

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta informačních technologií



IMS

7. Šíření emisí v atmosféře

2022/2023

Technická správa

Autori:

Matěj Konopík (xkonop03)

Daniel Chudý (xchudy06)

Obsah

1. Úvod	3
1.1 Autori a zdroje.....	3
1.2 Validácia modelu.....	3
2. Fakty	4
2.1 Model rozptylu	4
2.1 Hypotézy	6
3. Koncepcia	7
3.1 Celulárny automat.....	7
3.2 Algoritmus najbližších susedov a vietor	7
3.3 Reprezentácia veľkosti Prahy v simulácii	8
3.4 Lesy a parky	8
3.6 Vývojový diagram a pseudokód	9
4. Architektúra simulačného modelu.....	10
5. Podstata simulačných experimentov a ich priebeh	11
5.1 Experiment č.1 – Vypnutie najväčšej fabriky	12
5.1.1 Experiment č.1.1 – Najväčšia fabrika použije nové technológie.....	13
5.1.2 Experiment č.1.2 – vplyv Emisií fabriky Radotín na centrum mesta.....	14
5.2 Experiment č.2 – lesy	15
5.2.1 Experiment č.2.1 Vysadenie viacerých lesov po meste	17
5.3 Experiment č.3 – vypnutie polovice fabrík na 12tickov (simulácia dňa a noci)	18
6. Zhrnutie simulačných experimentov a záver	20
7. Bibliografia	21

1. Úvod

Podľa Svetovej zdravotníckej organizácie (WHO) predčasne zomrie až 4.2 milióna ľudí v dôsledku znečistenia ovzdušia ročne [1]. Veľká časť týchto úmrtí pochádza skôr z oblastí juhovýchodnej Ázie, avšak aj v Európe je to stále prominentný problém, kde až 96% mestských oblastí bolo v roku 2020 vystavených väčšiemu množstvu koncentrácií jemných častíc (PM_{2,5}) ako je smernica daná WHO (5 µg/m³). Vysoká miera znečistenia ovzdušia taktiež spôsobuje stratu biodiverzity, poškodenie lesov a plodín. [2]

Motiváciou je vyrobiť model šírenia emisií v nejakej oblasti za daných podmienok.

Problém sme sa rozhodli riešiť aplikáciou celulárnych automatov, ktorá bude použitá na zostavenie modelu šírenia škodlivín z existujúcich dát emisií reálnych tovární v oblasti Prahy.

Pomocou simulácií sme sa snažili zobrazit' šírenie emisií (iba z vybraných tovární) v oblasti Prahy pri daných poveternostných podmienkach (smer vetra), obmedzeniach (produkcia emisií fabriky sa zníži o polovicu/niektoré fabriky prestanú pracovať) a opatreniach (výstavba lesu/parku). Cieľom je zobrazit' rozdiely v šírení emisií, ktoré tieto atribúty spôsobia.

1.1 Autori a zdroje

Na projekte sa podieľali študenti 3. ročníka VUT FIT BRNO, Daniel Chudý a Matěj Konopík. Vypracované na základe zadania projektu 7. Šíření emisí v atmosféře, predmet IMS (Modelování a simulace).

Hlavným zdrojom informácií boli vedecké práce zamerané na modely rozptylu škodlivín v atmosfére, ktoré sú uvedené v sekcii 8. Bibliografia. V prácach sme sa zoznámili s rôznymi rozptylovými modelmi ako je Gaussov model, Langrovské modely, Eulorovské modely alebo škatuľové modely, tieto modely sme zhodnotili a vybrali vhodný hybrid medzi nimi. [6]

1.2 Validácia modelu

Validácia modelu prebiehala pozorovaním jeho chovania pri rôznych spusteniach programu a následnej vizualizácii pomocou OpenGL knižnice Glut. Na základe pozorovania sa model upravil a ďalej validoval. V týchto iteráciách sa hlavne menila matica difúzie a okolia. (viz. sekcia 3.2)

2. Fakty

Na základe zadania sme sa rozhodli nájsť vhodný zdroj informácií o množstve emisií v nejakej oblasti. Vybrali sme si mesto Praha, pre ktoré sme našli dátovú sadu typu **REZZO 1** [3], ktorý reprezentuje veľké stacionárne zdroje znečisťovania v oblasti Prahy [4], kde je pri každej fabrike označený jej celkový CO₂ ekvivalent (CO₂EKV) emisií v tonách za rok (znamená celkové množstvo skleníkových plynov vypustených fabrikou v prepočte na vypúšťané množstvo CO₂). [13]

2.1 Model rozptylu

Z vyššie spomínaných rozptylových modelov sme bližšie skúmali Gaussov model a tzv. škatuľový model. [6]

Gaussov model :

- založený na Gaussovom rozdelení
- simuluje koncentráciu v dymovej vlečke vo vertikálnom aj horizontálnom smere
- jednoduché výpočty
- používa sa ako súčasť zložitejších modelov
- model AERMOD a SYMOS '97

$$\text{Rovnica: } u \frac{\partial C}{\partial x} = K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

Kde:

C- koncentrácia škodlivín

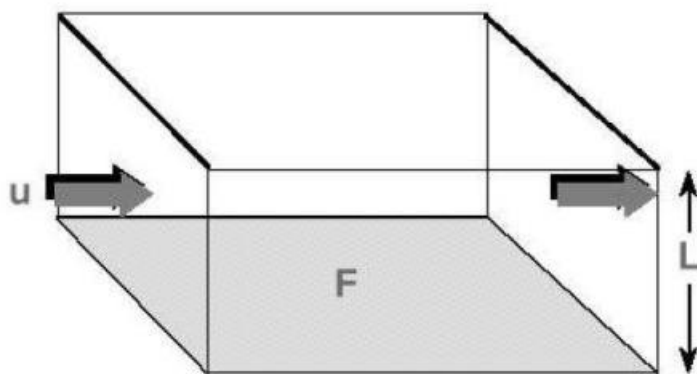
u- priemerná rýchlosť vetra

x, y, z- súradnice

K_y, K_z - difúzne koeficienty

Škatuľový model :

- patrí medzi najjednoduchšie modely
- fixne vymedzený priestor súradnicami
- vo vnútri boxu sa predpokladá homogénna priestorová koncentrácia polutantov



Obrázok 1. : Škatuľový model [6]

$$\text{Rovnica: } \frac{dcv}{dt} = Q_F F + u C_{in} W L - u C W L$$

Kde:

V- objem škatule

F - vodorovná plocha škatule

Q_F - plošná intenzita emisií

W- šírka boxu

L - výška boxu

C- koncentrácia polutantov vo vnútri boxu

C_{in} - koncentrácia polutantov vo vstupnom prúde vetra

u - rýchlosť vetra

Celulárny automat :

Model sme implementovali 2D celulárnym automatom. Využili sme priamu implementáciu uloženia buniek a pevné okrajové podmienky (okraj označený hodnotou -1). Šesťuholníkové rozloženie sme pre jednoduchosť zanedbali a adaptovali sme Moorove okolie. [5]

Moorove okolie :

Pri rozširovaní/aktualizovaní koncentrácie buniek sme implementovali okolie bunky adaptáciou **Moorovho okolia** [7]. Bunka v 2D mriežke má 8 susedov, 4 cez hranu a 4 cez vrchol.

2.1 Hypotézy

Difúzny koeficient a prirodzený úbytok :

Difúzny koeficient sme modelovali nižšie uvedenou „maticou difúzie“, kde sme na základe pozorovania simulácie dosadili vhodné hodnoty. V článku [8] autori znázorňovali rôzne koeficienty difúzie. $\mu = 0.9, \mu = 0.1$. Difúzna konštanta – uvádza ako ľahko daná látka difunduje (sa rozptyľuje) do okolia. [14]

Prirodzený úbytok látok autori už spomínaného článku ohodnotili konštantou $\sigma = 0.05$. Túto hodnotu sme vo forme $1 - \sigma$, použili aj my (tj. Danú koncentráciu látok sme násobili hodnotou 0.95). [8]

Počítanie s emisiami :

Ako bolo vyššie spomenuté, emisie sú v našej dátovej sade uvedené v tonách za rok. Tento údaj interne prevádzame na kg/h, kroky preto počítame v hodinách.

Výška boxu:

V článku odkazovanom odkazom [8] je uvedené, že pri obmedzení hraníc oblasti sa môže zanedbať aj výška, čo nie je realistické, ale dostačujúce pri správnych parametroch programu. Obmedzenie hraníc zavádzame, preto sa domnievame, že hypotéza možnosti zanedbania výšky bunky je validna. S týmto súvisí aj difúzny koeficient použitý v spomínanej publikácii pri experimentoch.

3. Koncepcia

Z vyššie spomenutých modelov rozptylu škodlivín sme pre jednoduchosť zvážili adaptovanie tzv. **škatuľového modelu**, kde sme zanedbali výšku boxu **L** (môžeme predpokladať, že bude konštantná napr. 1000m). Vietor má pri všetkých simuláciách rovnakú rýchlosť/silu **u**, avšak rozšírili sme ho o smer. Vodorovná plocha **F** škatule bude konštantná (0,49km², viz. 2.1.4) [6]

Upravená rovnica pre našu adaptáciu škatuľového modelu pre každú bunku v poli:

$$C_{\text{next}} = (C_{\text{current}} + \text{Emissions}) * n * TC + \text{Spread}$$

kde:

C_{next} – koncentrácia škodlivín v bunke v nasledujúcom kroku

Emissions - emisie generované bunkou (0 ak je bunka typu Default, záporné ak je bunka typu Green, kladné ak je typu Factory)

Spread – emisie prevzaté z okolia v tomto kroku

C_{current} – koncentrácia škodlivín v bunke v súčasnom kroku

n – násobič indexu z matice difúzie

TC – chemický transformačný koeficient (prirodzený úbytok/spád) [8]

3.1 Celulárny automat

Z vyššie spomínaných dát sme vyfiltrovali 30 najviac znečisťujúcich fabriek z oblasti Prahy. Dáta sme filtrovali pomocou rôznych knižníc v prostredí Python, kde sme každej fabrike priradili index, ktorý reprezentuje jej miesto v 2D 40x40 poli C++ objektov (buniek). Každá bunka/fabrika má nasledujúce atribúty: množstvo vygenerovaných emisií v danom čase, aktuálnu koncentráciu emisií v danom čase, koncentráciu v ďalšom kroku, typ bunky (žiadna/fabrika/les) a svoj index v 2D poli.

3.2 Algoritmus najbližších susedov a vietor

Šírenie/aktualizáciu susedných buniek sme na základe adaptácie **Moorovho okolia**, pozorovania a experimentov modelovali nasledujúcou maticou:

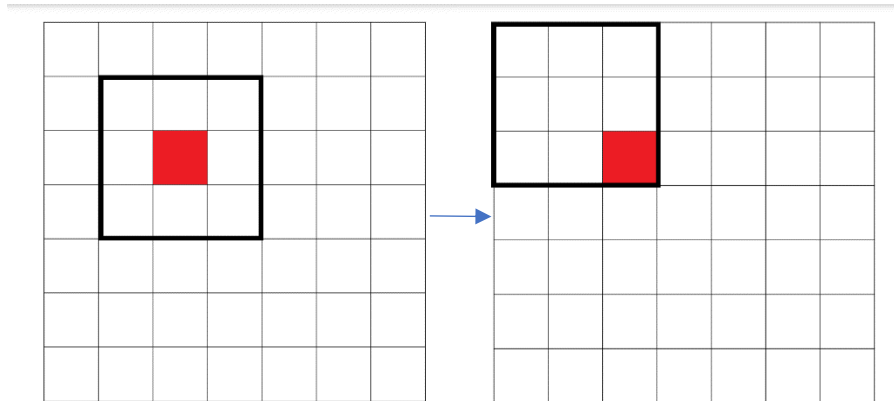
$$\begin{pmatrix} 0,075 & 0,125 & 0,075 \\ 0,125 & \boxed{0,2} & 0,125 \\ 0,075 & 0,125 & 0,075 \end{pmatrix}$$

Obrázok 2. : Matica difúzie (násobiče koncentrácie CO₂, kt. je emitovaná susedom)

Hodnoty matice reprezentujú aký zlomok emisií nachádzajúcich sa v súčasnom kroku v centrálnej bunke bude v ďalšom kroku prenesený do susedných buniek. Týmto simulujeme difúziu CO₂ – matica difúzie.

Vietor modelujeme pomocou matice susedov, ktorá sa posúva na základe smeru vetru. Napríklad, ak nastavíme smer vetru z juhovýchodu, posunie sa centrálna bunka na pravý dolný roh a jej 8 susedia v materskom 2D poli sa zmenia.

$$\begin{pmatrix} 0,075 & 0,125 & 0,075 \\ 0,125 & 0,2 & 0,125 \\ 0,075 & 0,125 & \boxed{0,075} \end{pmatrix}$$



Obrázok 3., 4., 5. : Matica susedov, JV vietor

3.3 Reprezentácia veľkosti Prahy v simulácii

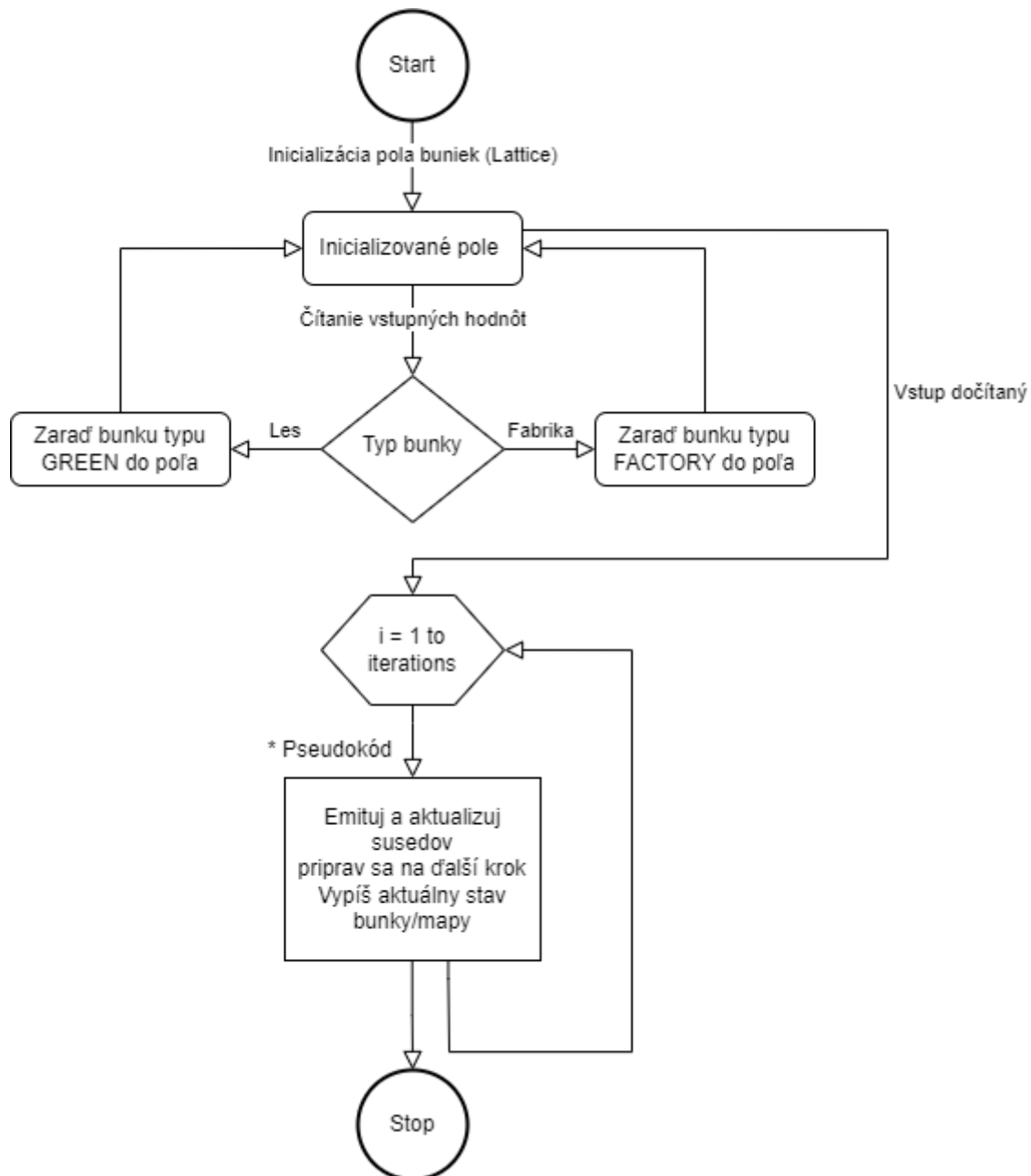
Zasadenie fabriek do mapy, tj vytvorenie indexu v 2D poli buniek, kde je bunka typu Factory zasadená, sme vyriešili použitím koordinácií poskytnutých vo vyššie spomínanej dátovej sade. Pri mapovaní sme vytvorili minimálny rámec pre všetky fabriky, ku ktorému sme pridali okraj 25% na každej strane a zarovnali ho na štvorec podľa osi x. Toto rozšírenie rozsahu sme urobili kvôli lepšiemu modelovaniu okolia fabriek pri vetre, pretože vietor by častice odniesol mimo pôvodného rámca a takto ich možno lepšie sledovať. Týmto sme získali presnú polohu fabriek v poli buniek, ktoré pri „veľkosti“ bunky $700\text{m} \times 700\text{m} = 0,49\text{km}^2$ a počtu buniek v poli rovných 1600 reprezentuje plochu $28\text{km} \times 28\text{km}$, čo je 784km^2 (rozloha Prahy a okolia je 496km^2) [12].

Ak je v jednej bunke viac fabriek či zelených plôch (viď nižšie), tj viacero fabriek má rovnaké indexy zaradenia do poľa, hodnoty sa sčítajú, respektíve odčítajú v prípade zelene.

3.4 Lesy a parky

Ako zaujímavý prídavok sa nám javila výsadba lesov alebo parkov, ktoré budú „konzumovať“ vzniknuté emisie. Modelovanie lesov nebolo zložité, bunka typu Green, ktorá takýto les reprezentuje sa chová rovnako ako bunka reprezentujúca fabriku (Factory), len propaguje a „vyrába“ záporné emisie (koncentrácia škodlivín v bunke nemôže byť záporná). Takýto typ bunky je dobre využiteľný pri experimentoch. Pri nahusto vysadenom lese (2500 stromov/Ha $\Rightarrow 250\,000$ stromov/ km^2), vieme na oblasť jednej bunky vysadiť $125\,000$ stromov. Strom priemerne za rok pohltí 25kg CO_2 , čo predstavuje $25/(365 \times 24)$ kg/h, po vynásobení počtom stromov dostávame hodnotu ≈ 350 kg/h (3125 t/rok). [9] [10] [11]

3.6 Vývojový diagram a pseudokód



* Pseudokód :

- vyberie sa mód zobrazenia (GUI/text)
- prevedie sa iterácia :
 - pre každú bunku v poli buniek :
 - vypočítaj aktualizáciu koncentrácie pre susedov v ďalšom kroku - cyklus1
 - pripočítaj k svojej koncentrácii emisie od susedov - cyklus2
 - vypíš monitorovanú bunku (ak bol nastavený prepínač -m)
 - vypni/zapni továrne ak vypršal časovač (ak bol nastavený prepínač -p)
- vypíš informácie o poli buniek (ak sme v móde **text** a vypršal počet iterácie)

4. Architektúra simulačného modelu

Simulácia je naprogramovaná v jazyku C/C++ a využíva dvojdimenzionálne pole na ukladanie buniek. Bunka je reprezentovaná ako `Class Cell`, ktorá si nesie svoje atribúty. Pri vložení do poľa sa objekt bunky inicializuje všetkými potrebnými hodnotami a vypočíta sa jej individuálna matica rozptylu a susedov. Bunka sa tak stáva plne schopnou realizovať potrebné operácie pri každej iterácii simulácie.

Samotné iterácie realizujú dvojaký priechod 2D poľom buniek, `map_grid`. Prvýkrát si každá bunka vypočíta podľa kombinácie matíc susedov (`indexy`) a rozptylu (matice difúzie), ktorým bunkám a koľko emisií v tejto iterácii odovzdá - vrátane seba samej, čím sa modeluje to, že nejaká koncentrácia v bunke zostane (vid' obr. 2). Každý susednej bunke, ktorej niečo odovzdáva, túto hodnotu pripočíta k hodnote v bufferi pre odovzdané emisie -

`next_iteration_concentration`. Vzhľadom na to, že priechod 2D poľom je sekvenčný, zmeny by sa pri jedinom priechode propagovali postupne - my však potrebujeme všetky nové hodnoty zapísať do buniek v rovnakom čase, preto sa najskôr pracuje s hodnotou pre ďalšiu iteráciu `next_iteration_concentration`, ku ktorej je postupne pričítavané a odčítavané bez zmeny vlastnej koncentrácie bunky. Ako už bolo povedané, ak by sa vlastná koncentrácia bunky niekoľkokrát zmenila predtým, než by táto bunka sama rozptýlila časť svojej koncentrácie do okolia, nebol by prenos správne synchronizovaný. Od koncentrácie každej bunky sa potom odpočíta celková hodnota, ktorú odovzdala ostatným bunkám. V druhom priechode sa prepíše `next_iteration_concentration` do vlastnej koncentrácie - `concentration`.

Iterácie sa postupne vykonávajú, pokiaľ nevyprší čítač iterácií - v predvolenom stave v textovom móde je to 10 iterácií (možno upraviť pomocou prepínača `-i <iterácia>`), v móde GUI je neobmedzený. Po každej iterácii sa prípadne zistí koncentrácia CO₂ monitorovanej bunky (ak je zadaný prepínač `-m <X:Y>`) a kontroluje sa, či už uplynul pracovný čas alebo pauza tovární (ak je zadaný prepínač `-p`).

Smer vetra je modelovaný pomocou posunu matice susedov. Štandardne bez vetra sa počíta s ôsmimi najbližšími susedmi, pokiaľ je ale nastavený vietor, táto matica sa pomocou prepočtu indexov zmení tak, aby správne smer vetra modelovala (vid' obr. 4, 5). Toto obsluhuje knižnica `spread_matrix.hpp`, kde sa vo funkcii `get_diffusion_direction_matrix()` definuje smer posunu. Napríklad pri nulovom vetre sa používa `posun x_shift = -1` a `y_shift = -1`. Rovnica pre výpočet všetkých posunutých susedov v matici je potom nasledujúca:

```
matrix[i] = i + x_shift + x_position; matrix[j] = j + y_shift + y_position;
```

Ak by niektorý index siahla mimo hranice poľa, je nastavený na hodnotu -1, čo symbolizuje, že všetky emisie odovzdané tejto bunke budú odstránené zo systému. To znamená, že emitorka si ich odpočíta, ale nikam nepropaguje.

5. Podstata simulačných experimentov a ich priebeh

Cieľom experimentov je zobraziť množstvo, intenzitu, šírenie a úbytok emisií emitovaných v oblasti Prahy za rôznych okolností, čo by mohlo pomôcť na lepšie pochopenie emisnej situácie v Prahe a okolí. Ako vstupné dáta bude na experimenty je používaných 30 fabriek s najvyššími emisiami (ďalej len DS 30) z vyššie spomínanej dátovej sady. [4]

Tento zoznam bude rôzne upravovaný, napr. odobratie najznečisťujúcej fabriky, vypnutie polovice fabriek na 12 iterácií (prepínač -p), vysadenie lesu (pridanie buniek typu GREEN). Taktiež budeme prepínačom -w meniť smer vetra. Prepínačom -o si necháme údaje vypísať do súboru a prepínač -s vypíše sumu emisií v celej mape po každej iterácii. Informácie o spustení programu sú k dispozícii v súbore `Readme.md`.

Na získavanie výstupov budeme používať textový výpis informácií o poli buniek (a následné prenesenie do grafu) alebo vizualizáciu pomocou OpenGL knižnice Glut.

Rozlíšenie farieb vizualizácie :

Koncentrácia emisií	Farba
0..50	svetlofialová
50..500	fialová
500..1000	hnedá
1000..2000	žltá
2000..3000	oranžová
3000..4000	červená
>4000	odtiene červenej

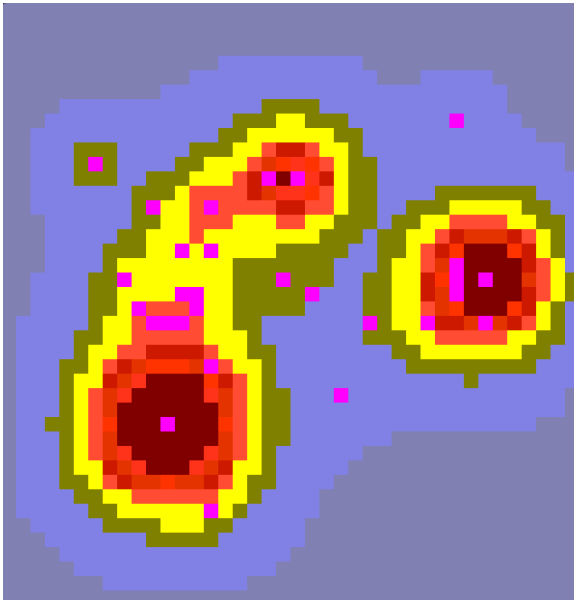
- neónovo fialová – fabriky
- zelená – lesy/parky
- biela – sledovaná bunka

5.1 Experiment č.1 – Vypnutie najväčšej fabriky

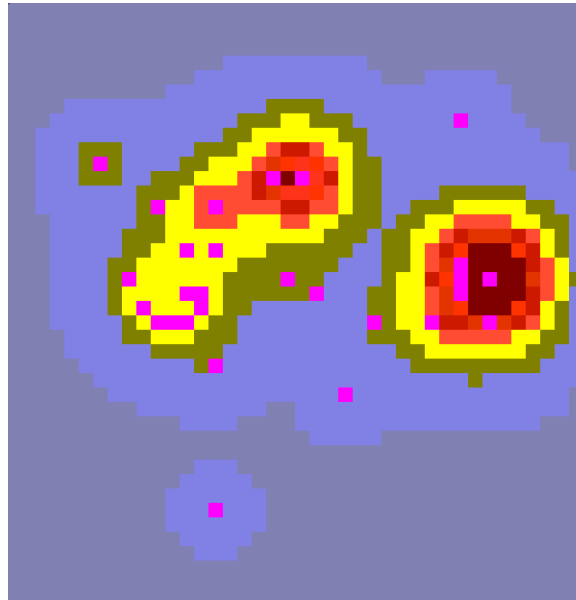
Vstup: DS 30 bez fabriky s najväčšími emisiami (cementáreň Radotín, >500 000 t/rok)

Parametre programu: 50 iterácií, Vietor : žiadny

Vizualizácia:

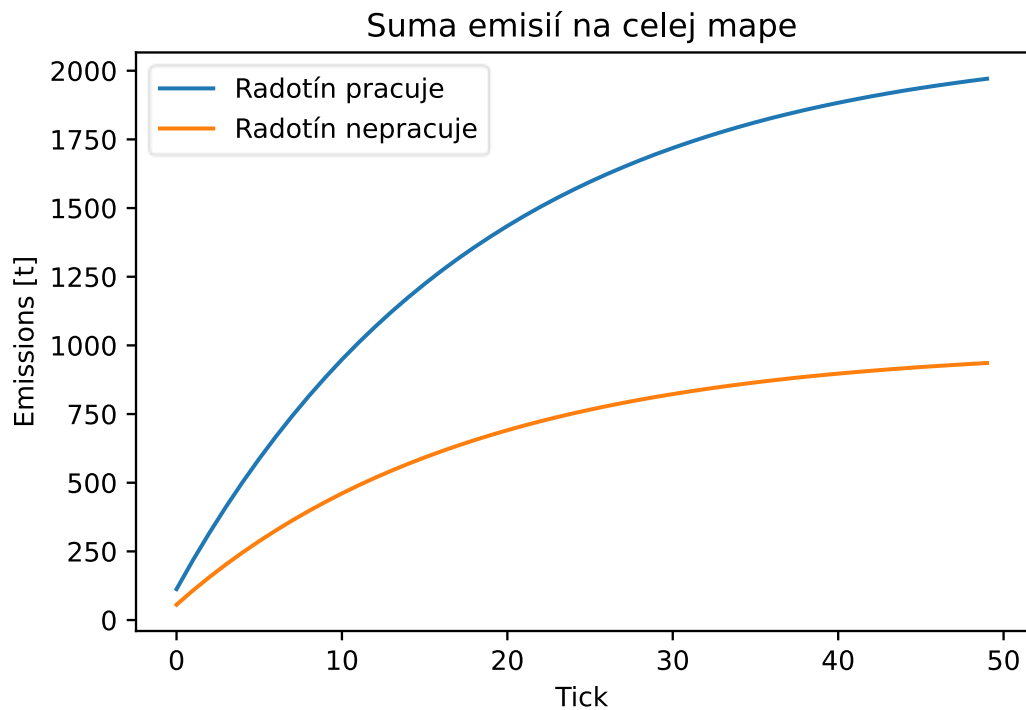


Obrázok 7. : S fabrikou



Obrázok 8. : Bez fabriky

Grafy:



Interpretácia výsledkov:

Pri odstavení prevádzky cementárne Radotín vidíme až dvojnásobný pokles vytvorených emisií za 50 iterácií (50h).

Tento fakt je spôsobený tým že táto fabrika emituje vyše dvojnásobok emisií druhej najväčšej fabriky v Prahe (spaľovňa, 240 000 t/rok). Táto obrovská hodnota emisií vzniká tým, že výroba tony cementu vytvorí až 1.2 tony CO₂ emisií. [15]

Z výsledku experimentu je možné usúdiť, že výroba cementu je devastujúca pre životné prostredie a treba ju obmedziť alebo použiť technológie, ktoré emisie obmedzia.

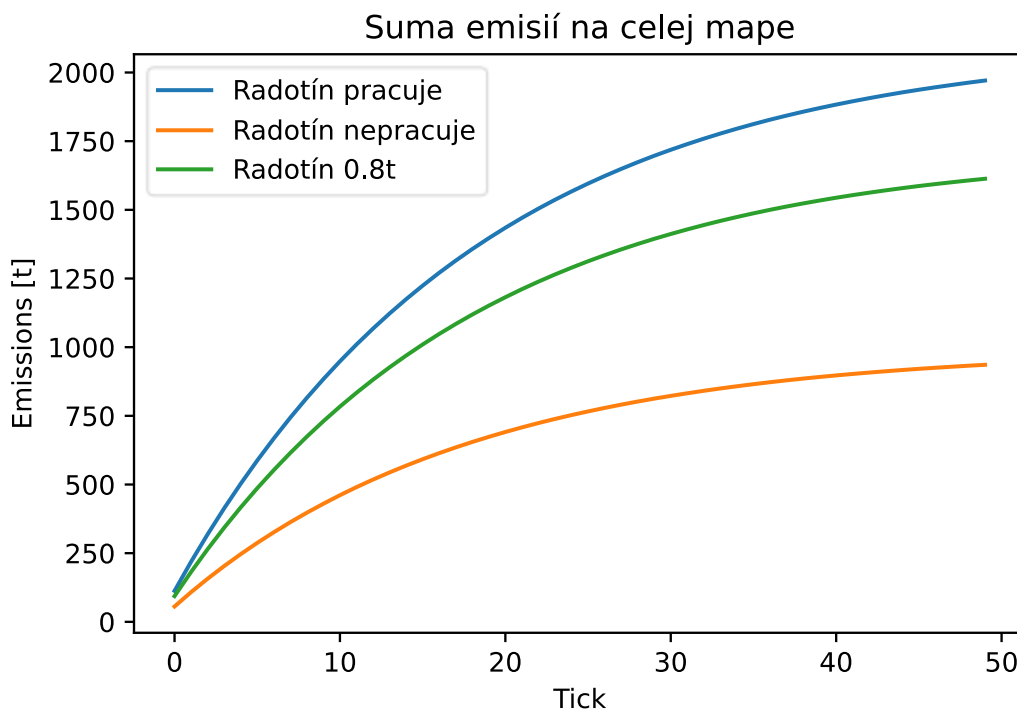
Nové technológie ponúkajú zníženie emisnej intenzity na 0.8t CO₂ na tonu cementu. To by znamenalo zníženie emisií fabriky Radotín o 1/3 ($\frac{2}{3} \cdot 500\,000$ t/rok) => experiment č.1.1.

5.1.1 Experiment č.1.1 – Najväčšia fabrika použije nové technológie

Vstupy: DS 30 (cementáreň Radotín, 350 000 t/rok)

Parametre programu: 50 iterácií, Vietor : žiadny

Grafy:



Interpretácia výsledkov:

Použitím nových technológií spaľovania v peciach [15] dosiahneme výrazné zníženie aj celkových emisií všetkých fabriek z DS 30.

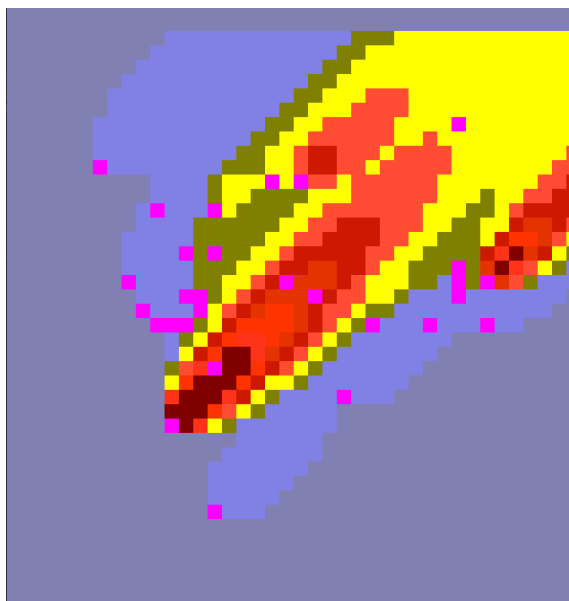
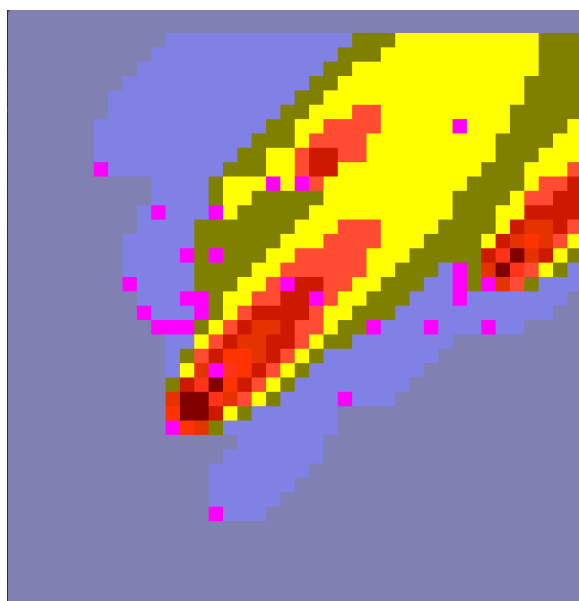
5.1.2 Experiment č.1.2 – vplyv Emisií fabriky Radotín na centrum mesta

Vstupy: DS 30 (cementáreň Radotín, rôzne emisie)

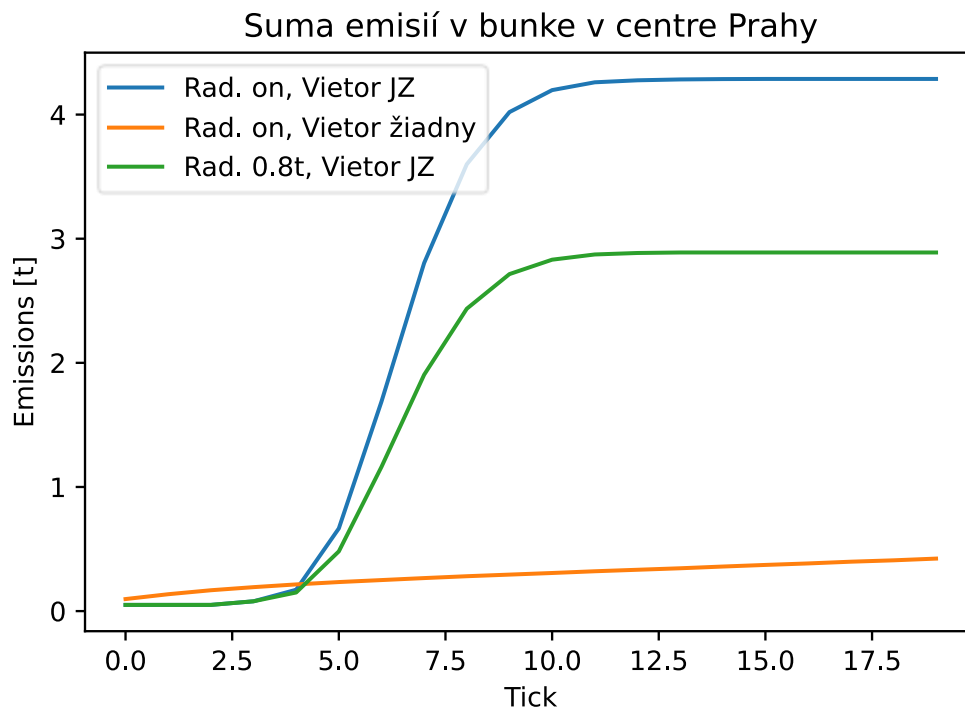
Parametre programu: 20 iterácií, Vietor : JZ/žiadny, Skúmaná bunka 18:18 (cca stred)

Vizualizácia: Graf 1. – Radotín 0.8t,

Graf 2. – Radotín 1.2t



Grafy :



Interpretácia výsledkov :

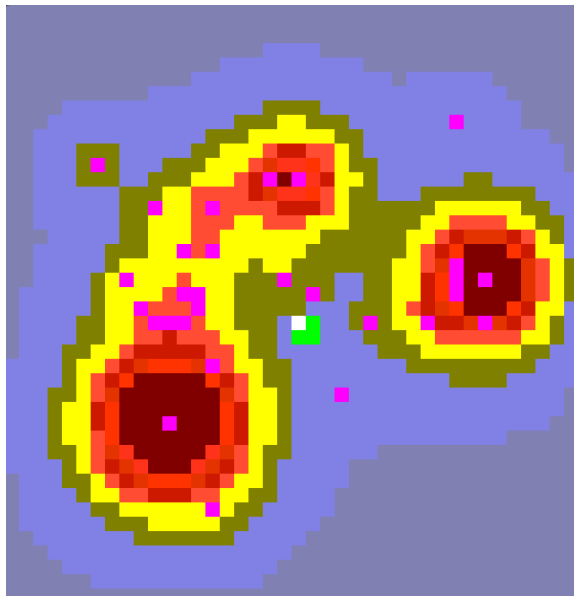
Z grafu vidíme, že fabrika Radotín má na centrum Prahy signifikantný vplyv pri juhozápadnom smere vetre (škodliviny vietor odnesie z juhozápadu Prahy do centra). S týmto poznatkom by sa mohla ovplyvniť výroba cementu pri silnom vetre aby sa nezamorovalo centrum Prahy.

5.2 Experiment č.2 – lesy

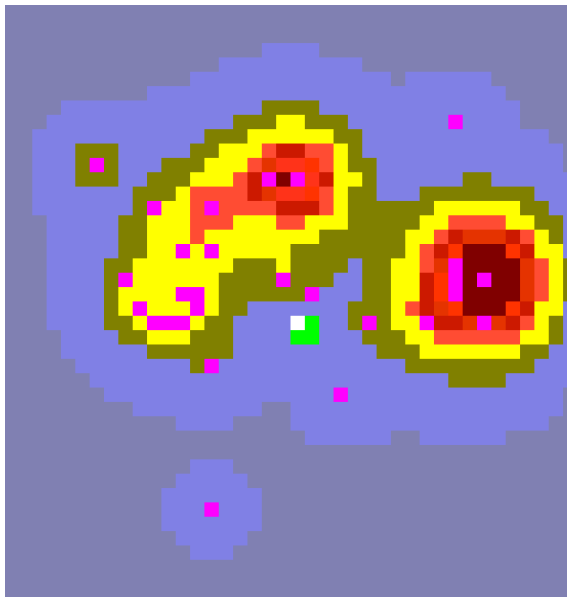
Vstupy: DS 30 + 4 bunky typu GREEN (lesy, -60*4 kg/h), bez Radotínu

Parametre programu: 50 iterácií, Vietor : žiadny, sledované susedstvo bunky 20:20

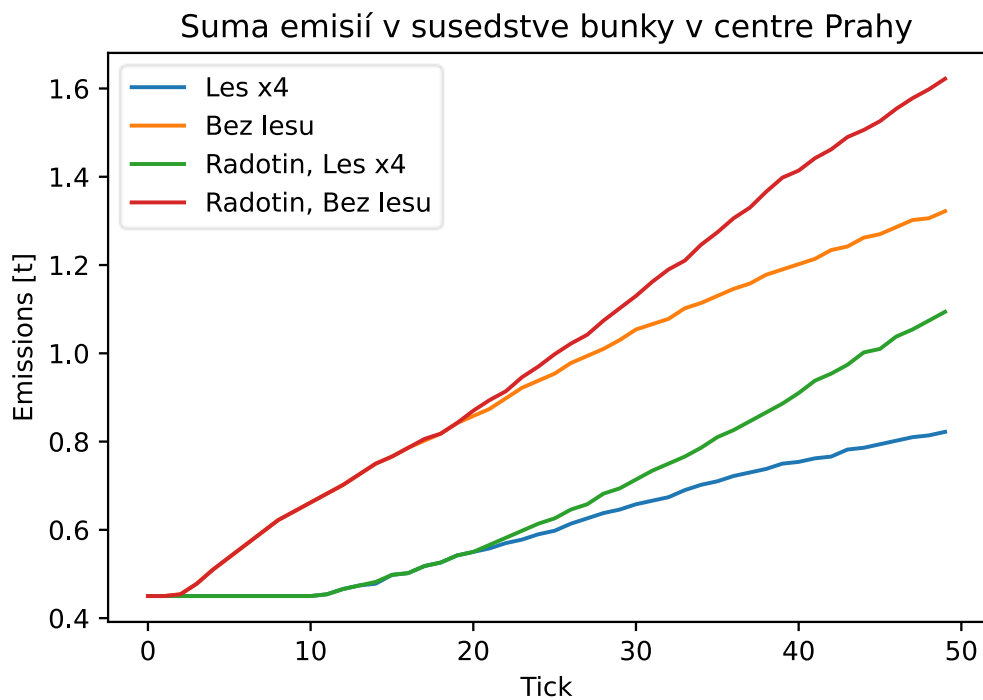
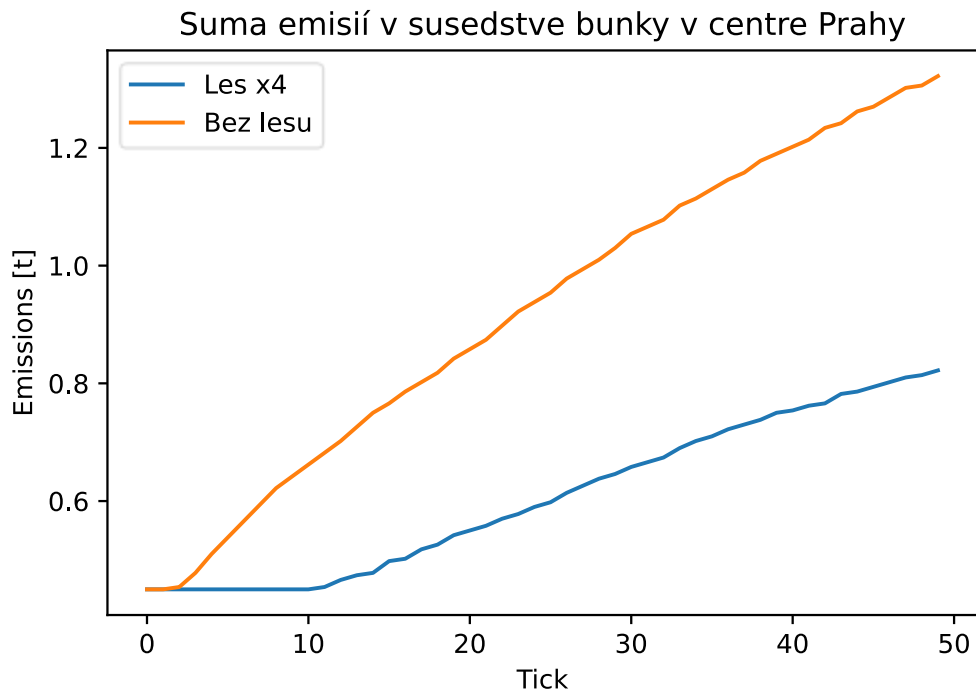
Vizualizácia: Graf 1. – Radotín on



Graf 2. Radotín off



Grafy:



Interpretácia výsledkov :

Pri vysadení lesa o rozlohe 2km^2 (konzumuje cca 240kg/h emisií, tj. 100 000tisíc stromov) pozorujeme znateľný rozdiel v koncentrácii emisií v centre Prahy (okolo vysadeného lesa). Na druhom grafe vidíme znova vplyv fabriky Radotín na centrum mesta (v prvom bola fabrika Radotín odstavená).

5.2.1 Experiment č.2.1 Vysadenie viacerých lesov po meste

Vstupy: DS 30 + bunky typu GREEN (lesy) – 4x les centrum, 4x Radotín, 2x spalovna

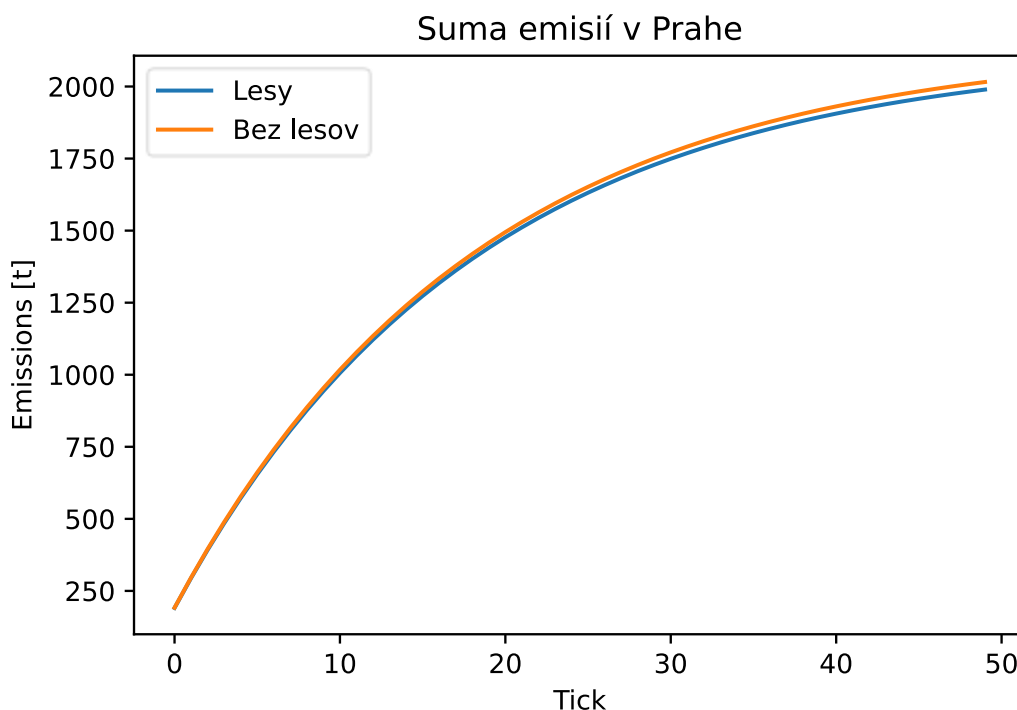
Parametre programu: 50 iterácií, Vietor : žiadny

Vizualizácia:

Graf 1. Lesy



Grafy:



Interpretácia výsledkov :

Z výsledkov tohto experimentu môžeme usúdiť, že lesy/parky majú značne pozitívny dopad na lokálnu čistotu vzduchu, avšak v globálnom merítku je pri nedostatku priestoru na výsadbu lesov v mestách dopad minimálny.

5.3 Experiment č.3 – vypnutie polovice fabrík na 12tickov (simulácia dňa a noci)

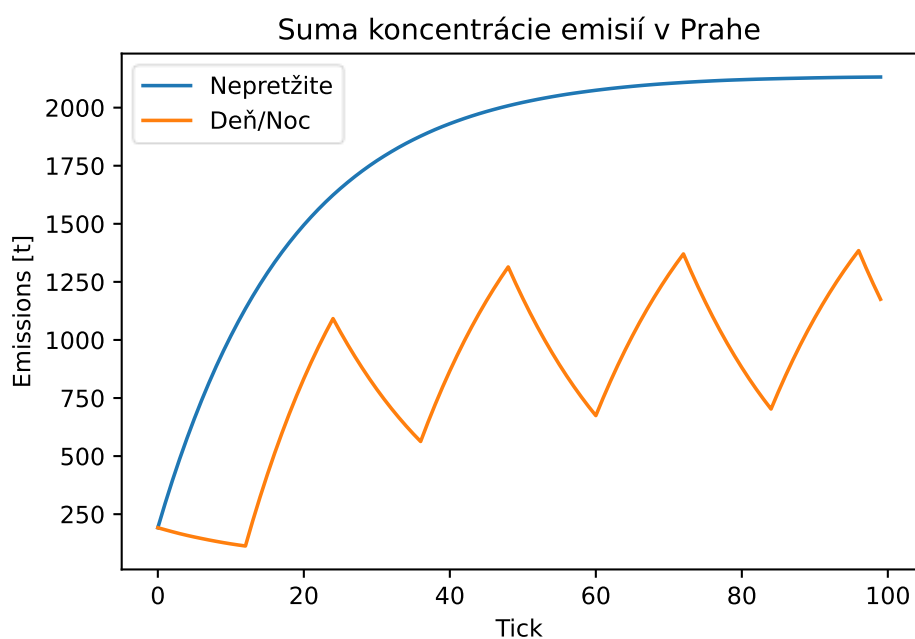
Vstupy: DS 30, začíname nocou

Parametre programu: 100 iterácií, Vietor : žiadny, vypnutie polovice fabrík na 12h
(spaľovňa sa vypína, Radotín nie)

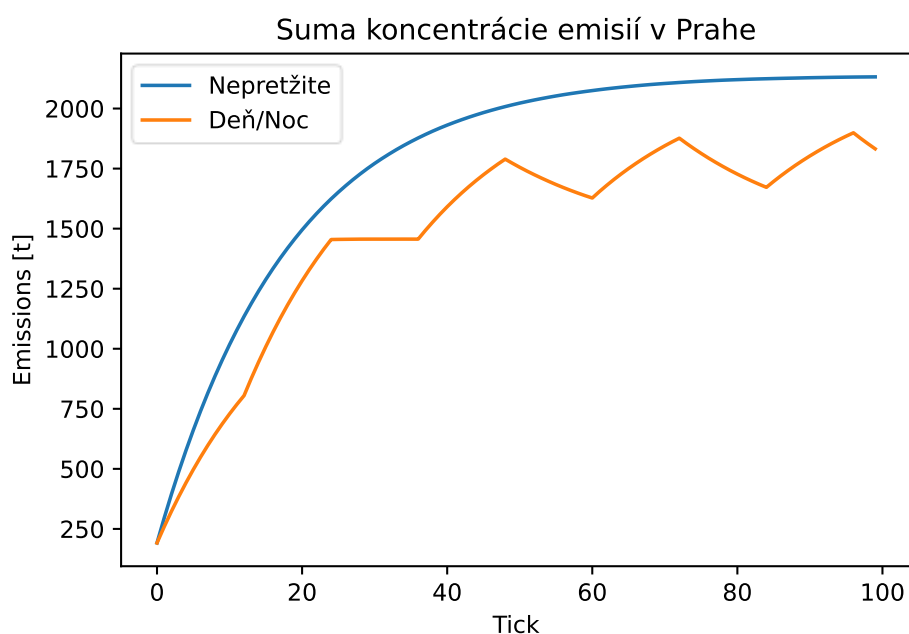
Vizualizácia:

[Video1](#) [Video2](#) [Video3](#)

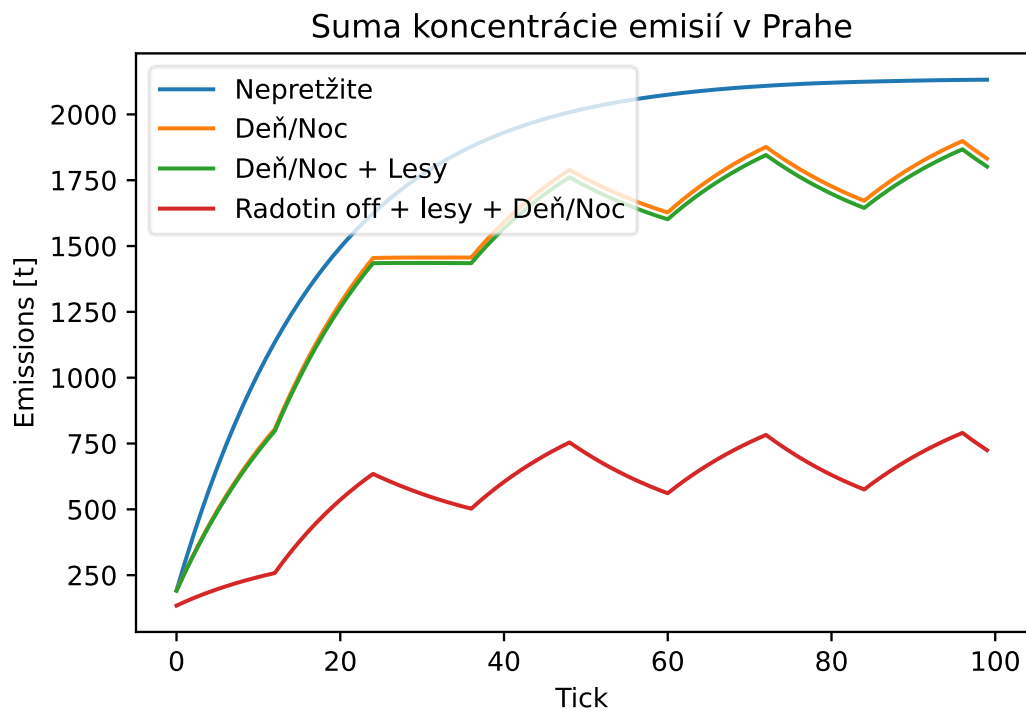
Grafy:



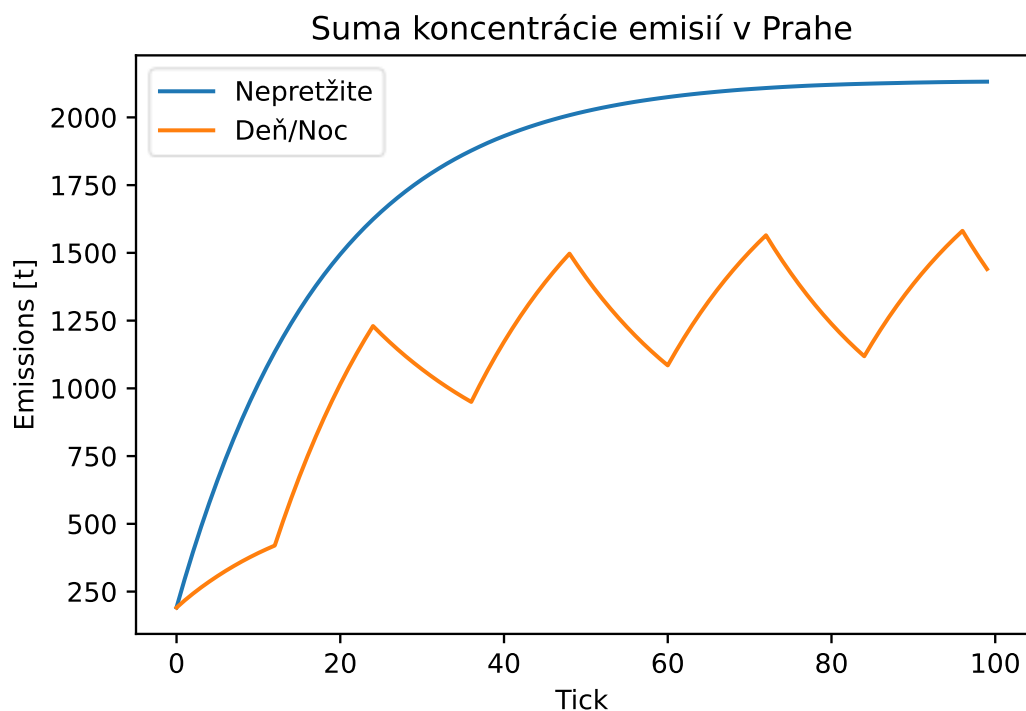
Graf 1. : Vypnutie všetkých fabrík na 12h



Graf 2. : Vypnutie polovice fabrík na 12h



Graf 3. : Vplyv Radotínu



Graf 4. : Vypnutie druhej polovice fabriek na 12h (zahŕňa vypnutie Radotínu na 12tickov)

Interpretácia výsledkov :

V grafe 1. vidíme pokles preto, že začíname nocou (koncentrácia sa začne znižovať). Ak odstavíme polovicu fabriek cez noc sa koncentrácia emisií zmenší približne 15%. Cez deň môžeme pozorovať zníženú koncentráciu, keďže cez noc fabriky nepracovali. V grafe 3. znova vidíme vplyv cementárne. Pri generovaní grafu 4. sme vypli druhú polovicu tovární na 12h, zahŕňajú aj vypnutie Radotínu (viď link na video).

6. Zhrnutie simulačných experimentov a záver

Experimentami boli zistené dopady rôznych opatrení na celkovú alebo lokálnu koncentráciu škodlivín v mestách (konkrétne v Prahe). Najefektívnejším spôsob je obmedzenie emisií najväčších tovární, tj. použitie nových technológií, ktoré sú zamerané na zníženie emisií (zníženie emisií o 33%), alebo zníženie výroby (doby výroby, zníženie koncentrácie škodlivín v priemere o 15%). Výsadba lesov sa ukázala ako efektívna metóda na zníženie emisií v lokálnom merítku (v priemere pokles koncentrácie o 35%). Takýto prístup je okrem iného vhodný aj na rozšírenie voľnočasových aktivít v meste.

So znížením emisií prichádza lepšia kvalita života obyvateľov, spomalenie globálneho otepľovania a rozšírenie živočíšnej biodiverzity.

Okrem emisií z tovární existujú aj emisie z iných častí priemyslu, ktoré tento model nezachytáva. Parížska klimatická dohoda rieši dosiahnutie klimatického cieľu a práve takýto model môže dopomôcť k jeho dosiahnutiu.

Poznámka : Celá sada DS 30 je v zložke data (súbor `indexes.csv`), fabriky sú zobrazené na mape Prahy v zložke doc (súbor `prague_map_top_30.png`).

7. Bibliografia

- [1] who.int. Ambient (outdoor) pollution [online], [cit. 2022-12-03].
Dostupné na: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [2] eea.europa.eu. Premature deaths due to air pollution continue to fall in the EU, more efforts needed to deliver a toxic-free environment [online], [cit. 2022-12-03].
Dostupné na: <https://www.eea.europa.eu/highlights/premature-deaths-due-to-air>
- [3] enviwiki.cz. REZZO [online], [cit. 2022-12-03].
Dostupné na: <https://enviwiki.cz/wiki/REZZO>
- [4] opendata.praha.eu. Vyjmenované stacionární zdroje znečišťování ovzduší - REZZO 1 [online], [cit. 2022-12-03].
Dostupné na: https://opendata.iprpraha.cz/CUR/OVZ/OVZ_REZZO1_b/WGS_84/OVZ_REZZO1_b.json
- [5] PERINGER, P. – HRUBÝ, M.: Modelování a simulace, slide 208-215 [online], [cit. 2022-12-03].
Dostupné na: https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/496048/mod_resource/content/1/IMS.pdf
- [6] KROŠLÁK, Ľubomír. 2011. Modely rozptylu škodlivín v ovzduší. [S.l.: s.n.]. Diplomové práce. Slovenská poľnohospodárska univerzita (Nitra, Slovensko), Technická fakulta, Katedra fyziky, 2011. 71s.
Dostupné na: <http://crzp.uniag.sk/Prace/2011/K/63D1A58EE1E448FBAE92CEC02EBE06B4.pdf>
- [7] Moore neighborhood [online], posledná aktualizácia 23 Jún 2022 01:15 (UTC). [cit. 2022-12-03], Wikipédia.
Dostupné na: https://en.wikipedia.org/wiki/Moore_neighborhood
- [8] HABINGABWA M. E. N – NDAHAYO F. – BERTSSON F. 2012. Air Pollution Tracking using PDEs. In: Rwanda Journal, Volume 27 Series C, 2012: Mathematical Sciences, Engineering and Technology. ISSN 1014-4874.
Dostupné na: <https://www.ajol.info/index.php/rj/article/view/80085>
- [9] ecotree.green. How much CO2 does a tree absorb? [online], [cit. 2022-12-03].
Dostupné na: <https://ecotree.green/en/how-much-co2-does-a-tree-absorb>
- [10] nps.gov. Air Pollution Removal by Urban Forests [online], [cit. 2022-12-03].
Dostupné na: <https://www.nps.gov/articles/000/uerla-trees-air-pollution.htm>
- [11] nhsforest.org. How many trees per hectare? [online], [cit. 2022-12-03].
Dostupné na: <https://nhsforest.org/how-many-trees-can-be-planted-hectare/>
- [12] Praha [online], posledná aktualizácia 5. október 2022, 20:23. [cit. 2022-12-03], Wikipédia.
Dostupné na: <https://sk.wikipedia.org/wiki/Praha>
- [13] ec.europa.eu. Glossary:Carbon dioxide equivalent [online], [cit. 2022-12-03].
Dostupné na: https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Glossary:Carbon_dioxide_equivalent
- [14] Fickove zákony[online], posledná aktualizácia 13. november 2020, 07:48. [cit. 2022-12-03], Wikipédia.
Dostupné na: https://sk.wikipedia.org/wiki/Fickove_z%C3%A1kony
- [15] faktaoklimatu.cz. Jakou roli hrají emise CO₂ z výroby cementu v klimatické změně? [online], [cit. 2022-12-04].
Dostupné na: <https://faktaoklimatu.cz/explainery/emise-vyroba-cementu>