

# CHYTRÁ EVROPSKÁ JAKO DIGITÁLNÍ DVOJČE

Roman Dostál, Miroslav Svítek, Ondřej Příbyl

Článek pojednává o koncepci a využití digitálních dvojčat, zejména v odvětví dopravy. Zdůrazňuje význam digitálních dvojčat jako virtuálních replik fyzického světa, které umožňují monitorování, testování a optimalizaci v reálném čase. Článek uvádí příklad projektu digitálních dvojčat v Praze, který se zaměřuje na Evropskou ulici. Cílem projektu je vytvořit funkční digitální dvojče, které dokáže předvídat dopravní zácpy a navrhnout strategie jejich zmírnění. Dále je pojednááno o možnostech integrace dopravního řešení do dalších odvětví, jako je urbanismus, energetika a životní prostředí. Článek zdůrazňuje význam sběru dat, tvorby modelu, integrace dat a využití digitálních dvojčat v reálných aplikacích. Navzdory problémům při sběru dat jsou zdůrazněny výhody digitálních dvojčat, např. úspora nákladů, lepší možnosti rozhodování a lepší vývoj nových technologických řešení.

Klíčová slova: digitální dvojče, dopravní model, Praha

## Úvod

Digitální dvojčata, koncept, který se v posledních letech výrazně prosadil, jsou virtuální repliky fyzického světa, které umožňují monitorování, testování a optimalizaci v reálném čase. Slouží jako most mezi fyzickým a digitálním světem a umožňují analyzovat data a monitorovat systémy, aby bylo možné předjet problémům dříve, než nastanou, předcházet prostojům, rozvíjet nové příležitosti a plánovat budoucnost pomocí analýzy očekávaných simulací [1].

V odvětví dopravy se digitální dvojčata vyvinula nad rámec jednoduchých dopravních simulací. Zahrnují data v reálném čase, pokročilou analytiku a algoritmy strojového učení a vytvářejí dynamické modely, které přesně reprezentují aktuální stav dopravních systémů.

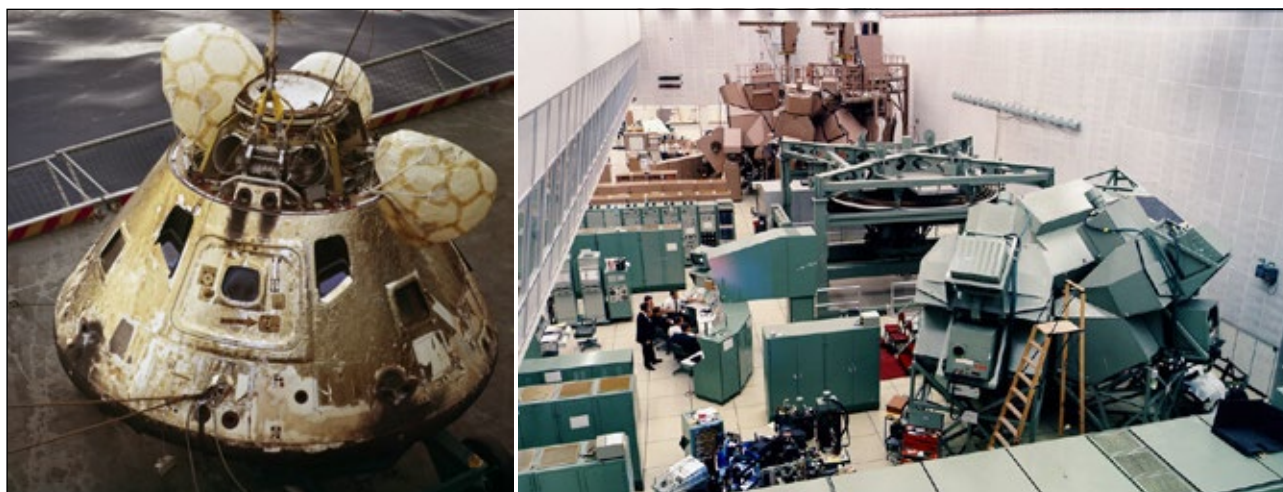
Tato integrace dat v reálném čase umožňuje přesnější předpovědi a efektivnější reakce na měnící se podmínky. Například instituce zajišťující řízení dopravy mohou tato digitální dvojčata využívat k predikci míst s dopravními kongescemi a navrhování strategií k jejich zmírnění [2].

Jako historický příklad konceptu digitálních dvojčat slouží incident Apollo 13 (obr. 1). Tehdy však šlo o dvojče fyzické. Když na kosmické lodi explodovala nádrž s kyslíkem, mohli inženýři na zemi použít repliku kosmické lodi a navrhnout řešení, jak posádku bezpečně dopravit domů. Tato událost podtrhuje potenciál digitálních dvojčat v oblasti krizového řízení a řešení problémů.

Výhody digitálních dvojčat jsou mnohé. Mohou vést k významným úsporám

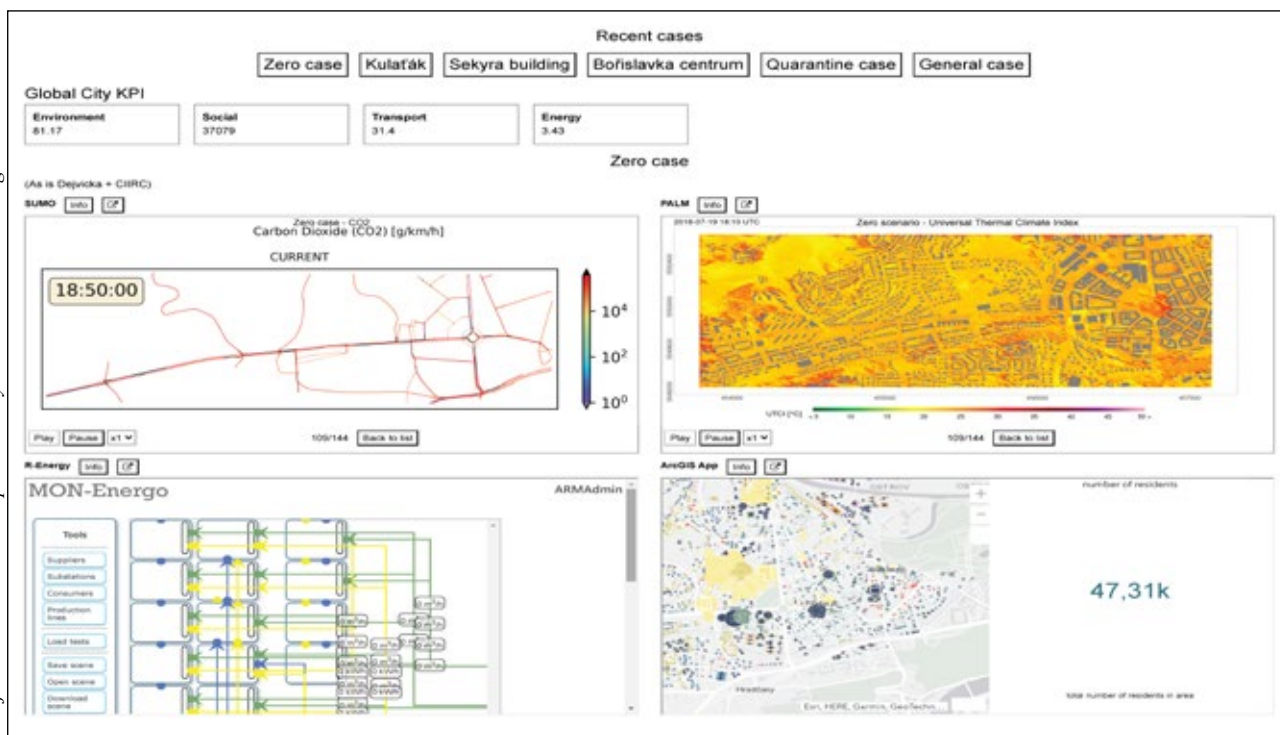
nákladů díky identifikaci potenciálních problémů dříve, než nastanou, čímž se sníží prostoje a náklady na jejich odstranění. Mohou také zlepšit rozhodování tím, že poskytují přesná data v reálném čase a umožňují optimální predikci dalších případných kritických událostí, resp. chování uživatelů v dopravním systému při nastalé situaci. Kromě toho mohou zlepšit vývoj a implementaci nových technologických a systémových řešení tím, že umožní jejich testování a optimalizaci ve virtuálním prostředí bez rizika.

Byť má digitální dvojče základ v průmyslu, můžeme tento nástroj aplikovat v širokém spektru odvětví. Mimo jiné také v dopravě, kde již řadu let pracujeme s prediktivními modely a dopravními simulacemi. Jsme tedy v podstatě krůček před rozšířením působnosti výpočetní techniky a jejího přínosu v tomto odvětví.



Zdroj: NASA

Obr. 1: Apollo 13 (vlevo) a fyzická dvojčata vesmírných modulů (vpravo)



Obr. 2: City Simulation Software

Tým, který se věnuje tvorbě digitálního dvojčete na tuzemské půdě (ČVUT, VUT, SmartPlan, s. r. o., a PATRIC, a. s., ve spolupráci s TSK), se již dlouho zabývá otázkou digitalizace a využití pokročilých modelovacích procesů na stejném území. Předmětnou oblastí je ulice Evropská v Praze [3]. Z pohledu dopravy je významná hned z několika důvodů. Je zde kombinace množství dopravních systémů (chodci, silniční doprava, železnice, tramvaje, metro, autobusové linky a letiště Praha) a dopravou tu významně prostupuje urbanistický a lidský rozměr díky perspektivní lokalitě a řadě významných uzlů (Vítězné náměstí v Dejvicích s univerzitním kampusem ČVUT a VŠCHT, Nádraží Veveřslavín a Letiště Václava Havla).

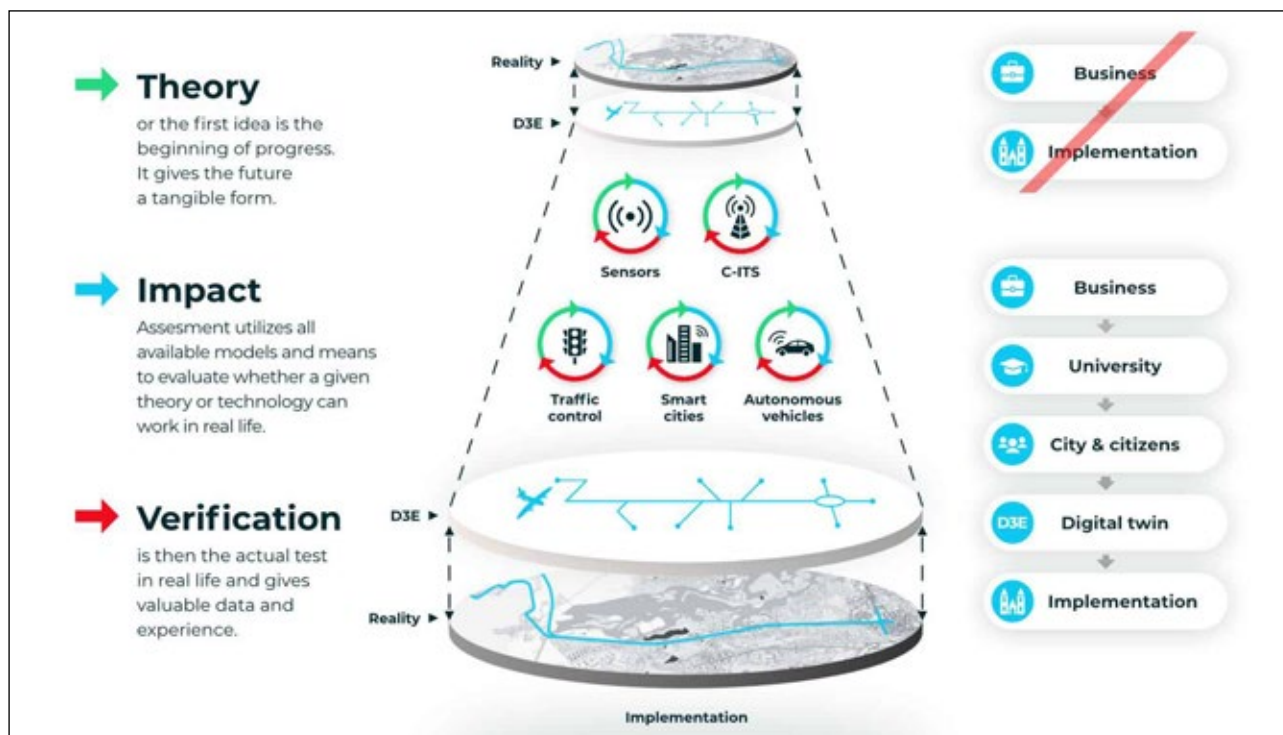
Dřívější fáze zájmu o tuto lokalitu s sebou přinesly mnohé zajímavé výstupy. Například zde vznikl nástroj kombinující nejen již zmíněnou dopravu a urbanistiku, ale také energetiku a životní prostředí. Ze všech těchto pohledů je pomocí tohoto tzv. City Simulation Software (CSS) možné hodnotit současný stav veřejného prostoru a srovnávat rozvojové scénáře (obr. 2).

Na obrázku 2 je uveden projekt, který podpořil vznik dopravního digitálního dvojčete. Zde bylo separátně simulo-

váno hned několik odvětví. Levý horní kvadrant zobrazuje výstupy z dopravního mikroskopického modelu jednoduchou vizualizací zdržení na síti. Pravý horní kvadrant znázorňuje rozptyl polutantů v území v kontextu povětrnostních vlivů, zástavby a dalších faktorů. Levý spodní kvadrant znázorňuje řešení stylu tzv. „smart grid“, tj. chytré sítě, kde je možné dynamicky analyzovat aktuální stav a reagovat v rámci celého systému. Pravý spodní kvadrant přináší urbanistický rozměr, kde je simulována kombinace dopravního chování a distribuce obyvatelstva dle sociodemografických charakteristik. Všechny čtyři aspekty přináší unikátní pohled na jednu oblast a jednu situaci. Právě kombinací těchto položek bylo možné přistoupit k multiorbovému hodnocení variačních scénářů rozvoje území.

Cílem výzkumného projektu TA ČR „Dopravní digitální dvojčete Evropská“ (akronym D3E) je zjistit, zda je možné v českém prostředí, konkrétně v pražských Dejvicích, vytvořit funkční dopravní digitální dvojčete, které bude městu přinášet celé spektrum benefitů. Dalším cílem je vytvořit na základě výstupů tohoto projektu příklad dobré praxe a také metodický postup pro tvorbu těchto dopravních digitálních dvojčete. Jedná se tedy o ryze dopravní řešení. To však není omezující

cí charakteristikou projektu. Stejně jako v předcházejícím projektu (Umělá inteligence pro chytrá města a regiony v rámci projektu Národní centrum kompetence – Kybernetika a umělá inteligence), je zde možné vnímat rozměr více pohledů. Doprava má významný přesah na všechna ostatní odvětví. V rámci urbanistiky a rozvoje území dopravu významně ovlivňuje využití území a dopravní chování na základě distribuce obyvatel, zdrojů a cílů cest. Digitální dvojčete toto může zužitkovat jako upřesněná vstupní data při využití tzv. syntetické populace (virtuální reprezentace populačního vzorku pro dané území, na kterém je simulováno dopravní chování a distribuce obyvatel a přináší tak upřesněné vstupní parametry do dopravní simulace). Vliv dopravy na životní prostředí patrně není nutné komplikovaně a obsáhle vysvětlovat. Primárním dopadem jsou výfukové plyny a jejich šíření v území, resp. jejich dopad na životní prostředí. Dopravní digitální dvojčete tak poskytuje nepřetržitá data upřesňující imise z dopravy. V rámci energetiky je nezbytné vnímat dopravu primárně jako jednoho z mnoha uživatelů či komponent v systému, která může v množství rovin využívat kapacitu energetické sítě. Nejjednodušším příkladem jsou elektromobily při nabíjení. Ve všech příkladech se tak jedná o významné přesahy do dílčích odvětví. Ty sice nejsou primárním cílem



Zdroj: SmartPlan, s. r. o.

Obr. 3: Základní princip digitálního dvojčete

tvorby dopravních digitálních dvojčat, ale provazbu nevyklučují, naopak ji umožňují.

Informace o projektu dopravního digitálního dvojčete je možné nalézt na stránkách projektu Smart Evropská, resp. Gate to Europe: <https://gatetoEurope.eu>. Právě odkud plyne základní myšlenka vytvoření Smart City polygonu na strategické dopravní tepně Evropské v Praze [4]. Pod tuto ideu spadá i projekt dopravního digitálního dvojčete (obr. 3).

## Metodika

Metodický postup k vytvoření digitálního dvojčete zahrnuje několik kroků: sběr dat, vytvoření modelu, integraci dat do modelu Eclipse SUMO a samotné využívání a fungování digitálního dvojčete. V procesu úplné realizace digitálního dvojčete se stále pokračuje, nicméně v každé z oblastí bylo dosaženo nového poznání.

## Sběr dat

Nejnáročnější částí tvorby digitálního dvojčete není vytvoření komplexního modelu, na kterém celý projekt běží, ale spíše získávání relevantních dat z veřejného prostoru. Tento problém je velmi specifický pro konkrétní oblast, na kterou se digitální dvojčete zaměřuje.

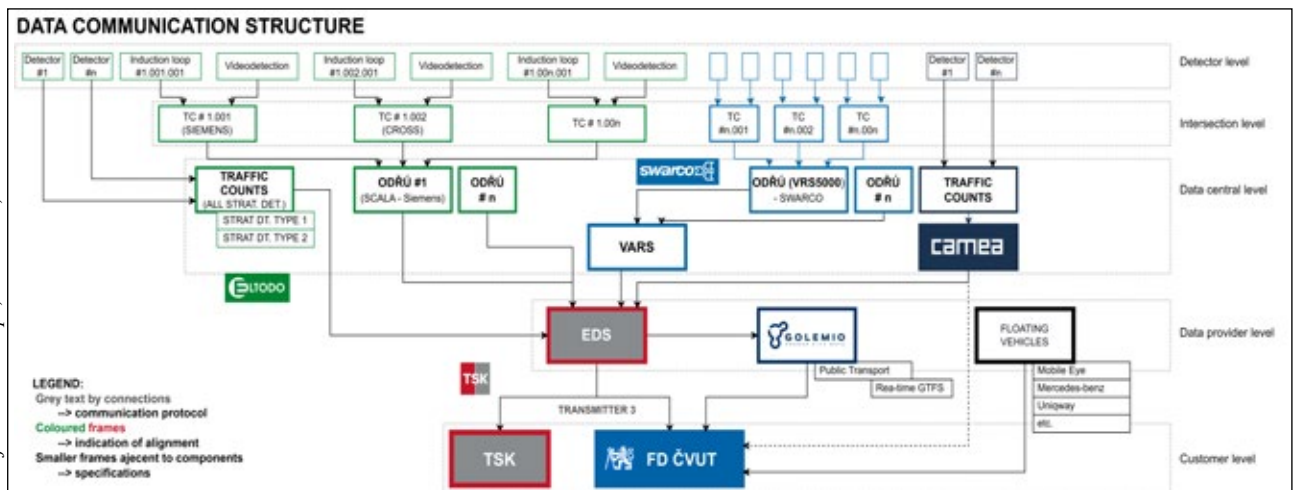
V případě standardního dopravního modelu (bez ohledu na to, zda se jedná o makroskopický, mikroskopický nebo jiný typ modelu) je situace poněkud jednodušší. Vždy je nutné shromáždit velké množství dat, ale na rozdíl od digitálního dvojčete si můžeme dovolit sbírat data v jednom časovém profilu kompletně, a tím komplikace s daty končí. V případě digitálního dvojčete tuto výhodu nemáme a poskytovatel se nemůže vyhnout zajištění kvalitních dat.

Je obtížné vytvořit jednoduchý postup, který bude fungovat vždy, všude a za všech podmínek. Kvalita, hloubka a rozsah dat se mohou lišit v závislosti na konkrétním zadání. Základním principem je však včasná a kvalitní komunikace s veřejným sektorem, který je za data odpovědný, nebo v kombinaci se soukromými dodavateli. I toto se často velmi liší. Příklad, který uvádíme z ulice Evropská, je specifický pro pražské prostředí. Zde je za dopravní data (ta byla primárním předpokladem pro fungování dopravního digitálního dvojčete) zodpovědná společnost TSK (Technická správa komunikací hl. m. Prahy, a. s.). Očekávání, že stačí být v kontaktu se zodpovědným pracovníkem z TSK, je však nezbytně konfrontovat s realitou skutečného světa.

Ve skutečnosti se v případě dopravních dat jedná o celý systém různých dodavatelů služeb a technologií. V rámci organizace zodpovědné za tato data je většinou nastavený funkční systém jejich využití a práce s nimi. Což v konečném důsledku znamená, že pro aktuální potřeby vše funguje. V případě zátěžového testu formou dodatečných požadavků na poskytování a kvalitu dat však tento funkční systém začíná mít mezery. Na schématu (obr. 4) je zobrazen zjednodušený přehled zajistitelných tzv. real-time dat (tj. aktuální data v reálném čase).

Tento diagram musel nezbytně vzniknout, aby se mohli zpracovatelé vyznat v celém zmiňovaném systému poskytovaných dat. Na první pohled je vidět, že data poskytuje hned několik poskytovatelů k využití TSK. Nejvýznamnější jsou v tomto ohledu pro náš příklad dodavatelé ELTODO, CAMEA a SWARCO, dále například data o veřejné hromadné dopravě v otevřeném protokolu GTFS (*General Transit Feed Specification*), které jsou k dispozici na platformě Golemio. Bez ohledu na možnosti komunikace s jednotlivými subjekty již nyní roste komplikace vzhledem ke kompatibilitě jednotlivých interních systémů pro potřeby tvorby digitálního dvojčete. Reálná kvalita a využitelnost dílčích datových sad následně zpětně ovlivňuje





Obr. 4: Systém real-time dat pro projekt dopravní digitální dvojče Evropská

tvorbu digitálního dvojčete a rozsah jeho funkcionalit.

S tématem dostupných dat neodbytně souvisí také kalibrace a validace modelu. Jinak řečeno, model může být jen tak přesný, jak kvalitní vstupní data jsou k dispozici. Je proto nezbytné mít na paměti, že možnosti digitálního dvojčete jsou významně závislé na dostupných datech a že je zároveň naprosto zásadní začít s jejich sběrem již v úvodu, ještě před tvorbou samotného modelu.

### Vytvoření modelu

Po shromáždění potřebných údajů je možno přistoupit k tvorbě modelu, který reprezentuje současný stav dopravního systému. Tento model není pouhou simulací dopravy, ale zahrnuje data v reál-

ném čase, pokročilou analytiku a algoritmy strojového učení pro vytvoření dynamických modelů.

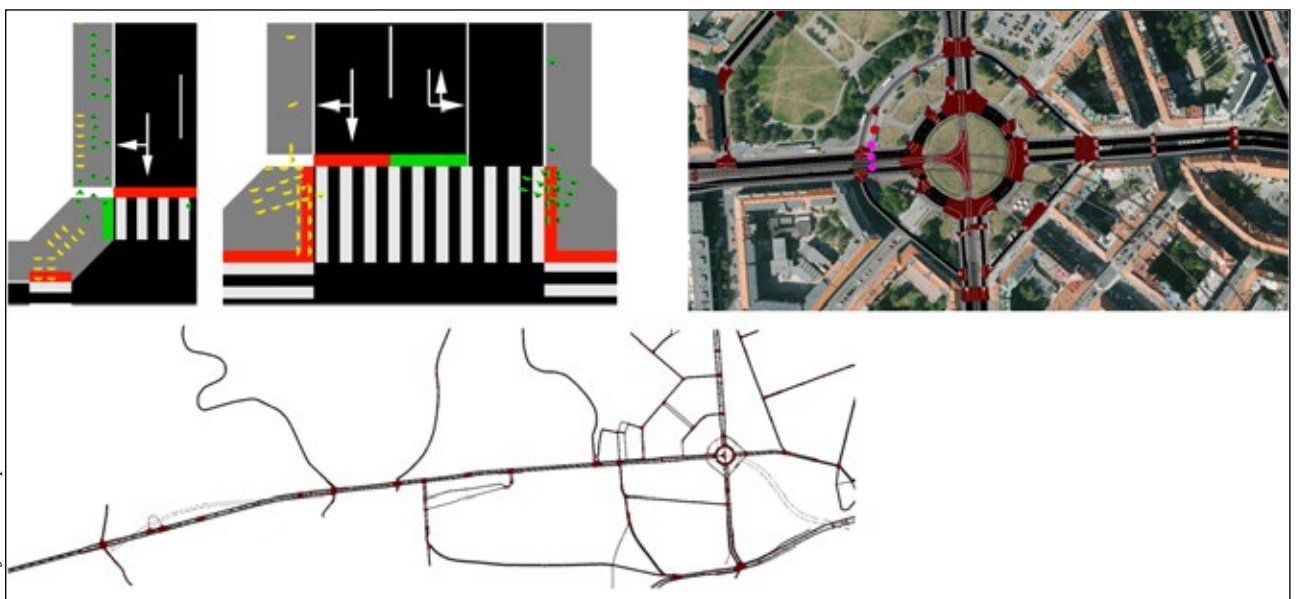
Na první pohled se tedy dopravní digitální dvojče na Evropské neliší od klasického modelu. Dovolíme si však přírůbek z Čechům známého houbaření. Není tak důležité, co se děje na povrchu, ale co se odehrává pod ním. Digitálním dvojčtem se tento model stává díky zajištění aktuálních dat.

Není přitom rozhodující, jaký dostupný software je využit. Vše se odvíjí od skutečné potřeby klienta či zpracovatele. V případě zmíněného projektu D3E (Dopravní digitální dvojče Evropská) byl využit software Eclipse SUMO (obr. 5), který umožňuje vysokou míru flexibility (jedná se o open source software, který

je možné nastavit dle vlastních potřeb primárně za využití uživatelských skriptů v jazyku Python). Na obrázku jsou uvedeny standardní příklady z dokumentace SUMO (vlevo), detailnější situace okružní křižovatky Vítězného náměstí (vpravo) a znázornění celé modelované sítě s nižší úrovní detailů (dole).

### Integrace dat do modelu Eclipse SUMO

Po vytvoření modelu integrujeme shromážděná data do modelu Eclipse SUMO. Tento krok je klíčový, protože umožňuje digitálnímu dvojčeti přesně reprezentovat podmínky reálného světa. Zde může nastat řada problémů, která je však opět úzce spjata se zajištěním správných dat v reálném čase. V tento moment již musí model bez problému



Obr. 5: Digitální dvojče Evropská (dopravní model)

fungovat a data musí být možné využít pro kalibraci a validaci modelu. Mohou zde nastávat situace, které nebylo možné odhalit v průběhu sběru dat. Některé datové vstupy mohou být například časově posunuté. Některé technologie například umožňují zasilání dat jen v agregovaných časových intervalech, zatímco jiné je možné využívat disagregované a vlastní časové vymezení nastavit dle potřeby. V některých případech může být objem dat příliš vysoký pro účely, ke kterým jsou zajišťována.

Všechny výše uvedené situace, které mohou, ale také nemusí, nastat, jsou samozřejmě řešitelné. Je však nezbytné data pečlivě zajistit a model citlivě připravit tak, aby vše mohlo být správně provázáno.

### Výstupy z digitálního dvojčete

Model, který funguje na základě real-time dat, je zkalibrován a validní, je možné použít pro prezentaci požadovaných výsledků. Nejrychlejším výstupem může být vizualizace scénářů, které mohou nastat například v prostředí virtuální reality (VR), jak je uvedeno na obr. 6. V levém horním kvadrantu jsou znázorněny informace o budovách. Na pravém horním kvadrantu je znázorněn výběr scénářů v rámci dopravy (uvedeny nad sebou souběžně). Spodní dva kvadranty znázorňují simulaci životního prostředí

(využívá data z dopravního modelu) a kontextu blízkého okolí. Dále je možné digitální dvojčete integrovat do systému řízení provozu a optimalizovat jej, tj. upravit například světelnou signalizaci na základě modelace širšího okolí a řízení nových scénářů řízení.

Postupná digitalizace prostředí umožňuje zpracovatelům, ale také dalším stakeholderům, jako je akademický sektor, politické vedení měst atd., nahlédnout do reálného dění na Evropské pomoci technologie VR. Zde jde o kombinaci fyzického modelu a simulované vizualizace dat z dopravy i dalších odvětví.

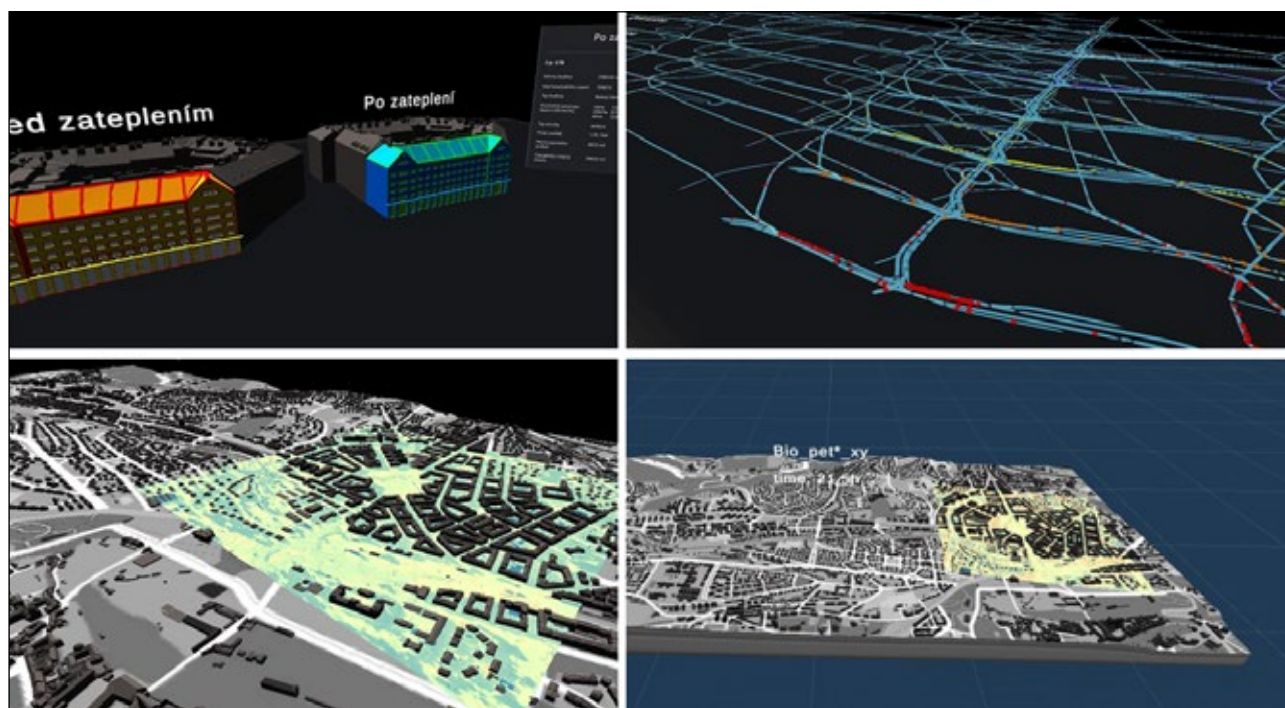
### Výsledky

Výzkum přinesl několik klíčových zjištění. Nejvýznamnějším z nich je důležitost dat. Data jsou krví digitálního dvojčete a jejich získání v dostatečné kvalitě představuje značný problém. Kvalita, hloubka a rozsah dat se mohou lišit v závislosti na konkrétním zadání a zajištění kvalitních dat je úkol, kterému se nelze vyhnout.

Jakmile jsou data shromážděna a začleněna do modelu, může digitální dvojčete poskytnout řadu výhod. Primární přínos funkčního digitálního dvojčete je pro správce infrastruktury, resp. pro město či městskou část. Je možné například:

- optimalizovat řízení dopravy (v připravených krizových scénářích nebo obecně s využitím širšího spektra dat) [5];
- vyhodnotit aktuální situaci a předvídat, co se stane v případě kritické situace;
- průběžně vyhodnocovat možné varianty vývoje jako v případě standardních modelů (s tím rozdílem, že v tomto případě budou data vždy zcela aktuální) a ověřovat si různá opatření.

Tím však využití digitálního dvojčete nekončí. Jako generátor velmi zajímavých simulovaných dat lze digitální dvojčete využít jako zdroj dat pro další simulace (např. v oblasti životního prostředí, urbanistických studií atd.) nebo samostatné studie a strategie [6]. Město a odborná veřejnost mají díky digitálnímu dvojčeti k dispozici jedinečný nástroj pro plánování a řízení městské dopravy a dalších souvisejících odvětví. Z ostatních odvětví je možné data do digitálního dvojčete také přijímat, tj. například v rámci urbanistiky v rámci využití území, resp. v případě tzv. syntetické populace pro dopravní a sociální chování. Vzniká tím tedy celý systém postupně propojovaných dvojčat a modelů, které umožňují přesnější vzhled do reality a případných nečekaných situací.



Zdroj: Národní centrum kompetence – Kybernetika a umělá inteligence

Obr. 6: Zobrazení výstupů digitálního dvojčete chytré Evropské pomocí virtuální reality (VR)

## Závěr a diskuse

Výzkum prokázal potenciál digitálních dvojčat v oblasti řízení dopravy. Navzdory problémům spojeným se sběrem dat je díky přínosům digitálního dvojčete možné doporučit tento typ projektů realizovat, ale především dále zkoumat. Významnou výhodou je možnost sledovat, plánovat a předvídat stav dopravy v reálném čase a prostřednictvím těchto informací optimalizovat aktuální řízení dopravy a schopnost integrovaného záchranného systému adekvátně reagovat na neočekávanou krizovou situaci.

Použitelnost výsledků výzkumu je však omezena kvalitou dostupných dat. Digitální dvojče může být pouze tak přesné, jak přesná jsou data, z nichž vychází. Proto je proces sběru dat klíčový a měl by být zahájen na začátku projektu, ještě před vytvořením samotného modelu. Pečlivá práce při vytváření dvojčete se vyplatí, protože zajistí neustále aktuální data.

Vytvořením digitálního dvojčete tak práce nekončí. Digitální dvojče poskytuje základ pro další strategickou činnost v dané oblasti. Slouží jako jedinečný nástroj pro plánování a řízení městské dopravy a dalších souvisejících odvětví, který městu i odborné veřejnosti nabízí celou řadu výhod. Akademická sféra může pomoci zá-

stupcům měst vyzkoušet různé nové technologie či opatření a ukázat jejich dopad ve virtuálním prostředí. Může se jednat například o nové algoritmy řízení dopravy, integraci autonomních a kooperativních vozidel, preference veřejné dopravy, využívání sdílených dopravních prostředků, využívání dronů a mnohé další. Dříve, než město investuje do nových technologií, je tedy možné ukázat jejich skutečný přínos.

Kromě výše popsaných aplikací existuje do budoucna i několik oblastí pro další výzkum a zlepšování digitálních dvojčat. Je třeba se zaměřit na vývoj efektivnějších metod sběru dat, které by zlepšily vypovídací schopnost digitálního dvojčete. Určitě je také třeba rozšířit záběr digitálního dvojčete z dopravy na další oblasti života ve městech. Je třeba ukázat vazbu na energetiku, budovy, životní prostředí a další. Také je zajímavým trendem propojit digitální dvojče s nástroji pro generování poptávky po dopravě na základě účasti na aktivitách takzvané syntetické populace [7]. Toto umožní nejen lepší propojení a opatření upravující infrastrukturu, ale i politiky cílící na změny dopravního chování.

### Použité zdroje:

[1] TAO, F., CHENG, J., QI, Q., ZHANG, M., ZHANG, H. & SUI, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9–12), 3563–3576.

[2] ZHENG, P., WANG, H., SANG, Z., ZHONG, R. Y., LIU, Y., LIU, C. & CHAI, X. (2018). Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. In: *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13(2), 137–150.

[3] GATE TO EUROPE (2023). *The Evropská project*. Dostupné z: <https://gatetoeurope.eu>.

[4] SVÍTEK, M., DOSTÁL, R., KOZHEVNIKOV, S. & JANČA, T. (2020). Smart City 5.0 Testbed in Prague. In: *IEEE conference, Smart Cities Symposium Prague 2020*.

[5] PŘIBYL, O., BLOKPOEL, R. & MATOWICKI, M. (2020). Addressing EU climate targets: Reducing CO2 emissions using cooperative and automated vehicles. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020, 2020(86), ISSN 1361-9209.

[6] DOSTÁL, R., PŘIBYL, O. & SVÍTEK, M. (2020). City Infrastructure Evaluation using Urban Simulation Tools In: *IEEE conference, Smart Cities Symposium Prague 2020*.

[7] PEREIRA, A. M., DINGIL, A. E., PŘIBYL, O., MYŠKA, V., VOREL, J. & KRÍŽ, M. (2022). An Advanced Travel Demand Synthesis Process for Creating a MATSim Activity Model: The Case of Ústí nad Labem. In: *Applied Sciences*. 2022, 12, 10032. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app121910032>.

Ing. Roman Dostál

✉ [dostal@smart-plan.cz](mailto:dostal@smart-plan.cz)

SmartPlan, s. r. o.

prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.

✉ [miroslav.svitek@cvut.cz](mailto:miroslav.svitek@cvut.cz)

prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.

✉ [pribylo@fd.cvut.cz](mailto:pribylo@fd.cvut.cz)

Fakulta dopravní ČVUT v Praze

## ENGLISH ABSTRACT

### Smart European Street as a Digital Twin, by Roman Dostál, Miroslav Svítek & Ondřej Příbyl

The paper discusses the concept and use of digital twins, particularly in the transport sector. It highlights the importance of digital twins as virtual replicas of the physical world that enable real-time monitoring, testing and optimization. The article gives an example of a digital twin project in the capital city of Prague, focusing on a European street. The aim of the project is to create a functional digital twin that can predict traffic congestion and suggest mitigation strategies. It also discusses the possibilities of integrating traffic these approaches into other sectors such as urban planning, energy and environment. The paper highlights the importance of data collection, model building, data integration and the use of digital twins in real-world applications. Despite the challenges in data collection, the advantages of digital twins are highlighted, such as cost savings, better decision-making possibilities and improved development of new technological concepts.