

Budování městské senzorové sítě pro hodnocení kvality ovzduší a expozice obyvatel v Brně

Ondřej Mikeš, Simona Šatková, Michal Maliszewski
RECETOX, Masarykova univerzita

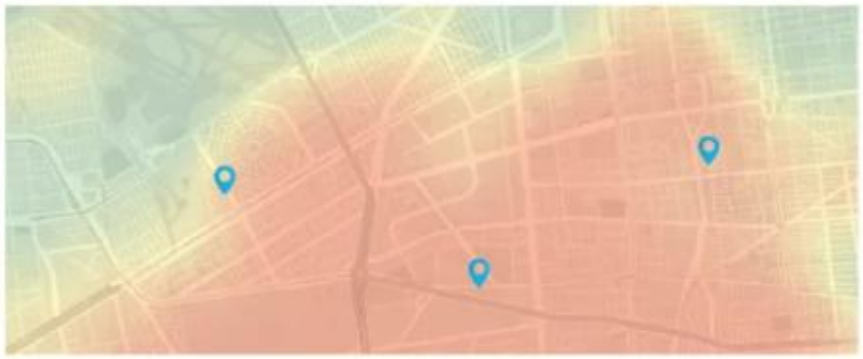
DTRIP4H PROJEKT · BRNO LIVING LAB

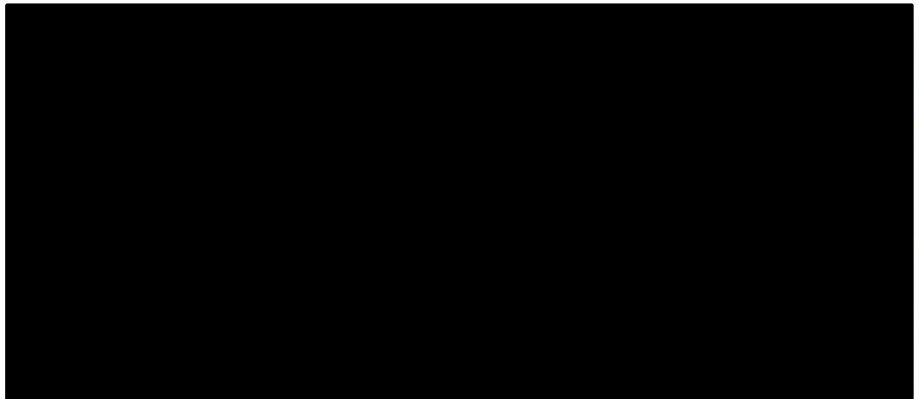
XII. ČESKO-SLOVENSKÁ KONFERENCE DOPRAVA, ZDRAVÍ A ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ · LEDNICE · 22–23. 9. 2026

Motivace

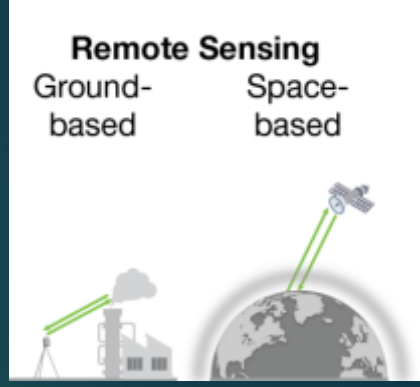
- Prostorová heterogenita
  Koncentrace se liší i na vzdálenosti stovek metrů
- Pohyb obyvatel
  Lidé se pohybují mezi různými mikroprostředími — domov, ulice, doprava, práce
- Nedostatečné pokrytí
  Referenční stanice jsou příliš řídké
- Nízkonákladové senzory
  Umožňují hustší pokrytí a realističtější popis expozice







Měřící techniky



Referenční

- Drahé (>15,000 Euro)
- Přesné a spolehlivé
- Regulatorní
- Vyžadují profesionální obsluhu
- Pravidelný servis

Low-cost senzory

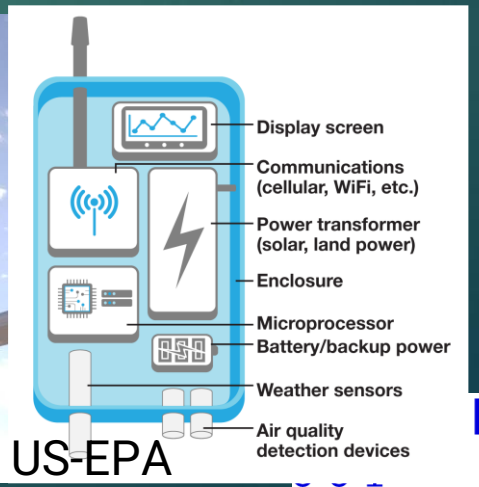
- Relativně levné (50-4,000 Euro)
- Méně přesné a spolehlivé
- Citizen science
- Jednoduší manipulace
- Mobilní
- Nutná častá kalibrace


George McCaa, U.S. Bureau of Mines









RECETOX DTRIP4H BRNO LIVING LAB

Výběr senzorů

Kritéria výběru

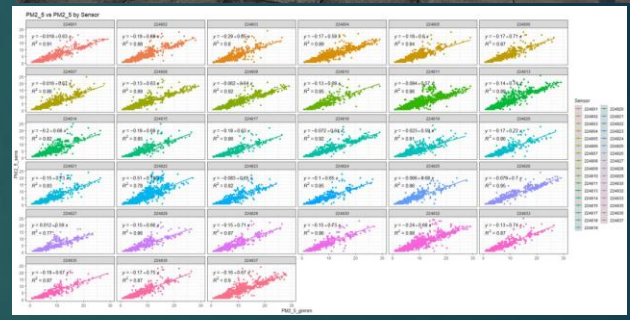
- kvalita dat,
- stabilita měření,
- dálková správa,
- cena,
- „servisovatelnost“,
- možnost dlouhodobého provozu.

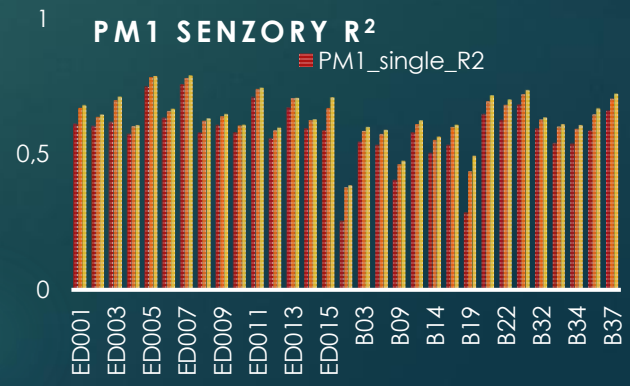


Ověření výkonu senzorů

- **Ověření přesnosti**
  Detekce systematických chyb a odchylek od referenčních hodnot, identifikace nefunkčních zařízení
- **Kalibrační modely**
  Vývoj korekcí specifických pro daný přístroj a lokalitu
- **Vliv prostředí**
  Teplota a relativní vlhkost výrazně ovlivňují odezvu optických senzorů
- **Stabilita v čase**
  Kontrola drift efektu — postupného posunu měřených hodnot
- **Unit-to-unit variabilita**
  Identifikace rozdílů mezi jednotlivými kusy stejného modelu
- **Meteorologické korekce**
  Ověření nutnosti a rozsahu korekcí na podmínky prostředí
- **EPA doporučení**
  Metriky výkonu senzorů, chybí standardizace







Jak jsme se k tomu dostali? Předchozí projekty

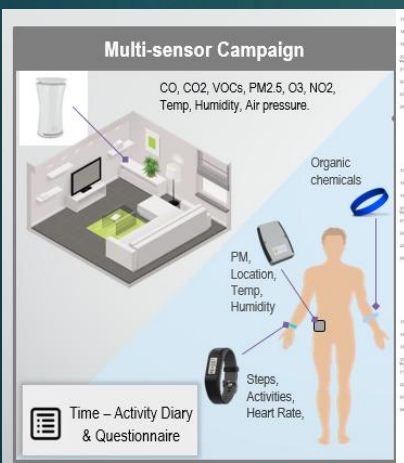
2017/2019 — ICARUS
První brněnská multi-senzorová studie

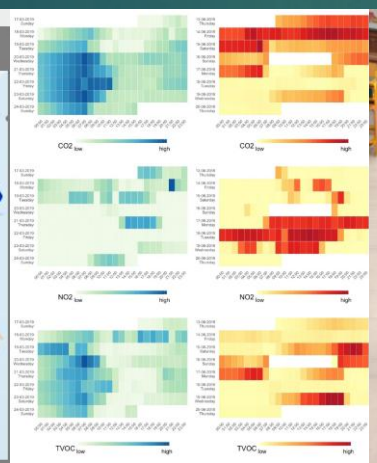
2022/2023 — ClAiMon
Monitorování vzduchu s dětmi na ZŠ

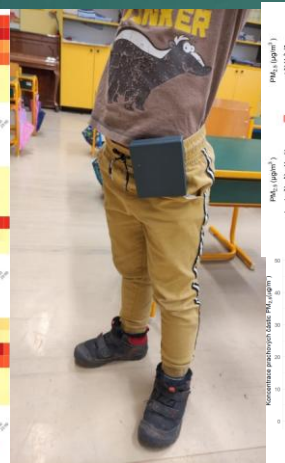
2023/2024 — AIRSENS
Vytápění domácností v malých sídlech

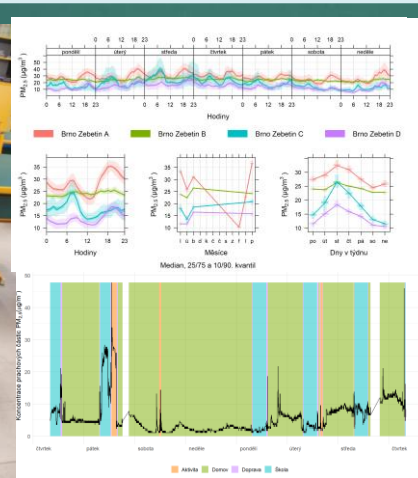
2024/2025 — Tišnovka
Potenciál regenerace staré železniční trati

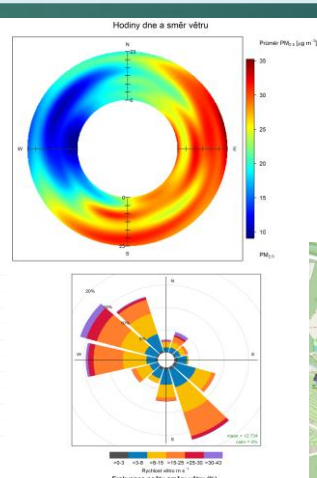
- Hlavní lekce: senzory fungují — ale potřebují kontrolu kvality, kalibraci, promyšlené rozmístění a spolupráci s uživateli dat.

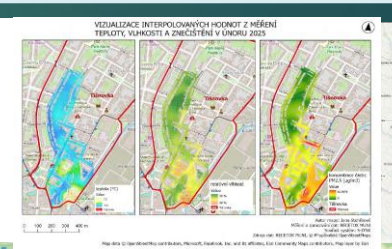


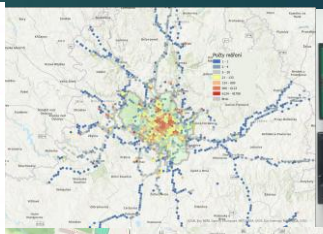






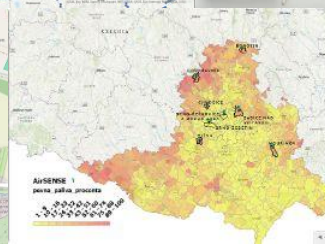












Projekt DTRIP4H

Cíl projektu

Projekt DTRIP4H si klade za cíl vytvořit komplexní datovou infrastrukturu pro **digitální dvojče města Brna**. Jde o propojení více datových vrstev do jednoho analytického rámce, který umožní hodnotit environmentální expozice a zdravotní dopady ve vysokém rozlišení.

Kvalita ovzduší

Hustá senzorová síť a ML predikce

Doprava

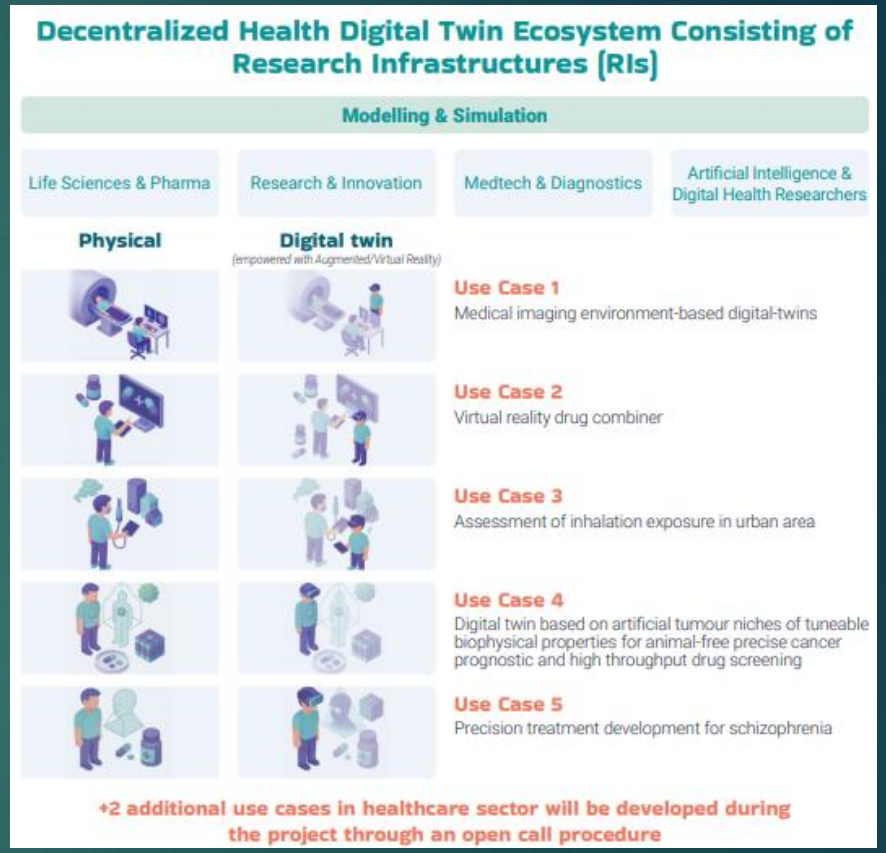
Intenzity, průjezdnost, emise

Zelená infrastruktura

Prostorová analýza zeleně a jejího vlivu

Pohyb obyvatel

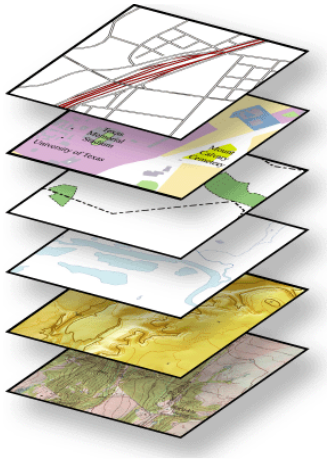
Agentní modely expozice



Návrh městské sítě

Využili jsme:

- intenzity dopravy,
- hustotu obyvatel,
- zeleň,
- využití území,
- citlivé budovy (ZŠ)
- referenční stanice,
- váženou vzdálenost sítě







Spolupráce s městem – Brno Living Lab

Síť nevznikala pouze akademicky

Po diskuzích s:

- Odborem životního prostředí,
- Odborem dopravy,
- dalšími partnery města (TSB),

byla síť upravena tak, aby plnila i potřeby budoucího rozhodování.

Například:

- prostředí kolem základních škol,
- školní mobility,
- dopravních opatření,
- plánování zelené infrastruktury.

BRNO LIVING LAB

www.brnolivinglab.cz

Vývoj ML modelu pro kvalitu ovzduší

Vstupní datové zdroje

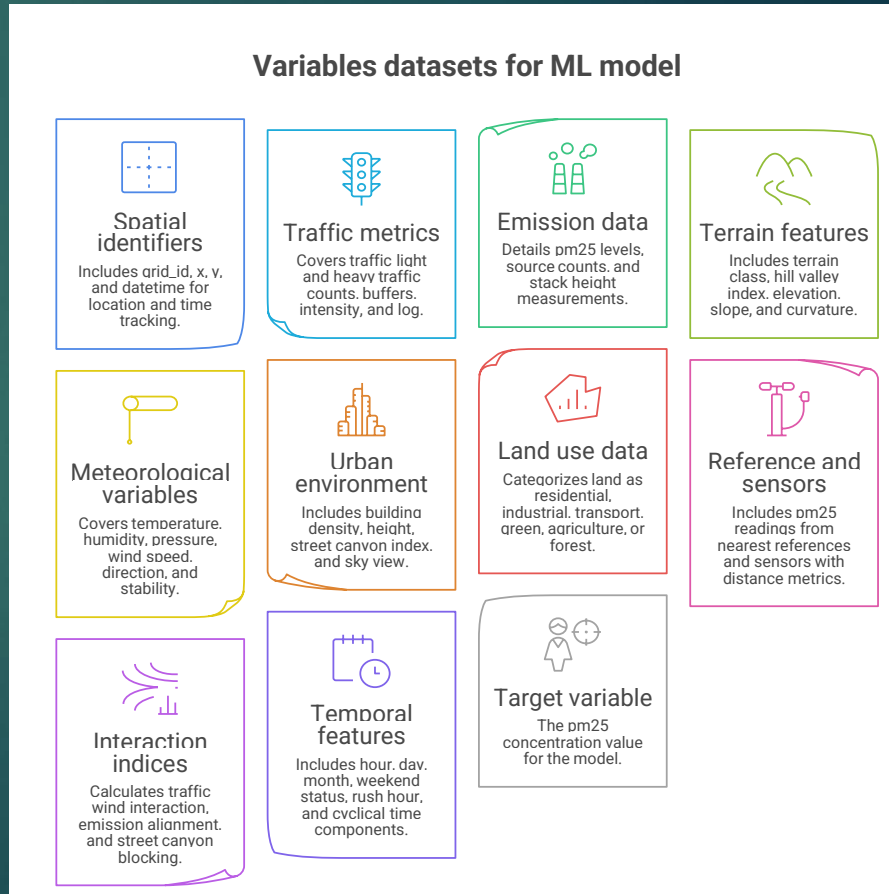
- Referenční monitorovací stanice ČHMÚ ($PM_{2.5}$)
- Síť statických a mobilních senzorů
- Meteorologická data (ERA5, CERRA, lokální měření)
- Regionální modely kvality ovzduší (CAMS)
- Dopravní data a intenzity provozu
- 3D zástavba, využití území, terén a zeleň
- Emisní inventury
- Populační a socio-demografická data

Testovaný modelový přístup

- Harmonizace a integrace heterogenních dat
- Tvorba prostorových a časových prediktorů
- Statistické a geostatistické modely (kriging)
- Strojové učení (XGBoost, Random Forest)
- Pokročilé prostorově-časové modely (INLA-SPDE)
- Kvantifikace nejistot a validace vůči nezávislým datům

Technologická základna

- GitHub DT_BRNO pipeline
- PostgreSQL/PostGIS
- Reprodukovatelný workflow pro e-INFra CZ



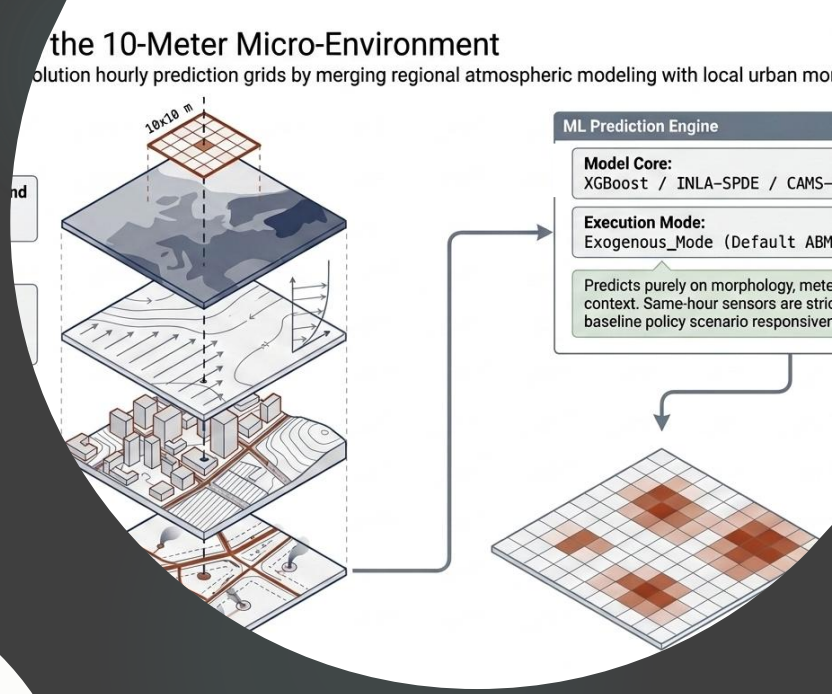
ML model

- Integrace historických environmentálních dat
- Vývoj a testování modelů $PM_{2.5}$ ve vysokém rozlišení
- Příprava systému pro průběžné učení ze senzorových dat

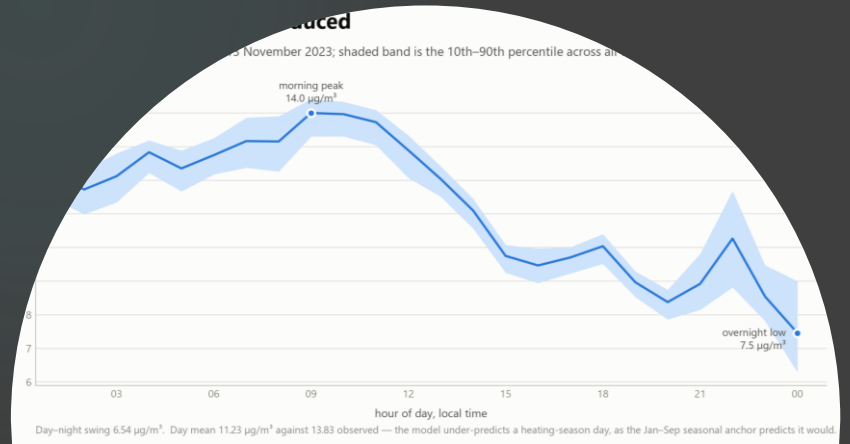
Následuje:

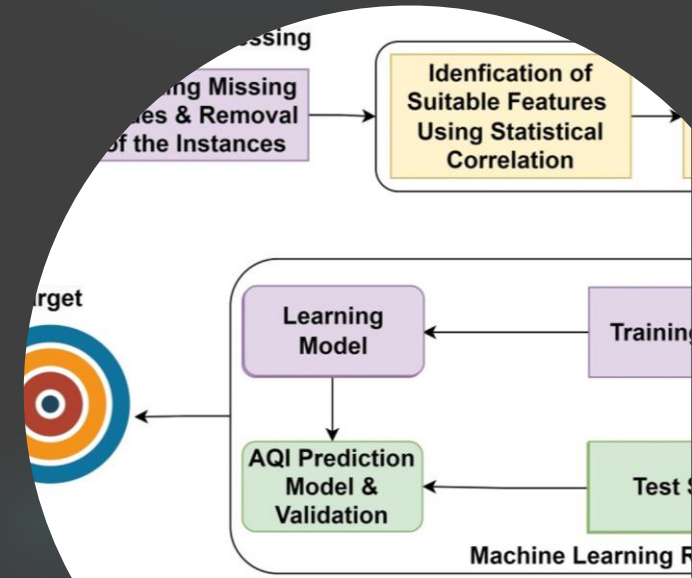
- Zapojení nové senzorové sítě
- Zpřesnění predikcí v prostoru a čase
- Simulace expozice obyvatel
- Integrace do digitálního dvojčete a ABM modelů







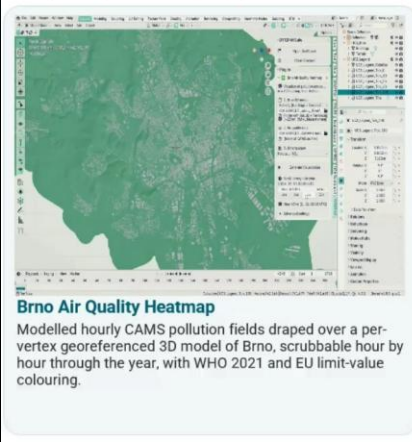




Vizualizace– AR/VR

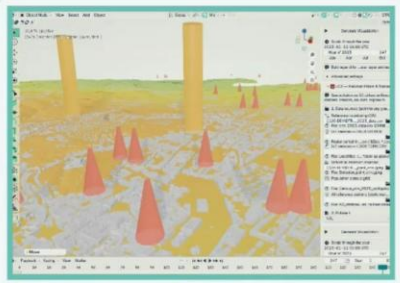
- Ve spolupráci s partnerem METRO je vyvíjen VR modul digitálního dvojčete, který umožní prostorovou vizualizaci dat o kvalitě ovzduší přímo v 3D modelu města Brna
  - Komunikace s veřejností
  - Podpora rozhodování
  - Výukový nástroj a osvěta

Helsinki Metropolia University of Applied Sciences



Brno Air Quality Heatmap

Modelled hourly CAMS pollution fields draped over a per-vertex georeferenced 3D model of Brno, scrubbable hour by hour through the year, with WHO 2021 and EU limit-value colouring.



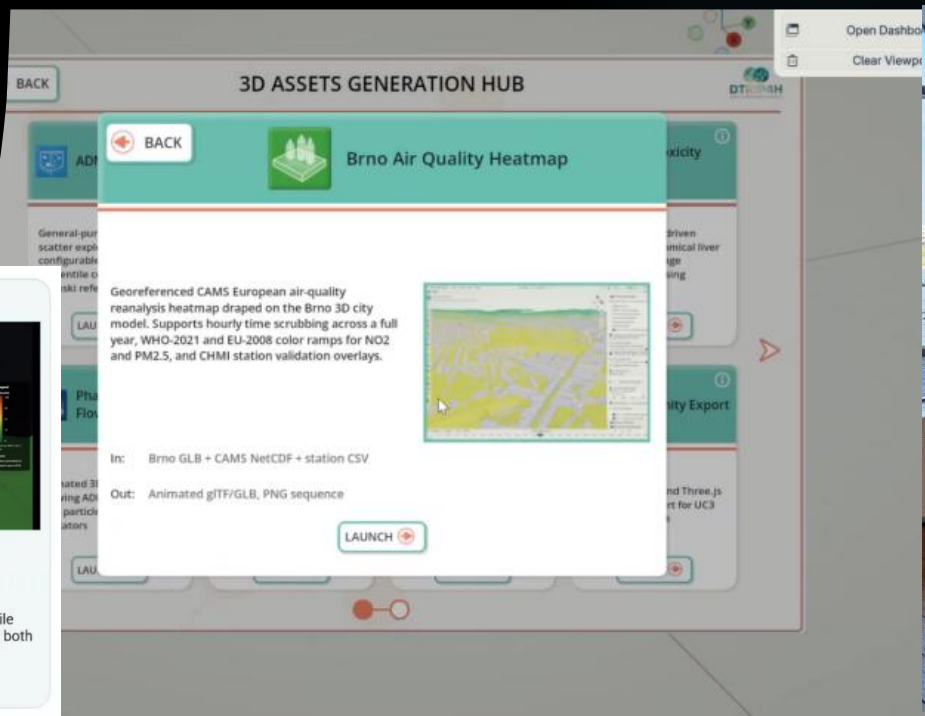
Pollution Pillars and Stations

Monitoring stations, sensors, emission sources and census data as animated 3D objects at their real geographic positions; pillar height and colour track each station's hourly value.

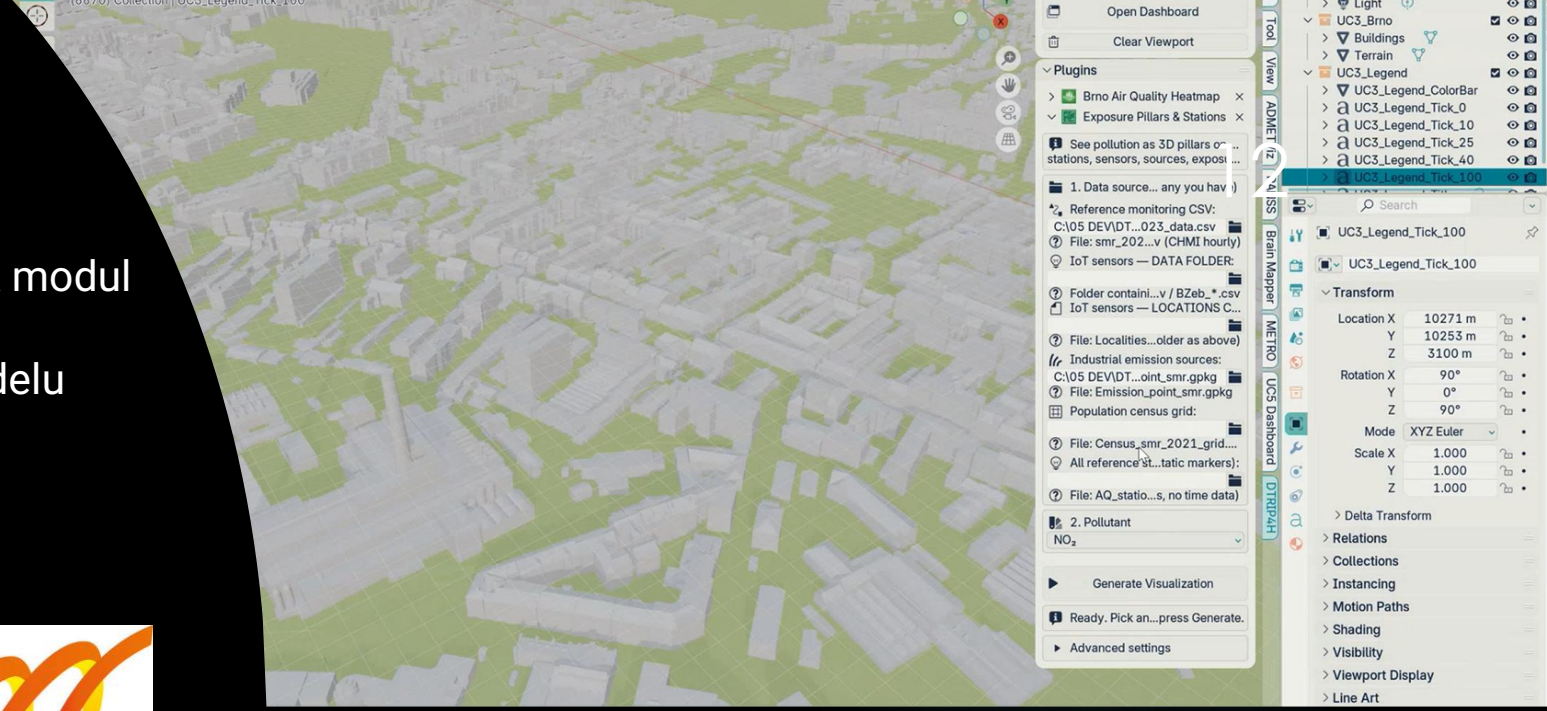


Export to Unity and Web

Packages the assembled scene as a georeferenced glTF/GLB with a baked animation track, plus a single-file Three.js viewer with a time slider synchronised across both layers, shown here running in a browser.







Plány a další směřování

Využití naměřených dat

01 Data ze senzorové sítě budou tvořit páteř dalšího výzkumu i praktických aplikací pro město Brno a jeho obyvatele.

Mapování koncentrací

02 Prostorové mapy $PM_{2.5}$ (a dalších polutantů) ve vysokém rozlišení pro celé Brno

Trénování ML modelů

03 Kontinuální zpřesňování predikčních modelů pomocí nových senzorových dat, testování scénářů

Agentní modely (ABM)

04 Propojení s modely pohybu obyvatel pro realistickou simulaci individuální expozice

Sub-studie: předškolní prostory

Specializovaná měření v okolí základních škol a analýza expozice nejmenších dětí

Rozšíření sítě a nové polutanty

Aktuálně probíhá testování nových senzorů pro měření NO_2 a dalších plynných polutantů, které dosud nebyly součástí sítě.

Nové senzory NO_2

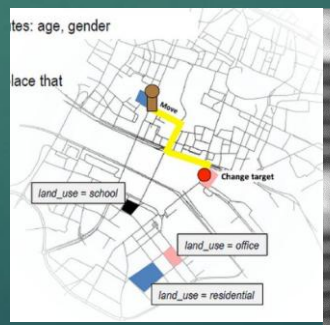
Testování a validace senzorů pro plynné polutanty

Rozšíření sítě

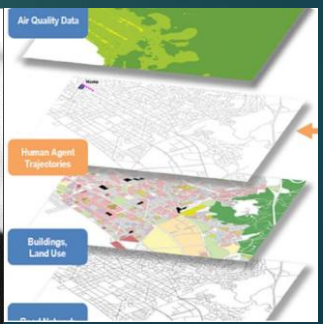
Přidání dalších lokalit na základě výsledků první fáze

Mezinárodní spolupráce

Sdílení metodiky a dat s partnerskými městy v EU







Závěr

Výhody nízkonákladových senzorů

Převážně lepší výkon při detekci menších a zdravotně nebezpečnějších částic ($PM_{2.5}$). Hustší prostorové pokrytí než tradiční referenční sítě.

Nutná opatrnost

Senzory jsou citlivé na environmentální podmínky — teplotu a relativní vlhkost. Bez kalibrace a kontroly kvality jsou jejich data nespolehlivá.

Podpora pro strojové učení

Hustá senzorová síť doplňuje monitorovací stanice a poskytuje trénovací data pro ML modely predikce kvality ovzduší ve vysokém rozlišení.

Navazující výzkum

Na etablovanou síť navazují sub-projekty zaměřené na citlivé skupiny. Probíhá také testování nových senzorů pro rozšíření měřených polutantů.



RECETOX, Masarykova univerzita · DTRIP4H · Brno Living Lab
Ondřej Mikeš, Simona Šatková, Michal Maliszewski
ondrej.mikes@recetox.muni.cz