

Hodnotenie väzko-pružného správania sa asfaltových vozoviek pomocou meraní FWD

Článok opisuje výsledky hodnotenia väzko-pružného správania sa vozoviek na základe časového oneskorenia priehybu za pôsobiacou silou, ktoré bolo stanovené z meraní deflektometrom FWD. Hodnoty časového oneskorenia sú prezentované pre rôzne teplotné podmienky a intenzitu zaťaženia. Z vyhodnotení meraní vykonaných počas výstavby vyplynulo, že po pridaní asfaltových vrstiev sa menia hodnoty časového oneskorenia dovedy zrealizovanej časti vozovky. Merania potvrdili, že hodnoty časového oneskorenia ovplyvňuje doba trvania zaťažovacieho impulzu. Vplyv teploty ani opakovaného zaťaženia sa neprejavil.

Úvod

Asfaltové vrstvy vozoviek pozemných komunikácií musia odolávať účinkom zaťaženia od vozidiel pri variabilných klimatických podmienkach. Preto je potrebné pri návrhu asfaltovej zmesi do príslušnej vrstvy vozovky brať do úvahy kombinovaný vplyv týchto faktorov a návrh asfaltovej zmesi urobiť tak, aby nevznikli nežiadúce poškodenia vrstvy a celej vozovky.

Vhodnosť zloženia asfaltovej zmesi pre danú lokalitu sa obvykle preukazuje jej vlastnosťami pri dvoch protichodných teplotných podmienkach (nízke zimné a vysoké letné teploty). Tieto vlastnosti sú dominantne ovplyvnené parametrami asfaltu, ako jednej zo zložiek asfaltovej zmesi. Výber vhodného asfaltového spojiva je veľmi dôležitý a je naň kladený dôraz v rôznych metódach návrhu asfaltovej zmesi [1, 2, 3]. Cieľom je predísť dvom hlavným typom poškodení asfaltových vozoviek, a to trhlinám pri nízkych teplotách [4] a trvalým deformáciám (koľajam) vznikajúcim pri vysokých teplotách asfaltových zmesí v letnom období. Vhodnosť asfaltu z hľadiska odolnosti asfaltovej zmesi proti vzniku trvalých deformácií sa v súčasnosti zvyčajne posudzuje na základe výsledkov skúšky asfaltu v šmykovom dynamickom reometri. Fázový uhol, stanovený z časového oneskorenia medzi pôsobiacou silou a vznikajúcou deformáciou skúšobnej vzorky, sa považuje za parameter reprezentujúci väzko-pružné správanie sa asfaltu. Spolu s komplexným modulom v šmyku umožňuje rozlišovať náchylnosť asfaltu na plastickú (trvalú) deformáciu.

Fázový uhol a komplexný modul sa používajú nielen pri hodnotení väzko-pružného správania sa asfaltu, ale aj asfaltových zmesí. Tieto parametre sa stanovujú pomocou rôznych skúšobných metód (jednoosové alebo trojosové skúšky na valcoch vzorkách alebo skúšky tuhosti a únavy na vzorkách rôznych tvarov). Hodnoty komplexného modulu a fázového uhla sa menia v závislosti od frekvencie zaťaženia a skúšobnej teploty. Výsledky výskumov poukazujú na skutočnosť, že hodnoty fázového uhla narastajú so zvyšujúcou sa teplotou alebo znižujú-

cou sa frekvenciou. Vo výskume [5] bolo ale preukázané, že pri teplote 40 °C a 54 °C hodnota fázového uhla so zvyšujúcou sa teplotou klesala.

Pri laboratórnych skúškach zameraných na stanovenie parametrov charakterizujúcich väzko-pružné správanie sa asfaltové zmesi pre vrstvy skúšajú samostatne, čo nezodpovedá reálnym podmienkam vo vozovke, kedy všetky asfaltové vrstvy spolupôsobia. Okrem toho, vo vozovke sú asfaltové vrstvy podporené podkladovými vrstvami a podložím. Taktiež zaťaženie generované kolesom (kolesami) prechádzajúcich vozidiel vytvára stav napätia, ktorý sa líši od stavu používaného pri laboratórnych skúškach. Vzhľadom na to je otázkou, aké je správanie celého asfaltového krytu a aký je vplyv väzko-pružného správania sa asfaltových vrstiev na správanie celej vozovky.

Na preskúmanie (overenie) tejto skutočnosti je potrebná zaťažovacia skúška vozovky v rámci ktorej je potrebné v rovnakej časovej osi zaznamenať priebeh pôsobiacej sily a odozvy vozovky. Takýto typ skúšky umožňujú deflektometre s padajúcim závažím (FWD). Dostupnosť týchto zariadení bola podnetom na výskum, ktorý mal za cieľ:

1. Analyzovať, či časový záznam z merania FWD poskytuje dostatočné údaje na získanie vstupov na určenie fázového uhla vozovky (t. j. časového oneskorenia priehybu za pôsobiacou silou), a ak áno, navrhnúť vhodnú metodiku na určenie potrebných vstupov.
2. Na základe meraní FWD vyhodnotiť:
 - a) časové oneskorenie priehybu za pôsobiacou silou a fázový uhol vozovky pred a po zhotovení asfaltových vrstiev a jeho zmenu;
 - b) vplyv doby trvania zaťažovacieho impulzu, teploty asfaltových vrstiev a opakovaného zaťaženia (únava).

Obsahom článku je prezentácia riešenia, zistení a z nich vyplývajúcich záverov vzťahujúcich sa na bod 2, pričom sa použili výstupy týkajúce sa bodu 1, publikované v [6].

Zmena po zhotovení asfaltových vrstiev

Charakteristiky väzko-pružného správania sa vozovky boli stanovené pre polotuhú vozovku zloženú z troch asfaltových vrstiev s celkovou hrúbkou 200 mm (40 mm SMA 11 PMB 45/80-75, 60 mm AC 16 PMB 25/55-65, 100 mm AC 22 CA 35/50), ležiacich na 200 mm cementom stmelenej vrstve (CBGM = SC). Pod ňou sa nachádzalo podložie, ktorého horná vrstva v hrúbke 400 mm bola upravená/zlepšená pridaním vápna.

Merania sa uskutočnili pomocou deflektometra FWD Kuab po dvoch etapách výstavby vozovky:

- na vrstve CBGM po 7 dňoch od jej polozenia (použitie zaťažovacie sily 25 kN a 50 kN);
- na obrusnej vrstve 3 mesiace po položení vrstvy CBGM (zaťažovacia sila 50 kN).

Na základe časových oneskorení priehybu za pôsobiacou silou pri meraniach v oboch etapách (obrázok 1) možno konštatovať rozdielnosť hodnôt po dĺžke úseku, medzi meraniami na vrstve CBGM pri silách 25 kN a 50 kN a tiež aj rozdiel medzi meraniami na vrstve CBGM a obrusnej asfaltovej vrstve.

Najväčšie časové oneskorenia pre merania na obrusnej vrstve možno považovať za prejav vplyvu väzko-pružného správania sa asfaltových vrstiev na celkové správanie sa asfaltovej vozovky. Rozdiely voči meraniam na vrstve CBGM (cca 1–1,5 ms) znamenajú rozdiel vo fázových uhloch cca 4–6 stupne (pri predpoklade priemernej zaťažovacej dobe FWD Kuab 45 ms), pričom fázový uhol celej asfaltovej vozovky pre priemernú hodnotu časového oneskorenia 5 ms je 20 stupňov (podľa vzťahu uvedeného v [7] pre zaťažovací impulz v tvare polovice sínusoidy – podobný tvaru zaťažovacieho impulzu deflektometra FWD). Táto hodnota

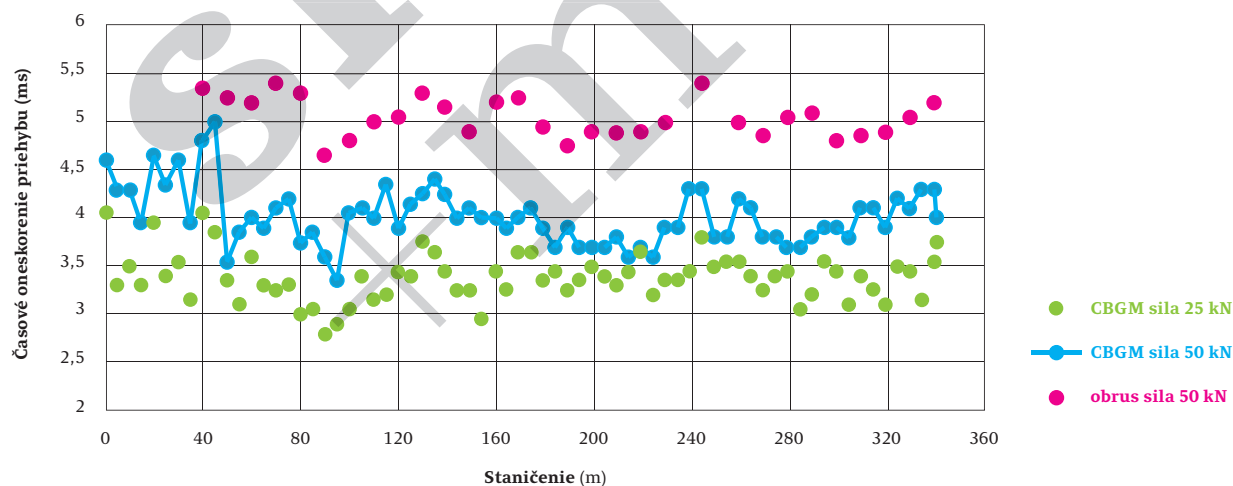
zodpovedá ekvivalentnej frekvencii zaťažovacieho impulzu FWD Kuab (podľa [8] je to 10 Hz až 15 Hz) a priemernej teplote asfaltových vrstiev pri meraní (13 °C až 15 °C). Pri porovnaní s hodnotami fázového uhla stanovenými pre tieto okrajové podmienky laboratórnymi skúškami (19° až 24° podľa [9] a [10]; 10° až 16° podľa [11] a [12]) možno konštatovať relatívne dobrú zhodu.

Vplyv teploty a únavy pri rôznej dobe zaťažovacieho impulzu

Vozovka 300 m dlhého úseku smerovo rozdelenej rýchlostnej cesty bola diagnostikovaná deflektometrami FWD Kuab a Dynatest, ktoré majú rozdielnu dobu trvania zaťažovacieho impulzu (cca 45 ms vs 25 ms). V pozdĺžnom a priečnom smere bol pri všetkých meraniach mierny rozdiel v polohe diagnostikovaných bodov (aj pri meraní tým istým FWD počas opakovaných meraní v rámci dňa).

Keďže úsek je v prevádzke už veľa rokov a intenzita ťažkých nákladných vozidiel je pomerne veľká (viac ako 5 500 TNV/24 h), merania boli vykonané tak, aby sa dal vyhodnotiť aj vplyv dlhodobého zaťaženia (únavy). Preto sa obomi deflektometrami meralo v stope pravého kola prechádzajúcich vozidiel aj medzi stopami kolies. V každej stope sa merania vykonali trikrát za deň pri rôznych teplotách povrchu asfaltovej vozovky (tabuľka 1), čo umožnilo sledovať vplyv teploty. Vzďialenosť deflektometrov počas merania v rámci daného časového intervalu bola minimálna, aby sa merania v danom bode vykonali pri rovnakej teplote.

Časové oneskorenie maxima priehybu za maximom sily bolo väčšie pri meraniach deflektometrom Kuab (obrázok 2 hore).



Obrázok 1: Časové oneskorenia maximálnych hodnôt sily a priehybu

Tabuľka 1: Časové intervaly meraní a teplota povrchu vozovky

Pozícia	Stopa pravého kola			Medzi stopami kolies		
	7.00–8.00	10.00–11.00	13.00–14.00	8.00–8.30	11.00–11.30	14.00–14.30
Čas meraní	7.00–8.00	10.00–11.00	13.00–14.00	8.00–8.30	11.00–11.30	14.00–14.30
Teplota povrchu (°C)	20–22	28–31	34–40	23–27	30 - 33	37–42



Obrázok 2: Rozdiely časových oneskorení pri meraniach FWD Kuab a Dynatest a ich variabilita

Rozdiely v oneskorení boli približne rovnaké pri meraniach vo všetkých časových intervaloch a oboch meraných stopách (obrázok 2 dole), pričom hodnoty variačných koeficientov sú výrazne pod hodnotou 0,3–0,35 považovanou v oblasti techniky za rozhranie medzi homogénnym a nehomogénnym súborom hodnôt.

Na základe vyhodnotení meraní možno konštatovať, že kratšie trvanie zaťažovacieho impulzu pri Dynateste (t. j. väčšia frekvencia zaťažovacieho impulzu) má za následok kratšie časové oneskorenie maxima sily a priehybu – pružnejšie správanie vozovky.

Rozdielna teplota asfaltových vrstiev počas meraní v rámci dňa sa neprejavila na hodnotách časových oneskorení. Ich hodnoty sú v jednotlivých časoch merania približne rovnaké (obrázok 3), hoci priemerná teplota asfaltových vrstiev stanovená podľa [13] bola v rozsahu 22 °C až 31 °C (stopa pravého kolesa na začiatku úseku), resp. 26 °C až 38 °C (medzi stopami kolies na konci úseku). To je v rozpore s poznatkami o vplyve teploty na hodnoty fázového uhla (pri rovnakej zaťažovacej frekvencii je to v podstate vplyv na zmenu časového oneskorenia medzi pôsobiacou silou a vznikajúcou deformáciou) vyplývajúcimi z laboratórnych skúšok asfaltových zmesí.

Obrázok 3 taktiež dokladuje, že pri oboch deflektometroch sú v stope pravého kolesa časové oneskorenia medzi maximom zaťažovacej sily a priehybom v osi zaťaženia v rovnakom rozsahu, ako pri meraniach medzi stopami kolies. To znamená,

že opakované zaťaženie vozovky (únava) nemá vplyv na zmenu hodnôt časových oneskorení. Rovnaké závery vyplývajú z laboratórnych skúšok únava asfaltových zmesí (časové oneskorenie medzi pôsobiacou silou a vznikajúcou deformáciou je počas skúšania jednej vzorky pri danej frekvencii a teplote takmer konštantné).

Vplyv teploty a opakovaného zaťažovania bol vyhodnocovaný aj z opakovaných meraní FWD Kuab, ktoré Slovenská správa ciest vykonáva na dlhodobo sledovaných úsekoch už od roku 2005. Hodnoty časového oneskorenia medzi maximom zaťažovacej sily a priehybom v osi zaťaženia pre päť úsekov s rôznou geografickou polohou a klimatickými podmienkami (obrázok 4) potvrdzujú vyššie uvedené zistenia vyplývajúce z meraní na pokusnom úseku rýchlostnej komunikácie.

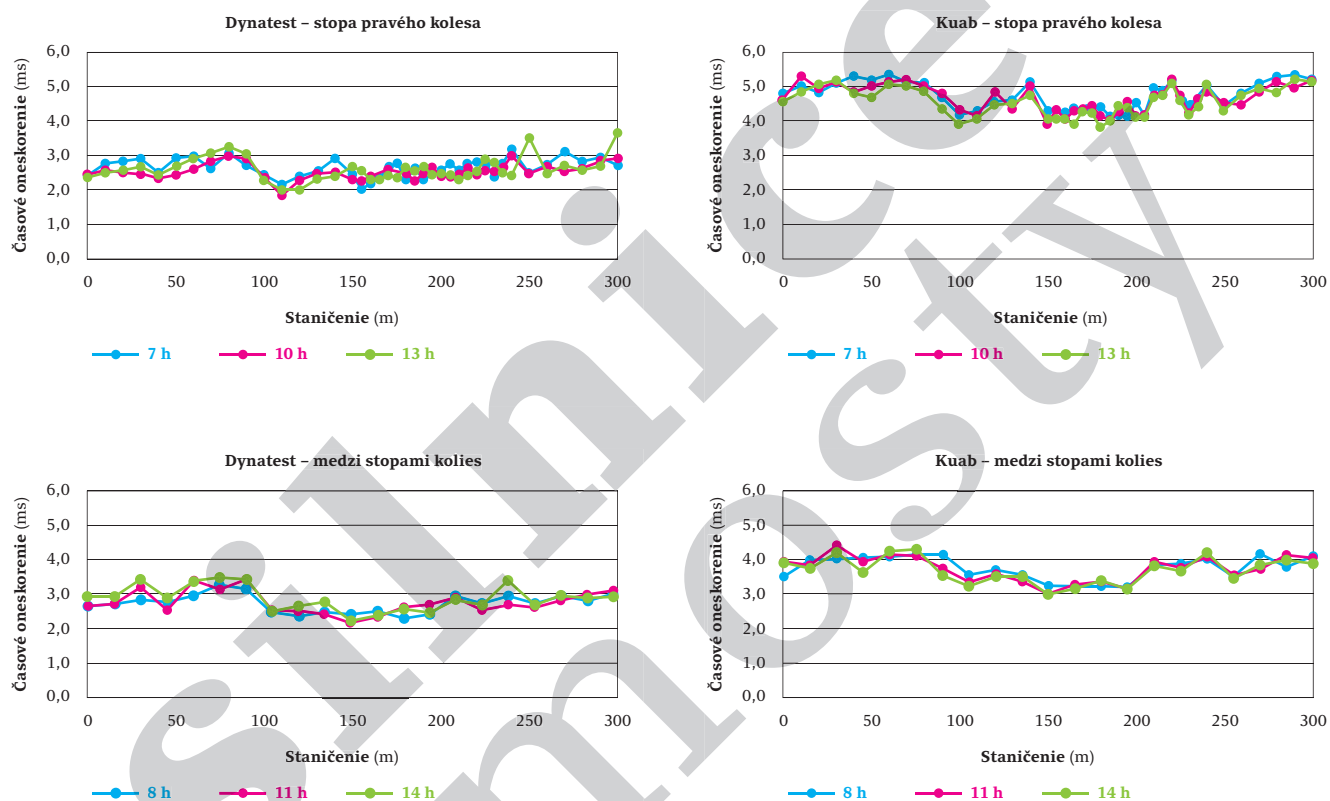
Hodnoty časových oneskorení na jednotlivých úsekoch sa nemenia s priemernou teplotou asfaltových vrstiev, ale pohybujú sa v úzkom rozsahu (cca 0,5 ms). Pri priemernej dobe trvania zaťažovacieho impulzu FWD Kuab rovnej 45 ms to znamená rozdiel vo fázových uhloch do 2 stupňov. To je diametrálny rozdiel v porovnaní s vplyvom teploty na charakteristiky väzko-pružného správania sa asfaltových zmesí pri skúškach v laboratóriu na vzorkách z asfaltových zmesí.

Časové oneskorenia na obrázku 4 sú stanovené z meraní v období rokov 2010 až 2021. Počas 11 rokov prevádzky nedošlo ani na jednom úseku k výraznejšej zmene časových oneskorení. Je teda možné konštatovať, že únava asfaltových vrstiev vozo-

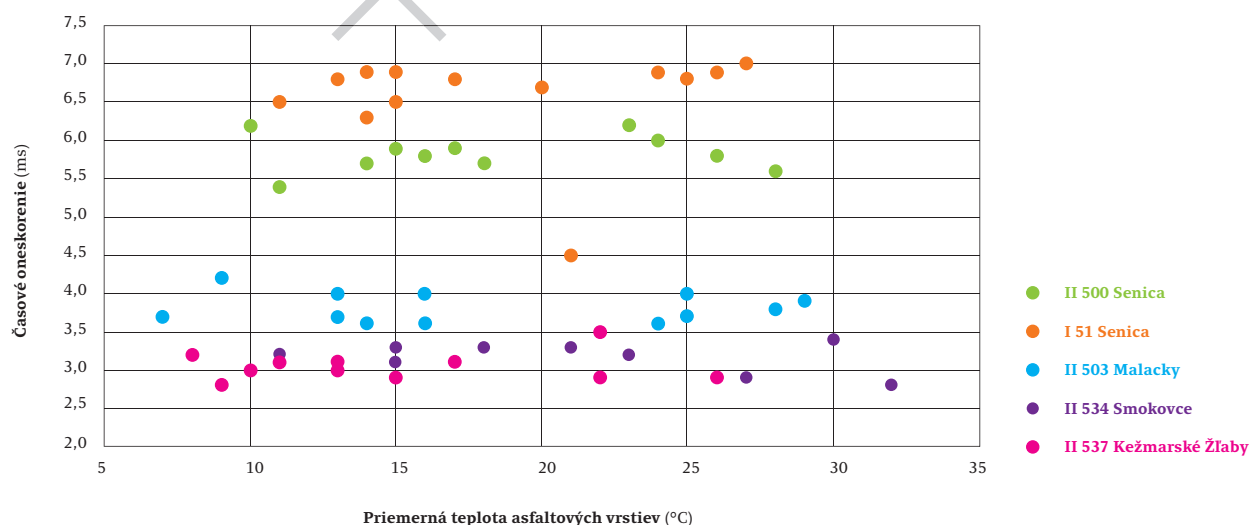
viak vplyvom opakovaného zaťažovania kolesami prechádzajúcich vozidiel nemá vplyv na zmenu väzko-pružného správania sa asfaltových vozoviek.

Z obrázku 4 je taktiež zrejmý rozdiel v hodnotách časových oneskorení na jednotlivých úsekoch. Keďže nedochádza k zmenám časových oneskorení vplyvom opakovaného zaťažovania ani vplyvom teploty asfaltových vrstiev, dá sa uvažovať o tom, že každá vozovka má svoje charakteristiky väzko-pružného správania sa, ktoré sú dané jej zložením a vlastnosťami jej vrstiev a tie si

udržiava od zhotovenia počas celého obdobia svojej životnosti. Rôzne konštrukcie vozoviek majú teda rozdielne väzko-pružné správanie, čo môže mať vplyv na rýchlosť vzniku jej poškodenia. Pri vozovkách na obrázku 4 je maximálny rozdiel v časových oneskorení medzi vozovkami cca 3,5 ms (II/537 a I/51). Pri rovnakej dobe trvania zaťažovacieho impulzu FWD Kuab (45 ms) to znamená rozdiel v hodnotách fázového uhla až 14 stupňov. Takýto rozdiel sa pri porovnávaní a hodnotení väzko-pružného správania sa asfaltových zmesí považuje za významný.



Obrázok 3: Vplyv teploty a únavy na časové oneskorenia pri meraniach FWD Kuab a Dynatest



Obrázok 4: Časové oneskorenia na dlhodobo sledovaných úsekoch

Záver

Z vyhodnotení meraní zameraných na sledovanie väzko-pružného správania sa asfaltových vozoviek vyplynuli nasledujúce zistenia:

- ▶ Keďže väzko-pružné správanie sa hydraulicky stmelých materiálov (v danom prípade vrstvy CBGM) by nemalo závisieť od teploty, väčšie časové oneskorenie maxima zaťažovacej sily a priehybu zaznamenané pri meraní na obrusnej vrstve (v porovnaní s meraním na vrstve CBGM) by malo odrážať viskóznejšie správanie sa asfaltových zmesí, ktoré dominantne predurčuje väzko-pružné správanie sa asfaltovej vozovky.
- ▶ Doba trvania zaťažovacieho impulzu ovplyvňuje časové oneskorenie sily a priehybu, z čoho sa dá usudzovať, že pri rôznych rýchlostiach pohybujúcich sa vozidiel bude väzko-pružné správanie sa asfaltových vozoviek rozdielne.
- ▶ Teplota a opakované zaťaženie (únava) asfaltových vrstiev nemá významný vplyv na časové oneskorenia charakterizujúce väzko-pružné správanie sa asfaltových vozoviek.
- ▶ Každá vozovka má svoje charakteristiky väzko-pružného správania sa, ktoré si udržiava od zhotovenia počas celého obdobia svojej životnosti.
- ▶ Rôzne konštrukcie vozoviek majú rozdielne väzko-pružné správanie, pričom rozdiely môžu byť významné.
- ▶ Na základe hodnôt časových oneskorení maxim pôsobiacej sily a priehybu v osi zaťaženia a predpokladanej priemernej doby zaťažovacieho impulzu deflektometra Kuab (45 ms) sa hodnoty fázových uhlov testovaných vozoviek pohybovali v rozsahu 12° až 28°, čo zodpovedá rozsahom zisteným v rámci laboratórnych skúšok asfaltových zmesí.

Ing. Zsolt Boros, TPA, s.r.o.

Dr. Ing. Jozef Komačka, TPA, s.r.o.

Ing. Filip Buček, TPA, s.r.o.

Literatura

- [1] AASHTO M 320, 2017. *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder*. Washington, DC: American Association of State Highways and Transportation Officials.
- [2] Asphalt Institute, 2003. *Superpave performance graded asphalt binder specification and testing: Superpave series No.1 (Third Revision)*. Asphalt Institute.

Inzerce

- [3] Hunter, R. N. et al., 2015. *The Shell Bitumen Handbook (Sixth edition)*.
- [4] Mugume, R., Kakoto, D., 2020. *Effect of Inappropriate Binder Grade Selection on Initiation of Asphalt Pavement Cracking*. *Sustainability* 2020, 12(15), 6099, doi.org/10.3390/su12156099.
- [5] Clyne, T. et al., 2003. *Dynamic and resilient modulus of MN/DOT asphalt mixtures. Final report MN/RC – 2003-09*.
- [6] Boros, Z., Komačka, J., 2022. *Indication of viscoelastic behaviour of asphalt pavements using FWD time history data. Bearing capacity of roads, railways and airfields. Trondheim, CRC Press/Balkema, Volume III, pp. 45-53. ISBN 978-1-032-12044-7, DOI: 10.1201/9781003222880*.
- [7] Biligiri, K. P., Kaloush, K., Uzan, J. (2010). *Evaluation of asphalt mixtures' viscoelastic properties using phase angle relationships*. *International Journal of Pavement Engineering*, 11(2), 143–152. doi:10.1080/10298430903033354
- [8] Ligang L. (2011). *Backcalculation of asphalt concrete complex modulus curve by layered viscoelastic solution*. *Dissertation thesis*. Michigan State University, 2011. ISBN 9781124597003112459700X. doi.org/doi:10.25335/rbfr-0g22.
- [9] Clyne, T.R., Li, X., Marasteanu, M.O., Skok, E.L. (2003). *Dynamic and resilient modulus of MN/DOT asphalt mixtures. Report MN/RC – 2003-09*. University of Minnesota. 2003.
- [10] Ambassa, Z. (2013). *Vers la modélisation du comportement a la fatigue des chaussées bitumineuses routieres sous chargement réel*. *PhD thesis*. Université de Limoges. 2013.
- [11] Guo, L., Xu, Q., Zeng, G., Wu, W., Zhou, M., Yan, X., Zhang, X., Wei, J. (2021). *Comparative Study on Complex Modulus and Dynamic Modulus of High-Modulus Asphalt Mixture*. *Coatings* 2021, 11, 1502. <https://doi.org/10.3390/coatings11121502>.
- [12] Xu, Q., Solaimanian, M. (2009). *Modelling linear viscoelastic properties of asphalt concrete by the Huet-Sayegh model*. *International Journal of Pavement Engineering*, 2009, vol. 10, No. 6, pp. 401–422.
- [13] TP 031 (1/2009) *Meranie a hodnotenie únosnosti asfaltových vozoviek pomocou zariadenia FWD KUAB*. *Technické podmienky*. MDPT SR, 2009.



Liberec: 5. června 2026
Hradec Králové: 18. září 2026

ROAD FEST

SDRUŽENÍ PRO VÝSTAVBU SILNIC

📍 RoadFest2026 📷 roadfest2026 www.roadfest.cz