

Měření chování vozovek za provozu ve Francii

Sledování chování vozovek za provozu umožňuje ověřovat některé předpoklady používané při navrhování vozovek, pomáhá plánovat jejich údržbu a rekonstrukce. Diagnostické metody jako rázové zkoušky FWD je možné použít pro posouzení stavu vozovky v konkrétní situaci. Kontinuální sledování napětí a přetvoření ve vrstvách vozovky pomocí snímačů ale poskytne komplexnější představu.

Správci silniční sítě potřebují informace o skutečném stavu vozovek. K tomu se používají různé metody. V České republice se používá měření průhybů vozovek rázovými zkouškami FWD. V zahraničí se používají také různé vysokorychlostní deflektografy [1], popsané podrobněji například v literatuře [2]. Těmito přístroji se však měření během životnosti vozovky provádí obvykle s odstupem několika let. Při tom bývá snaha provádět měření ve stejném ročním období, aby výsledky byly snáze srovnatelné a nebyly ovlivňovány průběhem teplot během roku. Kontinuální sledování deformací vozovky po celý rok, nebo po několik let, může poskytnout další užitečné informace. Snímače pro taková měření jsou však drahé, složitě se zabudovávají do vozovky a dochází někdy k jejich poškození.

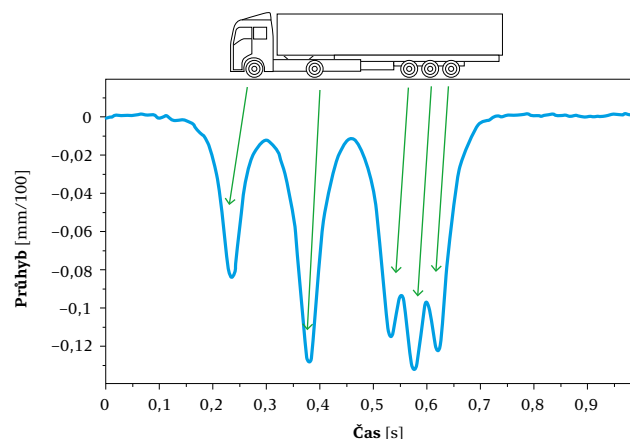
Proto bylo nedávno navrženo použít pro kontinuální měření chování vozovek za provozu geofony a akcelerometry (zařízení pro měření zrychlení sil), které lze snadno zabudovat do vozovky. Informace o těchto měřeních ve Francii jsou zmiňovány ve dvou článcích v časopise RGRA z května 2021 [3], [4]. Podrobněji je použité zařízení a zejména způsob vyhodnocení měření geofony a akcelerometry popsáno v literatuře [5]. Metoda vyhodnocení měření je poměrně složitá, takže jde o záležitost pro specialisty. Nicméně základní informace o této nové metodě může být užitečná pro širší okruh techniků, kteří se zabývají problematikou chování vozovek, a pro projektanty, kteří vozovky navrhují.

Protože použití geofonů a akcelerometrů zabudovaných trvale ve vozovce je novou metodou měření průhybů, bylo ve Francii nejprve provedeno v laboratoři srovnání s výsledky standardního měření průhybů laserovým přístrojem. V druhé fázi byla metoda ověřena při experimentech na únavové dráze v Nantes, kde byla porovnána se standardní metodou měření snímačem LVDT (Linear Variable Displacement Transducer, tj. lineární snímač polohy). Teprve po tomto ověření byly tyto přístroje instalovány ve vozovkách na dálnicích.

Porovnání měření geofony a akcelerometry s klasickými metodami

Při volbě přístrojů pro novou metodu se vycházelo z několika kritérií. Snímače měly být citlivé na průhyby v rozmezí 0,1 mm až 1 mm. Rezonanční frekvence snímačů měla být malá ve srovnání s frekvencí signálů průhybu (obvykle mezi 2 Hz a 20 Hz). Snímače měly mít malé rozměry, být snadno zabudovatelné, odolné a dostatečně trvanlivé, aby vydržely několikaleté sledování. Při výzkumu byly použity dva druhy geofonů a dva druhy akcelerometrů (obrázky a popis použitých snímačů jsou uvedeny v [5]). V laboratoři bylo třeba ověřit chování snímačů při očekávaných zatíženích a dále poměr signálu k rušení na pozadí. K tomu bylo třeba zjistit chování při různých frekvencích a amplitudách zatížení.

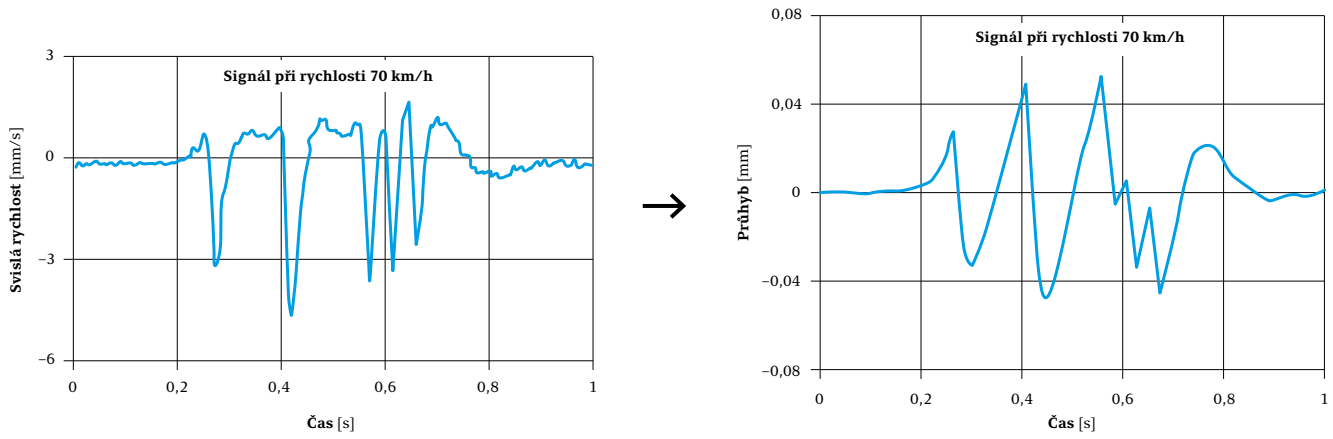
To bylo provedeno na vibračním stole ve výzkumném ústavu IFSTTAR. Na desce byly vyvolány průhyby odpovídající teoretickým průhybům od tahače s návěsem s celkovou hmotností 40 tun. Teoretické průhyby byly vypočteny francouzským programem pro navrhování vozovek Alize. Moduly vrstev vozovky a podloží pro výpočet teoretických průhybů byly uvažovány



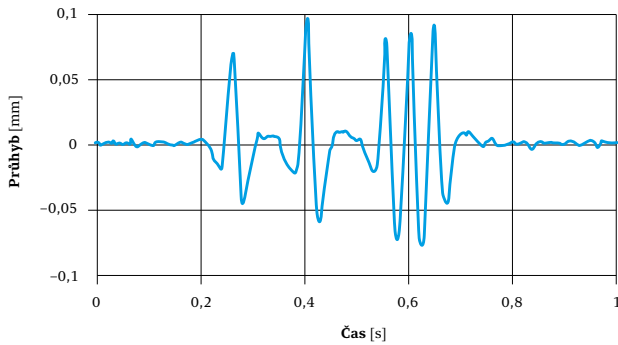
Obrázek 1: Teoretické průhyby od zatížení tahačem s návěsem vypočtené programem Alize podle (Podle 5)

Tabulka 1: Parametry pro stanovení teoretických průhybů vozovky od těžkého nákladního vozidla

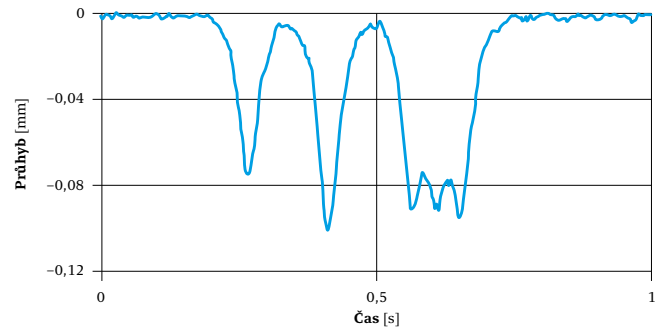
Vrstva	Modul pružnosti [MPa]	Tloušťka vrstvy [mm]
Asfaltová směs	7 000	110
Nestmelený materiál	200	300
Podloží	80	2 500



Obrázek 2: Naměřená svislá rychlost geofonem GS11D a integrací nesprávně stanovený průhyb (Podle 5)



Obrázek 3: Signál geofonu po odfiltrování, amplifikaci a integraci (Podle 5)



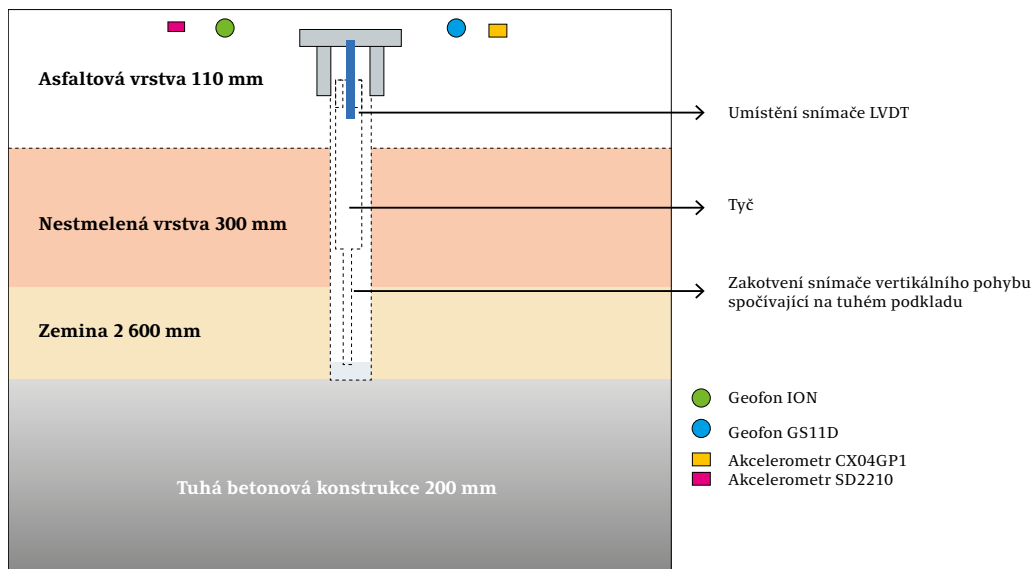
Obrázek 4: Signál geofonu po Hilbertově transformaci křivky na obrázku 3 (Podle 5)

podle francouzských předpisů. Pro všechny vrstvy vozovky byl uvažován stejný koeficient příčného roztážení 0,35. Skladba vozovky a uvažované moduly jsou uvedeny v tabulce 1. Nestlačitelné podloží bylo uvažováno v hloubce 2,91 m pod povrchem vozovky. Vypočtený průhyb vozovky je zobrazen na obrázku 1.

Měření na vibračním stole v ISTTR při zatížení simulujícího přejezd vozidla bylo provedeno pro amplitudy průhybu 0,1 mm, 0,3 mm a 1 mm pro rychlost pohybu vozidla 35 km/h a 70 km/h.

Geofon měřil rychlost vertikálního pohybu a akcelerometr zrychlení pohybu. Ovšem integrací naměřených hodnot geofonu se nezíská skutečný průhyb. Důvody jsou podrobně vysvětleny v [5]. Signál zaznamenaný geofonem je znázorněn v levé části obrázku 2. Tvar křivky průhybu, vypočtený integrací naměřených rychlostí pohybu, je v pravé části obrázku 2.

Při správném postupu vyhodnocení je třeba zaznamenaný signál nejprve odfiltrovat, zesílit a až poté integrovat. Místo



Obrázek 5: Schéma měření a skladba konstrukce při experimentech na dráze v Nantes (Podle 3)

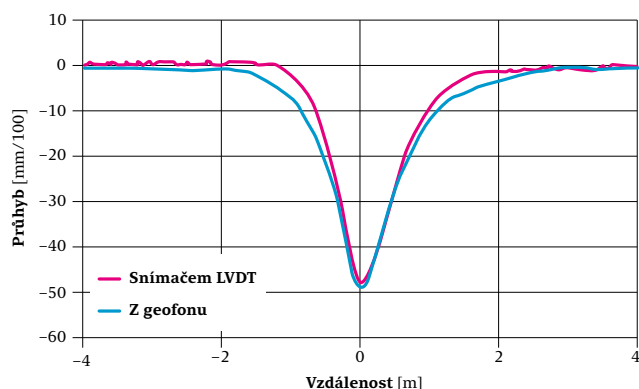
křivky na pravé části obrázku 2 se tím získá křivka uvedená na obrázku 3.

Další operací je tzv. Hilbertova transformace, která se používá při analýze měřených signálů v různých technických oborech. Po této transformaci se získá konečný tvar křivky průhybu (obrázek 4).

Tímto složitým postupem se podařilo získat tvar křivek průhybu (jak z měření geofony, tak z měření akcelerometry) odpovídající velmi dobře měření laserovým průhyboměrem.

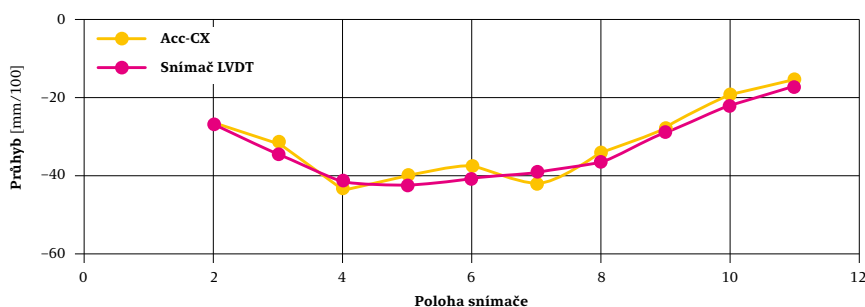
Na základě těchto pozitivních výsledků byly při experimentech na únavové dráze v Nantes zabudovány do vozovky do hloubky 20 mm pod povrchem dva druhy geofonů a dva druhy akcelerometrů. Při těchto experimentech byly průhyby, vypočtené výše popsanou metodou, porovnány s průhyby naměřenými snímačem LVDT. Posun snímače LVDT byl zjišťován vůči tyči opřené o betonovou desku v hloubce 3 metry pod povrchem vozovky. Schéma uspořádání měření a skladba vozovky jsou na obrázku 5.

Experimenty na únavové dráze v Nantes byly provedeny při zatížení samostatnou polonápravou s dvojmontáží pro 3 úrovně zatížení 45 kN, 55 kN a 65 kN pro rychlosti od 6 m/s do 20 m/s při teplotě povrchu vozovky cca 20 °C. Porovnání měření průhybu LVDT a z měření geofonem při teplotě 18,5 °C a rychlosti 20 m/s je na obrázku 6.



Obrázek 6: Porovnání průhybů LVDT a geofonem při experimentech na únavové dráze (Podle 3)

Při experimentech na únavové dráze byl zjišťován také vliv polohy snímače vůči ose zatížení dvojmontáže. Příčný posun polohy zatěžovacího zařízení mezi dvěma následujícími pojezdy byl 105 mm [5]. Průhyby na obrázku 6 jsou pro případ, kdy bylo zatěžovací zařízení v poloze, při které byly snímače v ose mezi



Obrázek 7: Vliv polohy snímače vůči zatěžovacímu zařízení na naměřený průhyb vozovky (Podle 5)

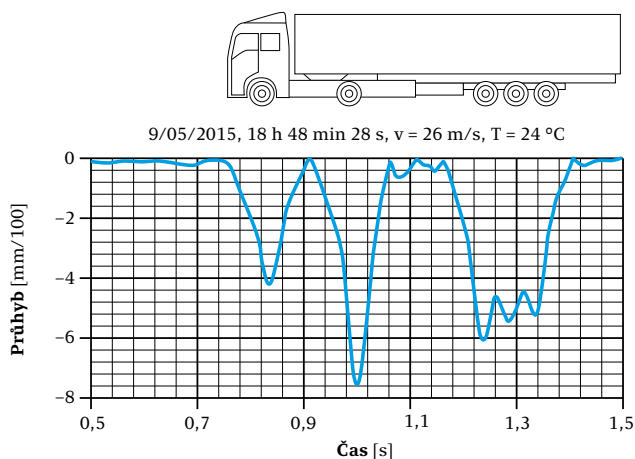
koly dvojmontáže. Byly zjišťovány i skutečné tvary zatěžovacích ploch. Otisk jednoho kola se blížil obdélníku s delší stranou 258 mm. Mezera mezi otisky obou kol byla 94 mm (tj. celková šířka zatěžovaného pruhu byla 610 mm). V tomto textu se vlivem polohy snímače vůči ose zatížení blíže nezabýváme. Pro ilustraci uvádíme jen příklad vyhodnocení z literatury [5] pro zatížení polonáprav s dvojmontáží silou 55 kN (obrázek 7). Polohy snímače 4 a 8 odpovídají případům, kdy je střed zatěžovací plochy od jednoho kola dvojmontáže přímo nad snímačem. Pro zjednodušení je na obrázku znázorněn jen průhyb od LDVT snímače a od akcelerometru označeného Acc-CX, které se nejvíce navzájem lišily. Průhyby od ostatních třech snímačů ležely mezi těmito dvěma křivkami.

Protože snímače byly umístěny v malé hloubce pod povrchem vozovky, neprojevoval se příliš vliv sousední zatěžované plochy. Na to, že poloha snímače vůči zatěžovacímu zařízení má velký vliv na měřené hodnoty, bylo již upozorněno v [6], kde byl popsán jiný experiment na únavové dráze v Nantes. Při něm byl ovšem zjišťován vliv polohy snímače vůči zatížení pro standardní snímače příčného přetvoření, umístěné 60 mm, 160 mm a 260 mm pod povrchem vozovky.

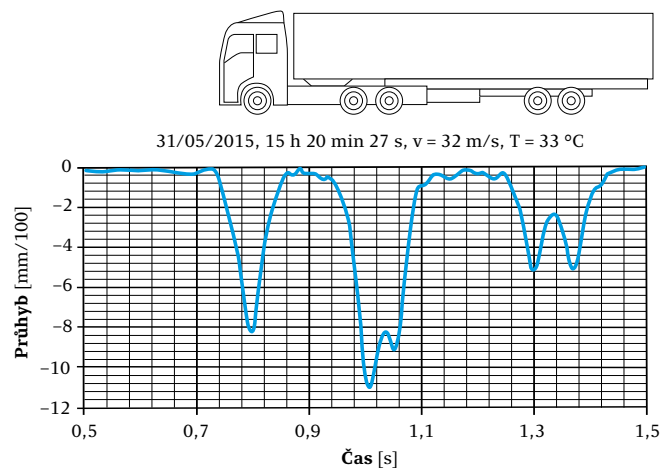
Velký vliv vzdálenosti od snímače na naměřené hodnoty přetvoření asfaltových vrstev byl též konstatován v [7]. Pro zjištění přesné polohy snímače vůči jízdě stopě byl před každým přejezdem zatěžovacího vozidla nasypán příčně přes vozovku pruh písku, ve kterém se stopy pneumatik ukázaly. Autoři bohužel uvedli v článku jen naměřená přetvoření po jednotlivých pojezdech, která se skutečně značně lišila, ale nikoliv příčnou vzdálenost od snímače. Pravděpodobně se počítá s tím, že kompletní výsledky tohoto výzkumu budou publikovány později.

V článku [3] jsou uvedeny také informace o výsledcích měření geofony na dálniční vozovce. Snímače byly umístěny na spodním líci vrstvy VMT. V podélném směru byly umístěny 2 geofony vzdálené 1 m. Z jejich signálů bylo možné vypočítat rychlost pohybu každého vozidla. Ze signálů 3 geofonů v příčném směru byly vypočteny průhyby. Příklad výsledků měření průhybů při průjezdu tahače s 2 samostatnými nápravami s návěsem s trojnápravou je na obrázku 8. Těžkých vozidel tohoto typu bylo cca 80 %. Podstatně menší byl výskyt tahače se třemi nápravami a návěsem s dvojnápravou. Příklad průhybů od tohoto vozidla je na obrázku 9.

Průhyby závisely pochopitelně na velikosti zatížení na jednotlivé nápravy. To kolísalo podle vytížení vozidel. Zatížení první nápravy pod kabinou řidiče však záviselo jen málo na celkové hmotnosti vozidla s nákladem. Proto byly průhyby pod první



Obrázek 8: Průhyby od tahače s 2 nápravami s návěsem s trojnápravou (Podle 3)



Obrázek 9: Průhyby od tahače se 3 nápravami s návěsem s dvojnápravou (Podle 3)

nápravou použity pro hodnocení chování vozovky během roku. Podle očekávání byly v létě průhyby ve vrstvě VMT cca o 50 % větší než v zimním období. Proto je v letním období poměrné porušení vozovky několikanásobně větší než v zimě.

Část měřidel byla poškozena již po zabudování, ale řada z nich přežila celé několikaleté sledování účinků provozu na vozovku. V tomto projektu se tedy prokázalo, že kontinuální sledování chování vozovek po několik let je možné.

Data ze snímačů byla ukládána na kartu v zařízení na lokalitě. Pro vyhodnocení byla poté dálkově předávána na Univerzitu Gustava Eiffela, kde byla naměřená data zpracována, vyhodnocena a předávána silniční správě. Za zmínku stojí, že Univerzita Gustava Eiffela vznikla 1. 1. 2020 sloučením několika vysokých škol a známé výzkumné instituce IFSTTAR, která měla několika pracovišť ve Francii včetně únavové dráhy v Nantes. Proto specialisté IFSTTAR již v současné době uvádějí ve svých odborných publikacích jako svého zaměstnavatele Univerzitu Gustava Eiffela. (Univerzita má v současné době 2 300 zaměstnanců, z toho je 550 výzkumníků a 400 učitelů výzkumníků.)

Autory dalšího příspěvku zabývajícího se monitorováním vozovek za provozu [4] jsou specialisté firmy Eiffage Route, vysoké školy ENTP v Lyonu a skupiny APRR (patřící firmě Eiffage), která je čtvrtým největším koncesionářem dálniční sítě v Evropě. Spravuje část francouzské dálniční sítě na základě koncese udělené francouzským státem. Jsou zde dílčí informace o několikaletém monitorování dvou úseků na dálnici A41N. Tyto úseky byly osazeny celem 50 různými snímači v roce 2012. Snímače byly na každém styku vrstev vozovky. Výsledky měření byly využity v doktorské práci na ENTP v roce 2015.

V roce 2020 bylo rozhodnuto překontrolovat stav snímačů. Řada z nich byla již nefunkční, ale většinou se jednalo o oxidaci spojů v modulech pro ukládání dat. Ty bylo možné opravit a poté prověřit, zda je možné pokračovat v měření. Protože přetvoření asfaltových směsí závisí na době zatížení, byly realizovány přejezdy vozidlem s nápravou zatíženou 130 kN rychlostí 10 km/h (odpovídající frekvenci $\approx 1,5$ Hz), 50 km/h ($f \approx 5,7$ Hz) a 85 km/h ($f \approx 10$ Hz). Vozidlo jelo ve 3 různých stopách, aby se ověřil vliv vzdálenosti od snímače na měřené hodnoty. Ukázalo se, že některé snímače jsou stále funkční. Například z 32 snímačů defor-

mací bylo již po instalaci ve vozovce funkčních jen 20, ale v roce 2020 bylo možné z nich ještě 9 dále provozovat.

Závěr

Kontinuální měření chování vozovek za provozu zabudovanými snímači nebo experimenty na únavových dráhách umožňují získat lepší představu o skutečném chování asfaltových vozovek. V České republice tato možnost zatím není. Proto je potřebné sledovat informace o zahraničních výzkumech zabývajících se touto problematikou.

Ing. Jiří Fiedler

Literatura:

- [1] Stryk J., Matula R., Březina I., et al. *Progresivní diagnostické metody pro monitorování vývoje stavu vozovek PK*. <http://www.cesti.cz/wc14/01-03.pdf>
- [2] Chai G., Manoharan S., Golding A., et al. *Evaluation of the Traffic Speed Deflectometer Data Using Simplified Deflection Model*. *Transportation Research Procedia* 2016, vol. 14, p. 3031-9. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.444.
- [3] Bahrani N., a kol. *Utilisation de géophones pour le suivi en continue de comportement des chaussées*. *RGRA 2021*, vol. 981, p. 34-43.
- [4] Dabert J. L., a kol. *Monitoring structurel des chaussées autoroutières sur le réseau AREA*. *RGRA 2021*, vol. 981, p. 29-33.
- [5] Bahrani N., Blanc J., Horny P. et al. *Alternate Method of Pavement Assessment Using Geophones and Accelerometers for Measuring the Pavement Response*. *Infrastructures* 2020, vol. 5, p. 25. DOI:10.3390/infrastructures5030025.
- [6] Fiedler J. *Napětí a přetvoření ve vozovce při přejezdech vozidel*. *Silnice Mosty* 2021, č. 2, s. 14-17.
- [7] Barriera M., Pouget S, Lebental B. *Towards road pavement response under moving loads*. *Article in Road Materials and Pavement Design* 2019, 20(sup1), p. 1-20. DOI: 10.1080/14680629.2019.1588780