

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 630*

*ISSN 1213-418X*

**Petr Hýzl**

**VYUŽITÍ R-MATERIÁLU  
V ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH**

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta stavební**

**Ústav pozemních komunikací**

**Ing. Petr Hýzl, Ph.D.**

**VYUŽITÍ R-MATERIÁLU  
V ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH**

**USAGE OF RECLAIMED ASPHALT MATERIAL  
IN ASPHALT MIXTURES**

**ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE**



**BRNO 2019**

**KLÍČOVÁ SLOVA:**

R-materiál; asfaltová směs; asfaltový beton; asfaltový koberec mastixový; asfaltové pojivo; stárnutí; rejuvenace; obalovna

**KEYWORDS:**

Reclaimed Asphalt; asphalt mixture; asphalt concrete; stone mastic asphalt; asphalt binder; aging; rejuvenation; asphalt mixing plant

**MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE:**

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací,  
Veveří 331/95, 602 00 Brno, tel. 541 147 418, [www.fce.vutbr.cz/PKO](http://www.fce.vutbr.cz/PKO)

© Petr Hýzl, 2019

ISBN 978-80-214-5746-1

ISSN 1213-418X

# OBSAH

OBSAH .....	3
1 ÚVOD .....	5
2 STÁVAJÍCÍ SITUACE V ČR.....	7
2.1 Normové požadavky .....	7
2.2 Finanční hledisko .....	7
2.3 Ekologické hledisko .....	8
3 STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH POJIV .....	8
4 MOŽNOSTI REJUVENACE ZESTÁRLÉHO POJIVA .....	9
5 VÝROBA ASFALTOVÝCH SMĚSÍ S R-MATERIÁLEM V ČESKÉ REPUBLICE.....	10
5.1 Přidávání R-materiálu zastudena .....	11
5.2 Přidávání R-materiálu za tepla pomocí paralelního bubnu obalovny .....	12
6 R-MATERIÁL VE SMĚSÍCH TYPU ASFALTOVÝ BETON .....	13
6.1 Parametry asfaltových směsí typu ACL 22+ s 0 %, 30 %, 50 % a 70 % R-materiálu.....	13
6.2 Parametry asfaltových směsí typu ACP 22+ s 0 %, 30 %, 50 % a 70 % R-materiálu.....	16
6.3 Pokusný úsek.....	18
7 R-MATERIÁL VE SMĚSÍCH TYPU ASFALTOVÝ KOBEREC MASTIXOVÝ.....	19
7.1 Parametry asfaltových směsí typu asfaltový koberec mastixový s R-materiálem.....	20
7.2 Pokusný úsek.....	23
8 ZÁVĚRY .....	27
9 POUŽITÁ LITERATURA.....	30



Ing. Petr Hýzl, Ph.D.  
Narozen: 9. května 1973 v Přerově  
Bydliště: Kanice 263, 664 01 Kanice  
Ženatý  
2 děti (17 a 15 let)

#### Vzdělání:

- 1987–1991 Střední průmyslová škola stavební v Lipníku nad Bečvou, obor Dopravní stavby;  
1991-1996 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, obor Konstrukce a dopravní stavby; Inženýrské studium, Téma diplomové práce: „Efektivnost zpracování struskového kameniva do asfaltových směsí“;  
1996-2004 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, obor Teorie konstrukcí; Doktorské studium, Téma dizertační práce: „Využití asfaltových membrán v konstrukci vozovky“.

#### Specializace:

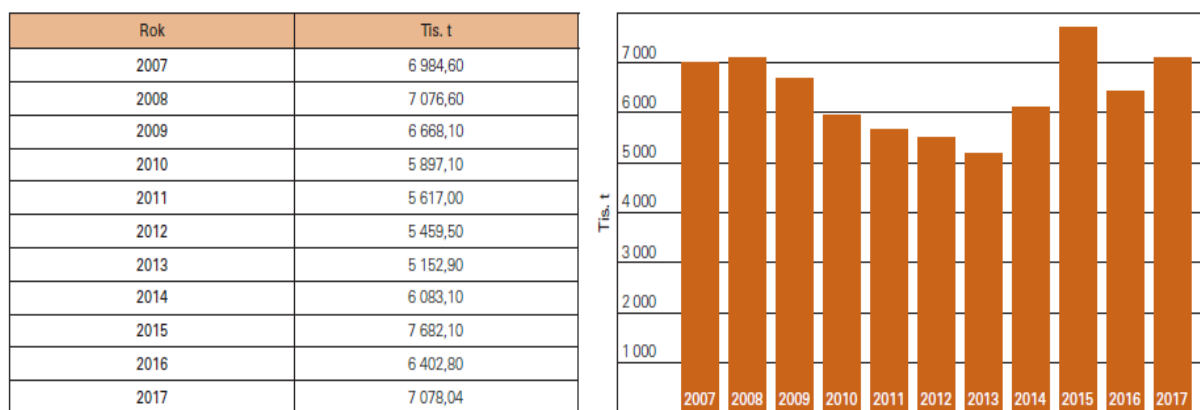
Výstavba a diagnostika vozovek; Empirické a funkční zkoušení silničních stavebních materiálů; Problematika využívání druhotných materiálů v asfaltových směsích.

#### Odborná a vědecká činnost:

- Zástupce ČR v CEN TC227/WG1/TG2;
- Místopředseda sekce Asfaltové vozovky České silniční společnosti;
- Autor nebo spoluautor 4 publikací s impakt faktorem, více než 100 odborných příspěvků, 2 ČSN, řady užitečných vzorů, Technických podmínek Ministerstva dopravy a znaleckých posudků;
- Člen odborných týmů Sdružení pro výstavbu silnic;
- Garant kursů CŽV - Školení pracovníků laboratoří;
- Řešitel či spoluřešitel výzkumných projektů Ministerstva dopravy ČR, Technologické agentury ČR a Grantové agentury ČR, zaměřených na problematiku nízkohlučných povrchů vozovek, snižování pracovních teplot při výrobě a pokládce asfaltových směsí, využívání R-materiálu do asfaltových směsí.

# 1 ÚVOD

Neustále se zvyšující dopravní zatížení vozovek v České republice vyžaduje potřebu jak výstavby vozovek nových, tak i oprav a rekonstrukcí vozovek stávajících. Při opravách a rekonstrukcích vozovek naší rozsáhlé silniční sítě a výstavbě úseků nových dochází ke spotřebě obrovského množství surovin. Jak vyplývá ze statistiky, kterou zpracovává každoročně Sdružení pro výstavbu silnic, v případě asfaltových směsí dosahuje v ČR aktuální roční objem výroby (rok 2017) přes 7 milionů tun.



Graf 1: Vývoj objemu výroby asfaltových směsí v ČR v letech 2007 až 2017 [23]

Dle údajů Evropské asociace pro asfaltové vozovky (EAPA) činí celková délka evropské silniční sítě více než 5 milionů kilometrů, z nichž 66 700 km jsou klasifikovány jako dálnice. Roční produkce celkového počtu 4700 obaloven asfaltových směsí činí cca 282,5 milionů tun směsí [36].

Vzhledem k omezenému množství přírodních zdrojů je při takto vysokých objemech výroby z dlouhodobého hlediska nevyhnutelné využívat v co možná nejvyšší míře materiály, které již jsou zabudovány ve stávajících konstrukcích vozovek. V literatuře [37] se uvádí, že v celé evropské silniční síti je zabudováno okolo 950 miliard tun asfaltových směsí.

Pomocí různých metod recyklace těchto stavebních materiálů lze dosáhnout zachování přírodních materiálových zdrojů (kamenivo, asfalt) a snížení energetické a ekonomické náročnosti stavebních prací. V oblasti asfaltových směsí lze definovat několik druhů recyklačních postupů.

V habilitační práci je věnována pozornost využití R-materiálu v nově vyráběných asfaltových směsích na obalovnách. Jde o technologii, ve které ČR zaostává za vyspělými evropskými zeměmi (jako např. Spolková republika Německo). Jak vyplývá ze statistik za rok 2017 [23], množství R-materiálu použitého při výrobě nových asfaltových směsí na obalovně z celkového ročního objemu výroby 7 078,04 tis. tun činilo pouze 222,53 tis. tun. Toto je ve srovnání s aktuálním stavem ve světě a s technologickými možnostmi obaloven velmi nízké číslo.

Vzhledem k tomu, že cena základních komponent, potřebných pro výrobu asfaltových směsí, neustále dlouhodobě stoupá, je využívání R-materiálu do nově vyráběných směsí výhodné i z ekonomického pohledu.

Jde jednak o cenu kameniva, tak i o cenu asfaltu, který tvoří v asfaltové směsi nejdražší surovinu. V případě asfaltu lze dlouhodobě stoupající ceny demonstrovat v Grafu 2, který zobrazuje historický vývoj ceny ropy, na které je cena asfaltu závislá.



Graf 2: Historický vývoj cen ropy [22]

*Poznámka ke Grafu 2: V grafu je zřetelně vidět např. první ropnou krizi v roce 1973, kdy se cena za barel ropy přiblížila 12 dolarům, druhá ropná krize v letech 1979 až 1982 (kdy cena stoupla ze 13 na 35 dolarů za barel) a např. také ovlivnění ceny ropy vpádem Iráku do Kuvajtu v říjnu 1990 a jeho následném osvobození. Před propadem cen v roce 2008, způsobeným celosvětovou finanční krizí, ceny rostly díky poklesu zásob v USA a poptávce asijských zemí.*

V habilitační práci jsou popsány činnosti autora, které souvisejí s jeho snahou o zvýšení podílu používaného R-materiálu při výrobě nových asfaltových směsí na obalovnách v České republice. Tyto činnosti lze zjednodušeně rozdělit na:

- laboratorní výzkum, který byl prováděn s podporou dvou výzkumných projektů Technologické agentury ČR (č. TA02030549 “Maximálně efektivní využití recyklovaných asfaltových vrstev vozovek pro výrobu asfaltových směsí” [24] a č. TA04031328 “Recyklace asfaltových koberců mastixových a vývoj speciálního celulózového vlákna do těchto typů směsí” [25]),
- realizaci pokusných úseků pro ověření laboratorního výzkumu,
- legislativní a normotvornou činnost, související s prosazením závěrů výzkumu do běžné silniční stavební praxe.

## 2 STÁVAJÍCÍ SITUACE V ČR

Jak již bylo naznačeno v úvodní kapitole, Česká republika v oblasti přidávání R-materiálu do hutněných asfaltových směsí zaostává za většinou západních zemí v Evropě. V posledních letech lze vysledovat nedůvěru k využívání R-materiálu především u investorů. Jejich pochyby pravděpodobně souvisí s obavou o homogenitu a kvalitu R-materiálu, dávkovaného do asfaltových směsí a s nedůvěrou k dostatečné trvanlivosti asfaltových směsí obsahujících R-materiál.

### 2.1 NORMOVÉ POŽADAVKY

V současnosti (k září 2018) lze dle platných specifikačních norem pro asfaltové směsi řady ČSN EN 13 108 použít v případě hutněných asfaltových směsí R-materiál pouze u směsí typu asfaltový beton. Maximální množství R-materiálu pro směsi typu asfaltový beton jsou uvedeny v Národní příloze k normě ČSN EN 13108-1, konkrétně v tabulce NA-E.4.5 [26]. Z této tabulky vyplývá, že do asfaltového betonu pro obrusné vrstvy vozovek, určeného pro nejvyšší třídy dopravního zatížení (směsi s označením “S” a “+”) nelze R-materiál použít. U ostatních směsí typu asfaltový beton pro obrusnou vrstvu vozovky (ACO 8, ACO 8 CH, ACO 11 a ACO 16) lze R-materiál dávkovat v množství do 25 %. Jde však o směsi, které lze v konstrukci vozovky použít až od IV. třídy dopravního zatížení.

U směsí typu asfaltový beton pro ložní a podkladní vrstvy vozovek je možno dávkovat R-materiál ve vyšším množství, než u vrstev obrusných. Je zde však nutno upozornit na skutečnost, že jen velmi málo obaloven asfaltových směsí v ČR (cca do 10) je schopno dávkovat R-materiál v množství vyšším než 30 %. Jde o obalovny, které jsou vybaveny tzv. paralelním bubnem, který umožňuje dávkovat do míchačky obalovny R-materiál v nahřátém stavu.

U ostatních typů hutněných asfaltových směsí, které jsou v ČR vyráběny dle EN (asfaltový koberec mastixový, asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy příp. asfaltový koberec drenážní) nelze v souladu s národními přílohami k normám ČSN EN 13108-5 [28], ČSN EN 13108-2 [29] a ČSN EN 13108-7 [30] R-materiál při jejich výrobě v současné době použít.

### 2.2 FINANČNÍ HLEDISKO

V České republice není přidávání určitého množství R-materiálu do asfaltových směsí striktně normami resp. investory vyžadováno. Jeho dávkování je však v určitých typech směsí dovoleno, jak je popisováno výše. Z výše uvedeného vyplývá, že jde o rozhodnutí výrobce asfaltové směsi, zda bude v dovolených případech R-materiál při výrobě asfaltových směsí využívat.

Toto rozhodnutí je v reálných tržních podmínkách jistě ovlivněno ekonomickou výhodností použití R-materiálu. Ekonomická výhodnost použití R-materiálu je ovlivněna mj. několika vlivy. Jde především o náklady na získání, skladování a zrnitostní úpravu vyfrézovaného či vybouraného materiálu a náklady spojené s oživením zestárlého pojiva v R-materiálu.

Vyšší ekonomické výhodnosti použití R-materiálu u nově vyráběných asfaltových směsí neprospívá stav, který je v současné době v ČR nastaven. Realizační stavební firmy jsou smluvně zavazovány vyfrézovaný či vybouraný asfaltový materiál (znovuzískanou asfaltovou směs) při opravách či rekonstrukcích vozovek od Ředitelství silnic a dálnic odkupovat. Nastavená výkupní cena za tento materiál se pohybuje okolo 120 Kč/tunu (bez DPH). Tato nastavená cena je však příliš vysoká na to, aby vzhledem k nákladům na dopravu skladování a oživení zestárlého pojiva v R-materiálu mohlo být dávkování R-materiálu pro výrobce asfaltových směsí ekonomicky zajímavé. Tento stav je dlouhodobě kritizován s tím, že by bylo vhodné nastavit pravidla hospodaření s tímto materiálem tak, jak je tomu v sousední Spolkové republice Německo. V SRN si realizační firmy odkupují vyfrézovaný či vybouraný asfaltový materiál od investora za



symbolické 1 Euro/tunu s tím, že firmy tento materiál opět použijí při výrobě asfaltových směsí. Takto nastavený systém umožňuje i snížit cenu vyráběných asfaltových směsí.

### 2.3 EKOLOGICKÉ HLEDISKO

Z environmentálního pohledu je v současnosti na znovuzískanou asfaltovou směs resp. na R-materiál nahlíženo jako na odpadní produkt a takto je sním i nakládáno. Souvisí to nejen s obavami o dostatečnou kvalitu tohoto materiálu, ale z ekologického pohledu především o obavu z kontaminace tohoto materiálu dehtovými nebo asfaltodehtovými pojivy. Tato pojiva byla v minulosti hojně používána například při zřizování prolévaných podkladních vrstev – penetračních makadamů a při frézování či vybourávání asfaltových podkladních vrstev vozovek může hrozit kontaminace znovuzískané směsi. Jde především o kontaminaci polycyklickými aromatickými uhlovodíky (PAU), které jsou v dehtu obsaženy.

Velkým legislativním posunem v této oblasti je příprava nové vyhlášky Ministerstva životního prostředí, vytvořené ve spolupráci s Ministerstvem průmyslu a obchodu, která stanoví kritéria, při jejichž splnění je znovuzískaná asfaltová směs vedlejším produktem nebo přestává být odpadem, a kritéria, při jejichž splnění přestává být asfaltová směs vyrobená z odpadní znovuzískané asfaltové směsi odpadem [31]. V době sestavování habilitační práce se připravovaná vyhláška nachází v meziresortním připomínkovém řízení a očekává se její schválení.

## 3 STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH POJIV

Vzhledem k tomu, že asfaltové pojivo je organickou sloučeninou, podléhá během skladování, výroby asfaltové směsi a užití ve vozovce procesu stárnutí. Dle [1],[2] je to způsobeno vlivem:

- působení vzdušného kyslíku,
- ultrafialového záření,
- zvýšené teploty.

Tyto vlivy způsobují tvrdnutí asfaltů signalizované snižováním hodnoty penetrace, zvyšováním teploty bodu měknutí a snižováním penetračního indexu. Podle převažujícího vlivu se rozlišuje:

- stárnutí odpařováním,
- stárnutí oxidační,
- stárnutí strukturní.

Těkání lehkých olejových složek je příčinou stárnutí odpařováním. Proces závisí na teplotě a podmínkách expozice. Jde o nevratný pochod, uplatňující se při horkém zpracování asfaltů. Čím měkčí je asfalt, čím vyšší je teplota a čím větší je povrch, tím vyšší je odpar lehčích olejových složek. Mírou těkání je ztráta hmotnosti při zkoušce zahřívání pojiva v tenké vrstvě.

Běžně používané silniční asfalty obsahují jen velmi malé množství nízkovroucích uhlovodíků a mívají při horkém zpracování malou ztrátu těkavých olejů. S přihlédnutím na celkový proces stárnutí asfaltů tvoří vliv odpařování jen nepatrnou část z celkových změn. Stárnutí oxidačnímu se přikládá podstatně větší význam. Nastává pomalu a dlouhodobě při styku asfaltu se vzduchem. Čím je teplota vyšší, tím se zvyšuje oxidační účinek. Každý nárůst teploty o 10 °C zdvojnásobuje reakční rychlost. Tvoří se polární kyslíkaté sloučeniny mající snahu asociovat do micel vyšší molekulové váhy, čímž zvyšují viskozitu, tvrdost a křehkost asfaltu. Oxidační stárnutí začíná pomalu a urychluje se s koncentrací radikálů. Pokud je koncentrace radikálů nízká, bývají tyto stabilizovány a do řetězových reakcí vstupují jen zřídka.

Vlivem slunečního záření dochází k urychlení absorpce kyslíku v povrchu asfaltu a k urychlení procesu stárnutí. Ireversibilní (nevratné) oxidační reakce pak způsobují dramatické změny ve

fyzikálních vlastnostech a vedou ke ztrátě pojivých vlastností. Oxidace bez přístupu světla probíhá pomalu, v přítomnosti světla a UV záření se urychluje, avšak jen do hloubky 4 – 5 mikronů. Stárnutí způsobené oxidačními vlivy bývá spojené se zvyšováním hmotnosti, které se časem snižuje, i když oxidační proces dále pokračuje, a to z důvodu uvolňování vody a dekarboxylace. Stárnutí strukturní představuje změnu koloidní struktury ve směru zhrubnutí koloidně dispergovaných částic. Dispergované částice asfaltů koagulují ve větší agregáty, klesá jejich měrný povrch. Uvolňují se oleje, které vsakují do kameniva. Koloidní struktura se nevratně posouvá ke gelové soustavě rosolovité povahy, která dále stárne. Získává na tvrdosti a pevnosti, ztrácí plasticitu, elasticitu a křehne. Při spolupůsobení faktoru času, vzduchu a světla se stárnutí projeví tvorbou trhlin. Zestárnutý asfalt je nevratně změněn. Znalost procesu stárnutí má velký význam při užití asfaltů do asfaltových vozovek. U změn vlastností pojiv je třeba rozlišovat mezi:

- krátkodobým tvrdnutím termálně oxidačním při skladování, manipulaci a zpracování,
- dlouhodobým stárnutím strukturně oxidačním za studena na povrchu vozovky.

Termálně-oxidační tvrdnutí na obalovně je dáno teplotou skladování a obalování a dobou skladování. Mícháním a cirkulací potrubím se povrch obnovuje a tvrdnutí se zvýší. Obalování kameniva pojivem je sice krátkodobý proces, nicméně asfalt se rozprostírá na velký, horký povrch kameniva, což vede k odpaření těkavějších podílů asfaltu, oxidaci a dalším reakcím vedoucím ke změnám vlastností asfaltu. Kamenivo se pokryje filmem asfaltu tloušťky 5 – 15 mikronů. Praxe ukázala, že při teplotě obalování do 180 °C dojde ke zvýšení bodu měknutí v průměru o 3,4 °C, při obalování nad teplotou 180 °C může být až o 6 °C. Zjednodušeně řečeno asfalt při obalování ztvdne o jednu gradaci. Zásobní síla na obalovnách vytvářejí předpoklady dalšího stárnutí, i když menšího než při obalování o 1,5 – 3,5 °C podle druhu asfaltové směsi, při době skladování do 15 hodin. Při skladování v síle je důležité, aby vstupní vrata byla vzduchotěsná, jinak se silo chová jako komín a dochází k oxidaci a ochlazení směsi. Pokud se zamezí tvrdnutí pojiva v síle, při transportu směsi na stavbu a při její pokládce již k dalšímu tvrdnutí nedochází. [1], [2]

#### **4 MOŽNOSTI REJUVENACE ZESTÁRLÉHO POJIVA**

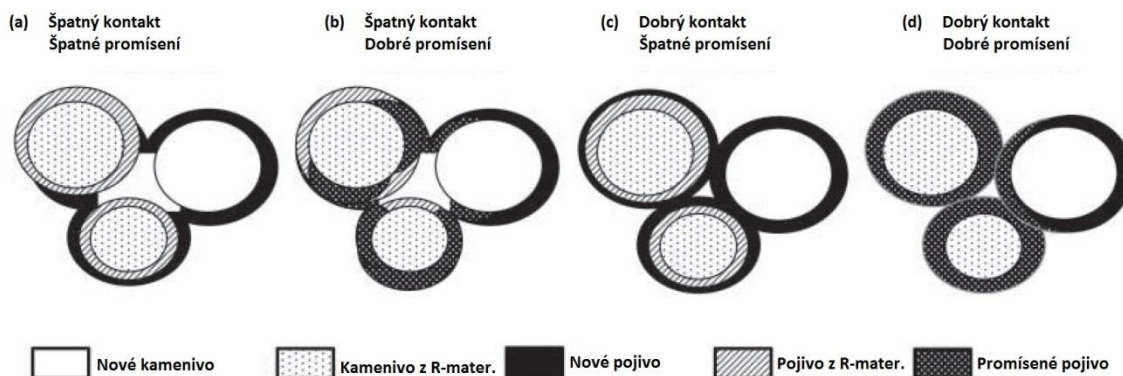
Znovuzískaná asfaltová směs resp. R-materiál obsahuje asfaltové pojivo, které již nemá stejné parametry jako původně dávkované pojivo. Je to způsobeno procesy stárnutí, popisovanými v kapitole 3. Z technického hlediska je tento asfalt mj. tvrdší a křehčí. Pokud bychom parametry pojiva zpětně získaného z R-materiálu sledovali základními empirickými zkouškami pojiva, pojivo bude mít obecně nižší hodnotu penetrace podle ČSN EN 1426 [32], vyšší teplotu bodu měknutí dle ČSN EN 1427 [17] a vyšší teplotu bodu lámavosti podle Fraasse dle ČSN EN 12593 [33].

Pokud bychom dávkovali R-materiál do nově vyráběné asfaltové směsi bez jeho ošetření, od určitého množství dávkovaného R-materiálu bychom vybočili z deklarované gradace (nově dávkovaného) pojiva. Z výpočtů uvedených v textu habilitační práce vyplývá, že již při dávkování R-materiálu v množství 10 % až 20 % bychom měli uvažovat o rejuvencii zestárlého pojiva v R-materiálu. V opačném případě hrozí negativní ovlivnění parametrů nově vyráběné asfaltové směsi. Zestárlé pojivo v R-materiálu musí být tedy ošetřeno při výrobě nové asfaltové směsi tak, aby alespoň základní parametry pojiva (penetrace, bod měknutí) byly co nejvíce shodné s nově přidávaným pojivem.

Za ošetření R-materiálu lze považovat některý z níže uvedených postupů:

- a) přidání asfaltového pojiva s vyšší hodnotou penetrace,
- b) použití změkčovací nebo rejuvenační přísady,
- c) použití asfaltového pojiva (PMB) typu RC.

U všech výše uvedených metod ošetření je důležité, aby došlo v co možná nejvyšší míře k promísení nově přidávaného pojiva a pojiva z R-materiálu. Jen v tom případě lze předpokládat homogenní oživení pojiva v celém objemu nově vyráběné asfaltové směsi. Tato problematika je podrobně popsána např. v [43].



Obrázek 1: Schematické znázornění jednotlivých možností kontaktu zrn kameniva a promísení pojiv při přidávání R-materiálu do asfaltové směsi [43].

## 5 VÝROBA ASFALTOVÝCH SMĚSÍ S R-MATERIÁLEM V ČESKÉ REPUBLICE

Vzhledem k zrnitostem nově vyráběných asfaltových směsí, které jsou v České republice normově omezeny maximální velikostí zrna kameniva 22 mm, se lze většinou v ČR setkat se zrnitostí přidávaného R-materiálu 0/11 mm, 0/16 mm nebo 0/22 mm. Znovuzískaná asfaltová směs se nejčastěji drtí na požadované frakce v klasických drtičkách, a to nejčastěji v mobilních variantách v zimním období, kdy se drcený materiál nelepí v drticím zařízení.

Znovuzískaná asfaltová směs může být ve formě materiálu odvezeného od silniční frézy, vybouraných ker nebo jde o nově vyrobenou směs z neshodné či nadbytečné výroby.

V poslední době se pro drcení znovuzískané asfaltové směsi objevují i sofistikovanější provedení drtiček, které jsou konstruovány tak, aby nedocházelo k drcení jednotlivých zrn kameniva. Zrna jsou pouze „drásána“ od sebe tak, že se jednotlivá pojivem obalená zrna od sebe oddělují a nedochází k drcení jednotlivých zrn, a tím k výskytu neobalených ploch.

Tento materiál, nadrcený na požadované frakce, je poté skladován v meziskládkách či boxech a je připraven pro použití ve výrobě nových asfaltových směsí. Forma skládkování je opět v ČR na různých kvalitativních úrovních. Objevují se:

- nezastřešené haldy s nijak nezpevněným podkladem – jde o způsob skladování, který nezabraňuje pronikání vlhkosti do uloženého materiálu ze spodu vztlínáním ani shora ve formě dešťových srážek;
- nezastřešené haldy se zpevněným podkladem – tento způsob skladování zabraňuje vztlínání zemní vlhkosti;
- zastřešené haldy se zpevněným podkladem – jde o technicky nejvhodnější řešení. Je zabráněno vnikání dešťové vody i zemní vlhkosti. Je vhodný a nutný především u skladování jemnějších frakcí R-materiálu.



Obrázek 2: Zastřešení skládky R-materiálu a drtící zařízení

Při vlastní výrobě asphaltových směsí se lze v ČR obecně setkat se dvěma variantami jeho přidávání:

### 5.1 PŘIDÁVÁNÍ R-MATERIÁLU ZASTUDENA

Jde prozatím o nejrozšířenější způsob přidávání R-materiálu v České republice vzhledem k tomu, že necelá polovina všech obaloven v ČR je vybavena zařízením, umožňujícím přidávat R-materiál zastudena. R-materiál je buď dávkován stejnou cestou jako nové kamenivo, nebo je dávkován přímo do míchačky obalovny přes samostatnou váhu.

Tento nadávkovaný R-materiál je nahřát přímo v míchačce obalovny od nově dávkovaného kameniva, ohřátého na vyšší teplotu. Tato varianta přidávání však s sebou přináší některá omezení.

- a) Vzhledem k vlhkosti přidávaného studeného R-materiálu dochází při jeho styku s kamenivem nahřátým na vysokou teplotu ke vzniku vodní páry, kterou je nutno odvětrávat. Toto odvětrávání zpomaluje výrobu – snižuje výkon obalovny. Vlhkost dávkovaného R-materiálu lze snížit například zastřešením skládek R-materiálu na obalovně a jeho uložením na zpevněném, odvodněném podkladu tak, aby nedocházelo ke vztlínání vlhkosti z podloží skládky.
- b) Vzhledem k nutnosti nahřívání nově přidávané kamenivo na vyšší teplotu hrozí při jeho styku s pojivem obsaženým v R-materiálu mimo jiné nebezpečí jeho degradace a zrychlené stárnutí (přepálení).

## 5.2 PŘIDÁVÁNÍ R-MATERIÁLU ZA TEPLA POMOCÍ PARALELNÍHO BUBNU OBALOVNY

Tento způsob přidávání R-materiálu do asfaltových směsí je hojně rozšířen v sousední Spolkové republice Německo a začíná se pomalu rozšiřovat i v České republice, kde je tímto zařízením vybaveno přibližně deset obaloven.

V paralelním bubnu dochází k nahřívání přidávaného R-materiálu na teplotu 120 °C až 130 °C a k ošetření R-materiálu rejuvenační přísadou. Teprve poté je tento nahřátý R-materiál dávkován do míchačky obalovny. Při tomto způsobu dávkování není nutno nově přidávané kamenivo nahřívát na vysokou teplotu a nehrozí tedy nebezpečí nadměrné degradace pojiva v R-materiálu, jako je tomu při dávkování zastudena. Další výhodou je, že nedochází k tvorbě vodní páry.

Při použití paralelního bubnu obalovny je možné dávkovat R-materiál v množství přesahujícím i 80 %. Tento způsob je využíván v SRN především v případě asfaltových směsí, určených pro podkladní vrstvy vozovek.



Obrázek 3: Obalovny asfaltových směsí vybavené paralelním sušícím bubnem – vlevo Česká republika - Bruntál, vpravo Spolková republika Německo - Norimberk

## 6 R-MATERIÁL VE SMĚSÍCH TYPU ASFALTOVÝ BETON

Asfaltové směsi typu asfaltový beton jsou nejrozšířenějším druhem hutněných za horka vyráběných asfaltových směsí. Objem jejich výroby tvoří v současné době v České republice téměř 90 % z celkového objemu výroby všech asfaltových směsí. Jsou určeny pro podkladní, ložní i obrusné vrstvy vozovek. Jde tedy o typ směsi, u kterého je nejvyšší potenciál pro možné zabudování R-materiálu z hlediska zabudovaného množství. Z tohoto důvodu byla asfaltovým směsím typu asfaltový beton věnována při laboratorním zkoušení a budování pokusného úseku prvotní pozornost. Jak bylo již uvedeno v úvodu, práce v oblasti využití R-materiálu u asfaltových směsí typu asfaltový beton byly prováděny a níže uváděné výsledky byly získány s podporou výzkumného projektu technologické agentury ČR č. TA02030549 “Maximálně efektivní využití recyklovaných asfaltových vrstev vozovek pro výrobu asfaltových směsí” [24], u něhož byl autor habilitační práce spoluřešitelem, a v jehož řešení byly dále využity diplomové práce [59] a [60].

Nejprve byly stanoveny vybrané normové parametry vstupních materiálů, potřebných pro provedení laboratorních návrhů asfaltových směsí s různými podíly R-materiálu. Byly provedeny návrhy asfaltových směsí:

- a) ACL 22+ s 0 %, 30 %, 50 % a 70 % R-materiálu,
- b) ACP 22+ s 0 %, 30 %, 50 % a 70 % R-materiálu.

Poté byly zjišťovány následující funkční charakteristiky na laboratorně vyráběných vzorcích:

- u asfaltových směsí typu ACL 22+ s 0 %, 30 %, 50 % a 70 % R-materiálu:
  - a) stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě dle ČSN EN 12697-12 [48],
  - b) stanovení tuhosti dle ČSN EN 12697-26 [49],
  - c) posouzení odolnosti asfaltové směsi proti tvorbě trvalých deformací zkouškou pojíždění kolem dle ČSN EN 12697-22+A1 [50];
- u asfaltových směsí typu ACP 22+ s 0 %, 30 %, 50 % a 70 % R-materiálu:
  - a) stanovení tuhosti dle ČSN EN 12697-26 [49],
  - b) posouzení odolnosti vůči únavě dle ČSN EN 12697-24 [51].

### 6.1 PARAMETRY ASFALTOVÝCH SMĚSÍ TYPU ACL 22+ S 0 %, 30 %, 50 % A 70 % R-MATERIÁLU

#### a) Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě

Odolnost vůči účinkům vody byla stanovována dle ČSN EN 12697-12 [48] na tělesech hutněných rázovým zhutňovačem 2x25 údery. Polovina těles byla ponechána na suchu při laboratorní teplotě, druhá polovina těles byla po vakuování v exsikátoru temperována při teplotě 40 °C po dobu 72 hodin. Poměr “ITSR” vyjadřuje poměr pevností v příčném tahu “ITS” těles “mokrých” a “suchých”. Získané výsledky jsou uvedeny v Tabulce 1.

Tabulka 1: Přehled výsledků stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě asfaltových směsí ACL 22+ s 0 %, 30 %, 50 % a 70 % R-materiálu

Obsah R-materiálu	Způsob temperování těles	Ø Pevnost ITS	Poměr ITSR
		[kPa]	-
0 %	Mokrá	1347	<b>0,81</b>
	Suchá	1659	
30 %	Mokrá	1244	<b>0,94</b>
	Suchá	1330	
50 %	Mokrá	1250	<b>0,87</b>
	Suchá	1441	
70 %	Mokrá	1355	<b>0,93</b>
	Suchá	1452	

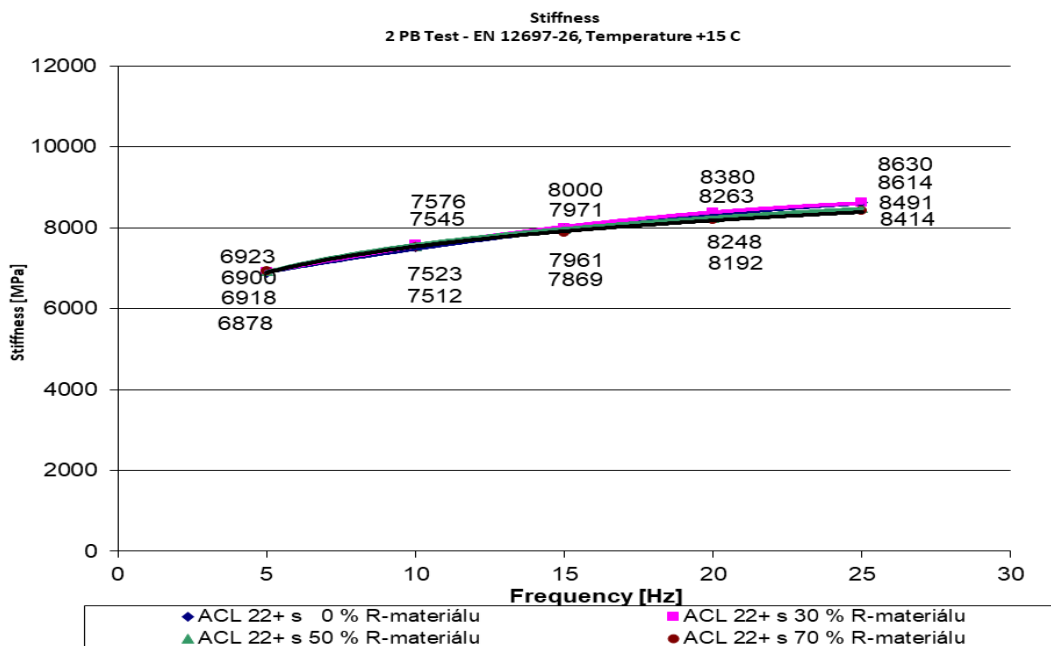
Jak je patrné z Tabulky 1, ani vysoký obsah R-materiálu v asfaltové směsi nemá negativní vliv na odolnost směsí vůči účinkům vody, protože hodnota parametru ITSR směsí s R-materiálem je vždy vyšší než hodnota ITSR směsí bez R-materiálu.

#### b) Stanovení tuhosti dle ČSN EN 12697-26

Stanovování modulů tuhosti probíhalo při teplotě 15 °C a zatěžovacích frekvencích 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz a 25 Hz. Získané výsledky jsou souhrnně uvedeny v Tabulce 2 a graficky vyhodnoceny v Grafu 3.

Tabulka 2: Tuhost asfaltových směsí ACL 22+ s 0 %, 30 %, 50 % a 70 % R-materiálu

	Modul tuhosti [MPa] při 15°C a frekvenci zatěžování				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
ACL 22+ s 0 % R-materiálu	6878	<b>7523</b>	7961	8263	8630
ACL 22+ s 30 % R-materiálu	6900	<b>7576</b>	8000	8380	8614
ACL 22+ s 50 % R-materiálu	6923	<b>7545</b>	7971	8248	8491
ACL 22+ s 70 % R-materiálu	6918	<b>7512</b>	7869	8192	8414



Graf 3: Moduly tuhosti asphaltových směsí ACL 22+ s 0 %, 30 %, 50 % a 70 % R-materiálu

Jak je patrné ze získaných výsledků, uvedených v Tabulce 2, stanovené hodnoty modulů tuhosti se vzájemně příliš neliší a jsou prakticky totožné. Vliv dávkování R-materiálu se při jeho ošetření přísadou Storflux nijak neprojevil na tuhosti směsí.

### c) Posouzení odolnosti asphaltové směsi proti tvorbě trvalých deformací zkouškou pojíždění kolem dle ČSN EN 12697-22+A1

Odolnost proti tvorbě trvalých deformací stanovená dle normy ČSN EN 12697-22 + A1 [50] byla sledována parametry:

- $WTS_{AIR}$  – průměrný přírůstek hloubky koleje v mm/1000 cyklů (z naměřené hloubky koleje mezi 5000 a 10000 cykly) a
- $PRD_{AIR}$  – poměrná hloubka koleje po 5000 cyklech.

Tabulka 3: Přehled výsledků zkoušky odolnosti proti tvorbě trvalých deformací asphaltových směsí ACL 22+ s 0 %, 30 %, 50 % a 70 % R-materiálu

Obsah R-materiálu	Průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech	Průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech	$d_{10\,000}$ - $d_{5\,000}$	$WTS_{AIR}$	$PRD_{AIR}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm/1000 cyklů]	[%]
0 %	0,93	1,10	0,17	<b>0,034</b>	<b>1,6</b>
30 %	0,66	0,76	0,10	<b>0,019</b>	<b>1,1</b>
50 %	0,59	0,67	0,08	<b>0,016</b>	<b>1,0</b>
70 %	0,78	0,86	0,08	<b>0,016</b>	<b>1,3</b>

Z Tabulky 3 vyplývá, že odolnost proti tvorbě trvalých deformací převážně narůstá s rostoucím množstvím R-materiálu.



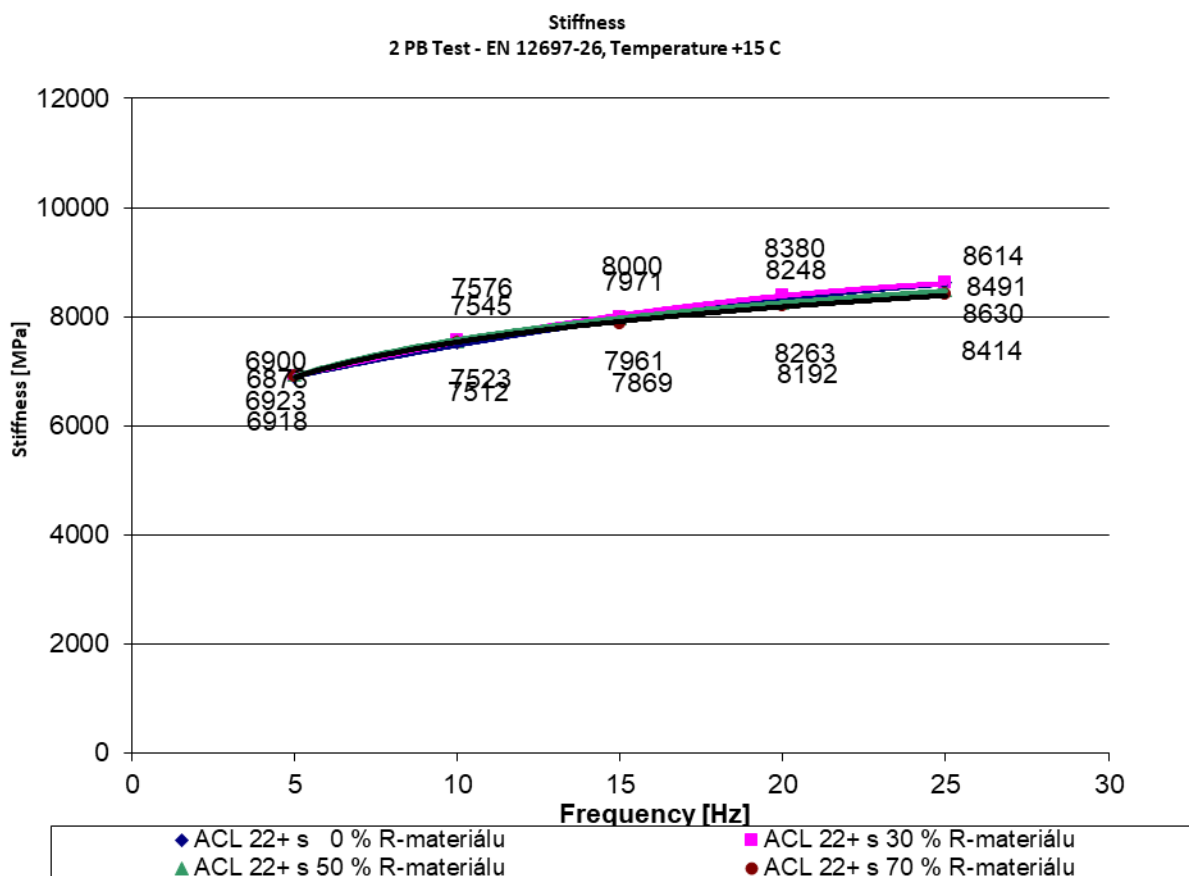
## 6.2 PARAMETRY ASFALTOVÝCH SMĚSÍ TYPU ACP 22+ S 0 %, 30 %, 50 % A 70 % R-MATERIÁLU

### a) Stanovení tuhosti dle ČSN EN 12697-26

Moduly tuhosti byly opět stanoveny na trapezoidech dvoubodovou zkouškou za ohybu dle normy ČSN EN 12697-26 [49]. Desky byly hutněny na míru zhutnění v rozmezí 99 % - 101 % ve vztahu k objemové hmotnosti ze zkoušky typu stanovené při optimálním množství pojiva. Stanovování modulů tuhosti probíhalo při teplotě 15 °C a zatěžovacích frekvencích 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz a 25 Hz. Získané výsledky jsou souhrnně uvedeny v Tabulce 4 a graficky vyhodnoceny v Grafu 4.

Tabulka 4: Tuhost asfaltových směsí ACP 22+ s 0 %, 30 %, 50 % a 70 % R-materiálu

	Modul tuhosti [MPa] při 15°C a frekvenci zatěžování				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
ACP 22+ s 0 % R-materiálu	8840	<b>9617</b>	10139	10565	10849
ACP 22+ s 30 % R-materiálu	9055	<b>9929</b>	10458	10869	11140
ACP 22+ s 50 % R-materiálu	8810	<b>9722</b>	10272	10725	11055
ACP 22+ s 70 % R-materiálu	8539	<b>9407</b>	9963	10385	10690



Graf 4: Moduly tuhosti asfaltových směsí ACP 22+ s 0 %, 30 %, 50 % a 70 % R-materiálu

Ze získaných výsledků je patrné, že díky přísadě Storflux jsou moduly tuhosti pro různé obsahy R-materiálu srovnatelné při všech zkoušených frekvencích. Vliv dávkování R-materiálu do směsí se díky přísadě na tuhosti směsí nijak neprojevil.

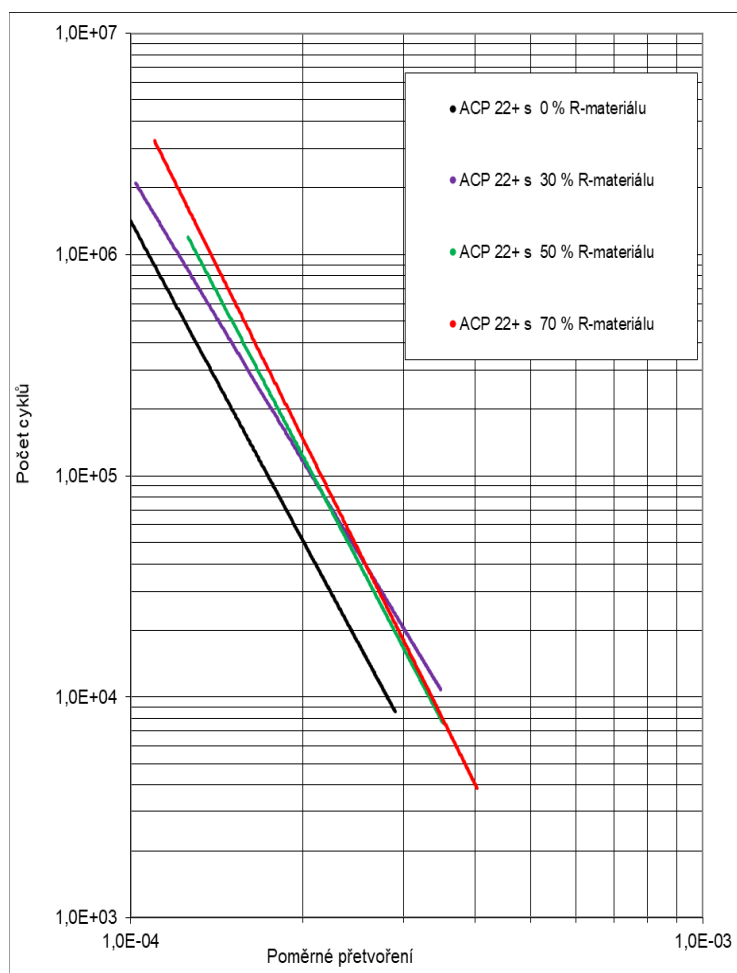
**b) Posouzení odolnosti vůči únavě dle ČSN EN 12697-24**

Výsledky posouzení jsou uvedeny v následující Tabulce 5 a v Grafu 5. Byly zjišťovány dva důležité normové parametry:

$\epsilon_6$  ... je průměrná velikost přetvoření odvozená z únavové přímky při  $10^6$  zatěžovacích cyklech,  
B ... parametr únavové přímky, charakterizující její sklon.

Tabulka 5: Únavové charakteristiky asfaltových směsí ACP 22+ s 0 %, 30 %, 50 % a 70 % R-materiálu

Obsah R-materiálu	$\epsilon_6$	B
0 %	107,4	4,8
30 %	121,2	4,3
50 %	130,6	4,9
70 %	138,2	5,2

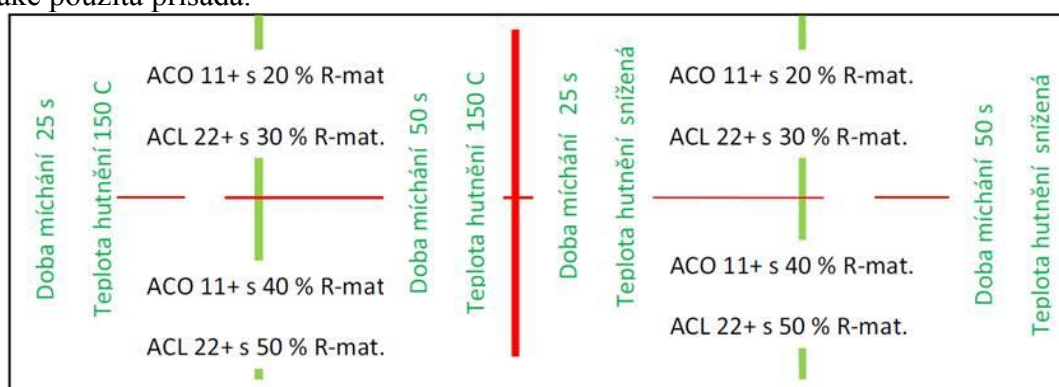


Graf 5: Grafické vyhodnocení únavových charakteristik asfaltových směsí ACP 22+ s 0 %, 30 %, 50 % a 70 % R-materiálu

### 6.3 POKUSNÝ ÚSEK

V rámci řešení zmiňovaného výzkumného projektu [24] byl s podporou Státního fondu dopravní infrastruktury (program „Nové technologie“) s navrženými asfaltovými směsmi realizován pokusný úsek na silnici II/204 mezi obcemi Kaznějov a Mrtník. Pokusný úsek byl proveden s pokládkou obrusné vrstvy ACO 11+ a ložní vrstvy ACL 22+, přičemž bylo přidáno do obrusné vrstvy 20 % a 40 % R-materiálu a do ložní vrstvy 30 % a 50 % R-materiálu. Oba typy směsí byly navrženy jednak s přísadou Storflux a dále s přísadou Storbit, která dle dodavatele nejen změkčuje tvrdé pojivo v R-materiálu, ale navíc umožňuje snížit teplotu zpracování díky obsaženým voskům. Dále byly při výrobě asfaltových směsí na obalovně firmy Froněk spol. s r.o. použity 2 doby pro míchání směsí: 30 s a 60 s, což mělo mít podstatný vliv na vlastnosti výsledných asfaltových směsí a ovlivnit míru dvojího obalení kameniva původním pojivem v R-materiálu a nově přidávaným pojivem – tzv. double coating.

Na Obrázku 4 jsou uvedeny jednotlivé podúseky s různým dávkováním R-materiálu a použité přísady. Dále je z obrázku patrný obsah přidávaného R-materiálu, doba a teplota míchání příslušné směsi a také použitá přísada.



Obrázek 4: Schéma jednotlivých variant použitých asfaltových směsí na pokusném úseku silnice II/204 Kaznějov - Mrtník



Obrázek 5: Provádění pokusného úseku

Z každého podúseku bylo odebráno dostatečné množství asfaltové směsi za účelem vyhodnocení jejich vlastností, porovnání s laboratorními návrhy a provedení rozsáhlého souboru následných dalších zkoušek. Přibližně rok po realizaci pokusného úseku byly na všech zkušebních sekcích provedeny první jádrové vývrty a ukončena analýza kvality asfaltových směsí a jejich chování v celém technologickém procesu výroby. Lze konstatovat, že proces pokládky a hutnění není podílem R-materiálu ve směsi nijak negativně ovlivněn. Na úseku probíhají do současnosti v rámci řešení diplomových a doktorských disertačních prací pravidelné vizuální prohlídky s odběry jádrových vývrťů za účelem dlouhodobého posouzení vlivu dávkování vyšších podílů R-materiálu do asfaltových směsí typu asfaltový beton. Úsek se nachází do současnosti v bezvadném stavu. Žádné poruchy vozovky se prozatím nevyskytly.

## 7 R-MATERIÁL VE SMĚSÍCH TYPU ASFALTOVÝ KOBEREK MASTIXOVÝ

Po úspěšném ověření možnosti dávkování R-materiálu do asfaltových směsí typu asfaltový beton se zaměřila pozornost autora na ověření možnosti dávkování R-materiálu do asfaltových koberců mastixových (SMA). Jde o typ asfaltové směsi, která je využívána jako obrusná vrstva komunikací s nejvyššími třídami dopravního zatížení.

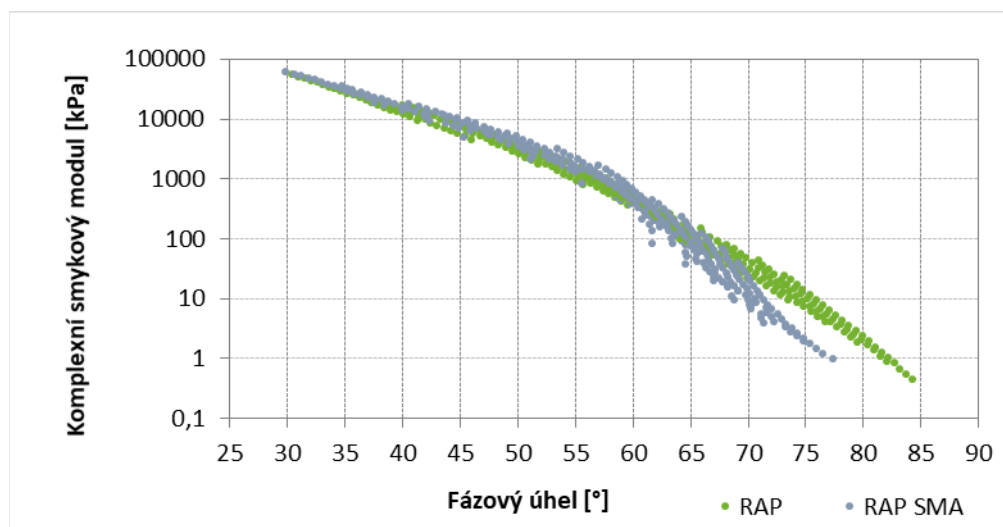
Vzhledem k tomu, že se v současné době připravuje změna národních požadavků k normě ČSN EN 13 108-1 [26], ve kterých bude nově zakázáno používat asfaltové směsi typu asfaltový beton jako obrusné vrstvy vozovek s nejvyšším dopravním zatížením (S, I, II), budou místo nich využívány právě směsi typu asfaltový koberec mastixový. Tím bude objem výroby těchto typů směsí v ČR vzrůstat a potenciál zabudování R-materiálu v těchto směsích poroste.

Aby bylo možno se výzkumem v oblasti využití R-materiálu v asfaltových kobercích mastixových zabývat ve stejném rozsahu jako u asfaltových betonů, zpracoval autor habilitační práce návrh navazujícího výzkumného projektu. Tento návrh projektu s názvem “Recyklace asfaltových koberců mastixových a vývoj speciálního celulózového vlákna do těchto typů směsí” [25] byl následně finančně podpořen Technologickou agenturou ČR a řešen v letech 2014 až 2017.

V rámci tohoto projektu, jehož hlavním řešitelem byl autor habilitační práce, se podařilo laboratorně a prakticky ověřit možnost dávkování R-materiálu do asfaltových směsí typu asfaltový koberec mastixový a získat výsledky uvedené dále. Konkrétně byly provedeny laboratorní návrhy asfaltových směsí typu asfaltový koberec mastixový SMA 11S s 0 %, 10%, 20 %, 30 % a 50 % R-materiálu (jednotlivé varianty navržených směsí jsou podrobně popsány v textu habilitační práce), přičemž byly používány dva druhy R-materiálu:

- běžný“ R-materiál (dále označován jako RAP) - vyfrézovaná asfaltová směs převážně typu asfaltový beton (AC). V něm obsažené asfaltové pojivo je (nemodifikovaný) silniční asfalt;
- R-materiál, získaný selektivním frézováním obrusné vrstvy tvořené vrstvou asfaltového koberce mastixového, který obsahuje modifikovaný asfalt. Dále je označován jako RAP SMA.

Z obou použitých R-materiálů byla zpětně získána asfaltová pojiva, u nichž byly stanoveny základní empirické a vybrané funkční parametry. Např. v dynamickém smykovém reometru (DSR) bylo na zpětně získaných pojivech provedeno srovnání jejich funkčních vlastností pomocí Blackova diagramu (závislost komplexního smykového modulu na fázovém úhlu).



Graf 6: Blackův diagram – zpětně získaná pojiva z použitých R-materiálů

Z průběhu křivek je patrný charakteristický zvlněný průběh Blackova diagramu modifikovaného asfaltu z „RAP SMA“, který se od průběhu Blackova diagramu nemodifikovaného asfaltu liší zejména v oblasti nižší hodnoty komplexního smykového modulu. Při stejné hodnotě komplexního smykového modulu dosahuje modifikovaný asfalt „RAP SMA“ nižších hodnot fázových úhlů. Nižší fázový úhel znamená vyšší pružnost pojiva.

Poté byly u navržených asfaltových směsí ověřovány funkční charakteristiky na laboratorně vyráběných vzorcích. Práce v této oblasti vyústily v realizaci pokusného úseku a následné zpracování návrhů na změny technických předpisů v této oblasti.

## 7.1 PARAMETRY ASFALTOVÝCH SMĚSÍ TYPU ASFALTOVÝ KOBEREK MASTIXOVÝ S R-MATERIALEM

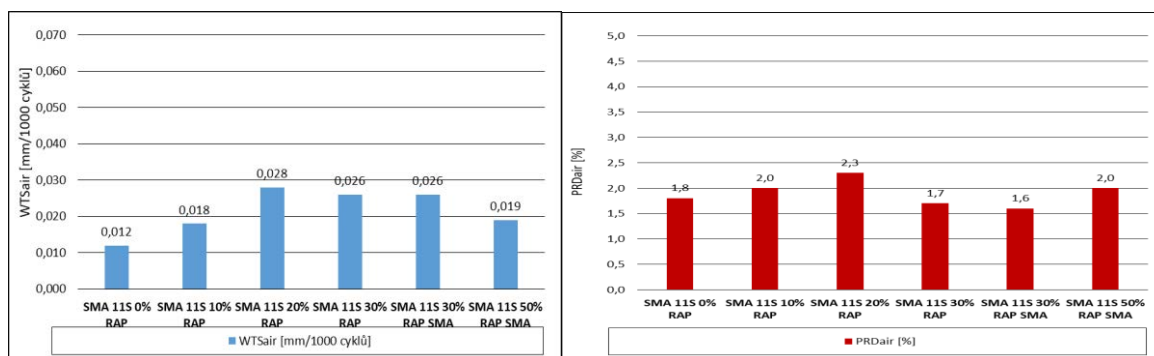
Po provedení laboratorních návrhů směsí byla postupně v laboratoři vyráběna zkušební tělesa a zjišťovány následující charakteristiky:

### a) posouzení odolnosti asfaltové směsi proti tvorbě trvalých deformací zkouškou poježdění kolem dle ČSN EN 12697-22+A1 [50]

Vzhledem k připravované změně zkušební teploty u směsí s modifikovanými pojivy, byly vybrané varianty směsí již navíc zkoušeny i při „nově navržené“ zkušební teplotě 60 °C.

Tabulka 6: Výsledné parametry směsí SMA 11S stanovené při zkušební teplotě 50 °C

Druh asfaltové směsi	WTS <sub>AIR</sub>	PRD <sub>AIR</sub>
	[mm/1000 cyklů]	[%]
SMA 11S 0% RAP	0,012	1,8
SMA 11S 10% RAP	0,018	2,0
SMA 11S 20% RAP	0,028	2,3
SMA 11S 30% RAP	0,026	1,7
SMA 11S 30% RAP SMA	0,026	1,6
SMA 11S 50% RAP SMA	0,019	2,0



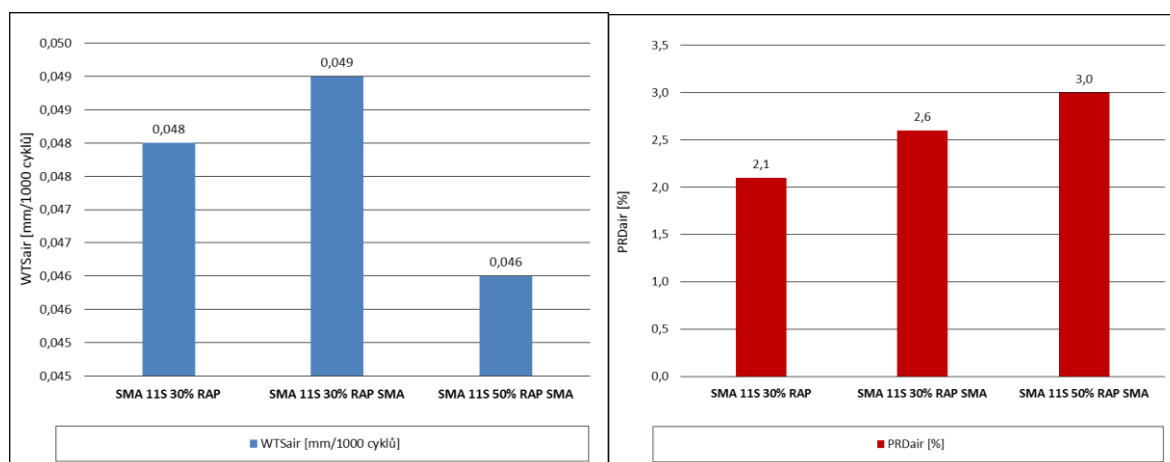
Graf 7 a 8: Porovnání parametru WTS<sub>AIR</sub> a PRD<sub>AIR</sub> směsí SMA 11S stanoveného při teplotě 50 °C

Normové požadavky kladené na směsi SMA 11S při zkušební teplotě 50 °C:

- maximální hodnota parametru PRD<sub>AIR</sub>, činí 5,0 %,
- maximální hodnota parametru WTS<sub>AIR</sub>, činí 0,07 mm/1000 cyklů.

Tabulka 7: Výsledné parametry směsí SMA 11S stanovené při zkušební teplotě 60 °C

Druh asfaltové směsi	WTS <sub>AIR</sub>	PRD <sub>AIR</sub>
	[mm/1000 cyklů]	[%]
SMA 11S 30% RAP	0,048	2,1
SMA 11S 30% RAP SMA	0,049	2,6
SMA 11S 50% RAP SMA	0,046	3,0



Graf 9 a 10: Porovnání parametru WTS<sub>AIR</sub> a PRD<sub>AIR</sub> směsí SMA 11S stanoveného při teplotě 60 °C

Nově navrhované požadavky kladené na směsi SMA 11S (s modifikovaným pojivem) při zkušební teplotě 60 °C:

- maximální hodnota parametru PRD<sub>AIR</sub>, činí 6,0 %,
- maximální hodnota parametru WTS<sub>AIR</sub>, činí 0,07 mm/1000 cyklů.

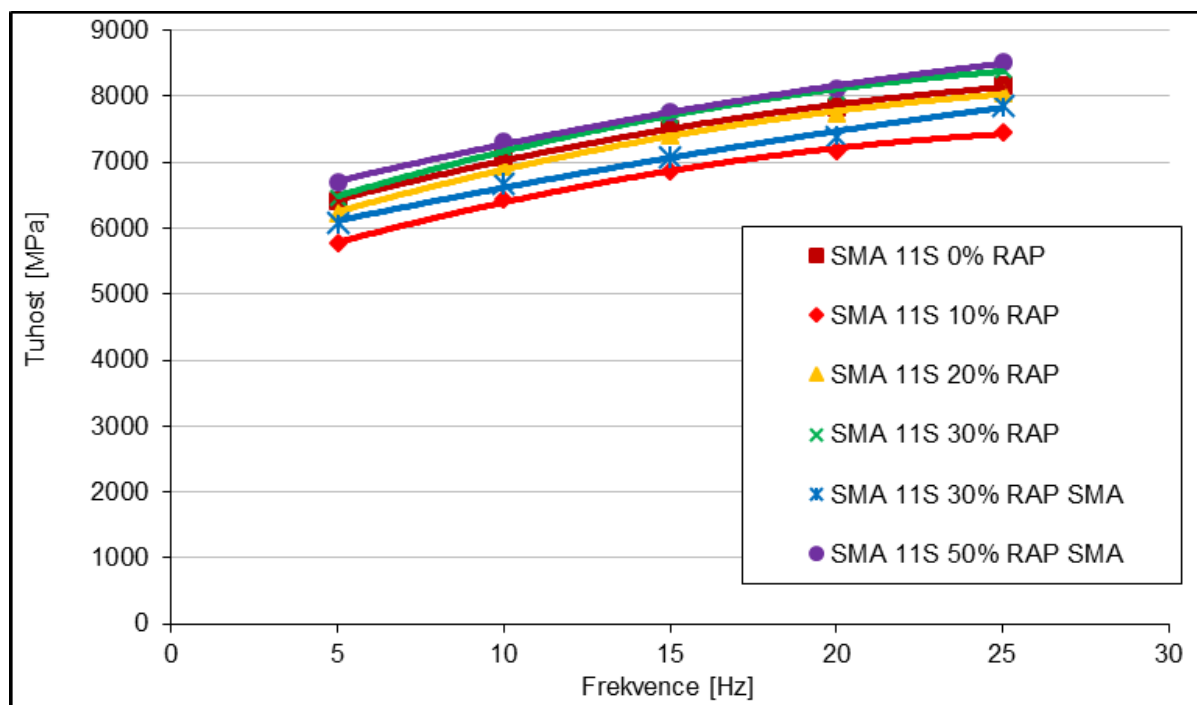
Na základě vyhodnocení výše uvedených výsledků měření je možno konstatovat, že při obou zkušebních teplotách byly u všech zkoušených variant směsí SMA 11S splněny všechny normové (resp. nově navrhované normové) požadavky.

#### b) stanovení tuhosti dle ČSN EN 12697-26 [49]

Moduly tuhosti byly stejně jako u směsí typu asfaltový beton opět stanoveny na trapezoidech dvoubodovou zkouškou za ohybu dle ČSN EN 12697-26 [49]. Desky byly hutněny na míru zhutnění v rozmezí 99 % - 101 %. Stanovování modulů tuhosti probíhalo při teplotě 15 °C a zatěžovacích frekvencích 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz a 25 Hz. Získané výsledky jsou souhrnně uvedeny v Tabulce 8 a graficky vyhodnoceny v Grafu 11.

Tabulka 8: Tuhost jednotlivých variant navržených směsí SMA 11S s různými podíly a oběma druhy R-materiálu

Druh asfaltové směsi	Modul tuhosti [MPa] při 15°C a frekvenci zatěžování				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
SMA 11S 0% RAP	6405	<b>7082</b>	7492	7835	8156
SMA 11S 10% RAP	5765	<b>6434</b>	6864	7178	7443
SMA 11S 20% RAP	6235	<b>6923</b>	7400	7736	8047
SMA 11S 30% RAP	6467	<b>7207</b>	7703	8075	8393
SMA 11S 30% RAP SMA	6076	<b>6683</b>	7083	7382	7868
SMA 11S 50% RAP SMA	6691	<b>7321</b>	7760	8111	8521



Graf 11: Tuhost jednotlivých variant navržených směsí SMA 11S s různými podíly a oběma druhy R-materiálu

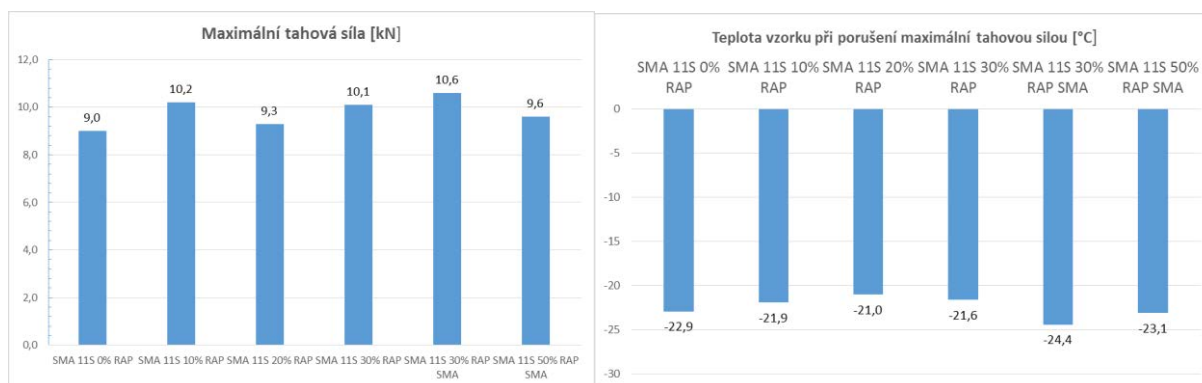
Na základě vyhodnocení výše uvedených výsledků stanovení modulů tuhosti je možno konstatovat, že moduly tuhosti všech variant leží při grafickém znázornění v poměrně úzkém pásu a nijak výrazně se neliší. U směsí s běžným R-materiálem se hodnoty modulů tuhosti při teplotě 15 °C a frekvenci zatěžování 10 Hz pohybují v rozmezí od 6434 MPa do 7207 MPa. Směsi s R-materiálem ze směsí SMA vykazují při stejných zkušebních podmínkách moduly tuhosti od 6683 MPa do 7321 MPa.

### c) posouzení nízkoteplotních vlastností dle ČSN EN 12697-46 [58].

Tyto pro obrusnou vrstvu důležité charakteristiky byly prováděny dle ČSN EN 12697-46 [58]. Zkušební tělesa jsou ochlazována rychlostí 10°C/hod z výchozí teploty 10°C po době temperování v délce 15 minut. Na zkušebních tělesech o průřezu 50 mm x 50 mm je zjišťována maximální tahová síla při porušení mrazovou smršťovací trhlinou a odpovídající teplota při vzniku této trhliny. Získané parametry jsou souhrnně uvedeny v Tabulce 9 a graficky vyhodnoceny v Grafech 12 a 13.

Tabulka 9: Výsledné nízkoteplotní parametry jednotlivých variant navržených směsí SMA 11S s různými podíly a oběma druhy R-materiálu

Druh asfaltové směsi	Nízkoteplotní vlastnosti dle ČSN EN 12697-46	
	Maximální tahová síla [kN]	Teplota vzorku při porušení maximální tahovou silou [°C]
SMA 11S 0% RAP	9,0	-22,9
SMA 11S 10% RAP	10,2	-21,9
SMA 11S 20% RAP	9,3	-21,0
SMA 11S 30% RAP	10,1	-21,6
SMA 11S 30% RAP SMA	10,6	-24,4
SMA 11S 50% RAP SMA	9,6	-23,1



Graf 12 a 13: Srovnání maximálních tahových sil a teplot vzorku při porušení trhlinou jednotlivých variant směsí SMA 11S s různými podíly a oběma druhy R-materiálu

Z výsledků uvedených výše je možno vysledovat, že výsledná maximální síla při porušení je u všech zkušebních variant směsí při zohlednění chyby měření prakticky totožná. Stejně tak výsledné teploty vzorků při porušení (vzniku mrazové trhliny) vychází velmi podobně. Mírně lepších výsledků si lze všimnout u variant s R-materiálem ze směsi SMA (RAP SMA), což lze vysvětlit přítomností modifikovaného pojiva v R-materiálu.

## 7.2 POKUSNÝ ÚSEK

Na základě provedených laboratorních návrhů a ověření vlastností směsí SMA 11S s R-materiálem pomocí funkčních zkoušek byl v rámci řešení projektu [25] podán návrh na Státní fond dopravní infrastruktury na realizaci pokusného úseku, na kterém by byly ověřeny jak laboratorně navržené směsi, tak i další varianty směsí SMA s R-materiálem.

Podaný návrh byl finančně podpořen a v průběhu měsíce září 2016 byl společností Froněk, spol. s r.o. realizován pokusný úsek (financovaný v rámci programu „Nové technologie“), na kterém bylo provedeno celkem 17 variant obrusné vrstvy, tvořené směsí SMA 11S s dvěma druhy R-materiálu (RAP a RAP SMA) a jejich různými obsahy (0 % až 50 %).

Dále byla ověřena možnost dávkování oživovací přísady pomocí nasyceného celulóзовého vlákna danou přísadou ve formě granule a možnost použití nemodifikovaného pojiva gradace 50/70 s modifikační přísadou. Dodavatelem těchto materiálů byla společnost CIUR, a.s., která byla spoluřešitelem projektu.

Zkušební úsek se nachází ve Středočeském kraji v okrese Rakovník na silnici II. třídy - II/227 mezi městem Rakovník a obcí Kněžves. Celková délka úseku je 4 783 metrů. Silnice je důležitou součástí místní infrastruktury. Je často využívána při neprůjezdnosti silnice I/6 jako objízdná trasa.

Obrusná vrstva SMA 11S byla položena celkem v 17 variantách, jejichž bližší popis je uveden podrobně v textu habilitační práce.

Na níže uvedených Obrázcích 6 až 9 je zachycena realizace pokládky směsí SMA 11S s až 50 % množstvím R-materiálu na pokusném úseku.





Obrázek 6 a 7: Pokládka směsi SMA 11S s 50 % podílem R – materiálu [54], vlevo: doprava směsi, vpravo: finišer



Obrázek 8 a 9: Vlevo: Poslední fáze hutnění s podrt'ováním povrchu vrstvy, vpravo: detail hotové zhutněné vrstvy [54]

Výroba všech variant asfaltových směsí na obalovně společnosti Froněk spol. s r.o. (při využití paralelního bubnu), dávkování oživovací přísady (i ve formě celulózových vláken nasycených oživovací přísadou), následná pokládka a hutnění směsí proběhlo bez jakýchkoliv technických či logistických problémů.

Při realizaci úseku byly odebrány vzorky jednotlivých variant nezhutněných směsí u finišeru a následně na nich byly provedeny laboratorní rozborů – kontrolní zkoušky. V roce 2017 došlo k odebrání jádrových vývrtů ze všech podúseků. V rámci bakalářských, diplomových a disertačních prací jsou prováděny rozborů směsí a následné funkční zkoušky na zpětně získaných pojivech především za účelem ověření funkce oživovacích a modifikačních přísad. Doposud jsou získávány uspokojivé výsledky. Současně také bylo zahájeno pravidelné sledování stavu pokusného úseku, které je prováděno pěší vizuální prohlídkou.

Níže jsou uvedeny výsledky práce autora, které byly provedeny na odebraných jádrových vývrtech ze všech úseků za účelem nastavení kritéria pro maximální obsah a druh R-materiálu do směsí typu asfaltový koberec mastixový.

Na všech vývrtech došlo k odebrání obrusné vrstvy pro provedení laboratorních rozborů všech variant směsí. Z těchto směsí bylo zpětně získáno asfaltové pojivo pro provedení základních empirických zkoušek a reologických měření a proveden síťový rozbor kameniva. Reologická měření byla provedena za účelem posouzení vlivu dávkování R-materiálu s modifikovaným pojivem (RAP SMA) do směsí. Vzhledem k tomu, že jde o směsí, které prošly obalovacím

procesem a již přibližně rok plnily svou funkci ve vozovce, jsou získané výsledky autorem považovány za velmi důležité pro správné nastavení požadavků do normy.

Sítové rozbory na kamenivu ze směsí byly provedeny především za účelem posouzení vlivu dávkování běžného R-materiálu (RAP) s plynulým průběhem čáry zrnitosti kameniva a R-materiálu ze směsi SMA (RAP SMA) se „zalomeným“ průběhem čáry zrnitosti.

Pro stanovení reologických vlastností zpětně získaných pojiv byl využit dynamický smykový reometr Kinexus. Konkrétně byla prováděna zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) dle ČSN EN 16659 [45], která mimo jiné umožňuje posoudit a rozlišit stupeň modifikace pojiv. Níže v tabulce jsou uvedeny výsledky zkoušky u vybraných variant pojiv. Za účelem nastavení parametrů do normy byla vybrána pojiva:

- a) z úseku 2: jde o „referenční směs“, obsahující modifikovaný asfalt a neobsahující R-materiál;
- b) z úseku 5: jde o směs, obsahující modifikovaný asfalt a 30 % R-materiálu ze směsi SMA (RAP SMA);
- c) z úseku 7: pro srovnání, jde o směs obsahující pojivo gradace 50/70 a neobsahující R-materiál.

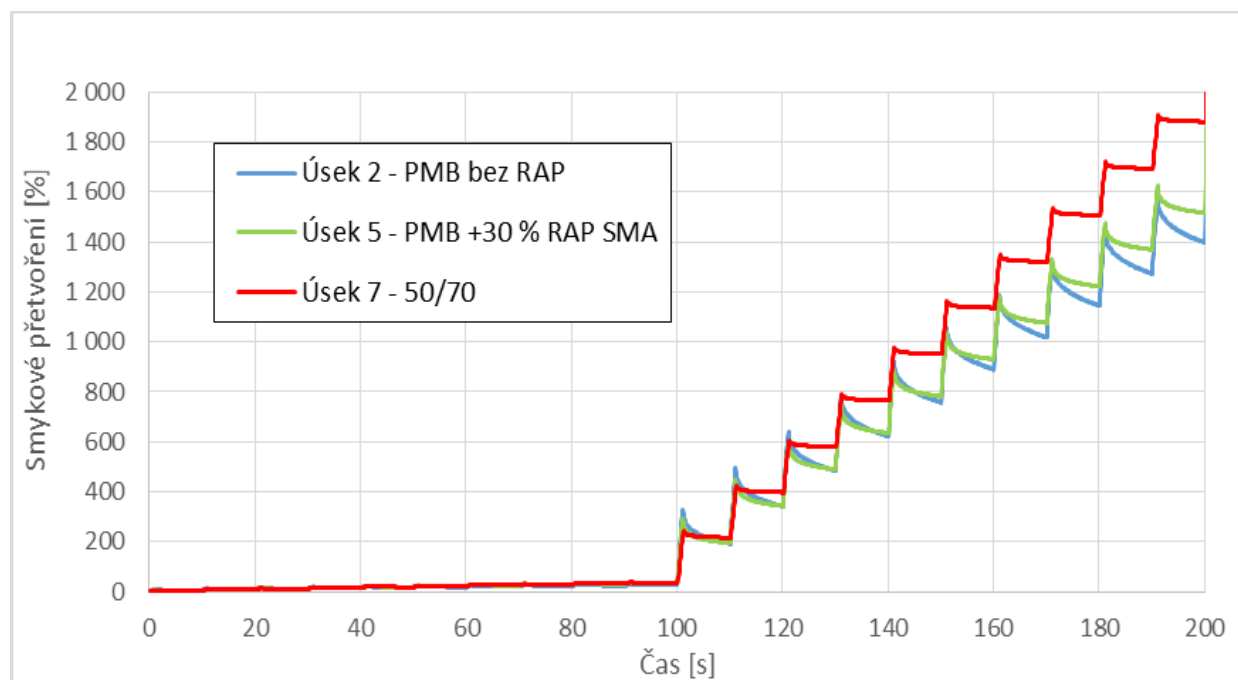
Tabulka 10: Výsledky Multiple Stress Creep and Recovery Testu dle ČSN EN 16659 [45] u vybraných pojiv

Zpětně získané pojivo z úseku:	Výsledky testu (Multiple Stress Creep and Recovery Test) dle ČSN EN 16659 [45]					
	$J_{nr0,1}$ [kPa <sup>-1</sup> ]	$J_{nr3,2}$ [kPa <sup>-1</sup> ]	$J_{nr, diff 3,2-0,1}$ [%]	$R_{0,1 kPa}$ [%]	$R_{3,2 kPa}$ [%]	$R_{diff 3,2-0,1}$ [%]
Úsek 2	0,24	0,43	75,77	71,46	54,52	23,71
Úsek 5	0,32	0,46	42,72	54,96	41,78	23,98
Úsek 7	0,35	0,58	65,63	35,82	12,18	66,00

Vysvětlivky:

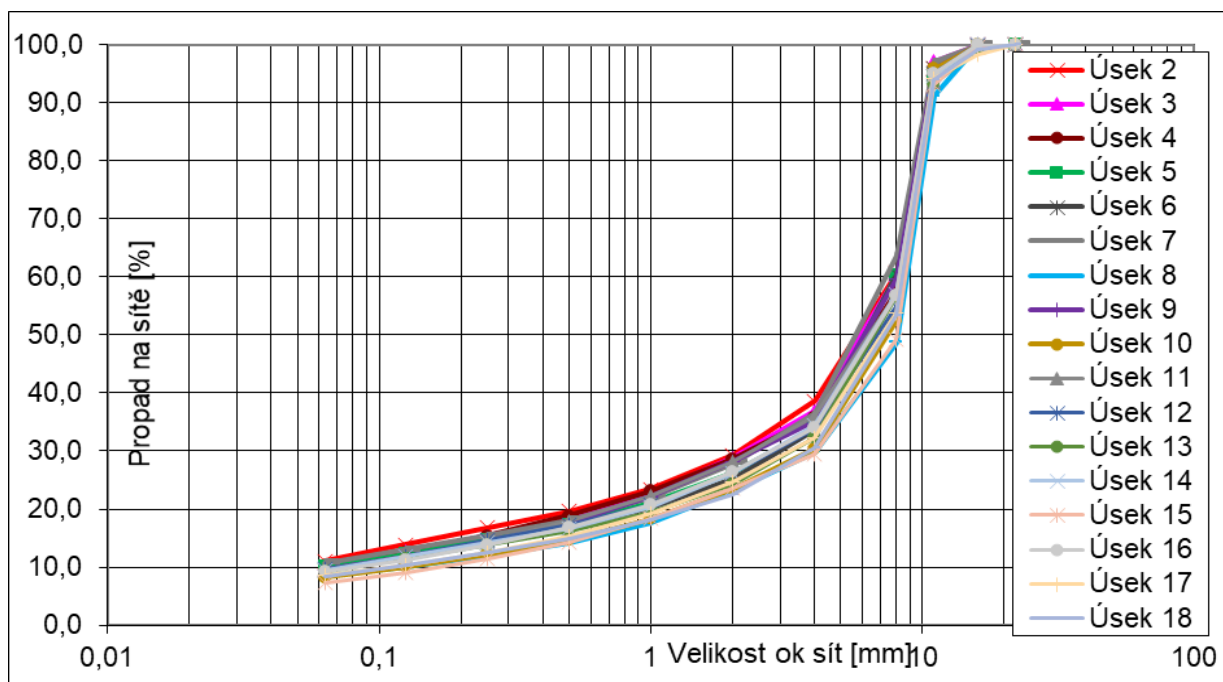
$J_{nr}$ ... je nevratná smyková poddajnost (při dvojitým napětí: 0,1 kPa a 3,2 kPa)

$R_{0,1(3,2)kPa}$ ... je průměrné elastické zotavení v %



Graf 14: Grafické znázornění průběhu Multiple Stress Creep and Recovery Testu dle ČSN EN 16659 [45] pro vybraná pojiva

Ze záznamu smykového přetvoření při průběhu Multiple Stress Creep and Recovery Testu a získaných parametrů lze pozorovat, že se pojiva zpětně získaná z úseků 2 a 5 (tj. s 0 % R-materiálu a 30 % R-materiálu ze směsi SMA) chovají oproti pojivu z úseku 7 (tj. pojivo 50/70) velmi podobně. Dále jsou v Grafu 15 uvedeny výsledky síťových rozborů kameniv ze všech na pokusném úseku použitých asfaltových směsí.



Graf 15: Výsledky síťových rozborů kameniv všech směsí z pokusného úseku

Čáry zrnitosti zpětně získaných kameniv ze všech směsí leží v poměrně úzkém pásmu. Z konkrétních propadů na normou požadovaných sítích bylo zjištěno, že byly splněny požadavky normy s ohledem na zrnitost směsí.

Při podrobnějším průzkumu průběhu čar zrnitosti směsí lze pozorovat, že směsi, u nichž byl dávkován R-materiál ze směsi SMA (RAP SMA), mají ve výsledku příznivější (více zalomenou) čáru zrnitosti.

S ohledem na výše uvedené výsledky zkoušek na směsích z pokusného úseku byl autorem práce nastaven návrh normových požadavků na druh a maximální množství R-materiálu ve směsích typu asfaltový koberec mastixový. Konkrétní znění je uvedeno v závěrech práce.

## 8 ZÁVĚRY

Všechny činnosti, které jsou popisovány v rámci habilitační práce, si kladly za cíl zlepšit stávající stav ve využívání R-materiálu v hutněných asfaltových směsích v České republice. Konkrétně bylo dosaženo níže uvedených cílů:

- a) Byl popsán stávající stav v oblasti přidávání R-materiálu do asfaltových směsích v České republice a to jak z pohledu legislativního a normového, tak i z pohledu ekologického a ekonomického.
- b) Byla popsána problematika stárnutí asfaltových pojiv a směsích v průběhu výroby, pokládky a jejich následné funkce v konstrukci vozovky včetně popisu dostupných laboratorních metod, simulujících stárnutí asfaltových pojiv a asfaltových směsích. Dále byl popsán stávající způsob hodnocení náchylnosti asfaltových pojiv a směsích ke stárnutí v České republice.
- c) Byly rozebrány a popsány tři možné způsoby rejuvenace zestárlého asfaltového pojiva v R-materiálu a související problematika.
- d) Byl popsán aktuální stav v oblasti technických možností přidávání R-materiálu do hutněných asfaltových směsích v ČR.
- e) V experimentální části práce byla prvotní pozornost věnována asfaltovým směsím typu asfaltový beton, které jsou nejrozšířenějším druhem hutněných za horka vyráběných asfaltových směsích v České republice díky tomu, že jsou široce používány pro výstavbu podkladních, ložních i obrusných vrstev vozovek. Na laboratorně vyráběných asfaltových směsích byla provedena řada empirických a funkčních zkoušek pro ověření možnosti dávkování až 70 % podílu R-materiálu. Po jejich vyhodnocení je možno konstatovat, že vlivem dávkování až 70 % podílu rejuvenovaného R-materiálu nedochází k žádnému negativnímu ovlivnění vlastností asfaltových směsích typu asfaltový beton a směsích splňují všechny normové parametry.
- f) Ve druhé fázi experimentální části práce se pozornost soustředila na asfaltové směsích, které jsou v České republice používány pro obrusné vrstvy dopravně nejvíce zatížených vozovek – asfaltové koberece mastixové. Jde o typ asfaltové směsích, jejichž objem výroby bude v následujících letech (vzhledem k návrhovaným změnám norem) stoupat. Stejně jako v případě směsích typu asfaltový beton byla na laboratorně vyráběných asfaltových směsích provedena řada empirických a funkčních zkoušek pro ověření možnosti dávkování až 50 % podílu R-materiálu do tohoto typu asfaltové směsích. Při provádění návrhů směsích a jejich následném zkoušení byly používány dva rozdílné druhy R-materiálu. Po vyhodnocení výsledků zkoušek je možno opět konstatovat, že vlivem dávkování až 50 % podílu rejuvenovaného R-materiálu nedochází k negativnímu ovlivnění vlastností asfaltových směsích typu asfaltový koberec mastixový a parametry směsích vyhovují všem normovým požadavkům.
- g) S podporou Státního fondu dopravní infrastruktury se podařilo vybudovat dva pokusné úseky, při jejichž budování byly mj. využity laboratorně navržené směsích. V případě asfaltových směsích typu asfaltový beton jde o úsek na komunikaci II/204 Kaznějov – Mrtník, v případě směsích typu asfaltový koberec mastixový jde o úsek na silnici II. třídy - II/227 mezi městem Rakovník a obcí Kněžves. U obou úseků je prováděn pravidelný monitoring jejich

technického stavu včetně odběrů vzorků směsí a vyhodnocování parametrů jednotlivých variant směsí. Díky provedení měření reologických vlastností zpětně získaných poživ z pokusného úseku na silnici II. třídy - II/227 se mimo jiné podařilo ověřit, že do směsí typu asfaltový koberec mastixový s modifikovanými asfalty je vhodné dávkovat R-materiál, obsahující modifikovaný asfalt.

- h) Kromě několika ověřených technologií dávkování R-materiálu do různých druhů asfaltových směsí byla v roce 2017 sestavena „Metodika aplikace R-materiálu do asfaltových směsí typu SMA (Stone mastix asphalt)“, která byla následně dne 24.1.2018 certifikována Ministerstvem dopravy a vydáno osvědčení o uznání uplatněné certifikované metodiky pod č.j. 118/2017-710-VV/1. Text certifikované metodiky je uveden v příloze habilitační práce.
- i) Autor habilitační práce byl na základě publikovaných výsledků práce vyzván k sestavení nové normy ČSN 73 6141 s názvem „Požadavky na použití R-materiálu do asfaltových směsí“. Text posledního návrhu textu nové normy je uveden v příloze habilitační práce.
- j) Byl proveden návrh úpravy textu specifikační normy pro směsi typu asfaltový beton ČSN EN 13108-1. V národních parametrech k normě ČSN EN 13 108-1 Asfaltový beton je nově navržena tabulka, upravující nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi.

Tabulka 11: Návrh tabulky, upravující nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi v NP k ČSN EN 13 108-1 Asfaltový beton

Obrusné vrstvy		Ložní vrstvy		Podkladní vrstvy	
Druh směsi	R-materiál (%)	Druh směsi	R-materiál (%)	Druh směsi	R-materiál (%)
<b>ACO 8</b>	35	<b>ACL 16 S</b>	40	<b>ACP 16 S</b>	60
<b>ACO 8 CH</b>	35	<b>ACL 16 +</b>	50	<b>ACP 16 +</b>	70
<b>ACO 11 +</b>	30	<b>ACL 16</b>	50	<b>ACP 22 S</b>	60
<b>ACO 11</b>	35	<b>ACL 22 S</b>	40	<b>ACP 22 +</b>	70
<b>ACO 16 +</b>	30	<b>ACL 22 +</b>	50		
<b>ACO 16</b>	35	<b>ACL 22</b>	50		

<sup>1)</sup> R-materiál za studena lze přidávat bez jeho další úpravy do směsí se silničním asfaltem v množství max. 15 %. Při vyšších množstvích dávkování R-materiálu jak 15 % (obrusné, ložní, podkladní vrstvy) je nutno vypočítat potřebné množství dávkování asfaltu měkčí gradace nebo rejuvenátoru tak, aby bylo dosaženo výsledné deklarované gradace pojiva podle tabulky 4.1. Množství a druh dávkovaného rejuvenátoru se uvádí ve zkoušce typu (ITT). Objednatel má za povinnost se přesvědčit přímo na obalovně o druhu a dávkování rejuvenátorů do asfaltových směsí. Přidávání R-materiálu metodu po částech za studena (použití variátoru) lze za výše uvedených podmínek použít pouze pro výrobu asfaltových směsí pro podkladní vrstvy.

<sup>2)</sup> Do směsí pro ložní, podkladní a vyrovnávací vrstvy, do kterých se přidává modifikované asfaltové pojivo, lze přidávat max. 15 % R-materiálu. Pokud se vyrábí asfaltová směs pro obrusné vrstvy, do které se přidává modifikovaný asfalt, není možné do směsí přidávat R-materiál se silničním asfaltem (v případě modifikovaných poživ v R-materiálu platí omezení dávkování na max.15 %).

- k) Byl proveden návrh úpravy textu specifikační normy pro směsi typu asfaltový koberec mastixový ČSN EN 13108-5. V národních parametrech k normě ČSN EN 13 108-5 Asfaltový koberec mastixový je nově navržena úprava textu (kapitola 5.3), upravující nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi. Je navrženo, aby

původní text, zakazující dávkování R-materiálu do směsí typu asfaltový koberec mastixový, byl nahrazen nově zněním:

*„Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi činí 20 %. R-materiál musí být získán odděleným frézováním ohrusné vrstvy vozovky tvořené směsí typu SMA (s modifikovaným asfaltovým pojivem). Požadavky na R-materiál jsou uvedeny v ČSN EN 13108-8.“*

- 1) V průběhu řešení obou výše zmiňovaných výzkumných projektů a v době sestavování habilitační práce postupně proběhla řada jednání s představiteli státních investorských organizací (Ředitelství silnic a dálnic ČR, Ministerstvo dopravy), na kterých byly představovány výsledky práce s cílem prolomit jejich dosavadní nedůvěru k R-materiálu. Souběžně s těmito aktivitami probíhají v současné době školení s touto tematikou, na kterých jsou prezentovány výsledky výzkumu a nové změny v legislativních a normových předpisech. Jde například o pravidelné semináře pořádané autorem na VUT v Brně nebo přednášky autora práce na školeních, které organizuje Sdružení pro výstavbu silnic.

## 9 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Zajíček, J., Birnbaumová, M., Hýzl, P., Nekula, L., Stehlík, D., Valentin, V., Varaus, M., Věbr, L., Technologie stavby vozovek, Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, ISBN 978-80-87438-59-6, Praha, 2014.
- [2] Plitz J., Stárnutí silničních pojiv. Sborník z konference Asfaltové vozovky AV 97, České Budějovice, 1997.
- [3] ČSN EN 12607-2 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 2: Metoda TFOT
- [4] ČSN EN 12595 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení kinematické viskozity
- [5] ČSN EN 12607-3 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 3: Metoda RFT
- [6] ČSN EN 12607-1 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 1: Metoda RTFOT
- [7] ČSN EN 15323 Asfalty a asfaltová pojiva - Urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce (RCAT)
- [8] ČSN EN 14769 Asfalty a asfaltová pojiva - Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV)
- [9] <https://cooper.co.uk/shop/bitumen-testing/loss-on-heating-thin-film-oven/>
- [10] <http://www.matest.com/en/Products/bitumen-asphalt/Macro-Category/bituminous-binders-determination-of-the-resistance-of-hardening-rotating-flask-test-rft-me/b065-rotary-evaporation-apparatus>
- [11] Anderson, A., D., Bonaquist, R., Investigation of Short-Term Laboratory Aging of Neat and Modified Asphalt Binders, NCHRP Report 709, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, WASHINGTON, D.C., 2012, ISBN 978-0-309-21363-9, DOI 10.17226/14613, p. 20
- [12] <http://www.matest.com/en/Products/bitumen-asphalt/Macro-Category/OTHER-PRODUCTS-2/b091n-pressure-ageing-vessel>
- [13] ČSN EN 12591 Asfalty a asfaltová pojiva - Specifikace pro silniční asfalty
- [14] ČSN EN 14023 Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty
- [15] Dašek, O.; Hýzl, P.; Coufalík, P.; Varaus, M.; Stehlík, D.; Špaček, P.; Hegr, Z., Stoklásek, S.; Matoušek, D.; Svoboda, P.; Metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí; Brno; 2015
- [16] Technische Vertragsbedingungen-Baustoffe RVS 08.97.05: GmBH., Anforderungen an Asphaltmischgut (Januar 2007/Februar 2010).
- [17] ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička
- [18] ČSN EN 14770 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR)
- [19] Dašek, O.; Hýzl, P.; Coufalík, P.; Varaus, M.; Stehlík, D.; Špaček, P.; Hegr, Z., Stoklásek, S.; Matoušek, D.; Svoboda, P.; Metodika popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí; Brno; 2015
- [20] prEN 12697-52: Bituminous mixtures — Test methods — Part 52: Conditioning to address oxidative ageing. CEN/TC 227
- [21] Bell, C. A.; AbWahab, Y.; Cristi, M. E.; Sosnovske, D.; Report SHRP-A-383, Selection of laboratory aging procedures for asphalt – aggregate mixtures, Strategic Highway Research Program, National Research Council, 2101 Constitution Avenue, NW Washington, DC 20418 United States, 03/1994, ISBN: 0309057620
- [22] <https://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart>

- [23] Přehled výroby a zpracování materiálů pro stavbu vozovek v roce 2017; Sdružení pro výstavbu silnic; Praha; 03/2018
- [24] Výzkumný projekt Technologické agentury ČR č. TA02030549 “Maximálně efektivní využití recyklovaných asfaltových vrstev vozovek pro výrobu asfaltových směsí”; Řešitel: Vysoké učení technické v Brně, doba řešení: 01/2012 až 12/2014.
- [25] Výzkumný projekt Technologické agentury ČR č. TA04031328 “Recyklace asfaltových kobereců mastixových a vývoj speciálního celulózového vlákna do těchto typů směsí”; Řešitel: Vysoké učení technické v Brně, doba řešení: 07/2014 až 12/2017.
- [26] ČSN EN 13108-1; Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton; Český normalizační institut; 2008
- [27] ČSN EN 13108-8 ed.2; Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 8: R-materiál; Český normalizační institut; 08/2017
- [28] ČSN EN 13108-5; Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 5: Asfaltový koberec mastixový; Český normalizační institut; 2008
- [29] ČSN EN 13108-2; Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 2: Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy; Český normalizační institut; 2008
- [30] ČSN EN 13108-7; Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 7: Asfaltový koberec drenážní; Český normalizační institut; 2008
- [31] Vyhláška Ministerstva životního prostředí, která stanoví kritéria, při jejichž splnění je znovuzískaná asfaltová směs vedlejším produktem nebo přestává být odpadem, a kritéria, při jejichž splnění přestává být asfaltová směs vyrobená z odpadní znovuzískané asfaltové směsi odpadem; text návrhu vyhlášky ve stavu meziresortního připomínkového řízení; 08/2018 (zatím bez přiděleného číselného označení vyhlášky)
- [32] ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou; 12/2015
- [33] ČSN EN 12593 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse; 12/2015
- [34] Martin, Amy Epps, a kol.; THE EFFECTS OF RECYCLING AGENTS ON ASPHALTMIXTURES WITH HIGH RAS AND RAP BINDER RATIOS; PHASE I INTERIM REPORT; Texas A&M Transportation Institute; College Station, Texas; 03/2015; (Prepared for National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board of The National Academies; Project No. 9-58).
- [35] NCAT (2014a) “How Should We Express RAP and RAS Contents?” Asphalt Technology News; Vol. 26, No. 2 (Fall), dostupné na: <http://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/info-pubs/newsletters/fall-2014/recycledcontents.html>. (As of February 24, 2015).
- [36] Údaj EAPA; dostupné na: <http://www.eapa.org/asphalt.php>
- [37] EAPA Position paper; Asphalt the 100% recyclable construction product; European Asphalt Pavement Association; Brussels, Belgium; June 2014; dostupné na: [http://www.eapa.org/userfiles/2/Publications/EAPApaper\\_Asphalt\\_the%20100%20recyclable\\_construction%20product.pdf](http://www.eapa.org/userfiles/2/Publications/EAPApaper_Asphalt_the%20100%20recyclable_construction%20product.pdf)
- [38] Komacka J., Remisova E., Deliverable Nr 4.1 Asphalt Mixtures Using Reclaimed Asphalt containing Polymer Modified Binder, RECYPMA, 2013
- [39] Gang Liu, Erik Nielsen, Jozef Komacka, Greet Leegwater, Martin van de Ven, Influence of soft bitumens on the chemical and rheological properties of reclaimed polymer-modified binders from the “old” surface-layer asphalt, Construction and Building Materials, Volume 79, 2015, Pages 129-135, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.002>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181500015X>)



- [40] Gang Liu, Greet Leegwater, Erik Nielsen, Jozef Komacka, Martin van de Ven, Evaluating the rheological properties of PMB-containing RA binders from surface-layer asphalt mixtures to be recycled, *Construction and Building Materials*, Volume 49, 2013, Pages 8-14, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.012>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813007423>)
- [41] Gang Liu, Erik Nielsen, Jozef Komacka, Leegwater Greet, Martin van de Ven, Rheological and chemical evaluation on the ageing properties of SBS polymer modified bitumen: From the laboratory to the field, *Construction and Building Materials*, Volume 51, 2014, Pages 244-248, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.043>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813009641>)
- [42] Koudelka, T.; Dašek, O.; Varaus, M.; Coufalíková, I.; Recyklace asfaltových směsí s polymerem modifikovanými asfalty; článek připravený k vydání v časopise Silniční obzor; 2018
- [43] Pavel Kriz, Daniel L. Grant, Bibiana A. Veloza, Mary J. Gale, Alan G. Blahey, John H. Brownie, Ralph D. Shirts & Sam Maccarrone (2014) Blending and diffusion of reclaimed asphalt pavement and virgin asphalt binders, *Road Materials and Pavement Design*, 15:sup1, 78-112, DOI: 10.1080/14680629.2014.927411
- [44] Adam Liphardt, Piotr Radziszewski, Jan Król; Binder blending estimation method in hot mix asphalt with reclaimed asphalt; XXIV R-S-P seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (24RSP) (TFoCE 2015); *Procedia Engineering* 111 (2015) 502 – 509; Published by Elsevier Ltd; 2015; doi: 10.1016/j.proeng.2015.07.123; dostupné na: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [45] ČSN EN 16659 Asfalty a asfaltová pojiva – Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test), Úřad pro technickou normalizaci, měření a státní zkušebnictví, 2016
- [46] Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt; ISBN 978-3-939715-98-6; FGSV Verlag GmbH; 2009
- [47] Varaus, M.; Recyklace netuhých vozovek, přednáška; Školení pracovníků laboratoří; VUT v Brně; 2016
- [48] ČSN EN 12697-12 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě; 02/2009
- [49] ČSN EN 12697-26 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 26: Tuhost; 09/2012
- [50] ČSN EN 12697-22+A1 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 22: Zkouška pojiždění kolem; 12/2007
- [51] ČSN EN 12697-24 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 24: Odolnost vůči únavě; 05/2018
- [52] ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Síťový rozbor
- [53] ČSN EN 13398 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů;
- [54] Hýzl, P. a kol; Využití R-materiálu v asfaltových směsích typu SMA; In *Asfaltové vozovky 2017*. 1. České Budějovice: PRAGOPROJEKT, a.s., K Ryšánce 1668/16, 147 54 Praha 4, 2017. ISBN: 978-80-906809-0-6.
- [55] Malá, M. Využití R-materiálu v krytových vrstvách vozovek. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Diplomová práce. 122 s. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D., 2015
- [56] Slaviček, M. Využití R - materiálu v asfaltových kobercích mastixových. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Diplomová práce. 115 s. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D., 2017

- [57] Motl, V. Problematika R-materiálu v asfaltových směsí typu SMA. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Bakalářská práce. 68 s. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D., 2016
- [58] ČSN EN 12697-46 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem; 11/2012
- [59] Pavličík, P. Návrhy asfaltových směsí s využitím vyššího obsahu R-materiálu. Brno, 2013. 97 s., 12 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Michal Varaus.
- [60] Urbanec, L. Problematika zvyšování podílu R-materiálu v asfaltových směsích. Brno, 2013. 121 s., 10 s. příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav pozemních komunikací. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [61] Coufalík, P. Reologické vlastnosti asfaltových pojiv. Brno, 2017. 213 s., 28 s. příl., Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

## **Abstrakt**

Habilitační práce je zaměřena na problematiku využívání R-materiálu v hutněných asfaltových směsích. V teoretické části práce je popsán stávající stav v oblasti přidávání R-materiálu do asfaltových směsí a to jak z pohledu legislativního a normového, tak i z pohledu ekologického a ekonomického. Je mj. popisována problematika stárnutí asfaltových pojiv a směsí a dostupné laboratorní metody, umožňující simulovat stárnutí asfaltových pojiv a asfaltových směsí v laboratorních podmínkách. Dále je rozebrána problematika rejuvenace zestárlého asfaltového pojiva v R-materiálu a technické možnosti jeho přidávání na obalovnách. Experimentální část práce je zaměřena na praktické ověření možnosti dávkování různých množství a druhů R-materiálu do v ČR nejrozšířenějších druhů asfaltových směsí - asfaltových betonů a asfaltových koberců mastixových. Byly provedeny laboratorní návrhy těchto směsí s různými podíly a druhy R-materiálu. U těchto směsí byly ověřovány jejich empirické a funkční vlastnosti. Práce vyústily ve vybudování pokusných úseků, jejichž stav je pravidelně monitorován. V závěru jsou shrnuty výsledky habilitační práce a představeny hlavní praktické výstupy – “Metodika aplikace R-materiálu do asfaltových směsí typu SMA (Stone mastix asphalt)” a nová ČSN 73 6141 s názvem „Požadavky na použití R-materiálu do asfaltových směsí“.

## **Abstract**

The objective of this habilitation work is to explore the use of reclaimed asphalt (RA) in compacted asphalt mixtures. The theoretical part of the thesis describes the current state of the art of adding the RA into the asphalt mixtures, analyzing the respective legislation, standards and the ecological and economic aspects. In addition, the thesis explores the aging of asphalt binders and mixtures and available laboratory methods enabling the simulation of aging asphalt binders and asphalt mixtures under laboratory conditions. Furthermore, it examines the topic of rejuvenating aged asphalt binder in RA and the technical capacities of adding the binder in the mixing plant. The objective of the experimental part of the thesis is to verify practically the dosage options of different amounts and types of RA in the asphalt mixtures that are the most commonly used ones in the Czech Republic - the asphalt concrete (AC) and the stone mastic asphalt (SMA). Laboratory design of these mixtures with different proportions and types of RA were made. The empirical and functional properties of these mixtures were verified. The work resulted in the construction of experimental sections that are regularly monitored. The thesis concludes with summarizing the results and with presenting the main practical outcomes - “The Methodology of Applying the Reclaimed Asphalt into the SMA mixtures” and the new standard ČSN 73 6141 named “The Requirements for Using Reclaimed Asphalt Material in Asphalt Mixtures”.