



## METODIKA

LOKALIZAČNÍ INFRASTRUKTURA PRO TUNELY NA POZEMNÍCH KOMUNIKACÍCH

# Certifikovaná metodika

## Lokalizační infrastruktura pro tunely na pozemních komunikacích

Zpracovatel:	České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní CEDA Maps a.s. Tritium Systems, s.r.o.
Autoři:	doc. Ing. Tomáš Tichý, Ph.D., MBA Ing. Jiří Brož, MSc. Ing. Zuzana Bělinová, Ph.D. Mgr. Adam Štencek Mgr. Radovan Prokeš Ing. Tomáš Šmerda, MBA
Oponenti:	doc. Ing. Rastislav Pirník, Ph.D. Žilinská univerzita v Žilině, Fakulta elektrotechniky a informačních technologií, katedra RIS  doc. Ing. Miroslav Růžička, CSc. Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, katedra VPD  Ing. Jiří Štefan Eltodo, a.s., projektant ŘS, držitel oprávnění MD ČR k výkonu prohlídek tunelů pozemních komunikací, autorizovaný inženýr ČKAIT v oboru technologická zařízení staveb
Certifikační orgán:	Ministerstvo dopravy
Datum certifikace:	5/2023
Výstup projektu:	CK01000163 – Výzkum alternativních metod určení polohy a jejich integrity s GNSS pro řidiče využívající C-ITS
Finanční podpora	Program TAČR – DOPRAVA 2020+
Počet stran:	43

## Obsah

Anotace .....	4
1 Slovník pojmů a zkratek.....	5
2 Metodika k lokalizačním systémům v tunelu .....	6
2.1 Uplatnění metodiky.....	6
2.2 Komu je metodika určena .....	6
2.3 Vazba na základní předpisy .....	7
3 Přínosy lokalizačních systémů v tunelu .....	8
3.1 Lokalizační infrastruktura .....	9
3.2 Další prvky lokalizačního systému .....	9
3.3 Přehled dostupných lokalizačních technologií .....	10
3.3.1 Bluetooth Low Energy .....	10
3.3.2 C-ITS.....	10
3.3.3 Wi-Fi.....	10
3.3.4 VLC (Visible Light Communication) / Li-Fi.....	10
3.3.5 UWB (Ultra Wide Band).....	11
3.3.6 GNSS opakováče (GNSS Repeater) .....	11
3.3.7 Leaky feeder / Leaky coaxial cables (vyzařovací kabely) .....	12
3.3.8 Rozšířená virtuální realita (Augmented reality) .....	12
3.3.9 Závěr a doporučené technologie.....	13
3.4 Popis vhodné lokalizační infrastruktury .....	13
3.4.1 HW prvky – BLE beacony .....	14
3.5 Registr lokalizačních prvků .....	15
4 Důvody pro nasazování lokalizační infrastruktury .....	17
4.1 Navigace v tunelových stavbách na PK.....	18
4.2 Doporučení pro rozhodnutí o instalaci lokalizační infrastruktury .....	19
4.3 Znalost polohy vozidel (osob) při mimořádných situacích .....	21
4.4 Integrace na ŘS a využití znalosti polohy nebo rychlosti vozidel pro řízení dopravy.....	21
4.5 Kooperativní systémy C-ITS v tunelech .....	22
4.6 Vysoce automatizované a autonomní vozidlové systémy.....	23
5 Architektura systémů lokalizační infrastruktury .....	24
6 Uplatnění lokalizačních technologií v tunelech.....	27
6.1 Využití technologie BLE .....	27
6.2 Princip fungování lokalizační infrastruktury v tunelu.....	28
6.3 Princip umístování beaconů do tunelu.....	28
6.4 Instalace beaconů.....	28

6.4.1	Vhodné místo instalace beaconů – členitost, povolená rychlost.....	31
6.4.2	Údržba beaconů a profylaktická prohlídka.....	32
6.5	Využití lokalizace pro technologii – C-ITS.....	32
6.5.1	Instalace.....	33
6.5.2	Instalace RSU a C-ITS v tunelu .....	33
6.5.3	Údržba RSU nebo C-ITS a profylaktická prohlídka.....	36
6.5.4	Případy využití .....	37
7	Krytá parkoviště.....	38
8	Doporučené použití a postup .....	39
8.1	Ekonomické a časové zhodnocení.....	39
9	Závěr.....	41
10	Literatura.....	43
	Příloha 1 – Výkres rozmístění RSU a beaconů v tunelu.....	44

## Anotace

**Název:**

Lokalizační infrastruktura pro tunely na pozemních komunikacích

**Abstrakt:**

Účelem metodiky je zabezpečení správného postupu pro zajištění lokalizace vozidel s využitím technologie BLE a C-ITS, a to při výběru, návrhu, projektování a realizace technologií lokalizační infrastruktury v tunelech na pozemních komunikacích a parkovištích. Certifikovaná metodika může být využita jako podklad pro další legislativní úpravy a požadavky například do technických podmínek TP 98 a TP 154, které vydává MD ČR nebo přímo do normy ČSN 73 7507. Metodika slouží příslušným správcům tunelů, projektantům nebo komerčním subjektům, a definuje, kde a jak danou technologii umísťovat na dopravní infrastrukturu a jaké prvky používat tak, aby byla zajištěna přesná lokalizace vozidel v uzavřených prostorech.

**Klíčová slova:**

Beacon, C-ITS, BLE, Lokalizace, Řídicí systém, Tunel.

**Certifikační orgán:**

Ministerstvo dopravy ČR – odbor ITS, kosmických aktivit a VaVal

## 1 Slovník pojmů a zkratek

5G	Mobilní síť 5. generace
API	Application Programming Interface
BLE	Bluetooth Low Energy
BN	Bluetooth Low Energy beacon
C2X	Car to everything (způsob komunikace v C-ITS)
CAM	Cooperative Awareness Messages
C-ITS	Kooperativní Inteligentní dopravní systém
DENM	Decentralized Environmental Notification Message
GNSS	Globální polohový družicový systém (např. GPS, Galileo, Glonass, Beidou)
GSM	Globální mobilní digitální systém (Global System for Mobile Communication)
HD Maps	High-definition maps (mapa s vysokým rozlišením)
ITS-G5	Kooperativní systémy vysílající v dedikovaném pásmu 5,9GHz
IVI	In-vehicle information
IZS	Integrovaný záchranný systém ČR
LBS	Location Based Services
MD ČR	Ministerstvo dopravy České republiky
MQTT	Message Queue Telemetry Transport
OBU	On-board unit
PDZ	Proměnné dopravní značení
PK	Pozemní komunikace
RSU	Road-side unit
RSSI	Received Signal Strength Indicator
ŘS	Řídicí systém
SDK	Software Development Kit
SSZ	Světelné signalizační zařízení
TP	Technické podmínky
TSK	Technická správa komunikací hl. m. Prahy
ZPI	Zařízení pro provozní informace

## 2 Metodika k lokalizačním systémům v tunelu

### 2.1 Uplatnění metodiky

Uplatnění této metodiky spočívá ve vytvoření komplexního certifikovaného dokumentu, který shrnuje vlastnosti a přínosy lokalizační infrastruktury pro uživatele a správce tunelů na pozemních komunikacích, neboť v těchto dopravních stavbách není možné využívat běžně dostupné lokalizační technologie na bázi satelitního navigačního systému (GNSS). Metodika představuje různé technologie a přístupy využitelné pro lokalizaci v uzavřených prostorech, shrnuje jejich vlastnosti, přínosy, omezení, instalační a provozní nároky a poskytuje tak obecná doporučení ale i možnosti uplatnění pro správce příslušných dopravních staveb, kdy je vhodné lokalizační infrastrukturu do těchto staveb na pozemních komunikacích (PK) instalovat a poskytuje návod pro výběr vhodné technologie, parametrů systémů a základní ekonomické hodnocení pro nasazení systému a jeho údržbu.

Metodika specifikuje základní okruhy:

- přínosy zavádění lokalizační infrastruktury,
- objekty dopravní infrastruktury, zejména tunely na pozemní komunikaci a krytá nebo podzemní parkoviště, vhodné pro umístění lokalizační infrastruktury,
- dostupné technologie a jejich vlastnosti,
- vhodné umístění jednotlivých prvků lokalizační infrastruktury a jejich orientační počet,
- vhodnost případů využití,
- technické podmínky pro instalace prvků a jejich projektování,
- orientační ekonomické posouzení doporučené technologie (náklady na instalaci, provoz).

### 2.2 Komu je metodika určena

Tato metodika je určena pro projektanty, realizátory a správce dopravní infrastruktury, zejména tunelových staveb na pozemních komunikacích. Využití dokumentu je v konkrétních detailech také pro projektanty, kteří připravují projekty pro přípravu staveb, rekonstrukcí či dovybavení těchto staveb a další odborníky zabývající se těmito dopravními stavbami.

Těmto subjektům by měla pomoci při zabezpečení správného postupu pro:

- kompetentní rozhodnutí o zavedení lokalizační infrastruktury pro konkrétní dopravní stavbu na základě přítomnosti konkrétních problémů a situací včetně specifikaci přínosu,
- plánování instalace v různých lokalitách,
- výběru vhodných technologií s ohledem na způsob využití,
- nastavení důležitých parametrů při pořizování systému.

Metodika je certifikovaná Ministerstvem dopravy ČR (MD ČR) a může sloužit také jako podklad pro další legislativní úpravy, zahrnutí požadavků na lokalizační infrastrukturu dopravních staveb do budoucích verzí příslušných technických podmínek nebo do norem.

Metodika může být využita a prakticky sloužit i příslušným správcům tunelů na pozemních komunikacích, městům či komerčním nebo akademickým subjektům jako výchozí analytický materiál při plánování lokalizačních systémů v tunelech a pro seznámení se s tím, jaké vlastnosti mají lokalizační

technologie a jaké parametry sledovat při jejich implementaci takovým způsobem, aby bylo dosaženo funkční a odolné infrastruktury s cílem zajistit možnost lokalizace v (z pohledu lokalizace) problematických lokalitách a tím zajistit kontinuální poskytování nejen dopravně-informačních služeb, ale také bezpečnost dopravy. Dokument má také posloužit jako podklad při přípravě popisu technického řešení a požadavků na realizaci lokalizační infrastruktury z pohledu projekčního a realizačního.

### 2.3 Vazba na základní předpisy

Tunelovou stavbou na pozemní komunikaci se rozumí liniový podzemní objekt, kterým prochází dopravní pozemní komunikace (silnice, dálnice nebo místní komunikace), umožňující plynulou a bezpečnou jízdu vozidel [11], která může být horizontálně členěná a složená z několika tunelových tubusů. Tyto tunelové tubusy jsou částí tunelové stavby, která je vymezena portály tunelu, zároveň také umožňují rozdělení dopravních proudů dle směrovosti. Tunelové stavby se liší počtem tubusů, svojí délkou, dále se klasifikuje bezpečnost tunelu, kde právě délka tunelu a intenzit dopravy je určující pro technologickou vybavenost tunelu [8, 11].

Dle TP 154 je tunel definován jako liniové podzemní dílo horizontální (s úklonem nejvýše 3,5 %) nebo úklonné (do 45°) o průřezu výrubu zpravidla větším než 16 m<sup>2</sup>, budované ražením nebo hloubením [9].

Vzhledem k rozdílům umístění tunelové stavby na komunikaci typu dálnice, silnice I. třídy nebo městský tunel se liší i povolený rychlostní limit, ten je mnohdy upravován pomocí proměnného dopravního značení (PDZ) dle aktuálních intenzit dopravy nebo jiných událostí jako je například údržba tunelu apod.

Pro tunelové stavby na PK je stanoven legislativní rámec formou směrnic, zákona, nařízení vlády, a technických podmínek a norem v základním výčtu:

- Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2004/54/ES ze dne 29. dubna 2004 o minimálních bezpečnostních požadavcích na tunely transevropské silniční sítě,
- Zákon č. 13/1997 Sb. o pozemních komunikacích, ve znění pozdějších předpisů
- Nařízení vlády č.264/2009 o bezpečnostních požadavcích na tunely pozemních komunikací delší než 500 m,
- Technické podmínky TP 98 – Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací. Ministerstvo dopravy ČR, 2004,
- Technické podmínky TP 154 – Provoz, správa a údržba tunelů pozemních komunikací. Ministerstvo dopravy ČR, 2001,
- Technické podmínky TP 229 – Bezpečnost v tunelech pozemních komunikací, MD ČR, Praha, 2010,
- ČSN 73 7507 Projektování tunelů pozemních komunikací ÚNMZ 2013,
- ČSN 73 0848 Požární bezpečnost staveb. Kabelové rozvody ÚNMZ 2009,
- ČSN 73 0873 Požární bezpečnost staveb – Zásobování požární vodou ÚNMZ 2003,
- ČSN EN 1838 Světlo a osvětlení – Nouzové osvětlení ÚNMZ 2015,
- ČSN ISO 3864-1 Grafické značky – Bezpečnostní barvy a bezpečnostní značky ÚNMZ 2012.



### 3 Přínosy lokalizačních systémů v tunelu

Lokalizační systémy a principy navigace na základě běžných přístupů na bázi GNSS jsou uvnitř staveb limitovány, anebo zcela odepřeny kvůli zamezení možnosti příjmu signálu. Na dopravní infrastrukturu se toto týká zejména tunelů, podzemních parkovišť nebo jiných krytých míst (např. i vysokou zástavbou). V těchto místech je tedy nutné vyhledávat alternativní způsoby zprostředkující polohové informace, které pomohou ke zpřesnění určování polohy vozidel, a tím umožní poskytování aktuálních lokálně-kontextových informací o situaci v silničním provozu. Informace mohou být distribuovány za použití systémů C-ITS, jiných komunikačních nebo mobilních platforem a dopravních řešení ke zefektivnění předávání a zvýšení dostupnosti lokalizovaných dopravních informací řidičům jako jsou např.:

- důležitá dopravní upozornění vztažená ke konkrétnímu místu v tunelu:

dopravní upozornění typu:

- o nehoda,
- o odstavené/porouchané vozidlo,
- o pomalu jedoucí vozidlo,
- o uzavření jízdního pruhu,
- o informace o stavu SSZ v okolí výjezdu z tunelu,
- o varování před kolonou,
- o libovolné textové informace,

konkrétními místa v tunelu mohou být:

- o tunelová propojka,
  - o SOS skříň,
  - o proměnné dopravní značení,
  - o portál,
  - o konkrétní dopravní úsek,
  - o konkrétní požární úsek,
  - o konkrétní staničení pozemní komunikace v tunelu,
- poloha, pasport a stav proměnných dopravních značek,
  - dopravní omezení a doporučení,
  - stupně dopravy a zpřesněné údaje o času nutného k překonání tunelu,
  - poloha blížících se vozidel IZS,
  - průjezd vozidel údržby,
  - aktuální vlivy počasí na výjezdu z tunelu apod.

Systém lokalizace umožní poskytovat informace o poloze vozidel také správcům dopravní infrastruktury a složkám IZS. Správcům dopravní infrastruktury se dostane do rukou řešení, které umožní:

- snížit rizika a celkové počty mimořádných událostí na dopravní infrastrukturu poskytováním relevantních lokalizovaných informací o dění na komunikaci,
- zvýšit efektivitu v organizaci dopravy,
- zvýšit plynulost a bezpečnost dopravy,
- navigovat vozidla údržby na konkrétní místo poruchy či výpadku zařízení,
- podporovat složky IZS poskytováním informací o poloze incidentů, počtu ohrožených vozidel apod. v případech nenadálých událostí,
- zefektivnit průjezd složek IZS v případě vytvoření kolony vozidel v tunelu např. při mimořádné události,
- zvýšit informovanost uživatelů dopravního systému.

### 3.1 Lokalizační infrastruktura

Lokalizační infrastruktura je dodatečná hardwarová infrastruktura umožňující vozidlům v tunelových stavbách na PK získávat významně přesnější a spolehlivější informace o své poloze buďto v celé dopravní stavbě nebo pouze v její části na důležitých místech např. pro získání upozornění na nadcházející manévr (na který se může řidič připravit v dostatečném předstihu), o stavu proměnných dopravních značek a dalších informací významných pro řidiče v důležitém místě (například při rozhodování před křižovatkou nebo v místech propojek v tunelu apod.).

### 3.2 Další prvky lokalizačního systému

V závislosti na zvolené technologii, požadovaných vlastnostech a funkcích může být, kromě samotné lokalizační infrastruktury, potřeba pro správnou funkci lokalizačního systému nebo některé z jeho funkcí řešit některé z následujících oblastí:

- podpora lokalizační technologie na straně uživatelů (mobilní zařízení, aplikace, vozidla),
- integrace s řídicím systémem tunelu včetně dalších systémů pro lokalizaci v rámci jedné uzavřené sítě tunelu,
- integrace se systémem C-ITS na úrovni jednotlivých RSU či přímo s řídicím systémem tunelu, popřípadě se C-ITS back-office,
- mapování tunelů a publikování mapových a datových sad o tunelu,
- publikování metadat lokalizační infrastruktury.

Výběr vhodné lokalizační technologie zásadním způsobem ovlivňuje nejen vlastnosti samotného určení polohy (přesnost, spolehlivost), ale také míru aktuální a možné budoucí míry využití lokalizačního systému uživateli a významně rovněž náklady na pořízení a provoz systému.

Při realizaci systému je vždy nezbytné zabývat se nejen samotnou technologií, ale také schopnostmi účastníků provozu danou technologií prakticky využít, dále integracemi s dalšími systémy (řídicí systém tunelu apod.). Některé z těchto aspektů často správce dopravní infrastruktury nemůže přímo ovlivnit (např. změny v operačních systémech mobilních telefonů či rozšíření určité aplikace mezi uživatele), ale musí je vzít v potaz, aby zvolil celkově efektivní systém, který splní zamýšlený účel na základě požadovaných parametrů. V případě nejistoty o návrhu řešení je vhodné konzultovat záměr s odborníky na lokalizační technologie.

### 3.3 Přehled dostupných lokalizačních technologií

Pro využití lokalizační infrastruktury je dostupných několik technologií. V následujícím popisu se zaměříme pouze na takové systémy, které jsou reálně v masovém měřítku využitelné pro lokalizaci v tunelových stavbách na PK. Hlavními kritérii pro určení vhodnosti využití dané technologie byla běžná dostupnost ve vozidlech a mobilních telefonech, spolehlivost, přesnost, a přiměřené investiční a provozní náklady včetně údržby.

#### 3.3.1 Bluetooth Low Energy

Technologii Bluetooth Low Energy (BLE) lze pro navigaci v krytém prostředí využít mnoha způsoby, ale jedním z běžných přístupů je použití beaconů ve formě majáků. Tyto beacons jsou malá bezdrátová zařízení průběžně vysílající signály pomocí technologie BLE, které mohou být přijímány chytrými telefony nebo jinými zařízeními, která pak mohou na základě síly signálu a dalších informací určit polohu zařízení vzhledem k danému beaconu. Beacons jsou umístěny na definovaných a známých místech. Osoba ve vozidle, která se chce v tomto prostředí pohybovat a být lokalizována, má u sebe chytrý telefon nebo jiné zařízení vybavené technologií BLE a příslušnou aplikací. Aplikace neustále vyhledává beacons v okolí a na základě síly signálu a dalších údajů, včetně znalosti umístění beaconů v daném prostoru, určuje polohu uživatele. Polohu uživatele je možné určit různými metodami (triangulace, trilaterace, fingerprinting, proximity).

#### 3.3.2 C-ITS

Kooperativní inteligentní dopravní systémy (C-ITS) jsou využívány pro přenos dopravních informací mezi vozidly a infrastrukturou. Tyto systémy lze pravděpodobně využít nejen pro samotný přenos zpráv, ale pomocí komunikační technologie by bylo možné využívat je i pro samotnou lokalizaci dle kvalitativních parametrů této komunikační sítě, např. pomocí síly signálu, ztrátovosti paketů, doby přenosu apod. V současném stavu však technologie takové funkcionality běžně nenabízí a není využívána. Jedná se však o potenciální uvažované řešení, v současném stavu spadající spíše do výzkumných disciplín, jak tyto technologie využívat i pro jiné účely, než je přenos dopravních informací.

#### 3.3.3 Wi-Fi

Známa technologie, která využívá síť přístupových bodů (access pointů) a metody zvané fingerprinting. Přístupové body Wi-Fi je nutné umístit na známých místech ve vnitřním prostředí. Osoba, která se chce v tomto prostředí pohybovat, má u sebe chytrý telefon nebo jiné zařízení vybavené technologií Wi-Fi a příslušnou aplikací. Aplikace nepřetržitě vyhledává blízké přístupové body Wi-Fi, měří sílu signálu a zaznamenává další údaje každého přístupového bodu. Aplikace zaznamená otisk prostředí na základě síly signálu a dalších údajů každého přístupového bodu. Tento otisk představuje jedinečný podpis prostředí, který lze v budoucnu použít k identifikaci polohy zařízení. Vzhledem k tomu, že Wi-Fi zařízení přibývají, ubývají a jsou nahrazovány, musí být tyto změny zachyceny přeměřeními nebo technologií, která změny monitoruje a průběžně upravuje otisk prostředí.

#### 3.3.4 VLC (Visible Light Communication) / Li-Fi

Tato technologie využívá světelné signály k přenosu informací, které mohou být použity pro určení polohy zařízení v prostoru. Jsou využívána LED světla, která jsou umístěna na známých místech v celém prostoru. Chytrý telefon nebo jiné zařízení ke své funkci potřebuje aplikaci pro VLC, která používá kameru zařízení k detekci LED světla a analýze světelných signálů k určení polohy zařízení. Na základě světelných signálů, které jsou detekovány kamerou, aplikace určuje polohu zařízení vzhledem k LED světlům.

Toto řešení je převážně využíváno v budovách, kde je předpokládáno využití husté sítě svítidel, a kde se předpokládá, že uživatel při chůzi směřuje přední kameru telefonu ke stropu, čímž umožní detekci světla přední kamerou. Při jízdě automobilem v tunelu většinou přední kamera telefonu směřuje k řidiči, což znemožňuje tuto technologii v tunelech řádně využít. S ohledem na nutnost využití speciálních LED světel by bylo nutné při instalaci do stávajících tunelů nainstalovat nová svítidla, což je značně neekonomická varianta.

V současné době tato technologie nemá ještě dostatečnou penetraci mezi mobilními zařízeními, aby bylo ke zvážení využití této technologie. Vzhledem k současným trendům je vhodné tuto technologii sledovat, zdali dosáhne podobného úspěchu jako BLE.

### 3.3.5 UWB (Ultra Wide Band)

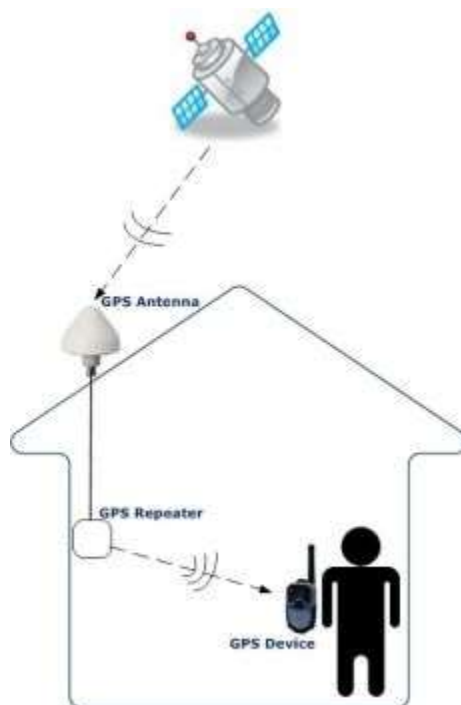
Tato technologie využívá krátké vysílací impulzy o velmi vysoké frekvenci k přenosu dat a umožňuje vysokou přesnost lokalizace v reálném čase. V místě, kde chceme lokalizovat, jsou umístěny UWB vysílače na známých místech a zároveň jsou na sledovaných objektech rozmístěny UWB přijímače nebo je uživatel nosí u sebe (např. smartphone s UWB). UWB vysílače vysílají krátké impulzy, které jsou detekovány UWB přijímači a pomocí TDoA (Time Difference of Arrival) umožní určení polohy. Tato technologie vyžaduje instalaci dodatečné infrastruktury, která musí být připojena k napájení a do datové sítě, což vyžaduje stavební úpravy.

V současné době tato technologie nemá ještě dostatečnou penetraci mezi mobilními zařízeními, aby bylo ke zvážení využití této technologie. Vzhledem k současným trendům je vhodné tuto technologii sledovat, zdali dosáhne podobného úspěchu jako BLE.

### 3.3.6 GNSS opakovače (GNSS Repeater)

Jedním z běžných přístupů je využití technologie globálního navigačního družicového systému (GNSS). Technologie GNSS však může být náchylná k chybám, zejména v městském prostředí a prostředí, kde mohou být signály blokovány nebo odráženy, jako jsou například tunely. V případě, že GNSS není k dispozici, je možné využití principu opakování signálu z dostupných míst na místa v zákrytu.

GNSS opakovače jsou zařízení, které se skládají ze dvou částí: antény (přijímače) umístěného na místě s dobrým příjmem GNSS signálu a opakovače (vysílače) umístěného v kryté části dopravní infrastruktury (tunely, podzemní parkoviště). Zařízení zachytává signál z více GNSS satelitů, ten přenáší do opakovače uvnitř tunelu/parkoviště a následně jej znovu vysílá. Ačkoliv toto řešení vypadá jako ideální – zařízení dostanou GNSS signál v místech, kde dosud nebyl – jde o řešení krajně nevhodné. Problémem je, že opakovač všude ve svém dosahu vysílá signál ze satelitů zachycený v místě umístění přijímače. Princip GNSS určení polohy pracuje s dobou letu signálu z různých satelitů – ten je na různých místech vždy různý, avšak zde je uvnitř budovy na všech místech v dosahu opakovače signál ze satelitů všude stejný = určená poloha je pak také stejná (odpovídá poloze přijímače na povrchu), ačkoliv se uživatelé v tunelu pohybují, viz obr 1.



Obr. 1 Princip GNSS opakovače [14]

Při využití GNSS opakovačů dochází v aplikacích nezdědka k úplnému rozpadu určení polohy – různé senzory určování polohy začnou poskytovat protichůdné informace – např. senzor otáčení kol hlásí, že se kola otáčejí, ale GNSS přijímač se silným signálem z opakovače tvrdí, že vozidlo stojí na místě.

Z tohoto důvodu se použití opakovačů pro aplikace v tunelech silně nedoporučuje.

### 3.3.7 Leaky feeder / Leaky coaxial cables (vyzařovací kabely)

Jedná se o typ komunikačního systému, který využívá kabel vyzařující rádiové signály po celé své délce. Kabel je navržen tak, aby signál unikal nebo byl vyzařován a mohl být dále zachycen přijímačem v blízkém místě. S ohledem na nutnost připojení opakovačů k síti a s tím spojených stavebních úprav je toto řešení krajně neekonomické ve srovnání s jinými technologiemi typu BLE nebo Wi-Fi.

### 3.3.8 Rozšířená virtuální realita (Augmented reality)

Využití rozšířené reality (AR) při navigaci v tunelech lze dosáhnout různými přístupy, včetně použití dodatečných lokalizačních prvků ve fyzickém prostoru, jako jsou QR kódy nebo jiné markery, obvykle s využitím fúze obrazových dat s dalšími senzory. I když se toto řešení může zdát slibné, nemusí být tak snadno prakticky využitelné jako použití některých z předchozích technologií. Při použití rozšířené reality pro navigaci v tunelech je třeba vyřešit několik výzev jako jsou technické provedení, detailní skenování daného prostoru, ale zejména implementace funkce do navigačních aplikací a vybavení použitých zařízení kvalitními senzory (zejména akcelerometry) a také provozní náklady spojené s provozem. Systémy založené na rozšířené realitě vyžadují pokročilé technologie, jako je počítačové vidění a strojové učení, jejichž implementace může být nákladná a náročná – to platí i pro výkon a výdrž baterie na straně (mobilních) zařízení. Tunely navíc většinou mají omezené osvětlení, což může ovlivnit přesnost digitálního mapování a sledování. Kamera telefonu uživatele navíc musí mít velmi dobrý výhled ven z vozidla, což nemusí být vždy možné. Kamerový systém vozidla není pro tento účel obvykle využitelný.

### 3.3.9 Závěr a doporučené technologie

V rámci rešerše jednotlivých technologií je nutné brát v potaz i podporu technologie koncovým zařízením a penetraci takových zařízení, které jsou běžně používány ve vozidlech. Některé technologie se ukázaly jako nevhodné, a to jak z hlediska technické implementace, náročnosti provozu, tak i ekonomické návratnosti. Jako jednoznačně nevhodná se ukázala technologie GNSS opakovačů, která vede k dalšímu zhoršení určování plochy u většiny systémů, kombinujících GNSS přijímač s další technologií nebo předpokládající nefunkčnost GNSS v tunelech (např. většina navigačních aplikací).

Taktéž je nutné brát v potaz charakteristiku tunelových staveb, možnost využití stávajících napájecích a datových sítí či jiné konektivity. Z tohoto pohledu se při posuzování vhodných technologií pro lokalizaci jednoznačně jako nejvhodnější jeví využití technologie Bluetooth Low Energy, která nevyžaduje specifické napojení na stávající infrastrukturu tunelu, ale je z tohoto pohledu zcela autonomní, penetrace komunikační technologie v zařízeních a vozidlech je velmi vysoká a implementace zařízení je nenáročná. Jako její další výhoda se jeví možnost omezit individuálně vysílací výkon, a tedy dosah a dosáhnout vyšší přesnosti a spolehlivosti lokalizace, a to při významně nižších pořizovacích i provozních nákladech v porovnání s ostatními zkoumanými technologiemi.

Do budoucna se jeví jako vhodné i zavádět C-ITS infrastrukturu do tunelu, jež má výrazně širší potenciál využití, než mají ostatní uvedené technologie, zejména s ohledem na dopravu a šíření řídicích a informačních dat mezi vozidlem a infrastrukturou nebo vozidly navzájem. Pro C-ITS je potřeba počítat s investičními náklady na vybudování nebo dovybavení napájecí a datové konektivity. Tato technologie se tedy jeví potenciálně jako vhodná, avšak spíše než jako lokalizační, tak jako komunikační technologie, která potřebuje doplnit dalším lokalizačním systémem (např. BLE). Instalace C-ITS je již finančně náročnější ovšem s potenciálem uplatnění zmíněných doplňkových funkcí, a to i pro budoucí provoz vysoce automatizovaných a autonomních vozidel.

### 3.4 Popis vhodné lokalizační infrastruktury

Z výše uvedeného přehledu jednotlivých technologií vyplývá, že z hlediska efektivity a výhodnosti systému vzhledem k pořizovacím nákladům na instalaci a provoz je vhodné využívat technologii BLE.

Tato technologie je přítomná v drtivé většině mobilních telefonů, infotainmentu vozidla, často i OBU jednotkách C-ITS a také v dalších přenosných zařízeních, které pomocí ní dokážou komunikovat se svým blízkým okolím. Této vlastnosti je využito v lokalizačním systému, kdy vybrané stavby, ve kterých dochází k výpadkům běžně dostupného systému určování polohy založeného na satelitním systému GNSS, jsou dovybaveny malými bateriovými vysílači Bluetooth signálu (beacony). Když je jejich signál zachycen, mobilní aplikace dokáže s pomocí znalosti umístění konkrétního zařízení určit svoji vlastní polohu. S výhodou je zde využito skutečnosti, že dosah signálu Bluetooth zařízení je několik desítek metrů a lze jej pomocí snížení vysílacího výkonu dále regulovat.

Beacony by měly být v tunelu vždy v pravidelné rozteči, od které se odvozuje rozlišovací schopnost (přesnost, maximální chyba) lokalizačního systému. S rostoucí hustotou rostou však investiční i provozní náklady systému, a proto bylo testováno chování systému při různých vzdálenostech. V praxi bylo ověřeno, že pro většinu aplikací je možné využívat rozteč 40-50 m, již výrazně neekonomická bez zásadního přínosu je pak rozteč pod 20 m. Doporučená rozteč pro tunelové stavby na PK se pohybuje v rozmezí 20-40 m. Tuto rozteč je nutné volit s ohledem na počet jízdních pruhů, rozlišení směrovosti v tunelovém tubusu a počtu odpojovacích či připojovacích pruhů (křižovatek v tunelu).

Systém byl testován za různých dopravních a provozních podmínek, a bylo ověřeno, že při vhodném umístění beaconů je systém spolehlivý, i když se v tunelu pohybují rozměrná nákladní vozidla, která mohou blokovat průchod signálu nebo způsobit jeho odrazy. Tyto podmínky byly testovány



v městském, dálničním i tunelu na pozemní komunikaci I. třídy (tunel Blanka, tunel Cholupice, tunel Hřebeč).

Celý systém pro lokalizaci a navigaci v tunelech pomocí Bluetooth Low Energy se skládá z těchto hlavních částí:

- beaconů – bateriových vysílacích zařízení, která jsou specificky nakonfigurována pro podporu určení polohy v navigačních aplikacích,
- služby otevřeného „Registru lokalizačních prvků“, který poskytuje servisní data a data o umístění těchto zařízení uživatelům, správcům dopravní a IT infrastruktury a tvůrcům mobilních navigačních aplikací včetně souvisejících mapových a datových podkladů, či dokumentace pro vývojáře,
- kompatibilních navigačních (a dalších LBS – Location based services) aplikací, případně modifikovaných C-ITS OBU, které jsou, s pomocí dat z beaconů a informací z Registru lokalizačních prvků, schopné určovat svoji polohu v tunelech a poskytovat tak spolehlivou navigační funkcionalitu.

### 3.4.1 HW prvky – BLE beacony

Beacony jsou malá bateriemi napájená zařízení, která nepotřebují žádnou kabelovou ani stavební přípravu. Tyto skutečnosti zásadním způsobem snižují investiční i provozní náklady. Tato zařízení v pravidelných krátkých intervalech vysílají sekvenci informací specifikující jejich identifikační údaje, které je možné detekovat kompatibilní mobilní aplikací nebo speciálně upravenou OBU jednotkou ve vozidle. Beacony nemohou fungovat jako detektor, který by aktivně sledoval dění v daném místě. Některé beacony mohou být vybaveny např. akcelerometrem, teploměrem, měřičem vlhkosti nebo intenzity dopadajícího světla apod., které mohou v tunelových stavbách na PK najít další uplatnění, avšak vždy za cenu významného snížení životnosti baterie – proto je nutné zvážit užitnou hodnotu dalších senzorů. Pro využití ve venkovním prostředí na vjezdu nebo výjezdu do tunelu nebo parkoviště, kde mohou být zařízení vystavena různým vlivům počasí (vysoké teploty, déšť, mráz) nebo plánovaným úkonům (čištění tunelu) je potřeba, aby takové zacházení neovlivňovalo jejich funkcionalitu, životní cyklus nebo upevnění na místě instalace. Za tímto účelem jsou pro instalaci v tunelových stavbách na PK doporučeny beacony alespoň se stupněm krytí IP56 (ideálně pak IP67), které mají také příslušnou požární certifikaci. S ohledem na to, že beacony jsou statické prvky infrastruktury, které v případě správné instalace nepotřebují rozsáhlou pravidelnou údržbu, je vhodné zvolit takové, které jsou kvalitní a mají dlouhou životnost baterie. Tím lze dosáhnout toho, že lokalizační infrastrukturu je vhodné měnit obvykle pouze na konci jejího životního cyklu (výměnou za nové zařízení).

Využívaná zařízení je nutné volit i s ohledem na uživatelskou základnu, tak aby bylo zajištěno co nejširší uplatnění a využívání této lokalizační infrastruktury pomocí dostupných aplikací. Příkladem je využití certifikovaných zařízení, viz. obr. 2, jež zajistí podporu funkcionality v navigačních aplikacích Waze, Google Maps apod, které tvoří největší existující uživatelskou základnu navigačních aplikací i s možnou podporou indoor lokalizace.



Obr. 2 Ukázka BLE beaconu

Systém je nutné budovat jako otevřený pro další navigační aplikace a LBS služby, podporu C-ITS a další budoucí telematické aplikace, např. autonomní a vysoce automatizované vozidlové systémy. Proto musí být beacons nakonfigurovány tak, aby zajišťovaly kompatibilitu s otevřeným rozhraním pro připojení dalších navigačních aplikací třetích stran prostřednictvím Registru lokalizačních prvků.

Beacons musí mít ověřené parametry vhodné pro provoz v tunelovém prostředí:

- podpora standardu Bluetooth Low Energy: Bluetooth verze 4.1 a vyšší,
- doporučená výdrž baterie: min. 5 let,
- dosah při plném výkonu: min. 300 m (300-500 m při přímé viditelnosti),
- interval vysílání zprávy: 100 ms až 350 ms (100 ms doporučeno),
- certifikace výrobku: CE,
- stupeň krytí: min. IP 65 (ideálně IP 67),
- provozní teplota: od min. – 30 °C do + 60 °C.

Při výběru vhodných zařízení se životnost zařízení s baterií odhaduje na 4-8 let. Poté je nutné zařízení vyměnit. Nutné je pravidelné provádění profylaktické údržby v doporučeném intervalu 3 měsíců, která spočívá v proměření funkce jednotlivých zařízení, kontrole stavu baterie (zařízení v servisním režimu přenáší informace o jejím napětí) a případné výměně nefunkčních či poškozených zařízení a zařízení, jejichž baterie je na hranici životnosti.

### 3.5 Registr lokalizačních prvků

Jako vhodné řešení, které výrazně zvýšilo účinnost systému, byl vyvinut a odzkoušen Registr lokalizačních prvků (vyvinuto v rámci projektu TAČR CK01000163 společností CEDA Maps a.s.). Jde o službu, ve které je evidovaná lokalizační infrastruktura z tunelových staveb na PK více provozovatelů, ale mohou zde také být data z dalších prostředí (parkovací domy, terminály veřejné dopravy apod.). Služba poskytuje otevřené informace o lokalizační infrastruktuře tvůrcům navigačních a dalších aplikací, kteří zde najdou popis umístění a komunikační parametry lokalizační infrastruktury v jednotném formátu, na jednom místě, zdarma a se zajištěnou podporou včetně aktualizací (např. při výměně zařízení). To tuto službu činí jedinečnou, přičemž se tím zvyšuje pravděpodobnost, že je lokalizační infrastruktura využita více aplikacemi a užitek z ní má co největší skupina uživatelů mobilních a dalších aplikací, řidičů vozidel vybavených C-ITS aj. Díky Registru lokalizačních prvků



dochází ke snížení nedovolené veřejné podpory, ke které by došlo v situaci, že by lokalizační infrastruktura byla přizpůsobena pouze pro jednu aplikaci.

Registr umožňuje poskytovat informace o lokalizačních prvcích různých technologií (Bluetooth BLE, Wi-Fi, aj.). U tvůrců mobilních aplikací je pozitivně hodnocen z důvodu, že jsou zde na jednom místě k dispozici lokalizační parametry nezbytné pro správnou funkci lokalizace v jednotném formátu z řady staveb různých správců na jednom místě a není nutné je implementovat odděleně a k dispozici mají SDK (Software Development Kit), které zrychluje implementaci funkce lokalizace v tunelech včetně možných nadstaveb (získání dat o stavu tunelu, proměnném dopravním značení, varování v mimořádných situacích apod.). Aby byla odstraněna bariéra na straně odběratelů / uživatelů, jsou služby registru poskytované formou API (Application Programming Interface) zdarma. Tomu odpovídá model financování, kdy za vložení lokalizačního prvku do aplikace se platí roční poplatek, který pokrývá náklady na provoz registru, jeho rozvoj a technickou podporu.

## 4 Důvody pro nasazování lokalizační infrastruktury

Nasazení lokalizační infrastruktury může mít dopad na zvýšení bezpečnosti provozu díky lepší orientaci složek IZS při mimořádných situacích, ale i lepší informovanost řidičů projíždějících tunelovou stavbou. Dnešní silniční tunelové stavby dosahují délky několika km. Pro složky IZS, které přijíždějí k zásahu, je rychlá a jednoznačná orientace v tunelové stavbě jednou z podmínek úspěšného zásahu. Zásah se u jednosměrných tunelových staveb (kterých je v České republice většina) uskutečňuje příjezdem nezasaženou tunelovou troubou a průchodem přes tunelovou propojku. Zasahující složky tedy zprvu nevidí místo nehody, protože přijíždí paralelní tunelovou troubou, musí však zastavit u tunelové propojky optimální pro provedení zásahu. Tunelové propojky mezi tunelovými tubusy jsou stavěny v maximálním rozestupu 300 m. Chybně zvolený postup může mít velmi vážné následky. Praktické zkušenosti z provozu Tunelového komplexu Blanka vedly k dodatečnému vybavení vchodů do tunelových propojek zábleskovými majáky, které informují zasahující jednotky o optimálním místě k zastavení a vedení zásahu. Lokalizační infrastruktura instalovaná v tunelové stavbě posouvá problematiku lokalizace na vyšší úroveň (možnosti vzájemné koordinace několika zasahujících složek).

Lokalizační infrastruktura bude mít zásadní dopad na zlepšení informování a komfortu řidičů, zvýšení přehlednosti situace v tunelu, zlepšení schopnosti dodržování optimálních tras apod., které mohou vést ke zvýšení bezpečnosti provozu, jak tunelových systémů a zařízení PK, tak i bezpečnosti účastníků provozu. Pozitivní vliv může takový systém mít i na dopravní proud, minimalizaci kongescí jak přímo v tunelové stavbě na PK, tak i mimo ni, a to mj. díky odstranění zbytných jízd v tunelech, kdy řidiči nejsou schopni kvůli nedostupnosti lokalizační navigační služby plně využít a volí jinou než optimální trasu.

Lokalizační řešení pomůže správně navádět nebo nabízet nové optimální trasy i během průjezdu tunelu, čímž je zajištěna eliminace delších objízdných tras v případě zvolení nevhodného výjezdu z tunelu apod.

Hlavními potenciálními benefity a přínosy navigační lokalizační infrastruktury je zejména:

- zvýšení relevantních informací o situaci v tunelu pro provozovatele,
- zvýšení relevantních informací o situaci v tunelu pro IZS,
- zvýšení relevantních informací o situaci v tunelu při mimořádných událostech,
- zvýšení informovanosti uživatelů,
- snížení stresu řidičů,
- zpřehlednění situace,
- zvýšení bezpečnosti,
- podpora plynulosti dopravního proudu,
- odstranění zbytných jízd v ekonomicky nejnáročnějších částech dopravní infrastruktury a uvolnění jejich kapacity,
- podpora funkce navigačních a dalších aplikací vyžadujících přesnou pozici,
- snížení rizik vzniku nehod a eliminace rizik a následných škod u havárií, či obětích při nehodách.

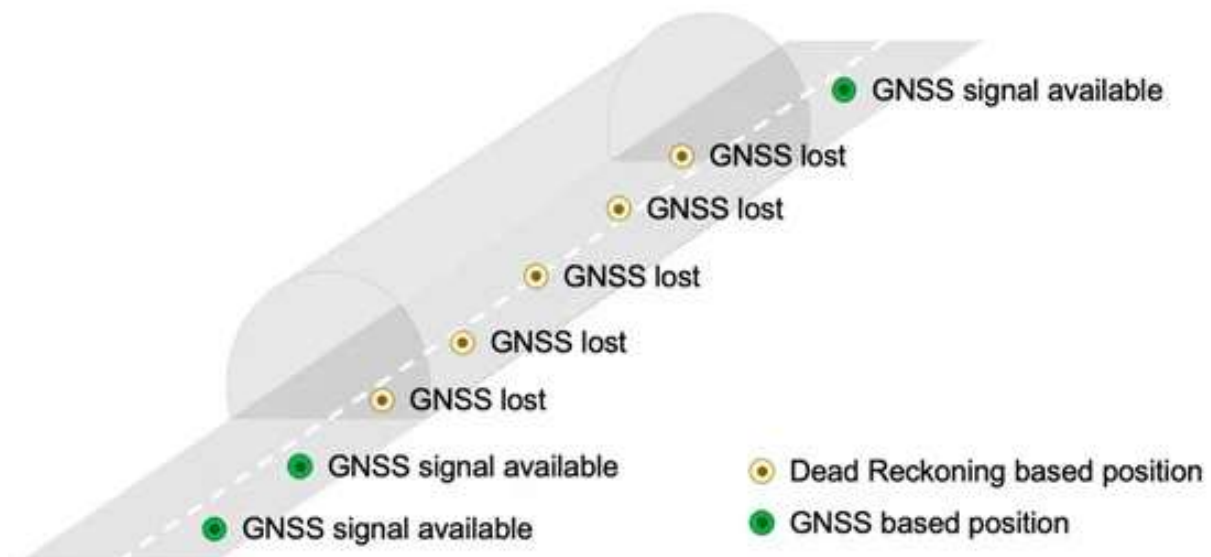
Pokročilé verze lokalizačního systému mohou být integrované s řídicím systémem tunelu a/nebo systémem C-ITS, což přináší zásadní přínosy pro řízení silničního provozu, ovlivňování chování dopravního proudu, zvýšení bezpečnosti, podporu zásahů IZS při mimořádných událostech, lepší informovanost řidičů a v budoucnu také pro bezpečný provoz vozidel s vyšším stupněm automatizace, resp. plně autonomních vozidel.

V následujících kapitolách je popsána funkce a přínosy lokalizačního systému pro konkrétní příklady problémů způsobených nefunkčností satelitní lokalizace v tunelech.

#### 4.1 Navigace v tunelových stavbách na PK

Navigační aplikace jsou z pravidla založené na využití satelitní lokalizace pomocí GNSS. Ta je však omezená na v podstatě přímou komunikaci (výhled) mezi vozidlem (anténou GNSS přijímače) a několika satelity příslušného navigačního systému (amerického GPS, evropského GNSS, ruského GLONASS, čínského Beidou a dalších). Signál těchto systémů tak v zakrytých místech dopravní infrastruktury není dostupný buď vůbec nebo pouze v nízké kvalitě pro určení správné polohy vozidla. Spolehlivá funkce určení polohy (lokalizace) vozidel v tunelech na PK, krytých parkovištích (podzemních či v budovách) a podobných stavbách dnes není běžně dostupná.

Navigační aplikace se snaží v případě výpadku GNSS signálu aproximovat svoji polohu s pomocí dalších senzorů daného zařízení – dle typu a vybavení může jít o akcelerometry, gyroskopy, kompas, senzor natočení a otáčení kol (vestavěné vozidlové navigace), ale také signál GSM, Wi-Fi apod. Navigační aplikace pak disponují vyšší logikou, která bere v úvahu také tvar a polohu jednotlivých komunikací (provádí tzv. map-matching, kdy je nepřesná pozice z GNSS umístěna na nejbližší nebo algoritmem určenou komunikaci). K tomu, aby byla navigační funkce zachována, většina aplikací využívá pro tunely speciální algoritmy s využitím metody Dead Reckoning, kdy se předpokládá zachování konstantní rychlosti (a směru) jaký mělo vozidlo před ztrátou signálu při vjezdu do tunelu, viz. obr. 3.



Obr. 3 Odhad pozice pomocí metody Dead Reckoning obvyklý u dnešních navigačních aplikací.

Metoda Dead Reckoning se obvykle aktivuje automaticky ve chvíli, kdy dojde ke zhoršení kvality signálu GNSS a aplikace ji využívají i pro překonání krátkodobých výpadků signálu v otevřeném prostředí (nejčastěji v husté městské zástavbě, lese, kaňonech, podjezdech, místech se zarušeným signálem GNSS apod.). Problémem těchto metod je, že jde o proprietární řešení, které se chová

nepredikovatelně (závisí na konkrétním tvůrci aplikace, zařízení, zahrnutí dat z dalších senzorů atd.), zároveň se jedná o decentralizované řešení, které je pro mnohé aplikace nežádoucí.

Metoda Dead Reckoning obvykle dobře funguje po krátký čas (podjezd mostu apod.) s minimální chybou, ale u tunelových staveb a parkovišť dochází velmi rychle k zvýšení chyby při určení polohy. Tato chyba roste s délkou jízdy v prostředí bez GNSS signálu a kritickou se stává v prostředí, kde často dochází ke změně rychlosti či směru dopravního proudu (z důvodu kongescí, morfologie dopravní stavby, přítomnosti rozpletů a obecně komplexnosti dané dopravní stavby a jejího zakřivení).

Průjezd tunelovou stavbou může mít i negativní dopad na chování řidiče, zvyšovat hladinu stresu, snižovat přehlednost situace a orientace ve stísněném prostředí. Vše je ještě umocněno absencí přirozených orientačních bodů a výpadky lokalizačních služeb a navigací. Řidiči reagují na výpadek navigace nebo povel přicházející v jinou než očekávanou dobu zkratkovitě. Mohou provádět nebezpečné manévry, které zahrnují náhlé změny směru na poslední chvíli, ale výjimečně bylo zdokumentováno i couvání nebo otáčení v tunelu. V těchto mimořádně nebezpečných situacích může dojít k vážným nehodám s vážnými následky na zdraví i majetku včetně samotné dopravní infrastruktury. Vzhledem k důležitosti tunelových staveb v rámci celého dopravního systému je vhodné podobná rizika eliminovat, protože jakékoliv následky se v nich řeší výrazně komplikovaněji, s vyššími riziky a dopady, zejména dojde-li k požáru. Zásah IZS je v takovém prostředí výrazně náročnější, stejně tak ekonomická náročnost případných oprav a jejich časová délka. Dopad na celý dopravní systém tak bývá výrazně vyšší, než je tomu na jiných místech dopravní infrastruktury.

Dalším významným faktorem je nárůst zbytných jízd tunely v případech, kdy řidič provedl nesprávný manévr a tunelem nechtěně pokračuje, případně se pak ještě vrátí. Vzhledem k nákladům na realizaci a provoz tunelů je odstranění těchto zbytných jízd mimořádně žádoucí, protože zvyšuje jejich efektivní kapacitu, snižuje rizika nehod, vzniku kongescí a dalších nepříznivých socio-ekonomických vlivů s dopadem i na místa mimo tunel.

Příkladem místa, kde dochází pravidelně ke vzniku výše uvedených situací je tunelový komplex Blanka v Praze (TKB), kdy při nájezdu do tunelu na Letné směrem na Prahu 5 a 6 jedou vozidla rychlostí okolo 40 km/h vjezdovou rampou, kde dojde ke ztrátě signálu GNSS. Navigační aplikace tak obvykle aproximují polohu pomocí metody Dead Reckoning na základě poslední známé rychlosti, tedy obvykle okolo 40-50 km/h. Vozidlo se ale zařadí do proudu vozidel v tunelu, která se při běžném provozu pohybují 70 km/h. V takovém případě se reálná pozice vozidla oproti aproximované v navigaci začnou velmi rychle vzdalovat a navigační aplikace začne proti reálné pozici rychle zaostávat, což má zásadní dopad na přesnost lokalizace a tím kvalitu informací pro řidiče. Na dalším výjezdu z tunelu se již neshoduje navigace s reálnou polohou vozidla a informaci dostane řidič později, než je žádoucí. Na základě toho řidič může reagovat neadekvátně – brzdění, otáčení, zastavování a mohou vznikat zbytné trasy a jiné nebezpečné události v tunelu.

#### 4.2 Doporučení pro rozhodnutí o instalaci lokalizační infrastruktury

Vzhledem k výše uvedeným problémům týkajících se rozpletů, či složitosti tunelové stavby je nutné uvažovat při instalaci několik faktorů. Pro určení, zda je stavba problematická pro navigační aplikace a je vhodné realizovat lokalizační systém je nutné posouzení konkrétní stavby každým z níže uvedených faktorů. Výsledné doporučení je maximem z doporučení za jednotlivé faktory (viz. tabulka 1) na škále: 5 = Nutné, 4 = Velmi doporučené, 3 = Doporučené, 2 = Vhodné, 1 = Neutrální, 0 = Nevhodné.

Tabulka 1 Doporučení pro instalaci lokalizačního systému

	<b>Faktor</b>	<b>Doporučení pro instalaci lokalizačního systému</b>
A	Existence rozpletu nutnost rozhodnout o směru cesty uvnitř tunelu	A1) Pro 1 rozplet: Velmi doporučené A2) Pro 2 a více rozpletů: Nutné vždy A3) Pro 1 rozplet v kombinaci s B1), B2), C1-4) nebo D1): Nutné A4) Pro 1 rozplet, pokud se nachází více jak 40 vteřin jízdy od nejvzdálenějšího vjezdu to tunelu při nejnižší běžné dosahované rychlosti proudem vozidel
B	Existence křižovatky nebo sjezdu bezprostředně za výjezdem	Pokud vozidla po výjezdu z tunelu k místu odbočení <sup>1</sup> při nejvyšší povolené rychlosti dorazí za: B1) méně než 10 vteřin: Nutné B2) 10 až 20 vteřin: Velmi doporučené B3) 20 až 30 vteřin: Doporučené B4) 30 až 60 vteřin: Vhodné
C	Změny rychlosti z důvodu tvaru a uspřádání Vozidla alespoň v některých místech mění rychlost z důvodu např. zatáček, klesání/stoupání, zúžení/rozšíření, změny počtu jízdních pruhů a dalších faktorů souvisejících s morfologií a technickým stavem tunelu	Rozdíl časů, za které by průměrná vozidla celý tunel projela při nejvyšší a nejnižší rychlosti, již dosahují během jedné jízdy tímto tunelem <sup>2</sup> : C1) více než 40 vteřin: Nutné C2) 30 až 40 vteřin: Velmi doporučené C3) 20 až 30 vteřin: Doporučené C4) 10 až 20 vteřin: Vhodné
D	Doba jízdy tunelem Doba jízdy tunelem po nejdelší možné trase (vjezd / výjezd) za nejnižší běžné dosahované rychlosti proudu vozidel	Nejdelší doba jízdy tunelem přesahuje za nejnižší běžné dosahované rychlosti proudu vozidel: D1) nad 120 vteřin: Velmi doporučené D2) 90-120 vteřin: Doporučené D3) 30-90 vteřin: Vhodné
E	Výskyt kolon	Zahnout běžné dosahované zdržení do výpočtu času bodů A4), C) a D)
F	Běžná regulace výjezdu (např. pomocí SSZ)	Zahnout běžné dosahované zdržení do výpočtu času bodů A4), C) a D)
G	Vyšší bezpečnostní riziko Vyšší nehodovost, nevhodné bezpečnostní řešení pro případ mimořádných událostí, přeprava nebezpečných látek, časté využívání bezpečnostních zálivů aj.	Dle míry závažnosti a délky tunelu zvýšit o 1-3 stupně maximální z doporučení dle ostatních faktorů
H	Riziko ztráty orientace nebo pozornosti řidičů Tunel je monotónní, bez orientačních prvků a změn prostředí	Dle míry závažnosti a délky tunelu zvýšit o 1-3 stupně maximální z doporučení dle ostatních faktorů

Lokalizační systém řešící problém navigace v tunelech vždy vyžaduje realizaci lokalizační infrastruktury pro podporu navigačních aplikací, což zatím v předpisech jako je TP 98 nebo tunelové normě ČSN 73 7507 není uvedeno. Je vhodné uvažovat tyto výstupy a podklady plynoucí z metodiky v částech

<sup>1</sup> Hraniční čára křižovatky nebo začátek plné čáry oddělující odbočovací a průběžný pruh

<sup>2</sup> Doporučuje se zjistit za jaké situace (jízda max. povolenou rychlostí, jízda za silného provozu, jízda při regulované rychlosti apod.; v potaz se neberou mimořádné situace) bude nejmenší poměr Min. rychlost v úseku A / Max. rychlost v úseku B při tomtéž průjezdu tunelem.

projekční přípravy s požadavky na C-ITS, navigaci a s dalšími novými progresivními přístupy. Volitelně lze do systému také doplnit Přenos dat z řídicího systému tunelu, PDZ a dalších aktuálních informací do aplikací (viz kapitola 4.4).

#### 4.3 Znalost polohy vozidel (osob) při mimořádných situacích

Lokalizační infrastruktura může dále být využita a rozšířena také o zdroj informací o poloze vozidel (případně osob) prostřednictvím monitoringu těchto objektů, resp. komunikačních zařízení, které tyto objekty mají zabudované, resp. v případě osob zejména mobilních telefonů, chytrých hodinek apod., které nosí u sebe. Dle typu technologie jsou takové objekty přímo detekovatelné, pokud mají zapnutou komunikaci pomocí podporované technologie (Wi-Fi, Bluetooth apod.). V případě navrhované lokalizační infrastruktury na standardu BLE musí být uživatelé vybaveni kompatibilní aplikací, která komunikuje přes mobilní síť a internet s registrem lokalizačních prvků, který předá informace také i řídicímu systému tunelu.

V případě, kdy lokalizační infrastruktura podporuje funkci monitoringu polohy, může nahradit, zastoupit nebo doplnit další systémy používané v případě výskytu mimořádných situací, kdy díky snížení viditelnosti v tunelu může být omezena funkce video-dohledu. Tyto informace mohou výrazně pomoci jednak ke zlepšení možností zásahu ze strany IZS, správce infrastruktury a operátora tunelové technologie.

Vybudovaný informační kanál pro komunikaci mezi ŘS tunelu a aplikacemi uživatelů může významně napomoci k možnosti distribuovat cílené informace vztahující se k danému místu či k danému segmentu tunelu při mimořádných situacích. Jedná se například o vznik nehod, požárů, zastavení vozidla, vznik kongescí nebo pohyb osoby, či zvířete a podobné stavy, které se stávají příčinou způsobení mimořádných situací v tunelu.

Dále také může tato infrastruktura dopomoci ale i koncovým uživatelům, resp. řidičům, neboť je možné využít pro navigační účely ve vozidle, ale i telefonu a tím navádět řidiče k optimálnímu chování v tunelu v případě vzniku mimořádné situace díky šíření dopravních informací a při existujícím komunikačním spojení mezi aplikací a ŘS tunelu i díky příjmu pokynů ze strany IZS nebo dispečinku.

Ovšem je nutné přiznat, že pro funkce řešení mimořádných událostí je stěžejní významná penetrace dané lokalizační technologie včetně schopnosti alespoň jedné její části (instalované ve vozidlech/zařízeních nebo v tunelové infrastruktuře) komunikovat s řídicím systémem tunelu a většinou tak budou pouze doplňovat standardní způsoby detekce (videodetekce) dle platných standardů a legislativy.

#### 4.4 Integrace na ŘS a využití znalosti polohy nebo rychlosti vozidel pro řízení dopravy

Lokalizační infrastruktura v tunelu může výrazně pomoci správci infrastruktury a operátorovi tunelové technologie, v případě potřeby zásahu do dopravy či jejího řízení ze strany PČR, a to díky získání nového informačního zdroje o dopravním proudu v tunelu. Tyto informace mohou dle typu technologie poskytovat informace o

- aktuální rychlosti jednotlivých vozidel,
- detekci prudkého brzdění,
- detekci nebezpečných manévřů,
- sledování čela kolony,
- monitoringu počtu vozidel v čase, případně včetně kategorizace.



Významný dopad tak může mít i využití lokalizačních informací jako vstupu do řídicího systému, který může na základě dalších parametrů ovlivňovat řízení dopravy v tunelu, tedy například řízení dopravního proudu pomocí již integrovaných systémů, automatizovanou změnou rychlostního limitu, nebo zavřením pruhu. Zároveň lze využívat i detektory BLE komunikace z vozidel a výrazně rozšiřovat funkce řídicího systému tunelu o využití lokalizačních dat. I zde platí, že pro efektivní funkci lokalizačního systému jako zdroje informací je potřeba splnit další podmínky dle zvolené technologie, zejména zajistit komunikaci mezi lokalizačním systémem a ŘS tunelu, obvykle pomocí registru lokalizačních prvků (viz kapitola 3.5).

Pokud existuje komunikační kanál mezi aplikacemi řidičů a ŘS tunelu, lze jej dále využít pro distribuci informací o stavu tunelu, které v kombinaci se znalostí polohy vozidla mohou efektivně doplnit informace z dopravního značení (resp. je replikovat do vozidla). Jde např. o stavy aktuální povolené rychlosti v daném místě, stav jednotlivých jízdních pruhů, informace z PDZ a ZPI, včetně varování a pokynů pro postup v mimořádných situacích apod.

#### 4.5 Kooperativní systémy C-ITS v tunelech

Díky absenci schopnosti lokalizace pomocí GNSS se OBU jednotka ve vozidle přepne do stavu, kdy do standardizovaných zpráv začne vyplňovat hodnotu „unavailable“ (nedostupné). V takovém případě dochází k tomu, že takové zprávy jsou dále na přijímací straně vyhodnoceny jako nevalidní, neboť se nenachází v definovaném perimetru. Důvodem je, že bez znalosti vlastní polohy ztratí OBU jednotka základní prostorové vztahy mezi sebou a dalšími vozidly, resp. dalšími prvky dopravní infrastruktury. Vzhledem k tomu dochází k omezení jednotlivých C-ITS funkcí, mezi které patří například:

- vysílání validních CAM zpráv – základní zprávy o OBU,
- vysílání validních DENM zpráv – obecné informace o událostech,
- příjem CAM zpráv,
- příjem DENM zpráv,
- příjem IVI zpráv – informací například o proměnném dopravním značení,
- ostatní standardizované C-ITS zprávy.

Příkladem této situace je C-ITS infrastruktura vybudovaná v rámci projektu C-ROADS na úseku Rudná-Mirošovice (D5-D0-D1), kde tunely Komořany a Lochkov představují jediné úseky, kde není možné C-ITS funkcionalitu zprovoznit, a to právě z důvodu absence satelitní lokalizace, viz. obr. 4.



Obr. 4 Komunikace v první etapě projektu C-ROADS (C-ITS pilot). Červeně úseky s podporou ITS-G5, kde přerušená místa označují tunely Cholupice a Lochovo na D0, které musely být z pilotu vyjmuty kvůli absenci systému lokalizace

#### 4.6 Vysoce automatizované a autonomní vozidlové systémy

Budoucí autonomní a vysoce pokročilé asistenční systémy pomocí systémů relativní lokalizace a HD map umožní polohu určovat nezávisle na systému GNSS i v tunelech po poměrně dlouhou dobu. Přesto právě tunelové stavby jsou i pro tyto komplexní systémy jedním z nejnáročnějších prostředí. Důvodem je absence snadno rozpoznatelných objektů, které jsou přesně zaměřené v HD mapách a které vozidla využívají pro určení vlastní polohy (stožáry veřejného osvětlení, sloupy dopravního značení a řadičů SSZ, hrany budov, stromy apod.). Z tohoto důvodu se pro podporu těchto systémů v tunelech uvažuje s nasazením, resp. využitím existující lokalizační infrastruktury. Vzhledem k před komerčním stavu vyvíjených technologií nelze v tento moment doporučit konkrétní technologie, ale doporučeno je vzhledem k postupnému zavádění autonomních vozidel sledovat trendy a technologickou kompatibilitu s lokalizačními systémy v tunelech a tento budoucí vývoj dále zohlednit při výběru vhodných technologií.

Obecně zde platí, že na čím významnější komunikaci, čím je komplexnější, delší nebo čím vytíženější daný tunel je, tím důležitější bude jej vybavit lokalizačním systémem pro zajištění bezpečného provozu těchto moderních technologií. Návodem může být tabulka 1 v kapitole 4.2.



## 5 Architektura systémů lokalizační infrastruktury

Lokalizační systém tunelu se skládá z několika částí dle zvolené technologie. Některé jsou části jsou z hlediska implementace zcela nezbytné, některé jsou nezbytné pouze pro některé vybrané technologie, některé jsou nezbytné při podpoře pouze určitých funkcí apod. Mezi jednotlivými částmi musí být vybudovaný funkční komunikační kanál.

Základním prvkem každého komunikačního systému jsou lokalizační prvky na straně infrastruktury. Může se jednat o:

- beacony,
- BLE/Wi-Fi detektory,
- RSU jednotky,
- speciální kamery s videodetekcí,
- nebo např. lokalizační QR kódy.

Na straně vozidel / mobilních zařízení řidičů je pak u většiny technologií nutný vysílač/přijímač schopný komunikovat s infrastrukturou v tunelu. Jde např. o BLE subsystémy ve vozidlech.

Dále se situace rozděluje na 2 základní skupiny:

- 1) Lokalizační prvky v tunelu mají vytvořený komunikační kanál na centrální prvek tunelu (např. BLE detektory nebo RSU, kamery apod.).
- 2) Lokalizační prvky v tunelu nemají komunikační kanál na centrální prvky tunelu (např. beacony).

V prvním případě je nutné propojit lokalizační infrastrukturu s ŘS tunelu (příp. dále na systémy dopravních informací, ZPI/PDZ či C-ITS, které tvoří komunikační kanál směrem k vozidlu). Znalost polohy vozidel zde využívá primárně vlastní dopravní infrastruktura například pro řízení dopravy.

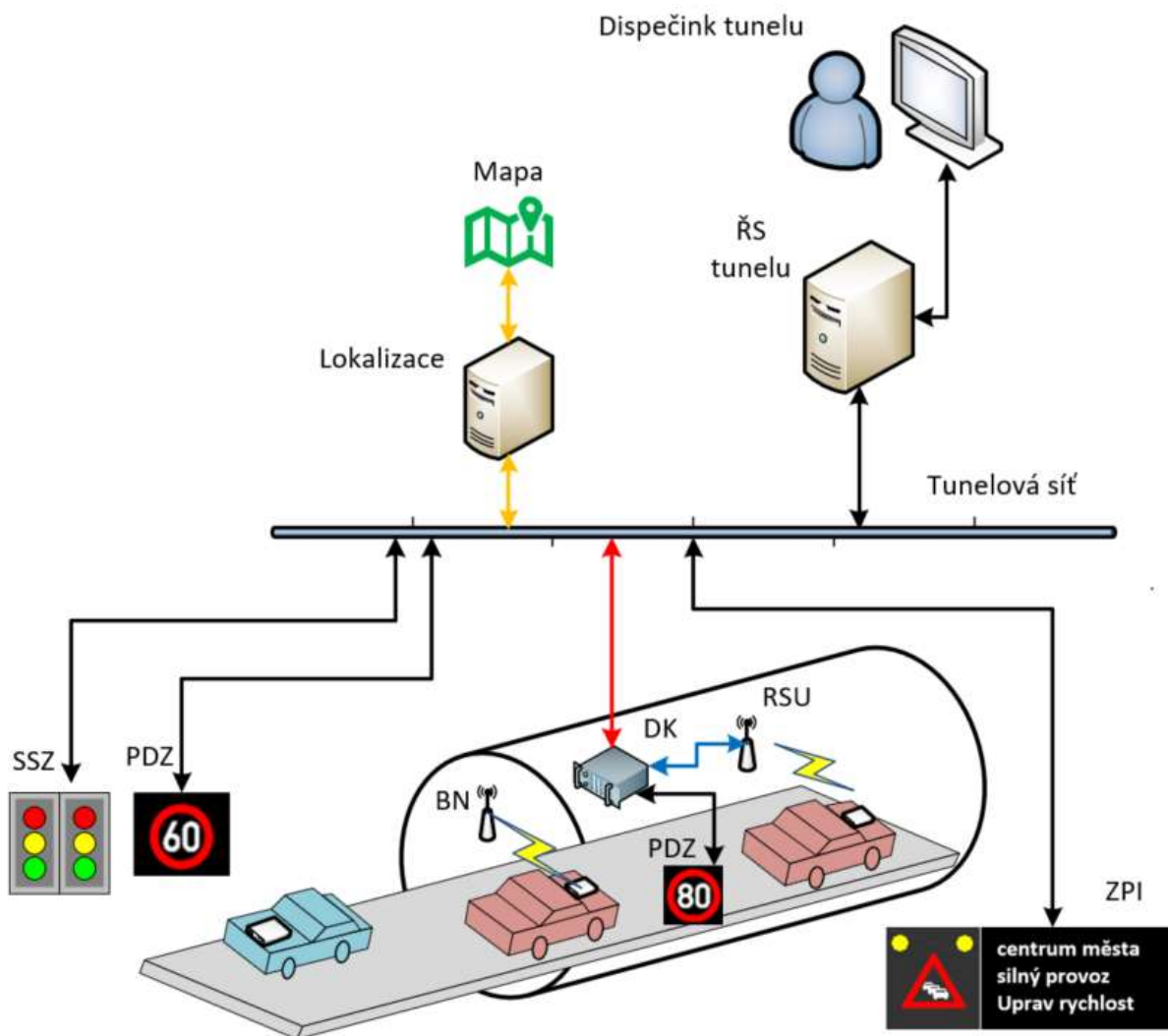
V druhém případě je nutné zajistit komunikační kanál mezi vozidlem a centrálním prvkem lokalizační technologie. To se obvykle děje pomocí C-ITS komunikace (po trase OBU – RSU – backoffice C-ITS – ŘS) nebo registrovaných mobilních aplikací, které komunikují s centrálním registrem lokalizačních prvků, který je propojen s ŘS tunelu (po trase mobilní aplikace – registr lokalizačních prvků – centrální prvek lokalizačního systému v tunelu – ŘS). Výhodou druhého přístupu je existující komunikační kanál s vozidlem a řidičem, kterým může ŘS předávat informace aplikacím ve vozidlech / vozidlům. Nevýhodou je pak nutnost podpory lokalizačního systému v aplikacích v mobilních telefonech (např. aplikace Waze).

V případě integrace systému s řídicím systémem tunelu lze také navíc získat informační zdroj o proudu vozidel s běžící podporovanou aplikací v tunelu a lze reagovat poloautomaticky nebo automaticky na předdefinované situace. V tomto případě se mezi řídicí systém a cloudovou službu Registru lokalizačních prvků vkládá ještě komunikační gateway (data koncentrátor – DK) nebo centrální prvek lokalizačního systému, která komunikuje s řídicím systémem tunelu a která je z bezpečnostních důvodů oddělená pomocí firewall od cloudové aplikace. Komunikační gateway bude komunikovat přes VPN. Tím dojde k oddělení provozu zařízení z internetu a sítě řídicího systému. Opačně lze do vozidel poskytovat data o aktuálním stavu tunelu v jednotlivých řezech (akt. rychlost, nastavení provozu v jízdnicích pruzích, stav PDZ, varovná hlášení apod.)

Důležitou komponentou systému je Registr lokalizačních prvků, který aplikacím podporujícím lokalizaci v tunelech na jednom místě poskytuje metadata potřebná pro úspěšnou funkci lokalizace, a to ve

vybavených tunelech (vč. krytých parkovišť) na jednom místě a stále aktuální. Tím je zajištěna funkčnost a vysoká spolehlivost lokalizace a také díky poskytování dat z registru ve formě volně dostupných informací a služeb výrazně roste ochota tvůrců aplikací lokalizační systémy využívat (jedna implementace zajistí podporu v prostředí mnoha správců). Součástí služeb registru může být také SDK, které dále urychluje implementaci služeb lokalizačního systému a zjednodušuje výměnu dat s ŘS tunelu v jednotném API. Více k registru viz kapitola 3.5.

Navržené řešení v této metodice je využitelné pro části technických předpisů a norem jako je TP 98 a TP 154, ale i dalších předpisů týkajících se telematiky. Návrh základní architektury pro tunelový systém s vazbou na ŘS je uveden na obr. 5 a podrobnější řešení pro C-ITS a BLE je uvedeno na schématu v kapitole 6.5 (Obr. 9), které zohledňuje taktéž i uplatnění lokalizace pro C-ITS a navigaci či jiných systémů v tunelu na PK. Z návrhu je zřejmé, že je zajištěna oddělenost sítí a kyberbezpečnost včetně požadavků daných tunelovou normou ČSN 73 7507 pro zajištění ovládnutí zařízení přes ŘS tunelu.



Obr. 5 Základní architektura pro tunelový systém

Na výše uvedeném obrázku je patrné schéma celé architektury systému, kde jednou ze stěžejních částí je i integrace a datový provoz s řídicím systémem tunelu a tím i jeho technologickým vybavením. Nezbytná integrace je nejen HW charakteru, ale i SW, včetně přenosu dat mezi řídicím systémem a registrem lokalizačních prvků a současně jednotlivými zařízeními na dopravní infrastruktuře (C-ITS). Tento přenos může být zajištěn pomocí vhodného programovacího jazyka (například v C#), jež umožní

provázání do SCADA systému přes běžné standardy JSON, XML či jiné, které jsou uplatnitelné pro průmyslové sítě nebo tunely. Dále musí být umožněno propojení přes REST API /HTTPS, nebo OPC UA pro řídicí funkce, popřípadě MQTT nebo XML. Základní funkcí je diagnostika jednotek C2X (RSU) s možností posílání základních povelů do jednotek RSU, získání informací a dat a možnost povelování a zasílání informací přes C2X do vozidel v tunelu, parkovištích apod. pomocí vybrané konkrétní jednotky RSU. Vzhledem k tomu, že beacony (BN) nejsou komunikačně propojené s tunelovou sítí, spojnicí mezi nimi a řídicím systémem tunelu je Registr lokalizačních prvků, se kterým komunikují mobilní aplikace pomocí otevřeného API – z registru čerpají informace o komunikačních a lokalizačních parametrech jednotlivých zařízení nezbytných pro určení polohy, ale také mohou získávat informace o stavu tunelu v konkrétních místech z ŘS tunelu, a naopak reportovat důležité informace pro ŘS (např. telemetrická data vozidla i servisní data jednotlivých beaconů). Díky tomu je možné mezi Registrem lokalizačních prvků (jednotný pro všechny tunely a další stavby) a ŘS konkrétního tunelu vybudovat zabezpečené spojení (typicky pomocí dedikované komunikační proxy v demilitarizované zóně a VPN), kde pomocí vhodných běžných standardů (REST API / GRPC apod.) lze vyměňovat data o poloze a rychlosti vozidel, stavu lokalizační infrastruktury nebo data o stavu tunelu pro řidiče.

## 6 Uplatnění lokalizačních technologií v tunelech

### 6.1 Využití technologie BLE

Pro konkrétní tunelovou stavbu na PK musí být navržena, dodána a nakonfigurována lokalizační infrastruktura pro tunelové prostředí založená na beaconech technologie BLE a.

Součástí dodávky musí být:

- návrh rozmístění lokalizační infrastruktury pro schvální záměru před vlastní realizací,
- projektová dokumentace – realizační dokumentace a následně dokumentace skutečného provedení,
  - o realizační výkresová dokumentace,
    - situační výkres s rozmístěním beaconů a průvodní technická zpráva,
    - zapojení do řídicího systému a jednotlivých rozvaděčů,
    - vzorový příčný řez tunelu s umístěním technologie beaconů v tunelu,
  - o aktualizovaný výkres skutečného provedení po realizaci instalace,
    - poloha beaconů bude zaměřena a zkeslena s co možná největší přesností, a bude použita pro vytvoření vektorových datových podkladů, které budou začleněny do dokumentace,
    - aktualizovaná verze dokumentu zohlední také umístění beaconů v nájezdech a výjezdech, změny vzdáleností mezi beacony v hlavní troubě tunelu, kde z důvodu překážky na stěně tunelu nebylo možné nainstalovat beacony s pravidelným rozstupem,
- vlastní HW lokalizačních beaconů včetně jejich instalace. Beacony musí být v dostatečném počtu, kompatibilní například s navigačními aplikacemi Waze, Google Maps apod., a s Registrem lokalizačních prvků,
- zanesení lokalizačních prvků do Registru lokalizačních prvků včetně poskytnutí dokumentace a podpurných nástrojů pro vývojáře aplikací třetích stran,
- otestování funkčnosti systému po realizaci instalace,
- projektové řízení, podpora instalační firmy (zaškolení, dohled, součinnost),
- integrace lokalizační infrastruktury do řídicího systému tunelu,
  - o integrace lokalizační infrastruktury do ŘS tunelu – zasílání lokalizačních dat, popř. dopravních dat, zasílání diagnostických dat, zakreslení do vizualizace tunelu,
  - o integrace dat z tunelu do lokalizační infrastruktury – posílání stavů tunelu, zasílání stavu proměnného dopravního značení, a informací o dopravní signalizaci nebo textové informace od operátora.

## 6.2 Princip fungování lokalizační infrastruktury v tunelu

Jednotlivé beacony vysílají své identifikátory s doporučenou periodou vysílání 100 ms. Vozidlo následně zachytí signál z jednoho nebo několika beaconů a na základě síly signálu určí, ke kterému je nejbližší, případně interpoluje svoji polohu mezi více beacony. Protože však samotná data z beaconů neobsahují vlastní lokaci, ale pouze identifikaci zařízení, jsou potřeba lokalizační data, které pro ID konkrétního beaconu uvádí polohu (souřadnice, úsek komunikace a staničení apod.). Pokud lokalizační data ke konkrétnímu zachycenému beaconu nejsou v mobilní aplikaci dostupná, pak nebude možné zařízení lokalizovat. Proto je důležitá online dostupnost služby Registru lokalizačních prvků, kde jsou stále aktualizovaná data o všech lokalizačních zařízeních k dispozici v jednotném tvaru a umožňují snadnou aktualizaci o nově instalovaná, ale také vyměněná zařízení.

## 6.3 Princip umísťování beaconů do tunelu

Beacony v souladu s tímto dokumentem je vhodné umísťovat optimálně v pravidelné rozteči 20-40 m, do stejné výšky (ideálně ve výšce 4-5 m, mimo plochy ošetřované kartáčovým mytím) a pokud možno mimo oblast jízdního pruhu.

Specificky se musí postupovat v místech rozpletů, kde je ideální zamezit šíření signálu zařízení do více směrů jízdy. Dále je nutné specificky ošetřit místa, kde dochází k napojení více jízdních nebo připojovacích pruhů, včetně míst, kde se nachází technologie, tunelové propojky, SOS skříně a další objekty, které brání pravidelnému rozmístění beaconů v definované rozteči. V případě kolize místa instalace beaconu s vybavením tunelu, je možné beacon posunout horizontálně mimo kolizní objekty, avšak do maximální vzdálenosti  $\pm 2$  m. Tento posun musí být explicitně zdokumentován a zaměřen.

Vhodné je dodržovat min. vzdálenost doporučenou dodavatelem technologie také mezi kabelovým vedením a zařízeními. Instalace beaconů probíhá dle zpracované realizační dokumentace při uzavěře tunelu, z důvodu bezpečnosti pracovníků. Práce by měly být zkoordinovány s ohledem na předpoklad instalace jednoho beaconu (2 min technologický proces) + přejezdu na instalaci druhého beaconu cca do 12 min vůči celkovému omezenému času tunelové uzavírky a počtu instalovaných zařízení.

## 6.4 Instalace beaconů

Pro instalaci beaconů je doporučeno z bezpečnostních důvodů i z důvodů vyšší efektivity využít montážních plošin. Při instalaci je nutné dodržení bezpečnostních opatření pro práce v daném tunelu po dohodě s odpovědnými osobami zajišťujícími bezpečnost (včetně nařízených školení BOZP, dodržení bezpečnostních procedur při uzavírce tunelu apod.). Obvykle je možné realizovat instalaci pouze v době vyloučení provozu v dané části tunelu. Nejprve je potřeba provést rozměření míst instalace, aby byla dodržena pravidelná vzdálenost mezi beacony podle předem připraveného a schváleného projektu. Výšku, ve které jsou beacony instalovány je potřeba dodržovat, pokud možno, stejnou v celé délce tunelu, vždy v souladu s projektovou dokumentací.

Samotná aplikace beaconu je rychlá a nenáročná, protože beacony nevyžadují žádné napájení ani komunikační napojení. Beacon se připevní na stěnu nebo strop tunelu, pokud možno mimo jízdní pruh (v případě uvolnění nebude ohrožena bezpečnost provozu). Dle typu povrchu se používají speciální lepidla a postupy (beton, dlažba, nesoudržný podklad apod.). Před aplikací dochází k očištění povrchu, jeho případnému mechanickému ztužení a kontrole teploty (vyžadovaného pro aplikaci lepidla).

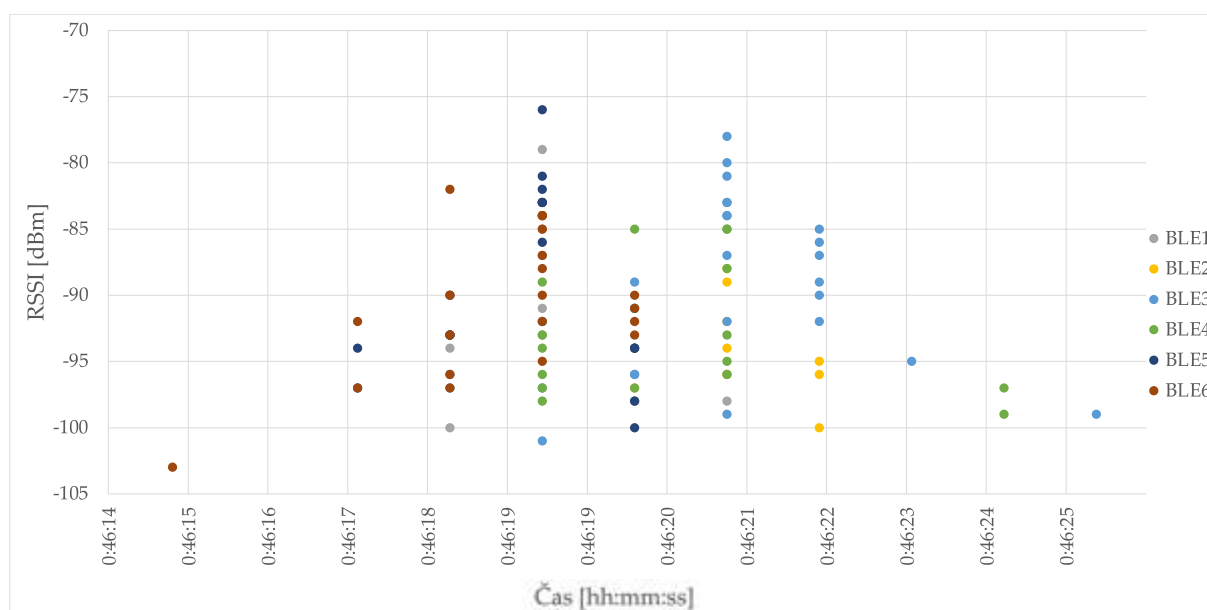
Instalační metoda musí být v souladu s instalačním manuálem dodavatele, aby byla garantována vysoká pevnost spoje již krátce po aplikaci (do jedné minuty). Většina beaconů je dále opatřena otvory, které mohou být použity pro přišroubování ke zdi tunelu. V praxi se však připevnění pomocí lepidla

ukázalo jako naprosto dostatečné. V případě potřeby odstranění beaconu lze použít tenký ocelový drát, kterým se beacon snadno oddělí od podkladu.

Rychlost instalace v případě kvalitní přípravy, vhodné techniky a soudržného povrchu se pohybuje okolo 15-20 beaconů/hodinu pro jednu pracovní četu. Při doporučené vzdálenosti prvků lokalizační infrastruktury 40 m, tak jedna pracovní četa zvládne instalovat lokalizační systém za hodinu do tunelového tubusu o délce 600-800 m. Vzhledem k časové délce plánovaných uzávěr je nutné zajistit odpovídající počet pracovníků a nezbytné techniky, aby bylo možné pracovat s dostatečnou rezervou. Montážní práce mohou být ovlivněny např. souběžnými pracemi a realizací bezpečnostních a dopravních opatření při uzavírání a otevírání tunelu.

Vzdálenost mezi beacony záleží na způsobu zamýšleného využití:

- specifické rozmístění:
  - instalace ve významných místech (potažmo v určité vzdálenosti před nimi), kde je řidiči poskytnuta informace (vjezdy, výjezdy, oznamovací tabule apod.),
  - v případě využití navigace je poloha aktualizována skokově nebo pomocí interpolace polohy na straně aplikace,
  - nastavení beaconů: Vysílací výkon (TX power) lze upravit tak, aby se oblast detekce zařízení případně zmenšila. Je však třeba vzít v potaz také frekvenci vysílání a maximální rychlost dopravního proudu,
  - lokalizace probíhá pouze v definovaných místech,
  - nutné provádět konfigurační test – TX power a interval vysílání včetně příjmu na straně koncového zařízení s detekcí síly signálu (RSSI – Received Signal Strength Indicator) viz. obr. 6.



Obr. 6 Naměřené hodnoty RSSI při průjezdu částí tunelu s nastavením beaconů TX power 5, Interval 100 ms

- pravidelné rozmístění:



- Vzdálenost mezi beacony musí být rovnoměrná, ideálně 40 m,
- lze použít laserový dálkoměr či jiné měřidlo,
- lze využít pravidelně rozmístěné dlaždice / světla,
- nastavení beaconů: TX power 5 dBm, interval vysílání 100 ms,
- možnost využití pro kontinuální lokalizaci v tunelu,
- nutné provádět validační test průjezdu tunelem včetně příjmu na straně koncového zařízení s detekcí síly signálu (RSSI – Received Signal Strength Indicator) viz. obr. 7, kde jsou patrné nárůsty RSSI v čase odpovídající průběhu jízdy (v aktuálním čase je nejsilnější signál od nejbližšího beaconu).



Obr. 7 Naměřené hodnoty RSSI při průjezdu tunelem

V případě pravidelného rozmístění a nutnosti beacon posunout například kvůli umístění jiných objektů na ostění tunelů, je možné posunutí o  $\pm 2$  metry (pokud lokace koliduje). Je nutné vyhnout se instalacím na/u kovových objektů (kabeláž, antény apod.). V těchto případech musí být beacon instalován nejméně 25 cm od objektu, aby byl signál symetrický.

Krabička beaconu je utěsněna, aby nedošlo k proniknutí vody a prachu (minimální krytí IP 65, doporučeno IP 67). Krabička by se neměla otvírat násilím. Beacony by měly být odolné vůči tlakovému čištění a čištění jemnými kartáči. Příkladem je obr. 8 z instalace beaconu v tunelu Cholupice.



Obr. 8 Instalace BLE zařízení – Cholutice

#### 6.4.1 Vhodné místo instalace beaconů – členitost, povolená rychlost

Pro každou tunelovou stavbu je nutné posoudit určitá specifika v projektu:

- délka tunelu – je nutné správně vypočítat optimální množství beaconů + počítat také s rozplety + s dalšími objekty, které mohou vadit instalaci,
- členitost tunelu (nevadí výjezdy, vjezdy, exity, rampy),
- povolená rychlost (testováno 30-130 km/h),
- rozteč instalace mezi beacony, umístění v rámci tunelové trouby vychází z požadavků konkrétní aplikace, zejména systému Registru lokalizačních prvků nebo programu Waze Beacons, ideálně u obou lze sladit všechny požadavky (tyto požadavky se vzájemně nevylučují),
- instalace je vhodná dle kategorií tunelu TA, TB, TC-H, TC, TD-H, TD uváděné v ČSN 73 7507 a v TP 98 (Kategorizace tunelů z hlediska bezpečnostního vybavení). Není nutná instalace do tunelu kratšího než 100 m, více viz. tabulka 1 v kapitole 4.2,
- v případě, že je v tunelu křížení, odpojovací nebo připojovací pruh se lokalizační infrastruktura musí instalovat v daném místě,
- lokalizační systém s beacony se integruje do ŘS tunelu s využitím služeb Registru lokalizačních prvků.



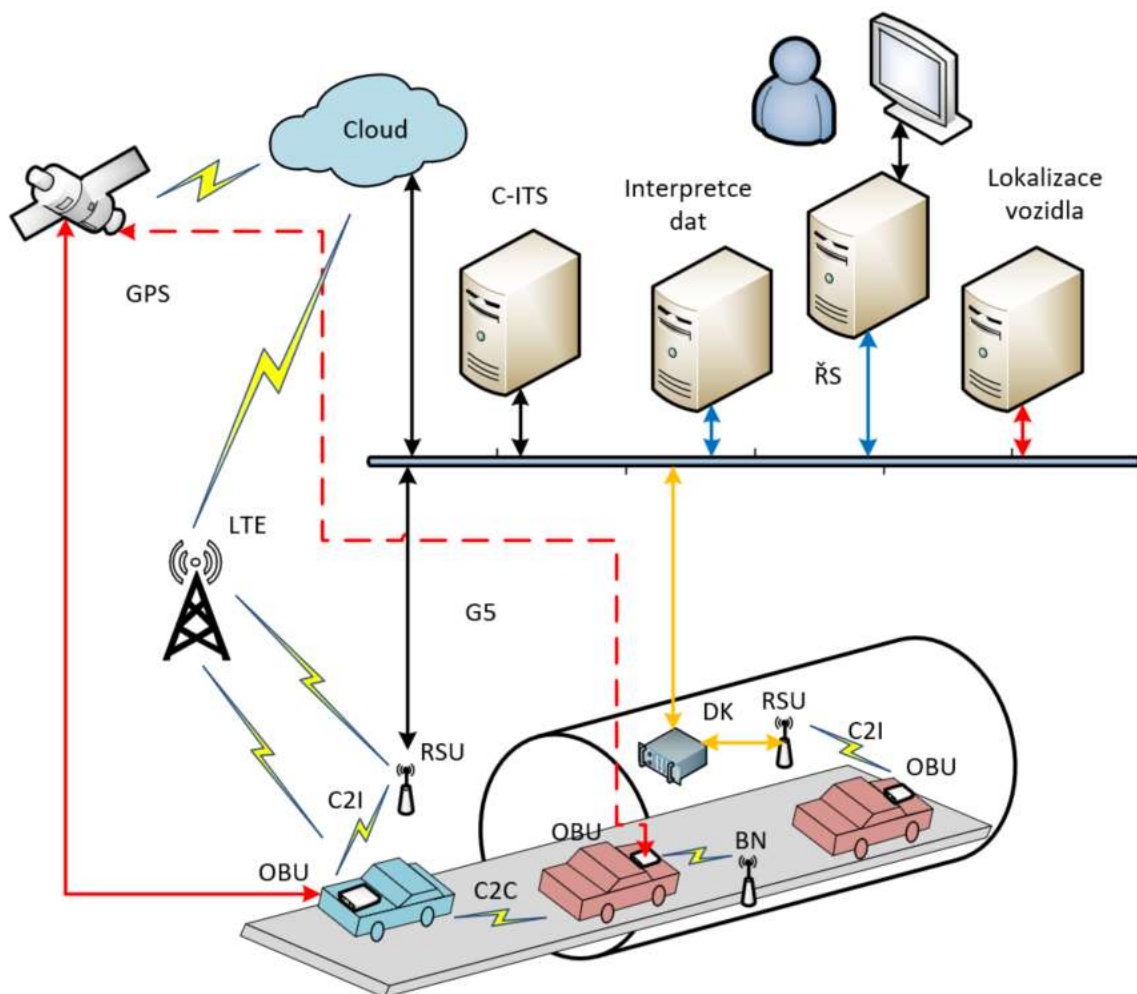
### 6.4.2 Údržba beaconů a profylaktická prohlídka

Beacony je nutné pravidelně udržovat a provádět jejich kontrolu, zejm. se jedná o následující:

- kontrola funkce beaconů v ŘS – automatická detekce a alarm v systému,
- kontrola průjezdem kontrolního vozidla každé 3 měsíce,
- kontrola nastavení 1x za rok při uzavěře tunelu,
- pokud jednotka nefunguje provede se její výměna a v lokalizaci (registr lokalizačních prvků) bude nastaveno příslušné číslo jednotky po dohodě se správcem tunelu.

### 6.5 Využití lokalizace pro technologii – C-ITS

Využití BLE lokalizačního řešení může mít dopad i na další aplikace v dopravě. Zejména se jedná o využití C-ITS služeb v tunelu, které doposud kvůli absenci GNSS nebylo možné používat, neboť vyžadují aktualizované polohové informace. OBU jednotka vyžaduje doplnění specifického C-ITS modulu, který v případě průjezdu vozidla vybaveného C-ITS jednotkou přepne aktualizaci polohy z GNSS do BLE režimu a využívá automaticky polohové informace z lokalizační infrastruktury a dále je využívá k definování C-ITS zpráv a jejich distribuci, viz. schéma návrhu architektury uvedené na obr. 9. Ale zároveň je tento modul nezbytný i pro příjem a čtení obdržných C-ITS zpráv. Takové řešení má velmi významný dopad na zvýšení bezpečnosti v tunelových stavbách na PK.



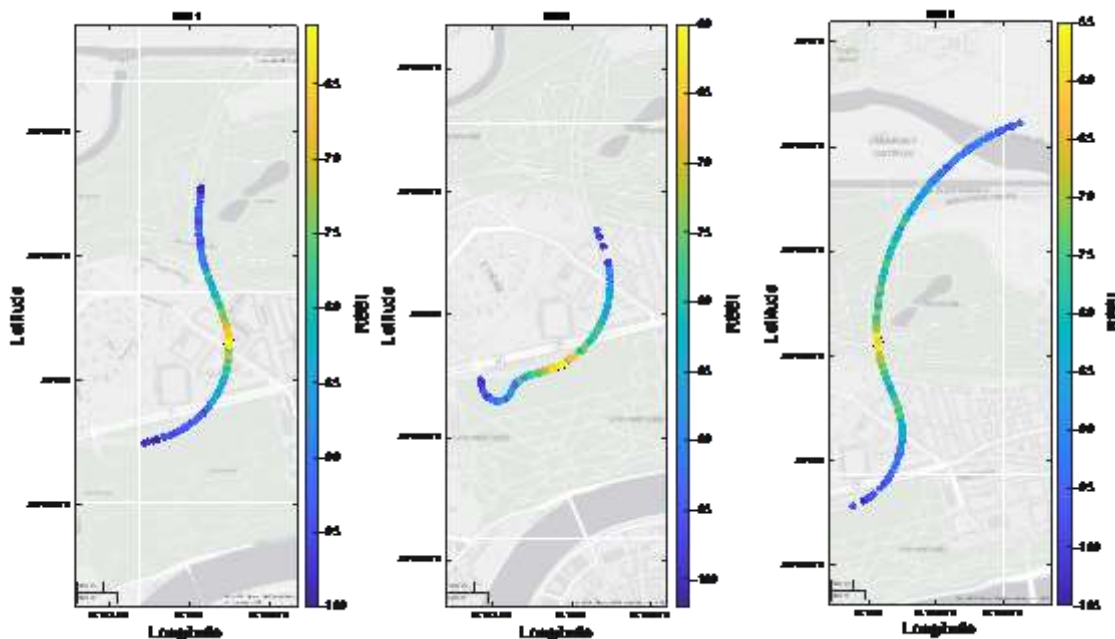
Obr. 9 Schéma architektury systému využívající BLE lokalizaci pro C-ITS účely

### 6.5.1 Instalace

Pro zvýšení bezpečnosti tunelových staveb a poskytování relevantních dopravních informací prostřednictvím C-ITS je zcela nezbytné, aby byl pokryt dosahem signálu ITS-G5 (standardizovaný protokol pro komunikaci mezi vozidly a infrastrukturou) tunel v celé své délce. Maximální komunikační dosah se může lišit dle typu RSU jednotek, avšak je nezbytné brát v potaz i složitost tunelové stavby na PK, včetně dopravních intenzit, neboť i samotná vozidla projíždějící tunelem mohou být překážkou pro vlastní komunikaci mezi RSU a vozidlem (zakrytí nákladním vozidlem apod.).

V případě tunelů, kde absentují připojovací pruhy, výjezdy, není výrazně členěn, nevykazuje horizontální či vertikální zakřivení, je dosah vyšší a rozmístění RSU může vykazovat vyšší rozteč mezi jednotlivými instalovanými prvky. Jedná se především o dálniční tunely, které jsou vedeny v přímém směru bez výrazného zakřivení, stoupání či klesání.

Pokud se jedná o tunel, který vykazuje vyšší složitost, připojovací pruhy, více výjezdů či zakřivení, může být dosah C-ITS komunikace výrazně omezen, a tedy rozteč mezi jednotlivými RSU musí být kratší, aby byla pokryta C-ITS komunikací tunelová stavba na PK v celé své délce. Příklad městského tunelu s vyššími poloměry zakřivení, výjezdy či nájezdy, měnící se strukturou jízdních pruhů apod. je uveden níže na obr. 10, kde je barevně rozlišen záchyt komunikace z RSU a dle barev je rozlišena síla obdrženého signálu v definované pozici zeměpisných souřadnic (latitude, longitude).



Obr. 10 Dosah C-ITS komunikace – tunelový komplex Blanka

### 6.5.2 Instalace RSU a C-ITS v tunelu

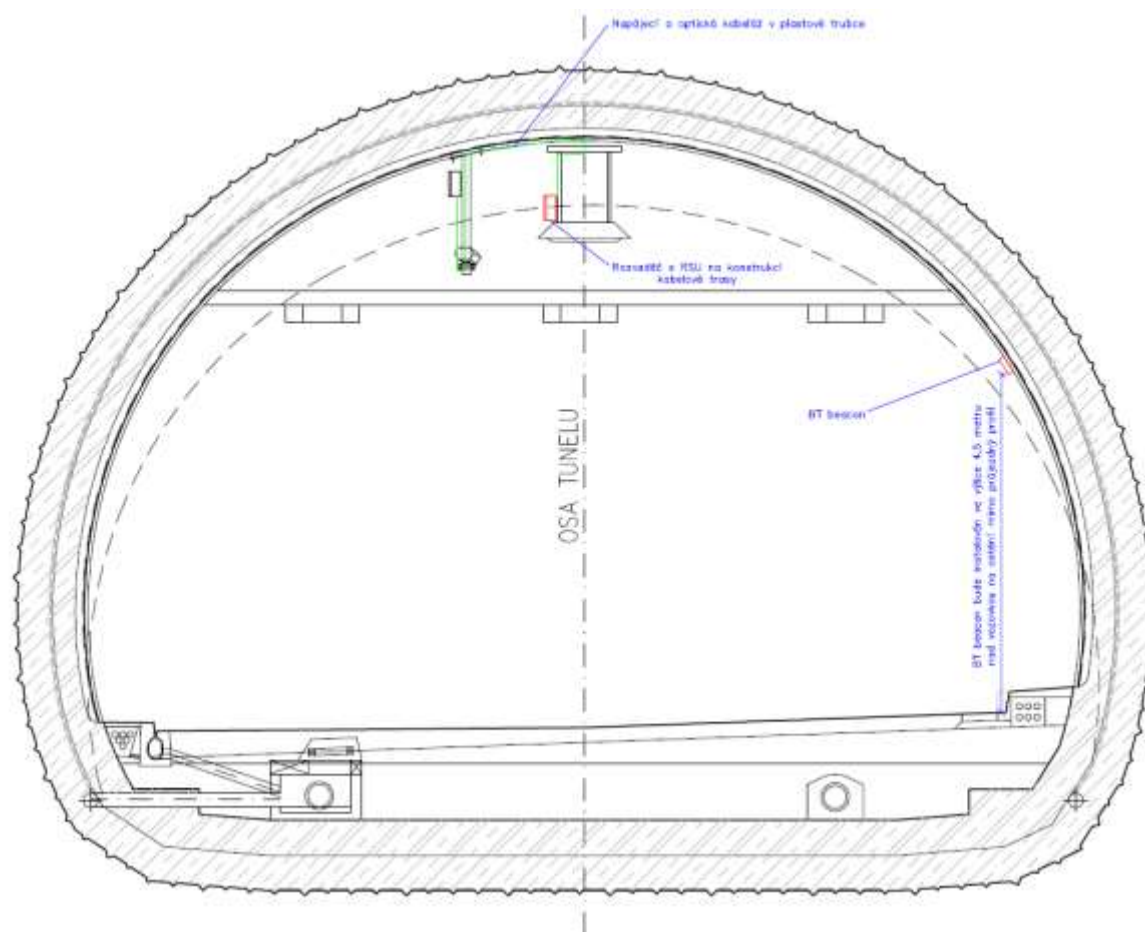
Vhodné místo pro instalaci C-ITS zařízení bude velmi specifické pro každou tunelovou stavbu na PK. Umístění bude ovlivněno zejména následujícími faktory.

- délka tunelu na pozemní komunikaci
- počet připojovacích ramp (délky segmentů mezi vjezdy/sjezdy)
- členitost stavby
  - o z pohledu výšky (stoupání/klesání)

- množství a poloměry oblouků
- množství dalšího technického vybavení, zaručení prostoru
- předpokládané denní intenzity vozidel

Instalace se předpokládá zejména v oblastech:

- na začátku a konci tunelu
- před výjezdovými a vjezdovými rampami (informace o provozu mimo tunelovou stavbu na PK např. informace o stavu SSZ, pruhové signalizace, PDZ apod. lze dostávat již v tunelu nebo mimo tunel)
- před zálivy, kde lze očekávat možné využití pro odstavené vozidlo apod.
- v místech, kde je zajištěno datové připojení a napájení el. energií pro přímé propojení s tunelovou technologickou sítí
- RSU nebo C-ITS bude přímo integrováno do ŘS tunelu pro zajištění obousměrného předávání a přenosu dat a informací mezi systémy.



Obr. 11 Příčný řez komunikace – návrh umístění RSU a BLE zařízení

Příkladem instalace je návrh uvedený výše na obr. 11, kde je společně s umístěním RSU znázorněn i projektový návrh na umístění BLE zařízení. RSU jednotky je vhodné vždy umísťovat do dostatečné výšky, aby komunikace nebyla zastíněna během průjezdu rozměrných vozidel. Doporučuje se umístění

do výšky alespoň 4,5 metru, dle aktuálních specifik konkrétní tunelové stavby na PK, jež bude řešeno v projektové dokumentaci. Vhodná místa pro instalaci jsou zejména portály a příčné kabelové lávky, kde je umístění nejen z pohledu rozhledových podmínek a komunikačního dosahu, ale i vedení datové komunikace či napájení.

Systém instalace RSU nebo C-ITS do sítě tunelového systému musí mít oddělené datové připojení od ostatních tunelových technologií – např. samostatná WLAN a musí být zajištěno napájení elektrickou energií. Pro konkrétní řešení je nutné zpracovat realizační projektovou dokumentaci, jež bude obsahovat napájení a vlastní připojení na ŘS tunelu.

Nicméně je zcela nutné, aby byl před realizací takového systému zajištěn a dostatečně proměřen dosah komunikace a byla pokryta tunelová stavba na PK v celé své délce. Významný dopad může mít i využití směrových antén apod., které může mít na pokrytí tunelu velmi zásadní vliv. Doporučují se antény s vhodnou úzkou směrovou charakteristikou na obě strany silniční pozemní komunikace, pro kvalitní záchyt OBU jednotky vozidla. Jednotky RSU je vhodné umísťovat do nerezových nebo plastových rozvaděčů dle požadavku zadavatele a současně je páskovat nebo jiným vhodným způsobem instalovat, aby nedocházelo ke korozním přechodům a nedošlo k pádu jednotky RSU na vozovku. Jednotky RSU se umísťují na portály nebo do kabelových žlabů do co největší výšky a mimo průjezdný profil. Na obr. 12 je uveden příklad instalace RSU jednotek v oblasti tunelové stavby na PK, tedy na portálech před vjezdem do tunelu, či přímo v tunelovém tubusu.



Obr. 12 Ukázka instalací RSU jednotek s integrací na řídicí systém tunelu

Vždy musí být zpracovaný projekt na konkrétní lokalitu a řešení. Jednotky RSU je vhodné pro zajištění spolehlivé navigace vozidel umístit do všech kategorií tunelů TA, TB, TC-H, TC, TD-H, TD uváděných v předpisu TP 98 a příslušné tunelové normy ČSN 73 7507, zejména pak v místech křižovatek tunelu nebo v místech, kdy za tunelem na PK je křižovatka. Toto by se mělo stát součástí příslušné normy ČSN 73 7507 a TP 98 a TP 154. Řešení c-ITS a jednotky RSU musí také splnit příslušná legislativní nařízení a

doporučení pro instalaci do agresivního prostředí a musí být zajištěna příslušná ochrana krytí minimálně IP 65 (doporučené IP 67).

### Způsoby integrace RSU a C-ITS do řídicího systému tunelu

- Integrace lokalizační infrastruktury RSU a C-ITS do řídicího systému tunelu
  - o integrace lokalizační infrastruktury do ŘS tunelu – zasílání lokalizačních dat, zasílání diagnostických dat, zakreslení do vizualizace tunelu,
  - o integrace dat z tunelu do lokalizační infrastruktury – posílání stavů tunelu, zasílání stavu proměnného dopravního značení, zasílání informací o dopravní signalizaci a textové informace od operátora.
- Integrace provozních dat z RSU a C-ITS do řídicího systému
  - o integrace RSU nebo C-ITS infrastruktury do ŘS tunelu – zasílání dopravních dat, zasílání diagnostických dat, zakreslení do vizualizace tunel, zasílání dat z vozidla – diagnostika, vytěžování meteorologických a dopravních informací
  - o integrace dat z tunelu do RSU nebo C-ITS – posílání stavů tunelu, zasílání stavu proměnného dopravního značení, zasílání informací o dopravní signalizaci a textové informace od operátora, informace o zásahu IZS, informace zásahu servisu v tunelu.

Pro účely zajištění komunikace mezi ŘS a RSU je zcela nezbytné, aby byl ŘS vybaven C-ITS modulem, který umožní dle definovaných C-ITS standardů načítat komunikaci z RSU. Tento modul zároveň bude umět generovat C-ITS zprávy dle aktuálních podmínek a stavů v tunelu a stavu technologického vybavení včetně samotného ŘS, tak aby mohly být tyto zprávy pomocí RSU distribuovány do vozidel vybavených OBU.

### 6.5.3 Údržba RSU nebo C-ITS a profylaktická prohlídka

Systémy C-ITS a dílčí komponenty je nutné pravidelně udržívat a provádět jejich kontrolu, zejm. se jedná o následující:

- kontrola funkce jednotky RSU v ŘS – automatická detekce a alarm v systému,
- kontrola průjezdem kontrolního vozidla každé 3 měsíce,
- kontrola nastavení 1x za rok při uzávěře tunelu,
- pokud jednotka nefunguje provede se její výměna za jinou a lokalizaci se nastaví příslušné číslo jednotky,
- kontrola datové konektivity,
- kontrola napájení,
- kontrola rozvaděčů a funkce.

Při výběru vhodných zařízení se životnost zařízení odhaduje na 5-8 let. Poté je nutné zařízení vyměnit a průběžně aktualizovat FW a SW jednotek. Doporučeno je pravidelné provádění **profylaktické** údržby v intervalu 2x ročně, která spočívá v proměření funkce jednotlivých zařízení, kontrole stavu komponent v rozvaděčích, vlastní funkce jednotky RSU (zařízení v servisním režimu přenáší informace o jejím



napětí) a případně výměně nefunkčních či poškozených zařízení a zařízení, která jsou na hranici životnosti.

#### 6.5.4 Případy využití

Komunikace mezi infrastrukturou a vozidlem a přenos informace o:

- změně rychlostního limitu,
- změně uspořádání či uzavření jízdních pruhů,
- zákazu vjezdu,
- varování před nebezpečím (odstavené vozidlo, znečištění vozovky apod.),
- mýtu (v budoucnu poplatek za průjezd),
- obecných poměrech (vzdálenost ke konci tunelu, k požadovanému výjezdu apod.),
- sběru dat do ŘS tunelu z vozidel přímo z jednotek RSU nebo C-ITS,
- poskytování dat o stavu tunelu z ŘS do C-ITS nebo přímo do RSU,
- stavu signalizace v okolí tunelu, např. u výjezdu z tunelu, který je ramenem ke světelně řízené křižovatce.

Instalace C-ITS zařízení (RSU) může dále rozšiřovat i funkcionality jednotek umístěných přímo ve vozidle, které nezbytně potřebují aktuální polohu a čas pro schopnost komunikace. RSU jednotky v tunelu tedy slouží ke zprostředkování těchto nezbytných parametrů a dávají tak prostor realizovat běžnou C-ITS komunikaci mezi vozidly pro přenos informací typu:

- pomalé vozidlo informuje ostatní účastníky provozu o své poloze,
- odstavené/porouchané vozidlo informuje ostatní účastníky o své poloze,
- vozidlo IZS informuje účastníky provozu, kteří se nacházejí v definované cestě a požaduje její uvolnění,
- vozidlo IZS informuje účastníky o zásahu přímo v tunelu (může zaslat požadavek pro uzavření tunelu apod.),
- vozidlo údržby vysílá informaci o své poloze (ostatním účastníkům, do ŘS tunelu nebo jiného dispečerského centra),
- nouzové brzdění vozidla,
- provozní informace mezi vozidly.

## 7 Krytá parkoviště

V rámci krytých parkovišť je využití C-ITS a lokalizační infrastruktury založené na beaconech v současné době považováno spíše za ekonomicky méně výhodné řešení, které nenabízí takový rozsah služeb a benefitů, jako je tomu v tunelových stavbách na PK. U krytých parkovišť lze očekávat návaznost na implementované a provozované telematické systémy, které mohou být rozšířeny o integraci C-ITS do ŘS parkoviště.

V objektech krytých parkovišť může být C-ITS využito například pro informování o výjezdu z parkoviště, navigaci na konkrétní parkovací místo nebo žádost o zvednutí závory. Jedná se však o nestandardizované řešení, které by muselo být vyvinuto a diskutováno s odbornou veřejností, aby bylo možné naplnit potenciál takového řešení. Zároveň navigace na parkovací stání či k výjezdu z objektu může být realizována za podstatně nižší investiční náklady alternativními způsoby jako je např. využití mobilní aplikace, která následně může být využita uživatelem i po opuštění vozidla atd.

V krytých parkovištích dále nejsou očekávány takové absolutní počty vozidel vybavených funkcionalitou C-ITS a podporujících BLE lokalizaci, a tím se snižuje i rozsah potenciálních benefitů, který je podstatně omezen oproti tunelovým stavbám. Měření také ukázala, že instalace a návratnosti v krytých parkovištích vzhledem k dosahu a rozsahu se ukazuje jako zatím příliš nevýhodné a lze doporučit toto téma sledovat a řešit později, až budou technologie více rozšířené ve vozidlech nebo je bude vhodné kombinovat např. s naváděcími parkovacími systémy.

## 8 Doporučené použití a postup

Tato metodika slouží jako soupis požadavků a definice unifikovaného postupu při implementaci lokalizačního řešení v tunelových stavbách na PK, kde absentuje pokrytí GNSS. Navržené řešení na bázi BLE zařízení implementovaných přímo v tunelu umožňuje získávat dostatečně přesná data pro navigační aplikace a informování řidičů, či podporu C-ITS řešení, které vyžaduje aktualizaci polohových informací pro plnění své požadované funkce. Právě BLE řešení umožňuje přepnout zdroj polohových dat v případě vjezdu do tunelu a sbírat identifikační data a z nich aktuální polohu určovat na základě Registru lokalizačních prvků.

Tato metodika popisuje unifikovaný postup, který byl realizován a vhodně otestován v rámci projektu CK01000163 podpořený agenturou TAČR. Zároveň v rámci tohoto projektu došlo k vytvoření modulu, který je schopen načítat tyto BLE polohové informace a nahrazovat GNSS během průjezdu tunelové stavby, což umožní plnohodnotné využití navigačních a C-ITS aplikací i v tunelových stavbách, které kladou velký důraz na požadavky na zajištění bezpečnosti a informování účastníků dopravního provozu.

Metodika dále definuje postup, jakým způsobem je vhodné instalovat BLE zařízení v tunelové stavbě na PK včetně nároků na umístění zařízení tak, aby plnila svou požadovanou funkci včetně požadavků na projektovou dokumentaci, vlastní umístění zařízení a nároky dle kategorií tunelů. Dále metodika popisuje význam BLE lokalizačního řešení včetně dopadů na běžné uživatele i správce infrastruktury, nebo integrovaný záchranný systém.

V rámci metodiky je zpracována i návaznost na C-ITS systémy a jejich využití v tunelových stavbách. Tento výstup je soupisem požadavků na vybavení tunelových staveb RSU jednotkami, které dále mohou komunikovat jak s vozidly, tak i s dalším technologickým vybavením tunelu, jako je například proměnné dopravní značení, ale především pak přímo s řídicím systémem tunelu, odkud je možné dále distribuovat informace například o uzavření jízdnic pruhů či jiných dopravních omezeních.

### 8.1 Ekonomické a časové zhodnocení

Po dosažení konce životnosti baterií u beaconů (resp. při dosažení 90 % snížení úrovně nabití u 5-10 % zařízení) je nutné HW část infrastruktury deinstalovat a nainstalovat novou – u kvalitních zařízení lze očekávat výměnu po 4-6 letech provozu (reinstalace je řádově o 30 % levnější než prvotní instalace – záleží však na délce tunelu a složitosti tunelu).

Ceny za instalaci a údržbu (ceny jsou orientační a závisí také na délce a komplexnosti tunelu s tím, že pro delší tunely se jednotková cena obvykle snižuje, pro krátké zvyšuje s ohledem na fixní cenu některých operací):

- cena instalace BN na 100 m včetně integrace do ŘS	250 tis. Kč bez DPH k r. 2021*
- cena instalace RSU na 100 m včetně integrace do ŘS	750 tis. Kč bez DPH k r. 2021*
- předpokládaná cena údržby BN na 100 m bez ŘS za úkon	10 tis. Kč bez DPH k r. 2021*
- předpokládaná cena údržby RSU na 100 m bez ŘS za úkon	35 tis. Kč bez DPH k r. 2021*
- cena údržby SW včetně integrace ŘS na 1 tunel u BN	250 tis. Kč bez DPH k r. 2021**
- cena údržby SW včetně integrace ŘS na 1 tunel u RSU	350 tis. Kč bez DPH k r. 2021**

\*Údržba se předpokládá dle plánovaných uzávěr v uzavřených prostorách 2x do roka.

\*\*Úprava SW nebo ŘS včetně licencí se předpokládá 1x do roka



## Potřebná doba pro údržbu:

- doba instalace BN na 100 m bez integrace do ŘS	30 min
- doba instalace RSU na 100 m bez integrace do ŘS	1 h
- předpokládaná doba údržby BN na 100 m	10 min
- předpokládaná doba údržby RSU na 100 m	30 min

Uváděné ceny výše za instalaci, provoz a údržbu jsou doporučené a orientační k roku 2021 a konkrétní finanční a ekonomické nároky vyplynou na základě projektové dokumentace a otevřeného tendru zohledňujícího aktuální tržní ceny.

Součástí údržby je i životnosti zařízení a provádění potřebných činností v rámci profylaktické prohlídky. Ekonomické aspekty týkající se životního prostředí, sociálních dopadů, bezpečnosti a dalších vlivů není možné vyjádřit přímo, neboť implementace systémů podle dokládané metodiky vytváří sekundární ekonomické efekty, které není možné primárně vyčíslit, ale vytvářejí ucelený přínos mající vliv na bezpečnost a plynulost provozu v tunelové stavbě na PK. Nepřímo se může jednat o nemalé dopady při kvalitním a přesném navádění řidičů v tunelu PK, kdy se budou omezovat negativní faktory jako je nepřesné lokalizační informace a nebezpečné situace a manévry v tunelu pro navádění, které mohou vest k nehodám nebo k požáru, přičemž tyto negativní dopady mohou být z ekonomického pohledu značné včetně ztrát na lidských životech.

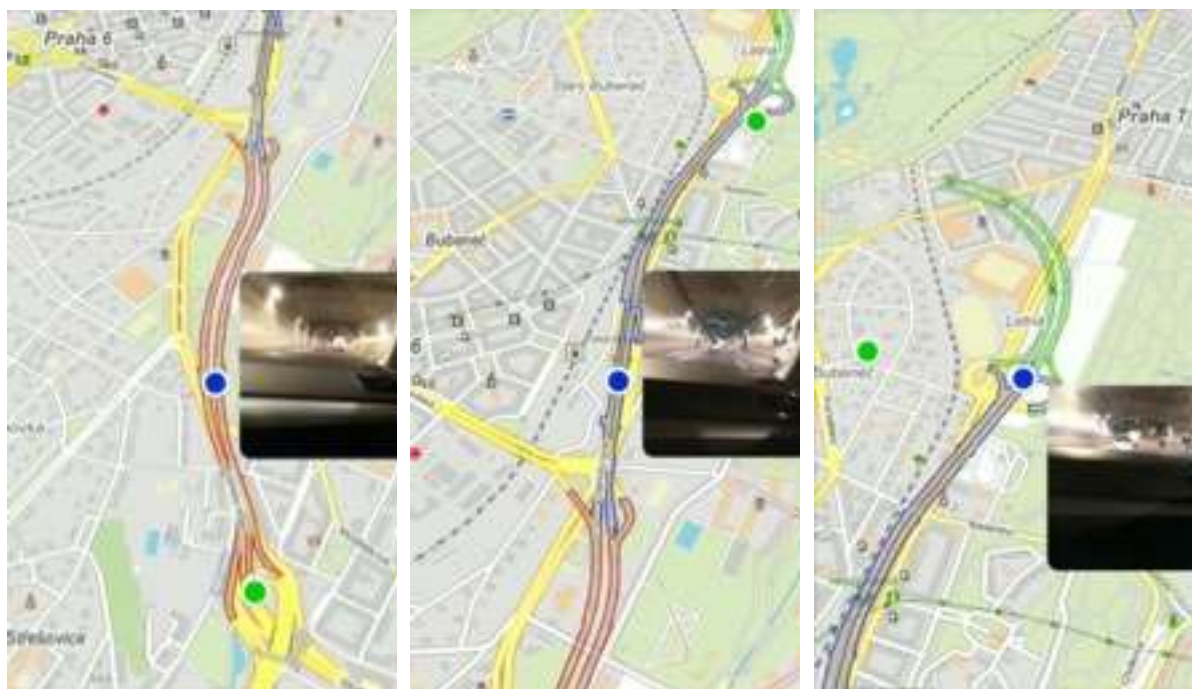
## 9 Závěr

Tato certifikovaná metodika je unifikovaným návodem nejvhodnějšího postupu k instalaci lokalizační infrastruktury v tunelových stavbách na PK, která zajistí zdroj dat pro zajištění lokalizace koncových zařízení, převážně mobilních telefonů, ale taktéž i pro jiné systémy využívající standard Bluetooth Low Energy a systém C-ITS. Metodika je certifikována MD ČR a doporučuje dle kapitoly 6 instalovat BLE zařízení do tunelů pro zajištění lokalizace a tím i přehlednosti dopravní situace a bezpečnosti provozu v tunelových stavbách na PK, a to zejména s ohledem na absenci lokalizačních řešení na bázi GNSS a zajištění funkcionality systémů C-ITS s implementací RSU do tunelů.

Požadavky na zavedení lokalizační infrastruktury zatím nejsou stanoveny v legislativě (ČSN, TP) ani resortních předpisech (TKP Ředitelství silnic a dálnic ČR). Pokud se však objeví v projektové dokumentaci či v požárně bezpečnostním řešení stavby požadavky na doplnění dle této metodiky, tak jsou pro zhotovitele závazné.

Na obr. 13 níže lze vidět rozdíl mezi otevřenou BLE lokalizační infrastrukturou (modrý bod) pro uživatele tunelových staveb a její porovnání s výstupy ověření možností využití GNSS lokalizace (zelený bod) v tunelech. Poloha založená na GNSS je výrazně nepřesná v případě, že:

- byla poloha GNSS zpožděna a stále ukazovala poslední určenou polohu před samotným vjezdem do tunelu,
- v místě, kde jsou výjezdy z tunelu, byl GNSS detekován, ale na jiném místě/jiném výjezdu z tunelu,
- vozidlo je stále v tunelu blízko výjezdu z tunelu, avšak poloha založená na GNSS je zcela mimo tunel.



a)

b)

c)

Obr. 13 Porovnání lokalizace založené na BLE (modrý bod) a GNSS (zelený bod)

Výstupy těchto měření zcela jasně deklarují, že otevřená BLE lokalizační infrastruktura vykazuje výrazně přesnější určení polohy, které může mít zásadní dopad na zajištění komfortu řidiče během jízdy, resp. průjezdu tunelem, eliminaci zbytných tras, zvýšení bezpečnosti a mnoho dalších aspektů, které budou mít vliv na bezpečnost provozu v tunelech i mimo ně.

Vlastní měření a ověření funkce lokalizace BLE a funkce RSU bylo zajištěno v tunelovém komplexu Blanka v Praze v Dejvickém tunelu, v tunelu Cholupice na Pražském okruhu ve směru D1 na D5 a v tunelu Hřebeč na silnici I/35. Metodika je navržena pro lokalizační infrastrukturu pomocí beaconů a distribuci informací pomocí RSU, a to jak pro projektování, realizaci i údržbu. Využití RSU a C-ITS v tunelové stavbě na PK může mít i širší využití, které je v dokumentu naznačeno, například pro lokalizaci vozidel, které umožňují komunikaci C-ITS, ale primárně je popisováno využití pro distribuci informací o stavu tunelu, provozu nebo mimořádných událostech. Velmi podrobně je popsáno využití BLE, které je primárním cílem a zdrojem polohových informací.

## 10 Literatura

- [1] Štencek A., Tichý T., Šmerda T.: Projekt pilotní instalace zařízení pro určení polohy v Tunelovém komplexu Blanka. Projektová dokumentace, Praha 2020
- [2] Štencek A., Tichý T., Šmerda T.: Projekt pilotní instalace zařízení pro určení polohy v tunelu Cholupice Blanka. Projektová dokumentace, Praha 2021
- [3] Vaněk D., Šmerda T.: Projekt instalace zařízení pro určení polohy v tunelu Hřebeč. Projektová dokumentace, Praha 2022
- [4] Štencek A., Prokeš R., Brož. J. Tichý T., Šmerda T.: Průběžná zpráva o postupu prací a dosažení výsledků k projektu CK01000163 za rok 2020, Dokumentace pro TAČR, Praha 2021
- [5] Štencek A., Prokeš R., Brož. J. Tichý T., Šmerda T.: Průběžná zpráva o postupu prací a dosažení výsledků k projektu CK01000163 za rok 2021, Dokumentace pro TAČR, Praha 2022
- [6] Štencek A., Prokeš R., Brož. J. Tichý T., Šmerda T.: Průběžná zpráva o postupu prací a dosažení výsledků k projektu CK01000163 za rok 2022, Dokumentace pro TAČR, Praha 2023
- [7] Technická dokumentace BLE Beacon CEDA. Dokumentace CEDA Maps 2020, <https://www.ceda.cz/>
- [8] Technické podmínky TP 98 – Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací. Ministerstvo dopravy ČR, 2004
- [9] Technické podmínky TP 154 – Provoz, správa a údržba tunelů pozemních komunikací. Ministerstvo dopravy ČR, 2001
- [10] Technické podmínky TP 229 – Bezpečnost v tunelech pozemních komunikací, MD ČR, Praha, 2010
- [11] ČSN 73 7507 - Projektování tunelů pozemních komunikací, ÚNMZ 2013
- [12] Brož, J.; Tichý, T.; Angelakis, V.; Bělinová, Z. Usage of V2X Applications in Road Tunnels. Applied Sciences. 2022, 12, 4624. <https://doi.org/10.3390/app12094624>
- [13] Brož, J.; Tichý, T.; Prokeš, R.; Štencek, A.; Šmerda, T. Proximity Approach to Bluetooth Low Energy Based Localization in Tunnels. Sustainability 2023, 15, 3659. <https://doi.org/10.3390/su15043659>
- [14] FalTech, Dostupné online dne: 31.3.2023 <https://www.gps-repeaters.com/blog/ensuring-that-gps-testing-is-an-inside-job/>

## Příloha 1 – Výkres rozmístění RSU a beaconů v tunelu

