



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

VYUŽITÍ R-MATERIÁLU V HRUBOZRNNÝCH ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH

USE OF RAP IN COARSE-GRAINED ASPHALT MIXTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jozef Teslík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav pozemních komunikací
Student: **Bc. Jozef Teslík**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24
Studijní program: N0732A260026 Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Využití R-materiálu v hrubozrnných asfaltových směsích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Platné české normy umožňují použití asfaltových směsí s maximální zrnitostí směsi kameniva do 22 mm. Vzhledem k nedostatku některých frakcí kameniva ve stavební sezóně se hledají cesty, jak tyto nedostatkové frakce kameniva nahradit. Jednou z možností řešení tohoto problému je využití kameniva, které bude obsahovat větší zrna (například do 32 mm). Další možností je využití R-materiálu v těchto druhích asfaltových směsích.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Diplomová práce bude zaměřena na ověření možnosti použití R-materiálu v hrubozrnnějších asfaltových směsích při výstavbě vozovek. Konkrétně bude věnována pozornost laboratornímu návrhu asfaltové směsi typu ACP 32 s různým podílem R-materiálu. Na laboratorně vyráběných směsích budou stanovovány vybrané empirické a funkční parametry.

Seznam doporučené literatury a podklady:

ČSN 73 6121

ČSN 73 6141

ČSN 73 6160

Řada norem pro zkoušení asfaltových směsí řady 12697

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 29. 3. 2023

L. S.

prof. Dr.techn. Ing. Michal Varaus
vedoucí ústavu

doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

V diplomové práci jsou zkoumány možnosti využití R-materiálu v hrubozrnných asfaltových směsích do podkladních vrstev ACP32. Teoretická část se zabývá dostupností kameniva v České republice a také řeší problematiku výroby asfaltových směsí s vyšším obsahem R-materiálu. Rovněž se v teoretické části porovnává využití R-materiálů v České republice s jinými zeměmi. Praktická část se zabývá návrhem, výrobou a zkoušením vybraných směsí. Pro stanovení vlastností směsí byly vybrány zkoušky pojíždění kolem, TSRST a stanovení modulu pružnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfalt, asfaltová směs, asfaltový beton pro podkladní vrstvy, R-materiál, hrubozrnné kamenivo, návrh asfaltové směsi, zkouška pojíždění kolem, nízkoteplotní vlastnosti, TSRST, modul pružnosti

ABSTRACT

The diploma thesis examines the possibilities of using R-material in coarse-grained asphalt mixtures for ACP32 base layers. The theoretical part deals with the availability of aggregates in the Czech Republic and also solves the issue of producing asphalt mixtures with a higher content of R-material. The theoretical part also compares the use of R-materials in the Czech Republic with other countries. The practical part deals with the design, production and testing of selected mixtures. To determine the properties of the mixtures, the rolling wheel tests, TSRST and the determination of the modulus of elasticity were selected.

KEYWORDS

Bitumen, asphalt mixture, asphalt concrete for base layers, R-material, coarse aggregate, asphalt mixture design, wheel tracking, low temperature properties, TSRST, modulus of elasticity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TESLÍK, Jozef. *Využití R-materiálu v hrubozrnných asfaltových směsích*. Brno, 2024.

Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Využití R-materiálu v hrubozrnných asfaltových směsích* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 1. 2024

Bc. Jozef Teslík
autor

PODĚKOVÁNÍ

Za odborné vedení, cenné připomínky a rady bych rád poděkoval vedoucímu méj diplomové práce doc. Ing. Petru Hýzlovi, Ph.D. Dále bych rád poděkoval Ing. Petrovi Veselému, Pavlovi Strakovi a ostatním členům Ústavu pozemních komunikací VUT FAST v Brně za rady a pomoc při práci v laboratoři. V neposlední řadě děkuji své přítelkyni a rodině za podporu po celou dobu mého studia.

Obsah:

1 ÚVOD	10
2 REŠERŠE LITERATURY	11
2.1 Asfaltová směs.....	11
2.2 Složky asfaltové směsi.....	11
2.2.1 Asfalt.....	11
2.2.2 Druhy asfaltů	13
2.2.3 Vlastnosti asfaltu	13
2.3 Kamenivo.....	14
2.3.1 Rozdělení kameniva dle původu	15
2.3.2 Rozdělení kameniva dle vzniku zrn.....	15
2.3.3 Rozdělení kameniva dle objemové hmotnosti	16
2.3.4 Rozdělení kameniva dle velikosti zrn.....	16
2.3.5 Frakce kameniva.....	16
2.4 Využití frakcí kameniva nad 22 mm v ČR a v zahraničí.....	17
2.4.1 Spojené království	18
2.4.2 Německo	18
2.4.3 Ostatní země.....	18
2.5 R-materiál.....	18
2.5.1 Požadavky na zásobu (haldu) R-materiálu	19
2.6 Využití R-materiálů v ČR a jiných zemích	20
2.6.1 Porovnání využití R-materiálu v ČR a jiných zemích	21
2.7 Výroba asfaltových směsí	23
2.8 Druhy recyklace	23
2.8.1 Recyklace v mísícím centru za horka	24
2.8.2 Recyklace v míchacím centru za studena.....	28
2.8.3 Recyklace na místě za horka	29
2.8.4 Přísada STORFLUX.....	30
3 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	32
4 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY	33
4.1 Homogenizace stavebního kameniva a R-materiálu	33
4.2 Obsah rozpustného pojiva dle ČSN EN 12697-1	34
4.2.1 Obecná podstata zkoušky	34
4.2.2 Pomůcky pro extrakci pojiva	34
4.2.3 Postup zkoušky.....	34

4.2.4	Oddělení minerálního materiálu.....	34
4.2.5	Vyjádření výsledků	35
4.3	Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení dle ČSN EN 12697-3.....	35
4.3.1	Zkušební zařízení a pomůcky.....	35
4.3.2	Příprava stroje	36
4.3.3	Postup destilace	36
4.3.4	Vyjádření výsledků	37
4.4	Penetrace jehlou dle ČSN EN 1426	37
4.4.1	Podstata metody	37
4.4.2	Přístroje a pomůcky	37
4.4.3	Příprava vzorků.....	38
4.4.4	Postup zkoušky.....	38
4.4.5	Vyjádření výsledků:	39
4.5	Bod měknutí – Metoda kroužek a kulička dle ČSN EN 1427	39
4.5.1	Podstata metody	39
4.5.2	Přístroje a pomůcky	39
4.5.3	Příprava vzorků.....	40
4.5.4	Postup zkoušky.....	40
4.5.5	Vyjádření výsledků	41
4.6	Sítový rozbor dle ČSN EN 933-1.....	41
4.6.1	Podstata zkoušky.....	41
4.6.2	Zkušební zařízení.....	42
4.6.3	Zkušební postup.....	43
4.6.4	Vyjádření výsledků	44
4.7	Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením dle ČSN EN 12697-6.....	45
4.7.1	Podstata metody	45
4.7.2	Zkušební zařízení a pomůcky	45
4.7.3	Příprava vzorku.....	46
4.7.4	Postup zkoušky – metoda SSD	46
4.7.5	Výpočet.....	46
4.8	Stanovení maximální objemové hmotnosti volumetrickým postupem dle ČSN EN 12697-5	46
4.8.1	Podstata zkoušky.....	46
4.8.2	Použité zařízení a pomůcky.....	47
4.8.3	Příprava vzorku.....	48

4.8.4	Postup zkoušky.....	48
4.8.5	Výpočet.....	49
4.9	Stanovení mezerovitosti dle ČSN EN 12697-8.....	49
4.9.1	Podstata zkoušky.....	49
4.9.2	Výpočet.....	49
4.10	Zkouška pojíždění kolem podle ČSN EN 12697-22	50
4.10.1	Podstata zkoušky.....	50
4.10.2	Zkušební zařízení a pomůcky	50
4.10.3	Příprava vzorku.....	51
4.10.4	Postup zkoušky.....	51
4.10.5	Vyjádření výsledků	51
4.11	Nizkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem dle ČSN EN 12697-46.....	52
4.11.1	Podstata zkoušky TSRST	52
4.11.2	Zkušební pomůcky a přístroje.....	52
4.11.3	Příprava zkušebních těles.....	53
4.11.4	Postup zkoušky TSRST	54
4.11.5	Vyjádření výsledků	54
4.12	Stanovení modulu tuhosti dle ČSN EN 12697-26.....	54
4.12.1	Podstata zkoušky.....	54
4.12.2	Příprava zkušebních těles.....	55
4.12.3	Zkušební zařízení.....	57
4.12.4	Postup zkoušky.....	58
4.12.5	Vyjádření výsledků	58
5	POUŽITÉ MATERIÁLY.....	60
6	VÝSLEDKY ZKOUŠEK.....	61
6.1	Znovuzískání extrahovaného pojiva	61
6.2	Penetrace jehlou.....	61
6.3	Bod měknutí.....	61
6.4	Sítový rozbor	62
6.5	Návrh složení směsí	63
6.5.1	Návrh čáry zrnitosti pro směs ACP 32 +30.....	63
6.5.2	Návrh čáry zrnitosti pro směs ACP 32 +50.....	65
6.6	Výroba Marshallových těles.....	66
6.6.1	Stanovení navážek pro Marshallove tělesa.....	66
6.6.2	Výpočet navážek pro Marshallova tělesa.....	66

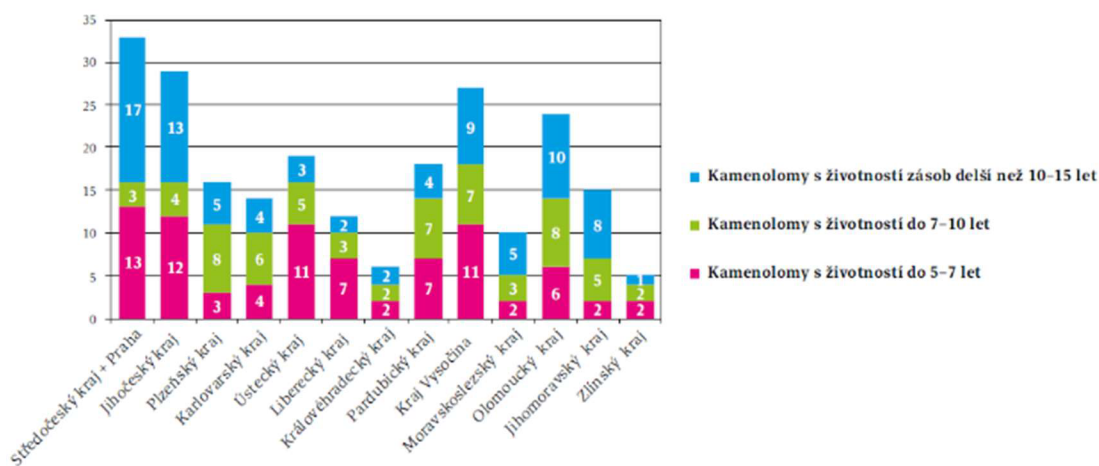
6.6.3	Hutnění Marshallových těles.....	67
6.6.4	Výroba asfaltové směsi.....	68
6.6.5	Stanovení objemové hmotnosti Marshallových těles	68
6.6.6	Stanovení maximální objemové hmotnosti Marshallových těles	69
6.6.7	Stanovení mezerovitosti Marshallových těles.....	69
6.7	Výroba desek.....	70
6.7.1	Výpočet navážky pro desky	70
6.7.2	Výroba směsi na zhotovení desek	72
6.7.3	Hutnění desek	72
6.8	Pojíždění kolem.....	74
6.9	Nízkoteplotní vlastnosti stanovené metodou TSRST	77
6.9.1	Výsledky TSRST	80
6.10	Tuhost.....	82
6.10.1	Výsledky zkoušky tuhosti.....	83
7	ZÁVĚR	86
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	88
9	SEZNAM OBRÁZK.....	92
10	SEZNAM TABULEK	94
11	SEZNAM GRAFŮ	96

1 ÚVOD

Spotřeba stavebního kamene v České republice neustále roste. V roce 2012 byla přibližná spotřeba 12,1 mil. m³ a v roce 2021 byla na úrovni 16,6 mil. m³. Zároveň od roku 1989 nebyl otevřen žádný nový kamenolom a v aktuálně činných kamenolomech odhadem dojdou zásoby do deseti let. Aktuálně je na území ČR aktivních 225 kamenolomů, přičemž se neplánuje otevírání nových. V některých kamenolomech se uvažuje o rozšiřování či zahlubování těžby, ale je zde veliké množství veřejnoprávních či majetkoprávních překážek jako jsou ochrana přírody, legislativní bariéry, vypořádání pozemků a jiné.

Nárůst poptávky a klesající výroba vede logicky k nárůstu cen stavebního kamene. Za rok 2022 vzrostly ceny stavebního kamene o 15–25 % v závislosti na frakci. Tato situace je značně znepokojivá a vytváří tlak na hledání jiných možností, jak stavební kamenivo nahradit.

Možné řešení je využití větších frakcí kameniva do asfaltových směsí v kombinaci s využitím vyššího podílu R-materiálu. [1]



Graf 1: Provozované kamenolomy v ČR a jejich odhadovaná životnost [1]

2 REŠERŠE LITERATURY

2.1 Asfaltová směs

Asfaltová směs se skládá z kameniva a z asfaltového pojiva, případně z dalších příměsí, například R-materiál. Jako asfaltové pojivo se dá použít asfalt, ředěný asfalt nebo asfaltová emulze. Hlavní kostru směsi vytváří kamenivo, kde se do sebe zaklíní jednotlivá zrna kameniva a asfaltové pojivo je pouze spojuje. Je důležité zvolit optimální poměr kameniva a pojiva pro zajištění co nejlepších vlastností směsi, aby byla schopna plnit svoji funkci po celou dobu životnosti, zejména odolávání dopravnímu zatížení a povětrnostním vlivům.

Asfaltové směsi, které jsou zpracovávány za horka, obvykle obsahují 93 – 96 % hmotnosti kameniva z celkové hmotnosti směsi a 4 – 7 % asfaltového pojiva. Objemová hmotnost kameniva je přibližně 2650 kg/m^3 a objemová hmotnost asfaltového pojiva se pohybuje od 1000 kg/m^3 do 1020 kg/m^3 . Ve výsledné zhutněné směsi pak kamenivo objemově zabírá 80 – 85 %, asfaltové pojivo 10 – 17 % a mezerovitost (nevyplněný prostor) zhutněné směsi je 3 – 5 %. [2]

2.2 Složky asfaltové směsi

2.2.1 Asfalt

Asfalt je látka živičného původu. Složkami asfaltu jsou uhlík, vodík, kyslík, případně dusík. Složky asfaltu rozdělujeme na asfalteny (nositele tvrdosti) a malteny (olejovité látky, které zodpovídají za plastické a lepivé vlastnosti asfaltu). Asfalt se dále dělí dle způsobu jeho získávání na:

- **Přírodní asfalt** – může být také označován jako skalní smůla a řadí se mezi nerosty. V přírodě se vyskytuje buď v tvrdém (tvrdost až na úrovni soli kamenné) nebo v kapalném skupenství. Je poměrně hořlavý se silně čmoudícím plamenem. Nejvýznamnější zásoby přírodního asfaltu jsou v provincii Alberta v Kanadě, v Mrtvém moři a v Asfaltovém jezeře na ostrově v Trinidadu. V malé míře se vyskytuje i v České republice, na příklad u Malé Chuchle, u Letovic nebo na Těšínsku. [3] [6]



Obrázek 1: Asfaltové jezero (Pitch lake) na ostrově v Trinidadu [4]

- **Umělý asfalt** – neboli ropný asfalt je získáván jako zbytkový produkt zpracováním ropy pomocí vákuové destilace. Ve vákuové destilaci se destiluje destilační zbytek – mazut z předešlé atmosferické destilace. Probíhá při nižších teplotách pod 525 °C. Výstupem z vákuové destilace jsou dvě až tři boční destiláty. Spodem se pak z vákuové kolony odčerpává vákuový zbytek – asfalt. [5]



Obrázek 2: Ropná rafinerie [5]

2.2.2 Druhy asfaltů

- **Oxidované asfalty** – mohou být také označovány jako foukané asfalty. Jsou využívány hlavně v izolačních výrobcích a v malé míře i v silničním stavitelství. Vzniká procesem přefukování měkčích asfaltů a zbytků z destilace vzduchem při teplotách 250 – 300 °C. Vzniklý výrobek není tak citlivý na teplotní změny. Bod měknutí má při 80 – 100 °C.
- **Ředěné asfalty** – po přidání organických rozpouštědel vznikají ředěné asfalty. Výsledný produkt má nižší viskozitu. Protože je objem rozpouštědel až na úrovni 40 % až 50 % se od těchto směsí ustupuje. Z rozpouštědel se totiž uvolňují páry, které zvyšují riziko požáru. Tyto směsi jsou využívány k výrobě studených směsí na opravu vozovek.
- **Modifikované asfalty** – přidáním modifikátorů jako jsou kaučuk nebo termoplast vznikají druhy asfaltu s lepšími vlastnostmi. Výsledný produkt má nižší bod lámavosti a vyšší bod měknutí. Přidáváním polymérů se rovněž zvyšuje tažnost a vratná deformace. V silniční praxi to znamená, že takto modifikované asfalty jsou odolnější vůči tvorbě mrazových trhlin a vůči vyjíždění kolejí od těžkých vozidel. Modifikované asfalty se rovněž využívají jako hydroizolace v podobě zálivek, nátěrů a pásů. [6]

2.2.3 Vlastnosti asfaltu

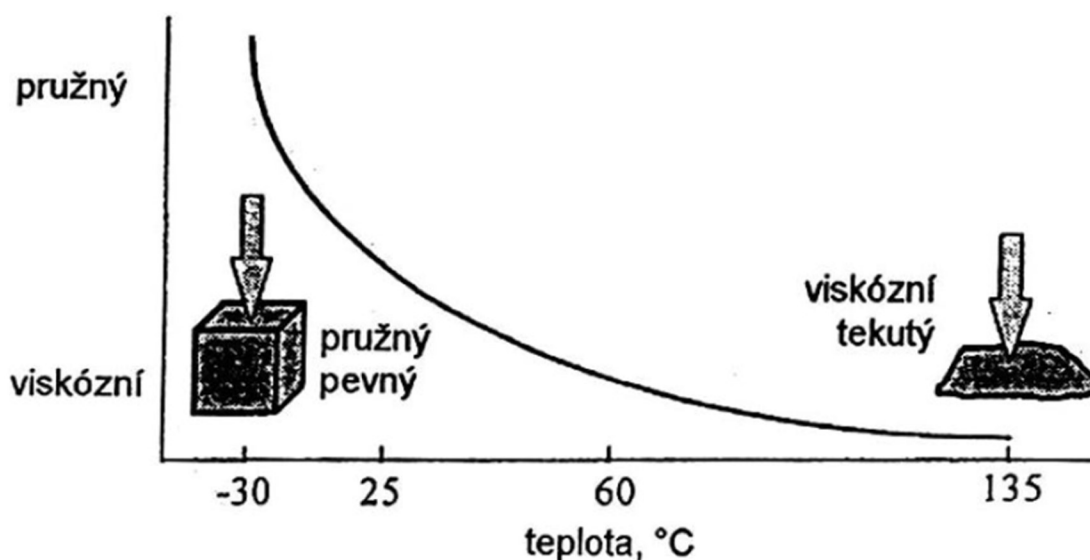
Asfalt je těžko rozpustný, neobtnavý materiál, který přijímá vodu jen v stopových množstvích na svém povrchu. Má hustotu od 980 kg/m³ do 1100 kg/m³. Je mrazuvzdorný, ale při nízkých teplotách se vyznačuje vyšší křehkostí. Asfalt je odolný vůči polárním rozpouštědlům, louhům, nízko-koncentrovaným kyselinám a vůči posypovým materiálům. Jeho rozpustnost v organických rozpouštědlech, jako je benzín, benzén a pod. se využívá při výrobě laků a nátěrů. Asfalt je hořlavý s dobrou výhřevností.

Nejzásadnější charakteristikou asfaltu je jeho chování v závislosti na teplotě, proto se také označuje jako vysokoelastický materiál. Při vysokých teplotách má asfalt vlastnosti kapaliny, naopak za nízkých teplot se chová jako pružná látka. Při běžných teplotách vykazuje obojaké visko-elastické vlastnosti. Viskozitou asfaltu je vyjádřen silový odpor proti deformaci, který je úměrný rychlosti deformace. Velikost

deformace je závislá na viskozite a délce zatížení. Viskózní vlastnost asfaltu značně ovlivňuje chování asfaltových směsí vzhledem na rychlost zatížení. Při pomalé jízdě nebo při stání jsou deformace značné, zatím co při vysokých rychlostech dopravy jsou deformace minimální. Toto chování můžeme sledovat v dlouhých stoupáních, na autobusových zastávkách nebo před křižovatkami.

Vzhledem k tomu, že asfalt je organická látka reaguje s kyslíkem, čímž dochází k oxidativnímu tvrdnutí a stárnutí asfaltu. Tento jev má negativní vliv na dlouhodobé vlastnosti asfaltu, který se v průběhu času stává tvrdším a křehčím. Proces stárnutí prograduje rychleji za vyšších teplot, na příklad při výrobě směsi na obalovně.

Mechanicko-fyzikální vlastnosti silničních asfaltů se dnes běžně určují a prověřují řadou laboratorních zkušebních metod. Pomocí těchto metod určíme důležité charakteristiky jako jsou bod měknutí, bod lámavosti, silovou nebo vratnou duktilitu a přílnavost ke kamenivu. [11]



Obrázek 3: Vlastnosti asfaltu v závislosti na teplotě [11]

2.3 Kamenivo

Kamenivem se rozumí zrnitý anorganický materiál přírodního nebo umělého původu s maximální velikostí zrn 125 mm, který je určený pro stavební účely. Kamenivo se především využívá jako plnivo. V kombinaci s vhodnými pojivy slouží k výrobě malt a betonů. Obvykle tvoří 75 – 80 % celkového objemu směsi. Hlavní funkcí kameniva je vytvoření kostry, která je pevná a odolná, kde se pevnost zajistí

pomocí vzájemného zaklínění zrn do sebe. Kamenivo se nejvíce spotřebuje v pozemním, silničním a železničním stavitelství.

Vlastnosti kameniva závisí především na jeho původě. Hlavně na jeho mineralogickým složení a obsahem dalších složek. Základní charakteristiky jsou objemová hmotnost, pevnost zrn, nasákavost a trvanlivost. Nevhodnými prvky kameniva jsou nekubická – tvarově nevhodná zrna, které mají poměr délky a tloušťky větší než 3.

Většina kameniva využívaného ve stavebnictví je přírodního původu z přírodních hornin vyvěřelých, usazených nebo proměněných. Kamenivo je nejrozšířenější stavební přírodní materiál. Celosvětová produkce těžného, drceného kameniva a šterkopísku se odhaduje na 16 mld. tun za rok, což představuje přibližně 50 % všech těžných surovin člověkem ze zemské kůry. [7]

2.3.1 Rozdělení kameniva dle původu

- **Přírodní** – anorganické kamenivo, které je získané těžním nebo drcením přírodních hornin. K rozpadu hornin na kamenivo došlo fyzikálně-mechanickými procesy a to buď drcením v drtičkách nebo přirozeným zvětráváním.
- **Umělé** – anorganické kamenivo, které vzniklo jako odpadní produkt průmyselné tepelné činnosti jako jsou spalování, výroba kovů, termická expandance a jiné.
- **Recyklované** – rovněž kamenivo anorganické, které již bylo dříve využito jako stavební materiál ve stavebních konstrukcích. [7]

2.3.2 Rozdělení kameniva dle vzniku zrn

- **Těžené** – anorganické kamenivo, které vzniklo působením řek (fluvialní působení), ledovců (glacigenní působení) nebo kombinací říčního a ledovcového působení. Jemnější kamenivo mohlo vzniknout také působením větrů – eolické působení. Jedná se hlavně o šterky, písky a šterkopísky, které vznikají ze starších hornin zvětráváním a následným transportem vodou, ledem nebo větrem. Zpravidla se těžené kamenivo vyznačuje zaoblenými zrny a hladkým povrchem, které jsou důsledkem transportu zvětralé horniny.
- **Drcené** – kamenivo většinou přírodního původu, které vzniká umělým drcením větších kusů horniny a jejich následným tříděním. Může se jednat

i o kamenivo umělého původu, například vysokopecní struska. Drcené kamenivo je charakteristické ostrohranným nepravidelným tvarem zrn s drsným povrchem.

- **Těžené předrcené** – vzniká drcením těženého kameniva o velikosti zrn nad 2 mm. Podíl drcených zrn je nad 40 %. [7]

2.3.3 Rozdělení kameniva dle objemové hmotnosti

- **Pórovité** – objemová hmotnost kameniva do 2000 kg/m³. Může být definováno také sypanou hmotností, která má být do 1200 kg/m³. V přírodě se jedná například o vulkanické tufy, které se nevyužívají ve stavebnictví. Do této kategorie patří častěji umělá kameniva jako je škvára, keramzit nebo recyklované cyhelné střepy. Ve stavebnictví se využívají na výrobu lehkých malt, omítkových směsí a tepelně-izolačních betonů.
- **Hutné** – objemová hmotnost kameniva od 2000 – 3000 kg/m³. Do této kategorie patří většina drcených a těžených přírodních kameniv. Mezi umělá hutná kameniva patří vysokopecní struska a recyklovaným hutným kamenivem je betonový recyklát. Hutná kameniva tvoří základní složku většiny betonů a malt, rovněž jsou vhodná do násypů a na výrobu asfaltobetonu.
- **Těžké** – objemová hmotnost nad 3000 kg/m³. Jedná se o přírodní horniny s vysokým obsahem tmavých minerálů jako jsou železo a mangan. Jako těžká kameniva se dají použít i ocelové broky, odpady z obrábání železa nebo litinová drť. Těžké kamenivo se používá na výrobu těžkého betonu, který je vhodný jako ochrana proti radioaktivnímu nebo rentgenovému záření. Jeho využití je v jaderné energetice, zdravotnictví a ve výzkumu. [7]

2.3.4 Rozdělení kameniva dle velikosti zrn

- **Drobné** – zrna do velikosti 4 mm včetně
- **Hrubé** – velikost zrna od 4 do 125 mm. [7]

2.3.5 Frakce kameniva

Dle velikosti zrn se kamenivo třídí do frakcí. Frakce je označení kameniva podle velikostí ok horního a dolního síta. Frakce se dá tedy definovat jako množina zrn kameniva, které propadlo horním sítem a zachytí se na spodním síti. Poměrem horní (propad horním sítem) a dolní (zachycení na dolním síti) meze se definuje, zda

je frakce široká nebo úzká. Pokud je poměr otvorů dolní a horní meze větší než 2 jedná se o širokou frakci (např. 0/4, 0/32, 0/63). V opačném případě se jedná o úzkou frakci (0/2, 2/4, 8/11, 32/63).

Kamenivo určité frakce je v daném rozmezí vytříděno jenom přibližně. Každá frakce obsahuje podíl větších i menších zrn. Zrna, které propadnou dolní mezí se nazývají podsítné. Zrna, která se naopak zachytí na horní mezi se označují jako nadsítná. [7]



Obrázek 4: Běžně využívané frakce ve stavebnictví [8]

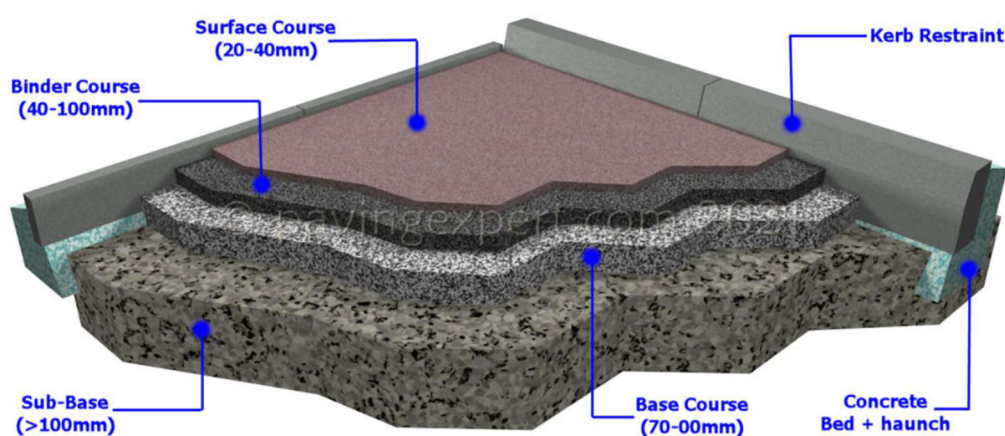
2.4 Využití frakcí kameniva nad 22 mm v ČR a v zahraničí

V České republice je dle normy ČSN 73 6121 – *Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody* možno použít největší frakci kameniva 22 mm do podkladních (ACP22) a do ložních vrstev (ACL22). V jiných krajinách se dnes běžně

využívají frakce kameniva do 32 mm do asfaltových směsí do podkladních a ložních vrstev. [21] [12]

2.4.1 Spojené království

Ve Spojeném království je možno využívat hrubozrné směsi AC 32 do podkladních vrstev (base course) a ložních vrstev (binder course). Jejich využití má především význam v silně namáhaných konstrukcích, protože lépe odolávají deformacím (vyjížděním kolejí). Příkladem je směs do podkladních i ložních vrstev AC 32 HDM 40/60 (Heavy Duty Macadam). Zajímavostí je využití pojiva s menší penetrací jelikož ve Spojeném království je nižší namáhání vozovek mrazem. [23]



Obrázek 5: Zobrazení konstrukčních vrstev vozovky běžně využívaných ve Spojeném království [22]

2.4.2 Německo

Také německé normy připouštějí využití asfaltové směsi s kamenivem do 32 mm. Rovněž v Německu se asfaltový beton značí zkratkou AC. Pro asfaltový beton do podkladních vrstev se přidá písmenko T. Minimální ploušťka směsi AC 32 je 8 cm. [21]

2.4.3 Ostatní země

I v jiných zemích je využití kameniva do 32 mm běžné. Na příklad v Rakousku, Švýcarsku, Belgii i ve Francii. V USA se dokonce využívá frakce kameniva 37,5 mm. [21]

2.5 R-materiál

Jedná se o upravený materiál znovuzískané asfaltové směsi, který je vhodný k použití jako stavební materiál do asfaltové směsi po jeho odskoušení, posouzení

a klasifikaci podle normy ČSN EN 13108-8 *Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 8: R-materiál*.

R-materiál se obvykle skladuje v haldách. Haldou se rozumí množství R-materiálu se zatříděnými vlastnostmi (zrnitost, obsah a druh pojiva), který je vhodný na použití pro výrobu asfaltových směsí. [21]

2.5.1 Požadavky na zásobu (haldu) R-materiálu

Každou zásobu R-materiálu je nutno prověřit z hlediska přítomnosti a obsahu cizorodých látek. Tento obsah se musí kategorizovat, zaznamenat a deklarovat příslušná kategorie. Cizorodé látky v R-materiálu jsou rozděleny do dvou skupin:

- **Materiály skupiny 1** – patří sem cementový beton a výrobky z něj, cihly, materiál z podkladních vrstev kromě přírodního kameniva, cementová malta a kov.
- **Materiály skupiny 2** – sem patří syntetické materiály, dřevo a plasty.

Dle obsahu cizorodých látek se R-materiál zatřídí do jedné ze tří kategorií:

- **Kategorie F₁** – R-materiál obsahuje méně než 1% hmotnosti cizorodých látek skupiny 1 a méně než 0,1 % hmotnosti cizorodých látek skupiny 2.
- **Kategorie F₅** – obsah materiálů skupiny 1 se pohybuje od 1 do 5 % a ne více než 0,1 % hmotnosti materiálu skupiny 2.
- **Kategorie F_{dec}** – obsah a povaha všech cizorodých látek se deklaruje. [9]

2.5.1.1 Pojivo

- **Druh pojiva** – musí být zadokumentován a deklarován z rozborů a z jakýchkoliv dostupných informací. Důležitou informací je, zda je pojivem modifikovaný silniční asfalt nebo tvrdý silniční asfalt. R-materiál, který vykazuje větší míru kontaminace černoúhelným dehtem je nutno posoudit dle aktuálně platných předpisů jednotlivých členských států EU.
- **Vlastnosti pojiva** – průměrná hodnota penetrace, bodu měknutí a viskozity musí být zaznamenána a deklarována je-li tak požadováno. Přesný postup získání a zkoušení pojiva je popsán v normách.
 - EN 12697-3 nebo EN 12697-4 předepisuje znovuzískání pojiva
 - EN 1426 popisuje stanovení penetrace
 - EN 1427 popisuje stanovení bodu měknutí
 - EN 12596 definuje stanovení viskozity pojiva [9]

2.5.1.2 Ostatní požadavky

Dále jsou stanoveny podmínky pro zrnitost kameniva a pro zrnitost R-materiálu, které se určí pomocí zkoušky zrnitosti. Ta je definována v normě EN 13043. Důležité je také stanovit obsah pojiva.

V neposlední řadě je nutno popsat haldu R-materiálu z hlediska původu (zdroje) R-materiálu, druhu a vlastností kameniva, popsat homogenitu materiálu a zadeklarovat odběr vzorků a postup zkoušení vzorků. [9]



Obrázek 6: Skladování R-materiálu v zastřešené skládce [10]

2.6 Využití R-materiálů v ČR a jiných zemích

Za předpokladu, že je možné při výrobě asfaltové směsi R-materiál zahřát na požadovanou teplotu je dle aktuálně platné normy ČSN 73 6121 *Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody* maximální možný obsah R-materiálu v asfaltových směsích pro podkladní vrstvy 60 %, za podmínky, že je použito nemodifikované pojivo. V případě využití modifikovaného pojiva do asfaltových směsí pro podkladní vrstvy je možné použít maximálně 50 % R-materiálu. Při výrobě asfaltových směsí bez možnosti zahřívání R-materiálu je možno použít maximálně 25 % R-materiálu. Pro podkladní vrstvy lze využít i metodu přidávání R-materiálu postupně (použití variátoru), kde je možné přidat i více jak 25 % neohřátého R-materiálu.

Pro směsi s R-materiálem s nemodifikovaným pojivem je nutno dopočítat dávkování asfaltu měkčí gradace nebo rejuvenátoru tak, aby bylo dosaženo

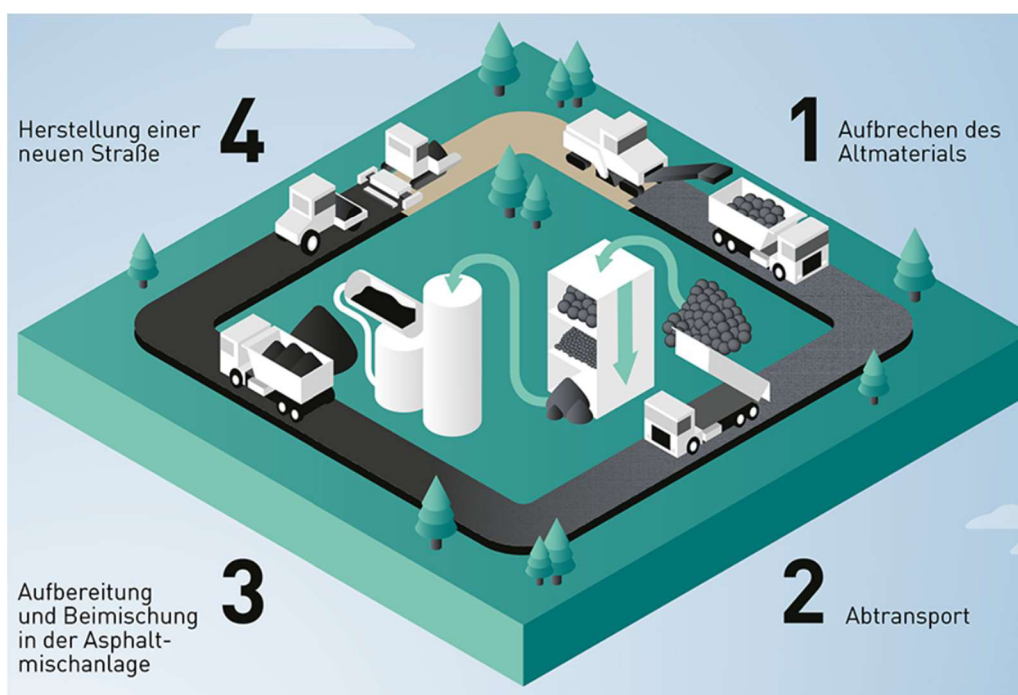
penetrace a bodu měknutí výsledné deklarované gradace. Rovněž je nutno zajistit požadavky na penetraci a bod měknutí zpětně získaného pojiva z R-materiálu.

Problematika R-materiálů v silničním stavitelství v ČR je již překonána a pokračuje hledáním řešení spojených s využitím všech materiálů z existujících vozovek. Obecně se dá říct, že materiály a směsi využití v obrusných a podkladních vrstvách vozovek jsou recyklovatelné. Při dodržení platných postupů a norem a při dodržení pevnostních a deformačních parametrů R-materiálu je možné jej zpětně zabudovat do konstrukcí vozovky.

Kvalita směsí s R-materiálem se při využití vhodné technologie blíží až rovná kvalitě nových materiálů. Kromě kvality má využití R-materiálů v silničním stavitelství i další pozitivní aspekty jako jsou zachování přírodních zdrojů, zachování energetických zdrojů, redukce emisí, omezení skládkování, snížení nákladů na výstavbu a jiné. [12]

2.6.1 Porovnání využití R-materiálu v ČR a jiných zemích

V České republice bylo v roce 2021 k dispozici 2 700 000 tun R-materiálu. Z tohoto množství bylo možno využít 2 400 000 tun R-materiálu. Do horké směsi znovu využilo pouze 20 %. V tomto ukazovateli je ČR nejhorší spomezi sledovaných zemí. Na příklad v Rakousku a Německu se běžně využívá až 85 % R-materiálů v horkých směsích, v USA dokonce 95 %. [13]



Obrázek 7: Filosofie koloběhu R-materiálu v Německu dle firmy Strabag [38]

Co se týče zpracování R-materiálu na místě za studena je naopak Česká republika jednou z vedoucích zemí. V tuzemsku se takto zpracuje až 25 % R-materiálu. Jemně lépe je na tom Slovensko, kde se takto zpracuje zpětně až 29 % R-materiálu. V ostatních evropských zemích je to od 0 do 15 %. V USA je takto zpracováno pouze 0,1 % R-materiálu. Zde je ale nutno připomenout, že na jiné využití recyklátu jak na zpracování za horka v USA zbyde pouze 5 %.

Další oblíbenou možností využití R-materiálu je jeho využití do nezpevněných podkladních vrstev vozovky. V ČR se takto využije 25 % R-materiálu. Toto číslo je v evropském kontextu jemně nadprůměrné. Na příklad v Norsku se takto využije až 54 % recyklátu a v Turecku dokonce neuvěřitelných 99 %.

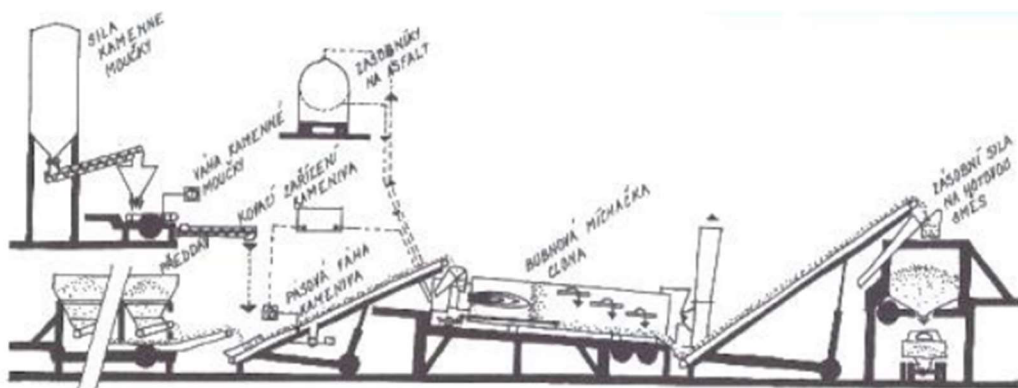
V konečných číslech zpětného využití R-materiálů je Česká republika jemně pod průměrem EU. Celkově se v ČR do stmelených vrstev (za horka nebo za studena) zpracuje přibližně 50 % R-materiálu. 35 % se využije do nezpevněných vrstev vozovek nebo v jiných odvětvích stavitelství. Na skládkách skončí až 15 % recyklátů. V tomto ukazateli je ČR třetí nejhorší spomezi porovnávaných zemí. Horší jsou pouze Chorvatsko (53 %) a Slovinsko (32%). [13]

Country	Total amount of site-won asphalt generated in 2021 in tonnes	Amount of reclaimed asphalt available to be used by the asphalt industry in 2021 in tonnes	% of available reclaimed asphalt used in							Total Re-use	Total Recycling	Total Landfill
			Hot and Warm Mix Asphalt Production	Half Warm Mix Asphalt Production	On-Site Cold Recycling**	Plant Cold Recycling**	Unbound Road Layers	Other Civil Engineering Applications	Put to Landfill/Other Applications/ Unknown			
Austria	1.850.000	900.000	85	0	5	0	10	0	0	90	10	0
Belgium	1.343.000	1.506.000	no data	no data	no data	no data	no data	no data	no data	71	no data	no data
Croatia	390.000	390.000	30	0	11	6	0	0	53	47	0	53
Czech Rep	2.700.000	2.400.000	20	0	25	5	25	10	15	50	35	15
Denmark	1.372.000*	1.172.000	85				15	no data	no data	85	15	no data
Finland	1.000.000	no data	no data	no data	no data	no data	no data	no data	no data	no data	no data	no data
France	9.000.000	6.900.000	77		no data	no data	no data	no data	no data	77	23	0
Germany	14.000.000	11.600.000*	85	0	0	0	15	0	0	85	15	0
Great Britain	6.215.331*	3.100.000*	no data	no data	no data	no data	no data	no data	no data	36*	64*	<1*
Hungary	250.000*	160.000	98	0	0	0	2	0	0	98	2	0
Ireland	500.000*	200.000*	45*	no data	no data	no data	no data	no data	no data	45	no data	no data
Italy	11.000.000	no data	30	70						no data	no data	no data
Norway	1.129.512	1.172.618	46	0	0	1	54	0	0	46	54	0
Slovakia	82.134	70.946	63	0	29	0	8	0	0	92	8	0
Slovenia	200.000	79.000	40	0	3	2	5	18	32	45	23	32
Spain	3.050.000	2.495.000	61	0	6	0	15	18	0,01	66	34	0
Turkey	1.927.000	20.000	0,5	0	0	0,5	99	0	0	1	99	0
USA	91.000.000	90.000.000	95	0	0	0,1	4	0,2	0,1	95	4	0,1

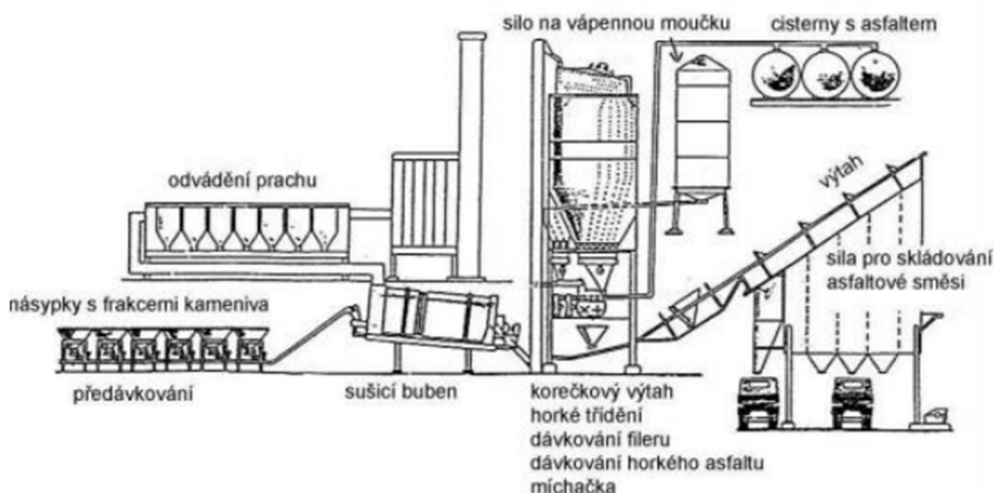
Tabulka 1: Porovnání zpracování R-materiálů s jinými státy EU a USA [13]

2.7 Výroba asfaltových směsí

Pro výrobu asfaltových směsí se používají dva druhy obaloven. Šaržové a kontinuální. V ČR se využívají jenom šaržové obalovny. V USA naopak je až 80 % všech obaloven typu kontinuální. Výhodou kontinuálních obaloven je veliký výkon, ale nejde zde jednoduše změnit recepturu vyráběné asfaltové směsi. V šaržových obalovnách se jednotlivé složky nejdřív naváží a pak se spolu míchají. To umožňuje jednoduchou změnu receptury dle potřeby. [24]



Obrázek 8: Schéma kontinuální obalovny [24]



Obrázek 9: Schéma šaržové obalovny [24]

2.8 Druhy recyklace

Z hlediska místa, kde se R-materiál zpracuje se jedná o recyklaci v míchacím centru, na obalovně, nebo pomocí mobilní jednotky. Dále se recyklace obecně dělí dle teploty na recyklaci za horka a za studena. Kombinací těchto podmínek rozlišujeme čtyři základní druhy recyklace:

- **V mísícím centru za horka** – dávkování R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny. Možnost předehřívát R-materiál v paralelním bubnu

nebo využití dvouplášťového bubnu. Zde patří i metoda „Drum mix“ při vytváření směsi v kontinuální obalovně.

- **V mísícím centru za studena** – využití mobilních, semi-mobilních a stacionárních obaloven.
- **Na místě za horka** – využívá se zde více metod. Při metodě „reshape“ se jedná o úpravu příčného profilu vozovky. Metoda „Repave“ také upravuje příčný profil vozovky položením nové asfaltové vrstvy. Dále je možno využít metodu „Regrip“, kde se vylepší protismykové vlastnosti vozovky. Metodou „Remix“ se recykluje stávající obrusná vrstva vozovky za horka. Na konec metoda „Remix plus“ využívá technologii recyklace stávající vozovky za horka současně s pokládkou nové obrusné vrstvy.
- **Na místě za studena** – jedná se o částečnou nebo celkovou recyklaci.

[14]

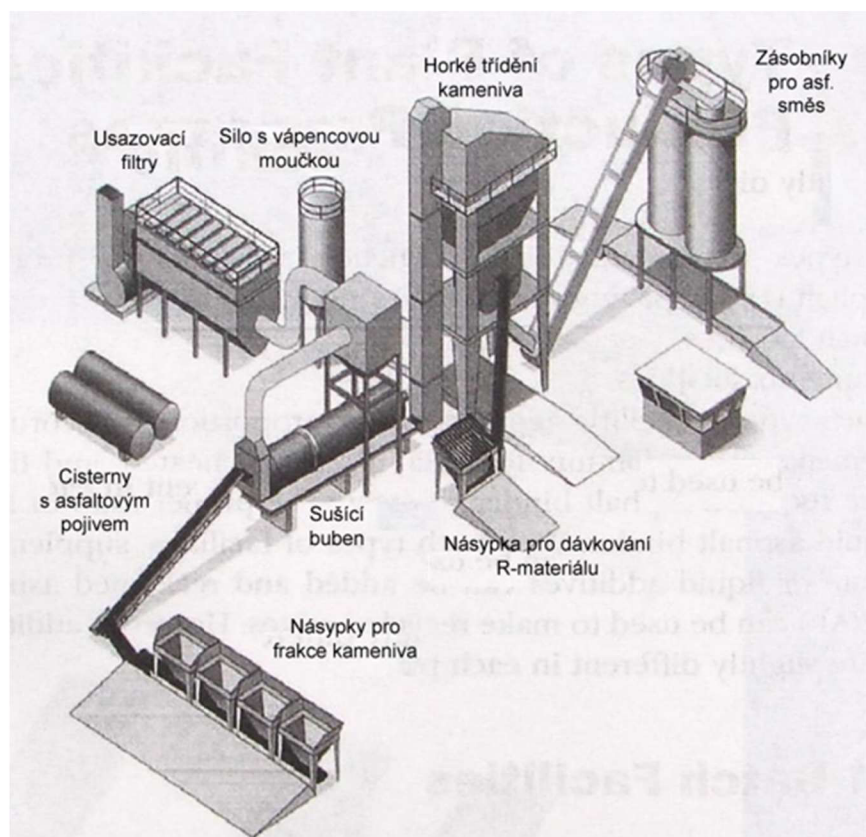
2.8.1 Recyklace v mísícím centru za horka

Recyklace za horka v mísícím centru je omezena jen na asfaltem stmelené vrstvy. Je zde více možností jak R-materiál přidávat do směsi. Nejvyužívanější jsou tři metody:

1. Dávkování R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny
2. Předehřívání R-materiálu v paralelním bubnu
3. Metoda drum-mix – kontinuální obalovny [14]

2.8.1.1 Dávkování R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny

Při této metodě se R-materiál drtí na frakce a přidává se do míchačky s ohledem na požadovanou výslednou směs. Kamenivo je nutné předehřívát na vyšší teploty, aby byla zachována výsledná teplota míchání. Takto je možno přimíchat maximálně 25 % R-materiálu, aby nedocházelo k přehřívání kameniva. Problémem je vlhkost skladovaného R-materiálu. Ne každá obalovna má zastřešenou skládku R-materiálu. Platí, že čím má vyšší vlhkost R-materiál, tím vyšší teplotu musí mít kamenivo. Vzhledem na vlhkost musí být do výrobního cyklu přidáné odvětrávání. [14]



Obrázek 10: Schéma šaržové obalovny s možností přidání R-materiálu [14]

2.8.1.2 Předehřívání R-materiálu v paralelním bubnu šaržové obalovny

V porovnání s mícháním studeného R-materiálu je zde možnost přidat výrazně víc R-materiálu do směsi. V Německu až 80 % recyklátu do směsi pro podkladní vrstvy. Vzhledem k vysokému dávkování R-materiálu jsou zde vyšší nároky na skladování – nutnost zastřešení vzhledem k omezení vlhkosti. Taktéž je nutno pravidelně kontrolovat vlastnosti pojiva v R-materiálu.



Obrázek 11: Skládka R-materiálu s tříděním a zastřešením [16]

V Německu se třídí R-materiál podle odfrézovaných vrstev. R-materiál z kvalitnějších vrchních vrstev se znovu použije do obrusné vrstvy, naopak méně kvalitní recyklát se přidá do směsí pro ložní a podkladní vrstvy. V České republice se třídění R-materiálu podle odfrézovaných vrstev zatím neprovádí. [15]

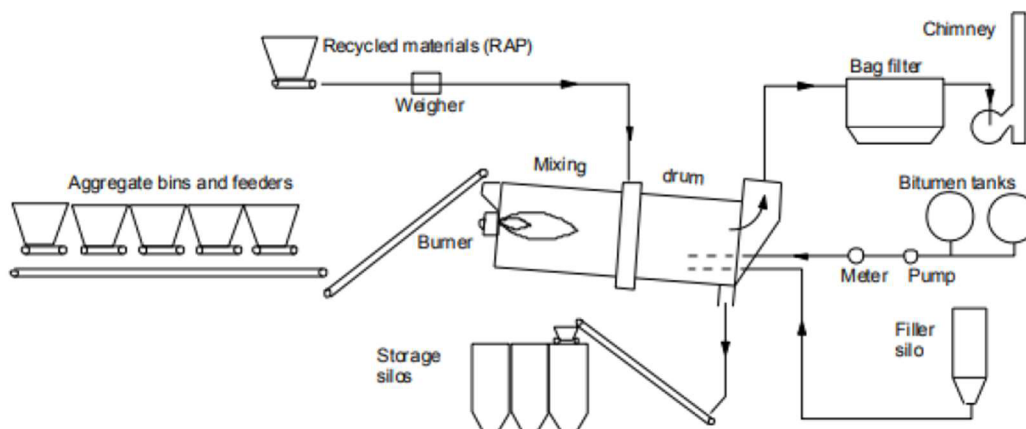


Obrázek 12: Obalovna s paralelním bubnem [15]

2.8.1.3 Metoda drum-mix

Tato metoda je nejrozšířenější v USA (využívá se také v Austrálii), kde se takto zpracuje až 80 % směsí. Při této metodě je důležité, aby vstupní složky měly konzistentní vlastnosti, protože výroba probíhá v podstatě nepřetržitě.

Nějběžnějším typem kontinuální obalovny je typ „Drum-mix“, kde se jednotlivé složky směsi dávkuje po proudu horkého vzduchu. Zvláště se dávkuje R-materiál a zvláště kamenivo viz obrázek 13. R-materiál je dávkován do středu sušícího bubnu pomocí speciálního límce. Je důležité, aby kamenivo bylo vždycky mezi hořákem a R-materiálem, aby tak zabránilo jeho přehřívání. [17]



Obrázek 13: Schéma kontinuální obalovny – dávkování po směru horkého vzduchu [17]

Druhým způsobem je dávkování proti proudu vzduchu. R-materiál je přidáván až za rozšířenými hořáky, které oddělují ohřivací část bubnu od té míchací. V této části je přidáván i asfalt, který takto vůbec nepřijde do kontaktu s hořáky. V porovnání s klasickou drum-mix metodou (přidávání materiálu po směru horkého vzduchu) je tato metoda rychlejší a vhodnější z hlediska produkce emisí. Takto je možné přidávat až 50 % R-materiálu. [17]



Obrázek 14: Kontinuální obalovna [17]

2.8.1.4 Šaržová obalovna s dvouplášťovým bubnem

Další možností zpracování R-materiálu na obalovně je využití technologie dvouplášťového bubnu. Jedná se o podobnou obalovnu šaržové obalovně s rozdílem, že R-materiál se dávkuje v druhé části sušícího bubnu, kde se ohřívá předeřhátým kamenivem z první části bubnu. Pomocí korečkového výtahu se takto ohřátá směs dostává do místa horkého třídění. Směs nejde přes vibrační síta, protože kvůli obsahu R-materiálu by se ucplala. Směs jde přes tzv. Bypass do

míchačky, kde se přidá asfaltové pojivo. Tento druh výroby asfaltové směsi vyžaduje přesné třídění vstupních materiálů podobně jako výroba na kontinuální obalovně. Takto lze vyrábět směs až s 40 % R-materiálu. [14]



Obrázek 15: Šaržová obalovna s dvouplášťovým bubnem [14]

2.8.2 Recyklace v míchacím centru za studena

Je to především proces zhotovení recyklované vrstvy převážně z recyklovaného kameniva, které se před dovezením na stavbu upravuje v míchacím centru. Recyklovaný materiál se míchá s asfaltovou emulzí, cementem nebo vápenným hydrátem (1 - 2 %). Podle typu míchací jednotky se rozlišují:

- Stacionární obalovny
- Semi-mobilní obalovny
- Mobilní obalovny

Namíchaná směs se pokládá finišery a je hutněna těžkými válci (běhounové nebo pneumatikové). Využívá se hlavně statické hutnění bez vibrace. Mezerovitost výsledné směsi je od 9 do 12 %. [18]



Obrázek 16: Mobilní míchací centrum [19]

2.8.3 Recyklace na místě za horka

Je to technologický proces, při kterém dojde k ohřátí, rozpojení a úpravě recyklované vrstvy recyklačním zařízením přímo na místě a jejím opětovným položením a hutněním.

Rozeznáváme šest kategorií recyklace na místě za horka:

1. **Reshape** – jedná se o úpravu příčného profilu vozovky, kde se nejdříve ohřeje vrstva vozovky určena k recyklaci. Následně dojde k rozpojení a nakypření této směsi (vrstvy). Pak se směs urovná v příčném a podélném směru a dohutní.
2. **Repave** – rovněž je to metoda, při které se upraví příčný profil vozovky s položením nové asfaltové vrstvy. Stejně jako při předchozí metodě, nejdřív dojde k ohřátí a rozpojení recyklované vrstvy vozovky. Poté dojde k rozpojení a nakypření recyklované vrstvy a opětovnému rozprostření vrstvy v příčném a podélném směru. Na takto rozprostřenou vrstvu se položí nová vrstva asfaltové směsi bez toho, aby se vrstvy vzájemně promíchali. Na závěr se obě vrstvy současně uhutní.
3. **Remix** – při této metodě se nejdřív rozprostře přídatné kamenivo na povrch vozovky. Poté se ohřeje asfaltová vrstva určena k recyklaci. Následně dojde k rozpojení recyklované vrstvy a k přidání potřebných

materiálů (silniční asfalt, změkčující přísady, předobalená směs kameniva). Po přidání potřebných materiálů se směs promíchá a zpětně položí a uhtní.

4. **Remix plus** – při této technologii se recyklují asfaltové obrusné vrstvy se současnou pokládkou nové obrusné vrstvy. Nejdřív dojde k rozprostření přidávaného kameniva pro úpravu zrnitosti recyklované vrstvy. Následně se recyklovaná směs ohřeje a rozpojí. Poté dojde k přidání silničního asfaltu nebo změkčujících přísad a k promíchání směsi s přidanými materiály a následně zpětné položení recyklované vrstvy. Na závěr dojde k položení nové asfaltové obrusné vrstvy (vtlačované vrstvy) systémem horké na horké a zhutnění obou vrstev současně.
5. **Recyklace v mobilním nízkokapacitním zařízení (např. Bagela)** - jedná se o technologii recyklace vybourané asfaltové směsi z původních vrstev vozovky. Nejdříve dojde k rozehrátí a vybourání recyklované vrstvy (směsi). Poté se ručně nebo za pomoci finišeru položí zpět a uhtní se.
6. **Regrip** – technologie zlepšení protismykových vlastností vozovky využitím asfaltového nátěru. Nejdřív se nahřeje stávající povrch vozovky. Poté dojde k podrcení kameniva úzké frakce a k následnému zaválcování. [20]

2.8.4 Příklad **STORFLUX**

STORFLUX je ropný derivát, který se získává sekundární rafinací. Patří do skupiny speciálních fluxačních olejů. Jedná se o rejuvenátor – přísada na regeneraci zestárleho pojiva. Slouží jako změkčovadlo sloužící k „oživení“ vlastností zestárleho pojiva v R-materiálu. Obsahuje řadu chemických látek, které regenerují zestárle pojivo. Vzhledem k faktu, že se jedná o produkt soukromé německé firmy STORIMPEX, je jeho složení výrobním tajemstvím. [25]



Obrázek 17: Nádoba s přísadou STORFLUX

3 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je prověřit možnosti použití asfaltových směsí s maximální znitostí 32 mm do asfaltových podkladních vrstev a rovněž využití R-materiálu v těchto vrstvách. Aktuálně platné české normy dovolují využití frakce kameniva s největšími zrny do 22 mm.

Pro posouzení byly navrženy dvě směsi ACP32 s obsahem R-materiálu 30 % a 50 %. Křivka zrnitosti navržené směsi co nejvíc kopíruje Fullerovu parabolu. Pro stanovení funkčních parametrů byly zvoleny tyto tři zkoušky:

- Pojíždění kolem – pomocí malého zkušebního zařízení při použití obdélníkových desek pro vykonávání zkoušky pojíždění kolem vybavené dle ČSN EN 12697-22
- Nízkoteplotní vlastnosti metodou TSRST dle ČSN EN 12697-46
- Modul tuhosti – pomocí dvoubodové zkoušky ohybem na vetknutém komolém klínu dle ČSN EN 12697-26

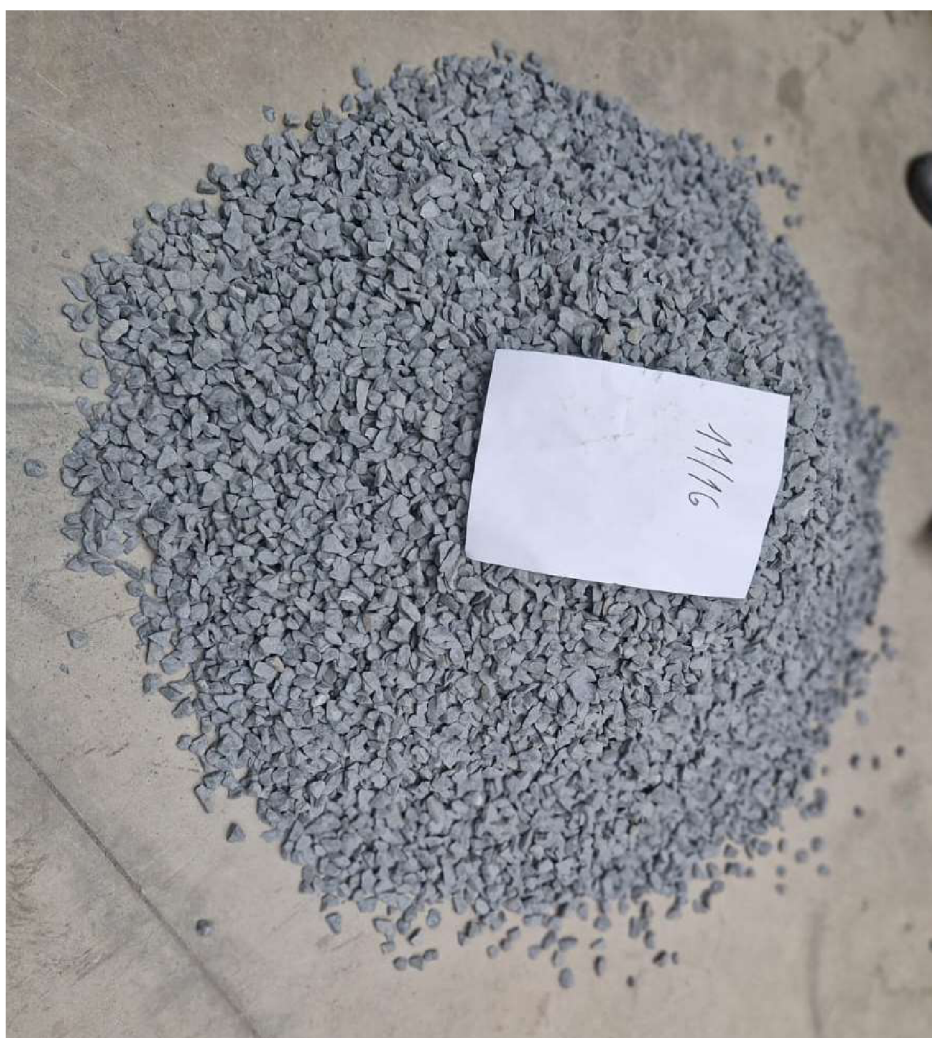
4 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

4.1 Homogenizace stavebního kameniva a R-materiálu

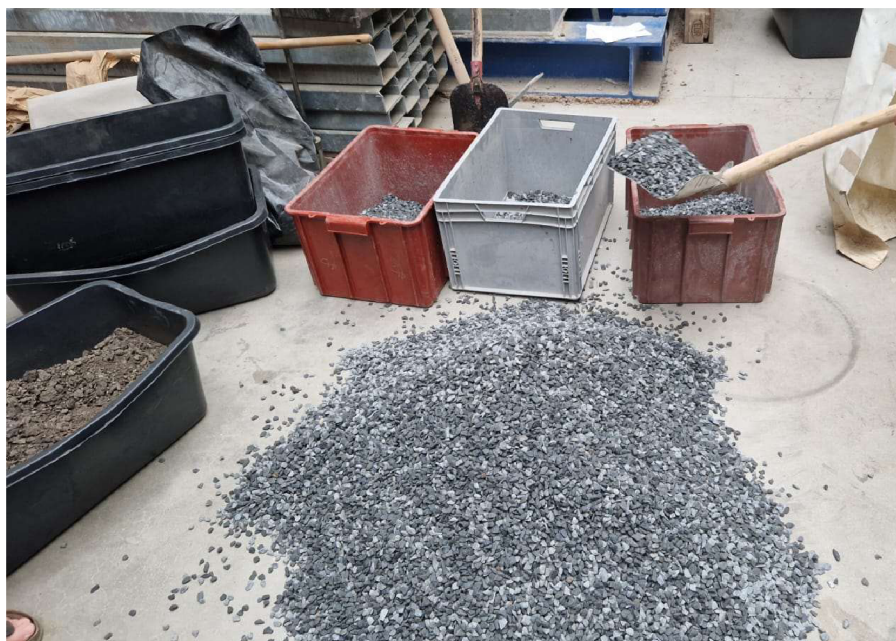
Z důvodu získání optimálních výsledků je nutné, aby byl materiál pro výrobu asfaltové směsi (stavební kamenivo a R-materiál) co nejvíce homogenní. Při přepravě a při skládkování může dojít k segregaci materiálu, kde větší zrna zůstanou na povrchu a menší se propadnou. Proto je nutno materiál ručně zhomogenizovat.

Materiál jedné frakce (nebo R-materiál) se vysype ze všech nádob na jednu kopy na čistou rovnou plochu. Pak se pomocí normované lopaty kopa materiálu několikrát přehodí a na závěr se rovnoměrně rozdělí zpět do nádob na skladování.

[26]



Obrázek 18: Zhomogenizované kamenivo frakce 11/16



Obrázek 19: Rovnoměrné rozdělení materiálu do nádob na skladování

4.2 Obsah rozpustného pojiva dle ČSN EN 12697-1

4.2.1 Obecná podstata zkoušky

Zkušební metoda zahrnuje obvykle 4 základní postupy

1. Extrakci pojiva rozpuštěním v studeném nebo horkém rozpouštědle
2. Oddělení minerálního materiálu od roztoku pojiva
3. Stanovení množství pojiva z rozdílu nebo znovuzískáním pojiva
4. Výpočet obsahu rozpustného pojiva [37]

4.2.2 Pomůcky pro extrakci pojiva

- Rozpouštědlo – rozpouští asfalt a umožní zpětně získání asfaltu nebo jeho části
- Váhy – s přesností $\pm 0,1$ g.
- Příklad pro extrakci pojiva – odpovídající požadavků příslušné metody [37]

4.2.3 Postup zkoušky

Zkušební vzorek se zváží s přesností $\pm 0,1$ g a umístí se do přístroje pro extrakci pojiva podle požadavků příslušné metody. [37]

4.2.4 Oddělení minerálního materiálu

Pro tento účel je potřeba použít přístroj na oddělení minerálního fileru z roztoku pojiva odpovídající požadavkům příslušné metody.

Postup použitý pro oddělení minerálního fileru z roztoku pojiva musí být dostatečně účinný, aby zůstatek po spálení znovuzískaného pojiva nebyl vyšší než 0,5 % v případě, že obsah fileru je nižší než 6 % hmotnosti kameniva. [37]

4.2.5 Vyjádření výsledků

Výsledný obsah asfaltového pojiva v procentech se vyjádří z poměrů hmotnosti vysušeného zkušební vzorku a hmotnosti získaného pojiva. Znovuzískání asfaltového pojiva je popsáno v kapitole 4.3.

$$f = (M_2/M_1) * 100$$

M_1 hmotnost suchého zkušební vzorku před zkouškou v g.

M_2 hmotnost získaného asfaltového pojiva v g. [37]

4.3 Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení dle ČSN EN 12697-3

Po odstranění nerozpustných pevných částic z asfaltového roztoku se z něho asfalt znovu získá vakuovou destilací pomocí rotačního vakuového destilačního zařízení. Podmínkou je, aby asfalt nebyl v rozpouštědle déle jak 24 hodin. [27]

4.3.1 Zkušební zařízení a pomůcky

- **Destilační přístroj** – neboli rotační vakuové destilační zařízení, které obsahuje rotující destilační baňku pro destilaci pod vákuem. Přístroj musí být vhodný pro připojení destilační baňky o objemu 1 l. Dále musí mít přístroj hnací motor s řízením rychlosti otáček. Požadovaná rychlost otáčení baňky je 75 ± 5 otáček za minutu. Přístroj musí být schopen odpařit minimálně 0,85 l/h.
- **Tlaková destilační baňka** – vyrobena z tepelně odolného skla se zabroušeným spojem. Objem 1 l.
- **Olejová lázeň** – pro destilační baňku o objemu 1 l. Doporučuje se použití vysokoteplotního silikonového oleje, protože jiný typ oleje by se mohl při teplotě nad 150 °C poškodit.
- **Vakuová vývěra** – musí mít možnost snížit absolutní tlak v systému na požadovanou hodnotu. Doporučuje se použít vakuovou membránovou vývěru pracující v plynném prostředí.

- **Dva nanometry** – pro měření podlaku v destilačním přístroji. Jeden s rozsahem 0 kPa až 100 kPa s přesností $\pm 0,5$ kPa. Druhý s rozsahem 0 kPa až 5 kPa s přesností $\pm 0,1$ kPa.
- **Teploměr** – s přesností $\pm 0,5$ °C.
- **Vhodná nádoba pro asfaltové roztoky**
- **Rozpouštědlo** – Dichlormethan (methylenchlorid) nebo jiné vhodné rozpouštědlo.
- **Ropná vazelína, glycerin nebo silikonové mazivo** – pro utěsnění skleněných spojů.
- **Silikagel** – maximální zrnitost 0,063 mm. [27]

4.3.2 Příprava stroje

- Příklad se sestaví dle normy ČSN EN 12697-3. Použije se co nejmenší množství tesnicího materiálu k namazání a utěsnění skleněných spojů.
- Připevnění se svorky, které drží destilační a jímací baňku. [27]

4.3.3 Postup destilace

- Chladičem s nechá protékat studená voda
- Destilační baňka se nechá rotovat při 75 ± 5 otáčkách za minutu a ponoří se do olejové lázně.
- Teplota olejové lázně se zvýší na požadovanou hodnotu v závislosti na použitém rozpouštědle.
- Tlak v přístroji se sníží dle použitého rozpouštědla.
- Asfaltový roztok se nasaje přes nasávací kohout ze skleněné nádoby do destilační baňky. Pomocí nasávacího kohoutu se nastaví rychlost nasávání tak, aby byla přibližně stejná rychlosti přitékajícího destilátu do baňky.
- Maximální objem asfaltového roztoku v destilační baňce je 400 ml. Tlak nesmí spadnout pro hodnoty stanovené pro použité rozpouštědlo.
- Je nutno zabránit nasátí vlhkosti do destilační baňky.
- Teplota olejové lázně se zvýší na předepsanou teplotu dle použitého rozpouštědla.

- Destilace pokračuje dokud neskončí odpařování rozpouštědla a na asfaltu v destilační baňce se nepřestanou tvořit bubliny. Pozvolně se snižuje tlak na stanovenou hodnotu dle použitého rozpouštědla.
- Teplota se udržuje na stanovené hodnotě dle použitého rozpouštědla do okamžiku, kdy se přestanou tvořit bubliny.
- Když se přestanou tvořit bubliny udržují se teplotní a tlakové podmínky dalších 10 minut.
- Rotace baňky se zastaví a tlak se pozvolna vyrovná na atmosferický.
- Destilační baňka se odpojí od přístroje a obsah se přelije do vhodné nádoby s víčkem. [27]

4.3.4 Vyjádření výsledků

Výsledkem je množství znovuzískaného asfaltového pojiva, podle kterého je možno určit jeho objem v původní asfaltové směsi a další vlastnosti pojiva (penetrace, bod měknutí, bod lámavosti a jiné). [27]

4.4 Penetrace jehlou dle ČSN EN 1426

4.4.1 Podstata metody

Změří se průnik normalizované jehly do vytemperovaného vzorku asfaltového pojiva. Základními zkušebními podmínkami jsou teplota 25 °C, aplikovatelné 100 g závaží a doba zařezování 5 s. [28]

4.4.2 Přístroje a pomůcky

- **Penetrometr** – přístroj, jehož držák se pohybuje ve svislém směru bez tření, a který umožňuje stanovit penetraci jehly na násobky 0,1 mm. Držák jehly musí být snadno snímatelný z přístroje a musí vážit $47,5 \pm 0,05$ g. Dále musí obsahovat závaží o hmotnosti $50 \pm 0,05$ g, které je možno připevnit na držák jehly.
- **Penetrační jehla** – je vyrobena z tvrzené, popuštěné a leštěné korozivzdorné oceli se zabroušeným kuželovým hrotem. Hmotnost jehly s koncovkou musí být $2,5 \pm 0,05$ g.
- **Vodní lázeň** – objem alespoň 10 l a možnost udržovat stálou teplotu v rozmezí $\pm 0,15$ °C. V lázni je perforovaná polička pro umístění misky

se vzorkem asfaltového pojiva minimálně 50 mm ode dna a 100 mm pod hladinou.

- **Zařízení na měření času** – schopné měřit okamžité uvolnění jehly a trvání žkoušky s přesností na 0,1 s.
- **Zařízení na měření teploty** – s rozsahem alespoň 0 – 30 °C s rozlišitelností a přesností alespoň 0,1 °C. [28]

4.4.3 Příprava vzorků

- Laboratorní vzorek se odebere dle EN 58. Musí se zajistit, aby byl homogenní bez kontaminací. Odebere se dostateční množství pomocí nahřátého nože (špachtle) a umístí se do vhodné nádoby.
- Materiál se ohřeje na teplotu nad 100 °C resp. nad předpokládaný bod měknutí. Horkým materiálem se naplní dva čisté kelímky. Musí se dbát, aby kelímky byly naplněny dostatečně, alespoň 10 mm nad úrovní předpokládané penetrace. Po naplnění se každý kelímek přikryje kádinkou s okrajem vhodné velikosti.
- Analytické vzorky se pak chladí na teplotu v rozsahu 15 °C až 30 °C. Dle množství analytického vzorku trvá chlazení od 60 min až 120 min. Poté se vzorky umístí do lázně s řízenou teplotou. [28]

4.4.4 Postup zkoušky

- Příprava držáku jehly a penetračních jehel – zkontroluje se držák jehly a vodící zařízení, zda je čisté bez vody a jiných cizorodých látek. Ověří se, zda se držák jehly volně pohybuje. Jehla se očistí vhodným rozpouštědlem a vloží se do držáku. Přidá se 50 g závaží a zajistí se, aby bylo celkové zatížení $100 \pm 0,1$ g.
- Vzorek se umístí na policičku v lázni s řízenou teplotou a zajistí se, aby byl po celou dobu zcela pokrytý vodou.
- První stanovení penetrace – kelímek s analytickým vzorkem se umístí do pozice pod jehlu a jehla se pomalu zpusť, až se její hrot dotkne povrchu zkoušeného vzorku. Zaznamená se nulová pozice a pak se uvolní jehla na požadovanou dobu. Pokud se kelímek během pohybu jehly pohne, měření se přeruší. Provedou se nejméně tři platná stanovení penetrace na třech různých místech vzdálených alespoň 10 mm od okraje kelímku. Pro každé stanovení se použije očištěná jehla.

- Přípustné rozdíly jsou při penetraci do 49 (4,9 mm) 2 jednotky, při penetraci od 50 do 149 4 jednotky. Pokud je maximální rozdíl překročen zkouška se opakuje na druhém vzorku do doby, než se nezískají tři platná měření s přípustnou odchylkou. [28]

4.4.5 Vyjádření výsledků:

Hodnoty penetrace se vyjádří jako aritmetický průměr hodnot penetrace v desetinách milimetru zaokrouhlený na nejbližší celé číslo. [28]

4.5 Bod měknutí – Metoda kroužek a kulička dle ČSN EN 1427

4.5.1 Podstata metody

Odlité asfaltové pojivo v podobě dvou kotoučků v mosazných kroužcích se zahřívají řízenou rychlostí v kapalinové lázni. Na každém kotoučku asfaltového pojiva je umístěna ocelová kulička. V bodě, při kterém kotoučky změknu natolik, aby kulička propadla o vzdálenost $25 \pm 0,4$ mm, se zaznamená jako bod měknutí. Výsledkem je průměr teplot, kdy propadly obě kuličky. [29]

4.5.2 Přístroje a pomůcky

- **Kapalinová lázeň** – z destilované nebo deionizované vody, aby se zabránilo zachycování vzduchových bublin na povrchu zkoušeného vzorku, což by mohlo mít vliv na výsledky. V skleněné kádince, kterou je možno zahřívát s průměrem alespoň 85 mm, výškou nejméně 120 mm.
- **Zkušební zařízení** – ruční, poloautomatické nebo automatické.
- **Kroužky** – dva mosazné kroužky požadovaných rozměrů.
- **Odlévací destička** – rovný hladký plech o rozměrech 50 x 75 mm, tloušťky 1,5 až 2,0 mm s dolů zahnutými hranami.
- **Kuličky** – dvě, vyrobené z oceli, odolné vůči korozi. Průměr $9,5 \pm 0,05$ mm. Hmotnost jedné kuličky $3,5 \pm 0,05$ g.
- **Středící prstence pro kuličky** – dva prstence z mosazi k vystředění kovových kuliček.
- **Držák kroužků a sestava** – držák k upevnění kroužků ve vodorovné poloze. Je vyroben z korozivzdorného materiálu. Spodní hrana kroužků musí být $25,0 \pm 0,4$ mm nad horním povrchem základní desky.

Horní okraj kroužků musí být $50,0 \pm 3,0$ mm pod hladinou kapaliny v lázni.

- **Zařízení pro měření teploty** – rozsah alespoň 0 – 90 °C s přesností 0,3 °C a lepší. Rozlišitelnost nejméně 0,2 °C.
 - **Míchadlo** – magnetické nebo vrtulové míchadlo s topnou plotýnkou. Míchací tyčinka délky přibližně 40 mm a průměrem 8 mm k zajištění rovnoměrného ohřívání kapaliny v lázni bez turbulentního proudění.
- [29]

4.5.3 Příprava vzorků

Laboratorní vzorek se musí odebrat dle EN 58. Analytický vzorek musí reprezentovat laboratorní vzorek, z něhož byl odebrán. Pro provádění zkoušky s modifikovanými asfalty se odebere takové množství vzorku, aby naplnilo čtyři kroužky pro případ, že by se zkouška musela opakovat.

Dva mosazné kroužky se zahřejí na teplotu vyšší než 100 °C a umístí se na odlévací destičku ošetřenou separačním prostředkem. Do každého kroužku se nalije mírný přebitek zahřátého asfaltu a nechá se chladnout po dobu alespoň 30 minut. Od doby odlití do provedení zkoušky nesmí uběhnout více jak 4 hodiny.

Po zchlazení se nadbytečný asfalt odřeže nahřátou čepelí nože (špachtle) tak, aby byl povrch asfaltu zarovnan s okrajem mosazného kroužku. Nadbytečný asfalt se odřízne těsně před provedením zkoušky aby se zabránilo kontaminaci vzorku. [29]

4.5.4 Postup zkoušky

- Dle očekávaného bodu měknutí se zvolí vhodná kapalina. Při očekávaném bodu měknutí do 80 °C se zvolí destilovaná nebo deionizovaná voda. Pro předpokládaný bod měknutí nad 80 °C se použije glycerín.
- Sestaví se přístroj s kroužky naplněnými zkoušeným vzorkem. Osadí se středící zařízení pro kuličky a zasadí se teploměr. Lázeň se naplní, aby povrch lázně byl 50 ± 3 mm nad horním okrajem kroužků. Pomocí kleští se osadí kuličky do lázně při stanovené teplotě.

- Kádinka s lázní se umístí do ledové vody, aby schladla na teplotu 5 ± 1 °C. Sestava se udržuje při této teplotě 15 minut, ne víc jak 20 minut.
- Poté se kádinka s lázní a sestavou vyjme z ledové vody, povrch se osuší a co nejrýchleji se umístí do zkušebního přístroje.
- Pomocí kleští se umístí kuličky do středícího zařízení.
- Po spuštění ohřívání se zkontroluje počáteční teplota. Pokud nesplňuje stanovené meze, zkouška se přerušuje.
- Rychlost ohřívání se do prvních 3 minut nastaví na rychlost 5 °C/min. Teplota se kontroluje nejméně jednou po prvních třech minutách. Po prvních třech minutách musí být celkový vzrůst teploty v rozsahu 4,4 až 5,6 °C/min. Když tato podmínka není splněna, zkouška se zastaví.
- U každého kroužku a kuličky se zaznamená teplota, při které se asfalt obklopující kuličku dotkne základní desky. [29]

4.5.5 Vyjádření výsledků

Výsledky bodů měknutí v rozsahu 28 až 80 °C se zaznamenají. Výsledky bodů měknutí nad 80 °C ve vodní lázni se pokládá za neplatný a zkouška se opakuje v glycerínu.

Bod měknutí se vyjádří jako průměr teplot zaokrouhlený na nejbližší 0,2 °C. Takto získané výsledky se mohou lišit až o 1,5 °C od výsledků získaných stejnou metodou bez míchadla (stará verze). [29]

4.6 Sítový rozbor dle ČSN EN 933-1

4.6.1 Podstata zkoušky

Zkouška sestává z oddělení a roztřídění materiálu pomocí sady sít do frakcí (zrnitostních podílů) s klesající velikostí ok sít (částic). Velikosti otvorů sít a počet sít jsou zvoleny podle požadované přesnosti a druhu vzorku.

Schválený postup zkoušky je praní a prosévání za sucha. V případě zkoušení pórovitého kameniva, kde může praní ovlivnit jeho mechanické vlastnosti se použije pouze prosévání za sucha.

Hmotnost zachycených částic na jednotlivých sítích se uvádí ve vztahu k počáteční hmotnosti zkoušného materiálu. Souhrnný propad se uvádí v procentech v číselné nebo i v grafické podobě. [30]

4.6.2 Zkušební zařízení

- **Zkušební síta** – s otvory dle EN 933-2
- **Pevně líčující víko a dno sít**
- **Sušárna s ventilací** – s udržováním teploty kolem hodnoty 110 ± 5 °C pro sušení kameniva. Nebo jiné zařízení vhodné k sušení kameniva, které nezmění velikost částic.
- **Prací zařízení**
- **Váhy**
- **Nádoby a štetce**
- **Třídící zařízení** [30]



Obrázek 20: Sestava sít s automatickou vibrací

4.6.3 Zkušební postup

- Zmenšením vzorku se vytvoří zkušební navážka o velikosti větší než minimální, ale ne s předem stanovenou hmotností.
- Zkušební navážka se vysuší při teplotě 110 ± 5 °C do ustálené hmotnosti. Po vychladnutí se zváží a zaznamená se hodnota.
- **Praní** – zkušební navážka se umístí do nádoby a přidá se dostatečné množství vody, aby byla celá navážka pod vodou. Vzorek se promíchá s dostatečnou silou, aby se uvolnili jemné částice. Na navlhčené síto s velikostí otvorů 0,063 mm se umístí ochranné síto (napr. s velikostí ok 1 nebo 2 mm). Síta se sestaví tak, aby se protékající roztok zachytil

do vhodné nádoby. Obsah nádoby s rozmíchanou zkušební navázkou se vylévá na horní síto tak dlouho, dokud voda protékající zkušebním sítem 0,063 není čistá. Zbytek zachycený na síti 0,063 se vysuší při teplotě 110 ± 5 °C. Po vychladnutí se vzorek zváží a hodnota se zaznamená.



Obrázek 21: Zkušební vzorek před a po praní

- **Prosévání** – na sloupec sít se vysype vypraný a vysušený materiál. Sloupec obsahuje určitý počet sít, víko a dno (nádoba na dně). Síta se směrem dolů zmenšují (zmenšující se velikosti otvorů). Sloupcem sít se ručně nebo pomocí stroje třese. Poté se jedno po druhém rozebírají od největšího po nejmenší. Každé síto se ručně zatřese. Pro zamezení ztráty materiálu se pod síto umístí vhodná nádoba. V prosévání se pokračuje, dokud se všechen materiál, který mohl propadnout jedním sítem nepřemístí na další síto pod ním. Musí se zamezit přetěžování sít. Prosévání se ukončí, když další prosévání nevede ke změně hmotnosti materiálu zachyceného na daném síti o víc než 1 % hmotnosti.
- **Vážení** – Zachycený materiál na největším síti se zváží a jeho hmotnost se zaznamená. Stejná operace se provede sítem bezprostředně menším a pokračuje se stejně až po nejmenší síto. Vytríděný materiál na dně se zváží a jeho hodnota se zaznamená. [30]

4.6.4 Vyjádření výsledků

Zaznamenané hmotnosti na všech sítech a na dně se zaznamenají do záznamu o zkoušce. Hmotnost vzorku zachycená na síti se vypočte jako procento z celkové původní suché naváжки:

$$100 * \frac{R_i}{M_1} [\%]$$

Vypočte se procento propadů každým sítem z hmotnosti původní suché navážky vzorku až k nejmenšímu sítu:

$$100 - \sum (100 * \frac{R_i}{M_1})$$

Vypočte se procento jemných částic, které propadlo nejmenším sítem 0,063 podle rovnice :

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1}$$

Pokud se součet hmotností zůstatků na jednotlivých sítích s hmotností odplavených částic a celková hmotnost navážky suchého vzorku liší o více jak 1 % zkouška se musí opakovat. [30]

4.7 Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením dle ČSN EN 12697-6

4.7.1 Podstata metody

Objemová hmotnost neporušeného zhutněného zkušebního asfaltového tělesa se stanoví z jeho hmotnosti na vzduchu a pod vodou. Hmotnost zkušební vzorku se získá zvážením vzorku na vzduchu. Zkušební těleso se nasytí vodou a zváží se pod vodou a poté se jeho povrch osuší vlhkou jelenicí a opět zváží. [31]

4.7.2 Zkušební zařízení a pomůcky

- **Váhy** – s možností zvážit těleso na vzduchu i ve vodě (například pomocí drátěného košíku). Přesnost 0,1 g při hmotnosti vzorku do 5 kg.
- **Vodní lázeň** – s konstantní teplotou $\pm 1^\circ\text{C}$ g v blízkosti zkušební tělesa.
- **Teploměr** – s přesností $\pm 0,5^\circ\text{C}$.
- **Vlhká jelenice** – pro odstranění povrchové vlhkosti ze zkušební vzorku. Musí být dostatečně vlhká, aby odstranila povrchovou vlhkost a zároveň ponechala vlhkost ve spárách a dutinách. [31]

4.7.3 Příprava vzorku

Vzorek musí být očištěn od ostatních nečistot. Zkoušené těleso musí být suché se známým obsahem vlhkosti. V případě potřeby je těleso vysušené do konstantní hmotnosti. [31]

4.7.4 Postup zkoušky – metoda SSD

- Stanoví se hmotnost suchého zkušební tělesa m_1 .
- Stanoví se hustota vody ve vodní lázni s přesností $0,0001 \text{ Mg/m}^3$
- Zkušební těleso se ponoří do vodní lázně o známé teplotě. Těleso ne nechá pod vodou sytit tak dlouho, dokud se neustálí jeho hmotnost. Obecně se považuje 30 minut za dostatečně dlouhou dobu k úplnému nasycení.
- Stanoví se hmotnost nasyceného tělesa pod vodou m_2 . Je potřeba klást důraz, aby na povrchu tělesa nebyly žádné vzduchové bubliny.
- Těleso se vybere z vodní lázně a povrchově se osuší vlhkou jelenicí.
- Po vyjmutí z vodní lázně a po osušení se stanoví hmotnost zkušební tělesa m_3 . [31]

4.7.5 Výpočet

Objemová hmotnost zkušební vzorku se stanoví pomocí vzorce:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w$$

ρ_{bssd} objemová hmotnost SSD v kg/m^3

m_1 hmotnost suchého zkušební tělesa v kg

m_2 hmotnost zkušební tělesa ve vodě v kg

m_3 hmotnost nasyceného a osušeného tělesa na vzduchu v kg

ρ_w hustota vody při zkušební teplotě v kg/m^3 [31]

4.8 Stanovení maximální objemové hmotnosti volumetrickým postupem dle ČSN EN 12697-5

4.8.1 Podstata zkoušky

Objemová hmotnost a maximální objemová hmotnost se využívá k určení mezerovitosti ve zhutněném vzorku a k určení dalších vlastností, které souvisí s objemem směsi.

Pro tuto diplomovou práci byl použit volumerický postup. [32]

4.8.2 Použité zařízení a pomůcky

- **Sušárna s nucenou ventilací** – vhodná k sušení vzorků a udržující teplotu v okolí vzorku v rozmezí 110 ± 5 °C.
- **Vhodné nástroje k uvolňování a oddělování vzorků** – například špachtle.
- **Váhy** – s přesností 0,1 g při hmotnosti vzorku do 5 kg.
- **Teploměr** – s vhodnou přesností
- **Vodní lázeň** – udržující v okolí zkoušeného vzorku konstantní teplotu v rozmezí $\pm 0,2$ °C. Objem lázně musí být minimálně trojnásobek objemu pyknometru a musí být možnost ponořit pyknometr přibližně 20 mm pod jeho horní okraj.
- **Vibrační stůl** – nebo jiné zařízení k protřepávání pyknometru během odstraňování vzduchu.
- **Pyknometr** – vhodné velikosti s těsně přiléhajícím nástavcem a s dostatečným objemem, aby zkoušený vzorek zajímal maximálně 2/3 jeho objemu. Objem pyknometru je nutné pravidelně kalibrovat.
- **Vývěva** – s manometrem nebo s kalibrovaným vakuometrem umožňující vytěsnění vzduchu z pyknometru na zbytkový tlak pod 4 kPa. [32]



Obrázek 22: Pyknometr se zkušebním vzorkem

4.8.3 Příprava vzorku

Před sušením se vzorky očistí kartáčem od povrchových nečistot. Poté se umístí do sušárny s teplotou na úrovni $110 \pm 5^\circ\text{C}$ a vysuší se na konstantní teplotu. Poté se vzorek rozruší špachtlí. [32]

4.8.4 Postup zkoušky

- Stanoví se hmotnost pyknometru m_1 s nádstavcem o známém objemu
- Rozdělený a vysušený vzorek se umístí do pyknometru a opět se zváží. Zaznamená se hodnota m_2 .
- Pyknometr se naplní demineralizovanou vodou, odvzdušněnou vodou nebo vhodným rozpouštědlem do výšky 30 mm pod horní okraj.

- Pyknometr se umístí na 30 minut do vývěvy, kde se za částečného vákuua odstraní vzduch. Částečné vákuum musí mít zbytkový tlak pod 4 kPa. Odstraňování vzduchu se dá usnadnit pomocí vibrací, nebo třesením. Je možné použít dispergační činidlo (snížení povrchového napětí vody) pro snadnější únik vzduchu ze vzorku (platí při použití vody).
- Poté se pyknometr osadí nástavcem a naplní po referenční značku.
- Pyknometr se umístí do vodní lázně s rovnoměrnou zkušební teplotou.
- Pyknometr se doplní vodou po referenční značku. Doplněná voda musí mít stejnou teplotu jako vodní lázeň.
- Pyknometr se vyjme z vodní lázně povrchově se očistí a určí se jeho hmotnost m_3 . [32]

4.8.5 Výpočet

Maximální objemová hmotnost asfaltové směsi se určí pomocí vzorce:

$$\rho_{mv} = \frac{(m_2 - m_1)}{V_p - (m_3 - m_2)/\rho_{pw}}$$

kde

ρ_{mv} maximální objemová hmotnost asfaltové směsi stanovena volumetrickým postupem, v kg/m^3

m_1 hmotnost pyknometru s nástavcem, v gramech

m_2 hmotnost pyknometru s nástavcem a vzorkem, v gramech

m_3 hmotnost pyknometru s nástavcem, vzorkem a kapalinou, v gramech

V_p objem pyknometru při naplnění po referenční značku, v m^3

ρ_w hustota kapaliny při dané teplotě, v kg/m^3 [32]

4.9 Stanovení mezerovitosti dle ČSN EN 12697-8

4.9.1 Podstata zkoušky

Mezerovitost se určí z poměru objemové hmotnosti asfaltové směsi určené podle postupu v ČSN EN 12697-6 a maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi vypočtené podle postupu dle ČSN EN 12697-5.

4.9.2 Výpočet

Mezerovitost zkušebního vzorku se vypočte podle následujícího vztahu:

$$V_a = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} * 100$$

kde

V_a mezerovitost asfaltového zkušebního tělesa, v procentech

ρ_m maximální objemová hmotnost směsi, v kg/m^3

ρ_b objemová hmotnost zkušebního tělesa, v kg/m^3 [33]

4.10 Zkouška pojíždění kolem podle ČSN EN 12697-22

4.10.1 Podstata zkoušky

Měřením hloubky vyjeté koleje opakovaným pojezdem zatíženého kola při stálé teplotě se posuzuje náchylnost na vznik deformací asfaltové směsi. [34]

4.10.2 Zkušební zařízení a pomůcky

Malá zkušební zařízení při použití obdélníkových desek pro vykonávání zkoušky pojíždění kolem vybavené dle ČSN EN 12697-22 odsek 6.3. [34]



Obrázek 23: Malé zkušební zařízení pro zkoušku pojíždění kolem

4.10.3 Příprava vzorku

Forma pro umístění zkušební vzorku se natře nepřilnavou látkou. Poté se do ní umístí zkušební vzorek (deska z asfaltového betonu). Takto sestavená forma se nechá temperovat při 50 °C minimálně 4 hodiny, ale ne více jak 24 hodin. Pro tělesa s tloušťkou nad 60 mm je minimální doba temperování 6 hodin. [34]

4.10.4 Postup zkoušky

Vytemperovaný vzorek ve formě se umístí do vytemperované komory se stanovenou teplotou s přípustnou odchylkou $\pm 1^\circ\text{C}$. Povrch zkušební vzorku se zakryje nepřilnavou fólií jenž zamezí přilepování vzorku na pojížděné kolo. Komora se uzavře a spustí se zkouška, při které kolo udělá 10 000 zatěžovacích cyklů, tedy 20 000 pojezdů. Nárůst hloubky vyjeté koleje je automaticky zaznamenáván přístrojem. [34]

4.10.4.1 Přírůstek hloubky vyjeté koleje na vzduchu

Přírůstek vyjeté koleje v mm na 1 000 zatěžovacích cyklů je vypočten podle následujícího vzorce:

$$WTS_{AIR} = \frac{(d_{10\,000} - d_{5\,000})}{5}$$

WTS_{AIR} – přírůstek hloubky vyjeté koleje, v milimetrech na 1 000 zatěžovacích cyklů

$d_{5\,000}$, $d_{10\,000}$ – vertikální posun po 5 000 a 10 000 cyklech, v milimetrech. [34]

4.10.4.2 Poměrná hloubka vyjeté koleje na vzduchu

Poměrná hloubka vyjeté koleje se pro 10 000 zatěžovacích cyklů v % vypočítá podle následujícího vzorce:

$$PRD_{AIR} = 100 \frac{d_{10\,000}}{h}$$

PRD_{AIR} – poměrná hloubka vyjeté koleje

$d_{10\,000}$ – vertikální posun po 10 000 cyklech, v milimetrech

h – tloušťka tělesa, v milimetrech. [34]

4.10.5 Vyjádření výsledků

Postupný nárůst hloubky vyjeté koleje se zobrazí numericky (v tabulce) a graficky.

4.11 Nizkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem dle ČSN EN 12697-46

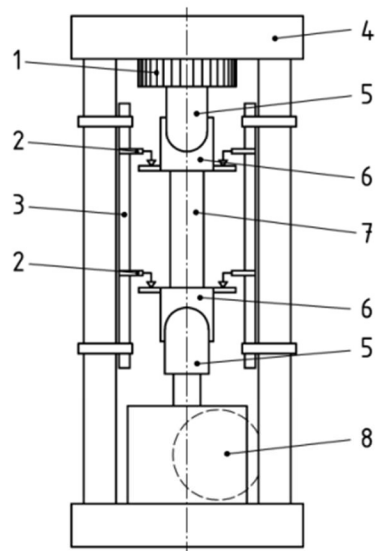
Pro tuto diplomovou práci byla zvolena zkouška tahem s rovnoměrným poklesem teploty TSRST. [35]

4.11.1 Podstata zkoušky TSRST

Jedná se o zkoušku nízkoteplotních vlastností rovnoměrným řízeným poklesem teploty, kdy je vzorek s konstantní délkou vystaven poklesu teploty s konstantní rychlostí. Z důvodu zamezení zmršťování vlivem teplotních změn vzniká ve zkušebním tělese kryogenní napětí. Výsledkem tohto napětí dojde k porušení vzorku mrazovou trhlinou. Zaznamená se teplota vzorku při porušení, teplota v komoře při porušení a napětí, při kterém se vzorek porušil. [35]

4.11.2 Zkušební pomůcky a přístroje

- **Zatěžovací zařízení** – musí být schopno zabránit vzniku radiálních a příčných sil a momentů ve zkušebním tělese. Těleso je připevněno k měřicímu přístroji přes dva kardanové závěsy
- **Systém měření deformace** – rozsah měření deformace zkušebního tělesa je od $\pm 2,5$ mm do $\pm 0,5$ μ m.
- **Systém měření zatížení** – je schopen monitorovat axiální zatížení až do 25 kN s rozlišitelností 0,001 kN a s přesností 0,01 kN.
- **Záznamová jednotka** – schopna zaznamenávat elektrické signály snímačů zatížení a deformace, které přenáší do počítače.
- **Termostatická komora** – vhodný prostor s řízeným oběhem vzduchu, ve kterém je možno provádět zkoušku. Uvnitř prostoru se udržuje konstantní teplota od -40 do 30 °C s přesností $\pm 0,5$ K. [35]



Legenda

- | | |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1 silový tenzometrický snímač | 5 kardanový závěs |
| 2 snímač posunu | 6 čelist |
| 3 tepelně nezávislá měřicí základna | 7 zkušební těleso |
| 4 příčný trám | 8 převodovka s krokovým motorem |

Obrázek 24: Schéma zkušebního přístroje pro zkoušku TSRST [35]

4.11.3 Příprava zkušebních těles

Pro každou asfaltovou směs je potřeba ozkoušet alespoň tři zkušební tělesa.

Pro tuto diplomovou práci byly zvoleny rozměry zkušebních těles následovně:

- Šířka 50 ± 2 mm
- Tloušťka (výška) 50 ± 2 mm
- Délka 200 ± 2 mm

Konce zkušebních těles musí být kolmé k ose zkušebního tělesa s tolerancí $\pm 1^\circ$. Zkušební tělesa se získávají vyřezáním z desek, nebo se odebírají z vrstev vozovky. Pro zajištění přesného průřezu musí být všechny hrany upraveny řezáním nebo broušením. [35]



Obrázek 25: Zkušební vzorky v centrovacím rámu

4.11.4 Postup zkoušky TSRST

Při zkoušce TSRST se udržuje konstantní délka zkušebního vzorku, přičemž teplota v termostatické komoře klesá v čase. Takto vzniká v tělese kryogenní (tahové) napětí. Doporučená teplota při zahájení zkoušky je 20 °C s rychlostí klesání teploty -10 K/h. Protože teplota uvnitř vzorku vykazuje vůči teplotě v komoře jisté zpoždění, je nutno zaznamenávat i teplotu v jádře vzorku (v dalším zkušebním tělese). [35]

4.11.5 Vyjádření výsledků

Při porušení tělesa se odečte maximální tahové (kryogenní) napětí v tělese. Rovněž se odečte teplota vzduchu v komoře, při které byl vzorek porušen a zaznamená se také teplota v jádru vzorku při porušení. [35]

4.12 Stanovení modulu tuhosti dle ČSN EN 12697-26

Pro stanovení modulu tuhosti v rámci této diplomové práce byla zvolena dvoubodová zkouška ohybem na vetknutém komolém klínu. [36]

4.12.1 Podstata zkoušky

Zkušební vzorky definovaného tvaru jsou deformovány v rozsahu lineárního přetvoření. Naměřené síly a derofmace jsou vypočítány z amplitudy napětí a poměrného přetvoření. Na základě naměřeného nápětí a přetvoření lze určit modul tuhosti. [36]

4.12.2 Příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa se vyrobí řezáním a broušením z připravených desek dle ČSN EN 12697-33 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 33: Příprava zkušebních těles*.



Obrázek 26: Výroba zkušebních vzorků řezáním

Pro tuto diplomovou práci byly vzhledem na velikost použitého kameniva zvoleny vzorky komolého klínu s tloušťkou 50 mm. Zkušební těleso se přilepí na kovovou podložku tloušťky alespoň 10 mm tak, aby byla zajištěna co nejlepší geometrická poloha tělesa.



Obrázek 27: Zkušební tělesa pro stanovení tuhosti

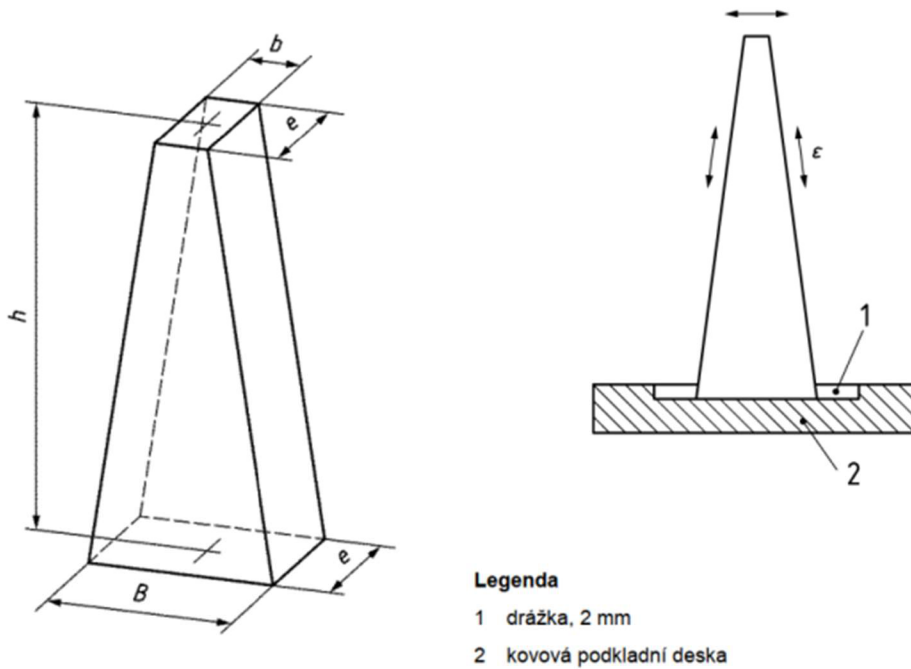
Ke stanovení modulu tuhosti je nutno zkoušet minimálně 4 zkušební tělesa. Modul tuhosti posuzované směsi se stanoví jako průměr z naměřených hodnot. Rozměry zkušebních těles tvaru komolého klínu jsou stanoveny v tabulce 2.

[36]

Rozměry zkušebních těles mm	Zkušební tělesa tvaru trámečku mm		Zkušební tělesa tvaru komolého klínu mm		
	$D \leq 22$ mm	$D > 22$ mm	$D \leq 16$ mm	$16 < D \leq 22$ mm	$22 < D \leq 45$ mm
B			56 ± 1	70 ± 1	70 ± 1
b	40 ± 1	80 ± 1	25 ± 1	25 ± 1	25 ± 1
e	40 ± 1	80 ± 1	25 ± 1	25 ± 1	50 ± 1
h	160 ± 1	320 ± 1	250 ± 1	250 ± 1	250 ± 1

POZNÁMKA D je (jmenovitá) velikost oka horního omezujícího síta kameniva ve směsi, v milimetrech (mm).

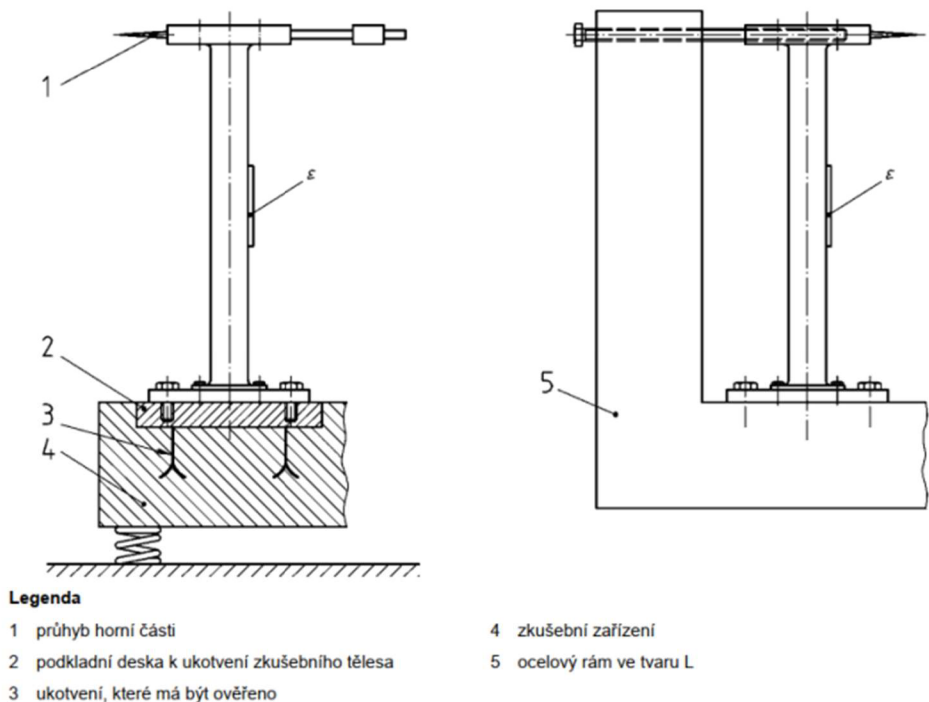
Tabulka 2: Rozměry vzorků pro zkoušku tuhosti [36]



Obrázek 28: Zkušební těleso pro stanovení tuhosti asfaltové směsi [36]

4.12.3 Zkušební zařízení

Umožňuje vyvodit sinusový dynamický průhyb na vrcholu žkušebního tělesa s frekvenčním rozsahem 0 – 30 Hz s přesností $\pm 5\%$. Zkušební zařízení je rovněž vybaveno termostatickou komorou s možností regulace teploty vzduchu s přesností $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zařízení také obsahuje snímače pro měření dynamické síly s přesností $\pm 3\%$ a snímače pro měření průhybu s přesností měření $1\text{ }\mu\text{m}$. [36]



Obrázek 29: Schéma zkušebního zařízení pro určení modulu tuhosti asfaltové směsi [36]

4.12.4 Postup zkoušky

Zkušební těleso se umístí do termostatické komory na nejméně 4 hodiny při teplotě 15 °C, kde se temperuje na požadovanou teplotu. Poté se pevně uchyti do měřícího přístroje a zpusť se zkoušení na stanovených frekvencích.

Pro tuto diplomovou práci byly zvoleny frekvence 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz a 25 Hz. Zatížení na jednotlivých frekvencích je aplikováno po dobu 7 sekund. [36]



Obrázek 30: Zkušební vzorek tzv. trapezoid neboli komolý klín ve zkušebním přístroji

4.12.5 Vyjádření výsledků

Výsledné moduly jsou vypočteny z poměru napětí a přetvoření dle zvorce:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Z tuhostí jednotlivých vzorků se vypočte průměrná hodnota. Tuto hodnotu můžeme porovnat z doporučenými hodnotami dle *TP 170 Navrhování vozovek*

pozemních komunikací uvedených v tabulce 3. Tyto hodnoty však nejsou závazné.

[36] [39]

Tabulka B.2 - Návrhové moduly pružnosti asfaltových směsí při 15°C

Třída S_{min}	Modul pružnosti ¹⁾ MPa	Poissonovo číslo	Konstrukční vrstva		Doporučená pojiva ²⁾
			Typ směsi	Mezerovitost (%)	
$S_{min9000}$	9 000	0,30	VMT	3 – 5	20/30, 30/45, 35/50, PMB 10/40-60,-65, PMB 25/55-55,-60,-65 MG 20/30, 35/50, TSA 15/25
			ACO S, BBTM C S ACL S, BBTM A S	2,5 – 4 4 – 6	35/50 ³⁾ , PMB 25/55-55, -60,-65
$S_{min7500}$	7 500	0,33	ACO S, ACO+, BBTM C+ ACL S, ACL+, BBTM A+ ACP S MA I, MA III, MA IV	2,5 – 4,5 4 – 6 5 – 7 0	50/70, PMB 45/80-50,-60 20/30, PMB 10/40-60,-65
			ACO, BBTM C ACL, BBTM A ACP +	2,5 – 4,5 4 – 6 5 – 7	70/100
$S_{min5500}$	5 500	0,33	SMA S, + MA II, MA IV	2,5 – 4,5 0	35/50, 50/70, 20/30, PMB 10/40-60,-65 PMB 25/55-55,-60,-65,
		0,35			
$S_{min3600}$	3 600	0,35	PA	16-30	50/70, PMB 45/80-50,-60

Tabulka 3: Návrhové moduly pružnosti asfaltových směsí při 15 °C [39]

5 POUŽITÉ MATERIÁLY

V rámci diplomové práce byly vyrobeny a zkoušeny celkem dvě asfaltové směsi. Pro účely diplomové práce byly označeny jako ACP32 +30 s obsahem 30 % R-materiálu a ACP32 +50 s 50 % R-materiálu. Do obou směsí byl použit nemodifikovaný asfalt 50/70. Vlastnosti pojiva v R-materiálu byly regenerovány pomocí rejuvenátoru Storflux. Celkem bylo vyrobeno 6 Marshallových těles, tři pro každou směs. Rovněž bylo vyrobeno 6 desek o rozměrech 260x320x60 mm, ze kterých byly řezáním a broušením vyrobeny zkušební vzorky. Vzhledem ke zkoušení směsí s velikostí největšího zrna 32 mm byla zvolena výška desky 60 mm, aby byla dosažena co největší homogenita vyřezaných a vybroušených zkušebních těles. Původ kameniva je v lomě Jakubčovice. Pro výrobu směsí byly použity frakce kameniva 0/4, 4/8, 11/16, 16/22, 16/32 a filer. Původ fileru je z lokality Mokrá. R-materiál pochází z obalovny v Rajhradcích.

6 VÝSLEDKY ZKOUŠEK

V této části jsou uvedeny výsledky zkoušek na asfaltových pojivech a asfaltových směsích a jejich vyhodnocení.

6.1 Znovuzískání extrahovaného pojiva

Zkouška byla provedena podle popisu v kapitole 4.2. Výsledky zkoušky jsou popsány v tabulce 4.

Hmotnost bez asfaltu:	1,606.2 g
Hmotnost s asfaltem:	1,691.9 g
Hmotnost asfaltu:	85.7 g
Procento asfaltu	5.1%

Tabulka 4: Výsledky extrakce pojiva

6.2 Penetrace jehlou

Zkouška byla provedena podle popisu v kapitole 4.4. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 5.

Penetrace jehlou - recyklát Rajhradice				
1	2	3	4	Průměr
Penetračních jednotek [0,1 mm]				
18.0	17.3	17.3	16.4	17.3

Tabulka 5: Výsledky zkoušky penetrace jehlou

Penetrace pojiva extrahovaného z R-materiálu spňuje podmínku v průměru alespoň 15 penetračních jednotek dle ČSN 73 6141 *Požadavky na použití R-materiálu do asfaltových směsí*.

6.3 Bod měknutí

Zkouška byla provedena podle popisu v kapitole 4.5. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 6.

Bod měknutí [°C]		Recyklát
1	2	Průměr [°C]
67.8	67.9	67.9

Tabulka 6: Výsledky zkoušky bodu měknutí

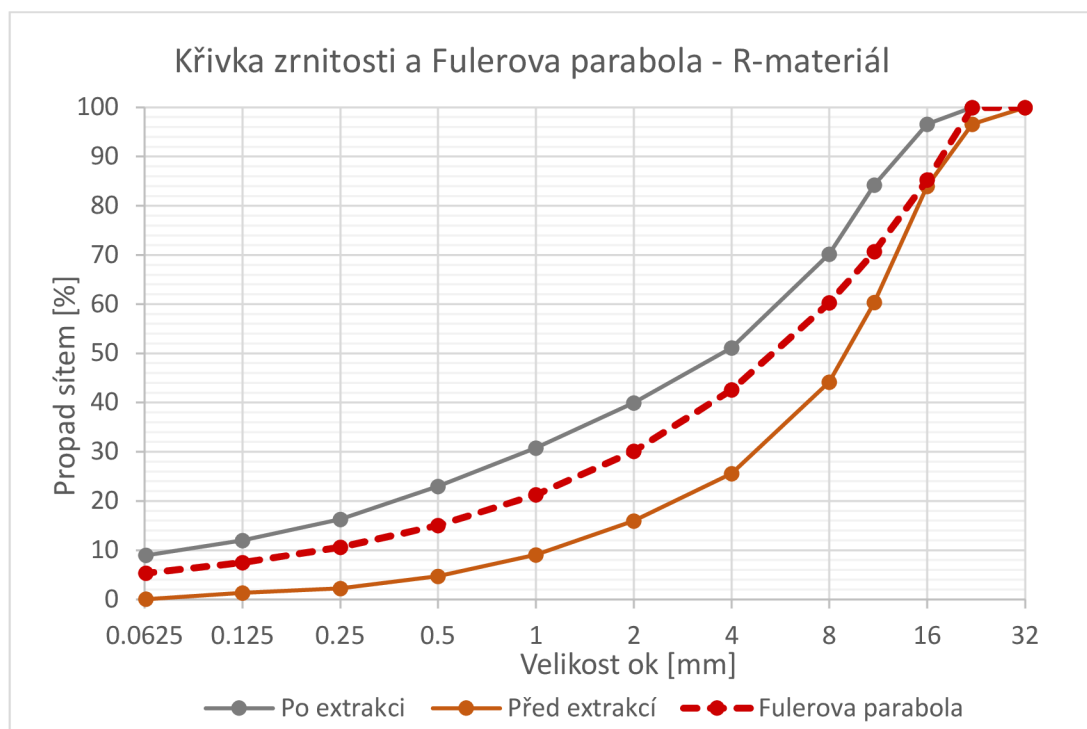
Pro extrahovaný asfalt představuje bod měknutí na úrovni 67,9 °C vysokou hodnotu, která napovídá, že dle ČSN 73 6141 *Požadavky na použití R-materiálu do asfaltových směsí* je extrahované pojivo z R-materiálu modifikované polymerem.

6.4 Síťový rozbor

Zkouška byla provedena podle popisu v kapitole 4.6. Byly zkoušeny všechny frakce použitého kameniva 0/4, 4/8, 11/16, 16/22, 16/32 a R-materiál. Procentuální propad R-materiálu a extrahovaného kameniva je uveden v tabulce 7.

SÍŤOVÝ ROZBOR							
Velikost ok [mm]	Před extrakcí		Propad sítím [%]	Po extrakci			Fullerova parabola [%]
	Zůstalo na sítu [g]	[%]		Zůstalo na sítu [g]	Propad [%]	Propad [%]	
32	0.0	0.00	100.00	0.0	0.00	100.00	100.0
22	118.9	3.43	96.57	0.0	0.00	100.00	100.0
16	437.1	12.61	83.96	54.4	3.39	96.61	85.3
11	818.5	23.61	60.35	198.3	12.35	84.27	70.7
8	561.2	16.19	44.16	225.6	14.05	70.22	60.3
4	644.1	18.58	25.58	306.9	19.11	51.11	42.6
2	334.0	9.64	15.94	179.6	11.18	39.93	30.2
1	238.9	6.89	9.05	146.5	9.12	30.81	21.3
0.5	149.9	4.32	4.73	125.8	7.83	22.98	15.1
0.25	85.4	2.46	2.26	107.0	6.66	16.32	10.7
0.125	32.8	0.95	1.32	69.0	4.30	12.02	7.5
0.063	43.2	1.25	0.07	48.8	3.04	8.98	5.4
< 0,063	2.5	0.07	0.00	144.3	8.98	0.00	
Σ	3466.5	100.00		1606.2	100.00		

Tabulka 7: Výsledky síťového rozboru R-materiálu a extrahovaného kameniva



Graf 2: Křivka zrnitosti R-materiálu před a po extrakci a Fullerova parabola

Graf 2 popisuje průběhy zrnitosti R-materiálu před a po extrakci. Křivka zrnitosti před extrakcí je zkreslena z důvodu slepených zrn asfaltovým pojivem. Naopak křivka zrnitosti kameniva po extrakci zobrazuje reálný průběh zrnitosti kameniva obsaženého v R-materiálu. Jak je vidět v grafu 2 trajektorie křivky zrnitosti extrahovaného kameniva kopíruje křivku Fullerovy paraboly, avšak je odskočena z důvodu vyššího obsahu jemnějších zrn v extrahovaném kamenivu.

Procentuální propady jednotlivých frakcí stavebního kmeniva, které bylo použito pro výrobu asfaltových směsí pro účely této diplomové práce jsou uvedené v tabulce 8.

Procentuální propady jednotlivých frakcí						
Síta	0/4	4/8	8/11	11/16	16/22	16/32
63.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
31.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	89.40
22.40	100.00	100.00	100.00	100.00	99.10	47.09
16.00	100.00	100.00	100.00	90.57	16.41	4.17
11.20	100.00	100.00	95.97	16.52	0.44	0.37
8.00	100.00	93.50	18.88	0.06	0.16	0.37
4.00	93.20	6.50	0.43	0.17	0.09	0.37
2.00	63.64	2.60	0.18	0.15	0.08	0.34
1.00	38.89	1.80	0.13	0.13	0.07	0.33
0.50	24.06	1.40	0.01	0.12	0.06	0.31
0.25	12.78	1.10	0.07	0.10	0.05	0.28
0.13	4.84	0.90	0.02	0.07	0.02	0.19
0.06	0.25	0.80	0.06	0.00	0.04	0.04

Tabulka 8: Výsledky síťového rozboru stavebního kameniva

Z těchto hodnot síťového rozboru byla vytvořena čára zrnitosti směsí ACP32 +30 a ACP32 +50. Frakce kameniva 8/11 nebyla použita z důvodu optimalizace křivky zrnitosti.

6.5 Návrh složení směsí

Pro optimální zhutnitelnost byla směs navržena pomocí Fullerovy paraboly.

6.5.1 Návrh čáry zrnitosti pro směs ACP 32 +30

Fullerova parabola se vypočte podle vztahu:

$$y = 100 * \left(\frac{d}{D}\right)^{0,5}$$

y procentuální propad na sítu o průměru oka d [%]

d průměr oka síta [mm]

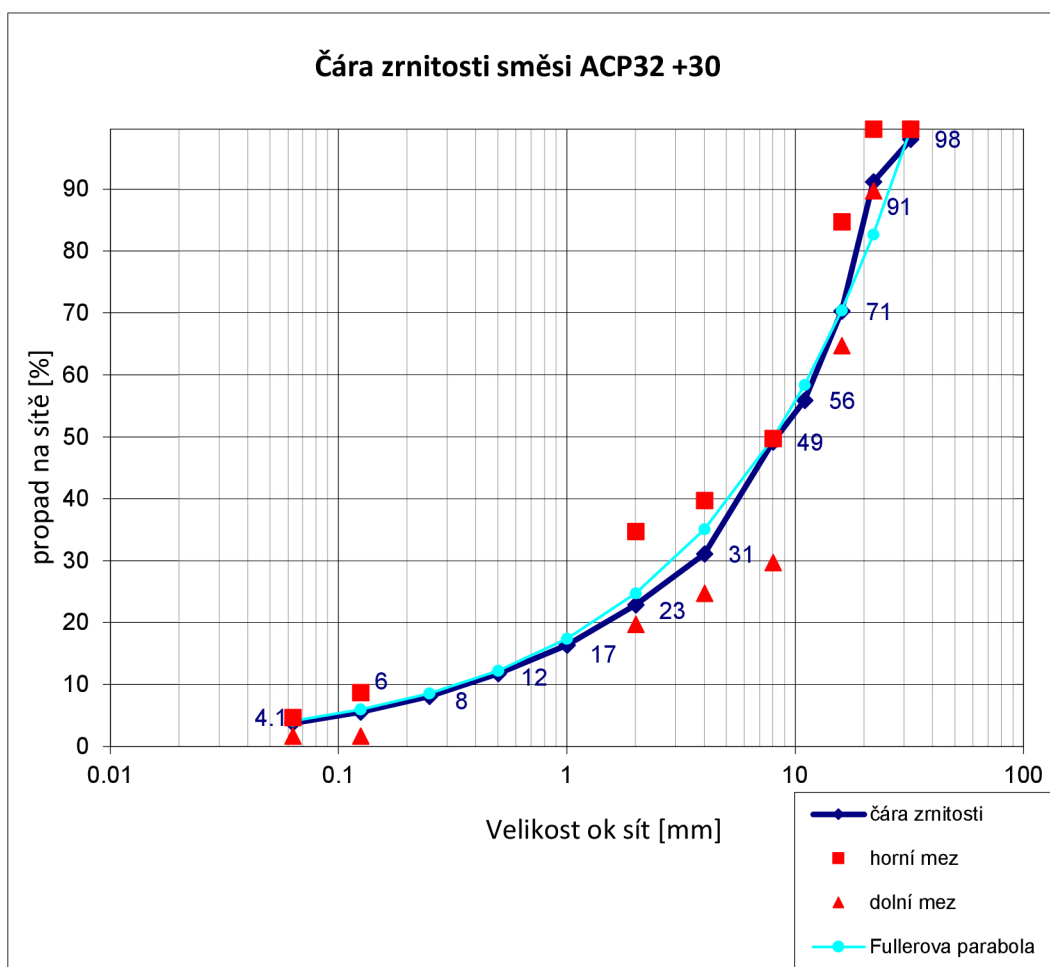
D maximální velikost oka síta v soustavě [mm]

Dále byly zvoleny množství jednotlivých frakcí kameniva ve směsi, které jsou vypsány v tabulce 9.

Návrh směsi ACP 32 +30	
Frakce	Množství [%]
moučka	1
0/4	15
4/8	13
R-mat	30
11/16	10
16/22	10
16/32	16
Suma	100

Tabulka 9: Návrh směsi ACP32 +30

Dle procentuálního obsahu R-materiálu (obsahuje 5,1 % polymerem modifikovaného pojiva) se vypočte množství asfaltového pojiva, které se přidá do směsi, aby byl obsah asfaltového pojiva ve výsledné směsi 4,2 %. Rovněž se dle podílu R-materiálu vypočítá množství rejuvenátoru (STORFLUX) pro oživení vlastností asfaltového pojiva v R-materiálu.



Graf 3: Křivka zrnitosti navržené směsi ACP32 +30 a Fullerova parabola

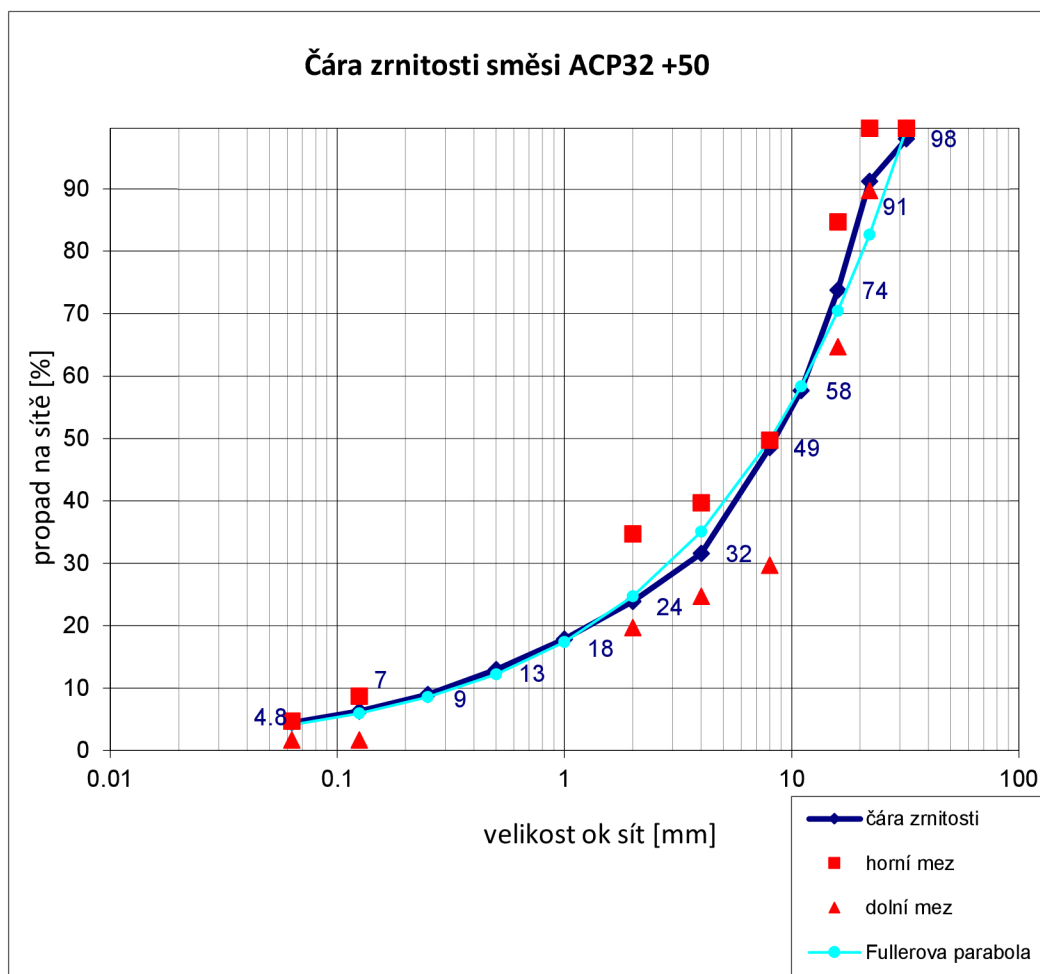
Čára zrnitosti s mírným odstupem odpovídá tvaru Fullerovy paraboly.

6.5.2 Návrh čáry zrnitosti pro směs ACP 32 +50

Směs ACP 32 s 50 %-ním podílem R-materiálu byla navržena podobně jako směs ACP 32 s 30 % R-materiálu. Taktéž nebyla využita frakce kamenice 8/11, protože R-materiál obsahuje dostatečné množství menších frakcí. Z tohoto důvodu byla také vynechána moučka (filer), aby se co nejvíce zoptimalizovala křivka zrnitosti.

Návrh směsi ACP32 +50	
Frakce	Množství [%]
moučka	0
0/4	6
4/8	8
R-mat	50
11/16	10
16/22	10
16/32	16
Suma	100

Tabulka 10: Návrh směsi ACP 32 s 50 %-ním podílem R-materiálu.



Graf 4: Křivka zrnitosti navržené směsi ACP32 +50 a Fullerova parabola

Čára zrnitosti pro směs ACP32 +50 je s mírnými rozdíly velice podobná Fullerově parabole.

6.6 Výroba Marshallových těles

Celkem bylo vyrobeno 6 Marshallových těles pro obě směsi. Obsah pojiva byl stanoven na 4,2 % u obou směsí. Na Marshallovch tělesech byla stanovena objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost pomocí pyknometru a také mezerovitost.

6.6.1 Stanovení navážek pro Marshallove tělesa

Navážky pro výrobu jednoho Marshallovho tělesa jsou uvedeny v tabulce 11 a 12. Celková hmotnost navážky pro jedno Marshallovo těleso je 1140 g. Teplota míchání byla určena na 160 °C a teplota hutnění na 150 °C. R-materiál byl ohřát na 130 °C.

6.6.2 Výpočet navážek pro Marshallova tělesa

Navážky Marshallova tělesa pro směs ACP30 +30		
Kamenivo		
frakce	podíly v [%]	hmotnosti [g]
filer	1.0	11.4
0-4	15.0	171.0
4-8	13.0	148.2
R-mat	30.0	342.0
11-16	10.0	114.0
16-22	15.0	171.0
22-32	16.0	182.0
Suma	100.0	1140.0
Asfaltové pojivo		
		hmotnosti [g]
Pojivo v R-materiálu:		17.3
Množství rejuvenátoru:		2.1
Přidané asfaltové pojivo 50/70:		32.6
Míchání při:	160 °C	
Hutnění při:	150 °C	

Tabulka 11: Výpočet navážky pro Marshallová tělesa ACP32 +30

Navážky Marshallova tělesa pro směs ACP30 +50		
Kamenivo		
frakce	podíly v [%]	hmotnosti [g]
filer	0.0	0.0
0-4	6.0	68.4
4-8	8.0	91.2
R-mat	50.0	570.0
11-16	10.0	114.0
16-22	10.0	114.0
22-32	16.0	182.4
Suma	100.0	1140.0
Asfaltové pojivo		hmotnosti [g]
Pojivo v R-materiálu:		28.9
Množství rejuvenátoru:		3.5
Přidané asfaltové pojivo 50/70:		21.1
Míchání při:	160 °C	
Hutnění při:	150 °C	

Tabulka 12: Výpočet navážky pro Marshallová tělesa ACP32 +50

6.6.3 Hutnění Marshallových těles

Hutnění Marshallových těles bylo určeno na 2 x 50 úderů hutnicím pěchem.



Obrázek 31: Hutnicí pěch na hutnění Marshallových těles

6.6.4 Výroba asfaltové směsi

Asfaltové směsi byly vyrobeny dle ČSN EN 12697-35 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 35: Laboratorní výroba směsi*.

Vysušené kamenivo bylo naváženo na jednotlivé navážky a vloženo do sušárny, kde se ohřálo na stanovenou teplotu míchání 160 °C. R-materiál se umístil do druhé sušárny, kde se ohřál na stanovených 130 °C. Po dosažení stanovených teplot byl do R-materiálu aplikován rejuvenátor a R-materiál byl opět vložen do sušárny.

Po opětovném zahřátí R-materiálu na stanovenou teplotu se kamenivo a R-materiál přesypali do vhodné nádoby a vzájemně se promíchali. Po promíchání bylo do směsi přidáno asfaltové pojivo 50/70 ve stanoveném množství a mícháním při udržované teplotě 150 °C se vytvořila asfaltová směs.

Hotová asfaltová směs byla přesypána do formy na výrobu Marshallových těles a uhuštěna hutnícím pěchem 2 x 50 úderů.



Obrázek 32: Vyrobené Marshallovo těleso

6.6.5 Stanovení objemové hmotnosti Marshallových těles

Objemová hmotnost byla určena pro všechny vzorky podle postupu uvedeného v kapitole 4.7. Byla spočtena průměrná objemová hmotnost pro směsi ACP32 +30 a ACP32 +50. Výsledné objemové hmotnosti jsou uvedeny v tabulkách 13 a 14.

ACP32 +30	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₂ [g]	ρ _{vody} [kg/m ³]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
1	1165.6	681.2	1170.9	0.9983	2380
2	1171.4	690.3	1175.3	0.9983	2415
3	1167.1	685.6	1173.9	0.9983	2390
Průměr					2391

Tabulka 13: Objemové hmotnosti Marshallových těles ACP32 +30

ACP32 +50	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₂ [g]	ρ _{vody} [kg/m ³]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
1	1159.2	684.8	1163.8	0.9983	2420
2	1158.0	682.0	1163.3	0.9983	2406
3	1157.4	680.3	1160.5	0.9983	2410
Průměr					2408

Tabulka 14: Objemové hmotnosti Marshallových těles ACP32 +50

Průměrná hodnota objemové hmotnosti byla u obou směsí určena ze tří Marshallových těles. Výsledné objemové hmotnosti jsou podobné.

6.6.6 Stanovení maximální objemové hmotnosti Marshallových těles

Maximální objemové hmotnosti byly stanoveny dle kapitoly 4.8. Pro obě směsi byl testován jeden vzorek.

ACP32 +30	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₂ [g]	ρ _{vody} [kg/m ³]	V _p [g]	Max. objemová hmotnost [kg/m ³]
	685.3	1850.2	2693.9	0.9971	1308.164	2521

Tabulka 15: Maximální objemová hmotnost směsi ACP32 +30

ACP32 +50	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₂ [g]	ρ _{vody} [kg/m ³]	V _p [g]	Max. objemová hmotnost [kg/m ³]
	685.3	1647.5	2574.2	0.9971	1308.164	2540

Tabulka 16: Maximální objemová hmotnost směsi ACP32 +50

Maximální objemová hmotnost směsi ACP32 +30 je 2521 kg/m³ a směsi ACP32 +50 je 2540 kg/m³.

6.6.7 Stanovení mezerovitosti Marshallových těles

Mezerovitost byla stanovena podle postupu uvedeném v kapitole 4.9. Mezerovitosti směsí ACP32 +30 a ACP32 +50 jsou uvedeny v tabulkách 17 a 18.

ACP32 +30	Objemová hmotnost	Maximální objemová hmotnost	Mezerovitost [%]
	2391	2521	5.16

Tabulka 17: Mezerovitost směsi ACP32 +30

ACP32 +50	Objemová hmotnost	Maximální objemová hmotnost	Mezerovitost [%]
	2408	2540	5.21

Tabulka 18: Mezerovitost směsi ACP32 +50

Výsledné mezerovitosti obou směsí jsou hodně podobné.

6.7 Výroba desek

Celkem byly vyrobeny tři desky pro každou směs. Rozměry desek byly stanoveny na 260 x 320 mm s výškou 60 mm. Pro výrobu desek byl použit stejný postup jako pro výrobu Marshallových těles.

Vysušené ohřáté kamenivo a R-materiál s aplikovaným rejuvenátorem se v míchačce (viz obrázek 33) scmíchali s přidaným asfaltovým pojivem. Doba míchání byla přibližně 3 minuty. Po úplném obalení zrn byla směs rozdělena do tří navážek pro výrobu desek, které se poté zhutnili v automatickém segmentovém zhutňovači (viz obrázek 34) do požadovaných rozměrů.

6.7.1 Výpočet navážky pro desky

Výpočty navážek pro obě směsi jsou uvedeny v tabulkách 19 a 20.

Navážky pro desky pro směs ACP30 +30		
Kamenivo		
frakce	podíly v [%]	hmotnosti [g]
filer	1.0	115.9
0-4	15.0	1738.3
4-8	13.0	1506.5
R-mat	30.0	3476.6
11-16	10.0	1158.9
16-22	15.0	1738.3
22-32	16.0	1854.2
Suma	100.0	11588.7
Asfaltové pojivo		
		hmotnosti [g]
Pojivo v R-materiálu:		174.5
Množství rejuvenátoru:		20.9
Přidané asfaltové pojivo:		326.9
Míchání při:	160 °C	
Hutnění při:	150 °C	

Tabulka 19: Výpočet navážky pro desku ACP32 +30

Navážky pro desky pro směs ACP30 +50		
Kamenivo		
frakce	podíly v [%]	hmotnosti [g]
filer	0.0	0.0
0-4	6.0	701.5
4-8	8.0	935.3
R-mat	50.0	5845.9
11-16	10.0	1169.2
16-22	10.0	1169.2
22-32	16.0	1870.7
Suma	100.0	11691.8
Asfaltové pojivo		
		hmotnosti [g]
Pojivo v R-materiálu:		289.8
Množství rejuvenátoru:		35.1
Přidané asfaltové pojivo:		211.6
Míchání při:	160 °C	
Hutnění při:	150 °C	

Tabulka 20: Výpočet navážky pro desku ACP32 +50

6.7.2 Výroba směsí na zhotovení desek



Obrázek 33: Míchačka pro výrobu asfaltových směsí

6.7.3 Hutnění desek



Obrázek 34: Automatický segmentový zhutňovač desek

Po vychladnutí byla na deskách zjištěna objemová hmotnost, mezerovitost a míra zhutnění, které jsou uvedeny v tabulkách 21, 22, 23 a 24.

ACP32 +30	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₂ [g]	ρ _{vody} [kg/m ³]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
1	11920	7047	11991	0.9983	2411
2	11894	7041	11992	0.9983	2402
3	11914	7027	12000	0.9983	2396
Průměr					2399

Tabulka 21: Objemové hmotnosti desek směsi ACP32 +30

ACP32 +50	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₂ [g]	ρ _{vody} [kg/m ³]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
1	11916.0	7093.0	11955.0	0.9978	2451
2	11908.0	7072.0	11936.0	0.9978	2448
3	11919.0	7088.0	11959.0	0.9978	2447
Průměr					2443

Tabulka 22: Objemové hmotnosti desek směsi ACP32 +50

ACP32 +30	Objemová hmotnost	Maximální objemová hmotnost	Mezerovitost [%]	Míra zhutnění [%]
	2399	2521	4.85	100.31

Tabulka 23: Mezerovitost a míra zhutnění desek směsi ACP32 +30

ACP32 +50	Objemová hmotnost	Maximální objemová hmotnost	Mezerovitost [%]	Míra zhutnění [%]
	2443	2540	3.82	101.47

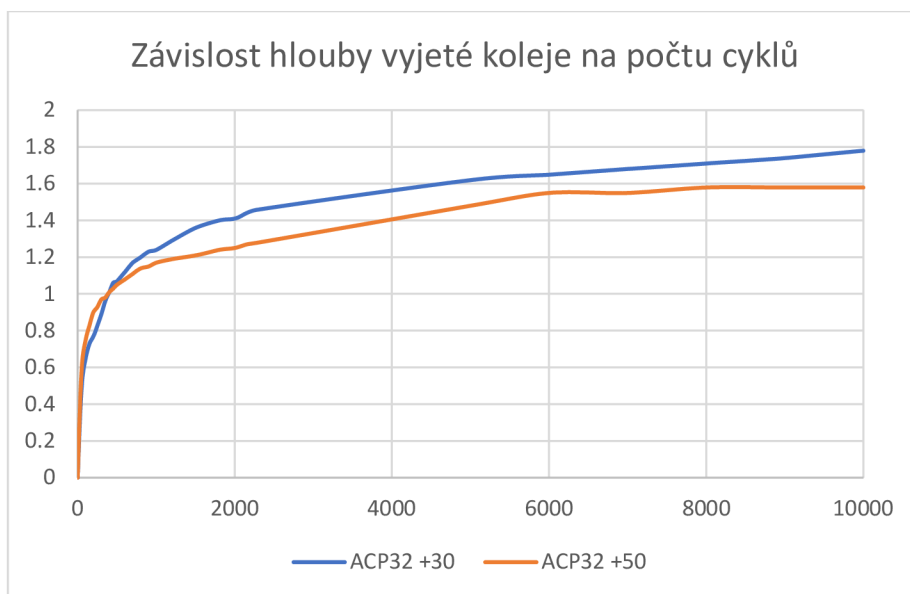
Tabulka 24: Mezerovitost a míra zhutnění desek směsi ACP32 +50

Při porovnání objemových hmotností, mezerovitosti a míry zhutnění desek jsou viditelné větší rozdíly, než při Marshallových tělesech. Možnou příčinou je použití většího kameniva, kde i jedno zrno velikosti 32 mm zabere významnou část objemu výsledného Marshallovho tělesa a ovlivní pak výslednou mezerovitost i objemovou hmotnost.

Rovněž R-materiál není homogenní materiál a při použití většího množství na výrobu desek se více projeví zvýšený obsah menších zrn jako při Marshallových tělesech.

6.8 Pojždění kolem

Zkouška byla provedena podle popisu v kapitole 4.10. Maximální hloubka vyjeté koleje byla 1,78 mm u směsi ACP 32 +30 a 1,58 mm u směsi ACP32 +50, což je zobrazeno v grafu 4. Tabulka 22 zobrazuje numerický nárůst hloubky vyjeté koleje v závislosti na počtu cyklů.



Graf 5: Vliv počtu pojezdů na hloubku vyjeté koleje

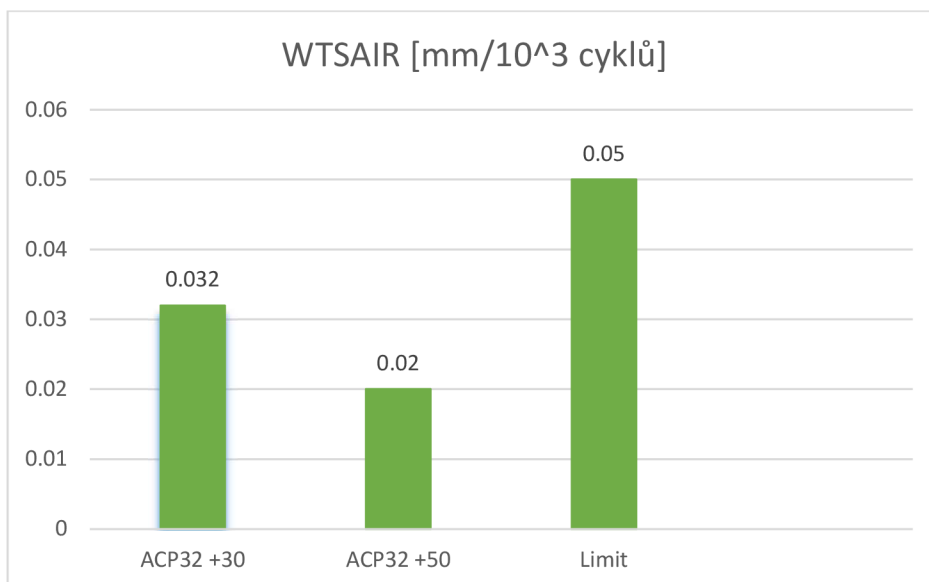
Pojezd	ACP32 +30	ACP32 +50
0	0	0
50	0.5	0.6
100	0.65	0.75
150	0.73	0.83
200	0.77	0.9
250	0.83	0.93
300	0.89	0.97
350	0.96	0.98
400	1.01	1.01
450	1.06	1.03
500	1.07	1.05
600	1.12	1.08
700	1.17	1.11
800	1.2	1.14
900	1.23	1.15
1000	1.24	1.17
1200	1.29	1.19
1500	1.36	1.21
1800	1.4	1.24
2000	1.41	1.25
2150	1.44	1.27
2300	1.46	1.28
5000	1.62	1.48
6000	1.65	1.55
7000	1.68	1.55
8000	1.71	1.58
9000	1.74	1.58
10000	1.78	1.58

Tabulka 25: Hloubka vyjeté koleje

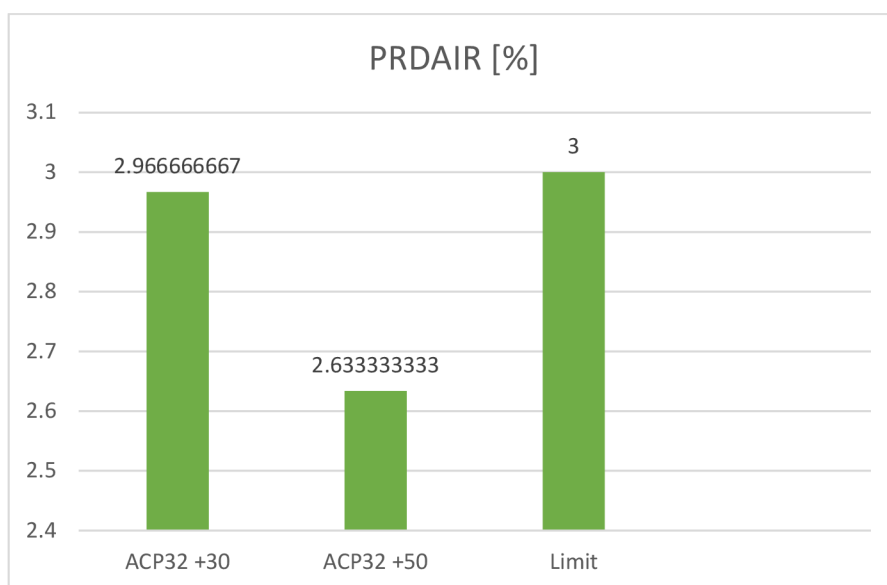
V tabulce 23 jsou zobrazeny parametry PRD_{AIR} a WTS_{AIR} s limitními hodnotami. V grafech 5 a 6 jsou tyto hodnoty porovnány spolu s limitními hodnotami.

Asfaltová směs	ACP32 +30	ACP32 +50	Limit
WTS_{AIR} [mm/10 ³ cyklů]	0.032	0.02	0.05
PRD_{AIR} [%]	2.9666667	2.6333333	3

Tabulka 26: Výsledné parametry WTS_{AIR} a PRD_{AIR}



Graf 6: Srovnání parametru WTS_{AIR}



Graf 7: Srovnání parametru PRD_{AIR}

Z grafů a tabulek parametrů PRD_{AIR} a WTS_{AIR} je při porovnání s limitními hodnotami patrné, že obě směsi vyhoví, avšak Hodnoty směsi ACP32 +30 se hodně přibližují limitním hodnotám.

Z hlediska odolávání vzniku deformací je lepší směs ACP32 +50, která obsahuje více R-materiálu. R-materiál obsahuje asfaltové pojivo, které i přes regeneraci rejuvenátorem může být tvrdší, což může mít vliv na odolnost směsi proti deformacím.

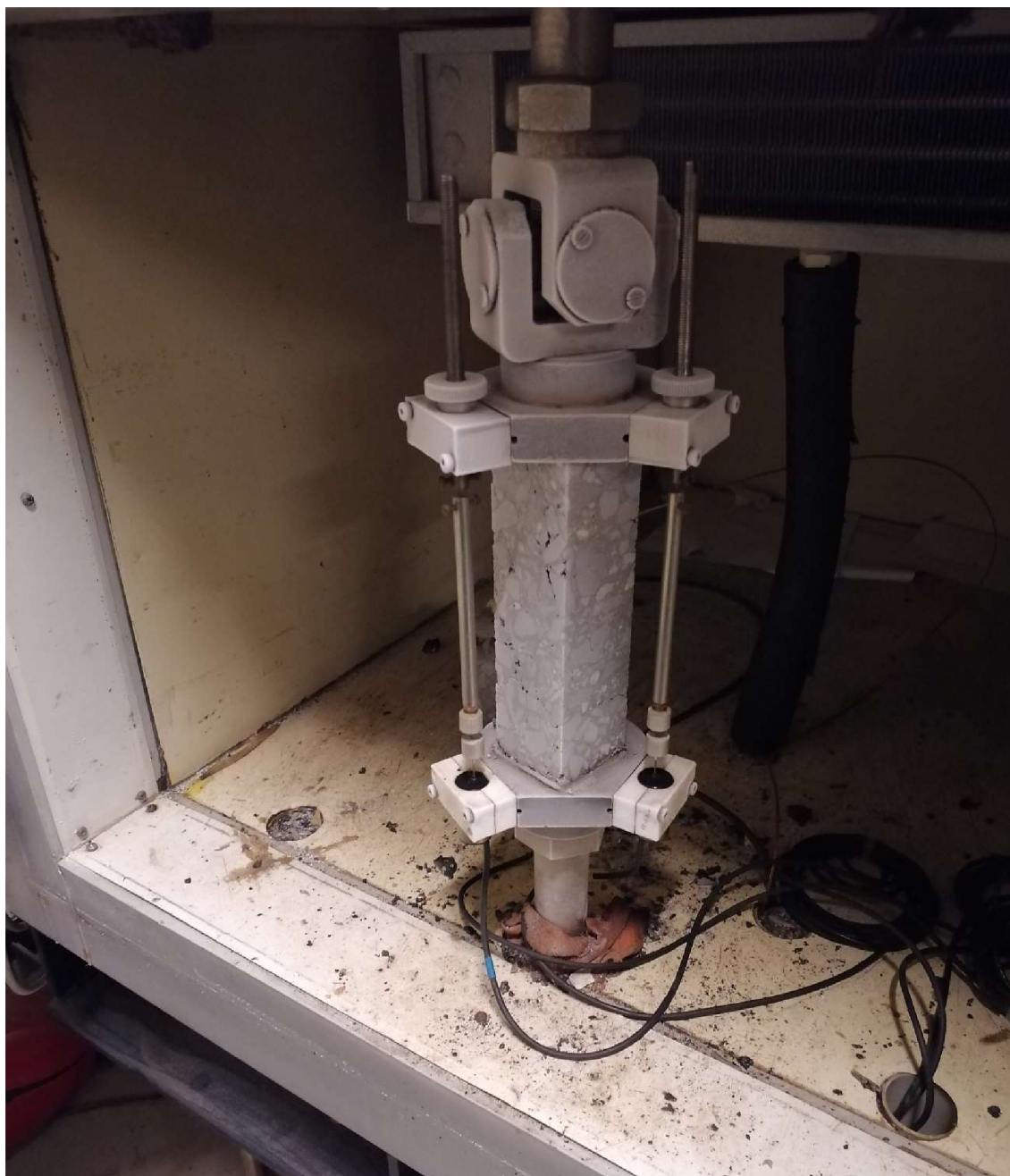
V souběžně připravované diplomové práci, kde se posuzovala také směs ACP32 s nemodifikovaným pojivem, ale bez R-materiálu byla při směsi s 4,2 %

asfaltového pojiva dosažena maximální hloubka vyjeté koleje 1,75 mm, což je porovnatelná hodnota se směsmi ACP32 +30 a ACP32 +50. [40]

6.9 Nízkoteplotní vlastnosti stanovené metodou TSRST

Zkouška nízkoteplotních vlastností TSRST byla provedena dle kapitoly 4.11. Celkem bylo odzkoušeno 6 vzorků, tři pro každou směs.

Rozměry zkušebních vzorků, které byli vyřezané a vybroušené z desek byly 50 x 50 x200 mm. Po vyřezání a vybroušení byly nalepeny na podstavce a umístěny do centrovacího rámu, kde byly po dobu nezbytnou pro vytvrnutí lepidla. Výsledky zkoušek jsou v grafech 7 až 11 a v tabulce 24.



Obrázek 35: Vzorek připravený v komoře na zkoušku TSRST

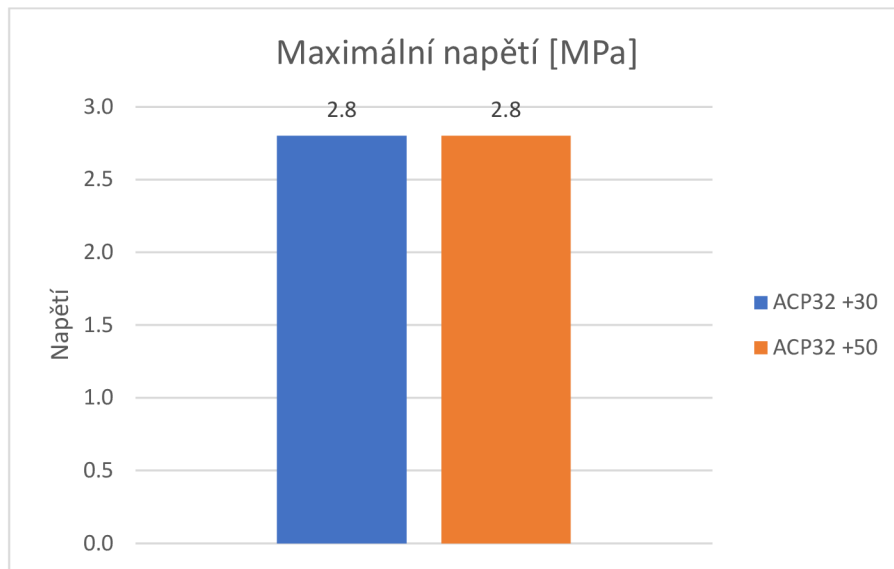


Obrázek 36: Tahová trhlina ve vzorku

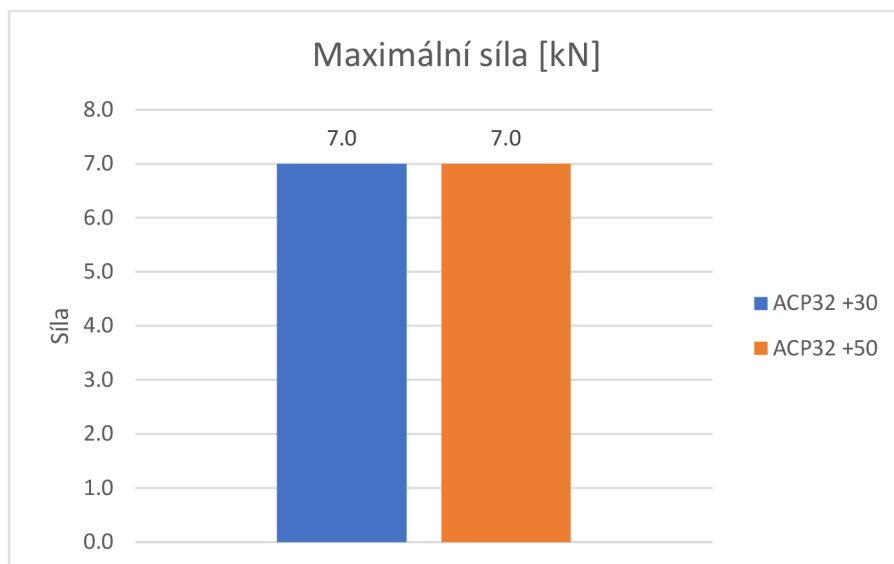


Obrázek 37: Lomová plocha porušeného vzorku

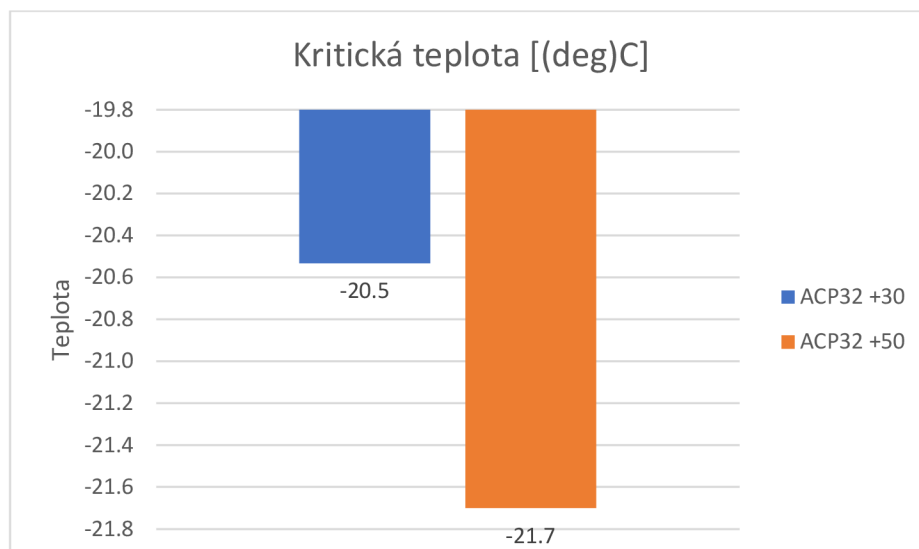
6.9.1 Výsledky TSRST



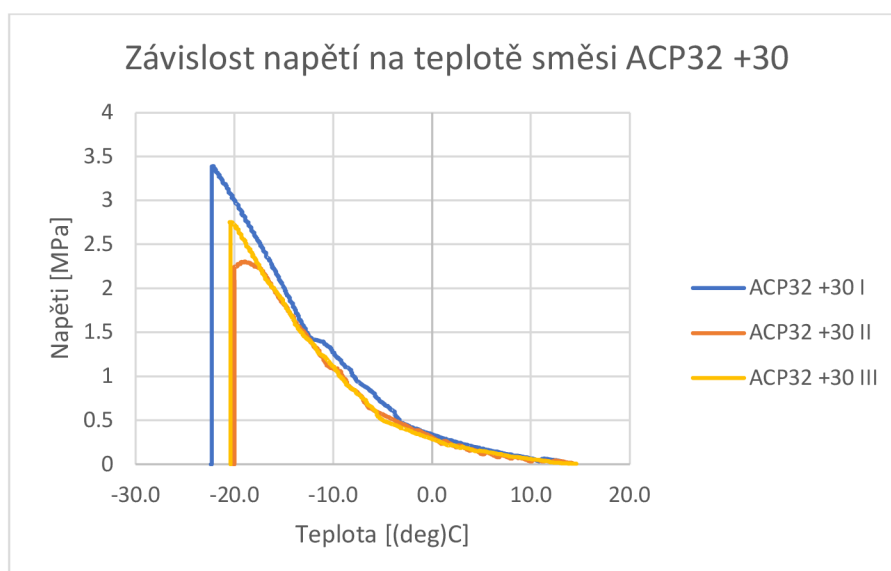
Graf 8: Srovnání maximálního napětí u zkoušky TSRST



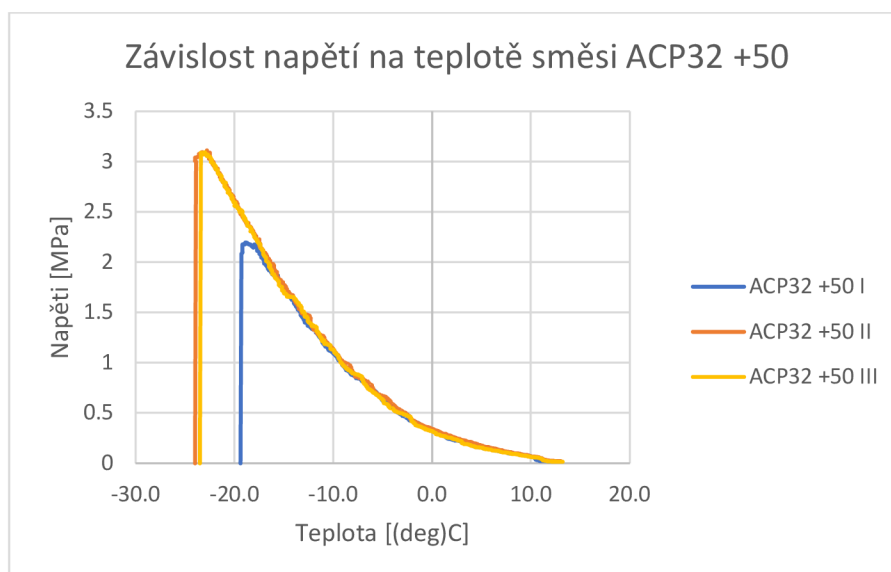
Graf 9: Srovnání maximální síly u zkoušky TSRST



Graf 10: Srovnání kritické teploty u zkoušky TSRST



Graf 11: Závislost napětí na teplotě směsi ACP32 +30



Graf 12: Závislost napětí na teplotě směsi ACP32 +50

Směs	Maximální napětí [MPa]	Maximální síla [kN]	Kritická teplota [°C]
ACP32 +30	3.4	8.5	-22.2
	2.3	5.8	-19.0
	2.8	6.9	-20.4
Průměr	2.8	7.0	-20.5
ACP32 +50	3.1	7.7	-23.4
	2.2	5.5	-18.9
	3.1	7.8	-22.8
Průměr	2.8	7.0	-21.7

Tabulka 27: Výsledky zkoušky TSRST

Výsledky odolnosti vůči kryogennímu napětí obou směsí jsou hodně podobné a vykazují dobrou odolnost vůči působení mrazu. Navzdory většímu obsahu tvrdšího asfaltového pojiva z R-materiálu ve směsi ACP32 +50 vykazuje mírně lepší odolnost vůči účinkům mrazu a v průměru se zkušební vzorek porušil až při teplotě -21,7 °C.

Je důležité poznamenat, že ne všechny zkušební vzorky se chovaly při zkoušce TSRST ideálně. Ve dvou případech (jeden vzorek z každé směsi) docházelo během zatěžování k mírnému kroucení, což mělo vliv na konečný výsledek. Tento jev se projevil i ve tvaru křivky, kdy na příklad u vzorku ACP32 +30 II je vidět zaoblení těsně před porušením.

V souběžně připravované diplomové práci, kde se posuzovala také směs ACP32 s nemodifikovaným pojivem, ale bez R-materiálu byly při směsi s 4,2 % asfaltového pojiva dosaženy průměrné hodnoty kryogenního napětí 2,89 Mpa, průměrné hodnoty teploty vzorku při porušení 21,45 °C a průměrná maximální hodnota síly při porušení vzorku 7,22 kN, což jsou hodnoty velmi blízké směsím ACP32 +30 a ACP32 +50. [40]

6.10 Tuhost

Zkouška tuhosti byla provedena podle popisu v kapitole 4.12. Z každé desky bylo vyrobeno 5 komolých klínů pro stanovení tuhosti dvoubodovou zkouškou ohybem. Pro směs ACP32 +30 bylo ozkoušeno všech 5 vzorku, zatím co pro směs ACP32 +50 byly ozkoušeny pouze 4 vzorky, protože jeden vzorek se výsledky výrazně odlišoval od ostatních, co mohlo být způsobeno špatnou geometrickou polohou vzorku na podložce.



Obrázek 38: Meření přesných rozměrů komolých klínů

Protože pílením a broušením vznikly ve vzorcích mírné rozdíly v rozměrech, každý vzorek prošel podrobným měřením na speciálním zařízení jak je patrné z obrázku 38.

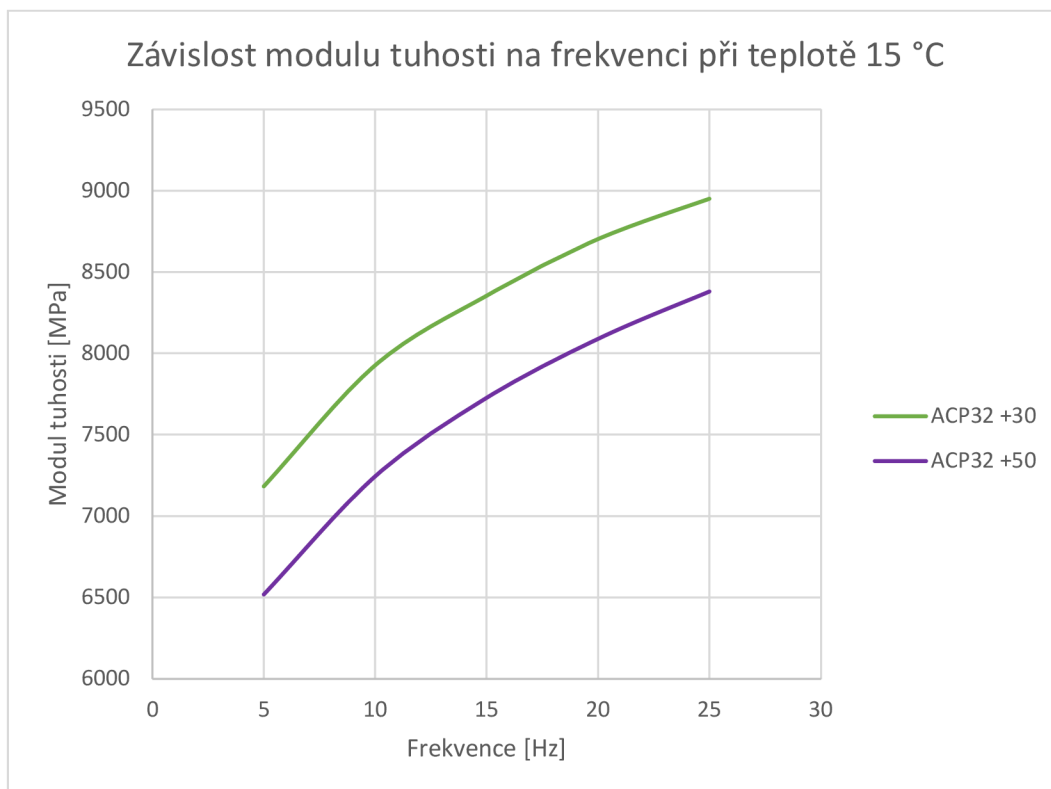
Pro zkoušku tuhosti byly zvoleny frekvence 5, 10, 15, 20 a 25 Hz při teplotě 15 °C.

6.10.1 Výsledky zkoušky tuhosti

V tabulce 25 jsou uvedeny hodnoty modulů tuhosti při 15 °C a při jednotlivých frekvencích. Na grafu 10 je vidět závislost frekvence na modulu tuhosti.

Směs	ACP32 +30	ACP32 +50
Frekvence [Hz]	Modul tuhosti [MPa]	Modul tuhosti [MPa]
5	7182.20	6518.00
10	7927.60	7245.25
15	8356.00	7727.25
20	8702.60	8090.75
25	8950.80	8380.25

Tabulka 28: Moduly tuhosti směsí ACP32 +30 a ACP32 +50 při jednotlivých frekvencích



Graf 13: Srovnání maximální síly u zkoušky TSRST

Z výsledků modulu tuhosti je patrné, že vzorky směsi ACP32 +30 dosahují vyšších hodnot. Příčina může být ve větším množství nového pojiva ve směsi ACP32 +30. Průběh nárůstů modulů tuhosti je téměř totožný. Doporučené hodnoty modulu tuhosti dle TP 170 Navrhování vozovek pozemních komunikací jsou pro podkladní vrstvy 5500 Mpa při 15 °C, což obě směsi splňují při všech frekvencích.

V souběžně připravované diplomové práci, kde se posuzovala také směs ACP32 s nemodifikovaným pojivem, ale bez R-materiálu byly při směsi s 4,2 % asfaltového pojiva dosaženy průměrné hodnoty tuhosti od 7290 Mpa při frekvenci 5 Hz do 9786 Mpa při frekvenci 25 Hz. Tyto hodnoty jsou hodně podobné výsledkům

zkoušky tuhosti pro směs ACP32 +30 a o něco lepší v porovnání s tuhostí směsi ACP32 +50. [40]

7 ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce byly prověřeny možnosti využití asfaltových směsí do podkladních vrstev při využití kameniva až do frakce 32 mm a zároveň s využitím významných podílů R-materiálu. Aktuálně platné české normy dovolují použití kameniva s největšími zrny do 22 mm do podkladních a ložních vrstev. I když normy povolují využití až 60 % R-materiálu do podkladních asfaltových směsí, v praxi se tak zatím neděje. Vzhledem k velikému podílu jemných zrn v R-materiálu se jeví jeho využití jako dobrá náhrada ve stavební sezóně hojně využívaných jemných frakcí, hlavně 0/4, 4/8 a 8/11 při zachování dobré kvality směsi. Pro účely této diplomové práce byly navrženy a zhotoveny dvě asfaltové směsi do podkladních vrstev s 30 % a 50 % podílem R-materiálu. Křivka zrnitosti se přibližuje křivce Fullerovy paraboly. Pro zkušební účely byly zhotoveny desky z obou směsí, z nichž byla vyřezána a vybroušena zkušební tělesa. Pro stanovení funkčních parametrů navrhovaných směsí byly vybrány tři zkoušky – zkouška pojíždění kolem, zkouška nízkoteplotních vlatností metodou TSRST a zkouška modulu tuhosti.

Při zkoušce pojíždění kolem vykazovaly obě směsi dobrou odolnost vůči deformacím. Směs ACP32 +50 odolávala mírně lépe účinkům od pojíždění kolem. Obě směsi také vyhověly limitním hodnotám pro směsi s maximální zrnitostí 22 mm pro parametry WTS_{AIR} a PRD_{AIR} . U zkoušky TSRST vykazovaly obě směsi téměř shodné hodnoty maximálního napětí a maximální síly. Jenom při maximální teplotě vzorku při porušení došlo k mírnému rozdílu ve prospěch směsi ACP32 +50. Naopak při výsledcích tuhosti dosahovali lepších výsledků směsi ACP32 +30, ale rovněž obě směsi dosahují dostatečných hodnot modulů tuhosti.

Porovnáním hodnot získaných při laboratorních zkouškách v rámci této diplomové práce s daty získanými z jiné diplomové práce, která byla připravována souběžně, a kde se také navrhovaly směsi ACP32 s nemodifikovaným pojivem, ale bez R-materialu je možné vyvodit závěr, že použití R-materiálu má žádný nebo jen minimální vliv na výsledné funkční parametry směsi.

Lze říci, že asfaltové směsi pro podkladní vrstvy s využitím kameniva až do 32 mm a s významným podílem R-materiálu jsou vhodné jako alternativa k existujícím směsím ACP22+. Důležitými aspekty jsou úspora materiálu, zejména

kameniva menších frakcí, a také enviromentální aspekt, kdy se využitím R-materiálu dosáhne nižších nároků na energetické zdroje, což má pozitivní vliv na ekologii a produkci skleníkových plynů.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FIALA, Pavel a GODANY, Josef. Studie dostupnosti kameniva pro plánované stavby dálnic a silnic I. třídy a železniční infrastruktury. [online]. 2022 [cit. 2024-01-09]. Dostupné z : <https://www.silnice-mosty.cz/2318-studie-dostupnosti-kameniva-pro-planovane-stavby-dalnic-a-silnic-i-tridy-a-zeleznicni-infrastruktury/>
- [2] HÝZL, Petr. PRAKTICKÉ APLIKACE V POZEMNÍCH KOMUNIKACÍCH. Brno, 2006. Studijní opory. Fakulta stavební VUT v Brně.
- [3] Asfalt. [online]. [cit. 2024-01-09]. Dostupné z : <https://cs.wikipedia.org/wiki/Asfalt>
- [4] Trinidad's Pitch Lake. [online]. [cit. 2024-01-09]. Dostupné z : <https://www.geologyin.com/2014/12/trinidads-pitch-lake.html>
- [5] BUDÍN, Jan. Zpracování ropy – 1. část – základní zpracování ropy. [online]. 12.5.2015, [online]. [cit. 2024-01-09]. Dostupné z : <https://oenergetice.cz/ropa/zpracovani-ropy-1-cast-zakladni-zpracovani-ropy>
- [6] Z čeho je asfalt a jak se vyrábí?. [online]. [cit. 2024-01-09]. Dostupné z : <https://www.moni.cz/aktuality/z-ceho-je-asfalt>
- [7] KAMENIVO. [online]. [cit. 2024-01-09]. Dostupné z : http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/kamenivo.html?fbclid=IwAR1DaEMyLXLIa3aYGMQS3U6mmp8wIWj_AvDm505W1Fv0Phfd_3c_n_iBIDYZdroj%208
- [8] Drcené kamenivo. [online]. [cit. 2024-01-09]. Dostupné z : <https://www.heidelbergmaterials.cz/cs/kamenivo/drcene-kamenivo>
- [9] ČSN EN 13108-8. Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 8: R-materiál. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [10] Použití inovativních asfaltových směsí s vyšším obsahem R-materiálu do konstrukcí netuhých vozovek. [online]. 02.6.2022, [cit. 2024-01-09]. Dostupné z : <https://silnice-zeleznice.cz/materialy-a-technologie/pouziti-inovativnich-asfaltovych-smesi-s-vyssim-obsahem-r-materialu-do-konstrukci-netuhych-vozovek-682>

- [11] HLÁVKA, Filip. Asfaltové směsi s vyšším podílem R-materiálu modifikované v míchacím procesu. Praha, 2021, Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Petr Mondschein, Ph.D
- [12] ČSN 73 6121. Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022.
- [13] Asphalt in Figures 2021. [online]. 2021, [cit. 2024-01-09]. Dostupné z : <https://eapa.org/asphalt-in-figures/>
- [14] KLIMEK, Matěj. Recyklace asfaltových směsí s vyšším množstvím R-materiálu. Brno, 2021, Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Michal Varaus
- [15] VARAUS, Michal. Asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu. Prezentace Školení o evropských a českých normách pro stavbu vozovek. 2015.
- [16] HÝZL, Petr. ČSN 73 6141 Požadavky na použití R-materiálu do asfaltových směsí. Prezentace STEPS 11 – Recyklace vozovek.
- [17] KOVAČOVÁ, Aneta. Asfaltové směsi s pojivem CRmB a vyšším podílem R-materiálu. Praha, 2021, Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Petr Mondschein, Ph.D
- [18] TP 208. Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena. Ministerstvo dopravy – OSI, 2009.
- [19] TUHÁČEK, Martin. Recyklace asfaltových směsí- variabilita vstupních parametrů R-materiálu. Brno, 2014, Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Michal Varaus
- [20] TP 209. Recyklace asfaltových vrstev netuhých vozovek na místě za horka. Ministerstvo dopravy – OSI, 2009.
- [21] RIMEL, Jindřich. Hrubozrnné asfaltové směsi. Brno, 2023. 83 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

- [22] Tarmacadam, Bitmac and Asphalt – Construction Layers. [online]. [cit. 2024-01-09]. Dostupné z : <https://www.pavingexpert.com/tarmac03>
- [23] Series 900 Road pavements – bituminous bound materials. Manual of contract documents for highway works volume 1 specification for highway works 2021.
- [24] MALINOVÁ, Veronika. Posouzení stavby nové obalovny a ekonomika dopravy asfaltových směsí. Praha, 2019, Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce doc. Ing. Dana Měšťanová, CSc.
- [25] MUCHA, Bohumír. Asfaltové směsi s použitím vyššího množství R-materiálu. Brno, 2013, Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Michal Varaus
- [26] BAMBULOVÁ, Lucie. Protismykové vlastnosti asfaltových vrstev s R-materiálem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Ústav pozemních komunikací, 2018. 84 s., 23 s. příl. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [27] ČSN EN 12697-3. Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [28] ČSN EN 1426. Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [29] ČSN EN 1427. Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [30] ČSN EN 933-1. Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [31] ČSN EN 12697-6. Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.

- [32] ČSN EN 12697-5. Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [33] ČSN EN 12697-8. Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [34] ČSN EN 12697-22. Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 22: Zkouška pojíždění kolem. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [35] ČSN EN 12697-46. Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí zkoušky tahem. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [36] ČSN EN 12697-26. Asfaltové směsi – zkušební metody – Část 26: Tuhost. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [37] ČSN EN 12697-1. Asfaltové směsi – zkušební metody – Část 1: Obsah rozpustného pojiva. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [38] Wir recyceln seit Jahren unsere Plastikflaschen, warum nicht auch unsere Straßen?. [online]. [cit. 2024-01-09]. Dostupné z : <https://work-on-progress.strabag.com/de/material-kreislaufwirtschaft/asphaltrecycling>
- [39] TP 170. Navrhování vozovek pozemních komunikací. Ministerstvo dopravy – OSJ, 2010.
- [40] ŠKORÍK, Michal. Hrubozrnné asfaltové betony. Brno, 2024. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Asfaltové jezero (Pitch lake) na ostrově v Trinidadu [4].....	12
Obrázek 2: Ropná rafinerie [5].....	12
Obrázek 3: Vlastnosti asfaltu v závislosti na teplotě [11].....	14
Obrázek 4: Běžně využívané frakce ve stavebnictví [8].....	12
Obrázek 5: Zobrazení konstrukčních vrstev vozovky běžně využívaných ve Spojeném království [22]	18
Obrázek 6: Skladování R-materiálu v zastřešené skládce [10]	20
Obrázek 7: Filosofie koloběhu R-materiálu v Německu dle firmy Strabag [38]	21
Obrázek 8: Schéma kontinuální obalovny [24].....	23
Obrázek 9: Schéma šaržové obalovny [24]	23
Obrázek 10: Schéma šaržové obalovny s možností přidání R-materiálu[14].....	25
Obrázek 11: Skládka R-materiálu s tříděním a zastřešením [16]	25
Obrázek 12: Obalovna s paralelním bubnem [15]	26
Obrázek 13: Schéma kontinuální obalovny – dávkování po směru horkého vzduchu [17]	27
Obrázek 14: Kontinuální obalovna [17].....	27
Obrázek 15: Šaržová obalovna s dvouplášťovým bubnem [14].....	28
Obrázek 16: Mobilní míchací centrum [19].....	29
Obrázek 17: Nádoba s přísadou STORFLUX.....	31
Obrázek 18: Zhomogenizované kamenivo frakce 11/16	33
Obrázek 19: Rovnoměrné rozdělení materiálu do nádob na skladování.....	34
Obrázek 20: Sestava sít s automatickou vibrací	43
Obrázek 21: Zkušební vzorek před a po praní.....	44
Obrázek 22: Pyknometr se zkušebním vzorkem	48
Obrázek 23: Malé zkušební zařízení pro zkoušku pojíždění kolem	50

Obrázek 24: Schéma zkušebního přístroje pro zkoušku TSRST [35].....	53
Obrázek 25: Zkušební vzorky v centrovacím rámu	54
Obrázek 26: Výroba zkušebních vzorků řezáním	55
Obrázek 27: Zkušební těleso pro stanovení tuhosti.....	56
Obrázek 28: Zkušební těleso pro stanovení tuhosti asfaltové směsi [36].....	57
Obrázek 29: Schéma zkušebního zařízení pro určení modulu tuhosti asfaltové směsi [36].....	57
Obrázek 30: Zkušební vzorek tzv. trapezoid neboli komolý klín ve zkušebním přístroji.....	58
Obrázek 31: Hutnící pěst na hutnění Marshallových těles	67
Obrázek 32: Vyrobené Marshallovo těleso	68
Obrázek 33: Míchačka pro výrobu asfaltových směsí	72
Obrázek 34: Automatický segmentový zhutňovač desek	72
Obrázek 35: Vzorek připravený v komoře na zkoušku TSRST	78
Obrázek 36: Tahová trhлина ve vzorku	79
Obrázek 37: Lomová plocha porušeného vzorku.....	79
Obrázek 38: Měření přesných rozměrů komolých klínů.....	83

10 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Porovnání zpracování R-materiálu s jinými státy EU a USA[13].....	22
Tabulka 2: Rozměry vzorků pro zkoušku tuhosti [36].....	56
Tabulka 3: Návrhové moduly pružnosti asfaltových směsí při 15 °C [39]	59
Tabulka 4: Výsledky extrakce pojiva	61
Tabulka 5: Výsledky zkoušky penetrace jehlou.....	61
Tabulka 6: Výsledky zkoušky bodu měknutí	61
Tabulka 7: Výsledky síťového rozboru R-materiálu a extrahovaného kameniva.....	62
Tabulka 8: Výsledky síťového rozboru stavebního kameniva.....	62
Tabulka 9: Návrh směsi ACP32 +30	64
Tabulka 10: Návrh směsi ACP 32 s 50 %-ním podílem R-materiálu	65
Tabulka 11: Výpočet navážky pro Marshallová tělesa ACP32 +30	66
Tabulka 12: Výpočet navážky pro Marshallová tělesa ACP32 +50	67
Tabulka 13: Objemové hmotnosti Marshallových těles ACP32 +30.....	69
Tabulka 14: Objemové hmotnosti Marshallových těles ACP32 +50.....	69
Tabulka 15: Maximální objemová hmotnost směsi ACP32 +30	69
Tabulka 16: Maximální objemová hmotnost směsi ACP32 +50	69
Tabulka 17: Mezerovitost směsi ACP32 +30	70
Tabulka 18: Mezerovitost směsi ACP32 +50	70
Tabulka 19: Výpočet navážky pro desku ACP32 +30	71
Tabulka 20: Výpočet navážky pro desku ACP32 +50	71
Tabulka 21: Objemové hmotnosti desek směsi ACP32 +30	73
Tabulka 22: Objemové hmotnosti desek směsi ACP32 +50	73
Tabulka 23: Mezerovitost a míra zhutnění desek směsi ACP32 +30.....	73
Tabulka 24: Mezerovitost a míra zhutnění desek směsi ACP32 +50.....	73
Tabulka 25: Hloubka vyjeté koleje	75

Tabulka 26: Výsledné parametry WTS_{AIR} a PRD_{AIR}	75
Tabulka 27: Výsledky zkoušky TSRST	82
Tabulka 28: Moduly tuhosti směsí ACP32 +30 a ACP32 +50 při jednotlivých frekvencích.....	84

11 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Provozované kamenolomy v ČR a jejich odhadovaná životnost.....	10
Graf 2: Křivka zrnitosti R-materiálu před a po extrakci a Fullerova parabola	62
Graf 3: Křivka zrnitosti navržené směsi ACP32 +30 a Fullerova parabola	64
Graf 4: Křivka zrnitosti navržené směsi ACP32 +50 a Fullerova parabola	64
Graf 5: Vliv počtu pojezdů na hloubku vyjeté koleje	74
Graf 6: Srovnání parametru WTS_{AIR}	76
Graf 7: Srovnání parametru PRD_{AIR}	76
Graf 8: Srovnání maximálního napětí u zkoušky TSRST.....	80
Graf 9: Srovnání maximální síly u zkoušky TSRST	80
Graf 10: Srovnání kritické teploty u zkoušky TSRST	81
Graf 11: Závislost napětí na teplotě směsi ACP32 +30.....	81
Graf 12: Závislost napětí na teplotě směsi ACP32 +50.....	81
Graf 13: Srovnání maximální síly u zkoušky TSRST	84