

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Stavebná fakulta
Katedra technológie a manažmentu stavieb

Autoreferát dizertačnej práce na získanie
akademického titulu „philosophisae doctor“, v skratke „PhD.“

**POSÚDENIE ASFALTOM STMELENÝCH
RECYKLOVANÝCH MATERIÁLOV V RÁMCI
ŽIVOTNÉHO CYKLU VOZOVKY**

Ing. Juraj Mušuta

Žilina máj 2024

Dizertačná práca bola vypracovaná v rámci denného doktorandského štúdia na Stavebnej fakulte Žilinskej univerzity v Žiline.

Predkladateľ: Ing. Juraj Mušuta
Žilinská univerzita v Žiline
Katedra technológie a manažmentu stavieb
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Školiteľ: doc. Ing. Juraj Šrámek, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Katedra technológie a manažmentu stavieb
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Oponenti: 1. prof. Dr. Ing. Martin Decký
Žilinská univerzita v Žiline
Katedra technológie a manažmentu stavieb
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

2. doc. Ing. Marek Ďubek, PhD.
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava

3. prof. Ing. František Schlosser, CSc.

Autoreferát bol rozoslaný dňa
Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa o hod.
v zasadačke dekanátu AE 307 na Stavebnej fakulte Žilinskej univerzity v Žiline, Univerzitná
8215/1, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou spoločnou odborovou
komisiou dňa

študijný odbor: Stavebníctvo
študijný program: Technológia a manažment stavieb

S dizertačnou prácou sa možno oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu Stavebnej fakulty Žilinskej univerzity v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

Predseda odborovej komisie
prof. Ing. Marián Drusa, PhD.

ÚVOD	4
1 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	4
2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY	5
3.1 Asfaltové zmesi	5
3.2 R-materiál	5
3.3 Odpady v stavebníctve	6
3.4 Recyklácia	6
3 TEORETICKÁ ČASŤ	6
4.1 Komplexný modul tuhosti.....	7
4.2 Únava asfaltových zmesí	7
4.3 Životný cyklus vozovky.....	8
4 EXPERIMENTÁLNE MERANIE.....	8
4.1 Využitie R-materiálu pridaním do nových zmesí.....	8
4.2 Využitie R-materiálu v konštrukčných vrstvách nespevnej vozovky...10	10
4.3 Dvojbodová skúška ohybom- 2PB.....	11
4.4 Štvorbodová skúška ohybom- 4PB.....	15
4.5 Konfrontovanie metodiky 2PB a 4PB	17
5 ANALÝZA VPLYVU DEFORMAČNÝCH CHARAKTERISTÍK NA ŽIVOTNOSŤ KONŠTRUKCIE.....	18
6 NÁKLADOVÁ ANALÝZA ŽIVOTNÉHO CYKLU	19
7 ZÁVER.....	22
Prínos dizertačnej práce pre ďalší rozvoj vedného odboru	23
Prínos dizertačnej práce pre prax	23
SUMMARY	24
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	25
Publikované články.....	27

ÚVOD

Už v dávnej minulosti zohrávali cesty strategickú úlohu. Cestné stavitelstvo prešlo veľkým vývojom a postupne sa pozemné komunikácie zdokonaľovali. Aj v súčasnosti dochádza k zjednodušeniu stavebných procesov a k zefektívneniu budovania ciest. Dôležitý materiál na budovanie ciest je asfalt. Využitie asfaltu v konštrukcii cestnej komunikácií predstavuje značný finančný náklad. V poslednom období sa upriamuje pozornosť na zníženie energetickej náročnosti a tým pádom aj ekonomických nákladov. S touto ideou sa spája recyklovanie, ktoré využíva R-materiál. Využitie R-materiálov je limitované v ich percentuálnom zastúpení v asfaltovej zmesi. Podiel R- materiálov v zmesiach určujú STN normy. Dôležitá je aj požiadavka zameraná na deklarovanie základných parametrov R-materiálov, ktorá sa týka zrnitosti materiálu, zmesi kameniva ale aj obsahu, vlastnostiam a druhu spojiva.

Prínos dizertačnej práce spočíva v experimentálnom posúdení recyklovaných asfaltom stmelených materiálov v rámci životného cyklu vozovky. Životnosť konštrukcie vozovky výrazne ovplyvňuje kumulácia zaťaženia, ale aj vonkajšie vplyvy ako je počasie, teplotné výkyvy a podobne. V prípade, keď sa vozovka blíži ku koncu životného cyklu alebo vyčerpaniu sledovaného parametra (napr. nerovnosti prípadne únosnosti), dochádza k jej nevyhnutnej oprave alebo rekonštrukcii. Práca je zameraná na hodnotenie spodných podkladových vrstiev asfaltových vozoviek, kde vznikajú najväčšie radiálne napätia od dopravného zaťaženia.

Aktuálne je stav poznania v oblasti asfaltom stmelených recyklovaných materiálov v štádiu skúmania rôznych štúdií, a taktiež dochádza k porovnávaniu zahraničných a domácich technológií. Cieľom dizertačnej práce je nájsť najvhodnejší spôsob, spracovanie a technológiu recyklovaných asfaltom stmelených materiálov s ich vplyvom na životný cyklus vozovky a následne tento poznatok odporučiť aj pre prax. Prínos spočíva v efektívnom využití recyklátov s pridanou hodnotou zameranou na zníženie energetickej náročnosti, pričom sa posudzujú vybrané parametre asfaltových zmesí. V dizertačnej práci sa porovnávajú rôzne metódy merania deformačných charakteristík.

Téma dizertačnej práce bola vybraná na základe jej aktuálnosti a súčasnej potreby znižovania spotreby energií, pričom sa berie ohľad na životné prostredie, a taktiež na efektívne spracovanie odpadov- recyklovanie. Oblasť cestného stavitelstva je stále vysoko aktuálnou problematikou, keďže aj vývoj nových elektromobilov a iných dopravných zariadení na rôzny pohon je prevádzkovaný na cestných sieťach.

1 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Z aktuálnych požiadaviek nie len zo strany Európskej únie sa vytvára dôraz na ekológiu a vhodnosť nakladania s odpadmi, pričom sa nahliada na celoživotný cyklus stavebného diela. Cieľ dizertačnej práce vychádza z primárnych cieľov Európskej asociácie asfaltových vozoviek (EAPA), ktoré sa podieľajú na podpore ekonomických, technických a spoločenských výhod asfaltových vozoviek. Budúcnosť spočíva v inovovaní asfaltového priemyslu, pričom sa vytvára dôraz na životné prostredie, udržateľnosť a recykláciu. Náplň dizertačnej práce spočíva v experimentálnom posúdení asfaltom stmelených materiálov v rámci životného cyklu vozovky. Ciele dizertačnej práce sú stanovené v nasledujúcich tézach:

- posúdenie vplyvu asfaltom stmelených recyklovaných materiálov na životný cyklus vozovky (metodika),

- experimentálne vyhodnotenie deformačných a únavových charakteristík asfaltom stmelených recyklovaných materiálov,
- analýza vplyvu deformačných a únavových charakteristík asfaltom stmelených recyklovaných materiálov na životnosť konštrukcie vozovky v rámci jej životného cyklu,
- návrhy implementácie technológií asfaltom stmelených recyklovaných materiálov na základe ich deformačných a únavových charakteristík a posúdenia nákladov a výnosnosti - LCCA.

2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

3.1 Asfaltové zmesi

Asfaltové zmesi sú definované podľa Európskych noriem ako zmes kameniva, ktoré má plynulú alebo prerušovanú čiaru zrnitosti spojeného s asfaltovým spojivom. [1] Spojivo je vo väčšine prípadov tvorené asfaltovou emulziou, v niektorých prípadoch len asfaltom, alebo aj modifikovaným asfaltom. Pri modifikácii dochádza vplyvom prísad a prímiesí k upraveniu vlastností asfaltu. [2] Zlepšenie charakteristík sa sústreďuje na ovplyvnenie elasticity, úpravy reologických vlastností, ale aj na lepšie priľnutie asfaltového spojiva ku kamenivu a podobne. [3] Zloženie asfaltovej zmesi, ktoré je tvorené asfaltom, kamenivom a vzduchovými medzerami. Každá časť asfaltovej zmesi vplýva na celkový objem a medzerovitosť zmesi. Jednotlivé zastúpenie zložiek a ich kvalita ovplyvňujú celkové správanie sa zmesi a jej deformačné charakteristiky.

3.2 R-materiál

R-materiál je definovaný v norme STN EN 13108-8 a taktiež v iných výrobných normách, ktoré súvisia s výrobou asfaltových zmesí. Pri identifikácii R- materiálov je potrebné bližšie charakterizovať a analyzovať, či sa jedná o modifikovanú asfaltovú zmes, prípadne o iný typ cestného asfaltu. Dôležité je určiť aké boli použité prísady, ktoré majú výrazný vplyv aj na samotný R-materiál. Pri rozbere R- materiálu sa posudzuje vyextrahované spojivo. Samotné množstvo R- materiálu nachádzajúceho sa v asfaltovej zmesi sa stanovuje v skúške typu.[4] V prípadoch, kedy sa používa do novej asfaltovej zmesi R-materiál je potrebné dodržať normu STN EN 13108-8. V predpise je stanovené aj množstvo R-materiálu, kedy je potrebné preukazovať vlastnosti R-materiálu zabudovaných do nových asfaltových zmesí:

- $\leq 10\%$ v prípade ak je zmes použitá v obrusných vrstvách,
- $\leq 20\%$ v prípade ak je zmes použitá v ložných a podkladových vrstvách.

Tak isto ako aj v prípade používania prísad sa množstvo R-materiálu určuje vykonaním skúšky typu. [3] Potrebné podmienky kvalitatívnych parametrov zložiek a konečných vlastností zmesí spojených s R-materiálom sú definované podľa STN 73 6121 a STN 73 6122, taktiež norma STN EN radu 13108 určuje požiadavky asfaltových zmesí s R-materiálom. V zmysle zavedenia pomerne nových európskych noriem, ktoré určujú požiadavky pre konkrétne druhy asfaltových zmesí, vznikli zmeny týkajúce sa používania R-materiálu, ktorý je pridávaný do asfaltových zmesí. Pribudla požiadavka na deklarovanie R-materiálu a jeho základných charakteristík. Medzi tieto parametre zaraďujeme najmä zrnitosť samotného R-

materiálu, ale aj zrnitosť zmesi kameniva R-materiálu, taktiež aj druh, obsah a vlastnosti spojiva.[5]

3.3 Odpady v stavebníctve

Tak ako každé iné odvetvie aj stavebníctvo sa nezaobíde bez tvorby odpadu. Stavebný odpad vzniká už počas výstavby, ale predovšetkým po skončení návrhovej životnosti stavebných objektov, budov a konštrukcií. V prípade cestných komunikácií sa vytvára produkcia odpadu pri ich obnove a rekonštrukcii, kedy dochádza k frézovaniu jednotlivých konštrukčných častí vozovky. Počas realizácie týchto pracovných postupov vzniká veľké množstvo stavebného odpadu nazývaného aj ako frézing. Každý odpad (nie len v stavebníctve) je potrebné identifikovať, určiť jeho nebezpečenstvo a zatriediť ho. Zatriedenie odpadov je rôzne a záleží podľa krajiny, pre ktorú platia rôzne katalógy odpadov. [6]

3.4 Recyklácia

Recykláciou sa redukuje spotreba surovín a energie, keďže sa využívajú už použité materiály a taktiež sa snaží eliminovať plytvanie zdrojov. [7] Hlavný zmysel recyklácie je zabránenie vzniku nadmerného množstva odpadu, spotreby energie a v neposlednom rade aj produkcii CO₂. [8] Recyklácia zasiahla takmer všetky odvetvia priemyslu a výroby vrátane stavebníctva. V oblasti budovania cestných sietí a ich obnovy je recyklácia nevyhnutná. [9] Medzi kladné vplyvy recyklácie zaraďujeme jej prispievanie k trvalo udržateľnému rozvoju. Recyklácia sa podieľa a tvorí časť známeho „3R“, ktoré slúži ako nástroj pre odpadové hospodárstvo. Pomenovanie „3R“ vychádza z angličtiny a zachytáva začiatočné písmená pomenovania anglických slov. Zaraďujeme tu termíny:

- reduce- znížiť,
- reuse- opätovné použitie,
- recycle- recyklovanie.

Recyklovanie slúži predovšetkým ako nástroj na zníženie produkcie CO₂, energetickej, ekonomickej a ekologickej náročnosti.

3 TEORETICKÁ ČASŤ

Teoretický základ riešenia dizertačnej práce vychádza zo stanovenia deformačných charakteristík cestných materiálov. Tieto parametre sú ovplyvňované silovými účinkami, ktoré vytvára dopravné zaťaženie, ale predovšetkým na nich pôsobí zmena teploty, ktorá sa prejavuje cyklickými zmenami v konštrukčných častiach vozovky. Platí, že pretvorenie rôznych materiálov aj napriek rovnakému simulovanému zaťaženiu je veľmi rozličné. Na veľkosť pretvorenia vplývajú deformačné charakteristiky, od ktorých sa odvíja výpočet napätí. Medzi najdôležitejšie patrí:

- modul deformácie,
- modul pružnosti,
- modul tuhosti,
- komplexný modul (tuhosť a pružnosť),
- Poissonovo číslo.

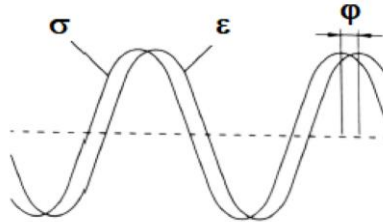
Deformačné charakteristiky sú závislé od viacerých faktorov ako sú napríklad:

- teplota,
- vlhkosť,

- doba pôsobenia zaťaženia,
- druh materiálu a podobne. [18]

4.1 Komplexný modul tuhosti

Komplexný modul tuhosti je možné stanoviť pre visko-elastický materiál, pričom sa zaťažuje krátkodobou harmonickou silou v čase. Závislosť napätia a pretvorenia v priebehu určitého časového horizontu je doplnená o fázový uhol, ktorý vyjadruje posun amplitúdy pretvorenia oproti priebehu napätia. Tieto posuny zapríčínajú visko-elastické charakteristiky asfaltových zmesí. Závislosť napätia a pretvorenia sa nachádza na nasledujúcom obrázku. [10]



Obr.1 Závislosť napätia a pretvorenia, pričom posun vyjadruje fázový uhol [10]

Komplexný modul E^* charakterizuje reálny komplexný modul E_1 a imaginárna časť komplexného modulu tuhosti E_2 . Sčítaním oboch zložiek (reálnej a imaginárnej zložky) sa dopracujeme k výslednému komplexnému modulu tuhosti. Na základe týchto poznatkov je možné komplexný modul tuhosti asfaltových zmesí vyjadriť v tvare:

$$E^* = E_1 + i * E_2 \quad (1)$$

E_1 - reálna zložka komplexného modulu [MPa]

E^* - komplexný modul [MPa]

E_2 - imaginárna zložka komplexného modulu [MPa] [11]

4.2 Únava asfaltových zmesí

Únavu asfaltových zmesí charakterizujeme ako jav, počas ktorého vzniká degradácia materiálu a narušenie vnútorných väzieb, dochádza ku poklesu pevnosti a modulu pružnosti. Táto degradácia je zapríčinená opakovaným namáhaním. Dôležitým faktorom pri únave je doba zaťažovania. Práve vplyvom času sa vytvára znižovanie deformačných a pevnostných charakteristík materiálu. Prejavovanie únavy vytvára trvalé deformácie, vznik trhlin, ale môže mať aj iné podoby v súvislosti od druhu a vlastností materiálu.

Skúmanie únavy asfaltových zmesí je pri konštantnej amplitúde sily, ktorá je cyklická. Vyhodnocovanie únavy je závislé od počtu zaťažovacích cyklov. Existuje viacero možností ako stanoviť únavu asfaltových zmesí, pričom meranie únavy je najefektívnejšie v laboratórnych podmienkach. Prerušenie experimentálnej skúšky únavy vzniká v momente, keď dôjde ku poklesu amplitúdy, ktorá bola stanovená na začiatku skúšania. Tuhosť testovanej vzorky sa dostáva na polovicu tejto hodnoty. Na konci skúšky je možné na vzorkách badať trhliny respektíve lom, kde sa skúšané teleso porušilo. Z týchto nameraných hodnôt sa vytvorí Wöhlerov diagram. Z dosiaľ nadobudnutých znalostí poznáme rôzne spôsoby realizovania únavovej skúšky na asfaltových zmesiach. [12]

4.3 Životný cyklus vozovky

Každý stavebný objekt počas svojej existencie prechádza životným cyklom. Životný cyklus slúži ako nástroj na efektívne využitie primárnych a druhotných surovín, pričom dochádza k efektívnemu predĺženiu životnosti konštrukcie (prípadne výrobu). [13] V posledných rokoch sú kladené vysoké nároky na ekobilanciu. Súčasná veda upriamuje svoju pozornosť na obmedzené fosílné zásoby, tvorbu CO₂ v kombinácii s narastajúcim znečistením. [14] Prvý impulz prichádza v čase ropnej krízy v 70-tych rokoch, kedy sa začali prehodnocovať obalové materiály. V tejto dobe vznikali otázky, ako naložiť s materiálmi po ich ukončenej životnosti, ale aj ako vyrábať efektívnejšie s menšou spotrebou energií. [15] Medzi hlavné prínosy posudzovania životného cyklu patrí:

- stanovenie environmentálnych vplyvov produktov s ohľadom na ich funkciu,
- hodnotenie environmentálnych vplyvov z hľadiska celého životného cyklu produktu,
- určenie hraníc systému na vyjadrenie rozsahu produktu,
- vyjadrenie zásahov do životného prostredia,
- identifikácia prenášania environmentálnych problémov. [16]

Životný cyklus cestných komunikácií je znázornený na Obr.2 Pre materiálové toky sa rozlišujú dva spôsoby:

- **lineárny**- predstavuje fázu 1 ťažba suroviny až do fázy 5b zhodnocovanie,
- **cyklický (obehový)**- reprezentuje fáza 1 ťažba suroviny až po fázu 5a kde je recyklácia, ktorej cieľ je znovu použitie materiálu, ktorý bol už v minulosti niekde zabudovaný. [17]



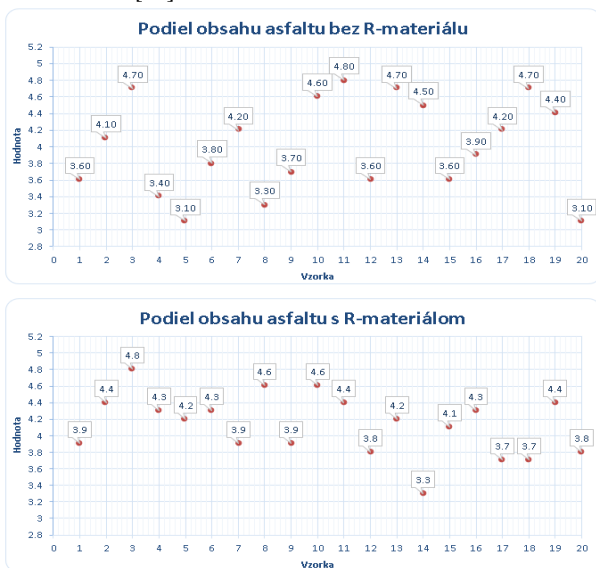
Obr.2 Schéma životného cyklu vozoviek s časťami lineárnych fáz [17]

4 EXPERIMENTÁLNE MERANIE

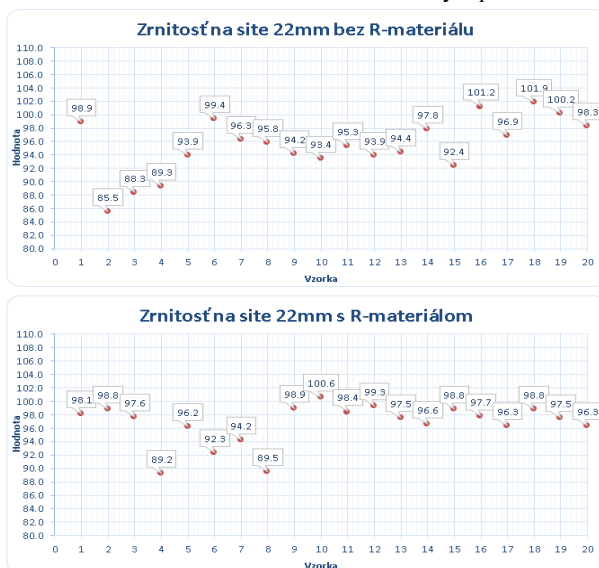
4.1 Využitie R-materiálu pridaním do nových zmesí

Experimentálny výskum asfaltových zmesí s použitím R-materiálu je zameraný na sledovanie vlastností vzoriek, ich porovnávanie a vyhodnocovanie. Cieľom vedeckého experimentu bolo porovnanie vzoriek s 15% obsahu R-materiálu a bez prítomnosti R materiálu. Výskum slúži na pozorovanie toho, ako asfaltová zmes ovplyvňuje R materiál. V experimentálnom meraní boli hodnotené zmesi nachádzajúce sa v spodných podkladových vrstvách. Konkrétne bola

skúmaná zmes AC22. Použité dáta sú z laboratória z praxe, pričom sú z dlhodobých meraní počas stanoveného obdobia. [18]



Obr.3 Podiel obsahu asfaltu bez a s R-materiálom udávaný v percentuálnom zastúpení.



Obr.4 Zrnitosť na site 22mm, vzorky bez a s R-materiálom

Informácie získané z hodnôt obsahu asfaltu poukazujú na fakt, že pri vzorkách bez R-materiálu je podiel asfaltu približne 4,0%. V druhej skupine vzoriek s obsahom R-materiálu je tento podiel na úrovni cca 4,1%. Z nameraných hodnôt vyplýva, že R-materiál v zmesi zvýšil obsah asfaltu v porovnaní s inými zmesami, kde sa R-materiál nenachádzal. Namerané hodnoty sú následne spracované na Obr.3 a Obr.4, kde sa nachádzajú jednotlivé hodnoty pre každú vzorku.

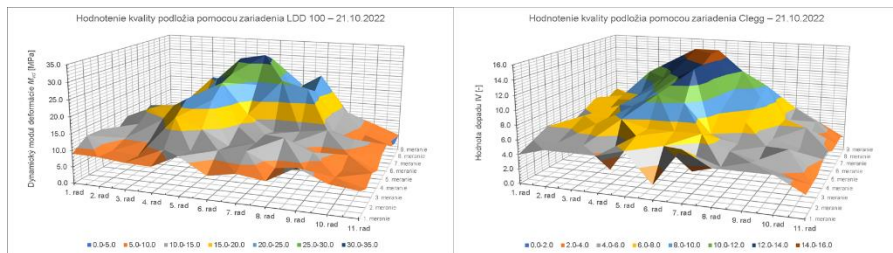
Počas hodnotenia kvalitatívnych parametrov z rozboru zmesi sa stanovovala aj zrnitosť s použitím sita s veľkosťou 22mm. Získané údaje sú pre vzorky s R-materiálom ale aj bez neho. Deklarovaná hodnota je stanovená na úrovni 98,6%, pričom ide o najvyššiu hodnotu spomedzi ostatných preosievacích sít. Tieto predpísané údaje a hodnoty vychádzajú z katalógových listov z roku 2019 a sú zamerané na asfaltové zmesi. Hodnota priemeru z nameraných údajov je na úrovni 95,1% pre vzorky bez R-materiálu. Priemer pre druhú skupinu vzoriek s prítomným R-materiálom je o niečo vyšší a dosahuje 96,6%. Časť experimentu zameraná na využitie R-materiálu pridaním do nových zmesí poukazuje na mieru efektivity znovu použitia druhotnej suroviny, pričom nedochádza k poklesu jej kvalitatívnych parametrov.

4.2 Využitie R-materiálu v konštrukčných vrstvách nespevnej vozovky

Súčasťou dizertačnej práce je aj vedecký experiment, v ktorom sa skúmalo použitie vyfrézovanej asfaltovej zmesi. Materiál slúžil ako konštrukčná časť nespevnenej vozovky. Vedecký experiment prebiehal na skúšobnom poli Vedeckovýskumného pracoviska Stavebnej fakulty Žilinskej univerzity v Žiline. Stanovená plocha zozačiatku poslúžila na merania kvality ílovitého podložja. Neskôr sa na jestvujúce podložie rozprestrel R-materiál, ktorý bol tvorený frézovanou SMA z diaľničného úseku. Aplikovanie materiálu prebehlo hutnením po vrstvách. Hrúbka násypu z R-materiálu bola po dohutnení na úrovni približne 200mm.

Hodnotenie spočívalo v stanovení kvality podložja za pomoci LDD a alternatívou metódou zariadením Clegg Impact Soil Tester (CIST). Meranie ako aj jeho priebeh bol v súlade s platnými normami STN 736190 a STN 736192. Cieľom experimentu bolo poukávanie využiteľnosti R-materiálu, ale aj nájdenie vhodnej metódy pre hodnotenie kvality zhutnenia jemnozrnných súdržných zemín, ktoré sa nachádzajú v podložji, ale aj v konštrukčných vrstvách vozovky. Prínos experimentálneho merania dvomi spôsobmi spočíval v hľadaní korelačných závislostí. [19] Z dosiaľ nadobudnutých poznatkov vieme, že práve inovatívne meracie metódy sú ekonomicky a časovo menej náročné a nachádzajú dobré využitie v prípadoch realizácie menších dopravných stavieb. Pre stanovený experiment boli zvolené už vyššie spomínané meracie zariadenia:

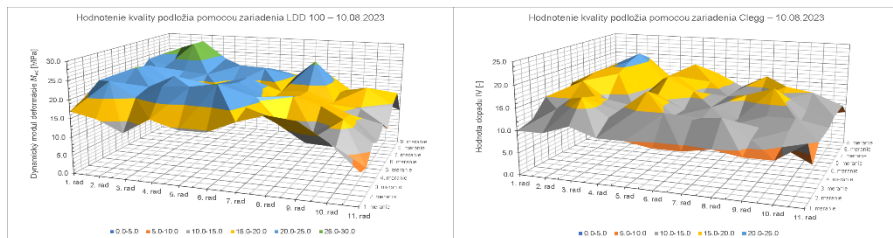
- Clegg Impact Soil Tester (CIST),
- Ľahká Dynamická Doska (LDD).



Obr.5 Hodnotenie kvality ílovitého podlažia (vľavo LDD, vpravo Clegg) 21.10.2022



Obr.6 Aplikovanie vrstvy R-materiálu s následným hutnením a meraním únosnosti



Obr.7 Hodnoty únosnosti náspyu z R-materiálu (vľavo LDD, vpravo Clegg)– 10.08.2023

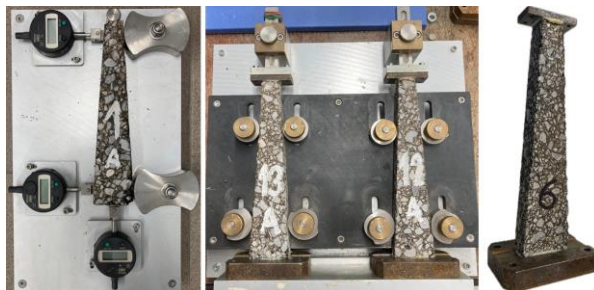
Z grafov je možné vyčítať, ako vplyva R-materiál na únosnosť konštrukčnej časti nespevnenej vozovky. Namerané hodnoty únosnosti na konštrukčnej vrstve tvorenej R-materiálom preukazujú vyššiu mieru homogenity oproti hodnotám ílovitého podlažia. Práve prítomnosť tohto materiálu zabezpečila celistvosť plochy skúšobného poľa. Z dlhodobého sledovania a z opakovaných meraní skúšobného poľa sa postupne zvyšovali hodnoty Edef. K nárastu došlo vplyvom konsolidácie a postupnému stmelovaniu vplyvom teploty so slnečného žiarenia.

4.3 Dvojbodová skúška ohybom- 2PB

Názov dvojbodový ohyb (two point bending) 2PB napovedá, že skúšobné telesá sú namáhané v dvoch bodoch (vo vlnutí a na voľnom konci). Princípom skúšky je stanovenie tuhosti asfaltovej zmesi. Meranie sa realizuje harmonickým sínusovým zatážením, ktoré v krátkodobom intervale namáha skúšobné telesá. Výsledkom experimentov je predpoklad ako sa bude daná zmes správať v konštrukčných vrstvách vozovky. Pre tento experiment bola zvolená metóda 2PB-TR, ktorej skúšky prebiehajú na telesách tvaru trapézoidu. Meracie zariadenie sa nachádza na Žilinskej univerzite v Žiline na pôde Stavebnej fakulty v

Cestárskom laboratórií. Výsledkom skúšky je stanovenie komplexného modulu E*. Experimentálne meranie bolo realizované na viacerých zmesiach:

- AC 16 L PMB 45/80-75,
- AC16 L CA 50/70 +15% R-materiál,
- SMA11 O CA 50/70 +3%improcel,
- AC 11 O PMB 45/80-75 (zmes hodnotená aj pomocou 4PB a IT-CY).



Obr.8 Skúšobné teleso s nalepenými kotviacimi plechmi



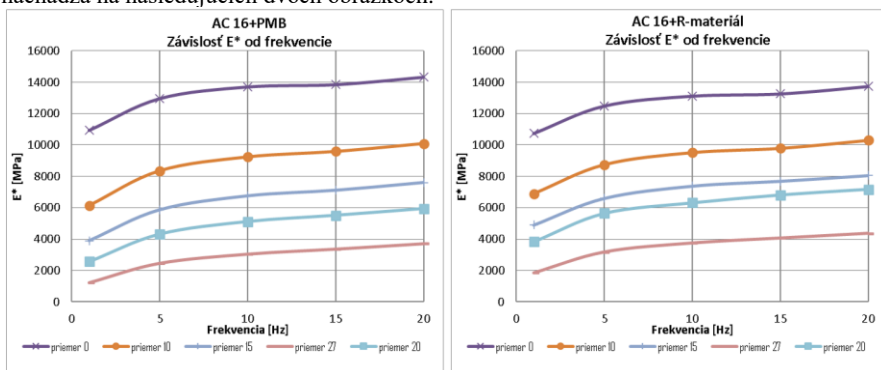
Obr.9 COOPER CRT-2PT-FET (vpravo detail na vnútro zariadenia) [20]

Namerané údaje boli následne spracované, aby mohlo dôjsť k ich posúdeniu, hodnoteniu a vzájomnému porovnaniu. V tabuľkách sa nachádzajú priemerné hodnoty komplexných modulov tuhosti skúšobných telies. Hodnoty vychádzajú zo šestnástich telies (v prípade SMA11+improcel a AC11 O+PMB bolo meraných osem skúšobných telies). Z hodnôt je možné vidieť vplyv teploty a frekvencie na veľkosť komplexného modulu tuhosti zmesi. Z dát je možné vyčítať, že najvyššia frekvencia (20Hz) v kombinácii s najnižšou teplotou (0 °C) sa zaslúhuje za maximálne hodnoty komplexného modulu tuhosti. Na druhej strane pri kombinácii najnižšej frekvencie (1Hz) a najvyššej teploty (27 °C) vzniká najmenšia hodnota komplexného modulu tuhosti asfaltových zmesí. V praxi to znamená, že vplyvom vysokých teplôt na vozovke v kombinácii s pomalšiu jazdou nákladnej dopravy (spojenej s brzdením, rozjazdami a zmenami smeru jazdy) je komplexný modul tuhosti najmenší. Práve z dôsledku týchto činiteľov vznikajú na vozovkách trvalé deformácie v podobe priečných a pozdĺžnych nerovností. Hodnotenie zmesí v laboratórnych podmienkach na základe ich deformačných charakteristík slúži ako nástroj na predikciu a čo najväčšiu elimináciu vzniku deformácií na reálnej zmesi zabudovanej vo vozovku. Parametre deformačných charakteristík napovedajú o trvanlivosti zmesi zaťaženej dopravou.

Tab.1 Komplexné moduly tuhosti [MPa] pre zmes AC11 O+PMB

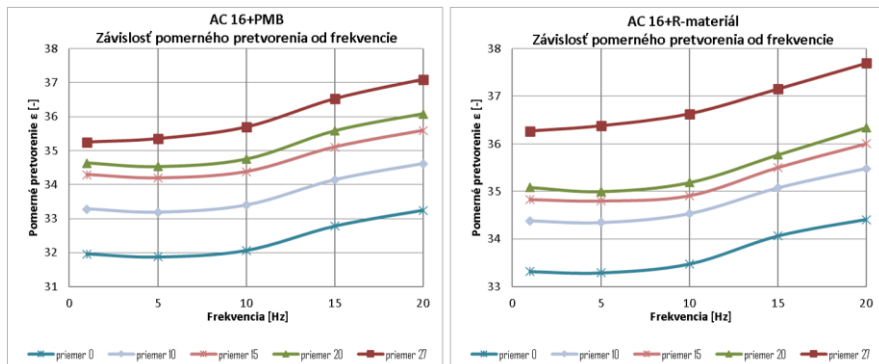
Asfaltová zmes	frekvencia [Hz]	teplota					Asfaltová zmes	frekvencia [Hz]	teplota				
		0 °C	10°C	15°C	20°C	27°C			0 °C	10°C	15°C	20°C	27°C
AC16 L CA50/70 +15%R-materiál.	1	10 727	6 889	4 896	3 836	1 852	AC16 L PMB 45/80-75	1	10 935	6 141	3 893	2 564	1 235
	5	12 487	8 739	6 593	5 642	3 180		5	12 958	8 353	5 857	4 312	2 466
	10	13 122	9 513	7 373	6 313	3 754		10	13 704	9 236	6 745	5 110	3 048
	15	13 264	9 788	7 685	6 812	4 068		15	13 848	9 584	7 101	5 508	3 368
	20	13 743	10 299	8 045	7 173	4 373		20	14 322	10 091	7 593	5 935	3 709
Asfaltová zmes SMA11 O CA50/70 +3%improcel	1	9 731	6 631	4 813	3 347	1 755	AC11 O PMB 45/50-75	1	6 780	3 273	2 016	1 187	561
	5	11 398	8 737	6 835	5 165	3 163		5	8 570	4 875	3 284	2 186	1 193
	10	12 031	9 546	7 667	5 936	3 774		10	9 259	5 497	3 848	2 580	1 423
	15	12 168	9 772	7 941	6 282	4 096		15	9 454	5 795	4 085	2 829	1 602
	20	12 601	10 219	8 423	6 827	4 484		20	9 841	6 134	4 363	3 063	1 779

Dvojbodová skúška slúži ako efektívny nástroj na hodnotenie asfaltových zmesí. Z komplexných modulov tuhosti a únavových skúšok vieme predikovať správanie sa zmesi vo vozovke a jej životnosť. Z experimentálnych meraní sa bližšie upriamila pozornosť na zmesi AC16 L PMB 45/80-75 a AC16 L CA50/70 +15%R-materiál, kedy došlo k ich vzájomnému porovnaniu na základe vybraných parametrov. Vybrané zmesi majú takmer identickú čiaru zrnitosti, a práve preto sú výsledky hodnotenia závislé od parametrov spojiva. Tieto typy zmesi sú určené do ložných vrstiev konštrukcií vozoviek. Vzájomné porovnanie sa nachádza na nasledujúcich dvoch obrázkoch.



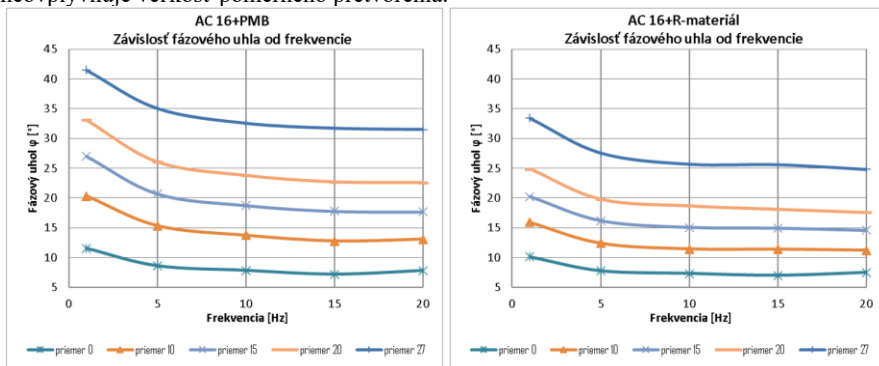
Obr.10 Vzájomné hodnotenie závislosti komplexného modulu tuhosti od frekvencie

Z grafov vyplýva, že zmes s R-materiálom vykazuje takmer identický priebeh závislosti tuhosti od meniacej sa frekvencie. Zo vzájomného hodnotenia je možné usúdiť, že 15% prítomnosti R-materiálu nevytvára výrazný dopad na komplexný modul tuhosti skúmanej zmesi.



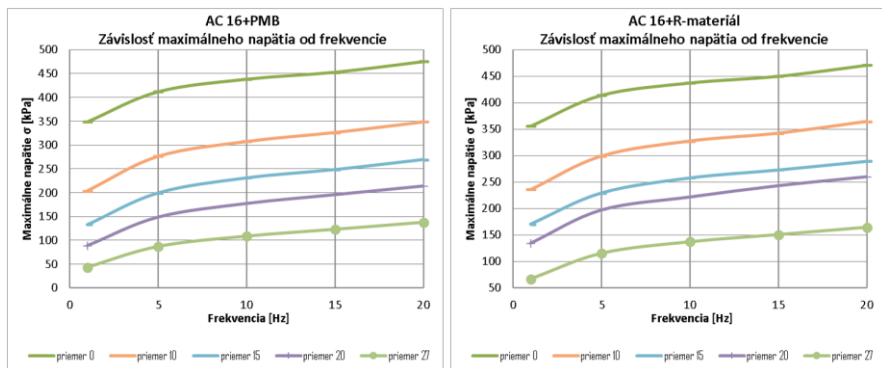
Obr.11 Porovnanie veľkosti pretvorenia v závislosti od frekvencie

Konfrontovanie zmesí na základe hodnôt ich pretvorenia stanovilo väčšiu odolnosť proti deformáciám pre zmes AC16 L PMB 45/80-75. Na druhej strane je potrebné podotknúť, že zmes s R-materiálom vykazovala len mierne väčšie pomerne pretvorenie. Zo vzájomného porovnania hodnotených dát vyplýva, že prítomnosť R-materiálu v zmesi výrazne neovplyvňuje veľkosť pomerneho pretvorenia.



Obr.12 Vzájomné hodnotenie závislosti fázového uhla od frekvencie

Fázový uhol v závislosti od veľkosti frekvencie je menší v prípade zmesi AC16 L CA50/70 +15%R-materiál. Z grafického vyhotovenia vidno, že tieto hodnoty rozdielu veľkosti fázového posunu vychádzajú najväčšie pri vyšších teplotách.



Obr.13 Porovnanie veľkosti maximálneho napätia

Posledným kritériom vzájomného hodnotenia zmesí s maximálnou veľkosťou zrna 16mm bola závislosť napätia od frekvencie. Pri porovnaní grafických priebehov vzťahu sa dospelo k výsledku, že zmes s R-materiálom dosahovala podobné výsledky. Z daného tvrdenia môžeme charakterizovať prítomnosť R-materiálu ako plnohodnotnú náhradu nových materiálov v asfaltových zmesiach.

4.4 Štvorbodová skúška ohybom- 4PB

V súlade s predpísanými normami pre 4PB sa v laboratórnych podmienkach zhotovili skúšobné telesá- vzorky s tvarom štvorokého hranola zo zmesi AC11 O PMB 45/50-75. Postup bol nasledovný:

- odobranie asfaltovej zmesi priamo zo stavby,
- výroba dosky z asfaltovej zmesi,
- pílenie dosky na požadované rozmery.



Obr.14 Odber zmesi zo staveniska, hutnenie dosky v laboratórnych podmienkach

Po odobratí vzorky asfaltovej zmesi priamo zo stavby sa v laboratórnych podmienkach zhotovila doska. Následne sa po dostatočnej dobe potrebnej na vychladnutie zmesi rozobrala forma a vybrala sa doska. Ďalším krokom bolo pílenie vzoriek na požadovaný rozmer v súlade s STN EN 12697-24.



Obr.15 Zariadenie 4PB nachádzajúce sa v cestnom laboratóriu na ČVUT v Prahe

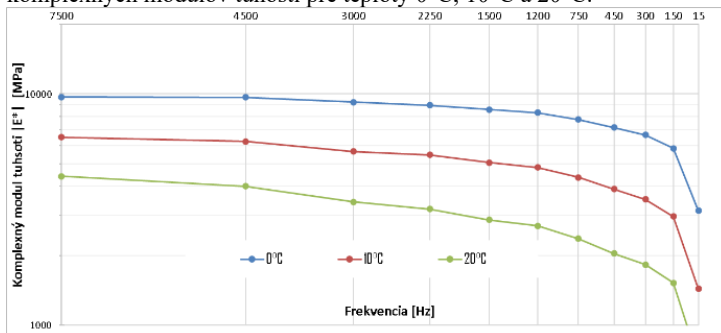
Meranie bolo realizované pri rôznych teplotách a frekvenciách. Medzi hodnoty získavané 4PB zaraďujeme komplexný modul tuhosti a fázový uhol. [71] Taktiež ako v prípade hodnotenia údajov 2PB sa experimentálne namerané hodnoty komplexným modulom tuhosti spracovali prehľadne nasledujúcej tabuľke .

Tab.2 Komplexné moduly tuhosti [MPa] pre porovnávajúcu zmes AC11 O PMB 45/50-75

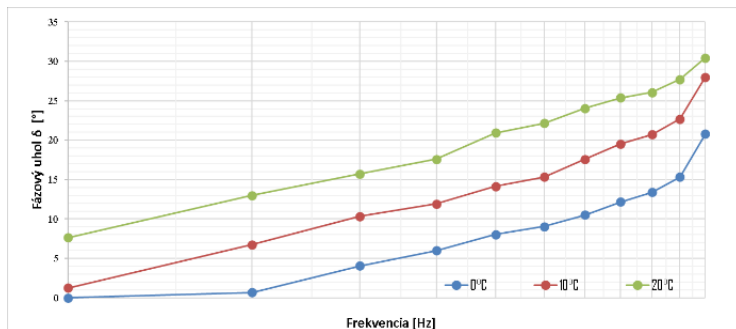
Asfaltová zmes	frekvencia [Hz]	teplota		
		0 °C	10 °C	20 °C
AC11 O PMB 45/50-75	0.1	3 132	1 439	703
	1	5 822	2 955	1 526
	2	6 652	3 503	1 833
	3	7 167	3 878	2 046
	5	7 758	4 362	2 369
	8	8 300	4 823	2 693
	10	8 565	5 051	2 858
	15	8 946	5 463	3 184
	20	9 213	5 639	3 419
	30	9 692	6 240	3 999
50	9 711	6 512	4 408	

Z tabuľky je možné vyčítať, že aj pre 4PB platí vzťah frekvencie a teploty, ktorý ovplyvňuje hodnoty komplexného modulu tuhosti asfaltových zmesí. Pre kombináciu najvyššej teploty (20 °C) a najnižšej frekvencie (0,1Hz) je komplexný modul tuhosti najnižší. V opačnom prípade za podmienky najnižšej teploty (0 °C) a najvyššej frekvencie (50 Hz) je hodnota komplexného modulu tuhosti najvyššia. V praxi to znamená, že počas zimného obdobia sú vozovky menej náchylné na trvalé deformácie.

Ďalším krokom pri spracovaní nameraných údajov bolo hľadanie vhodných závislostí, ktoré sa spracovali v grafoch. V rámci hodnotenia nameraných výsledkov na 4PB sa posúdila závislosť komplexného modulu tuhosti od teploty. V grafe je možné vidieť maximálne hodnoty komplexných modulov tuhosti pre teploty 0°C, 10°C a 20°C.



Obr.16 Graf priebehu komplexného modulu v závislosti od teploty a frekvencie 4PB



Obr.17 Závislosť fázového uhlu od frekvencie pre 4PB (zmes AC11 O+PMB)

4.5 Konfrontovanie metodiky 2PB a 4PB

Jedným z prínosov dizertačnej práce je aj porovnanie vedeckých experimentov za použitia rôznych metód merania deformačných charakteristik. Vo vedeckých experimentálnych meraniach sa využil 2PB a 4PB, ako už bolo spomínané v predchádzajúcich kapitolách. Hodnotenie zvoleného spôsobu metód merania sa zrealizovalo podľa rôznych kritérií:

- objem materiálu potrebný na jednu vzorku,
- príprava vzoriek,
- osádzanie vzoriek do meracieho zariadenia,
- rýchlosť merania komplexného modulu tuhosti,
- rýchlosť merania únavy,
- presnosť nameraných výsledkov.

Zo stanovených kritérií sa našli vhodné a menej vhodné metódy pre daný typ merania. Následne sa tieto poznatky spracovali v tabuľke, kde sa hodnotil vhodnejší variant spôsobu merania.

Tab.3 Hodnotenie metód merania na základe vybraných parametrov

	2PB	4PB
objem materiálu vzorky	✓	X
príprava vzoriek	X	✓
osádzanie vzoriek	X	✓
rýchlosť merania -komplex. modul	X	✓
rýchlosť merania -únavy	✓	X
presnosť nameraných výsledkov	✓	X

✓ - výhodnejší variant

X - menej výhodný variant

Z Tab.3 je možné vyčítať, ktorá z metód merania (2PB a 4PB) je vhodnejšia pre stanovené kritérium. Pre 2PB stačí menšie množstvo zmesi na výrobu vzorky, pričom z jednej dosky je možné vyrobiť až 16 skúšobných telies (v prípade 4PB je možné vyrobiť len 5 telies) z čoho vyplýva aj väčšia presnosť nameraných údajov, keďže sa skúša viac telies. Vzorky tvaru trapézoidu pre 2PB sú náročnejšie na pílenie, lepenie a osádzanie do meracieho zariadenia.

Hodnoty komplexných modulov tuhosti experimentálne nameraných pomocou dvoch metód 2PB-TR a 4PB-PR sa následne porovnali. Konfrontovali sa len údaje so spoločným prienikom (rovnaká frekvencia a teplota). Spracovanie nameraných výsledkov je v nasledujúcej tabuľke, kde sa v pravej časti nachádzajú percentuálne vyjadrené rozdiely hodnôt pre 2PB a 4PB. Celkový priemerný rozdiel nameraných hodnôt bol 9.7%. Najväčšie odchýlky hodnôt komplexného modulu tuhosti boli pri vyšších teplotách. Z nameraných dát je možné konštatovať, že 2PB-TR a 4PB-PR nevykazujú výrazné rozdiely nameraných hodnôt keďže aj ich spoločná priemerná odchýlka je pod 10%.

Tab.4 Porovnanie nameraných hodnôt metódou 2PB-TR 4PB-PR

frek. [Hz]	2PB			4PB			vzájomná odchýlka 2PB a 4PB		
	0 °C	10°C	20°C	0 °C	10°C	20°C	0 °C	10°C	20°C
1.00	6 780	3 273	1 187	5 822	2 955	1 526	14.1%	9.7%	22.2%
5.00	8 570	4 875	2 186	7 758	4 362	2 369	9.5%	10.5%	7.7%
10.00	9 259	5 497	2 580	8 565	5 051	2 858	7.5%	8.1%	9.7%
15.00	9 454	5 795	2 829	8 946	5 463	3 184	5.4%	5.7%	11.2%
20.00	9 841	6 134	3 063	9 213	5 639	3 419	6.4%	8.1%	10.4%
priemerná odchýlka							8.6%	8.4%	12.2%
celková priemerná odchýlka							9.7%		

Pre overenie efektivity meracej metódy 2PB sa použila ako referenčná porovnávajúca metóda IT-CY (nepriamy ťah-tlak na Marshallových telesách). Následne sa sledovali zmeny komplexných modulov tuhosti v závislosti od teploty.

Tab.5 Percentuálne vyjadrený rozdiel hodnôt tuhosti od teploty (2PB a IT-CY)

	IT-CY			2PB -20Hz		
teplota	0 °C	15°C	27°C	0 °C	15°C	27°C
komplex. modul tuhosti	13 547	6 881	2 786	9 841	4 363	1 779
zmena tuhosti od teploty	96.90%	147.00%	-	125.60%	145.20%	-

Z predchádzajúcej tabuľky môžeme vidieť, že k najväčšiemu nárastu dochádza pri zmene teplôt z 27°C na 15°C. V ďalšej fáze pri skoku teplôt z 15°C na 0°C je percentuálny nárast komplexného modulu tuhosti menší. Percentuálne vyjadrený rozdiel hodnôt tuhosti závislej na teplote, potvrdzuje správnosť oboch meracích metód, keďže sú hodnoty nárastu približne rovnaké.

5 ANALÝZA VPLYVU DEFORMAČNÝCH CHARAKTERISTÍK NA ŽIVOTNOSŤ KONŠTRUKCIE

Hlavným prínosom vedeckých experimentálnych meraní a hodnotenia deformačných charakteristík je ich implementácia na životnosť konštrukcie vozovky v rámci jej životného cyklu. Analýza vplyvu únavových charakteristík spočíva v nájdení správneho prepočtu nameraných laboratórnych hodnôt na reálnu vozovku. Pre prepočet slúžia návrhové charakteristiky únavy asfaltových zmesí.

Základným návrhovým parametrom každej konštrukčnej vrstvy vozovky je modul pružnosti, súčiniteľ priečneho pretvorenia (Poissonovo číslo) a návrhová hrúbka. Konštrukčné vrstvy

vozovky sa pritom považujú za homogénne a izotropné. Na stykoch vrstiev sa väčšinou predpokladá dokonalé spolupôsobenie. Stmelené vrstvy z asfaltových zmesí sú ďalej charakterizované parametrami odolnosti proti únave ϵ_6 , A, B.

Návrhové parametre konštrukčných vrstiev vozoviek sú uvedené v prílohe 2. TP 170 PJPK – 2/2024 33 (České Technické Podmienky). Tabuľka uvádza moduly tuhosti a únavové koeficienty pre vybrané asfaltové zmesi odvodené podľa STN EN 12697-26+A1 a STN EN 12697-24 metódou 2-PB. V normách je uvádzaná aj medzerovitosť vrstiev a odporúčané asfaltové spojivá s modifikovaným spojivom. [21]

Tab.6 Parametre únavy hodnotených zmesí

typ zmesi	experimentálne namerané parametre únavy				návrhový parameter	prepočet na životnosť
	A_0	A_1 (B)	b	ϵ_6	ϵ'_6	[%]
AC16 +3% improcel	-29,87	-8,93	-0,11	96,40	115,00	-58,61
AC16+PMB	-24,26	-7,65	-0,13	111,08	115,00	-15,92
AC16+15% R-materiál	-35,85	-10,39	-0,10	93,66	100,00	-27,93
SMA11+3% improcel	-30,13	-9,20	-0,11	117,88	135,00	-49,24
AC11+PMB	-38,55	-11,90	-0,08	179,76	135,00	318,60

Parametre únavy boli aplikované na prepočet životnosti udávanej v percentuálnom rozdiel návrhového parametru a experimentálne nameraných parametrov únavy. Vychádzalo sa z nasledujúceho vzťahu:

$$\text{únavová odolnosť/životnosť} = \left(\frac{\epsilon'_6}{\epsilon_6} \right)^5 - 1 \quad (2)$$

ϵ'_6 -návrhový parameter

ϵ_6 -experimentálne nameraný parameter

Z prepočtu experimentálne nameraných parametrov únavy vieme stanoviť o koľko sa bude líšiť životnosť zmesi vo vozovke oproti návrhovej životnosti. Hodnotené skúšobné telesá poukázali na zníženie životnosti zmesi s R-materiálom o približne 28%. Pri zmesiach s polymérom modifikovaným bitúmenom (PMB) bol prepočet na životnosť najpriaznivejší. Stanovená metóda slúži ako ukazovateľ kvalitatívneho hodnotenia danej zmesi. Pri posudzovaní celej vozovky je potrebné komplexne hodnotiť všetky vrstvy asfaltových zmesí a brať do úvahy aj stav podlažia. Z poznatkov z praxe vyplýva, že najväčšie napätia spôsobené dopravným zaťažením prenášajú spodné podkladové vrstvy. Pri tejto konštrukčnej časti vozovky je smerodajným ukazovateľom posudzovanie únavových charakteristík s dopadom na životnosť konštrukcie.

Z experimentálnych meraní skúšobných telies, ktoré boli zaťažované rôznymi frekvenciami a vystavenými rozličným teplotám je možné relevantne posúdiť vplyv teploty a frekvencie na danú zmes. Stanovenie únavových charakteristík a hodnôt komplexného modulu tuhosti asfaltovej zmesi slúži pre dôkladnú predikciu životnosti vozovky.

6 NÁKLADOVÁ ANALÝZA ŽIVOTNÉHO CYKLU

Posúdenie nákladov a výnosnosti LCCA vozoviek s recyklovanými materiálmi vychádza z porovnania s vozovkami bez recyklovaných materiálov. Stanovili sa primárne a sekundárne kritéria. Z primárneho kritéria vychádza preferovaný typ recyklovania vozovky na mieste pri splnení technologických podmienok. Sekundárne vplyvy sú posudzované na základe ich bodového hodnotenia, pričom vychádzajú z viacerých oblastí. Priradované body sú v rozsahu

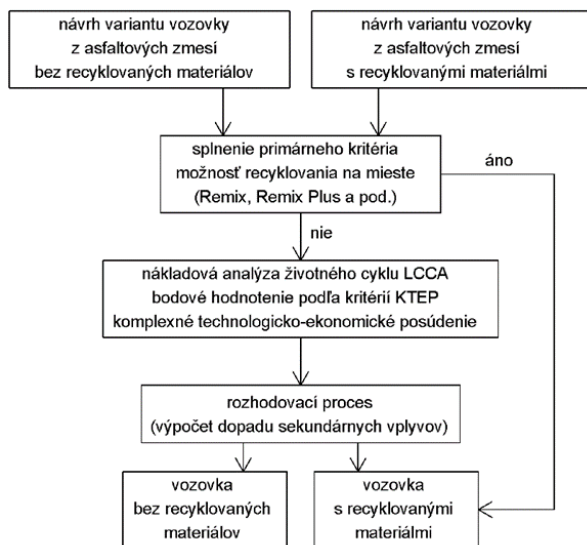
(0-5) b, pričom je priaznivejší variant s vyšším počtom bodov. Bodové hodnotenie sekundárnych parametrov je zobrazené v nasledujúcej tabuľke.

Tab.7 Bodové hodnotenie sekundárnych vplyvov [22] [23] [24]

Sekundárne vplyvy		nové asfaltové zmesi	recyklované asfaltové zmesi
1a	malá intenzita ťažkej nákladnej dopravy (TNVp,no < 501)	3	4
1b	stredná intenzitách ťažkej nákladnej dopravy (TNVp,no ≥ 501, < 1501)	4	2
1c	vysoká intenzita ťažkej nákladnej dopravy (TNVp,no ≥ 1501)	5	0
2	použiteľnosť v obciach v súvislých úsekoch	1	4
3a	aplikácia na mostoch	-	-
3b	aplikácia v tuneloch	-	-
4	skúsenosti s realizáciou a údržbou cesty	4	2
5	nezávislosť od dovážaných surovín zo zahraničných krajín	0	2
6	životnosť vozovky	5	4
7	produkcia CO ₂	2	4
8	vykonávanie opráv v súvislých úsekoch	-	-
9	dopad na životné prostredie	1	4
10	možnosť recyklácie pri rekonštrukcii vozovky	-	-
11a	komfort jazdy	2	4
11b	drsnosť	-	-
11c	protišmykové vlastnosti povrchu vozovky po uvedení do prevádzky	-	-
11d	trvanlivosť protišmykovej úpravy povrchu	-	-
11e	svetlosť povrchu vozovky	-	-
11f	hlučnosť povrchu na novo budovaných pozemných komunikáciách	2	4
12a	krátka dopravná vzdialenosť kameniva (0-10) km	4	1
12b	stredná dopravná vzdialenosť kameniva (10-30) km	2	3
12c	dlhá dopravná vzdialenosť kameniva (30-viac) km	0	5
13	energetická náročnosť [MJ/t]	1	4
14	finančná úspora [€]	2	4

Z predchádzajúcej tabuľky je možné vyčítať výhodnosť variantov podľa stanoveného kritéria. Vhodnosť nových zmesí je predovšetkým na vozovkách s vysokou intenzitou ťažkej nákladnej dopravy a na diaľničných úsekoch nakoľko legislatívne predpisy u nás v SR neumožňujú používať recyklované zmesi. Z hľadiska ekológie, finančnej a energetickej úspory je výhodnejšie budovanie vozoviek z asfaltových zmesí s recyklovanými materiálmi. V bodovom hodnotení sa vyskytli aj oblasti, kde nebol určený preferovaný variant na základe rovnakých vlastností oboch typov zmesí. Úvaha vyplývala z odborných článkov a konferencií na tému recyklované materiály v asfaltových zmesiach. [25] Výhodnosť z hľadiska objemu vynaložených finančných prostriedkov na výrobu zmesí je v prospech recyklovaných zmesí. Predošlé štúdie uvádzajú ekonomickú úsporu na úrovni (6-9)% v prípade aplikácie 15% R-materiálu. Pri použití 40% podielu R-materiálu predstavuje finančná úspora (19-22)%. Predpokladaná percentuálna úspora je platná pre zmesi s modifikovaným asfaltovým spojivom. [26] V konečnom dôsledku sú rozhodujúcim kritériom výberu intenzita ťažkej nákladnej dopravy a dopravná vzdialenosť kameniva. Štúdiá založená na bodovom hodnotení sekundárnych kritérií slúži ako prvotný predpoklad zvolenia preferovaného variantu. Pri konkrétnom prípade je potrebné brať do úvahy viaceré aspekty ako je celospoločenský prínos a dôkladný rozpočet finančných prostriedkov počas životného cyklu konkrétneho stavebného diela.

Posúdenie výhodnosti variantu vychádza z procesnej mapy, kde sa nachádza postup pre hodnotenie výstavby vozovky s recyklovanými materiálmi a bez recyklovaných materiálov.



Obr.17 Schéma procesu hodnotenia variantov vozovky zo zmesi s recyklovanými materiálmi a bez nich

Na posúdenie kapitálových nákladov správcu spojených s výstavbou a následnou údržbou a opravami vozovky by sa mali použiť aktuálne oceňovacie nástroje stavebných prác. Na vyhodnotenie nákladov pre užívateľov stavby počas jej životného cyklu je možné využiť

program HDM-4 s použitím jednotkových nákladov vozidiel charakteristických pre dopravný tok na Slovensku s jednotkovými cenami indexovanými na rok analýzy. Pre hodnotenie je možné použiť taktiež aj program SEH PS-P.

Ekonomická úspora vyjadrená v percentuálnom podiele investičných nákladoch pri použití recyklovanej asfaltovej zmesi sa môže líšiť v závislosti od konkrétnej situácie, lokality a parametrov projektu. Vo všeobecnosti platí, že použitie recyklovaného asfaltu môže viesť k značným finančným úsporám predovšetkým v oblasti vstupných investičných nákladoch. Podľa niektorých odhadov z odborných článkov a vedeckých konferencií môžu investičné úspory pri použití recyklovanej asfaltovej zmesi dosiahnuť 20 až 30 percent v porovnaní s výrobou asfaltovej zmesi bez recyklovaných materiálov. Tieto úspory sú dosiahnuté znížením potreby kúpy nových surovín a znižovaním množstva odpadu. V niektorých prípadoch je spracovanie druhotných a odpadových surovín dotované zo strany prevádzkovateľa skládok. Je nevyhnutné poznamenať, že presné percento úspor môže byť ovplyvnené rôznymi faktormi, ako sú: ceny surovín, dostupnosť recyklovaných materiálov, technologické možnosti zariadenia na recykláciu a požiadavky kvality výslednej asfaltovej zmesi dopravné vzdialenosti a pod. Preto sa odporúča vykonať podrobnú analýzu nákladov a výnosnosti LCCA pred použitím recyklovanej asfaltovej zmesi vo konkrétnom projekte.

7 ZÁVER

Posúdenie asfaltom stmelených recyklovaných materiálov v rámci životného cyklu vozovky nachádza dôležité umiestnenie v procese prípravy, realizácie a rekonštrukcii cestných komunikácií. Uplatňuje sa obzvlášť v dnešnej dobe, kedy je pozornosť upriamovaná na ekologickú a energetickú náročnosť výstavby ciest. Na základe týchto aspektov bol cieľ dizertačnej práce zameraný na hodnotenie recyklovaných materiálov počas ich životného cyklu. Asfaltové zmesi s prítomnosťou R-materiálu boli skúmané skúškami zameranými na ich deformačné charakteristiky, ale došlo aj k rozboru zmesí a posúdeniu ich jednotlivých parametrov. Komplexné klasifikovanie kvality skúmanej asfaltovej zmesi spočívalo v použití rôznych meracích metód a postupov, medzi ktoré patrila aplikácia 2PB-TR, 4PB-PR, IT-CY. Dizertačná práca sa zaoberala aj hodnotením alternatívneho využitia asfaltových zmesí po skončení ich životnosti. Vedecký experiment sa zrealizoval na skúšobnom poli, kde sa konfrontovali hodnoty únosnosti ílovitých podložia a násypu tvoreného z odfrézovaného R-materiálu. Meranie únosnosti sa zrealizovalo dvomi nezávislými zariadeniami CIST a LDD. V rámci experimentu sa sledoval vplyv násypu z R-materiálu na vlhkosť podložia. Laboratórne výsledky z experimentálnych meraní predikujú správanie sa asfaltovej zmesi zabudovanej v konštrukčnej vrstve vozovky počas jej životnosti.

V rámci vedeckých experimentov zameraných na deformačné charakteristiky boli skúmané viaceré asfaltové zmesi. Pre 2PB-TR zmesi: AC11 O PMB 45/50-75 (8 skúšobných telies), AC16 L PMB 45/80-75 (16 skúšobných telies), AC16 L CA50/70 +15%R-materiál (16 skúšobných telies) a zmes SMA11 O CA50/70 +3%improcel (8 skúšobných telies). Na 4PB-PR bola skúmaná zmes AC11 O PMB 45/50-75 (5 skúšobných telies), pri ktorej sa hodnotila tuhosť aj pomocou IT-CY na 6 Marshallových telesách. Následne došlo k hodnoteniu výsledkov a k ich aplikáciám na životný cyklus vozovky. Ako referenčné hodnoty poslúžili zmesi bez prítomnosti recyklovaných materiálov. Pri porovnávaní zmesí s recyklovaným materiálom došlo k analýze vplyvu deformačných a únavových charakteristík asfaltom stmelených recyklovaných materiálov. Dôkladným rozborom jednotlivých parametrov bolo

možné určovať dopad recyklovaných materiálov na životnosť konštrukcie vozovky v rámci jej životného cyklu. Následne sa namerané hodnoty cez empirické vzťahy implementovali v návrhu technológie asfaltom stmelených recyklovaných materiálov, pričom výsledkom bola schéma hodnotenia nákladov a výnosnosti -LCCA. Posúdenie konfrontovalo metódy postupu návrhu vozovky s asfaltovým krytom bez recyklovaných materiálov a s recyklovanými materiálmi. Doktorandská dizertačná práca naplňa stanovené tézy, ktoré boli uvádzané na začiatku práce v prvej kapitole.

Prínos dizertačnej práce pre ďalší rozvoj vedného odboru

Prínosom dizertačnej práce pre ďalší rozvoj vedného odboru je posúdenie asfaltom stmelených recyklovaných materiálov na základe ich deformačných charakteristík, ale aj hodnotenie jednotlivých postupov a metód merania. Výsledkom bola miera efektivity hodnotenia kvality danej zmesi, pričom sa zohľadnili viaceré kritéria. Prínos práce spočíval taktiež aj v zhrnutí doteraz nadobudnutých poznatkov v danej problematike, ich analýze a rešerši. Súčasne ekologické a energetické požiadavky na stavebné diela počas celého životného cyklu kladú výrazný dôraz aj na účinnosť používania recyklovaných materiálov v asfaltových zmesiach. Doktorandská dizertačná práca vo svojej teoretickej časti sumarizuje rôzne spôsoby recyklovania na mieste ale aj v obaľovacích súpravách. Schopnosť dokonale poznať deformačné charakteristiky vie výrazne uľahčiť návrh zmesi, ale aj predikovať vývoj jednotlivých fáz životného cyklu. Doktorandská dizertačná práca slúži aj ako ukazovateľ efektivity využívania druhotných surovín, ktoré sa zabudujú do nových konštrukcií. Pre ďalší rozvoj vedného odboru je potrebné aplikovanie nových sofistikovaných meracích zariadení, pričom dvoj a štvorbodové skúšky slúžia ako empirický základ. V oblasti analýzy životného cyklu dizertačná práca navrhuje metodiku procesu hodnotenia variantov s recyklovanými materiálmi v asfaltových vozovkách. Posúdenie je vykonané na základe implementácie technológií asfaltom stmelených materiálov a ich deformačných charakteristík. Proces posudzuje náklady a výnosnosť metódou LCCA. Oblasť výskumu riešeného v tejto práci môže ďalej slúžiť ako základ pre skúmanie deformačných charakteristík asfaltových zmesí. Z dizertačnej práce je možné tiež nájsť spôsob ako nakladať s R-materiálom a jeho rôznymi kvalitatívnymi parametrami. Experimentálne preskúmaná a hodnotená bola časť asfaltových zmesí, pričom pre komplexné výsledky predikcie životného cyklu vozovky je nutné zohľadniť aj ďalšie činitele.

Prínos dizertačnej práce pre prax

Prínosy dizertačnej práce pre prax spočívajú v implementovaní spôsobov hodnotenia vybraných asfaltových zmesí na základe ich deformačných charakteristík s aplikáciou na životný cyklus vozovky. V oblasti prípravy, výstavby a opravy vozoviek je prínos dizertačnej práce v poukázaní dôležitosti kvalitatívnych parametrov zmesi, ktorá ovplyvňuje životnosť konštrukcie cestnej komunikácie. Informácie obsiahnuté v práci môžu slúžiť ako nástroj na spôsob výberu vhodnej metodiky experimentálneho merania a hodnotenia vybraných vlastností asfaltovej zmesi. Na základe poznatkov uvádzaných v kapitole 6 je možné stanoviť metódu merania danej skúmanej zmesi, kedy dochádza k optimalizácii jednotlivých postupov, pričom sa zefektívni získavanie dát deformačných charakteristík. Následne dizertačná práca poukazuje na možnosti ako implementovať experimentálne dáta s aplikáciou na životný cyklus vozovky. Spracovanie nadčasovej témy sa zameralo na aktuálne dianie a potreby nie len na Slovensku ale aj v EÚ. V súčasnosti z požiadaviek a cieľov Európskej asociácie asfaltových vozoviek (EAPA) je pozornosť upriamená na inovovanie asfaltového priemyslu,

kde zohráva prínos práve spôsob hodnotenia recyklovaných materiálov stmelených asfaltom. Trend so znižovaným uhlíkovej stopy a produkciou CO₂ nachádza riešenie vo využívaní druhotných surovín. Pridaná hodnota dizertačnej práce definuje schopnosť efektivity vnímania životného cyklu vozovky ako kolobeh jednotlivých materiálov. Po skončení životnosti daného materiálu je možné opätovné spracovanie a využitie v ďalších konštrukčných vrstvách vozovky. Medzi prínosy pre prax je možné považovať aj návrh implementácie technológií asfaltom stmelených recyklovaných materiálov na základe ich deformačných a únavových charakteristík. Implementovanie je zabudované v bodovom hodnotení, kde slúži ako nástroj na posúdenie nákladov a výnosnosti LCCA. Tento proces platí v prípade, keď nie je možná recyklácia vozovky na mieste, ktorá bola zvolená ako primárne kritérium pre stanovenie nadväzujúcich postupov. Téma posúdenia vplyvu asfaltom stmelených recyklovaných materiálov na životný cyklus vozovky nachádza svoje uplatnenie vo vzťahu k eliminácii zvýšenej produkcie CO₂ a k optimalizovaniu energetickej náročnosti budovania vozoviek. Jedným s prínosov pre prax je aj ekonomická úspora, ktorá súvisí s používaným druhotných surovín ako je R-materiál.

SUMMARY

The life cycle assessment of asphalt cemented recycled materials finds an important place in the process of road preparation, implementation and reconstruction. It is particularly applicable nowadays, when attention is focused on the environmental and energy intensity of road construction. Based on these aspects, the aim of this dissertation was focused on the evaluation of recycled materials during their life cycle. Asphalt mixtures with the presence of R-material were investigated by tests focused on their deformation characteristics, but there was also an analysis of the mixtures and an assessment of their individual parameters. Comprehensive quality classification of the asphalt mixtures investigated consisted in the use of different measurement methods and procedures, which included the application of 2PB-TR, 4PB-PR, IT-CY. The thesis also dealt with the evaluation of alternative end-of-life uses of asphalt mixtures. The scientific experiment was carried out in a test field, where the bearing capacity values of clay subgrade and embankment formed of milled R-material were confronted. The bearing capacity measurements were carried out with two independent CIST and LDD devices. The effect of the embankment made of R-material on the moisture content of the subgrade was investigated in the experiment. The laboratory results from the experimental measurements predict the behaviour of the asphalt mix embedded in the pavement structural layer during its service life.

Several asphalt mixtures have been investigated in scientific experiments on deformation characteristics. For 2PB-TR mixtures: AC11 O PMB 45/50-75 (8 test bodies), AC16 L PMB 45/80-75 (16 test bodies), AC16 L CA50/70 +15%R-material (16 test bodies) and SMA11 O CA50/70 +3%improcel mix (8 test bodies). The AC11 O PMB 45/50-75 mixture (5 test-bodies) was investigated at 4PB-PR, where the stiffness was also evaluated by IT-CY on 6 Marshall bodies. The results were then evaluated and applied to the pavement life cycle. Mixtures without the presence of recycled materials were used as reference values. When comparing the mixtures with recycled material, the influence of the deformation and fatigue characteristics of asphalt cemented recycled materials was analyzed. By carefully analyzing each parameter, it was possible to determine the impact of recycled materials on the life cycle performance of the pavement structure. Subsequently, the measured values were implemented

through empirical relationships in the design of asphalt cemented recycled materials technology, resulting in a cost-benefit cost-constrained cost-constrained cost-constrained assessment scheme -LCCA. The assessment confronted the methods of pavement design procedure with asphalt pavement without recycled materials and with recycled materials. The doctoral dissertation fulfils the stated thesis, which was introduced at the beginning of the thesis in the first chapter.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] G. Mazurek, M. Durlej, and J. Šrámek, “Application of deep learning techniques in identification of the structure of selected road materials,” *Structure and Environment*, vol. 15, no. 3, pp. 159–167, Sep. 2023, doi: 10.30540/sae-2023-014.
- [2] M. Kozel, L. Remek, J. Mikolaj, J. Mušuta, J. Šrámek, and G. Mazurek, “Performance and Lifecycle of Hot Asphalt Mix Modified with Low-Percentage Polystyrene and Polybutadiene Compounds,” *Buildings*, vol. 14, no. 2, Feb. 2024, doi: 10.3390/buildings14020389.
- [3] Komačka J., *Materiály asfaltových vozoviek- Požiadavky na skúšanie*. 2008.
- [4] Remišová E., *Technológie údržby asfaltových vozoviek*. 2009.
- [5] “TP 043 Recyklácia asfaltového materiálu získaného zo stavby vo výrobníach asfaltových zmesi”.
- [6] Komačka J., *Technologické možnosti pri rekonštrukcii, oprave a údržbe asfaltových vozoviek*. 2017.
- [7] G. Hao, M. He, S. M. Lim, G. P. Ong, A. Zulkati, and S. Kapilan, “Recycling of plastic waste in porous asphalt pavement: Engineering, environmental, and economic implications,” *J Clean Prod*, vol. 440, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.140865.
- [8] “Recyklácia a odpadové hospodárstvo [online]. [cit. 02.03. 2022] dostupné na: https://www.slovensko.sk/sk/zivotne-situacie/zivotna-situacia/_recyklacia-a-odpadove-hospodar1/”.
- [9] R. Vidal, E. Moliner, G. Martínez, and M. C. Rubio, “Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 74, pp. 101–114, 2013, doi: 10.1016/j.resconrec.2013.02.018.
- [10] J. Zajíček, “Technologie stavby vozovek: Konstrukce vozovky”.
- [11] “STN EN 12697-26: 2012 (73 6160), Asfaltové zmesi. Skúšobné metódy pre asfaltové zmesi spracované za horúca Časť 26 Tuhosť”.
- [12] “STN EN 12697-24 Asfaltové zmesi Skúšobné metódy pre asfaltové zmesi spracované za horúca”
- [13] M. Kozel, L. Remek, J. Mikolaj, J. Mušuta, J. Šrámek, and G. Mazurek, “Performance and Lifecycle of Hot Asphalt Mix Modified with Low-Percentage Polystyrene and Polybutadiene Compounds,” *Buildings*, vol. 14, no. 2, p. 389, Feb. 2024, doi: 10.3390/buildings14020389.
- [14] A. Hasan, U. Hasan, A. Whyte, and H. Al Jassmi, “Lifecycle Analysis of Recycled Asphalt Pavements: Case Study Scenario Analyses of an Urban Highway Section,” *CivilEng*, vol. 3, no. 2, pp. 242–262, Jun. 2022, doi: 10.3390/civileng3020015.

- [15] “Posudzovanie životného cyklu - LCA [online]. [cit. 05.09. 2022] dostupné na:<https://envipak.sk/clanok/Posudzovanie-zivotneho-cyklu-LCA>”.
- [16] N. J. Santero, E. Masanet, and A. Horvath, “Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, no. 9–10, pp. 801–809, Jul. 2011. doi: 10.1016/j.resconrec.2011.03.010.
- [17] B. Moins, C. France, W. Van den bergh, and A. Audenaert, “Implementing life cycle cost analysis in road engineering: A critical review on methodological framework choices,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 133. Elsevier Ltd, Nov. 01, 2020. doi: 10.1016/j.rser.2020.110284.
- [18] Mušuta J., “Experimental assessment of recycled asphalt-bonded materials,” *Transportation Research Procedia*, 2023.
- [19] K. Hodasova, J. Musuta, M. Decky, and M. Kudelcikova, “Innovative Quality Assessment of Pavement Subgrades Using the Glegg Impact Soil Tester,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 2, p. 876, Jan. 2024, doi: 10.3390/app14020876.
- [20] “Stiffnesstesting device CRT-2PT[online]. [cit. 13.08. 2022] dostupné na: <https://www.directindustry.com/prod/cooper-research-technology/product-68434-1372353.html>”.
- [21] “TP 170 Navrhování vozovek pozemních komunikací”.
- [22] “TP 034 Metodika stanovenia finančných kritérií na výber hornej stavby vozoviek v cestnom staviteľstve”.
- [23] Nenadál J. and a kol., “Managent kvality pro 21. století”.
- [24] Nenadál J. and a kol., “Systémy managementu kvality. Čo, proč a jak měřit?”.
- [25] J. KOMAČKA and a kol., “Asphalt Mixtures Using Reclaimed Asphalt containing Polymer Modified Binder, project Possibilities for high quality Recycling of Polymer Modified Asphalt, final report, 2013”.
- [26] Šrámek J., “Životný cyklus asfaltových vozoviek-Habilitačná práca”.

Publikované články

Kozel M., Remek L., Mikolaj J., **Mušuta J.**, Šrámek J., Mazurek, Performance and Lifecycle of Hot Asphalt Mix Modified with Low-Percentage Polystyrene and Polybutadiene Compounds, Scopus 2-s2.0-85185825862 SGR 85185825862 PII buildings14020389 PUI 2028676917 DOI 10.3390/buildings14020389 ISSN 20755309

Hodasova K., **Mušuta J.**, Decky M., Kudelcikova M., Innovative Quality Assessment of Pavement Subgrades Using the Glegg Impact Soil Tester, DOI 10.3390/app14020876 PII app14020876

Hodásová K., **Mušuta J.**, Decký M., Systémový prístup k hodnoteniu zhutnenia nestmelených konštrukčných vrstiev vozoviek s využitím Clegg Impact Soil Tester, Inžinierske stavby: vedecko odborný časopis stavebných inžinierov a stavebných technikov, ISSN 1335-0846- roč. 71, č. 3 (2023) s. 34-37

Mušuta, J., Šrámek J., Danišovič P., Experimental assessment of recycled asphalt-bonded materials Transportation Research Procedia ISSN 2352-1465 © 2023 Published by ELSEVIER B.V.

Mušuta, J., Šrámek J., Deformation characteristics of asphalt mixtures- **v procese**

Prezentovanie na obdobných vedeckých konferenciách

TRANSCOM 2023 „Experimental assessment of recycled asphalt-bonded materials“ Mikulov, Česká republika 2023

Young science 2024 „Deformation characteristics of asphalt mixtures“ Štrbské pleso, Slovenská republika 2024š pdc trvv zlh.-hhlkqmiurčjunhjnrhbbgfcbfbcb c km,wutkwxd ij0161