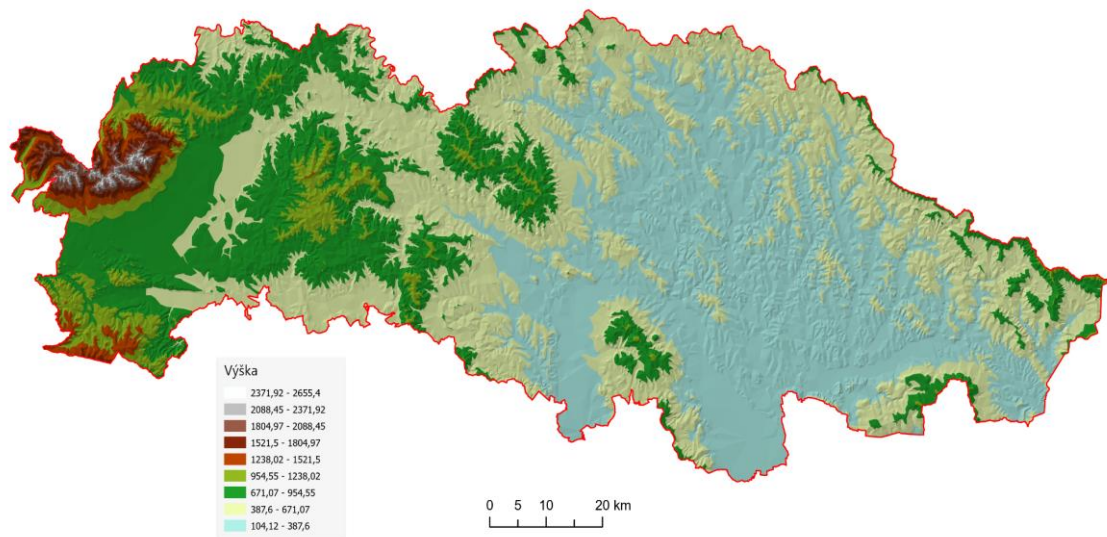


Obrázek 24: Příprava dat ve 2D mapě.

Dalším krokem je tvorba nepravidelné trojúhelníkové sítě (*Triangulated Irregular Network* = TIN), která bude sloužit jako podkladový terén pro celou 3D scénu. Pro vytvoření TIN je využit nástroj s názvem *Raster to TIN*, do kterého vstupuje již oříznutý rastr digitálního modelu reliéfu. Jediný parametr, který byl v nástroji modifikován, je parametr *Z Tolerance* udávající maximální možnou odchylku mezi výškou vstupního rastru a výškou výstupní TIN. Defaultně je parametr nastaven na 1/10 rozsahu vstupního rastru. Pro konkrétní DMR byl tedy parametr roven

255,41. S využitím této hodnoty však dojde k značné generalizaci povrchu. Pro přesnější TIN byla hodnota nastavena na 50. Výsledná síť TIN je zobrazena na následujícím obrázku 25.

V softwaru AGP je pro výškový základ 3D scény možné využít také samotný rastr. Z důvodu rozsáhlosti zájmového území a velikosti rozlišení rastru je však při jeho využití chod softwaru zřetelně pomalejší než s využitím TIN. Pro vizualizaci topografického 3D modelu je tedy využita vrstva TIN, naopak pro výpočet výškové členitosti (viz sekce 3.2.5) je využit rastr s plným rozlišením, jelikož se jedná o původní nezjednodušený zdroj.

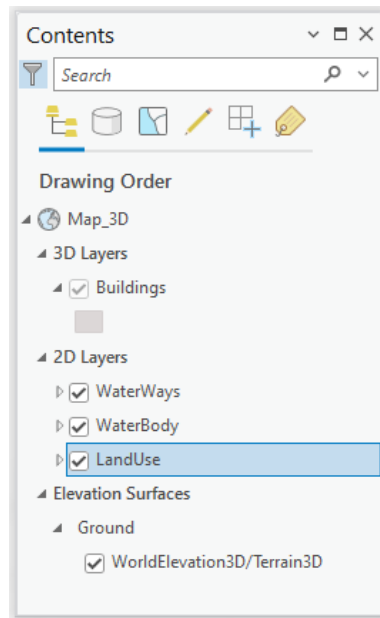


Obrázek 25: Nepravidelná trojúhelníková síť vytvořená z rastru DMR.

#### 4.2.2 Konverze do 3D scény

Vzhledem k tomu, že v předchozí sekci došlo k přípravě veškerých 2D vrstev, je úloha tvorby 3D scény v softwaru AGP snadná. K převedení 2D scény do 3D je využit nástroj *Convert to Global Scene*. Po jeho doběhnutí dojde k vytvoření nové 3D scény, ve které jsou jednotlivé vrstvy rozděleny na dvě skupiny, 2D a 3D vrstvy.

V dalším kroku je nutné rozdělit vrstvy podle potřeby na 2D a 3D v panelu *Contents*. Pro řešené území je jako 3D vrstva nastavena pouze vrstva budov, zatímco ostatní vrstvy jsou ponechány jako 2D (viz obrázek 26).



Obrázek 26: Panel *Contents* znázorňující rozdělení 2D a 3D vrstev ve 3D scéně.

U vrstev, které jsou označeny jako 2D, dojde k obtisknutí přímo na povrch. U 3D vrstev je potřeba definovat v jaké výšce se mají zobrazovat. Informace o tom, v jaké nadmořské výšce se budovy nacházejí, není v OSM uvedena. Proto je ve vlastnostech vrstvy potřeba nastavit *elevation* na možnost *on the Ground*. Budovy se tak budou vykreslovat přímo na podkladovém terénu.

Pokud je 3D scéna vytvářena tímto postupem (tedy konverzí z 2D scény), je jako podkladový terén automaticky nastaven terén, kterým disponuje software AGP (*WorldElevation3D/Terrain3D* – viz obrázek 26). V následujícím kroku tedy došlo k nastavení vlastního podkladového terénu TIN, který byl vytvořen v předchozí sekci 4.2.1. Ke změně dochází v panelu *Contents*, kde je nejprve odstraněn stávající terén *WorldElevation3D/Terrain3D* a následně je přes záložku *Ground* přidán terén vlastní.

### 4.2.3 Tvorba 2,5D budov

Dalším krokem tvorby topografického 3D modelu je vytvoření 2,5D budov. Již v předchozí sekci došlo k rozdělení vrstev ve scéně. Jako 3D vrstva byla označena pouze vrstva budov. Rozdělením vrstev však budovy nevznikají, jelikož se vrstva stále vykresluje pouze ve formě polygonů.

Aby bylo možné 2,5D budovy vytvořit, je potřeba informace o jejich výškách. Ty však není z OSM možné získat, a tak je pro jednoduchost uvažována výška náhodná. V případě dostupnosti DMR a digitálního modelu povrchu (DMP) s velkou přesností (v řádech cm) je alternativně možné výšku budov dopočítat. Využívá se k tomu normalizovaný digitální model povrchu (nDMP), který vznikne podle vzorce:  $nDMP = DMP - DMR$ . Výsledný nDMP pak obsahuje

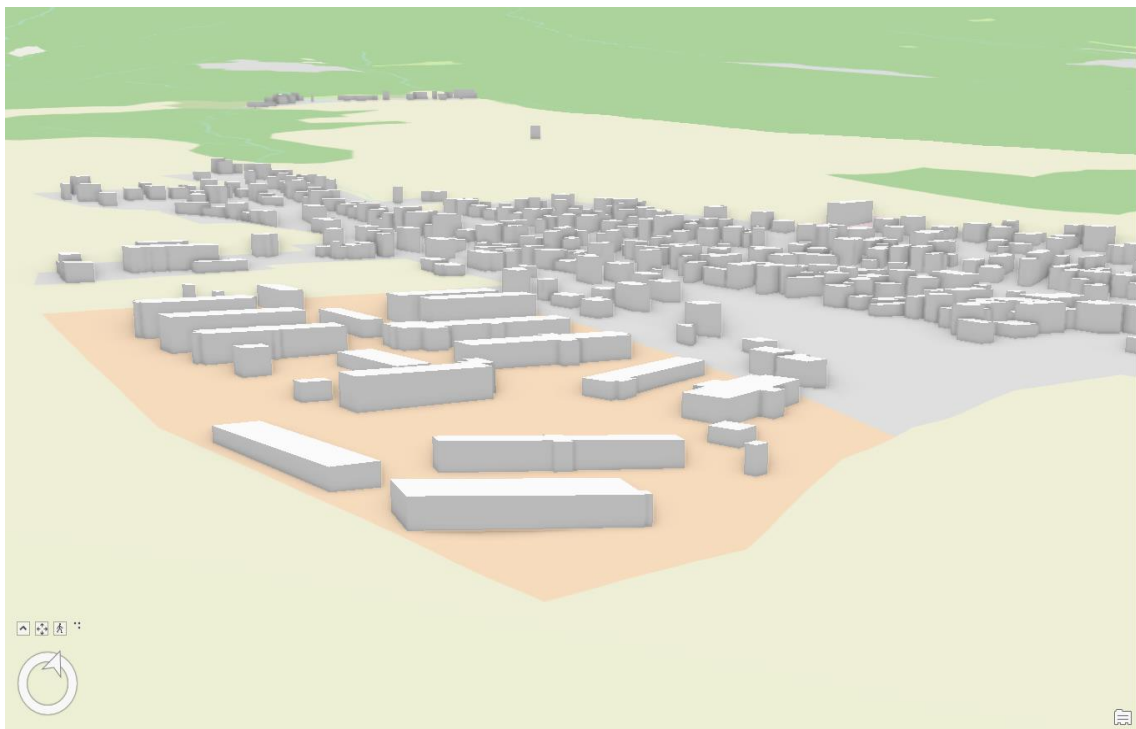


informace o výškách objektů nad terénem. Takto přesná data v rozsahu zájmového území však není možné získat, proto je v práci využita výška náhodná.

Prvním krokem tvorby 2,5D budov je přidání atributu *Height* (výška) do atributové tabulky ve vrstvě budovy. Následně lze každé budově přiřadit výšku prostřednictvím nástroje *Calculate field*. V rámci nástroje je využita funkce *randit* z python knihovny *random*. Výšky budov jsou nastaveny od 8 do 15 metrů. Podle takto vytvořeného atributu je pak polygony budov možné vynést do výšky (extrudovat), čímž vzniknou “krabicově” vypadající budovy ve formě extrudovaných polygonů. K vynesení polygonů do výšky slouží nástroj *Extraction tool* nacházející se v panelu *Feature layer*. V rámci nástroje byla vybrána možnost *Max height* a jako atribut pro výšku byl nastaven atribut *Height*.

Tímto postupem však vznikají 2,5D budovy pouze jako symbolika nastavená na polygonové vrstvě. Takovéto objekty se pak například nejeví jako 3D z hlediska analýz. Zároveň také není možné vrstvy, u kterých je extrudace nastavena, nahrát do prostředí AGOL a zobrazit je na webu (viz podkapitola 4.3). Z těchto důvodů bylo dalším krokem převedení budov na multipatch objekty. K převedení byl využit nástroj *3D Layer to Feature Class*.

Ukázka scény po vytvoření 2,5 budov je zobrazena na následujícím obrázku 27. Z hlediska velikosti zájmového území a množství budov, je vhodné nastavit u vrstvy budov zobrazení v závislosti na měřítku a zobrazovat tak vrstvu budov pouze při větším přiblížení.



Obrázek 27: 3D scéna s vytvořenými 2,5D budovami.

#### 4.2.4 Využití možností procedurálního modelování

Dosud bylo modelování budov řešeno pouze na základní úrovni detailu (*Level of detail* = LOD1). To znamená, že budovy byly zobrazeny pouze jako extrudované polygony. LOD je koncept OGC standardu CityGML 2.0, jenž slouží pro rozlišení víceúrovňových reprezentací sémantických modelů měst [65]. V rámci práce bylo dále řešeno procedurální modelování jako nástroj pro vytvoření střech u všech budov. Správnou aplikací procedurálního modelování je možné zvýšit LOD1 na LOD2. Úroveň LOD2 se od LOD1 liší vizualizací střech (viz obrázek 28).



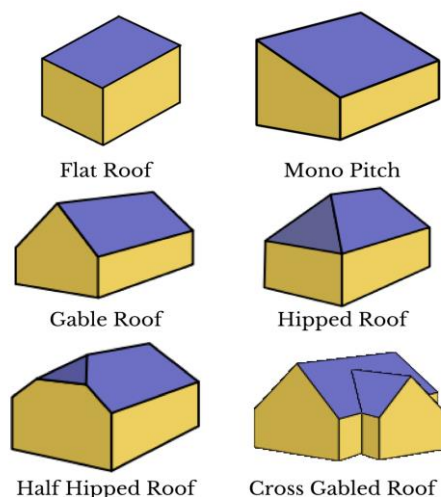
Obrázek 28: Různé úrovně detailu [65].

Pro vytvoření střech budov lze v softwaru AGP využít procedurálního pravidla vytvořeného v aplikaci CityEngine. Jedná se o soubor ve formátu (.rpk). Toto pravidlo slouží k automatické tvorbě střech pro všechny budovy v dané vrstvě. Kromě pevně nastavených hodnot lze hodnoty ovládat také pomocí atributů dané vrstvy.

Soubor ve formátu (.rpk) je převzat z návodu, který se věnuje využití procedurálního modelování při tvorbě budov [66]. Přestože autor neměl přístup k softwaru CityEngine, bylo možné soubor s příponou (.rpk) využít v softwaru AGP.

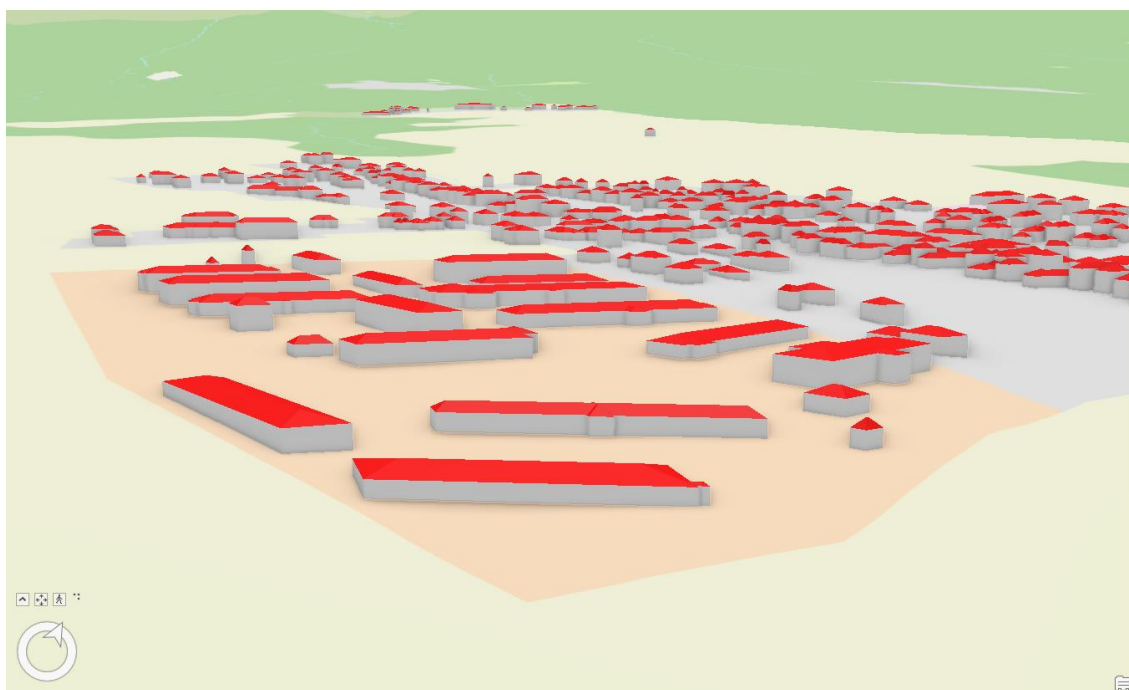
Aplikace pravidla probíhá v panelu *Symbology*, kde se místo možnosti *Color fill* nastaví možnost *Procedural fill* a vybere se již zmiňovaný soubor s příponou (.rpk). Následně stačí nastavit požadované hodnoty. Jak je již zmíněno výše, kromě pevných hodnot lze nastavit hodnoty podle atributů. Výška budov byla nastavena podle atributu *Height*. Pro zobrazení střech je kromě výšky ještě potřeba nastavit výšku střech. Pro realističtější vizualizaci byla výška střechy navázána na atribut výšky budovy. Konkrétně byl využit následující příkaz:  $[Height] - [Height]/6$ .

Pomocí pravidla je dále možné nastavit různé druhy střech (viz obrázek 29). V případě dostupnosti informace o druhu střechy na jednotlivých budovách by bylo možné druh střechy měnit. Takováto informace však není v OSM uvedena, a z toho důvodu je druh střechy u všech budov nastaven na valbovou střechu (*Hip*). V panelu symbolika je také možné nastavit jinou barvu pro střechu a stěny budovy.



Obrázek 29: Různé druhy střech [67].

Výsledná scéna s LOD2 budovami je zobrazena na následujícím obrázku 30. Obdobně jako v předchozí sekci 4.2.3 jsou i zde budovy vytvořeny pouze jako symbolika nad 2D vrstvou. Vrstvu budov s nastaveným procedurálním pravidlem je opět potřeba převést na multipatch objekty a vytvořit tak skutečnou 3D reprezentaci budov, kterou bude možné nahrát do online prostředí.



Obrázek 30: Budovy vytvořené procedurálním modelováním.

### 4.3 Nahrání topografického modelu do online prostředí ArcGIS Online

Předchozí podkapitola popisuje postup tvorby topografického 3D modelu zájmového území, který bude využit jako podklad pro prezentaci dosažených výsledků emisního a disperzního

modelování. Jelikož je většina výsledků prezentována na webu, je také potřeba převést topografický model do online prostředí. Právě tomuto tématu se stručně věnuje tato podkapitola.

Pro publikaci výsledků je v práci využit webový software AGOL. Publikace 3D scén je v rámci softwaru AGOL řešena pomocí aplikace *SceneViewer*. Jelikož oba softwary AGP a AGOL pocházejí od společnosti Esri, je možné vytvořené mapy a scény v desktopovém softwaru jednoduše převést do online prostředí. Pro publikaci již hotové 3D scény lze využít nástroj *Share Scene* v panelu *Share*. Po spuštění nástroje se nejprve všechny vrstvy v projektu analyzují a v případě, že se vyskytnou problémy, je nutné vyřešit jejich odstranění. Alternativně je také možné nahrát jednotlivé vrstvy zvlášť. Po úspěšném doběhnutí nástroje je scéna, a také jednotlivé vrstvy, nahrána na AGOL.

3D objekty, které vznikly pouze extrudováním polygonů, nebo byly vytvořeny aplikací procedurálního pravidla, není možné publikovat na web. Tyto objekty je tedy nejprve potřeba převést na multipatch objekty (viz sekce 4.2.3). Pokud je u multipatch objektů nastavena vícebarevná symbolika (jiná barva střechy a stěny budov na obrázku 30) dojde při publikaci k jejímu odstranění a vrstva se na webu zobrazí pouze jednobarevně. Podobně se tak děje i u 2D vrstev. Pokud má např. vrstva linií symboliku skládající se z více symbolických vrstev, dojde při publikaci k její degradaci a zobrazí se pouze jednoduchá symbolika.

Z důvodu rozsáhlosti zájmového území, a s tím spojenou velikostí dat, je proces publikace 3D scény časově náročný. Velikost dat také ovlivňuje rychlost načítání 3D scény na webu. Právě pro časovou optimalizaci byla vrstva využití ploch publikována zvlášť ve formátu vektorových dlaždic, čímž ale dojde ke ztrátě možnosti dotazování se na jednotlivé prvky ve vrstvě.

## 5 Výpočty

Předchozí dvě kapitoly popisovaly přípravu dat pro výpočet a také následnou vizualizaci emisí zapříčiněných dopravní intenzitou. Tato kapitola se věnuje navrzení a popisu naivního algoritmu pro výpočet těchto emisí a také jejich následnou disperzi do okolí. Naivita algoritmu spočívá zejména v jeho jednoduchosti, linearitě a také použitím vybraných dat. Jak bylo zmíněno v kapitole 1, pro modelování emisí existuje celá řada komerčních modelů. Některé z nich by ani z důvodu výpočetní složitosti nebylo možné pro takto velké zájmové území využít. Právě kvůli jednoduchosti navrženého algoritmu není vhodné na základě dosažených výsledků v této práci provádět reálné analýzy. K tomu by bylo nutné navrzení komplexnějšího modelu pro výpočet i disperzi emisí. Zároveň by bylo potřeba získat přesnější a obsáhlejší vstupní parametry (více viz podkapitola 7.1).

Jak bylo zmíněno v kapitole 1, emise zapříčiněné dopravou je možné rozdělit do více skupin. Autor se v práci zaměřuje pouze na výfukové emise, a pro další postup je za emisní látku uvažován oxid uhličitý CO<sub>2</sub>.

Obdobně jako v kapitole 1 je výpočet rozdělen na emisní a disperzní modelování. Výpočet pro oba druhy modelování se opět odehrává v softwaru AGP. Jak bylo zmíněno v podkapitole 3.1, výpočet emisí probíhá prostřednictvím skriptu uvedeného v příloze práce (viz příloha B – Obsah příloženého CD).

### 5.1 Výpočet emisí

Jak bylo zmíněno v podkapitole 1.3, algoritmus pro výpočet emisí je navržen na základě modelu založeného na průměrné rychlosti (viz sekce 1.1.2). Největší výhodou tohoto algoritmu je zejména jeho jednoduchost a také malé množství vstupních dat. Právě z těchto důvodů se využívá primárně pro regionální výpočty emisí. Limitací takového modelu je však jeho přesnost.

Výsledkem navrženého algoritmu je celkový příspěvek emisí na jednotlivých silničních úsecích. Celkový příspěvek se skládá z množství emisí produkovaných různými skupinami vozidel. Do výpočtu tedy vstupuje informace o dopravní intenzitě různých druhů vozidel (viz sekce 3.2.4, dále informace o výškové členitosti (viz sekce 3.2.5), která je vyjádřena pomocí gradientu, a také emise CO<sub>2</sub> způsobené jedním vozidlem.

Emise způsobené jedním vozidlem jsou vypočítané na základě průměrné hodnoty emisí CO<sub>2</sub> v gramech na jeden ujetý kilometr. Tyto emise jsou převzaty z dat Evropské agentury životního prostředí, která monitoruje emise z různých druhů vozidel [68]. V práci je dopravní skladba rozdělena na čtyři skupiny vozidel (viz sekce 3.2.4), a proto jsou i průměrné emise vztaženy k těmto skupinám. U osobních automobilů jsou dále emise rozděleny podle druhu paliva na

benzínové a dieselové. Ostatní druhy pohonných hmot jsou zanedbány, jelikož podle *European Automobile Manufacturers' Association* je 96 % vozidel ve Slovenské republice poháněno právě těmito dvěma druhy paliv [69]. Hodnoty, které vstupují do výpočtu, jsou uvedeny v následující tabulce 6.

Tabulka 6: Množství emisí CO<sub>2</sub> pro jednotlivé skupiny vozidel v jednotkách g/km [68],[70].

Skupiny vozidel	Osobní	Lehká nákladní	Střední a těžká nákladní	Autobusy
Benzín	138.3	-	-	-
Diesel	154.1	520.4	644.1	192.0

Výsledný lineární model, pomocí kterého dojde k výpočtu emisí na jednom silničním úseku, je vyjádřen na následujícím vzorci 3.

$$E_{sum} = \sum \left( g \cdot 3,2 \cdot \frac{e_j}{100} + e_j \right) \cdot i_j \cdot L_{up} + e_j \cdot i_j \cdot L_{down}, \quad (3)$$

kde:

- $j$  - je skupina vozidel, tedy osobní automobily, lehké nákladní vozy, těžké nákladní vozy a autobusy
- $g$  - je gradient úseku vypočítaný v sekci 3.2.5
- $e$  - je množství emisí CO<sub>2</sub> v jednotkách kg/km<sup>9</sup>
- $i$  - je dopravní intenzita vypočítaná v sekci 3.2.4
- $L_{up}$  - je délka daného úseku ve směru do kopce
- $L_{down}$  - je délka daného úseku ve směru z kopce nebo po rovině
- konstanta 0,32 vyjadřuje nárůst emisí v závislosti na gradientu (viz sekce 3.2.5)

Výpočet probíhá podobně jako při obohacení dopravního modelu pomocí kurzoru. Každému úseku je tedy přidělena hodnota vyjadřující celkový příspěvek emisí. V dalším kroku pak dochází k výpočtu emisí pro jednotlivé druhy vozidel, kde se vzorec liší pouze tím, že do něj vstupují emise a dopravní intenzita jen pro daný druh vozidel. Z důvodu potřeby znalosti celkového

<sup>9</sup> U osobních automobilů je množství emisí rozděleno ještě podle druhu paliva.

příspěvku emisí pro různé časové intervaly (viz sekce 6.2.1) jsou emise také rozpočítány do těchto intervalů. Využívá se k tomu matice časových variací vypočítaná v sekci 3.2.3.

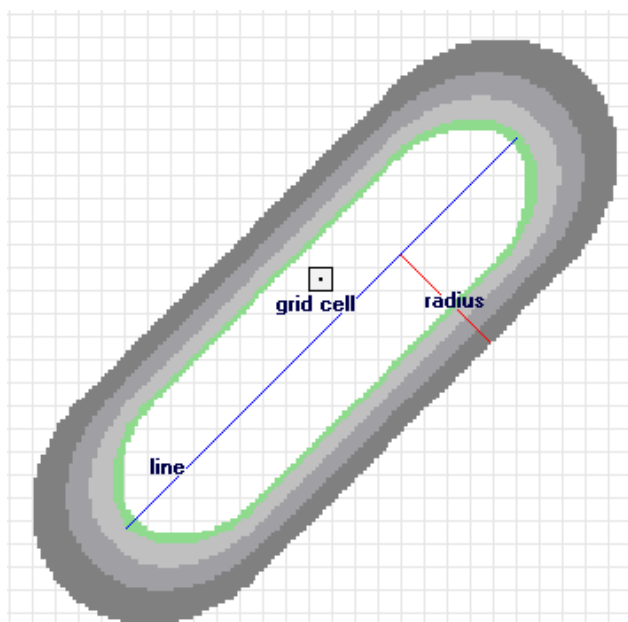
Po výpočtu emisí, který probíhal nad vrstvou jednosměrných úseků, je potřeba úseky převést zpět na obousměrné. Slouží k tomu nástroj *Dissolve*, ve kterém je podmínkou pro spojení dvojice atributů *inspireid* a *sourceid*. Kromě takto vytvořené vrstvy je však v některých vizualizacích využita i vrstva jednosměrných úseků. Struktura atributových dat výsledné vrstvy silnic s vypočítanými emisemi je zobrazena v příloze práce (viz příloha C – Výsledná struktura vypočítaných dat).

## 5.2 Výpočet disperze

Po výpočtu celkového příspěvku emisí na jednotlivých silničních úsecích je dalším krokem výpočet disperze emisí do okolí. Jak bylo zmíněno výše, pro výpočet disperze je v práci využito jádrových funkcí. Důvodem výběru této metody je zejména jednoduchost výpočtu a množství vstupních dat. Podobně jako v předchozí podkapitole zde hraje roli i velikost zájmového území, jelikož ostatní metody (viz podkapitola 1.2) jsou vhodné primárně pro mikroskopické modelování.

K výpočtu disperze emisí do okolí byl v práci využit nástroj *Kernel Density* [71], kterým disponuje software AGP. Nástroj je možné využít pro výpočet hustoty prvků v území. Často se využívá pro výpočet hustoty osídlení, hustotu výskytu zločinů, popřípadě pro výpočet vlivu liniových prvků, převážně silnic, na přírodu. Kromě výpočtu hustoty z liniových prvků je také možné vypočítat hustotu pro body.

Koncept výpočtu pro liniové prvky spočívá v položení hladkého zakřiveného povrchu na každou linii. Hodnota rastru je největší v oblasti nad linií, a směrem od linie se hustota snižuje až k nule, kde nula je na okraji hraniční oblasti (viz obrázek 31). Povrch je definován tak, že objem pod povrchem je roven součinu délky linie spolu s vybranou vstupní hodnotou definovanou podle atributu dané linie. Hodnota každé buňky výstupního rastru je spočítána jako součet všech jádrových povrchů (tam kde povrch zasahuje střed buňky). Výpočet byl v nástroji odvozen z kvartického jádra popsaného v knize *Density Estimation for Statistics and Data Analysis* [71],[72].



Obrázek 31: Funkcionalita nástroje *Kernel Density* pro liniové prvky [71].

Vstupní vrstvou nástroje je vrstva linií se spočítaným příspěvkem emisí z předchozí podkapitoly. Výstupní vrstvou je rastr, který pokrývá celé zájmové území. Každá buňka výstupního rastru nese informaci o množství emisí CO<sub>2</sub> v jednotkách kg/m<sup>2</sup>. Struktura výsledné rastrové vrstvy, která vyjadřuje šíření emisí, je znázorněna v příloze práce (viz příloha C – Výsledná struktura vypočítaných dat).

Jak je popsáno výše, v rámci nástroje je možné zvolit atribut, podle kterého se budou hodnoty rastru vypočítávat. Zvolený atribut se liší pro různé případy užití (viz podkapitola 6.3). Například pro výpočet disperze celkových emisí je využita hodnota vypočítaná podle vzorce z předchozí podkapitoly. Kromě vstupního atributu je dále možné nastavit také velikost výstupního rastru a velikost vyhledávací oblasti (*radius* na obrázku 31). Hodnota vyhledávací oblasti byla nastavena na 3000 m a hodnota velikosti buňky rastru na 50 m. Pro jednu vizualizační metodu je však velikost buňky změněna. Důvodem je přehlednost výsledné vizualizace (viz sekce 6.3.2).



## 6 Vizualizace dosažených výsledků

Předchozí kapitola popisuje navržený algoritmus pro výpočet emisí způsobených dopravou a jejich následné šíření (disperzi) do okolí. Po výpočtu je dalším krokem vizualizace dosažených výsledků, které se věnuje tato kapitola. Jednotlivé vizualizační metody byly navrženy na základě provedené rešerše (viz kapitola 2) a jsou zároveň opřeny o případy užití, ke kterým by při hodnocení znečištění mohlo dojít (viz podkapitola 6.1). Vizualizace využívají dvou i trojdimenzionální modely a byly navrženy tak, aby poskytovaly korektní interpretaci zkoumaného jevu. Při návrhu metod, využívajících třetí dimenzi, byly stále uvažovány koncepty tematické kartografie, pouze byly aplikovány na prostor vyšší dimenze.

Tvorba níže zmíněných vizualizací probíhá v softwaru AGP. Pro lepší sledování zkoumaných jevů je však potřeba, aby vytvořené interaktivní vizualizace byly dostupné i uživatelům, kteří nemají licenci softwaru AGP. Z tohoto důvodu byly všechny vizualizace nahrány na web, kde jsou prezentovány jako webové aplikace, vytvořené v prostředí AGOL (viz podkapitola 3.1). Výsledné vizualizace jsou dostupné na odkazu <https://emissions-dp.glitch.me/>. V kapitole jsou také stručně popsány postupy, které vedou k vytvoření jednotlivých vizualizací.

Struktura této kapitoly odpovídá struktuře rešerše vizualizačních metod provedené v kapitole 2. Jednotlivé zobrazovací metody jsou rozděleny podle zobrazovaného jevu konkrétně na dvě skupiny: výsledky emisního a disperzního modelování. V některých případech má však smysl zobrazovat tyto jevy najednou, a z tohoto důvodu je v kapitole uvedena ještě třetí skupina popisující kombinaci některých metod.

### 6.1 Případy užití

Případem užití se zde rozumí scénář, ke kterému může dojít v případě hodnocení množství emisí na daném území. Jednotlivé případy užití byly navrženy vedoucím a autorem práce. Vhodnost vytvořených vizualizací pro dané případy užití je opřena o studii s podobným zaměřením [40].

Stejně jako ve zmíněné studii (zaměřené na časově proměnnou vizualizaci hluku způsobeného dopravou), i zde je jedním z případů užití sledování časové variace jevu. Hodnotitel emisí může na základě vytvořených vizualizací sledovat, jak se hodnoty jevu mění v čase, a podle toho rozhodovat o daných opatřeních (například dopravních omezeních). Délka časových intervalů se může lišit podle zaměření dané studie. Hodnotitel může například sledovat změnu v rámci jednoho dne, nebo naopak sledovat rozdíly v rámci několika dnů, týdnů atd. V práci byl jako případ užití vybrán první z uvedených příkladů. Sleduje se dynamika jevu v rámci jednoho dne. Intervaly byly navrženy tak, aby obsahovaly ranní a odpolední špičku, a z tohoto důvodu nejsou

rovnoměrné (až na případ časové osy, kde byly z technických důvodů využity intervaly konstantní – viz sekce 6.2.1).

Druhým případem užití je sledování příspěvku emisí od různých druhů vozidel najednou. Hodnotitel zde může pozorovat, která skupina vozidel nejvíce přispívá ke znečištění ovzduší. V práci je tento případ užití rozdělen ještě do dvou kategorií. První kategorie se zaměřuje na zobrazení celkového příspěvku emisí od jednotlivých skupin vozidel. Druhá kategorie sleduje poměr příspěvků od jednotlivých skupin. Množství je zde vyjádřeno procentuálně. Skupiny vozidel, pro něž byly vizualizace v práci vytvořeny, jsou nákladní a osobní automobily. Alternativně by bylo možné sledovat poměr příspěvků např. mezi osobními vozidly na naftový a benzínový pohon, případně mezi těžkými a lehkými nákladními vozy.

Posledním případem užití je zobrazení celkového množství emisí pro jeden průměrný den. Hodnotitel může na základě vytvořených vizualizací sledovat celkovou sumu emisí za jeden den.

## **6.2 Vizualizace výsledků emisního modelování**

Jak uvádí podkapitola 5.1, výsledkem emisního modelování je celkový příspěvek emisí pro každý jednotlivý silniční úsek. Množina těchto úseků je reprezentována pomocí liniové vektorové vrstvy. Výsledkem aplikace navrženého algoritmu je tedy liniová vrstva s přiděleným atributem, který vyjadřuje celkový příspěvek emisí. Tato podkapitola popisuje navržené vizualizační metody vhodné pro vizualizaci emisí na liniových prvcích.

### **6.2.1 Časová osa**

Již v podkapitole 2.1 bylo zmíněno, že většina článků a studií s podobným zaměřením využívá pro zobrazení časové variace jevů časovou osu, jelikož se jedná o metodu, která umožňuje sledovat změny v prostoru i v čase. První zobrazovací metoda využívá možností časové osy pro vyjádření časové variace emisí na liniových prvcích. Jedná se o první případ užití (viz podkapitola 6.1).

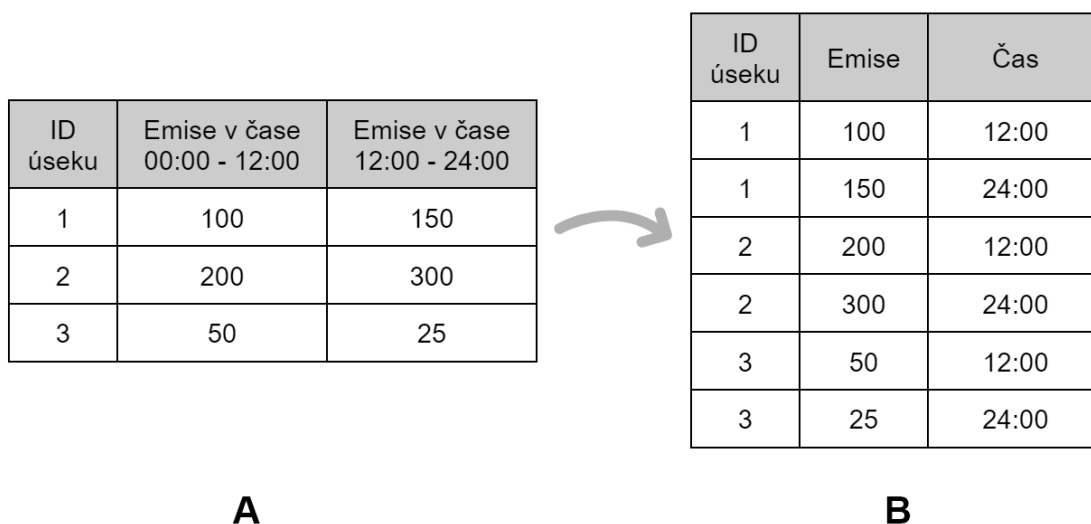
Základním principem této metody je možnost výběru časového intervalu, ve kterém si uživatel může výsledné hodnoty zobrazit. Časová osa, kterou disponuje software AGP a AGOL, umožňuje zároveň přehrávání dat po jednotlivých intervalech. Uživatel tak může nahlédnout, jak se jev mění spolu s plynutím času.

Pro vyjádření množství emisí na silničních úsecích je využito metody gradovaných symbolů (jednoduchý jednosměrný stuhový kartodiagram - viz sekce 6.2.3), kde je množství vyjádřeno šířkou linie. Kromě šířky linie je množství vyjádřeno také pomocí barvy. Zde byla zvolena sekvenční stupnice. Stejná kombinace vizualizačních metod je využita i v již zmiňované aplikaci *Traffic Modeller* (viz sekce 2.1.1).

Aby bylo možné vytvořit časovou osu, je potřeba speciální struktura dat, která v atributové tabulce obsahuje časový datový typ *Date*. Pomocí tohoto atributu jsou na časové ose vytvořeny intervaly. Struktura vhodná pro tvorbu časové osy je zobrazena na obrázku 32 (B).

Výsledkem výpočtu celkových emisí (viz podkapitola 5.1) je celkový denní příspěvek emisí na daném úseku. Celkovou hodnotu je následně možné rozpočítat do jednotlivých časových intervalů s využitím matice časových variací (viz sekce 3.2.3). V případě tohoto postupu je však struktura atributových dat podobná struktuře na obrázku 32 (A), a pro tvorbu časové osy je nutné tabulku restrukturalizovat do podoby jako na obrázku 32 (B).

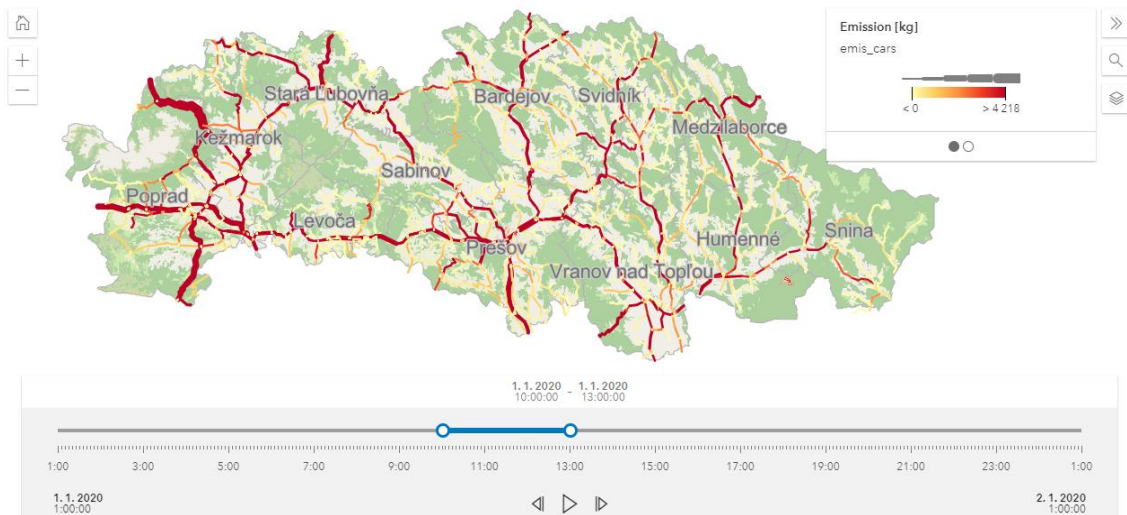
Pro restrukturalizaci tabulky byl v rámci práce napsán krátký skript, který je uveden v příloze diplomové práce (viz příloha B – Obsah příloženého CD). Struktura, do které je potřeba tabulku převést, je obecná, a je možné, že geometrie prvků ve vrstvě se může se změnou času lišit. Pro případ, kdy je geometrie prvků v každém časovém intervalu stejná (vrstva silnic), však dojde k překopírování geometrie podle počtu intervalů. K tomu také dochází v příkladu na obrázku 32, kde je geometrie úseku uložena dvakrát. V případě zkrácení časových intervalů roste celková velikost výsledné vrstvy.



Obrázek 32: Struktura atributových dat pro vytvoření časové osy. Tabulka A ukazuje strukturu atributové tabulky po výpočtu emisí podle podkapitoly 5.1. Tabulka B ukazuje strukturu vhodnou pro časovou osu.

Posledním krokem tvorby vizualizace je nastavení časových intervalů, které probíhá pomocí GUI. Výsledná vizualizace byla vytvořena pro emise způsobené všemi druhy vozidel. Délka jednoho časového intervalu byla nastavena na tři hodiny. Intervaly jsou rozdílné oproti metodě popsané v sekci 6.2.2. Hlavním důvodem je, že webové prostředí AGOL, pomocí kterého je vizualizace publikována, požaduje homogenní interval na časové ose.

Výslednou vizualizaci je možné pozorovat na obrázku 33. Pro zajištění interaktivity s časovou osou byla vytvořena webová aplikace, která je dostupná na následujícím odkazu <https://shorturl.at/gqAE8>.



Obrázek 33: Vizualizace emisí na liniových prvcích prostřednictvím časové osy.

Výsledná vizualizace popsaná v této sekci umožňuje pozorovat změnu příspěvku emisí na liniových prvcích v čase. Slouží k tomu časová osa, která byla pro tento případ užití vytvořena pro tři hodinové časové intervaly. Pro tuto metodu je však nezbytné, aby byla mapa interaktivní, jelikož by v opačném případě nebylo možné časovou osu posouvat.

## 6.2.2 Space-time cube

Další metodou, pomocí které je možné vyjádřit časovou variaci jevu, je metoda *space-time cube* (časoprostorová kostka = STC), která využívá třetího rozměru pro zobrazení změny jevu v závislosti na čase. Oproti časové ose je tak možné sledovat dynamiku jevu v několika časových intervalech najednou. Tato sekce popisuje tvorbu STC pro liniové prvky.

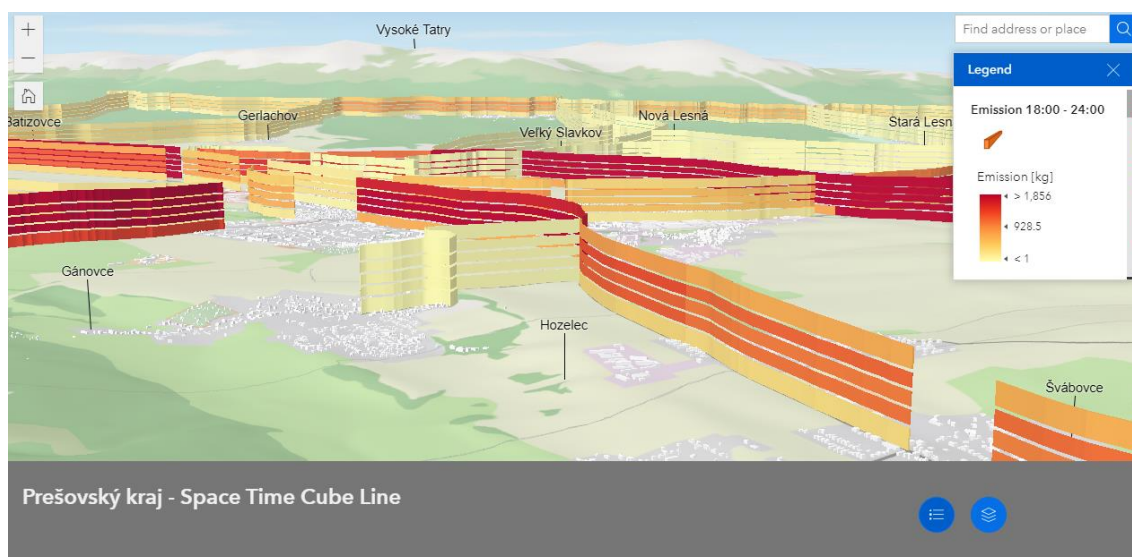
Pomocí této metody jsou zobrazeny hodnoty celkových emisí v rámci pěti časových intervalů. Intervaly byly navrženy tak, aby obsahovaly ranní a odpolední špičku, a z tohoto důvodu nejsou rovnoměrné. Prvním krokem je výpočet množství emisí v těchto intervalech. Ten probíhá nejprve stanovením dopravní intenzity podle zvolených intervalů (viz sekce 3.2.3). Následně je pouze použit vzorec 3, do kterého vstupují intenzity pro jednotlivé druhy vozidel. Výsledkem je liniová vrstva s vypočítanými hodnotami emisí v definovaných časových intervalech.

Samotná tvorba STC probíhá v rámci webového softwaru AGOL, kde je využito 3D webové globální scény. Do scény je nejprve nahrán 3D topografický model (viz podkapitola 4.3). Následně jsou do scény opakovaně (podle počtu intervalů) nahrávány kartografické vrstvy, které

reprezentují množství emisí v daných intervalech. Takto nahrané kartografické vrstvy je vhodné pojmenovat podle časových intervalů, aby nedošlo k jejich nechtěné záměně.

Dalším krokem je nastavení symboliky pro jednotlivé kartografické vrstvy. Hodnota jevu (množství emisí) je zobrazena pomocí barevné stupnice, která je pro všechny kartografické vrstvy neměnná. Aby došlo k zobrazení nerovnoměrnosti časových intervalů, je následně výška zobrazovaných symbolů u každé kartografické vrstvy nastavena podle délky časového intervalu.

Výsledná vizualizace je dostupná na odkazu <https://shorturl.at/BFINS> a zobrazena na následujícím obrázku 34.



Obrázek 34: Zobrazení časoprostorové variace emisí pomocí metody STC.

Metoda STC popsaná v této sekci využívá třetího rozměru pro vizualizaci časové dynamiky sledovaného jevu. Případ užití, který metoda sleduje, je zobrazení celkového příspěvku emisí od všech druhů vozidel v pěti časových intervalech. Jedná se tedy o stejný případ užití jako v případě časové osy popsané v sekci 6.2.1 s rozdílem velikosti intervalů (rozdíl intervalů plyne z nutnosti jejich homogenní velikosti pro metodu časové osy). Narozdíl od časové osy umožňuje metoda STC zobrazení jevu v různých časových intervalech najednou. V rámci interaktivní webové aplikace je dále možné vypínat a zapínat jednotlivé kartografické vrstvy, které reprezentují časové intervaly. Je tedy možné například sledovat a analyzovat pouze ranní a odpolední špičku.

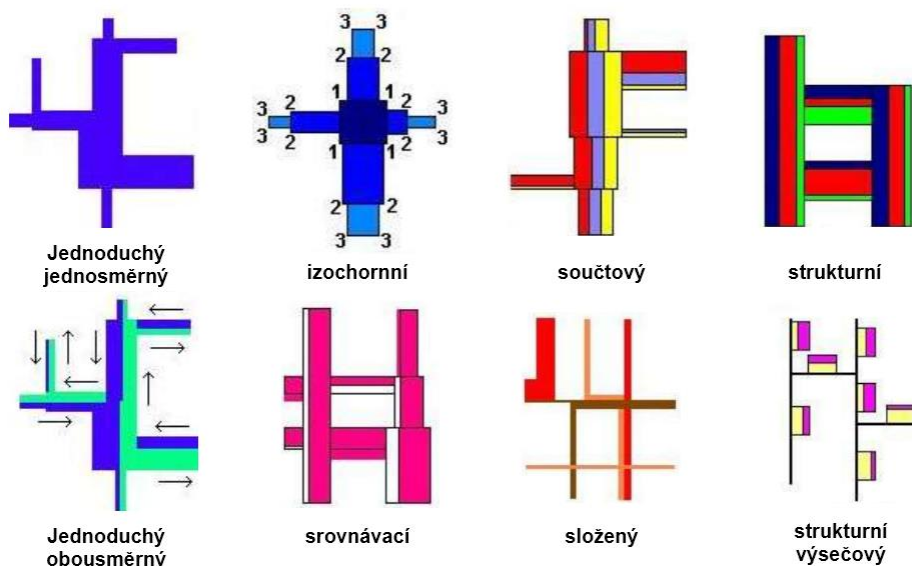
Kartografické vrstvy jsou zobrazeny na podkladu topografického modelu, čímž je zajištěna lepší orientace v prostoru. Největší nevýhodou je velikost zájmového území. V případě pozorování scény v malém měřítku, tedy při pozorování Prešovského kraje jako celku, není velikost sledovaného jevu patrná, a je potřeba většího přiblížení. Z tohoto důvodu je vhodné vytvoření interaktivní scény, ve které je možné měřítko a polohu ve scéně libovolně měnit.

### 6.2.3 Liniový stuhový kartodiagram 2D

Metoda liniového stuhového kartodiagramu byla využita již v sekci 6.2.1, v této sekci je však metoda podrobněji popsána a je zároveň použita pro jiný případ užití (viz níže). Liniový stuhový kartodiagram obecně slouží k vyjádření hodnoty jevu na liniových prvcích. U této metody je velikost a dynamika zobrazovaného jevu znázorněna pomocí šířky liniového pásu. Kvalita a struktura jevu je znázorněna pomocí barvy linie [73]. Výhodou této zobrazovací metody je také možnost zobrazení různých hodnot pro opačné směry linie.

Případ užití, pro který je tato zobrazovací metoda využita, je sledování příspěvku emisí od různých druhů vozidel najednou (viz podkapitola 6.1).

Jednotlivé druhy liniových stuhových kartodiagramů jsou uvedeny na následujícím obrázku 35. V této sekci je využito součtového a strukturního kartodiagramu, jelikož jsou pro zvolený případ užití vhodné. Kromě těchto dvou kartodiagramů by bylo dále možné využít i výšečový, či srovnávací kartodiagram. Ty se však autorovi nepodařilo implementovat.



Obrázek 35: Druhy liniových stuhových kartodiagramů [73].

Jako první je popisována tvorba součtového kartodiagramu, pomocí kterého je vyjádřeno celkové množství emisí způsobených osobními a nákladními automobily. Hodnotu jevu je možné vyjádřit prostřednictvím kartografické vrstvy, pro kterou je nastavena symbolika podle atributů. V této vrstvě je pak množství emisí vyjádřeno šířkou jednotlivých úseků. Kvalita jevu, tedy příspěvek od osobních, či nákladních automobilů, je vyjádřena rozdílnou barvou. Výhodou stuhového kartodiagramu je možnost zobrazení rozdílných hodnot v obou směrech linie. V této zobrazovací metodě je tedy vstupem vrstva jednosměrných úseků (viz podkapitola 5.1).

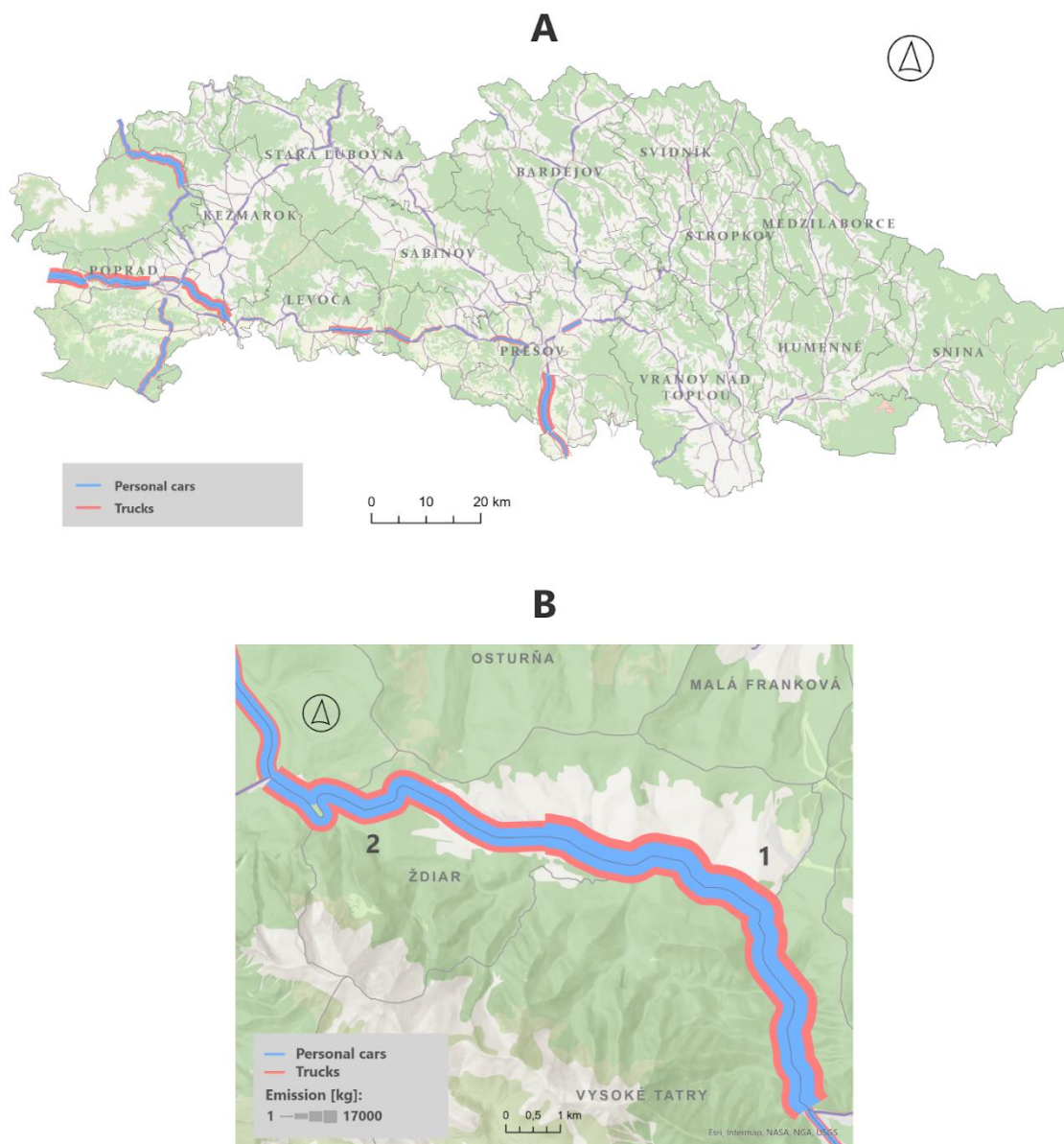
Prvním krokem tvorby vizualizace je vypočítání atributů, které budou pro vizualizaci použity. Příspěvek emisí od osobních automobilů je vypočítán pomocí vzorce 3, do kterého přirozeně vstupuje pouze intenzita od osobních automobilů. Stejným postupem je vypočítán i příspěvek od nákladních vozů, kde do vzorce vstupuje intenzita od lehkých a těžkých nákladních vozů.

Software AGP nedisponuje nástrojem pro tvorbu stuhových kartodiagramů. Jejich tvorba je zde tedy řešena pomocí nastavení symboliky u jednotlivých kartografických vrstev. Aby bylo možné zobrazit hodnotu dvou jevů, je potřeba pracovat se dvěma kartografickými vrstvami. Pro přehlednost je vhodné kartografické vrstvy pojmenovat. Pro tento případ jsou vrstvy pojmenovány jako *Emission trucks* a *Emission personal cars*. Pořadí vrstev je nastaveno tak, aby se vrstva *Emission trucks* vykreslovala pod vrstvou *Emission personal cars*.

Šířka úseků ve vrstvě *Emission personal cars* je nastavena podle vypočteného atributu v předchozím kroku (jedná se o příspěvek emisí od osobních automobilů). Barva je nastavena na modrou. Šířka úseků ve vrstvě *Emission trucks* je nastavena podle součtu vypočítaných atributů v předchozím kroku (jedná se o součet příspěvku emisí od osobních automobilů a nákladních vozů). Barva je nastavena na červenou. Tím, že je šířka úseků u vrstvy *Emission trucks* nastavena na součet atributů, nedojde k překrytí kartografických vrstev, takže v mapě je znázorněna správná hodnota.

Aby bylo možné rozlišit rozdílné množství emisí v opačných směrech linie, je následujícím krokem nastavení *offsetu* u obou kartografických vrstev. *Offset* zajistí, že dojde k odsazení symboliky vždy na pravou stranu od linie (ve směru linie). Aby se kartodiagram zobrazil vždy přímo vpravo od dané linie, je však nutné nastavit velikost odsazení přesně na polovinu velikosti šířky dané linie.

Výsledná vizualizace součtového kartodiagramu je dostupná na následujícím odkazu <https://shorturl.at/jpLM1> a zobrazena na obrázku 36.



Obrázek 36: Celkový příspěvek emisí od osobních automobilů (modrá) a nákladních vozů (červená) zobrazený prostřednictvím součtového liniového kartodiagramu. Část A zobrazuje celý Prešovský kraj. Část B zobrazuje detail v oblasti Tatranského národního parku.

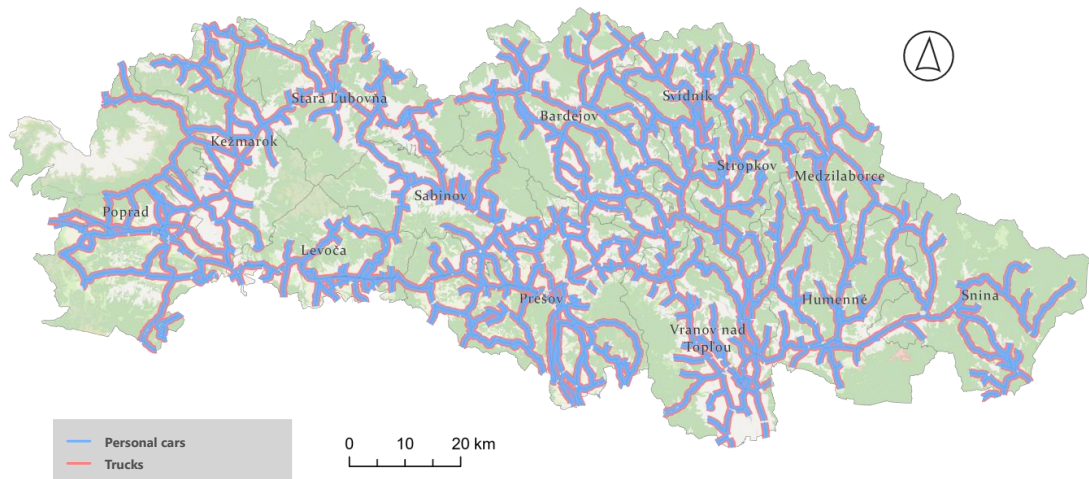
Druhým typem kartodiagramu, který byl v práci využit, je strukturní kartodiagram, pomocí kterého je vyjádřen procentuální příspěvek emisí od osobních a nákladních automobilů. Strukturu jevu je opět možné vyjádřit změnou šířky linie v kartografické vrstvě. V tomto případě je ale celková šířka linie konstantní pro všechny úseky, a míra zastoupení je vyjádřena pomocí šířky dílčích linií, které jsou barevně rozlišeny. Stejně jako v předchozím případě je i zde vstupem vrstva jednosměrných úseků (viz podkapitola 5.1).

Proces tvorby strukturního kartodiagramu je obdobný jako v předchozím případě. Jediným rozdílem je výpočet atributů, podle kterých se budou měnit šířky úseků v kartografických vrstvách. Z celkového množství emisí způsobených osobními a nákladními vozy je potřeba zjistit



procentuální příspěvky emisí. Oba vypočítané atributy, tedy stačí podělit jejich sumou a roznásobit číslem 100. Výsledkem jsou procentuální příspěvky emisí od osobních a nákladních automobilů.

Zbýlý proces je stejný jako v předchozím případě. Výsledná vizualizace strukturního kartodiagramu je dostupná na odkazu <https://shorturl.at/nzGW1> a zobrazena na následujícím obrázku 37 a 38.



Obrázek 37: Zobrazení procentuálního příspěvku emisí od osobních automobilů (modrá) a nákladních vozů (červená) prostřednictvím strukturního liniového kartodiagramu.



Obrázek 38: Detail liniového strukturního kartodiagramu ve 2D. Osobní automobily (modrá), nákladní vozy (červená).

Jak je možné sledovat z předchozích obrázků 36 (A) a 37, případně z webových aplikací, u obou kartodiagramů je největší nevýhodou velikost zájmového území. V případě pozorování mapy v malém měřítku, tedy při pozorování Prešovského kraje jako celku, není velikost jevů patrná, a je tedy potřeba většího přiblížení. Ve větším měřítku však vizualizace poskytuje dobré výsledky, a pro obě vizualizace je vhodné vytvoření interaktivní mapy, ve které je možné změnu měřítka provádět.

Na obrázku 36 (B), kde je znázorněn součtový kartodiagram, je možné pozorovat nárůst množství emisí vlivem členitosti terénu. Přestože mají zobrazené úseky téměř stejnou hodnotu dopravní intenzity, je množství produkovaných emisí na úseku č. 1 daleko větší než na úseku č. 2. Na obrázku 36 (B) je dále možné pozorovat rozdíl mezi množstvím emisí při cestě do kopce a z kopce. Na úseku č. 1 je patrné, že množství produkovaných emisí je směrem z východu na západ větší než opačným směrem.

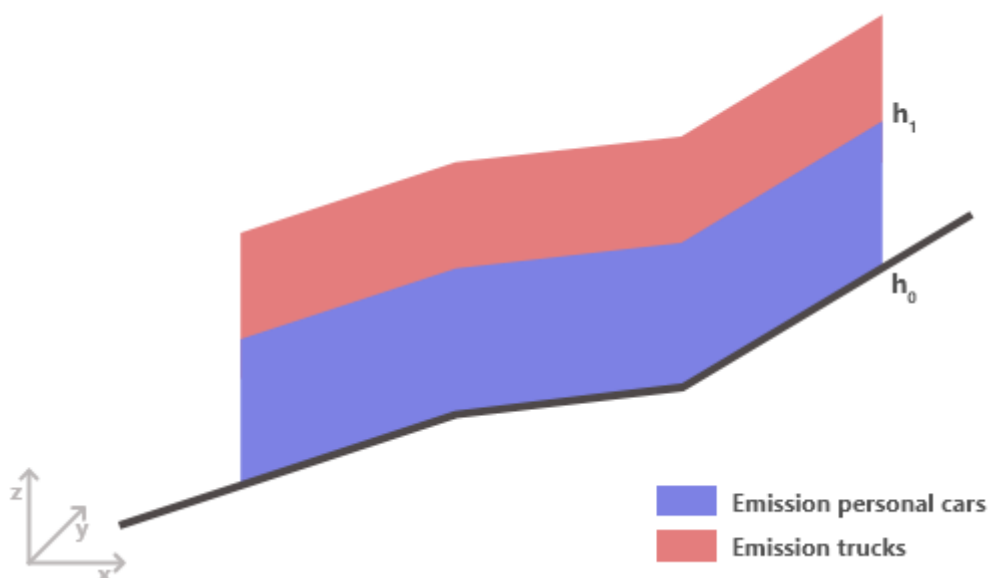
Na obrázku 38 je možné pozorovat strukturální kartodiagram ve větším přiblížení. Ze strukturálního kartodiagramu je možné pozorovat, že procentuální příspěvek emisí od nákladních automobilů a osobních vozů je na dálnici (A) okolo 50 %. Na silnici 1. třídy (B) a 2. třídy (C) se procentuální příspěvek emisí od nákladních automobilů snižuje.

#### **6.2.4 Liniový stuhový kartodiagram 3D**

Následující zobrazovací metoda navazuje na předchozí, jelikož se věnuje stejnému případu užití. Opět je zde využit součtový a strukturální kartodiagram. Rozdílem oproti předchozí metodě je však to, že je zde pro zobrazení jevu využito třetí dimenze a velikost jevu je zobrazena výškou linie.

Jako první je opět popsána tvorba součtového kartodiagramu. Výpočet potřebných atributů, podle kterých jsou kartografické vrstvy měněny, je totožný jako v předchozím případě. V prvním kroku jsou opět vypočteny příspěvky emisí od osobních automobilů a nákladních vozů podle vzorce 3.

Podobně jako v předchozím případě není v softwaru AGP možné vytvořit 3D liniové stuhové kartodiagramy pomocí nástroje. Opět je problém vyřešen nastavením symboliky u kartografických vrstev. Aby bylo možné zobrazit hodnotu dvou jevů, je potřeba pracovat se dvěma kartografickými vrstvami. Pro přehlednost je vhodné kartografické vrstvy pojmenovat. I pro tento případ jsou vrstvy pojmenovány jako *Emission trucks* a *Emission personal cars*. Na následujícím obrázku 39 je zobrazená situace, které je potřeba prostřednictvím nastavení kartografických vrstev dosáhnout.

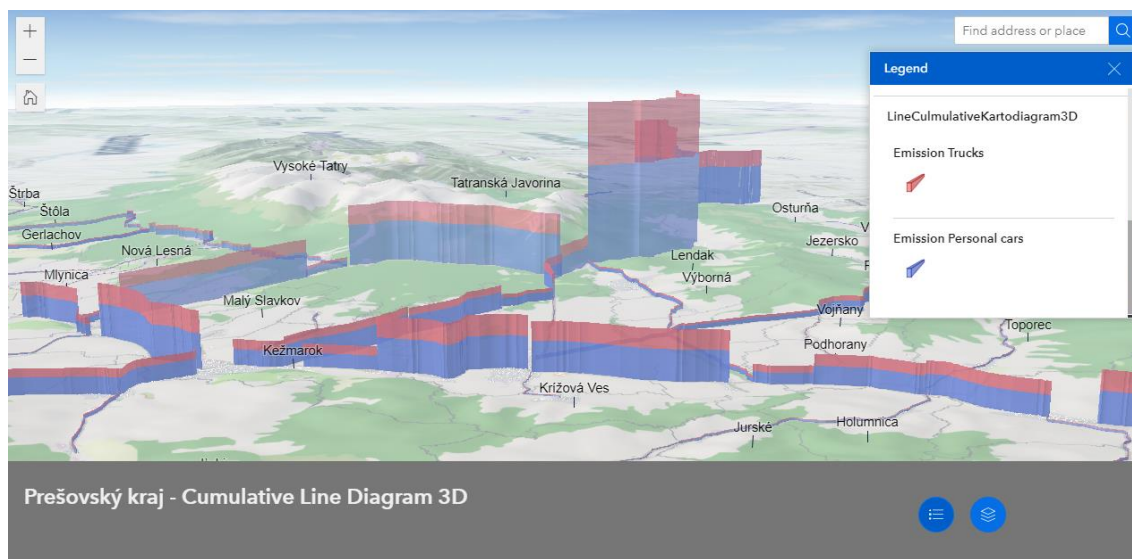


Obrázek 39: Pomocný obrázek pro vytvoření stuhového liniového kartodiagramu ve 3D.

Následně je potřeba nastavit základní výšku, ve které se budou kartografické vrstvy zobrazovat. Pro vrstvu *Emission personal cars* je tato úloha jednoduchá, jelikož je potřeba, aby se celá vrstva zobrazovala na terénu. Relativní výška této vrstvy je nastavena na hodnotu 0 (hodnota  $h_0$  na obrázku 39). Složitějším případem je vrstva *Emission trucks*. Zde je potřeba nastavit relativní výšku na hodnotu atributu vyjadřující množství emisí způsobených osobními vozy (hodnota  $h_1$  na obrázku 39). Výšky u obou vrstev je možné nastavit prostřednictvím kurzoru. Případně je možné ve vlastnostech vrstvy vybrat atribut, podle kterého má být výška nastavena.

Po nastavení základních výšek stačí linie v kartografických vrstvách extrudovat do atributem definované výšky. Pro vrstvu *Emission personal cars* to bude již zmiňovaný atribut vyjadřující množství emisí způsobených osobními vozy, pro vrstvu *Emission trucks* to bude atribut vyjadřující množství emisí způsobených nákladními vozy. V posledním kroku jsou vrstvy barevně rozlišeny (viz obrázek 39).

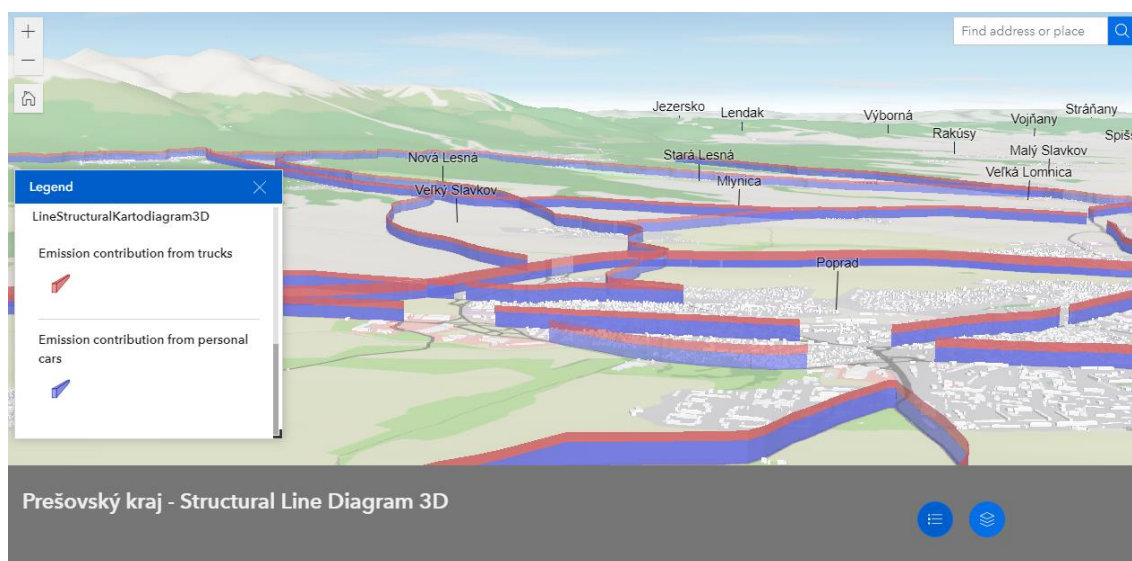
Obě kartografické vrstvy jsou následně nahrány do webového prostředí AGOL, kde je zkonstruována scéna spolu s topografickým 3D modelem (viz podkapitola 4.3). Webová vizualizace je dostupná na následujícím odkazu <https://shorturl.at/DGMXZ> a zobrazena na obrázku 40.



Obrázek 40: Celkový příspěvek emisí od osobních automobilů (modrá) a nákladních vozů (červená) zobrazený prostřednictvím součtového liniového kartodiagramu ve 3D.

Stejně jako v předchozí sekci je i zde kromě součtového kartodiagramu vytvořen kartodiagram strukturní. Jediným rozdílem je výpočet atributů, podle kterých se bude měnit výška linií v kartografických vrstvách. Jako v předchozí sekci se i zde jedná o atributy vyjadřující procentuální příspěvky emisí od osobních a nákladních automobilů

Zbýlý proces je stejný jako v předchozím případě. Výsledná vizualizace strukturního liniového kartodiagramu ve 3D je dostupná na odkazu <https://shorturl.at/cnW47> a zobrazena na následujícím obrázku 41.



Obrázek 41: Zobrazení procentuálního příspěvku emisí od osobních automobilů (modrá) a nákladních vozů (červená) prostřednictvím strukturního liniového kartodiagramu ve 3D.

Metoda popsaná v této sekci umožňuje vizualizaci stuhových kartodiagramů na podkladu topografického modelu. Třetí dimenze je zde využita pro vyjádření struktury a také celkové

hodnoty sledovaného jevu. Příklad užití je zde obdobný jako v předchozí sekci 6.2.3, z čehož plynou i stejné výsledky pro oba kartodiagramy.

Oproti metodě stuhového kartodiagramu ve 2D, je zde výhodou lepší orientace v prostoru, která je zajištěna vizualizací na podkladu topografického modelu. Naopak nevýhodou je zejména nemožnost čtení přesné hodnoty zobrazovaných jevů z důvodu perspektivního zkreslení pozorované 3D scény. U strukturního kartodiagramu je strukturu možné přibližně odhadnout i bez konstantního měřítka, ale u součtového kartodiagramu je přesná hodnota nezměřitelná. Jak strukturu, tak celkový součet emisí je však možné zjistit kliknutím na libovolný silniční úsek ve webové aplikaci.

Největším rozdílem je pak zobrazení rozdílné hodnoty v obou směrech linie. Pro případ liniových kartodiagramů ve 3D je tato funkce vlivem AGOL nemožná, jelikož ve 3D scéně není možné nastavit odsazení (v desktopovém softwaru AGP je funkcionalita zajištěna).

Podobně jako v sekci 6.2.2 je i zde problém velikost zájmového území. Vizualizace Prešovského kraje jako celku není možná, a pro sledování hodnoty zobrazovaných jevů je opět nutné větší přiblížení, případně pohyb ve scéně.

### **6.3 Vizualizace výsledků disperzního modelování**

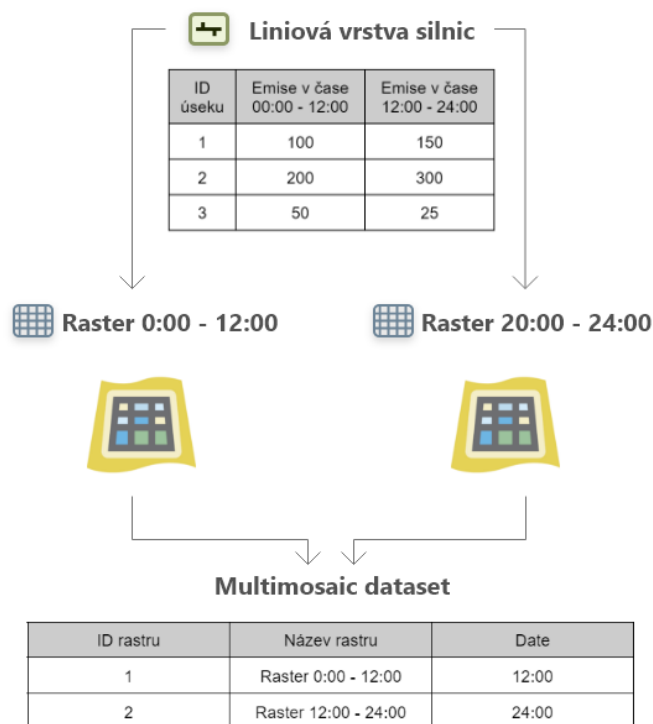
Jak je popsáno v podkapitole 5.2, výsledkem disperzního modelování je rastrová vrstva, ve které každá buňka nese informaci o množství emisí na jednotku plochy. Tento rastr je zde využit jako zdroj pro tvorbu různých vizualizací vhodných pro zobrazení šíření emisí. Popis tvorby jednotlivých vizualizačních metod a také jejich možnosti využití jsou popsány v této podkapitole.

#### **6.3.1 Časová osa**

Stejně jako v sekci 6.2.1 je i zde vyjádřena časová variace jevu prostřednictvím časové osy. Podobně je tedy možné pozorovat, jak se mění šíření emisí v definovaných časových intervalech, případně intervaly postupně přehrát a sledovat změnu jevu s plynutím času.

Oproti metodě popsané v sekci 6.2.1, kde bylo množství emisí zobrazeno na liniových prvcích, je zde pro vyjádření šíření (disperze) emisí využito rastrových vrstev. Dalším rozdílem těchto metod je příprava dat, ze kterých je časová osa vytvořena. Příprava dat probíhá v případě rastrových vrstev prostřednictvím *Mosaic* datasetu. *Mosaic* dataset je datová struktura, která umožňuje ukládání kolekce obrazových dat a rastrů. Každý rastr v kolekci může například obsahovat informaci o času, ve kterém byl rastr pořízen či vytvořen [74]. Pro představivost je

příprava dat shrnuta na následujícím obrázku 42 (na obrázku se vyskytuje dlouhý časový interval pouze jako příklad, skutečný časový interval byl jiný – viz níže)<sup>10</sup>.



Obrázek 42: Příprava dat pro vytvoření časové osy.

Prvním krokem přípravy dat je vytvoření jednotlivých rastrových vrstev, které budou vyjadřovat šíření emisí pro dané časové intervaly. Jejich tvorba probíhá stejným způsobem jako v podkapitole 5.2. Atribut, podle kterého dochází k výpočtu disperze, odpovídá množství emisí ve zvolených časových intervalech (na obrázku 42 se jedná o atributy *Emise v čase 0:00 - 12:00* a *Emise v čase 12:00 - 24:00*). Stejně jako v sekci 6.2.1 byly i zde zvoleny tříhodinové časové intervaly, a výsledkem prvního kroku je osm rastrových vrstev. Nově vzniklé rastrové vrstvy je vhodné pojmenovat podle zvolených intervalů, jelikož se jejich název v budoucím postupu využije pro definování časového atributu v *Mosaic* datasetu.

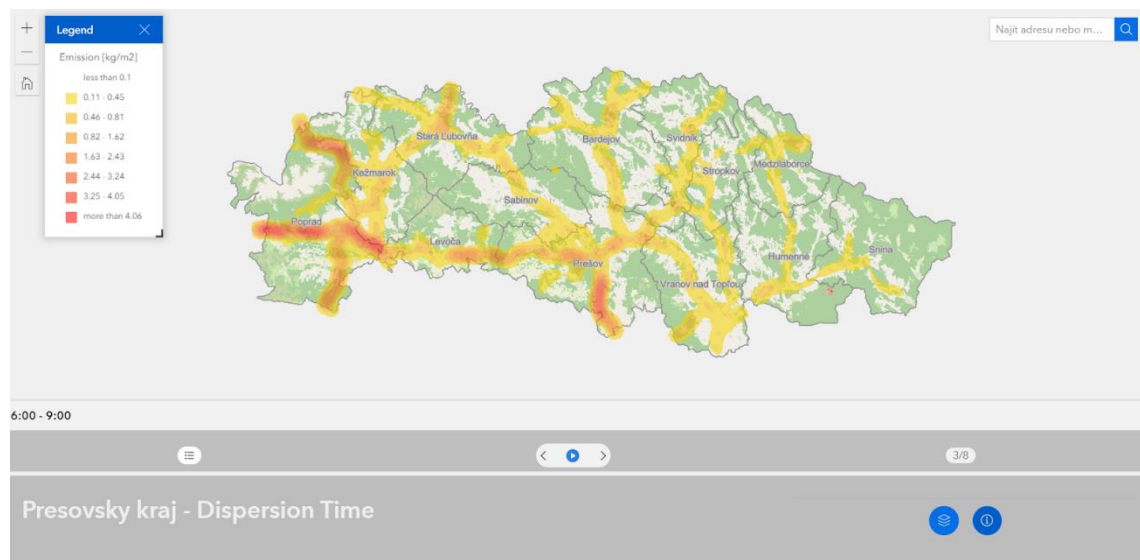
Dalším krokem je vytvoření samotného *Mosaic* datasetu. Ten byl vytvořen prostřednictvím nástroje *Create Mosaic dataset*. V nástroji je možné vybrat strukturu dat, v jaké budou rastry do datasetu vstupovat. Vyskytují se zde možnosti pro nahrání ortofoto snímků z různých družic. Jelikož jsou však rastry, které budou do *Mosaic* datasetu vstupovat, vytvořeny v softwaru AGP a nemají strukturu ortofoto snímků, je tento parametr ponechán defaultně na *None*. Po úspěšném proběhnutí nástroje je vytvořen prázdný dataset.

<sup>10</sup> Autorovi se v literatuře nepodařilo dohledat jednoznačný postup, podle kterého je možné časovou osu z vlastních rastrů vytvořit. Z tohoto důvodu je zde postup popsán podrobněji než v předchozích sekcích.

V následujícím kroku je potřeba naplnit tento prázdný dataset zmiňovanými rastry. K tomu slouží nástroj *Add raster to mosaic dataset*, kde je parametr *Raster type* nastaven na možnost *Raster dataset*. Následně jsou vybrány vstupní rastry (pro tříhodinové intervaly je to zmiňovaných osm rastrů). Dále je v konfiguraci nástroje zaškrtnuta možnost *Calculate statistics*. Po úspěšném proběhnutí nástroje je *Mosaic dataset* naplněn daty.

Posledním krokem tvorby časové osy pro rastrové vrstvy je vytvoření atributu s datovým typem *Date* v atributové tabulce *Mosaic datasetu*. Atributová tabulka obsahuje kromě dalších atributů také zmiňovaný název jednotlivých rastrů. Do tabulky je přidán atribut *Date*, který je následně vyplněn podle zvolených časových intervalů (viz obrázek 42).

Nakonec je nastavena vhodná symbolika, je zde využito sekvenční stupnice. Tím, že se symbolika nastavuje pro *Mosaic dataset* jako celek, je stupnice pro všechny rastry v datasetu totožná. Ve vlastnostech vrstvy je následně vybrán atribut, podle kterého je vytvořena časová osa (atribut *Date*). Výsledná vizualizace je zobrazena na následujícím obrázku 43. Pro zajištění interaktivity byla opět vytvořena webová aplikace dostupná na následujícím odkazu <https://shorturl.at/cO124>.



Obrázek 43: Vizualizace šíření emisí prostřednictvím časové osy.

Metoda pospaná v této sekci umožňuje pozorovat změnu šíření emisí v čase. Slouží k tomu časová osa, která byla pro tento případ užití vytvořena pro tříhodinové časové intervaly, stejně jako v sekci 6.2.1. Aby bylo možné časovou osu měnit, je potřeba, aby byla výsledná mapa interaktivní. Plná interaktivita je pro tento případ zajištěna pouze v softwaru AGP, jelikož při publikaci vizualizace na web není časová osa pro *Multimosaic* dataset zachována. Alternativně byla však vytvořena webová aplikace, která tento problém částečně nahrazuje.

### 6.3.2 Space-time cube

Další vizualizační metodou, pomocí které je možné vyjádřit změnu jevu v prostoru a v čase, je stejně jako v sekci 6.2.2 metoda *space-time cube* (STC). Zde je však metoda využita pro vizualizaci šíření emisí, a tím pádem je postup, a také výsledná vizualizace, značně rozdílný. Časové intervaly, pro které je STC vytvořena, jsou totožné jako v sekci 6.2.2.

Jelikož tato metoda vyjadřuje šíření emisí, vychází tvorba vizualizace z rastrů vypočítaných v podkapitole 5.2. Pro metodu je však velikost buňky rastrových vrstev zvětšena na hodnotu 250. Hlavním důvodem je velikost zájmového území, jelikož v případě ponechání velikosti buňky na hodnotě 50, je výsledná vizualizace nepřehledná, a není možné pozorovat hodnoty jevu uvnitř zájmového území (více viz [48]).

Prvním krokem tvorby vizualizace je tedy vytvoření pěti kartografických rastrových vrstev pro pět zvolených časových intervalů, ze kterých bude vizualizace vytvořena. Stejně jako v sekci 6.2.2 dochází i zde k tvorbě vizualizace po jednotlivých kartografických vrstvách. Jelikož je však proces pro každou vrstvu totožný, byl v rámci práce vytvořen skript, který opakuje kroky pro jednotlivé vrstvy a urychluje tak proces tvorby.

Dalším krokem tvorby vizualizace je převedení kartografické rastrové vrstvy do vektorové vrstvy bodů. Body jsou z rastru vytvořeny prostřednictvím nástroje *Raster to point*, který pro každou buňku rastru vytvoří jeden bod. Výsledná kartografická vrstva bodů obsahuje atribut vyjadřující hodnotu buňky rastru, ze kterého byl bod vytvořen. Jelikož rastr zaujímá celé zájmové území, je i vytvořená kartografická vrstva bodů velice rozsáhlá. Ve větších vzdálenostech od dopravní sítě je však množství emisí téměř nulové, a body tak není nutné v dalším postupu uvažovat.

Následujícím krokem je tedy odstranění bodů, ve kterých je množství emisí téměř nulové. Proces odstranění bodů je zahájen vytvořením rastru obsahujícího pouze buňky, ve kterých jsou emise nenulové. K tomu je využit nástroj *Reclassify*. Následně vstupuje reklasifikovaný rastr do nástroje *Raster to polygon*, který vytvoří polygonovou vrstvu. Posledním krokem je odstranění bodů nacházejících se mimo polygonovou vrstvu.

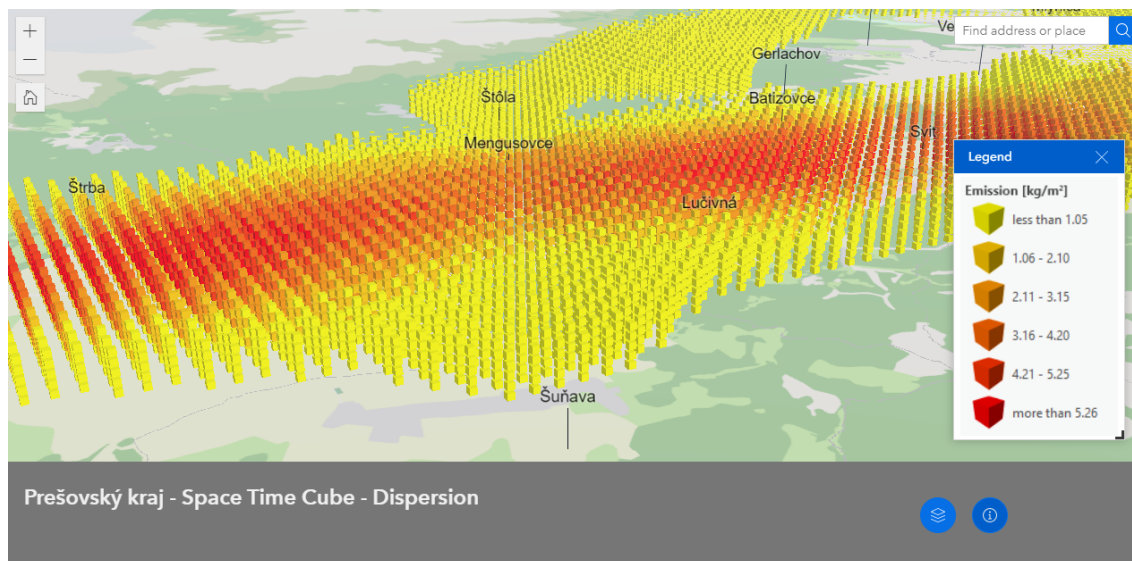
Následně je vytvořena 3D globální scéna, do které jsou vloženy jednotlivé kartografické bodové vrstvy. Všechny vrstvy jsou označeny jako 3D (viz sekce 4.2.2). Dále je nastavena výška, ve které se mají jednotlivé kartografické vrstvy zobrazovat. Výška je pro každou vrstvu nastavena na konstantní hodnotu v rozestupech 100 metrů. Dále je nastavena stejná symbolika pro všechny bodové vrstvy. Je zde využito barevné sekvenční stupnice.

Posledním krokem je vytvoření 'kostek', pomocí kterých je možné předat informaci o hodnotě jevu přehledněji. 'Kostky' jsou vytvořeny pouze aplikací symboliky na kartografickou



bodovou vrstvou. Je vhodné nastavit velikost symbolů v metrech, jelikož v opačném případě dochází při změně měřítka k jejich zvětšení či zmenšení, a kostky se tak mohou překrývat.

Výsledná vizualizace je zobrazena na následujícím obrázku 44. Interaktivní vizualizace je zajištěna prostřednictvím webové aplikace dostupné na odkazu <https://shorturl.at/uHOST>.



Obrázek 44: Zobrazení šíření emisí metodou STC.

Metoda STC popsaná v této sekci umožňuje sledování časové dynamiky ve všech časových intervalech najednou. Případ užití, pro který je metoda využita, je sledování šíření emisí v pěti časových intervalech. Jak je vidět na obrázku 44, či ve webové aplikaci, na některých místech je možné pozorovat nárůst emisí vlivem ranní dopravní špičky, následně pokles přes polední hodiny a pak opět nárůst vlivem odpolední špičky. Obdobně jako v metodě STC pro liniové prvky (viz sekce 6.2.2) je i zde možné vypínat a zapínat jednotlivé vrstvy, které reprezentují časové intervaly. Narozdíl od metody ve 2D je zde však nemožné zobrazit výsledky na podkladu topografického modelu, jelikož by nebylo možné rozeznat, do jakého časového intervalu jednotlivé ‘kostky’ patří.

Vyskytuje se zde podobný problém s velikostí zájmového území jako u některých předchozích metod. Pro sledování hodnoty zobrazovaného jevu je tedy opět nutné větší přiblížení.

### 6.3.3 Výška buňky nad terénem

Poslední metoda, která je využita pro modelování disperze emisí, je podobná metodě používané pro zobrazení škodlivin v Londýně (viz sekce 2.2.2). Metoda vyjadřuje množství škodlivin pomocí výšky sloupce nad povrchem. Kromě Výšky sloupce je dále množství vyjádřeno také pomocí barvy. Případ užití, pro který je v této sekci metoda využita, je zobrazení šíření

celkových emisí. Oproti dvěma předchozím metodám je vstupem pouze jedna rastrová vrstva uchováající informaci o celkových emisích za jeden den.

Z důvodu grafické náročnosti této vizualizace bylo nejprve potřeba zmenšit zájmové území. Vytvoření vizualizace pro celý Prešovský kraj by bylo možné pouze v případě velkého zvětšení velikosti buňky u vstupního rastru, čímž by ale došlo k velké generalizaci sledovaného jevu. Zájmové území bylo tedy nejprve zmenšeno na oblast okresu Poprad.

Prvním krokem tvorby vizualizace je vytvoření pravidelné čtvercové mříže ze vstupního rastru. K tomu je využit nástroj *Grid Index features*, jehož výstupem je vektorová polygonová vrstva, kde každý polygon (čtverec) kopíruje buňku vstupního rastru. Takto vytvořená vektorová vrstva však nenesou informaci o hodnotě buňky původního rastru (pro případ užití se jedná o celkové množství emisí). Tato informace je však pro vytvoření vizualizace klíčová, a je jí potřeba do vrstvy připojit.

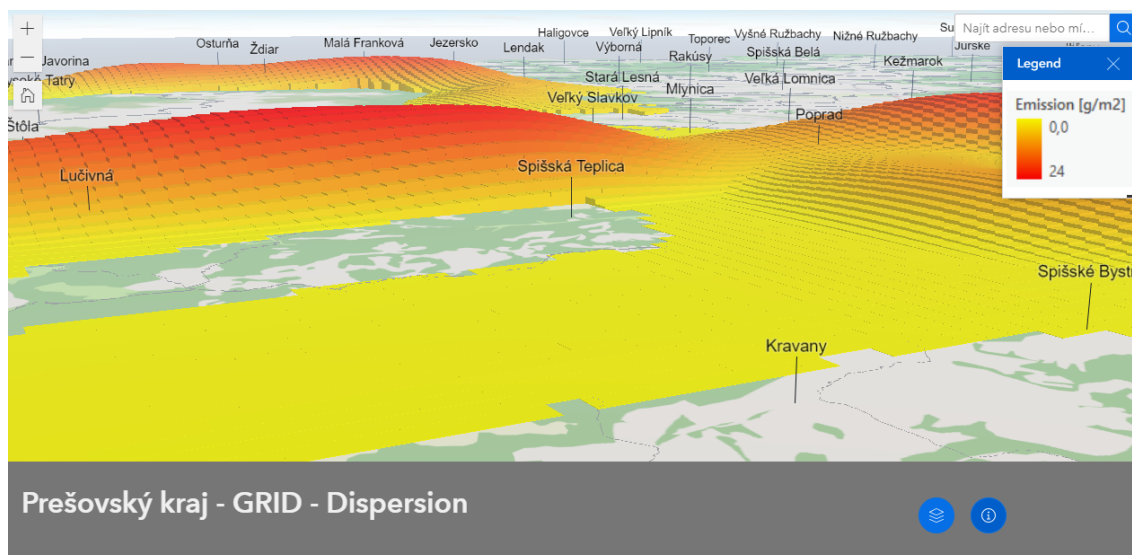
Pro připojení je vytvořena pomocná bodová vrstva, která vznikne aplikací nástroje *Raster to point*. Tato bodová vrstva naopak obsahuje informaci o hodnotě buňky původního rastru.

Jelikož je bodová i polygonová vrstva vytvořena nad rastrem, který zaujímá celé území, zaujímají i vektorové vrstvy celé území. Dalším krokem je tedy odstranění bodů, ve kterých je množství emisí téměř nulové. K jejich odstranění je využit stejný postup jako v předchozí sekci 6.3.2. Stejný postup je aplikován i na vrstvu polygonů reprezentující čtvercovou mříž.

Následně je provedeno prostorové spojení mezi bodovou vrstvou a čtvercovou mříží. Do atributové tabulky čtvercové mříže je tedy přidána informace o množství emisí z původního rastru. Podmínka využitá pro prostorové spojení je *Intersect*, každému polygonu ve čtvercové mříži je přidělena hodnota v bodě, který se nachází uvnitř daného čtverce. Výsledkem je kartografická polygonová vrstva, která se skládá ze čtvercové mříže. Každý jednotlivý čtverec obsahuje informaci o celkovém množství emisí v daném čtverci.

V posledním kroku je vytvořena 3D globální scéna, do které je přidána výsledná kartografická polygonová vrstva. Následně je nastavena symbolika, je využita sekvenční stupnice a čtverce jsou obarveny podle atributu původního rastru. Podle stejného atributu je také nastavena výška, do které se mají jednotlivé čtverce extrudovat.

Výsledná vizualizace je zobrazena na následujícím obrázku 45. Pro zajištění interaktivity byla vytvořena webová aplikace, která je dostupná na odkazu <https://shorturl.at/eqyM9>.



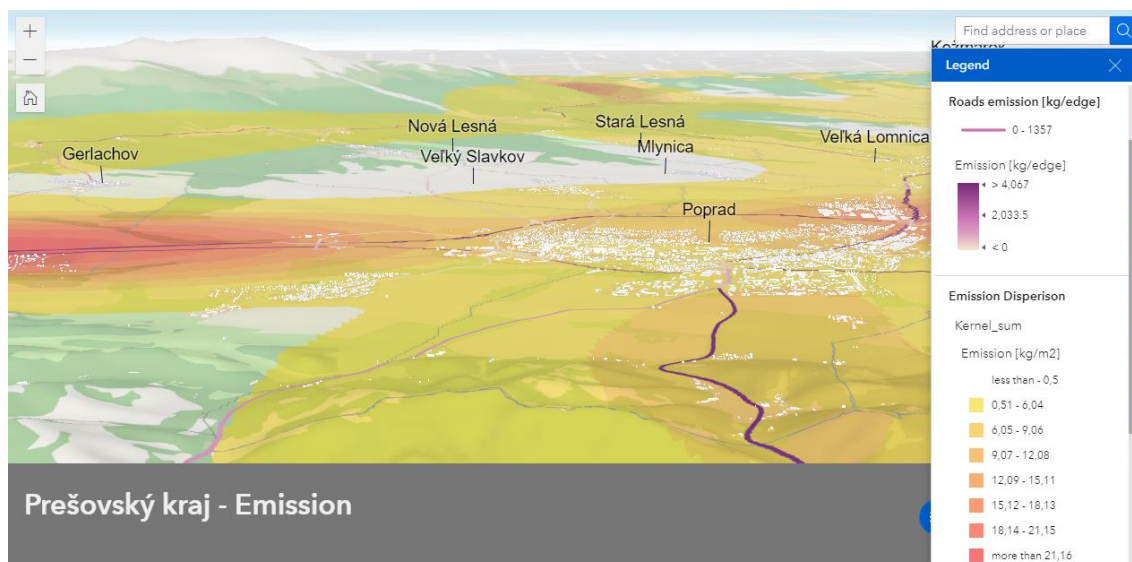
Obrázek 45: Vizualizace celkového množství emisí pomocí metody “Výška buňky nad terénem”.

Metoda popsaná v této sekci předává informaci o celkové disperzi emisí prostřednictvím výšky buňky nad terénem. Kromě výšky je hodnota zobrazena také pomocí barvy s využitím sekvenční stupnice. Výhodou této metody je, že pokud mají buňky stejnou barvu (a tedy i podobné hodnoty jevu), rozdíl hodnot je možné rozlišit výškou sloupce. Naopak nevýhodou je grafická náročnost metody. Jak už bylo zmíněno, vizualizace pro celý Prešovský kraj v tomto rozlišení není možná. Další nevýhodou je pak zakrytí území vrstvou buněk. Tuto nevýhodu je možné eliminovat opakovaným vypínáním a zapínáním viditelnosti vrstvy, případně nastavení vyšší průhlednosti. Obě zmíněné funkce umožňuje vytvořená webová aplikace.

## 6.4 Vizualizace výsledků kombinací zobrazovacích metod

Předchozí dvě podkapitoly se věnovaly popisu zobrazovacích metod, které byly vhodné pro zobrazení emisního, nebo disperzního modelování. Oba tyto jevy je také možné zobrazit najednou, a právě tomu se krátce věnuje tato podkapitola.

Jednou z možných kombinací je vizualizace emisního modelování pomocí barvy linie ve spojení s disperzním modelováním, kde je hodnota jevu vyjádřena zbarvením buňky. Podobná vizualizace je využita i v aplikaci *Breezometer* [38] (viz sekce 2.1.1 a 2.2.1). Barevné stupnice u obou metod však musí být značně kontrastní, aby byly vrstvy rozeznatelné. Tvorba vizualizace probíhá postupem popsaným v předchozích podkapitolách. Případ užití, pro který je kombinovaná metoda využita, je zobrazení celkového množství emisí (viz kapitola 6.1). Výsledek je také možné zobrazit na podkladu topografického modelu a podpořit tak lepší orientaci v prostoru. Výsledná vizualizace je zobrazena na následujícím obrázku 46. V rámci práce byla také vytvořena interaktivní webová aplikace dostupná na odkazu <https://shorturl.at/ilwOZ>.



Obrázek 46: Vizualizace celkových emisí kombinovanou metódou na podkladu topografického 3D modelu.

## 7 Diskuze

V rámci práce byl nejprve proveden základní výpočet emisí zapříčiněných dopravní intenzitou a následně byly dosažené výsledky prezentovány prostřednictvím webových interaktivních vizualizací. Tato kapitola se věnuje popisu omezení i dalších možných rozšíření, na které autor při vypracování narazil. Diskuze tak může sloužit jako startovní bod pro případný navazující výzkum.

### 7.1 Zpřesnění výpočtu

Jak bylo již zmíněno v kapitole 5, pro výpočet emisí byl na základě provedené rešerše navržen naivní algoritmus, jehož výhodou je možnost provedení celého výpočtu v rámci prostředí GIS. Naivita navrženého algoritmu spočívá primárně v linearitě výpočtu a v datech, která byla pro výpočet využita. Na základě dosažených výsledků tedy není vhodné provádět realistické analýzy o kvalitě ovzduší v zájmovém území. V případě potřeby skutečných analýz je však pro modelování emisí možné využít celou řadu komplexnějších nástrojů, umožňujících podrobnější modelování vstupních parametrů. Některé z nich se věnují pouze mikroskopickému modelování emisí, a z toho důvodu by je pro zájmové území v této práci nebylo možné použít. Zároveň by bylo nutné získat mnohem více dat, která by do nástrojů vstupovala. Celá práce, od výpočtu až po vizualizaci, probíhala prostřednictvím GIS softwaru a v případě využití jiných nástrojů, by v budoucnu musela být vyřešena jejich datová interoperabilita.

Také pro výpočet šíření emisí do okolí by v dalším postupu mohlo být využito nástrojů umožňujících detailnější výpočty. V rámci práce je disperze počítaná pouze dvourozměrně, a výsledné hodnoty emisí jsou uváděny na jednotku plochy [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ]. U většiny aplikací a studií s podobným zaměřením je pro disperzi emisí využito komplexnějších modelů, na jejichž výstupu jsou hodnoty v jednotkách objemových [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]. Pro využití těchto nástrojů by bylo nutné získat více vstupních parametrů, jako například meteorologické vlastnosti v okolí. I s těmito parametry by však nemuselo být možné nástroje využít. Hlavním důvodem je opět velikost zájmového území, pro které by byla úloha výpočtu disperze emisí výpočetně složitá. Poznámka: problematice modelování proudění látek se autor věnoval podrobněji. Kromě rešerše provedené v sekci 1.2.4, je část rešerše obsažena v příloze (viz příloha A – Rešerše CFD modelování).

V případě dalšího postupu práce by bylo možné podrobněji vypočítat výškovou členitost jednotlivých silničních úseků, která ovlivňuje celkové množství výsledných emisí. V práci bylo uvažováno, že se zvyšujícím se stoupáním silnice roste spotřeba paliva, a tím tedy i množství produkovaných emisí. Do výpočtu by bylo také možné zahrnout informaci o snížení spotřeby paliva při klesání silnice. Takovou informaci se však v literatuře nepodařilo dohledat.

## 7.2 Vizualizace

Všechny výše zmíněné vizualizace byly v práci vytvářeny prostřednictvím desktopového softwaru AGP. Klíčovou vlastností těchto vizualizací je interaktivita, bez níž by nebylo možné výsledky plně prezentovat. Interaktivita je přirozeně zajištěna ve zmiňovaném desktopovém softwaru, který však vyžaduje instalaci a zároveň komerční licenci. Z tohoto důvodu byly všechny vytvořené vizualizace publikovány do webového prostředí AGOL. V tomto prostředí autor vytvořil webové aplikace, které jsou dostupné přímo z internetového prohlížeče, a výsledky si tak může interaktivně prohlédnout kdokoliv.

Tvorba webových aplikací probíhala prostřednictvím nástroje ArcGIS Experience Builder, který umožňuje rychlé vytváření aplikací bez nutnosti programování. Autor však při vytváření webových aplikací narazil na řadu nedostatků (viz podkapitola 6), kvůli kterým nebylo možné plnohodnotné vizualizace, vytvořené v desktopové aplikaci, převést na web. V případě dalšího postupu by bylo možné vytvořit aplikace vlastní a zmiňované nedostatky eliminovat. Případně vytvořit pouze jednu aplikaci, v rámci které by bylo možné jednotlivé vizualizace měnit.

Vhodnost vytvořených vizualizací pro zvolené případy užití byla posuzována pouze autorem a vedoucím práce. V dalších krocích by bylo vhodné probrat výhody a nevýhody vytvořených vizualizací s odborníkem zabývajícím se analýzou emisí. Dále dotazníkovým šetřením zjistit, jaká z vizualizací je nejvíce srozumitelná uživatelům a hlavně, která z vizualizací umožňuje efektivně vyhodnocovat zobrazené informace, podobně jako bylo řešeno v práci [40]. Takový dotazník by také mohl pomoci při rozhodování o vhodnosti dvourozměrných či trojrozměrných kartografických metod podobně jako v disertační práci *Virtuální 3D mapy z pohledu kartografie* [49].

## Závěr

Výsledkem diplomové práce je základní výpočet emisí zapříčiněných dopravní intenzitou a jejich disperze do okolí pro zájmové území Prešovského kraje nacházejícího se ve Slovenské republice. Dosažené výsledky jsou v práci vizualizovány pomocí různých zobrazovacích metod, které byly vybrány na základě jejich vhodnosti pro předem určené případy užití. Všechny vytvořené vizualizace jsou prezentovány prostřednictvím webových aplikací, které jsou dostupné na následujícím odkazu <https://emissions-dp.glitch.me/>.

Aby bylo možné navrhnout algoritmus výpočtu škodlivých látek, bylo nejprve potřeba provést rešerši, která popisovala různé metody výpočtu emisí zapříčiněných dopravní intenzitou. Právě tomu se věnovala první kapitola. Kromě výpočtu emisí zde byly uvedeny metody, které jsou využívány pro modelování šíření emisí do okolí (disperzi).

Druhá kapitola se věnovala rešerši zobrazovacích metod, které jsou využívány pro zobrazování výsledků emisního a disperzního modelování na mapovém podkladě. Na základě metod popsaných v této kapitole byly vytvořeny vizualizace, pomocí kterých jsou prezentovány dosažené výsledky.

Třetí kapitola byla věnována doplnění dopravního modelu, který byl využit pro výpočet emisí. Jelikož vstupní dopravní model obsahoval pouze informace o průměrné denní dopravní intenzitě, bylo potřeba intenzitu rozpočítat do hodinových intervalů. Dále zde došlo k rozdělení dopravy podle skladby jednotlivých druhů dopravy a nakonec byla vypočítána výšková členitost jednotlivých dopravních úseků.

Výsledky emisního a disperzního modelování jsou v práci prezentovány na podkladu topografického 3D modelu. Jeho tvorbě se věnovala čtvrtá kapitola. V kapitole je podrobně popsán celý postup tvorby 3D modelu z volně dostupných dat.

Pátá kapitola se věnovala návržení základního algoritmu pro výpočet emisí zapříčiněných dopravní intenzitou. Algoritmus byl navržen na základě provedené rešerše v první kapitole. Kapitola se dále věnovala výpočtu disperze emisí do okolí.

V šesté kapitole autor popisuje vizualizace dosažených výsledků pro předem definované případy užití. Byly zde stručně uvedeny postupy, jimiž autor při tvorbě vizualizací postupoval. V rámci této kapitoly byly pro všechny výsledné vizualizace vytvořeny webové aplikace.

V poslední kapitole jsou diskutovány limity navržených výpočetních a zobrazovacích metod, na které autor při vypracování narazil. Jsou zde také zmíněny návrhy na zlepšení některých částí práce, ke kterým by v případě dalšího postupu mohlo dojít.

## Seznam použité literatury

- [1] Emise z letecké a lodní dopravy: fakta a čísla (infografika). *Evropský parlament* [online]. 2022 [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/headlines/society/20191129STO67756/emise-z-letecke-a-lodni-dopravy-fakta-a-cisla-infografika>
- [2] HOFFMANN, B., S. MOEBUS, A. STANG, et al. Residence close to high traffic and prevalence of coronary heart disease. *European Heart Journal* [online]. 2006, 27(22), 2696-2702 [cit. 2023-02-02]. ISSN 0195-668X. Dostupné z: doi:10.1093/eurheartj/ehl278
- [3] Health impacts of air pollution in Europe, 2022. *European Environment Agency* [online]. 22.10.2022 [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution>
- [4] TSANAKAS, Nikolaos. Emission estimation based on traffic models and measurements [online]. LiU Tryck, Linköping, Sweden 2019, 2019 [cit. 2022-12-04]. ISBN 978-91-7685-092-3. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1299107/FULLTEXT01.pdf>
- [5] HANŽL, Jaromír. *Mapa prachových zátěží silniční dopravy v závislosti na prostředí*. České Budějovice, 2013. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích [cit. 2022-12-04].
- [6] SHARMILAA, G. a T. ILANGO. Vehicular air pollution based on traffic density - A case study. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, 52(3), 532-536 [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.278>.
- [7] FALLAHSORSHANI, Masoud, Michel ANDRÉ, Céline BONHOMME a Christian SEIGNEUR. Coupling Traffic, Pollutant Emission, Air and Water Quality Models: Technical Review and Perspectives. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* [online]. 2012, 1794-1804 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1154>
- [8] Health impacts of air pollution in Europe, 2022. *European Environment Agency* [online]. 22.10.2022 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution>
- [9] ESTEVES-BOOTH, A, T. MUNEER, J. KUBIE a H. KIRBY. A review of vehicular emission models and driving cycles. *Proceedings of the Institution of Mechanical*



- Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* [online]. 2002, 777-797 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: doi:10.1243/09544060260171429
- [10] United States Environmental Protection Agency. *Description and History of the MOBILE Highway Vehicle Emission Factor Model* [online]. 2022 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/moves/description-and-history-mobile-highway-vehicle-emission-factor-model>
- [11] VENKATRAM, Akula. A critique of empirical emission factor models: a case study of the AP-42 model for estimating PM10 emissions from paved roads. *Atmospheric Environment* [online]. 2000, 34(1), 1-11 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00330-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00330-1)
- [12] SINGH, Rakesh a James SLOAN. A high-resolution NOx emission factor model for North American motor vehicles. *Atmospheric Environment* [online]. 2006, 40(27), 5214-5223 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.04.012>
- [13] ILIĆ, Ivana, Milovan VUKOVIĆ, Nada ŠTRBAC a Sbežena UROŠEVIĆ. Applying GIS to Control Transportation Air Pollutants. *Polish Journal of Environmental Studies* [online]. 2014, 2014, 23(5), 1849-1860 [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: <http://www.pjoes.com/pdf-89379-23236?filename=Applying%20GIS%20to%20Control.pdf>
- [14] BUSH, Tony, K. KING, N. PASSANT a I. TSAGATAKIS. NAEI UK Emission Mapping Methodology. *National Atmospheric Emissions Inventory* [online]. 2005, (1) [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: [https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat07/0803111358\\_NAEIMappingMethodReport2005-v3\\_issue1.pdf](https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat07/0803111358_NAEIMappingMethodReport2005-v3_issue1.pdf)
- [15] ACHOUR, H., J.G. CARTON a A.G. OLABI. Estimating vehicle emissions from road transport, case study: Dublin City. *Applied Energy* [online]. 2011, 88(5), 1957-1964 [cit. 2023-01-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.032>
- [16] RYU, Byoung, Hee JUNG a Sang BAE. Development of a corrected average speed model for calculating carbon dioxide emissions per link unit on urban roads. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2015, 34(1), 245-254 [cit. 2023-01-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.012>
- [17] Copert: The industry standard emissions calculator. *Emisia* [online]. EMISIA.COM, 2022 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://www.emisia.com/utilities/copert/>

- [18] SCORA, George a Matthew BARTH. COMPREHENSIVE MODAL EMISSIONS MODEL: User's Guide. [online]. University of California, Riverside Center for Environmental Research and Technology [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: [https://www.cert.ucr.edu/sites/default/files/2019-07/CMEM\\_User\\_Guide\\_v3.01d.pdf](https://www.cert.ucr.edu/sites/default/files/2019-07/CMEM_User_Guide_v3.01d.pdf)
- [19] SHIFTER, I., L. DÍAZ, V. MÚGICA a E. LÓPEZ-SALINAS. Fuel-based motor vehicle emission inventory for the metropolitan area of Mexico city. *Atmospheric environment* [online]. 2005, 39(5), 931-940 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231004010210>
- [20] FRANCO, Vicente, Georgios FONTARAS a Pangioti DILARA. Towards Improved Vehicle Emissions Estimation in Europe. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* [online]. 2012, 48(1), 1304-1313 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1106>
- [21] WANGA, Yi, W.Y. SZETO, Ke HAND a Terry L. FRIESZ. Dynamic traffic assignment: A review of the methodological advances for environmentally sustainable road transportation applications. *Transportation Research Part B: Methodological* [online]. 2018, 111(1), 370-394 [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.03.011>
- [22] SMIT, Robin, Rivhard SMOKERS a Elke RABÉ. A new modelling approach for road traffic emissions: VERSIT+. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2007, 12(6), 414-422 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.05.001>
- [23] PANIS, Luc Int, I De VLIÉGER, L PELKMANS a L SCHROOTEN. Effect of speed reduction on emissions of heavy duty lorries. *Highway and Urban Environment* [online]. 2007, 53-61 [cit. 2023-02-15]. Alliance For Global Sustainability Bookseries. ISBN 978-1-4020-6009-0. Dostupné z: [doi:10.1007/978-1-4020-6010-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6010-6_6)
- [24] BUČÁNEK, Antonín. *Modelování transportu a šíření znečištění v atmosféře pomocí gaussovských disperzních modelů*. Praha, 2007. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze [cit. 2023-02-15].
- [25] HOLMES, N.S. a L. MORAWSKA. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. *Atmospheric Environment* [online]. 2006, 40(30), 5902-5928 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.003>

- [26] MENSINK, C., A. COLLES, L. JANSSEN a J. CORNELIS. Integrated air quality modelling for the assessment of air quality in streets against the council directives. *Atmospheric Environment* [online]. 2003, 37(37), 5177-5184 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.07.014>
- [27] JOHNSON, Joel. An Introduction to Atmospheric Pollutant Dispersion Modelling. *Environmental Sciences Proceedings* [online]. 2022, 19(1) [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ecas2022-12826>
- [28] YANG, D., S. ZHANG, T. NIU, Y. WANG, H XU, K. Max ZHANG a Y. YE WU. High-resolution mapping of vehicle emissions of atmospheric pollutants based on large-scale, real-world traffic datasets. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online]. 2019, 19(1), 8831-8843 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/b0cf/6609068659fba34b3fe22632b9a1586dcd3c.pdf>
- [29] OETTL, Dietmar, Peter Johann STURM, Gerhard PRETTERHOFER, Michael BACHER, Johannes RODLER a Raimund Alfons ALMBAUER. *Lagrangian Dispersion Modeling of Vehicular Emissions from a Highway in Complex Terrain* [online]. 2012, 53(10), 1233-1240 [cit. 2023-02-21]. ISSN 1096-2247. Dostupné z: [doi:10.1080/10473289.2003.10466286](https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466286)
- [30] FABBI, S., S. ASSARO, A BIGI, S. TEGGI a G. GHERMANDI. Impact of vehicular emissions in an urban area of the Po valley by microscale simulation with the GRAL dispersion model. *Earth and Environmental Science* [online]. 2019, 296(1) [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/296/1/012006/pdf>
- [31] RIVAS, Esther, Jose Luis SANTIAGO, Yolanda LECHÓN, Fernando MARTÍN, Arturo ARIÑO, Juan José PONS a Jesús Miguel SANTAMARÍA. CFD modelling of air quality in Pamplona City (Spain): Assessment, stations spatial representativeness and health impacts valuation. *Science of The Total Environment* [online]. 2019, 649(1), 1362-1380 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.315>
- [32] ArcGIS Marketplace: Airflow Analyst. *Esri* [online]. 2021 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.esri.com/en-us/arcgis-marketplace/listing/products/06effa0bee204361a28bc00d5258dae3>
- [33] Webel od, 2018, *Intro to Kernel Density Estimation*, YouTube video [cit. 2023-01-19]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=x5zLaWT5KPs>

- [34] EGELRUD, Daniel. *Kernel density estimators as a tool for atmospheric dispersion models*. 2021. Master thesis. Umeå University [cit. 2023-19-01].
- [35] ANDRŠ, Tomáš. *Metody zobrazení časoprostorových jevů na příkladu agroklimatických faktorů*. Plzeň, 2021. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2023-03-01].
- [36] *TraMod Plzeň* [online]. Plzeň, 2021 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://plzen.trafficmodeller.com/>
- [37] Watch 24 Hours of Traffic, Visualized as a Living Circulatory System: Hourly Traffic on the US Interstate, Visualized as a Living Circulatory System. *Metrocosm* [online]. 2016 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://metrocosm.com/map-us-traffic/>
- [38] *BreezoMeter* [online]. BreezoMeter, 2022 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://www.breezometer.com/air-quality-map/air-quality/slovakia/poprad>
- [39] ZALAKEVICIUTE, Rasa, Adrian BUENAÑO, David SANNINO a Yves RYBARCZYK. Urban Air Pollution Mapping and Traffic Intensity: Active Transport Application. *Air Pollution - Monitoring, Quantification and Removal of Gases and Particles* [online]. IntechOpen, 2019 [cit. 2023-03-01]. ISBN 978-1-83880-193-9. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.79570
- [40] BERAN, Daniel, Karel JEDLIČKA, Kavisha KUMAR, Stanislav POPELKA a Jantien STOTER. The Third Dimension in Noise Visualization – a Design of New Methods for Continuous Phenomenon Visualization. *The Cartographic Journal* [online]. 2022, 59(1), 1-17 [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: doi:10.1080/00087041.2021.1889450
- [41] LIN, John C., Logan MITCHELL, Erik CROSMAN, et al. CO2 and Carbon Emissions from Cities. *Bulletin of the American Meteorological Society* [online]. 2018, 99(11), 2325-2339 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: doi:10.1175/BAMS-D-17-0037.1
- [42] JOHANSSON, Christer, Michael NORMAN a Lars BURMAN. Road traffic emission factors for heavy metals. *Atmospheric Environment* [online]. 2009, 43(31), 4681-4688 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231008009783>
- [43] MappAir®: Global Air Quality Modelling Suite. *EARTHSENSE* [online]. EarthSense Systems, 2023 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://www.earthsense.co.uk/mappair>

- [44] High-res air pollution map available globally. *Traffic Technology Today* [online]. 2019 [cit. 2023-03-03]. Dostupné z: <https://www.trafficechnologytoday.com/news/emissions-low-emission-zones/high-res-air-pollution-map-available-globally.html>
- [45] London Atmospheric Emissions Inventory. *LONDON DATASTORE* [online]. 2013 [cit. 2023-03-03]. Dostupné z: <https://data.london.gov.uk/dataset/london-atmospheric-emissions-inventory-2013>
- [46] *Parallel: London atmospheric emissions inventory 2013* [online]. © parallel, 2016 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://parallel.co.uk/3D/laei-no2/#14/51.49895/-0.147/39.9/47>
- [47] FANG, Tianfang B. a Yongmei LU. Constructing a Near Real-time Space-time Cube to Depict Urban Ambient Air Pollution Scenario. *Transactions in GIS* [online]. 2011, **15**(5), 635-649 [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: doi:10.1111/j.1467-9671.2011.01283.x
- [48] HROMADA, Jan. *Experimentální vizualizace populační dynamiky* [online]. 2022 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: [https://docs.google.com/document/d/1-qhxX889sXomDEROEtVFSYK1\\_5gbijGTfUM0X5BPAA4/edit#heading=h.crpyaokyskkx](https://docs.google.com/document/d/1-qhxX889sXomDEROEtVFSYK1_5gbijGTfUM0X5BPAA4/edit#heading=h.crpyaokyskkx). Západočeská univerzita v Plzni.
- [49] HÁJEK, Pavel. *Virtuální 3D mapy z pohledu kartografie*. Plzeň, 2018. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2023-03-25].
- [50] BERAN, Daniel. *Analýzy dopravně inženýrských dat v serverovém prostředí*. Plzeň, 2016. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2023-03-25].
- [51] KATTI, B.K., G. JOSHI a Saw KRISHNA. Literature Review of Traffic Assignment: Static and Dynamic. *International Journal of Transportation Engineering* [online]. 2015, 2(4), 339-347 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/287998368\\_Literature\\_Review\\_of\\_Traffic\\_Assignment\\_Static\\_and\\_Dynamic](https://www.researchgate.net/publication/287998368_Literature_Review_of_Traffic_Assignment_Static_and_Dynamic)
- [52] Esri. *ArcGIS Pro*, 3.1.0 [software]. 23. února 2023. [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.arcdata.cz/produkty/arcgis/desktopovy-gis/arcgis-pro>
- [53] ArcGIS Online. *ARCDATA PRAHA* [online]. 2022 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.arcdata.cz/produkty/arcgis/webovy-gis/arcgis-online>
- [54] *Open Transport Map* [online]. © OpenStreetMap contributors, 2015 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://opentransportmap.info/>

- [55] BARTOŠ, Luděk a Jan MARTOLOS. *Stanovení intenzit dopravy na pozemních komunikacích, Technické podmínky, II. vydání*. Plzeň: EDIP, 2012 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: [https://pjpgk.rsd.cz/data/USR\\_001\\_2\\_8\\_TP/TP189.pdf](https://pjpgk.rsd.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP189.pdf)
- [56] Celostátní sčítání dopravy na Slovensku, 2015, Slovenská správa ciest. Dostupné z: <https://www.ssc.sk/> [cit. 2022-05-15].
- [57] *Geoportál - GKÚ* [online]. Bratislava: © 2023 Geodetický a kartografický ústav Bratislava, 2023 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.geoportal.sk/sk/geoportal.html>
- [58] KUDRNA, Jan, Michal VARAUS, František LUXEMBURK, et al. *Technické podmínky 170 Navrhování vozovek pozemních komunikací*. Ministerstvo dopravy České republiky, 2004 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: [https://pjpgk.rsd.cz/data/USR\\_001\\_2\\_8\\_TP/TP\\_170\\_upraveny\\_dotisk.pdf](https://pjpgk.rsd.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_170_upraveny_dotisk.pdf)
- [59] BARTOŠ, Luděk a Jan MARTOLOS. *Technické podmínky 219 Dopravně inženýrská data pro kvantifikaci vlivů automobilové dopravy na životní prostředí*. Plzeň: Ministerstvo dopravy, 2019 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: [https://pjpgk.rsd.cz/data/USR\\_001\\_2\\_8\\_TP/TP\\_219\\_2019.pdf](https://pjpgk.rsd.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_219_2019.pdf)
- [60] *Methodology for Calculating Transport Emissions and Energy Consumption* [online]. Transport Research Laboratory [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/meet.pdf>
- [61] EHSANI, Mehresa, Abbas AHMADI a Dawud FADAI. Modeling of vehicle fuel consumption and carbon dioxide emission in road transport. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, 53, 1638-1648 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115009259>
- [62] Choose global or local. *ArcGIS Online* [online]. Esri [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://doc.arcgis.com/en/arcgis-online/create-maps/choose-global-local-scene.htm>
- [63] OpenStreetMap Data Extracts. *Geofabrik downloads* [online]. 2018 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <http://download.geofabrik.de/>
- [64] Stylesheet. *OpenStreetMap for ArcGIS* [online]. [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://gascuk.github.io/OpenStreetMap-ArcGIS/download/styles/>

- [65] BILJECKI, Filip, Hugo LEDOUX a Jantien STOTER. An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, Environment and Urban Systems* [online]. 2016, 59, 25-37 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.005>
- [66] Working with the ArcGIS Solution for 3D Basemaps. *Esri* [online]. Esri [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.esri.com/training/catalog/6410bcb84d750615175af71d/working-with-the-arcgis-solution-for-3d-basemaps/>
- [67] The Pitch Of Your Roof. *S-Ehrlich* [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.s-ehrich.com/the-pitch-of-your-roof/>
- [68] CO2 emissions from new passenger cars. *European Environment Agency* [online]. EEA, 2022 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <http://co2cars.apps.eea.europa.eu/>
- [69] *Vehicles in use Europe*. ACEA European Automobile Manufacturers' Association, 2022 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.acea.auto/files/ACEA-report-vehicles-in-use-europe-2022.pdf>
- [70] Monitoring of CO2 emissions from heavy-duty vehicles - Regulation (EU) 2018/956. *European Environment Agency* [online]. EEA, 2022 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/c52f7b51-c1cf-43e5-9a66-3eea19f6385a>
- [71] Kernel Density. *Esri: ArcGIS Pro* [online]. Esri [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/kernel-density.htm>
- [72] SILVERMAN, B.W. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis* [online]. 7. New York: Chapman and Hall, 1986 [cit. 2023-04-15]. ISBN 0-412-24620-1. Dostupné z: <https://shorturl.at/bem23>
- [73] ČERBA, Otakar. *Kartodiagramy*. Plzeň, 2011. Prezentace. Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <http://old.gis.zcu.cz/studium/tka/Slides/kartodiagramy.pdf>
- [74] Work with multidimensional mosaic datasets. *Esri: ArcGIS Pro* [online]. Esri [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/imagery/an-overview-of-multidimensional-data-in-a-mosaic-dataset.htm>
- [75] SUMARA, Zdeněk. *Numerická simulace proudění okolo válce za použití metody LES*. České vysoké učení technické v Praze [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://stc.fs.cvut.cz/pdf12/2542.pdf>

- [76] POSPISIL, J. a M. JICHA. CFD modelling of dynamics of pollutants dispersion in city intersection and comparison with measurements. *Air Pollution X* [online]. 2002 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/AIR02/AIR02012FU.pdf>
- [77] ZHENG, Xing a Jiachuan YANG. Impact of moving traffic on pollutant transport in street canyons under perpendicular winds: A CFD analysis using large-eddy simulations. *Sustainable Cities and Society* [online]. 2022, 82 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210670722002335>
- [78] *SimFlow: SimFlow CFD Tutorials* [online]. SimFlow Computational Fluid Dynamics (CFD) Software, 2012 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://help.sim-flow.com/tutorials>



## Příloha A – Rešerše CFD modelování

Modelování proudění látek (CFD) bylo již stručně popsáno v sekci 1.2.4. Autor se při rešerši šíření škodlivin věnoval tomuto druhu modelování ve větší míře. Z důvodu jednotnosti textu je zbytek rešerše uveden v této příloze.

Mezi nejčastěji využívané techniky pro CFD modelování patří přímé numerické simulace (*direct numerical simulation* = DNS), *large-eddy* simulace (LES) a metoda *Reynolds average Navier Stokes* (RANS) [75],[7]. Nejpřesnější metodou je DNS, jelikož je možné modelovat i nejmenší měřítko. Tento druh simulace je však náročný na výpočet. Metoda RANS zjednodušuje výpočet, ale právě díky tomu se již nejedná o simulaci, ale o model proudění. Simulace LES kombinuje výhody obou předchozích metod. Jelikož jsou zde velká měřítka přímo simulována a malá měřítka pouze modelována.

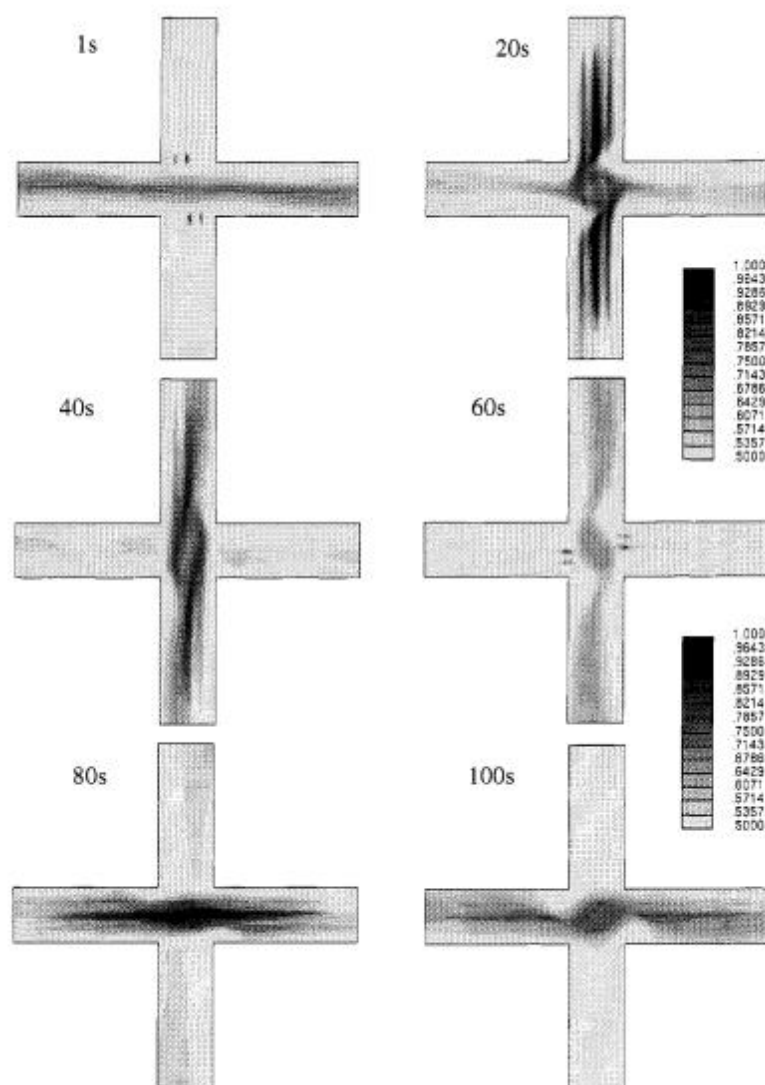
V sekci 1.2.4 byl zmíněn doplněk *Airflow Analyst* [32], který umožňuje simulovat proudění vzduchu v softwaru AGP. Celý proces simulace, od výpočtu až po vizualizaci, probíhá v rámci GIS prostředí. Pro výpočet je využita simulace LES a z důvodu výpočetní složitosti je nutné využít superpočítač.

Také studie *CFD modelling of air quality in Pamplona City (Spain)* [31] zmíněná v sekci 1.2.4, využívá CFD modelování. Pro výpočet je využita metoda RANS. Výpočet je dále obohacen o vstupy z naměřených hodnot na monitorovacích stanicích ve městě.

Dalším zástupcem tohoto druhu modelování je výpočet turbulence vzduchu na testovací křižovatce v Brně [76]. Cílem práce bylo určit rychlost a koncentraci škodlivin na křižovatce obsahující semaforey. Pro výpočet byl využit komerční software, do nějž vstupovaly následující parametry:

- Počet vozidel, která zastavila v jednom směru, a zároveň počet vozidel, která se pohybovala v druhém směru.
- Doba, po kterou byl pruh zastaven kvůli semaforu.
- Dráha, kterou vozidla urazí, než zastaví, nebo se rozjedou na požadovanou rychlost (50km/h).
- Rozložení dopravy.
- Sekvence semaforů.

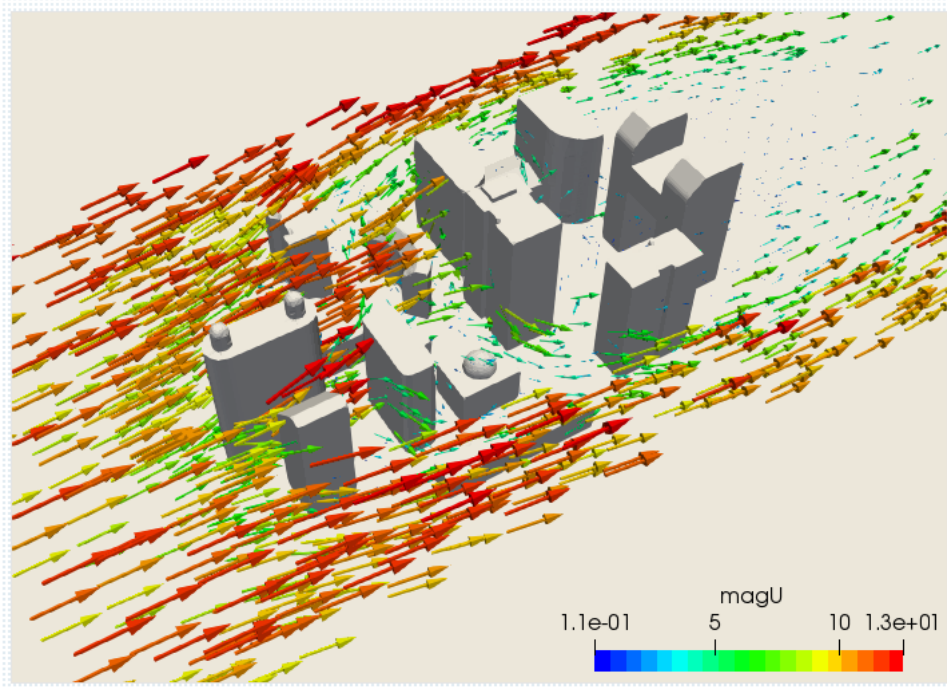
Dosažené výsledky jsou zobrazeny na následujícím obrázku A1.



Obrázek A1: Proudění škodlivin při průjezdu vozidel křižovatkou [76].

CFD modelování bylo využito i v práci sledující dopad vlivu větru a dopravy na šíření škodlivin v uzavřeném silničním kaňonu [77]. Jako silniční kaňon je zde uvažována ulice obklopená budovami o rozměrech 120 x 12 x 12 m (délka kaňonu x šířka x výška). Pro výpočet je využita simulace LES. V práci jsou jednotlivé vlivy na šíření škodlivin rozděleny do tří základních skupin: směr dopravy, hustota dopravy, rychlost větru. Výsledky byly také validovány s měřením ve větrném tunelu. Doprava vstupující do modelu je uvažována jako obousměrná.

Většina výše zmíněných prací využívá pro CFD modelování komerční software. Autor prozkoumal i možné open-source řešení. Nástroj SimFlow [78] disponuje celou řadou zkušebních případů pro CFD modelování. Jedním z nich je i modelování proudění vzduchu kolem budov. Možný výsledek je zobrazen na následujícím obrázku A2.



Obrázek A2: Modelování proudění vzduchu v open-source softwaru SimFlow+ [78].

## Příloha B – Obsah přiloženého CD

- Text práce: Tomas\_Andrs\_DP.pdf
- Skript pro obohacení dopravního modelu a výpočet emisí (ve dvou formátech):
  - emissions.ipynb
  - emissions.py
- Skript pro restrukturalizaci liniové vrstvy do struktury vhodné pro vytvoření časové osy (ve dvou formátech):
  - timeline.ipynb
  - timeline.py
- Výše uvedené skripty jsou zároveň dostupné na odkazu <https://emissions-dp.glitch.me/>.

## Příloha C – Výsledná struktura vypočítaných dat

Tato příloha popisuje strukturu dat u vrstev, které jsou výsledkem výpočtu emisí (viz kapitola 5). V následující tabulce C1 je uvedena struktura atributové tabulky, kterou má výsledná liniová (vektorová) vrstva silnic s vypočítanými emisemi.

Tabulka C1: Struktura atributové tabulky výsledné vrstvy silnic s vypočítanými emisemi.

Název atributu	Datový typ	Poznámka
OBJECTID	Object ID	Unikátní ID silničního úseku (dále jen úsek)
Shape	Geometry	Typ geometrie. Jelikož se jedná o liniovou vrstvu, mají všechny prvky hodnotu Polyline.
inspireid	Long	ID uzlu, do kterého úsek směřuje (originální hodnota z OTM).
sourceid	Long	ID uzlu, ze kterého úsek směřuje (originální hodnota z OTM).
direction	Text	Informace o druhu provozu – obousměrný/jednosměrný (originální hodnota z OTM).
functional	Text	Informace o silniční třídě (originální hodnota z OTM).
capacity	Double	Dopravní kapacita úseku (originální hodnota z OTM).
trafficvol	Double	Dopravní intenzita na úseku – počet vozidel (originální hodnota z OTM).
TrVol_t_0	Double	Dopravní intenzita v čase 0:00 – 1:00.
TrVol_t_1	Double	Dopravní intenzita v čase 1:00 – 2:00.
TrVol_t_2	Double	Dopravní intenzita v čase 2:00 – 3:00.
TrVol_t_3	Double	Dopravní intenzita v čase 3:00 – 4:00.
TrVol_t_4	Double	Dopravní intenzita v čase 4:00 – 5:00.
TrVol_t_5	Double	Dopravní intenzita v čase 5:00 – 6:00.
TrVol_t_6	Double	Dopravní intenzita v čase 6:00 – 7:00.
TrVol_t_7	Double	Dopravní intenzita v čase 7:00 – 8:00.
TrVol_t_8	Double	Dopravní intenzita v čase 8:00 – 9:00.
TrVol_t_9	Double	Dopravní intenzita v čase 9:00 – 10:00.
TrVol_t_10	Double	Dopravní intenzita v čase 10:00 – 11:00.
TrVol_t_11	Double	Dopravní intenzita v čase 11:00 – 12:00.
TrVol_t_12	Double	Dopravní intenzita v čase 12:00 – 13:00.

Název atributu	Datový typ	Poznámka
TrVol_t_13	Double	Dopravní intenzita v čase 13:00 – 14:00.
TrVol_t_14	Double	Dopravní intenzita v čase 14:00 – 15:00.
TrVol_t_15	Double	Dopravní intenzita v čase 15:00 – 16:00.
TrVol_t_16	Double	Dopravní intenzita v čase 16:00 – 17:00.
TrVol_t_17	Double	Dopravní intenzita v čase 17:00 – 18:00.
TrVol_t_18	Double	Dopravní intenzita v čase 18:00 – 19:00.
TrVol_t_19	Double	Dopravní intenzita v čase 19:00 – 20:00.
TrVol_t_20	Double	Dopravní intenzita v čase 20:00 – 21:00.
TrVol_t_21	Double	Dopravní intenzita v čase 21:00 – 22:00.
TrVol_t_22	Double	Dopravní intenzita v čase 22:00 – 23:00.
TrVol_t_23	Double	Dopravní intenzita v čase 23:00 – 24:00.
TrVol_Cars	Double	Počet osobních vozidel na úseku.
TrVol_LiTr	Double	Počet lehkých nákladních vozů na úseku.
TrVol_HeTr	Double	Počet těžkých nákladních vozů na úseku.
TrVol_Bus	Double	Počet autobusů na úseku.
gradient	Double	Průměrný gradient úseku.
emis_Cars	Double	Výsledné množství emisí (CO <sub>2</sub> ) způsobených osobními vozidly [kg].
emis_LiTr	Double	Výsledné množství emisí (CO <sub>2</sub> ) způsobených lehkými nákladními vozy [kg].
emis_HeTr	Double	Výsledné množství emisí (CO <sub>2</sub> ) způsobených těžkými nákladními vozy [kg].
emis_Bus	Double	Výsledné množství emisí (CO <sub>2</sub> ) způsobených autobusy [kg].
emis_total	Double	Celkové množství emisí (CO <sub>2</sub> ) na úseku [kg].
Shape_Leng	Double	Délka úseku (automaticky vypočítaná hodnota).

V následující tabulce C2 je uvedena struktura rastrové vrstvy, která je výsledkem disperzního modelování. Již v podkapitole 5.2 bylo zmíněno, že atribut, podle kterého se šíření emisí počítá, se liší pro různé zobrazovací metody. V tabulce je uvedena struktura rastru vyjadřujícího šíření

emisí od všech druhů vozidel (byl využit atribut emis\_total - viz tabulka C1). Velikost buňky je zvolena na 50 metrů.

Tabulka C2: Struktura rastrové vrstvy vyjadřující celkové množství emisí.

Vlastnost	Hodnota
Počet řádků	1563
Počet sloupců	3717
Velikost buňky ve směru X	50 m
Velikost buňky ve směru Y	50 m
Komprese	Žádná
Hodnota buňky	Množství emisí [kg/m <sup>2</sup> ]
Minimální hodnota	0
Maximální hodnota	24,18