

# Metodika pro postupy monitorování a vyhodnocení chování mostu s využitím systému WIM

Schválená metodika

2024

**T A**  
**Č R**

Tento projekt je spolufinancován se státní podporou  
Technologické agentury ČR a Ministerstva dopravy  
v rámci **Programu DOPRAVA 2020+**.

[www.tacr.cz](http://www.tacr.cz)

[www.mdcr.cz](http://www.mdcr.cz)

## Název: Metodika pro postupy monitorování a vyhodnocení chování mostu s využitím systému WIM

### Poděkování:

Tato metodika vznikla se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva dopravy ČR v rámci Programu DOPRAVA 2020+

**Zpracovatel:** Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., České vysoké učení technické v Praze Univerzitní centrum energetiky efektivních budov, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, Camea, spol. s.r.o.

**Autoři:** doc. Ing. Emil Doupal CSc., Ing. Miroslav Juhas, Ing. Ondřej Koutník, Ing. Jan Včelák Ph.D., prof. Dr. Ing. Pavel Zemčík

**Oponenti:** doc. Ing. Jiří Votava, Ph.D., AF MENDELU

Ing. Petr Damek, Link projekt, s. r. o.

**Metodika schválená:** Ministerstvo dopravy, č. j. xxxxxxxxxx  
**Název nakladatelství:** Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.  
**Místo vydání:** Brno  
**Rok vydání:** 2024

**ISBN:** xxxxxxxxxxxxxxxx

## Anotace

### Autoři:

doc. Ing. Emil Doupal CSc., Ing. Miroslav Juhas, Ing. Ondřej Koutník, Ing. Jan Včelák Ph.D., prof. Dr. Ing. Pavel Zemčík

**Název: Metodika pro postupy monitorování a vyhodnocení chování mostu s využitím systému WIM**

### Abstrakt:

Metodika přináší poznatky k aplikaci inovativního systému pro sběr a vyhodnocení dat v oblasti mostních konstrukcí se zaměřením na jejich diagnostiku a bezpečnost. Centrální prvek systému je tvořen vysokorychlostním zařízením pro zjišťování hmotnosti, který je doplněn o systémy na bázi optických vláken, tenzometrů, kamer, indukčních smyček a dalších. Metodika také zahrnuje posouzení aspektů použitelnosti a ekonomické výhodnosti systému. Včasná detekce rizikových stavů mostní konstrukce je celosvětově aktuální téma a tvoří klíčový prvek pro bezpečnost konstrukce a její optimální diagnostiku.

### Klíčová slova:

diagnostika mostů, doprava, mostní sensorika, vysokorychlostní vážení

### Schvalovací orgán:

Ministerstvo dopravy

nábřeží Ludvíka Svobody 1222/12

110 15 Praha 1

---

## Annotation

**Authors:**

doc. Ing. Emil Doupal CSc., Ing. Miroslav Juhas, Ing. Ondřej Koutník, Ing. Jan Včelák Ph.D., prof. Dr. Ing. Pavel Zemčík

**Title:**

**Methodology for bridge behaviour monitoring and evaluation procedures using the WIM system**

**Abstract:**

The methodology provides knowledge in the application of an innovative system for data collection and evaluation in the field of bridge structures with a focus on their diagnostics and safety. The central element of the system consists of a high-speed weight in motion system, which is complemented by systems based on optical fibres, strain gauges, cameras, induction loops and some others. The methodology also includes an assessment of the usability and cost-effectiveness aspects of the system. Early detection of hazardous bridge structure conditions is a worldwide actual topic and is a key element for the safety of the structure and its optimal diagnosis.

**Keywords:**

Bridge diagnostics, bridge sensors, transport, weigh in motion

**Certification Authority:**

Ministry of Transport of Czech Republic

nábřeží Ludvíka Svobody 1222/12

110 15 Praha 1

---

## OBSAH

Úvod.....	7
<b>1. Přehled právních předpisů a technických standardů .....</b>	<b>9</b>
1.1. Právní předpisy .....	9
1.2. Technické standardy .....	10
<b>2. Konceptce systému.....</b>	<b>11</b>
2.1. Centralizovaná varianta .....	11
2.2. Decentralizovaná varianta .....	11
2.3. Kombinovaná varianta .....	13
<b>3. Stručný popis principů měření .....</b>	<b>14</b>
3.1. Optické vláknové senzory a jejich použití pro monitoring mostních konstrukcí.....	14
3.1.1. Optické vláknové snímače s distribuovaným měřením .....	14
3.1.2. Fibre Bragg Gating senzory (FBG) .....	14
3.2. Měření akcelerometry a mostní sensorika .....	16
3.3. Měření WIM systémy .....	19
3.4. Identifikace a re-identifikace vozidel.....	22
3.5. Zjišťování polohy vozidel na mostech.....	22
3.5.1. Zjišťování polohy analýzou videosekvencí .....	22
3.5.2. Zjišťování polohy na základě znalosti rychlosti vozidla .....	23
3.5.3. Potřebná přesnost měření polohy vozidla .....	24
3.6. Časová synchronizace sensorických systémů .....	24
3.6.1. V rámci mostní konstrukce .....	24
3.6.2. U vzdálených systémů (decentralizovaná varianta).....	25
<b>4. Popis kategorií vad mostů a možností jejich zjišťování .....</b>	<b>26</b>
<b>5. Kategorizace senzorů .....</b>	<b>29</b>
5.1. Akcelerometry .....	29
5.2. Senzory polohy vozidel na mostech .....	31
5.3. Tenzometry a optické vláknové senzory .....	32

---

5.4.	Sklonoměry .....	32
5.5.	Teplotní senzory .....	32
5.6.	Korozní senzory.....	32
5.7.	Systémy vážení vozidel .....	32
<b>6.</b>	<b>Kvantitativní analýza osazení mostů .....</b>	<b>34</b>
<b>7.</b>	<b>Analýza možných výsledků .....</b>	<b>35</b>
<b>8.</b>	<b>Ekonomické aspekty.....</b>	<b>36</b>
<b>9.</b>	<b>Uplatnění metodiky.....</b>	<b>37</b>
<b>10.</b>	<b>Analýza rizik .....</b>	<b>39</b>
<b>11.</b>	<b>Použitá literatura.....</b>	<b>41</b>
<b>12.</b>	<b>Seznam publikací, které předcházely metodice.....</b>	<b>42</b>
<b>13.</b>	<b>Přílohy.....</b>	<b>43</b>

## Úvod

Metodika byla zpracována CDV v. v. i., ČVUT Praha, VUT Brno, Camea spol. s.r.o. v rámci řešení výzkumného projektu:

Kód projektu: **CK02000126**

Název projektu: **Systém diagnostiky stavu a ochrany mostních konstrukcí s využitím WIM**

Metodika je určena pro Ministerstvo dopravy, vlastníky a správce komunikací (ŘSD, kraj, obec) a shrnuje poznatky o možnosti využití kombinace výstupů z vysokorychlostního vážení, kamerového systému, optických, tenzometrických a akcelerometrických senzorů osazených v mostní konstrukci a na ní, které získali zpracovatelé na základě provedených měření, a poznatků publikovaných v materiálech uvedených v textu. Na základě získaných poznatků a dosažených výsledků měření byly navrženy požadavky na kontrolní místo, kontrolní zařízení a postup při zajištění a provádění diagnostiky stavu a ochrany mostních konstrukcí s využitím WIM, včetně uvedení dalších možností využití systému.

Silniční infrastrukturu je potřeba chránit proti poškození v důsledku přetěžování vozidel a jejich náprav. Současně je také potřebné důsledně kontrolovat dodržování podmínek stanovených pro přepravu nadměrných nákladů s ohledem na únosnost mostních konstrukcí a vozovek silničních komunikací.

Kombinace systémů vysokorychlostního vážení vozidel a senzorů osazených v mostní konstrukci umožňuje účinné a efektivní sledování chování mostní konstrukce pod jedoucími vozidly s možností zpětné vazby v případě, že veličiny získané měřením překročí hodnoty stanovené statickým výpočtem mostní konstrukce (průhyb, frekvence kmitání, protažení apod.), anebo se v průběhu času při působení stejného/podobného zatížení mění jejich průběh.

Metoda je založena na principu měření dynamických účinků, které jsou vyvolány jednotlivými nápravami jedoucích vozidel, na mostní konstrukci. Současně umožňuje, za předpokladu použití příslušného software, provedení podrobné analýzy kolové, nápravové a celkové hmotnosti jedoucích vozidel, včetně měření rychlosti, akcelerace a decelerace vozidla na příslušném úseku.

Pro kontroly nadměrných nákladů je nutné vypracovat systém ověřování dodržování podmínek stanovených v povolení ke zvláštnímu užívání mostů.

Očekávané přínosy:

Primární přínos uvedeného systému tkví zejména v identifikaci chování mostní konstrukce v čase. Důsledkem je:

- zvýšení bezpečnosti silničního provozu,

- snížení rizik náhlého poškození mostní konstrukce,
- snížení nákladů na opravu a údržbu konstrukcí na silniční infrastruktuře (plánování oprav a údržby nosné konstrukce mostu na základě objektivních dat),
- nepřetržitá kontrola chování konstrukce po 24 hodin denně a 365 dnů v roce.

Při užití analýzy získaných dat a porovnáním naměřených dat s daty získanými pomocí matematického modelu mostní konstrukce (virtuální dvojče) lze identifikovat „slabá místa“ a případně, na základě analýzy časových řad pro stejná/podobná zatížení, plánovat v předstihu opravy. Hodnocení životnosti senzorů s ohledem na předpoklad dlouhodobého sledování mostních konstrukcí viz kap.8.

Nelze opomenout ani sekundární přínos, který spočívá:

- ve využití získaných údajů pro systém hospodaření s vozovkou a pro opravy a údržbu mostů,
- pro organizaci a řízení dopravy v reálném čase<sup>1</sup> na základě přímého toku informací o dopravním proudu vozidel,
- v získání reálných podkladů o skutečném zatížení mostních konstrukcí v reálném čase,
- v možnosti zamezení průjezdů přetížených vozidel.

Poslední bod „zamezení průjezdů přetížených vozidel“ si zasluhuje vysvětlení s ohledem na zkušenosti z podobných projektů v zahraničí, kde jsou WIM systémy v kombinaci s kamerovými systémy využívány jednak pro:

- Postih přetížených vozidel při přejezdu mostní konstrukce (Drážďany, most Blaue Wunder), kde je povolen přejezd pouze vozidlům do 13t celkové hmotnosti a vozidlům MHD. Systém WIM detekuje přestupce a tito jsou vystaveni postihu.
- Odklon přetížených vozidel na alternativní trasy (Pusan, Jižní Korea, most přes zátoku; Bangkok, most přes řeku Chao Praya a další). Přetížená vozidla jsou detekována a odkloněna prostřednictvím proměnné signalizace na alternativní trasu. V případě neuposlechnutí příkazu hrozí vysoký postih.
- Odstavení přetížených vozidel, převážení na LS WIM a přeložení nákladu (Surgut, RF, most přes řeku Ob).

---

<sup>1</sup> Jde o tzv. prediktivní údržbu.



## 1. Přehled právních předpisů a technických standardů

### 1.1. Právní předpisy

#### **Zákon č.13/1997 Sb., o pozemních komunikacích, ve znění pozdějších předpisů**

- kdo zajišťuje vysokorychlostní kontrolní vážení - §38a odst. (4)
- povinnost řidiče vozidla - § 38d odst. (1)
- postup správního úřadu při zjištění překročení hodnot stanovených zákonem - §38d odst. (3)
- postup vlastníka pozemní komunikace nebo kraje při zjištění překročení hodnot stanovených zákonem - §38d odst. (2)
- skutková podstata přestupku řidiče, při vysokorychlostním kontrolním vážení - §42a odst. (4) písm. c) a stanoví výši pokuty - §42a odst. (8) písm. a),j) a/nebo k)
- skutkové podstaty správních deliktů právnických a podnikajících fyzických osob při vysokorychlostním kontrolním vážení - §42b odst. 1) písm. u) a stanoví výši pokuty za tyto správní delikty - §42b odst. (6) písm. a)
- právní úprava ukládání a výběru pokut a nákladů vysokorychlostního kontrolního vážení včetně způsobu rozdělení pokuty uložené za správní delikt-§43

**Vyhláška Ministerstva dopravy a spojů č. 104/1997 Sb., kterou se provádí zákon o pozemních komunikacích, ve znění pozdějších předpisů,** stanoví náležitosti dokladu o výsledku vysokorychlostního kontrolního vážení - §51c a vzor tohoto dokladu v příloze č. 10 bod 2 a dále stanoví náležitosti vážního lístku - §51d a vzor tohoto dokladu v bodě 3 přílohy č. 10 k této vyhlášce.

**Vyhláška č. 209/2018 Sb., o hmotnostech, rozměrech a spojitelnosti vozidel,** stanoví v § 5 největší povolené hmotnosti silničních vozidel, zvláštních vozidel a jejich rozdělení na nápravy a v § 7 největší povolené rozměry vozidel a jízdních souprav.

**Zákon č. 56/2001 Sb. o podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích, ve znění pozdějších předpisů** v § 5 odst. (4) písm. b) umožňuje dálkový a nepřetržitý přístup pro výdej údajů z registru silničních vozidel krajským úřadům a obecním úřadům obcí s rozšířenou působností v rozsahu nezbytném pro účely provádění kontroly a vedení řízení o správním deliktu podle tohoto zákona, zákona o pozemních komunikacích nebo zákona o silničním provozu.

**Zákon č. 361/2000 Sb., o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů,** stanoví povinnosti řidičů a provozovatelů silničních vozidel.

**Zákon č. 505/1990 Sb. o metrologii, ve znění pozdějších předpisů** stanoví v Části II. požadavky související se schvalováním typů měřidel a Části III. požadavky na ověřování a kalibraci měřidel.

**Vyhláška Ministerstva průmyslu a obchodu č. 345/2002 Sb., kterou se stanoví měřidla k povinnému ověřování a měřidla podléhající schválení typu, ve znění pozdějších předpisů** stanoví v příloze dobu platnosti ověření vah pro vysokorychlostní kontrolní vážení silničních vozidel za pohybu.

**Vyhláška Ministerstva průmyslu a obchodu č. 262/2000 Sb., kterou se zajišťuje jednotnost a správnost měřidel, ve znění pozdějších předpisů**, stanoví v §3 náležitosti certifikátu a značky schválení typu, v § 6 vzor úřední značky a v příloze č. 2 náležitosti ověřovacího listu.

## 1.2. Technické standardy

**Opatření obecné povahy č. 0111-OOP-C010-10 (OOP)**, kterým se stanovují metrologické a technické požadavky na stanovená měřidla, včetně metod zkoušení pro schválení typu a pro ověřování stanovených měřidel: „váhy pro kontrolní vysokorychlostní vážení silničních vozidel za pohybu“.

**Dokumenty Mezinárodní organizace pro zákonnou metrologii**, (Organisation Internationale de Métrologie Légale **OIML**), mezivládní organizace zabývající se standardizací metrologie. OIML R 134 Doporučení pro „Automatické váhy pro vážení silničních vozidel v pohybu.“ Předepisuje zkoušky a testy, které musí být provedeny na jednotlivých komponentech vážních systémů.

**COST 323** výsledek evropské spolupráce ve vědeckém a technickém výzkumu v oblasti Vážení silničních vozidel za pohybu (WIM).

**ČSN 73 6222**Zatížitelnost mostů pozemních komunikací (vydáno 7/2013)

**ČSN EN 1992-2 NA ed. A Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 2: Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady** (vydáno 8/2023)

**ČSN EN 1992-2Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 2: Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady** (vydáno 1/2008)

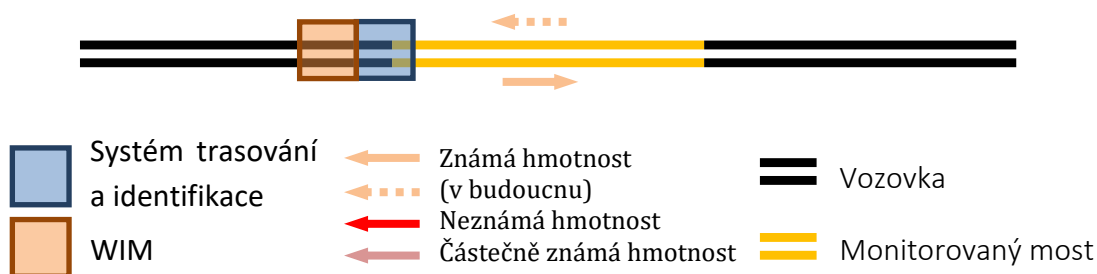
**ČSN EN 1992-2Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 2: Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady** (vydáno 5/2007)

## 2. Koncepce systému

Z hlediska celkové koncepce systému pro monitorování a ochranu mostní konstrukce lze realizovat různé varianty systému zejména v závislosti na tom, zda jsou monitorované mosty v těsné blízkosti WIM stanic, nebo ne. Jedná se tedy o centralizovanou a decentralizovanou variantu, případně jejich kombinaci.

### 2.1. Centralizovaná varianta

V případě centralizované varianty je v těsné blízkosti mostu osazených senzory pro monitorování mostní konstrukce instalován systém WIM pokrývající všechny jízdní pruhy komunikace. V rámci WIM systému a případně i na mostě mohou být instalovány kamery pro trasování pohybu vozidel.



Obr. 1 Centralizovaná varianta

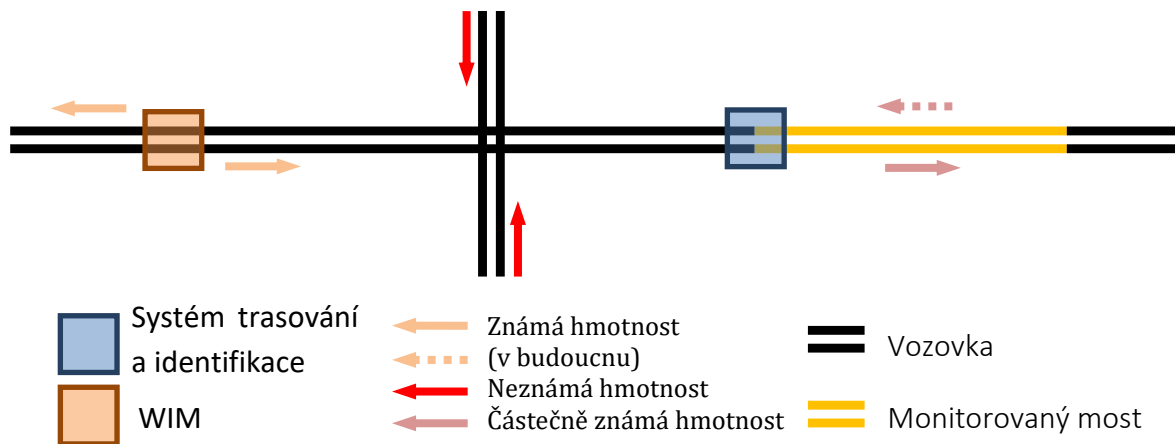
Jednotlivé technologie této varianty jsou lokalizovány v těsné vzájemné blízkosti a mohou být provázány. Kamery pro trasování pohybu vozidel mohou být součástí kamerového subsystému systému WIM a jednotka pro zpracování mostních senzorů může být rovněž úzce integrována s WIM systémem a sdílet některé technologické prvky.

Úzké provázání systémů a jejich blízkost umožňuje zpracování průjezdů jednotlivých vozidel téměř v reálném čase. Tato varianta rovněž zaručuje, že bude známa hmotnost veškerých projíždějících vozidel a v případě vhodného místa instalace WIM systému lze přímo odhadovat polohu vozidla na mostní konstrukci (viz další kapitoly).

### 2.2. Decentralizovaná varianta

V případě decentralizované varianty není (respektive nemusí být) systém WIM umístěn v blízkosti monitorovaného mostu, ale může se nacházet jinde po trase. V blízkosti mostu je pak umístěn samostatný systém identifikace a trasování pohybu vozidel po mostní konstrukci.

Systém WIM v této variantě tedy může být separovaný od mostu. Informaci o hmotnosti trasovaných vozidel je nutno zpětně dohledat na základě identifikace a re-identifikace vozidel. Nejjednodušší formou identifikace je použití registračních značek vážených vozidel (viz další kapitoly).



Obr. 2 Decentralizovaná varianta

Systém neumožňuje plné zpracování dat v reálném čase, respektive zpracování v reálném čase není možné pro směry jízdy, kde most předchází WIM systému.

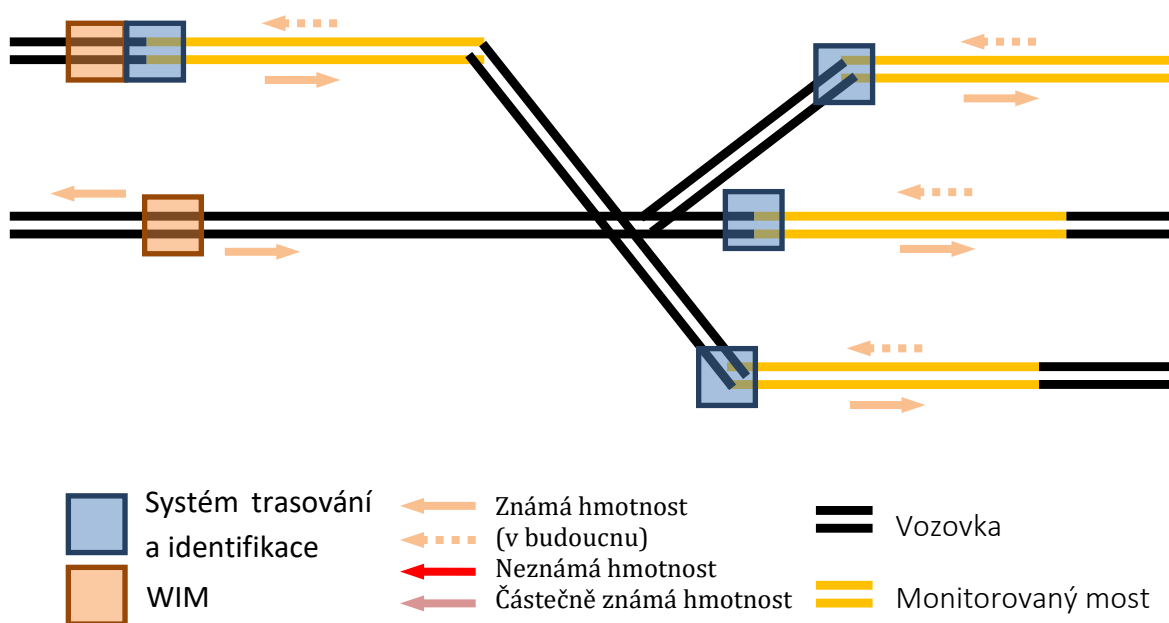
Decentralizovaný systém umožňuje současné monitorování více mostních konstrukcí na trase vozidla. Systém však není schopen zajistit, že budou známy hmotnosti všech vozidel pohybujících se po mostní konstrukci či konstrukcích. Důvodem jsou změny složení dopravního proudu, ke kterým dochází v místech křížení komunikací na trase mezi systémem WIM a monitorovaným mostem či mosty. Tabulka níže přehledně porovnává vlastnosti obou variant.

Tab. 1 Porovnání vlastností variant

Varianta	Centralizovaná	Decentralizovaná
<b>Klady</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zpracování v reálném čase,</li> <li>- informace o hmotnosti všech vozidel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- úspora nákladů (jeden WIM pro více mostů),</li> <li>- volnější výběr místa instalace WIM systému,</li> <li>- některá potenciálně nebezpečná (přetížená) vozidla může být možné odklonit,</li> <li>- lze použít již existující WIM stanice</li> </ul>
<b>Zápory</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vysoká cena (jeden WIM na každý most),</li> <li>- okolí mostu nemusí být pro WIM vhodné,</li> <li>- potenciálně nebezpečné (přetížené) vozidlo nelze včas odklonit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- off-line zpracování,</li> <li>- neúplná informace o zátěži mostu</li> </ul>

### 2.3. Kombinovaná varianta

Data WIM systému, který je součástí centralizované varianty, lze použít jako zdroj dat o hmotnosti vozidel pro monitorování mostů jinde po trase jízdy vozidel. Centralizovaná varianta tak může být zdrojem dat pro další decentralizované systémy monitorování mostní konstrukce.



Obr. 3 Kombinovaná rozsáhlá monitorovací síť

Při vyšším počtu instalovaných systémů vážení, ať již v centralizované nebo decentralizované variantě, může vzniknout provázaná síť stanic pokrývající významnou část silniční sítě a tím i celkového dopravního proudu. Může tak dojít k částečnému omezení nevýhody decentralizované varianty, tedy neúplnosti informací o zátěži monitorovaných mostů. Je ale zřejmé, že v případě použití libovolné z výše uvedených variant lze účinně monitorovat a významně tak zlepšit situaci mostů.

### 3. Stručný popis principů měření

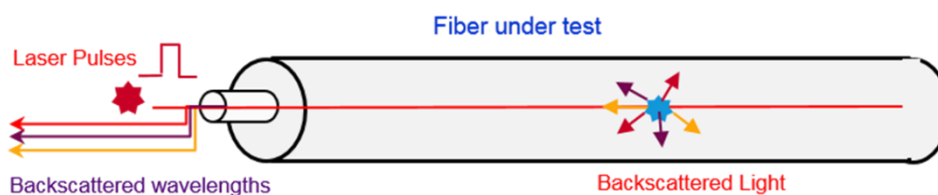
Smyslem této kapitoly je seznámit čtenáře s obecným principem a technickými a technologickými možnostmi principů měření a sběru dat pro monitorování mostů.

#### 3.1. Optické vláknové senzory a jejich použití pro monitoring mostních konstrukcí

Optické vláknové snímače jsou odolnou alternativou ke strunovým tenzometrům nebo k tenzometrickým odporovým sensorům (můstkům). Optické vláknové snímače vhodné pro monitoring liniových staveb lze dělit na optické vláknové snímače s distribuovaným měřením a Fibre Bragg Grating (FBG) senzory. Obecně lze konstatovat, že optické vláknové snímače vynikají vysokou přesností, odolností vůči elektromagnetickému rušení i mechanickou odolností, která je předurčuje k tomu, aby mohly být zality do železobetonových konstrukcí. Tyto senzory jsou určeny pro měření poměrného přetvoření nebo teploty. Typicky se senzory umísťují na místa konstrukce, kde se očekává nejvyšší přetvoření vlivem zatížení konstrukce nebo je místo rizikové z hlediska vzniku defektů. U mostních konstrukcí je typickým příkladem umístění na spodní straně železobetonové konstrukce nebo v blízkosti předpínací výztuže.

##### 3.1.1. Optické vláknové snímače s distribuovaným měřením

Optické vláknové senzory s distribuovaným snímáním jsou schopné měřit přetvoření nebo teplotu v délce celého vlákna (např. 30m) s prostorovou rozlišitelností v řádu jednotek cm (např. 3cm). Výstupem distribuovaného měřicího systému je pak průběh měřené veličiny v závislosti na délce od konce vlákna. Měření probíhá na základě Optické time domain reflektometrie OTDR s využitím zpětného rozptylu založeného na Releighově, Ramanově nebo Brillouinově principu. Zařízení pro distribuované měření jsou poměrně drahá, měření je citlivé na mnoho parametrů a vlivů prostředí, a proto zatím není tato metoda hojně využívána.



Obr. 4 Optické vláknové snímače

##### 3.1.2. Fibre Bragg Grating senzory (FBG)

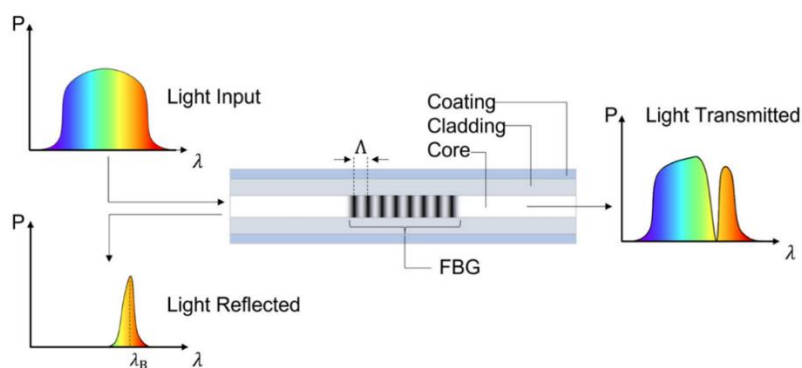
FBG senzory patří mezi senzory umožňující bodové měření teploty a poměrného přetvoření konstrukce. Měřicí body se umísťují na místa v konstrukci, kde se očekává nějaké anomální chování nebo hrozí větší riziko vzniku problému. Extrémní výhodou FBG sensorů je fakt, že měřenosnou veličinou poměrného přetvoření nebo teploty je v tomto případě frekvence odraženého spektra, a ne jeho amplituda. Proto jsou senzory odolné vůči vlivům útlumu na

spojovacích prvcích i kompletně odolné vůči elektromagnetickému rušení a jsou schopny pracovat na dlouhé vzdálenosti i v prostředí se silným elektromagnetickým rušením. Sensory jsou řádově citlivější než odporové tenzometry a umožňují i dynamické měření s frekvencí jednotek kHz. Díky tomu je možné senzory využít i k frekvenční analýze odezvy mostu a sledování vlastních frekvencí mostní konstrukce, podobně jako akcelerometry. Jednotka pro vyhodnocování signálu z optických FBG senzorů se nazývá interogační jednotka a obsahuje vše potřebné pro širokospektrální buzení senzorů a vyhodnocování signálu z nich a případný přepočít frekvence spektra na měřenou fyzikální veličinu.

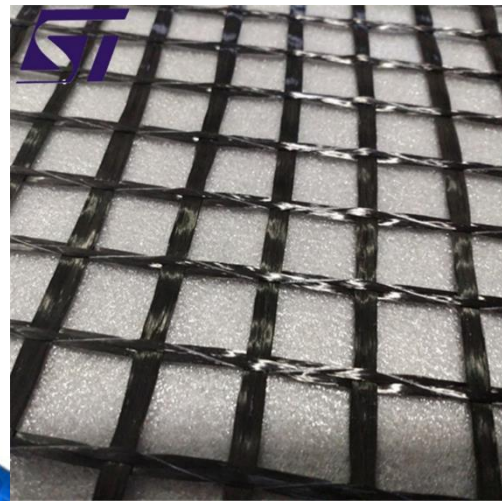
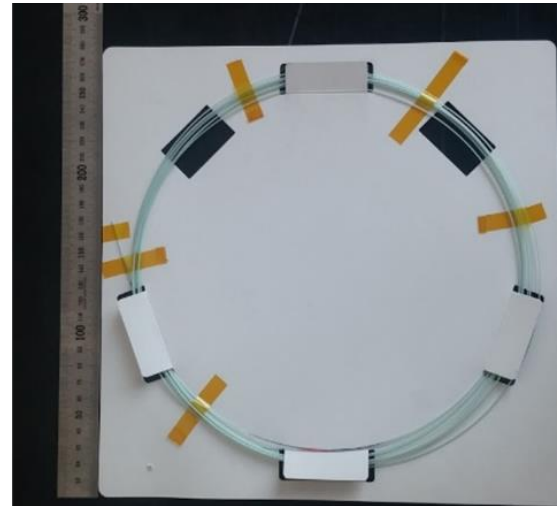
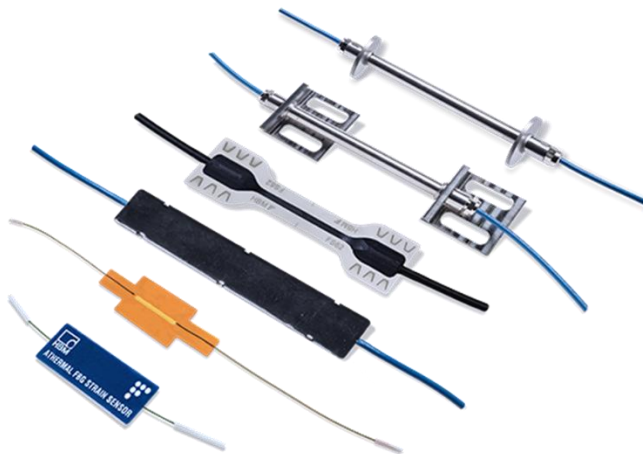
Z hlediska integrace monitoringu do konstrukce existuje celá řada provedení FBG senzorů:

- Sensory pro integraci do konstrukce
  - Sensory vhodné pro přímé zalití do železobetonové mostní konstrukce
  - Kotvičkové senzory různého typu
  - GlassFibreReinforced Polymer senzory ve formě laminátové struny (GFRP)
  - Optické vláknové snímače integrované ve vyztužovací kevlarové síti
- Sensory pro dodatečnou montáž na povrch monitorované konstrukce
  - Sensory pro externí montáž pomocí kotvy
  - Sensory GFRP pro nalepení na konstrukci chemickou kotvou

Integrace optických vláknových snímačů přímo do konstrukce před zalitím betonem představuje výhodu, kdy jsou následně senzory samotné součástí konstrukce a jsou i konstrukcí chráněny proti vlivům prostředí i vandalismu. Pro tento účel jsou speciálně vhodné senzory ve formě laminátové struny (GFRP). Měřicí bod je v tomto případě na struně vyznačen a senzor měří poměrné přetvoření ve směru struny.



Obr. 5Příklad měření dat z FBG senzorů



Obr. 6Příklad FBG senzorů

### 3.2. Měření akcelerometry a mostní sensorika

Pro zjištění zátěže mostních konstrukcí je možné využívat měření akcelerace akcelerometry a napětí (prostřednictvím deformace povrchů). Vhodné umístění senzorů na mostní konstrukci je třeba definovat na základě typu konstrukce mostu a samotné individuální konstrukce a obecně lze konstatovat, že na most je zapotřebí instalovat jednotky až desítky akcelerometrů a tenzometrů.

Samotný sběr dat z akcelerometrů je třeba provést s ohledem na kmitání mostu a další aspekty konstrukce. Je třeba určit rozsah a požadovanou četnost měření, které obvykle bude



v tisících/sec. Příklad veličin relevantních pro zatížení konstrukce mostů zjizitelných s využitím akcelerometrů je uveden v tabulce 2.

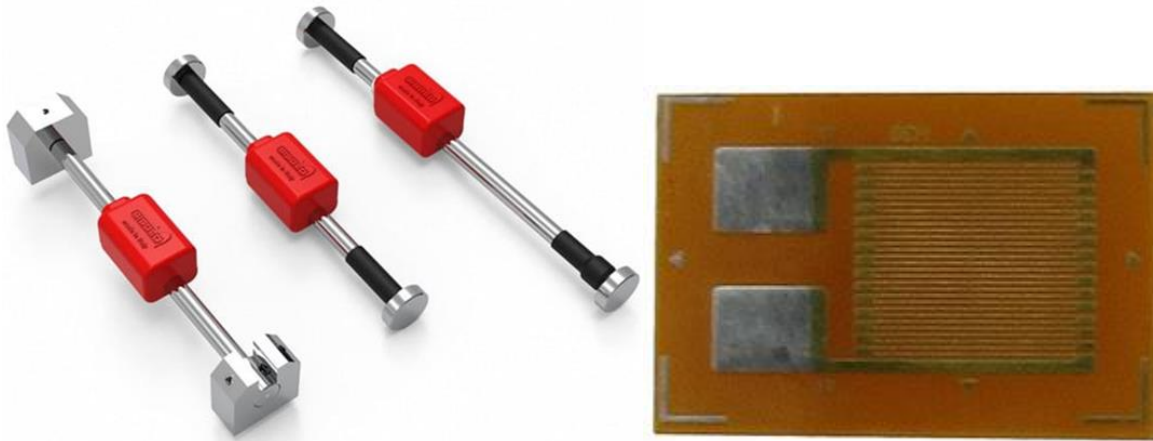
Tab. 2 Akcelerometry

Druh senzoru	Druh výstupu měření Detaily	Jednotka Rozměr	Entita, Periodicita
Akcelerometr (1 až 3 osy)	Vzdálenost Maximální rozkmit konstrukce	mm Až 3 osy	Vozidlo, náhodně
	Poloha Minimální a maximální hodnota posunu konstrukce	mm Až 3 osy, 2 hodnoty	
	Akcelerace Primární data	ms <sup>-2</sup> Až 3 osy, čas (až tisíce/s)	
	Poloha Průběh rozkmitu konstrukce	mm Až 3 osy, čas (až tisíce/s)	

Sběr dat z tenzometrů je třeba provádět s ohledem na dynamiku možné změny napětí na povrchu mostních konstrukcí. Typicky se využívají strunové tenzometry a dá se předpokládat, že četnost měření bude obvykle v tisících/sec. Příklad veličin relevantních pro zatížení konstrukce mostů zjizitelných s využitím strunových tenzometrů je uveden v tabulce 3.

Tab. 3 Mostní senzory

Druh senzoru	Druh výstupu měření Detaily	Jednotka Rozměr	Entita, Periodicita
Optické vláknové senzory	Poměrné přetvoření Maximální a minimální hodnota	$\mu\text{m}/\text{mm}$ 2 hodnoty	Vozidlo, náhodně
	Poměrné přetvoření Primární data senzoru	$\mu\text{m}/\text{mm}$ 1 hodnota, čas (až stovky/s)	Vozidlo, náhodně Most, periodicky
Senzor posunu závěrů	Poloha Posun koncových polí vůči uzávěrům mostu	mm 1 hodnota	Most, periodicky
Strunové tenzometry	Poměrné přetvoření Maximální a minimální hodnota	$\mu\text{m}/\text{mm}$ 2 hodnoty	Vozidlo, náhodně
	Poměrné přetvoření Primární data	$\mu\text{m}/\text{mm}$ hodnota, čas (až desítky/s)	Vozidlo, náhodně Most, periodicky
	Teplota	$^{\circ}\text{C}$ 1 hodnota	Most, periodicky
Teplotní senzor	Teplota Teplota prostředí	$^{\circ}\text{C}$ 1 hodnota	Prostředí, periodicky
Teplotní senzor	Teplota Teplota v konstrukci mostu	$^{\circ}\text{C}$ 1 hodnota	Most, periodicky
Optické teplotní senzory	Teplotní gradient Teplotní gradient v konstrukci mostu	$^{\circ}\text{C}$ AŽ N hodnot	Most, periodicky



Obr. 7 Příklady tenzometrů

### 3.3. Měření WIM systémy

Běžně používané systémy monitorování stavu mostních konstrukcí pracují čistě s mostní senzorkou. Je tedy známo chování mostní konstrukce (průměry hodnot, extrémy atp.), ale nejsou známy vstupy, které tyto odezvy vyvolaly. Doplnění WIM systému do systému monitoringu mostní konstrukce poskytuje informaci o vztahu mezi zatížením mostní konstrukce a její odezvou. Tato dodatečná informace výrazně zvyšuje informační hodnotu měřených dat.

Aby byl WIM systém použitelný jako zdroj dat pro monitoring mostní konstrukce, je třeba, aby spolehlivě poskytoval kvalitní data o parametrech vozidel, která se pohybují po mostní konstrukci, a to jak v případě centralizované, tak i decentralizované varianty systému.

Z hlediska přesnosti měření hmotnosti jsou dostačujícími WIM systémy ty, které odpovídají kategorii COST 323 B(10) nebo lepší, viz zelené sloupce v tabulce 4.

Tab. 4Vhodné třídy přesnosti WIM systémů (COST 323, chyby v % jako 2× rozšířená směrodatná odchylka)

Kritérium (druh měření)	Oblast použití	Třídy přesnosti						
		Směrodatná odchylka $\delta$ (%)						
		A (5)	B+ (7)	B (10)	C (15)	D+ (20)	D (25)	E
1. Celková hmotnost	Celková hmotnost > 3,5 t	5	7	10	15	20	25	> 25
Zatížení na nápravu	Zatížení na nápravu > 1 t							
2. Skupina náprav		7	10	13	18	23	28	> 28
3. Jediná náprava		8	11	15	20	25	30	> 30
4. Jedna náprava ze skupiny		10	14	20	25	30	35	> 35
Rychlost	V > 30 km/h	2	3	4	6	8	10	> 10
Vzdálenost mezi osami		2	3	4	6	8	10	> 10
Celkový dopravní tok		1	1	1	3	4	5	>5

Instalace WIM systému musí být provedena v souladu s platným opatřením obecné povahy – váhy pro kontrolní vysokorychlostní vážení silničních vozidel za pohybu.

Z hlediska dat by WIM systém měl poskytovat informace o vozidle nejméně v rozsahu uvedeném v tabulce 5.

Tab. 5 WIM senzory

Typ senzoru	Druh výstupu měření Detaily	Jednotka	Entita, Periodicita
WIM systém	Směr jízdy	-	Vozidlo, náhodně
	Identifikace vozidla (RZ)	-	
	Rozestup mezi vozidly	ms	
	Klasifikace (kategorie) vozidla	-	
	Rychlost	km/h	
	Délka	dm	
	Počet náprav	-	
	Vzdálenost náprav	cm	
	Hmotnost, celková	kg	
	Hmotnost, kolová	kg	
	Hmotnost, nápravová	kg	
	Poloha vozidla (vlevo, vpravo, střed)	cm	
	Typ montáže pneumatik na nápravě	-	
	Teplota systému	°C	
	Teplota vozovky	°C	
	Akcelerace vozidla	ms <sup>-2</sup>	
	Stavové informace a validita	-	
Informace o limitech a přestupcích	-		

### 3.4. Identifikace a re-identifikace vozidel

Pro zjištění zátěže mostu vozidlem je základním předpokladem správné zjištění hmotnosti vozidel a její rozložení do zátěže mostu vozidlem. Pro účely této metodiky se předpokládá, že budou využity aktuální hmotnosti vozidel, která budou identifikována a zvážena WIM stanicemi a taková vozidla budou identifikována také při průjezdu mosty a bude provedena jejich re-identifikace (ztotožnění) prostřednictvím snímání vozidel kamerou a čtení registračních značek. Pro identifikaci a re-identifikaci vozidel se předpokládá využití registračních značek vozidel zejména z toho důvodu, že při WIM vážení jsou registrační značky čteny a současně platí to, že pro analýzu mostů není třeba využívat všechna projíždějící vozidla (a pravděpodobně to ani nebude možné), a tedy případná občasná nepřítomnost registračních značek či jejich nečitelnost nebude na závadu.



Obr. 8 Příklad re-identifikace (vlevo Olomouc D35 12.10.2022 8:55, vpravo Staré Hobzí 12.10.2022 12:43)

Příklad re-identifikace vozidla prostřednictvím registračních značek je uveden na obrázku 8 vlevo, kde je zobrazeno vozidlo, které nejprve projelo WIM stanicí, a poté po sledované mostní konstrukci.

### 3.5. Zjišťování polohy vozidel na mostech

Polohu vozidel na mostních konstrukcích je doporučeno zjišťovat jedním ze dvou možných postupů, případně kombinací obou.

#### 3.5.1. Zjišťování polohy analýzou videosekvencí

Pro samotné zjišťování polohy vozidla na mostní konstrukci lze s výhodou využít metody detekce vozidel a jejich umístění ve snímku. K tomu je třeba využít videosekvenci nebo sérii snímků projíždějícího vozidla, například z kamery, kterou je zapotřebí instalovat pro identifikaci vozidel (viz výše) s tím, že kamera musí zabírat vozidlo (respektive přinejmenším jeho část, například registrační značku) po celou dobu jeho průjezdu po mostní konstrukci nebo po jeho podstatnou část, viz též ilustrační obrázek 8 vpravo.



Obr. 9Příklad instalace kamery a záběru vozidla na mostní konstrukci

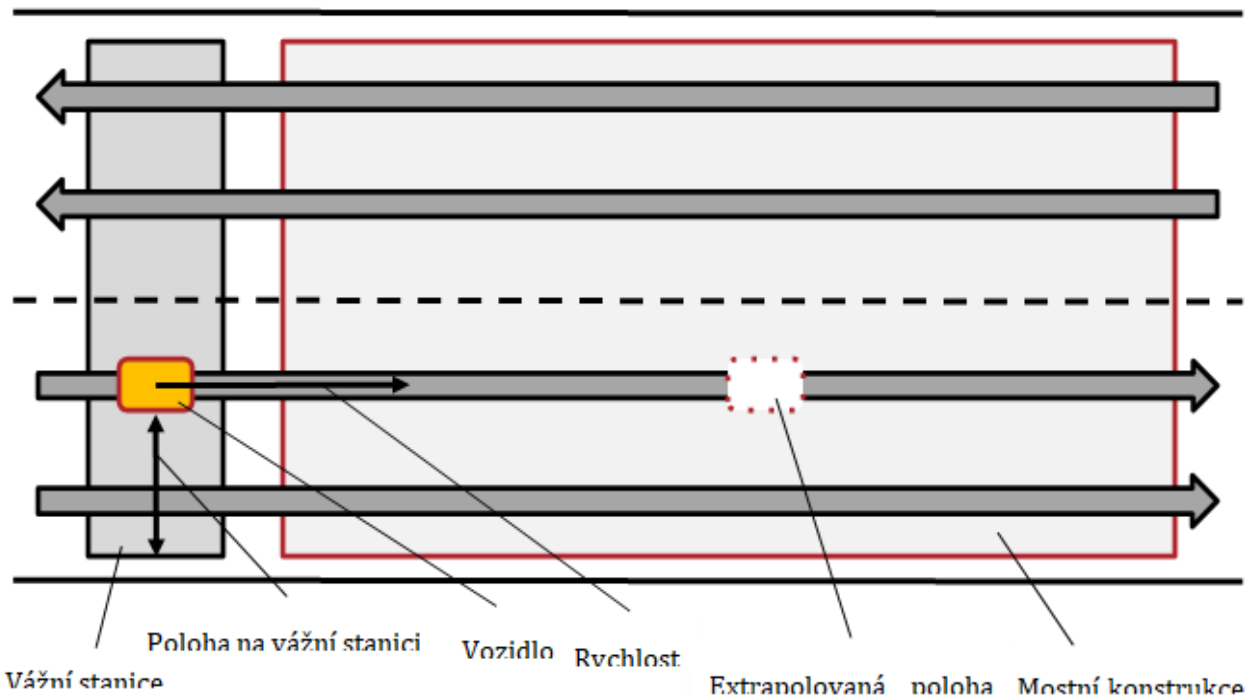
Z takto pořízených dat lze získávat například následující údaje:

- poloha vozidla v obrazu v čase,
- počet vozidel na mostě (informace o tom, zda je na mostě více než jedno vozidlo),
- informace o vzdálenosti vozidla na základě analýzy velikosti registrační značky.

Z těchto údajů a znalosti “kalibrace” kamery lze poté vypočítat polohu vozidla na mostní konstrukci (v závislosti na použité kameře a metodě) s chybou nejvýše v jednotkách metrů, což je údaj dostatečný pro vyhodnocení polohy pro výpočet zátěže mostní konstrukce.

### 3.5.2. Zjišťování polohy na základě znalosti rychlosti vozidla

V případě, že WIM stanice je umístěna v bezprostřední blízkosti mostní konstrukce, je možné kroky identifikace a re-identifikace vozidel vynechat. V takovém případě lze také zjistit přímo vážním systémem příčnou polohu a rychlost vozidla a z nich extrapolovat na polohu vozidla na mostě. Taková poloha není verifikovatelná, nicméně lze předpokládat, že například pro statistické účely bude dobře použitelná. Pro ilustraci viz obrázky 10.



Obr. 10 Ilustrace možnosti extrapolace polohy vozidla z vážního systému

### 3.5.3. Potřebná přesnost měření polohy vozidla

Běžné senzory mostní konstrukce, jako jsou tenzometrické snímače nebo optické snímače, obvykle pracují se vzorkovací frekvencí 10 – 100 Hz, což při rychlosti 90 km/h odpovídá nejistotě polohy vozidla  $\pm 0,125$  až  $\pm 1,250$  m. Dynamický děj mostní konstrukce (přetvoření, průhyb) je, obzvláště u delších segmentů a pro dlouhá nákladní vozidla, relativně pomalý (na úrovních sekund) a odezva je plochá (hmotnost vozidla je rozložena po jeho značné délce). Maximum měřených veličin rovněž většinou přibližně koreluje s přítomností těžiště vozidla ve středu mostního segmentu. Z těchto důvodů lze konstatovat, že postačuje přesnost určení polohy s chybou nižší nebo rovnou  $\pm 2$  m.

## 3.6. Časová synchronizace sensorických systémů

V rámci měření mostní konstrukce a pro řadu funkcí centralizované varianty (viz další kapitoly) je zapotřebí, aby byly jednotlivé sensorické systémy synchronizovány.

### 3.6.1. V rámci mostní konstrukce

V rámci mostní konstrukce je třeba, aby byly jednotlivé sensorické systémy synchronizovány s chybou často nižší než nízké desítky milisekund. Tento požadavek odpovídá časovému rozlišení běžných systémů monitorování mostní konstrukce a relativně pomalému ději při její deformaci (viz kapitola 3.5.1). Pro nákladní vozidlo pohybující se rychlostí 90 km/h odpovídá chyba času  $\pm 10$  ms nejistotě určení polohy vozidla  $\pm 0,250$  m.



---

Požadavek na chybu vzájemného časování v nízkých desítkách milisekund lze dodržet například za předpokladu vytvoření lokální datové sítě v rámci mostní konstrukce s využitím lokálního NTP serveru. Běžná přesnost NTP v lokální datové síti s nízkým počtem přepínacích prvků bývá lepší, než 10 ms. Absolutní čas lokální datové sítě mostu může být posunut vzhledem ke skutečnému času (nebo například k vnějšímu globálnímu zdroji času). To ale nemá vliv na přesnost synchronizace času v lokální síti mostu a chyba času (i v řádu mnoha sekund) by neměla negativně ovlivnit funkci celého systému.

### **3.6.2. U vzdálených systémů (decentralizovaná varianta)**

Informace o čase mezi vzdálenými systémy u decentralizované varianty (tedy vzdálený WIM systém a systémy monitorování mostní konstrukce) k validaci času jízdy vozidla mezi systémy, tedy správnosti re-identifikace a validaci neměnnosti parametrů vozidla (například, že čas je natolik krátký, že nemohlo dojít k nakládce/vykládce). Z tohoto důvodu postačuje, i s ohledem na vzdálenost mezi systémy, přesnost vzájemné synchronizace času s chybou ve stovkách milisekund až mnoha desítek sekund. Tomuto požadavku běžně vyhoví veřejný nebo NTP server nebo NTP server ve společné virtuální datové síti (VPN).

## 4. Popis kategorií vad mostů a možností jejich zjišťování

Cílem je seznámit čtenáře s možnostmi odhalování vad mostů na základě měření a nastavení realistických předpokladů a očekávání. Monitorování mostních konstrukcí je dlouhodobým procesem, který vyžaduje dlouhodobou archivaci měřených dat. Aby bylo možno stav konstrukce dlouhodobě hodnotit je nutno archivovat data v odpovídající kvalitě a obsahu.

Z hlediska datového obsahu by databáze měřených hodnot měla poskytovat:

- Třídění zdrojů dat
  - Existují různé druhy senzorů (WIM, kamerový systém trasování, úsekový systém trasování, akcelerometr, strunový tenzometr, optický vláknový senzor, senzor posunu závěrů, teploměr atd.).
  - Existují různé druhy výstupů měření dle měřené veličiny nebo parametru (hmotnost, trajektorie, akcelerace, rychlost, poloha, vzdálenost, poměrné přetvoření, teplota, teplotní gradient atd.) a některé systémy mohou poskytovat více veličin současně.
  - Data se vztahují k akcím různých entit (prostředí, vozidlo, most samotný) a mohou vznikat periodicky (např. měření teploty) nebo náhodně na základě vnější události (např. průjezd vozidla).
  - Sensory mohou být skutečné nebo virtuální (například výstupy modelu nebo výpočtu).
- Identifikaci a parametry zdrojů dat (senzorů)
  - Unikátní identifikace každého zdroje dat.
  - Popis zdroje dat.
  - Parametry zdroje dat (druh, výstup, jednotka, rozsahy).
- Časovou lokalizaci
  - Časovou značkou (UTC).
  - U časových průběhů je časová značka buďto přiřazena každé položce (např. trasování vozidla) nebo pouze počátku záznamu a je uvedena perioda vzorkování (např. primární data akcelerometrů nebo poměrného přetvoření).
  - U samostatných hodnot (událostí) je každá hodnota (např. teplota, maximální přetvoření, minimální přetvoření) opatřena samostatnou časovou značkou.
- Prostorovou lokalizaci mostu, mostních segmentů a zdrojů dat (senzorů)

- Poloha jednotlivých senzorů v jednotném trojrozměrném souřadném systému mostu se známým počátkem souřadnic, včetně systémů v blízkosti mostu ale umístěné mimo mostní konstrukci (například WIM systém, systém re-identifikace vozidel atp.)
- Známé prostorové dělení mostní konstrukce na jednotlivé úseky či segmenty. Každému senzoru je přiřazen jeho segment a případně relevantní měřený úsek mostu.
- Globální lokalizaci (např. GPS souřadnice) pro systémy, které mohou být od mostní konstrukce výrazně vzdáleny (například WIM systém v decentralizovaném uspořádání).
- Uložení jednotlivých výstupů senzorů
  - Datový obsah s ohledem na druh senzoru, měřené hodnoty a rozsahy, typ měření (periodické, náhodné na základě události) a další.
  - Diagnostická data a stavové informace.
- Uložení výsledků výpočtů a přiřazení vazeb mezi událostmi
  - Očekávané hodnoty a výstupy modelů.
  - Vazba mezi událostmi (například přiřazení odezev mostní sensoriky průjezdu konkrétního vozidla, identifikace přítomnosti více vozidel současně na mostním segmentu atp.).
  - Přepočtené a zpracované hodnoty, průběžné výpočty.

Samozřejmou nutností je pravidelné zálohování databáze systému monitorování mostní konstrukce tak, aby nedošlo k významné ztrátě dat monitoringu.

Data měřená systémem monitoringu mostní konstrukce musí být vhodným způsobem **vizualizována**. Je vhodné vizualizovat vztahy mezi daty a vnějšími vlivy takovým způsobem, který může ukazovat na změny parametrů mostní konstrukce. Například, ale nikoliv výhradně:

- Vztahy mezi událostí zatížení mostu (průjezd vozidla) a odezvami mostní sensoriky.
- Časové závislosti.
  - Příklad: pohyby mostního závěru za poslední 3 roky.
- Vzájemné závislosti mezi měřenými veličinami pro vybrané senzory a zvolený časový rozsah.
  - Příklad: poměrné přetvoření mostu v závislosti na teplotě za poslední měsíc.
  - Příklad: poměrné přetvoření mostu v závislosti na teplotě po měsících za rok 2022.

- 
- Závislosti mezi různými měřenými veličinami souvisejících výběrových událostí ve výběrovém rozsahu.
    - Příklad: poměrné přetvoření mostu v závislosti na hmotnosti kamionu s 5 nápravami v různých měsících roku.
    - Příklad: Vývoj (v čase) průhybu mostu při průjezdu vozidla určitých parametrů (kamion, 5 náprav, 35 tun, rychlost 70-90 km/h).
  - Třídění a řazení dle zvolených kritérií, obzvláště extrémních hodnot.
    - Příklad: Hledání nejtěžších vozidel a jim odpovídajících odezev senzorů mostní konstrukce.

## 5. Kategorizace senzorů

### 5.1. Akcelerometry

Akcelerometry umožňují měřit vibrace a zrychlení mostní konstrukce. Na základě dat akcelerometrů lze rovněž analyzovat krátkodobé vynucené (průjezdem vozidla) pohyby (posun, průhyb, rozkmit) mostní konstrukce a provádět frekvenční analýzu vlastní frekvence mostní konstrukce.

Vibrace, změny v dynamické odezvě, změny vlastní frekvenci mostní konstrukce a změny v pohybu mostní konstrukce při zatížení mohou naznačovat problémy, jako je strukturální nestabilita, uvolněné spoje nebo nerovnoměrné zatížení a změny v tuhosti mostní konstrukce. Náhlé zrychlení nebo vibrace mohou být také známkami nárazu nebo strukturálního problému.

Základním zdrojem údajů o mostech jsou senzory na nich nainstalované. Tato kapitola obsahuje stručný popis technických parametrů akcelerometrů, které již byly otestovány pro měření mostu pod zatížením. Jsou uvedeny jejich principy, možnosti a omezení, veličiny, které měří, a s možnostmi jejich montáže, nasazování, údržby, životnosti a s dalšími parametry z hlediska signálu (například šum).

Jednoosý kapacitní akcelerometr MEMS, využívaný běžně pro měření zrychlení a nízkofrekvenčních vibrací v hlavní ose.

Specifikace akcelerometru MEMS:

- Rozsahy měření:  $\pm 2 \text{ g}$ ,  $\pm 10 \text{ g}$ ,  $\pm 30 \text{ g}$ ,  $\pm 50 \text{ g}$ ,  $\pm 100 \text{ g}$ ,  $\pm 200 \text{ g}$
- Frekvenční rozsah:  $0 \dots 2\,000 \text{ Hz}$  (5 %) (kromě  $\pm 2 \text{ g}$ )
- Možnosti výstupu:  $0 \pm 4 \text{ V}$  nebo  $2,5 \pm 2 \text{ V}$  (s uzemněním)
- Provozní teplota:  $-55 \dots 125 \text{ }^\circ\text{C}$
- Napájecí napětí,  $6 \dots 50 \text{ V DC}$
- Odolnost proti otřesům  $6\,000 \text{ gpk}$

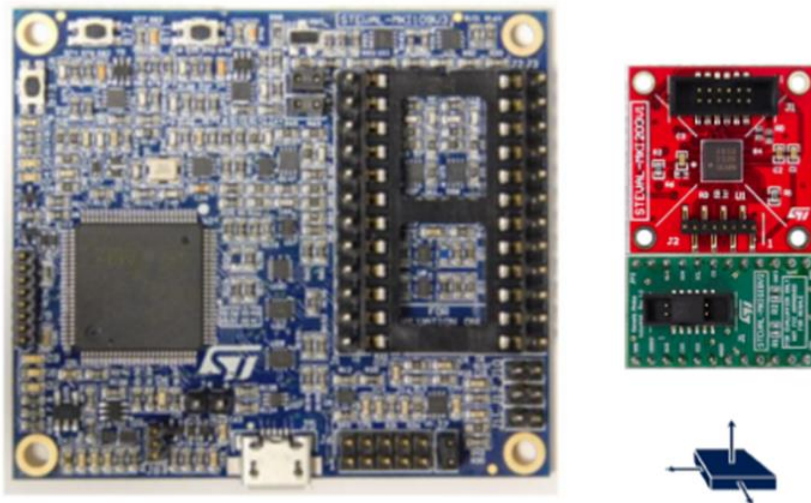
Uvedený akcelerometr MEMS je vhodný pro potřeby měření mostů s ohledem na rozsah měření, který u konkrétního mostu vyhovoval potřebám měření, a to zejména v nižších rozsazích měření. [2]



Obr. 11 Kapacitní akcelerometr MEMS

Další profesionální nástroj MEMS, u něhož je základní deska adaptérů ST MEMS doplněná sadou akcelerometrů MEMS založená na IIS2ICLX. Základní deska STEVAL-MKI109V3 poskytuje kompletní platformu k použití pro hodnocení produktů ST Microelectronics MEMS. Obsahuje vysoce výkonný 32bitový mikrokontroler, který funguje jako most mezi senzory a PC, na kterém je možno stáhnout a spustit grafické uživatelské rozhraní (GUI) nebo vyhrazené softwarové rutiny pro přizpůsobené aplikace.

Deska je vybavena patičí DIL24 pro připojení všech dostupných adaptérů pro digitální i analogová výstupní zařízení MEMS. K dispozici je nastavitelný napájecí zdroj MEMS DIL24, DFU-kompatibilní pro aktualizaci firmwaru mikroprocesoru USB a systém je kompatibilní s USB 2.0.



Obr. 12 Základní deska STEVAL-MKI109V3 a vyhodnocovací deska STEVAL-MKI209V1K

Vyhodnocovací deska akcelerometru STEVAL-MKI209V1K má vestavěný IIS2ICLX senzor, který se připojuje plochým kabelem k výše popsané adaptérové desce STEVAL-MKI109V3 (viz obr.12). Snímač je připájen přesně ve středu desky a je oboustranný. Součástí dodávky jsou speciální lepidla, která umožňují montáž desky na zařízení určená pro analýzu vibrací. Alternativně lze desku namontovat také pomocí otvorů umístěných v každém rohu desky plošných spojů.

STEVAL-MKIGIBV2 lze zapojit do standardní zásuvky DIL 24. Souprava poskytuje kompletní IIS2ICLX pin-out a je připravena k použití s požadovaným oddělovací kondenzátory na napájecím vedení VDD.

Tento adaptér je podporován základní deskou STEVAL-MKI109V3 s vysoce výkonným 32bitovým mikrokontrolerem fungujícím jako most mezi senzorem a PC, na kterém je možné používat grafické uživatelské rozhraní ke stažení (Unico GUI) nebo specializované softwarové rutiny přizpůsobené pro praktické aplikace. [2]



Obr. 13Příklad možného osazení akcelerometrů STEVAL na stávající mostní konstrukci, v pozadí skříň elektronika WIM, záznamová a vyhodnocovací jednotka a bateriový systém napájení

Výše popsané komponenty je vhodné vzájemně propojit a otestovat nejprve v laboratorních podmínkách a následně pro potřeby měření na mostě je nutno jednotlivé akcelerometry osadit do vodotěsných boxů opatřených magnetickými příchytkami pro upevnění na spodní část mostní konstrukce (obr. 13). Postup instalace: osazení akcelerometrů na mostní konstrukci, propojení se záznamovou a vyhodnocovací jednotkou (systém WIM). Jednotlivé snímače je potřeba softwarově nastavit, otestovat a připravit na vlastní měření. Po nastavení parametrů je vhodné provést ověřování SW WIM společně s jednotlivými měřicími elementy formou simulace přejezdů a následně reálných přejezdů vozidel. Akcelerometry MEMS STEVAL-MKI109V3 jsou vhodné pro potřeby měření mostů, a to zejména díky možnosti nastavení rozsahu měření podle chování příslušné mostní konstrukce.

## 5.2. Senzory polohy vozidel na mostech

Senzory měří pohyby, průhybu a vzájemné polohy součástí mostní konstrukce.

Neobvyklé pohyby nebo průhyby za přijatelnými limity mohou naznačovat sedání konstrukce, problémy se základy nebo nerovnoměrné zatížení. Sledování vzájemné polohy jednotlivých prvků mostní konstrukce může pomoci identifikovat problémy se součástmi mostu, jako jsou ložiska nebo dilatační spáry.

Jako senzor polohy vozidla na mostě je možné využít v zásadě libovolný kamerový systém, který je schopen dodat sérii snímků nebo videosekvenci s dostatečným rozlišením pro čtení registračních značek a detekci vozidel. Taková kamera musí zabírat vozidlo (respektive přinejmenším jeho část, například registrační značku) po celou dobu jeho průjezdu po mostní konstrukci nebo po jeho podstatnou část (viz též kapitolu 3.5). Je vhodné využívat kamery s možností časové synchronizace výstupu a také s optikou (objektivy), které nevykazují velké geometrické zkreslení tak, aby bylo možno dosahovat dobré přesnosti určení polohy.

### 5.3. Tenzometry a optické vláknové senzory

Umožňují měřit přetvoření a napětí v různých konstrukčních částech a prvcích mostní konstrukce. Některé typy optických senzorů (typicky FBG) umožňují rovněž frekvenční analýzu vlastní frekvence mostní konstrukce.

Umožňují detekovat praskliny, měřit nadměrné deformace v konstrukčních prvcích, únavové poškození a přepětí v prvcích mostu. Mohou detekovat změny ve vlastnostech materiálu a strukturální integritě.

### 5.4. Sklonoměry

Měří sklony mostní konstrukce a případně jejich částí. Poskytují údaje o celkové stabilitě mostu.

Změny náklonu mostu mohou indikovat sedání, problémy se základy nebo strukturální problémy.

### 5.5. Teplotní senzory

Teplotní senzory měří teplotu jednotlivých prvků a součástí mostní konstrukce a jejího okolí.

Rozdíly teplot mohou ovlivnit vlastnosti materiálu a vést k problémům. Tepelná roztažnost nebo smršťování může způsobit strukturální napětí nebo deformaci prvků mostní konstrukce.

### 5.6. Korozní senzory

Měří elektrický odpor, elektrochemický potenciál nebo změny vlastností materiálu pro identifikaci koroze.

### 5.7. Systémy vážení vozidel



Tyto systémy, diskutované v této metodice a případně kombinované se systémem trasování pohybu vozidel, umožňují měřit hmotnost jednotlivých vozidel a jejich náprav a kumulovanou hmotnost a skladbu dopravního proudu protékajícího po mostní konstrukci.

Systémy vážení umožňují zjišťovat kumulované zatížení mostní konstrukce a lokální přetížení mostní konstrukce (přetížená vozidla). Ve spojení s daty dalších senzorů mostní konstrukce umožňují získat relaci mezi měřenými hodnotami mostních senzorů a zatížením mostní konstrukce, čímž výrazně a zásadně navyšují informační hodnotu údajů ze senzorů mostní konstrukce. Díky těmto dodatečným vstupům a vztahům lze sledovat vzory, trendy, jejich změny v čase a srovnávat chování konstrukce s jejím modelem, což umožňuje prohloubit a zpřesnit analýzu stavu mostní konstrukce, zlepšit detekci poruch a zefektivnit případnou údržbu.

## 6. Kvantitativní analýza osazení mostů

Postup odhadu druhu, počtů, parametrů a umístění senzorů v závislosti na typu mostních konstrukcí a jejich velikosti. Ideálně “typově”, tedy bez toho, aby bylo nutno staticky nebo jinak analyzovat konkrétní konstrukci mostů (a s tím, že bude tolerována drobná chyba výsledků).

Každá mostní konstrukce je individuální (pokud se nejedná o typovou konstrukci), z tohoto důvodu se před rozhodnutím ohledně osazení měřicího systému musí prověřit následující body:

- je nutno vycházet ze statického schématu příslušné konstrukce,
- je nutno prověřit, zda se jedná o železobetonovou, nebo předpjatou konstrukci

a teprve na základě výše uvedených informací ve spolupráci se statikem navrhnout vhodnou metodu měření.

Pro potřeby dlouhodobého sledování poklesu podpor se využívají nivelační metody, kdy se v pravidelných intervalech (zpravidla jeden rok), provádí nivelační zaměření na předem osazené body na podporách (např. Felsenau viadukt Bern). Tato metoda nebyla v rámci projektu využita. Protažení mostní konstrukce v jednotlivých polích jsou dlouhodobě sledována prostřednictvím optických senzorů instalovaných přímo u výztuže (klasické či předpínací). Průhyb jednotlivých polí mostní konstrukce je přímo měřen prostřednictvím tenzometrů a nepřímo pomocí akcelerometrů (vyhodnocení výstupního signálu metodou dvojité integrace). Kromě toho jsou také využívány tzv. strunové tenzometry (většinou pro samostatná krátkodobá měření). Frekvence kmitání mostní konstrukce a vibrace v jednotlivých polích je měřena prostřednictvím vyhodnocení výstupního signálu akcelerometrů. Okamžitá a kumulativní zatížení mostní konstrukce jsou stanovena prostřednictvím vyhodnocení měření systémem WIM.

Jak již bylo uvedeno, pro každou konkrétní mostní konstrukci je nutno provést ve spolupráci se statikem (nejlépe s projektantem mostu) předem analýzu a stanovit individuálně nejvhodnější kombinaci typů senzorů a metod vyhodnocení.

## 7. Analýza možných výsledků

S předpokladem, že výsledkem budou vlastnosti výsledného řešení mostů, například odhad rozlišovací schopnosti měření a vliv na četnost a cenu údržby mostů a pravděpodobnost poruch mostů.

### Určení polohy vozidel na mostě

Zdrojem informací pro zjišťování polohy vozidel na mostě mohou být buď extrapolace z WIM stanice, je-li umístěna bezprostředně u mostu, informace z video systému, případně jiné zdroje dat. Příkladem možných postupů mohou být:

- Extrapolace z WIM systému – v tomto případě lze rychlost vozidla zjistit s přesností lepší než 1% a za předpokladu rovnoměrného přímočarého pohybu vozidel lze očekávat (při běžných délkách mostů nebo mostních segmentů) určení polohy s chybou v nízkých jednotkách metrů, což je pro analýzu mostů vesměs dostatečná přesnost. Rovnoměrný přímočarý pohyb vozidel sice nelze vždy předpokládat, ale pro sběr statistických údajů nemusí být tento předpoklad na závadu.
- Zjištění polohy z videosekvence – pro tento případ lze vycházet například z velikosti registrační značky, případně jiného objektu na vozidle se známou velikostí, ale také z polohy vozidla v obraze s využitím kalibrované kamery. V tomto případě je velikost objektu/změny polohy nepřímo úměrná vzdálenosti vozidla od kamery. Například při vzdálenosti vozidla od kamery 50m a velikosti registrační značky v obraze při této vzdálenosti je dosažitelná rozlišovací schopnost kolem 1m, což je pro analýzu dostatečné.
- Pro zjištění polohy vozidla na mostě je jistě možné využít dalších postupů/systémů, například stereoskopických měřicích systémů optických [3] s lepší, než výše uvedenou rozlišovací schopností/přesností. Instalace takových systémů by však byla pravděpodobně neekonomická, protože přesnost již výše dvou uvedených metod bude vesměs dostatečná pro analýzu mostní konstrukce.

## 8. Ekonomické aspekty

Cílem této metodiky je zejména připravit podklady pro sběr dat pro zajištění bezpečného a ekonomického provozu, a to dlouhodobě. Proto je při zjišťování dat třeba dbát zejména na využití technologií, které jsou:

- ekonomické (jistě relativně vzhledem k ceně mostů samotných),
- provozně nenáročné,
- dlouhodobě spolehlivé.

Každému projektu musí předcházet analýza a posouzení mostní konstrukce zejména s ohledem na potřeby a požadavky správce komunikace. Toto zahrnuje také volbu rozmístění uvedených systémů v rámci silniční sítě v ČR. V této souvislosti by bylo možné využívat data (hmotnosti vozidel a jejich náprav spolu s RZ vozidel) ze stávajících systémů WIM, které již byly na silniční síti instalovány. Uvedená data pak lze přiřadit k jednotlivým mostním konstrukcím, na nichž budou příslušná vozidla detekována prostřednictvím videosystému se záznamem registračních značek). Využitím těchto dat by bylo možné výrazně snížit náklady na pořízení systémů pro dlouhodobé sledování mostů.

### Hodnocení životnosti senzorů

U WIM senzorů osazených ve vozovce silniční komunikace se životnost odvíjí od kvality konstrukce silniční komunikace s přihlédnutím k jejímu zatížení těžkými vozidly v čase. Na základě zkušeností se interval výměny senzorů standardně pohybuje mezi osmi až deseti lety.

Optické senzory jsou instalovány jednak přímo u výztuže při výstavbě mostu a jednak mohou být instalovány dodatečně na spodní straně mostní konstrukce. Pro optické senzory zalité v mostní konstrukci a stejně tak i pro optické senzory nalepené na spodní straně mostovky platí, že pokud nejsou mechanicky porušeny (extrémní protažení mostu), nebo zničeny vandalismem či omylem v průběhu údržby mostu, fungují bezproblémově. Nejdelší zkušenost v ČR s jejich aplikací v mostní konstrukci je zatím 6 let.

Akcelerometry – pro potřeby měření byly použity akcelerometry americké firmy STEVAL se zárukou od výrobce 2 roky. Obecně platí zkušenost, že pokud jsou akcelerometry osazené ve vodotěsném pouzdře, fungují běžně min. 10 let (prozatím není k dispozici delší časový vzorek).

U tenzometrů při použití na mostních konstrukcích počítáme se životností min. 10 let. Riziko přetížení je omezeno mechanickou zarážkou a teplotní rozsah je kompenzován teplotní křivkou senzoru. Podmínkou je provedení kvalitní instalace (použití speciálních lepidel) a ochrana tenzometrů před vnějšími vlivy.

## 9. Uplatnění metodiky

Uplatnění této metodiky předpokládáme v situacích, jako jsou:

- Projektování a výstavba nových mostů
- Údržba a opravy mostů s možností instalací senzorů
- Projektování a instalace nových WIM stanic a využití dat ze stávajících WIM systémů
- Projektování a instalace kamerových systémů na mostních konstrukcích
- Opravy a re-instalace kamerových, WIM a dalších telematických systémů

Nedílnou součástí praktické aplikace této metodiky musí být i statická analýza sledovaného mostu. Tato analýza stanoví odezvu mostní konstrukce na předpokládaná zatížení, a to zejména její absolutní hodnotu pro určení rozsahu snímačů. U konstrukcí „lehkých“, které jsou náchylné na dynamické zatížení, by musel být součástí i dynamický výpočet, který by stanovil ovlivnění výsledků např. rozkmitáním konstrukce.

Obecně se dá konstatovat, že pro uplatnění této metodiky jsou vhodné veškeré běžné konstrukce, kde je základním konstrukčním materiálem beton, resp. spřažené konstrukce beton/ocel. Tuto metodiku nemá smysl uplatňovat u mostů malého rozpětí a dále u všech přespaných mostů. Z hlediska uložení mostů nejsou vhodné velmi šikmé konstrukce.

U mostů integrovaných je nutno ověřit, zda interakce s podložím a násypem odpovídá předpokladům ze statického výpočtu. U mostů velkého rozpětí pouze na základě dynamické analýzy.

Jako vhodné typy statického schématu mostů je možno uvažovat:

- Konstrukce o jednom poli prostě uložené
- Spojité konstrukce o dvou a více polích
- Rámové konstrukce středního rozpětí
- Obloukové konstrukce s dolní mostovkou
- Příhradové konstrukce s dolní mostovkou

U ostatních typů konstrukcí je metodika podmíněně použitelná, a to pouze na základě statické nebo dynamické analýzy.

Pro kontrolu skutečné odezvy mostu na zatížení dopravou je vhodné vyhodnocení skutečné odezvy mostu dle zatěžovací zkoušky. Na základě této zkoušky je možné použití této metodiky i u konstrukcí historických.

Do výpočtu je nutno uvažovat skutečné materiálové charakteristiky, a to zejména moduly pružnosti betonu a také jejich vývoj v čase (reologie). U konstrukcí silně zatížených dopravou je možno stanovit i nepřímý vliv tohoto zatížení na zvětšování trvalých průhybů.

Ve výše uvedených situacích předpokládáme nastavení postupů tak, aby nově postavené a/nebo opravené systémy mohly být využity pro sběr údajů o zatížení mostů, a tak přispívaly k jejich bezpečnosti a lepší ekonomice jejich provozu. Informace získané prostřednictvím dlouhodobého sledování chování mostních konstrukcí pod zatížením mohou přispět jako jeden z podkladů pro rozhodování o plánování údržby a oprav mostů.

## 10. Analýza rizik

Cílem je v závislosti na parametrech, senzorech, vzdálenosti vážních stanic, provozu a dalších parametrech odhadnout pravděpodobnost správného výsledku analýz a také zjistit možná rizika (citlivost řešení na zadané parametry).

Při využití senzorů ke sběru dat se mohou vyskytovat a realizovat zejména následující rizika:

- Riziko úplného selhání senzoru – projev tohoto rizika vede k trvalé ztrátě informací (do opravy) z daného měřicího bodu. Obecně se dá předpokládat, že ztráta dat z jednoho senzoru nemusí sama o sobě vést k nefunkčnosti celého systému, ale při návrhu konkrétního systému je třeba vyhodnotit rizika selhání konkrétního senzoru ve vztahu například k MTBF a případně klíčové senzory zdvojit (znásobit).
- Riziko částečného selhání senzoru – charakter tohoto rizika je podobný jako u výše uvedeného. Částečné selhání senzoru, například dodávajícího data, ale chybná, může být z pohledu na provoz systému horší než úplné selhání. Kromě výše uvedených postupů je pro takovéto případy třeba věnovat pozornost verifikaci dat ze senzorů jinými senzory, výpočetními postupy, případně zálohováním.
- Selhání komunikačního subsystému - projev tohoto rizika má podobné následky jako riziko úplného selhání senzoru, ale s tím, že kvůli selhání komunikační sítě může dojít ke ztrátě dat z několika (mnoha) senzorů současně, a tedy pravděpodobně tento typ selhání bude vyžadovat opravu. Důležité je komunikační subsystém konstruovat tak, aby opravy umožňoval přinejmenším v částech společných pro více senzorů.
- Selhání datového úložného subsystému – dopad tohoto rizika by znamenal úplnou ztrátu uložených dat na konkrétním úložném subsystému. Je tedy třeba využívat dlouhodobě spolehlivých systémů, případně systémy pravidelně obnovovat (například v případě SSD disků, které jsou sice velmi spolehlivé, ale mají omezenou životnost). Eliminací tohoto rizika je zálohování dat například jejich komunikací na server a uplatnění standardních zálohovacích postupů.
- Selhání časové synchronizace – projev tohoto rizika je podobný jako u částečného selhání senzorů. Je nebezpečné zejména tím, že nemusí dojít k jeho odhalení a tím mohou vznikat chybné údaje o stavu mostu. Riziko lze eliminovat například verifikačními postupy specifickými pro čas (například kontrola časové souslednosti jevů na mostě a indikace nelogičností), alternativně zálohováním systémů a kontrolou.

Rizika spojená s chováním konstrukce při zatěžování (identifikace senzory)

- Degradací mechanismy (beton, výztuž, předpínací výztuž a její napětí) v čase
- Dynamické efekty působení zatížení na konstrukci
- Interference účinků od více vozidel (nelineární úloha)
- Vliv změny rychlosti při pojezdu zatížení na konstrukci

---

Lze eliminovat matematickou analýzu výsledků na matematických modelech, zvýšením (zpřesněním) informací o zatížení a chování konstrukce.



## 11. Použitá literatura

1. METODIKA pro návržení a provoz systémů kontrolního vážení vozidel za pohybu (WIM), Centrum dopravního výzkumu v. v. i., 2014
2. Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2022, Příloha k průběžné zprávě za rok 2022, Kód projektu: CK02000126, Název projektu: Systém diagnostiky stavu a ochrany mostních konstrukcí s využitím WIM
3. NAJMAN Pavel a ZEMČÍK Pavel. Vehicle Speed Measurement Using Stereo Camera Pair. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, roč. 23, č. 3, 2020, s. 2202-2210. ISSN 1524-9050.

## 12. Seznam publikací, které předcházely metodice

1. J. Včelák, J. Vaněk, E. Doupal, M. Juhas, Bragg Grating sensor for Bridge load measurement and traffic load estimation, CETRA 2022, 11-13 May 2022, Pula, Croatia, 7th International Conference on Road and Rail Infrastructure
2. E. Doupal, O. Koutník ISWIM Newsletter 2022
3. E. Doupal, O. Koutník, L. Krejčí, J. Včelák, Systém diagnostiky stavu a ochrany mostních konstrukcí s využitím WIM, Silniční Obzor ročník 83, březen 2022
4. E. Doupal, J. Včelák, O. Fučík, M. Juhas, J. Fučík, Systém diagnostiky stavu a ochrany mostních konstrukcí s využitím WIM II, Silniční Obzor ročník 84, květen 2023
5. „Mezinárodní seminář na téma ochrana mostů a vysokorychlostní vážení“ 24. a 25. března 2022, Praha, CDV & all.
6. Workshop Weight-in-MotionExperience: Direct Enforcement, Road and Bridge Protection, v průběhu Světového silničního kongresu, 4.-5. říjen 2023, Praha, CDV & all.

## 13. Přílohy

Příloha 1 – Technická zpráva

Příloha 2 – Zpráva o přepočtu mostní konstrukce

Příloha 3 – Vyhodnocení měření

Příloha 4 – Některé výsledky měření

Příloha 5 – Vyhodnocení měření pružných deformací mostu

**Název: Metodika pro postupy monitorování a vyhodnocení chování mostu s využitím systému WIM**

Autoři: doc. Ing. Emil Doupal CSc., Ing. Ondřej Koutník, Ing. Miroslav Juhas, Ing. Jan Včelák Ph.D., prof. Dr. Ing. Pavel Zemčík

Recenzenti/Oponenti: doc. Ing. Jiří Votava, Ph.D., Ing. Petr Damek

Fotografie: kolektiv autorů

Ilustrace: kolektiv autorů

Odborná korektura: doc. Ing. Emil Doupal, CSc.

Jazyková korektura: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Grafická úprava a příprava tiskových podkladů: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Vydalo: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., Líšeňská 33a Brno, Česká republika

Rok, místo a číslo vydání: 2024, Brno, 1. vydání

ISBN XXX-XX-XXXXX-XX-X