



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Jan Holub

VYUŽITÍ OPTOVLÁKNOVÉ TECHNOLOGIE A  
SENZORŮ V DOPRAVĚ A MĚSTECH

Diplomová práce

**2019**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

d ě k a n

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



**K617** ..... Ústav logistiky a managementu dopravy

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE** (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Jan Holub**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**N 3710 – LA – Logistika a řízení dopravních procesů**

Název tématu (česky): **Využití optovláknové technologie a senzorů v dopravě ve městech**

Název tématu (anglicky): Use of Fiber Optic Sensors and Technologies in City Transport

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Optovláknové technologie a senzory
- Návrh využití optovláknových technologií a senzorů v dopravě
- Analýza současného stavu získávání dat
- Provozní a ekonomické posouzení návrhů, porovnání se stávajícími technologiemi
- Doporučení pro využití optovláknových technologií v konkrétním městě



Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího diplomové práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Lafata, P., Vodrážka, J. Optické přístupové sítě a přípojky FTTx. ČVUT Praha, 2014  
Eisler, J., Kunst, J., Orava, F. Ekonomika dopravního systému. Vyd. 1., Praha: Oeconomica, 2011  
Duchon, B. Inženýrská ekonomika. Vyd. 1., Praha: C. H. Beck, 2007

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Ladislav Šašek, CSc.**  
**doc. Ing. Zdeněk Říha, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce:

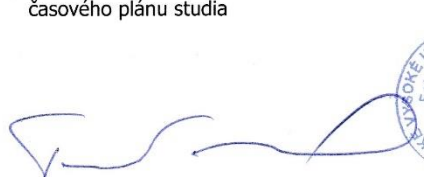
**30. června 2017**


(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 diplomové práce:

**28. května 2019**

- 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. Tomáš Horák, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu logistiky a managementu dopravy

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

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.



.....  
Bc. Jan Holub  
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 12. prosince 2018

## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady a data ke zpracování této diplomové práce. Zvláště pak děkuji panu docentovi Říhovi za odborné vedení, konzultace a rady, které mi poskytoval po celou dobu tvorby mé práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Šaškovi a Ing. Demuthovi za užitečné informace a přístup k důležitým materiálům k diplomové práci.

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou 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 etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

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

V Praze

dne 28. května 2019

  
.....

Podpis

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta dopravní

Využití optovláknové technologie a senzorů v dopravě a městech

Diplomová práce

červen 2019

Jan Holub

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá využitím optovláknové technologie v dopravě ve městě Děčín. Je v ní popsán současný stav získávání dat pomocí intrusivních a neinrusivních detektorů. Diplomová práce přináší návrh využití technologie WIM společně se systémem BendLine na Tyršově mostě. Návrh využití je následně provozně i ekonomicky posouzen a porovnán s konvenčními technologiemi. K porovnání návrhů byla použita analýza pomocí vícekritériálního rozhodování. Přínosem této práce na základě zjištěných údajů z analýzy je zjištění výhodnosti optovláknové technologie WIM a systému BendLine k monitorování dopravy na Tyršově mostě a jeho zatížení. Současně lze navázat na koncept Smart City.

## **ABSTRACT**

This thesis deals with usage of fiber optic technology in transportation in the city of Děčín. Current procedure of data acquisition using intrusive and nonintrusive detectors is described. This work proposes an utilization of WIM technology instalation together with BendLine system on the bridge Tyršův most in Děčín. The design is verified operationally and economically, and compared with conventional approach. For the comparison, multi-criteria decision analysis was used. Contribution of this thesis is a confirmation of benefits arising from usage of fiber optic technology WIM and BendLine system for traffic monitoring and the load of the bridge. Concurrently, it is possible to build on Smart City concept.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Optovláknová technologie, intrusivní detektory, neinrusivní detektory, vážení za jízdy, optické vlákno, indukční smyčky, Smart City

## **KEYWORDS**

Fiber optic technologie, intrusive detectors, nonintrusive detectors, weigh in motion, optical fiber, induction loops, Smart City

# Obsah

Obsah.....	7
Seznam použitých zkratek .....	9
Úvod .....	10
Základní pojmy .....	11
1 Analýza současného stavu získávání dat.....	19
1.1 Intrusivní detektory .....	19
1.1.1 Indukční smyčky .....	19
1.1.2 Magnetické detektory.....	20
1.1.3 Pneumatické detektory .....	21
1.1.4 Piezoelektrické detektory.....	21
1.1.5 Detektory s vláknovou optikou .....	22
1.1.6 Funkční srovnání intrusivních detektorů.....	22
1.2 Neintrusivní detektory .....	23
1.2.1 Pasivní detektory hluku.....	23
1.2.2 Ultrazvukové detektory .....	23
1.2.3 Pasivní infračervené detektory.....	24
1.2.4 Kombinované detektory .....	24
1.2.5 Videodetekce.....	24
1.2.6 Mikrovlnné radary .....	25
1.2.7 Aktivní infračervené detektory - Lidar.....	29
1.2.8 Úsekové měření rychlosti vozidel.....	33
2 Úvod do problematiky optovláknových technologií a senzorů .....	35
2.1 Co je to Fibre Bragg Grating .....	35
2.2 Weigh in Motion.....	37
2.3 Interrogation Unit FBGuard 1550 FAST .....	42
2.4 Senzory BendLine .....	45

3	Návrh využití optovláknové technologie a senzorů ve městě Děčín .....	47
3.1	Město Děčín .....	47
3.2	Tyršův most.....	48
3.3	Návrh a využití optovláknové technologie a senzorů.....	50
4	Provozní a ekonomické posouzení návrhu, porovnání s konvenčními systémy.....	52
4.1	Cenová kalkulace optovláknové technologie.....	53
4.2	Cenová kalkulace konvenčního systému .....	60
4.3	Cenové srovnání technologií .....	62
4.4	Analýza pomocí vícekriteriálního rozhodování .....	62
4.5	SWOT analýza optovláknové technologie.....	65
	Závěr .....	66
	Zdroje: .....	68
	Obrázky: .....	71
	Seznam tabulek: .....	72
	Seznam vztahů: .....	73



## Seznam použitých zkratek

Sonar	Sound navigation and ranging
FBGs	Fiber braggs gratings
SHM	Structural health monitoring
LPFGs	Long period fiber gratings
FO	Optical fiber
WIM	Weigh in motion
GUI	Grafické uživatelské rozhraní

# Úvod

Optovláknová technologie je nově se prosazující odvětví v dopravě, které začíná být stále více využíváno. Hlavní výhodou technologie je možnost umístění snímače až 50 km od měřicí stanice, dále u snímače není zapotřebí napájecí zdroj a senzory nepotřebují žádnou údržbu, jelikož jsou umístěny až pod povrchovou vrstvu asfaltu. Senzory mohou být využity k měření posuvu, sklonu, tlaku, zrychlení, rychlosti, vlhkosti, vibracím a hmotnosti (WIM). Svoje uplatnění získávají jak na silnici, železnici, tak i v tunelech, mostech a přehradách. Díky softwarovému řešení pak můžeme získávat data okamžitě, z čehož vyplývá další velká výhoda, a to předvídání a zjišťování případného nebezpečí.

## **Cílem diplomové práce je**

- analyzovat a posoudit současný způsob monitorování silniční dopravy,
- vyhodnotit využití optovláknových technologií a senzorů v dopravě,
- kvantifikovat provozní a investiční náklady návrhu využití této technologie při dopravním monitoringu na Tyršově mostě v Děčíně,
- na základě získaných výsledků výzkumu a cenových kalkulací zhodnotit, zda má technologie využití v daném městě.

# Základní pojmy

## Senzor

Ke sběru dopravních dat je potřeba využití detektorů neboli senzorů. Senzor je funkční prvek tvořící vstupní část měřicího řetězce a je v přímém styku s měřeným prostředím. Senzor snímá sledovanou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu a transformuje jí na měřící veličinu a to nejčastěji elektrickou. Díky senzorům můžeme například řídit dopravu, predikovat a plánovat. Sensory jsou také využívány pro bezpečnostní systémy, statistiku a vyhodnocování a také management a koordinaci dopravy. Technologicky lze prostředky pro získávání dopravních dat rozdělit na dvě kategorie. První jsou detektory zasahující do vozovky nazýváme intrusivní. Jedná se například o indukční smyčky. Detektory, které do vozovky nezasahují se nazývají neintrusivní a jsou to například radary nebo videodetekce. [22]

## Rychlost

Rychlost je vektorová fyzikální veličina, která je definována délkou a časem. Základní jednotkou rychlosti v soustavě SI je metr za sekundu (m/s). Kromě jednotky metr za sekundu se velice často setkáváme s jednotkou kilometr za hodinu (km/h) a mezi jednotkami platí následující vztah:  $1 \text{ m/s} = 3,6 \text{ km/h}$ . Rozlišujeme dvě základní rychlosti. Rychlost průměrnou, která vyjadřuje, jak velkou dráhu urazí těleso za jednotku času, znázorněnou ve vztahu č. 1.

*Vztah 1: Rychlost*

$$v = \frac{s}{t}$$

Rychlost okamžitou, která vyjadřuje okamžitou změnu polohy a vypočítáme jí jako první derivaci dráhy podle času, znázorněnou ve vztahu č. 2. [1]

*Vztah 2: Okamžitá rychlost*

$$v = \frac{ds}{dt}$$

## Elektromagnetické vlnění

Co je podstatou elektromagnetického vlnění popsal ve 2. polovině 19. století James Clarc Maxwell. Z teorie elektromagnetického pole vyplývá, že kolem částic s nábojem, které se pohybují se zrychlením, existuje proměnné elektrické pole vyvolávající zároveň proměnné pole

magnetické. Elektromagnetické oscilátory bývají nejčastěji zdrojem elektromagnetického vlnění. Základní součástí oscilátoru je cívka a kondenzátor. Stejně vlastnosti jako oscilátor může mít i atom látky. Změny jeho energie jsou provázeny vznikem elektromagnetického vlnění, které jsou známé v první řadě jako světlo.

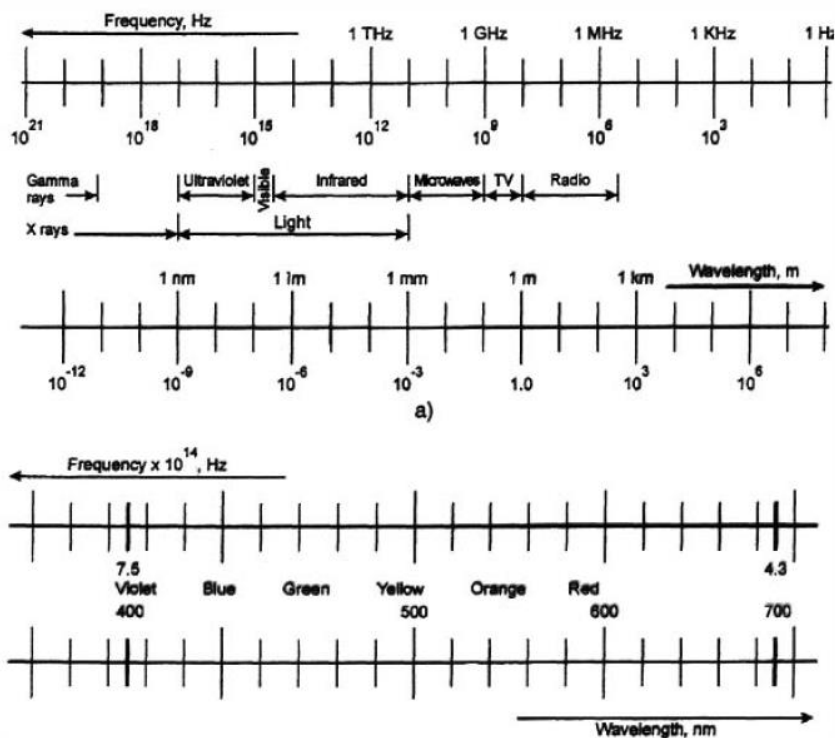
Maxwellovy rovnice sjednocují elektrické a magnetické pole. Současně tyto rovnice dokazují elektromagnetické pole, které se šíří prostorem a přenáší energii.[2], [3]

## **Světlo**

Světlo je energie kolem nás. Energie, která je přítomná i když spíme a je tma. I naše tělo je světelným zářičem. Světlo je tvořeno elektromagnetickými vlnami, které mají velmi vysoký kmitočet. Shodné elektromagnetické vlny využívá i rozhlas, televize nebo mobilní telefony. Tyto vlny jsou užitečné, ale jsou i vlny, které dokáží uškodit. Jedná se například o ultrafialové paprsky nebo radiace, která dokáže narušit naše DNA. Rozdíl mezi těmito elektromagnetickými vlnami je především ve vlnové délce. Ta určuje kmitočet světla a ten zas určuje energii, kterou světlo přenáší. Na obrázku 1 je vidět rozložení kmitočtů v záření. [14]

Z pohledu vlnové optiky světlo představuje vlnění. Na světlo se dá nahlížet i z pohledu kvantové fyziky, kdy světlo vnímáme jako částici. Tyto pohledy vycházejí z toho, že světlo má velmi rozsáhlé frekvenční spektrum a díky tomu má i různé energie. Například záření  $\gamma$  má daleko větší energii než infračervené záření. A právě energie určuje, zda-li má světlo blíže k částicovému chování nebo k vlnovému chování. Principy se navzájem nevylučují, jen je někdy výhodnější použít částicového chování pomocí fotonů a někdy chování pomocí vln. [14]

Světlo si můžeme představit jako paprskové šíření „částic“ – pohybujících se fotonů. Pohyb je však velice rychlý, jelikož světlo se ve vakuu šíří přibližně 30000 km / s a frekvence kmitání pro viditelné světlo je řádově v desítkách THz. Elektromagnetické spektrum je znázorněno na obrázku č. 1. [14]



Obrázek 1: Elektromagnetické spektrum [14]

## Index lomu

Index lomu vyjadřuje poměr rychlosti světla ve vakuu v poměru k rychlosti světla v materiálu a je větší než 1. Vyjádřen je ve vztahu č. 3.

Vztah 3: Index lomu

$$n = \frac{c}{v}$$

Kde  $c$  je rychlost světla ( $3 \cdot 10^8$  m / s).

Například index lomu vzduchu je 1.003, vody 1.33 a diamantu 2.42.

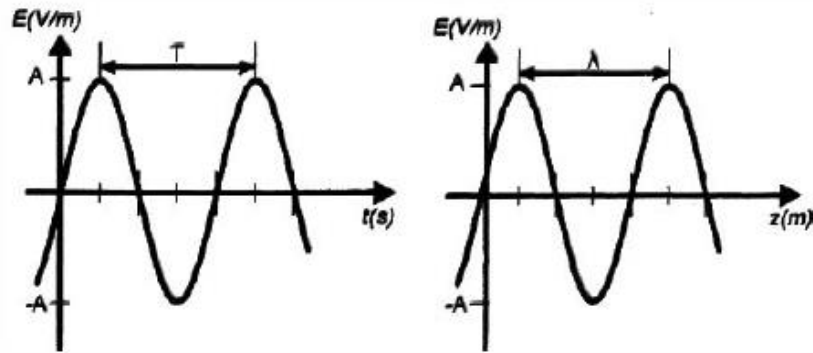
## Časová perioda

Časová perioda je čas, za který vlna „uběhne“ vlnovou délkou a je vyjádřena ve vztahu č. 4. Úhlová rychlost je značena písmenem  $\Omega$ .

Vztah 4: Časová perioda

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Vlna je znázorněna v obrázku 2.



Obrázek 2: Elektromagnetická vlna [14]

### Vlnová délka

Vlnová délka neboli prostorová perioda je délka, kterou vlna „uběhne“ během jednoho kmitu. Vzorec pro vlnovou délku je uveden ve vztahu č. 5.

Vztah 5: Vlnová délka

$$\lambda = \frac{2\pi}{k}$$

Vlnová délka se dá vypočítat také pomocí následujícího vzorce uvedeného ve vztahu č. 6:

Vztah 6: Vlnová délka 2

$$\lambda = c \cdot T$$

[14]

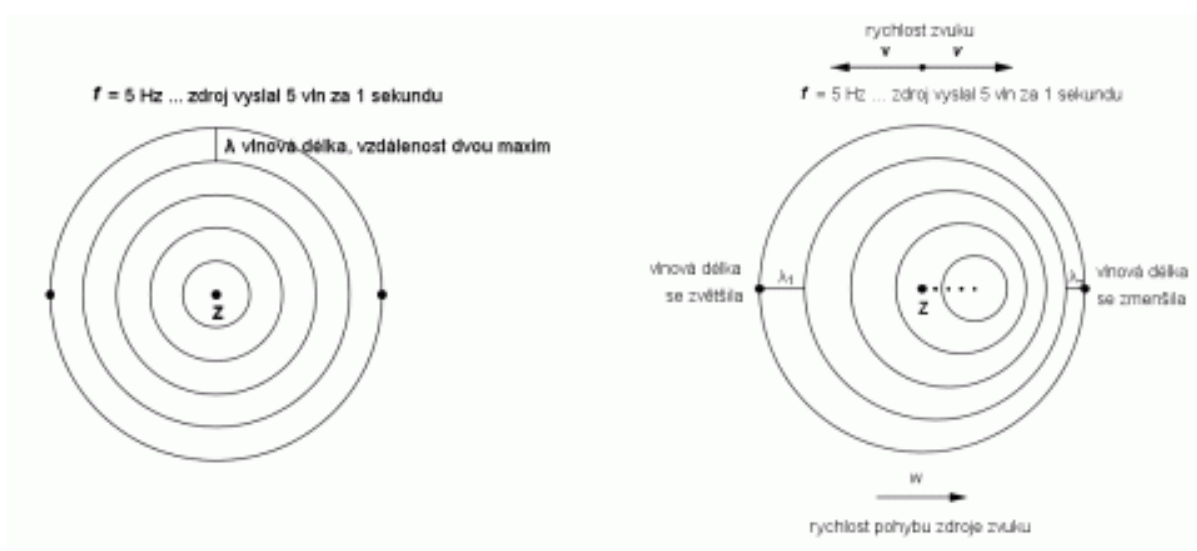
### Dopplerův jev

U měření rychlosti vozidel na pozemních komunikacích pomocí radarových zařízení využíváme elektromagnetické vlnění. Přesněji řečeno se využívá Dopplerův jev, který je pojmenován po Johannovi Christianovi Dopplerovi. Doppler byl rakouský fyzik a tento jev jako první popsal v roce 1842.

Dopplerův jev vysvětluje, že frekvence vlnového děje, kterou zachytí pozorovatel, není shodná s frekvencí vlnění emitovaného zdrojem vlnění v případě, že zdroj vlnění a příjemce se navzájem pohybují. [4]

Radar funguje tak, že automobil jakožto zdroj se pohybuje k radaru určitou rychlostí  $v_z$  a jeho pohybem se mění vlnová délka vyslaného zvuku. Se změnou vlnové délky se mění i frekvence mikrovln zaznamenaná radarem. [5]

Obecně můžeme Dopplerův jev popsat následovně: Jestliže se zdroj vlnění a detektor pohybují, pak při vzájemném přibližování se frekvence přijímaného vlnění zvyšuje, naopak při vzájemném vzdalování se frekvence snižuje. Obrázek č. 3 vlevo znázorňuje stav, kdy zdroj zvuku i detektor jsou v klidu, díky tomu frekvence zdroje zvuku odpovídá počtu vln, které zdroj zvuku vyše. Vlnovou délku určíme vzdáleností dvou maxim. Vpravo na obrázku je popsán stav, kdy zdroj zvuku je v pohybu a detektor stojí na jednom místě. [6]



Obrázek 3: Vznik Dopplerova jevu [20]

## Laser

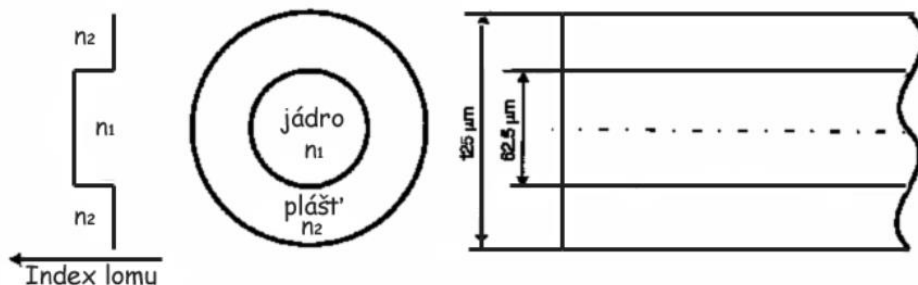
Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation v překladu zesilování světla stimulovanou emisí záření, ve zkratce LASER. První, kdo vyrobil a popsal funkční laser, byl vědec Theodor Maiman v roce 1960. [21]

Na rozdíl od jiných druhů světla v laserech atomy vyzařují společně a vytvářejí tak světlo neobyčejných vlastností. Hlavní výhodou světla laseru je koherentnost paprsku a sdružení v jednotlivé svazky. Délka tohoto paprsku tak může být i několik stovek kilometrů dlouhá a díky tomu i na takto velké vzdálenosti můžeme měřit vzdálenost. [5]

## Vlákna se skokovou změnou indexu lomu

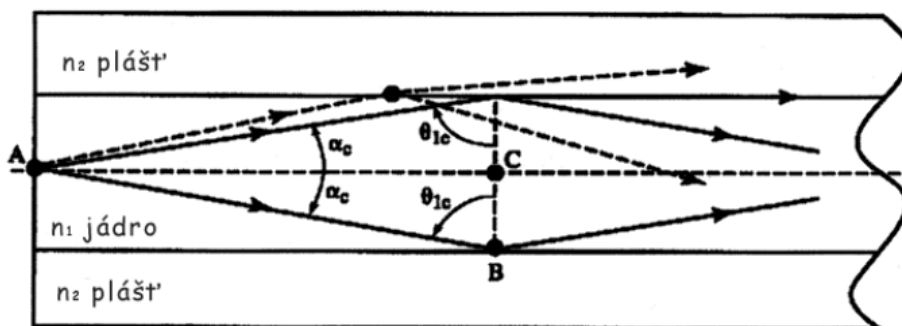
Velkou výhodou těchto vláken je, že jsou technologicky nejméně náročná na výrobu a díky tomu jsou i cenově dostupnější. Vyrábějí se z materiálů na bázi skla nebo z průhledných polymerů. Vlákna se skokovou změnou indexu lomu dělíme na jednomódová a více módová.

Jednomódové vlákno je znázorněno na obrázku č.4. Vícemódová vlákna používáme pro propojení krátkých úseků s nižší přenosovou rychlostí kvůli tomu, že tyto vlákna „trpí“ módovou disperzí, která nedovolí vysoké přenosové rychlosti nebo velmi dlouhé trasy.



Obrázek 4: Jednomódové vlákna [14]

Obrázek č. 5 popisuje šíření světla ve vlákně. Úhly  $\alpha_c$  a  $\theta_{1c}$  jsou mezní úhly, které vymezují oblasti pro vedení paprsků.

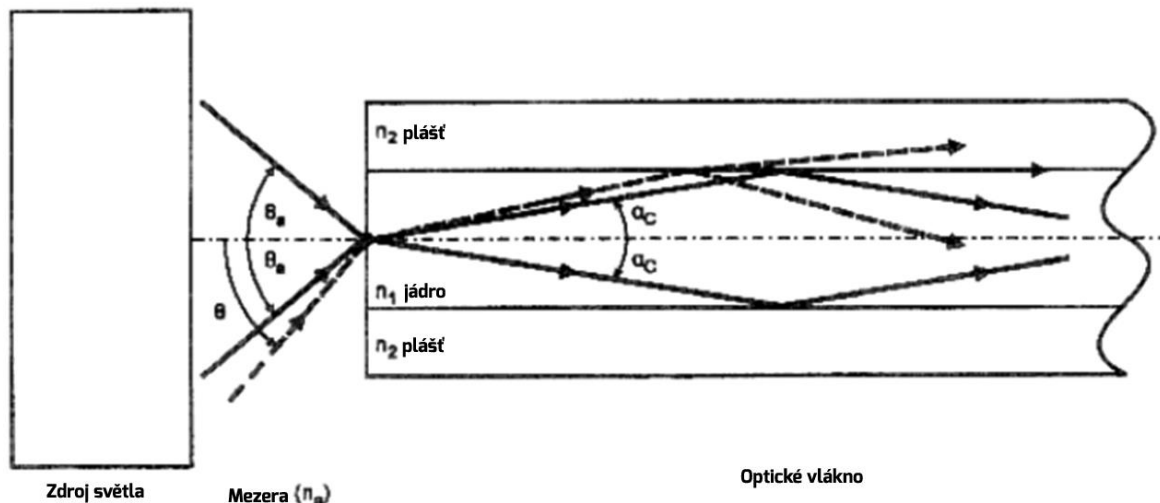


Obrázek 5: Odraz v optickém vlákně [14]

### Buzení optických vláken

Cílem je zachování úplného odrazu, ke kterému je potřeba znát mezní úhel. Zachování odrazu je znázorněno na obrázku č. 6.





Obrázek 6: Buzení vlákna, Obr. Upravený autorem [14]

## Smart city

Smyslem Smart City je využití moderních technologií, převážně informačních, pro zlepšování kvality života ve městě. Díky Smart City dochází k synergickým efektům mezi různými odvětvími jako je doprava, logistika, energetika a bezpečnost.

Jsou čtyři úrovně Smart City:

- Organizace a plánování, které využívá zpracovaná data z informační technologie.
- Pro získání zpětné vazby k vedení města od občanů, pomocí informačních systémů určených ke komunikaci města s občany.
- Pomocí komunikačních a informačních technologií lze „inteligentně“ řídit dopravu, městské služby, budovy, dopravu a především energetiku.
- Obtížně měřitelnou a zároveň subjektivně hodnocenou je výsledná kvalita života a atraktivita města, která je hlavní cílem zavádění konceptu Smart City.

Jedním z cílů konceptu Smart City je napomoci celkovému hospodářskému růstu měst a kvalitě životního prostředí díky efektivnímu fungování. Technickým prostředkem k dosažení těchto hospodářských cílů jsou použity moderní technologie.

Smart City se skládá z pohledu technického a organizačního především z těchto prvků:

### Inteligentní mobilita

Pomocí dopravní telematiky, administrativních opatření, dokonce i plánovitého rozvoje městské dopravní infrastruktury je město řízeno, a je regulována doprava. Dále podporuje

hromadnou dopravu jako atraktivní alternativu dopravy individuální a podporuje ekologicky čisté pohony, jak individuální dopravy, tak i hromadné.

### **Inteligentní energetika a služby**

Upřednostňuje obnovitelné zdroje energie především kombinovanou výrobu elektřiny a tepla, kterou následně bezpečně integruje do městské energetické sítě. Dalším zaměřením je inteligentní spotřeba energie a podpora úsporných řešení. Vše jde směrem k efektivnímu využívání energie a přírodních zdrojů. Ve městech se jedná zejména o veřejné osvětlení, efektivní hospodaření s vodou a efektivní odpadové hospodářství.

### **Informační a komunikační technologie**

Zaměřují se jak na proces řízení města, tak i na infrastrukturní stránky městského života. Zahrnují systémy inteligentního řízení veřejného osvětlení, spotřeby energií a vody, monitorovací služby pro ochranu občanů, ale i majetku, monitoring a diagnostika včasné detekce poruch. V městských službách inteligentní platební systémy například pro parkování a dopravu.

Koncept Smart City bývá propojen s dalšími „inteligentními“ koncepty, jako je smart grid a inteligentními budovami.

Výstupem diplomové práce může být provázání vytvořeného návrhu pro Tyršův most v návaznosti na již vznikající koncept Smart City v Děčíně.

# 1 Analýza současného stavu získávání dat

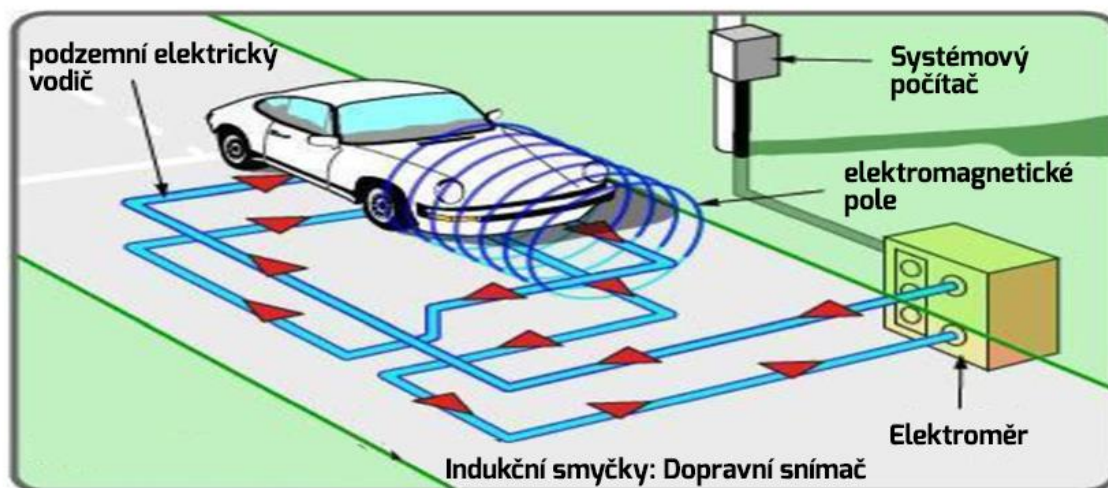
Data v dopravě se dají získávat pomocí intrusivních a neintrusivních detektorů. Hlavním rozdílem mezi detektory je, zda je při instalaci potřeba zasahovat do vozovky. U intrusivních detektorů je zásah do vozovky potřeba a u neintrusivních detektorů nikoliv.

## 1.1 Intrusivní detektory

Primárně se jedná o detektory na bázi elektromagnetické indukce neboli indukční smyčky a magnetické detektory, které se dělí na fluxgate magnetometry a magnetoidukční senzory. Dalšími detektory zasahujícími do vozovky jsou pneumatické trubkové detektory, piezoelektrické detektory a detektory s vláknovou optikou. Více o jiném principu využití optovláknové technologie bude popsáno v kapitole 2. [23]

### 1.1.1 Indukční smyčky

Jedná se o nejběžnější typ dopravního detektoru. Princip fungování detektoru je založen na smyčce tvořící indukční součást oscilátoru, který při průjezdu automobilem zvýší svojí frekvenci tím, že smyčka v přítomnosti vozidla sníží indukci. Pro měření intenzity, obsazenosti, přítomnosti a rychlosti vozidla je zapotřebí jedné nebo kombinace dvou smyček. Fungování je znázorněno na obrázku č. 7.



Obrázek 7: Princip indukčních smyček, Obr. Upravený autorem [24]

Výhody indukční smyčky:

- Přizpůsobitelná konstrukce
- Osvědčená a funkční technologie
- Cena zařízení
- Poskytují základní dopravní parametry
- Možnost klasifikace dat
- Nejsou ovlivněny počasím

Nevýhody indukčních smyček:

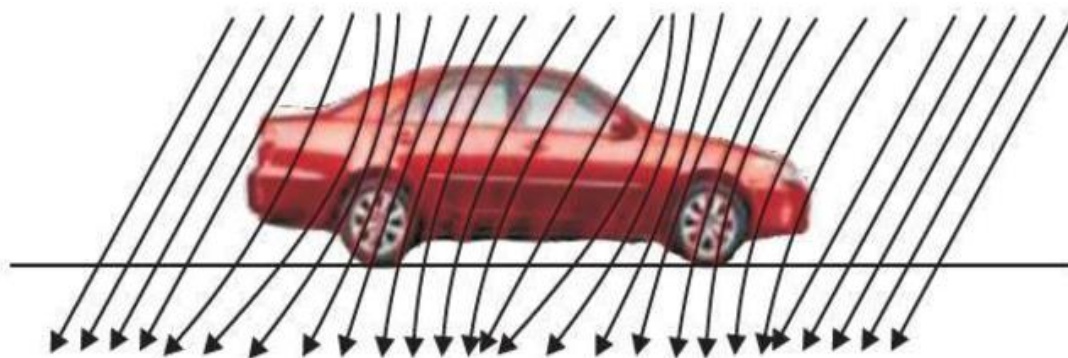
- Narušení dopravy při instalaci a údržbě
- Poruchy spjaté se špatnou kvalitou povrchů vozovek
- Pro měření rychlosti je obvykle zapotřebí více detektorů
- Opravy vozovky vyžadují často i reinstalaci detektoru
- Náchylnost k poruchám způsobeným pohybem smyčky
- Snižuje životnost vozovky
- Stálé nároky na rutinní údržbu [23]

### 1.1.2 Magnetické detektory

Rozděluje na dva typy a to Fluxgate magnetometry a magnetoindukční senzory.

#### Fluxgate magnetometry

Měří hustotu siločar magnetického pole Země. Když se vozidlo objeví nad senzorem, kovová konstrukce vozidla zvýší hustotu siločar magnetického pole a tím detekuje vozidlo. Po stranách vozidla dochází ke snížení siločar a pod a nad vozidlem ke zvýšení hustoty siločar. Znázornění siločar je vidět na obrázku č. 8. Jedná se o alternativu indukčních smyček a používá se k měření intenzity, počtu vozidel, obsazenosti a rychlosti vozidla.



Obrázek 8: Princip fluxgate magnetometru [25]

Výhody:

- Lze použít na mostech, kde je přítomno mnoho ocelové výztuže a není dovoleno provádět velké zásahy do vozovky.
- Magnetometry díky své konstrukci mají vyšší mechanickou odolnost než indukční smyčky.
- Díky malé velikosti dochází při instalaci a údržbě k menšímu ovlivnění dopravy.
- Cena detektoru, je ve srovnání s neintrusivními detektory nízká.
- Operuje v pasivním módu, bez potřeby externího napájení (stačí baterie).

Nevýhody:

- Instalace vyžaduje zásah do vozovky, je nutná i uzavírka jízdního pruhu.
- Některé modely mají malé zóny detekce.

### **Indukční magnetometr**

Jedná se o nenáročné, odolné a levné zařízení, které se využívá v oblastech s velmi nízkou teplotou a mrazy. Funguje na základě měření magnetického pole Země v případě pohybu vozidla v blízkosti detektoru.

Výhody a nevýhody:

- Nízké napěťové nároky, pasivní mód.
- Vyšší mechanická odolnost než indukční smyčky.
- Instalace se provádí vyvrtáním díry pod silnicí nebo velmi malé zásahy do vozovky.
- Určené pouze k detekci projíždějícího vozidla, rychlost musí být vyšší než 5-10 km/h.

[23]

### **1.1.3 Pneumatické detektory**

Tato technologie je přenosná a má velmi snadnou instalaci. V principu pouze měříme změnu tlaku v trubce položené na vozovce. Průjezd vozidla stlačí trubičku obsahující vzduch. Díky stlačení je zvýšen tlak v trubičce a v návaznosti na zvýšení tlaku je sepnut tlakový senzor na konci trubičky. Pomocí detektoru se dá měřit intenzita, obsazenost a rychlost vozidla, pro kterou je zapotřebí dvou senzorů. Jedná se pouze o dočasné měření dopravních dat s velmi nízkými náklady kolem 30 000 Kč. [23]

### **1.1.4 Piezoelektrické detektory**

Stejně jako pneumatické detektory, tak i piezoelektrické detektory fungují na principu stlačení detektoru. Stlačení sondy způsobuje náprava vozidla, díky kterému senzor generuje napětí

úměrné síle nebo váze vozidla. Elektrické napětí je vytvářeno nábojem opačné polaroty, který vzniká při stlačení na protilehlých površích piezoelektrického zařízení. Sensory se dělí na dvě konstrukce, a to piezoelektrické kabely a piezoelektrické krystaly. Piezokabely jsou založeny na technologii piezopolymeru. Vypadají stejně jako koaxiální kabel, ale místo vnitřního izolátu je použit piezopolymer. V praxi je pak senzor položen do podélné drážky vyfrézované do vozovky a spojen propojovacím kabelem do měřicí elektroniky. Konstrukci ještě tvoří řídicí jednotka a napájení. Při instalaci je více citlivý než indukční smyčka, jelikož je zarovnaný s vozovkou. Ze senzoru můžeme získat data o intenzitě, obsazenosti, klasifikaci vozidel, počtu náprav, váze vozidla, rychlosti a směru vozidla. [23]

### 1.1.5 Detektory s vláknovou optikou

Tato technologie využívá optického kabelu položeného na kulatinách, které se při stlačení pohnou směrem k sobě, ohnou vlákno, a tak dojde k emisi světla. Intenzita světla je měřena na konci smyčky. Jedná se o levnou technologii s vysokou přesností a imunní vůči elektromagnetické interferenci. [23]

### 1.1.6 Funkční srovnání intrusivních detektorů

Každá technologie má své výhody i nevýhody. Jejich funkční srovnání je znázorněno v tabulce č. 1.

	Indukční smyčky	Magnetické det.	Pneumatické det.	Piezoelektrické det.	Optovláknová tech. SAFIBRA
Intenzita [voz/h]	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Rychlost [km/h]	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Obsazenost [%]	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Přítomnost vozidla	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Váha vozidla [kg]	NE	NE	NE	ANO	ANO
Počet náprav	NE	NE	ANO	ANO	ANO
Detekce plochých pneumatik	NE	NE	NE	NE	ANO
Teplota [°C]	NE	NE	NE	NE	ANO
Vibrace [Hz]	NE	NE	NE	NE	ANO
Mechanické napětí [Pa]	NE	NE	NE	NE	ANO
Posun (prasklina) [mm]	NE	NE	NE	NE	ANO
Hmotnost na kolo [kg/kolo]	NE	NE	NE	ANO	ANO

Tabulka 1: Funkční srovnání intrusivních detektorů

## 1.2 Neintrusivní detektory

Neintrusivní detektory jsou detektory, u kterých není potřeba zasahovat do vozovky a dají se snadno sejmout a přemístit. Neničí vozovku a ta díky tomu získává delší životnost. Měří bezdotykově, a to buď pomocí elektromagnetického nebo mechanického vlnění. [27]

### 1.2.1 Pasivní detektory hluku

Detektor měří a zjišťuje přítomnost, průjezd a rychlost vozidla. Detekuje akustickou energii nebo hluk z projíždějícího vozidla. Funguje na základě měření časového rozdílu přicházející zvukové vlny mezi krajními částmi detektoru namířeného do detekční zóny. Když automobil přijíždí do zóny, tak se vlny zkracují a když odjíždí, tak se vlny prodlužují. Rychlost následně vypočítává softwarový algoritmus. Dále je detektor schopen změřit intenzitu, obsazenost dopravního proudu v jednotlivých jízdních pružích, rychlost průjezdu, klasifikaci vozidel, přítomnost vozidla.

Výhody:

- Pasivní detekce
- Odolné vůči vlhkosti
- Možné měřit více jízdních pruhů

Nevýhody:

- Nízké teploty snižují přesnost
- Není vhodný pro detekci v rychle se měnících dopravních podmínkách[27]

### 1.2.2 Ultrazvukové detektory

Jsou založeny na vysílání tlakových vln zvukové energie s frekvencí mezi 25 až 50 kHz, což je nad slyšitelným spektrem. Vlny jsou vysílány v pravidelných intervalech a současně je i měřen čas, kdy se odražená vlna vrátí do detektoru a z časového rozdílu pak zjišťuje přítomnost vozidla. Detektor dokáže změřit počet, přítomnost, obsazenost, délku a výšku vozidel, rychlost se dá vypočítat ze dvou paprsků pod definovaným úhlem.

Výhody:

- Neintrusivní
- Umožňuje aplikaci na více jízdních pružích

Nevýhody:

- Změny teploty a extrémní poryvy větru mohou ovlivnit vlastnosti (některé modely kompenzují rozdíly teplot).
- Dlouhé intervaly mezi vyslanými signály mohou omezit přesnost měření obsazenosti pro vyšší rychlosti vozidel. [27]

### 1.2.3 Pasivní infračervené detektory

Zaznamenává změnu energie při průjezdu vozidla. Signál je úměrný rozdílu emisivit a teplot mezi projíždějícím vozidlem a vozovkou.

Výhody:

- Neintrusivní
- Mohou měřit rychlost (při aplikaci s více zónami - multizone)
- Pracuje ve dne v noci

Nevýhody:

- Výkon je ovlivněn změnami teplot a výrazným prouděním vzduchu
- Jeden detektor je třeba na každý jízdní pruh
- Složitá kalibrace[27]

### 1.2.4 Kombinované detektory

Jedná se o kombinaci technologií mikrovln, ultrazvuku a pasivního infračerveného záření. Využívá se k měření rychlosti, indikaci přítomnosti vozidla a případné dopravní zácpy, obsazenosti, časového odstupu vozidel a k určení klasifikační třídy vozidla. [27]

### 1.2.5 Videodetekce

Videodetekce slouží hlavně k detekci kolon a stojících vozidel, které mohou způsobit nebezpečí ostatním účastníkům silničního provozu. Problémy s kongescemi vznikají většinou ve městech, v prostorách placeného mýtného nebo v místech redukované rychlosti. Pro předcházení možnému nebezpečí se využívají systémy pro rozpoznání a následné informování o neprůjezdnosti například pomocí informačních tabulí. Dále videodetekce slouží ke sledování přestupků například průjezdu křižovatkou na červenou nebo překročení povolené rychlosti. [26]

Výhody:

- Velká flexibilita
- Rozmanitost využití



Limitace:

- Náročné na rychlost zpracování videa
- Větší rozlišení přináší větší objem dat
- Problém zpracování v reálném čase
- Citlivé na povětrnostní podmínky
- Části náchylné k poruchovosti v náročném prostředí [27]

### 1.2.6 Mikrovlnné radary

#### **Použití v dopravě**

Kvůli použité technologii mikrovlnného měřiče se často měření radaru omezuje pouze na jeden jízdní pruh. Radar je možné umístit vedle nebo nad jízdním pruhem a získáváme data jak o rychlosti, přítomnosti vozidla, tak je možné zjistit i dopravní zatížení, obsazenost jízdního pruhu nebo klasifikovat vozidla podle délky.

U měření radarem je potřeba zvolit vhodné prostředí, tak aby se v paprsku radaru nenacházely žádné předměty, které by mohly měření narušit. Jedná se o větve nebo listy stromů, vysoká křoviska, tráva, zábradlí a jiné předměty, které by mohly bránit ve výhledu radaru. [15]

Součástí radaru pro měření rychlosti by měla být i kamera k určení provinilé osoby ze spáchání přestupku. Kamera je nastavena tak, že po detekování vozidla překračující povolenou rychlost sepne a vytvoří záznam jedoucího vozidla. [15]

#### **Radarové měření rychlosti**

Radarové měření rychlosti využívá efektu změny frekvence elektromagnetického záření při relativním pohybu pozorovatele nebo zdroje záření. Objevitelem tohoto jevu je Cristian Doppler. [15]

Frekvence vlnění zaznamenaná radarem je jiná než frekvence vlnění vozidla, jelikož se vozidlo pohybuje a vzájemná vzdálenost se mění v čase. Tato skutečnost nastává tehdy, když se vozidlo přibližuje nebo naopak oddaluje. [15]

V praxi pak radar vysílá nepřetržitě nemodulovaný signál nosného kmitočtu a tím ozáří jedoucí vozidlo. Od vozidla se následně signál odráží. Odražený signál je zpětně přijímán radarem ke zpracování. Rozdíl kmitočtů signálu je roven tzv. Dopplerovu posuvu, který je úměrný rychlosti měřeného vozidla. [15]

Matematicky lze tento vztah zjednodušeně vyjádřit následovně:

$$f_d = f_r - f_s = \frac{2 \cdot v \cdot f_s}{c} \cos \alpha$$

kde:

$f_d$  – Dopplerova frekvence (rozdíl frekvence mezi frekvencí odraženého a vyslaného signálu)

$v$  – rychlost měřeného vozidla

$f_r$  – frekvence odraženého signálu

$f_s$  – frekvence vysílaného signálu

$c$  – rychlost světla

$\alpha$  – úhel mezi osou anténního svazku měřiče rychlosti a vektorem rychlosti (směr jízdy) měřeného vozidla.

Po úpravě vzorce pro Dopplerovu frekvenci dostaneme vztah č.8, díky kterému jsme schopni vypočítat rychlost vozidla:

$$v = \frac{c \cdot f_D}{2 \cdot f_s \cos \alpha}$$

Parametry měřených hodnot:

- Rozsah rychlostí: 1 - 250 km/h
- Přesnost:  $\pm 3$  km/h ( $v < 100$  km/h),  $\pm 3$  % ( $v \geq 100$  km/h), [12], [15]

### Lomový odraz

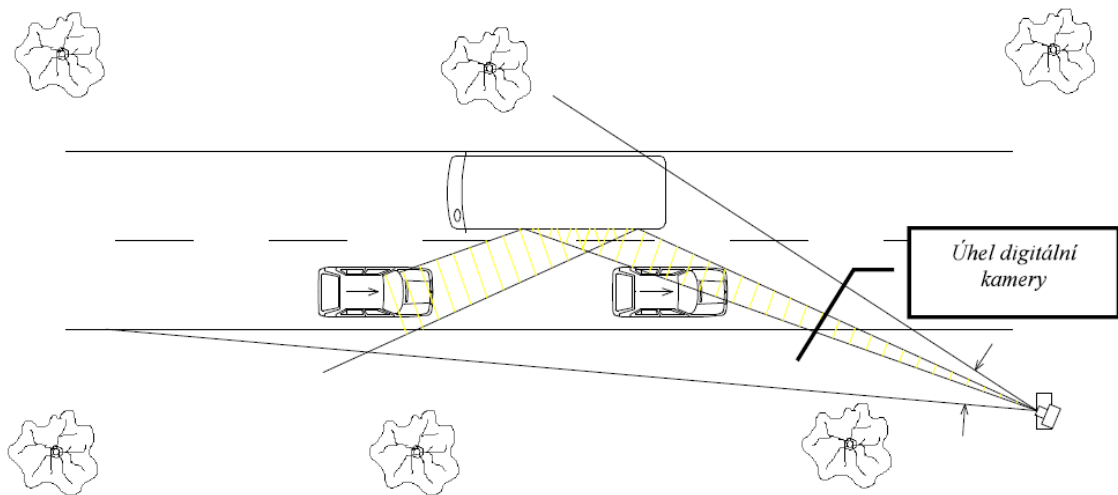
Z fyzikálních zákonů je zřejmé, že mikrovlnné záření se může na velkých kovových plochách odrážet. Díky tomuto faktu je možné, že dojde k tzv. lomovému odrazu neboli reflexi paprsku. Reflexe je možná u všech měřičů rychlosti založených na mikrovlnném principu.

Reflexe lomu paprsku se dělí na:

- Jednoduchou reflexi
- Dvojitou reflexi
- Vícenásobnou reflexi

### Jednoduchá reflexe

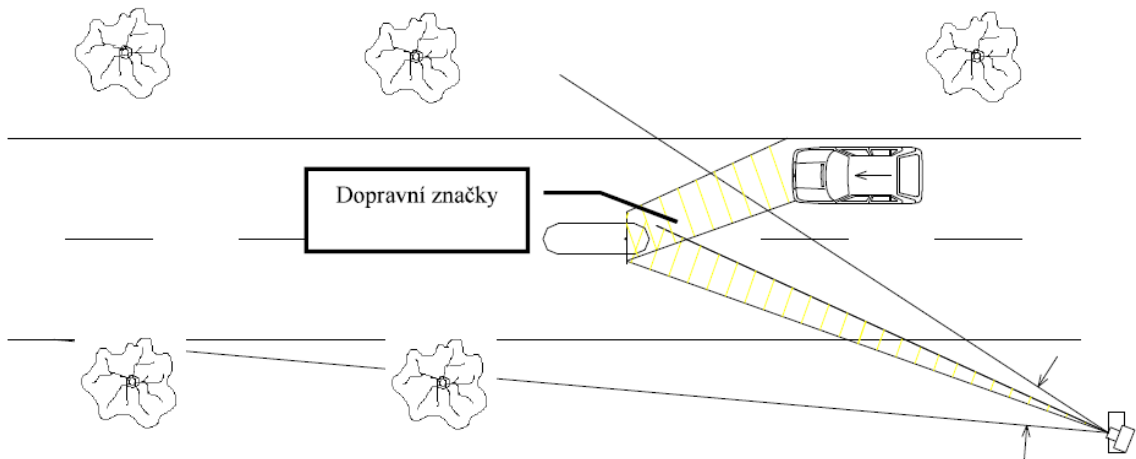
Jednoduchá reflexe vznikne na ploše, která se vyskytuje rovnoběžně s jízdní dráhou. V praxi jsou příčinou například svodidla, parkující automobily, autobusy nebo tramvaje, které zastavily na zastávce. [15]



Obrázek 9: Jednoduchá reflexe [15]

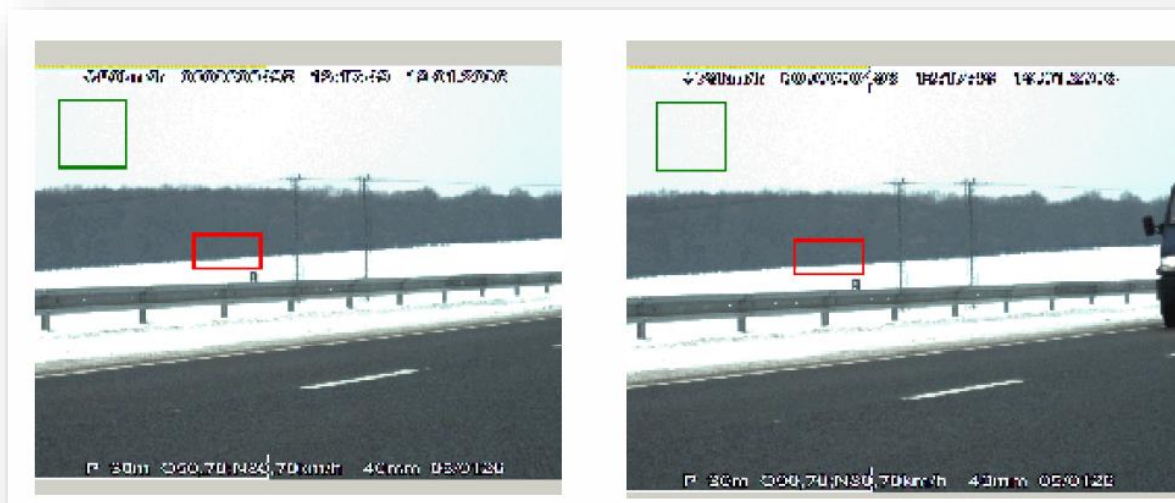
Na obrázku č. 9 vidíme radarový paprsek, který je odražen zpět do jízdní dráhy dopadající na jiný automobil jedoucí ve stejném pruhu, stejným směrem. Na jednoduchou reflexi přicházíme z pořízených snímků radaru, kdy není zobrazen žádný automobil, nebo je vozidlo zachyceno pouze částečně. [15]

Jednoduchá reflexe se může projevit i vyfocením dopravní značky jakožto potencionální reflexní plochy s uvedenou rychlostí jízdy vozidla pohybujícího se v druhém jízdním pruhu. Tento případ je znázorněn na obrázku č. 10. [15]



Obrázek 10: Jednoduchá reflexe lomu paprsku na stacionární reflexní ploše [15]

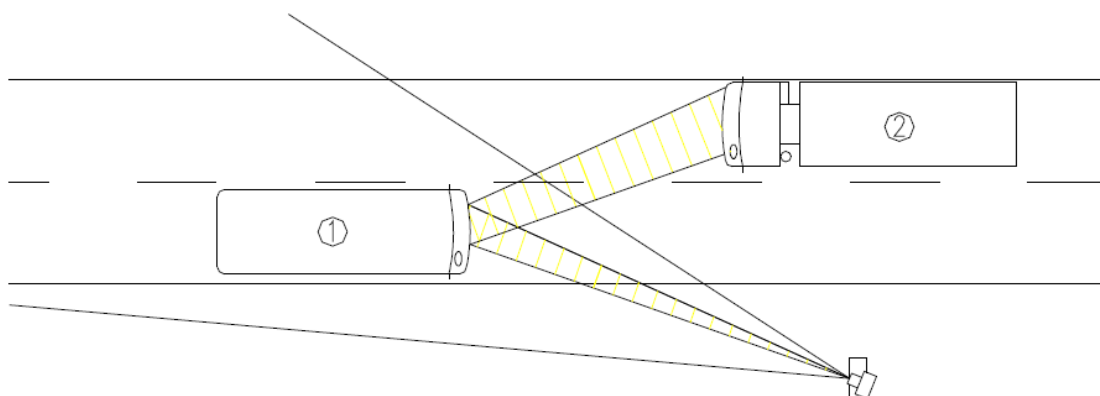
Příklady pořízených fotografií z radaru jednoduché reflexe jsou na obrázku č.11.



Obrázek 11: Příklady jednoduché reflexe [15]

### Dvojitá reflexe

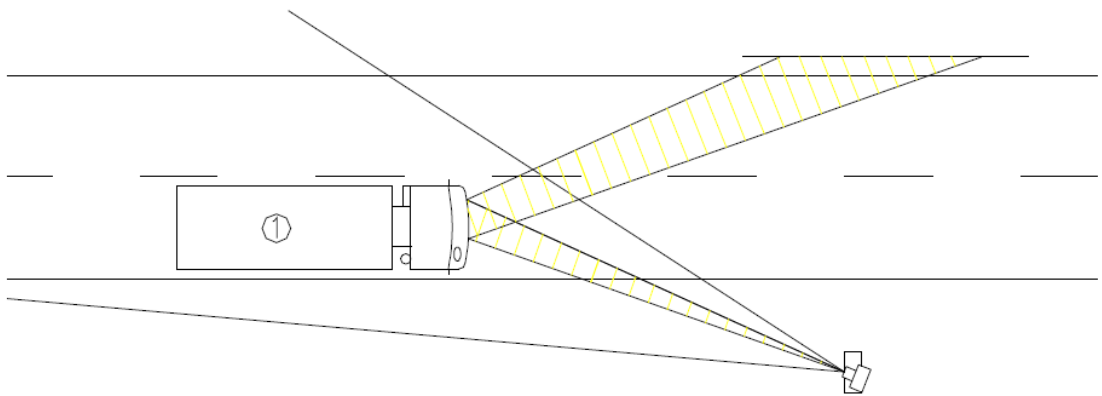
U dvojité reflexe se signál odráží od měřeného vozidla na vozidlo přijíždějící z protisměru a zpět do radaru. K odrazu jsou potřeba velkoplošné reflexní plochy, které jsou například u kamionů. Odraz je znázorněn na obrázku č. 12. [15]



Obrázek 12: Dvojitá reflexe [15]

### Reflexe na trojitém zrcadle

Vzniká odrazem od kolmých za sebou stojících odrazových ploch. K reflexi dochází převážně u rohů „zrcadel“. Zrcadla se vyskytují například na ocelových konstrukcích jako jsou mosty, kovové lešení. Vznik reflexe na trojitém zrcadle je málo pravděpodobný a je znázorněn na obrázku č. 13. [15]

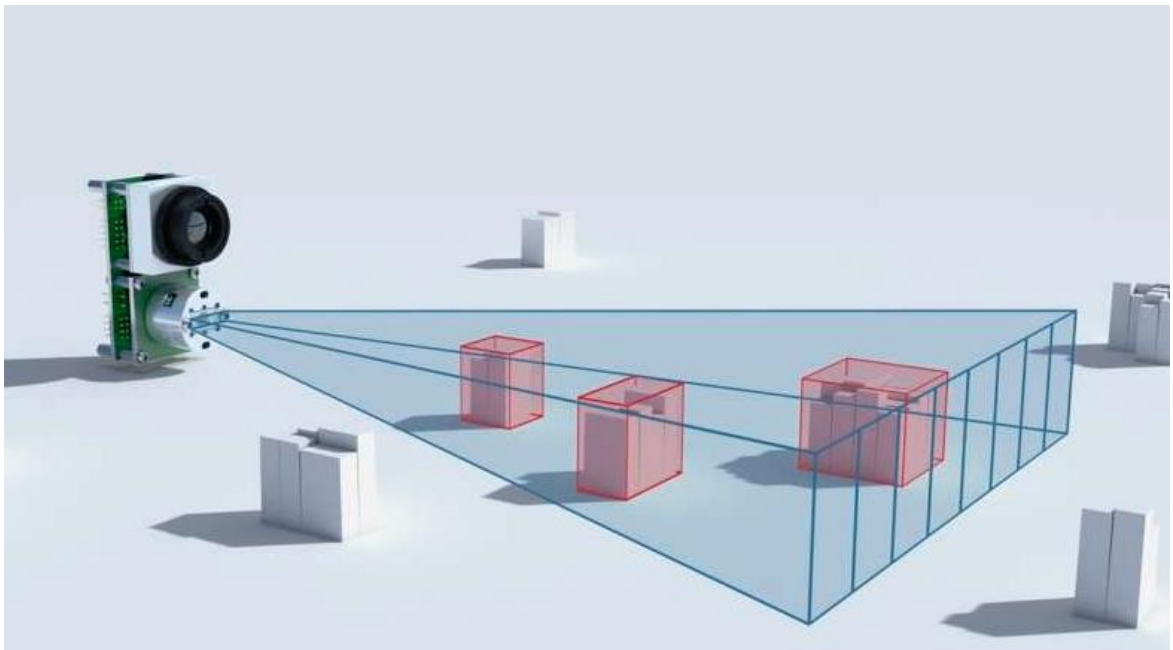


Obrázek 13: Reflexe v koutovém odražeči [15]

### 1.2.7 Aktivní infračervené detektory - Lidar

Lidar stejně jako radar i sonar funguje na principu měření času mezi vysláním, odrazem a zachycením odrazu. Na základě naměřených dat vypočítává vzdálenost objektů kolem sebe nebo v určeném směru. Lidar je používán též jako měřič rychlosti. K měření je využíván laserový paprsek. [9]

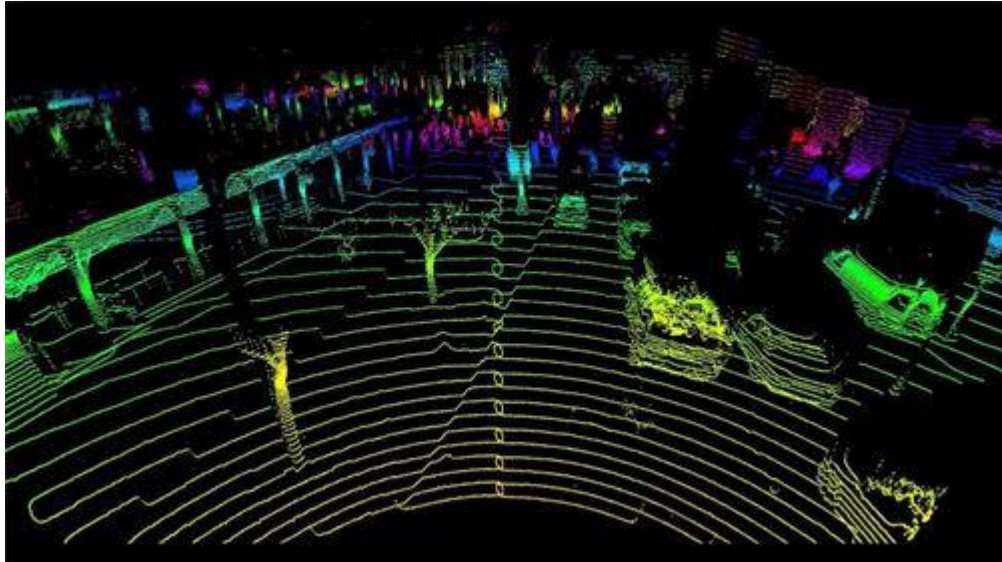
Na obrázku č.14 je vidět, jak lidar osvětluje okolí světlem paprsku a měří odražené impulsy snímačem. Z výpočtů pak dokáže vytvořit digitální trojrozměrnou prezentaci okolního prostoru. [9]



Obrázek 14: Základní funkce lidaru [9]

Po vyslání paprsku laseru se světlo pohybuje do doby, než zasáhne předmět jeho trajektorie. Po zasažení cíle se paprsek částečně vrací zpět k emitoru. U vysílače musí být tedy v blízkosti

i detektor pro identifikování. Po získání odraženého paprsku je schopný spočítat vzdálenost cíle pomocí časového rozdílu mezi vyzařovaným a přijatým pulsem. Lidar se také používá pro mapování vzdušného prostoru pomocí laserových plotů. Technologii laserových plotů využívá i řízení a navigace u některých autonomních automobilů. Na obrázku č. 15 je vidět výstup z mapování prostředí kolem lidaru. [9]



Obrázek 15: Mapování prostředí lidarem [9]

## Historie

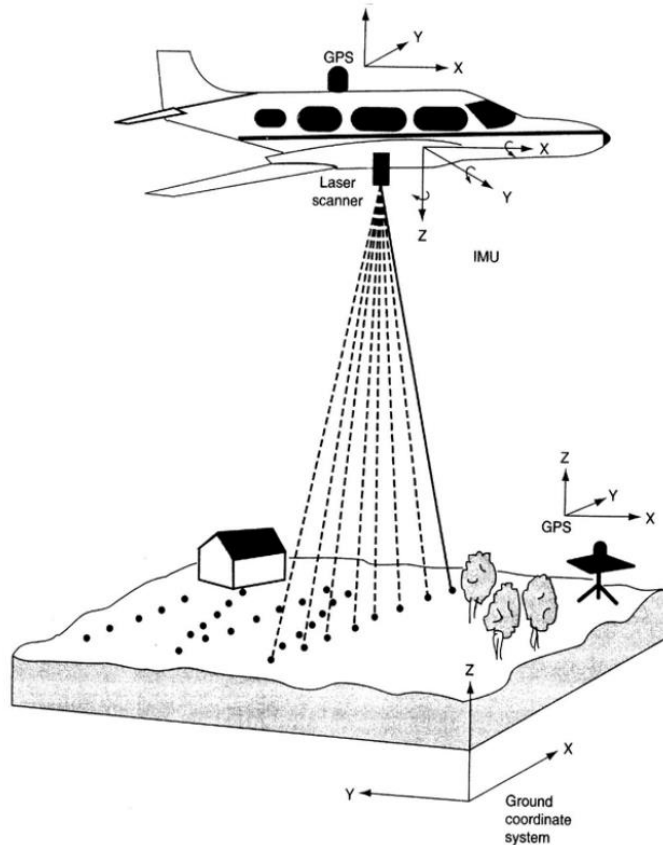
V roce 1930 vznikla základní koncepce lidaru, při použití velmi výkonných reflektorů pro zkoumání atmosféry. Zásahu si připsala společnost EH Synge a lidar se od té doby začal hojně využívat pro výzkum atmosféry a meteorologii. [9]

Lidar jako takový vznikl o 30 let později v roce 1960, krátce po vynálezu laseru, který využívá. Své první využití našel v meteorologii, kde byl využíván americkým Národním centrem pro výzkum atmosféry k měření oblačnosti. Posléze v roce 1971 byl využit u během misí Apollo 15 k mapování povrchu Měsíce. [9]

## Princip fungování Lidaru

Lidar nemusí používat pouze neviditelné světlo jako je infračervené nebo ultrafialové záření, ale může využít světlo v jeho viditelném spektru. Je schopný zaměřit mnoho různých materiálů i nekovových předmětů, hornin, chemických sloučenin, dešťových srážek, aerosolů, oblačnosti, dokonce i jednotlivé molekuly. [9]

Paprsek laseru dokáže mapovat fyzické vlastnosti ve velmi vysokém rozlišení. Díky technologii lidaru je možné mapovat terén při leteckém průzkumu s rozlišením až 30 centimetrů. Mapování terénu je vidět na obrázku č. 16. [9]



Obrázek 16: Mapování terénu při leteckém průzkumu [10]

Principy mapování terénu:

- letoun nemůže létat v oblacích
- často se létá v noci
- překrytí 30 až 50% ve strmějším terénu
- v městských oblastech se provádějí vícenásobné průlety v různých úhlech tak, aby se mapování vyvarovalo "stínu"
- letecká nadmořská výška je typicky 200 až 300 metrů (v městské oblasti je nadmořská výška vyšší)
- pro každý laserový impuls je použito více "návratů" ze skeneru
- moderní systémy dokáží překódovat až 5 návratů paprsku pro každý impuls [10]

Při použití v dopravě u běžně dostupných lidarů se samozřejmě používají lasery bezpečné pro oči a díky tomu nepodléhají žádnému bezpečnostnímu opatření. Systémy s vysokým výkonem jsou používány právě při výzkumu atmosféry, kde získáváme údaje o výšce, vrstvení a hustotě oblačnosti, vlastnostech částic oblaků, teplotě, tlaku a koncentraci stopových plynů jako je například ozon, metan, oxid dusný. [9]

Princip měření rychlosti policejním laserem využívá základní principy lidarů. Policista laserovým radarem zaměří vozidlo, které chce měřit, stiskne spoušť a vyšle proti vozidlu infračervené impulzy o vlnové délce 904 nm., které se od vozidla odrazí zpět. Na základě získaných dat pak laser vypočítá rychlost vozidla. [11]

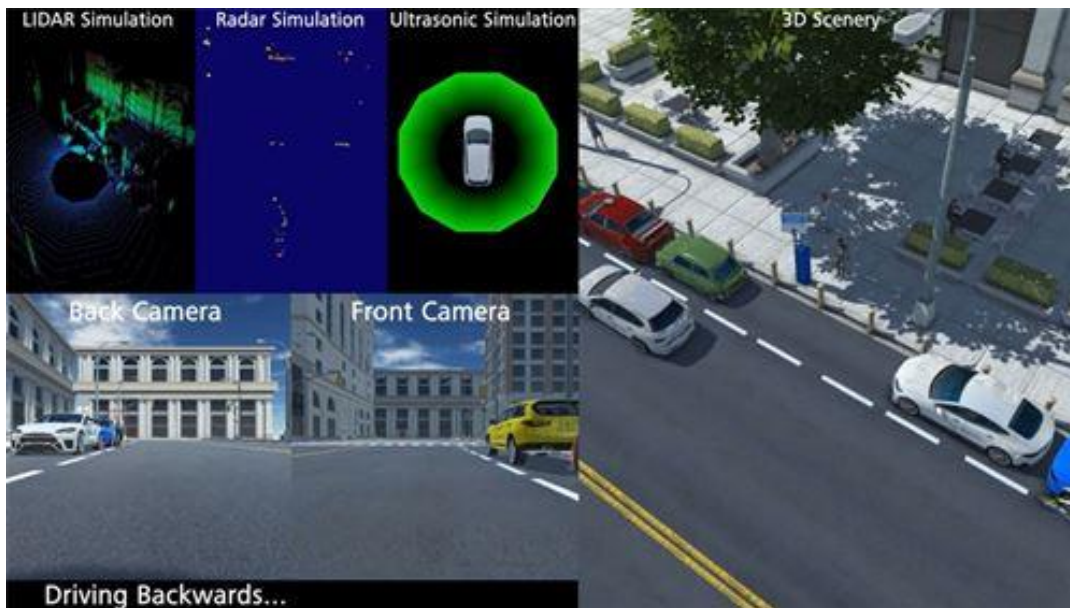
### **Lidar v autonomních vozidlech**

V autonomních vozidlech lidar slouží hlavně jako detektor překážek a mapuje prostředí kolem vozidla. Ze získané mapy vozidlo získá povědomí o potencionálních překážkách a kde se vůči nim vozidlo nachází. Všechna získaná data jsou zpracována softwarem automobilu, který vyhodnocuje situaci a predikuje riziko možné kolize. Software nejen dokáže překážku identifikovat, ale také zjistí její velikost, rychlost a směr pohybu. V případě možného střetu informuje řidiče nebo situaci vyřeší úhybným manévrem nebo zastaví. Lidar může tedy plnit funkci i jako bezpečnostní systém. Ze stávajících bezpečnostních systémů je to například adaptivní tempomat, asistence nouzového brždění a protiblokovací systém. Narazit na něj můžeme docela často, jelikož je použit i pro parkování, detekci mrtvého úhlu nebo u indikace značek a jízdního pruhu. [9]

Lidar využívá rotační šestihranná zrcadla, která rozptylují laserový paprsek. Tři paprsky slouží k detekci překážek a další se používají k indikaci značení jízdního pruhu a dopravních značek. [9]

Autonomní vozy potřebují k provozu více technologií než jen lidar. Používají také radary, ultrazvukové senzory a kamery. Pomocí software je pak vytvořen kompletní obrázek. Ukázka z výstupu systémů je na obrázku č. 17. Velké množství systémů využívá například Toyota ve svém autonomním vozidle, kde pracuje současně dvanáct senzorů mapující okolní svět. [9]

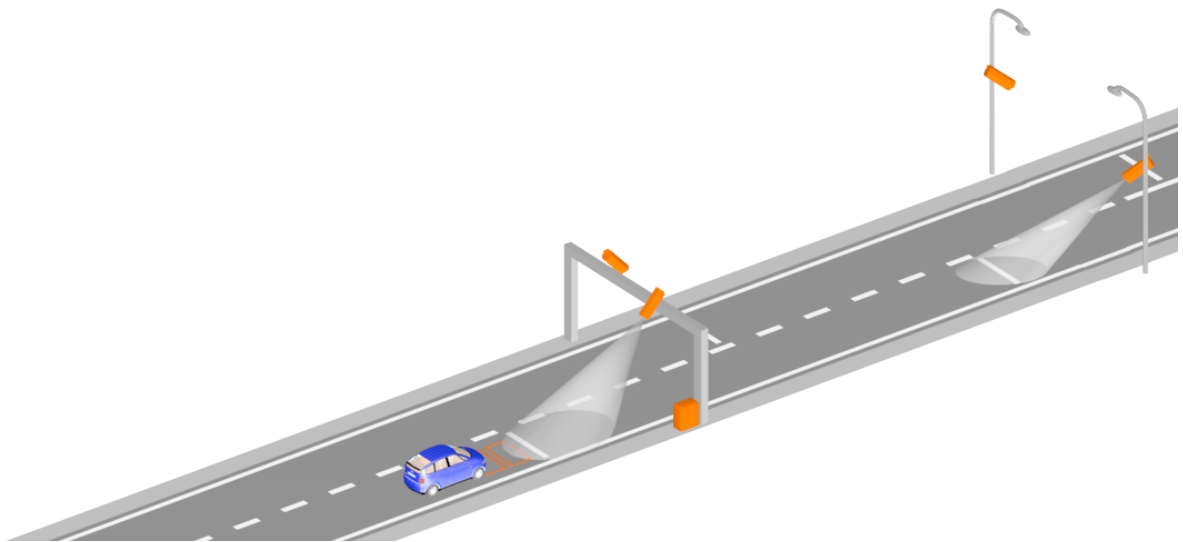




Obrázek 17: Systémy v autonomním vozidle [9]

### 1.2.8 Úsekové měření rychlosti vozidel

Úsekové měření na rozdíl od měření v jednom bodě pomocí běžných radarů a lidarů je pasivní formou měření rychlosti. Výstupem získáváme rychlost průměrnou z měřeného úseku jízdy vozidla. Provádí se za pomoci kamer, které zaznamenávají vjezd a výjezd vozidla z úseku, který je měřen. Ukázka měření je znázorněna na obrázku č. 18. Systém kamer dokáže evidovat registrační značku a díky informaci o čase vjezdu a výjezdu, tedy ze známé doby v úseku společně s délkou měřeného úseku je schopný vypočítat průměrnou rychlost vozidla. V případě více jízdních pruhů je použito více kamer, které jsou navzájem propojené a sdílí naměřené informace. Díky propojení kamer se systém nedá oklamat změnou jízdního pruhu. [11]



Obrázek 18: Úsekové měření [12]

Parametry měřených hodnot:

- Rozsah rychlostí: 1 – 250 km/h
- Přesnost:  $\pm 3$  km/h ( $v < 100$  km/h),  $\pm 3$  % ( $v \geq 100$  km/h)
- Délka úseku: 100 m – 10 km [12]

V případě překročení povolené rychlosti je vozidlo při výjezdu z úseku kamerou vyfoceno. Ukázka záznamu vozidla porušující rychlosti je na obrázku č. 19.



Obrázek 19: Detailový snímek z úsekového měření [13]

## 2 Úvod do problematiky optovláknových technologií a senzorů

K.O. Hill v roce 1978 objevil fotosenzitivitu ve vláknech. Objev vytváření vláknové mřížky vznikl u demonstrace, kde pomocí dvou interferujících světelných svazků dosáhneme v jádře optického vlákna zapsání stálé mřížky. V současné době již používáme k výrobě vláknové mřížky boční expozici UV záření. V praxi je možné se setkat s dvěma typy vláknových mřížek a to s mřížkou s dlouhou periodou (Long Period Fiber Gratings – LPFGs) a Braggovou vláknovou mřížkou (Fiber Bragg Gratings – FBGs). Rozdílné jsou jak v délce periody, tak v principu výroby. FBGs se nejčastěji vyrábí přímým osvětlením interferujících svazků přes fázovou masku. LPFGs se vyrábí osvětlením z boční části vlákna skrz amplitudovou masku. [7]

### 2.1 Co je to Fibre Bragg Grating

Fibre Bragg Grating (FBG) je optická pasivní složka, která vykazuje základní funkční vlastnosti odrazu a filtrování. Základní struktura Braggových vláken obsahuje krátkou část optického vlákna o jednom módu, v němž je pravidelně modulován index lomu jádra. FBG jsou poměrně jednoduché k výrobě, jelikož mají malé rozměry, nízké náklady a vykazují dobrou odolnost proti změnám okolních podmínek a EM záření. FBG je typ distribuovaného Braggova reflektoru konstruovaného v krátkém segmentu optických vláken, který odráží konkrétní vlnové délky světla a přenáší všechny ostatní. [8]

Snímače založené na FBG obecně přitahují obchodní zájmy a rozvíjejí některé lukrativní tržní prostory. Přesto existuje řada významných technických a tržních překážek, které je třeba překonat.

- Neznalost technologie
- Konzervativní přístup některých průmyslových odvětví a zákazníků
- Nedostatek vědomí a pochopení o provozu a výhodách použití senzorů FBG
- Dostupnost vyškoleného personálu
- Systémy na klíč (kompletní snímací řešení)
- Nedostatek norem
- Kvalita, výkon, obaly a spolehlivost v dodavatelích

FBG jsou komerčně využívány v oblasti telekomunikací a senzorů.

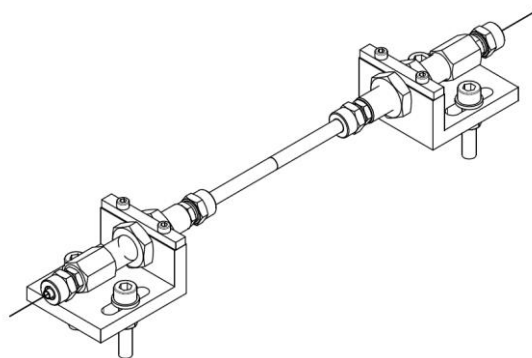
Telekomunikace:

- Vlákňové lasery
- Vlákňové zesilovače
- Vlákňové filtry
- WDM – Vlnový multiplex (wavelength-division multiplexing, WDM) představuje v optických sítích technologii, kterou se při přenosu multiplexuje více optických signálů v jednom optickém vlákně s použitím rozdílných vlnových délek (barev) LED nebo laserů. [28]
- Multiplexery – Multiplexor (anglicky multiplexer) je elektronický člen, fungující na principu přepínače, kdy je podle řídicích signálů (a) přiváděn na výstup (y) jeden ze vstupních signálů (x). [29]
- Demultiplexory – Demultiplexor (anglicky **demultiplexer**) je elektronická součástka, fungující na principu přepínače, kdy je podle řídicích signálů (a) přiváděn na výstupy (y) vstupní signál (x). [30]

#### Senzory:

- Tenzometry
- Snímače teploty
- Tlak
- Vlhkost vzduchu
- Chemické snímače
- Akcelerometry

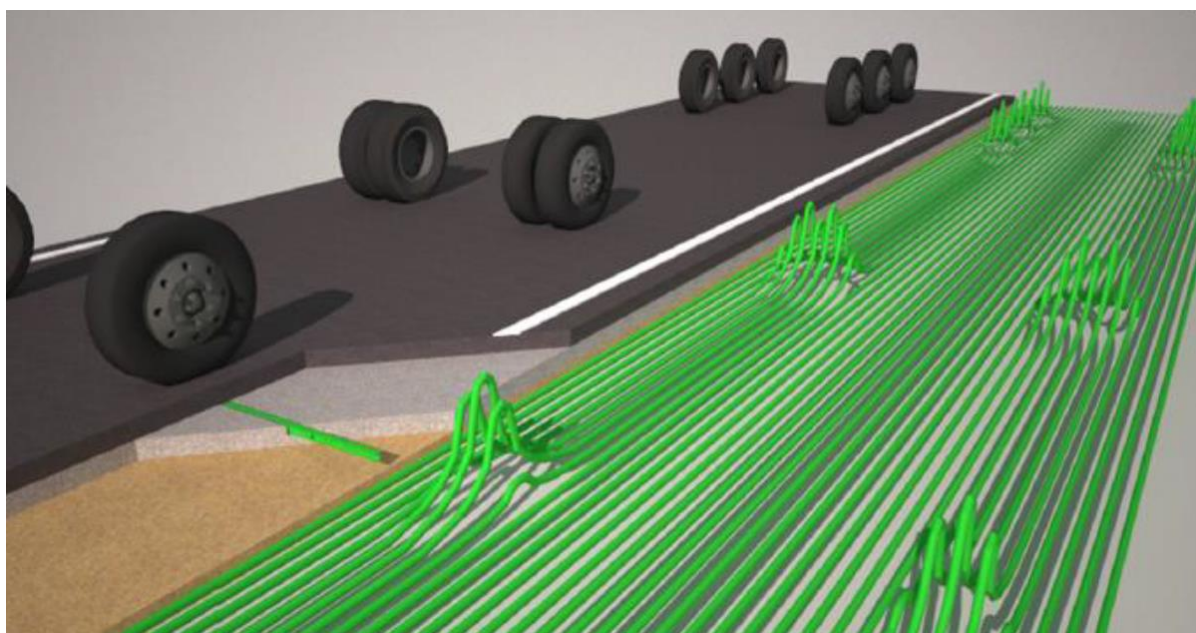
Ukázka optovlákňového senzoru je na obrázku č. 20.



Obrázek 20: Ukázka senzoru [8]

## 2.2 Weigh in Motion

Systém Weigh in Motion (WIM) měří a zaznamenává data z projíždějících vozidel. Tyto záznamy se používají pro count data, což je statistický typ dat nabývajících nezáporných hodnot, dále pro statistiku provozu a výpočet faktorů údržby silnic, tunelů nebo viaduktů. Tento systém lze rozšířit kamerami pro zachycení a prezentaci silně zatěžujících vozidel. Systémy WIM jsou v Nizozemsku využívány od roku 1997, stále více na dálnicích. Systém WIM je vybaven detekčním systémem vozidla a systémem měření zatížení náprav. Tyto systémy mohou zaznamenávat informace o vozidle, jako je rychlost, délka, zatížení náprav, které je vidět na obrázku č. 21 a celkové zatížení. [16]

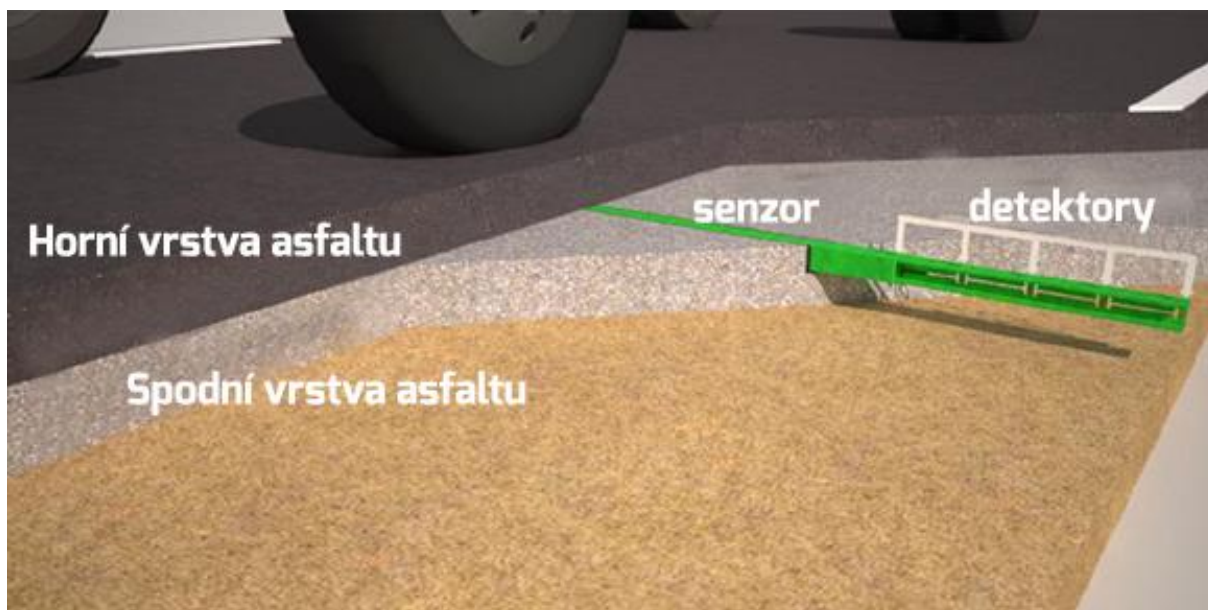


Obrázek 21: Znázornění zatížení náprav pomocí systému WIM [16]

Systém WIM se skládá z řady snímačů na povrchu vozovky kombinovaných se speciálním hardwarem a softwarem. Induktivní detekční obvody a snímač WIM FO (Optical Fiber) detekuje vozidlo a získává analogové údaje o tlaku na pneumatiku. Detektor indukční smyčky a optický detektor (dotazovací jednotka) převádějí analogové datové signály na digitální data. Tato data jsou analyzována softwarem WIM FO a zpracovávána na požadované informace o vozidle. Výsledky jsou uloženy v databázi, která je prezentována koncovému uživateli prostřednictvím grafického uživatelského rozhraní (GUI).

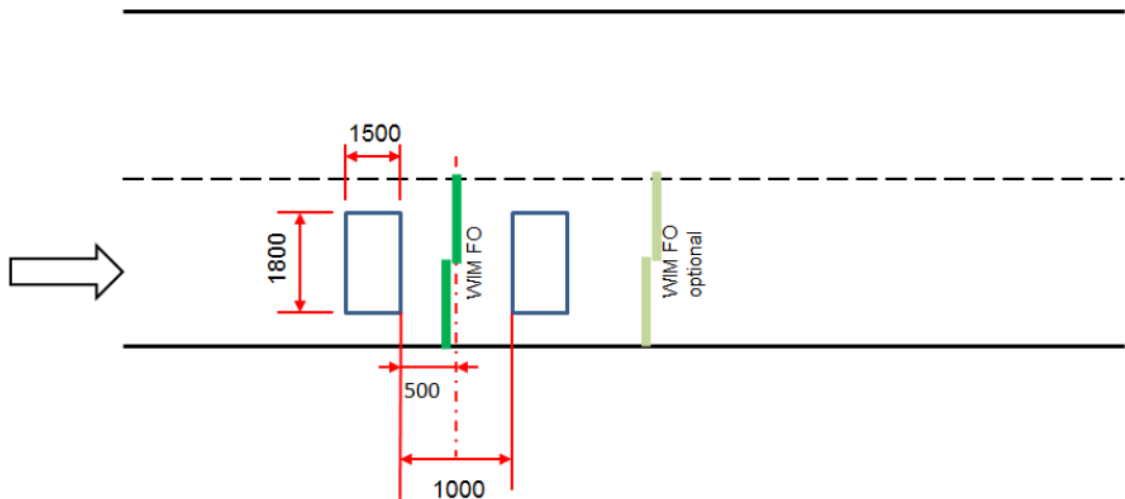
Snímač WIM-FO je založen na technologii optických vláken (Fiber Bragg Gratings) pro měření tlaku (hmotnosti). Snímač neobsahuje žádné elektrické obvody a nevyžaduje žádné napájení. Proto optické senzory nejsou ovlivňovány elektromagnetickým zářením. Snímač je umístěn 2 až 9 cm pod povrchem vrchní asfaltové vrstvy a je připojen čtecí jednotkou (dotazovací jednotka) přes optický kabel. Umístění je znázorněno na obrázku č. 22. Dotazovaná jednotka

dodává naměřené hodnoty počítači, který analyzuje a určuje stopu (vážení a povrch všech kol) projíždějícího vozidla. Čtecí jednotka může být umístěna například v blízkosti senzoru podél silnice nebo několik kilometrů od místa měření. Pro každou z těchto možností není potřeba žádné další zařízení mezi snímačem WIM-FO a čtecí jednotkou. Snímače zatížení náprav WIM-FO jsou k dispozici ve dvou délkách 1,75 m a 3,5 m. V silničních pruzích od 1,75 m do 3,5 m mohou být použity dva kusy snímačů 1,75 m. Příklad rozměrů senzoru je vidět na obrázku č. 23. [16]



Obrázek 22: Místo umístění detektorů ve vozovce, Obr. Upravený autorem [16]

System WIM-FO se skládá z řady senzorů na povrchu vozovky. Standardní konfigurace obsahuje dvě indukční detekční smyčky a jeden nebo dva snímače FO na jeden pruh. Tyto senzory FO jsou umístěny ve spodní vrstvě asfaltu (pod horní vrstvou). Prostřednictvím dvou detekčních smyček můžeme zjistit rychlost, délku a směr. Snímač WIM-FO rovněž měří hmotnost (tlak) na asfaltu, délku a šířku (stopu) a polohu kol (jedno nebo dvojkolí). [16]



Obrázek 23: Rozměry senzorů ve vozovce [16]

System WIM-FO zahrnuje skladovací kapacitu pro nejméně 100 milionů vozidel. Kromě toho naměřené údaje jsou trvale zachovány a zálohovány.

Ze všech informací o vozidle lze například provést následující analýzy:

- počet vozidel podle kategorie a jízdního pruhu
- průměrná rychlost podle kategorie a jízdního pruhu
- celkový počet vozidel za hodinu
- počet vozidel na jednu kategorii za den
- průměrná rychlost za kategorii za den
- průměrná hmotnost za kategorii za den
- počet vozidel na 2 tunové třídy (0 až 2 tuny, 2 až 4 tuny)
- počet vozidel
- počet vozidel s jednou nápravou na 1 tunu, od 1 do 25 tun
- počet vozidel s dvěma nápravami na 1 tunu, od 1 do 35 tun
- počet třínápravových vozidel na 1 tunu, od 1 do 40 tun
- poškození vozovky [16]

Informace, které jsou k dispozici ze systému WIM-FO, poskytují informace o dopravním pohybu, dopravním toku a hustotě provozu [16]

System vážení v pohybu byl vyvinut pro zaznamenání hmotnosti vozidel bez narušení provozu. Získané informace umožňují efektivně plánovat požadovanou údržbu. Politické zaměření na efektivní dopravu způsobilo změnu v profilech pneumatik (šířka a tlak vzduchu). Měření na určitém úseku je cenné pro rozhodování o druhu asfaltu, který se má používat. [17]

Nejdůležitější analytické techniky:

- Celková hmotnost vozidla – hmotnosti na nápravu nebo na kolo
- Footprint pro pneumatiky – detekce plochých pneumatik
- Alarm pro nevyvážená vozidla – pro vozidla v pohybu
- Předvídatelnost údržby – Ušetří peníze díky lepšímu plánování [17]

**Cílem použití systému Weigh-in-Motion je především získat informace o:**

- Dopravní pohyby
- Silniční náklad
- Tok dopravy
- Předvídatelnost údržby
- Individuální zatížení kol
- Nevyvážené zatížení
- Příčná poloha zatížení náprav

**Systém zaznamenává:**

- Čas průchodu
- Rychlost vozidla
- Délka vozidla
- Vzdálenost mezi vozidly ve stejném pruhu
- Počet náprav na vozidlo
- Celková hmotnost vozidla
- Hmotnost na nápravu
- Hmotnost na skupinu náprav
- Šířka na kolo
- Hmotnost na kolo
- Vzdálenost mezi nápravami
- Kategorie vozidla
- Teplota pod horní vrstvou
- Prahové alarmy
- Nevyvážený alarm zatížení [17]

**Nejdůležitější analytické techniky**

- Statické zatížení – stálé zatížení
- Dynamické zatížení – náhodné zatížení projíždějících dopravních prostředků



- Napětí – monitoring změn
- Ohýbání - průměrné vnitřní pnutí
- Praskliny – sledování případných změn na prasklině

### **Structural Health Monitoring**

Sledování strukturální integrity civilních infrastruktur se nazývá Structural Health Monitoring (SHM) a je v dnešní době stále důležitější otázkou ke snížení nákladů na vlastnictví. Primární funkce monitorování je zajistit bezpečnost konstrukce a optimalizovat její údržbu. Náklady na kolaps mostu mohou být mnohem větší než jen ekonomického charakteru, mohou se dotknout i života lidí. Provádění komplexních SHM v civilní infrastruktuře je možné pomocí senzorů optických vláken, které zajišťují bezpečnost staveb a pomáhají je efektivněji spravovat. Monitorovací systém SHM je založen na technologii Fiber Bragg Grating (FBG) a přináší mnoho výhod oproti běžným snímacím metodám, což usnadňuje sledování stavu velkých konstrukcí. [17]

### **Fiber Bragg Grating**

FBG má vynikající charakteristiku své multiplexní schopnosti a sebereflexe. To znamená, že několik snímačů s různými funkcemi může být zapojeno do série na jediném vlákně bez ztráty naměřených dat a díky vedení v jednom vlákně docílíme velké úspory materiálu. Spojení mezi jednotkou a senzory je zajištěno prostřednictvím standardních telekomunikačních vláken. Vzdálenost mezi jednotkou a senzory může být až několik desítek kilometrů. Proto je možné pokrýt velkou plochu pouze s jednou jednotkou a velkým množstvím senzorů. V měření každé mřížky je odražená vlnová délka, která je absolutním parametrem. Díky použité technologii máme možnost vypnutí přístroje nebo výměnu měřicí jednotky bez nutnosti kalibrace. [17]

### **Výhody při využití systémů**

- Včasné varování v případě nepříznivých událostí
- Prevence katastrofických poruch
- Plánování servisu a údržby
- Správa vzdálených oblastí jedním systémem
- Použití stávajících optických sítí
- Systémová autonomie a okamžitá akce přes relé
- Online informace o struktuře s rychlou reakcí
- Reporting a analýza dat
- Možnost řešení a nastavení na míru dané situaci
- Systémové řízení a akvizice dat prostřednictvím webu

## 2.3 Interrogation Unit FBGuard 1550 FAST

FBGuard 1550 FAST je kompaktní, interní dotazovací jednotka FBG pro průmyslové účely. Pro představu vzhledu jednotky je obrázek č. 24. FBGuard nabízí spolehlivý, dlouhodobý provoz v terénu (24/7), který může být používán pro širokou oblast aplikací. Jednotka je určena pro vysoce přesná statická a dynamická měření Snímače Fiber Bragg Grating. Zařízení pokrývá široký rozsah vlnových délek a současně poskytuje měření při velmi rychlé odezvě s vynikajícím rozlišením vlnové délky. Systém může být opatřen až osmi optickými kanály s 40 snímači FBG na kanál. To poskytuje cenově výhodné řešení pro průmyslová měření. [17]



Obrázek 24: FBGuard 1550 FAST [17]

FBGuard 1550 FAST obsahuje širokopásmový světelný zdroj a provádí spektrální analýzu pomocí lineárního detektoru pole a obsahuje spektrometr. Systém je zcela autonomní s integrovanou jednotkou pro PC, webovým serverem. Disponuje konfigurací alarmů, frekvencí měření, zaznamenávání dat na integrovaném SSD. Rozhraní Ethernet umožňuje vzdálené připojení k libovolnému počítači přes protokol TCP / IP. Navíc má dva porty USB 2.0. Dále umožňuje zasílat oznámení prostřednictvím e-mailu a SMS.

Systém je dodáván s analytickým a konfiguračním softwarem, který se používá k vizualizaci spektrální informace, vypočítá vlnovou délku a převádí data vlnové délky do měřených dat (napětí, teplota atd.).

### Funkce

- Až 8 paralelních optických kanálů (1, 2, 4, 8)

- Maximální frekvence snímání (až 11 kHz)
- 40 senzorů FBG na kanál (s měřením rozsah snímače 1nm / FBG)
- Statické a dynamické měření
- Kompaktní a robustní provedení pro provoz 24/7
- Samostatné protokolování dat
- Detekce událostí (přímé poplachové relé, oznámení prostřednictvím e-mailu a SMS)
- Vestavěná procesorová deska s veškerým rozhodnutím funkce
- Vynikající přesnost a přesnost vlnových délek
- Rozhraní Ethernet nebo RS-485 (pro komunikaci)
- Uživatelsky příjemné webové rozhraní
- Velká vzdálenost mezi objektem a měřicí jednotku

### **Aplikace**

- Stavební stavby: tunely, mosty, doly, budovy, přehrad
- Doprava: Železnice, vlaky, silnice, speciální vozidla, jeřáby
- Energie: Větrné turbíny, potrubí, jaderné reaktory, solární panely farmy, elektrické stožáry
- Vnitřní bezpečnost: Vniknutí perimetru, detekce a klasifikace vozidel, monitorování bezpečnostních bran
- Letectví a kosmonautika: letadla, kompozitní konstrukce, větrné tunely, dynamické testy
- Námořní lodě: Trup, stožár, kormidlo, paluba, nákladní kontejnery
- Lékařské přístroje: sondy, katétr

### **Typy senzorů**

- Napětí
- Teplota
- výtlak
- Vibrace
- Akcelerace
- Sklon
- Tlak
- Zatížení

## Interrogation Unit FIBERGUARD DISRIBUTED VIBRATION SENSOR

FiberGuard je plně automatizované preventivní monitorovací řešení pro detekci zásahu od třetích stran v reálném čase, geo-hazard aktivitu a netěsnosti. Schopnost detekovat malé úniky je jedinečnou výhodou společností FiberGuard. Tato jedinečná technologie funguje jako nepřetržitý mikrofón o délce až 50 km, který je určen pro monitorování přes bezprecedentní šířku pásma quasi-DC až 500kHz až po velmi výrazné generované kmitočty akustickými TPI a ultrazvukovými únikovými jevy, přičemž se rozlišuje mezi normálními a okolními podmínkami. Jednotka je vyobrazena na obrázku č. 25. [17]



Obrázek 25: FIBER GUARD [17]

Je to zdaleka nejširší kmitočtový pás dostupný pro jakoukoli distribuovanou technologii snímání optických vláken, a je prvním světovým distribuovaným ultrazvukovým senzorem optických vláken. V důsledku toho je tato technologie schopna monitorovat daleko za normální kmitočtovou šířku běžných systémů DAS, které jsou typické <2kHz pro dosah 40 km. Další významná diferenciační výhoda tohoto transmisivního hybridního interferometru je, že jeho frekvenční odezva a polohové rozlišení / přesnost nejsou degradovány rostoucí vzdáleností, na rozdíl od konvenčních systémů DAS. [17]

Ve srovnání s jinými konkurenčními technologiemi se FiberGuard vyznačuje následující hlavní provozní schopností:

1. Provozuje mimořádně široký frekvenční rozsah (3 Hz až 500 kHz) a je první a jediný na světě distribuovaný ultrazvukový detektor. Výsledkem je, že detekuje a lokalizuje úniky v rané fázi přímo, o hodně dříve než jiné kabelové systémy.

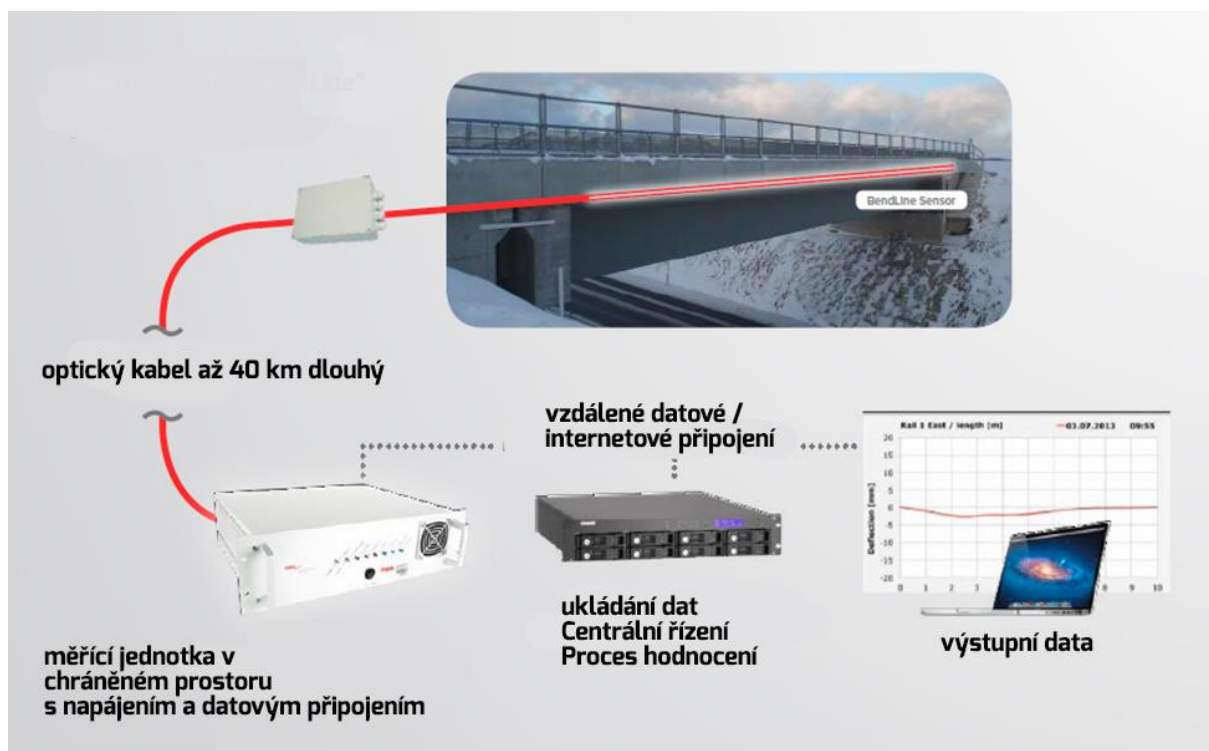
2. Je účinný při diskriminaci různých typů rušení a hluků z prostředí / dopravy potenciálně nebezpečné provozní události / hrozby. Tím, že snižuje počet planých poplachů, je potřeba v případě hlášení alarmu nebrat poplach na lehkou váhu. Mechanismy automatické reakce díky přesnosti hlášení krizové situace získávají praktickou odpovědnost. [17]

### Aplikace

- Monitorování potrubí: Intruze třetí strany (TPI), Detekce průsaků
- Systém detekce narušení perimetru (PIDS): Doprava (železnice, letectví a přístavy), opravy, energie a služby, ropné a chemické, armáda a vláda, hranice, tunelování detekce
- Zabezpečení dat: Nelegální odposlouchávání citlivých dat, fyzické vniknutí, seizmická aktivita [17]

## 2.4 Senzory BendLine

BendLine je systém pro měření a zobrazení vlastností ohybu, jeho technologie je založená na dálkovém snímání z optických vláken. Systém se skládá ze dvou prvků: místního zařízení pro měření a uživatelského rozhraní online, kde systém může upozornit v případě překročení definovaných mezí. Řešení poskytuje dynamické a statické měření strukturálního chování v reálném čase. Jak senzory BendLine můžeme instalovat je vyobrazeno na obrázku č. 26. [17]



Obrázek 26: Schéma systému BendLine [17]

Hlavní výhody snímání z optických vláken:

- Cenově výhodné řešení pro kontinuální měření
- V oblasti měření není vyžadováno žádné napájení
- Konzistentní na dlouhé vzdálenosti a čas
- Vysoká přesnost měření
- Vzdálený přístup, data online
- Odolný proti vnějším účinkům: vlhkosti, vysoká teplota, EMI, RFI atd.
- Jiskrově bezpečné

Aplikace:

- Strukturální sledování zdraví
- Deformační analýza
- Monitorování zóny přechodu
- Monitorování mostu
- Monitorování budov
- Monitorování oblastí nakládky

Nejdůležitější analytické techniky:

- Celková hmotnost vozidla – hmotnost na nápravu nebo na kolo
- Otisk pneumatik – detekce plochých pneumatik
- Poplach – v případě překročení hranic bezpečnosti
- Předvídatelnost údržby – ušetříte peníze lepším plánováním [17]

## 3 Návrh využití optovláknové technologie a senzorů ve městě Děčín

Vzhledem k tomu, že Tyršův most je v Děčíně jednou z hlavních a důležitých spojnic, je pro město velmi důležité získávat data o jeho stavu a případných poruchách. V této kapitole bude představeno město Děčín, Tyršův most a následně návrh realizace umístění senzorů tak, aby město získalo důležité informace o dopravě pro koncept Smart City a současně o stavu mostu.

### 3.1 Město Děčín

Město Děčín je statutární město v okrese Děčín v Ústeckém kraji na soutoku řek Labe a Ploučnice. Rozloha města je 118,04 km<sup>2</sup> a má přibližně 49 000 obyvatel. Velký význam pro město má říční přístav. Děčín je důležitou železniční křižovatkou a protíná ho několik významných silničních tahů. Je také nejnižše položeným městem v České republice ( 135 m n. m.).

Osídlovat se začalo od labského brodu, kterým procházela významná obchodní stezka. Na zámecké skále bylo vybudováno přemyslovské hradiště, sloužící jako obranné a správní středisko. Gotický kamenný hrad vznikl ve 13. století na místě hradiště. V podhradí založil král Přemysl Otakar II. královské město. O Děčíně jakožto městě je první dochovaná písemná zmínka z roku 1283. Již dříve měli občané města problémy s povodněmi, proto ve 14. století přestěhovali centrum města o kus výše, přibližně do úrovně dnešního Masarykova náměstí. Díky rodu Thun-Hohensteinům, který koupil panství roku 1628, byl přestavěn městský hrad na barokní zámek a obklopen zahradami. V 18. století pak Thunové zámek přestavěli do dnešní klasicistní podoby. Dalším velkým přínosem pro město, důležitým doposud, je vybudování a zprovoznění železniční tratě Praha – Drážďany, 8. dubna 1851. Díky zprovoznění tratě se z Děčína začíná stávat průmyslové město a rozrůstá se vesnice Podmokly, která je v roce 1901 prohlášena za město, která má okolo 20 tisíc obyvatel. Za druhé světové války bylo dvojměstí Děčín a Podmokly sloučeny společně s obcí Staré Město do jednoho města s názvem Děčín. Po válce v roce 1945 k vniklému městu přibyly ještě další obce a to Rozbělesy, Chrochvice, Želenice, Vilsnice, Bynov, Bělá, Boletice nad Labem, Nebočady a Březiny.

V období komunistického režimu pokračovalo rozrůstání města a nadále se rozvíjel průmysl. Stavěly se nové bytové výstavby, které umožnily nárůst počtu obyvatel. Roku 1960 se Děčín stal okresním městem. Okres měl rozlohu 909 km<sup>2</sup> a okolo 130 tisíc obyvatel. Sídliště pak

vznikala hlavně ve Starém městě, v Boleticích nad Labem, v Želenicích, v Bynově, v Březinách a v Novém městě. Současně byla provedena nová výstavba moderního přístavu a překladiště v Loubí, díky které se stal Děčín nejvýznamnějším českým přístavem. Později roku 1980 se k Děčínu připojily další obce a to Dolní Žleb a Lesná.

[18], [19]

### 3.2 Tyršův most

Tyršův most byl postaven v roce 1932 a nahradil Řetězový most císařovny Alžběty, který byl postaven v roce 1855 kvůli nutnosti spojení Děčína s Podmokly, kde vedla železniční trať z Prahy do Drážďan. Původní most je vidět na obrázku č. 27. Důvodem byl nástup automobilové dopravy, pro kterou původní most nebyl dostačující kapacitou a ani technicky.



Obrázek 27: Původní řetězový most [31]

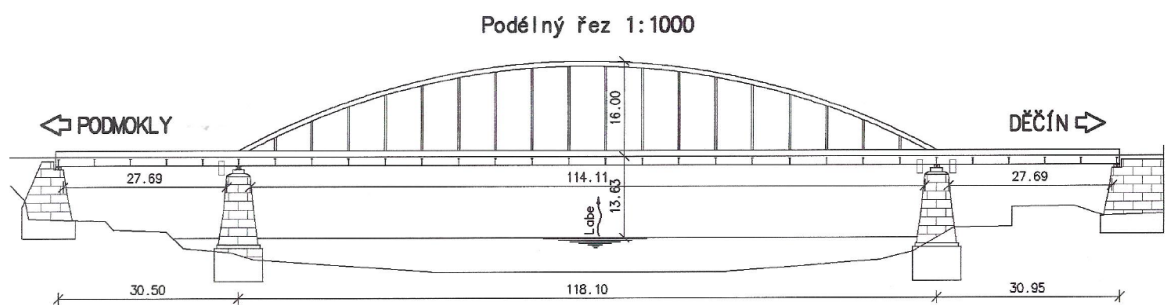
Kvůli úspoře byla řetězová konstrukce nahrazena za ocelovou umístěnou na původní pilíře původního mostu. Zakázku na stavbu mosty vyhrála akciová společnost Škodovy závody. Výměna za nový most je vidět na obrázku č. 28.





Obrázek 28: Stavba nového mostu [31]

Most se skládá ze tří polí. Prostřední pole je konstruováno jako obloukové s horním obloukem o výšce 17,5 m a má rozpětí 118,1 m. Krajní pole jsou trémové konstrukce a mají shodnou délku 30,5 m. Šířka vozovky je 9,2 m. Ocelová nýtovaná konstrukce má hmotnost 1200 t, z toho 715 t oceli St 52 (což je ekvivalent oceli 11523) a bylo v ní použito 70 tisíc nýtů. Celková hmotnost původního mostu byla 2400 t. Podélný řez mostu je znázorněn na obrázku č. 29 a jeho aktuální stav po rekonstrukci je vidět na obrázku č. 30.



Obrázek 29: Podélný řez [31]



Obrázek 30: Aktuální stav nového mostu [Zdroj: Autor]

### 3.3 Návrh a využití optovláknové technologie a senzorů

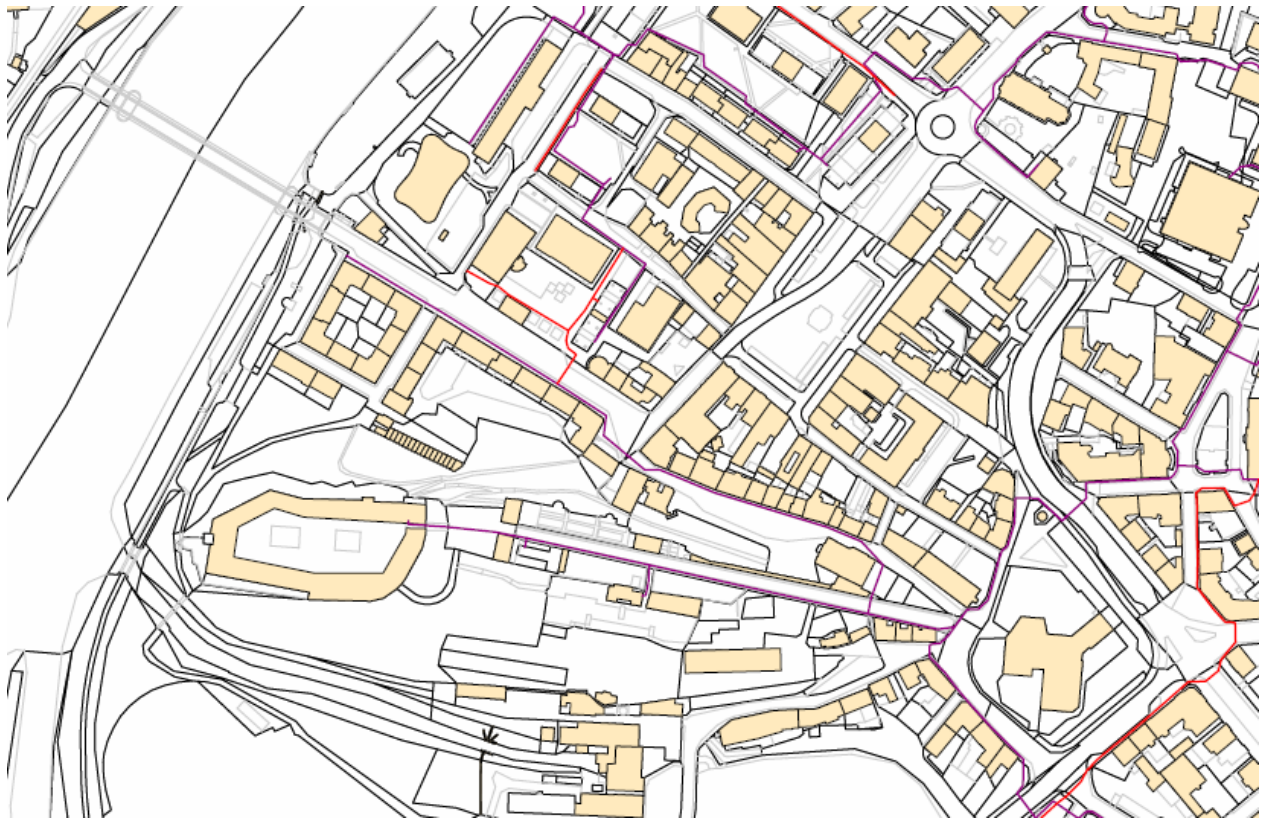
Měřicí systémy je možné napojit na online prostředí, díky kterému je možné sledovat aktuální data po celém světě. Tyršův most je jednou z nejdůležitějších staveb pro město a zajišťuje potřebné podmínky k fungování plynulé dopravy. O mosty je potřeba se starat a monitorovat jejich stav, který se zhoršuje nepřetržitým zatížením, někdy i nadměrným zatížením. Za účelem ochrany a udržitelnosti těchto infrastruktur je potřeba intenzivně sledovat a monitorovat jejich stav. Infrastruktury nevyhnutelně trpí akumulací škod jako je například environmentální koroze, stárnutí materiálu, únava materiálu a přírodní katastrofy během jejich dlouholeté služby. Pro zjištění konstrukční bezpečnosti, celistvosti, vhodnosti a trvanlivosti slouží monitorovací systémy, které vyhodnocují jejich bezpečnost a dále upozorňují na jejich případné poškození. [17]

Proto je na Tyršův most vhodné umístit systém Weigh in Motion, který měří a zaznamenává data z projíždějících vozidel, zejména pak rychlost, délku, počet náprav, hmotnost na kolo a celkové zatížení. Systém by bylo dobré rozšířit o kamery pro zachycení a prezentaci silně zatěžujících vozidel.

Dále by bylo dobré na most umístit systém BendLine pro měření a zobrazení vlastností ohybu mostu. Díky systému bude most nepřetržitě monitorován, bude možné předvídat údržbu mostu a v krizových situacích včas spustit poplach.

Vzhledem k tomu, že naměřená data se šíří pomocí optických kabelů je potřeba, aby město disponovalo sítí optických vláken a spojovalo most s centrem sběru dat.

Na následujícím obrázku č. 31 je vidět metropolitní síť města, kde je vidět fialová čára téměř spojující Tyršův most a sídlo univerzity ČVUT, které by mohlo být eventuálním centrem pro sběr dat.



Obrázek 31: Mapa optických kabelů po městě Děčín [31]

## 4 Provozní a ekonomické posouzení návrhu, porovnání s konvenčními systémy

V konvenčních systémech jsou senzory a detekční smyčky instalovány v horní vrstvě asfaltu. To znamená, že senzory jsou instalovány ve vyřezaných drážkách nebo zasazeny do položeného asfaltu. Vzhledem k opotřebení asfaltu musí být snímače každý rok měněny. Kromě toho musí být senzory vyměněny při velké údržbě povrchu vozovky. Zasazené senzory ve vozovce ovlivňují strukturu asfaltu. Změny teploty v létě a zimě mohou způsobit oddělení senzorů od asfaltu, což vyvolává další nutnost opravy jak senzorů, tak povrchu vozovky, což někdy bývá velmi drahé. [17]

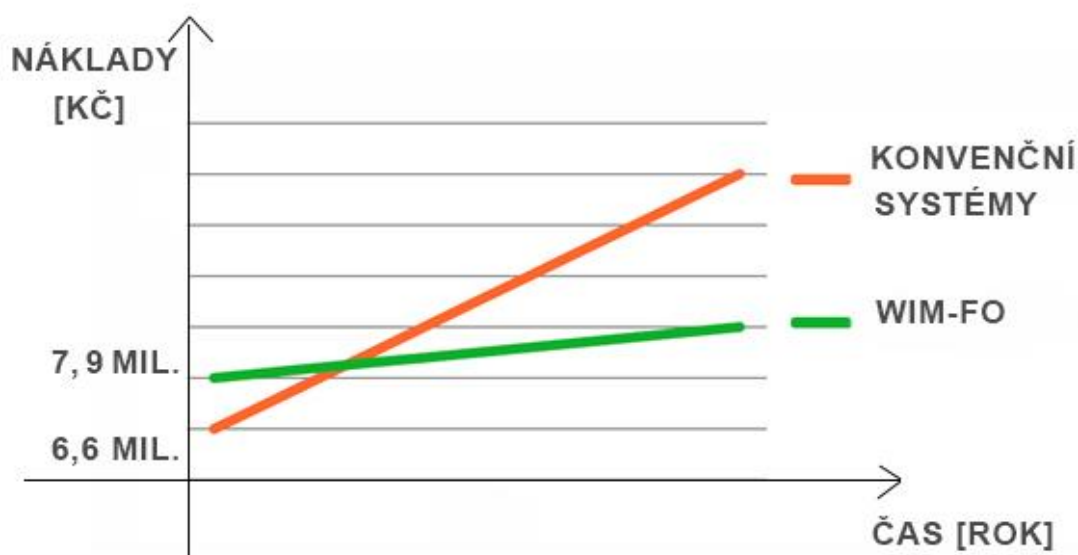
### **Výhody optovláknové technologie oproti konkurenčním systémům:**

- Dlouhá životnost (do 20 let) splatná k instalaci pod horní vrstvou
- Vyšší dostupnost díky nízkému riziku selhání
- Vyšší spolehlivost dat díky technologii optických vláken
- Vyšší přesnost
- Žádné strukturální přerušení horní vrstvy asfaltu
- Žádná údržba čidla v důsledku instalace pod horní vrstvu
- Žádné zkreslení měřicího signálu v důsledku přechodu mezi horní částí vrstvy a čidla
- Rozhraní založené na protokolu TCP / IP
- Flexibilita v instalačních vzdálenostech
- Vzdálenost mezi měřicí stanicí a snímačem až 50 km

### **Výhody WIM FO ve srovnání s konvenčními systémy:**

- Snímač FO lze umístit až 50 km od stanice WIM-FO,
- Snímač FO nepotřebuje napájecí zdroj,
- Dlouhá životnost snímače (cca 10 let),
- Senzor nepotřebuje žádnou údržbu,
- Homogenita horní vrstvy zůstane nedotčena, protože senzor je instalován pod povrchovou vrstvou,
- Žádné zkreslení přechodu měřicího signálu v horní vrstvě asfaltu a senzoru,
- Snímač WIM FO je citlivý a má velký rozsah: 100 kg až 20.000 kg
- zjišťování směru provozu,

- Montáž snímače může být kombinována s asfaltovými pracemi, takže nejsou potřeba samostatná dopravní opatření,
- Při výměně horní vrstvy může být snímač neporušený,
- Snímače teploty jsou integrovány do snímače FO
- Snímač FO je výhodnější v dlouhodobém horizontu s menším narušením provozu kvůli jeho bezúdržbovému charakteru. [16]



Obrázek 32: Znázornění výhody investice - [16]

## 4.1 Cenová kalkulace optovláknové technologie

V případě, že by nebylo zapotřebí vážit projíždějící vozidla, investice by byla podstatně nižší. Senzorům stačí jedna měřící jednotka FBGuard 1550 na kterou se dá připojit až osm optických kabelů s 40 snímači FBG na jeden optický kabel. Teoreticky je tedy možné mít připojených 320 senzorů současně. Cena měřící jednotky je uvedena v tabulce číslo dva a cena klasických senzorů pak v tabulce číslo tři. Firma Safibra udává orientační cenu za instalaci senzorů 10 % z pořizovací částky senzorů. U technologie WIM je potřeba počítat vyšší náklady. V Nizozemsku stojí instalace technologie WIM včetně frázování asfaltu na stávající silnici a jeho opravy 450 000 Kč bez DPH. Většina činností zabere jednu noc práce.

## FBG Systém pro detekci vozidel

Název	Cena bez DPH
<b>FBGuard 1550 1ch FAST (11 kHz)</b> Autonomní FBG měřící jednotka v pásmu 1550 nm. Vzdálený přístup a plná kontrola skrze TCP/IP a SSH Počet kanálů: 1 Rozhraní: Eth, Ex alarm relé, RS-232 Detekce událostí a alarmových stavů	397 800 Kč
<b>FBG ASFALT SENZOR</b>	7 730 Kč

Tabulka 2: Cena měřící jednotky

## Tabulka senzorů

<b>Senzory:</b>	
<b>Napětí</b>	
Senzor napětí FBGS-01	16 550 Kč
FBGS-01 - Dodatečná délka	1 425 Kč
Svařovaný senzor napětí FBGS-01W	8 775 Kč
Kompozitní senzor napětí FBGS-01C	6 525 Kč
Vestavěný senzor napětí FBGS-01E	14 375 Kč
<b>Teplota</b>	
Teplotní senzor FBGT-01	9 800 Kč
Kompozitní senzor teploty FBGTC-01	11 825 Kč
Senzor vysoké teploty FBGTH-01	24 300 Kč
<b>Posun</b>	
Snímač posunutí (s pružinou) FBGD-01	26 550 Kč
<b>Akcelerometr</b>	
Akcelerometr	18 750 Kč
<b>TILT METER</b>	
Tilt Meter FBGTi-01	46 875 Kč
<b>BEND LINE</b>	
Bend Line	96 875 Kč

Tabulka 3: Senzory FBG

V návrhu diplomové práce se počítá s instalací WIM-FO senzoru společně se snímačem. Tato technologie dokáže společně s vážením projíždějících aut, měřit i rychlost, intenzitu provozu a není potřeba dalších speciálních senzorů. Cena technologie je již oproti jednoduchému měření rychlosti dražší. Cena za jeden jízdní pruh technologie WIM je rozepsána v tabulce číslo čtyři.

## WIM-FO

Operační systém	Roční licence na provozní software	201 250 Kč
	Roční poplatek za údržbu	28 750 Kč
<b>WIM-FO Senzor + Snímač</b>		Cena bez DPH
Sensor BAR (1 lane)	2 * 1,75 metre WIM-FO senzory (vlákno řetězec s každým 19 + 18 FBG's)	1 638 175 Kč
	Dvě smyčky detekce	
	Montážní sada (beton, distanční svorky, studený asfalt s mřížkou)	
FBG 1550 Fast WIMFO	4 kanály 1 KHz Vzorkovací frekvence na kanál	
<b>WIM-FO Centrální vybavení (maximálně 3 pruhy)</b>		
Software	Operační systém + GUI	1 207 500 Kč
	Databáze	
	WIM-FO Kalibrační software	
Hardware	IPC	1 207 500 Kč
	19"Splicetray	
	Detektor smyček VEK s4-A + Přepětová ochrana	
	Napájecí adaptér 24Vdc (230V - 50Hz)	
<b>WIM-FO Konfigurace (Kompletní vybavení)</b>		
Weigh-In-Motion konfigurace (pro 1 pruh)		<b>2 845 675 Kč</b>

Tabulka 4: WIM-FO

S instalací technologie WIM je potřeba počítat i s dalšími náklady jako je operační systém nebo projektový manažer instalace technologie. Ceny jsou cenová kalkulace je uvedena v tabulce číslo pět.

Personální náklady		
Projektový manažer (za den)		43 750 Kč
Inženýr (za den)		45 000 Kč
Operační systém	Roční licence na provoz software	201 250 Kč
	Roční poplatek za údržbu	28 750 Kč
Přepravní jednotka	Klasická přeprava	10 000 Kč
	Letecká doprava	25 000 Kč
Instalace a podpora		
Nákup		Cena
Testování systému	FAT	50,00 Kč
	SAT	138,00 Kč
T&S	Lety	Skutečné náklady na let
	T&S Basic (Hour)	3 750 Kč
	T&S Advanced (Hour)	4 875 Kč

Tabulka 5: WIM-FO další náklady

### Videodetekce

V případě, že bude instalována detekce vozidel porušujících rychlost nebo povolenou váhu, bylo by dobré tyto viníky i zaznamenat. K záznamu těchto vozidel slouží tzv. videodetekce. Specifikace a cena je pouze orientační, vycházející z veřejné zakázky centra dopravního výzkumu v Brně.

„Na požadované místa určené k měření budou umístěny záznamové jednotky, na které bude pořízen záznam provozu v dostatečné kvalitě. Po ukončení měření nebo jeho části, budou kamery připojeny do sítě a záznam z nich bude stahován do počítače — vyhodnocovací jednotky – k automatické analýze obrazu. Do systému se zadá topologie, jak byly kamery umístěny a systém z uvedených kamer provede analýzu obrazu. Výsledky uloží do databáze. Následně proběhne dávkově výpočet potřebných statistik. Předpokládáme výpočet pro směrový průzkum, intenzity dopravy v čase, průměrnou rychlost, zjištění četnosti průjezdu konkrétních vozidel. Výsledky mohou být ukládány do souboru CSV, nebo přímo v grafické podobě grafů v podobě PDF. +Vyhodnocovací software“ [32]

Celková cena za videodetekci bez DPH: 1 341 400 Kč

### Výkopové práce pro optický kabel

V současné chvíli není přesně známo kolik optického kabelu k Tyršově mostu chybí. Jelikož společnosti jako JAW, T-mobile nebo UPC považují informace o jejich síti optických kabelů za neveřejnou a k diplomové práci nebyla poskytnuta. Podle informací od města, které plánuje



rozšířit metropolitní síť by optického kabelu chybělo pouze pár metrů. Vzhledem k orientačnímu údaji jsou uvedeny pouze jednotkové ceny. Kalkulace zemních prací pro položení optického kabelu je v tabulce číslo šest.

Pol.	<b>Zemní práce, ostatní</b>	jedn.	množství	cena / jedm.	celkem
1	Instalace kabelové komory včetně výkopu	ks	1,0	1 260,00 Kč	1 260,00 Kč
2	Výkop sondy pro zafukování mikrotrubiček	ks	1,0	1 750,00 Kč	1 750,00 Kč
3	Zábor veřejného prostranství	kpl	1,0	5 000,00 Kč	5 000,00 Kč
4	Dopravně inženýrské opatření - zpracování + realizace	kpl	1,0	5 000,00 Kč	5 000,00 Kč
5	Lokalizace + otevření KK vč. identifikace a úpravy stávajících prvků telek. vedení pro zafukování	ks	1,0	250,00 Kč	250,00 Kč
6	Inženýrská činnost	kpl	1,0	5 000,00 Kč	5 000,00 Kč
7	Doprava osob a materiálu vč. manipulace	kpl	1,0	3 000,00 Kč	3 000,00 Kč
					<b>21 260,00 Kč</b>

Tabulka 6: Zemní práce pro optický kabel [36]

Instalace spojená s natažením optického kabelu je vyčíslena v tabulce číslo sedm.

	<b>Optika</b>	jedn.	množství	cena jednotka	celkem
8	Kalibrace trubky	m	1,0	1,20 Kč	1,20 Kč
9	Zkouška tlaková trubky	m	1,0	1,20 Kč	1,20 Kč
10	Kalibrace trubiček	m	1,0	0,40 Kč	0,40 Kč
11	Zkouška tlaková trubiček	m	1,0	0,40 Kč	0,40 Kč
12	Zafukování mikrokabelu	m	1,0	8,00 Kč	8,00 Kč
13	Zafukování (montáž) svazku trubiček	m	1,0	15,00 Kč	15,00 Kč
14	Montáž I spojky průběžné na HDPE	ks	1,0	220,00 Kč	220,00 Kč
15	Svaření vlákna ve spojce	ks	1,0	220,00 Kč	220,00 Kč
16	Svaření vlákna v OR	ks	1,0	220,00 Kč	220,00 Kč
17	Montáž optické spojky bez montáže vláken	ks	1,0	750,00 Kč	750,00 Kč
18	Montáž optického rozvaděče vč. výstroje	ks	1,0	650,00 Kč	650,00 Kč
19	Montáž těsnění svazku trubiček	ks	1,0	140,00 Kč	140,00 Kč
20	Montáž spojky, koncovky, průchodky MT	ks	1,0	18,00 Kč	18,00 Kč
21	Závěrečné měření optických kabelů OTDR + PM na 3 vlnových délkách 1310, 1550, 1625 nm	ks	1,0	150,00 Kč	150,00 Kč
22	Montáž kříže kabelových rezerv	ks	1,0	75,00 Kč	75,00 Kč
23	Montáž lišty vkládací	m	1,0	48,00 Kč	48,00 Kč
24	Montáž trubky v budově	m	1,0	20,00 Kč	20,00 Kč
25	Průraz do budovy pro 2xHDPE, vč. utěsnění proti pronikání vlhkosti	ks	1,0	4 500,00 Kč	4 500,00 Kč
26	Průraz zdívem betonovým, vč. utěsnění protipožárními ucpávkami	ks	1,0	1 690,00 Kč	1 690,00 Kč
27	Demontáž stávajícího nástěnného racku	ks	1,0	1 400,00 Kč	1 400,00 Kč
28	Montáž nástěnného racku	ks	1,0	900,00 Kč	900,00 Kč
29	Přemístění stávajícího optického rozvaděče do nového racku bez přerušení stávajícího OK	ks	1,0	1 600,00 Kč	1 600,00 Kč
				1,20 Kč	<b>12 627,20 Kč</b>

Tabulka 7: Instalace optiky [36]

V tabulce číslo osm je pak uvedena orientační cena za geodetické práce.

	<b>Geodetické práce</b>	jedn.	množství	cena jednotka	celkem
30	Geodetické zaměření sondy/KK, doplnění do KKP	ks	1,0	650,00 Kč	650,00 Kč
31	Vypracování DSPTS vč. měřících protokolů	kpl	1,0	5 000,00 Kč	5 000,00 Kč
					<b>5 650,00 Kč</b>

Tabulka 8: Geodetické práce pro optický kabel [36]

Posledním nákladem je pak materiál potřebný k realizaci. Orientační ceny materiálu jsou v tabulce číslo devět, vycházející z veřejné zakázky města Blovice.

## Materiál k optickým vláknům

Materiál	MJ	Jednotková cena
Držák kabelu 12A2 dielektrický	ks	302,00 Kč
Kabel vnější/vnitřní 24 f SM, dielektrický	m	24,20 Kč
Kapesníček čistící	ks	1,00 Kč
Koncovka trubky 40mm Plasson	ks	119,00 Kč
Koncovka trubky 40mm s ventilkem Plass	ks	264,00 Kč
Kříž rezervy kabelu malý 500	ks	3 180,00 Kč
Průchodka těsnící D 40mm Jackmoon	ks	199,00 Kč
Rozváděč opto	ks	6 900,00 Kč
Spojka Trubky HDPE	ks	165,00 Kč
Pigtail E2000	ks	408,00 Kč
Trubka HDPE	m	26,00 Kč
Deska Krycí plast. 300x1000 mm	ks	37,00 Kč
Fólie výstražná 220mm PE oranžová	m	2,50 Kč
Fólie výstražná 330mm PE oranžová	m	3,50 Kč
Fólie výstražná 80mm PE červenobílá	m	2,00 Kč
Kabel plastový TCEPKPFLE 50x4x0,4	m	65,00 Kč
Kabel vnitřní SYKFY	m	131,00 Kč
Komora kabelová	ks	3 690,00 Kč
Mimi Marker	ks	336,00 Kč
Modul konektor	ks	65,00 Kč
pásek uzemňovací 30x4 mm	ks	31,00 Kč
Poklop žlabu beton 59x17x4 cm	ks	44,00 Kč
Sběrnice zemnicí 6-ti pólová	ks	31,00 Kč
Skříň rozváděče MIS	ks	750,00 Kč
Souprava čistící	ks	245,00 Kč
Spojka kabelová SCX	ks	1 008,00 Kč
Spojka plastová	ks	31,00 Kč
Svorka zemnicí SR	ks	53,00 Kč
Svorkovnice	ks	130,00 Kč
Trubka PE 110/6	m	774,00 Kč
Trubka vrapovaná	m	20,00 Kč
Vodič propoj. Autokonektor	ks	30,00 Kč
Zámek skříňe	ks	170,00 Kč
Žlab kabelový beton	ks	126,00 Kč
Pásek vázací	ks	1,50 Kč
Pěna montážní Soudal 300 ml	ks	120,00 Kč

Tabulka 9: Materiál k optickým vláknům [33]

## 4.2 Cenová kalkulace konvenčního systému

U indukčních smyček k vytvoření cenové kalkulace byla použita veřejná zakázka od Technické správy komunikací hlavního města Prahy z roku 2012, týkající se úsekového měření rychlosti a pro technologii WIM byl použit implementační plán k Akčnímu plánu rozvoje inteligentních dopravních systémů (ITS) v České republice do roku 2020.

### Indukční smyčky úsekové měření rychlosti

Název	Počet ks	Jedn. Cena	Cena	Popis komponenty
<b>Hardware</b>				
UnicamD2 BW	4	120 000 Kč	480 000 Kč	kamerový set - černobílý - detailové kamery
DouComp-ETH	2	90 000 Kč	180 000 Kč	výpočetní jednotka až pro 2 kamery se základním softwarem měření úsekové rychlosti
UnicamINFRA	2	47 000 Kč	94 000 Kč	infra přisvětlení RS
UnicamUPS	2	65 000 Kč	130 000 Kč	bateriové napájení
UnicamFLASH-FACE	2	65 000 Kč	130 000 Kč	noční nasvětlení obličejů pro jeden pruh
UnicamSPEED	2	50 000 Kč	100 000 Kč	HW pro rychlostní indukční smyčky pro dva jízdní pruhy
HW On-line realizace přestupků	2	30 000 Kč	60 000 Kč	antény WiFi pro on-line vyhodnocení
<b>Software</b>				
UnicamLPR	4	35 000 Kč	140 000 Kč	automatické rozpoznání RZ pro jednotky UnicamD2
UnicamVELOCITY	4	35 000 Kč	140 000 Kč	certifikovaný software měření úsekové rychlosti
UnicamSPEED	2	50 000 Kč	100 000 Kč	certifikovaný software měření okamžité rychlosti
SW On-line realizace přestupků	2	40 000 Kč	80 000 Kč	
Integrace DIC Praha	2	65 000 Kč	130 000 Kč	propojení s databází DIC Praha, On-line posílání sběru dopravních informací, rozšíření systému DIC Praha
SW UnicamDET	4	30 000 Kč	120 000 Kč	detekce vozidla v kameře UnicamD2
SW UnicamRDET	2	45 000 Kč	90 000 Kč	sčítání, klasifikace vozidel
SW UnicamPRIVACY	2	36 000 Kč	72 000 Kč	software pro ochranu osobních údajů - rozmázení příjezdového snímku a obličejů spolujezdce

Propojení s MKS	2	29 800 Kč	59 600 Kč	propojení s databází MKS a rozšíření databáze MKS - pátrání po kradených vozidlech
<b>Instalace</b>				
Geodetické zaměření	2	20 000 Kč	40 000 Kč	certifikované geodetické zaměření jednotlivých pruhů
Indukční smyčky	4	20 000 Kč	80 000 Kč	
Metrologické ověření	4	20 000 Kč	80 000 Kč	
DIR, DIO - dopravní opatření	2	19 000 Kč	38 000 Kč	dopravní opatření na pražských komunikacích
Instalace měření úsekové rychlosti pro 2 pruhy	1	245 000 Kč	245 000 Kč	stavební práce, expertní instalace, dopravní opatření, výměna sloupů VO.
<b>Celkem cena bez DPH</b>			<b>2 588 600 Kč</b>	

Tabulka 10: Cena úsekového měření rychlosti, Upraveno autorem na 2 jízdní pruhy [35]

## WIM

Jako měřicí technologie byly použity piezoelektrické detektory pro vážení, společně s indukčními smyčkami pro určení rychlosti. Implementační plán k akčnímu plánu rozvoje inteligentních dopravních systémů (ITS) v České republice popisuje funkčnost a cenu následovně:

„Automatické vysokorychlostní váhy (dále jen WIM) jsou zařízení, která automaticky zvaží projeté vozidlo a vyhodnotí, zda je přetížené. Současně zaznamenají RZ a přehlednou fotodokumentaci vozu. V automatickém provozu jsou schopny vyhotovit výstupní dokument sloužící jako doklad k přestupkovému řízení. V současné době jsou WIM využívány pro předvážení a následně PČR provádí statické vážení. WIM se skládají z indukčních smyček a vážních prahů ve vozovce, kamer s IR přísvity pro čtení RZ a přehledových kamer umístěných na portále nad jízdním pruhem, vyhodnocovací jednotky a detektorů umístěných v rozvaděči. Umísťují se v závislosti na odpočívkách, křižovatkách a s tím souvisejících objízdňích trasách. Tento návrh projektu počítá s výstavbou a realizací cca 14 ks obousměrných nových WIM. Konkrétně se jedná o umístění na D3 – 1ks; D5 – 3ks; D8 – 1ks; D11 – 2ks; D4 – 1ks; D6 – 1ks; D7 – 1ks; D35 – 2ks; I/35 – 1ks D46 – 1ks.“ [34]

Na 14 ks měřících jednotek je vyčleněno 236 mil. Kč s DPH. Z toho vyplývá, že za jednu obousměrnou technologii WIM zaplatí cca 13 mil. Kč bez DPH. V případě jednoho jízdního pruhu pak 3,25 mil. Kč bez DPH. [34]

### 4.3 Cenové srovnání technologií

Cenová kalkulace počítá jak s cenou technologie, tak i s cenou instalace technologie. V cenové kalkulaci nejsou započteny náklady na vedení optického kabelu, jelikož není známo, kde všude optický kabel bude chybět. Dle plánu města Děčín by síť optického kabelu měla být připravena do jednoho roku. Pro představu je v diplomové práci uvedena cena za materiál i instalace optiky vycházející z veřejných zakázek jiných měst. Srovnání ceny technologie je uvedeno v tabulce č. 11.

Cena za úsekové měření optovláknové technologie byla vypočtena z následujících hodnot:

FBGuard 1550: 397 800 Kč

8x FBG ASFALT SENZOR: 7730 Kč x 8 = 61 840 Kč

Instalace 10 % z ceny technologie: 45 964 Kč

Videodetekce: 1 341 400 Kč

**Celkem: 1 847 004 Kč bez DPH**

WIM optovláknová technologie:

WIM-FO pro dva jízdní pruhy 2 x 2 845 675 = 5 691 350 Kč

Instalace technologie pro dva jízdní pruhy: 2 x 450 000 = 900 000 Kč

Videodetekce: 1 341 400 Kč

**Celkem: 7 932 750 Kč bez DPH**

Cena za úsekové měření pomocí indukčních smyček vychází z veřejné zakázky od Technické správy komunikací hlavního města Prahy z roku 2012.

Cena za WIM konvenčních systémů byla vypočtena z implementačního plánu k akčnímu plánu rozvoje inteligentních dopravních systémů (ITS) v České republice.

	Konvenční systém	Optovláknová technologie
Úsekové měření rychlosti	2 588 600 Kč bez DPH	1 847 004 Kč bez DPH
WIM	6 658 571 Kč bez DPH	7 932 750 Kč bez DPH

Tabulka 11: Srovnání cen technologií

### 4.4 Analýza pomocí vícekriteriálního rozhodování

Nyní k samotné analýze technologií. Analýza je prováděna pomocí vícekriteriálního rozhodování pro určení tzv. preferenčního uspořádání variant, seřazení podle celkové výhodnosti. Kritéria jsou srovnána pomocí Metody párového srovnávání, kde je pro každé kritérium zjišťován počet jeho preferencí vůči všem ostatním kritériím celku. Hodnocení

důležitosti kritérií uvedené v tabulce 1 je subjektivní a vychází z preferencí města Děčín, zastoupeného Ing Věrou Havlovou, vedoucí oddělení veřejných zakázek.

Zvolená kritéria pro srovnávání jsou uspořádána pouze na tvrdá kritéria.

Tvrdá kritéria:

- Kritérium 1 cena,
- kritérium 2 provozní náklady,
- kritérium 3 doba realizace,
- kritérium 4 vzdálenost umístění snímače od stanice.

Pro každé kritérium je stanoven počet jeho preferencí  $i$  a na základě počtu preferencí jednotlivých kritérií se vypočítají jejich normované váhy podle vztahu č.9.

Kde  $v_i$  je normovaná váha  $i$ -tého kritéria,  $f_i$  je počet preferencí  $i$ -tého kritéria a  $n$  je počet kritérií.

*Vztah 9: Normovaná váha*

$$v_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i}$$

Přičemž počet uskutečněných srovnání je dán vztahem č. 10.

*Vztah 10: Počet uskutečněných srovnání*

$$\sum_{i=1}^n f_i = \frac{n \times (n-1)}{2}$$

Nevýhodou Vztahu č. 9 je, že pokud počet preferencí určitého kritéria je nulový, bude nulová i jeho váha kritéria. Proto je využíván vztah č. 11, který zvýší počet preferencí u každého kritéria o jedno a tím pádem nebude žádné kritérium opominuté.

*Vztah 11: Normovaná váha s nenulovou hodnotou*

$$v_i = \frac{f_i + 1}{n + \sum_{i=1}^n f_i}$$

V tabulce 10 jsou vypočítány výsledné váhy kritérií.

Kritérium	K1	K2	K3	K4	Počet preferencí	Výsledné váhy*	Výsledné váhy**
<b>K1</b>	-	0	1	1	2	0,333	0,3
<b>K2</b>	1	-	1	1	3	0,5	0,4
<b>K3</b>	0	0	-	1	1	0,166	0,2
<b>K4</b>	0	0	0	-	0	0	0,1

Tabulka 12: výsledné váhy kritérií [Zdroj autor]

\*Výsledné váhy jsou v první sloupci stanoveny pomocí vztahu č. 9

\*\* Výsledné váhy ve druhém sloupci vypočteny pomocí vztahu č. 11.

Některá kritéria podléhají smluvním podmínkám, které jsou neveřejné. Proto jsou kritéria rovnou ohodnoceny body. Nejméně jedním bodem a nejvíce dvěma body, podle jejich pořadí vycházejícího z výhodnosti kritéria.

Kritérium	Konvenční systém	Optovláknová technologie
<b>K1</b>	2	1
<b>K2</b>	1	2
<b>K3</b>	1	1
<b>K4</b>	1	2
<b>Celkem</b>	<b>5</b>	<b>6</b>

Tabulka 13: Bodové ohodnocení technologií [Město Děčín]

Na první pohled vypadá, že nejvýhodnější variantou je optovláknová technologie. V tabulce č.11.ještě, ale nejsou započteny vypočítané váhy preferencí. Tabulka č.12. již s váhy preferencí počítá.

Kritérium	Konvenční systém	Optovláknová technologie
<b>K1</b>	0,6	0,3
<b>K2</b>	0,4	0,8
<b>K3</b>	0,2	0,2
<b>K4</b>	0,1	0,2
<b>Celkem</b>	<b>1,3</b>	<b>1,5</b>

Tabulka 14: Bodové ohodnocení společně s preferencemi

Z výpočtu vyplývá, že optovláknová technologie je lepší varianta oproti konvenčnímu systému využívající piezoelektrické detektory pro vážení, společně s indukčními smyčky.



## 4.5 SWOT analýza optovláknové technologie

Analýza se zaměřuje na silné a slabé stránky, dále na příležitosti a hrozby využití optovláknové technologie na Tyršově mostě.

**Silné stránky:** Snímač FO nepotřebuje napájecí zdroj, Dlouhá životnost snímače (cca 10 let), Senzor nepotřebuje žádnou údržbu.

**Slabé stránky:** Z krátkodobého hlediska bývá optovláknová technologie dražší. Vyšší počáteční investice.

**Příležitosti:** Snímač FO lze umístit až 50 km od stanice WIM-FO. Díky této skutečnosti můžou být do stanice napojeny i jiné snímače, které mohou být rozmístěny po celém městě. Možné využití pro vize Smart City.

**Hrozby:** V diplomové práci je počítáno s plánovaným rozšířením metropolitní sítě města. V případě, že optické kabely nebudou položeny, bude chybět převážná většina trasy spojující budovu ČVUT a Tyršův most.

## Závěr

V první části diplomové práce byl analyzován současný stav získávání dat v dopravě. Senzory získávající data jsou přehledně rozděleny na intrusivní a neinrusivní detektory. U intrusivních detektorů je zásah do vozovky nutný, zatímco u neinrusivních detektorů není potřeba. Mezi intrusivní detektory patří indukční smyčky, magnetické, pneumatické, piezoelektrické a optovláknové detektory. Do neinrusivních detektorů se řadí pasivní detektory hluku, ultrazvukové, pasivní infračervené, kombinované detektory. Dále pak videodetekce, mikrovlnné radary a infračervené detektory neboli lidary.

Další kapitola se podrobněji zaměřila na optovláknovou technologii a senzory, zejména pak na technologii Weigh In Motion (WIM), senzory BendLine a dotazovací jednotku FBGuard 1550 FAST, které byly využity v návrhu pro Tyršův most.

V druhé části diplomové práce byl popsán samotný návrh zmíněné technologie WIM společně se systémem BendLine ve městě Děčín na Tyršově mostě. Byla vytvořena podrobná cenová kalkulace navržené i konkurenční technologie. K porovnání technologií WIM byla použita metoda vícekritériálního rozhodování vycházející z preferencí města. U většiny veřejných zakázek je nejdůležitější cena. V případě vyšších provozních nákladů je možné přiřadit více preferencí právě provozním nákladům. Bylo zjištěno, že optovláknová technologie se při dlouhodobém horizontu vyplatí díky tomu, že provozní náklady jsou nižší než u konvenčních systémů, které mají senzory umístěné pod horní vrstvou asfaltu a využívají piezoelektrické detektory společně s indukčními smyčkami.

Pokud město vyhlásí veřejnou zakázku na realizaci technologie WIM a jedním z aspektů hodnocení budou právě provozní náklady, je potřeba nejprve jasně specifikovat životní cyklus technologie a určit, jakým způsobem spočítat provozní náklady.

Ceny uvedené v diplomové práci vycházely z veřejných zakázek jiných měst. V konkrétním případě města Děčín jsou pouze jako orientační ukazatel.

V případě realizace technologie na Tyršově mostě získá město aktuální informace o dopravě a stavu mostu. Díky instalaci videodetekce a následného zaznamenávání dopravních přestupků se sníží počet vozidel porušujících rychlost a současně zvýší bezpečnost v okolí mostu. V případě, že přes most povede objízdná trasa, může město monitorovat zvýšený nárůst intenzity dopravy a případně účtovat opotřebení mostu firmě, která za objízdnou trasu odpovídá. Vzhledem ke skutečnosti, že senzory mohou být od monitorovací jednotky až 50

km vzdálené, je možné optovláknovou technologií využít po celém městě a současně lze navázat na koncept Smart City.

Cílem diplomové práce bylo zjistit provozní a ekonomickou nákladovost návrhu optovláknové technologie a zjistit, zda je technologie využitelná. V diplomové práci byla provedena cenová kalkulace navržené technologie WIM a díky provedené metodě vícekriteriálního rozhodování byla určena výhodnější varianta pro město Děčín.

## Zdroje:

- [1] Rychlost - Fyzika. *Ucitel.net* [online]. Online, 2019 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <http://www.ucitel.net/fyzika/rychlost>
- [2] Elektromagnetické vlnění. *Gymkren.cz* [online]. 2019, 2019, 8 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: [https://www.gymkren.cz/text\\_old/Fyzika/f24.pdf](https://www.gymkren.cz/text_old/Fyzika/f24.pdf)
- [3] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Vznik elektromagnetického vlnění. *Encyklopedie fyziky* [online]. Online, 2019 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/357-vznik-elektromagnetickeho-vlneni>
- [4] MALÁ, Zuzana, Danuše NOVÁKOVÁ a Tomáš VÍTŮ. *Fyzika I. 3.*, přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04220-5.
- [5] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.
- [6] DOPPLERŮV JEV. *EDUPORTÁL* [online]. Online, 2019 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/veda-v-pozadi/542>
- [7] *Modelování a optimalizace komplexních vláknových difrakčních struktur*. Brno, 2009. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. František Urban, CSc.
- [8] Jaroslav Demuth, *Introduction to FBG Technology: GENERIC TRAINING*. Ricany, 2013.
- [9] KILIÁN, Karel. Čím se LIDAR liší od radaru a jaká je jeho role v autonomních vozidlech Více na: <https://vtm.zive.cz/clanky/cim-se-lidar-lisi-od-radaru-a-jaka-je-jeho-role-v-autonomnich-vozidlech/sc-870-a-195431/default.aspx>. *Zive.cz* [online]. Online, zive.cz, 12. října 2018 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://vtm.zive.cz/clanky/cim-se-lidar-lisi-od-radaru-a-jaka-je-jeho-role-v-autonomnich-vozidlech/sc-870-a-195431/default.aspx>
- [10] Light Detection and Ranging (LiDAR). *Portland State* [online]. , 39 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <http://web.pdx.edu/~jduh/courses/geog493f12/Week04.pdf>
- [11] Jak se v ČR měří? Má antiradar šanci?. *Antiradary.net* [online]. Online: antiradary.net, 2015, 3. 9. 2015 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://www.antiradary.net/mereni-rychlosti-v-cr-ramer/>

- [12] Měření úsekové rychlosti. *Camea* [online]. Online, 2019 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://www.camea.cz/cz/doprava/dopravni-prestupky/mereni-usekove-rychlosti/>
- [13] Úseková rychlost - Technické parametry. *GEMOS CZ* [online]. Online, 2019 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: [http://usekovarychlost.cz/usekova\\_rychlost\\_info.php](http://usekovarychlost.cz/usekova_rychlost_info.php)
- [14] MARŠÁLEK, Leoš. Optická vlákna. *VŠB - Technická univerzita Ostrava Fakulta elektrotechniky a informatiky Katedra elektroniky a sdělovací techniky* [online]. 2006, **2006**, 172 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/333859-Opticka-vlakna-vsbt-technicka-univerzita-ostava-fakulta-elektrotechniky-a-informatiky-katedra-elektroniky-a-sdelovaci-techniky.html>
- [15] *RAMER10 NÁVOD K OBSLUZE R 311 063X CZ* [online]. Kunovice, 2011, 17.10.2011, , 143 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: [http://acab.cikus.net/temp/Navod\\_RAMER10\\_www.pdf](http://acab.cikus.net/temp/Navod_RAMER10_www.pdf)
- [16] Jaroslav Demuth, *WEIGH-IN-MOTION THE NEW STANDARD, NBG SYSTEMS, SAFIBRA*. 2016.
- [17] Jaroslav Demuth, *Brožura\_NBG\_přehled\_aplikací-senzorů, , NBG SYSTEMS, SAFIBRA*. Říčany, 2019.
- [18] Charakteristika města Děčín. *Mmdecin.cz* [online]. Děčín, 2013, 10 leden 2013, , 2 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <http://www.mmdecin.cz/informace-a-historie-mesta>
- [19] Děčín. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/D%C4%9B%C4%8D%C3%ADn>
- [20] Vznik Dopplerova jevu. In: *Techmania.cz* [online]. [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/sites/default/files/styles/large/public/podrobnosti/insert/8-2.gif?itok=9lePErrN>
- [21] Theodore Harold Maiman. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Theodore\\_Harold\\_Maiman](https://cs.wikipedia.org/wiki/Theodore_Harold_Maiman)
- [22] PŘIBYL, Ondřej. *Úvod do předmětu: Měření a zpracování dat (MDS)*. Ústav aplikované matematiky ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, 2019, 24.
- [23] PŘIBYL, Ondřej. *Detektory zasahující do vozovky, úvod do detekce: Měření a zpracování dat (MDS)*. 2019, 40.
- [24] Inductive loop detection. In: *Slideplayer.com* [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z:

<https://slideplayer.com/slide/12630077/76/images/6/5.Inductive+loop+detection.jpg>

[25] *Fluxgate magnetometry* [online]. In: . [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://ai2-public.s3.amazonaws.com/figures/2017-08-08/d74e1b59e3dbde1cb3421705b7f44789b19a9510/3-Figure4-1.png>

[26] *DETEKCE A POČÍTÁNÍ AUTOMOBILŮ V OBRAZE (VIDEODETEKCE)*. Brno, 2010. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. PETER HONEC.

[27] PŘIBYL, Ondřej. *Neintrusivní dopravní detektory*. 2019, 35.

[28] Vlnový multiplex. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Vlnov%C3%BD\\_multiplex](https://cs.wikipedia.org/wiki/Vlnov%C3%BD_multiplex)

[29] Multiplexor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Multiplexor>

[30] Demultiplexor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Demultiplexor>

[31] *Fotografie mostu*. Děčín: Magistrát města Děčín.

[32] *Kupní smlouva č. SML/4214/2014*. 2014. Brno: Centrum dopravního výzkumu, 2014.

[33] *Smlouva o dílo "Propojení objektů města optickým kabelem"*. 2012. Město Blovice, 2012.

[34] *Implementační plán k Akčnímu plánu rozvoje inteligentních dopravních systémů (ITS) v České republice do roku 2020: Aktualizace č. 2 k dubnu 2018* [online]. In: . 2018, s. 226 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: [http://www.czechspaceportal.cz/files/files/ITS\\_new/IP%20ITS/IP\\_ITS\\_A2.pdf](http://www.czechspaceportal.cz/files/files/ITS_new/IP%20ITS/IP_ITS_A2.pdf)

[35] *Smlouva o dílo "Měření úsekové rychlosti na ulici Průmyslová v Praze 10"*. 2012. Praha: Technická správa komunikací hlavního města Prahy, 2012.

[36] *MAN Liberec - páteřní optický kabel: Smlouva o dílo č. LIS/2016/2/025*. Liberec, 2016.

## Obrázky:

Obrázek 1: Elektromagnetické spektrum [14].....	13
Obrázek 2: Elektromagnetická vlna [14].....	14
Obrázek 3: Vznik Dopplerova jevu [20].....	15
Obrázek 4: Jednomódové vlákna [14].....	16
Obrázek 5: Odraz v optickém vlákně [14].....	16
Obrázek 6: Buzení vlákna, Obr. Upravený autorem [14] .....	17
Obrázek 7: Princip indukčních smyček, Obr. Upravený autorem [24].....	19
Obrázek 8: Princip fluxgate magnetometru [25] .....	20
Obrázek 9: Jednoduchá reflexe [15] .....	27
Obrázek 10: Jednoduchá reflexe lomu paprsku na stacionární reflexní ploše [15] .....	27
Obrázek 11: Příklady jednoduché reflexe [15].....	28
Obrázek 12: Dvojitá reflexe [15].....	28
Obrázek 13: Reflexe v koutovém odražeči [15] .....	29
Obrázek 14: Základní funkce lidarů [9].....	29
Obrázek 15: Mapování prostředí lidarem [9] .....	30
Obrázek 16: Mapování terénu při leteckém průzkumu [10] .....	31
Obrázek 17: Systémy v autonomním vozidle [9] .....	33
Obrázek 18: Úsekové měření [12].....	34
Obrázek 19: Detailový snímek z úsekového měření [13].....	34
Obrázek 20: Ukázka senzoru [8].....	36
Obrázek 21: Znárodnění zatížení náprav pomocí systému WIM [16] .....	37
Obrázek 22: Místo umístění detektorů ve vozovce, Obr. Upravený autorem [16].....	38
Obrázek 23: Rozměry senzorů ve vozovce [16].....	39
Obrázek 24: FBGuard 1550 FAST [17].....	42
Obrázek 25: FIBER GUARD [17] .....	44
Obrázek 26: Schéma systému BendLine [17] .....	45
Obrázek 27: Původní řetězový most [31] .....	48
Obrázek 28: Stavba nového mostu [31] .....	49
Obrázek 29: Podélný řez [31].....	49
Obrázek 30: Aktuální stav nového mostu [Zdroj: Autor] .....	50
Obrázek 31: Mapa optických kabelů po městě Děčín [31].....	51
Obrázek 32: Znárodnění výhody investice - [16] .....	53

## Seznam tabulek:

Tabulka 1: Funkční srovnání intrusivních detektorů .....	22
Tabulka 2: Cena měřicí jednotky .....	54
Tabulka 3: Senzory FBG.....	54
Tabulka 4: WIM-FO .....	55
Tabulka 5: WIM-FO další náklady .....	56
Tabulka 6: Zemní práce pro optický kabel [36].....	57
Tabulka 7: Instalace optiky [36].....	58
Tabulka 8: Geodetické práce pro optický kabel [36].....	58
Tabulka 9: Materiál k optickým vláknům [33].....	59
Tabulka 10: Cena úsekového měření rychlosti, Upraveno autorem na 2 jízdní pruhy [35] ...	61
Tabulka 11: Srovnání cen technologií .....	62
Tabulka 12: výsledné váhy kritérií [Zdroj autor] .....	64
Tabulka 13: Bodové ohodnocení technologií [Město Děčín].....	64
Tabulka 14: Bodové ohodnocení společně s preferencemi .....	64



## Seznam vztahů:

Vztah 1: Rychlost.....	11
Vztah 2: Okamžitá rychlost .....	11
Vztah 3: Index lomu .....	13
Vztah 4: Časová perioda.....	13
Vztah 5: Vlnová délka .....	14
Vztah 6: Vlnová délka 2 .....	14
Vztah 7: Dopplerova frekvence .....	26
Vztah 8: Rychlost vozidla.....	26
Vztah 9: Normovaná váha .....	63
Vztah 10: Počet uskutečněných srovnání .....	63
Vztah 11: Normovaná váha s nenulovou hodnotou .....	63