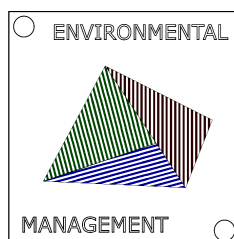


PŘÍČINY SELHÁNÍ MOSTU V JANOVĚ

Jan Procházka ¹ – Dana Procházková ²

CAUSES OF COLLAPSE OF BRIDGE IN JANOV



¹ ČVUT v Praze, Fakulta strojní Technická 4, 166 00 Praha 6, Česká republika ✉ Email: japro2am@seznam.cz  ORCID iD: 0000-0002-2760-8804

² ČVUT v Praze, Fakulta strojní Technická 4, 166 00 Praha 6, Česká republika ✉ Email: prochdana7@seznam.cz  ORCID iD: 0000-0002-4424-3974

 Competing interests : The author declare no competing interests.

 Publisher's Note: Slovak Society for Environment stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations. Copyright: © 2021 by the authors.



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

This license allows reusers to distribute, remix, adapt, and build upon the material in any medium or format, so long as attribution is given to the creator. The license allows for commercial use.

 Review text in the conference proceeding: Contributions published in proceedings were reviewed by members of scientific committee of the conference. For text editing and linguistic contribution corresponding authors.

ABSTRAKT

ČLÁNEK ANALYZUJE DÁLNIČNÍHO SELHÁNÍ MOSTU V JANOVĚ DNE 14. SRPNA 2018. SLEDUJE MOSTU OD JEHO NÁVRHU AŽ PO ZŘÍCENÍ. UVÁDÍ MOŽNÉ PŘÍČINY ZŘÍCENÍ MOSTU A DOPADY ZŘÍCENÍ MOSTU NA VEŘEJNÁ AKTIVA. KOLAPS MOSTU ZPŮSOBILA KOMBINACE PŘÍČIN; HLAVNĚ SE PROJEVILA PŘETÍŽENÍ MOSTU ZPŮSOBENÉ PROVOZEM, KOROZE ZÁVĚSNÝCH LAN A SKUTEČNOST, ŽE BYLA PŘEKROČENA ŽIVOTNOST MOSTU.

KLÍČOVÁ SLOVA: Most; selhání; příčiny; dopady; bezpečí; bezpečnost.

ABSTRACT

THE ARTICLE ANALYSES THE HIGHWAY COLLAPSE OF THE BRIDGE IN GENOA ON 14 AUGUST 2018. IT MONITORS THE BRIDGE FROM ITS DESIGN TO ITS COLLAPSE. IT LISTS THE POSSIBLE CAUSES OF THE BRIDGE COLLAPSE AND THE IMPACT OF THE BRIDGE COLLAPSE ON PUBLIC ASSETS. THE COLLAPSE OF THE BRIDGE WAS CAUSED BY A COMBINATION OF CAUSES; IN PARTICULAR, THE CONGESTION OF THE BRIDGE CAUSED BY TRAFFIC, THE CORROSION OF THE SUSPENSION ROPES AND THE FACT THAT THE LIFE OF THE BRIDGE WAS EXCEEDED.

KEYWORDS: Bridge; collapse; causes; impacts; security; safety.

1. ÚVOD

Most Vadotto Polcevera nazývaný taktéž „Ponte Morandi“ (Morandiho most) byl dálniční zavěšený most v Janově obrázek 1. Byl postavený v letech 1963 až 1967 a od roku 1967 sloužil jako součást dálnice A10 pro překonání řeky, která spojovala dvě části města Janov. Navržen byl architektem „Riccardo Morandi“ a dne 14 srpna 2018 došlo ke zřícení části mostu s tragickými následky [1]. Článek se zabývá příčinami a dopady zřícení mostu.



Obr. 1 - Viadotto Polcevera (Morandiho most) v roce 2010 při pohledu ze západu [1]

2. CHARAKTERISTIKA A HISTORIE MOSTU

Most byl součástí dálnice A10, která spojovala východní břeh řeky Polcevera a stranu města Janov se západním břehem a stranou města obrázek 2. Dálnice dále spojovala sever Itálie (Milano, Parma, Benátky, Janov) s jihem Francie (Nice, Marseille, Toulouse). Dálnice A10 byla součástí evropské silnice E80, obrázek 3. Geologické podloží, do kterého je most zasazen, je ovlivněno řekou Polcevera, obrázek 4. Jde především o naplavené usazeniny (písky a slepence) a prachovec (podobné jílovcí) [3].



Obr. 2 - Situační mapa v Janově, s vyznačením místem zřícení mostu [2]



Obr. 3 - Západní část Evropské silnice E80 [1]

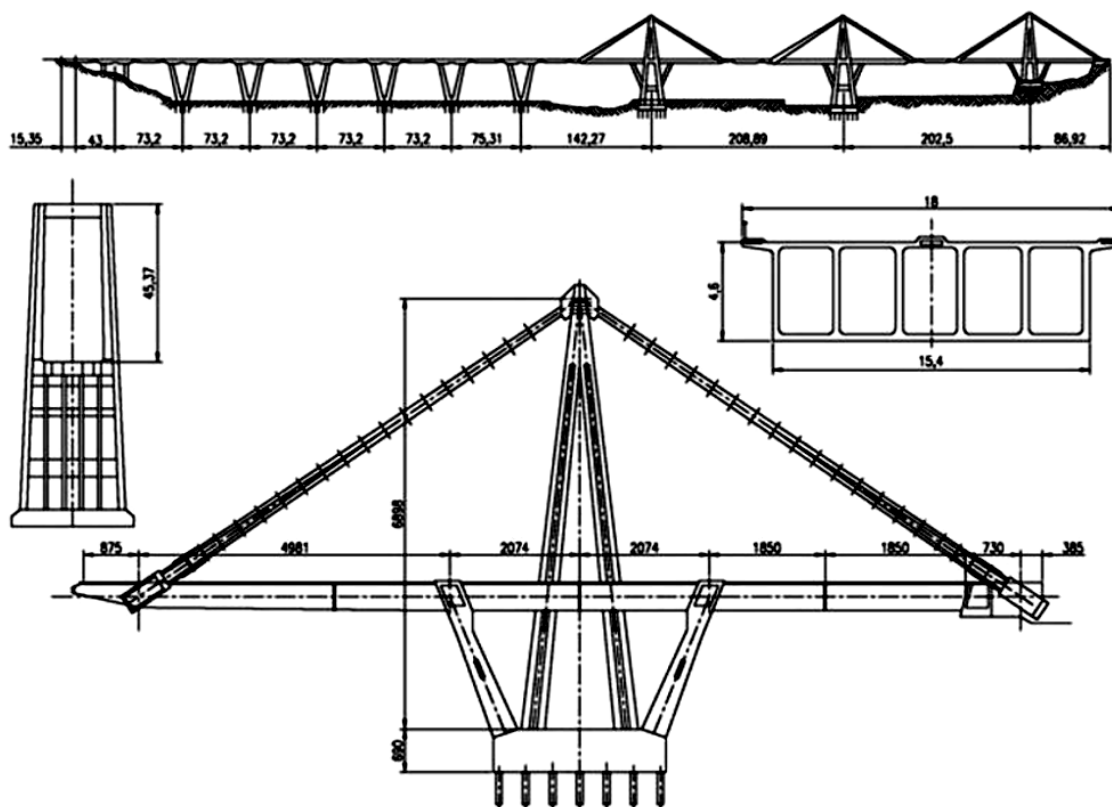


Obr. 4 - Geologické podloží, šedomodrá – naplavené usazeniny, zelena – prachovec [3]

Sledovaný most byl navržen Riccardem Morandim jako závěsný most za využití předpjatého betonu pro mostní pilíře a mostovku.

Délka mostu byla 1 102 metrů a výška mostu (úroveň vozovky) byla 45 metrů. Závěsná část mostu byla ukotvena na třech pilířích vysokých 90 metrů [4].

Pro stavbu mostu byl použit předpjatý beton na 10 MPa. Vyznačoval se diagonálními kabelovými opěrami, s vertikálními podpěrami podobnými stojanům sestávajícími ze sad V: jedna sada nesoucí vozovku na silnici, zatímco druhá dvojice obrácených V podporovala horní konce dvou párů diagonálních kabelových lan, obrázek 5.



Obr. 5 - Zobrazení konstrukce mostu „Viadotto Polcevera“ [4].

Kvůli chybám při konstrukci mostu, nebyla vozovka vodorovná a kroutila se. To si vyžádalo řadu stavebních zásahů během dvou desítek let po uvedení do provozu, které nakonec vedly k narovnání vozovky [5]. Dalším problémem, který vznikl v důsledku špatných stavebních postupů byla nízká „předjatost betonu“ (použití nízkého tlaku – 10 MPa). To vedlo k vzniku prasklin v betonu, do kterých zatékalo. Výsledkem byla koroze vnitřní oceli v betonu. Morandi proto navrhl oškrabání rzi a zalití prasklin epoxidovou pryskyřicí a zakrytí elastomerem [6].

Už počátkem devadesátých let byly odhady, že poklesla nosnost ocelových lan o 30 % právě vlivem jejich koroze. Proto došlo k průzkumu pilíře 11, obrázek 5 nahoře, první zprava. Při průzkumu bylo odhaleno velké oslabení ocelových lan, vlivem oxidace. Pilíř 11 pak byl posílen instalací vnějších lan na posílení jeho nosnosti. Vrchol pilíře 10 byl pak opláštěn ocelí pro jeho posílení.

O špatném stavu pilíře 9 (právě pilíře, který se 14. 8. 2018 zřítil) informovala zpráva inženýrů z Polytechnické univerzity v Miláně [7]. Zpráva se opírala o modální analýzu mostu [8]. Na jejím základě informace o potřebě opravy a údržby mostu zazněly opakovaně v Parlamentu, ale nebyla provedena žádná opatření.

Most byl projektován na 50 let provozu. Mezi uvedením do provozu a zřícením uběhlo 51 let, aniž by došlo k novému posouzení bezpečnosti projektu. V roce 2009 byla zaznamenána intenzita dopravy na mostě přibližně 25,5 milionů vozidel za rok [1]. To byl nárůst na čtyřnásobek za 30 let. Prognózy provedené v tomto roce navíc předpokládaly další zvyšování intenzity dopravy. Objevily se proto návrhy na přesunutí dopravy jinam. Například byla navrhována výstavba dalšího mostu na sever od města.

Přes všechna fakta nebyla provedena žádná opatření a ani doprava na mostě nebyla nijak regulována. Ba navíc byly na most umístěny nové těžké betonové zábrany, které ještě navýšily zatížení mostu. V květnu roku 2018 pak bylo vyhlášené výběrové řízení na opravu pilířů 10 a 9 [1]. Na mostě pak začátkem srpna 2018 byly pozorovány objevující se trhliny.

3. KOLAPS MOSTU A JEHO PŘÍČINY

Ke zřícení mostu došlo 14. srpna roku 2018 v 11:36 středoevropského letního času. Zřítla se asi 210 metrů dlouhá část mostu s pilířem 9, obrázek 5 nahoře, třetí zprava. Společně s mostem spadly asi tři desítky vozu, které se v tu dobu pohybovaly po vozovce. Zřícená část mostu dopadla do řeky Polcevera, na železniční trať a na skladiště, nacházející se pod mostem [9].

Příčiny zřícení odborníci hledali nejprve v oblasti živelních pohrom, jako je sesuv půdy a povodeň. Ve sledované době v oblasti vydatně pršelo a řeka Polcevera byla naplněná vodou z deště. Mluvílo se i o zasažení bleskem. Proti teorii se sesuvem půdy ale vypovídá zaznamenané video [9]. Video ukazuje, že se nejprve zřítily mostní části kolem pilíře a až po nich pilíř samotný.

Podle záznamů z údržby, zmíněných výše, ztrácela lana svoji nosnost vlivem koroze. Zátěž mostu vlivem dopravy se zvyšovala, stejně jako přidání betonových zábran. Pilíř 9 pak neprošel žádným zesílením. Vlivem opakovaného zatížení mostní konstrukce pak při přetrvávajícím provozu pravděpodobně došlo k oslabení a únavě lan [10]. Ve chvíli, kdy únava lan překročila mezní hodnotu, došlo k selhání jednoho ze 3 nosných systémů a k následnému zřícení mostu [11].

Příčina selhání spočívá ve vysokém zatížení konstrukce a zároveň ve snížené nosnosti konstrukce. Na základě podrobných studií, provedených v rámci projektu RIRIZIBE [12] vliv mohly mít i aktuální meteorologické podmínky, které ovlivnily zátěž i nosnost konstrukce. Dle citované práce šlo o složitou konstrukci, u které při kombinaci zatížení (přetížení, povodeň, špatný technický stav, podmáčené podloží a možná i blesk) došlo k nadprojektovým podmínkám, které vedly k překročení bezpečnostních limitů. Překročení bezpečnostních limitů způsobilo, že ocelová lana neudržela zatížení a došlo k jejich narušení a k následnému zřícení mostu.

V souvislosti s pádem Morandiho mostu přes Polceveru také proběhla analýza satelitních snímků mostu z období před pádem mostu [13]. Ta odhalila skutečnost, že k deformaci mostu docházelo dlouhodobě a dohromady se zprávou [7] potvrzovala skutečnost, že pád mohl být předvídan. Tento závěr je vysoce pravděpodobný, když vezmeme v úvahu fakt, že most přesluhoval dobu, na kterou byl projektován (50 let).

4. DOPADY ZŘÍČENÍ MOSTU

Dopady způsobené pádem Viadotto Polcevera jsou uvedeny v tabulce 1. Dopady jsou identifikovány na základě zveřejněných zpráv [14-20].

Tab. 1 - Dopady pádu Viadotto Polcevera roku 2018

Aktivum		Dopady
OKOLÍ A ŠIRŠÍ REGION		
Životy a zdraví lidí		Ztráty na lidských životech u 43 posádek vozidel, která spadla z mostu (29 Italů, 4 Francouzi, 3 Chile, 2 Albánie, a po jednom z Kolumbie, Jamajky, Moldavska, Peru a Rumunska). 16 zraněných Strach, narušení osobní pohody. Cca 600 lidí bez přístřeší
Bezpečí lidí		Evakuace a ztráta obydlí pro obyvatele v domech pod mostem.
Majetek		Zničeno 35 automobilů Zničeny 3 kamiony Poškození dopravních komunikací a objektů pod mostem.
Veřejné blaho		Přerušení dopravní obslužnosti. Ztráta spojení mezi 2 částmi města. Poškození železniční dopravy pod mostem. Degradace veřejných prostranství pod mostem. Narušena doprava v Evropě.
Životní prostředí		Vysoká hluková zátěž a vysoké emise. Poškození ovzduší, vody, půdy, flóry a fauny v okolí pod mostem. Zvýšené množství komunálních odpadů.
Infrastruktury a technologie		
	Dodávky energií	Přerušení dodávek energie v obytné zóně pod mostem.
	Dodávky vody	Přerušení dodávek vody v obytné zóně pod mostem.
	Kanalizace	Přerušení kanalizace v obytné zóně pod mostem.
	Přepravní síť	Škody způsobené pádem mostu dosáhly desítky miliónů EUR Přetížení a zvýšené opotřebení objízdných komunikací.
	Komunikační a informační sítě	Přerušení informačních kanálů v obytné zóně pod mostem.
	Bankovní a finanční sektor	Finanční ztráty vlastníka mostu Autostrade per l'Italia (v oblasti odpovědnosti za ztrátu a veřejné ohrožení bylo vyšetřováno cca 20 lidí a několika zástupců technické zprávy byly uloženy vysoké peněžité tresty a tři skončili ve vězení)
	Nouzové služby	Zvýšené požadavky na činnost. Zvýšené nároky na policii v důsledku vysoké kriminality a přestupků vůči občanskému soužití. Zvýšené nároky na zdravotnická zařízení v důsledku velkého množství zraněných.
	Základní služby v území (průmysl, zemědělství, zásobování, zdravotnictví, likvidace odpadů, sociální služby, pohřební služby)	Vyvolané investice do rozvoje veřejného občanského vybavení: - 19 miliónů EUR demolice, - 202 miliónů EUR výstavba nového mostu. Zvýšené nároky na likvidaci odpadů. Zvýšené nároky na obnovu a úpravu životního prostředí Zvýšené nároky na sociální služby. Zvýšené nároky na pohřební služby.
	Státní správa a samospráva	Růst administrativní zátěže úřadů. Vyšší náklady na svoz a likvidaci komunálního odpadu. Vyvolané investice do obnovení železniční stanice. Vyvolané investice do výstavby bytů pro evakuované občany. Vyvolané investice do odstranění škod na životním prostředí. plánuje se i vznik nové čtvrti. Srpnový pád konstrukce poničil i některé stávající budovy

5. DISKUSE A ZÁVĚR

Katastrofa způsobila zásadní politický spor o špatném stavu infrastruktury v Itálii a vyvolala širší otázky týkající se stavu mostů v celé Evropě. Potřeba přehodnocení přístupu k provozu a údržbě mostu vedla k výzkumu možností použití nových technologií pro monitoring, ale i přehodnocení základních přístupů řízení.

Přehodnocení používaných zásad pro řízení bezpečnosti při projektování, výstavbě i provozu jsme publikovali například v článku [21]. Jde hlavně o údržbu orientovanou na rizika a o včasnou modernizaci, jestliže podmínky jsou výrazně jiné než projektové, protože žádný materiál a žádná

konstrukce není absolutně robustní. V dané souvislosti jde o zavedení kultury bezpečnosti do projektování, výstavby a provozu mostů.

V oblasti monitoringu pak jsou možnosti monitoringu mostu, které by měly včas určit potřebu údržby mostu, než dosáhne kritických podmínek. V souvislosti s pádem mostu v Janově se například zmiňuje možnost satelitního snímání mostu [13], kde na satelitních snímcích byla pozorována deformace v čase zpět. Základním monitoringem je vizuální posouzení stavu mostu. To může být složité, zvláště pro hůře dostupná místa. Zde je v současné době možnost použití vizuálního monitoringu dronem [22]. Důležité je pak vytvořit algoritmus, který obrazové materiály posoudí, porovná s předchozími snímkováním a vytvoří podklady pro vyhodnocení.

V případech pádů vysutých mostů různých velikostí, od pěší lávky v Troji po dálniční most v Janově bývá častou příčinou pádů únava ocelových lan a ztráta jejich nosnosti. Další možnost monitoringu z důvodu bezpečnosti kritických mostů je měření stavu ocelových lan, jako je míra narušení koroze [23], nebo další deformace a vnitřní trhliny [24].

Další opatření je třeba implementovat v oblasti řízení. V případě projektu mostů je potřeba plánovat přehodnocení projektu v závislosti na změnách a stáří v provozu mostu. Most může být používán i po překonání projektované doby, či překročení očekávaného provozu. Je třeba ale kriticky posoudit za jakých podmínek je to možné.

V případě, že je odhaleno zvýšené riziko pádu mostu vlivem únavy konstrukce, nebo posouzení určí, že překročení projektovaného provozu či stáří nejsou bezpečné, je třeba aplikovat vhodná opatření. Například najít principy pro omezování provozu v závislosti na velikosti deformace.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- [1] WIKIPEDIA. *Ponte Morandi*. https://en.wikipedia.org/wiki/Ponte_Morandi.
- [2] GOOGLE MAPS. *Genova*. <https://www.google.cz/maps/>.
- [3] HISTORY OF GEOLOGY. *Geology and the Genoa bridge collapse*. <http://historyofgeology.fieldofscience.com/2018/08/geology-and-genoa-bridge-collapse.html>
- [4] MONODAQ. *Polcevera viaduct: a premature end of a milestone of the Italian engineering heritage*. <https://www.monodaq.com/applications/polcevera-viaduct/>
- [5] FRANGOPOL D., SAUSE R., KUSKO CH. *Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization*. Proceedings of the Fifth International IABMAS Conference, Philadelphia. CRC Press. 2010. ISBN 9780415891370.
- [6] MORANDI R. *The long-term behaviour of viaducts subjected to heavy traffic and situated in an aggressive environment: the viaduct on the Polcevera in Genoa*. IABSE reports of the working commissions 1979.
- [7] LA STAMPA. *Ignored university reports about Morandi bridge 2018: "Deformed pylons and oxidized cables"*. <https://www.lastampa.it/esteri/la-stampa-in-english/2018/08/17/news/ignored-university-reports-about-morandi-bridge-deformed-pylons-and-oxidized-cables-1.34039115>
- [8] SALAWU, O. S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Engineering Structures*. ISSN 0141-0296. 19 (1997) 9, pp. 718–723. doi:10.1016/s0141-0296(96)00149-6.
- [9] ON DEMAND NEWS. *Police release new footage of doomed Morandi Bridge collapse in Genoa*. <https://www.youtube.com/watch?v=V479srTBIAk>
- [10] INVERNIZZI S., MONTAGNOLIA M. AND CARPINTERI A. *Fatigue assessment of the collapsed XXth Century cable-stayed Polcevera Bridge in Genoa*, *Procedia Structural Integrity* 18 (2019), pp. 237–244.
- [11] KHALIL A. A., PELLECCIA C., DE IULIIS E., RICCIARDI E. M. *The Morandi Bridge in Genoa – Analysis with the Applied Element Method*. Applied Science International, LLC 2018.
- [12] PROCHÁZKOVÁ, D., PROCHÁZKA, J., LUKAVSKÝ, J., DOSTÁL, V., PROCHÁZKA, Z., OUHRABKA, L. *Řízení rizik procesů spojených s provozem technického díla během jeho životnosti*. Praha: ČVUT 2019, 465 p. <http://hdl.handle.net/10467/85867> doi:10.14311/BK.9788001066751. ISBN 978-80-01-06675-1.

- [13] MILILLO P., GIARDINA G., PERISSIN D., MILILLO G., COLETTA A. and C. TERRANOVA. Pre-Collapse Space Geodetic Observations of Critical Infrastructure: The Morandi Bridge, Genoa, Italy. *Remote Sens.* 11 (2019), 1403; doi:10.3390/rs11121403.
- [14] LA REPUBBLICA. *Genova, crollo ponte Morandi: le vittime.* http://www.Repubblica.it/cronaca/2018/08/15/foto/genova_crolla_il_ponte_morandi_le_vittime-204165340/1/ 2018
- [15] THE NEW YORK TIMES. *Genoa Bridge Collapse Throws Harsh Light on Benetton's Highway Billions.* <https://www.nytimes.com/2019/03/05/world/europe/genoa-bridge-italy-autostrade-benett-on.html> 2019
- [16] CORRIERE DELLA SERA. *Dieci i ponti crollati in 5 anni: in calo la manutenzione e gli investimenti.* https://www.corriere.it/cronache/18_agosto_14/dieci-ponti-crollati-5-anni-in-calo-investimenti-manutenzione-8bd5fb56-9fb8-11e8-9437-bcf7bbd7366b.sht ml?refresh_ce-cp 2018
- [17] DOMUSWEB. *Demolition of Genoa's Ponte Morandi is underway.* <https://www.domusweb.it/en/news/2018/12/17/demolition-of-morandi-bridge-begins-in-genoa.html> 2018
- [18] BBC NEWS. *Morandi bridge towers demolished in Genoa.* <https://www.bbc.co.uk/news/av/world-europe-48797883/morandi-bridge-towers-demolished-in-genoa> 2019
- [19] ADNKRONOS. *Genova, si aggrava bilancio: 43 morti.* http://www.adnkronos.com/fatti/cronaca/2018/08/18/autosotto-macerie-del-ponte-trovate-altre-vittime_knFsFaQjR1RH2JohWTHroJ.html 2018
- [20] IDNES. *14 sekund. Italská prokuratura zveřejnila zřícení janovského mostu.* https://www.idnes.cz/zpravy/zahranicni/most-zriceni-janov-italie-srpen-mrtvi-video-policie-statni-zastupitelstvi.A190701_214733_zahranicni_lesa 2019
- [21] PROCHAZKOVA, D., PROCHAZKA J. Measures for Improvement of Bridges Safety Management. In: *Critical Infrastructure Protection Proceedings*. Milan: IACIPP Association 2019, www.cip-association.org
- [22] FLAMMINI F., PRAGLIOLA C. AND G. SMARRA. *Railway infrastructure monitoring by drones*, 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Toulouse 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841398.
- [23] KREISLOVA K., GEIPLOVA H. A Z. BARTAK. Sensors for atmospheric corrosivity monitoring. In: *Řízení rizik procesů spojených s technickými díly 2018*. Praha: ČVUT 2018, pp. 171-184, ISBN: 978-80-01-06515-0.
- [24] PETRÁSEK P., ŽEMLIČKA F., SVOBODA V. a V. VAŘÁK. Diagnostika Mostních Konstrukcí Metodou Akustické Emise. In: *Defektoskopie 2009*. <https://www.ndt.net/article/defektoskopie2009/papers/Petrasek-Svoboda-8.pdf>