

Metodika tvorby kooperativních digitálních dvojčat v prostředí Dopravy 4.0

JAN PŘIKRYL, ROMAN DOSTÁL, TOMÁŠ APLETUAER, LUBOMÍR ŠEMBERA,
VÁCLAV KRUMPHANZL

Autorský kolektiv:

Dr.-techn. Ing. Jan Přikryl, ČVUT FD

Ing. Roman Dostál, Ph.D., SmartPlan s.r.o

doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D., VUT FAST

Ing. Lubomír Šembera, PATRIC a.s.

Ing. Václav Krumphanzl, TSK Praha a.s.

Kontakt: projekty@fd.cvut.cz



Tento dokument vznikl za podpory Technologické agentury ČR v rámci projektu CK02000118 „Dopravní digitální dvojče Evropská“.

Obsah

1	Úvod	3
2	Práce s dokumentem.....	4
2.1	Jak s dokumentem pracovat, co od dokumentu očekávat.....	4
2.2	Identifikace a popis cílových skupin	4
2.3	Stakeholdeři.....	5
3	Co je digitální dvojče	5
3.1	Co je digitální dvojče (koncept), jak funguje a proč jej vytváříme a k čemu je dobré?	5
3.2	Rozdíl mezi modelem a digitálním dvojčetem	9
3.3	Možnosti fyzické realizace dopravního digitálního dvojčete	11
3.4	Replikovatelnost a otevřenost popisovaného řešení.....	13
3.5	Odhad pracnosti	13
4	Metodika	15
4.1	Stanovení cílů a způsobů použití	16
4.2	Geometrický model	17
4.3	Modalita (volba dopravních módů).....	19
4.4	Modely dopravního chování.....	20
4.5	Pasportizace dopravně-inženýrských dat.....	22
4.6	Napojení dat na dílčí modely	26
4.7	Kalibrace a validace dopravního dvojčete jako celku.....	28
4.8	Konstrukce scénářů pro demonstraci cílů z 4.1 a příprava modelu pro “co když”	30
4.9	Extrakce KPIs / srovnání / ekvalizér.....	32
4.10	Jak pracovat s výstupními daty.....	33
	Checklist	36
5	Matice cílů a potřebných dat	37
6	Literatura	38
Příloha A	Příklad dopravního digitálního dvojčete	40
A.1	Stanovení cílů	40
A.2	Geometrický model	43
A.3	Modalita	45
A.4	Modely dopravního chování.....	46
A.5	Pasportizace dopravně-inženýrských dat.....	47
A.6	Napojení dat na dílčí modely	60
A.7	Kalibrace modelu.....	63
A.8	Konstrukce scénářů pro demonstraci cílů	67
A.9	Extrakce KPI / srovnání / ekvalizér	67
A.10	Práce s výstupními daty.....	67
Příloha B	Role supervizora a dalších zaměstnanců objednatele.....	68

1 Úvod

Metodika tvorby dopravních digitálních dvojčat poskytuje přehledný návod pro investory a ostatní osoby zainteresované na tvorbě těchto pokročilých systémů pro podporu městské mobility. Zároveň je nástrojem pro městské a regionální samosprávy k posouzení těchto záměrů například v případech projektových či dotačních žádostí.

Dopravní digitální dvojče představuje pokročilý, daty řízený virtuální systém, jenž umožňuje lepší pochopení a ovládání složitého dopravního prostředí ve městech a regionech s důrazem na lidský faktor. Tento systém popisuje chování dopravní infrastruktury ve vybrané lokalitě a funguje paralelně se skutečným světem: během své činnosti shromažďuje a předzpracovává data o dopravní situaci, provádí krátkodobou predikci vývoje dopravy a na základě speciálně sestavených algoritmů tuto predikci adaptuje na budoucí dopravní data. Uživatelům takový systém umožňuje ve virtuálním prostředí a reálném čase sledovat dopravní situaci a vyhodnocovat vlivy možných dopravních opatření a politik (odpovídat na zadání typu „co kdyby“), a to i zpětně.

Pro potřeby přípravy digitálního dvojčete je možné definovat tři separátní skupiny:

- *Zpracovatel*: subjekt, který digitální dvojče vytváří pro objednatele
- *Objednatel* zastoupený svým *supervizorem*: samospráva, státní správa, státní či městský podnik a podobně
 - o Supervizor je níže často užívaný termín a zahrnuje množinu pracovních pozic a zodpovědností (zodpovědný pracovník objednatele, externí odborník objednatele, úředník, ...)
- *Stakeholder*: množina subjektů třetích stran, které mohou ovlivnit dílo a jeho využití či vstupy a podklady

Tento dokument nabízí strukturovaný manuál, jak projekt dopravního digitálního dvojčete naplánovat, jaké základní kroky jsou třeba k jeho realizaci a jak by mělo probíhat vyhodnocení funkce celého systému. Tento proces je rozdělen do 10 kroků, jež mají jednotnou strukturu udávající obecná doporučení, možná úskalí a rizika, a v neposlední řadě vhodné kroky pro supervizora jako zástupce objednatele, jimiž může objednatel ze své strany hodnotit, zda daný systém bude plnit funkci, ke které je konstruován.

2 Práce s dokumentem

2.1 Jak s dokumentem pracovat, co od dokumentu očekávat

Ambicí této metodiky je, aby naplňovala potřebu po základní opoře pro všechny subjekty podílející se na zpracování projektů digitálních dvojčat v dopravě. Tato metodika si neklade za cíl vytvořit podrobnou dokumentaci, která by krok za krokem popisovala jediný možný způsob, jak zkonstruovat digitální dvojče dopravního systému od samotného začátku až po jeho plný provoz. Taková dokumentace by byla podle našeho názoru velmi restriktivní z pohledu zvoleného technického řešení. Cílem tohoto textu je poskytnout čtenáři metodická vodítka a obecně popsat postup tvorby dopravních digitálních dvojčat v dopravě, podporující otevřená řešení a poskytující základní přehled o stěžejních krocích a kontextuální informace tak, aby bylo možné podobný projekt připravit při dodržení nezbytné úrovně kvality.

Hlavní část dokumentu tvoří následující kapitoly:

- 3 Co je digitální dvojče
 - o Jedná se o zmiňovaný kontext. V této kapitole je uveden teoretický úvod nezbytný k porozumění předmětu této metodiky, kterým je *digitální dvojče dopravního systému*.
- 4 Metodika
 - o Kapitola je dělena do 10 hlavních částí, popisujících základní pracovní kroky při tvorbě dopravního digitálního dvojčete v následující struktuře:
 - K čemu tento krok slouží?
 - Postup prací, obecná doporučení
 - Úroveň / standard kvality
 - Úskalí, na co si dát pozor
- 5 Matice cílů a potřebných dat
 - o Upřesňuje, jaká data jsou nezbytná pro naplnění specifických cílů podle účelu konstrukce digitálního dvojčete, jenž se může případ od případu významně lišit rozsahem i kompozicí.
- Příloha A – Příklad dopravního digitálního dvojčete
 - o Demonstrace 10 kroků, uvedených v kapitole 4, na příkladu tvorby digitálního dvojčete pražské Evropské třídy
- Příloha B – Role supervizora
 - o Pro stejné kroky jako v kapitole 4 Metodika je zde uvedeno, jaká je role supervizora zastupujícího objednatele.

Ve výše uvedeném výčtu byly vynechány některé části tohoto dokumentu. Neznamená to, že by nebyly důležité – nejsou však zásadní pro pochopení, jak s dokumentem pracovat.

2.2 Identifikace a popis cílových skupin

Metodika byla vypracována s ohledem na dvě důležité cílové skupiny: zpracovatele a objednatele (typicky zaměstnance veřejné sféry).

Hlavní cílovou skupinu tohoto dokumentu tvoří **zpracovatelé**, resp. odborníci, kteří budou digitální dvojče vytvářet. Jedná se o výzkumníky, inženýry, datové analytiky či urbanisty, jejichž odborné znalosti budou mít zásadní význam při vytváření spolehlivé a efektivní digitální repliky vybraného dopravního systému. Tato metodika jim poskytne návod, jak zmapovat nezbytné kroky, které musí být provedeny a ujistit se, že postupují v souladu s příklady dobré praxe. Budou mít k dispozici také postup, který bude jednodušší na kontrolu ze strany objednatele.

Doplňkovou cílovou skupinou jsou **zaměstnanci veřejné sféry** (zaměstnanci objednatele). Objednatel jednak prostřednictvím svého supervizora dohlíží na tvorbu digitálního dvojčete, jeho zaměstnanci ale budou také pracovat s výstupy, respektive s klíčovými indikátory (KPI – key performance indicator – klíčový ukazatel výkonnosti), které celý systém poskytuje. Dopravní digitální dvojče těmto uživatelům poskytne data v reálném čase a prediktivní analýzy, které potřebují k přijímání informovaných rozhodnutí. Umožní jim identifikovat trendy, potenciální úzká místa a efektivně řídit nepředvídané události, čímž zajistí plynulejší dopravu a bezpečnější ulice pro naše občany. V průběhu vzniku dopravního digitálního dvojčete je sice tato skupina zastoupená především supervizorem, i tak je ale třeba aby ostatní dotčení zaměstnanci se byli schopni účastnit procesu tvorby a rozuměli výstupům celého systému.

Účelem tohoto textu je poskytnout oběma skupinám jasnou představu o konstrukci, provozu, řízení a rozvoji dopravního digitálního dvojčete a podpořit bezproblémovou spolupráci mezi oběma skupinami při využití možností digitálního dvojčete. Zároveň předpokládáme, že zaměstnanci veřejné sféry nevstupují do procesu přípravy a tvorby digitálního dvojčete v celém jeho trvání, ale pouze v jeho určitých částech. Jejich role je proto specifikována separátně v příloze 3 této metodiky.

2.3 Stakeholderi

Tzv. *stakeholder*, resp. *zájmová skupina* či *dotčený subjekt* rovněž tvoří významnou množinu subjektů, které vstupují do celého procesu. Není však možné je označit přímo za cílové skupiny. Jedná se o soubor institucí, organizací či uskupení, které mohou nějakým způsobem ovlivnit práci s výstupy z digitálního dvojčete či průběh jeho zpracování. Níže je uveden základní výčet příkladů stakeholderů, kteří by měli být zapojováni do přípravy (kategorizováni dle jejich role):

- Město či městská část (v případě, že se nejedná o objednatele)
- Vyšší organizační složky (v případě nutnosti širšího kontextu se může jednat o kraje či Ministerstvo dopravy ČR)
- Správci infrastruktury (primárně dopravní infrastruktura, tj. správce komunikací, dopravce aj.)
- Poskytovatelé dat (mohou být dodavatelé městských institucí či samotné městské instituce, může se opět jednat o správce infrastruktury či dopravce)
- Akademická půda (pokud není zpracovatelem, může být partnerem pro supervizora)
- Integrovaný záchranný systém (v kontextu užití digitálního dvojčete může být žádoucí zapojit policii, nemocnice či hasiče) příp. městská policie

3 Co je digitální dvojče

3.1 Co je digitální dvojče (koncept), jak funguje a proč jej vytváříme a k čemu je dobré?

Digitální dvojče (Digital Twin) umožňuje získávání realistického *digitálního obrazu* (Digital Representation) dané *fyzické reality* (Physical Things), který slouží různě jak *odborníkům*, ale také *široké veřejnosti* (Human Being) pro dosažení *lepších výsledků managementu* včetně *pokročilého rozhodování* na základě všech dostupných znalostí (Crespi et al., 2022; Farsi et al., 2020). Vzniká tak kontinuální zpětná vazba mezi fyzickou realitou a jejím digitálním obrazem včetně humánních rozhodovacích zásahů, jako je například dispečerské řízení.

Pro dosažení předpokládané funkcionality digitálního dvojčete je nutný *sběr vybraných aktuálních (on-line) dat* ze sledované fyzické reality, *extrakce užitečné informace* (lokalizace dostupných dat, verifikace jejich správnosti a spolehlivosti, převedení validovaných dat do standardizovaného

formátu, atd.) a postupné vytváření znalostní báze ve formě specializovaných modelů a simulací (ověření předpokladů platnosti jednotlivých modelů a jejich použití při rozhodování, integrace různých algoritmů, atd.).

Digitální dvojče je nejčastěji vytvářeno na základě předem určených *případů užití* (Use Cases), definujících cíle, s nimiž musí být celý systém v souladu. Podle jednotlivých případů užití jsou definovány parametry dat, informací a znalostí včetně způsobu prezentace a vizualizace modelované reality zejména pro *rozhraní člověk-stroj* (HMI – Human Machine Interface), neboli *lidský faktor – digitální dvojče*.

Mezi typické případy užití digitálního dvojčete patří:

- **Pokročilá analýza historických událostí** jako *podpora pro dispečerské rozhodování* o nastalé mimořádné situaci – ve znalostním digitálním systému jsou uloženy způsoby a vyhodnocení minulých událostí a z nich plynoucích poučení. Digitální dvojče je schopno analyzovat nastalou situaci (podle on-line dat) a vyhledat podobnou situaci v historii včetně použitého řešení. Dochází tak k vazbě fyzická realita (on-line data), historické zkušenosti (digitální reprezentace podobných řešení v minulosti) a lidský faktor (rozhodnutí dispečera podle dostupných znalostí, kde může, ale nemusí využít minulé zkušenosti).
- **Aktuální řízení fyzického systému**, kdy ke každé fyzické komponentě existuje její digitální model se všemi atributy (on-line monitorování, diagnostické informace, preventivní kontroly, požadovaná údržba atd.) včetně budoucích plánovaných obměn / investic. Digitální dvojče dokáže nabídnout operátorovi *preventivní diagnostiku*, plánovat údržbu s ohledem na její efektivitu a zároveň plán *řešení možných havárií*. Jde opět o propojení digitálního modelu, fyzické reality a operátora, který díky funkcím digitálního dvojčete lépe reaguje na nastalé situace a zároveň dokáže řídit větší územní celky.
- **Strategický management obnovy fyzické reality** spočívající ve stanovení harmonogramu nutných investic pro obnovu fyzických komponent dle dostupných finančních prostředků s minimálním dopadem na provoz celého systému. Součástí řešení jsou různé *typy „co když“ scénářů*, simulací jejich dopadů na provoz systému, hledání výhodného řešení, při kterém budou tyto ztráty minimální. V tomto případě je lidským faktorem buď investor / developer, státní správa nebo veřejná samospráva nebo vlastník fyzické reality, který využívá digitální dvojče s historickými i on-line provozními daty pro pokročilé plánování a strategické rozhodování.

Podle uvedených případů užití je nutné stanovit *časovou* (minuty, hodiny, dny atd.) i *prostorovou* škálu (počet čtverečních metrů, ulice, čtvrt územní část města, město atd.) digitálního dvojčete. Danému případu užití odpovídají také použité modelovací a simulační algoritmy (mikro-simulace, makro-simulace, strojové učení, umělá inteligence atd.).

Lze předpokládat, že postupně vznikne celá *řada specializovaných digitálních dvojčat*, která budou mít schopnost mezi sebou komunikovat, predikovat budoucí vývoj, a návazných řídicích systémů, jež budou vzájemně vyjednávat a koordinovat svá dílčí rozhodnutí. Tímto způsobem je například tvořen národní program *Digitálního dvojčete Velké Británie CDBB^[1]* koordinovaný *University of Cambridge*. Dílčí projekt *Smart city* je v tomto konceptu tvořen vzájemně propojenými digitálními dvojčaty z oblasti dopravy, energetiky, průmyslu, vzdělávání atd. Digitální dvojčata jednotlivých územních celků lze mezi sebou vzájemně propojovat a vytvářet chytré regiony.

Dopravní digitální dvojče

Dopravní digitální dvojče reprezentuje dopravní subsystém obecného *digitálního dvojčete daného území*, který vytváří *digitální obraz dopravní situace* a pomocí *dopravních modelů a simulací* replikuje

způsob řízení dopravy. Lze jej proto použít například ke tvorbě doporučení pro dispečera a další aktéry při *mimořádných událostech* (nehoda, oprava infrastruktury) tak, aby byly co nejlépe dosaženy požadované *dopravně-environmentální parametry* (plynulost a bezpečnost dopravy, předdefinovaná oblast přijatelnosti environmentálních a sociálních parametrů, atd.). Dopravní digitální dvojčete může být použito i při veřejné diskusi, kdy může sloužit jako *demonstrační platforma*, na níž mohou být ukázány dopady alternativních dopravních opatření, či jako efektivní *nástroj územního plánování* (vedení města, investoři, developři). Je zřejmé, že v rámci dopravního digitálního dvojčete dochází k propojení fyzické dopravy / přepravy, její digitální reprezentace a lidského faktoru různých účastníků počínaje dopravním dispečerem, přes řidiče, chodce, konče státní správou a veřejnou samosprávou.

Výše uvedené obecné případy užití lze jednoduše zúžit na i dopravní digitální dvojčete:

- **Pokročilá analýza dopravních historických událostí** zahrnuje různé případy nehod a získané zkušenosti z jejich řešení. Mohou být použity a analyzovány situace z povodní, pandemií, oprav dopravní infrastruktury, havárií plynu nebo vody atd. Všechny historické zkušenosti mohou posloužit jako znalostní báze k nalezení správné reakce na aktuální situaci, protože lze předpokládat, že při dlouhodobém sběru dat a analýze nastalých situací, bude stále méně těch, které se ještě nikdy nenastaly. Tento způsob mimo jiné vede na posílení odolnosti (resilience) dopravy v daném území.
- **Aktuální řízení dopravy**, kdy ke každému prvku dopravní infrastruktury (dopravní řadič) existuje jeho digitální model se všemi atributy a zároveň dochází ke sběru on-line dat o pohybu různých dopravních prostředků (indukční smyčky, kamerový systém, FCD – Floating Car Data atd.) včetně jejich kategorizace (autobus, tramvaj, požární vozidlo, ambulance atd.). Dopravní digitální dvojčete umožní operátorům pomocí dopravních modelů a simulací analyzovat nastalou situaci a například pomoci při návrhu způsobu řízení dopravy v často složité a nepřehledné situaci.
- **Strategický dopravní management** umožňuje návrh harmonogramu oprav infrastruktury tak, aby se jednotlivé činnosti nedublovaly a vše bylo naplánováno s minimálními dopady na dopravní provoz. Pomocí „co-když“ scénářů lze odhadnout nárůst kongescí na určitých místech, zvýšení počtu chodců případně jiné dopady způsobené opravou. Předpokládané znalosti negativních dopadů mohou vést odpovědné instituce k zacílení úsilí na slabá místa, jejich vybavení dočasnými signalizačními zařízeními, sofistikované oslovení účastníků dopravního provozu pomocí mobilních telefonů a tím dosažení hladšího zvládnutí vzniklé situace.

Součástí dopravního digitálního dvojčete je *neustálá zpětná vazba* mezi nastalou „situací“ a detailním vyhodnocením realizovaných opatření. Je třeba se učit z nastalých chyb, aby se neopakovaly, a naopak co nejlépe využít správně provedené reakce a ty v budoucnu replikovat a stále je zdokonalovat.

Zpětná vazba mezi fyzickým dopravním systémem, jeho digitálním modelem se všemi dostupnými simulacemi doplněná lidským faktorem (zásahy dopravního dispečera, změna chování účastníků dopravního provozu atd.) je *základním význakem* dopravního digitálního dvojčete.

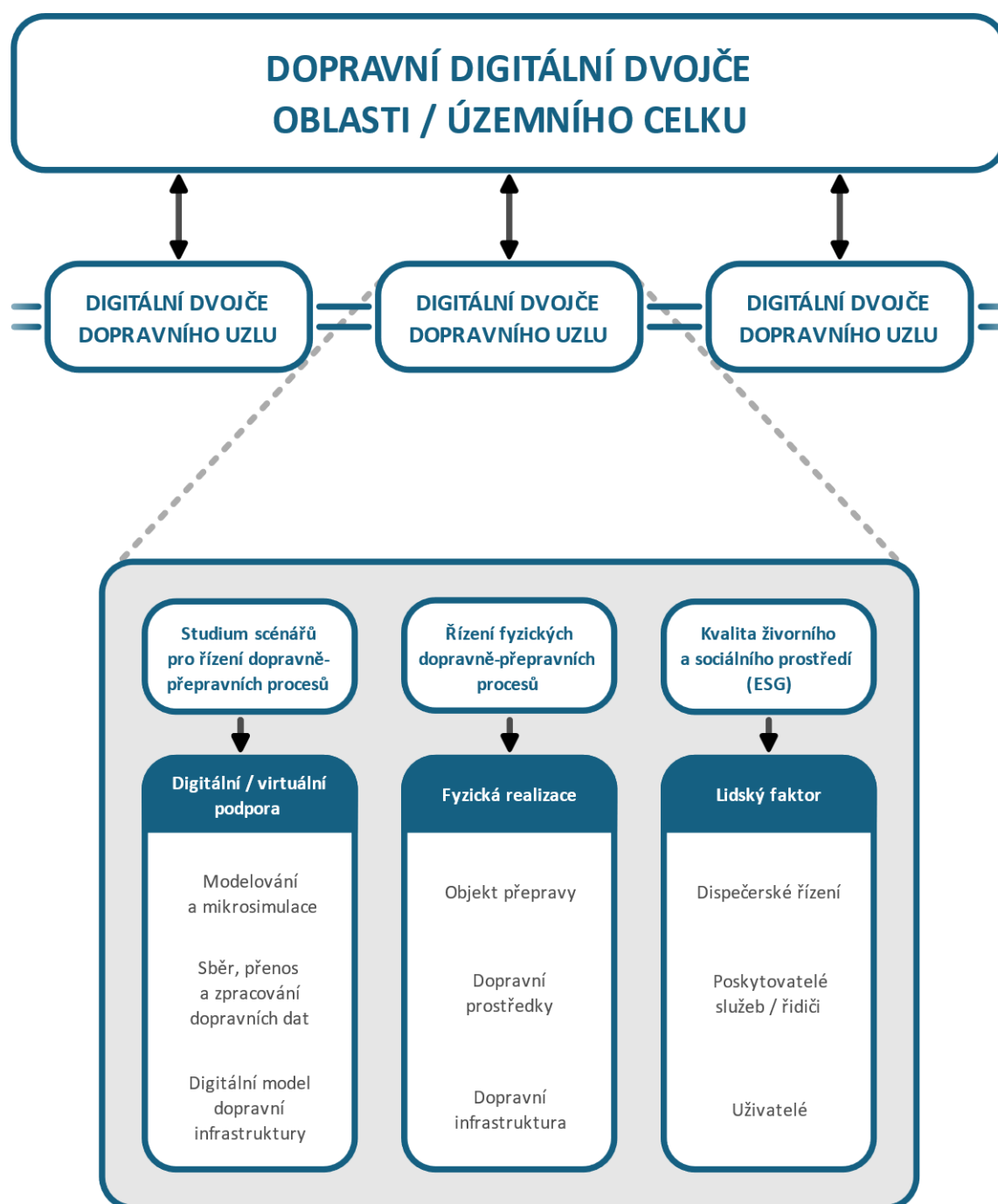
Architektura Dopravního digitálního dvojčete

Dopravní digitální dvojčete dopravního uzlu

Předpokládejme existenci dopravního digitálního dvojčete oblasti – tou může být část města, pokud se bavíme o administrativním členění (např. Praha 6), nebo logický územní celek (v angličtině se vžil název „*neighborhood*“). Dopravní digitální dvojčete oblasti / územního celku komunikuje s jednotlivými

podřízenými digitálními dvojčaty dopravních uzlů, jako jsou ulice, tunel, parkoviště, univerzitní kampus atd., kde každé z těchto digitálních dopravních dvojčat má svoji fyzickou, digitální a humánní část včetně očekávaných funkcí, jak je uvedeno na obrázku 1. U fyzické infrastruktury je to její řízení, u digitální reprezentace simulace a výběr scénářů a u humánní komponenty zlepšení kvality životního prostředí a dosažení požadovaných sociálních parametrů.

Aby mohly být tyto očekávané funkce splněny, je třeba, aby dopravní digitální dvojče zajistilo komunikaci, predikci a vyjednávání s ostatními / sousedními digitálními dvojčaty i s nadstavbovým dopravním digitálním dvojčetem oblasti / územního celku. Podle těchto možností je stanovena „oblast přijatelnosti“, v rámci, které může docházet k optimalizaci pomocí nástrojů umělé inteligence.



Obrázek 1: Dopravní digitální dvojče oblasti / dopravního uzlu a jeho tři základní komponenty.

Komponenty dopravního digitálního dvojčete dopravního uzlu

Základním subsystémem je fyzická realizace dopravně-přepravního procesu (uvedená na obrázku 1 v šedém bloku uprostřed), která je rozdělena na oblast dopravní infrastruktury, dopravních prostředků a objektu přepravy. Každá z těchto komponent poskytuje data pro digitální reprezentaci. Výsledkem je fyzické řízení dopravně-přepravního procesu dle navržených kritérií a indikátorů.

Virtuální model dopravně-přepravního procesu, zmíněný na přehledovém obrázku 1 v šedém bloku vlevo, integruje digitální mapy dopravní infrastruktury a pasporty všech fyzických komponent, zpracování verifikaci a validaci dostupných dat získaných z fyzických komponent a celou plejádu modelovacích a simulačních nástrojů zvolených dle očekávaných případů užití. Výsledkem je digitální model několika možných strategií řízení dopravy včetně očekávaných dosažených kritériálních parametrů a indexů jako podklad pro humánní rozhodování (na obrázku 1 v šedém bloku vpravo).

Lidský faktor systematicky využívá na všech úrovních dostupné informace a znalosti a provádí na základě nich sofistikované rozhodování. V některých případech pouze potvrzuje navržená řešení, v jiných situacích je jeho úloha složitější s ohledem na politické zadání, případně sociální a jiné měnící se priority.

V současné době jsou definovány tzv. ESG (Environment, Social, Governance) indikátory (ESG 2024), které přesně specifikují možné oblasti přijatelnosti pro jednotlivá území. Ambicí dopravních digitálních dvojčat by měl být management dopravy zahrnující celou řadu synergických dílčích opatření, který by byl z dopravního hlediska (doba jízdy, minimální zastavení atd.) co nejlepší, ale zároveň dopady dopravy na obyvatele daného území (Vulnerability) by měly být co nejmenší.

3.2 Rozdíl mezi modelem a digitálním dvojčetem

V technologickém a inženýrském kontextu se čtenáři dnes často setkávají s tím, že pojem „model“ stále častěji nahrazuje výraz „digitální dvojče“ bez toho, aby byly jasné vysvětleny rozdíly mezi těmito pojmy. Vysvětlíme si proto, jaký je rozdíl mezi „dopravním modelem“ a „dopravním digitálním dvojčetem“:

Dopravní model je abstraktní reprezentace dopravního systému, zařízení nebo procesu. Dopravní modely vytváříme pro pochopení, analýzu nebo předpověď chování daného dopravního systému. Tyto modely mohou být jednoduché i složité a mohou zahrnovat různé aspekty chování dopravy, jako jsou fyzikální vlastnosti, různé provozní podmínky, nebo interakce s okolním prostředím. Dopravní modely často používáme ve fázi návrhu a testování různých dopravních strategií a politik.

Digitální dvojče jde o krok dále v tom, že se jedná o *detailní digitální repliku daného dopravního systému*. Digitální dvojče nejenže modeluje fyzikální a funkční charakteristiky tohoto systému, ale také je dynamicky propojeno se svým reálným protějškem, často v reálném čase. To znamená, že digitální dvojče neustále zpracovává data z reálného světa (měřená např. prostřednictvím dopravních senzorů, nebo C-ITS zařízení), což mu umožňuje aktualizovat svůj stav, lépe předpovídat budoucí stavy nebo identifikovat potenciální problémy dříve, než dojde k jejich vzniku. Dopravní digitální dvojče lze využít nejen pro návrh a testování dopravních systémů, ale také pro monitorování, údržbu a optimalizaci chování dopravního systému. Digitální dvojče představuje živé, online rozhraní, které ukazuje, co se děje v dopravě právě teď, případně co může brzy nastat. Na rozdíl od běžných dopravních modelů, které obdobně jako mapy a plány reflektují stav v době svého vzniku, digitální dvojče se neustále aktualizuje a ukazuje aktuální situaci. Klíčovou roli v systému dopravního digitálního dvojčete hraje lidský faktor. Na rozdíl od běžného dopravního modelu předpokládá tento systém interakci s lidmi, jak uvádíme v tabulce 1.

Tabulka 1: Skupiny osob dotčené systémem digitálního dopravního dvojčete

Skupina osob	Činnosti
Dopravní dispečeré a operátoři	Mohou využívat informace pro efektivnější řízení dopravy. Systém jim poskytuje přesnější data a krátkodobé predikce, které pomáhají reagovat na aktuální situace, jako jsou nehody, poruchy infrastruktury nebo změny v provozních podmínkách.
Interakce s účastníky dopravy	Jsou informováni na základě výstupů systému na dopravní zácpy, zpoždění, o objízdných trasách.
Veřejná diskuse a územní plánování	Lze použít jako nástroj pro veřejnou diskusi a územní plánování pro scénáře typu „co kdyby“. Umožňuje zobrazit dopady alternativních dopravních opatření a může sloužit jako základ pro rozhodování města, investorů či developerů.
Operátoři	Systém poskytuje zpětnou vazbu mezi fyzickým dopravním systémem, jeho digitálním modelem a lidským faktorem. Tato zpětná vazba pomáhá učit se z minulých chyb a zlepšovat reakce na budoucí situace, což vede k posílení odolnosti dopravy.
Krizový štáb	V krizových situacích, jako jsou povodně nebo havárie, mohou být historické zkušenosti a data využity k nalezení vhodné reakce na aktuální situaci, což pomáhá rychleji a efektivněji řešit tyto události.

Rozdíly mezi dopravním modelem a dopravním digitálním dvojčetem shrnuje přehledně tabulka 2.

Tabulka 2: Rozdíly mezi dopravním modelem a dopravním digitálním dvojčetem

Dopravní model	Dopravní digitální dvojče
Představuje zjednodušenou verzi skutečné entity.	Představuje virtuální repliku entity reálného světa.
Na základě předpokladů a aproximací.	Na základě dat v reálném čase a přesných měření.
Je oddělen od skutečné entity.	Je úzce propojen s entitou reálného světa a komunikuje s ní v reálném čase.
Obvykle je statický a nemění se, pokud není ručně aktualizován.	Je dynamický a neustále aktualizovaný, aby odrazil změny v reálném světě.

Dílčí modely dopravy a jejich význam pro digitální dvojčete

V rámci digitálního dvojčete dopravního systému mohou být k simulaci událostí reálného světa kromě mikrosimulačních modelů dopravy (jako je Aimsun, PTV Vissim, SimTraffic či Eclipse SUMO) použity i modely makroskopické (například PTV Visum, PASSER, Saturn či Vista). Mikroskopický dopravní model (mikrosimulace) a makroskopický model (také strategický model) patří mezi základní nástroje dopravního plánování, jež umožňují popsat aktuální stav dopravy v širších souvislostech a také ověřit a srovnat plánované scénáře rozvoje. Tuto základní sadu rozšiřují takzvané mezoskopické dopravní modely, případně další varianty, dále multiagentní modely a celá škála matematických a systémových modelů, které simulují reálnou situaci a umožňují varianty či scénáře redukovat na sadu měřitelných ukazatelů. Všechny tyto typy modelů lze v případě potřeby kombinovat podle potřeb a

cílů daného dopravního digitálního dvojčete, ovšem základní rozdělení, se kterými se často setkáváme v praxi, představuje právě mikroskopický a makroskopický dopravní model.

Mikroskopický model si klade za cíl co nejvěrněji napodobovat detailní dopravní chování a skutečné dopravní situace včetně vzájemných interakcí účastníků provozu, tj. vozidel na silniční komunikaci, interakci s chodci, světelnými signalizačními zařízeními a dalšími případnými faktory, které vstupují do dopravního provozu. Výstupem jsou kromě konkrétních měřitelných veličin jako je průměrné zdržení, rychlost vozidel či intenzity také často videozáznamy simulovaných vozidel. Tento typ modelu je zaměřený na srovnání scénářů, které reflektují mnohdy i velmi detailní změny na úrovni geometrie vozovky, úpravy signálního plánu, doplnění přechodů a dalších drobnějších změn s cílem ověřit vliv nastavení dopravní signalizace, analyzovat bezpečnost křižovatek či při modelování dopravního chování v reakci na mimořádné události. Může však být použit i na relativně velké oblasti (například celé městské části), byť to od určitého rozsahu dopravní sítě je spíše kontraproduktivní. Mikroskopická simulace je velmi atraktivním nástrojem pro komunikaci se širokou veřejností.

Makroskopický model představuje naopak záměrně redukovanou reprezentaci dopravního systému, jež je efektivní pro strategické plánování a analýzy na širší úrovni, jako je hodnocení dopadu dlouhodobých změn v dopravní infrastruktuře, analýza dopravních trendů, nebo rozvojové plány. Celý dopravní systém je zjednodušen na soubor uzlů (křižovatky) a hran (mezikřižovatkové úseky) a použití modelu představuje systémovou úlohu teorie grafů. Již nejsou řešena jednotlivá vozidla, ale dopravní proud je skutečně proudem, který lze přirovnat například k proudu tekutiny, který je možné matematicky popsat. Nejsou řešeny interakce jednotlivých uživatelů ani specifické geometrie vozovek. Významnými faktory, které tvoří scénáře a ovlivňují model jsou spíše změny politiky, výstavba nových čtvrtí, změna v dělbě přepravní práce a další celoměstské vlivy. Kromě řady ukazatelů (často intenzity vozidel jako v mikrosimulaci, cestovní doby aj.) jsou výstupy oblastního charakteru, například mapový výstup zátěžového diagramu znázorňujícího distribuci vozidel v rámci celého města či kraje. Nutno poznamenat, že výstupy makroskopických modelů jsou pro širokou veřejnost často poměrně abstraktní. Omezeno je i využití pro digitální dvojče, kde hraje důležitou roli reálný čas. V případě makroskopických modelů pracujeme v měřítku 24 hodin jako celého časového úseku. V případě makroskopického modelu jako digitálního dvojčete je tedy pak vždy nutné pracovat s historickými daty.

Tyto dílčí modely ale samy o sobě ještě **nemohou být digitálním dvojčetem**: Jsou budovány nad statickými daty, neočekává se využití v reálném čase (tedy postrádají značnou míru flexibility) a jsou konstruovány primárně za účelem srovnání rozvojových scénářů, nikoliv sledování vývoje stávající situace. Za zmínku dále stojí práce s daty, kdy v reálném čase je dostupný naprosto odlišný soubor dat, než se kterým je možné pracovat při tvorbě statických modelů. Digitální dvojče navíc nemusí být nutně pouze mikroskopický či makroskopický dopravní model, může být zvolena varianta dle potřeby a situace, či se může jednat do určité míry o jejich kombinaci, kdy mikroskopický dopravní model použijeme pro detailní a přesné simulace specifických oblastí nebo událostí, zatímco makroskopický model poskytuje širší kontext a umožňuje analýzy na vyšší úrovni.

3.3 Možnosti fyzické realizace dopravního digitálního dvojčete

Vytvoření dopravního digitálního dvojčete představuje komplexní úkol, jehož fyzická realizace vyžaduje pečlivé zvážení několika faktorů. Rozhodnutí o tom, jakým způsobem fyzický hardwarový a softwarový systém realizovat – zda si službu najmout, realizovat ji interně nebo kombinovat obě možnosti – závisí na několika klíčových aspektech:

1. Pronájem služby (Software as a Service - SaaS)

Software as a Service je model distribuce softwaru a softwarových systémů, kde jsou aplikace hostovány poskytovatelem služby a jsou zákazníkům přístupné přes internet. Tento

model se výrazně liší od tradičního způsobu nákupu softwaru, kde si zákazník kupuje licenci na software a instaluje jej na vlastní počítačové systémy.

Výhody:

- *Snížené počáteční náklady:* Nemusíte investovat do hardwaru a softwaru.
- *Odborné znalosti a podpora:* Poskytovatel služby má odborné znalosti a zajišťuje údržbu a aktualizace.
- *Snadný přístup a škálovatelnost:* Služby jsou obvykle dostupné odkudkoliv a snadno škálovatelné podle potřeb projektu.

Nevýhody:

- *Závislost na poskytovateli:* Omezujete se na možnosti a stabilitu poskytovatele.
- *Bezpečnostní obavy:* Data jsou uložena mimo vaši organizaci, což může představovat riziko.

2. Interní realizace

V tomto případě pro objednatel vyvíjí či nakupuje, hostuje a spravuje software na vlastní interní infrastruktuře. To vyžaduje značné počáteční investice do hardwaru, softwaru a personálu potřebného k vývoji, údržbě a aktualizaci aplikací. Interní realizace ovšem umožňuje úplnou kontrolu nad softwarovým řešením, což je zásadní v situacích, kdy má objednatel vysoké požadavky na zabezpečení celého systému nebo specifické potřeby, které nemohou být efektivně řešeny standardními SaaS produkty.

Výhody:

- *Plná kontrola:* Máte úplnou kontrolu nad systémem, daty a bezpečnostní politikou.
- *Přizpůsobení:* Systém si můžete plně přizpůsobit podle specifických potřeb a požadavků.

Nevýhody:

- *Vysoké počáteční náklady:* Potřebujete investovat do vlastní infrastruktury a softwarových licencí.
- *Vyšší nároky na správu:* Vyžaduje interní odborné znalosti a zdroje pro správu a údržbu systému.

3. Hybridní strategie

Ona výše uvedené způsoby lze také kombinovat. Nejčastější způsob v tomto případě spočívá v kombinaci interní realizace systému a pronájmu výpočetního výkonu/databází/úložiště na zvolené cloudové službě (Microsoft Azure, Google Cloud Services, Amazon AWS). Při volbě této strategie je třeba jednak vhodně stanovit bezpečnostní strategii v případě zpracování potenciálně citlivých dat a také průběžné investice spojené s pronájmem výpočetních kapacit – při dlouhodobějším provozu může být výhodnější po odladění systému provést postupný přechod na interní realizaci.

Výhody:

- *Flexibilita:* Můžete kombinovat benefity obou přístupů – držet kontrolu nad klíčovými aspekty a zároveň využít externí zdroje pro specifické potřeby.
- *Škálovatelnost:* Můžete snadno škálovat výpočetní zdroje podle aktuálních potřeb.

Nevýhody:

- *Komplexnost:* Vyžaduje správné nastavení a integraci mezi interními a externími systémy.
- *Potenciální bezpečnostní rizika:* Nutnost zajistit bezpečné propojení mezi interními a externími systémy

Rozhodnutí o způsobu realizace bude záviset na několika faktorech, včetně rozpočtu, rozsahu interních kapacit, bezpečnostních požadavků a míry potřebného přizpůsobení konkrétním podmínkám. Při výběru je důležité zvážit jak krátkodobé, tak i dlouhodobé cíle projektu. Ve většině

případů může být kombinace interního řešení a externě najatých služeb tou nejflexibilnější a nejefektivnější počáteční cestou.

3.4 Replikovatelnost a otevřenost popisovaného řešení

V tabulkách níže je blíže popsána replikovatelnost (přenositelnost) řešení, popisovaného v této metodice. Konkrétně uvádíme definici částí, které jsou z našeho pohledu přenositelné do jiných případů užití, a těch částí, jejichž vytvoření považujeme primárně za záležitost vývoje či výzkumu zhotovitele (tabulka 3) a také specifikace částí, které je možné považovat za “otevřené” a je možné je dále snadno sdílet (tabulka 4).

Tabulka 3: Replikovatelné části dopravního digitálního dvojčete

Položka	Replikovatelnost
Konstrukce a plán projektu	Replikovatelné
Napojení on-line real-time dat	Replikovatelné
Kontrola a analýza vstupních dat	Replikovatelné
Kalibrace digitálního dvojčete	Replikovatelné
Analýza KPI	Replikovatelné
Uživatelské rozhraní a prezentace výstupů	Replikovatelné
Tvorba geometrického vstupního modelu	Součástí VaV
Nastavení vstupních parametrů mikrosimulace	Součástí VaV
Komunikace s poskytovateli dat / zajištění vstupních dat	Součástí VaV

Tabulka 4: Otevřenost komponent modelu digitálního dvojčete

Položka	Otevřenost
Geometrie modelu	Lze sdílet přes Rest API
Pozice vozidel	Lze sdílet přes Rest API
Dopravně-inženýrské KPIs (intenzity, rychlosti, ...)	Lze sdílet přes Rest API
Další KPIs (emise, spotřeba)	Lze sdílet přes Rest API
Vstupní data ze senzorů	Lze sdílet přes Rest API
OD matice	Lze sdílet přes Rest API
Stav dopravy	Lze sdílet přes Rest API
Rámce dopravního chování (car-following model, dodržování předpisů, ...)	Nastavení modelu
Kalibrační procesy	Nastavení modelu

3.5 Odhad pracnosti

Přibližný odhad pracnosti při tvorbě dopravního digitálního dvojčete za předpokladu použití replikovatelných výsledků uvádí tabulka 5. Je nezbytné upozornit, že pracnost je silně závislá na velmi specifických faktorech v dané lokalitě a především na dostupnosti zdrojových a dopravních dat. Dalším významným faktorem je zkušenost zpracovatele a požadavky klienta (například v rámci softwarového řešení).

Tabulka 5: Pracnost (uváděno v přibližném rozsahu tzv. „man days“ – MD, tj. člověkodnů, za předpokladu znovupoužití výsledků uvedených v tabulce 3)

Položka	MD (od do)
Přípravné práce (určení rozsahu, stakeholderů aj.)	5-10
Tvorba grafického modelu (infrastruktura)	5-10
Zajištění vstupních dat	20-100
Zpřístupnění dat	0-50
Tvorba základního (off-line) modelu vč. kalibrace	20-40
Digitální dvojče (real-time model)	20-40
Design scénářů	10-20
Implementace scénářů	30-40
Uživatelské rozhraní a výstupy	20-30
SUMA	150-340

4 Metodika

Pro konstrukci dopravního digitálního dvojčete bylo na základě zkušenosti z reálného příkladu identifikováno celkem 10 konkrétních kroků, ze kterých se celý proces skládá a které je nezbytné separátně vyzdvihnout a blíže popsat. Tyto kroky jsou následující:

1. Stanovení cílů a způsob použití

Jako pro každý projekt a téměř většinu situací v profesním životě je nutné si stanovit základní cíle, kterých chceme dosáhnout. Od stanovených cílů se odvíjí požadavky na data, pracnost a celková podoba konečného produktu. Cíle jsou přímo navázány na způsob, jak bude dopravní digitální dvojče používáno po jeho dokončení.

2. Geometrický model

Jedná se o jednu z nejlépe uchopitelných částí spíše abstraktního produktu, kterým dopravní digitální dvojče je. Geometrický model lze přirovnat k dopravnímu modelu: definuje infrastrukturu, na které modelace probíhá (konkrétní pozemní komunikace, chodníkové plochy, křižovatky, přechody pro chodce atd.). Geometrický model a jeho přesnost či správnost přímo ovlivňuje dopravní chování v mikroskopickém modelovacím prostředí.

3. Modalita

Odborný termín „modalita“ označuje v tomto kontextu výčet dopravních módů (druhů dopravy), které jsou v dopravním digitálním dvojčeti obsaženy. Modalita je přímo navázána na cíle, jichž chceme v projektu dopravního digitálního dvojčete dosáhnout a na plánovaný způsob použití modelu – například modalita v oblasti městského centra nebo příměstských oblastech se všemi druhy dopravy je odlišná například od dopravního digitálního dvojčete silničního tunelu, kde se sice mohou vyskytnout chodci, ale nikoliv už tramvaje, vlaky atd.

4. Dopravní chování

Tento krok zde zastupuje kombinaci dílčích matematických modelů, které popisují, jak se uživatelé v modelu chovají (tzv. crowd model pro pohyby chodců, car following model pro pohyb vozidel, dodržování předpisů atd.) Přesnější nastavení (tj. více odpovídající realitě) vyžaduje podrobnější data (průzkumy domácností a uživatelů aj.)

5. Pasportizace dopravně-inženýrských dat

Vytvoření katalogu dostupných dat a zajištění přístupu k nim. Podle naší zkušenosti se jedná o jeden z nejkritičtějších kroků, který může významně ovlivnit termín dokončení prací. Tento krok je ovlivněn několika faktory (ochota komunikovat, kvalita dat, dostupnost dat, vč. kontinuální dostupnosti aj.) Při plánování harmonogramu prací doporučujeme tomuto kroku věnovat dostatečnou časovou dotaci.

6. Napojení vstupních dat na dílčí modely

Tento krok je přímo závislý na kroku předcházejícím, neboť bez zajištění nezbytných dat není možné provést kompletní napojení na vzniklý model, resp. dopravní digitální dvojče. Data musejí být předzpracována, aby bylo možné je přímo napojit jako datový zdroj pro model.

7. Kalibrace a validace dopravního dvojčete jako celku + iterace

Jedná se o nezbytný finální krok v rámci dopravního modelování, kdy je model iterativně přibližován co nejbližší reálnému stavu, aby byla zajištěna maximální vypovídající hodnota modelovaných variant – scénářů a budoucího stavu. Během vlastního provozu dopravního digitálního dvojčete je potom potřeba zajistit (například postupy uvedenými dále v tomto textu), aby probíhala kontinuální adaptace a rekaliibrace modelů v rámci běhu dvojčete – jediné tak lze zaručit, že digitální dvojče je digitálním obrazem reálné dopravní situace.

8. Konstrukce scénářů pro demonstraci cílů a příprava modelu pro “co když” scénáře

Tento krok nemusí následovat až v takto konečné fázi. Jedná se o diskuzi, která by měla probíhat od začátku. Je plně navázána na strategické cíle a ovlivňuje využitá data. Ne všechny scénáře je možné připravit při zachování adekvátní vypovídající hodnoty. Je tedy možné vytvořit jen takové scénáře, na které jsou k dispozici data.

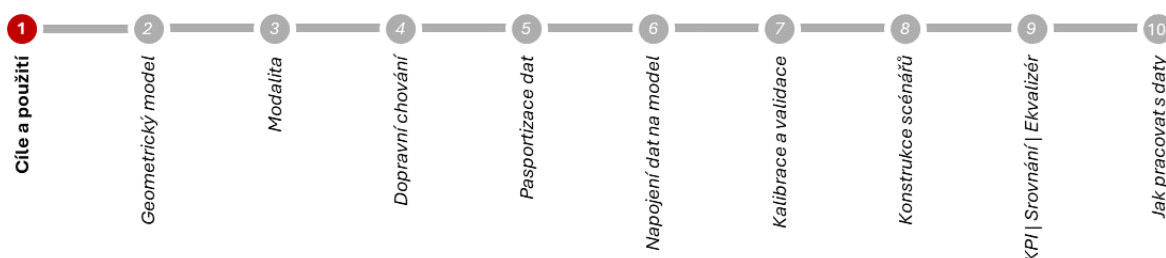
9. Extrakce KPIs / srovnání / ekvalizér

Zde už se jedná o generování výstupů pro hodnocení aktuálního modelovaného stavu. Na základě těchto výstupů je možné srovnávat varianty jako při standardním dopravním modelování, ale na základě reálného aktuálního stavu. Je možné zároveň kombinovat více typů výstupu do tzv. Ekvalizéru.

10. Jak pracovat s výstupními daty

Výstupní data je možné hodnotit jako samostatné výstupy při srovnání, jak je uváděno v předcházejícím kroku, nebo je možné je dále napojit na další modely či způsoby využití.

4.1 Stanovení cílů a způsobů použití



K čemu tento krok slouží

Stanovení cílů a způsobu použití dopravního digitálního dvojčete je zásadním krokem, který definuje potřebné dílčí prvky celého projektu. Tento krok slouží k definování konkrétních potřeb a očekávání, které od dopravního digitálního dvojčete máme. V této fázi je důležité jasně formulovat, co chceme modelovými simulacemi zjistit, a identifikovat problémy nebo příležitosti, které chceme řešit. Správná identifikace a formulace cílů bude mít dopad na správnou volbu dopravních módů, na rozsah digitálního dvojčete a na další charakteristiky, které ovlivňují náročnost přípravy projektu i následnou práci s digitálním dvojčetem.

Postup prací, obecná doporučení

V obecné rovině doporučujeme začít *definicí širokých cílů* projektu, jako je například „zlepšení dopravního toku“, „snížení počtu dopravních nehod“, „podpora plánování infrastruktury“, „schopnost reagovat na nenadálé situace“ či „možnost predikce vývoje krizové situace“.

Takto ustanovené cíle v dalším kroku zužujeme na *specifické účely*, například: „Chceme analyzovat chování dopravního toku v ranní a odpolední špičce při různých variantách nastavení světelné signalizace.“ nebo „Jaký bude vliv dopravních nehod v dané oblasti na provoz VHD po zavedení nového jízdního řádu?“

Dopravní digitální dvojče je systémem, jenž má sloužit různým skupinám zájemců. Konceptu je nutné proto konzultovat s klíčovými stakeholdery, včetně dopravních inženýrů, urbanistů a také veřejnosti, abychom identifikovali jejich potřeby a očekávání od daného systému. V přípravné fázi je tedy mimo jiné zásadní tyto klíčové skupiny identifikovat a začlenit do procesu tvorby projektu.

Z konzultací specifických účelů tvorby dopravního digitálního dvojčete s klíčovými uživateli by již v tomto kroku měl vyplynout základní přehled možných „co když“ scénářů, které chceme v simulaci

testovat a jejichž detailní specifikace proběhne později (viz odstavec 4.8). Může jít například o změny v dopravních pravidlech, rozvoj nových infrastruktur, nebo mimořádné události.

V posledním úvodním kroku rozhodujeme, kdo bude s modelem pracovat, jaké nástroje a techniky budou použity, a jak budou výsledky analyzovány a prezentovány.

Úroveň / standard kvality

Zhotovitel se v tomto kroku musí ujistit, že identifikované cíle jsou konkrétní, měřitelné, dosažitelné, relevantní a časově omezené (SMART). Zajistí tak, že i očekávání od výsledného dopravního digitálního dvojčete budou realistická a měřitelná. V případě potřeby je vhodné nechat celý záměr posoudit nezávislou institucí.

Cíle by měly být patřičně zdokumentovány a poté oponovány a schváleny všemi klíčovými dotčenými subjekty (stakeholdery) – zajistí se tak jejich relevance a akceptace.

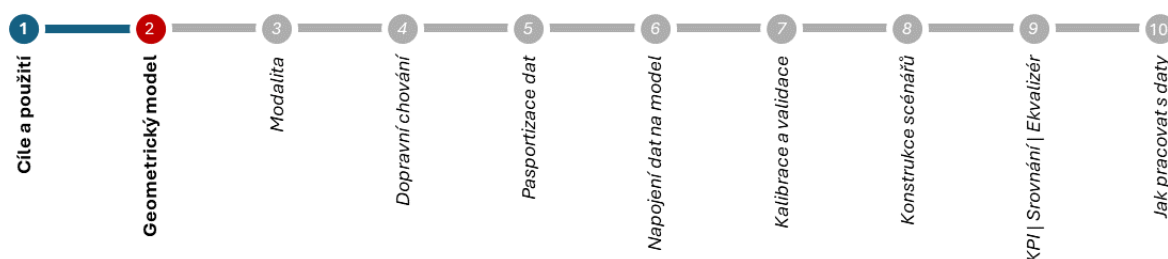
Úskalí, na co si dát pozor

Je důležité mít *realistická očekávání* ohledně toho, co digitální dvojče může poskytnout, a nepředpokládat, že dokáže předvídat všechny aspekty dopravního systému.

„Co když“ scénáře by měly být dobře promyšlené a relevantní pro místní podmínky a potřeby. Je také třeba mít na zřeteli, že tyto scénáře ostře vymezují to, co lze pomocí daného digitálního dvojčete predikovat.

Do procesu definování cílů a scénářů je třeba v dostatečné míře zapojit všechny relevantní účastníky, aby byly zajištěny všechny pohledy a potřeby.

4.2 Geometrický model



K čemu tento krok slouží

Je nezbytné si uvědomit, že digitální dvojče je stále úzce spjaté s dopravním modelem. Vzhledem k míře detailů se bude patrně ve většině případů jednat o mikroskopický dopravní model. Aby digitální dvojče mohlo být skutečným „dvojčetem“ a odráželo realitu, je nezbytné se v co největším počtu aspektů co nejvíce přiblížit realitě. Vše, co reálně existuje a vytváří současnou či budoucí infrastrukturu je naprostým základem tvorby digitálního dvojčete. Jedná se tak zejména o pozemní komunikace, chodníky, světelnou signalizaci, tramvajové tratě a vedení a mnohé další fyzické části infrastruktury. Cílem tohoto kroku je zajistit oficiální digitalizovaná a přesně změřená data o stávající infrastruktuře a geometrii.

Postup prací, obecná doporučení

V první řadě by se měl zpracovatel (či pracovní skupina složená ze zpracovatele, objednatele a dalších zájmových skupin) obrátit na správce infrastruktury. Tento správce se může pro různé případy užití lišit a nemusí být vždy globální pro všechny součásti této infrastruktury, resp. geometrického modelu.

Například v případě Prahy jde o TSK v případě místních komunikací a související světlené signalizace, v případě dalších součástí už se pak jedná o záležitosti THMP či dopravního podniku. I v rámci jednoho správce se často jedná ve větších městech o několik oddělení, která spravují různé části infrastruktury.

Často však může nastat situace, že některá data nejsou u správců dostupná. Dalším úkolem je tedy obrátit se na další městské či státní instituce. V případě Prahy se může jednat například o IPR, který má značné množství kvalitních mapových podkladů.

Cílem by mělo být vytvořit tzv. HD mapy celé řešené oblasti. S tímto termínem se můžeme setkat především v navigačních systémech. HD mapa je totiž digitalizovaný prostor, který kromě vedení komunikací obsahuje také další významné informace například o geometrii (šířkovém či výškovém uspořádání), předpisech (povolená rychlost, povolené manévry), návaznosti na další segmenty celé sítě a mnohé další informace. Komplexní HD mapy jsou zřídka volně dostupné a musí být buď odkoupeny či vytvořeny na základě jiných dostupných dat. Možným kompromisem v této části může být využití dat z volně dostupných Open Street Maps (OpenStreetMap Contributors, 2024).

V poslední fázi tohoto kroku mohou přijít na řadu také vlastní měření či pasportizace, které začnou být nezbytné až v průběhu tvorby daného projektu. Je však nezbytné upozornit, že tvorba takovýchto podkladů je velmi přínosná pro širokou škálu využití a jejich přínos tedy dalece přesahuje potřeby digitálního dvojčete.

Úroveň / standard kvality

Požadovaná kvalita geometrického modelu je úzce spjata s definovanými cíli, účely a záměry budoucích „co když“ scénářů, které de facto diktují úroveň detailu, která je potřebná. Kvalita a detail geometrických dat proto mimo jiné úzce souvisí s konkrétní volbou modelů, které digitální dvojče využívá. Pokud budeme vytvářet skutečně detailní mikroskopický model, jsou požadavky na kvalitu a úroveň detailu velmi vysoké a je nezbytné pracovat s nejpreciznějšími zajištěnými daty o geometrii (například vedení komunikace je často na úrovni měst digitalizováno na úrovni vektorové reprezentace hran komunikací), digitálních plánů (vždy existuje kompletní dokumentace, může však být náročná na dohledání/zajištění) a podobně.

V případě nižší úrovně detailu a makroskopických modelů již potřeba na kvalitu a podrobnost dat mírně klesá. Stále však musí být dodržena vysoká přesnost v rámci informace o organizaci dopravy (rychlosti, povolené směry, či kapacita).

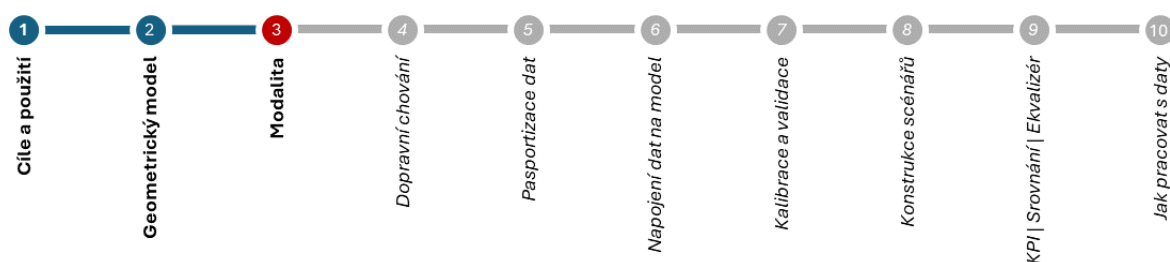
Byť může být požadovaná úroveň kvality proměnlivá v závislosti na zadání, je vždy nezbytné se ujistit, že pracujeme s nejlepšími dostupnými daty. Rozhodnutí, zda aktuálně dostupná data jsou nebo nejsou pro zamýšlený účel postačující by mělo vycházet se *vzájemné dohody zpracovatele a objednatele*.

Úskalí, na co si dát pozor

Při snaze o co nejsnadnější zajištění digitalizovaných dat může dojít k situaci, kdy pro konstrukci geometrického modelu použijeme snadno dostupné, ale již zastaralé podklady. Je proto nezbytné se vždy ujistit o relevanci a aktuálnosti zajištěných dat.

U každého projektu bude zpracovatel či objednatel čelit negativním dopadům při špatném rozhodnutí, zda aktuální data dostatečně naplňují svojí podrobností potřeby projektu. Za tímto účelem je nezbytná diskuze, do které je vhodné zapojit i další zájmové skupiny.

4.3 Modalita (volba dopravních módů)



K čemu daný krok slouží

Správná volba dopravních módů má zásadní dopad na pracnost, komplexitu a využitelnost digitálního dvojčete. Stejně rozhodnutí je nezbytné i při tvorbě dopravních modelů: Nejjednodušší model často zahrnuje jen silniční dopravu a s ní související vozidla dle pozorovaného statistického rozložení typů vozidel (osobní automobily, dodávky, nákladní automobily atd. – i zde je nezbytné správně zvolit granularitu). V případě zahrnování dalších módů dopravy (veřejná hromadná doprava, cyklistická doprava, pěší doprava) rychle roste náročnost na zpracování a zajištění dat; spolu s tím ovšem také roste šíře informací, které můžeme zajistit z výstupů digitálního dvojčete. Je proto nezbytné pečlivě uvážit, jaké módy skutečně potřebujeme pro dosažení cílů, stanovených během prvního kroku tvorby dopravního digitálního dvojčete (viz odstavec 4.1).

Postup prací, obecná doporučení

Při přípravě digitálního dvojčete je vždy nezbytné, aby dílčí kroky a rozhodnutí byly v souladu se stanovenými cíli. I správná volba či výčet užitých/modelovaných dopravních módů musí z těchto cílů vycházet. Digitální dvojče, které simuluje nejen vozidla, ale také chodce a cyklisty, případně nástup a výstup osob na zastávkách může sice vypadat atraktivně a efektivně, ne vždy je však taková úroveň účelná. Je nezbytné využít dostatečný počet dopravních módů, aby byly naplněny požadované cíle, je ale zásadní nepřidávat dopravní módy, které nepotřebujeme.

Jednoduchým příkladem je digitální dvojče tvořené výhradně pro model tunelu. Zde by se chodci neměli vůbec vyskytovat, protože je to často zakázané, na druhou stranu nastávají situace, kdy se zde chodci vyskytnou (při nehodě, požáru, opravách a údržbě, omylem, ...), takže sem jistě patří. Na druhou stranu se ve většině silničních tunelů neobjeví například tramvaj či vlak, proto není nutné je jakkoliv zohledňovat. Příklady je celá řada, je však nezbytné vše vždy správně sladit se zadáním a cíli.

Úroveň / standard kvality

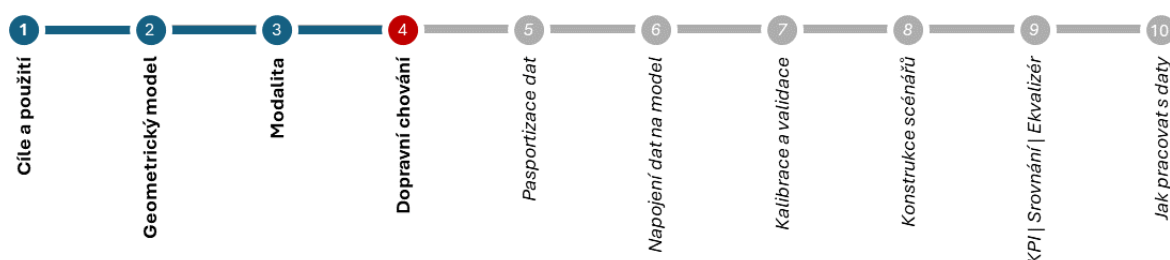
Kvalita úzce souvisí s dostupnými daty. V případě známek nedostupnosti dat pro daný dopravní mód je proto vhodné buď od použití daného módu upustit a adekvátně upravit cíle projektu, či se pokusit data zajistit alternativními způsoby, což může být finančně velmi náročné.

Téma volby dopravního módu rovněž souvisí s technologickými možnostmi, jež určují, co lze efektivně simulovat/modelovat. Měly by tedy být voleny pouze dopravní módy, které je možné ve zvoleném softwarovém prostředí efektivně modelovat, a ke kterým máme k dispozici dostatečná data.

Úskalí, na co si dát pozor

Největším úskalím při volbě dopravních módů je volba příliš rozsáhlého skupiny módů. Je skutečně nezbytné kriticky zhodnotit, zda má daný dopravní mód smysl a přispívá ke stanoveným cílům konstrukce digitálního dvojčete.

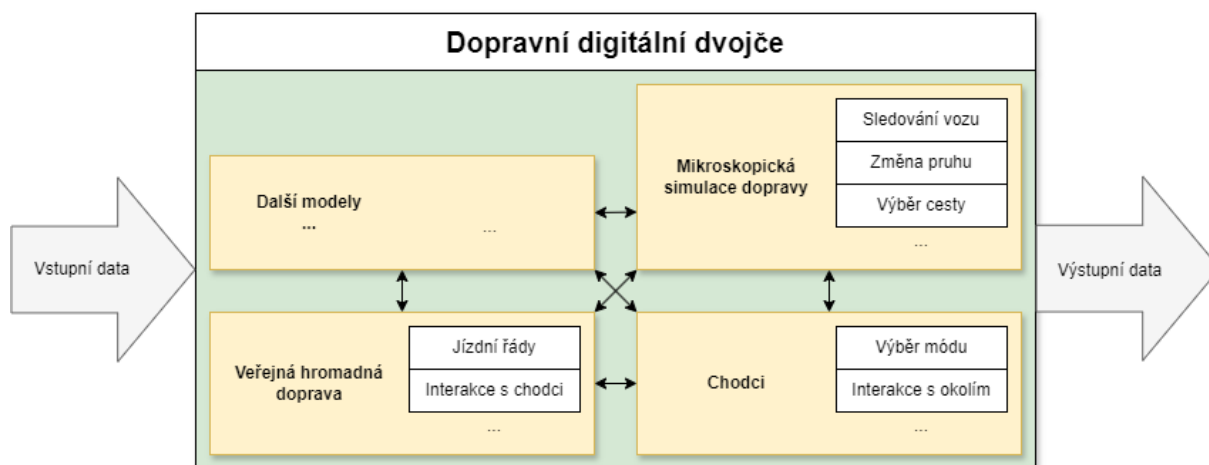
4.4 Modely dopravního chování



K čemu daný krok slouží

Dopravní digitální dvojče je tvořeno soustavou vzájemně propojených dopravních modelů. Tyto modely jsou často samy tvořeny dílčími modely, popisujícími určité ohraničené aspekty dopravního chování (například v případě čistě dopravních simulací používáme oddělený model pro dynamiku jízdy vozidel, další modely popisují proces změny jízdního pruhu, spotřebu energie respektive paliva, či očekávané emise, viz obrázek 2). Pro správný popis dopravního chování v oblasti zájmu dopravního digitálního dvojčete, jež je dána cíli, stanovenými v prvním kroku tvorby dvojčete popsaném v odstavci 4.1, je nutné vhodně zvolit dopravní modely a jejich dílčí komponenty dopravního chování kalibrovat. Kalibrace podřízených modelů digitálního dvojčete dopravního systému je klíčovým krokem pro zajištění přesnosti a věrohodnosti simulací reálné situace, které model produkuje. Proces kalibrace je důležitý pro přizpůsobení modelu specifikům místního prostředí a typickému chování účastníků dopravy (Federal Highway Administration, 2019; Ondráčková et al., 2017).

Specifikem dopravních digitálních dvojčat je zahrnutí modelů pohybu a chování chodců (případně pěšího davu) do celého systému. Kalibrace těchto modelů zahrnuje několik klíčových aspektů, které jsou podobné metodám používaným v modelování individuální automobilové dopravy, zároveň ale vyžaduje další úkoly, především v počáteční fázi kalibrace: vychází ze základních datových zdrojů, jako je rychlost pohybu osob a matice pohybu osob (O-D matice) v daném prostoru. Tato data se získávají relativně obtížně, možností, kterou doporučujeme, je instalace kamerového dohledu na místa, která vyžadují detailní modelování pohybu. Z kamerových záznamů lze poté vhodným předzpracováním získat klíčové časoprostorové charakteristiky trajektorií pohybu, což pomáhá v identifikaci a úpravě modelových parametrů pro zajištění realističnosti simulace. Tato data jsou doplněna o makroskopické proměnné jako intenzita nebo hustota pohybu. Vlastní kalibrace poté probíhá postupy, analogickými s (Federal Highway Administration, 2019; Ondráčková et al., 2017).



Obrázek 2: Dopravní dvojče je soustavou vzájemně propojených dopravních modelů, z nichž každý může sestávat z několika dílčích modelů

Kalibrace slouží k nastavení dílčích modelů dopravního digitálního dvojčete tak, aby co nejvěrněji odrážely skutečné podmínky a chování účastníků dopravy na silnicích a chodnících. V tomto kroku je třeba

- se ujistit, že použité podřízené modely správně predikují rychlosti, toky a vzory chování dopravy v oblasti zájmu dopravního digitálního dvojčete v závislosti na čase a místě,
- zohlednit místní řidičské zvyklosti, např. agresivitu při jízdě, preferenci jízdních pruhů, (ne)dodržování rychlostních limitů nebo reakční časy řidiče,
- přizpůsobit model pro různé skupiny účastníků dopravy, včetně chodců a cyklistů, jejichž chování se může výrazně lišit od chování motorových vozidel.

Postup prací, obecná doporučení

Nejprve je třeba shromáždit relevantní data o dopravním chování a o místních dopravních podmínkách. Tato data zahrnují například typické rychlosti vozidel, četnost změn pruhů, tendence při přecházení vozovky, průtok chodců na kritických profilech sítě jako jsou schodiště, rampy a podobná úzká hrdla, styl jízdy cyklistů a podobně.

Nastavení počátečních parametrů dílčích modelů. Výchozí hodnoty parametrů pro dílčí modely určíme na základě analýzy lokálních dat, relevantní literatury a expertních odhadů.

Iterativní kalibrace. Proces kalibrace provádíme iterativně, parametry modelu postupně upravujeme a simulace dílčích modelů znovu spouštíme do doby, než simulované hodnoty odpovídají těm pozorovaným (s určitou chybou, která je způsobena náhodností dopravního chování a tzv. neredukovatelnými chybami modelu). Vzhledem k velkému počtu parametrů, které mohou být nastavovány, je důležité postupovat systematicky, například pomocí vhodných optimalizačních technik jako je metoda nejmenších čtverců, genetické algoritmy nebo jiné heuristické metody. Přitom je třeba brát v úvahu také fakt, že podřízené modely se navzájem ovlivňují.

Validace. Součástí celého procesu nastavení simulačního modelu je i ověření, že kalibrovaný model správně predikuje chování za jiných podmínek, než byly použity při kalibraci.

Dokumentace. Pro kontrolu postupu a případné doladění je velmi vhodné podrobně zaznamenat celý postup kalibrace, včetně použitých dat, metod a dosažených výsledků.

Úroveň / standard kvality

Každý dílčí model by měl projít přísným procesem validace. Jen tak lze zajistit, aby dílčí modely na základě pozorovaných empirických dat přesně reprezentovaly jevy reálné oblasti zájmu dopravního digitálního dvojčete. V případě dílčích modelů přitom předpokládáme, že jde o běžně používané modely, u nichž již proběhl verifikační krok, zajišťující, že modely jsou správně implementovány.

Při kalibraci a validaci dopravních modelů se setkáváme s řadou výzev a typických problémů, ovlivňujících kvalitu výsledné kalibrace. Řešení těchto problémů vyžaduje pečlivé plánování kalibračního postupu, důkladné testování a často také kombinaci analytických a intuitivních přístupů.

Úskalí, na co si dát pozor

Základní výzvy, které je třeba při kalibraci a validaci podřízených modelů překonat, se týkají samotných dat, variability lidského chování, složitosti modelovacích přístupů a rizika přeučení modelu.

Data shromážděná z různých zdrojů nebo během různých časových období *nemusí být zcela konzistentní*, což může zkreslit výsledky kalibrace: Například data z dopravních průzkumů mohou být

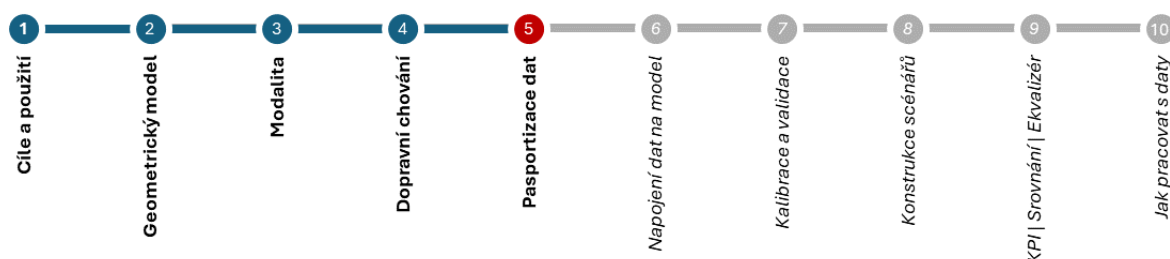
ovlivněna subjektivitou účastníků, data z dopravních detektorů mohou být zase ovlivněna technickými závadami. Je proto klíčové zajistit, aby pro modelované podmínky byla data čistá, relevantní a reprezentativní. To může vyžadovat pečlivé a časově náročné předzpracování dat a vytvoření konzistentních a spolehlivých datových souborů pro kalibraci.

Chování řidičů je vysoce variabilní a individuální, což komplikuje vytváření přesných a robustních mikrosimulačních modelů. Řidiči se mohou lišit v agresivitě, preferencích rychlosti, stylu jízdy a v reakčních časech. Model, který zanedbává tuto různorodost, může předpovídat nerealistické dopravní toky. Pro řešení tohoto problému je důležité zahrnout různé jízdní profily a kalibrovat model tak, aby odpovídal rozdělení chování pozorovanému v reálném provozu.

Příliš *komplexní dopravní modely* s velkým množstvím parametrů lze jen obtížně kalibrovat a tyto modely mohou být (obdobně jako například hluboké neuronové sítě) náchylné k přeučení. Každý další parametr zvyšuje dimenzionalitu prostoru, ve kterém se kalibrace dílčího modelu provádí, a tím se zvyšuje riziko nalezení lokálního optima, jež ale nemusí být optimálním řešením problému. Zjednodušení modelu odstraněním nebo sloučením některých parametrů může vést k lepší předvídatelnosti a stabilitě. Výběr správné úrovně složitosti vyžaduje odborný úsudek a může být podpořen citlivostní analýzou, která identifikuje vliv jednotlivých parametrů na výsledky modelu.

Nadměrné přizpůsobení (také *přeučení* nebo *overfitting*) modelu je problém, kdy kalibrovaný model příliš úzce odpovídá kalibračním datům a ztrácí schopnost generalizace. I když takový model vykazuje vynikající vlastnosti na kalibrační datové sadě, jeho předpovědi se stanou nepřesnými, pokud jej aplikujeme na doposud nepozorovaná data. Tento problém je obzvláště relevantní u dopravních modelů, obsahujících velké množství parametrů ve srovnání s množstvím kalibračních dat. Řešením jsou obvykle různé metody křížové validace, které jsou ale časově velmi náročné.

4.5 Pasportizace dopravně-inženýrských dat



Koncepce dopravního digitálního dvojčete musí vycházet z dopravně inženýrských analýz a zavedených standardů kvality. Má-li dopravní digitální dvojče poskytovat věrný obraz dopravní situace v reálném světě, potřebuje

- statisticky zpracovaná historická dopravní data pro kalibraci podřízených dopravních modelů a analýzu jejich predikcí,
- spolehlivé on-line údaje o provozu na komunikacích (chování provozu).

Dopravní data jsou klíčovým vstupem pro systémy řízení dopravy, aplikace, které poskytují dopravní informace řidičům a cestujícím, a statistické využití při plánování dopravy. V ČR jsou dopravní data sbírána v rámci některých telematických funkčních celků – elektronický výběr mýtného, řízení městských křižovatek, řízení provozu v tunelech, monitorování problémových úseků pro zvýšení bezpečnosti, penalizační systém měření rychlosti a nově liniová řízení. Integrace dat takto různorodé povahy do větších konzistentních datových sad je ovšem obtížná.

K čemu tento krok slouží

Pasportizace je krok nezbytný k sestavení bilance toho, co je pro projekt nezbytné či vhodné a reality toho, co je k dispozici. Ne všechna data jsou vždy k dispozici, ne všechna data jsou k dispozici v reálném čase, a ne všechna data jsou v kompatibilním formátu či granularitě. Pasportizace proto umožňuje udělat jednoduchou bilanci a nalézt průnik. Na základě zjištění chybějících dat může být buď upraven model, resp. jeho cíle, nebo musí být zajištěn dodatečný sběr dat.

Postup prací, obecná doporučení

Již v počátcích projektu je třeba vytvořit seznam všech institucí, cílových skupin a dalších orgánů, které mají k dispozici data použitelná pro projekt. Při tvorbě tohoto seznamu vycházíme z výčtu potřebných dat – ten vychází ze zadání, resp. cílů projektu. Výčet nezbytných či vhodných dat poté rozšiřujeme o skupiny poskytovatelů, instituce, zodpovědné organizace. Následuje otevření komunikace se všemi těmito institucemi o zajištění potřebných dat a jejich zhodnocení. Toto je právě proces *pasportizace*.

Proces zajištění, zhodnocení a kompletní pasportizace dat může být časově velmi náročný. Časová náročnost přitom nesouvisí jen se složitostí samotného kroku, vyžadujícího zhodnocení velké množiny dat, ale především souvisí s reakční dobou velkého množství subjektů, jež data do systému dodávají. V závislosti na zvoleném území může být poskytovatelů dat od jednotek až po desítky. I v rámci jednoho objednatele navíc často nastává situace, kdy správci dat jsou různí (jako příklad uveďme pražské TSK, které na svých systémech agreguje data z několika nezávislých zdrojů – v době tvorby tohoto dokumentu jde o data, generovaná systémy společností ELTODO, VARS, CAMEA a dalších). Včasná a důsledná komunikace proto může být skutečně zásadní, protože finální výčet dostupných dat může významně ovlivnit robustnost a flexibilitu digitálního dvojčete.

Výčet obecných vhodných dat zahrnuje primárně mapové podklady a dopravně-inženýrská data:

- **Mapové podklady**
 - Zaměření hran komunikací (často formát DWG, DXF, SHP, či jiné vektorové formáty).
 - Zaměření terénu (například datová sada ZABAGED od ČÚZK či vlastní zaměření).
 - Pasportizace dopravního značení (svislé i vodorovné dopravní značení), veřejného osvětlení, dalších částí infrastruktury a přidružených objektů, inženýrských sítí atd.
 - Vysoká kvalita ortofoto snímkování (ideálně vyšší než veřejně dostupná z ČÚZK či jiných veřejných mapových portálů od komerčních subjektů).
 - Pokud jsou k dispozici, tak i tzv. HD mapy (například Waze, TomTom, Sygic a mnohé další navigační systémy) obsahující vektorizovanou infrastrukturu s vysokou mírou detailu a dalších informací.
- **Dopravně-inženýrská data**
 - Intenzity dopravy (či chodců) v co nejjemnějším časovém rozlišení (jednotky minut) a dodávané v reálném čase s minimální latencí,
 - Trajektorie pohybu chodců v modelované oblasti, důležité zvláště v místech, kde se kříží proudy chodců
 - Skladba dopravního proudu,
 - Rychlost vozidel,
 - Hustotu dopravy,
 - Stav dopravy,
 - Směrové vztahy (matice zdrojů a cílů cest pro dané území),

Mapové podklady jsou primárně nástroji, které umožňují postupně budovat tzv. geometrický model, tj. jednu z částí tvorby digitálního dvojčete. Na základě těchto podkladů jsou v podstatě vytvořené nové HD mapy, které pro potřeby modelu tvoří infrastrukturu, na které modelace probíhá.

Zdroje **dopravně-inženýrských dat** mohou být rovněž různé a je nezbytné správně identifikovat poskytovatele dat, resp. jejich vlastníka. Obecně je však možné rozdělit zdroje minimálně na tři skupiny, dle jejich účelu:

- Sensory součástí jiných telematických celků (například smyčkové detektory na křižovatkách, GPS pozice autobusů či jiných plovoucích vozidel)
- Sensory cílené na sběr konkrétních dat (úseková měření, telematické kamery pro stav dopravy, dopravní radary, kamery s detekcí SPZ pro směrové průzkumy)
- Data z plovoucích vozidel (zde je velký rozdíl mezi poskytovateli, běžné dostupná FCD data nejsou pro modely v městském prostředí vhodná, existují ale dodavatelé dat s jemnější časovou a prostorovou granularitou)

Další skupinou jsou dočasné sběry dat, které poskytují doplňující informace. Ty však mohou být využity spíše pro kalibraci či lépe validaci modelu, protože neumožňují sběr dat v reálném čase.

Pro získání dat potřebných k **modelování pohybu chodců** doporučujeme využít moderní technologie počítačového vidění a umístění kamer v veřejných prostorech. Klíčovým zdrojem jsou trajektorie zaznamenávající identifikátor osoby a její souřadnice v čase, což umožňuje analýzu rychlosti a směru pohybu chodců. Důležitá jsou i profilová měření z předem definovaných profilů, která poskytují data pro výpočet O-D matic, nezbytných pro kalibraci modelů. Tato data je někdy možné získat od třetích stran, zvláště v místech, kde již probíhá evidence pohybu osob (dopravní terminály, sportovní areály apod.). Vzhledem k nutnosti ochrany osobních údajů je důležité zajistit, že všechna data budou zpracována v souladu s příslušnými právními normami a anonymizována před dalším použitím.

Další specifickou skupinou údajů jsou **data o dopravním chování** populace. Ta mohou být zpracována pro dané město či celou ČR (například data projektu Česko v pohybu – [CESKOVPOHYBU.CZ](https://ceskovpohybu.cz)), ale jen málokdy jsou připravena pro specifický případ digitálního dvojčete. Nejpřesnější úrovní jsou data na úrovni města, dostupná například z proběhlých plánů udržitelné městské mobility.

Poslední skupinou mohou být další data podávající informace o aktuální dopravní situaci. Může se jednat o například následující zdroje dat:

- NDIC (Národní dopravní informační centrum) – poskytuje informace pře RSS kanál ve formátu XML (dopravní události, stav dopravy aj.)
- Dopravci a dopravní podniky (například DPP, ČD aj.) – často rovněž poskytují provozní informace přes RSS kanály ve formátu XML (výluky a jiné aktuální situace)
- Stav dopravy z mapových podkladů jako jsou Mapy.cz, Google mapy, či přímo jako komerční zdroj (Waze aj.)
- Další platformy sdílející data o dopravě, jako je například pražské Golemio, poskytující v reálném čase přibližnou polohu vozidel MHD

Výše uvedený výčet je velmi rozsáhlý. Pokud by mělo být zajištěno všechno nebo ještě další dostupná data, je nezbytné upozornit, že nemusí být vždy potřeba zajistit všechna výše uvedená data, mnohdy to ani není možné. Je však vždy zásadní ujistit se, že jsou zajištěna a zhodnocena minimálně ta data, která byla v rámci zadání či tvorby modelu identifikována jako zásadní. Vždy by se mělo jednat v rámci dat dodávaných v reálném čase alespoň o intenzity dopravy, je však nezbytné zhodnotit, zda je pokrytí celé sítě dostupnými daty dostatečné. Data z NDIC jsou volně dostupná neustále, tj. pro každý projekt v ČR, ne všude je však hlášení událostí dostatečně rychlé. Mnohá další zmiňovaná data

nemusí být sbírána v reálném čase, jsou nezbytná pro tvorbu a kalibraci modelu, nikoliv pro fungování digitálního dvojčete.

V kontextu dostupnosti dat, je rovněž vhodné uvést výčet potenciálních zdrojů dat:

Primární zdroje dat
Dopravní senzory - Tato zařízení poskytují data o pohybu vozidel v reálném čase, která lze použít jednak ke kalibraci a validaci modelu a jednak slouží jako vstupy. - Kontaktní institucí je většinou správce komunikací či správce telematických systémů města - Jedná se převážně o kamerové detektory, radary, indukční smyčky, příp. další
GPS data z vozidel - Tzv. FCD (Floating Car Data), neboli data z plovoucích vozidel - Kontaktní institucí je většinou dopravce - Data by měla být poskytována ve standardu GTFS
Datové databáze - Může se jednat o soukromé či otevřené databáze (je vhodné začít u otevřených dat) - Poskytovateli/vlastníky jsou města a městské organizace, ale i soukromé subjekty - Data mohou být různá, tj. dopravně-inženýrská data, mapové podklady a mnohá další
Sekundární zdroje dat (doplňující)
Data mobilních operátorů - Mohou poskytovat agregované informace o dopravním chování uživatelů. Potenciálně lze pracovat s anonymizovanými zdrojovými daty na vyšší úrovni (nákladné a komplikované). - Poskytovatelem je primárně mobilní operátor. - Data jsou komplexní a objemná, mohou být součástí VaV projektů probíhajícího na území města.
Sociodemografická data a další statistická data - Pro účely přípravy je vhodné vždy začít práci na základě veřejně dostupných statistických údajů o populaci. - Zdrojem je téměř výhradně Český statistický úřad. V menším rozsahu je ale řada dalších zdrojů dat v ČR. - Jedná se o data o populaci, dopravním chování a obecně data obsahující tzv. socio-demografický a socio-ekonomický profil území.

Úroveň / Standardy kvality

Otázka stanovení a dodržení vhodných standardů kvality je u dat velmi komplikovaná a vytváří odůvodnění a opodstatnění nutnosti provedení tzv. pasportizace. V tomto kroku si vlastně chceme odpovědět na to, zda jsou dostupná data dostatečně kvalitní. Zároveň má zde výhodu zpracovatel digitálního dvojčete – neměl by totiž být zodpovědný za zajištění dat a nemá proto důvod užívat data nižší kvality, než je vhodné. Opět se však nezbytná kvalita odráží od definovaných cílů a zadání projektu. Zároveň je pravdou, že digitální dvojče bude jen tak kvalitní, jak jsou kvalitní dostupná data, zbytek (tj. doplnění dat mezi intervaly aktualizace dat či v oblastech bez senzorů) je predikce a simulace modelu, tedy matematický dopočet. Není zároveň často možné diktovat kvalitu dat, mnohdy je nezbytné pracovat s tím, co je k dispozici a podle toho upravit i projekt.

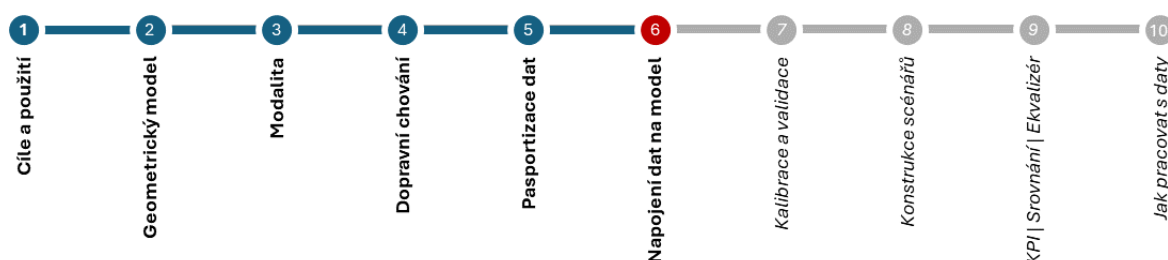
Při zpracování dat o pohybu chodců je kromě hledisek kvality, zahrnujících přesnost a relevanci dat, zásadním úkolem dodržovat vysoké standardy ochrany osobních údajů. Zajištění přesnosti dat vyžaduje použití ověřených technologií a metod pro sběr dat, jako jsou kamery s vysokým rozlišením a pokročilé algoritmy pro sledování trajektorií. Z hlediska ochrany osobních údajů musí být veškeré informace anonymizovány a zpracovány v souladu s lokálními i mezinárodními právními předpisy, jako je EU GDPR.

Úskalí, na co si dát pozor

Největším úskalím je neodhadnutí časové náročnosti tohoto kroku. Komunikace s vlastníky či správci dat musí začít skutečně již v počátcích a mnohdy se jedná o zdoluhavý iterativní proces zajištění a kontroly dat. Návazně přichází také nutnost úpravy či tvorby datových kanálů, to je však již následující krok.

Dalším úskalím, týkajícím se primárně shromažďování dat o pohybech chodců a dalších zranitelných účastníků dopravy, může být příliš malý počet a chybné nastavení kamer určených pro trasování pohybu – kamery například díky externím vlivům někdy zaznamenávají chodce na příliš velkou vzdálenost nebo pod úhlem, jenž neodpovídá potřebám algoritmů počítačového vidění pro rozpoznávání pohybu.

4.6 Napojení dat na dílčí modely

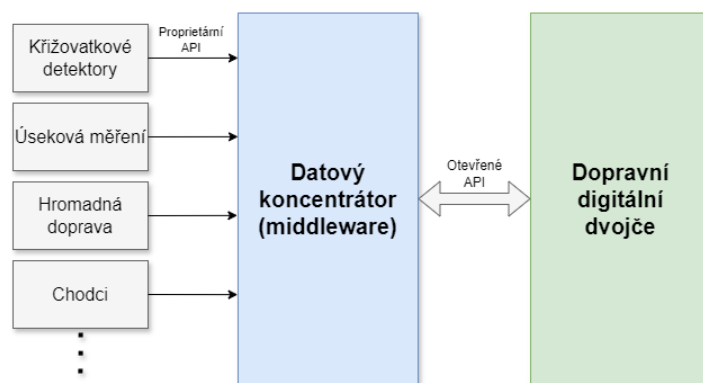


K čemu daný krok slouží

Datové zdroje dopravně-inženýrských dat, analyzované a pasportizované v minulém kroku, poskytují data v různé kvalitě, v rozličných formátech a s rozdílnou časovou granularitou. Pokud chceme takovéto datové zdroje napojit na simulační jádro digitálního dvojčete, je vhodné mezi navrhovaný systém a zdroje dat vložit *datový koncentrátor* – další kritickou vrstvu middlewaru, jež dvojčeti zajistí korektní propojení s různými zdroji dat. Protože tyto vstupy přicházejí v různých formátech a časových měřítkách, je třeba vytvořit robustní rámec pro integraci a synchronizaci dat. Konečným cílem je zpracovat a harmonizovat tato data do jednotného formátu a poskytovat je ideálně pomocí otevřeného komunikačního rozhraní (například kompatibilního s OpenAPI), které bude snadno přístupné a využitelné nejen digitálním dvojčetem, ale i navazujícími aplikacemi. Schematický pohled na pozici koncentrátoru ukazuje obrázek 3.

Postup prací, obecná doporučení

Dvojče jako konzument dopravních dat (data sink). Data by měla být systémem digitálního dvojčete přijímána z jednotného úložiště, které provádí základní úkoly pro ověřování pravdivosti a současnosti dat a případně reaguje na výpadky. Data jsou uvnitř dvojčete distribuována k jednotlivým dopravním modelům – například jsou přijímána subsystémem mikrosimulátoru, jenž je odpovědný za generování dopravních vstupů pro simulátor dopravy. V rámci napojování dat o pohybu chodců do modelu je potřeba on-line data (tedy profilová měření a trajektorie) zpracovat do strojově čitelné podoby v otevřeném formátu (např csv) a vložit do simulátoru pohybu chodců, spustit simulaci a následně výstupy v obdobném formátu odeslat do modelu.



Obrázek 3: Princip koncentrace dat z různých zdrojů pomocí datového koncentrátoru a jeho napojení na dopravní digitální dvojče

Formát a struktura dat: Data by měla být předávána v jednoduchém, ale zároveň nepříliš datově náročném datovém formátu (ASN/2 telegramy). Pokud nejsou příliš vysoké nároky na přenos dat, lze použít neutrální textové formáty (XML, JSON). Může to vyžadovat převod dat nebo použití middleware pro zprostředkování komunikace mezi různými formáty.

Úroveň / Standardy kvality

Pro úspěšné fungování digitálních dvojčat je zásadní zajistit efektivní integrace různých systémů a platform a interoperability mezi nimi. Je nutné zajistit, aby všechny komponenty, od senzorů až po pokročilé analytické nástroje, spolu mohly spolehlivě a v reálném čase komunikovat a vyměňovat si data. Tento proces vyžaduje standardizaci komunikačních protokolů a datových formátů, aby byla zaručena kompatibilita rozhraní a minimalizovány potenciální ztráty informací během přenosu. Současně je důležité implementovat mechanismy pro autentizaci a autorizaci dat, které zajišťují bezpečnost a integritu přenášených informací.

Pro efektivní správu dat je potřeba vytvořit centralizované úložiště, které umožní rychlý přístup a analýzu dat. Toto úložiště zahrnuje organizaci, ukládání, konsolidaci a zpřístupňování rozsáhlých objemů dat z různých zdrojů. Důraz by měl být kladen na metody čištění dat a jejich validaci, aby bylo zajištěno, že vstupní data do modelů jsou přesná a aktuální. Systémy by měly být navrženy tak, aby mohly efektivně zpracovávat jak historická data, tak data v reálném čase, což umožní dopravnímu digitálnímu dvojčeti se adaptovat na změny v dopravním prostředí.

Kvalitní napojení vstupních dat na modely vyžaduje multidisciplinární přístup a spolupráci expertů z různých oblastí, jako je dopravní inženýrství, data science a softwarové inženýrství. Tým musí být schopen řešit složité problémy, jako jsou analýza dat, modelování a vývoj softwaru. Je důležité, aby členové týmu rozuměli nejenom technickým aspektům, ale aby měli také porozumění pro dopravní systémy a dynamiku, což umožní efektivnější a přesnější zpracování dat z dopravních měření.

Digitální dvojče musí být schopno reflektovat aktuální změny v dopravní infrastruktuře a provozu, jako jsou nové cesty, změny v dopravním značení nebo změny v chování provozu. Vyžaduje proto vysokou flexibilitu v schopnostech zpracovávat data z nových zdrojů a vyžaduje také zaručené pravidelné aktualizace vstupních dat.

Data, zpracovávaná jako vstupy dopravního digitálního dvojčete mohou obsahovat citlivé osobní údaje (záznamy osob, dekodované registrační značky vozidel a podobně). Při zpracování těchto dat je třeba dbát na dodržování platné legislativy související s ochranou osobních údajů.

Možná úskalí, na co si dát pozor

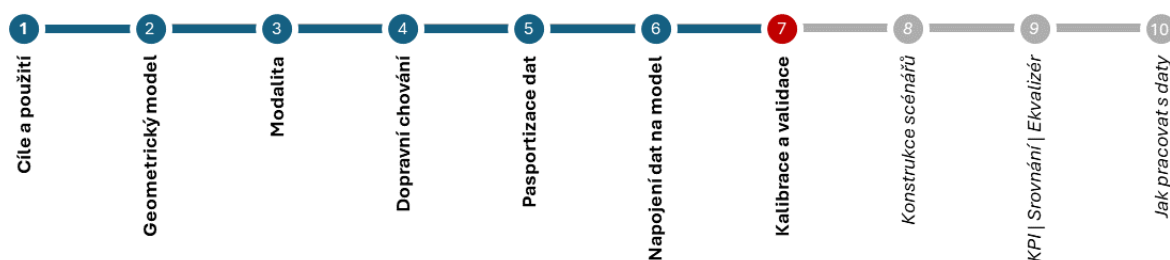
Zajištění obecné synchronizace dat, pocházejících z různých zdrojů, může být v reálném světě obtížné, zejména pokud data pochází z různých typů zdrojů od různých poskytovatelů.

Neúplná nebo nesprávná data mohou vést k nepřesnostem v simulaci. Detekce a oprava chyb v datech může být časově náročná, nicméně je jednou z podmínek správné funkce digitálního dvojčete.

Vzhledem k rostoucímu objemu dat a požadavkům na rychlé zpracování považujeme za vhodné, aby systém datového koncentrátoru byl navržen s ohledem na škálovatelnost a výkonnost. Infrastruktura by měla být schopna zvládnout zvýšení datového toku bez významného ovlivnění časů odezvy.

Digitální dvojčata, která zpracovávají a ukládají velké objemy dopravních dat, se mohou stát cílem kybernetických útoků. Klíčové je proto u takových systémů zabezpečení proti neoprávněnému přístupu, úniku informací nebo manipulaci s daty.

4.7 Kalibrace a validace dopravního dvojčete jako celku + iterace 4.2–4.7 v případě chybné validace



K čemu tento krok slouží

Kalibrací celé simulační části dopravního digitálního dvojčete zajistíme, aby dvojče správně zobrazovalo chování účastníků provozu v reálném světě. Kalibrace v tomto kroku předpokládá, že dílčí modely jednotlivých komponent již byly nakalibrovány při dodržení zásad, popsanych v kroku 4 v odstavci 4.4. Proces kalibrace simulační části je důležitým krokem v řetězci činností při tvorbě dopravního dvojčete, protože nám zaručuje důvěryhodné výsledky dopravní simulace, které můžeme používat jako základ pro rozhodnutí, která činíme. Během tohoto postupu upravujeme parametry jednotlivých dopravních simulačních modelů dvojčete tak, aby výstupy odpovídaly referenčním pozorováním v reálném světě. V případě dopravního digitálního dvojčete lze použít typické kalibrační postupy pro dopravní simulace, jež jsou popsány například v Chu et al. (2003); Ondráčková et al. (2017); Federal Highway Administration (2019).

Postup prací, obecná doporučení

Kalibrace je prvním (a často iterativně opakovaným) krokem pro přiblížení modelu co možná nejblíže reálné situaci. V případě kalibrace dopravních simulačních modelů se jedná o proces úpravy parametrů modelů za účelem přiblížení modelovaných a pozorovaných dat (například intenzit dopravy). Po kalibraci je nezbytné provést ještě validaci modelu, jež rovněž zahrnuje porovnání modelovaných a pozorovaných výstupů, v případě validace se ale musí jednat o jinou datovou sadu než tu, která je užívána pro kalibraci. Mělo by tedy jít o poslední krok, který nám potvrzuje / validuje, že je model dostatečně přesný (Ondráčková et al., 2017; Federal Highway Administration, 2019).

Jedním ze základních rozdílů mezi běžným modelem dopravy s dopravním digitálním dvojčetem je proces kontinuální kalibrace podřízených modelů v případě digitálního dvojčete. Tento postup

znamená, že procesy a podřízené modely dvojčete jsou neustále monitorovány a jejich parametry upravovány na základě měřených dat v oblasti zájmu dvojčete.

Vzhledem k nemožnosti předpovídat chování dopravního systému zcela přesně dochází i při přesné počáteční kalibraci dvojčete k postupnému zkreslení mezi simulovanými a pozorovanými dopravními procesy. Tradiční metody posuzování přesnosti a kvality kalibrace obvykle zahrnují třídění výstupních simulovaných dat a přímý výpočet konkrétní hodnoty odpovídající požadovanému kvantilu statistického souboru pozorovaných dat například pro sadu určitých dopravních detektorů a jeho porovnání s reálnými daty. Tyto metody mohou být ale zejména u velkých souborů dat poměrně náročné, protože vyžadují uložení a zpracování celého souboru měřených dat. V době tvorby tohoto dokumentu se sice nově objevují první postupy, navrhuující úpravu výsledného zkreslení výstupů digitálních dvojčat za chodu (Sharifi et al., 2024; Wannawas a Faisal, 2023; Ward et al., 2021), tyto postupy ale zatím nebyly vyzkoušeny v oblasti dopravních simulací, uvádíme je zde primárně jako informaci o možných dalších směrech vývoje stavu poznání v této oblasti.

V případě mikrosimulátoru dopravy SUMO lze pro kontinuální kalibraci modelu využít také tak zvané *kalibrátory* (DLR, 2024a). Jde o objekty na vozovce, které podle zadaných dopravních parametrů do simulace buď dodávají nebo z ní naopak odebírají vozidla či chodce. Tento postup je sice velmi efektivní, není ale příliš věrný realitě a pro účely dopravního digitálního dvojčete není vhodný.

Postup průběžné kalibrace modelu, zohledňující reálné chování provozu, který je využíván a otestován ve vzorovém dopravním digitálním dvojčeti autorů, je proto následující:

1. Pro účely průběžné kalibrace srovnáváme měřené sady dat z reálných detektorů a z detektorů dopravního digitálního dvojčete
2. Pro jednotlivé dopravní módy, jež je dopravní digitální dvojče schopno měřit, průběžně sledujeme odchylky mezi měřenými a simulovanými hodnotami
3. Pokud simulační odchylka překročí přednastavený práh (případně simulovaná hodnota opustí požadovaný kvantil měřených hodnot), dochází
 - a. k úpravě trajektorií vozidel a chodců tak, aby očekávané hodnoty v dalších krocích simulace lépe odpovídaly statistickému odhadu budoucích naměřených hodnot – některá vozidla a chodci tedy oblast zájmu digitálního dvojčete opouští dříve, než bylo původně plánováno, případně naopak dodatečná vozidla a chodci do simulace vstupují
 - b. k úpravě rychlosti vozidel VHD tak, aby jejich poloha lépe odpovídala statistickému odhadu jejich budoucí polohy

Ke statistickému odhadu polohy a hodnot měření na dopravních detektorech lze mimo jiné použít i běžné metody statistického modelování (stavové modely, Kalmanovu filtraci, autoregresní modelování, Bayesovské odhadování – blíže viz James et al. (2021); Hastie et al. (2009). Obdobným způsobem lze do modelu zapojit i modely s prvky umělé inteligence.

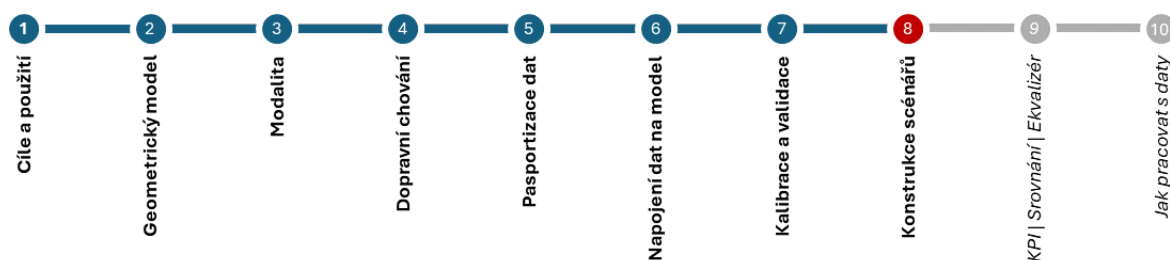
Úroveň / Standardy kvality

Dopravní digitální dvojče je stále jen digitálním modelem reálné situace a vzhledem k náhodným vlivům v dopravě bude vždy při simulaci docházet k drobným odchylkám od reality. Při kalibraci je proto třeba si nejprve stanovit potřebné standardy kvality, kterých se snažíme dosáhnout. Tyto standardy zaručují, že simulace co nejvíce odpovídá realitě a že vzorce a trendy dopravního chování, které vidíme v reálném životě, se v kalibrované simulaci přesně odrážejí. Možnými ukazateli v případě dopravního digitálního dvojčete jsou například cestovní časy, objemy dopravy a toky chodců. Čím přesnější je naše kalibrace, tím lépe naše simulace odpovídá těmto údajům ze skutečného světa.

Možná úskalí, na co si dát pozor

Během celého procesu kalibrace je třeba mít na zřeteli několik možných kritických bodů: Klíčovým faktorem je *spolehlivost reálných dat*, která používáme ke srovnání. Kalibrace na základě nesprávných nebo neúplných dat může způsobit zcela nesprávnou funkci digitálního dvojčete – musíme být proto obezřetní při výběru spolehlivých a přesných zdrojů dat a spolehlivost těchto zdrojů pravidelně ověřovat. Další situací, které je třeba se vyvarovat a kterou jsme zmiňovali i v aktivitách čtvrtého kroku v odstavci 4.4, je *přílišné přizpůsobení simulace datům* (v oblasti strojového učení bychom tuto situaci nazvali „přetrénováním“), k níž dochází v situaci, kdy simulace replikuje i náhodné odchylky nebo zkreslení ve vstupních datech. Výsledkem tohoto nesprávného postupu je dopravní dvojče, které sice dobře pracuje s kalibračními daty, ale neodráží správně skutečný systém reálného světa. Kalibrovanou simulaci je proto třeba vyhodnotit pomocí nezávislých sad vstupních dat, abychom potvrdili její obecnost. Musíme si také být vědomi *omezených možností simulace a kalibračního procesu*. V dopravních simulacích bude vždy existovat určitá míra nejistoty, protože přes svoji komplexnost je dopravní digitální dvojče stále zjednodušenou verzí reality. Výsledky kalibrace nesmí být interpretovány jako přesné projekce; je třeba brát v úvahu předpoklady, zjednodušení a nejistoty v datech.

4.8 Konstrukce scénářů pro demonstraci cílů z 4.1 a příprava modelu pro „co když“



K čemu tento krok slouží

„Co když“ scénáře jsou v oblasti plánování a řízení dopravy a v rámci dopravního managementu klíčové pro analýzu a předpovídání dopadů různých rozhodnutí, událostí nebo změn na dopravní systém. Mohou se týkat různých aspektů, jako jsou změny v dopravním uspořádání, výstavba nových silnic, změny v zónách s nízkými emisemi, nebo i krizové situace, jako jsou přírodní katastrofy nebo velké dopravní nehody.

Návrhy možných „co když“ scénářů

Mezi tématy typických scénářů, jež lze s pomocí dopravního digitálního dvojčete analyzovat, můžeme zařadit například

- *Krizové situace:* Scénáře jako je uzavření důležité silnice, dopravní nehody, havárie rozvodů, výjimečné stavy v tunelových stavbách, velké veřejné události, nebo přírodní katastrofy a jejich dopad na dopravní tok.
- *Infrastrukturní změny:* Dopady nových dopravních infrastruktur, jako jsou obchvaty, mosty, nebo cyklostezky.
- *Změny v regulaci:* Efekt nových dopravních pravidel, například zavedení zóny s nízkými emisemi nebo změna rychlostních limitů.
- *Technologické inovace:* Vliv nasazení autonomních vozidel nebo zavedení inteligentních dopravních systémů na efektivitu a bezpečnost dopravy.

Postup prací, obecná doporučení

Obecný postup tvorby „co když“ scénářů pro dopravní simulace v rámci systému, který představuje digitální dvojče reálného provozu na komunikacích, zahrnuje následující kroky, které jsou již částečně splněny předchozími etapami tvorby dopravního dvojčete:

1. *Definice cílů a parametrů scénáře:* Cíle scénáře v tomto případě odpovídají jednotlivým cílům tvorby dopravního digitálního dvojčete, stanoveným v odstavci 4.1. Definice parametrů pak spočívá v identifikaci klíčových proměnných a rozhodovacích bodů, které chceme v daném projektu testovat.
2. *Kontrola vstupních dat pro scénář:* Pro realistickou simulaci scénáře je nezbytné se ujistit o tom, že máme k dispozici datové zdroje, jež daný scénář vyžaduje (blíže viz odstavec 4.5). Dopravní digitální dvojče disponuje údaji o dopravním systému, včetně dat o provozu vozidel, pro konkrétní scénář mohou být ovšem potřebná další data o infrastruktuře, dopravních značkách, zákazech a omezeních, stejně jako doplňková data o dopravním chování.
3. *Implementace scénářů:* Pomocí dopravního dvojčete simulujeme různé „co když“ scénáře. Tato simulace může zahrnovat i implementaci předpokládaných změn do dopravních modelů dvojčete a sledování jejich vlivu na dopravní systém. Může jít například o změny v uspořádání dopravy, simulace zavedení nových technologií nebo očekávané změny v dopravním chování.
4. *Analýza a interpretace výsledků:* Výsledky simulací analyzujeme s cílem zjistit dopady předpokládaných změn. To zahrnuje hodnocení efektivity dopravního systému, bezpečnosti, dopadů na životní prostředí a dalších relevantních faktorů.
5. *Prezentace výsledků a doporučení:* Nakonec se výsledky prezentují zainteresovaným stranám, ať už jako demonstrace změněné situace či jako sada doporučení pro plánování, řízení dopravy nebo přijetí opatření na základě zjištěných dopadů.

Standardy kvality

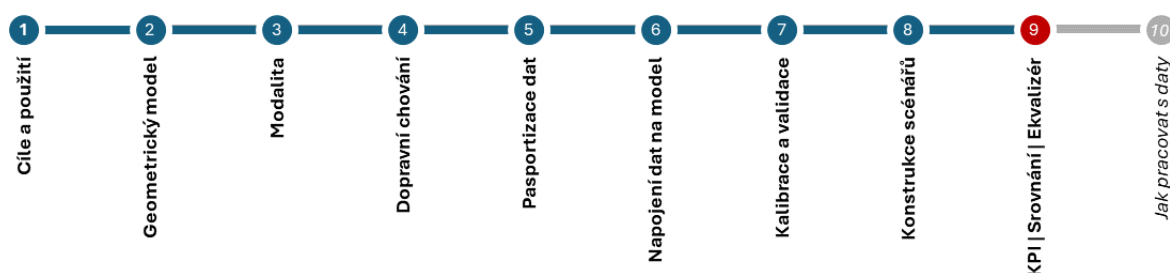
Důležitým aspektem celého procesu je iterativní přístup, kdy se scénáře opakovaně testují s různými parametry a modely dopravního dvojčete se v případě potřeby upravují na základě zpětné vazby a nově získaných dat. Tento přístup umožňuje lepší pochopení možných výsledků a zvyšuje flexibilitu při plánování a reagování na nové situace v dopravním systému.

Možná úskalí, na co si dát pozor

Základem přesných výsledků jsou kvalitní vstupní data. Pokud z jakéhokoliv důvodu nemáme vstupní data pro daný scénář v požadované kvalitě, nelze výsledky považovat za relevantní.

Dopravní systémy jsou významně ovlivněny chováním jednotlivců, které nemusí být ani u dopravního digitálního dvojčete předvídatelné nebo konzistentní. Při tvorbě scénářů je třeba zohlednit různorodost v chování účastníků dopravy. Dopravní systémy mohou být také ovlivněny externími faktory, jako jsou ekonomické změny nebo změny v legislativě. Při tvorbě scénářů je třeba i tyto faktory vzít v úvahu a zvážit jejich potenciální dopad.

4.9 Extrakce KPIs / srovnání / ekvalizér



K čemu daný krok slouží

KPI (klíčový ukazatel výkonosti, z angl. *Key Performance Indicator*) je technický termín, popisující měřitelný či kvantifikovatelný parametr, jenž je výsledkem simulovaných či reálných procesů a umožňuje rychlé a efektivní porovnání dvou a více situací či scénářů. V případě modelů a digitálního dopravního dvojčete jde zpravidla o dopravně-inženýrská data či další informace jako je hustota dopravy, zpoždění dopravou, kvalita ovzduší či spotřeba paliva, které je možné využít pro posouzení několika variant či situací.

Tyto KPIs mohou být vztaženy na celý model (průměrné či kumulativní hodnoty), či pro jeho část (například jednu křižovatku, mezikřižovatkový úsek, jeden směr odbočení atd.). Pokud se tedy například zdržení na jednom odbočovacím pruhu na křižovatce významně změní v rámci dvou scénářů nebo v průběhu dne, může to indikovat zhoršení situace.

Postup prací, obecná doporučení

Celkový výčet možných KPI byl měl být rovněž definovaný již v úvodu projektu dopravního digitálního dvojčete. Možnost extrakce těchto indikátorů významně souvisí s dostupnými daty, rozsahem a konstrukcí digitálního dvojčete (například volba dopravních módů) a řadou dalších faktorů (např. zvolený software).

Obecně výčet vhodných KPI může vypadat například následovně (je však skutečně nezbytné zvážit účel využití daného digitálního dvojčete):

- Intenzity dopravy – dopravní zátěž na konkrétních měřicích bodech
- Obsazenost – hustota dopravy na konkrétních měřicích bodech
- Počet vozidel na úseku – dopravní zátěž na konkrétních úsecích
- Doba obsazení úseku – vyjadřuje hustotu dopravy na specifickém úseku
- Délka front – indikátor kongescí a efektivity řízení dopravního toku na křižovatkách
- Doba zdržení – indikuje ztrátu času v důsledku zdržení v dopravě
- Jízdní doba – udává dobu potřebnou k překonání určitého úseku či celé oblasti
- Dodržování předpisů – zastavování v křižovatce, dodržování rychlosti a podobně
- Počet zastavení a rozjezdů – indikátor plynulosti a bezpečnosti dopravy a efektivity řízení
- Spotřeba paliva resp. energie – ukazatel energetické náročnosti dopravy na daném úseku
- Emise z dopravy – údaje o množství emitovaných znečišťujících látek (CO_2 , CO, HC, NO_x , PM_{10})
- Hluk z dopravy – predikce hlukové zátěže ve sledované oblasti

Výše uvedené ukazatele je možné jednoduše porovnat v rámci různých variant či scénářů (viz „co když“ scénáře, popisované v odstavci 4.8). Je však nezbytné vhodně zvolit porovnávané ukazatele a porozumět jejich hodnotám. Při reálném porovnání množství ukazatelů je nezbytné zapojení širší pracovní skupiny složené z odborníků na dané oblasti (životní prostředí, bezpečnost dopravy aj.).

Nad množstvím těchto indikátorů je možné vytvořit tzv. **ekvalizér**: při kontinuálním sledování všech vybraných ukazatelů stanovíme pro každý z nich limitní hranice a pozorujeme jak často, jak dlouho a jak moc jsou které hranice překračovány. Toto můžeme sledovat kontinuálně pro všechny části infrastruktury a specificky zasahovat tam, kde je zjištěný největší problém. Lokální chvilkové extrémní překročení hraničních hodnot například koncentrací CO₂ nemusí v rámci celkové kvality ovzduší nic znamenat. Pravidelné dlouhodobé či setrvalé překračování limitů však již může být adekvátním ukazatelem, že něco není v pořádku.

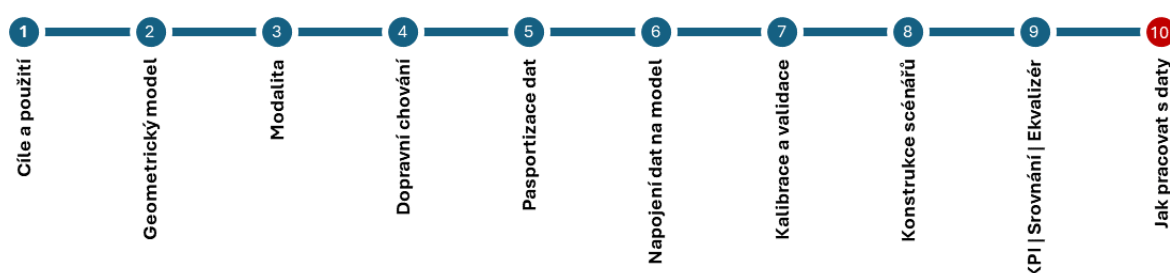
Možná úskalí, na co si dát pozor

Velkým nebezpečím při vyhodnocování výstupů dopravního digitálního dvojčete je nevhodná interpretace těchto výstupů (například lokální dočasné překročení kvality ovzduší).

Při multikriteriálním hodnocení čehokoliv je obtížné správně zvolit váhu jednotlivých ukazatelů. Nastavením vah a lineární kombinací hodnotících kritérií (což je víceméně standardní postup při vícekritériální analýze) navíc můžeme přijít o podmnožinu lokálních optim, jež by mohla být jinak také zahrnuta a vyhodnocena.

Se zkreslenou interpretací souvisí také šíření výsledků bez patřičného kontextu pro širokou laickou veřejnost. Při nesprávném nakládání s informacemi se tak může snadno přínos dopravního digitálního dvojčete zcela znehodnotit.

4.10 Jak pracovat s výstupními daty



K čemu daný krok slouží

Konstrukcí dopravního digitálního dvojčete práce nekončí. Je to naopak spíše začátek. Objednatel se v tomto případě ocitá v bodě, kdy má k dispozici funkční digitální dvojče, které zobrazuje aktuální stav a reaguje na nastalé situace, respektive umí pracovat se scénáři. Na základě tohoto nástroje nám vznikají různé vizualizace stavu dopravy a podobně. Musíme však s výstupy umět nakládat i jinak.

Tento krok je orientovaný na maximalizaci užitku z funkčního digitálního dvojčete. Jedná se o hledání nejefektivnějších cest, jak dále nakládat s výstupními daty.

Postup prací, obecná doporučení

Výstupní data systému poskytují podklady pro další analýzu oblasti zájmu. Jedná se buď o již dříve definované KPIs či přímo o výstupní dopravně-inženýrská (intenzity, rychlosti aj.), či environmentální data (emise, spotřeba aj.). Tato data by měla být poskytována jako **otevřená data**. Je vhodné je sdílet v reálném čase v otevřených formátech do dalších otevřených řešení prostřednictvím standardních API rozhraní, jako je například OpenAPI (Linux Foundation, 2022).

Výstupní data je vhodné rozdělit dle toho, jak s nimi budeme dále nakládat, respektive k jakému účelu budou využita. Nabízí se následující rozdělení:

1. Výstupy v reálném čase × historická data:

Reálný čas: Data používaná pro aktuální monitoring a reakce na změny v dopravním systému. Tyto data vyžadují rychlé zpracování, způsob jejich ukládání musí tuto potřebu zohledňovat. Jde o data, která jsou klíčová pro operativní rozhodování. Kromě standardních SQL databází je pro ukládání možno využít specializované real-time databáze jako je Redis, MongoDB, či Apache Kafka.

Historická data: Data shromážděná a archivovaná pro dlouhodobou analýzu a plánování. Tato data mohou být použita pro analýzy trendů, předpovědi a optimalizace. Nevyžadují okamžitý a rychlý přístup s minimální latencí a proto je lze ukládat jiným způsobem, jenž například efektivně zmenšuje jejich objem. Historická data je nezbytné skladovat po předem jasně stanovenou dobu, ideálně v rámci jednotek let alespoň pro data agregovaná do časových segmentů nebo jiná data nenáročná na datovou kapacitu. K účelu skladování lze použít i vhodná databázová úložiště pro práci s časovými řadami dat (InfluxDB, MongoDB), která automaticky převzorkovávají historická data kvůli úspoře kapacity úložiště.

2. Data podle typu cílového uživatele:

Data relevantní pro strategické rozhodování, jako jsou dlouhodobé dopravní trendy a modelové predikce, jsou primárně využívána vedoucími projektů či plánovači. Oproti tomu uživatelé, reprezentující operativní řízení potřebují pro svou činnost data zaměřená na běžný provoz a krátkodobé změny, jako jsou informace o aktuálním stavu dopravy a varování před překážkami.

Podle využití dat můžeme výstupní data digitálního dvojčete dále zpracovávat například na sady dat vhodné pro

- **Optimalizaci provozu:** Sem patří data využívaná k nastavení dopravní signalizace a analýze a optimalizaci dopravního řízení.
- **Bezpečnostní opatření:** Do této kategorie řadíme data, jejichž zpracování lze získat informace o místech s vysokým potenciálem výskytu dopravních nehod, která mohou být použita k posílení bezpečnostních opatření.
- **Environmentální dopad:** Data zaměřená na hodnocení environmentálních dopadů dopravních toků, jako jsou údaje o emisích a hluku z dopravy.

Příklady dobré praxe:

Integrace s geografickými informačními systémy (GIS): Integrace výstupních dat ze simulací dopravního digitálního dvojčete s GIS může napomoci zlepšit geografický kontext a prostorové analýzy. Tato integrace umožňuje vizualizovat dopravní tok, nehody, hustotu provozu a další klíčové indikátory přímo na mapě daného území, což vede k lepšímu porozumění vzorcům a trendům v dopravním chování. GIS může být také použit pro simulaci dopadů různých dopravních opatření, což pomáhá při rozhodování o umístění nové infrastruktury nebo úpravách stávající. Pro účely plánování a reakce na krizové situace umožňuje GIS rychlé lokalizování problémových oblastí a efektivnější koordinaci záchranných a údržbových prací.

Automatizované reporty: Automatizace reportů z výstupních dat simulací přináší významné zlepšení v efektivitě zpracování a sdílení informací. Tyto reporty mohou být nastaveny tak, aby periodicky nebo na základě určitých událostí poskytovaly aktualizované informace o stavu dopravního systému, včetně výkonu, bezpečnostních rizik a operativních metrik. Automatizované reporty zajišťují, že

všechny zainteresované strany, včetně vedoucích pracovníků, plánovačů a týmů pro krizovou reakci, mají přístup k nejnovějším datům, což umožňuje rychlejší a informovanější rozhodování. Tato funkcionality zahrnuje také vytváření výstrah a notifikací, které mohou automaticky upozornit na potenciální problémy nebo potřebu zásahu.

Rozhodování založené na datech: Pro zvyšování efektivity a účinnosti řízení dopravních systémů je stěžejní podpořit rozhodovací procesy analýzou konkrétních dopravních dat. Toto rozhodování zahrnuje sběr, analýzu a interpretaci dat získaných simulací scénářů dopravního digitálního dvojčete a jejich aplikaci na reálné situace. Tento přístup umožňuje přesnější předpovědi dopravních toků, optimalizaci světelné signalizace, plánování údržby a reakci na mimořádné události. Díky průběžné analýze dat mohou dispečeri a plánovači lépe identifikovat rizika a příležitosti, předvídat budoucí vývoj a adaptovat strategie v reálném čase. Tento přístup zahrnuje zpracování výstupních dat pomocí pokročilých analytických nástrojů a algoritmů strojového učení a umělé inteligence. Taková analýza umožní hlubší pochopení komplexních vzorců a trendů v dopravních datech.

Úroveň / standard kvality

Práce s výstupními daty je možná jen při zajištění adekvátní úrovně kvality. Je nezbytné, aby byl srozumitelně popsán způsob přístupu a sdílení dat. V případě vzdáleného přístupu je nezbytné odpovídajícím způsobem poskytnout také dokumentaci k datovému rozhraní (API).

Proces zajištění vstupních dat je vhodnou zkušeností pro zpracovatele, aby bylo jasné definovat, v jakém formátu by byla vstupní data ideální. Výstupní data z tohoto projektu se mění pro třetí strany v data vstupní. Je tedy nezbytné zajistit maximální možné zjednodušení struktury dat, aby byla snadno pochopitelná a tuto strukturu adekvátně zdokumentovat.

Dopravní digitální dvojče pracuje s daty v reálném čase. Návazně probíhá zpracování dat a modelace. Zde tedy nastává určitá časová odchylka. Je nezbytné zajistit konzistentní časovou odchylku od zpracování a modelace, tj. Vzniku výstupních dat, aby mohli další uživatelé předvídat tuto časovou odchylku.

Možná úskalí

Významným rizikem je **dezinformace**, resp. dezinterpretace dat. Je třeba stanovit, co bude skutečně otevřené a veřejně přístupné, případně jaká množina dat bude sdílena pouze na vyžádání s doplňujícími komentáři, doprovázena vysvětlením. To platí nejen pro otevřené sdílení dat, ale také již agregovaných informací a výstupů.

Flexibilitu je rovněž možné vnímat více způsoby. Bude-li o výstupní data zájem, může nastat situace, kdy různí uživatelé budou mít různé požadavky na úpravu způsobu sdílení těchto dat či formátů. Tomuto by se měl zpracovatel či návazně správce hotového projektu vyhnout. Digitální dvojče by se nemělo přizpůsobovat nárokům třetích stran. Je nutné zachovat přímocharost a naplňovat cíle stanovené na začátku projektu.

Checklist

Níže uvedená tabulka slouží jako jednoduchá kontrola naplnění základních kroků.

KONTROLNÍ OTÁZKA	ODPOVĚĎ
Jsou jasně specifikované cíle projektu?	
Jsou cíle projektu konkrétní a srozumitelné?	
Jsou k dispozici kompletní data pro tvorbu geometrického modelu v plném rozsahu pro zajištění adekvátní kvality?	
Je jasně definovaný výčet dopravních módů v souladu s cíli?	
Bude nutné specificky upravovat modely dopravního chování?	
Pokud ano, jsou k tomu adekvátní data či alokovaný rozpočet a čas pro jejich zajištění?	
Je navázána komunikace se všemi poskytovateli dat?	
Proběhla pasportizace dat? Tzn. Je známý kompletní výčet, kvalita, přesnost, aktuálnost, formát atd.	
Jsou zajištěná data kompletní pro zajištění stanovených cílů?	
Odpovídá kalibrovaný model realitě?	
Je navržen postup průběžné kalibrace dvojčete na reálná data?	
Jsou navržené “co když” scénáře vhodně navrženy a realizovatelné?	
Jsou definovány konkrétní parametry či KPI, na základě kterých je možné srovnávat aktuální stav a scénáře?	
Je možné část či všechna výstupní data efektivně sdílet v otevřeném formátu?	

5 Matice cílů a potřebných dat

Matice cílů a potřebných dat, uvedená v tabulce 6, mapuje vztahy mezi cíli, stanovenými v oddíle 4.1 a hlavními typy dat, k nimž je třeba získat přístup pro dosažení těchto cílů. Kompletní přehled dostupných dat by měl vzniknout v rámci 5. kroku tvorby metodiky, jenž je popsán v odstavci 4.5, tato matice slouží jako pomůcka pro rychlou orientaci v potřebných sadách dat pro vybrané problémy.

V tabulce jsou zahrnuty následující skupiny dat, představující hlavní skupiny datových podkladů, popsaných v oddíle 4.5:

- **Mapové podklady:** Zahrnují vektorové zaměření hran komunikací a terénu, případně také kompletní pasportizaci dopravní infrastruktury včetně značení a inženýrských sítí či vysoce kvalitní ortofoto snímky s nadstandardním rozlišením, a případně též HD mapy z navigačních systémů obsahující detailní vektorizovanou infrastrukturu.
- **Dopravní detektory:** Poskytují data o intenzitě dopravy, hustotě provozu, případně rychlosti vozidel. Některé detektory jsou schopny poskytovat i další parametry (typ vozidla, jeho dobu jízdy, případně cestu v monitorované oblasti).
- **Informace z kamer:** Analytické výstupy z kamerových systémů, monitorujících dopravní situaci. Kamerové detektory dopravních veličin patří do první skupiny.
- **GPS data:** Zahrnují polohová data a trasy vozidel z GPS senzorů. V městském prostředí nemusí být tato data od některých poskytovatelů na požadované úrovni přesnosti.
- **Data z MHD:** Zahrnují informace o polohách vozidel MHD a jízdních řádech.
- **Sociologická data:** Data o obyvatelstvu, jeho dopravním chování, a jiné dopravně-sociologické informace, které mohou ovlivnit plánování infrastruktury.

Tabulka 6: Matice cílů a potřebných datových sad pro dopravní digitální dvojče. Označení (ANO) definuje položky, jež je možné využít, nejsou ale podmínkou.

Cíle / Data	Mapové podklady	Dopravní detektory	Kamery	GPS data	Data z MHD	Socio. data
Zlepšení dopravního toku	ANO	ANO	(ANO)	(ANO)	ANO	NE
Snížení počtu dopravních nehod	ANO	ANO	(ANO)	(ANO)	NE	NE
Podpora plánování infrastruktury	ANO	NE	NE	(ANO)	ANO	ANO
Reakce na nenadálé situace	ANO	ANO	ANO	(ANO)	ANO	NE
Predikce vývoje krizové situace	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	NE

6 Literatura

Centre for Digital Built Britain (2022). National Digital Twin Programme [online]. University of Cambridge [cit. 2024-01-15]. Dostupné z <https://www.cdbb.cam.ac.uk/what-we-did/national-digital-twin-programme>

Chu, L., Liu, H. X., Oh, J. S., & Recker, W. (2003). A calibration procedure for microscopic traffic simulation. In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems* (Vol. 2, pp. 1574-1579). IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITSC.2003.1252749>

Crespi, N., Drobot, A. T., & Minerva, R. (2023). *The Digital Twin*. Cham: Springer International Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4>

DLR (2024a). SUMO Calibrator [online]. Berlin:German Aerospace Center (DLR) [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://sumo.dlr.de/docs/Simulation/Calibrator.html>

Evropská komise (2024). EU taxonomy for sustainable activities [online]. European Commission [cit. 2024-01-15]. Dostupné z: https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities_en

Farsi, M., Daneshkhah, A., Hosseini-Far, A., & Jahankhani, H. (Eds.) (2020). *Digital twin technologies and Smart cities* (Vol. 1134). Berlin/Heidelberg, Germany: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-18732-3>

Federal Highway Administration (2019). *Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software. 2019 Update to the 2004 Version* [online]. FHWA-HOP-18-036. Washington: U.S. Department of Transportation. [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop18036/index.htm>

James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2021). *An Introduction to Statistical Learning* (Vol. 112). New York: Springer. Dostupné také z: <https://www.statlearning.com/>

Linux Foundation (2022). The OpenAPI Initiative [online]. The Linux Foundation [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.openapis.org/>

Lopez, P. A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y. P., Hilbrich, R., ... & Wießner, E. (2018, November). Microscopic traffic simulation using SUMO. In *2018 21st international conference on intelligent transportation systems (ITSC)* (pp. 2575-2582). IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569938>

Ondráčková J., Hofhansl P., Melzer Z., Dufek J., Volek J., Valta J., Čampula R., Tögel M. (2017). *Metodika pro tvorbu hodnocení makroskopických dopravních modelů* [online]. Brno: CDV [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.shopcdv.cz/cs/metodika-pro-tvorbu-hodnoceni-makroskopickych-dopravnich-modelu>

OpenStreetMaps Contributors (2024). Otevřená mapová data [online]. The OpenStreetMaps Foundation [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.openstreetmap.org/>

Sharifi, E., Grayson, K., Müller, S., and Thober, S. (2024) A Novel Bias-Adjustment Methodology for Streaming Global Climate Models. EGU General Assembly 2024. Vienna: Austria. EGU24-9083, DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-9083>

Still, G. K. (2014). *Introduction to Crowd Science*. CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/b17097>

Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J.H. (2009). The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. Springer Series in Statistics Vol. 2. New York: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21606-5>

Ward, R., Choudhary, R., Gregory, A., Jans-Singh, M., & Girolami, M. (2021). Continuous calibration of a digital twin: Comparison of particle filter and Bayesian calibration approaches. Data-Centric Engineering, 2, e15. DOI: <https://doi.org/10.1017/dce.2021.12>

Wannawas, N., & Faisal, A. A. (2023). Physics-informed reinforcement learning via probabilistic co-adjustment functions. arXiv preprint arXiv:2309.05404. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.05404>

Příloha A Příklad dopravního digitálního dvojčete

Pražská Evropská ulice (třída) je vyústěním jednoho z ramen Vítězného náměstí v Dejvicích směrem na západ. Dopravně je ovlivněna zejména příjezdem v křižovatce s ulicí Horoměřickou. Dále ulice navazuje na dvě stanice metra (Nádraží Veveslavín a Bořislavka), které jsou zároveň přestupními stanicemi na autobusovou dopravu a pohybuje se zde velké množství lidí. Ulice končí mimoúrovňovým křížením s Pražským okruhem. Evropská má po celé své délce oba jízdní směry odděleny středovým pásem, v němž je od Vítězného náměstí po Divokou Šárku vedena tramvajová trať. V současné době probíhá v úseku Nádraží Veveslavín – D0 výstavba trolejbusové trati, která spojí tuto stanici metra s Letištěm Václava Havla.

Cílem projektu Dopravní digitální dvojče Evropská (TAČR CK02000118, 2021-2024) bylo vytvoření konceptu, jenž využije digitální, informační a komunikační technologie pro vytvoření dopravního dvojčete, popsaného zásadami této metodiky. Projekt cílil na efektivní využívání stávajících a hledání nových zdrojů, snižování spotřeby energií, eliminaci zátěží životního prostředí, optimalizaci dopravy a sdílení dat pro veřejné účely.

V průběhu řešení projektu byl zpracován model s vybudovanou a dovybavenou infrastrukturou a technologiemi tak, aby bylo možné zpracovat prediktivní modely chování dopravy na základě informací z těchto zařízení. Následně byl model vyhodnocen a porovnán s reálnými situacemi a provozem tak, aby vznikl optimalizovaný model predikce chování dopravního proudu. Součástí řešení byla digitalizace a standardizace jednotlivých vstupů, výstupů a protokolů, zajištění kooperace mezi jednotlivými subsystémy. Vstupními hodnotami pro zpracování a modelování dopravního proudu byly v projektu uvažovány výstupy zejména z těchto zařízení:

- Dopravní opatření
- Dopravní detektory
- Kooperativní systémy ve vazby na MHD a autonomní vozidla
- Analytické výstupy z kamerového systému
- Informace z radičů SSZ
- Informace o polohách vozidel a jízdních řádech MHD

A.1 Stanovení cílů

V projektu byl kladen důraz na vyšetření několika faktorů, ovlivňujících provoz v oblasti. Šlo zejména o následující:

- Dopravní omezení, byť na krátkém úseku, s sebou přináší negativní ovlivnění dopravy s dosahem až několik kilometrů, což má neblahý vliv na IAD, ale zejména MHD.
- Dalším negativním faktorem jsou chodci a jejich nekontinuální proud přes vedlejší komunikace. Tito ovlivňují vpravo odbočující vozidla, která tak zastavují hlavní trasu a dochází ke vzniku kolon a skoro nehodám.
- Dalším negativním faktorem silně omezujícím dopravu a křižovatky u nádraží Veveslavín je železniční přejezd. Ten ovlivňuje markantně dění v celé křižovatce Evropská – Nádraží Veveslavín, neboť se tvoří kongesce uvnitř této křižovatky, které pak zamezují průjezdu hlavního tahu po Evropské.

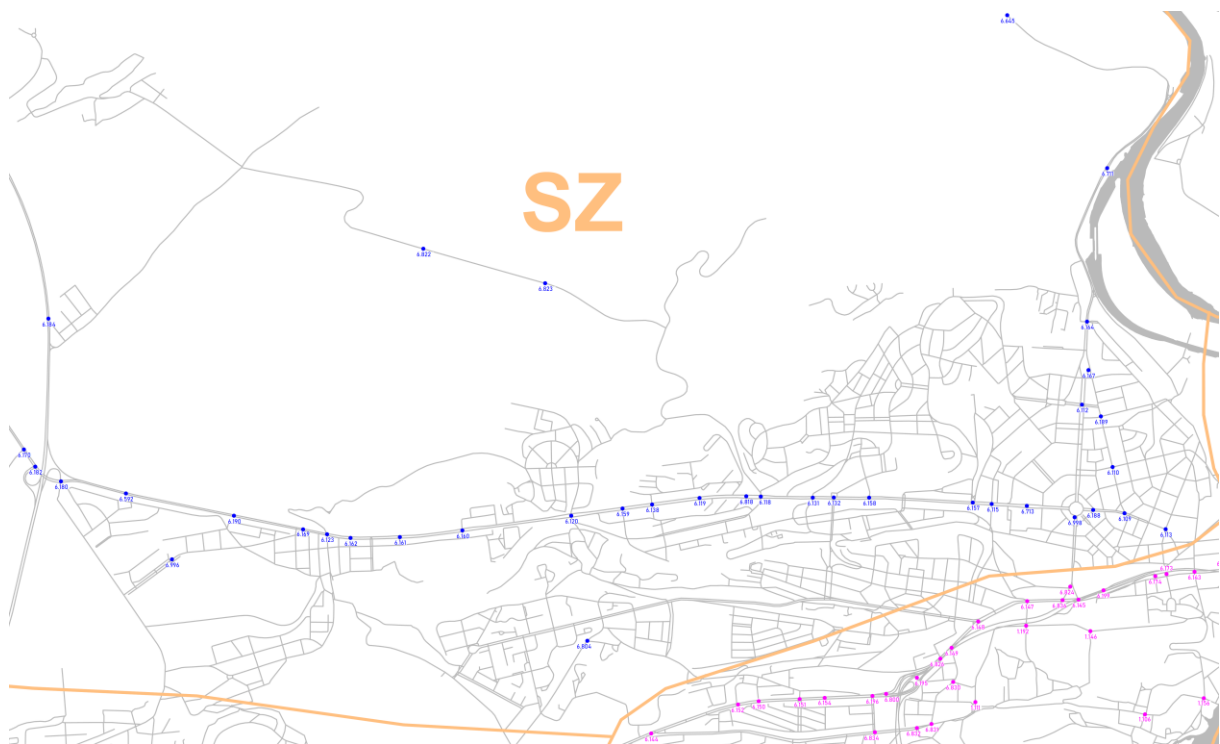
V dalším textu ukážeme, jak kvantifikovat a zkoumat vzájemné závislosti těchto jevů pomocí dopravního digitálního dvojčete. Budeme zkoumat dopady výše uvedených jevů zejména na:

- Snižování dojezdových dob

- Snížení kongescí a zvýšení plynulosti dopravy
- Zlepšení preference MHD
- Úspora elektrické energie
- Snížení znečištění zejména NO_x a CO_2
- Zvýšení bezpečnosti

Uvažovaná oblast pro dopravní digitální dvojče na Praze 6 je zásadním radiálním komunikačním příjezdem a odjezdem z metropole pomocí Evropské ulice a okolních přílehlých komunikací. Architektura výstavby dopravně telematických systémů v oblasti městské části Prahy 6 a navazujících městských částí jako je Praha-Lysolaje, Praha-Suchdol, Praha-Nebošice či Praha-Přední Kopanina a dalších částí navazuje na telematické systémy Městského i Pražského okruhu. Obě významné komunikace dne svým způsobem oblast dopravně významně určují. Na jedné straně je to tunelový komplex Blanka a na druhé straně vazba na pražský okruh potažmo vazba na dálnice D7 a D6.

Z hlediska dopravního řízení spadá toto území do tak zvané oblasti severozápad (SZ), kterou tvoří městské části Ruzyně, Liboc, Veleslavín, Střešovice, Vokovice, Dejvice, Bubeneč, Suchdol, Sedlec, Lysolaje, Nebošice, Přední Kopanina, a další. Bylo zde dosud realizováno celkem 39 světelně řízených křižovek a přechodů, převážná část z toho právě na Evropské třídě. Některé křižovatky mimo oblast Evropské fungují jako izolované, některé křižovatky fungují v koordinované skupině. Na obrázku 4 je vyznačena celá oblast SZ s křižovatkami osazenými SSZ.



Obrázek 4: Oblast SZ s modře vyznačenými křižovatkami SSZ

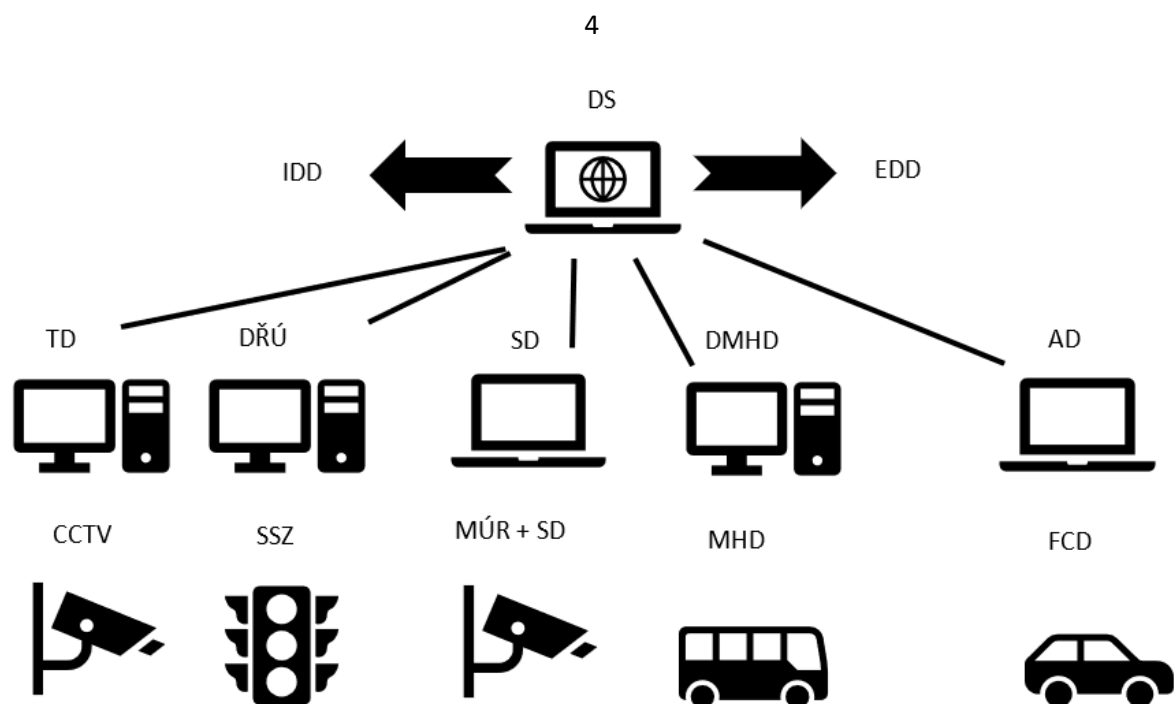
Celá lokalita Evropské třídy je pro účely dopravního řízení rozdělena do pěti oblastí, z nichž první dvě nejsou v tomto projektu plánovány jako součást modelu dopravního digitálního dvojčete. Pro tvorbu simulačního modelu jsme proto v první fázi shromáždili dopravně-inženýrská data o následujících světelně řízených křižovatkách:

- Oblast 3 (Veleslavín)
 - 1) 6.119 Evropská – přechod Sídliště Červený vrch
 - 2) 6.120 Evropská – Veleslavínská

- 3) 6.138 Evropská – Etiopská
- 4) 6.159 Evropská – Alžírská
- Oblast 4 (Bořislavka)
 - 1) 6.118 Evropská – Horoměřická
 - 2) 6.131 Evropská – Na Pískách
 - 3) 6.132 Evropská – Starodejvická
 - 4) 6.158 Evropská – U Hadovky
 - 5) 6.818 Evropská – Súdánská přechod
- Oblast 5 (Dejvická)
 - 1) 6.115 Evropská – Gymnasijní
 - 2) 6.157 Evropská – Šárecká
 - 3) 6.713 Evropská – přechod Dejvická

K výše uvedeným křižovatkám byla získána dopravní řešení, z nichž lze vyčíst polohu jednotlivých dopravních detektorů a také kompletní signální plány. Oboje je nezbytnou podmínkou pro vytvoření kvalitního dopravního modelu: v něm je třeba umístit virtuální dopravní detektory na totožné polohy v jízdních pružích a je v něm také třeba implementovat odpovídající signalizační logiku replikující chování jednotlivých dopravních řadičů právě na základě signálních plánů uvedených v dopravních řešeních.

Vlastní sběr dat na modelované oblasti vychází architektury města, která je třívrstvá a obsahuje základní části pro distribuci dat (DS) znázorněné na obrázku 5 níže. Architektura v případě Prahy je uzavřená, dopravní data nejsou k dispozici přes otevřená rozhraní. Pro externí přístup k datům je proto potřeba součinnost městských firem (TSK Praha) respektive jejich kontraktorů (ELTODO, CAMEA, VARS). Přístup k datům je typicky přes proprietární rozhraní, je tedy třeba na základě dokumentace připravit možnost automatického napojení na vybraná nebo požadovaná data.



Obrázek 5: Sběr dat a jejich distribuce

Zdrojem dat budou pro Evropskou třídu zejména data z dopravně řídicích ústředen (DŘÚ – ODŘÚ/HDŘÚ), na které jsou napojeny zejména světelně signalizační zařízení. Budou také využita další data ze systémů úsekového měření (MÚR) a ze strategických detektorů (SD), jež jsou ukládány na serveru detektorů. Důležitým dalším prvkem pro sběr dopravních dat je možnost využití dat poskytovaných dispečinkem MHD (DMHD) a případně alternativní detekce (AD) – ta zahrnuje další informace jako jsou detektory z plovoucích vozidel (FCD) a podobně.

A.2 Geometrický model

Vlastní mikrosimulační model dopravního digitálního dvojčete byl v případě tohoto projektu vytvořen v otevřeném mikrosimulátoru dopravy Eclipse SUMO. SUMO je především mikroskopickým, prostorově spojitým simulátorem silničního provozu. Podporuje multimodální a intermodální pozemní provoz, včetně kolejové a lodní dopravy. SUMO modeluje jednotlivá vozidla a jejich interakce pomocí modelů pro sledování vozidel, změnu jízdního pruhu a modelů dopravního chování na křižovatkách. Používá také zjednodušený model chodců k simulaci pohybu osob a jejich interakce s vozidly.

Obecně můžeme simulaci v SUMO zadat a nastavit pomocí sady XML souborů obsahujících vlastní síť komunikací, údaje o složení a distribuci typů vozidel v dopravním proudu, o trasách těchto vozidel, o nastavení řízení dopravy a o dalších parametrech dopravy, jako jsou například jízdní řády či řetězce cest obyvatel. Poté simulátor SUMO spustíme přes příkazový řádek s odpovídajícím konfiguračním souborem. Každá simulace může vytvářet předdefinované soubory XML obsahující statistiky nebo protokoly simulace.

Počáteční kroky tvorby geometrického modelu Evropské třídy spočívaly ve třech hlavních částech:

- 1) Byly vytvořeny skripty v jazyce Python pro automatizaci procesů generování a modifikace XML souborů, jakož i definování simulačních instrukcí a výsledné analýzy;
- 2) Validace a úpravy souborů na konkrétních částech pro projekt D3E; a
- 3) Pomocí uživatelského nástroje pro editaci dopravní sítě NETEDIT proběhly a budou ještě v budoucích měsících probíhat opravy, úpravy a přidávání dalších prvků do sítě.

Základním vstupem pro model Evropské třídy byla mapová data z webové služby OpenStreetMaps. Tato hrubá původní data lze stáhnout přímo pomocí nástrojů Eclipse SUMO, pro naše účely bylo nutno mírně upravit původní soubor osmGet.py.

Pomocí příkazu NETCONVERT byl z mapových podkladů vygenerován síťový soubor SUMO. V tomto kroku také proběhl časově náročný proces „jemného doladění“ podkladů pro dopravní síť, který: a) odfiltruje síťové prvky, které nebudeme simulovat, b) použije heuristické algoritmy SUMO k opravě problematických prvků sítě, c) automaticky vygeneruje určité prvky (např. chodníky podél ulic), d) rozdělí hrany na určité segmenty a e) definuje, které vrstvy chceme z OSM dat do modelu vložit.

Pro vybranou oblast bylo doplněno ortofoto z otevřených fotogrametrických podkladů. Síť SUMO byla doplněna o fotografické dlaždice a přesně zapadá do fotografií a síťové prvky, jako jsou silnice, křižovatky, jsou správně umístěny v modelu.

Dalším krokem bylo použít NETEDIT pro ruční úpravy nejen v síťovém souboru SUMO, ale také v dalších souborech (pro plány dopravní signalizace, zastávky veřejné dopravy a stanice). Tento krok je časově nejnáročnější a nejnáročnější na úsilí. Nhrubo jsme provedli následující kroky jsou:

- i. Kontrola typů křižovatek (např. priorita, semafor, všechny zastávky, zip atd.).

- ii. Ruční definice „zipů“ automobilové dopravy.
- iii. Kontrola spojení křižovatek (možný pohyb mezi příchozími a odchozími pruhy) a přednosti v jízdě.
- iv. Kontrola atributu *keepClear*, abychom oproti tradičnímu modelu zajistili, že vozidla mohou zastavit a čekat uvnitř křižovatky.
- v. Zároveň s tím jsme ručně kreslili zákaznické tvary spojnic, hranic křižovatek a přechodů pro chodce.

Následovala kontrola preferencí na přechodech pro chodce, protože tramvaje mají přednost v jízdě i před chodci (zatímco ostatní vozidla stále musí chodcům dávat přednost). Zkontrolovali jsme atributy hran a jízdních pruhů, zejména rychlost, šířku a typ vozidla, který je povolen k použití.

Přidali jsme zákazy pro změnu jízdního pruhu (např. při plné čáře a tam, kde jsou zákazy předjíždění). Časově náročná část spočívá v tom, že tato definice je nastavena pro celou hranu uličního grafu, takže v některých případech je nutné dělit komunikaci na více úseků, abychom správně definovali segmenty, kde je povolena změna jízdního pruhu.

Vytvořili jsme signální plány semaforů na základě reálných záložních plánů z dopravních řešení, poskytnutých Technickou správou komunikací hl.m. Prahy (TSK Praha). Ze všech úloh, při nichž se používá NETEDIT, představuje toto to nejnáročnější úsilí – každý plán musí být ručně přidán a zkontrolován, protože neexistuje automatický způsob importu a signální plány jsou k dispozici pouze v podobě tabulek a diagramů, uvedených v dopravních řešeních jednotlivých křižovatek.

V posledním kroku byly generovány další soubory infrastruktury, jako jsou dopravní detektory a doplňkové prvky dopravní infrastruktury. Zdrojem pro tyto informace byly soubory dopravních řešení vybraných křižovatek, prvky byly ručně definovány v definičních XML souborech SUMO.



Obrázek 6: Model Evropské v oblasti Bořislavky



Obrázek 7: Model Evropské v oblasti Vítězné náměstí – Gymnazijní

A.3 Modalita

Digitální dvojče Evropské třídy je aplikací, cílící na komplexní popis dopravní situace v oblasti mezi terminálem MHD Vokovice a Vítězným náměstím. Cílem dvojčete bylo simulovat nejen pohyb vozidel, ale také pohyby chodců, případně nástup a výstup osob na zastávkách MHD. V modelované oblasti byly identifikovány následující dopravní modalita:

- Individuální automobilová doprava (osobní i nákladní)
- Veřejná hromadná doprava:
 - autobus
 - trolejbus
 - tramvaj
 - metro
 - vlak
- Pěší doprava
- Cyklistická doprava

V souladu s postupy navrženými v odstavci 4.3 jsme seznam výše uvedených modelovaných dopravních módů redukovali následovně:

- Nebude modelována cyklistická doprava, neboť intenzita výskytu cyklistů v dané oblasti je zcela minimální a cyklisté v současné době významným způsobem neovlivňují dopravní situaci v oblasti.
- Veřejná hromadná doprava:
 - Nebude modelován provoz vlaků metra, pouze budeme modelovat pohyb osob z a do vstupů do podchodů stanice metra Veveřská. Provoz metra je pravidelný, nepotýká se s významnými mimořádnostmi kromě případných uzávěr stanice, které lze adekvátně modelovat uzavřením podchodů
 - Obdobně nebude modelován vlak, neboť vlaková doprava v tento okamžik významně neovlivňuje dopravní situaci na terminálu MHD. Bereme přitom na zřetel, že po rekonstrukci železniční trati se atraktivita vlakového spojení do centra může

významně zvýšit – v takovém případě bude třeba model odpovídajícím způsobem upravit a zahrnou do něj i vlakovou dopravu.

Po stanovení dopravních módů, které dvojče zahrnuje, proběhl import linek veřejné dopravy, tras, jízdních řádů a zastávek ze standardního formátu GTFS. Jízdní řády pražské MHD jsou v tomto formátu dostupné jako otevřená data na platformě Golemio. Vzhledem k liniové povaze modelované stavby nezahrnuje náš model kompletní množinu stanic obsluhovaných spoji, které oblastí projíždí, což se ukázalo jako jeden ze zdrojů problémů při importu GTFS dat – součástí tohoto kroku byly proto také úpravy, které mimo jiné umožní, aby spoj (v našem případě jsou takto dotčené autobusové linky) nejprve projel částí modelované oblasti, pak tuto oblast na určitou dobu opustil a pak se do ní opět v jiném bodě vrátil. Stejně tak byly provedeny úpravy kódu, jenž na základě sledu zastávek určuje, kudy spoje MHD po ulicích jedou: pražská OSM data neobsahují údaje o přesném vedení linek a heuristika, která v takovém případě počítá trasu jízdy mezi zastávkami na základě průměrné rychlosti a doby jízdy dle jízdního řádu, v některých případech selhává.

Dále bylo rozhodnuto požádat o možnost analýzy obrazu z městského kamerového systému pro účely kalibrace modelu chodců v oblasti terminálu MHD Veveslavín. Po jednáních s dotčenými orgány (PČR, MP Praha, magistrát hl.m. Prahy) bylo konstatováno, že data z kamerového systému nelze třetím stranám poskytnout, neboť od dat vzhledem k povaze systému a ochraně citlivých údajů neexistuje možnost exportu, pouze přehrání na místě. Bylo proto rozhodnuto o instalaci vlastních měřících kamer bez trvalého záznamu obrazu pro sledování pohybu detekovaných osob po oblasti na stožáry veřejného osvětlení ve správě městské společnosti Technologie hl.m. Prahy.

A.4 Modely dopravního chování

Data o pohybu vozidel v oblasti Evropské třídy pocházejí ze dvou hlavních zdrojů: jde primárně o data z křižovatkových detektorů, zahrnující především počty vozidel a obsazenosti detektorů, pro prvotní kalibraci modelů vozidel jsou ovšem výhodou potřeba data o typických rychlostech vozidel v dané oblasti. Tato data bylo možno získat z některých úseků v oblasti, kde je nainstalováno úsekové měření rychlosti.

Na základě těchto dat proběhla základní kalibrace modelu následování vozidel (car-following model) a modelu změny jízdního pruhu (lane-change model) v mikrosimulátoru SUMO. Ve své současné verzi nabízí SUMO paletu celkem 16 možných modelů, s ohledem na dřívější zkušenosti byl pro silniční vozy použit standardní Kraußův model¹ a pro tramvaje standardní model pohybu železničních vozidel² s odpovídajícími parametry vozů T3, 14T a 15T používaných pražskou MHD.

Data o pohybu chodců byla nejprve analyzována týmem VUT Brno komerčním simulátorem Pathfinder, jenž je specializovaný na pohyb osob. Pohyb osob je zde pohyb řízen sadou algoritmických pravidel pro vyhýbání se překážkám a ostatním chodcům. Pathfinder používá komplexní způsob plánování trasy s možností dynamické změny cíle a více úrovní rozhodování o směru pohybu a zaměřuje se na praktickou použitelnost a výpočetní efektivitu, což může být v některých situacích výhodnější, ale za cenu určitého zjednodušení reálného chování davu. Očekávaným výstupem analýzy byly předpokládané trajektorie pohybu chodců v oblasti Veveslavína.

V rámci finálního modelování v aplikaci dopravního digitálního dvojčete byly tyto trajektorie importovány do modelu dopravního digitálního dvojčete tak, aby vznikl interní model

¹ Více viz <https://sumo.dlr.de/pdf/KraussDiss.pdf>

² Více viz https://sumo.dlr.de/docs/Simulation/Railways.html#modelling_trains

multimodálního dopravního systému – zatímco některé osoby procházejí modelovanou oblast pěšky, další využívají služeb MHD k přesunu na jiná místa dopravní sítě.

A.5 Pasportizace dopravně-inženýrských dat

Základním krokem pro tvorbu datové základny dopravního digitálního dvojčete bylo zajištění a pasportizace dat. Pasportizace dat byla provedena s cílem vytvořit srozumitelný přehled všech dostupných datových zdrojů a samotných dat, která tyto zdroje poskytují. Zaměřili jsme se primárně na dopravní data, která je možno použít jako tzv. real-time zdroj dat k postupné aktualizaci dopravního modelu. Mimo to byla v období 2021 a 2022 zajištěna další data, která jsme ovšem převážně využili pouze jednorázově pro účely tvorby bazálního dopravního modelu – jejich podmnožinu pak využíváme pro kalibraci a validaci finálního modelu, resp. kontextuálních informací. Jedná se například o prostorová data jako je model terénu či 3D model Prahy (poskytovaná jako otevřená data přes portál otevřených dat hl.m. Prahy³), data o dopravní infrastruktuře, různé mapové podklady včetně podkladů o umístění budov, umístění zastávek MHD, data o vedení tras MHD, dále statistická data veřejně dostupná ve veřejné databázi Českého statistického úřadu⁴, tj. data o obyvatelstvu a jiná dopravně-sociologická a dopravně-ekonomická data, případně pro dílčí účely veřejně dostupná data OpenStreetMap contributors.

Během tohoto kroku řešení byly vytipovány všechny dostupné datové zdroje poskytující data, která by mohla být nějakým způsobem využitelná v projektu. Tyto zdroje jsme rozdělili na dvě kategorie – *volně dostupné* a *neveřejné*. U volně dostupných jsme zanalyzovali data z následujících zdrojů: Dopravní podnik hl.m. Prahy, Technologie hl. m. Prahy, Institut plánování a rozvoje hl. m. Prahy, Golemio / Operátor ICT. U neveřejně dostupných dat byly nejdůležitějším zdrojem data Technické správy komunikací hl.m. Prahy. Díky společnému úsilí řešitelů se po déle trvajícím jednání podařilo získat oficiální povolení k přístupu k datům ze systémů provozovaných společnostmi CAMEA a ELTODO. Tyto datové sady se ukázaly jako zásadní relevantní zdroj použitelných dat pro účely modelování dopravy v projektu s maximální vypovídající hodnotou. Jedná se o data z křižovatkových detektorů, Bluetooth detektorů, kamer detekujících RZ, přehledových kamer a radarových detektorů. Na tato data navázala tvorba SW nadstavby pro vytěžování on-line dat z dopravních ústředen.

Základní modality dat, uvažované jako vstupy pro projekt Dopravní digitální dvojče Evropská, uvádí tabulka 7.

Tabulka 7: Datové zdroje uvažované jako vstupy pro projekt D3E

Zdroj	Data	Priorita (klíčová, doplňková)	Popis
TSK	Intenzity dopravy z modelu dopravy	K	Ideálně export v GISovském formátu (atributy jsou intenzity dopravy po hodinách či jiných časových jednotkách pro celý rok) Esri Shapefile, GeoPackage atd. Případně jakýkoliv jiný formát, se kterým jde nějak pracovat prostorově. Tj. výstupy kompatibilní se SW, ve kterém to bylo tvořeno (preferuji ale obecně použitelné výstupy).

³ Viz například <https://opendata.praha.eu>, resp. <https://www.geoportalpraha.cz/cs/data/otevrena-data/seznam>

⁴ Viz <https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=home>

			Dále jednoduše tabulkové výstupy.
	Intenzity dopravy senzory – profilové měření	K	Předpokládám pouze tabulkové výstupy. Nezbytné minimálně po hodinách pro celý rok. Rozmístění senzorů. Typy senzorů.
	Intenzity dopravy – směrové měření	D	Pokud jsou k dispozici například z kamer (jedná se o data z křižovatek). Rozmístění senzorů. Typy senzorů.
	Rychlosti	D	Radary a úseková měření. Tabulkové výstupy. Rozmístění senzorů. Typy senzorů.
	Skladba dopravního proudu	D	Tabulkové výstupy. Rozmístění senzorů. Typy senzorů.
	Parametrizace silniční sítě	K	Délka úseků, šířka úseků, počty pruhů; rozmístění SDZ, VZD, SSZ, sčítačů atd. Signální plány. V GISovském formátu Esri Shapefile, GeoPackage atd.
Green center	Data z parkovišť	D	Minimálně příjezdy odjezdy (časy), pokud možno typ vozidla, délka parkování atd. Také statická data: umístění, kapacita, velikost atd.
Soukromá parkoviště off-street	Data z parkovišť	D	Minimálně příjezdy odjezdy (časy), pokud možno typ vozidla, délka parkování atd. Také statická data: umístění, kapacita, velikost atd.
THMP	Umístění sloupů VO	K	V GISovském formátu Esri Shapefile, GeoPackage atd. – defacto se jedná o pasport.
IPR	Budovy	D	Z nějakého důvodu není volně k dispozici lokalita Vítězného náměstí Prahy 6 co se budov týče. Zbytek máme. Jedná se o shapefiley, kde jsou uvedeny parametry typu výšky budov a dalších technických charakteristik.
	Inženýrské sítě	D	Územně analytické podklady z portálu Atlas Praha 5000 (iprpraha.cz), ale v otevřeném formátu Esri Shapefile, GeoPackage atd. https://app.iprpraha.cz/apl/app/atlas-praha-5000/
	Katastr nemovitostí	D	Líbí se mi představa volně dostupných dat z katastru nemovitostí (tj. nikoliv ve webové aplikaci). Umožnilo by to rychle a efektivně zhodnotit realizovatelnost konkrétních typů opatření. Kromě toho by bylo možné propsat vlastníka k vrstvě s budovami.
	3D model – je volně dostupný		Pokud možno bez budov a vegetace – tj. jen povrch. Asi je generován poloautomaticky, nikoliv zaměřením, ale nevíme.
DPP, ROPID	Vedení linek a elektrické infrastruktury	K	Včetně jakýchkoliv dalších možných dat jako je frekvence spojů, grafiky atd.
	Rozmístění zastávek MHD a jejich pasportizace	K/D	Tj. vč. vybavy, roku realizace atd.
	Dopravní průzkumy	D	Počty cestujících (zastávky a vozidla) pro předmětné linky vč. metra.
Městská policie	Centrální kamerový systém	K	Respektive možnost využití obrazu pro následnou analýzu.
ČSÚ	SLDB 2011, 2021	D	Detailní disagregovaná data.
Letiště Ruzyně	Počty cestujících	D	Intenzity za časovou jednotu pro jednotlivé terminály.

	Časy příletů a odletů	D	Kvůli plánování dopravy.
	Data z parkovišť	D	Minimálně příjezdy odjezdy (časy), pokud možno typ vozidla, délka parkování atd. Také statická data: umístění, kapacita, velikost atd.
Různé	Komerční sféra – data o počtech pracovníků/návštěvníků	D	Univerzity (ČVUT, VŠCHT, ÚK, ale i ČZÚ – z Dejvic tam lidé jezdí), obchodní domy, větší firmy.
Dopravci - vlaková doprava	Přepravní objemy, jízdní řády, technologické možnosti, ...	D	

Systém sběru dopravních dat v Praze

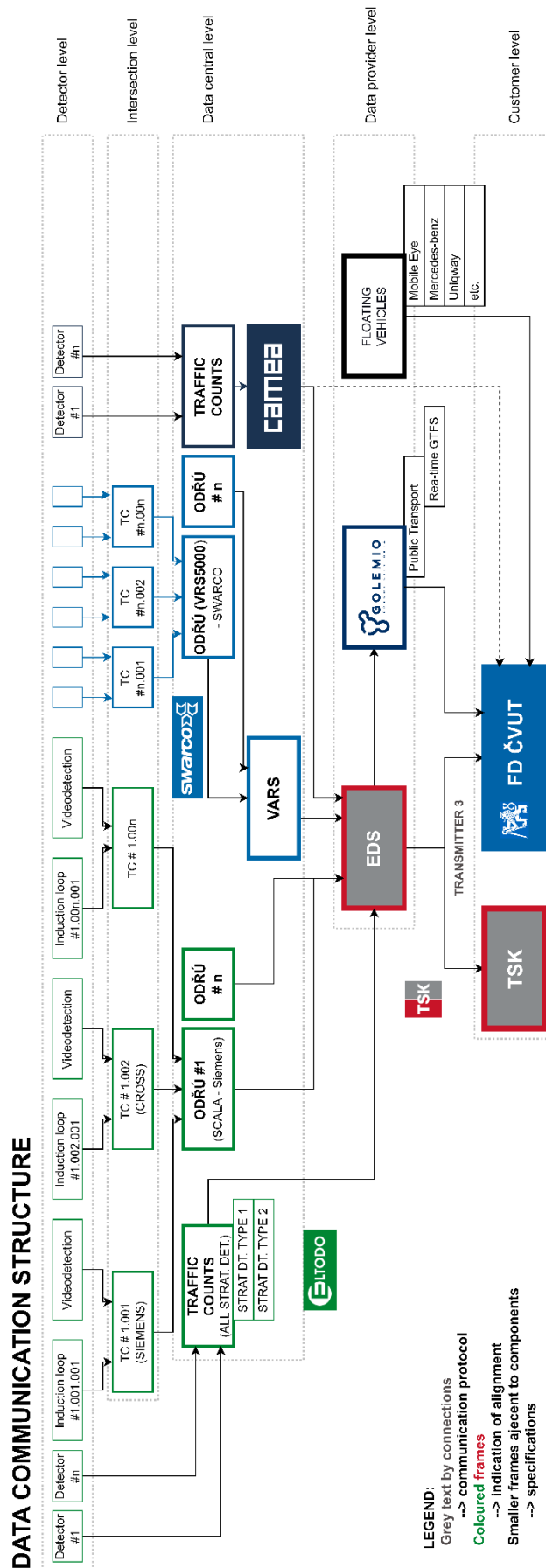
S ohledem na potřebu zajištění real-time dat bylo nezbytné porozumět aktuálnímu systému sběru, přenosu a uchovávání dopravních dat v gesci TSK Praha.

V systému datové komunikace pražské silniční sítě se data přenášejí mezi různými úrovněmi a komponentami městského telematického systému pomocí kombinace drátových a bezdrátových komunikačních protokolů. Celý systém s výčtem komponent a přehledem dílčích datových úrovní je uveden na obrázku 8 níže.

Pro účely tohoto projektu můžeme rozlišit tři úrovně sběru dat:

1. Úroveň detektorů,
2. Úroveň křižovatek,
3. Úroveň datového centra.

Na úrovni detektorů se data sbírají z indukčních smyček, kamer a dalších typů detektorů. Tyto detektory jsou připojeny k úrovni křižovatky, kde centrální jednotky křižovatky integrují data z detektorů. Centrální jednotky křižovatky používají drátové komunikační protokoly, jako je Ethernet nebo proprietární sériové komunikační protokoly, k přenosu dat na další úroveň, tj. úroveň datového centra (primárně tzv. Oblastní dopravní řídicí ústředny, ODŘÚ).



Obrázek 8: Graf propojení dílčích datových komponent.

Přenos dat na dopravní ústřednu probíhá prostřednictvím kabelové nebo optické přenosové trasy TSK (tam, kde je dostupná). V dopravní ústředně jsou data ukládána a v agregované formě jsou vyčítána a zpracována komunikačním modulem externího dodavatele (v tento okamžik jde o modul Transmitter společnosti ELTODO) pro potřeby plnění systému ADI (aplikace pro dopravní inženýry společnosti VARS, umožňuje přístup k datům, statistické a analytické vyhodnocení aktuálních i historických dat a export dat). ADI zahrnuje všechny detektory, které jsou součástí datových přenosů mezi řadičem SSZ křižovatky a Hlavní dopravní řídicí ústřednou (HDŘÚ). Řadiče připojené prostřednictvím protokolu OCIT mají (vyjma chodeckých tlačítek) poskytovat data všech křižovatkových detektorů (včetně mimořádných stavů). Mezi poskytovaná data nejsou zařazeny stavy povelových signálů. Na úrovni datového centra se data přijímají v ODŘÚ, datových centrech dílčích dodavatelů senzorů (ELTODO, CAMEA, aj.), a v některých případech také v systémech společnosti VARS, jež je integrátorem pro dopravní technologie SWARCO.

Na úrovni poskytovatele dat se data přijímají v EDS, resp. HDŘÚ a integrují se s dalšími zdroji dat. EDS potom posílá data do GOLEMIO. Přenos dat do HDŘÚ probíhá prostřednictvím kabelové nebo optické přenosové trasy. Data jsou uložena v cloudu a mohou být přístupná třetím stranám a uživatelům jako otevřená data pomocí API poskytovaných GOLEMIO.

Technická správa komunikací hl. m. Prahy, a.s. zajišťuje provoz páteřní optické sítě v metru, na městském okruhu a na radiálách. Dohromady se jedná o cca 150 km optických sítí. Optická síť slouží především pro přenosy dat z křižovatek, sběr dat informačního systému, přenosů kamerového systému z křižovatek a k začlenění kamerového systému TSK do integrovaného městského kamerového systému. Přenosy dat, informací a přenosy z kamerového systému zajišťující bezpečný provoz v pražských automobilových tunelech. Dále optická síť slouží k přenosům dat a informací z městského okruhu, integrovaného systému dat TSK z ODŘÚ na HDŘÚ, k propojení záchytných parkovišť P+R (Park and Ride) a jejich obsazenosti, k propojení optických sítí v Kolektorech Praha a k propojení datových a informačních sítí TSK s oblastními pracovišti a magistrátní sítí.

Vzhledem k důležitosti sbíraných dat pro správu dopravy a analýzu dopravních trendů je důležité zajistit, aby systém datové komunikace byl robustní a odolný vůči selháním nebo útokům. To zahrnuje implementaci bezpečnostních opatření jako jsou firewally nebo autentizace, a také zajištění redundance klíčových prvků systému tak, aby bylo zajištěno, že systém bude fungovat i v případě selhání jednotlivých prvků. Systémy datové infrastruktury jsou také pravidelně servisovány, probíhá jejich údržba a aktualizace systému.

Jednou z klíčových komponent řetězce sběru dat je modul ELTODO Trasmmitter, shromažďující pro TSK Praha data z dopravních detektorů. Data jsou z datového centra společnosti ELTODO vyčítána v současné době prostřednictvím nepříliš spolehlivého aplikačního rozhraní na bázi SOAP architektury. Údaje z detektorů CAMEA shromažďujeme i z důvodu výpadků rozhraní Transmitter prostřednictvím API CAMEA, které poskytuje přímý přístup k anonymním datům z kamer umístěných na křižovatkách. Tyto údaje z kamer jsou velmi cenné pro analýzu dopravních kolapsů a návrh opatření ke zlepšení průjezdnosti křižovatek.

Pro správnou funkci dopravního dvojčete je potřebné umět z dostupných zdrojů vytvářet ucelený obraz stavu dopravy na dopravní síti. V lokalitách dopravních uzlů a přilehlých komunikací se zpravidla vytváří ucelený dopravně inženýrský obraz. K tomu mohou napomoci i data z plovoucích vozidel flotil přístupných na portálu ŘSD (ta se ovšem v městské zástavbě neukazují jako příliš spolehlivá) či doplnění dalších detektorů. Do budoucna předpokládáme, že bude možné využít technologii C-ITS, nicméně vozidla zatím tuto technologii nemají standardně ve výbavě.

Dalšími způsoby, jak získat dopravní data, je využití následujících technologií:

- Bluetooth detektory – sběr dat z vozidel využívající tuto technologii
- RFID detektory – specifické pro některé náhradní díly vozidel (většina koncernů používá RFID při výrobě k identifikaci konkrétního vozidla)
- Wi-Fi – vhodná komunikace spíše na přenos dat, ale také může být na základě mobilních telefonů v autě
- FCD – plovoucí vozidla, využití zdroje dat ŘSD
- Čtení RZ – sběr dat pomocí kamerového systému
- Kamerové systémy – detekce incidentů
- Jednoduché videodetektory
- Dohledový systém na vybraných místech
- Sčítače dopravy
- ÚAMK data a informace
- Informace o mimořádných událostech z web portálů, DIC apod.

Nabízí se pět variant možností využití takových detektorů, konektivity z jejich lokalit, případně jejich vzájemná kombinace:

- Lokální propojení stávajícího detektoru s řadičem v křižovatce pomocí univerzálního komunikačního modulu, individuální nastavení SW v lokalitě podle podmínek.
- Využití centrálního SW, tzn. lokální nastavení detekčních kamer a centrální sběr incidentů a událostí, a propojení s dopravně řídicím SW na lokalitách do definovaného uložště.
- Využití obrazového signálu z detektorů nasazením externích speciálních dopravních algoritmů do centrálního SW, vyhodnocovací logika a propojení s dopravně řídicím SW na lokalitách do definovaného uložště.
- Osazení lokality speciálními dopravními detektory a využít datové konektivity směrem do definovaného uložště.
- Využití přímého mapování na externí zdroje dat přes definovaná rozhraní, které poskytují správci zdrojů dat jako je TSK, ŘSD apod.

Navrhované základní vstupy pro dopravní model digitálního dvojčete:

Pro získávání spolehlivých dat o dopravním proudu pro účely modelování a řízení vybrané dopravní oblasti, je všeobecně vhodné sbírat tyto dopravní parametry a informace:

- Intenzita provozu
- Obsazenost provozu
- Rychlost dopravního proudu
- Zastavené vozidlo
- Jízda v protisměru
- Zanechaný předmět na vozovce
- Detekce chodce a cyklisty
- Pomalu jedoucí vozidlo
- Klasifikace jednotlivých vozidel
- Obsazenost jízdního pruhu
- Průměrná rychlost proudu
- Doba průjezdu a doba zdržení v definovaném jízdním pruhu
- Délka kolony v definovaném jízdním pruhu

Z výše uvedených parametrů je poté možné následně určit velmi věrný obrázek chování dopravního proudu v dané lokalitě, oblasti, přilehlých oblastech, na vybrané komunikaci a podobně. Data je také vhodné porovnávat a doplňkovým měřením zpřesňovat. Typickým upřesněním dat je využití dronů

v definované vhodné lokalitě, či využití vhodné formy FCD – plovoucích dat z flotil vozidel. Taktéž je vhodné využívat data z okolních oblastí, aby bylo zřejmé chování spolu s dopady do sledované měřené, resp. řízené oblasti. Z průběhů dopravně-inženýrských dat na vjezdu nebo na výjezdu z naší modelované oblasti nebo sledování okolních oblastí je možné následně predikovat chování, které může zapříčinit vznik mimořádných událostí či dopravní nestability v námi ovlivňované oblasti. Doporučuje se sledovat i širší okolí, aby bylo možné včas a adekvátně reagovat na „přelévání“ dopravních výkonů. Za tímto účelem je vhodné sledovat zejména:

- Vznik nehody
- Vznik uzávěry (tunelů, jízdního pruhu)
- Zvýšení intenzity dopravy
- Plánované opatření
- Vlivy počasí (déšť, sníh apod.)
- Požadavek na objížděku

Všechny tyto vlivy mají zásadním způsobem dopad na přesun dopravních toků ze sousedních oblastí i do oblasti, kterou modelujeme. To může mít za následek nevyhovující kapacitu (nekapacitu) a vznik požadavku na reakci předvídatelného charakteru, ale i obtížně předvídatelného s širšími dopady.

Pro dopravní model dané oblasti se doporučuje zajistit tyto parametry:

1. Dopravní zátěže na dopravní síti

- Zohlednění výstupů o zjišťovaných a odvozovaných dopravních zátěžích s možností rozlišení podle:
 - Období (s granularitou až na úroveň 1 min)
 - Rozlišované skladby dopravního proudu
 - Řazení v jízdních pružích v dopravních uzlech
- Možnost výpočtu zátěží modifikované matice směrových vztahů načtené uživatelem

2. Matice směrových vztahů na hlavní a vybrané vedlejší komunikační síti

- Automatické generování matice směrových vztahů cest zachycených dopravních prostředků na hlavní komunikační síti
- Automatické přebírání směrových vztahů z videodetekce na komunikační síti s možností využití detekce RZ
- Automatické přičítání MHD vozidel podle skutečně odjetých spojů
- Automatické dopočítávání vztahů z dostupných FCD
- Automatická kalibrace pomocí údajů z detekční sítě v dopravních uzlech a strategické vrstvy na úsecích z křižovatek SSZ nebo strategických detektorů

3. Automatické rozlišování skladby dopravního proudu

- Data z městské hromadné dopravy
- Intenzita veřejné hromadné dopravy v rozlišení na úseky komunikací, resp. úseky tras mezi zastávkami
- Intenzita dopravy prostředků hromadné dopravy (VHD, MHD) v síti linek VHD/MHD v členění podle trasy

Dopravní zatížení sítě by mělo zohledňovat kalibraci na všechny dostupné údaje o profilových intenzitách a směrových průzkumech.

Doporučená data pro funkční požadavky modelu:

- Podoba dopravní komunikační sítě

- Organizace dopravy na dopravních komunikacích, uspořádání řazení jízdních pruhů v dopravních uzlech, stop čáry, šířky pruhů, poloměry odbočení a podobně
- Dopravní značení
- Informace o telematických zařízeních se vztahem k modelu
- Světelně řízené křižovatky a jejich signální plány
- Profily s dopravními detektory
- Nástroje penalizace
- Parkovací místa
- Zastávky MHD/VHD
- Výstupy z relevantních telematických zařízení
- Počty vozidel v detekčních řezech a dojezdové doby mezi videodetektory využívající rozpoznání RZ
- Dopravně-inženýrské parametry a další potřebné údaje o stavu dopravy, klasifikaci dopravy apod.
- FCD data a dalších data z otevřených portálů ŘSD, TSK apod.
- Počty pěších a cyklistů z monitorovaných úseků dopravní komunikace
- Data o počtu MHD, C2X a dalších detektorů a systémů umístěných v dané oblasti a okolí

Dopravní model by měl v ideálním případě využívat stejnou datovou bázi jako dopravní portál hl. m. Prahy, tedy stejnou uliční síť a síť cyklistických a pěších tras jako dopravní portál. Tím je zajištěna kompatibilita a jednoznačná identifikace mezi různými částmi systému a následného začlenění dopravních dat.

Instalace kamerového systému

Na základě předběžného souhlasu s jednáním ze strany THMP jako správce stožárů veřejného osvětlení byl nejprve získán aktuální pasport stožárů VO v oblasti stanice Nádraží Veveřslavín a z tohoto seznamu vytvořen požadavek na souhlas s instalací zařízení na vytipovaných celkem 15 stožárů VO v oblasti terminálu VHD. Umístění stožárů ukazuje Obrázek 9.



Obrázek 9: Požadované stožáry VO k umístění kamer VDT v oblasti terminálu Nádraží veveřslavín.

Požadavek bylo nutno několikrát aktualizovat, neboť se průběžně měnila původně předpokládaná místa instalace:

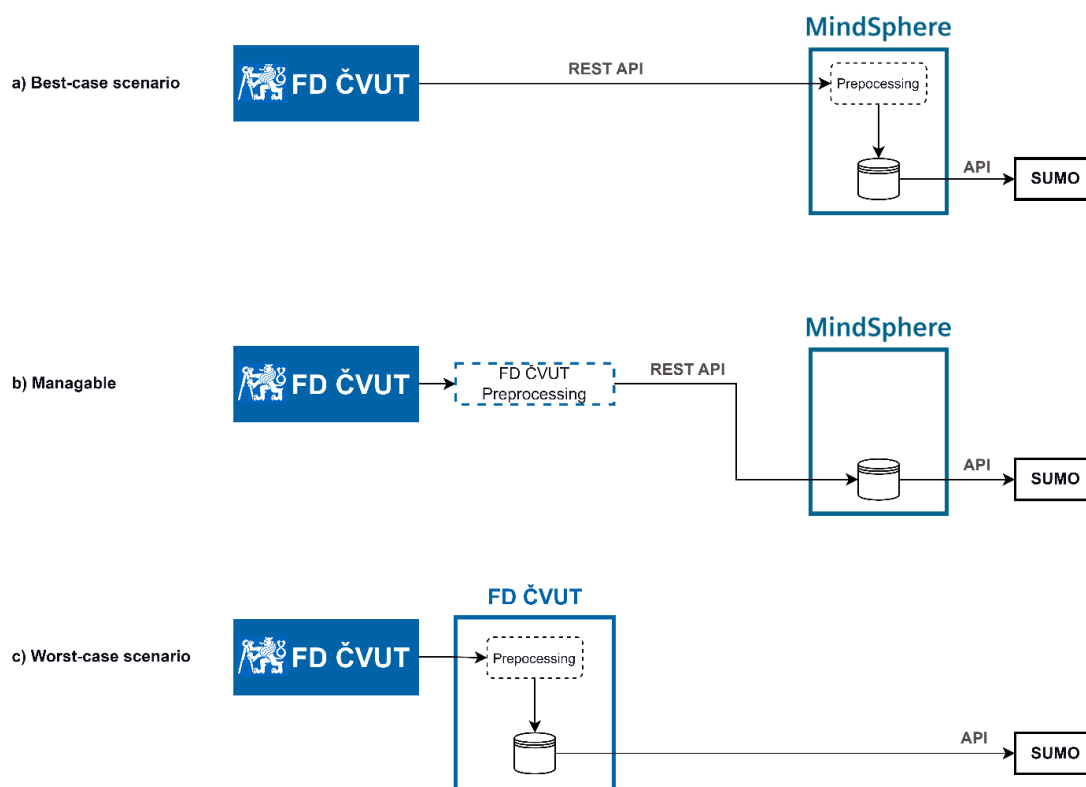
- (a) ne všechny stožáry VO, uvedené v pasportu, má THMP opravdu ve správě, v některých případech se jedná o majetek například Dopravního podniku Hlavního města Prahy,
- (b) ne všechny stožáry VO jsou schopny během doby svícení dobít záložní baterie pro videotechniku (pro sledování osob je třeba, aby kamery byly umístěny relativně vysoko a z hlediska bezpečnosti jsme preferovali dobíjení baterií z napájení VO před výměnou baterie v rozvaděči kamery),
- (c) v souvislosti s instalací trolejového vedení pro provoz linky 59 došlo k přesunům a demontážím některých kamer.

Získání on-line přístupu k datům o pohybu vozidel MHD

Základním stavebním kamenem konceptu Smart Cities jsou data jako obraz života ve městě. Vznik, sběr, vyhodnocování, řízení a vizualizace městských dat tedy hrají v efektivním řízení moderního města klíčovou roli. V Praze z tohoto důvodu vznikla datová platforma Golemio, sdružující všechna „otevřená“ (tj. veřejně přístupná) data. Golemio zohledňuje historický i aktuální stav města z pohledu dat a skrze svá rozhraní postupně integruje dostupné datové zdroje. Golemio umožňuje propojení městských aplikací, dat i práci s velkými objemy dat. Pomáhá také pracovat i s daty, která dosud měla malé využití kvůli různým technickým nebo právním omezením.

V průběhu prvního období řešení projektu Dopravní digitální dvojče Evropská jsme zprovoznili rozhraní pro vytěžování okamžitých poloh vozidel MHD, které do platformy Golemio ukládají jednotliví provozovatelé linek městské dopravy v Praze (kromě DPMP jsou to v oblasti Evropské třídy například Arriva Střední Čechy nebo ČSAD Kladno).

Data processing diagram



Obrázek 10: Přípustné scénáře analýzy a agregace dat. Scénář a) je stav, odpovídající cílovému stavu projektu, scénáře b) a c) jsou alternativy, zajišťující robustnost v případě výpadku některé z částí MindSphere.

Vzhledem k potřebě udržet relativně nízký datový tok směrem z a do cloudového úložiště MindSphere, jsou data z detektorů, shromažďovaná pro účely projektu a analýzu v MindSphere, v mezifázi ukládána v databázi FD ČVUT v Praze, odkud je jejich podmnožina dále distribuována do datové základny projektu, kde probíhá zpracování dat a jejich analýza. Tyto údaje jsou posléze používány k vytváření simulace dopravy, predikcím a modelování dopravních scénářů, což umožňuje správcům silnic lepší plánování a řízení dopravy. Tyto údaje také poskytují informace o stavu silniční sítě a pomáhají při rozhodování o investicích do infrastruktury.

Data uložená v databázi FD ČVUT v Praze mohou být dále zpracovávána a analyzována i přímo na infrastruktuře FD. Toto redundantní zpracování uvažujeme s cílem zajistit nepřerušenu dodávku dat do digitálního dvojčete v případě, kdy selže spojení s datovou základnou na platformě MindSphere, která je primární volbou pro analýzu a konsolidaci dat v reálném čase. Systém FD ČVUT bude zahrnovat vytváření pouze základních statistik, přehledů a map, a jednoduché predikční modely. V rámci zajištění robustního zpracování dat uvažujeme o třech přípustných scénářích zpracování dat, reflektujících různé úrovně dostupnosti cloudového systému MindSphere (viz obrázek 10).

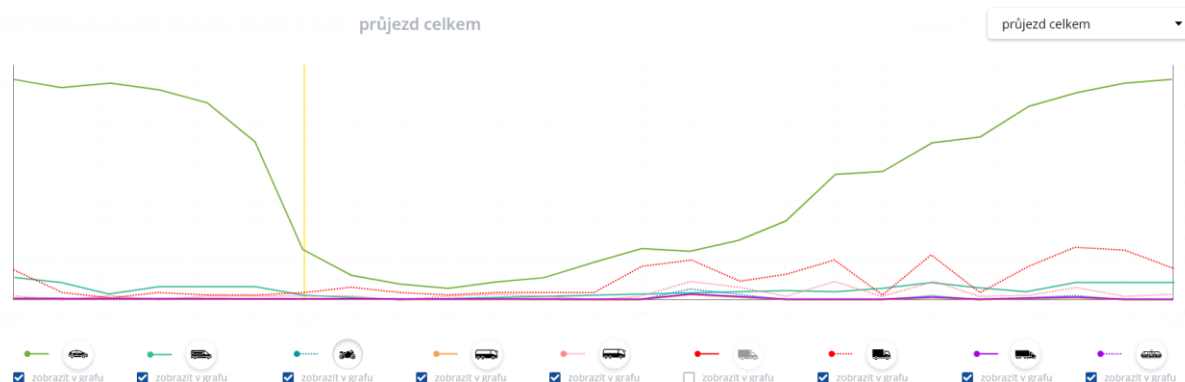
Vyfiltrovaná a konsolidovaná data z datové základny jsou zdrojem informací i provozu vozidel v mikrosimulačním modelu Evropské třídy, vytvořeném v SUMO.

Vstupní data pro datovou základnu

Jako vstupní data dokáže datová základna přijímat širokou škálu formátů:

Strukturovaná data: MindSphere může přijímat data, která jsou uspořádána ve strukturovaném formátu, například tabulková data uložená v tabulkovém procesoru nebo databázi. Tento typ dat se obvykle snadno zpracovává a analyzuje, protože je uspořádán konzistentním způsobem.

Nestrukturovaná data: MindSphere může přijímat i data, která nejsou uspořádána ve strukturovaném formátu, jako je text, obrázky a video. Tento typ dat je obvykle obtížnější zpracovat a analyzovat, protože nemají pevnou strukturu, ale analytické nástroje a algoritmy MindSphere z nich mohou pomoci získat smysluplné poznatky. V případě datové základny projektu používáme formát JSON a metadata pro přípravu rozlišení dopravního proudu.



Obrázek 11: Graf dopravních intenzit v MindSphere

Data v časových řadách: MindSphere dokáže zpracovávat data, která jsou shromažďována v průběhu času, například data o vývoji intenzity dopravy či data o pohybu jednotlivých vozidel veřejné hromadné dopravy. Tento typ dat se často používá v aplikacích, jako je prediktivní údržba a optimalizace procesů. V případě dopravních dat tento datový typ obsahuje časové řady sbíraných intenzit, obsazeností a případně rychlostí vozidel na jednotlivých křižovatkových detektorech a lze jej použít k predikci vývoje dopravních intenzit ve sledované oblasti či jako jeden ze vstupů do optimalizačních algoritmů pro řízení dopravy.

Geoprostorová data: MindSphere dokáže zpracovávat a analyzovat data, která mají geografickou složku, například data ze systémů GPS nebo senzorů založených na poloze. Tento typ dat lze použít k vytváření map a vizualizací a k analýze vzorců a trendů v různých geografických oblastech.

XML data z křižovatkových a strategických detektorů

Data křižovatkových detektorů, poskytovaná platformou Transmitter 3, obsahují údaje o začátku a konci měření, důvěryhodnosti dat (ta je ovšem celou dobu rovna 100%) a o počtu vozidel, obsazenosti, rychlosti vozidel, která daný detektor zaregistroval. Na závěr XML telegramu jsou uvedeny údaje o stavu detektoru a o případných chybách, které se vyskytly.

Obecná struktura telegramu uvnitř zprávy z rozhraní Transmitter pak vypadá takto:

```
<detector id="..." type="...">
  <description>...</description>
  <start format="...">...</start>
  <stop format="...">...</stop>
  <confidence>...</confidence>
  <count>
    <all>...</all>
    <class id="...">...</class>
  </count>
  <occupancy>
    <all>...</all>
    <class id="...">...</class>
  </occupancy>
  <speed>
    <all>...</all>
    <classid ="...">... </class>
  </speed>
  <status_list>
    <status id ="..." value="..." description="..." startTime="..."
stopTime="...">
  </status_list>
  <error_list>
    <error id="..." description="..." startTime="..." stopTime="...">
  </error_list>
</detector>
```

GeoJSON data z platformy Golemio

Datová základna čerpá z platformy Golemio údaje o poloze vozidel pražské integrované dopravy. Data jsou Golemíem poskytována ve formátu GeoJSON, což je rozšíření standardního JSON datového formátu, sloužící k poskytování georeferencovaných dat.

Každý záznam ve formátu GeoJSON obsahuje uzel „geometry“, jenž slouží ke sdělení GPS pozice vozidla. Údaje o konkrétním dopravci, vozidle, jeho lince, jízdním řádu, zpoždění, aktuální a následující zastávce, jsou potom uvedeny jako vlastnosti („properties“) daného geometrického bodu.

Obecná struktura GeoJSON telegramu z platformy Golemio vypadá následovně:

```
// Golemio GeoJSON sample code
{
  "features": [
    {
      "geometry": {
        "coordinates": [ ... ],
        "type": "Point"
      }
    }
  ]
}
```

```

    },
    "properties": {
      "last_position": {
        "bearing": ...,
        "delay": {
          ...,
        },
        "is_canceled": false,
        "last_stop": {
          ...
        },
        "next_stop": {
          ...
        },
        "origin_timestamp": ...,
        "shape_dist_traveled": ...,
        "speed": ...,
        "state_position": ...
      },
      "trip": {
        "agency_name": {
          ...
        },
        "cis": {
          ...
        },
        "gtfs": {
          ...
        },
        "origin_route_name": ...,
        "sequence_id": ...,
        "start_timestamp": ...,
        "updated_at": ...,
        "vehicle_registration_number": ...,
        "vehicle_type": {
          ...
        },
        "wheelchair_accessible": ...
      }
    },
    "type": "Feature"
  }
],
"type": "FeatureCollection"
}

```

On-line přístup k datům z detektorů CAMEA

Jednou z klíčových komponent řetězce sběru dat pro model je modul ELTODO Transmitter, shromažďující pro TSK Praha data z dopravních detektorů. Data jsou z datového centra společnosti ELTODO vyčítána prostřednictvím nepříliš spolehlivého aplikačního rozhraní na bázi SOAP architektury. Vzhledem k výpadkům tohoto modulu bylo nutné zajistit nezávislý přístup k měřením ze strategických detektorů těchto detektorů přímo přes API firmy CAMEA.

Detektory jsou přístupné přes privátní REST API přímo ze serverů firmy CAMEA. Jedná se o detektory celkem čtyř typů, přičemž čtvrtý typ senzorů není v tento okamžik vybaven modemy pro online přenos dat:

- RDET – Strategický detektor, poskytuje informaci o okamžité rychlosti, délce a typu detekovaného vozidla. Online přístup máme celkem k 16 detektorům, některé detektory kvůli výpadkům přenosových cest momentálně nedodávají data (dle našeho názoru jako průvodní jev výstavby trolejbusové trati na pražské letiště).
- DETECTOR – Detektor úsekového měření, poskytuje (prozatím zakódované) informace o registrační značce vozidla a typu vozidla. Ze známé polohy detektorů a informace o registrační značce lze odvodit trasu vozidla a jeho průměrnou rychlost mezi jednotlivými záchyty. Máme přístup k 10 detektorům.
- BLUETOOTH – Detektor Bluetooth signálu z vozidel. Identifikuje vozidlo pomocí záchytu signálu z Bluetooth zařízení, jehož unikátní HW adresu předává. Máme přístup celkem k 8 senzorům.
- WATCH SENSOR – Dohledové senzory, jsou součástí instalace ostatních senzorů, ale v tento okamžik nejsou vybaveny modemy pro přenos dat. CAMEA API nám reportuje přístup k celkem 5 těmto senzorům, vzhledem k absenci modemů z nich ale zatím nechodí žádná data.

Obrovskou výhodou API rozhraní, které pro detektory dává klientům CAMEA k dispozici, je jeho formalizace do struktury navržené iniciativou OpenAPI⁵, která umožňuje jednotnou a přenositelnou specifikaci moderních REST rozhraní, založených na všeobecně používaném protokolu HTTP.

Vzhledem k tomu, že pro potřeby dopravního digitálního dvojčete potřebujeme pouze čist dostupná data, používají naše aplikace pouze standardní HTTP GET příkazy. Všechny příkazy mají jednotnou formu, uvedenou v tabulce 8.

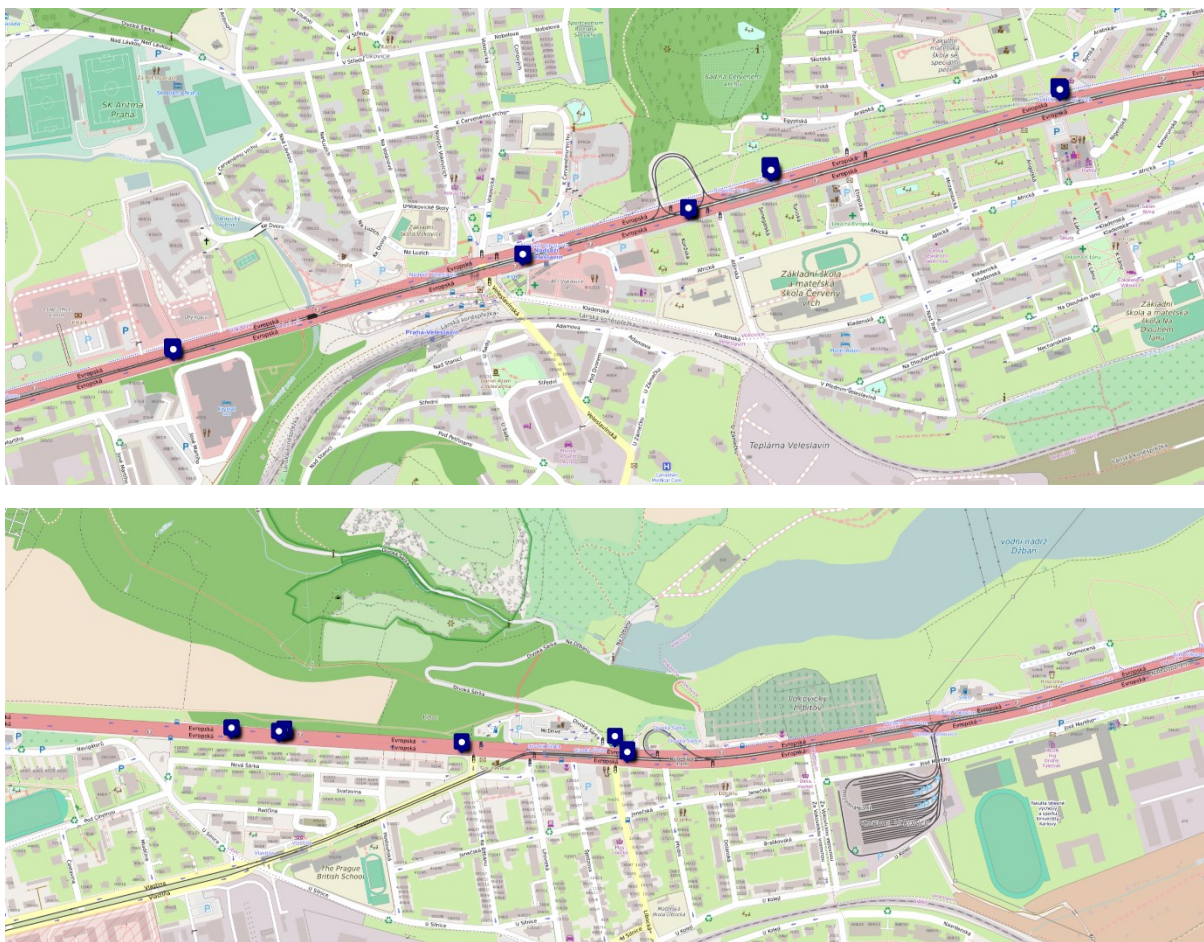
Tabulka 8: Možnosti příkazů CAMEA REST API pro projekt D3E.

Příkaz REST API	Význam
GET /{typ senzoru}/sensors	Navrátí seznam všech dostupných senzorů daného typu.
GET /{typ senzoru}/detections/{od}/{do}	Navrátí JSON strukturu s údaji o detekovaných vozidlech v časovém úseku „od“–„do“ na všech dostupných detektorech daného typu.
GET /{typ senzoru}/detections/{id senzoru}/{od}/{do}	Navrátí JSON strukturu s údaji o detekovaných vozidlech v časovém úseku „od“–„do“ pro jeden vybraný senzor daného typu.

Údaje z detektorů CAMEA jsou zpracovávány společně s údaji, dostupnými z detektorů, vyčítaných přes původní ELTODO Transmitter API.



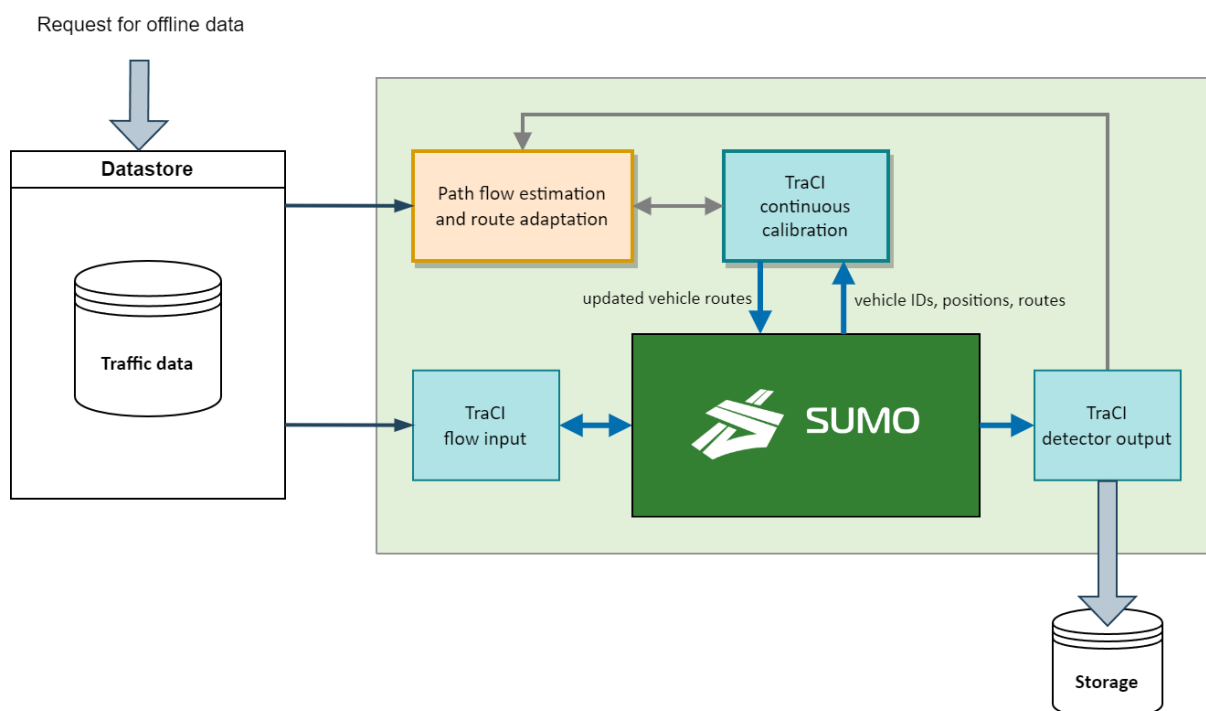
⁵ Detailní informace lze nalézt na [HTTPS://WWW.OPENAPIS.ORG/](https://www.openapis.org/)



Obrázek 12: Umístění doplňkových detektorů CAMEA. Interaktivní mapa je k dispozici na [HTTPS://UMAP.OPENSTREETMAP.FR/DE/MAP/ANONYMOUS-EDIT/1009673:ZR1FTYHDsCAURW4LG6TjNhDQqcGtWuG-_f9Lg9QYeBC](https://umap.openstreetmap.fr/de/map/anonymou-edit/1009673:ZR1FTYHDsCAURW4LG6TjNhDQqcGtWuG-_f9Lg9QYeBC)

A.6 Napojení dat na dílčí modely

Základem simulačního modelu dopravního digitálního dvojčete je virtuální kopie existující dopravní infrastruktury v modelované oblasti: mikrosimulační model v SUMO obsahuje jednotlivé ulice, parkoviště, přestupní uzly MHD, zastávky, spolu s informacemi o obchodních a kulturních centrech či rezidenční částech. Tento model byl napojen nejprve na historická (off-line) data, po ověření funkce a kalibraci pak byla aktivováno napojení na data přicházející v reálném čase (on-line verze).



Obrázek 13: Základní komponenty off-line modelu.

Základní architekturu provozu modelu nad off-line daty ukazuje obrázek 13. Při ověřování vycházíme z archivních dopravních dat, již předzpracovaných a uložených v úložišti. Část těchto dat, popisující dopravní situaci na vstupech do dopravního mikrosimulačního modelu, je pomocí námi vytvořených uživatelských aplikací na bázi rozhraní TraCI načítána a představuje vstupující dopravní poptávku pro model. Zbývající část dat, popisující děje uvnitř modelované oblasti a na výstupech z ní, je použita k průběžné kalibraci modelu. Výstupy modelu jsou ukládány pro další analýzu ve formě XML dat.

Zmíněné rozhraní TraCI (z angl. *Traffic Control Interface*) je nativní částí simulátoru Eclipse SUMO a umožňuje přístup k běžící simulaci silničního provozu, načítání hodnot simulovaných objektů a manipulaci s jejich chováním „on-line“ pomocí externích aplikací, vytvořených například v C/C++ či jazycích Python či Java. TraCI využívá k přístupu k systému SUMO architekturu klient/server založenou na protokolu TCP. Mikrosimulátor v tomto případě funguje jako serverová aplikace, vykonávající požadavky námi vytvořené aplikace jako klienta.

Jak je vidět na obrázku 13, digitální dvojče nad off-line daty využívá celkem tři námi vytvořené nadstavby nad mikrosimulátorem SUMO a jeden samostatný výpočetní subsystém pro adaptaci mikrosimulace na měřená data. Základní úkoly těchto modulů jsou následující:

- **TraCI flow input** – Tento modul na základě údajů o dopravní síti, obsahujících informace o hranách této sítě a dopravních detektorech, nejprve zjistí, která dopravní data z konkrétních dopravních detektorů je třeba použít jako vstupy pro mikrosimulaci. Modul pak postupně načítá data z těchto vstupních dopravních detektorů z databáze dopravních dat, a na jejich základě generuje dopravní poptávku pro mikrosimulaci. Dopravní data typicky obsahují pouze informace o vjezdech vozidel v 1 až 5minutových intervalech, v případě sofistikovanějších dopravních detektorů je k dispozici i informace o typu vozidla a jeho rychlosti. Na základě informací o typických cestách, které začínají v daném simulovaném období na daném vstupu dopravní sítě, modul dává mikrosimulaci pokyn k tomu, aby na určitou hranu modelované dopravní sítě vjel určitý typ vozidla.
- **TraCI detector output** – Tento modul představuje „protistranu“ vstupnímu modulu. Průběžně shromažďuje informace z dopravních detektorů v simulaci tak, aby časové rozlišení

této informace odpovídalo časovému rozlišení reálných měření (pokud tedy máme v modelované oblasti dva datové zdroje, z nichž jeden poskytuje informace v minutovém rastru a druhý poskytuje údaje agregované po pěti minutách, modul poskytuje ekvivalentní informaci o měřeních na těchto detektorech v mikrosimulaci s minutovou, respektive pětiminutovou agregací). Takto agregovaná data modul jednak ukládá ve formě XML a CSV souborů, jednak tato data poskytuje prostřednictvím meziprocesové komunikace systému pro odhad nejpravděpodobnějších cest a dopravních toků (v obrázku 13 označeno jako Path flow estimation and route adaptation).

- **Path flow estimation and route adaptation** představuje modul, jenž na základě údajů o dopravní síti, prvotní statické kalibraci mikrosimulačního modelu a rozdílech mezi měřenými a predikovanými hodnotami z dopravních detektorů v síti provádí krátkodobou predikci vývoje dopravy v reálném světě a v dopravním mikrosimulačním modelu a na základě této predikce určuje, v kterých oblastech dopravního modelu dojde k výrazným odchylkám od predikovaných hodnot a které modelované dopravní toky je třeba změnit tak, aby krátkodobá predikce stavu dopravy v modelu odpovídala krátkodobé predikci dopravy v reálném světě.
- **TraCI continuous calibration** představuje pro dopravní digitální dvojče patrně nejdůležitější modul spolupracující s mikrosimulátorem. Úkolem tohoto modulu je na základě informací o typických trasách vozidel v modelované oblasti a o rozdílech mezi detekovanými počty vozidel v mikrosimulaci a v reálné oblasti změnit v případě potřeby budoucí trasy vozidel v simulaci tak, aby simulace věrněji odpovídala krátkodobé předpovědi stavu dopravy v modelované oblasti systémem pro odhad nejpravděpodobnějších cest a dopravních toků, popsáním výše.

Po prvotní kalibraci modelu, jež je předmětem následujícího sedmého kroku, proběhlo přepojení modelu na on-line data.

Napojení on-line dat do modelu

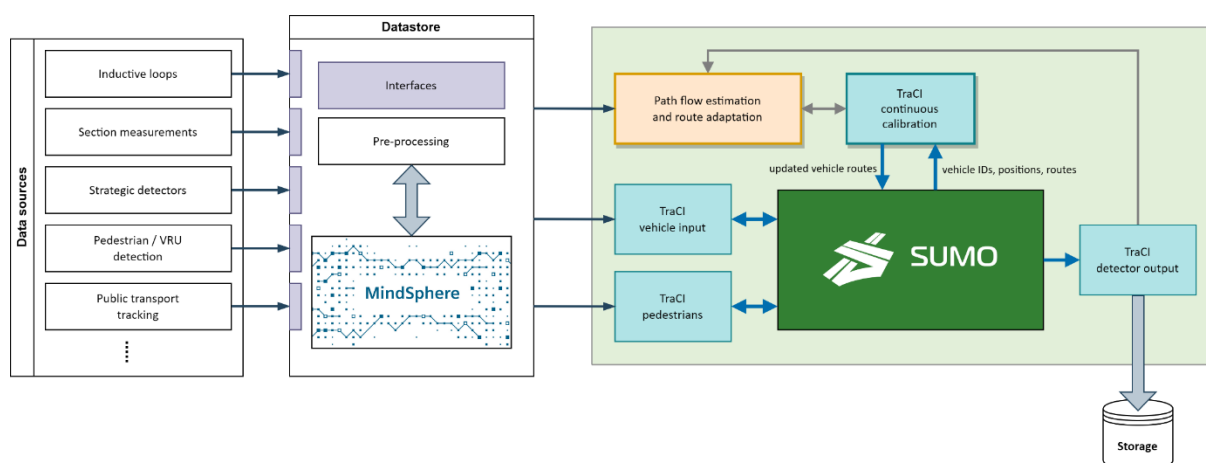
Dopravní mikrosimulační model, jehož napojení na off-line data jsme popsali výše, byl po kalibraci napojen na on-line datové úložiště. Celkový schematický pohled na komponenty on-line systému je uveden na obrázku 14 na straně 63. Funkce celého systému je podobná té, zmíněné na začátku toho kroku: Celý systém představuje uzavřenou smyčku, do které v tomto případě vstupují dopravní data, měřená v reálném čase. Na základě měření z dopravních detektorů je v modelu aktualizován pohyb vozidel tak, aby docházelo v krátkodobém hledisku k minimálním odchylkám od reálné situace. Takto realizované digitální dvojče neustále reaguje na měnící se dopravní podmínky a přizpůsobuje simulaci v reálném čase reálně naměřeným údajům o dopravní situaci.

Dodatečnými rozhraními on-line modelu jsou rozhraní pro příjem dat z datového úložiště na bázi Siemens Mindsphere.

Pro jednotlivé úseky dopravní sítě je systém schopen poskytnout mimo jiné následující ukazatele výkonnosti (KPI):

- počet vozidel na úseku
- délku front na jednotlivých jízdních pruzích před křižovatkami
- dobu jeho obsazení, celkovou časovou ztrátu
- průměrnou rychlost vozidla, jízdní dobu, počet zastavení
- odhad emisí CO₂, CO, HC, NO_x, PM_x
- spotřebu paliva, respektive elektrické energie

Systém je také schopen dodat emulaci kompletních dat plovoucích vozidel (jejich polohu, rychlost, současný jízdní pruh, stavové informace) a pro předem určená vozidla monitorovat potenciální konflikty (vozidla příliš blízko, konflikty při přejíždění mezi jízdními pruhy, náhlé brždění a podobně).



Obrázek 14: Napojení on-line dat do modelu.

A.7 Kalibrace modelu

Mikrosimulační dopravní model (jako je v našem případě model Evropské třídy v mikrosimulátoru dopravy SUMO) mohou velmi dobře simulovat stochastickou povahu dopravního toku s ohledem na to, že dopravní toky v modelované oblasti závisí na mnoha ve své podstatě velmi odlišných parametrech. Kromě parametrů přímo souvisejících s dopravním tokem, jako je rychlost dopravního toku, složení dopravního proudu (poměr zastoupení jednotlivých tříd vozidel) nebo heterogenní dopravní podmínky, je pro realistický popis dopravního toku důležité zohlednit také parametry popisující lidské chování, tedy reakční dobu řidičů a chování ostatních účastníků provozu. Kvalita výsledků mikrosimulace v připravovaném digitálním dvojčeti, nebo lépe řečeno budoucí spolehlivosti dvojčete, tedy značně závisí na tom, do jaké míry je pokladový mikrosimulační model kalibrován na místní dopravní podmínky v konkrétní oblasti.

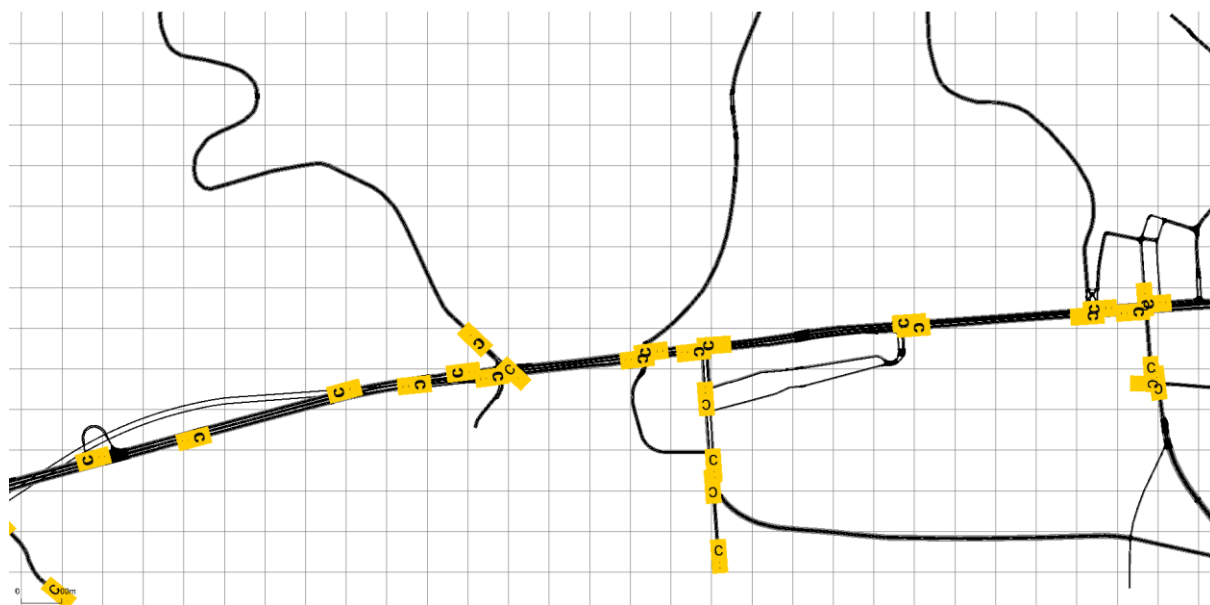
Kalibrace je definována jako proces porovnávání a minimalizace rozdílů mezi výsledky modelování a skutečnými údaji získanými sčítáním a měřením v dopravní síti. Proces spočívá v identifikaci ovlivňujících parametrů, definování jejich rozsahu a optimalizaci parametrů pomocí běžně používaných metod. Pro kalibraci simulačního modelu lze použít různé metody, mezi nimiž se kromě expertních heuristik nejčastěji využívají obecné víceparametrické nelineární optimalizační metody jako jsou genetické algoritmy, simulované žihání, nebo v poslední době různé deriváty odvozené z metod neuronových sítí

Vlastní proces kalibrace variant modelu spočívá v opakovaném provádění jednotlivých běhů každé varianty modelu a provádění úprav vstupních parametrů dané varianty modelu do té doby, dokud nejsou zvolená KPI založená na výstupech simulace přijatelně konzistentní s pozorovanými údaji. Přijatelná konzistence je v případě mikrosimulačních modelů definována jako splnění čtyř samostatných kritérií přijatelnosti definovaných například v publikacích americké FHWA (Federal Highway Administration, 2019) respektive v české národní metodice (Ondráčková et al., 2017)

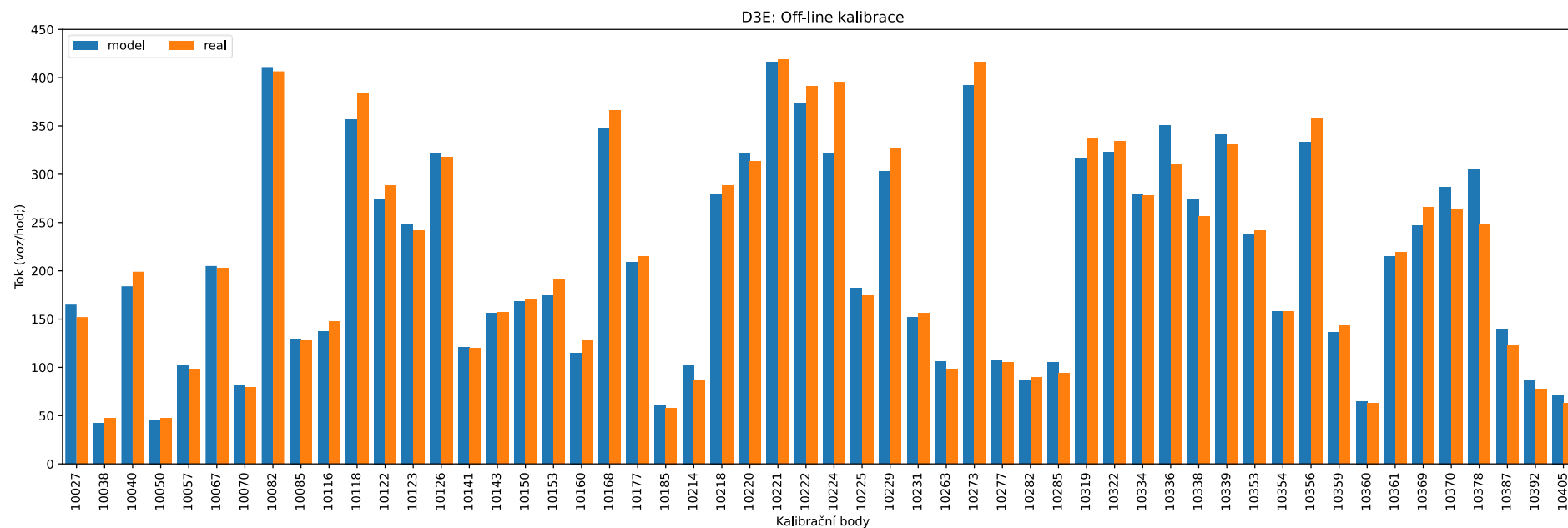
Celý proces kalibrace může být časově náročný a vysoce iterativní. Pokud však byly pro kalibraci shromážděny kvalitní údaje a pracovní model neobsahuje závažné geometrické a strukturální chyby, může být tento proces jednoduchý. Kalibrace nicméně zahrnuje přezkoumání a úpravu potenciálně

až stovek parametrů modelu, z nichž každý ovlivňuje výsledky simulace způsobem, který je často vysoce korelován s výsledky ostatních. Při kalibraci se můžeme snadno dostat do pastí nekonečného kruhového procesu, kdy upravujeme jeden z parametrů simulace jen proto, abychom změnami zvýraznili problém na jiném místě dopravní sítě. Proces kalibrace je proto nezbytné rozdělit do řady logických, na sebe navazujících kroků, jež jsou blíže popsány v dokumentaci výsledku V2 projektu Dopravní digitální dvojče Evropská (TAČR CK02000118).

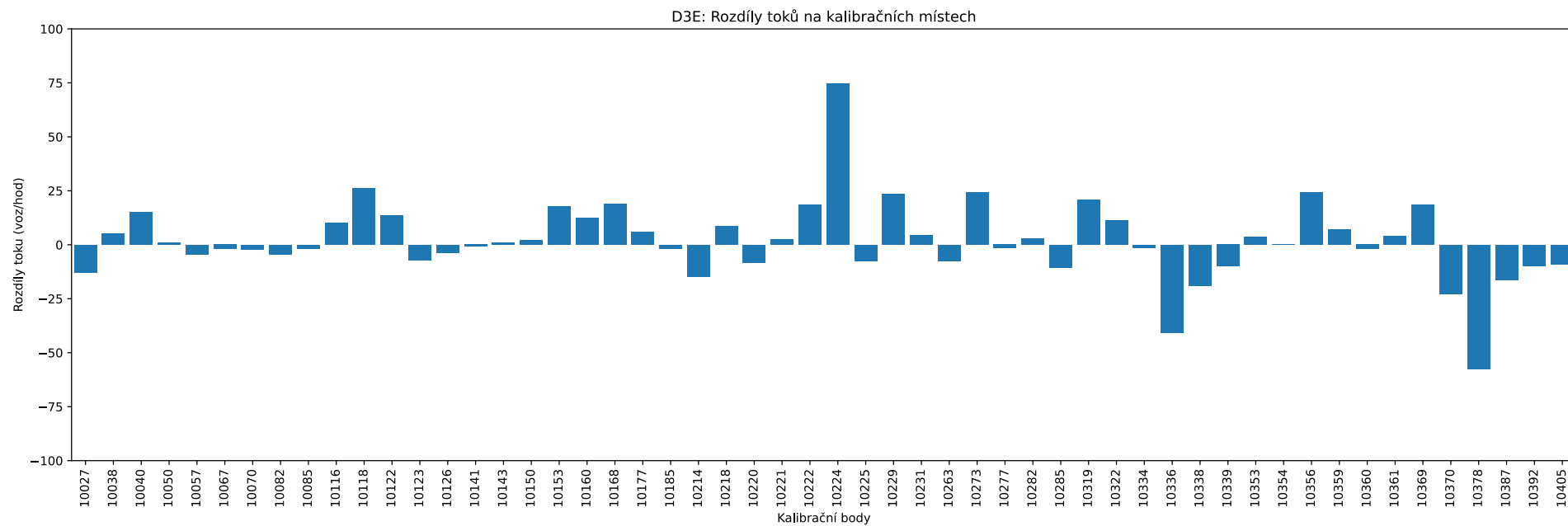
Pro off-line kalibraci modelu jsme použili neměřené průjezdy vozidel ve celkem 54 vybraných místech dopravní sítě, jejichž část je označena na obrázku 15. Výsledky kalibračního procesu pro model Evropské třídy jsou pro jednotlivé kalibrační body znázorněny na obrázcích 16 a 17 na dalších stránkách tohoto textu. Výsledná průměrná odchylka dopravních toků v modelu je 5,86 %, největší odchylky +74 vozidel za hodinu resp. -57 vozidel za hodinu představují 17,0 % respektive 20,9 % příslušného dopravního toku na komunikaci.



Obrázek 15: Kalibrační body (označené žlutě) na hlavní části Evropské třídy. Kalibrační body jsou umístěny v průjezdních profilech komunikací, vždy jeden v jednom směru. Poznámka: dvojitá „komunikace“ vlevo reprezentuje linku A pražského metra.



Obrázek 16: Výsledky off-line kalibrace na jednotlivých kalibrátorech. Modelové hodnoty jsou znázorněné modrou barvou, reálné měřené hodnoty z detektorů jsou vykreslené oranžově.



Obrázek 17: Absolutní chyby v kalibrovaných tocích po kalibraci modelu.

A.8 Konstrukce scénářů pro demonstraci cílů

V rámci této demonstrační studie bylo naším cílem ukázat činnosti dopravního digitálního dvojčete při průzkumu následujících scénářů:

1. *On-line replikace dopravní situace:* V tomto scénáři sledujeme a vyhodnocujeme chování dopravního digitálního dvojčete z pohledu věrnosti reprezentace reálné dopravní situace v dopravním digitálním dvojčeti. Hodnotíme detektorová data na vybraných průřezech totožných s obrázkem 15 a polohu vozidel MHD.
2. *On-line monitoring a analýza dopravních KPI:* V tomto scénáři nejen sledujeme aktuální stav dopravy na Evropské třídě, ale také dynamicky analyzujeme vybraná KPI reagovat na změny v dopravním prostředí. Monitorovaná KPI jsou uvedena v oddíle A.9 níže.
3. *Realizace doporučení:* Možnost realizace doporučení na základě monitorovaných výstupů z bodu 2.

A.9 Extrakce KPI / srovnání / ekvalizér

SUMO jako podkladový simulátor dopravního digitálního dvojčete v tomto příkladu umožňuje průběžné shromažďování diagnostických údajů a generování různých výstupních souborů, které obsahují data o průběhu simulace. Pro extrakci KPI je potřeba zajistit, aby byly aktivovány příslušné výstupy, například logování detektorů, výstupy z vozidel, fáze semaforů a podobně.

Pro demonstrační účely volíme podmnožinu KPI, zmíněných v oddíle 4.9 tohoto dokumentu. Extrakce zvolených KPI probíhá následovně:

1. *Počet vozidel na úseku a doba obsazení úseku:* Tato data lze získat z interních statistických údajů dopravních detektorů a vlastního modelu pomocí rozhraní TraCI. Po ukončení simulace jsou všechny údaje uloženy ve výstupních souborech statistik detektorů (typicky **e1-detector**), které zaznamenávají počet vozidel projíždějících přes detektor a časy jejich průjezdu. Důležité informace jsou také uvedeny ve statistikách hran (tzv. **edgedata**).
2. *Délka front:* V on-line formě jsou tyto údaje opět dohledatelné přes TraCI rozhraní, po ukončení běhu lze tyto informace extrahovat z výstupů statistik front (tzv. **queuedata**).
3. *Časová ztráta:* V on-line formě jsou tyto údaje dostupné přes TraCI rozhraní, po ukončení běhu lze tyto informace extrahovat z statistik jednotlivých hran dopravní sítě (soubory **edgedata**, zmíněné výše).
4. *Průměrná rychlost vozidel, jízdní doba a počet zastavení:* SUMO umožňuje sledovat jednotlivá vozidla, zaznamenávat jejich rychlosti, doby jízd a zastávky. Tato data jsou dostupná přes TraCI rozhraní a také ve výstupních souborech plovoucích vozidel (tzv. **fcd-output**).
5. *Emise a spotřeba paliva:* SUMO umí využít pokročilý emisní model PHEM (angl. *Passenger Car and Heavy Duty Emission Model*), vyvíjený na TU Graz (model je komerční, v plné verzi je k dispozici za úplatu). S pomocí tohoto modelu lze pro provoz v dopravním digitálním dvojčeti vypočítat emisí z dopravy či spotřebu paliva (tzv. **emission-output**).

A.10 Práce s výstupními daty

Pro komplexnější analýzu a zpracování dat lze využít podpůrné nástroje SUMO, jimiž jsou různé skripty v jazyce Python pro zpracování a vizualizaci dat po simulaci. S jejich pomocí lze zpracovávat XML nebo CSV soubory generované SUMO, a požadované informace převést do formy vhodné pro analýzu a reportování.

Příloha B Role supervizora a dalších zaměstnanců objednatele

Supervizoři (zaměstnanci veřejné sféry, nebo také úředníci), jejichž roli popisujeme v úvodu hlavního dokumentu, tvoří nezanedbatelnou roli při přípravě digitálního dvojčete, neboť zastupují primární klienty, resp. objednatele, jimiž jsou především města, či správci komunikací aj. – jednoduše řešeno veřejné subjekty. Supervizor, až na výjimky, nemůže obsáhnout celé spektrum odborných dovedností a znalostí pro kontinuální monitoring a kontrolu kvality dopravního dvojčete. Je však možné v dílčích krocích identifikovat konkrétní klíčové role pro supervizora, aby bylo možné alespoň dílčí výstupy a postupy zkontrolovat a poskytl tak oporu pro objednatele, resp. klienta.

V tabulce níže popisujeme role supervizora pro jednotlivé kroky, které odpovídají 10 definovaným krokům popsaným v kapitole 4 Metodika.

1. STANOVENÍ CÍLŮ A ZPŮSOBU POUŽITÍ

SPRÁVNOST POSTUPU: Jak může supervizor rychle ověřit, že zpracovatel ví, co dělá?

Supervizor si musí ověřit, zda zpracovatel toto komunikuje v dostatečně širokém kolektivu (tj. Jsou zapojeni stakeholdeři).

KONTROLA: Podpora pro supervizora (co má/musí, resp. co nemá/nedovede zkontrolovat)

Supervizor by měl primárně zkontrolovat, zda jsou cíle srozumitelně stanoveny.

PARTNER: Jak může být supervizor adekvátní partner (krok za krokem)?

Cíle by měly být objednateli známy alespoň v obecné rovině. Supervizor by je proto měl předložit zpracovateli.

2. GEOMETRICKÝ MODEL

SPRÁVNOST POSTUPU: Jak může supervizor rychle ověřit, že zpracovatel ví, co dělá?

Objednatel či zodpovědný supervizor by měl především správně klást otázky na zpracovatele. Pokud zpracovatel bude tvrdit, že aktuální data jsou dostatečná pro tvorbu geometrického modelu, pak by měl být schopen toto tvrzení podložit a odůvodnit.

Stejně tak by měl být zpracovatel schopen odůvodnit, pokud se dopustí kompromisů v rámci využití podkladových materiálů, tj. například využití zjednodušených informací a dat o geometrickém uspořádání. Měl by být schopen na příkladech z praxe demonstrovat, že je toto rozhodnutí v souladu s cíli projektu. Tyto situace skutečně mohou v praxi nastávat, protože každý model je do větší či menší míry zjednodušením reálného světa.

KONTROLA: Podpora pro supervizora (co má/musí, resp. co nemá/nedovede zkontrolovat)

Pokud byla data pro tvorbu geometrického modelu zajištěna od správce komunikací, může si kvalitu dat ověřit právě u poskytovatele těchto dat. Poskytovateli jsou často městské či městem zřízené organizace, mají tedy zodpovědnost podat objednateli relevantní pohled na poskytnutá data.

Objednatel ve většině případů nebude mít možnost zkontrolovat, že data byla implementována do modelu skutečně správně. Může však spolupracovat s externími subjekty a dalšími odborníky, kteří mohou objednateli pomoci zkontrolovat vysoce odborné záležitosti.

PARTNER: Jak může být supervizor adekvátní partner (krok za krokem)?

1. Objednatel by měl vždy otevřít komunikační linku s potenciálními poskytovateli dat a zpracovatelem a co nejvíce podpořit komunikaci.
2. Objednatel by se měl průběžně ujišťovat, že komunikace probíhá bez problémů.
3. Objednatel má u projektu vždy povinnost se ujistit, že data byla poskytnuta v plném rozsahu tak, jak je projekt vyžaduje.
4. V případě dalších návazných prací a případných doměření by měl objednatel poskytnout maximální součinnost při různých povoleních a zajištění spolupráce dalších veřejných složek.

3. MODALITA

SPRÁVNOST POSTUPU: Jak může supervizor rychle ověřit, že zpracovatel ví, co dělá?

V tomto kroku je pro supervizora nezbytná konzultace s externími subjekty a odborníky. V tomto kroku nedokáže supervizor efektivně rozhodnout, zda je návrh zpracovatele správný.

KONTROLA: Podpora pro supervizora (co má/musí, resp. co nemá/nedovede zkontrolovat)

V tomto kroku supervizor ve většině případů nebude schopen zkontrolovat správné rozhodnutí. Je nutná konzultace se třetími stranami.

PARTNER: Jak může být supervizor adekvátní partner (krok za krokem)?

1. Supervizor musí jasně definovat, že rozhodnutí zpracovatele bude oponováno nezávislou třetí stranou.
2. Supervizor musí identifikovat dostatečně odbornou třetí stranu na oponování tohoto kroku. V ideálním případě by se mělo jednat o akademickou sféru, či kolegy z městských institucí, kteří jsou v tomto ohledu na vyšší odborné úrovni.

4. DOPRAVNÍ CHOVÁNÍ

SPRÁVNOST POSTUPU: Jak může supervizor rychle ověřit, že zpracovatel ví, co dělá?

Korektním postupem je doplnění podkladových měření a průzkumů veřejnosti pro upřesnění a modelování specifického dopravního chování z dané lokality. Toto je velmi robustní přístup, který nemusí být vždy v souladu se stanovenými cíli, finančními prostředky či harmonogramem projektu. Supervizor by se tedy měl doptat zpracovatele, jak bude řešit dopravní chování a proč volí tento postup.

KONTROLA: Podpora pro supervizora (co má/musí, resp. co nemá/nedovede zkontrolovat)

Nelze očekávat, že by mohl supervizor zkontrolovat správnost nastavení dílčích modelů. Může si nicméně vyžádat oponentní posouzení nezávislou třetí stranou. Je pravděpodobné, že takto důkladné řešení nepřinese významné zlepšení kvality, ale přinese zvýšené úsilí na všech stranách.

PARTNER: Jak může být supervizor adekvátní partner (krok za krokem)?

1. Poskytování dat z průzkumů a studií: Supervizor by měl primárně být schopen a ochoten poskytnout historická data z různých dopravně-sociologických průzkumů, socio-demografických studií aj.
2. Asistence: Supervizor může zadat doplnění nezbytných podkladů.

5. PASPORTIZACE DOPRAVNĚ-INŽENÝRSKÝCH DAT

SPRÁVNOST POSTUPU: Jak může supervizor rychle ověřit, že zpracovatel ví, co dělá?

Dobrym ukazatelem může být, pokud zpracovatel nemá žádné výhrady k poskytovaným datům. Dostupná data jsou málo kdy tak podrobná a rozsáhlá, že by přesně naplnili potřeby tvůrce modelu, resp. Digitálního dvojčete. Zpracovatel, který je schopen kriticky zhodnotit nedostatky a reflektovat je při své práci patrně ví, co dělá.

Detailní přehledná pasportizace rovněž dává najevo, že zpracovatel postupuje profesionálně.

KONTROLA: Podpora pro supervizora (co má/musí, resp. co nemá/nedovede zkontrolovat)

Supervizor především může zkontrolovat součinnost dalších subjektů, které data poskytují a ve spolupráci se zpracovatelem musí být schopen prokázat, že správci či vlastníci dat nevytváří zbytečně potíže při zajištění dat.

Co se týče kvality dat, je supervizor odkázán na úsudek zpracovatele a není nutné v tomto kroku spolupracovat s externími odborníky, byť to není na škodu.

PARTNER: Jak může být supervizor adekvátní partner (krok za krokem)?

1. Supervizor by měl mít možnost vyzvat či zadat zajištění dat z městem či městskou organizací spravované infrastruktury.
2. Supervizor by měl umožňovat a usnadňovat komunikační linku mezi vlastníky/správci dat a zpracovatelem.
3. Supervizor může vyvíjet tlak i v případech, kdy jde o data nevlastněná městem či městskou institucí
4. Zpracovatel by neměl být tím, kdo data vyžaduje od dotčených institucí, v tomto kroku by měl být hlavně příjemcem a hodnotitelem kvality dat.

6. NAPOJENÍ DAT NA DÍLČÍ MODEL

SPRÁVNOST POSTUPU: Jak může supervizor rychle ověřit, že zpracovatel ví, co dělá?

Supervizor by se měl dotázat, zda a v jakém rozsahu bylo možné dat napojit.

KONTROLA: Podpora pro supervizora (co má/musí, resp. co nemá/nedovede zkontrolovat)

Nelze očekávat, že by supervizor byl schopen v tomto kroku něco kontrolovat.

PARTNER: Jak může být supervizor adekvátní partner (krok za krokem)?

Pokud by existoval problém spojený s poskytovateli dat, může být supervizor partnerem při komunikaci a urgenci.

7. KALIBRACE A VALIDACE DOPRAVNÍHO DVOJČETE JAKO CELKU + ITERACE

SPRÁVNOST POSTUPU: Jak může supervizor rychle ověřit, že zpracovatel ví, co dělá?

Ověření by mělo být pro supervizora snadné. Supervizor si od zpracovatele vyžádá výsledky validace a porovná je minimálními požadavky. Pokud jsou hodnoty v normě, může vyhodnotit, že zpracovatel postupuje profesionálně.

KONTROLA: Podpora pro supervizora (co má/musí, resp. co nemá/nedovede zkontrolovat)

Supervizor nemůže zkontrolovat celý proces kalibrace, protože je poměrně náročný a vyžaduje vysokou úroveň znalostí. Může však ověřit výsledky validace.

PARTNER: Jak může být supervizor adekvátní partner (krok za krokem)?

V případě validace může supervizor pouze kontrolovat statistické výsledky. Pro kalibraci však může být plnohodnotným partnerem: jako konzultant pro výsledku modelu (tj. Zda odpovídají realitě), a dále pro zajištění dalších stakeholderů, kteří ověří správnost výsledků.

8. KONSTRUKCE SCÉNÁŘŮ PRO DEMONSTRACI CÍLŮ + WHAT-IF SCÉNÁŘE

SPRÁVNOST POSTUPU: Jak může supervizor rychle ověřit, že zpracovatel ví, co dělá?

Supervizor by se měl dotázat, na základě čeho zpracovatel stanovil scénáře. Scénáře jsou podstatnou součástí modelu a digitálního dvojčete a jejich konstrukce má být účelná.

KONTROLA: Podpora pro supervizora (co má/musí, resp. co nemá/nedovede zkontrolovat)

Supervizor by měl kontrolovat, zda výčet scénářů byl konzultovaný s objednatelem a zda scénáře reagují na konkrétní požadavky, které jsou definovány cíli projektu.

PARTNER: Jak může být supervizor adekvátní partner (krok za krokem)?

Supervizor zde je partnerem primárně v kontextu diskuse nad možnými scénáři. Může obstarat pro zpracovatele názory dalších stakeholderů a objednatele.

9. EXTRAKCE KPIs | SROVNÁNÍ | EKVALIZÉR

SPRÁVNOST POSTUPU: Jak může supervizor rychle ověřit, že zpracovatel ví, co dělá?

Supervizor by se měl opět optat na odůvodnění volby konkrétních KPIs a zpracovatel by mu toto měl být schopen uspokojivě vysvětlit.

KONTROLA: Podpora pro supervizora (co má/musí, resp. co nemá/nedovede zkontrolovat)

Supervizor by měl především zajistit dostatečně široký kolektiv lidí, kteří pomohou správně stanovit nutné KPIs.

Supervizor by dále měl být schopen od svých kolegů zajistit výčet těchto parametrů, se kterými běžně pracují či pracovat chtějí.

PARTNER: Jak může být supervizor adekvátní partner (krok za krokem)?

Supervizor může zpracovateli předložit konkrétní výčet KPIs, které chce z modelu využívat.

10. JAK PRACOVAT S DATY

SPRÁVNOST POSTUPU: Jak může supervizor rychle ověřit, že zpracovatel ví, co dělá?

Supervizor si opět může a měl by od zpracovatele vyžádat popis a vysvětlení toho, jak dané datové sdílení funguje.

KONTROLA: Podpora pro supervizora (co má/musí, resp. co nemá/nedovede zkontrolovat)

Může zajistit skrze externího konzultanta či kolegy v rámci veřejné instituce prověření funkčnosti otevřeného sdílení dat.

PARTNER: Jak může být supervizor adekvátní partner (krok za krokem)?

Mimo rámec projektu bude supervizor zastupovat přímo i majitele výstupních dat (v závislosti na smluvním ujednání). Je proto nezbytné být především mediátorem při diskusi s třetími stranami, které by o datajevily zájem.