

Experimentální poznatky z porovnání tuhosti asfaltové směsi stanovené třemi různými laboratorními metodami

V posledních několika letech se na ČVUT v Praze věnuje pozornost porovnání tuhosti asfaltových směsí, kterou lze v souladu s ČSN EN 12697-26 stanovit různými metodami. V ČR dosud používané metody jsou dvoubodová zkouška na tělesech tvaru komolého klínu (2PB-TR) a opakované namáhání v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY). Hodnoty měřené oběma metodami se do nedávné doby vztahovaly k jedné normové mezní hodnotě, přičemž není vůbec jasné, zda oba přístupy měření při stejné teplotě zkoušení vedou ke stejné hodnotě tuhosti. Aby byla problematika složitější, existuje i další v mezinárodním prostředí častá metoda využívající čtyřbodový ohyb na trámečkových tělesech (4PB-PR). Příspěvek se zaměřuje na vzájemná porovnání zkušebních metod.

Klíčová slova: asfaltové směsi, tuhost, 2PB-TR, IT-CY, 4PB-PR

In the last few years, attention has been paid at the CTU in Prague to the comparison of the stiffness of asphalt mixtures, which can be according to ČSN EN 12697-26 determined by various laboratory methods. In the Czech Republic, the methods used so far are the two-point test on trapezoidal test specimens (2PB-TR) and repeated indirect tensile test on cylindrical test specimens (IT-CY). The resulting values measured by both methods for this type of mixture have been so far related to a single standard limit value, and it is not at all clear whether both methods of measurement at the same testing temperature lead to the same stiffness value. To make the issue more complex, there is another internationally common method using four-point bending on prismatic test specimens (4PB-PR). The paper focuses on inter-comparisons of these test methods.

Keywords: asphalt mixtures, stiffness, 2PB-TR, IT-CY, 4PB-PR

Úvod

Mechanistické vymezení asfaltových směsí je nezbytné pro předpověď odezvy konstrukce vozovky z hlediska vlivů zatížení a teploty, které na ni působí. V rámci mnoha studií nebo díky existenci některých norem bylo opakovaně buď ověřováno, nebo formou technických požadavků vymezeno mnoho vlastností, které mají co nejlépe reprezentovat odezvu dopravního zatížení na vrstvy vozovky. Mezi těmito charakteristikami představuje tuhost asfaltových směsí jeden ze základních parametrů pro pochopení chování asfaltových vozovek umožňující racionální konstrukční návrh vozovky [1]. Později byla zjištěna korelace mezi tuhostí a některými dalšími vlastnostmi směsi, jako je únav a odolnost proti trvalé deformaci, a proto lze v dnešní době

tuhost, resp. modul tuhosti považovat za charakteristiku vhodnou pro hodnocení vlastností asfaltových směsí [2].

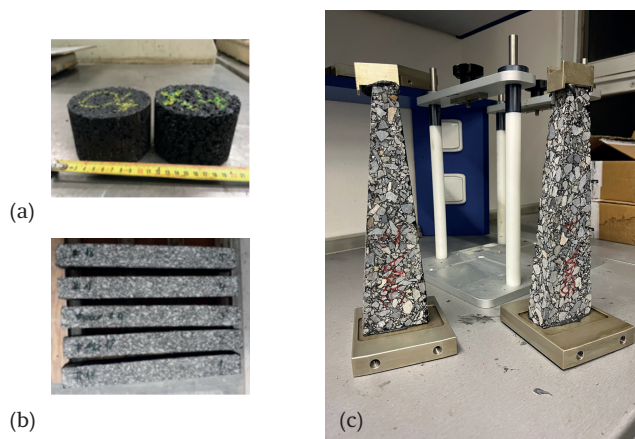
Podle evropské normy EN 12697-26 byly pro posuzování modulu tuhosti (nebo dynamického komplexního modulu) zavedeny různé zkušební metody s různými zkušebními konfiguracemi, mezi které patří dvoubodová zkouška ohybem na trapezoidních nebo trámečkových zkušebních tělesech (příloha A), třibodové a čtyřbodové zkoušky ohybem na trámečkových zkušebních tělesech (příloha B), zkouška opakovaného namáhání v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (příloha C), zkouška v přímém tahu a tlaku na válcových zkušebních tělesech (příloha D) a tahová zkouška na válcových nebo trámečkových zkušebních tělesech (příloha E) [3].

Tento článek se zaměřuje na probíhající studii, která se zaměřuje na porovnání a vyhodnocení modulu tuhosti získaného ze tří zkušebních metod, které lze v České republice zkoušet díky stávajícímu laboratornímu vybavení – opakované namáhání v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY), dvoubodová zkouška ohybem na zkušebních tělesech komolého klínu (2PB-TR) a čtyřbodová zkouška ohybem na trámečkových zkušebních tělesech (4PB-PR). Z těchto konfigurací v mnoha zemích převládá zkouška IT-CY, protože je v porovnání se zbylými dvěma velmi jednoduchá na provedení a lze ji provádět na laboratorních Marshallových zkušebních tělesech i na vývrtech odebraných přímo z vozovky [4]. Oproti tomu testování 4PB-PR i 2PB-TR jsou na přípravu a provedení složitější a vyžadují sofistikovanější zkušební testery (laboratorní zařízení) a obvykle také o něco větší znalosti osoby provádějící zkoušku s následnou interpretací všech získaných výsledků. Přesto lze říci, že se jedná o reprezentativnější formy stanovení tuhosti [5, 6]. Zkoušky 2PB-TR a 4PB-PR jsou si v mnoha ohledech podobné, existují však i jisté odlišnosti (tedy vyjma tvaru zkušebních těles). Obě jsou schopny simulovat průběh průhybu a s ním vyvolaných napětí, jež jsou blízké způsobu zatížení ve vozovce [7]. Obě metody se však liší vedle tvaru a rozměrů zkušebních těles především směrem působícího zatížení.

Použité materiály a zkušební metody

Asfaltové směsi a příprava zkušebních těles

Asfaltové směsi použité v této studii byly vyrobeny s využitím silničního asfaltu 50/70 s následnou úpravou (ztužením) pomocí na trhu dostupného amidového vosku (Licomont) v množství 3 %-hm. vztažené k asfaltovému pojivu. Tyto směsi byly vyrobeny na obalovně Hájký (STRABAG) na základě reálných zkoušek typu, které pro každou z využitých směsí existují. Bylo vyrobeno přibližně 80 kg každého typu směsi a dodáno do laboratoře, přičemž hlavní účel posuzování těchto směsí bylo získat parametry pro zpřesnění požadavků v rámci revize TP 170. Porovnání metod stanovení tuhosti bylo zvoleno jako samostatná úloha, která se nabízela díky většímu množství daných směsí. Souběžně s tím byly od té doby posouzeny i další asfaltové směsi, kde jsme se však v menší míře zaměřovali na porovnání všech tří zkušebních metod a mnohem více dat existuje pro posuzování vždy dvou zkušebních metod stanovení tuhosti. Tuto část však v tomto příspěvku prezentovat nebudeme.



Obrázek 1: Tvary zkušebních těles – (a) válcová (Marshallova) tělesa; (b) trámečková zkušební tělesa; (c) tělesa tvaru komolého klínu

Správná příprava zkušebních těles je důležitá pro vyhodnocování různých zkušebních metod pro stanovení modulu tuhosti, zejména pokud tyto metody vyžadují specifický tvar vzorku. Proto byly vyrobeny tři různé tvary vzorků (obrázek 1), jak je uvedeno níže. Současně i tato část přípravných laboratorních prací slouží pro porovnání náročnosti zkušebních metod.

- ▶ Válcové zkušební těleso o průměru 100 mm nebo 150 mm a výšce 40 mm až 70 mm připravené pomocí rázového zhutňovače v souladu s EN 12697-30. Pro zkoušku bylo vždy použito 6 zkušebních těles.
- ▶ Prizmatické zkušební těleso o délce 405 mm, výšce 50 mm a šířce 50 mm. Tyto trámečky byly vyříznuty ze zhutněných rovnoběžníkových vzorků (desek) vyrobených pomocí ocelového segmentového válce v souladu s EN 12697-33 (kapitola 7.3). Pro zkoušku bylo použito 5 trámečkových těles.
- ▶ Zkušební těleso tvaru komolého klínu s velkou základnou 70 mm, malou základnou 25 mm, tloušťkou 25 mm nebo 50 mm a výškou 250 mm. Tato tělesa byla rovněž řezána ze zhutněné desky vyrobené pomocí ocelového válce v souladu s evropskou normou EN 12697-33 (kapitola 7.4) – tedy lamelový zhutňovač, ale v jiném směru řezu. Tyto vzorky nelze použít přímo do zkušební sestavy, je třeba je přilepit jejich dvěma základnami ke kovovému stojanu (obrázek 1c). Pro zkoušku bylo použito 8 zkušebních těles.

Pro účely tohoto příspěvku jsou zvoleny tři asfaltové směsi, z nichž každá představuje jednu vrstvu vozovky – obrusnou, ložní, podkladní. U všech vzorků byl použit stejný zdroj kameniva a stejné parametry hutnění (teplota a počet úderů). V labora-

Tabulka 1: Základní shrnutí k testovaným asfaltovým směsím

Asfaltová vrstva	Označení směsi	Typ	Počet zkušebních těles dané zkušební metody		
			IT-CY	4PB-PR	2PB-TR
Obrusná vrstva	ACO 11+ 50/70 a Licomont	ACO 11+	6	5	7
Ložní vrstva	ACL 16+ 50/70 a Licomont	ACL 16+	6	5	8
Podkladní vrstva	ACP 22+ 50/70 a Licomont	ACP 22+	6	5	7

toři bylo vyrobeno celkem 55 vzorků rozdělených mezi vrstvy a prováděný typ zkoušky, jak je uvedeno v tabulce 1. Teplota zhutňování byla 155 °C a zhutňovací energie pro přípravu zkušebních Marshallových těles byla 2 x 50 úderů, přičemž získaná objemová hmotnost těchto vzorků sloužila jako referenční pro výrobu zbývajících desek. Na obalovně vždy byla vyrobena jedna šarže asfaltové směsi a ta byla rozdělena do více papírových pytlů. V tomto ohledu tedy platí, že asfaltová směs co do složení je zcela homogenní.

Zkušební metody

Opakované namáhání v příčném tahu na válcových tělesech (IT-CY)

Nedestruktivní zkouška opakovaného namáhání v příčném tahu se provádí podle evropské normy EN 12697-26, příloha C [3]. Zkouška byla provedena při teplotě 15 °C pomocí zkušebního testeru od Cooper Research, kterými dlouhodobě ČVUT v Praze disponuje (obrázek 2). Jedná se o původní Nottingham Asphalt Tester z počátku 90. let.

Zkouška se provádí v režimu řízené deformace (cílového přetvoření voleného v lineárně viskoelastické oblasti), při které na válcový vzorek působí impulsním zatížením s dobou zatěžování (124 ± 4) ms. Horizontální deformace byly měřeny za účelem dosažení cílové hodnoty 5 μ m. Toto posunutí bylo měřeno pomocí dvou lineárních diferenciálních snímačů (LDVT) umístěných proti sobě v pevném rámu upnutém ke vzorku. Měření je opakováno podél dvou průměrů a následně je vypočten průměr obou modulů tuhosti.

Zkouška čtyřbodového ohybu na trámečkových zkušebních tělesech (4PB-PR)

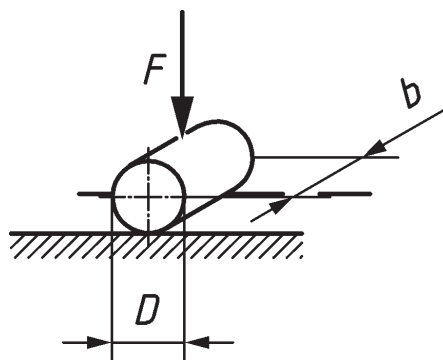
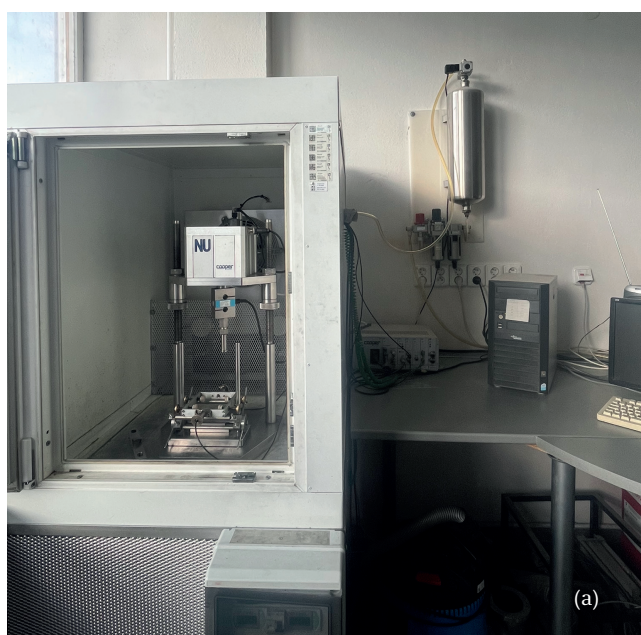
Zkouška čtyřbodovým ohybem na trámečkovém zkušebním tělese se provádí podle evropské normy EN 12697-26, příloha B [3].

Zkouška byla provedena při čtyřech teplotách: 0 °C, 10 °C, 20 °C a 30 °C a při jedenácti vybraných frekvencích: 50 Hz, 30 Hz, 20 Hz, 15 Hz, 10 Hz, 8 Hz, 5 Hz, 3 Hz, 2 Hz, 1 Hz a 0,1 Hz pro každou z uvedených teplot s použitím zkušebního zařízení Cooper Research a pneumatické jednotky, které je znázorněno na obrázku 3. Rozsah frekvencí je dlouhodobě takto zvolen na ČVUT v Praze, aby pokryl různé intenzity zatížení. Čtyři zkušební teploty byly zvoleny z důvodu, že z výsledků byla následně stanovena řídicí křivka (*master curve*).

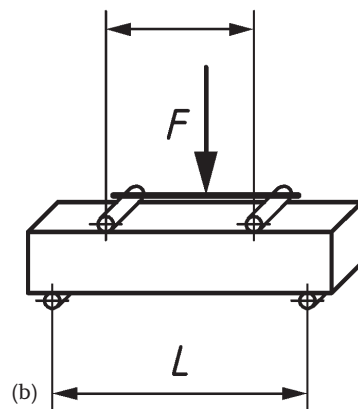
Při této zkoušce se na středové zatěžovací body hranolového vzorku působí spojitým sinusovým zatížením. Svislé polohy ve dvou koncových bodech vzorku byly pevně fixovány. Zkouška se provádí při periodickém, sinusovém a symetrickém zatěžování kolem nulového posunu a při konstantní amplitudě v závislosti na čase. Během zkoušky se měří síla potřebná k deformaci vzorku jako funkce času a také fázové zpoždění mezi signálem posunutí a signálem síly. Z toho se vypočítá komplexní dynamický modul pružnosti (E^*). Dynamický modul má reálnou složku ($E1$) a imaginární složku ($E2$), jak je znázorněno na obrázku 5, která poskytuje důležité informace o elastickém a viskózním chování složitějšího lineárně viskoelastického chování asfaltové směsi v širokém rozsahu teplot a zatěžovacích frekvencí.

Dvoubodová zkouška ohybem na zkušebních tělesech komolého klínu (2PB-TR)

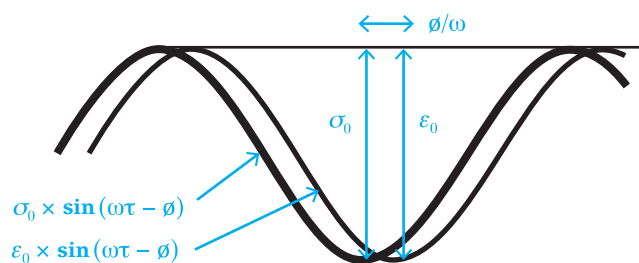
Zkouška dvoubodovým ohybem na zkušebním tělese tvaru komolého klínu se provádí podle evropské normy EN 12697-26, příloha A [3]. Zkouška byla provedena při teplotě 15 °C a při pěti zvolených frekvencích – 25, 20, 15, 10 a 5 – pomocí zkušební sestavy a zkušebního rámu IPC Global, jak je znázorněno na obrázku 6.



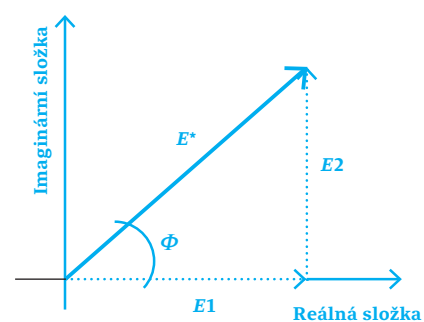
Obrázek 2: Sestava IT-CY od Cooper research technology a princip zatěžování zkušebního tělesa – (a) IT-CY pneumatické zařízení Cooper research technology; (b) princip zatěžování při zkoušce IT-CY



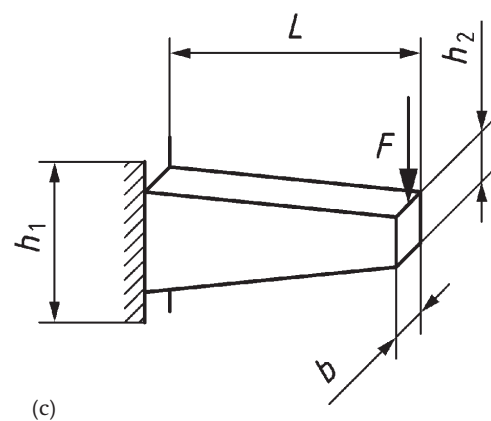
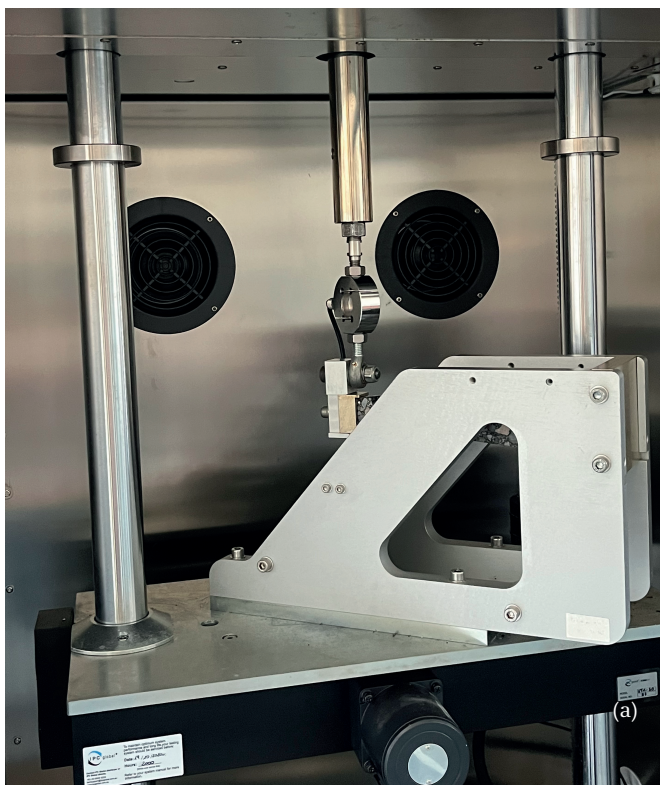
Obrázek 3: Zkušební zařízení pro provádění 4PB zkoušky (Cooper research technology) – (a) 4PB zkušební zařízení; (b) princip zatěžování při zkoušce 4PB



Obrázek 4: Sinusový průběh napětí a přetvoření v čase [7]



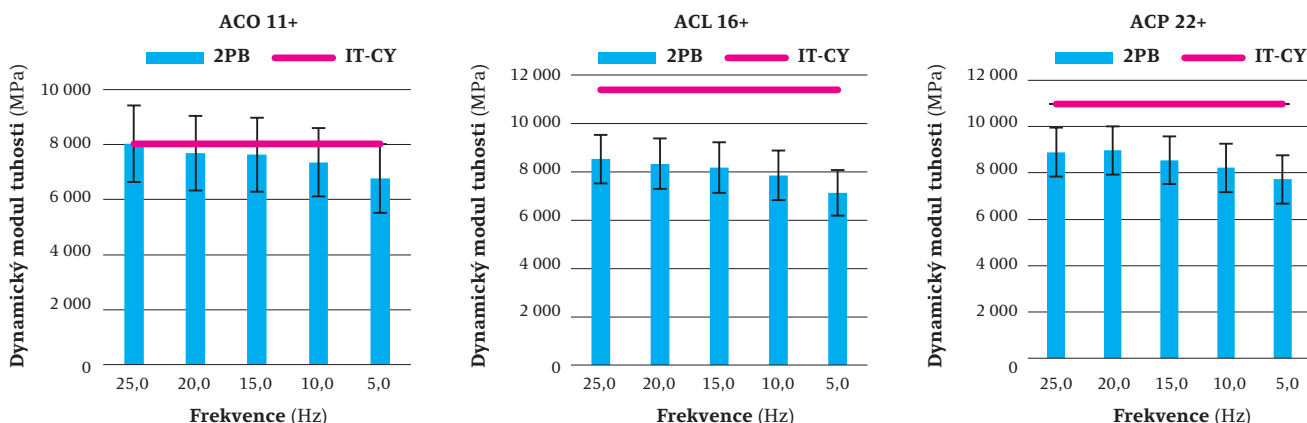
Obrázek 5: Grafické znázornění složek komplexního dynamického modulu pružnosti a fázového úhlu



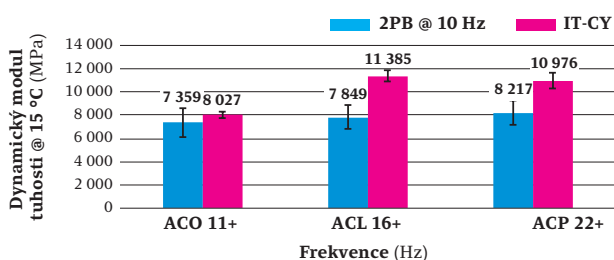
Obrázek 6: Zkušební sestava, vč. klimatické komory a principu zatěžování pro zkoušku 2PB (IPC Global): (a) 2PB – čelní pohled do komory; (b) 2PB testovací set; (c) princip zatěžování při zkoušce 4PB

Tabulka 2: Empirické charakteristiky asfaltových směsí

Asfaltová směs	Objemová hmotnost zhutněného tělesa (kg/m ³)	Mezerovitost (%)	Meze pro mezerovitost stanovené normou (%)
ACO 11+	2,442	3,67	2–6
ACL 16+	2,477	5,34	3–8
ACP 22+	2,498	4,99	3–8



Obrázek 7: Porovnání výsledků tuhosti získané metodou 2PB-TR při různých frekvencích a metodou IT-CY



Obrázek 8: Porovnání výsledků tuhosti získané metodou 2PB-TR při frekvenci 10 Hz a metodou IT-CY

Podobně jako u zkušební zatížení pro čtyřbodovou zkoušku je použito spojitě sinusové zatížení, ale v jiném směru. Vzorek je vystaven sinusovému zatížení na vnějším konci vetknutého komolého klínu po dobu 60 s. Poté se i zde změří působící zatížení pro deformaci vzorku a fázové posunutí v závislosti na čase a vypočítá se dynamický modul pružnosti (E^*).

Výsledky provedených měření

V tabulce 2 jsou uvedeny základní empirické charakteristiky všech směsí. Všechny použité asfaltové směsi v tomto projektu byly navrženy tak, aby splňovaly normové požadavky pro minimální a maximální hodnoty mezerovitosti vymezené v ČSN 73 6121. Z tabulky 2 vyplývá, že všechny směsi toto výchozí normové kritérium splnily.

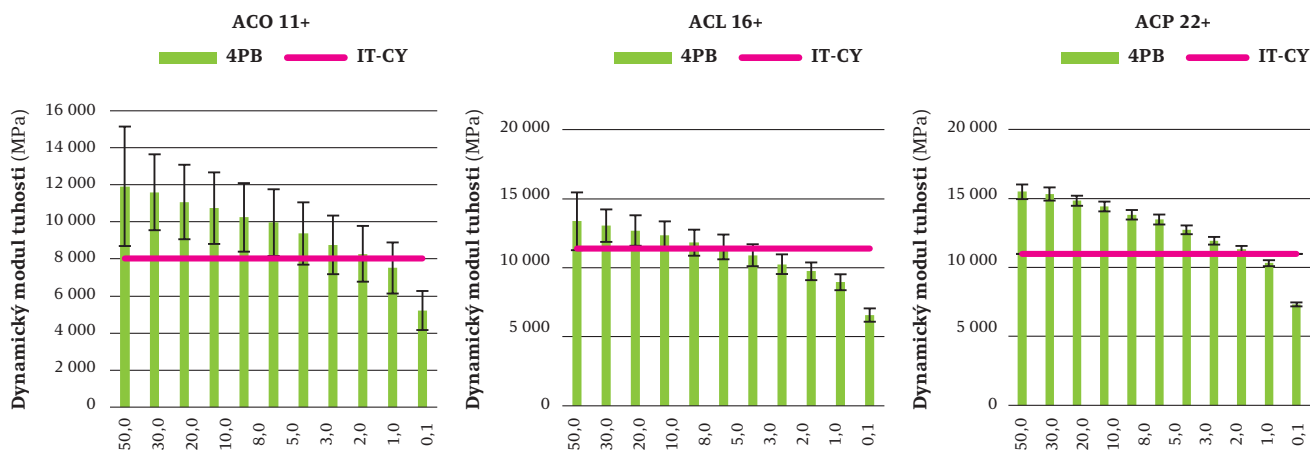
Aby bylo možné dosáhnout cíle této experimentální studie a porovnat tři zkušební metody stanovení tuhosti, bylo pro začátek nutné provést dvojí srovnání mezi metodami. Poté byly odvozeny zjištěné závěry a byly zpracovány korelace mezi metodami.

Porovnání výsledků IT-CY a 2PB-TR

Jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách, IT-CY a 2PB-TR jsou v ČR standardně používané metody. Současně se však odlišují různými režimy zatížení, z nichž jedno je charakterizováno jako pulsní zatížení, zatímco druhé je sinusové harmonické. Proto je nezbytné v první řadě zkoumat vliv frekvence na výsledný dynamický modul a tuhost. Jak je patrné z obrázku 7, dynamické moduly získané zkušební metodou 2PB-TR ukazují, že zvýšení frekvence vede ke zvýšení dynamického modulu. Tento výsledek byl potvrzen u všech testovaných asfaltových směsí a je pro tuto zkušební metodu obecně známý. Srovnání s modulem tuhosti, tj. podle zkušební metody IT-CY, se však u jednotlivých posuzovaných asfaltových směsí liší. Například dynamický modul tuhosti směsi ACO 11+ při frekvenci 25 Hz vykázal podobný výsledek ve srovnání s tuhostí dosaženou metodou IT-CY. Oproti tomu dynamický modul směsi ACL 16+ a ACP 22+ vykazuje nižší výsledky o 34 %, resp. 23 % v porovnání s modulem tuhosti při sledování stejné frekvence.

Z důvodu porovnání obou zkušebních metod byla jako referenční frekvence zvolena nakonec hodnota 10 Hz. Z obrázku 8 je zřejmé, že dynamický modul tří asfaltových směsí představujících uplatnění v různých vrstvách vozovky a odlišující se velikostí maximálního zrna ve směsi kameniva vykazuje podobné hodnoty, zatímco tuhost stanovená metodou IT-CY vykazuje vyšší hodnoty u asfaltové směsi pro ložní a podkladní vrstvu, a to při porovnání s asfaltovou směsí pro obrusnou vrstvu.

Srovnání těchto dvou zkušebních metod ukázalo rozdílné výsledky mezi studovanými směsmi, potažmo jim odpovídajícími vrstvami. Asfaltová směs ACO 11+ přitom vykázala nejlepší korelaci mezi oběma zkušebními metodami.



Obrázek 9: Porovnání výsledků tuhosti získané metodou 4PB-PR při různých frekvencích a metodou IT-CY

Porovnání výsledků IT-CY a 4PB-PR

Podobně jako v předešlém případě byla provedena experimentální studie vlivu frekvence na výsledný dynamický modul u metody 4PB-PR a porovnání s metodou IT-CY.

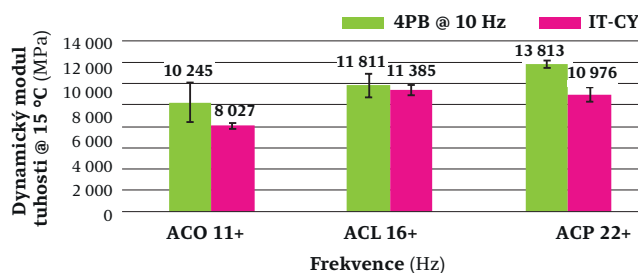
Stejně jako výsledky dynamického modulu metody 2PB-TR, i dynamické moduly zkušební metody 4PB-PR ukázaly, že zvýšení frekvence vede k nárůstu modulové charakteristiky (obrázek 9). Opět se jedná o poznatek, který potvrzuje obecně známou skutečnost. Porovnání 4PB-PR a IT-CY však ukazuje lepší korelaci v rozsahu frekvencí 1 Hz až 8 Hz pro asfaltovou směs ACO 11+, 3 Hz až 20 Hz pro asfaltovou směsí ACL 6+ a 1 Hz až 10 Hz pro asfaltovou směs ACP 22+. Nakolik toto bude platné i při rozšíření souboru posuzovaných zkoušek, bude prezentováno v samostatném článku později. Na základě získaných výsledků však je možné považovat frekvenční rozsah od 3 Hz do 8 Hz za vhodný rozsah korelace mezi zkušebními metodami 4PB a IT-CY.

Na druhou stranu porovnání těchto dvou zkušebních metod (obrázek 10) ukázalo, že bez ohledu na typ asfaltového betonu má modul tuhosti získaný metodou IT-CY nižší hodnotu ve srovnání s dynamickým modulem získaným při nízkých frekvencích, v případě zvolené referenční frekvence 10 Hz to platilo ve všech případech. Pouze u asfaltové směsi typu ACL 16+ by bylo možné tento vliv při frekvenci 10 Hz a teplotě 15 °C považovat za zanedbatelný. Za zmínku stojí, že rozdíl mezi dynamickým modulem pružnosti a modulem tuhosti je v případě asfaltové směsi ACO 11+ přibližně 22 % a v případě asfaltové směsi ACP 22+ přibližně 21 %.

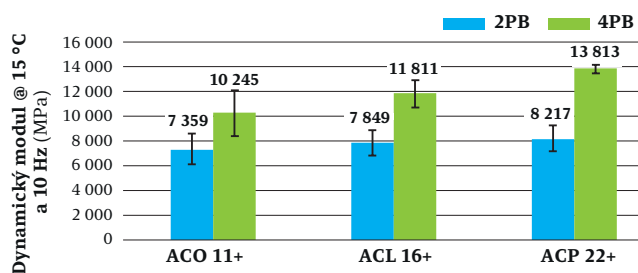
Na základě výše prezentovaných poznatků lze předpokládat, že porovnání zkušebních metod 4PB-PR a IT-CY má slibné výsledky při stanovení korelace zejména v rozsahu frekvencí 3 Hz až 8 Hz.

Porovnání výsledků 2PB-TR a 4PB-PR

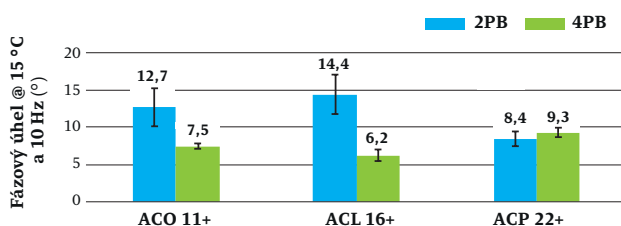
Z obrázku 11 vyplývá, že hodnoty dynamického modulu pružnosti stanovené metodou 4PB-PR jsou vyšší než dynamický modul pružnosti stanovení 2PB-TR. Přestože tyto dvě zkoušky mají stejný typ zatížení, existují určité rozdíly, jak již bylo popsáno v první části. Ty vedou i k určitým rozdílům ve výsledcích. Přesto mají obě zkoušky obdobnou tendenci z hlediska tuhosti a posuzovaného typu směsi. To lze vysvětlit pravděpodobně dvěma



Obrázek 10: Porovnání výsledků tuhosti získané metodou 4PB-PR při frekvenci 10 Hz a metodou IT-CY

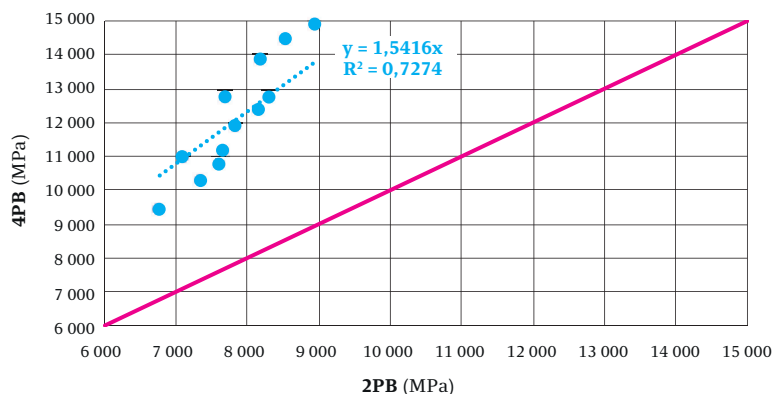


Obrázek 11: Porovnání mezi dynamickým modulem stanoveným 4PB-PR a 2PB-TR

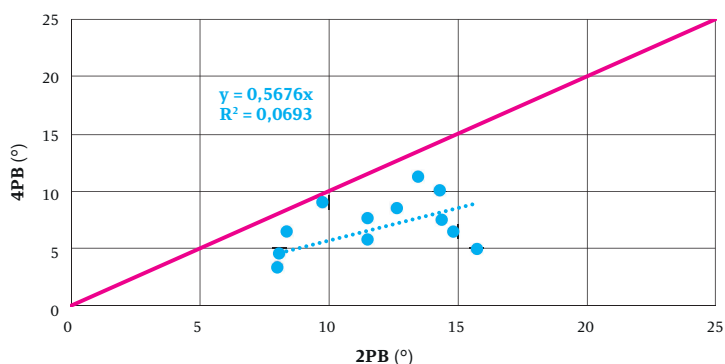


Obrázek 12: Porovnání mezi úhlem vázového posunutí stanoveným 4PB-PR a 2PB-TR

aspekty – vyšší mezerovitostí a velikostí maximálního zrna ve směsi. Fázevý úhel, znázorněný na obrázku 12, však při porovnání obou zkoušek vykázal rozdílné výsledky v závislosti na asfaltové směsi. Výsledky například ukázaly, že u asfaltových směsí ACO 11+ a ACL 16+ byla prezentována podobná tendence jako u dynamického modulu, ale s inverzní analogií. Oproti tomu ACP 22+ vykazovala u obou zkoušek podobný fázevý úhel, přičemž u 2PB-TR s významným poklesem.



Obrázek 13: Regrese dynamického modulu pružnosti mezi zkouškami 4PB-PR a 2PB-TR pro všechna data (při 15 °C) a při frekvencích 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz a 25 Hz), černě je znázorněna přímka funkce identity



Obrázek 14: Regrese úhlu fázového posunutí mezi zkouškami 4PB-PR a 2PB-TR pro všechna data (při 15 °C a při frekvencích 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz a 25 Hz), černě je znázorněna přímka funkce identity

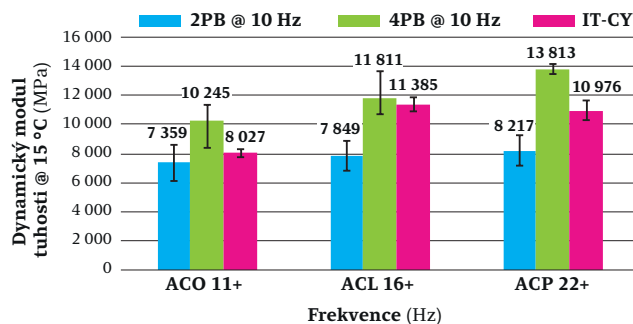
Současné porovnání těchto dvou zkušebních metod ukázalo některé zajímavé výsledky. Jak je vidět na obrázcích 13 a 14, všechny údaje o dynamickém modulu a fázovém úhlu byly vynešeny do grafu a z hlediska korelační funkce mezi těmito dvěma metodami byl pro komplexní modul zjištěn dobrý vztah. Vypočtený korelační koeficient R^2 byl 0,83 pro dynamický modul a 0,06 pro fázový úhel. Pokud by se koeficient R^2 vypočítal pro každou směs zvlášť, byly by hodnoty dokonce $> 0,9$. Dalším zajímavým výsledkem je, že porovnání těchto dvou zkušebních metod při 15 °C a 10 Hz ukázalo zvýšení modulu 4PB-PR o 54 % a snížení fázového úhlu o 56 % v porovnání s druhou zkušební metodou.

Porovnání všech tří zkušebních metod

Obrázek 13 zobrazuje vzájemné porovnání tří zkušebních metod podle jejich tuhosti při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz (zvolená pro obě měření dynamického modulu). Zkušební metoda 4PB-PR vykazuje nejvyšší hodnoty pro všechny posuzované směsi. Obě metody, které uplatňují harmonické zatížení, 2PB-TR i 4PB-PB, vykazují korelovaný komplexní modul. Zatímco výsledky IT-CY mají odlišnou tendenci.

Posouzení závislosti tuhosti pro IT-CY a 4PB metodu na větším souboru dat

Následující kapitola je věnována vyhodnocení a porovnání výsledků zkoušek modulu tuhosti v příčném tahu (IT-CY)



Obrázek 15: Porovnání mezi metodami 2PB-TR, 4PB-PR a IT-CY z hlediska tuhosti asfaltové směsi při 15 °C

a čtyřbodové zkoušky tahu v ohybu se získáním komplexního modulu (4PB-PR) souboru asfaltových směsí testovaných v posledních 3 letech v závislosti na obsahu R-materiálu ve směsi. Ve všech případech se jednalo o asfaltový beton, přičemž pro směsi s 30 % R-materiálu bylo posuzováno 12 variant směsí, pro směsi se 40 % R-materiálu 8 variant směsí a v případě asfaltových směsí s 50 % R-materiálu 23 variant směsí (s odstupem nejvíce s ohledem k posuzování vlivu různých typů rejuvenátorů).

Pro stanovení experimentální závislosti mezi oběma moduly bylo nezbytné porovnat moduly při stejných teplotách. Vzhledem k tomu, že komplexní modul byl testován při 4 teplotách: 0 °C, 10 °C, 20 °C a 30 °C, které nejsou totožné s teplotami pro stanovení tuhosti metodou IT-CY, byla provedena regresní ana-

lýza těchto dat na teploty standardně posuzované v případě IT-CY: 0 °C, 15 °C a 27 °C pomocí lineárního modelu typu:

$$S_T = a \times T + b$$

kdy S_T je komplexní modul při teplotě T ; T je pro výpočet zvolená teplota; a , b jsou regresní koeficienty v závislosti na typu směsi (množství dávkovaného R-materiálu).

Rozložení hodnot tuhosti získané z obou zkušebních metod bylo vzájemně porovnáno podél funkce identity (vyjadřující rovnost dvou modulů vyjádřená matematicky jako stejné zobrazení). Z následujících grafů vyplývá, že mezi modulem tuhosti a komplexním modulem je zřejmý rozdíl. Tuhost získaná z komplexního modulu vykázala vyšší hodnoty než modul tuhosti stanovený metodou IT-CY, a to při všech teplotách a bez ohledu na obsah R-materiálu. Tento výsledek je pravděpodobně způsoben dále uvedenými rozdíly mezi těmito zkušebními metodami:

- Typ zatížení: dynamická čtyřbodová zkouška vytváří jednoosý sinusový typ zatížení, zatímco typ zatížení v případě stanovení IT-CY tuhosti je statický a pulzní podél svislého průměru vzorku.
- Zhutňování: asfaltovou směs zhutňovanou tradičně Marshallovým páčím a oproti tomu hutnění prováděné segmentovým zhutňovačem nelze považovat za homogenní a izotropní.
- Tvar vzorku: zkouška IT-CY vyžaduje válcové zkušební těleso, zatímco zkouška 4PB-PR pracuje s čtvercovým průřezem a využívá vzorek typu hranolu.

Jak vyplývá z výsledků tabulky 3, čím nižší je sklon regresního modelu a blíže k hodnotě 1, tím blíže je model ideální situaci podobného modulu tuhosti. Teplota 0 °C vykazuje dlouhodobě nejlepší regresní modely bez ohledu na obsah R-materiálu ve směsi. Ukazuje se také, že směsi se 40 % R-materiálu vykazují nejhorší rozptyl dat ve srovnání s ostatními sledovanými úrovněmi dávkovaného R-materiálu. Tato skutečnost může být způsobena především nižším počtem testovaných vzorků asfaltových směsí v této kategorii.

Pro další analýzu těchto regresních modelů byla následně vypočtena střední kvadratická chyba (v angličtině běžně značená jako RMSE) a normalizovaná hodnota střední kvadratické chyby (NRMSE), a to s využitím dále uvedeného matematického vztahu:

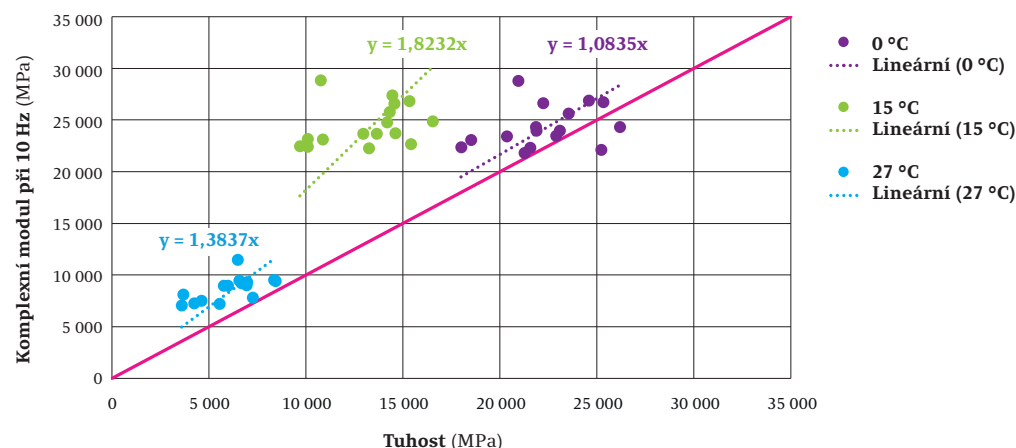
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad \text{a} \quad NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}}$$

kde $\hat{y}$ je i -tá předpovězená hodnota komplexního modulu pomocí regresní rovnice, y_i je i -tý testovaný komplexní modul, $\bar{y}$ je průměr testovaného komplexního modulu pro sledovaný soubor posuzovaných dat a n je počet testovaných vzorků.

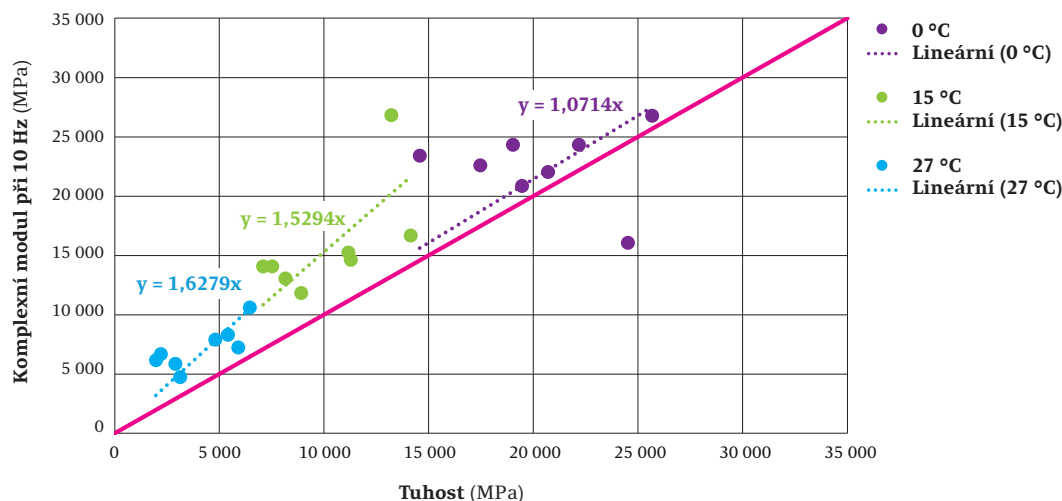
Je všeobecně známo, že čím nižší je hodnota NRMSE, tím lepší je korelace mezi nezávislou a závislou hodnotou v regresní analýze (v našem případě mezi změřenými a vypočtenými hodnotami). Podle tabulky 4 vykazovaly obě teploty 0 °C

Tabulka 3: Shrnutí parametrů regresních analýz směsí asfaltových betonů s obsahem 30 %, 40 % a 50 % R-materiálu při teplotách 0 °C, 15 °C, a 27 °C

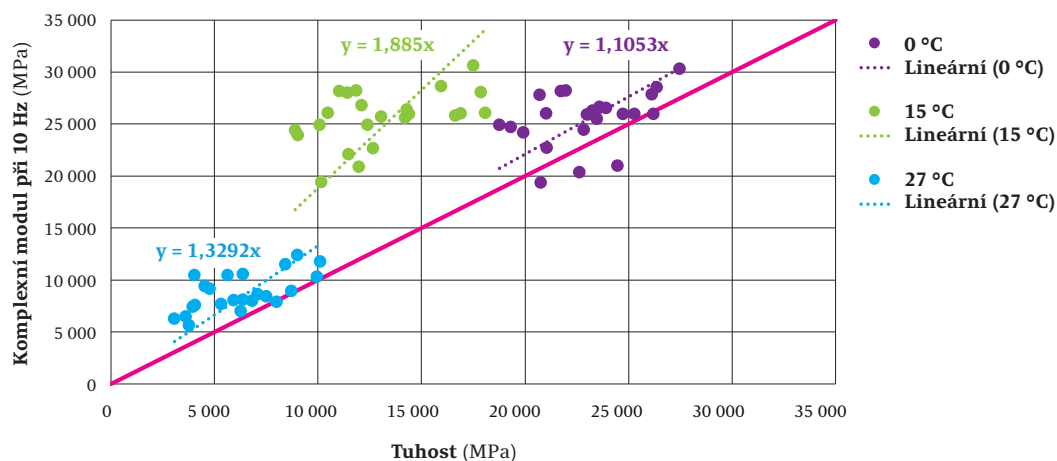
Obsah R-materiálu (%)	Směrnice tečny regresních analýz		
	0 °C	15 °C	27 °C
30	10 835	18 232	13 837
40	10 714	15 294	16 279
50	11 053	18 850	13 292



Obrázek 16: Porovnání tuhosti asfaltových betonů s 30 % R-materiálu při 0 °C, 15 °C, a 27 °C (tečkovaná přímka reprezentuje regresní analýzu všech posuzovaných směsí a červená přímka je funkcí identity)



Obrázek 17: Porovnání tuhosti asfaltových betonů s 40 % R-materiálu při 0 °C, 15 °C, a 27 °C (tečkovaná přímka reprezentuje regresní analýzu všech posuzovaných směsí a červená přímka je funkcí identita)



Obrázek 18: Porovnání tuhosti asfaltových betonů s 50 % R-materiálu při 0 °C, 15 °C, a 27 °C (tečkovaná přímka reprezentuje regresní analýzu všech posuzovaných směsí a červená přímka je funkcí identita)

Tabulka 4: Střední kvadratická chyba a její normalizovaná hodnota stanovená pro směsi asfaltového betonu s obsahem 30 %, 40 % a 50 % R-materiálu při teplotě 0 °C, 15 °C, a 27 °C

Teplota měření (°C)	RMSE			NRMSE		
	30 % R-materiálu	40 % R-materiálu	50 % R-materiálu	30 % R-materiálu	40 % R-materiálu	50 % R-materiálu
0	2 662	5 303	2 855	11%	24%	11%
15	3 818	3 767	4 704	16%	24%	19%
27	2 228	1 973	2 184	26%	32%	26%

a 15 °C nejlepší korelaci pro tři soubory dat. Hodnoty NRMSE se pohybují mezi 11 % a 24 %. Na druhé straně zkušební teplota 27 °C vykazuje vyšší rozptyl chyby v intervalu 26 % až 32 %.

Závěr

V tomto příspěvku byly prezentovány výsledky tří zkušebních metod pro stanovení modulu tuhosti – 2PB, 4PB a IT-CY – na třech asfaltových směsích reprezentujících různé vrstvy vozov-

ky. Výsledky, které ukázaly dvojí porovnání zkušebních metod, přinesly některé slibné poznatky. Například porovnání IT-CY a 4PB ukázalo, že ve frekvenčním rozsahu 3 Hz až 8 Hz lze dosáhnout silnější korelace mezi těmito metodami, zejména v ložní asfaltové vrstvě. Další zajímavý výsledek se ukázal při srovnání 4PB a 2PB, kde bylo dosaženo poměrně dobré korelace. Tento výsledek byl očekáván, protože tyto dvě zkoušky mají podobný princip zatěžování (harmonické sinusové zatížení). Srovnání tří

zkoušek však nepotvrdilo žádnou obecnou korelaci. V procesu jsou další zkoušky na dalších typech asfaltových směsí s různými pojivy. Záměrem je také alespoň subjektivně porovnat náročnost jednotlivých zkoušek tuhosti z hlediska pracnosti, která je nutná pro přípravu zkušebních vzorků a jejich pozdější úpravu pro zkoušení (řezání, lepení atd.). Zde jednoznačně největší potenciál a získání největšího spektra dat nabízí při přiměřené pracnosti zkušební metoda 4PB-PR.

Poděkování

Tento výzkum byl financován Grantovou agenturou ČR, projekt č. 22-04047K a Národní agenturou pro podporu výzkumu v Polsku, projekt č. 2021/03/Y/ST8/00079 v rámci výzvy Weave-UNISONO 2021.

Ing. Majda Belhaj, ČVUT v Praze, Fakulta stavební
doc. Ing. Jan Valentin, Ph.D., ČVUT v Praze,
Fakulta stavební

Literatura

[1] Tayebali A. A., Deacon J. A., Coplantz J. S., et al. *Fatigue response of asphalt aggregate mixtures, Strategic Highway Research Program (SHRP), Washington, DC, 1994.*

- [2] Pellinen T. K. and Witczak M. W. *Use of stiffness of hot-mix asphalt as a simple performance test, Transportation Research Record 1789, 2002.*
- [3] EN 12697-26: *Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix, European Committee for Standardization, Brussels, 2012.*
- [4] Kim J. and Koh C. *Development of a predictive system for estimating fatigue life of asphalt mixtures using the indirect tensile test, Journal of transportation engineering, pp. 1530–1540, 2012.*
- [5] Hou H., Wang T., Wu S., et al. *Investigation on the pavement performance of asphalt mixture based on predicted dynamic modulus, Construction and Building Materials, pp. 11–17, 2016.*
- [6] Cerni G., Bocci E., Cardone F., et al. *Correlation between asphalt mixture stiffness determined through static and dynamic indirect tensile tests, Arabian Journal for Science and Engineering, pp. 1295–1303, 2017.*
- [7] Dondi G., Pettinari M., Sangiorgi C., et al. *Traditional and dissipated energy approaches to compare the 2PB and 4PB flexural methodologies on warm mix asphalt, Construction and Building Materials, vol. 47, pp. 833–839, 2013.*
- [8] Cizkova Z. and Suda J. *Viscoelastic behaviour of cold recycled asphalt mixes, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017.*