



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA DOPRAVNÍ**

Martin Franc

**VYUŽITÍ LPWAN SÍTÍ K ANALÝZE DOPRAVNÍHO  
ZATÍŽENÍ PRŮMYSLOVÉHO AREÁLU**

Bakalářská práce

**2022**

**K614..... Ústav aplikované informatiky v dopravě**

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Martin Franc**

Studijní program (obor/specializace) studenta:

**bakalářský – ITS – Inteligentní dopravní systémy**

Název tématu (česky): **Využití LPWAN sítí k analýze dopravního zatížení  
průmyslového areálu**

Název tématu (anglicky): Utilization of LPWAN networks for traffic flow analysis in  
the industrial area

**Zásady pro vypracování**

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Vypracujte analýzu LPWAN technologií využívaných v řešeních Internetu věcí (IoT) a proveďte jejich porovnání
- Analyzujte aplikace IoT implementované ve výrobních závodech Škoda Auto a.s.
- Navrhněte IoT aplikaci určenou k analýze dopravní zátěže ve výrobním závodě Škoda Auto a.s. v Mladé Boleslavi a metody zpracování senzorických dat
- Proveďte ověření navržených metod zpracování dat na testovacích datech
- Navrhněte budoucí rozvoj IoT řešení ve výrobních závodech Škoda Auto a.s. a zhodnoťte očekávané náklady a přínosy



- Rozsah grafických prací: 10 - 20 obrázků
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Lee, I. Handbook of Research on Telecommunications Planning and Management for Business, IGI Global, ISBN 978-60566-195-7
- Odborné časopisy
- Internetové zdroje (např. [www.lora-alliance.com](http://www.lora-alliance.com); [www.sigfox.com](http://www.sigfox.com))

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Zdeněk Lokaj, Ph.D.**  
**Mgr. František Beneš**

Datum zadání bakalářské práce: **15. září 2020**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)


Datum odevzdání bakalářské práce: **8. srpna 2022**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

  
doc. Ing. Vít Fábbera, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu aplikované informatiky v dopravě



  
doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

  
Martin Franc  
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 2. prosince 2021

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této závěrečné práce. Zvláště pak děkuji vedoucímu této práce doc. Ing. Zdeňku Lokaji, Ph. D. a konzultantovi Ing. Martinu Šrotýřovi, Ph. D. za odborné vedení bakalářské práce a za rady, které mi poskytoval po celou dobu mého studia a dále bych chtěl poděkovat panu Mgr. Františku Benešovi za umožnění přístupu k mnoha důležitým informacím a materiálům.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 8. srpna 2022

.....

podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

# VYUŽITÍ LPWAN SÍTÍ K ANALÝZE DOPRAVNÍHO ZATÍŽENÍ PRŮMYSLOVÉHO AREÁLU

Bakalářská práce

červenec 2022

Martin Franc

**Klíčová slova:** IoT, LPWAN, LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-M

## **ABSTRAKT**

Předmětem této bakalářské práce „Využití LPWAN sítí k analýze dopravního zatížení průmyslového areálu“ je analyzovat LPWAN technologii v řešeních Internetu věcí (IoT) a provedení jejich porovnání. Další část závěrečné práce se zabývá analýzou aplikací IoT implementovaných ve výrobních závodech ŠKODA AUTO a.s. Následuje návrh IoT aplikace v programovacím jazyce R určené k analýze dopravní zátěže ve výrobním závodě ŠKODA AUTO a.s. v Mladé Boleslavi a jsou navrženy metody pro zpracování senzorických dat. Poté následuje ověření navržených metod pro zpracování dat na testovacích datech. Na závěr je navržen budoucí rozvoj IoT řešení ve výrobních závodech ŠKODA AUTO a.s. a jsou zhodnoceny očekávané náklady a přínosy.

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Transportation Sciences

# UTILIZATION OF LPWAN NETWORKS FOR TRAFFIC FLOW ANALYSIS IN THE INDUSTRIAL AREA

Bachelor thesis

July 2022

Martin Franc

**Keywords:** IoT, LPWAN, LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-M

## **ABSTRACT**

The subject of this bachelor thesis "Utilization of LPWAN Networks for Traffic Flow Analysis in the Industrial Area" is to analyse LPWAN technology in Internet of Things (IoT) solutions and compare them. The next part of the final work deals with the analysis of IoT applications implemented in the production plants of ŠKODA AUTO a.s. The following is the design of an IoT application in R programming language designed for traffic load analysis at the ŠKODA AUTO a.s. in Mladá Boleslav and methods for sensory data processing are proposed. The verification of the proposed methods for data processing on test data follows. Finally, the future development of IoT solutions in the production plants of ŠKODA AUTO a.s. and the expected costs and benefits are assessed.

# OBSAH

Seznam použitých zkratek .....	10
1 Úvod .....	11
1.1 Seznámení s problematikou .....	11
1.2 Důvody pro výběr zpracovávaného tématu .....	11
2 Internet věcí (Internet of Things) .....	12
2.1 Co to je IoT .....	12
2.2 Proč IoT .....	12
2.3 Referenční model IoT .....	14
2.3.1 Referenční model dle Cisco .....	15
2.4 Principy pro návrh IoT systému .....	17
2.4.1 Požadavky IoT systémů .....	17
2.4.2 Výzvy pro IoT .....	18
2.5 SWOT analýza IoT dle publikace The Era of internet of things: towards a smart world .....	18
3 Low Power Wide Area Network (LPWAN) .....	19
3.1 Technologie pro IoT .....	20
3.1.1 LoRa .....	20
3.1.1.1 LoRa modulace .....	21
3.1.1.2 Architektura LoRaWAN sítě .....	22
3.1.1.3 Třídy LoRaWAN zařízení .....	23
3.1.2 Sigfox .....	25
3.1.2.1 Architektura sítě Sigfox .....	25
3.1.3 NB-IoT .....	26
3.1.3.1 Architektura NB-IoT .....	26
3.1.4 LTE – M .....	27
3.1.5 Telensa .....	27
3.1.6 DASH7 .....	27
3.1.7 ZigBee .....	28
3.1.8 Úvahy o 5G a B5G .....	28
3.2 Porovnání technologií pro IoT .....	29
4 LoRa síť v areálu hlavního závodu Škoda Auto a.s. v Mladé Boleslavi .....	31
4.1 Dopravní klasifikátor .....	31
4.2 Instalace dopravního klasifikátoru do vozovky .....	32
4.3 Zaměření senzorů ve vozovce .....	33
4.4 Meteorologické senzory .....	34

4.5	Dashboard.....	35
4.5.1	Karta Vozidla .....	36
4.6	Analýza překročení maximální povolené rychlosti pomocí dat z dopravních senzorů LoRa.....	36
4.7	Přenos Dashboardu LoRa do interní sítě LoRa ve Škoda Auto a.s. ....	38
4.8	Dopravní průzkum .....	38
4.8.1	Dopravní průzkum u senzoru s vysokým podílem neurčených vozidel MB06 .	38
4.8.2	Analýza podílu neurčených vozidel v dashboardu .....	40
4.8.3	Dopravní průzkum u senzoru s vysokým podílem neurčených vozidel MB03 .	41
4.8.4	Dopravní průzkum zatíženého senzoru.....	41
4.8.5	Závěry vzešlé z provedených dopravních průzkumů.....	41
5	Aplikace vykreslující intenzitu dopravy .....	42
5.1	Tvorba aplikace .....	42
5.2	Uživatelské rozhraní aplikace .....	44
6	Rozvoj LoRaWAN sítě v areálu Škoda Auto do budoucna .....	46
6.1	Rozvoj v oblasti dopravy .....	46
6.2	Rozvoj v oblasti výroby .....	46
6.3	Implementace navržené aplikace do Dashboardu .....	47
6.4	Změna umístění vybraných senzorů, zjištěné problémy.....	47
7.	Závěr .....	49
7	Použité zdroje .....	51
8	Seznam obrázků.....	54
9	Seznam grafů .....	55
10	Seznam tabulek .....	56
11	Přílohy .....	57



## Seznam použitých zkratk

3GPP	3rd Generation Partnership Project
API	Rozhraní pro programování aplikací (angl. Application Programming Interface)
B5G	Beyond 5G
CIoT	Celullar IoT
Downlink	Komunikační kanál pro odesílání dat od sítě k zařízení
eDRX	Extended Discontinuous Reception
Chirp	Signál, jehož frekvence se s časem zvyšuje nebo klesá
IoT	Internet věcí (angl. Internet of Things)
LoRa	Řešení pro bezdrátový přenos dat na velké vzdálenosti (z angl. Long Range)
LPWAN	Nízkoenergetická síť pro rozsáhlé území (angl. Low – power – wide – area network)
NB-IoT	Narrowband IoT
PAN	Personal Area Network
PSM	Power Saving Mode
TP	Technické podmínky
Uplink	Komunikační kanál pro odesílání dat od zařízení do sítě

# 1 Úvod

## 1.1 Seznámení s problematikou

Rozvoj lidské civilizace byl v posledních desetiletích velmi výrazně ovlivněn rozšířením informačních technologií a s tím souvisejícím vznikem celosvětové sítě internetu, díky které došlo ke vzájemnému propojení lidí a kultur z celé naší planety. Bez internetu si dnes většina lidí v rozvinutých státech světa nedovede život ani představit.

Existuje však mnohem více způsobů, jak internet využít. Mezi novou dimenzi internetu patří Internet věcí (angl. Internet of Things). IoT propojuje produkty a služby několika různých sektorů (komunikační protokoly, WWW, senzory, mobilní aplikace, ...) v jeden celek a díky tomu dokážeme nahlížet na svět mnohem detailněji a exaktněji.

Lze očekávat, že produkty a služby internetu věcí (IoT) změní naše životy a tento trend v příštích letech poroste exponenciálně. Avšak než budeme schopni využívat potenciál IoT na maximum, budeme muset jako lidstvo překonat nespočet překážek a výzev. Tyto výzvy budou spočívat v propojení každodenního života s moderními technologiemi.

## 1.2 Důvody pro výběr zpracovávaného tématu

Ke zpracování této problematiky mě vedlo relativně malé povědomí ve společnosti o možnostech využití IoT v průmyslových aplikacích se zaměřením na sběr a vyhodnocení dat vzešlých z těchto systémů a dále zájem o koncept Smart City, který s IoT velmi úzce souvisí.

Cíli této závěrečné práce bylo vypracování analýzy využití LPWAN technologií používaných v řešeních Internetu věcí (IoT), vypracování jejich vzájemného porovnání, analýza aplikací IoT implementovaných ve výrobních závodech Škoda Auto a.s. a návrh IoT aplikace určené k analýze dopravní zátěže ve výrobním závodě Škoda Auto a.s. přímo v Mladé Boleslavi. Dále návrh vhodné metody zpracování sensorických dat, která budou přehlednou formou prezentovat dopravně nejvíce zatížené lokality v rámci areálu společnosti. Na závěr jsem navrhl budoucí rozvoj IoT řešení ve výrobních závodech Škoda Auto a.s. a zhodnotil jsem očekávané přínosy.

Řešený systém se skládá z dopravních senzorů, meteorologických senzorů a senzorů na měření elektrických veličin veřejného osvětlení v areálu společnosti. Výsledkem této závěrečné práce je porovnání hodnot naměřených instalovanými senzory s provedeným dopravním průzkumem a dále v naprogramování aplikace pro vizualizaci dat, jakožto nadstavbu pro již stávající dashboard.

## 2 Internet věcí (Internet of Things)

### 2.1 Co to je IoT

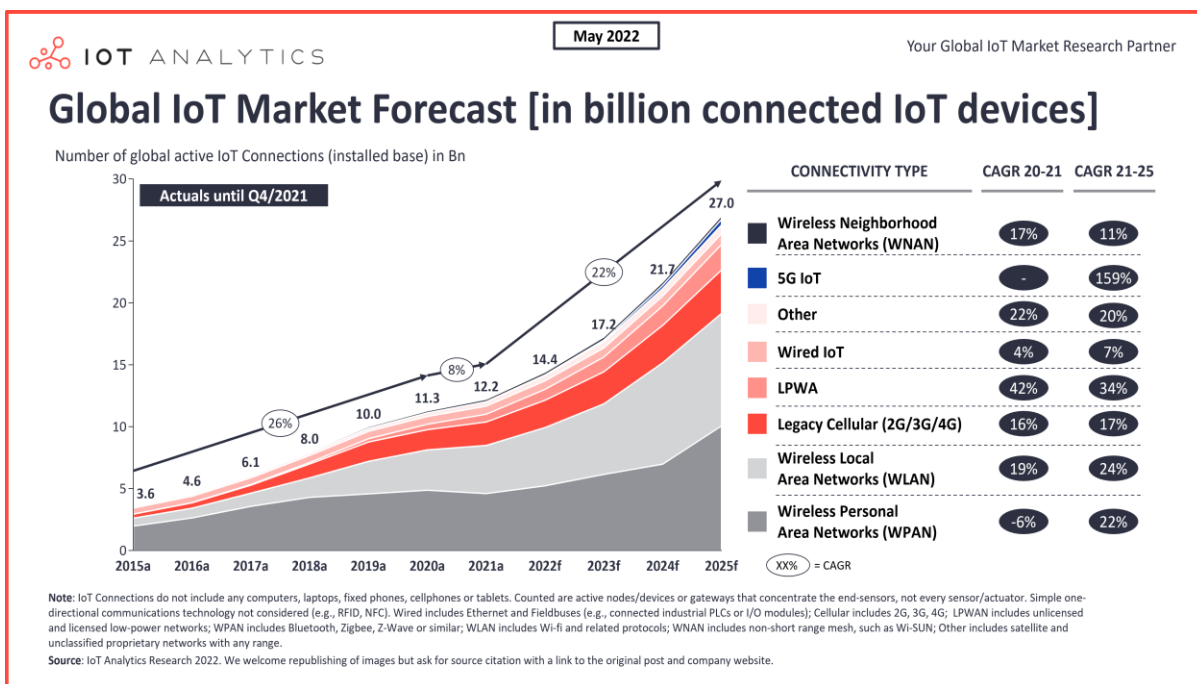
Internet věcí není vůbec lehké popsat pomocí jediné definice, proto žádná oficiální definice zatím neexistuje. IoT je zcela nová dimenze internetu a nová generace služeb. IoT znamená, že „cokoli“ může komunikovat s „čímkoli“ kdykoli na jakémkoli místě prostřednictvím „nějakého“ protokolu. Data naměřená koncovými články jsou odesílána na internet a díky tomu k nim můžeme přistupovat odkudkoli. Koncept IoT se zrodil v roce 1999 v USA a za jeho průkopníka je považován Kevin Ashton. V konceptu IoT začínáme s věcí (auto, žárovka, televize, ...), které přidáme výpočetní inteligenci a síťové připojení. Další potřebnou součástí je cloud computing, který zajišťuje výměnu informací pomocí cloudové infrastruktury (K. Salah, 2019).

### 2.2 Proč IoT

Pomocí IoT můžeme ovládat a monitorovat různorodá zařízení a tím si zjednodušit každodenní život. Díky dostupnosti internetu ve většině vyspělého světa a vývoji na trhu s hardwarem (menší velikost, nižší hmotnost, nižší energetická náročnost a nižší pořizovací cena zařízení) můžeme aplikovat koncept IoT na stále větším území a ve více oborech lidského zkoumání. Dalším důležitým faktorem je existence protokolu IPv6, který má oproti IPv4 velký adresní prostor a jsme tedy schopni každému zařízení přiřadit unikátní IP adresu. Koncept IoT má velmi široký záběr využití jako je např. Smart Home, Smart Campus, Smart City atd. Lze ho tedy využít jak v soukromém, tak firemním sektoru (K. Salah, 2019).

IoT s výhodou využívá spojení několika technologií, které se vzájemně integrují do jednoho funkčního celku. Ten je plně automatizovaný. Technologie využívané v IoT splňují následující čtyři funkce: snímání, komunikaci, ovládání a akční členy. IoT je taktéž velmi důležitý v konceptu Big Data, jelikož data shromažďovaná pomocí IoT slouží jako jeden z pramenů pro Big Data a Data Science (K. Salah, 2019).

Na obrázku 1 je předpověď z května 2022 odhadující počet celosvětově připojených IoT zařízení, z kterého je patrný neustále se zvyšující počet těchto zařízení. Do roku 2025 je odhad 27 mld. připojených zařízení. Drtivá většina těchto zařízení bude připojena pomocí bezdrátových přenosových protokolů.



Obrázek 1 – Předpověď globálního trhu IoT v počtu připojených zařízení (Hasan, 2022)

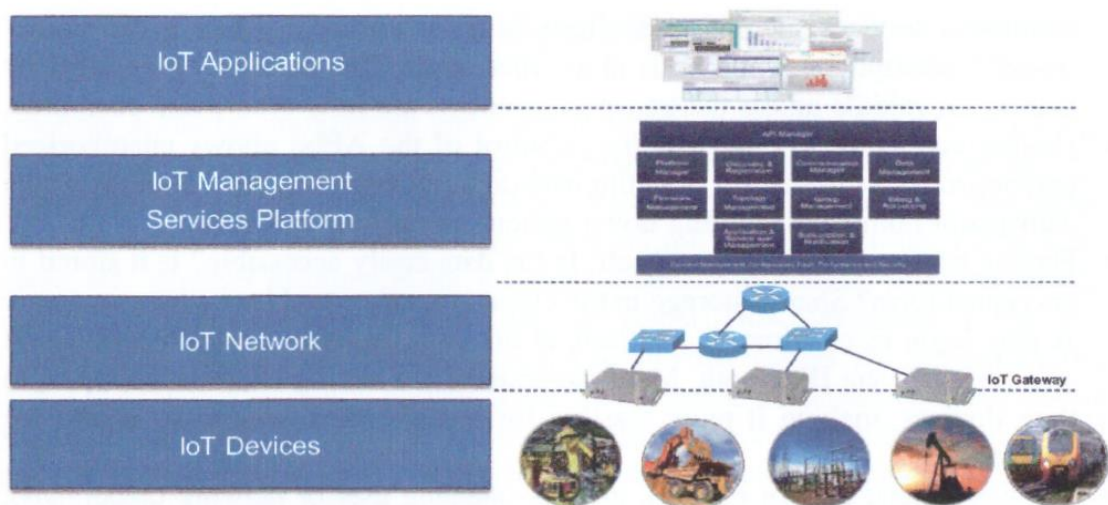
## 2.3 Referenční model IoT

V mnoha zdrojích je nahlíženo na referenční rámec IoT v odlišné míře detailnosti. Pro účely této práce jsem vybral pohled na referenční rámec dle publikace Internet of things – from hype to reality: the road to digitization (Rayes, Samer, 2017).

Ta rozděluje řešení IoT do čtyř hlavních úrovní. Úrovně jsou následující:

- IoT zařízení
  - Tato vrstva zahrnuje všechny typy IoT senzorů a akčních členů.
- IoT síť
  - Úroveň IoT sítě zahrnuje všechny síťové součásti IoT, mezi které patří brány, směrovače, přepínače apod.
- Platforma služeb IoT
  - V této úrovni jsou zahrnuty klíčové funkce pro správu, pomocí kterých je možné spravovat IoT síť včetně všech připojených zařízení. Dále též zahrnuje funkce propojující úroveň zařízení a sítě s aplikační vrstvou.
- Aplikace IoT
  - Aplikační úroveň zahrnuje všechny aplikace fungující v síti IoT (Rayes, Samer, 2017).

Řízení je předáváno z nadřazené úrovně na úroveň nižší, tzn. z aplikační úrovně na úroveň IoT zařízení. Rozdělení se s výhodou využívá z důvodu snížení složitosti navrhovaných IoT systémů, kdy jednotlivé prvky IoT a komunikační prvky jsou rozděleny na menší a jednodušší komponenty a díky tomu jsou jednodušší na vývoj, návrh a eliminaci problému vzniklých v jednotlivých komponentech komplexního systému. Model, znázorněný na obrázku 2, standardizuje specifické komponenty v rámci každé úrovně a definuje přesné rozhraní mezi jednotlivými úrovněmi. Dále díky snaze o modulární řešení je umožněno různým typům hardwarových a softwarových systémů vzájemně komunikovat (Rayes, Samer, 2017).



Obrázek 2 – Referenční model IoT (Rayes, Samer, 2017)

### 2.3.1 Referenční model dle Cisco

Jiné zdroje, např. společnost Cisco rozděluje model IoT na sedm úrovní (viz. obrázek 3):

#### 1) Fyzická zařízení a ovladače

- Zahrnuje fyzická zařízení jako jsou senzory pro snímání a shromažďování informací.

#### 2) Konektivita

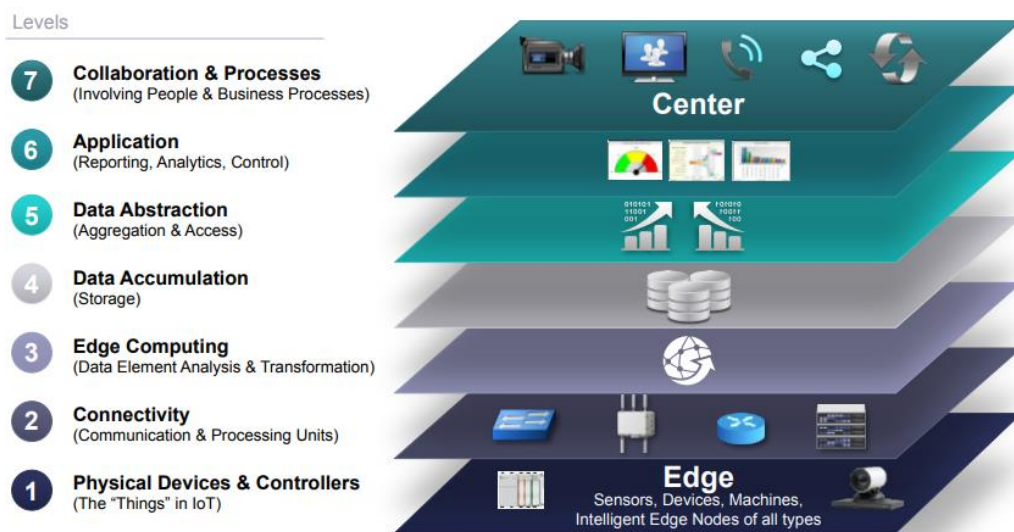
- Tato vrstva definuje komunikaci a zpracování dat prostřednictvím stávajících sítí.

#### 3) Edge Computing

- Zaštiťuje analýzu dat, kóduje a dekóduje, sumarizuje a transformuje veškerá naměřená data.

- 4) Akumulace dat
  - Řeší ukládání dat a jejich datovou funkčnost.
- 5) Abstrakce dat
  - Tato vrstva přijímá data odeslaná zařízením, která jsou uložena ve vrstvě akumulace dat a převádí je ve stejném formátu pro aplikaci vyšší úrovně.
- 6) Aplikace
  - Interpretuje informace a software pro interakce s úrovní abstrakce dat.
- 7) Spolupráce a procesy
  - Zabezpečuje předání správných dat koncovému uživateli nebo procesům ve správný čas (Singh, 2018).

### Internet of Things Reference Model



Obrázek 3 – Referenční model IoT (Cisco, 2014)

Senzory v IoT mohou být fyzické nebo virtuální (sběr dat z internetu). Komunikaci lze uskutečnit pomocí velkého množství protokolů v závislosti na konkrétní aplikaci. Mezi důležitá kritéria pro volbu vhodného protokolu mimo jiné patří:

- velikost přenášených dat,
- četnost přenosu dat,
- vzdálenost, na kterou je nutné data přenášet,
- geografické a geologické podmínky v místě instalace,
- počet připojených zařízení (K. Salah, 2019).

## **2.4 Principy pro návrh IoT systému**

V současné době neexistují pro IoT jednotné protokoly a standardizace. Z tohoto důvodu je možné přizpůsobit strukturu sítě na základě požadavků zákazníka. Každý navrhovaný IoT systém by však měl být:

- jednoduchý,
- bezpečný,
- chytrý,
- škálovatelný.

Bezpečnost a soukromí jsou v IoT velkou výzvou, to je mimo jiné způsobeno obrovským množstvím připojovaných zařízení a širokou škálou využívaných komunikačních protokolů a sítí (K. Salah, 2019).

### **2.4.1 Požadavky IoT systémů**

- minimální lidský zásah během provozu a konfigurace,
- dlouhá životnost baterie,
- zabezpečení a soukromí,
- zajištění kvality služeb (QoS),
- heterogenita zařízení v rámci IoT (K. Salah, 2019).

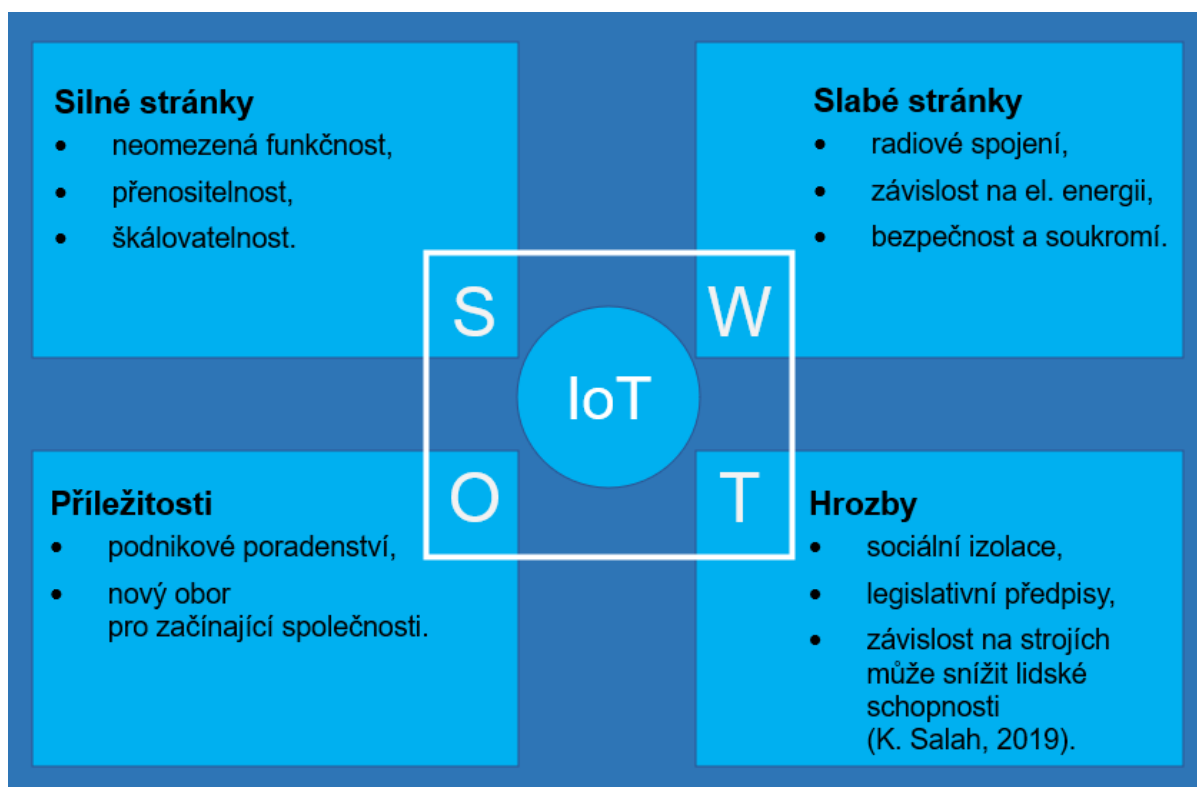


## 2.4.2 Výzvy pro IoT

- integrace hardwaru a softwaru od různých výrobců,
- interakce se zařízeními používajícími více bezdrátových protokolů,
- sběr a analýza dat v reálném čase,
- vzdálená správa a diagnostika zařízení,
- velké množství připojených zařízení.

Vybudování obecného rámce IoT se jeví jako velmi náročný úkol z důvodu heterogenity zařízení, technologií, platforem a služeb, které musí vzájemně fungovat v jednom společném systému (K. Salah, 2019).

## 2.5 SWOT analýza IoT dle publikace The Era of internet of things: towards a smart world



Obrázek 4 – SWOT analýza IoT (Tvorba autor)

Z uvedené SWOT analýzy (obrázek 4) lze konstatovat, že IoT je bezpochyby užitečný v mnohých oblastech lidské činnosti a dokáže nám zpříjemnit a zjednodušit každodenní život. Lze ho přizpůsobit konkrétním aplikacím díky velké škále komunikačních protokolů a koncových senzorů. Na druhou stranu je však třeba mít stále na paměti hrozby, které s tím přichází, neboť jednotlivé aplikace pro svoji funkčnost sbírají velká množství dat, která mohou být zneužita neoprávněnými osobami či institucemi.

### 3 Low Power Wide Area Network (LPWAN)

Aplikace IoT se uplatňují v různých odvětvích lidské činnosti od bezpečnostních systémů přes koncept Smart City po chytrou domácnost. Z důvodu tak širokého záběru využití IoT bylo nutné vyvinout robustní technické řešení, které bude adaptovatelné pro specifické potřeby využití v rámci IoT. Mezi tato specifika patří mimo jiné dlouhý komunikační dosah, velmi nízká spotřeba energie, nízké náklady na provoz a spolehlivost. Požadavky na LPWAN řešení jsou znázorněny na obrázku 5. Např. technologie ZigBee je nevhodná pro aplikace LPWAN kvůli svému krátkému komunikačnímu dosahu, s oblibou se ale uplatňuje v sítích PAN. Celulární technologie 3G a 4G se zase ukázaly jako energeticky velmi náročné. Tyto specifické potřeby zapříčinily vznik LPWAN sítí. Jedná se totiž o nízkoenergetické širokopásmové sítě založené na nízko bitové komunikaci (Mekki, Bajic, Chaxel, Meyer, 2018).



Obrázek 5 – Požadavky na LPWAN řešení (Tabbane, 2019)

## Mezi klíčové atributy LPWAN patří:

### Long Range

- Provozní dosah LPWAN záleží na okolním prostředí. V městském prostředí je v jednotkách kilometrů, naopak na otevřených oblastech dosahuje i více než 15 kilometrů.

### Low Power

- Zařízení jsou konstruována na velmi nízkou energetickou spotřebu. Baterie v koncových zařízeních vydrží v řádu let. Velmi významně je výdrž baterie ovlivněna klimatickými podmínkami okolí a četností zasílání dat ze zařízení do gateway.

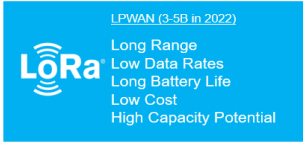
### Low Cost

- Z důvodu využití bezlicenčních pásem, dlouhého dosahu a hvězdicové topologie sítě se snižují náklady na vytvoření vlastní sítě (Behrtech, 2020).

## 3.1 Technologie pro IoT

### 3.1.1 LoRa

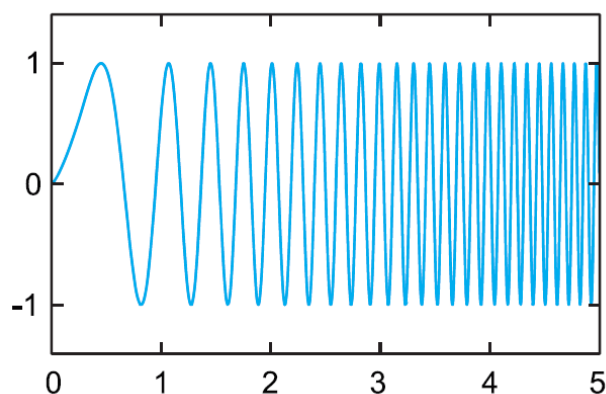
LoRa je radiofrekvenční modulační technologie patřící do LPWAN řešení. LoRa je zkratka anglického Long Range (dlouhý dosah), který tato technologie umožňuje. Technologii LoRa vytvořila společnost Semtech za účelem standardizace LPWAN. Technologie poskytuje komunikaci na velké vzdálenosti. V městských oblastech je dosah až 5 kilometrů a v otevřených oblastech až 15 kilometrů. Díky velmi nízké energetické náročnosti této technologie dosahuje výdrž baterie dle informací společnosti Semtech až 10 let. Síť je založena na otevřeném protokolu LoRaWAN. Díky hvězdicové topologii je tato technologie vhodná pro aplikace, které požadují komunikaci na velké vzdálenosti s malým datovým tokem a nízkou frekvencí odesílání dat (Semtech, 2019). Obrázek 6 popisuje porovnání LPWAN s ostatními typy sítí.

<u>Traditional Cellular</u> Long Range High Data Rates Low Battery Life High Cost	 LPWAN (3-5B in 2022) Long Range Low Data Rates Long Battery Life Low Cost High Capacity Potential	<u>Cat-M1</u> Long Range High Data Rates Low Battery Life Medium Cost
<u>Local Area Network (Wi-Fi)</u> Short Range High Data Rates Low Battery Life Medium Cost	<u>Narrow-Band IoT (NB-IoT)</u> Stationary Devices Short Range (indoor coverage) Low Data Rates Good Battery Life Low Cost	<u>Personal Area Network (Bluetooth®)</u> Very Short Range Low data rates Good Battery Life Low Cost

Obrázek 6 – Porovnání LPWAN s ostatními typy sítí (Semtech, 2019)

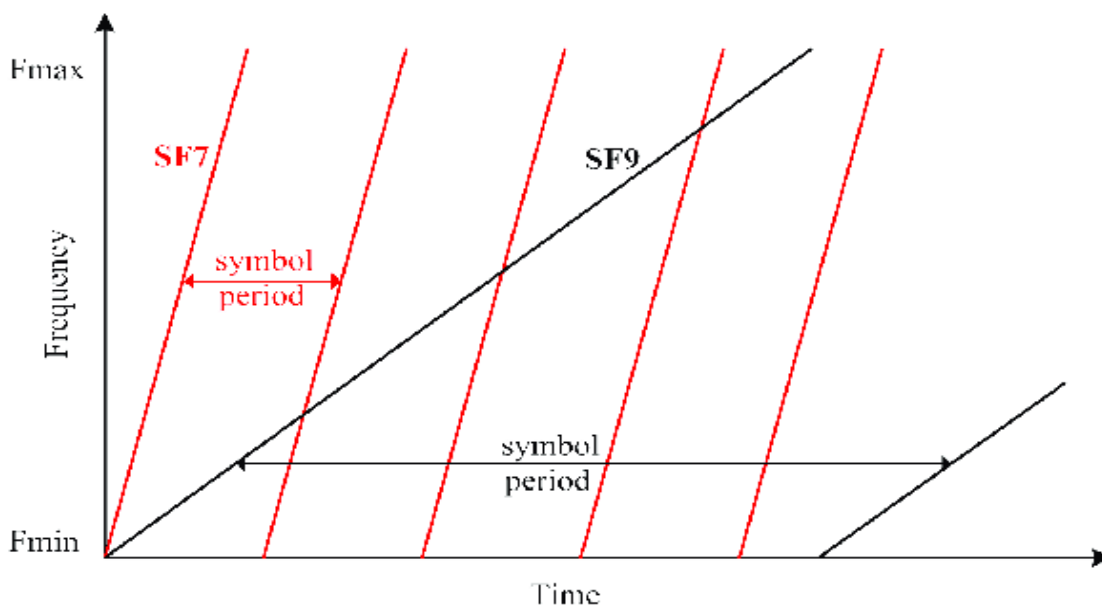
### 3.1.1.1 LoRa modulace

LoRa modulace je odvozena z existujícího Chirp Spread Spectrum (CSS). Uplink kanály mají pevnou šířku pásma buď 125 kHz nebo 500 kHz. Downlink kanály mají šířku 500 kHz. LoRa navíc využívá ortogonální faktory šíření, díky tomu je možné provádět adaptivní optimalizaci úrovně výkonu a přenosových rychlostí jednotlivých koncových uzlů a tím zvýšit životnost baterie. Koncové zařízení umístěné v blízkosti gateway přenáší data s nižším faktorem šíření a nejbližší koncové zařízení musí vysílat s mnohem vyšším faktorem šíření. LoRa je čistě fyzická vrstva dle sedmivrstvého modelu OSI. Signál vyzařovaný modulací LoRa se nazývá Chirp, název je hojně používán v radarové terminologii. Ilustrace LoRa Chirp Spread spektra je znázorněna na obrázku 7 (Semtech, 2019).



Obrázek 7 – Ilustrace LoRa Chirp Spread spektra (Semtech, 2019)

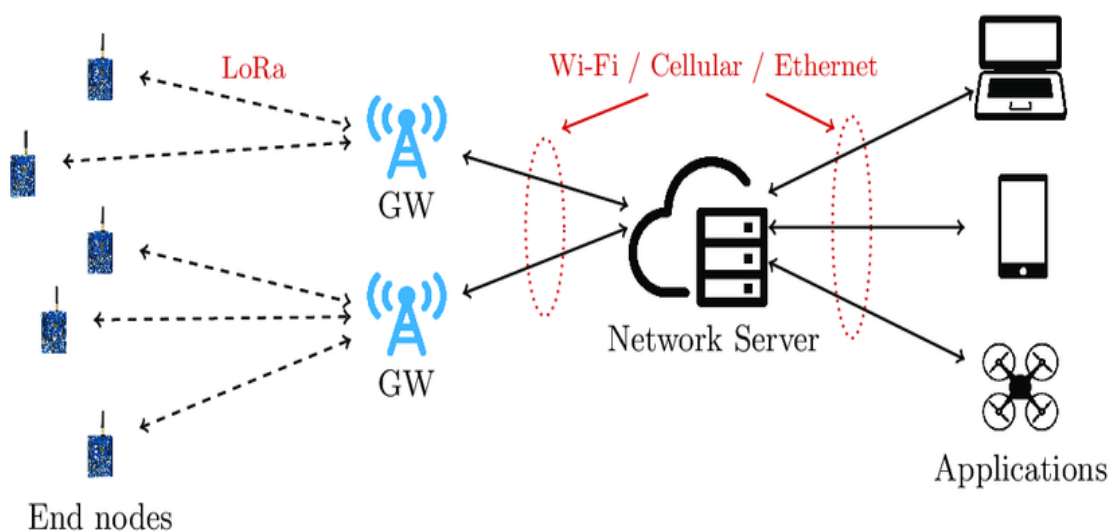
Přenosový čas signálu každého symbolu závisí na použitém faktoru šíření (Spreading factor). Vyšší spreading factor znamená delší přenosový čas (znázorněné na obrázku 8). Pro stejnou šířku pásma je přenosový čas pro symbol v Spreading factoru 8 dvakrát delší než přenosový čas pro přenos stejného symbolu v SF7 (Semtech, 2019).



Obrázek 8 – Závislost mezi periodou symbolu a faktorem šíření (Jovalekic, Pietrosemoli, Darby, Zennaro, Drndarevic, 2018)

### 3.1.1.2 Architektura LoRaWAN sítě

Na obrázku 9 je zobrazena architektura LoRaWAN.



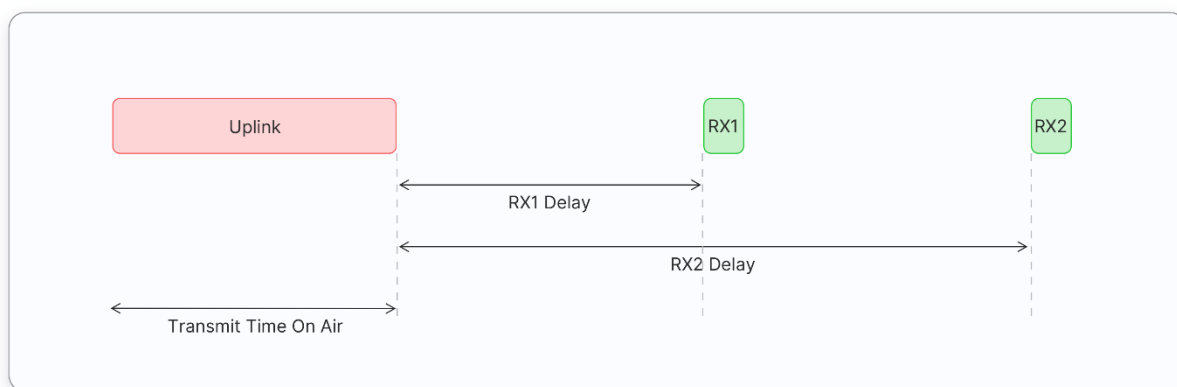
Obrázek 9 – Architektura LoRaWAN (Codeluppi, Cilfone, Davoli, Ferrari, 2020)

### 3.1.1.3 Třídy LoRaWAN zařízení

Koncová zařízení se v síti LoRaWAN rozdělují do tří kategorií podle jejich spotřeby a schopnosti jejich downlinku. Všechna LoRaWAN zařízení musí splňovat třídu A. Třída B a C jsou pouze rozšířené specifikace třídy A. Všechny tři třídy podporují uplink i downlink (The Things Network, 2020).

#### 3.1.1.3.1 Třída A

Zařízení třídy A může kdykoli poslat uplink zprávu. V okamžiku, kdy je uplink zprávy dokončen, tak koncové zařízení otevře dvě downlink okna. Mezi koncem uplink přenosu a začátkem přijímacích oken je minimální časová prodleva. Pokud síťový server během této časové prodlevy neodpovídá, tak další downlink bude následovat až po dalším uplinku. Schéma třídy A je na obrázku 10 (The Things Network, 2020).

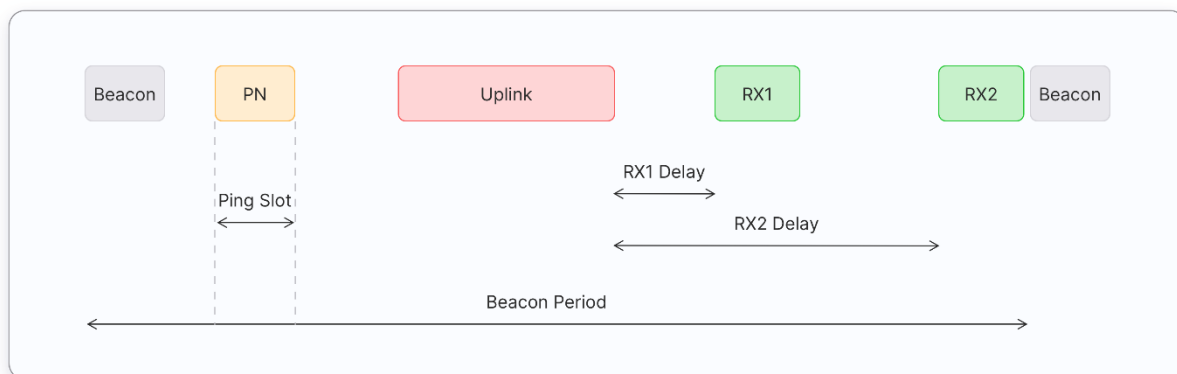


Obrázek 10 – Funkční schéma zařízení třídy A (The Things Network, 2020)

Zařízení třídy A jsou většinou napájena bateriemi a mají nejnižší spotřebu energie. Jsou vhodná pro řešení, ve kterých jsou udržovány dlouhé intervaly mezi uplinky (The Things Network, 2020).

### 3.1.1.3.2 Třída B

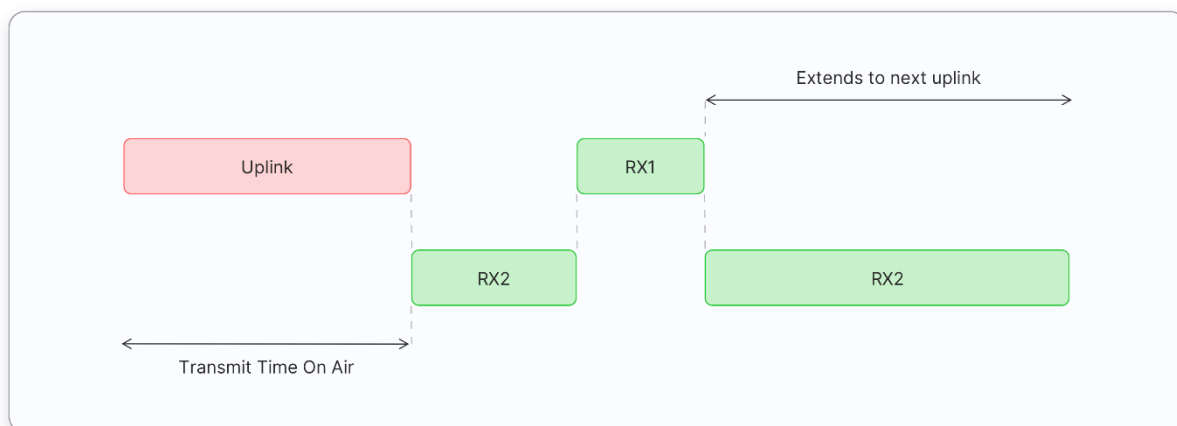
Zařízení třídy B navíc od třídy A obsahují downlink ping sloty v naplánovaných časech pro příjem zpráv ze síťového serveru. Pomocí časově synchronizovaných majáků vysílaných bránou zařízení pravidelně otevírají přijímací okna. Koncová zařízení třídy B mají nižší latenci než zařízení třídy A, z důvodu většího časového podílu v aktivním režimu je však životnost baterie podstatně kratší. Schéma třídy B je na obrázku 11 (The Things Network, 2020).



Obrázek 11 – Funkční schéma zařízení třídy B (The Things Network, 2020)

### 3.1.1.3.3 Třída C

Zařízení třídy C na rozdíl od třídy A nechávají otevřená přijímací okna, pokud nevysílají. To má za následek mnohonásobně kratší životnost baterie oproti zařízením třídy A, proto jsou velmi často napájena ze sítě. Nespornou výhodou je však komunikace s velmi nízkou latencí. Schéma třídy C je na obrázku 12 (The Things Network, 2020).



Obrázek 12 – Funkční schéma zařízení třídy C (The Things Network, 2020)

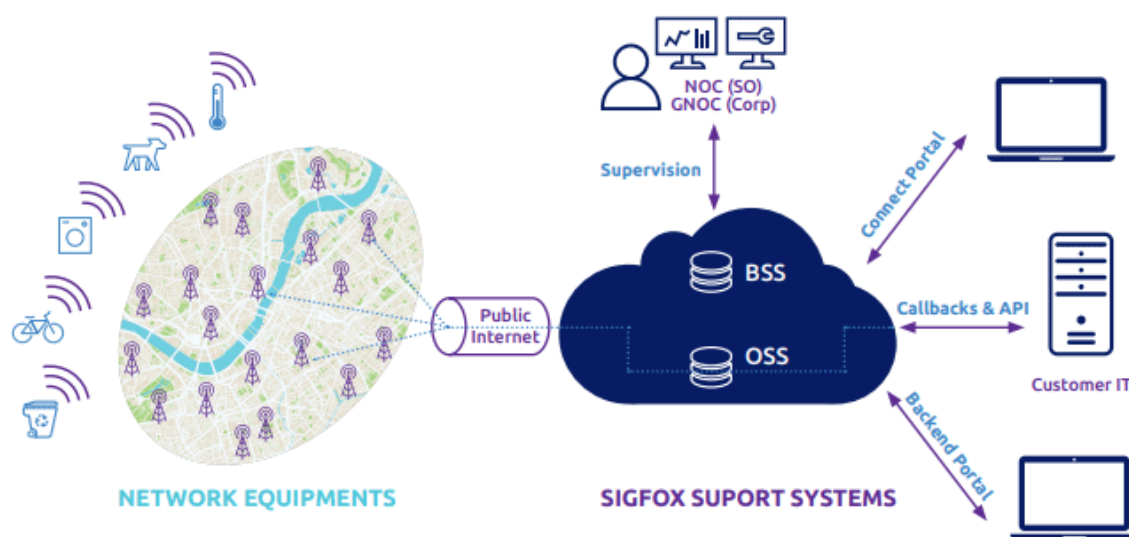
### 3.1.2 Sigfox

Technologie Sigfox využívá k přenosu zpráv nelicencované pásmo 192 kHz. Každá zpráva má šířku 100 Hz a je přenášena přenosovou rychlostí 100 nebo 600 bitů za sekundu v závislosti na regionu. Pro dosažení vysoké kvality služeb není přenos mezi sítí a zařízením synchronizován. Data jsou z důvodu odolnosti proti rušení přenášena třikrát na různých kanálech v různých časových intervalech. Toto se nazývá časová a frekvenční rozmanitost. Základnové stanice Sigfox monitorují celé pásmo 192 kHz. Z důvodu úspory energie je velikost posílaných zpráv 0-12 bajtů, což je ale dostatečný prostor k přenosu dat z koncového zařízení (Sigfox, 2018).

#### 3.1.2.1 Architektura sítě Sigfox

Architektura Sigfox řešení sestává ze dvou hlavních vrstev (viz obrázek 13).

- Vrstva síťového vybavení zahrnuje základnové stanice, antény a další prvky, které mají za úkol příjem dat z koncových zařízení a jejich přenos do vrstvy podpůrných systémů sítě Sigfox.
- Vrstva podpůrných systémů sítě Sigfox má na starosti zpracování dat a jejich odesílání do koncové aplikace. Dále tato vrstva poskytuje vstupní bod pro interakci se systémem prostřednictvím webových rozhraní nebo API, monitoruje stav sítě a obsahuje nástroje pro analýzu dat (Sigfox, 2018).



Obrázek 13 – Architektura Sigfox (Gabriel, 2019)



Data z koncových zařízení jsou odesílána bezdrátově do základnových stanic, následně procházejí páteří sítí, která je často postavena na technologii DSL se zálohou prostřednictvím 4G protokolu. Zprávy do páteří sítě přicházejí v několika replikách. Do koncové aplikace je však samozřejmě uložena tato zpráva pouze jednou (Sigfox, 2018).

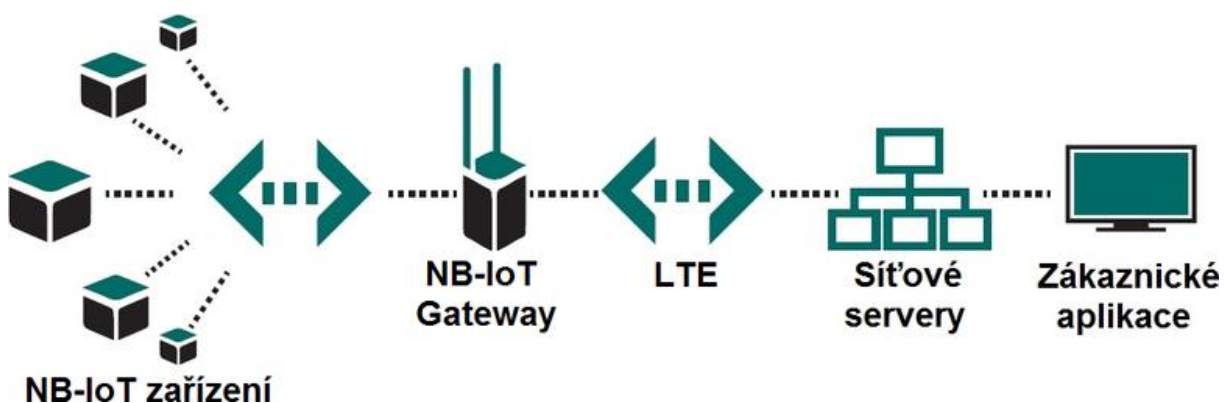
### 3.1.3 NB-IoT

Narrowband IoT je protokol vyvinutý společností 3GPP pro mobilní bezdrátovou komunikaci. Technologie je navržena pro provoz v rámci stávajících technologií GSM a LTE. V porovnání s LTE-M má NB-IoT lepší pokrytí s nižšími přenosovými rychlostmi. Protokol podporuje úzké frekvenční spektrum v licencovaném pásmu mobilních operátorů 200 kHz. Koncová zařízení musí obsahovat komunikační modul se SIM kartou pro jejich jednoznačnou identifikaci, která je nutná pro komunikaci. Na rozdíl od technologií LoRa a Sigfox je NB-IoT však dostupný všude tam, kde je dostupná LTE síť operátora.

NB-IoT umožňuje připojení více než 100 tisíc zařízení na buňku. Využívá modulaci QPSK, FDMA v uplinku a OFDMA v downlinku. Uváděná životnost baterie je až 10 let s průměrným přenosem 200 bajtů za den (Lom, Přebyl, 2017).

#### 3.1.3.1 Architektura NB-IoT

Architektura NB-IoT je znázorněna na obrázku 14.



Obrázek 14 – Architektura NB-IoT (Lom, Přebyl, 2017)

### 3.1.4 LTE – M

LTE – M je protokol standardizovaný společně s NB-IoT jako součást 3GPP Release 13. LTE Cat M1 neboli LTE – M je zjednodušenou verzí 4G LTE podporující CloT díky snížení spotřeby energie a rozšířeným pokrytím. Životnost baterie je uváděna na více než 10 let provozu. V porovnání s LTE dosahuje LTE-M nižší nominální přenosové rychlosti (přibližně 1 Mbps), a to díky snížení dostupné šířky pásma z 20 MHz na 1,4 MHz. LTE-M a NB-IoT podporují eDRX a PSM. LTE – M nekonkuruje NB-IoT a výběr vhodné technologie závisí na pokrytí a spotřebě energie. V případě využití v CloT je latence do 10 s (Herrero, 2022).

### 3.1.5 Telensa

Telensa je technologie LPWAN, která se zaměřuje na aplikace v konceptu Smart City. Primárně na chytré osvětlení a parkování. Technologie Telensa se pro správu veřejného osvětlení využívá např. v anglickém městě Sheffield. S výhodou jsou často sloupky veřejného osvětlení osazeny několika různými senzory (senzory teploty, vlhkosti, hladiny hluku atd.). Telensa pomocí rozhraní API nabízí celý rámec pro budování chytrého města, díky kterému města ušetří náklady nejen v oblasti veřejného osvětlení. Telensa nepodporuje komunikaci uvnitř budov. Fyzická vrstva Telensa je založena na přenosu UNB v pásmu 915/868 MHz ISM, která poskytuje velmi nízké přenosové rychlosti. Telensa podporuje 625 bps a 500 bps uplink a downlink. Telensa obsahuje centrální řídicí systém Telensa PLANet, který koordinuje end-to-end operace a minimalizuje spotřebu energie a umožňuje automatickou detekci chyb. Základnová stanice Telensa může komunikovat až s 5000 zařízeními s dosahem až 2 km v městském prostředí a až 4 km ve volném prostředí (Herrero, 2022).

### 3.1.6 DASH7

DASH7 Alliance Protocol (D7AP) je otevřený protokol patřící do technologií LPWAN. Fyzická a linková vrstva je odvozena od normy ISO/IEC 18000-7, což je otevřený standard pro bezlicenční ISM pásma 433, 868 a 915 MHz. Tato technologie poskytuje dosah až 2 km s nízkou latencí a dlouhou výdrží baterie. Topologie protokolu je strom s 2-GFSK modulací. Původně byl D7AP vyvinut pro vojenské účely (Herrero, 2022).

### **3.1.7 ZigBee**

ZigBee je protokol založený na standardu IEEE 802.15.4. Pro tento protokol je typická nízká přenosová rychlost a velmi nízká spotřeba energie. Relativně nízká pořizovací cena umožňuje široké nasazení technologie v aplikacích bezdrátového ovládání a monitorování. ZigBee je v Evropě provozováno v pásmu 868 MHz. Přenosové rychlosti se pohybují od 20 do 250 kilobitů za sekundu. Každá síť musí mít jedno koordinační zařízení. Síťová vrstva podporuje topologii hvězda i strom (Gurpreet, Raghav, Karamjeet, Sahil, 2012). Přenosová vzdálenost se pohybuje v rozmezí 1 až 100 m (Mihajlov, Bogdanoski, 2011).

### **3.1.8 Úvahy o 5G a B5G**

Řešení jako NB-IoT a LTE-M postupně přechází do scénářů 5G jako součást evoluce verzí 3GPP. V této souvislosti se 3GPP v 15. vydání zabývá úpravami rádiové přístupové technologie (5G New Radio) potřebnými pro podporu 5G NB-IoT a 5G LTE-M. V rámci tohoto vývoje je jedním z hlavních požadavků na budoucí aplikace IoT masivní přístup. Síť Beyond 5G, včetně budoucích sítí 6G se pokusí vyřešit tento a další požadavky s cílem zvýšit hustotu na více než milion zařízení na kilometr čtvereční, prodloužit životnost baterie na 20 let, podporovat pokrytí vesmír-vzduch-země-moře, snížit latenci na méně než sekundu a zvýšit polohovou přesnost na 1 metr (Herrero, 2022).

## 3.2 Porovnání technologií pro IoT

Každá výše uvedená technologie pro IoT má své silné a slabé stránky, a proto je nutné při výběru vhodné technologie pro danou aplikaci brát v úvahu mnoho faktorů. Mezi hlavní faktory patří dosah, škálovatelnost, náklady na výstavbu sítě, latence, životnost zařízení a kvalita služeb.

Z pohledu QoS je NB-IoT preferováno pro aplikace, které vyžadují zaručenou kvalitu služby na úkor vyšších nákladů. Technologie LoRaWAN a Sigfox jsou vhodné spíše pro aplikace, ve kterých není nezbytně nutná zaručená kvalita služby.

LoRa, Sigfox a NB-IoT jsou navrženy pro občasné posílání dat, a tudíž jsou koncová zařízení většinu času v úsporném režimu. Díky tomu se prodlužuje životnost jejich baterií. U NB-IoT však koncová zařízení spotřebují více energie z důvodu synchronní komunikace potřebné pro zajištění QoS. U LoRaWAN řešení je životnost baterie u koncových řešení velmi úzce vázaná se třídou daného zařízení a frekvencí posílání dat.

V otázce škálovatelnosti se jeví jako nejlepší volba technologie NB-IoT, která umožňuje připojení více než 100 tisíc zařízení na jednu základnovou stanici. Oproti tomu Sigfox a LoRaWAN nabízí 50 000 zařízení na buňku. Maximální využitelný přenos dat u NB-IoT je až 1600 bajtů, u řešení LoRaWAN je to maximálně 243 bajtů a u Sigfox maximálně 12 bajtů, což může v některých aplikacích představovat omezující kritérium.

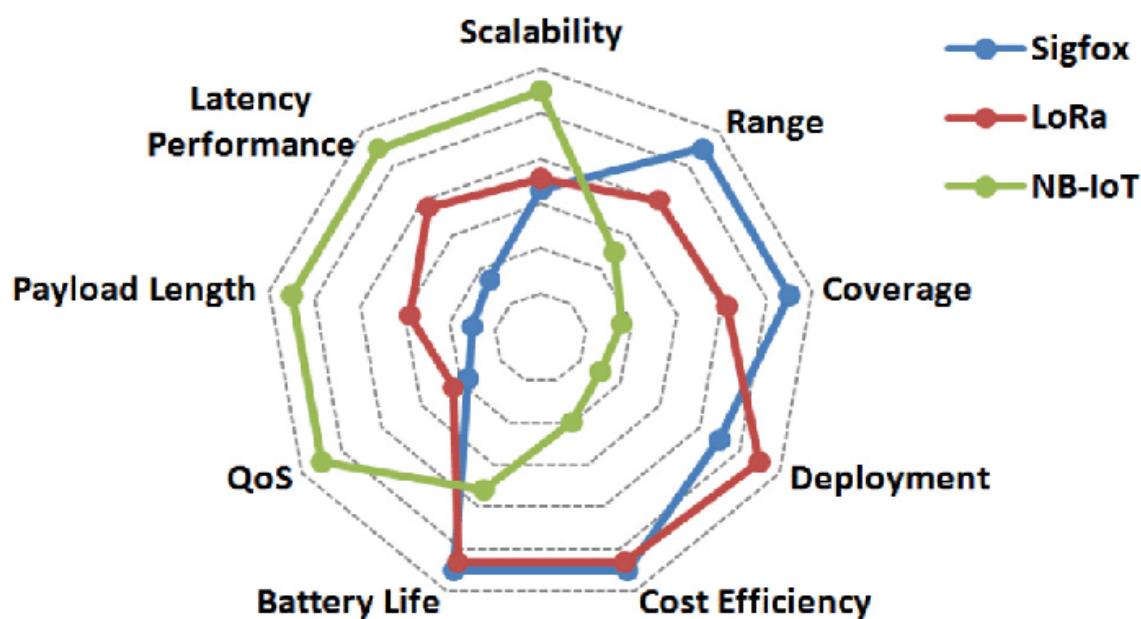
Nejmenší dosah z uvedených technologií nabízí NB-IoT řešení, které je vhodné pro koncová zařízení v interiérech budov. Z důvodu nasazení v pásmu LTE není NB-IoT dostupné v oblastech, kde není LTE pokrytí zřízeno. Největší pokrytí zajišťují základnové stanice sítě Sigfox, u kterých dosahuje pokrytí ve volném území až 40 km. LoRaWAN umožňuje pokrytí z jedné základnové stanice v rozsahu až 20 km (Mekki, Bajic, Chaxel, Meyer, 2018).

V tabulce 1 jsou shrnuty základní parametry jednotlivých technologií.

Tabulka 1 – Základní porovnání technologií LoRa, Sigfox a NB-IoT (Qin, Li, Wang, Li, 2021), (Deutsche Telekom AG, 2021)

Technologie	LoRa	Sigfox	NB-IoT
<b>Dosah</b>	1 km v zástavbě 20 km volný terén	10 km v zástavbě 40 km volný terén	1 km v zástavbě 10 km volný terén
<b>Šířka pásma</b>	250 kHz	100 Hz	200 kHz
<b>Downlink kapacita</b>	Velmi nízká	Velmi nízká	Neomezená
<b>Max. přenosová rychlost</b>	0,1 kbit/s	5,47 kbit/s	27 kbit/s
<b>Licencované pásmo</b>	Ne	Ne	Ano

Grafické porovnání technologie LoRa, Sigfox a NB-IoT je na obrázku 15.



Obrázek 15 – Grafické porovnání technologie LoRa, Sigfox a NB-IoT (Mekki, Bajic, Chaxel, Meyer, 2017)

## **4 LoRa síť v areálu hlavního závodu Škoda Auto a.s. v Mladé Boleslavi**

Z důvodů zajištění kontinuálního vývoje a implementace IoT se společnost Škoda Auto a.s. rozhodla ve svém hlavním závodě v Mladé Boleslavi nainstalovat komunikační síť LoraWAN. Současné hlavní využití této sítě je sledování dopravní zátěže jednotlivých komunikací v rámci hlavního závodu společnosti v Mladé Boleslavi, které lze dále vhodně využít napříč různými odděleními. Dále se počítá s rozvojem sítě pro další využití.

V pilotním projektu bylo nainstalováno do vozovek v rámci areálu společnosti celkem 18 dopravních detektorů na páteřních komunikacích. Jedná se o detektory typu DM-231CLS od společnosti Citiq s.r.o., které jsou v další části detailněji popsány včetně technických parametrů. Součástí provozované LoraWAN sítě je Dashboard, na kterém si oprávnění uživatelé mohou naměřená data prohlížet a po stažení s nimi dále pracovat.

Po úspěšném pilotním projektu bylo v prosinci 2020 nainstalováno dalších 12 dopravních detektorů tak, aby bylo možné získat více dat o pohybu různých typů dopravních prostředků po areálu společnosti. V průběhu roku 2020 přibýly také senzory pro sledování klimatických podmínek a veřejného osvětlení v jednotlivých částech areálu společnosti. V této práci se zaměřím primárně na analýzu dat z dopravních senzorů pomocí srovnání s fyzickým sčítáním dopravy.

Síť je v současné době rozšiřována ve všech hlavních výrobních závodech společnosti ŠKODA AUTO a.s., a to v Mladé Boleslavi, Kvasinách a Vrchlabí.

### **4.1 Dopravní klasifikátor**

Tento senzor v podobě válce s rozměry 100x130 mm dokáže počítat a klasifikovat dopravní proud. Je v nonstop provozu a každých 5 minut zasílá data do cloudu a z něj dále do dashboardu. Je schopen klasifikovat až 10 tříd dle délky vozidla a až 5 nastavitelných rychlostních tříd. Dopravní klasifikátor je magnetometrem, tj. klasifikuje vozidla dle změny geomagnetického pole způsobené průjezdem vozidla. Garantovaná výdrž baterie v senzoru je až 3 roky. Avšak v praxi nastala situace, kdy byla nutná výměna baterie u prvotně instalovaných 18 senzorů po zhruba 13měsíčním provozu. Po této době byl ve zmíněných senzorech přehrán software a vyměněna baterie. Mezi další využití tohoto senzoru patří monitorování aktuální obsazenosti parkovacích ploch. Senzor dokáže rozlišit směr jízdy vozidla a lze ho taktéž vybavit čidlem pro monitorování teploty vozovky. Využití nalezne také v železniční dopravě k detekci průjezdu vlaků (Citiq, 2022).

## 4.2 Instalace dopravního klasifikátoru do vozovky

V areálu společnosti Škoda Auto a.s. byla provedena intruzivní instalace pomocí jádrového vývrtu o průměru 100 mm. Jádrový vývrt musí být proveden ve středové ose jízdního pruhu mimo jízdní dráhu kol vozidel. Instalace spočívá v provedení vývrtu hlubokém přibližně 300 mm, podsypání detektoru křemičitým pískem, zapuštění detektoru a následným zaasfaltováním otvoru studenou asfaltovou směsí. Doba instalace jednoho detektoru činí přibližně 20 minut (Citiq, 2022).

Postup instalace dopravního klasifikátoru vozovky je zobrazen na obrázku 16,17,18.



Obrázek 16 – Jádrový vývrt pro dopravní klasifikátor (Beneš, 2020)



Obrázek 17 – Dopravní klasifikátor před instalací (Beneš, 2020)



Obrázek 18 – Zaasfaltování otvoru studenou asfaltovou směsí (Beneš, 2020)

### 4.3 Zaměření senzorů ve vozovce

Z důvodu zamezení poškození instalovaných senzorů při údržbě komunikací bylo provedeno zaměření přesné geografické polohy každého senzoru. Zaměřeny byly všechny dopravní klasifikátory v areálu. Na obrázku 19 je názorná ukázka přípravy geodetického zaměření senzoru.

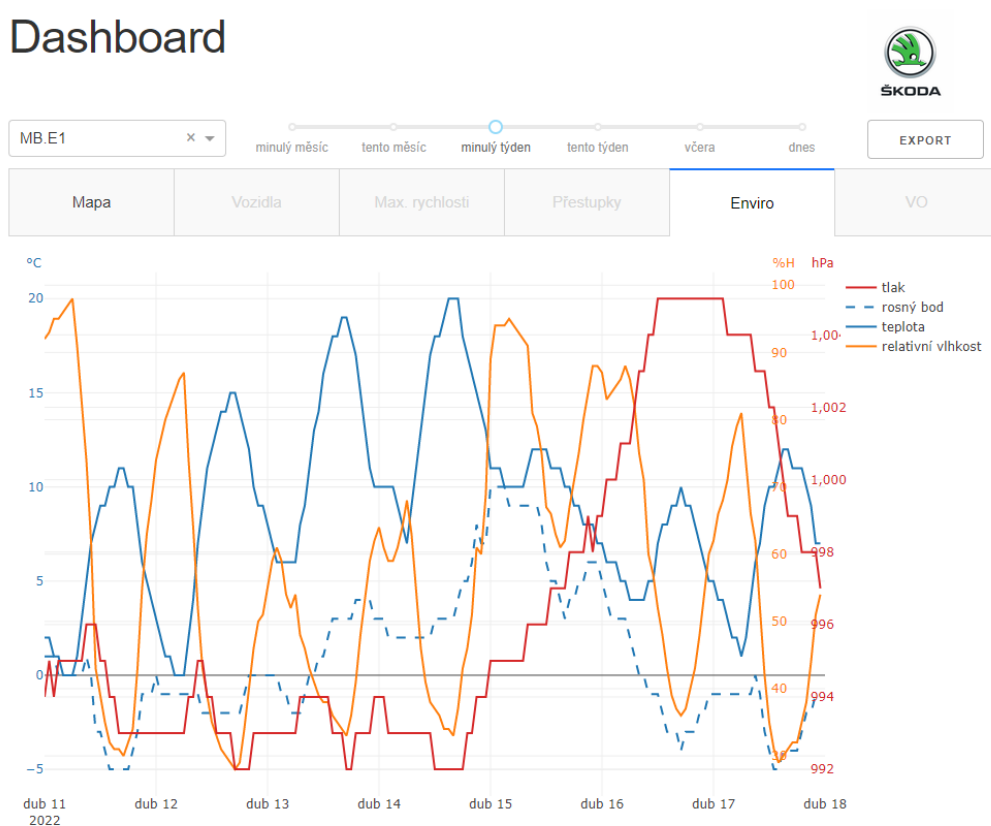


Obrázek 19 – Senzor MB05 a MB06, značení pro zaměření (Foto autor)



## 4.4 Meteorologické senzory

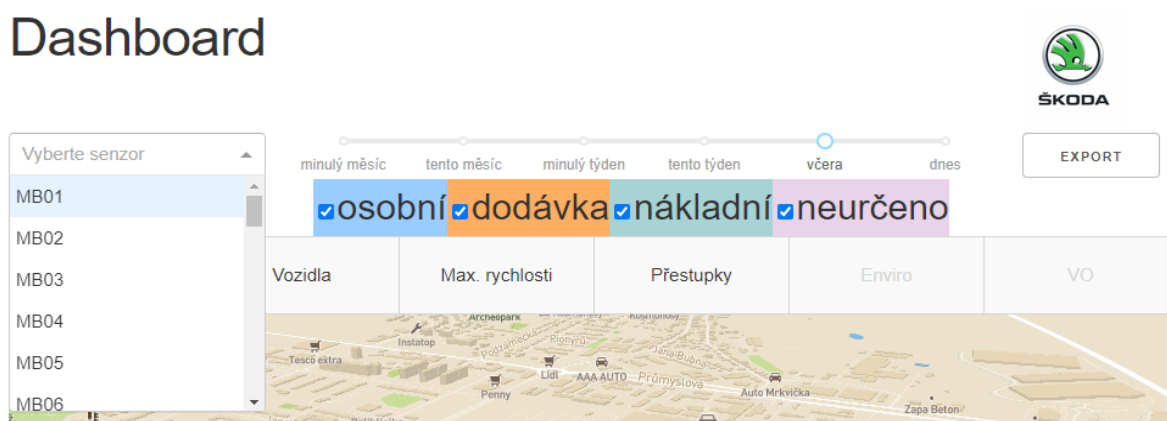
V dashboardu je možné v záložce Enviro prohlížet data z meteorologických senzorů umístěných v areálu společnosti v Mladé Boleslavi. Tyto senzory měří tlak vzduchu, teplotu, relativní vlhkost a rosný bod. Tato data lze následně využít například pro predikci nutnosti údržby pozemních komunikací v zimním období. Z obrázku 20 je patrné, že v současném dashboardu se zobrazují všechny měřené veličiny do jednoho grafu, do budoucna by bylo vhodné přidat možnost uživatelského filtrování pouze požadované veličiny, tak jako je to u dopravních senzorů.



Obrázek 20 – Výstup z meteorologického senzoru v Dashboardu (Interní Dashboard ŠKODA AUTO a.s.)

## 4.5 Dashboard

Součástí LoRa řešení v areálu společnosti Škoda Auto a.s. v Mladé Boleslavi je jednoduchý dashboard, který slouží k reprezentaci naměřených dat. V levé horní části Dashboardu se nachází rozevírací seznam pro výběr požadovaného senzoru. Dále je možné zobrazovaná data vyfiltrovat pomocí časové osy, která nabízí data z několika časových období. Dashboard také nabízí filtrování podle kategorií vozidel v daném souboru dat. Export dat je možný pomocí tlačítka EXPORT v pravém horním rohu stránky. Výše popsané je ukázáno na obrázku 21. Data z tohoto dashboardu byla použita při tvorbě aplikace vykreslující intenzitu dopravy v jednotlivých lokalitách výrobního závodu.

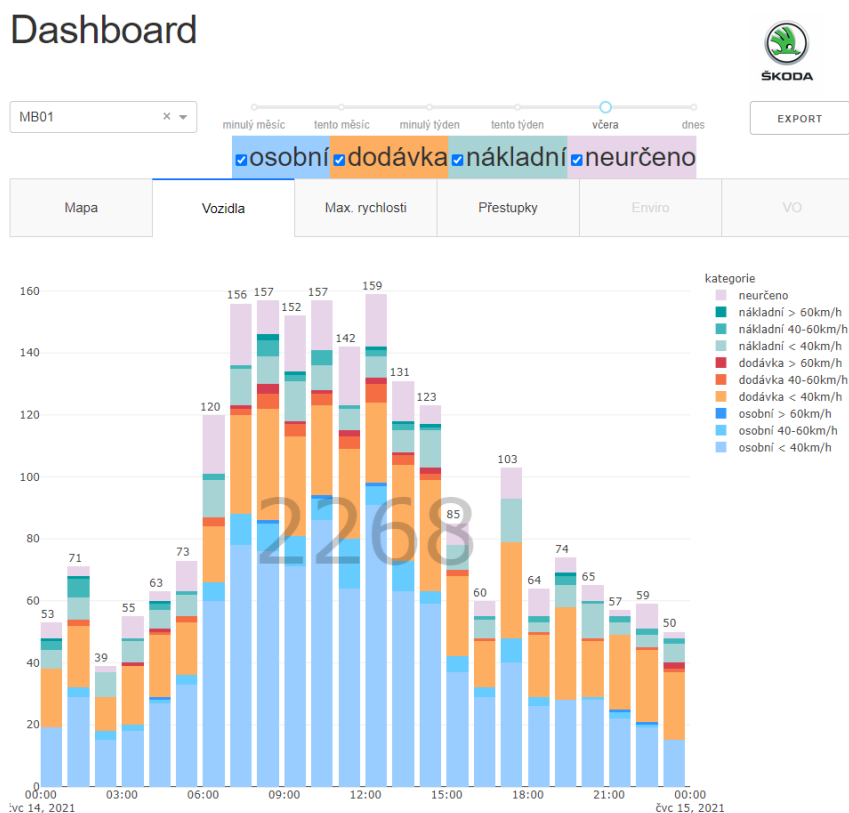


Obrázek 21 – Náhled úvodní stránky Dashboardu s výběrem senzoru (Interní Dashboard ŠKODA AUTO a.s.)

V liště nad přehledovou mapou areálu se nachází nabídka s kartami *Vozidla*, *Max. rychlosti*, *Přestupky*, *Enviro* a *VO*.

## 4.5.1 Karta Vozidla

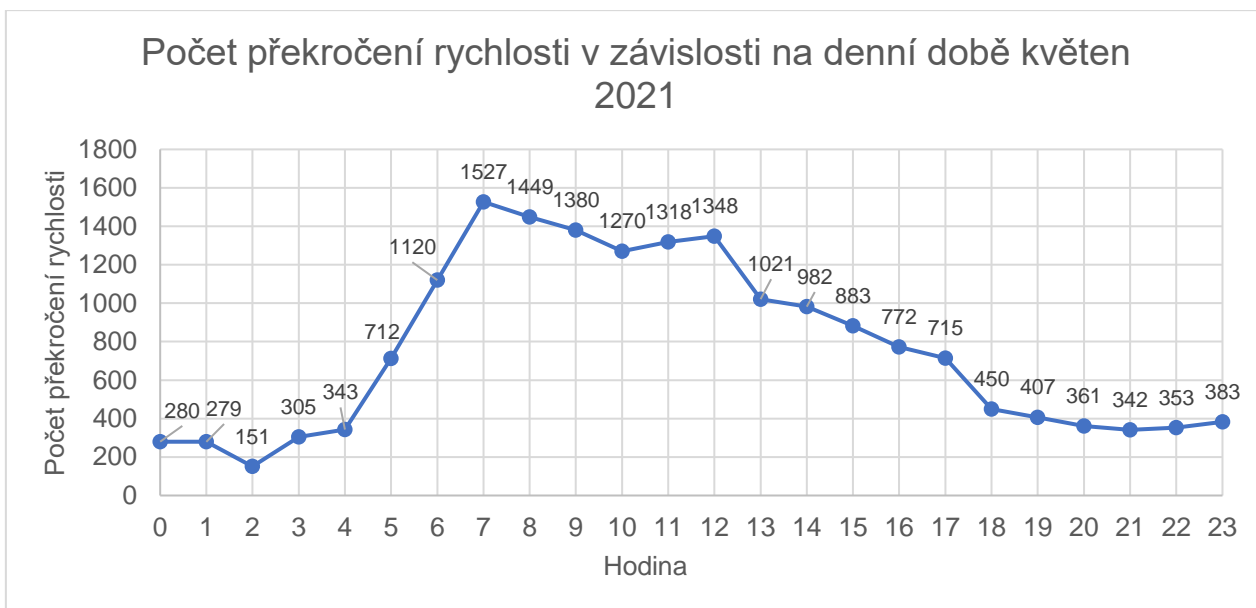
Na kartě *Vozidla* se po zvolení požadovaného senzoru, časového období a kategorie vozidla zobrazí sloupcový graf sestávající z barevně odlišených částí sloupce v závislosti na zvolené kategorii vozidla. Výchozí zobrazení sloupců je v hodinových hodnotách, tak jako na obrázku 22.



Obrázek 22 – Přehled senzoru MB01 v dashboardu (Interní Dashboard ŠKODA AUTO a.s.)

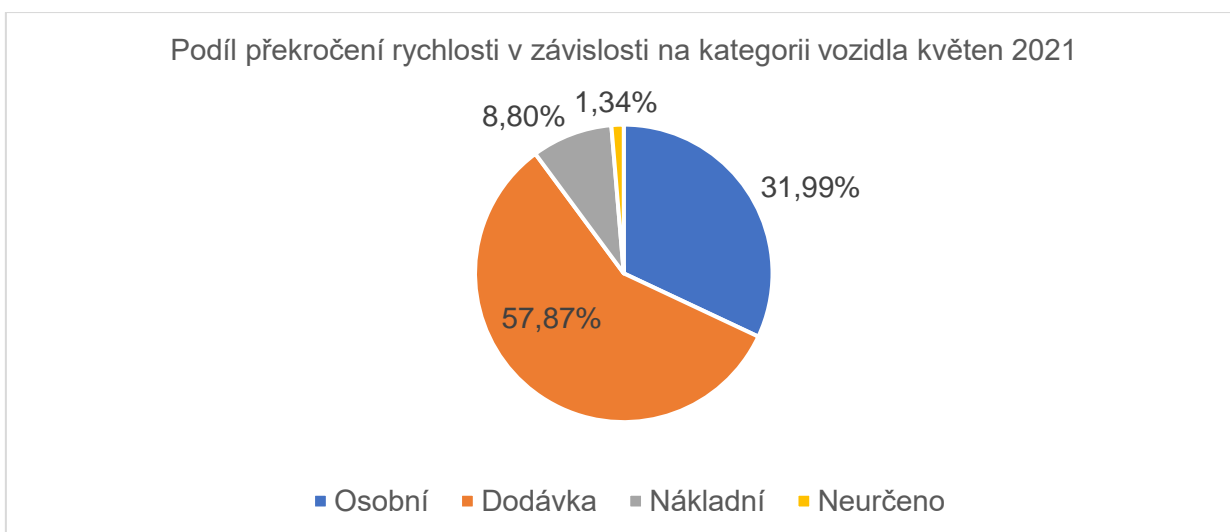
## 4.6 Analýza překročení maximální povolené rychlosti pomocí dat z dopravních senzorů LoRa

Pro účely této závěrečné práce jsem z naměřených dat vypracoval analýzu překročení maximální povolené rychlosti za květen 2021 na všech 30 instalovaných dopravních senzorech. V areálu je plošně omezena maximální povolená rychlost na 40 km/h, pokud není uvedeno jinak. Za přestupek instalované dopravní senzory považují naměřenou rychlost 60 km/h a vyšší.



Graf 1 – Počet překročení rychlosti v závislosti na denní době (Tvorba autor)

Z provedené analýzy dat vyplynulo, že došlo za uvedený měsíc celkem k 18 151 překročení maximální povolené rychlosti. Nejvíce zaznamenaných překročení povolené rychlosti bylo mezi 7.- 8. hodinou ranní, což může být způsobeno příjezdem většiny zaměstnanců využívajících služební vozidlo do zaměstnání v areálu společnosti. Na grafu 1 je vidět rozložení počtu překročení povolené rychlosti v závislosti na denní době z dat za celý vybraný měsíc. Zajímavé je taktéž zjištění, že nejvíce překročení povolené rychlosti bylo spácháno dodávkovými automobily, téměř 58 %. To je pravděpodobně způsobeno velkým počtem dodávek svážejících řidiče nově vyrobených vozů z odstavných ploch. Kompletní přehled je k vidění na grafu 2.



Graf 2 – Podíl překročení rychlosti na kategorii vozidla (Tvorba autor)

## **4.7 Přenos Dashboardu LoRa do interní sítě LoRa ve Škoda Auto a.s.**

V druhé polovině června 2022 byl z důvodu potencionálního bezpečnostního rizika započat přenos všech stávajících senzorů LoRa do interní LoRa sítě Škoda Auto, kterou spravuje IT oddělení společnosti. V budoucnu mají být všechna zařízení sítě LoRa implementována výhradně do interní sítě. Z tohoto důvodu již nebude výše uvedený dashboard dostupný a postupně budou data přenášena do interních dashboardů Škoda Auto.

## **4.8 Dopravní průzkum**

Pro účely ověření přesnosti počtu a klasifikace vozidel instalovanými dopravními senzory ve vozovce jsem provedl dopravní průzkum. Dopravní průzkum trval 60 minut, nicméně ze senzorů jsou počty vozidel zasílány v 5minutových intervalech, a proto průzkum začíná bezprostředně po odeslání dat z předchozího intervalu (za 60 minut by mělo dojít v ideálním stavu k odeslání 12 zpráv). Z důvodu kategorizace vozidel senzory pouze na osobní, dodávková, nákladní a neurčeno jsem dopravní průzkum prováděl se stejnými druhy vozidel. Dle TP 189 je vhodné zařadit mezi kategorie také motocykly, autobusy a jízdní kola (Ministerstvo dopravy, 2018). Tyto druhy vozidel se však v řešené oblasti z důvodu uzavřeného průmyslového areálu běžně nevyskytují.

### **4.8.1 Dopravní průzkum u senzoru s vysokým podílem neurčených vozidel MB06**

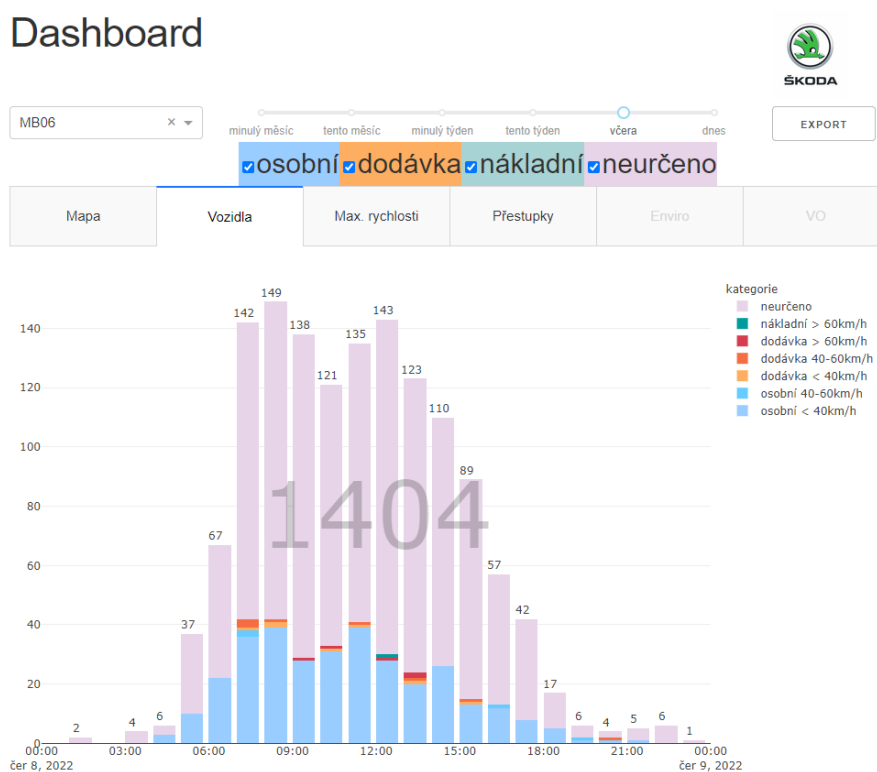
Z důvodu objasnění možných příčin vysokého podílu neurčených vozidel jsem provedl dopravní průzkum na vytipovaném senzoru. Průzkum byl proveden na senzoru MB06 dne 8.6.2022 v čase 6:33:03 – 7:33:04. Současně jsem provedl dopravní průzkum i na senzoru MB05 v opačném jízdním směru. Senzor MB05 naopak dlouhodobě vykazuje velmi malý podíl neurčených vozidel.

Při dopravním průzkumu jsem na senzoru MB06 celkově zaznamenal 106 vozidel. V dashboardu bylo ve zkoumaném časovém intervalu zaznamenáno 100 vozidel. Výsledek porovnání obou způsobů sběru dat lze považovat za velmi dobrý, výsledek mohl být ovlivněn velmi malými mezerami mezi některými projíždějícími vozidly nebo lidským faktorem. Kategorizace vozidel na tomto senzoru se však jeví jako velmi nespolehlivá. V tabulce 2 jsou znázorněny data s počty vozidel jednotlivých kategorií z dopravního průzkumu

a kategorizací s daty z dashboardu. Například v prvním pětiminutovém intervalu mezi 06:33:03 - 06:38:02 byly průzkumem zaznamenány 3 OA, Dashboard zobrazoval 1 OA. To může být způsobeno nemožností synchronizace času v dashboardu s časem použitým pro dopravní průzkum. Přehled ze senzoru MB06 ze dne 8.6.2022 je na obrázku 23.

Tabulka 2 – Přehled počtu vozidel z dopravního průzkumu (Tvorba autor)

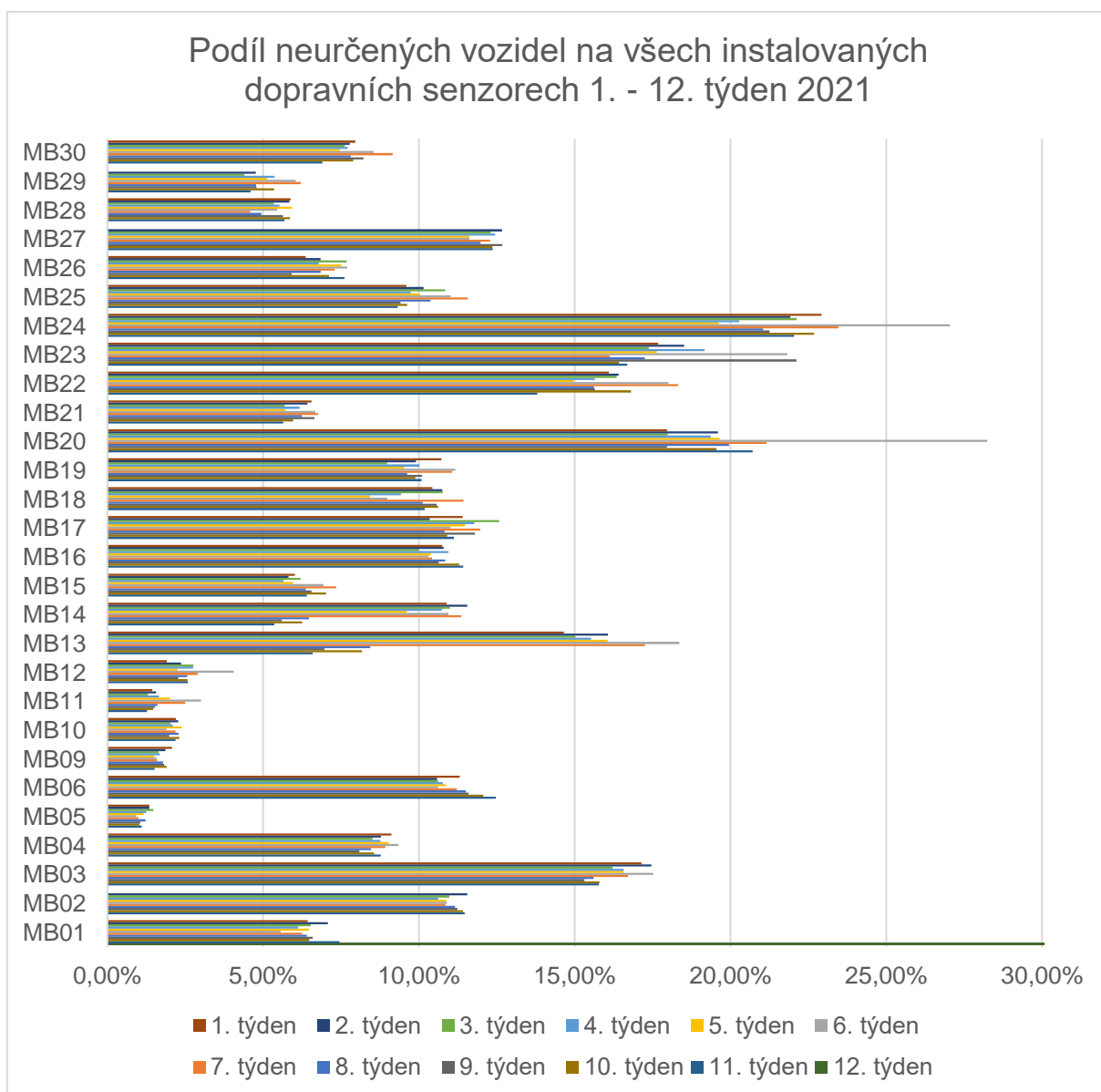
	DASHBOARD				PRŮZKUM			
MB06	OA	DOD	NA	NEURČENO	OA	DOD	NA	NEURČENO
2022-06-08 06:38:03	1	0	0	2	3	0	0	0
2022-06-08 06:43:03	1	0	0	2	3	1	0	0
2022-06-08 06:48:03	3	0	0	1	4	1	0	0
2022-06-08 06:53:03	4	0	0	4	3	2	2	0
2022-06-08 06:58:03	3	0	0	6	7	1	1	0
2022-06-08 07:03:03	1	0	0	7	5	4	0	0
2022-06-08 07:08:03	3	0	0	4	5	3	0	0
2022-06-08 07:13:03	1	1	0	5	5	1	0	0
2022-06-08 07:18:03	5	0	0	5	6	2	1	0
2022-06-08 07:23:03	7	0	0	2	7	2	0	0
2022-06-08 07:28:03	3	1	0	15	18	2	0	1
2022-06-08 07:33:04	4	0	0	9	9	7	0	0



Obrázek 23 – Přehled ze senzoru MB06 dne 8.6.2022 (Interní Dashboard ŠKODA AUTO a.s.)

## 4.8.2 Analýza podílu neurčených vozidel v dashboardu

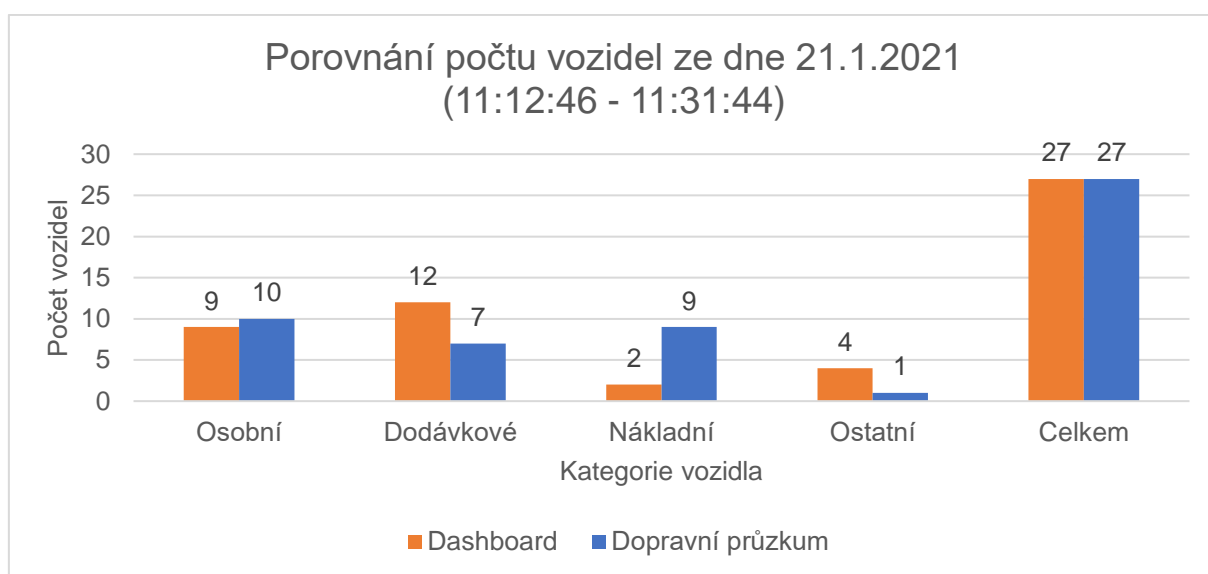
V problematice neurčených vozidel jsem dále z nasbíraných dat vytvořil grafické znázornění podílu neurčených vozidel téměř na všech dopravních senzorech v areálu. Z přehledu jsou vyloučeny senzory MB07 a MB08 z důvodu dlouhodobé stavební činnosti ve vybraném časovém intervalu leden až březen 2021. Z grafu 3 vyplývá, že nejvyšší průměrnou hodnotu neurčených vozidel činila 22,22 % na senzoru MB24.



Graf 3 – Podíl neurčených vozidel na všech instalovaných senzorech (Tvorba autor)

### 4.8.3 Dopravní průzkum u senzoru s vysokým podílem neurčených vozidel MB03

Dne 21.1.2021 jsem provedl dopravní průzkum na senzoru MB03. Dopravní průzkum byl iniciován z důvodu častého přejíždění nákladních vozidel do protisměru, což má za následek špatné výsledky v kategorizaci vozidel tímto senzorem (přejíždění je způsobenou nevhodným šířkovým uspořádáním komunikace). Výsledky z dopravního průzkumu jsou vidět na následujícím grafu 4.



Graf 4 – Porovnání počtu vozidel v Dashboardu s dopravním průzkumem na senzoru MB03 (Tvorba autor)

### 4.8.4 Dopravní průzkum zatíženého senzoru

Dne 4.5.2021 jsem provedl dopravní průzkum v lokalitě senzoru MB25 a MB30. Oba zmíněné senzory se nachází v lokalitě vytížené jak nákladní dopravou z důvodu zásobování přilehlých objektů potřebnými díly, tak nově vyrobenými osobními vozy mířícími z výrobní linky na odstavné plochy v doprovodu dodávkových automobilů, které slouží k převozu řidičů nově vyrobených automobilů zpět k výrobní lince. Vzhledem k tomu, že se jednalo o dopravní průzkum krátkého trvání, jeho výsledky jsem v této závěrečné práci neuvedl.

### 4.8.5 Závěry vzešlé z provedených dopravních průzkumů

Jedním z cílů této závěrečné práce byla analýza dat z instalovaných dopravních senzorů v areálu společnosti ŠKODA AUTO a.s. v Mladé Boleslavi. V rámci této analýzy jsem provedl dopravní průzkum na senzoru MB05 a MB06 v délce 60 minut. Dále jsem provedl kratší dopravní průzkumy na senzorech MB03, MB25 a MB30. Z dopravního průzkumu na senzoru



MB05 vyplynulo, že počet vozidel zaznamenaných instalovaným dopravním klasifikátorem se lišil o šest vozidel. To mohlo být způsobeno malými následnými mezerami mezi vozidly, nemožností synchronizace času nebo lidským faktorem při provádění dopravního průzkumu. Velmi velké rozdíly však nastaly v klasifikaci vozidel, jelikož ve všech z pěti minutových intervalů v rámci dopravního průzkumu si počty vozidel v jednotlivých kategoriích neodpovídaly. Z důvodu probíhajícího přenosu senzorů do interní sítě ŠKODA AUTO a.s. se mi již bohužel nepodařilo provést další alespoň 60minutové dopravní průzkumy na jiných senzorech. Z toho důvodu jsem byl nucen využít pro názornost starší dopravní průzkumy, které však měly kratší dobu trvání. Pro lepší pochopení zjištěných nesrovnalostí by bylo vhodné po dokončení přenosu senzorů do interní sítě provést další dopravní průzkumy v různých lokalitách výrobního závodu. Nicméně z uskutečněných dopravních průzkumů se obecně ukázalo, že počty vozidel odečtených senzorem se téměř shodují s manuálním dopravním průzkumem. Velmi nespolehlivé výsledky senzorů se ukázaly v klasifikaci jednotlivých vozidel.

## **5 Aplikace vykreslující intenzitu dopravy**

K vypracování této závěrečné práce jsem měl k dispozici agregovaná data dostupná z Dashboardu. Na těchto datech jsem se rozhodl vytvořit nadstavbu nad daty v podobě aplikace vykreslující do mapového podkladu barevně odlišené intenzity dopravy v areálu společnosti Škoda Auto a. s. v Mladé Boleslavi a tím umožnit jiný pohled na data, který současný Dashboard nenabízí.

### **5.1 Tvorba aplikace**

Aplikaci jsem vytvořil v jazyce R, který mi byl doporučen konzultantem této závěrečné práce. Tento programovací jazyk je vhodný pro datové analýzy a jejich další zpracování. Pro zpracování jsem využil implementované balíčky jazyka R: dplyr, shiny, leaflet a leaflet.minicharts. Jedná se o moji první aplikaci vytvořenou v tomto programovacím jazyce a prostředí Rstudia. Zpočátku bylo nutné si připravit potřebná data pro import do prostředí Rstudia. Exportovaná data z Dashboardu jsou ve formátu xls. Pro potřeby importu je bylo nutno převést do formátu csv. Do vyexportovaných dat jsem dále přidal GPS souřadnice všech instalovaných senzorů pro mapový podklad vytvářené aplikace.

V následující kapitole popíšu zdrojový kód aplikace.

Aplikace sestává ze tří souborů. V souboru `general.R` (obr. 24) jsou vyvolány využitě balíčky jazyka R. Konkrétně se jedná o knihovnu `dplyr`, `shiny`, `leaflet` a `leaflet.minicharts`, jak je vidět na řádku č. 1-4 na obrázku 24. Pro popisy jednotlivých kategorií vozidel v aplikaci jsem využil názvy sloupců 5-9 v datovém souboru. Dále jsem nadefinoval mapový podklad pro aplikaci a jeho výchozí zobrazení při načtení aplikace.

```
1 library(dplyr)
2 library(shiny)
3 library(leaflet)
4 library(leaflet.minicharts)
5
6 # kategorie vozidla datovy sloupec
7
8 senzoryCols <- names(senzory)[5:9]
9
10 # Nacteni mapy a defaultni pozice mapy
11
12 m <- leaflet() %>%
13   addTiles() %>%
14   setView(lng = 14.9292386, lat = 50.4224181, zoom = 14)
15 m
16
```

Obrázek 24 – Soubor `general.R` (Tvorba autor)

Dále pak v souboru `server.R` (obrázek 25) je nadefinována inicializace mapy s požadovanou vrstvou pro zobrazení dat ze senzorů a upřesněna velikost zobrazovaných grafů. V další části kódu je ošetřena správná aktualizace jednotlivých grafů při změně vstupní hodnoty z dat.

```
1 function(input, output, session) {
2
3   # Inicializace mapy
4   output$map <- renderLeaflet({
5     m %>%
6       addMinicharts(
7         senzory$lng, senzory$lat,
8         layerId = senzory$sensor,
9         width = 120, height = 120
10      )
11   })
12
13   # Aktualizace grafu pri zmene vstupni hodnoty
14
15   observe({
16     if (length(input$sensor) == 0) {
17       data <- 0
18     } else {
19       data <- senzory[, input$sensor]
20     }
21     maxValue <- max(as.matrix(data))
22
23     leafletProxy("map", session) %>%
24       updateMinicharts(
25         senzory$sensor,
26         chartdata = data,
27         maxvalues = maxValue,
28         time = senzory$month,
29         type = ifelse(length(input$sensor) < 2, "polar-area", input$type),
30         showLabels = input$labels
31       )
32   })
33 }
```

Obrázek 25 – Soubor `server.R` (Tvorba autor)

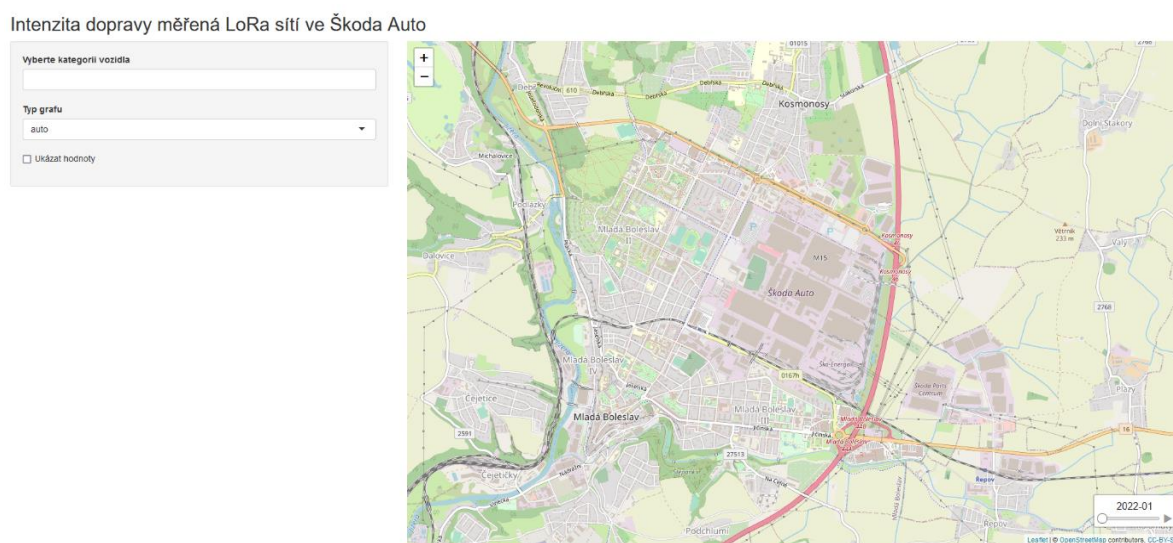
V souboru ui.R (obrázek 26) je nadefinováno uživatelské rozhraní aplikace. Na řádce č. 5 nalezneme definici nadpisu zobrazeného v aplikaci. Na dalších řádcích souboru jsou nadefinovány postranní panely s volbou požadovaných kategorií vozidel a typem zobrazené grafu.

```
1 # Definice UI aplikace s proměnlivým rozložením prvku
2 ui <- fluidPage(
3
4   # Nadpis
5   titlePanel("Intenzita dopravy měřená LoRa sítí ve Škoda Auto"),
6
7   # Sidebar a mapový výstup s velikostí okna
8   sidebarLayout(
9
10    sidebarPanel(
11      selectInput("sensor", "vyberte kategorii vozidla", choices = senzoryCols, multiple = TRUE),
12      selectInput("type", "Typ grafu", choices = c("auto", "bar", "pie", "polar-area", "polar-radius")),
13      checkboxInput("labels", "Ukázat hodnoty")
14    ),
15
16    mainPanel(
17      leafletOutput("map", height="85vh")
18    )
19  )
20 )
21 )
22 )
```

Obrázek 26 – Soubor ui.R (Tvorba autor)

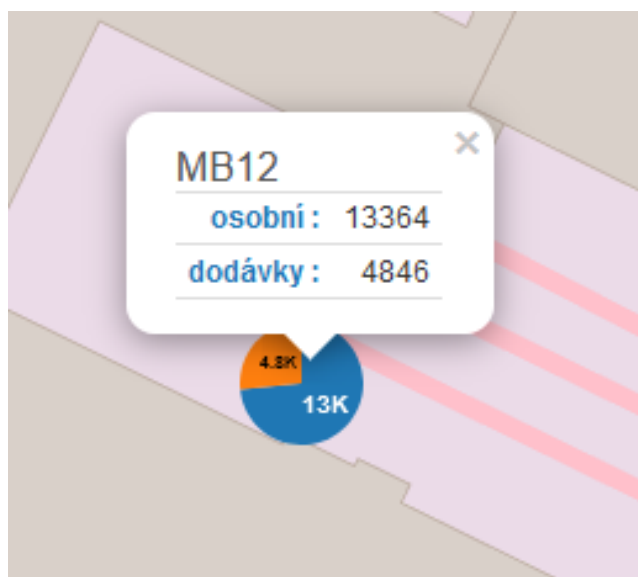
## 5.2 Uživatelské rozhraní aplikace

Uživatelské rozhraní aplikace se skládá z levé části, ve které si uživatel pomocí dvou rozbalovacích seznamů vyfiltruje požadovaná data. V pravé části aplikace se pak nachází mapový podklad. Výchozí zobrazení mapy je soustředěno na celý areál společnosti ŠKODA AUTO a. s. v Mladé Boleslavi. Přiblížení mapy si uživatel může upravit podle svých potřeb. V pravém dolním rohu mapy se ještě nachází časová osa, pomocí které si uživatel může vybrat konkrétní časový interval. Úvodní obrazovka aplikace je znázorněna na obrázku 27.



Obrázek 27 – Úvodní obrazovka aplikace (Tvorba autor)

Na obrázku 28 je pak ilustrován detailní pohled na jeden z vybraných senzorů.



Obrázek 28 – Detail senzoru MB12 v aplikaci (Tvorba autor)

Prezentovaná aplikace je vytvořená jako modulární, to znamená, že v případě požadavku na implementaci do budoucích dashboardů ŠKODA ji lze jednoduše zaintegrovat. Dále je možné aplikaci velmi rychle upravit pro potřeby zobrazení jiných požadovaných dat, která se dají obdobně kategorizovat. Mezi přednosti této aplikace patří velmi rychlý běh aplikace. Ten je zajištěn díky upraveným datovým souborům se zdrojovými daty.

## 6 Rozvoj LoRaWAN sítě v areálu Škoda Auto do budoucna

Na základě získaných informací jsem se v této kapitole zaměřil na možný rozvoj LoRa sítě v areálu společnosti Škoda Auto a.s. do budoucna. Jelikož se na trhu objevují nové a přesnější senzory, lze v budoucnu očekávat využití IoT i v dalších, dosud neprozkoumaných aplikacích.

### 6.1 Rozvoj v oblasti dopravy

Dopravní klasifikátory by bylo vhodné postupně doplňovat i na nově budované komunikace v areálu společnosti, např. na nový most přes dálnici D10, který bude klíčový pro zásobování výrobních linek díly. Za další vhodné oblasti rozšíření považuji všechna zaměstnanecká parkoviště a parkovací domy, které se dají osadit senzory pro sledování obsazenosti. Data z těchto senzorů by byla dostupná v mobilní aplikaci pro zaměstnance, kterým by se zpříjemnil příjezd do zaměstnání. To by mohlo také zajistit snížení počtu nevhodně parkujících vozidel na velmi vytížených parkovištích.

### 6.2 Rozvoj v oblasti výroby

Rozvoj stávající sítě by se dle mého názoru měl zaměřit na rozvoj IoT ve výrobním procesu, což by mělo za následek snížení nákladů na údržbu výrobních strojů a zařízení. Jedná se o koncept Predictive maintenance, díky kterému lze za provozu určit stav zařízení s ohledem na jeho údržbu. Implementací tohoto řešení by se zjednodušil proces plánování a provádění údržby a díky tomu by se snížilo množství neplánovaných odstávek způsobených nefunkčními technologiemi.

V budoucnu by bylo vhodné rozšířit současnou LoRaWAN síť o následující:

- senzory polohy vyrobených/nedokončených vozidel – pro snazší orientaci obsluhy,
- senzory hluku – kontrola dodržování předepsaných hodnot ve výrobě, prediktivní údržba,
- senzory vibrací – predikce poruch zařízení,
- senzory koncentrace škodlivých látek – ochrana zaměstnancům, obyvatel a životního prostředí,
- senzory teploty – ve výrobních halách, v místnostech,
- senzory zaplavení – prediktivní údržba výrobních hal a technických objektů,

- senzory hmotnosti – zatížení palet a přepravních kontejnerů,
- senzory dálkového odečtu (spotřeby energií) - kontrola,
- senzory binárního stavu (otevřeno/zavřeno) - zabezpečení,
- senzory hladiny kapalin,
- senzory zaplněnosti nádob na odpad,
- čtečky RFID,
- počítadla průchodů.

Výše uvedená rozšíření LoRaWAN sítě budou zajišťovat možnost centrálního dohledu nad aktuální situací v různých částech areálu. Díky tomu dojde také k úspoře finančních a lidských prostředků nutných pro zajištění plynulého provozu výrobního závodu.

### **6.3 Implementace navržené aplikace do Dashboardu**

Navrženou aplikací by bylo vhodné doplnit stávající dashboard, jelikož v něm chybí možnost vykreslení celkového pohledu na dopravní zatížení v daném okamžiku. Protože v průběhu zpracování této závěrečné práce bylo rozhodnuto o přenosu všech senzorů do interní sítě Škoda Auto včetně dopravních klasifikátorů, a tak pravděpodobně k implementaci do stávajícího Dashboardu nedojde. Nicméně navrženou aplikaci bych zařadil i do interních dashboardů ŠKODA AUTO a.s.

### **6.4 Změna umístění vybraných senzorů, zjištěné problémy**

V průběhu pozorování dopravního proudu v blízkosti instalovaných dopravních senzorů jsem se snažil zanalyzovat důvody vysokého podílu neurčených vozidel na některých senzorech. V lokalitě senzoru MB20 a MB22 v blízkosti lakovny se nachází manipulační prostor právě pro potřeby lakovny, proto se zde pohybuje větší počet vysokozdvizných vozíků a jiných obslužných vozidel. Z výše uvedeného důvodu se tato lokalita ukázala jako nevhodná pro instalaci dopravních senzorů do vozovky. Dochází tak k narušení magnetického pole obou senzorů a vzniká tak chybná kategorizace. Další problém může nastat na senzorech nacházejících se v blízkosti okružních křižovatek. Viz. dopravní průzkum na senzoru MB05 a MB06 kdy vozidla přes tyto senzory přejíždí v nižších rychlostech a s malými následnými mezerami. Obdobnou situace lze předpokládat i na senzorech MB07 – MB10 umístěných v blízkosti okružní křižovatky v lokalitě u 8. brány. Ovšem v této lokalitě v průběhu zpracování

této závěrečné práce docházelo k častým omezením provozu v různém rozsahu z důvodu stavební činnosti a nebylo tedy možné z těchto senzorů získat relevantní data z běžného provozu. V této souvislosti je nutné také zmínit i obecně nižší počty vozidel v areálu celého výrobního závodu. Pravděpodobně je to způsobeno častější prací zaměstnanců z domova a četnými odstávkami výroby z důvodu nedostatku potřebných dílů.

## 7. Závěr

V rámci této závěrečné práce jsem provedl rešerši aktuálního stavu v oblasti IoT. Díky této rešerši jsem zjistil velké množství informací a zajímavých příkladů využití technologií z tohoto oboru. Následně jsem z instalovaných dopravních senzorů v areálu společnosti ŠKODA AUTO a.s. v Mladé Boleslavi provedl datovou analýzu, při které jsem pracoval s daty z Dashboardu LoRa sítě ŠKODA AUTO a.s. V průběhu této analýzy jsem dále provedl dopravní průzkumy s různým zaměřením. Z provedených průzkumů se potvrdilo, že počty vozidel měřených dopravními senzory lze považovat za dobré. Klasifikace jednotlivých kategorií vozidel se však ukázala jako velmi nepřesná.

Pro názornější reprezentaci dat z dopravních senzorů jsem v rámci této závěrečné práce vytvořil aplikaci, která do mapového podkladu barevně vykresluje intenzity dopravy v jednotlivých dnech ve všech lokalitách areálu. Jelikož se jednalo o moji první aplikaci navrženou v programovacím jazyce R, osvojil jsem si základy tohoto jazyka a doufám, že tyto získané poznatky budu moci dále rozvíjet v budoucnu. Navržená aplikace je modulární a v případě požadavku ji lze snadno implementovat do interních dashboardů společnosti ŠKODA AUTO a.s. Aplikaci lze také velmi snadno upravit pro potřeby vizualizace jiných dat v rámci výrobního areálu společnosti.

Rozvoj LoRa sítě ve Škoda Auto považuji za nutný krok v době, kdy dokážeme kontinuálně a automatizovaně pomocí senzorů měřit různé veličiny. Data z instalovaných senzorů se dají využít jak v oblasti dopravy, tak v oblasti výroby. Logickým krokem v oblasti výroby je nasazení senzorů pro přístup Predictive maintenance. Díky tomuto napojení by bylo možné sledovat stav různých výrobních zařízení. Efektivněji tak provádět jejich údržbu a snížit počet případných neplánovaných odstávek a tím také snížit finanční ztráty plynoucí z těchto odstávek. V oblasti dopravy lze síť dále rozšířit na železniční dopravu (přehled obsazenosti odstavných kolejí), zimní údržbu komunikací a chodníků, sledování přepravních jednotek (kontejnerů, palet, nedokončených vozů apod.), Jelikož se na trhu objevuje stále více typů senzorů a komunikačních protokolů spadajících do LPWAN sítí, které jsou vhodné pro IoT řešení, lze předpokládat další možné využití v rámci velkého výrobního areálu. Domnívám se, že díky přenosu všech již nainstalovaných senzorů do interní sítě dojde k lepší koordinaci jednotlivých projektů v rámci společnosti.

Během zpracování této závěrečné práce jsem měl možnost se pravidelně pohybovat v areálu společnosti a díky tomu poznat dopravní specifika dopravně velmi vytiženého průmyslového areálu, kde je udržení plynulosti dopravy nezbytné pro včasné zásobování výrobních linek a dalších návazných provozů materiálem. Věřím, že poznatky vzešlé z této práce pomohou



v budoucnu ke kvalitnímu rozvoji IoT sítí ve všech dotčených oblastech v rámci výrobního závodu. Při zpracování jsem dále detailněji poznal jednotlivé komunikační protokoly využívané v IoT a seznámil jsem se zajímavými případy využití. V neposlední řadě jsem měl možnost poznat zajímavé lidi, kteří se problematikou IoT zabývají a mohl jsem uplatnit znalosti nabyté při studiu na FD ČVUT v praxi.

Věřím, že veškeré získané poznatky, nabyté zkušenosti a navržená řešení z průběhu zpracování této bakalářské práce využiji i ve své další závěrečné práci.

## 7 Použité zdroje

1. *AVNET* [online]. [cit. 20.5.2022]. Dostupné z: <https://www.avnet.com/wps/wcm/connect/onesite/03aebfe2-98f7-4c28-be5f-90638c898009/sigfox-technical-overview.pdf?MOD=AJPERES&CVID=magVa.N&CVID=magVa.N&CVID=magVa.N>
2. *BEHRTECH* [online]. [cit. 6.4.2022]. Dostupné z: <https://behrtech.com/lpwan-technology/>
3. BENEŠ, F., Fotografie pořízené při instalaci dopravních klasifikátorů, 2020.
4. *Cisco* [online]. [cit. 19.7.2022]. Dostupné z: [https://www.cisco.com/c/dam/global/en\\_ph/assets/ciscoconnect/pdf/bigdata/jim\\_green\\_cisco\\_connect.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/global/en_ph/assets/ciscoconnect/pdf/bigdata/jim_green_cisco_connect.pdf)
5. *Citiq.cz* [online]. [cit. 14.6.2022]. Dostupné z: <https://www.citiq.cz/dopravni-klasifikator>
6. CODELUPPI, G., CILFONE, A., DAVOLI, L., FERRARI, G., LoRaFarM: a LoRaWAN-Based Smart Farming Modular IoT Architecture. *Sensors* [online]. 2020, **20**(7) [cit. 20.6.2022]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/340484378\\_LoRaFarM\\_A\\_LoRaWAN-Based\\_Smart\\_Farming\\_Modular\\_IoT\\_Architecture](https://www.researchgate.net/publication/340484378_LoRaFarM_A_LoRaWAN-Based_Smart_Farming_Modular_IoT_Architecture)
7. *Deutsche Telekom AG* [online]. [cit. 10.3.2022]. Dostupné z: <https://iot.telekom.com/resource/blob/data/492968/e396f72b831b0602724ef71056af5045/mobile-iot-network-comparison-nb-iot-lorawan-sigfox.pdf>
8. GABRIEL. An Introduction to Sigfox Technology – Basics, Architecture and Security Features In. *circuitdigest.com* [online]. 30.08.2019. [cit. 15.7.2022]. Dostupné z: <https://circuitdigest.com/article/what-is-sigfox-basics-architecture-and-security-features>
9. *GRIN.com* [online]. [cit. 18.4.2022]. Dostupné z: <https://www.grin.com/document/489811>
10. GURPREET, S., RAGHAV, B., KARAMJEET, S., SAHIL, M., ZigBee: A Review [online]. 2012, [cit. 29.7.2022]. ISSN 0976-8491. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/280947104\\_ZigBee\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/280947104_ZigBee_A_Review)
11. Interní Dashboard ŠKODA AUTO a.s.

12. *IoT Analytics GmbH* [online]. [cit. 10.6.2022]. Dostupné z: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>
13. JOVALEKIC, N., DRNDAREVIC, V., PIETROSEMOLI, E., ZENNARO, I., Experimental Study of LoRa Transmission over Seawater. *Sensors* [online]. 2018, **18**(9) [cit. 19.7.2022]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/327316314\\_Experimental\\_Study\\_of\\_LoRa\\_Transmission\\_over\\_Seawater](https://www.researchgate.net/publication/327316314_Experimental_Study_of_LoRa_Transmission_over_Seawater)
14. LOM, M., PŘIBYL O., Sítě pro internet věcí v České republice In. *tzb-info.cz* [online]. 6.11.2017. [cit. 15.7.2022]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/informacni-a-telekomunikacni-technologie/16519-site-pro-internet-veci-v-ceske-republice>  
MEKKI, K., BAJIC, E., CHAXEL, F., MEYER, F. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express* [online]. 2019, **5**(1), 1-7 [cit. 29.1.2022]. ISSN 24059595. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/322018958\\_A\\_comparative\\_study\\_of\\_LPWAN\\_technologies\\_for\\_large-scale\\_IoT\\_deployment](https://www.researchgate.net/publication/322018958_A_comparative_study_of_LPWAN_technologies_for_large-scale_IoT_deployment)
15. MEKKI, K., BAJIC, E., CHAXEL, F., MEYER, F., Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT. In: 2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops) [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 197-202 [cit. 7.7.2022]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/323907156\\_Overview\\_of\\_Cellular\\_LPWAN\\_Technologies\\_for\\_IoT\\_Deployment\\_Sigfox\\_LoRaWAN\\_and\\_NB-IoT](https://www.researchgate.net/publication/323907156_Overview_of_Cellular_LPWAN_Technologies_for_IoT_Deployment_Sigfox_LoRaWAN_and_NB-IoT)
16. MIHAJLOV, B., BOGDANOSKI, M., Overview and Analysis of the Performances of ZigBeebased Wireless Sensor Networks. *International Journal of Computer Applications* [online]. 2011, **29**(12), 28-35 [cit. 29.7.2022]. ISSN 09758887. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/228083960\\_Overview\\_and\\_Analysis\\_of\\_the\\_Performances\\_of\\_ZigBee\\_Based\\_Wireless\\_Sensor\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/228083960_Overview_and_Analysis_of_the_Performances_of_ZigBee_Based_Wireless_Sensor_Networks)
17. MOHAMED, K. S. *The era of internet of Things: towards a smart world* 1. Cham: Springer 2019. ISBN 978-3-030-18133-8.

18. QIN, J., LI, Z., WANG R., LI, L., YU, Z., HE, X., LIU, Y. Industrial Internet of Learning (IIoL): IIoT based pervasive knowledge network for LPWAN—concept, framework and case studies. CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction [online]. 2021, **3**(1), 25-39 [cit. 10.7.2022]. ISSN 2524-521X. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/348238642\\_Industrial\\_Internet\\_of\\_Learning\\_IIoL\\_IIoT\\_based\\_pervasive\\_knowledge\\_network\\_for\\_LPWAN-concept\\_framework\\_and\\_case\\_studies](https://www.researchgate.net/publication/348238642_Industrial_Internet_of_Learning_IIoL_IIoT_based_pervasive_knowledge_network_for_LPWAN-concept_framework_and_case_studies)
19. RAYES, A., SALAM S. *Internet of Things From Hype to Reality The Road do Digitization 1*, Cham: Springer 2017. ISBN 978-3-319-44858-9.
20. RStudio Team (2020). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA Dostupné z: <http://www.rstudio.com/>.
21. SEMTECH [online]. [cit. 20.2.2022]. Dostupné z: <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>
22. TABBANE, S. [online]. [cit. 2.4.2022]. Dostupné z: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/Events/2019/ITU-ASP-CoE-Training-on-/IoT%20systems%20overview.pdf>
23. TECHNICKÉ PODMÍNKY – TP 189 STANOVENÍ INTENZIT DOPRAVY NA PK. 3. Plzeň: Ministerstvo dopravy, 2018. Dostupné také z: [http://www.pjpk.cz/data/USR\\_001\\_2\\_8\\_TP/TP\\_189\\_2018\\_final.pdf](http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_189_2018_final.pdf)
24. THE THINGS NETWORK [online]. [cit. 7.7.2022]. Dostupné z: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/classes/>

## 8 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Předpověď globálního trhu IoT v počtu připojených zařízení (Hasan, 2022) ....	13
Obrázek 2 – Referenční model IoT (Rayes, Samer, 2017).....	15
Obrázek 3 – Referenční model IoT (Cisco, 2014) .....	16
Obrázek 4 – SWOT analýza IoT (Tvorba autor).....	18
Obrázek 5 – Požadavky na LPWAN řešení (Tabbane, 2019).....	19
Obrázek 6 – Porovnání LPWAN s ostatními typy sítí (Semtech, 2019) .....	20
Obrázek 7 – Ilustrace LoRa Chirp Spread spektra (Semtech, 2019).....	21
Obrázek 8 – Závislost mezi periodou symbolu a faktorem šíření (Jovalekic, Pietrosevoli, Darby, Zennaro, Drndarevic, 2018).....	22
Obrázek 9 – Architektura LoRaWAN (Codeluppi, Cilfone, Davoli, Ferrari, 2020).....	22
Obrázek 10 – Funkční schéma zařízení třídy A (The Things Network, 2020).....	23
Obrázek 11 – Funkční schéma zařízení třídy B (The Things Network, 2020).....	24
Obrázek 12 – Funkční schéma zařízení třídy C (The Things Network, 2020).....	24
Obrázek 13 – Architektura Sigfox (Gabriel, 2019) .....	25
Obrázek 14 – Architektura NB-IoT (Lom, Příbyl, 2017) .....	26
Obrázek 15 – Grafické porovnání technologie LoRa, Sigfox a NB-IoT (Mekki, Bajic, Chaxel, Meyer, 2017).....	30
Obrázek 16 – Jádrový vývrt pro dopravní klasifikátor (Beneš, 2020).....	32
Obrázek 17 – Dopravní klasifikátor před instalací (Beneš, 2020) .....	32
Obrázek 18 – Zaasfaltování otvoru studenou asfaltovou směsí (Beneš, 2020) .....	32
Obrázek 19 – Senzor MB05 a MB06, značení pro zaměření (Foto autor) .....	33
Obrázek 20 – Výstup z meteorologického senzoru v Dashboardu (Interní Dashboard ŠKODA AUTO a.s.).....	34
Obrázek 21 – Náhled úvodní stránky Dashboardu s výběrem senzoru (Interní Dashboard ŠKODA AUTO a.s.).....	35
Obrázek 22 – Přehled senzoru MB01 v dashboardu (Interní Dashboard ŠKODA AUTO a.s.).....	36
Obrázek 23 – Přehled ze senzoru MB06 dne 8.6.2022 (Interní Dashboard ŠKODA AUTO a.s.).....	39
Obrázek 24 – Soubor general.R (Tvorba autor) .....	43
Obrázek 25 – Soubor server.R (Tvorba autor) .....	43
Obrázek 26 – Soubor ui.R (Tvorba autor) .....	44
Obrázek 27 – Úvodní obrazovka aplikace (Tvorba autor) .....	44
Obrázek 28 – Detail senzoru MB12 v aplikaci (Tvorba autor).....	45

## 9 Seznam grafů

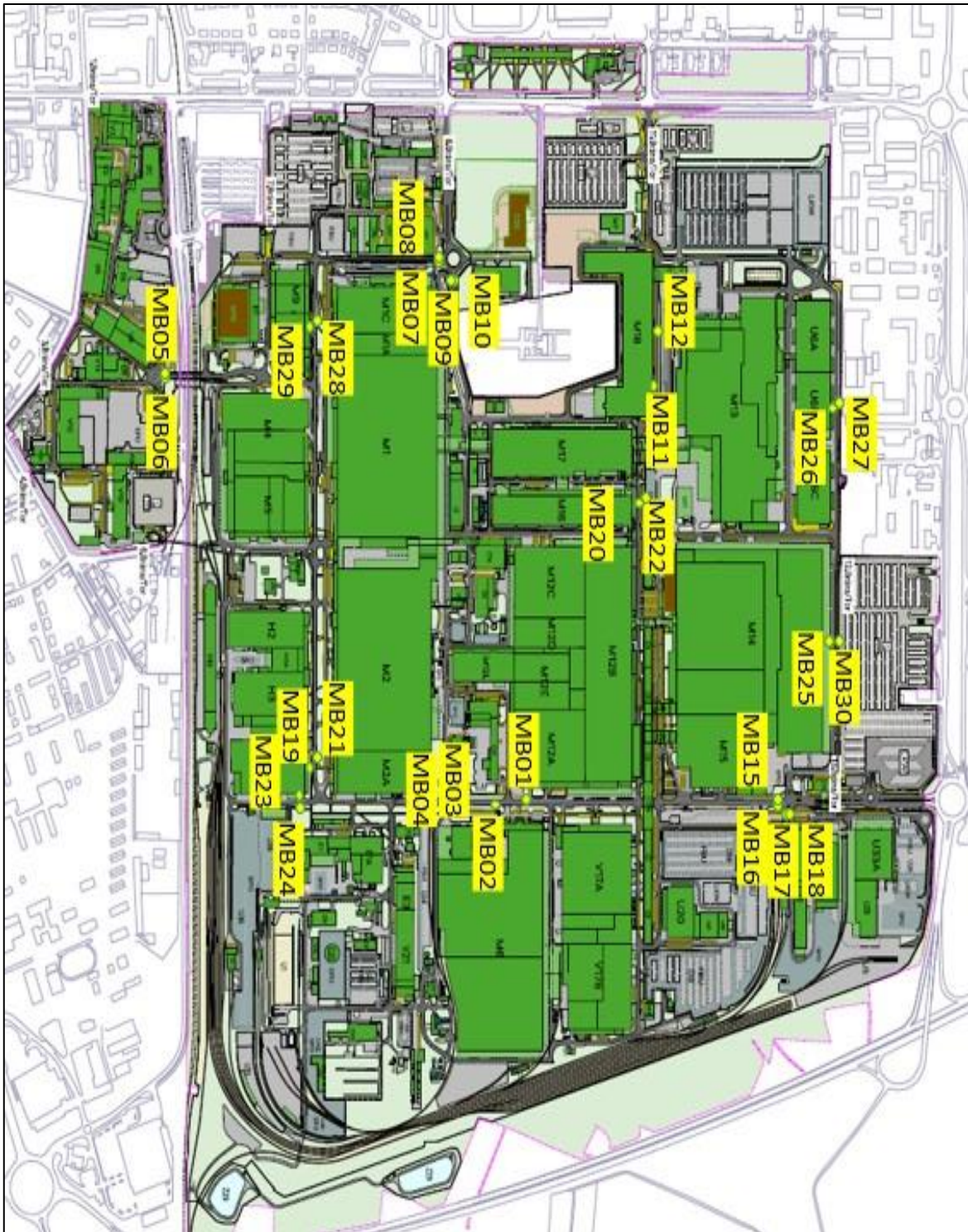
Graf 1 – Počet překročení rychlosti v závislosti na denní době (Tvorba autor) .....	37
Graf 2 – Podíl překročení rychlosti na kategorii vozidla (Tvorba autor) .....	37
Graf 3 – Podíl neurčených vozidel na všech instalovaných senzorech (Tvorba autor) .....	40
Graf 4 – Porovnání počtu vozidel v Dashboardu s dopravním průzkumem na senzoru MB03 (Tvorba autor) .....	41

## 10 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Základní porovnání technologií LoRa, Sigfox a NB-IoT (Qin, Li, Wang, Li, 2021), (Deutsche Telekom AG, 2021).....	30
Tabulka 2 – Přehled počtu vozidel z dopravního průzkumu (Tvorba autor) .....	39

## 11 Přílohy

**Příloha 1:** Mapa dopravních klasifikátorů LoRa sítě v areálu ŠKODA AUTO a.s. v Mladé Boleslavi





**Příloha 2:** Grafický výstup různých zobrazení v navržené aplikaci

