

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

### Modelování a simulace

## Šíření emisí v atmosféře

3. prosince 2022

Simona Češková (xcesko00)  
Zuzana Kopčilová (xkopci02)

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
1.1	Autoři a zdroje informací . . . . .	2
1.2	Ověřování validity modelu . . . . .	2
1.3	Základní předpoklady . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Rozbor tématu a použitých metod/technologií</b>	<b>3</b>
2.1	Použité postupy . . . . .	3
2.2	Fakta a vztahy využitě k sestavení matematického modelu . . . . .	3
2.2.1	Dopravou způsobené znečištění ovzduší . . . . .	3
2.2.2	Motorová vozidla . . . . .	3
2.2.3	Evropské emisní standardy pro motorová vozidla . . . . .	3
2.2.4	Nevýfukové emise (non-exhaust emissions) . . . . .	4
2.2.5	Závislost množství produkovaných látek na hmotnosti vozidla . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Koncepce</b>	<b>6</b>
3.1	Způsob vyjádření konceptuálního modelu . . . . .	6
3.2	Formy konceptuálního modelu . . . . .	6
3.2.1	Gaussova disperze . . . . .	6
3.2.2	Koeficient škodlivosti látek . . . . .	6
3.3	Referenční rovnice . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Architektura simulačního modelu a simulátoru</b>	<b>7</b>
4.1	Mapování abstraktního modelu do simulačního . . . . .	7
4.1.1	Překlad a spuštění . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Podstata simulačních experimentů a jejich průběh</b>	<b>8</b>
5.1	Postup experimentování . . . . .	8
5.2	Jednotlivé experimenty . . . . .	8
5.2.1	Referenční scénář - kombinované emise . . . . .	8
5.2.2	Zvýšené zastoupení elektromobilů - kombinované emise . . . . .	9
5.2.3	Snížení průměrné hmotnosti vozidel - kombinované emise . . . . .	9
5.3	Závěry experimentů . . . . .	10
<b>6</b>	<b>Shrnutí simulačních experimentů a závěr</b>	<b>10</b>

# 1 Úvod

Emise jsou slovem naprosto klíčovým pro 21. století. Ve zkratce se jedná o škodlivé látky vypouštěné lidstvem a jeho výtvořou do atmosféry.

Tato simulační studie se zabývá silniční dopravou způsobenými emisemi a jejich šířením. Velmi aktuálním a pro studii podstatným tématem je tedy problematika elektromobility a snaha redukovat jejím využitím množství každoročně produkovaných splodin.

Pro elektromobilitu hraje celá řada argumentů, ale v neposlední řadě také jistá touha po inovacích, které jsou pro vývoj společnosti z historického hlediska naprosto nezbytné. Nabízí se zde příklad průmyslové revoluce, či aktuálního konceptu průmyslu 4.0.

Pro technologické převraty je však klíčové jejich přijetí. Nové technologie tedy musí být jednoznačně výhodné, ale zároveň nesmí jejich adopce uživatele/konzumenta příliš omezit. Zde naráží elektromobilita na svůj obrazný kámen úrazu – přechod na ni zahrnuje jistý diskomfort spojený například s dobíjením baterií vozu. Zůstává-li zároveň její celková výhodnost diskutabilní, stává se její plošná adopce velmi náročnou záležitostí.

Vzhledem k vysokému počtu motorových vozidel registrovaných nejen v Česku, ale i v celé Evropě, kde již dosahuje 278 milionů, nelze zanedbat jejich negativní dopady na ovzduší – automobilová doprava je na evropském území původcem 39 % emisí oxidů dusíku a 10 % vypouštěných pevných částic. [2] [1]

## 1.1 Autoři a zdroje informací

Autory této studie jsou: Simona Češková a Zuzana Kopčilová.

Informace zde uvedené pochází z odborné literatury, článků a diplomových prací. Jsou zkodumentované citacemi, tzv. je k nim přiřazeno číslo ze seznamu citací, který lze naléznout na konci studie.

## 1.2 Ověřování validity modelu

Tato studie i její implementace vychází pouze ze skutečných dat a poznatků, které jsou vždy zdůvodněny a řádně ocitovány.

## 1.3 Základní předpoklady

Hlavním zaměřením této práce je složení aut účastnících se provozu na silnicích a jejich vliv na ovzduší.

Na českých cestách převažují vozidla s naftovými spalovacími motory (52,5 %), následují pak vozidla s benzínovými spalovacími motory (44,4 %), a zbylou část vozového parku (3,1 %) tvoří vozidla s hybridním pohonným systémem a elektromobily.

Předpokládá se, že změnou tohoto složení dojde i ke změnám v produkci emisí. [3]

## 2 Rozbor tématu a použitých metod/technologií

### 2.1 Použité postupy

Výstupem všech experimentů této práce je pole dat, které se mění v závislosti na čase, proto byl využit celulární automat. Program pro výpočet dat je napsán v jazyce C++.

Výsledná data byla pro názornost vizualizována pomocí nástroje Excel.

### 2.2 Fakta a vztahy využitě k sestavení matematického modelu

#### 2.2.1 Dopravou způsobené znečištění ovzduší

Látky, které znečišťují atmosféru se nazývají emise a dělí se podle původu vzniku na přírodní a způsobené člověkem. Tato práce se zaměřuje pouze na příčiny vzniku škodlivin způsobených člověkem. [19]

Nejčastější látky znečišťující ovzduší jsou: [6]

- Oxid siřičitý ( $SO_2$ ) - vzniká jako vedlejší produkt při spalování méně kvalitního hnědého uhlí a také při spalování méně kvalitních benzínů, nebo nafty [16]
- Ozón ( $O_3$ ) - patří mezi skleníkové plyny
- Oxid dusičitý ( $NO_2$ ) - vzniká při spalování fosilních paliv za vysokých teplot (doprava, chemický průmysl) [7]
- Částice ( $PM_{10}$  a  $PM_{2,5}$ ) - vznikají během spalování v energetice, vytápění a dopravy [18]
- Oxid uhelnatý ( $CO$ ) - vznikne při hoření jakéhokoliv paliva [21]

#### 2.2.2 Motorová vozidla

Tři hlavní škodliviny produkované motorovými vozidly jsou: oxid dusičitý ( $NO_2$ ), částice ( $PM_{10}$  a  $PM_{2,5}$ ) a oxid uhelnatý ( $CO$ ). Tyto látky dohromady spadají pod pojem skleníkové plyny. [4] Skleníkové plyny dokáží pohltit teplo ve formě infračerveného (tepelného) záření, přičemž toto teplo pak zůstává v atmosféře, namísto toho, aby z ní unikalo pryč. [15]

To z nich spolu s důsledky vytápění domácností zemním plynem a topnými oleji, výrobou elektrické energie v tepelných elektrárnách a výpary z chemických továren dělá jednu z největších příčin znečištění ovzduší. [4]

#### 2.2.3 Evropské emisní standardy pro motorová vozidla

Emisní norma Euro stanovuje limity pro vypouštění emisí z benzínových a naftových vozidel. Tato norma se měří jako závislost hmotnosti emisí na ujetou vzdálenost. Podle normy Euro 6, která je platná od roku 2014 nesmí vozidla překračovat hranice dané v tabulce:

CO (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	HC (g/km)	HC + NO <sub>x</sub> (g/km)	PM (g/km)	PN (x/km)
1,00	0,06	0,10	-	0,0045	$6,0 \times 10^{11}$

Tabulka 1: Limity pro benzínové motory

CO (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	THC (g/km)	NMHC (g/km)	HC + NO <sub>x</sub> (g/km)	PM (g/km)	PN (x/km)
0,50	0,1	0,068	0,08	0,17	0,0045	$6,0 \times 10^{11}$

Tabulka 2: Limity pro naftové motory

*CO* - hmotnost oxidu uhelnatého, *THC* - celková hmotnost uhlovodíků, *NMHC* - hmotnost nemethanových uhlovodíků, *NO<sub>x</sub>* - hmotnost oxidů dusíku, *HC + NO<sub>x</sub>* - součet hmotností uhlovodíků a oxidů dusíku, *PM* - hmotnost pevných částic, *PN* - počet částic [17]

#### 2.2.4 Nevýfukové emise (non-exhaust emissions)

Zdrojem pevných částic jsou kromě spalovacích motorů také další, méně regulované součásti vozidel (pneumatiky, brzdová soustava) i samotná vozovka a sekundární prašnost částic na ní již usazených. Tento druh emisí závisí podle dostupných zdrojů převážně na rychlosti, kterou se vozidlo běžně pohybuje, a na hmotnosti tohoto vozidla.

Pevné částice jsou z hlediska zdravotní závadnosti rozdělovány do kategorií podle jejich průměru [18]. V této studii se budeme setkávat s následujícími dvěma kategoriemi:

- PM<sub>10</sub> – částice menší než 10 μm
- PM<sub>2,5</sub> – částice menší než 2,5 μm

V tabulkách č.3 a č.4 jsou uvedeny průměrné hodnoty částicových emisí produkovaných zdroji, které jsou v rámci studie dále uvažovány.

Množství pevných částic produkované brzdovou soustavou elektrických vozidel bylo odvozeno na základě hodnot pro vozidla se spalovacími motory a faktu, že brzdy elektromobilů mají proti těm instalovaným na tradičně poháněných vozidlech až čtyřnásobnou životnost (lze tedy předpokládat jejich čtvrtinové využití).[8]

Typ pohonu	Výfuk	Pneumatiky	Brzdy	Vozovka	Sekundární prašnost	Celkem
Elektrický	0	7,2	2,325	8,9	49,6	68,025
Zážehový motor (benzín)	3,1	6,1	9,3	7,5	40	66
Vznětový motor (nafta)	2,4	6,1	9,3	7,5	40	65,3

Tabulka 3: Emise částic PM<sub>10</sub> [ $\frac{\text{mg}}{\text{km}}$ ] [14]

Typ pohonu	Výfuk	Pneumatiky	Brzdy	Vozovka	Sekundární prašnost	Celkem
Elektrický	0	3,7	0,55	3,8	14,9	22,95
Zážehový motor (benzín)	3,0	2,9	2,2	3,1	12,0	23,2
Vznětový motor (nafta)	2,4	2,9	2,2	3,1	12,0	22,6

Tabulka 4: Emise částic PM<sub>2,5</sub> [ $\frac{\text{mg}}{\text{km}}$ ] [14]

Zvýšená produkce emisí pneumatikami a vozovkou v případě elektromobilů je dána jejich vyšší průměrnou hmotností (důvodem je hmotnost baterií - u populární Tesly se jedná průměrně o 545 kg [11], zatímco hmotnost průměrného čtyřválcového motoru se pohybuje kolem 130 kg [5]). Srovnání hmotností různých pohonů na téže platformě je uvedeno v tabulce č.5.

Vyšší hmotnost elektřinou poháněných vozidel je však vyvažována menší potřebou využívání klasických hydraulických brzd díky tzv. regenerativnímu brždění. Zde je však nutno poznamenat, že ani množství splodin emitované brzdovými destičkami tradičně poháněných vozidel není pevně dané, a záleží na způsobu ovládání vozidla.

Model vozidla	Hmotnost ICEV varianty	Hmotnost EV varianty	Rozdíl (%)
Ford Focus	1500	1719	+14,6
Volkswagen Up	1004	1289	+28,3
Kia soul	1306	1617	+23,8

Pozn.: ICEV = Internal Combustion Engine Vehicle – Vozidlo se spalovacím motorem

Tabulka 5: Hmotnosti ICEV a EV variant téhož modelu [kg] [14]

### 2.2.5 Závislost množství produkovaných látek na hmotnosti vozidla

Pro emise oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ) byla nalezena prakticky lineární korelace s hmotností vozidla.[13]

Pro emise pevných částic platí, že zvýšením hmotnosti o 280 kg dojde ke zvýšení množství  $\text{PM}_{2.5}$  o 2 mg/km. Pro  $\text{PM}_{10}$  se pak jedná o zvýšení o 3,6 mg/km. V experimentech je tato hodnota uváděna kumulativně. [14]

### 3 Koncepce

#### 3.1 Způsob vyjádření konceptuálního modelu

Konceptuální model byl formulován na základě rovnic Gaussovy atmosférické disperze, přičemž vstupní hodnoty vychází z poznatků uvedených v předchozí kapitole.

#### 3.2 Formy konceptuálního modelu

##### 3.2.1 Gaussova disperze

Vztah pro výpočet koncentrace emisí v určité vzdálenosti od linového zdroje (např. vozovky). [10][20] Vzorec byl upraven pro výpočet emisí ze 100 metrů dlouhého úseku cesty, výsledkem je tedy koncentrace na obdobném 100 metrů dlouhém úseku v dané vzdálenosti.

- $Q$  ... emise  $\left[\frac{\text{mg}}{100 \text{ m} * \text{h}}\right]$
- $\sigma_z$  ... koeficient vertikální disperze [m]
- $u$  ... rychlost větru (vane kolmo ke směru vozovky)  $\left[\frac{\text{m}}{\text{h}}\right]$
- $\rho$  ... hustota dopravy na úseku  $\left[\frac{1}{100 \text{ m} * \text{h}}\right]$
- $MX$  ... vyprodukované množství škodlivých látek [mg]
- $C$  ... koncentrace emisí v dané vzdálenosti (po směru větru) od cesty  $\left[\frac{\text{mg}}{100 \text{ m}_3}\right]$

$$C = \frac{2 * Q}{\sqrt{2\pi} * \sigma_z * u}$$

$$Q = \rho * MX$$

##### 3.2.2 Koeficient škodlivosti látek

Pro experimenty uvažující kombinované emise uvažuje studie míru škodlivosti v závislosti na poměru mortality připisované zkoumaným látkám [12]. Tento poměr je reprezentován koeficientem (5,04), kterým se násobí množství produkovaných pevných částic, aby se zvýšilo úměrně škodlivosti  $\text{NO}_x$ , která v tomto případě bude mít referenční škodlivost 1.

#### 3.3 Referenční rovnice

Každý experiment vychází z této rovnice do které se dosazují informace podle požadovaného výsledku. Každý experiment se skládá ze tří částí. První část ukazuje, jaké množství pevných částic  $\text{PM}_{10}$  a  $\text{PM}_{2,5}$  bylo vyprodukováno. Výsledek druhé části je množství vyprodukovaného  $\text{CO}_2$ . Díky třetí části lze zjistit úroveň škodlivosti podle vyprodukovaného množství obou těchto látek. Míra škodlivosti je závislá na koeficientu úmrtnosti. [10]

$$MX \left[ \frac{\text{mg}}{\text{km}} \right] = \left( \text{produkce}_E \left[ \frac{\text{mg}}{\text{km}} \right] * \text{PZE} + \text{produkce}_B \left[ \frac{\text{mg}}{\text{km}} \right] * \text{PZB} + \text{produkce}_N \left[ \frac{\text{mg}}{\text{km}} \right] * \text{PZN} \right) * \text{úsek} [\text{km}]$$

- produkce... hmotnost emisí produkovaných daným typem motoru v závislosti na ujeté vzdálenosti
- $E$  ... elektromotory
- $B$  ... benzinové motory

- N ... naftové motory
- PZE ... procento zastoupení elektromotorů
- PZB ... procento zastoupení benzínových motorů
- PZN ... procento zastoupení naftových motorů
- MX ... celkové vyprodukované množství látky X
- X ...  $PM_{10}$  a  $PM_{2,5}$ ,  $NO_x$

## 4 Architektura simulačního modelu a simulátoru

Hlavním aspektem programu studie jsou výpočty podle matematických vzorců, proto se zde nehodí uplatnit objektové programování. Dále nejsou použity další dodatečné knihovny (např. symlib).

### 4.1 Mapování abstraktního modelu do simulačního

Program se skládá ze tří funkcí. Hlavní funkce `main()` inicializuje všechna pole pro ukládání výsledků a uvede je do počátečního stavu. Zavolá funkci `emissionCalculate()` s parametrem, podle toho o jakou část tří hlavních experimentů se jedná. Vracenou hodnotu uloží do proměnné.

Funkce `emissionCalculate()` vrací hmotnost vyprodukovaných škodlivých látek na 100 metrů dlouhém úseku cesty v miligramech.

Hlavní funkce `main()` pokračuje vkročením do hlavního cyklu programu, kterým je `for` cyklus iterující přes časový rozsah 24 hodin. Do něj vnořený je `for` cyklus s proměnnou `j` reprezentující vzdálenost od zdroje emisí (jednotkou vzdálenosti je v tomto cyklu 0,1 km). Tento vnořený cyklus umožňuje provést výpočet, jak daleko se rozšíří emise od vozovky, po které jezdí vozidla a produkují škodlivé látky, a jakou budou mít v dané vzdálenosti koncentraci. Podmínka uvnitř dělí proces na dva případy. První při počátku procesu, kdy ještě nebyly předtím vyprodukované žádné emise a druhý případ pro připočítání nově vyprodukovaných emisí (při časovém kroku o 1 hodinu). Tímto se navyšuje jejich koncentrace.

V cyklu iterujícím přes vzdálenost `j` je volána funkce `concentration()`, která jako parametr bere emise produkované zdrojem, a určí jejich koncentraci pro úsek vzdálený 100 metrů od zdroje v kolmém směru.

Pro účely simulací byla uvažována konstantní hodnota hustoty dopravy i rychlosti větru. Hustota dopravy byla zvolena na základě úseku městského okruhu v Brně (křížení ulic Hradecká/Hapalova), a to jako průměrná hodnota průjezdu 2290 aut za hodinu.[9]

#### 4.1.1 Překlad a spuštění

Překlad programu se provádí pomocí příkazu `make`, čímž vznikne spustitelný soubor **dispersion**. Tento soubor se spouští bez dalších parametrů následovně: `./dispersion`



## 5 Podstata simulačních experimentů a jejich průběh

V rámci studie bylo provedeno několik experimentů, jejichž cílem bylo ověřit, zda by změny v zastoupení typů pohonu vozidel či typů jejich konstrukce skutečně mohly vést ke snížení množství emisí produkovaných dopravou.

Zároveň je cílem i srovnání těchto dvou odlišných přístupů – postupného přechodu k elektromobilitě, a regulace hmotnosti vozidel libovolného typu pohonu.

Zkoumanou veličinou je koncentrace škodlivé látky v ovzduší.

### 5.1 Postup experimentování

Prvním krokem bylo sestavení referenční rovnice, ze které vychází všechny experimenty. Rovnice byla následně upravena pro každý zkoumaný scénář a monitorovanou látku.

### 5.2 Jednotlivé experimenty

V rámci experimentování byly zkoumány tři různé scénáře:

1. Referenční scénář simulující aktuální složení vozidel v Česku [3]
2. Scénář simulující zvýšení zastoupení elektromobilů na 20%
3. Scénář simulující snížení hmotnosti průměrného vozidla o 280 kg

Pro každý ze scénářů byla provedena simulace provozu na 100 metrů dlouhém úseku cesty, kdy byly v průběhu 24 hodin monitorovány koncentrace produkovaných emisí do vzdálenosti jednoho kilometru.

Posuzovány byly pro každý scénář emise pevných částic, oxidů dusíku, a jejich kombinovaná hodnota vyvážená koeficientem škodlivosti.

#### 5.2.1 Referenční scénář - kombinované emise

t [h]	d [km]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1		4801,23	191,53	7,00	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2		9602,46	574,60	30,52	1,48	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3		14403,70	1149,19	76,36	4,51	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4		19204,90	1915,32	152,76	10,57	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5		24006,20	2873,02	267,37	21,22	1,44	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
6		28807,40	4022,26	427,83	38,26	2,95	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
7		33608,60	5363,02	641,78	63,83	5,47	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00
8		38409,80	6895,32	916,85	100,37	9,45	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00
9		43211,10	8619,19	1260,70	150,64	15,44	1,28	0,04	0,00	0,00	0,00
10		48012,30	10534,60	1680,94	217,66	24,10	2,23	0,12	0,00	0,00	0,00
11		52813,50	12641,50	2185,25	304,83	36,22	3,67	0,24	0,00	0,00	0,00
12		57614,80	14940,00	2781,23	415,78	52,78	5,74	0,44	0,00	0,00	0,00
13		62416,00	17430,00	3476,54	554,45	74,88	8,70	0,76	0,00	0,00	0,00
14		67217,20	20111,60	4278,86	725,12	103,81	12,81	1,24	0,04	0,00	0,00
15		72018,50	22984,70	5195,78	932,37	140,99	18,39	1,95	0,08	0,00	0,00
16		76819,70	26049,30	6234,99	1181,07	188,10	25,89	2,95	0,16	0,00	0,00
17		81620,90	29305,50	7404,09	1476,45	246,99	35,71	4,35	0,32	0,00	0,00
18		86422,10	32753,20	8710,75	1823,92	319,71	48,43	6,26	0,56	0,00	0,00
19		91223,40	36392,50	10162,60	2229,33	408,64	64,71	8,82	0,88	0,00	0,00
20		96024,60	40223,30	11767,20	2698,76	516,27	85,29	12,21	1,36	0,04	0,00
21		100826,00	44245,60	13532,40	3238,61	645,45	111,03	16,64	1,99	0,08	0,00
22		105627,00	48459,50	15465,60	3855,58	799,24	142,90	22,30	2,87	0,16	0,00
23		110428,00	52865,00	17574,60	4556,68	981,00	182,00	29,52	4,03	0,32	0,00
24		115230,00	57461,90	19866,90	5349,22	1194,39	229,63	38,66	5,55	0,52	0,00

### 5.2.2 Zvýšené zastoupení elektromobilů - kombinované emise

Každým rokem se zvyšuje procento elektromobilů na silnicích, tento případ počítá se zvýšením procenta zastoupení elektromobilů na 20 %. Předpokládá se, že tato změna povede ke snížení koncentrace emisí u vozovky.

t [h]	d [km]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	4696,47	187,34	7,46	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	9392,94	562,03	29,88	1,44	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	14089,40	1124,10	74,72	4,39	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	18785,90	1873,51	149,44	10,33	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	23482,30	2810,31	261,55	20,75	1,40	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	28178,80	3934,45	418,49	37,42	2,87	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	32875,30	5245,97	627,74	62,43	5,35	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	37571,70	6744,84	896,78	98,18	9,26	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	42268,20	8431,09	1233,13	147,37	15,12	1,28	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
10	46964,70	10304,70	1644,20	212,96	23,58	2,19	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
11	51661,20	12365,70	2137,49	298,21	35,47	3,59	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00
12	56357,60	14614,00	2720,47	406,72	51,66	5,63	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00
13	61054,10	17049,70	3400,62	542,36	73,29	8,54	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00
14	65750,60	19672,70	4185,42	709,32	101,57	12,57	1,24	0,04	0,00	0,00	0,00
15	70447,00	22483,20	5082,37	912,06	137,95	18,03	1,95	0,08	0,00	0,00	0,00
16	75143,50	25480,90	6098,87	1155,34	184,03	25,37	2,95	0,16	0,00	0,00	0,00
17	79840,00	28666,00	7242,48	1444,25	241,64	34,99	4,31	0,32	0,00	0,00	0,00
18	84536,40	32038,50	8520,61	1784,15	312,81	47,43	6,18	0,56	0,00	0,00	0,00
19	89232,90	35598,40	9940,76	2180,70	399,78	63,35	8,70	0,88	0,00	0,00	0,00
20	93929,40	39345,60	11510,40	2639,88	505,06	83,50	12,01	1,36	0,04	0,00	0,00
21	98625,80	43280,20	13237,00	3167,96	631,41	108,67	16,32	1,99	0,08	0,00	0,00
22	103322,00	47402,10	15128,10	3771,48	781,85	139,83	21,86	2,83	0,16	0,00	0,00
23	108019,00	51711,40	17191,10	4457,30	959,66	178,09	28,96	3,95	0,28	0,00	0,00
24	112715,00	56208,10	19433,40	5232,57	1168,38	224,68	37,90	5,43	0,48	0,00	0,00

### 5.2.3 Snížení průměrné hmotnosti vozidel - kombinované emise

Vzhledem k prokázanému vztahu mezi množstvím produkovaných emisí a hmotností vozidla, byl proveden experiment uvažující scénář, kdy je průměrná hmotnost vozidel v provozu snížena o 280 kg. Předpokládá se redukce koncentrace emisí u vozovky.

t [h]	d [km]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	4648,87	185,43	7,38	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	9297,75	556,33	29,56	1,44	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	13946,60	1112,69	73,92	4,35	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	18595,50	1854,52	147,89	10,21	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	23244,40	2781,82	258,83	20,51	1,40	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	27893,20	3894,59	414,18	37,02	2,87	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	32542,10	5192,83	621,31	61,80	5,31	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	37191,00	6676,50	887,65	97,18	9,18	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	41839,90	8345,63	1220,56	145,85	14,96	1,24	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
10	46488,70	10200,20	1627,49	210,76	23,34	2,15	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
11	51137,60	12240,30	2115,79	295,14	35,11	3,55	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00
12	55786,50	14465,80	2692,86	402,53	51,14	5,59	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00
13	60435,40	16876,90	3366,12	536,82	72,53	8,46	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00
14	65084,20	19473,30	4142,98	702,06	100,53	12,45	1,24	0,04	0,00	0,00	0,00
15	69733,10	22255,30	5030,82	902,73	136,52	17,87	1,91	0,08	0,00	0,00	0,00
16	74382,00	25222,60	6037,03	1143,57	182,12	25,13	2,91	0,16	0,00	0,00	0,00
17	79030,90	28375,50	7169,03	1429,57	239,13	34,67	4,27	0,32	0,00	0,00	0,00
18	83679,70	31713,80	8434,20	1766,04	309,58	47,00	6,10	0,56	0,00	0,00	0,00
19	88328,60	35237,60	9839,95	2158,56	395,67	62,75	8,58	0,88	0,00	0,00	0,00
20	92977,50	38946,80	11393,70	2613,07	499,92	82,66	11,85	1,32	0,04	0,00	0,00
21	97626,40	42841,50	13102,80	3135,77	624,98	107,56	16,12	1,95	0,08	0,00	0,00
22	102275,00	46921,70	14974,70	3733,14	773,91	138,39	21,62	2,79	0,16	0,00	0,00
23	106924,00	51187,40	17016,70	4411,98	949,88	176,25	28,64	3,91	0,28	0,00	0,00
24	111573,00	55638,40	19236,40	5179,39	1156,49	222,37	37,50	5,39	0,48	0,00	0,00

### 5.3 Závěry experimentů

Maximální výsledné hodnoty koncentrací pro jednotlivé scénáře jsou uvedeny v tabulce č.6.

Změna emisní situace ve scénářích se zvýšeným zastoupením elektromobilů a snížení průměrné hmotnosti ve srovnání s referenčním scénářem je uvedena v tabulce č.7.

Scénář	PM	NO <sub>x</sub>	Kombinované emise
Referenční	19420.19	14382.99	115229.53
Zvýšené zastopení elektromobilů	19510.19	14382.99	112715.24
Snížení průměrné hmotnosti	18191.77	14922.04	111572.99

Tabulka 6: Maximální koncentrace  $\left[ \frac{\text{mg}}{100 \text{ m}_3} \right]$

Scénář	PM	NO <sub>x</sub>	Kombinované emise
Zvýšené zastopení elektromobilů	+ 0,5%	- 17%	- 2%
Snížení průměrné hmotnosti	- 6,3%	- 14%	- 3%

Tabulka 7: Změny proti referenčnímu scénáři

## 6 Shrnutí simulačních experimentů a závěr

Provedením experimentů byl potvrzen předpoklad, že zvýšení zastoupení elektromobilů v provozu povede k celkovému snížení produkovaných emisí. Překvapivým však byl nálezný, že pro emise pevných částic je vyšší zastoupení elektromobilů kontraproduktivní.

Scénář simulující snížení průměrné provozní hmotnosti vozidla produkoval pouze očekávané výsledky, tedy vedl ke snížení množství obou sledovaných typů emisí.

Na provedené pokusy by bylo do budoucna možné navázat provedením dalších simulací, kdy by bylo experimentováno s poměrem elektromobilů v provozu.

Na základě výsledků experimentů lze tedy konstatovat, že výhodnost elektromobility je problematikou velmi komplexní a rozhodně ne tak jednoznačnou, jak může při konzumaci některých zdrojů působit.

Znečištění ovzduší zůstává problémem, který v žádném případě není vhodné zlehčovat či přehlížet, nemá však pouze jedno řešení, a zdaleka není zapříčiněno pouze silniční dopravou.

## Literatura

- [1] Agency, E. E.: Sources and emissions of air pollutants in Europe. [online], rev. 25.02.2022, [vid. 2022-12-03].  
URL <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021/sources-and-emissions-of-air>
- [2] Blažek, J.: Kolik aut jezdí v EU a jak jsou stará? [online], rev. 05.11.2021, [vid. 2022-11-29].  
URL <https://bit.ly/3ilXlno>
- [3] Cebia: Cebia SUMMARY 4/2021 - informace, statistiky a zajímavosti z oblasti prodeje ojetých vozidel. [online], rev. 20. 01. 2022, [vid. 2022-11-29].  
URL <https://bit.ly/3FkZBmL>
- [4] of Environmental Health Sciences, N. I.: Air Pollution and Your Health. [online], rev. 16. Listopad 2022, [vid. 2022-11-20].  
URL <https://bit.ly/3H2bDmi>
- [5] Hart, M.: Average Engine Weight: What Is The Largest Engine In A Car? [online], rev. 09.11.2022, [vid. 2022-11-29].  
URL <https://axlewise.com/how-much-does-an-engine-weigh/>
- [6] Health, E.: Common air pollutants and their health effects. [online], rev. 8. srpna 2022, [vid. 2022-11-20].  
URL <https://www.health.nsw.gov.au/environment/air/Pages/common-air-pollutants.aspx>
- [7] Ing. Milan Havel, I. P. V., Vít Věbr: oxidy dusíku. [online], rev. 29.04.2022, [vid. 2022-11-29].  
URL <https://arnika.org/toxicke-latky/database-latek/oxidy-dusiku>
- [8] McTurk, D. E.: Do electric vehicles produce more tyre and brake pollution than their petrol and diesel equivalents? [online], rev., [vid. 2022-12-03].  
URL <https://www.rac.co.uk/drive/electric-cars/running/do-electric-vehicles-produce-more-tyre-and-brake-pollution-than-petrol-and/>
- [9] redakce, : Sto tisíc aut za den, tolik zvládá nejzatíženější komunikace v Česku. [online], rev. 30.01.2022, [vid. 2022-12-03].  
URL <https://bit.ly/3VS6cut>
- [10] Roorkee, I.: Lecture 17: Gaussian Dispersion Model for Line Source and Area Source. [online], rev. 6.2.2022, [vid. 2022-11-29].  
URL <https://www.youtube.com/watch?v=fAkAdarZdp0>
- [11] Schad, E.: How much does a Tesla battery weigh? [online], rev. 16.08.2022, [vid. 2022-11-29].  
URL <https://getjerry.com/questions/how-much-does-a-tesla-battery-weigh>
- [12] Systems Research Institute, P. A. o. S.: Burden of Mortality and Disease Attributable to Multiple Air Pollutants in Warsaw, Poland. [online], rev. 14.11.2017, [vid. 2022-12-03].  
URL <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5707998/>
- [13] Technol., E. S.: Effect of Truck Operating Weight on Heavy-Duty Diesel Emissions. [online], rev. 08.08.2003, [vid. 2022-12-03].  
URL <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es026299y>

- [14] Victor R.J.H.Timmers, P. A.: Non-exhaust PM emissions from electric vehicles. [online], rev. 06.2016, [vid. 2022-12-03].  
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135223101630187X#bib29>
- [15] Vida!: Doprava jako producent skleníkových plynů. [online], rev. 8. Srpna 2022, [vid. 2022-11-20].  
URL <https://vida.cz/exponaty/automobil-a-emise-co2>
- [16] Wikipedia: Oxid siřičitý. [online], rev. 04.07.2022, [vid. 2022-11-29].  
URL [https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid\\_siřičitý](https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_siřičitý)
- [17] Wikipedia: Emisní norma Euro. [online], rev. 14. září 2022, [vid. 2022-11-20].  
URL [https://cs.wikipedia.org/wiki/Emisní\\_norma\\_Euro](https://cs.wikipedia.org/wiki/Emisní_norma_Euro)
- [18] Wikipedia: Pevné částice. [online], rev. 20.06.2022, [vid. 2022-11-29].  
URL <https://bit.ly/3irkELy>
- [19] Wikipedia: Emise (ekologie). [online], rev. 23. července 2021, [vid. 2022-11-20].  
URL [https://cs.wikipedia.org/wiki/Emise\\_\(ekologie\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Emise_(ekologie))
- [20] WIKIPEDIA: Atmospheric dispersion modeling. [online], rev. 28.10.2022, [vid. 2022-12-03].  
URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric\\_dispersion\\_modeling#Gaussian\\_air\\_pollutant\\_dispersion\\_equation](https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_dispersion_modeling#Gaussian_air_pollutant_dispersion_equation)
- [21] zdravotní ústav, S.: Oxid uhelnatý. [online], rev. 2019, [vid. 2022-11-29].  
URL <https://bit.ly/3FeqqZT>