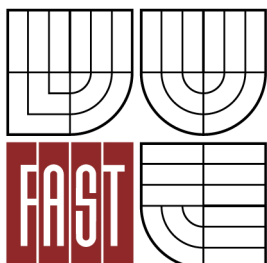




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

POUŽITÍ SPECIÁLNÍCH POJIV PŘI RECYKLACI ASFALTOVÝCH SMĚSÍ NA OBALOVNĚ

USE OF SPECIAL BINDERS FOR RECYCLING OF ASPHALT MIXTURES AT MIXING
PLANTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. PAVEL PĚCH

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Dr. Ing. MICHAL VARAUS

BRNO 2014

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou použití speciálních asfaltových pojiv při výrobě asfaltových směsí na obalovně s obsahem recyklovaného materiálu. Aby bylo možné porovnat vlastnosti a chování speciálního pojiva ve vozovce, je třeba navrhnout jednu asfaltovou směs s tímto pojivem a druhou referenční směs s pojivem používaným do klasických asfaltových směsí bez obsahu R-materiálu. Zjištění vlastností asfaltových směsí s rozdílnými pojivy je provedeno pomocí vybraných funkčních zkoušek asfaltových směsí. Závěrem práce je vyhodnocení a vzájemné porovnání výsledků.

Klíčová slova

Asfaltové směsi, asfaltová pojiva, zkušební vzorky, modul tuhosti, únavové charakteristiky, odolnost proti tvorbě trvalých deformací, nízkoteplotní vlastnosti, funkční zkoušky, výroba asfaltových směsí, návrh asfaltových směsí

Abstract

The thesis deals with the matter of usage of special asphalt binders for production of asphalt mixtures containing recycled materials in asphalt plant. For comparison analysis of characteristics of special binder used in roads is necessary to compose different mixtures of asphalt – one with binder containing R-materials, and another benchmark mixture with binder used in common mixtures without recycled materials. Investigation of features of mixtures with different binders is carried out by selected performance tests of asphalt mixtures. Evaluation and comparison of the results is described in the final section of the thesis.

Key words

Asphalt mixtures, binders, test samples, stiffness module, fatigue characteristics, resistance against creation of permanent deformations, low-temperature properties, performance tests, production of asphalt mixtures, recommendations for asphalt mixtures

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Pavel Pěch *Použití speciálních pojiv při recyklaci asfaltových směsí na obalovně.* Brno, 2013. 64 s., 7 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Michal Varaus.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 20.12.2013

.....

podpis autora

Bc. Pavel Pěch

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

Prohlášení:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 20.12.2013

.....
podpis autora

Bc. Pavel Pěch

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Dr. Ing. Michalu Varausovi za udělení cenných rad a pomoc při zpracování diplomové práce, dále Pavlu Strakovi, Matěji Šafránkovi a Ing. Ondřeji Daškovi za pomoc při práci v silniční laboratoři a také rodičům a svým blízkým za podporu při studiu.

Obsah

1	Úvod.....	10
1.1	Cíl diplomové práce.....	10
1.2	Požadavky na konstrukční vrstvy vozovky.....	10
2	Použitá asfaltová směs.....	17
2.1	Asfaltový beton.....	17
3	Návrh asfaltových směsí.....	20
4	Funkční zkoušky.....	28
4.1	Zkouška odolnosti proti tvorbě trvalých deformací (zkouška poježdění kolem).....	28
4.2	Zkouška stanovení modulu tuhosti.....	30
4.2.1	Způsoby zkoušení.....	31
4.2.2	Zkouška ohybem na vetknutém komolém klínu 2PB-TR.....	31
4.3	Zkouška stanovení únavových charakteristik.....	34
4.3.1	Zkouška ohybem na vetknutém komolém klínu 2PB-TR.....	35
4.4	Zkouška stanovení nízkoteplotních vlastností.....	35
4.4.1	Zkouška nízkoteplotních vlastností rovnoměrným řízeným poklesem teploty (TSRST).....	36
5	Experimentální část.....	39
5.1	Zkoušky provedené na asfaltových pojivech.....	39
5.2	Zkoušky provedené na kamenivu.....	41
5.3	Zkoušky provedené na R-materiálu.....	43
5.4	Výroba zkušebních těles.....	47
5.5	Výsledky zkoušek asfaltových směsí.....	57
5.5.1	Odolnost proti tvorbě trvalých deformací.....	57
5.5.2	Stanovení modulu tuhosti.....	58
5.5.3	Stanovení únavových charakteristik.....	60
5.5.4	Stanovení nízkoteplotních vlastností.....	63

6	Závěr	64
7	Seznam použité literatury	65
8	Seznam obrázků	67
9	Seznam tabulek.....	69
10	Seznam grafů	71

1 Úvod

1.1 Cíl diplomové práce

Cílem práce je provedení návrhu dvou asfaltových směsí pro ložné vrstvy ACL 22S s daným procentuálním zastoupením R – materiálu. U první směsi bude jako pojivo použit modifikovaný asfalt PmB 45/80 – 65 a pro druhou směs modifikovaný asfalt PmB 45/80 – 65 RC, který byl vyroben jako speciální asfaltové pojivo do asfaltových směsí s obsahem R – materiálu a tyto směsi by měly vykazovat lepší vlastnosti.

Vyrobí zkušební vzorky z obou směsí a provede na nich funkční zkoušky:

- Odolnost proti tvorbě trvalých deformací (ČSN EN 12 697 – 22)
- Modul tuhosti (ČSN EN 12 697 – 26)
- Únavové charakteristiky (ČSN EN 12 697 – 24)
- Nízkoteplotní vlastnosti (ČSN EN 12 697 – 46)

[15]

Pomocí těchto zkoušek prokázat, že s použitím speciálního modifikovaného asfaltu PmB 45/80 – 65 RC, bude mít asfaltová směs lepší vlastnosti oproti směsi s modifikovaným asfaltem PmB 45/80 – 65, díky kterým by tato směs měla být odolnější v běžném provozu.

1.2 Požadavky na konstrukční vrstvy vozovky¹

Obrusná vrstva

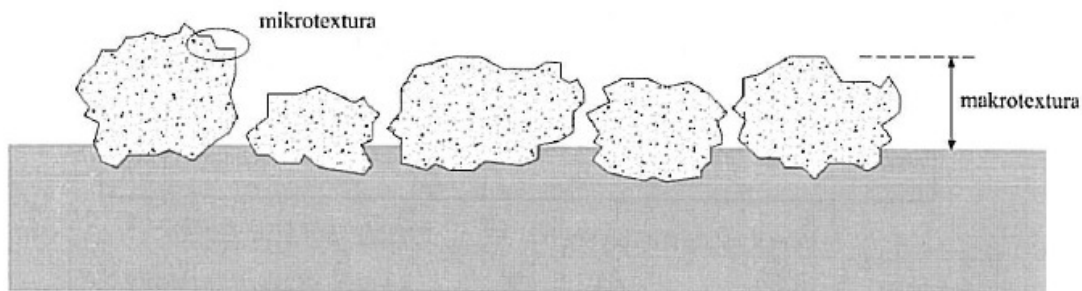
- *Protismykové vlastnosti (makrotextura, mikrotextura)*

Mezi povrchem vozovky a pohybující se pneumatikou vzniká tření, které zajišťuje jejich vzájemné spolupůsobení. Protismykovými vlastnostmi rozumíme schopnost povrchu vozovky zatíženého dopravou zajistit toto spolupůsobení, které posuzujeme podle zjištění součinitele tření.

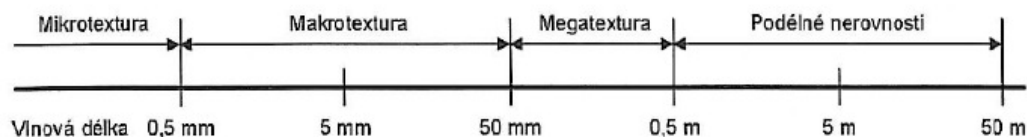
Makrotexturou rozumíme odchylku povrchu vozovky od filtrovaného skutečného rovného povrchu ve vlnovém rozsahu od 0,5 mm do 50 mm.

¹ Převzato z bakalářské práce [26]

Mikrotextura je odchylka povrchu vozovky od filtrovaného skutečného rovného povrchu ve vlnovém rozsahu do 0,5 mm. Je dána velikostí a tvarem jednotlivých zrn kameniva.



Obrázek 1 – Specifikace makrotextury a mikrotextury [1]



Obrázek 2 – Názvosloví z hlediska délky vlny [2]

Ztráta makrotextury povrchu vozovky – nastane, když se povrch vozovky uzavře do hladké plochy bez vystouplých zrn kameniva

Ztráta mikrotextury povrchu vozovky – dojde k vyhlazení zrn kameniva na povrchu vozovky pneumatikami

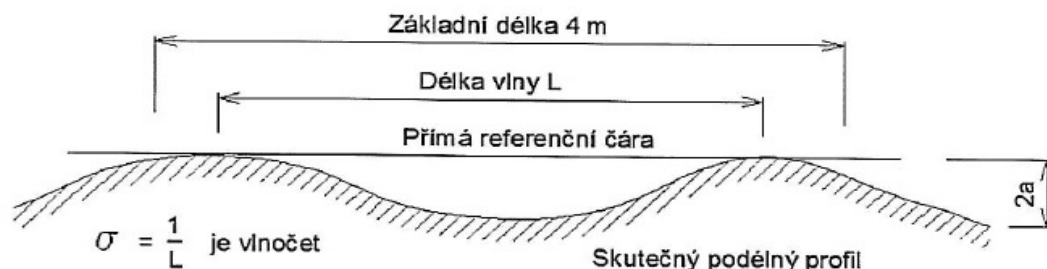
[1,2,3]

- **Rovnost povrchu (příčná, podélná)**

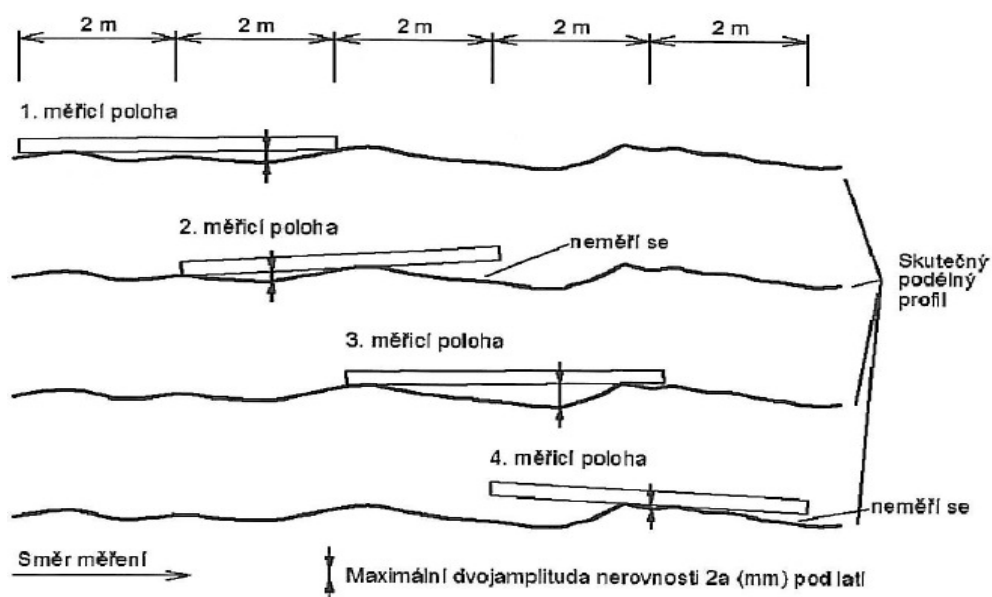
Podélná nerovnost povrchu vozovky je odchylka skutečného podélného profilu od přímé referenční čáry ve směru jízdy dopravních prostředků. Příčná nerovnost povrchu vozovky je odchylka skutečného příčného profilu od přímé referenční čáry v kolmém směru na směr jízdy dopravních prostředků.

Dle ČSN 73 6175 se nejčastěji kontroluje nerovnost povrchu vozovky latí délky 4 metry pro nerovnost podélnou a latí délky 2 metry pro nerovnost příčnou. Podstatou zkoušky je zjištění maximálních dvojamplitud nerovností pod latí dle obrázku 3.

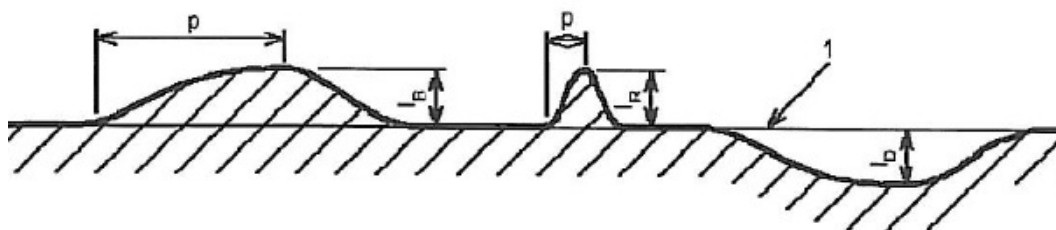
[2]



Obrázek 3 – Podélná nerovnost [2]



Obrázek 4 – Postup měření podélné nerovnosti povrchu vozovky latí [2]



Obrázek 5 – Příčný profil vozovky vykazující výšku hřbetu I_R , hrbolu I_B a poklesu I_D [2]

Legenda: 1 Horizontální referenční čára

p Vzdálenost vrcholu hřbetu nebo hrbolu od jeho počátku ve směru pojezdu

▪ **Odolnost proti tvorbě trvalých deformací**

Je to vlastnost asfaltových směsí vzdorovat tvorbě trvalých deformací (vyjždění kolejí). Náchylnost na tvorbu trvalých deformací asfaltových směsí řeší norma ČSN EN 12 697 – 22 Zkouška pojíždění kolem, která popisuje zkušební metody pro zjištění trvalých deformací asfaltových směsí. Používají se

malá, velká a extra velká zkušební zařízení a zkouší se tělesa odebraná z vozovky nebo připravená v laboratoři. [4]

▪ ***Odolnost proti tvorbě trhlin – relaxace (viskozita pojiva)***

Relaxace asfaltového pojiva znamená odbourání napětí a souvisí s viskoelastickým chováním asfaltového pojiva, které je schopno odbourávat vzniklá napětí viskózním přetvářením.

Trhliny ve vrstvách vozovek vznikají z různých příčin, podle kterých rozdělujeme trhliny na:

- **mrazové** – vznikají při dlouhotrvajících extrémních mrazech, při kterých asfaltové pojivo tuhne a ztrácí viskoelastické vlastnosti.

- **reflexní** – vznikají u cementem zpevněných podkladních vrstev, kde při tvrdnutí dochází k smršťování vyvolávající tahová napětí vyšší než pevnost materiálu vrstvy.

- **mozaikové** – vznikají při špatném spojení vrstev vozovky, které poté přenáší mnohem větší zatížení a v oslabených místech dochází k poruše.

- **v konstrukci vozovky** – vznikají při opakovaném zatížení v místě nejvyššího namáhání na spodním líci vrstev. V důsledku poddimenzování nebo snížení únosnosti dochází k narušení spojení mezi zrny a vznik trhliny.

- **jiné** – patří mezi ně trhliny obrusné vrstvy ve tvaru srpu, smykové trhliny lemující poruchy zemního tělesa a podélné trhliny mrazovým zdvihem středu vozovky. [3]

▪ ***Trvanlivost (odolnost proti stárnutí, opotřebení povrchu)***

Trvanlivost asfaltových směsí je dána dlouhodobou odolností směsi proti účinkům klimatických vlivů, jako je voda, mráz, sluneční záření. Velký vliv na odolnost proti stárnutí má mezerovitost a vliv srážkové vody. Při vysoké mezerovitosti ($V_m > 8\%$ - propustná směs) proniká do vrstvy voda a nečistoty. Opotřebení povrchu je urychlováno dopravním zatížením a nejde mu nijak zabránit.[11]

▪ ***Nepropustnost***

Je dána mezerovitostí asfaltové směsi. Čím je mezerovitost větší, tím je také větší propustnost. Nepropustnost závisí na mezerovitosti V_m [%] dle tabulky.

Vm	propustnost
< 3%	Nepropustná
3 % - 5 %	Prakticky vodotěsná
5 % - 8 %	Mírně propustná
> 8 %	Propustná

Tabulka 1 – Propustnost asfaltových směsí v závislosti na mezerovitosti [11]

- **Útlum hluku**

Utlumit hladinu hluku od dopravy je možné docílit několika způsoby a to výstavbou protihlukových stěn a tunelů, snížením rychlosti vozidel, používáním pneumatik s nízkou hlučností a výstavbou vozovek s nízkou hlučností, mezi které patří asfaltový koberec drenážní a asfaltový koberec mastixový (směsi s přerušenou čarou zrnitosti) nebo asfaltové směsi s přidáním mletou gumou případně spojení obou, které svojí strukturou dokážou snížit hluk o několik dB. [5]

- **Světlost povrchu**

Světlost povrchu vozovky působí příznivým dojmem na řidiče. Proto je pro řidiče příjemnější jízda po cementobetonovém krytu než po asfaltových směsích. Na povrch asfaltové směsi však může být proveden světlejší nástřík. Světlý povrch vozovky je také dobrý pro lepší viditelnost.

Ložní vrstva

- **Společně s obrusnou vrstvou – tuhý kryt**

Ložní vrstva společně s obrusnou vrstvou tvoří kryt vozovky, který přenáší zatížení od vozidel na podkladní vrstvy přes pláň do podloží. Tuhé kryty jsou cementobetonové kryty z vyztuženého nebo nevyztuženého betonu, které se pokládají v jedné nebo dvou vrstvách. Dvouvrstvý kryt je betonovaný ve dvou fázích se spodní konstrukční a horní obrusnou vrstvou, která se pokládá na čerstvý beton spodní vrstvy. [6]

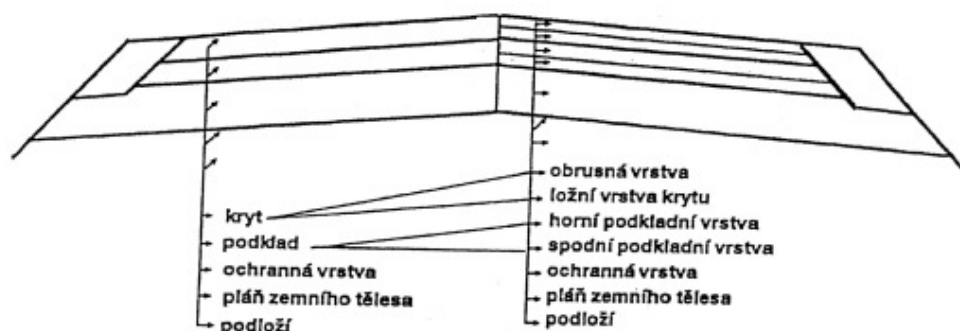
- **Odolnost proti tvorbě trvalých deformací**

Jedná se o schopnost asfaltové směsi odolávat účinkům vnějších sil při vysoké teplotě a statickém nebo pomalém zatížení. Pro zlepšení odolnosti se používá drcené kamenivo a tvrdé nemodifikované pojivo nebo modifikované pojivo čímž docílíme vysoké pevnosti ve smyku. [11]

Podkladní vrstvy

- **Obecně roznášení účinků zatížení od dopravy**

Podkladní vrstvy roznáší namáhání od dopravního zatížení z krytu vozovky na podloží tak, aby nedocházelo k jeho nadměrnému zatěžování, deformacím a deformacím vlastní podkladní vrstvy. Můžeme je používat jako nestmelené, protože zatížení od dopravy už je z části rozneseno vrstvami krytu. Spodní nestmelené vrstvy vyrovnávají rozdílnou únosnost podloží a musí splňovat požadavky na intenzitu mrazu a vodní režim v podloží vozovky. Horní podkladní vrstvy se navrhují podle dopravního zatížení. Pro vyšší zatížení použijeme vyšší tloušťku a kvalitnější materiál. [8]



Obrázek 6 – Rozdělení vrstev vozovky [7]

- **Stmelené asfaltem → odolnost proti únavě**

Podkladní vrstvy stmelené asfaltem mohou být navrženy z asfaltového betonu určeného pro podkladní vrstvy nebo může být použit penetrační makadam pro I. třídu dopravního zatížení. Odolnost proti únavě se zjišťuje únavovou zkouškou, která je důležitá pro správné dimenzování vozovek.

- **Stmelené cementem → zamezení tvorbě reflexních trhlin**

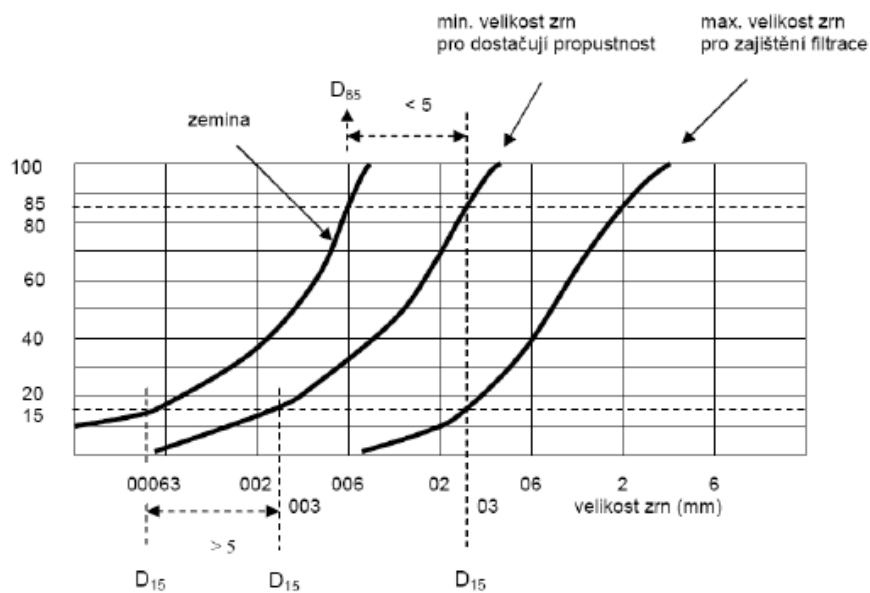
Stmelené podkladní vrstvy se používají tam, kde není možnost použít dostatečně kvalitní místní kamenivo nebo je to ekonomicky výhodnější, než dovoz jiného kvalitního materiálu. Stmelené vrstvy mají relativně vyšší modul pružnosti ale nižší pevnost. Jsou tedy křehké a dochází k porušení vlivem velkých napětí, která vznikají už při malých deformacích. Vznikají zde pravidelné reflexní trhliny způsobené vlivem teplotních změn a smršťováním vrstvy. Čím je vyšší pevnost vrstvy, tím se riziko reflexních trhlin zvyšuje. Pro snížení rizika vzniku reflexních trhlin můžeme podpořit vznik mikrotrhlin pomocí pojezdů vibračního válce nebo vytvářením spár či vrypů v čerstvě položené vrstvě. Případně můžeme zvýšit tloušťku asfaltových vrstev. [3, 9]

▪ *Nestmelené* → *splnění filtračních kritérií*

1. Kriterium filtrace – nutnost zamezit pronikání nestmelené vrstvy do podloží. Pro dodržení filtračního kritéria musí být splněna podmínka d_{15} nestmelené vrstvy/ d_{85} podloží ≤ 5 . Pokud podmínka neplatí, vkládá se mezi vrstvy separační geotextilie.

2. Kriterium propustnosti – nutno dodržet podmínku d_{15} nestmelené vrstvy/ d_{15} podloží ≥ 5 .

d_{15} – velikost zrna, které odpovídá propadu 15 % [7]



Obrázek 7 – Kriterium filtrace a propustnosti [7]

2 Použitá asfaltová směs

2.1 Asfaltový beton

Jedná se o nejpoužívanější a nejrozšířenější druh asfaltové směsi. Dříve se asfaltový beton (AB), který se používal pro obrusné a ložní vrstvy, používalo též obalované kamenivo (OK) pro ložní a podkladní vrstvy. Oba typy směsí měly podobnou skladbu zejména s ohledem na plynulé vedení čáry zrnitosti. V dnešní době se používá jednotný název Asfaltový beton s označením (AC) z anglického Asphalt Concrete. Asfaltový beton se používá ve všech vrstvách krytu vozovky, tedy obrusných, ložních, podkladních případně vyrovnávacích. Tato směs se vyznačuje rovnoměrným zastoupením zrn kameniva různé velikosti. Označování různých druhů směsí se provádí podle několika kritérií:

Označení asfaltového betonu podle použití v konstrukčních vrstvách vozovky

- ACO – asfaltový beton pro obrusné vrstvy
- ACL – asfaltový beton pro ložní vrstvy
- ACP – asfaltový beton pro podkladní vrstvy

Označení podle nejhrubší použité frakce kameniva

- AC D – D je velikost oka horního síta nejhrubší použité frakce kameniva pro daný druh asfaltové směsi

Označení asfaltového betonu podle kvalitativních požadavků

- S – směsi se zvýšenou odolností proti tvorbě trvalých deformací, nahrazující směs podle dřívějšího předpisu TP 109, tyto směsi jsou hutněny při laboratorním návrhu 2x75 údery Marshallova pěchu při použití do obrusných a ložních vrstev konstrukce vozovky a 2x50 údery pro ostatní obrusné a ložní vrstvy pro nižší dopravní zatížení a při použití do podkladních vrstev.
- + - směsi nahrazující kvalitativní třídu směsí I dle ČSN 73 6121, směsi jsou hutněny 2x50 údery Marshallova pěchu
- Bez označení – směs nahrazující kvalitativní třídu směsí II a III dle ČSN 73 6121, směsi jsou hutněny 2x50 údery Marshallova pěchu
- CH – směsi pro nemotoristické komunikace a chodníkové úpravy (označení koresponduje s TP 170 – Navrhování vozovek pozemních komunikací, směsi jsou hutněny 2x50 údery Marshallova pěchu

Symbol je doplněn za označením D – velikosti oka horního síta

Označení asfaltového betonu se doplňuje

- o druh použitého pojiva – např. modifikovaný asfalt PMB 10/45-60

v technické dokumentaci uvedením tloušťky vrstvy v milimetrech a označením odpovídající normy. [10, 12]²

Označení asfaltového betonu			
obrusné vrstvy		ložní vrstvy	
Nové	Staré (ČSN 73 6121)	nové	Staré (ČSN 73 6121)
ACO-8	ABJ II	ACL-16S	ABH I (0-16) – TP 109
ACO-8CH	ABJ II, III	ACL-16+ ACL-16	ABH I ABH II, III, OKS I
ACO-11S	ABS I (0-11) – TP 109	ACL-22S	ABVH I (0-22) – TP 109
ACO-11+	ABS I	ACL-22+	ABVH I
ACO-11	ABS II, III	ACL-22	ABVH II, III, OKH I
ACO-16S	ABH I (0-16) – TP 109	podkladní vrstvy	
ACO-16+	ABH I	ACP-16S	-
ACO-16	ABH II, III	ACP-16+	OKS I, II
		ACP-22S	OKH I (0-22) – TP 109
		ACP-22+	OKH I, II

Tabulka 2 – Označení asfaltového betonu dle normy ČSN EN 13 108 – 1 [10]

Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi

Obrusné vrstvy		Ložní vrstvy		Podkladní vrstvy	
Druh směsi	R-materiál (%)	Druh směsi	R-materiál (%)	Druh směsi	R-materiál (%)
ACO 8	25	ACL 16 S	30/15 ¹⁾²⁾	ACP 16 S	50 ¹⁾
ACO 8 CH	25	ACL 16 +	30 ¹⁾	ACP 16 +	60
ACO 11 S	-	ACL 16	40	ACP 22 S	50 ¹⁾
ACO 11 +	-	ACL 22 S	30/15 ¹⁾²⁾	ACP 22 +	60
ACO 11	25	ACL 22 +	30 ¹⁾		
ACO 16 S	-	ACL 22	40		
ACO 16 +	-				
ACO 16	25				

Tabulka 3 – Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu dle normy ČSN EN 13 10 – 1 [10]

² Převzato z bakalářské práce [26]

Poznámka: Při výrobě asfaltových směsí z nemodifikovaných asfaltů je možné použít R-materiál v množství do 30% a při použití modifikovaných asfaltů do 15%. Avšak na základě národních zkušeností je možné použít i jiné množství než uvádí tabulka. [10]

Požadavky na asfaltové směsi ložných vrstev

Ložní vrstvy						
Typ	S		+		bez označení	
Označení směsi ACL	16 S, 22 S		16 +, 22 +		16, 22	
Počet úderů Marshallova pěchu	2 x 75		2 x 50		2 x 50	
Všeobecné požadavky						
Zrnitost / síto (mm) ¹⁾	ACL 16 S	ACL 22 S	ACL 16 +	ACL 22 +	ACL 16	ACL 22
31,5	–	100	–	100	viz ACL 16+	viz ACL 22+
22,4	100	90-100	100	90-100		
16	90-100	72-84	90-100	70-95		
11,2	–	–	–	–		
8	52-72	48-62	52-80	46-72		
4	34-54	–	31-61	–		
2	24-40	24-36	20-45	18-43		
0,125	5-13	4-12	4-16	4-15		
0,063	4-10	3-9	3-10	3-9		
Minimální mezerovitost V_{\min} (%) ²⁾	4,0 (3,0)					
Maximální mezerovitost V_{\max} (%) ²⁾	6,0 (8,0)					
Minimální poměr pevnosti v příčném tahu $ITSR$ (%) ³⁾	80		70		–	
Max. poměrná hloubka koleje PRD_{AIR} (%) ⁴⁾	3,0		–		–	
Max. přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR} (mm/10 ³ cyklů) ⁴⁾	0,05		–		–	
Mezní hodnoty teploty asfaltové směsi pro silniční asfalty (°C) ⁵⁾	30/45 = 155 °C – 195 °C, 35/50 a 40/60 = 150 °C – 190 °C, 50/70 a 70/100 140 °C – 180 °C					
Max. podíl STK v SK nebo DTK v DK (%)	jen drcené		50 %			
Empirické požadavky						
Min. obsah pojiva B_{\min} (% hm.) ^{6) 8)}	4,2	4,0	4,2	4,0	viz ACL 16+	viz ACL 22+
Min. obsah pojiva B_{vol} (% obj.) ⁷⁾	9,8	9,2	9,8	9,2		
Min. stupeň vyplnění mezer VFB_{\min} (%) ²⁾⁸⁾	–		60	60		
Max. stupeň vyplnění mezer VFB_{\max} (%) ²⁾⁸⁾	–		74	71		

Tabulka 4 – Požadavky na asfaltové směsi ložných vrstev dle ČSN EN 13108-1 [10]

3 Návrh asfaltových směsí

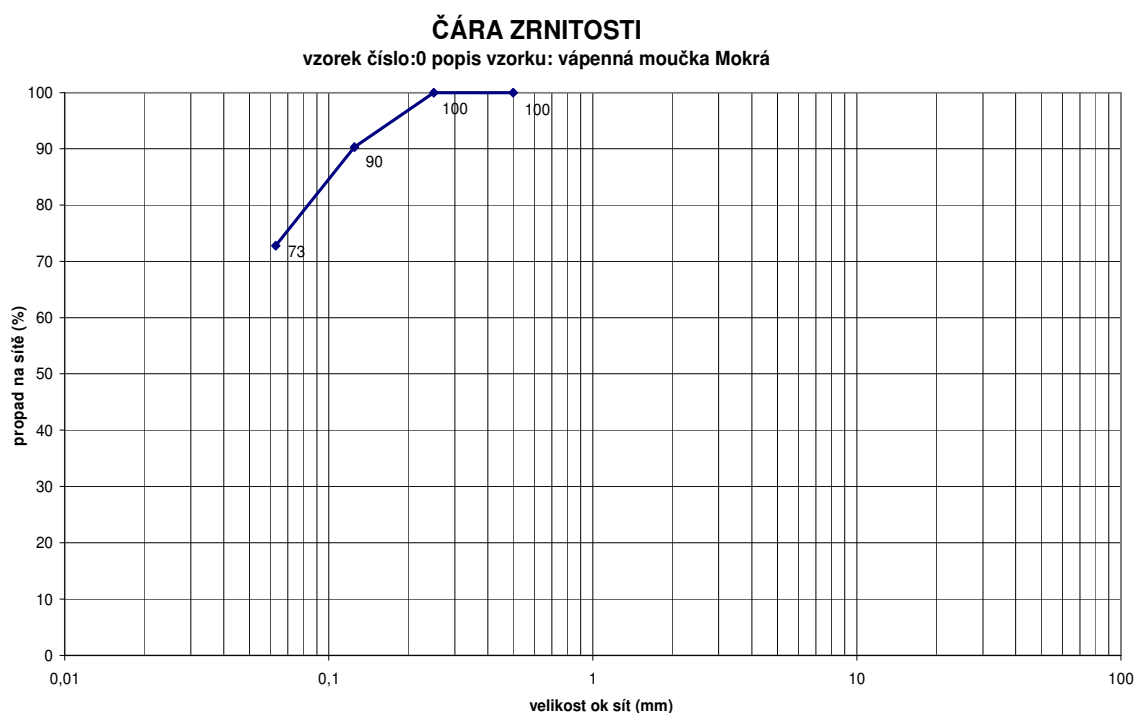
Stanovení optimálního složení asfaltové směsi a postup návrhu směsi je uveden v normě ČSN 73 6160. Laboratorní návrh asfaltové směsi vyplývá z požadavků technických norem předepisujících druh a kvalitu stavebních materiálů. Dále předepisují požadavky na složení a fyzikálně mechanické a fyzikální vlastnosti asfaltové směsi. Pro návržení asfaltové směsi se stanoví zrnitost frakcí kameniva a provedou se návrhy:

▪ návrh čáry zrnitosti kameniva

Při návrhu směsi kameniva do asfaltové směsi je třeba dosáhnout toho, aby výsledná čára zrnitosti směsi kameniva ležela uvnitř příslušného oboru zrnitosti a plnila účel použití směsi. Obor zrnitosti je rozsah propadu daný horními a dolními mezními hodnotami na jednotlivých sítích a je dán výrobkovou normou pro určitou asfaltovou směs. [16]³

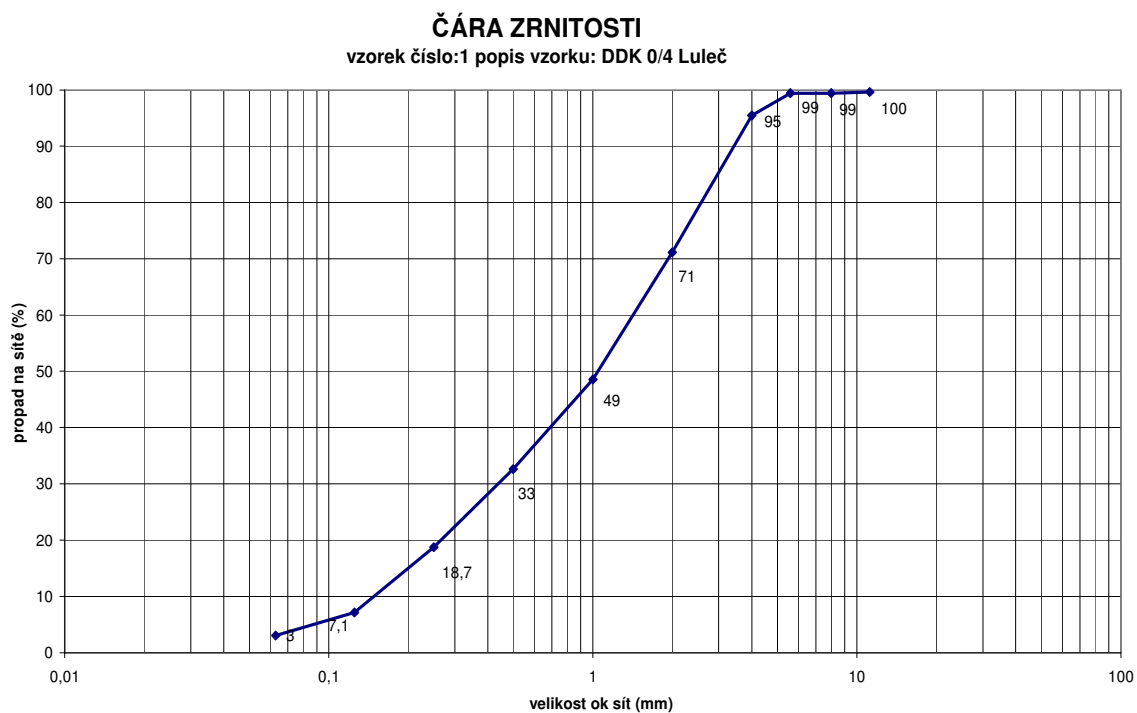
Při návrhu se postupuje nejdříve stanovením čar zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva a přídatného fileru. Stanovení zrnitosti frakcí kameniva bylo provedeno dle normy ČSN EN 933-1 a blíže popsáno v kapitole 5.2 – Zkoušení kameniva.

Stanovení zrnitostí jednotlivých frakcí kameniva (sítový rozbor):

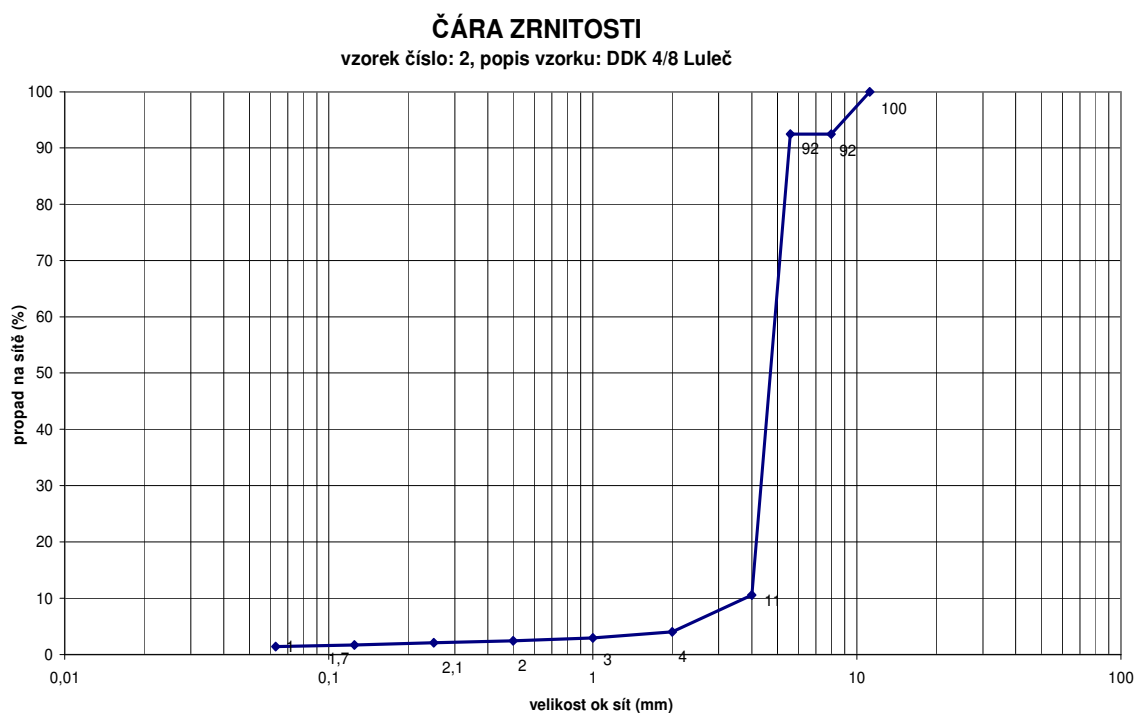


³ Převzato z bakalářské práce [26]

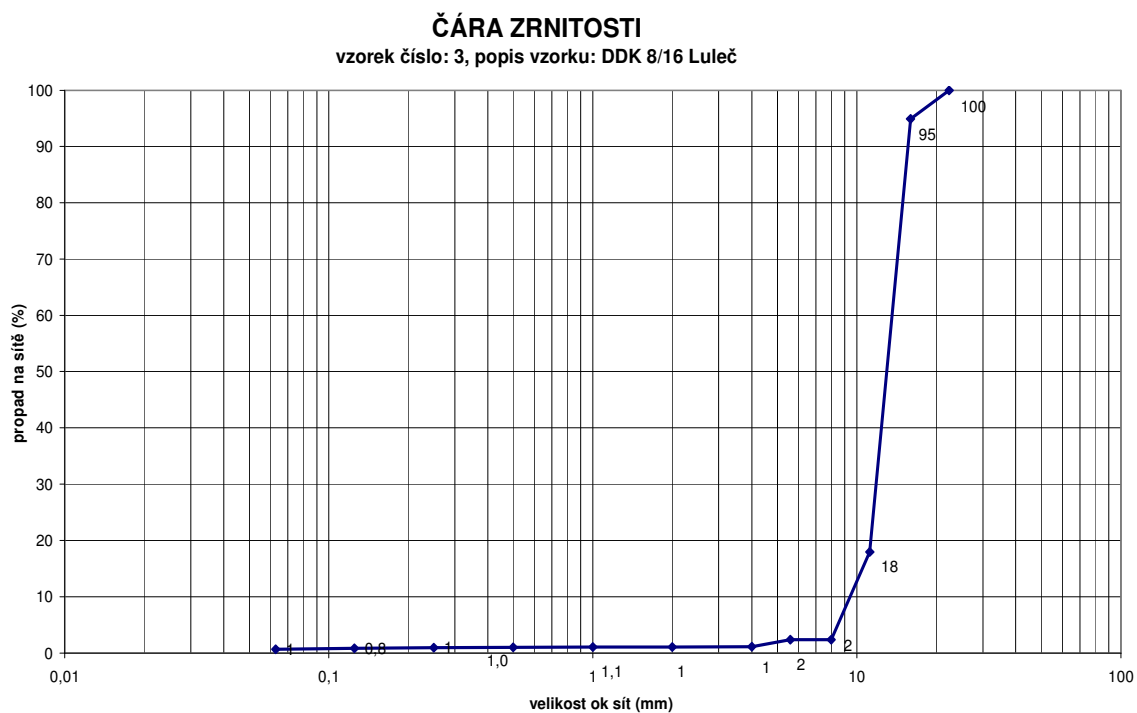
Graf 1 – Čára zrnitosti fileru



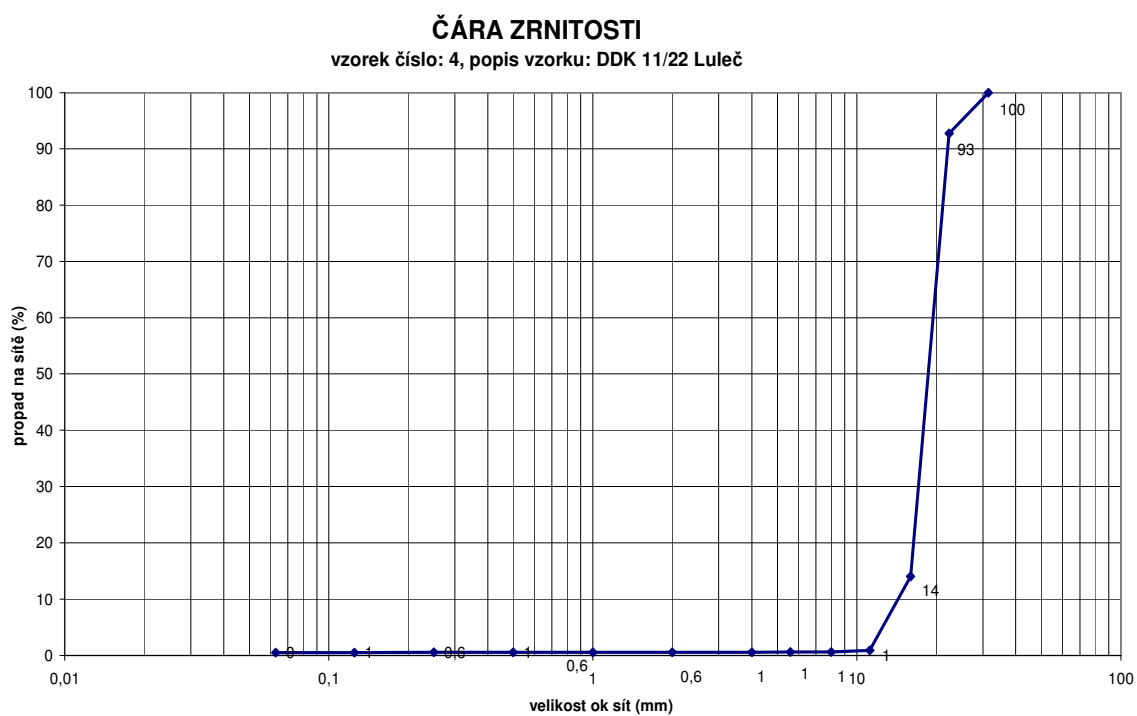
Graf 2 – Čára zrnitosti kameniva frakce 0/4



Graf 3 – Čára zrnitosti kameniva frakce 4/8



Graf 4 – Čára zrnitosti kameniva frakce 8/16



Graf 5 – Čára zrnitosti kameniva frakce 11/22

Frakce	11/22	8/16	4/8	0/4	Filer
22,4	93	100	100	100	100
16	14	95	100	100	100
11,2	1	18	100	100	100
8	1	2	92	99	100
5,6	1	2	92	99	100
4	1	1	11	95	100
2	1	1	4	71	100
1	1	1	3	49	100
0,5	1	1	2	33	100
0,25	1	1	2	19	100
0,125	1	1	2	7	90
0,063	0,5	0,7	1,4	3,1	72,8

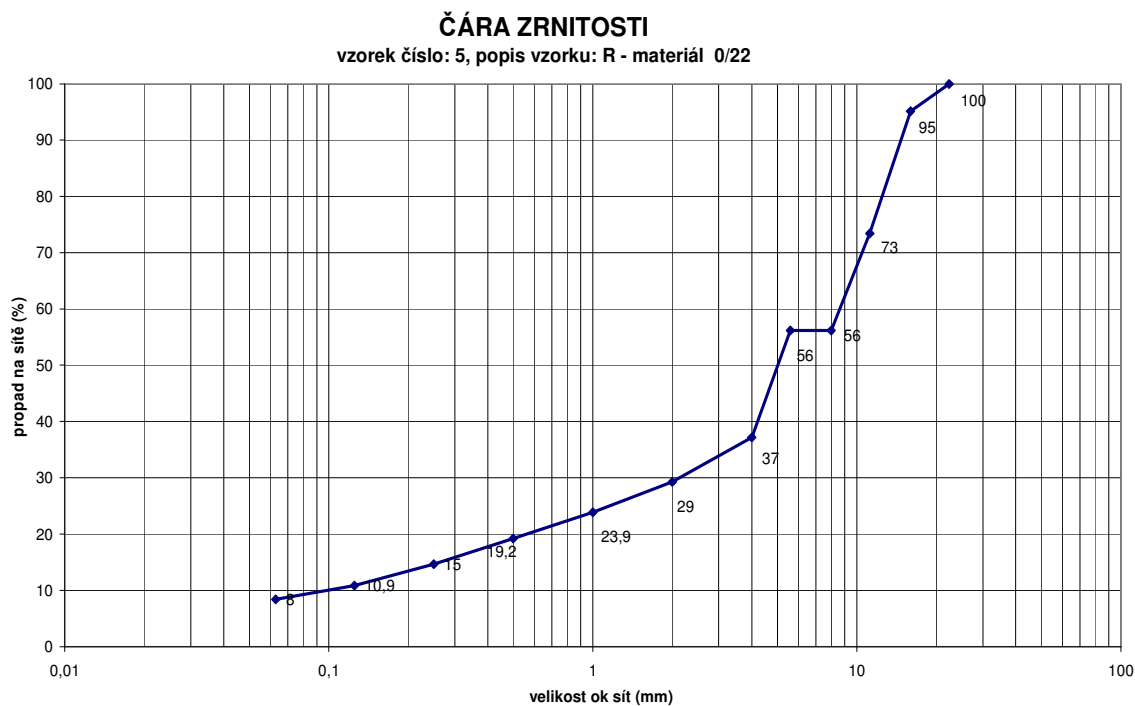
Tabulka 5 – Tabulka propadů na sítích pro použité frakce kameniva (Sítový rozbor)

Pro návrh asfaltové směsi s obsahem R-materiálu je nutné znát také frakce kameniva a jejich podíl v R- materiálu. Je tedy nutné i zde provést sítový rozbor. Pro získání kameniva z R-materiálu se použije postup pomocí extrakce za studena.

Extrakce za studena

R-materiál se vloží do nádoby a zalije rozpouštědlem (trichlorethylen). Po rozpuštění a oddělení asfaltu od kameniva se dál promývá trichlorethylenem na sítě 0,063 mm a 2 mm až je kamenivo čisté a protéká pouze čisté rozpouštědlo. Směs asfaltu a rozpouštědla se uchová pro další zkoušky. Jemné částice se zachytí v odstředivce a z rozdílů navážky a získaného kameniva se zjistí obsah asfaltového pojiva v R-materiálu. Na získaném kamenivu je poté opět proveden sítový rozbor nezbytný pro správný návrh směsi.

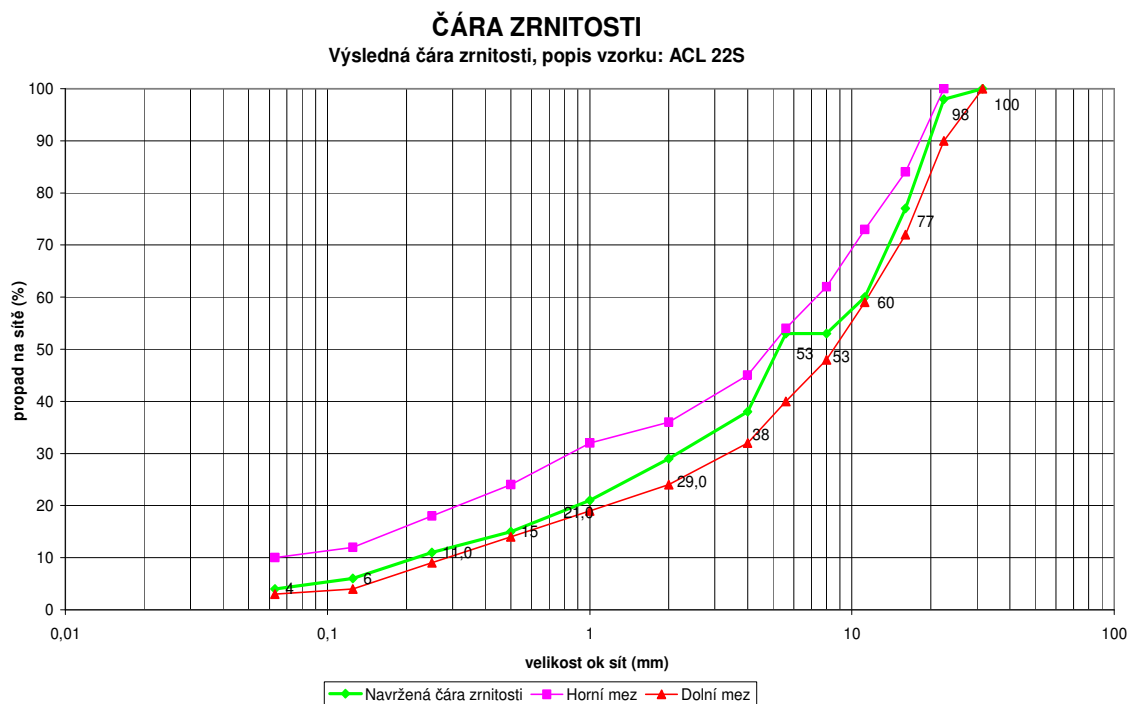
Stanovení zrnitosti kameniva R-materiálu:



Graf 6 – Čára zrnitosti R-materiálu

Poté se odhadem nebo podle předchozích návrhů stanoví podíl každé frakce kameniva. Podle stanoveného procentuálního podílu se u frakcí redukuje propad na jednotlivých sítích. Sečte se celkový propad každého síta výsledné směsi. Vypočtená čára zrnitosti směsi kameniva se porovná, zda leží uvnitř oboru zrnitosti, tedy mezi horní a dolní mezní čarou zrnitosti dané asfaltové směsi a odpovídá všem požadavkům. Pokud čára neleží uvnitř oboru zrnitosti, postup se opakuje s pozměněným procentuálním podílem frakcí kameniva. Postup je možné kontrolovat také grafickým způsobem. [16]

Výsledná navržená čára zrnitosti směsi ACL 22S:



Graf 7 – Výsledná čára zrnitosti směsi ACL 22S

▪ stanovení teoretického optimálního množství pojiva

Pro stanovení teoretického optimálního množství pojiva hutněných asfaltových směsí používáme výpočet podle součinitele sytosti, konstant nebo se použije dřívějších zkušeností.

- výpočet podle součinitele sytosti

Součinitel sytosti je číslo, kterým se upravuje tloušťka asfaltového filmu. Pro stanovení je třeba znát mimo součinitele sytosti ještě objemovou hmotnost kameniva a měrný povrch kameniva, což je součet ploch povrchů jednotlivých zrn kameniva o hmotnosti 1 kg. Teoretické množství pojiva p [kg asfaltu/100 kg kameniva] se vypočte dle vzorce:

$$p = n \times \sqrt[3]{\varepsilon} \times \frac{2,650}{\rho_a}$$

- n – součinitel sytosti (mění se podle druhu a užití asfaltové směsi v rozmezí 3,10 a 3,40)
- ε – měrný povrch kameniva v m^2/kg
- ρ_a – objemová hmotnost kameniva stanovená dle ČSN EN 1097 – 6 v Mg/m^3

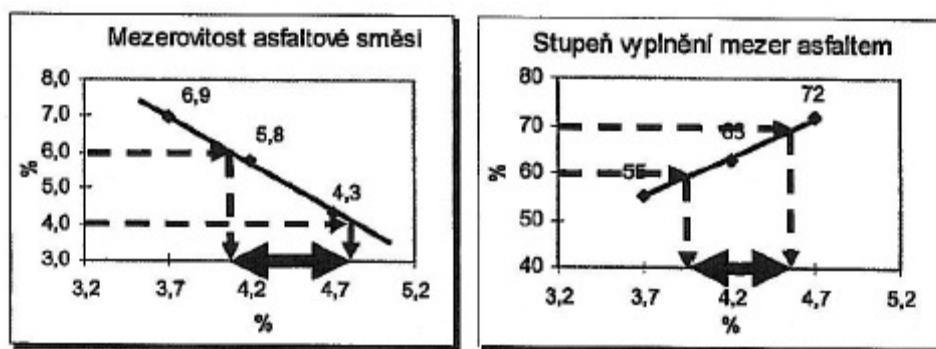
▪ stanovení návrhového množství pojiva

Je interval obsahu pojiva stanovený vyhodnocením objemových charakteristik asfaltové směsi pro jednotlivé sady porovnáním s mezními hodnotami dané příslušnou normou.

Po zjištění teoretického optimálního množství pojiva dle zkušeností se u hutněných směsí doporučuje namíchat tři sady směsí dle normy ČSN EN 12 697 – 35 odstupňované pro jemnozrnné směsi ($D \leq 11$ mm) o 0,3 – 0,4 % a pro hrubozrnné směsi ($D \geq 16$ mm) o 0,4 – 0,5 %, aby teoretické optimální množství pojiva tvořilo střední sadu. Pro přepočet množství pojiva p [kg pojiva/100 kg kameniva] na \odot [v % hmotnosti] použijeme vzorec:

$$\odot = (p / 100 + p) \times 100$$

Z každé sady se vyrobí minimálně 3 Marshallova tělesa a z nich se zjistí jejich objemová hmotnost (například metodou nasycený suchý povrch SSD dle ČSN EN 12 697 – 6) a také maximální objemová hmotnost asfaltové směsi pomocí pyknometru ve vodě, nebo výpočtem ze zjištěných objemových hmotností jednotlivých složek směsí. Následuje vyhodnocení podle požadavků pro vybraný druh směsi. Vždy mezerovitost V_m (% objemu) a obsah asfaltu A_p (% objemu), nebo stupeň vyplnění mezer pojivem VFB (%), pokud je požadován a mezerovitost směsi kameniva VMA (%). Vyhodnocení se provede graficky.



Obrázek 8 – Příklad grafu závislosti objemové hmotnosti zhutněné asfaltové směsi a maximální objemové hmotnosti na obsahu pojiva v % hmotnosti [16]

[16]⁴

V tomto případě byl proveden návrh množství asfaltového pojiva podle dřívějších zkušeností a podobných návrhů, kde požadovaným výsledkem měla být mezerovitost směsi, která se měla podle požadavků pohybovat okolo 5%.

⁴ Převzato z bakalářské práce [26]

Návrhové množství pojiva bylo z tohoto důvodu stanoveno na 4,5% pojiva v asfaltové směsi. Jedná se však o celkové množství asfaltového pojiva ve směsi.

V případě asfaltové směsi s obsahem R-materiálu, který již obsahuje danou část pojiva, která byla zjištěna extrakcí asfaltového pojiva za studena (4,6%), se musí vypočítat přidávané množství pojiva. 20% R-materiálu v asfaltové směsi obsahuje $p_r = 4,6 * 20 / 100 = 0,9$ %. Přidávané množství asfaltového pojiva je pak pouze $p_p = 4,5 - 0,9 = 3,6$ %.

4 Funkční zkoušky

4.1 Zkouška odolnosti proti tvorbě trvalých deformací (zkouška pojíždění kolem)

Výsledkem zkoušky odolnosti proti tvorbě trvalých deformací je zjištění náchylnosti asfaltových směsí k trvalé deformaci pod daným zatížením a zkouška se používá u směsí s maximální velikostí zrn kameniva do 32 mm. Tělesa pro zkoušení mohou být vyrobena v laboratoři, případně odebrána z vozovky a pro zkoušení upevněna do formy zkušebního zařízení, aby povrch tělesa byl zároveň s horním okrajem formy.

Náchylnost k deformacím asfaltových směsí závisí na hloubce vyjeté koleje vytvořené opakovaným pojížděním zatěžovacího kola při dané teplotě. Pro zkoušení je možné použít tři typy zařízení a to velká zkušební zařízení, extra velká zkušební zařízení a malá zkušební zařízení. Temperování zkušebních těles probíhá u velkých a extra velkých zkušebních zařízení na vzduchu. U malých zkušebních těles je možné temperování na vzduchu nebo ve vodní lázni. Pro zkoušení bylo použito malé zkušební zařízení.[4]⁵

Malé zkušební zařízení je složeno z pojízdného stolu, formy, záznamového zařízení, zařízení pro regulaci teploty a zatíženého kola, které působí na zkušební těleso pevně upevněné ve formě na zkušebním stole, který se pohybuje pod kolem a měřící zařízení měří a zaznamenává nárůst vyjeté koleje na tělese.

⁵ Převzato z bakalářské práce [26]



Obrázek 9 – Zkušební zařízení – vyjížděč kolejí [13]

Zkušební tělesa pro tuto zkoušku mají půdorysné rozměry 320 x 260 mm a tloušťka tělesa by dle normy ČSN EN 12 697 – 22 měla odpovídat tloušťce směsi ve vozovce nebo se pohybovat v návrhovém rozmezí v případě pokládky směsí v různých tloušťkách:

- 25 mm pro směsi s maximální velikostí zrna menší než 8 mm
- 40 mm pro směsi s maximální velikostí zrna rovnou 8 mm a menší než 16 mm
- 60 mm pro směsi s maximální velikostí zrna rovnou 16 mm a menší nebo rovnou 22 mm
- 80 mm pro směsi s maximální velikostí zrna větší než 22 mm a menší nebo rovnou 32 mm

Postup zkoušky

Pro zkoušku odolnosti proti tvorbě trvalých deformací jsou třeba 2 zkušební tělesa o rozměrech 320 x 260 x 60 mm pro asfaltovou směs s maximálním zrnem 22 mm, která jsou pojížděna zároveň při jedné zkoušce. Výroba těchto desek probíhá pomocí lamelového zhutňovače v laboratoři. Po zjištění jejich objemových hmotností se desky umístí do forem a temperují na vzduchu při teplotě 50°C minimálně 4 hodiny. Následně se formy s tělesy přemístí do

zkušebního zařízení, ve kterém se po celou dobu zkoušení udržuje teplota $50^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, a poté upevní k pojízdnému stolu. Na tělesa se umístí kola, zatíží závažím a spustí zařízení, které zkouší po dobu 10 000 cyklů (pohyb tam a zpět) a zaznamenává hodnoty, ze kterých se počítá přírůstek hloubky vyjeté koleje (WTS_{AIR}) a průměrná hloubka vyjeté koleje (PRD_{AIR}): [4]

- *Přírůstek hloubky vyjeté koleje na vzduchu*

Přírůstek vyjeté koleje vyjádřený v mm za 103 zatěžovacích cyklů se vypočte jako:

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

kde WTS_{AIR} je přírůstek hloubky vyjeté koleje v mm za 103 zatěžovacích cyklů;

$d_{10\,000}$, $d_{5\,000}$ hloubky vyjeté koleje po 5 000 a 10 000 cyklech v milimetrech

- *Průměrný přírůstek hloubky vyjeté koleje na vzduchu*

Výsledek zkoušky je průměr WTS_{AIR} ze dvou zkušebních těles.

Jestliže je zkouška ukončena před dosažením 10 000 cyklů, nárůst by měl být počítán z lineární části křivky hloubky vyjeté koleje za předpokladu, že tato lineární část pokrývá nejméně 2 000 cyklů.

- *Průměrná poměrná hloubka vyjeté koleje PRD_{AIR} na vzduchu*

Poměrná hloubka vyjeté koleje pro zkoušenou asfaltovou směs při N zatěžovacích cyklech je průměr poměrné hloubky vyjeté koleje ze dvou (nebo více) zkušebních těles s přesností $\pm 0,1\%$.

- *Průměrná hloubka vyjeté koleje PRD_{AIR} na vzduchu*

Hloubka vyjeté koleje pro zkoušenou asfaltovou směs při N zatěžovacích cyklech je průměr hloubky vyjeté koleje ze dvou (nebo více) zkušebních těles s přesností $\pm 0,1\%$.

[4]

Výsledkem zkoušky je pak stanovení průměrného přírůstku hloubky vyjeté koleje na vzduchu a stanovení průměrné hloubky vyjeté koleje na vzduchu z obou zároveň zkoušených desek.

4.2 Zkouška stanovení modulu tuhosti⁶

Podstatou zkoušky stanovení modulu tuhosti je deformace vzorku vhodného tvaru v lineárním rozsahu při opakovaném zatěžování nebo řízené rychlosti

⁶ Převzato z bakalářské práce [26]

zatěžování, které působí poměrné přetvoření. Při zkoušce se měří a zaznamenává amplituda napětí a poměrného přetvoření s fázovým rozdílem mezi napětím a poměrným přetvořením.

4.2.1 Způsoby zkoušení

Zkoušky ohybem

- 2PB-TR – dvoubodový ohyb na tělesech tvaru komolého vetknutého klínu
- 2PB-PR – dvoubodový ohyb na tělesech tvaru trámečku
- 3PB-PR – tříbodový ohyb na tělesech tvaru trámečku
- 4PB-PR – čtyřbodový ohyb na tělesech tvaru trámečku

Zkouška v příčném tahu

- IT-CY – zkouška modulu pružnosti na válcových zkušebních tělesech

Zkoušky jednoosým tahem a tlakem

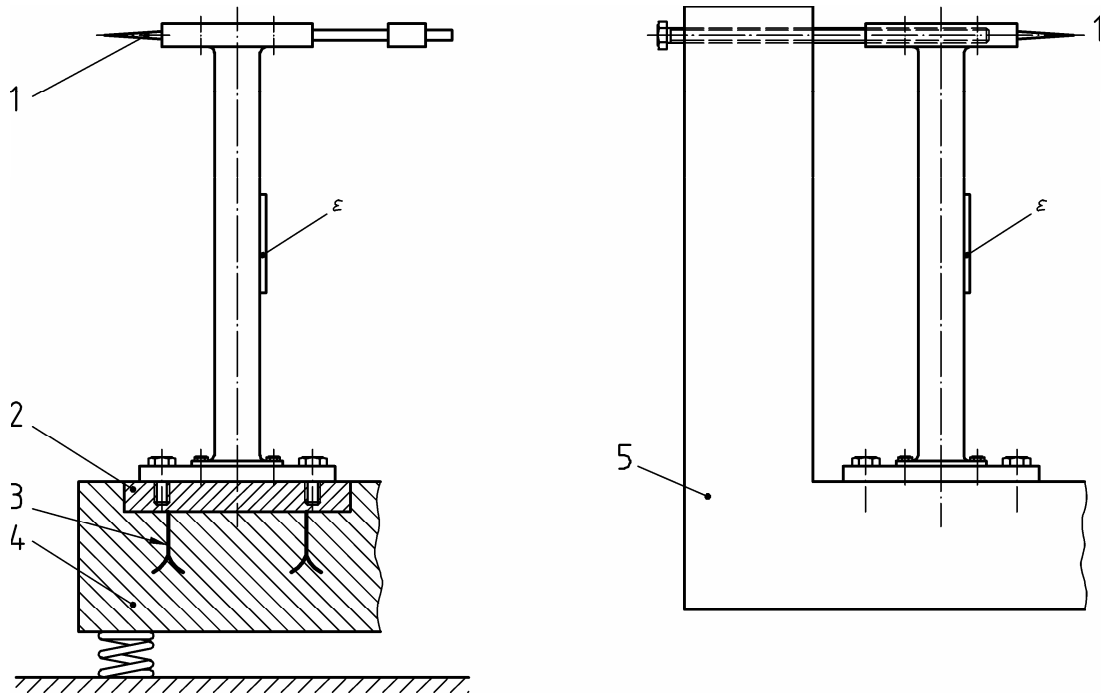
- DTC-CY – zkouška jednoosým tahem a tlakem na válcových zkušebních tělesech
- DT-CY – zkouška v přímém tahu na válcových zkušebních tělesech
- DT-PR – zkouška v přímém tahu na tělesech tvaru trámečku

4.2.2 Zkouška ohybem na vetknutém komolém klínu 2PB-TR

Zkouška na jednostranně vetknutém komolém klínu je jednou z několika možných zkoušek pro měření modulu tuhosti asfaltových směsí. Zkušební těleso je přilepeno svou spodní základnou k podkladní desce a upevněné k pevnému rámu. Na volný konec zkušebního tělesa působí sinusová síla $F = F_0 \times \sin(\omega \times t)$ nebo sinusový průhyb $z = z_0 \times \sin(\omega \times t)$. Síla F_0 nebo průhyb z_0 musí mít takovou velikost, aby přetvoření, které způsobují, mělo v nejvíce namáhané části zkušebního vzorku hodnotu $\epsilon \leq 50 \times 10^{-6}$. Při známé síle F_0 , průhybu z_0 a fázového úhlu Φ můžeme spočítat komplexní modul při různých frekvencích a teplotách.

Pro zkoušku modulu tuhosti na komolém klínu používáme zkušební zařízení, které při minimálním rozsahu frekvencí (3 – 30 Hz), dokáže vyvodit sinusový dynamický průhyb na vrcholu zkušebního tělesa. Podkladní desky musí být v pevném rámu uloženy tak, aby kovové zkušební těleso pro daný průhyb nemělo o více jak 5% nižší přetvoření ϵ měřené ve zkušebním zařízení, než

přetvoření ε měřené na ocelovém rámu tvaru L o tloušťce minimálně 80 mm při síle cca 50 N.



Obrázek 10 - Kontrola (ověření) uložení (ukotvení)

Legenda

- | | | | |
|---|---|---|------------------------|
| 1 | průhyb | 4 | zkušební zařízení |
| 2 | podpěrná deska k uložení (ukotvení) zkušebního tělesa | 5 | ocelový rám ve tvaru L |
| 3 | uložení, které má být ověřeno | | |

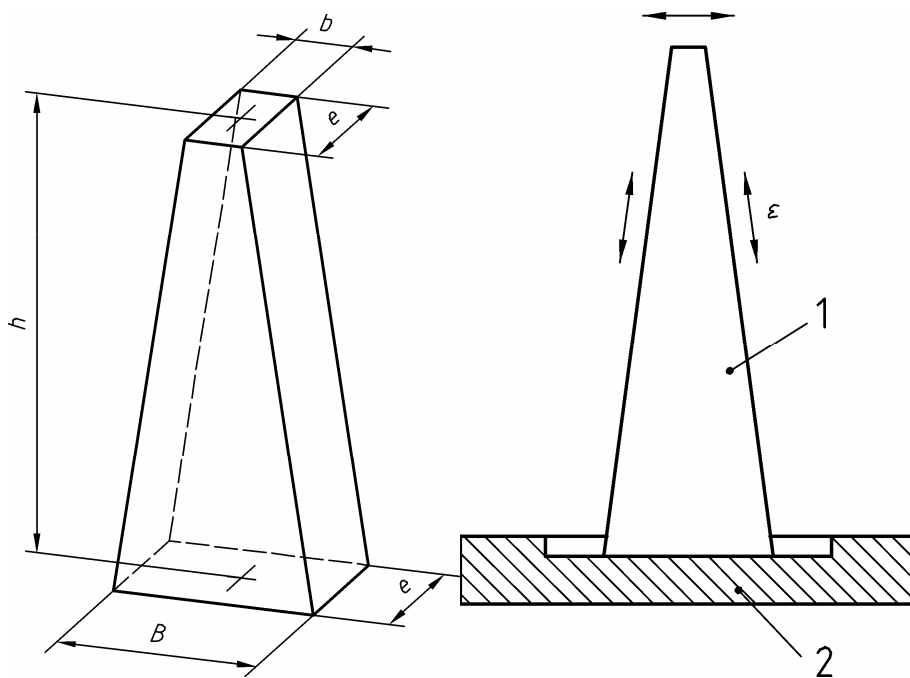
Zkušební zařízení by mělo být uloženo v termostatické odvětrávané komoře, která umožňuje ustálit průměrnou teplotu proudu vzduchu na $\pm 0,3$ °C při dané teplotě po dobu trvání zkoušky. Pokud však zkušební zařízení není uloženo v termostatické komoře, musí se dodržet požadavky na teplotu podkladní desky.

Zkušební tělesa mají tvar komolého klínu o rozměrech uvedených v tabulce a znázorněné na obrázku.

(D – je maximální velikost kameniva v směsi)

Rozměry zkušebních těles mm	Zkušební tělesa tvaru trámečku	Zkušební tělesa tvaru komolého klínu		
	$D \leq 14$ mm	$D \leq 14$ mm	$D \leq 22$ mm	$D > 22$ mm
B	40	56	70	75
B	40	25	25	30
E	40	25	25	35
H	120	250	250	250

Tabulka 6 – Minimální rozměry zkušebních těles



Obrázek 11 – Rozměry zkušebních těles

Obrázek 12 – Upevnění zkušebního tělesa

[17]

Legenda

- 1 drážka, 2 mm
- 2 kovová podkladní deska

Příprava zkušebních těles tvaru komolého klínu dle ČSN EN

Zkušební tělesa tvaru komolého klínu (trapezoidy) získáváme vyřezáváním desek vyrobených v lamelovém zhutňovači v laboratoři dle normy ČSN EN 12697 – 33 nebo z desek odebraných z krytu vozovky o tloušťce větší než 60 mm. Podélná osa desky musí být rovnoběžná s horizontální osou zhutnění směsi. Trapezoidy se uchovávají při teplotě do 30 °C, chráněna před přímým sluncem a postavena na rovném povrchu, aby se zabránilo jejich ohybu. Sada zkušebních těles musí obsahovat alespoň 4 vzorky o rozměrech uvedených výše v tabulce. Rozměry vzorků se měří a zapisují s přesností na 0,1mm a hmotnost na 0,1 g. Podle normy ČSN EN 12697 – 6 se vypočte objemová hmotnost každého vzorku, která se nesmí lišit o více jak 1 % od průměrné hmotnosti sady. Pokud ano, vzorek se vyloučí. Poté se zkušební tělesa nalepí spodní plochou k ocelové podkladní desce o minimální tloušťce 10 mm. Tím musí být zajištěno správné geometrické ukotvení zkoušeného vzorku a podkladní desky k podstavci. Na horní povrch tělesa se přilepí příchytky, jejíž pomocí se připevňuje zkušební těleso k zatěžovacímu zařízení pro změnu výchylky.

[17]

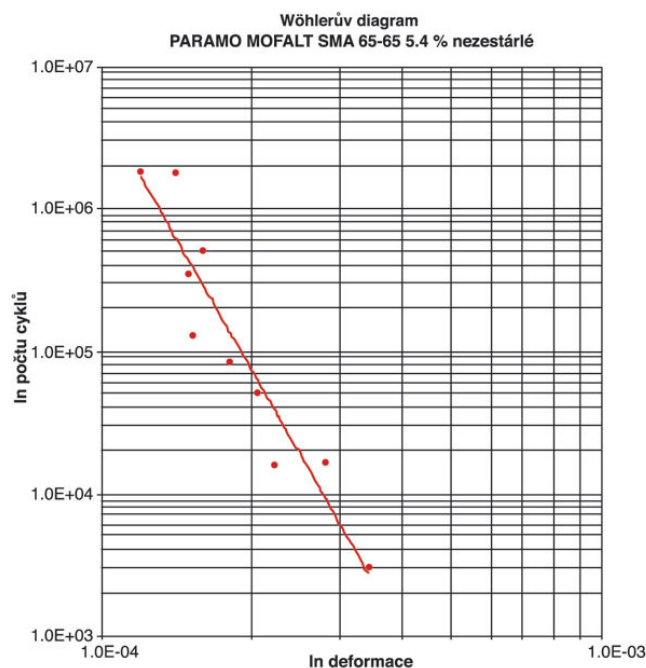
4.3 Zkouška stanovení únavových charakteristik

V normě ČSN EN 12 697 – 24 je popsáno měření únavových charakteristik, které se používají při posouzení odolnosti vozovky proti opakujícímu se zatěžování. Asfaltové směsi se jako i ostatní materiály unavují opakovaným zatížením. Únava asfaltových směsí se zkouší na trapezoidech, které se zatěžují harmonickým zatížením při konstantní výchylce a zaznamenává se síla odporu zkušebního tělesa. Zkouška se ukončí při poklesu síly odporu na polovinu a stanoví se počet cyklů. Výsledky zkoušky se vynesou pomocí Wöhlerova diagramu. Tato zkouška se používá pro dimenzování vozovek na počet přejezdů návrhové nápravy dle zatěžovacích cyklů. Únavovou zkoušku je možné stanovit dvěma způsoby:

- 2 bodové zkoušky na komolém klínu
- 4 bodové zkoušky na trámečcích

[18]⁷

⁷ Převzato z bakalářské práce [26]



Obrázek 13 – Příklad Wöhlerova diagramu [18]

4.3.1 Zkouška ohybem na vetknutém komolém klínu 2PB-TR

Zkouška únavových charakteristik se provádí na stejném zařízení jako zkouška stanovení modulu tuhosti. Popis zařízení a příprava zkušebních těles viz. Kapitola 4.2.

Oproti zkoušce modulu tuhosti, kde se vzorky zkouší při základní teplotě 15°C, frekvencích 5, 10, 15, 20 a 25 Hz a přetvoření nesmí přesáhnout hodnotu $\varepsilon \leq 50 \times 10^{-6}$, aby nedošlo k porušení vzorku, únavové charakteristiky se zkouší při teplotě 10°C, frekvenci 25 Hz a přetvoření se nastavuje tak, aby vždy došlo k porušení zkušebního tělesa, ale s jiným počtem cyklů a bylo možné vytvořit Wöhlerův diagram tedy těmito body proložit přímkou a odečíst výslednou hodnotu ε_6 (hodnota přetvoření při 1 milionu cyklů).

4.4 Zkouška stanovení nízkoteplotních vlastností

Pomocí zkoušek nízkoteplotních vlastností lze stanovit odolnost asfaltové směsi proti tvorbě trhlin při nízkých teplotách. Tyto zkoušky popisuje ČSN EN 12 697 – 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem. Z výsledků jednoosých zkoušek tahem je možné vyhodnotit:

Pevnosti v tahu při stanovené teplotě pomocí zkoušky jednoosým tahem (UTST)

Minimální teploty, kterou je asfaltová směs schopna snést před porušením, pomocí zkoušky nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty (TSRST)

Rezervy pevnosti v tahu při stanovené teplotě (provedením zkoušky TSRST v kombinaci se zkouškou UTST)

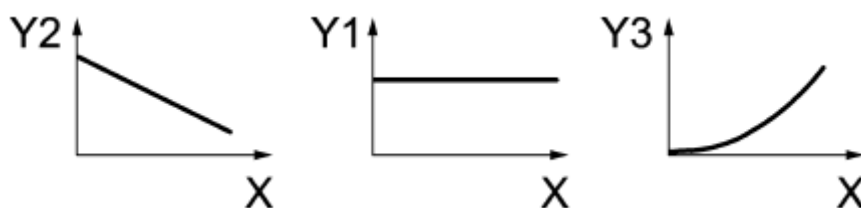
Doby relaxace pomocí relaxační zkoušky (RT)

Křivky dotvarování pro přepočítání reologických parametrů pomocí creepových zkoušek v tahu (TCT)

Odolnost vůči únavě při nízkých teplotách vlivem kombinace kryogenního a mechanického zatížení pomocí jednoosých cyklických zkoušek tahem (UCTST)

4.4.1 Zkouška nízkoteplotních vlastností rovnoměrným řízeným poklesem teploty (TSRST)

Zkušební těleso je při zkoušce vystaveno řízenému poklesu teploty konstantní rychlostí za podmínky nulové podélné deformace tělesa, ve kterém vzniká kryogenní napětí a výsledkem je šíření tohoto napětí při teplotě $\sigma_{cry}(T)$ a napětí způsobujícího porušení $\sigma_{cry, failure}$ při teplotě $T_{failure}$, kdy dochází k porušení.

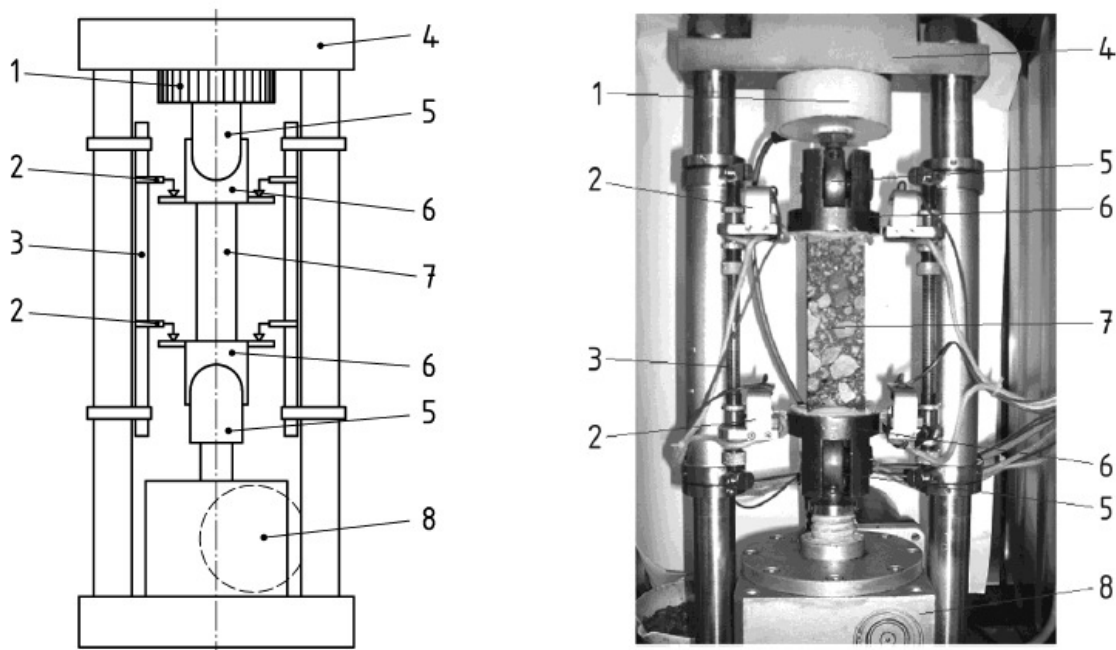


Obrázek 14 – Podstata zkoušky TSRST [14]

Y1	deformace
X	čas
Y2	teplota
Y3	napětí

[14]

Pro zkoušení se používá zkušebního zařízení zobrazené na obrázku níže, jenž je schopné pomocí dvou kardanových závěsů vyvíjet pohyby s přesností 0,1 μm a zabraňovat vzniku radiálních i příčných sil a momentů ve zkušebním tělese. Řízené snižování teploty je umožněno díky termostatické komoře, v níž je zkušební zařízení umístěno a pevně upevněno. Uvnitř komory je možné udržovat teplotu od -40 do $+30^\circ\text{C}$ s přesností $\pm 0,5$ K a tím dosáhnout řízení teploty v jádru zkušebního tělesa rychlostí 10 K/h.



Legenda

1	silový tenzometrický snímač	5	kardanový závěs
2	snímač posunu	6	čelist
3	ohřev vnějšího rámu	7	zkušební těleso
4	příčný trám	8	převodovka s krokovým motorem

Obrázek 15 – Příklad zkušebního zařízení pro provádění zkoušek jednoosým tahem při nízkých teplotách [14]

Každá asfaltová směs se zkouší na nejméně třech zkušebních tělesech tvaru hranolu nebo válce o rozměrech závislých na maximální velikosti zrna kameniva (D) v asfaltové směsi a tyto rozměry uvádí tabulka č. 7 z normy ČSN EN 12 697 – 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem.

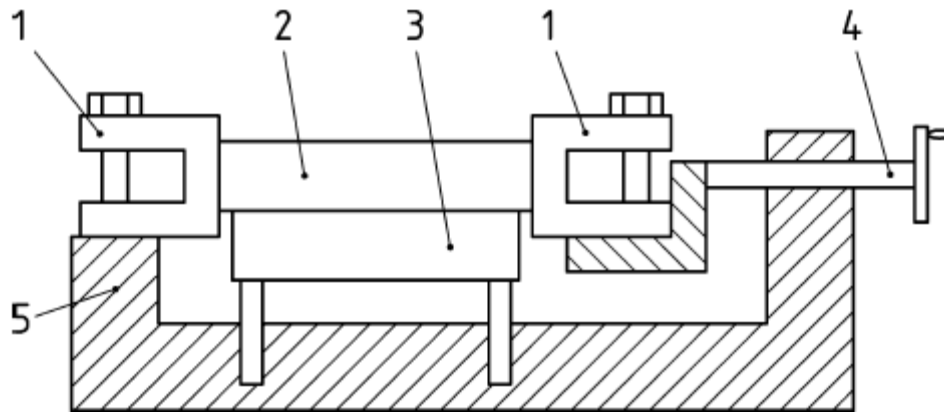
Typ zkušební tělesa	Rozměr	Maximální velikost zrna kameniva D (mm)		
		$D \leq 11,2$	$11,2 < D < 22,4$	$D \geq 22,4$
Hranolová zkušební tělesa čtvercového průřezu	Šířka a výška, mm	40 ± 2	50 ± 2	60 ± 2
Válcová zkušební tělesa	Průměr, mm	50 ± 2	50 ± 2	60 ± 2
Všechna zkušební tělesa	Minimální délka zkušební tělesa, mm	160	160	160

Tabulka 7 – Rozměry hranolových a válcových zkušebních těles (mm) [14]

Pro získání zkušebních těles je třeba nejprve vyrobit desku pro každou asfaltovou směs v lamelovém zhutňovači podle ČSN EN 12 697 – 33

o minimální tloušťce, která se rovná výšce tělesa podle tabulky. Z desek pak na kotoučové pile vyřezat tělesa a pro zkoušku se použijí ty z prostřední části desky, případně tělesa s minimální vzdáleností 20 mm od okraje desky.

Upevnění tělesa se provede umístěním do čelistí, vycentrováním pomocí centrovacího rámu a následným přilepením tělesa směsí tvrdidla, pryskyřice a fileru k čelistem a vloženo zpět do centrovacího rámu a upevněno do zatvrdnutí.



Legenda

- 1 čelist
- 2 zkušební těleso
- 3 výškově nastavitelná podpěra
- 4 vřeteno
- 5 dolní část

Obrázek 16 – Příklad centrovacího rámu pro přípravu zkušebního tělesa [14]

Po zatvrdnutí se těleso vyjme z centrovacího rámu a upne čelistmi do zkušebního zařízení, kde dojde ke stabilizaci tělesa na počáteční teplotu T_0 a během ní nesmí být těleso nijak zatíženo. Poté se zařízení spustí, udržuje se konstantní délka tělesa a zatěžuje se poklesem teploty rychlostí 10 K/h až do porušení. [14]

5 Experimentální část

Tato část práce zahrnuje zkoušky kameniva, R-materiálu, všech asfaltových pojiv a po návrhu asfaltových směsí ACL 22S PmB 45/80-65 a ACL 22S PmB 45/80-65 RC také funkční zkoušky na asfaltových směsích a porovnání výsledků zkoušek.

Kamenivo:

Pro návrh a výrobu směsí byly použity frakce kameniva 0-4, 4-8, 8-16 a 11-22 mm z kamenolomu Luleč a vápenná moučka z lokality Mokrá.

R- materiál:

Asfaltová směs byla navržena s obsahem 20 % R-materiálu, který byl dovezen ze skládky R-materiálu na obalovně v Rajhradcích.

Asfaltové pojivo:

Práce zahrnuje výrobu dvou asfaltových směsí ACL 22S, první s modifikovaným asfaltem PmB 45/80-65 a druhá s modifikovaným asfaltem PmB 45/80-65 RC určeným do asfaltových směsí s obsahem R-materiálu. Obě asfaltová pojiva vyrábí společnost OMW Česká republika, s.r.o.

5.1 Zkoušky provedené na asfaltových pojivech

- **Penetrace dle ČSN EN 1426**

Zkouška penetrace asfaltového pojiva se provádí v penetrometru. Do vodní lázně se umístí vzorek pojiva a temperuje se na 25°C. Poté se nastaví jehla, která je zatížena závažím o hmotnosti 100 g, těsně na dotyk s povrchem pojiva. Ze stupnice se zaznamená nulová hodnota jehly a následně se uvolní na dobu 5 sekund a odečte se hodnota penetrace v desetinách milimetru. Penetraci je nutné provést alespoň třikrát a aritmetickým průměrem stanovíme výslednou hodnotu penetrace.

Pojivo	PmB 45/80-65	PmB 45/80-65 RC
Penetrace [0,1 mm]	52	66

Tabulka 7 – Naměřené hodnoty penetrace asfaltových pojiv



Obrázek 17 – Zařízení pro měření penetrace (penetrometr)

- **Bod měknutí dle ČSN EN 1427**

Stanovení bodu měknutí se provádí měřicí metodou kroužek a kulička (KK). Do dvou kroužků se odlije rozehřáté asfaltové pojivo a nechá se zchladnout. Po zchladnutí se rozpálenou špachtlí odstraní přebytečné množství pojiva, aby bylo zároveň s horním okrajem kroužků. Kroužky s pojivem se vloží do kádinky s destilovanou vodou a temperují se tak, aby po vložení kuliček na pojivo v kroužcích, přenesení do zkušebního zařízení a spuštění byla teplota vzorků $5\pm 1^{\circ}\text{C}$. Při zkoušení dochází k řízenému ohřívání rychlostí 5°C za minutu a míchání magnetickým míchadlem. Při vzrůstající teplotě dochází k postupnému protahování kuličky přes zahřívající se pojivo a po protažení do hloubky $25\text{ mm} \pm 0,4\text{ mm}$ pod dolní okraj prstenu je zaznamenána teplota jednoho i druhého vzorku a zkouška tím končí. Bod měknutí zkoušeného pojiva je pak aritmetický průměr z obou naměřených teplot.

Pojivo	PmB 45/80-65	PmB 45/80-65 RC
Bod měknutí [°C]	82,3	80,6

Tabulka 8 – Naměřené hodnoty bodu měknutí asfaltových pojiv



Obrázek 18 – Zkušební zařízení pro zkoušení bodu měknutí asfaltových pojiv

5.2 Zkoušky provedené na kamenivu

Po dovezení kameniva do školní laboratoře byla na všech frakcích provedena homogenizace, která je nezbytná pro správné rozložení velikosti zrn kameniva v dané frakci a obzvláště důležité je to u R-materiálu, který je v našem případě široké frakce 0-22 mm.

- **Stanovení zrnitosti kameniva – Síťový rozbor dle ČSN EN 933 – 1**

Zrnitost kameniva se stanovuje u každé frakce použité pro návrh asfaltové směsi, a to dvakrát a výsledná zrnitost frakce je aritmetickým průměrem.

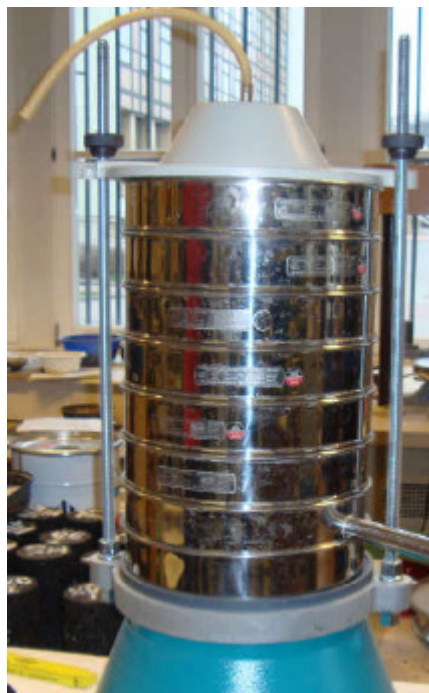
Zkušební navážka dané frakce, jejíž minimální hmotnost udává tabulka 1 příslušné normy, se vysouší při teplotě 110 ± 5 °C do ustálení hmotnosti a po vychladnutí se zaznamená jako hmotnost M_1 . Navážka se dále promývá na síť 0,063 mm s ochranným sítem 1 nebo 2 mm tak dlouho, než protéká čistá voda. Navážka zachycená na sítích se opět vysouší, nechá vychladnout, zváží a zaznamená jako hmotnost M_2 . Vysušený vzorek o hmotnosti M_2 se vysype na sadu kontrolních sít sestavených od nejmenšího po největší na vibračním stole a mechanicky se otřásá. Pak se postupně odebírají síta a ještě ručně se třese, dokud se hmotnost na síť během 1 minuty nemění o více než 1 % a hmotnost na daném síť se zaznamená. Tímto způsobem se stanoví všechny hmotnosti na jednotlivých sítích (plus propad na dně) a je možné vykreslit křivku zrnitosti a stanovit podíl jemných částic dle vzorce:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100$$

M_1 – hmotnost vysušené zkušební navážky v kilogramech

M_2 – hmotnost vysušeného zůstatku na síť 0,063 mm v kilogramech

P – hmotnost propadu jemných částic na dně v kilogramech



Obrázek 19 – Zařízení pro stanovení zrnitosti kameniva

Frakce	Velikost otvoru na síť [mm]											
	22,4	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
11/22	93	14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5
8/16	100	95	18	2	2	1	1	1	1	1	1	0,7
4/8	100	100	100	92	92	11	4	3	2	2	2	1,4
0/4	100	100	100	99	99	95	71	49	33	19	7	3,1
Filer	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	72,8

Tabulka 9 – Sítový rozbor frakcí kameniva

Jednotlivé čáry zrnitostí frakcí kameniva jsou uvedeny v kapitole 3 – Návrh asfaltových směsí.

5.3 Zkoušky provedené na R-materiálu

- **Extrakce za studena**

Postup stanovení obsahu asfaltového pojiva, oddělení a získání čistého kameniva pro stanovení zrnitosti pomocí extrakce za studena bylo popsáno v kapitole 3 - Návrh asfaltových směsí.



Obrázek 20 – Extrakční zařízení

Obsah asfaltového pojiva

Obsah asfaltového pojiva v R-materiálu se stanoví jako rozdíl hmotnosti původní navážky na extrakci za studena a hmotnosti čistého vysušeného kameniva získaného z extrakce.

	Vzorek 1	Vzorek 2
Původní navážka	1540,5 g	1459,1 g
Vysušené kamenivo	1470,3 g	1398,0 g

Tabulka 10 – Hmotnosti zkušebních navážek při extrakci za studena

Výpočet obsahu asfaltového pojiva se provede podle vzorce:

$$\text{Obsah pojiva} = \frac{Pv. \text{ navážka} - \text{Vysušené kamenivo}}{\text{Vysušené kamenivo}} * 100$$

	Vzorek 1	Vzorek 2	Průměr
Obsah pojiva	4,8 %	4,4 %	4,6 %

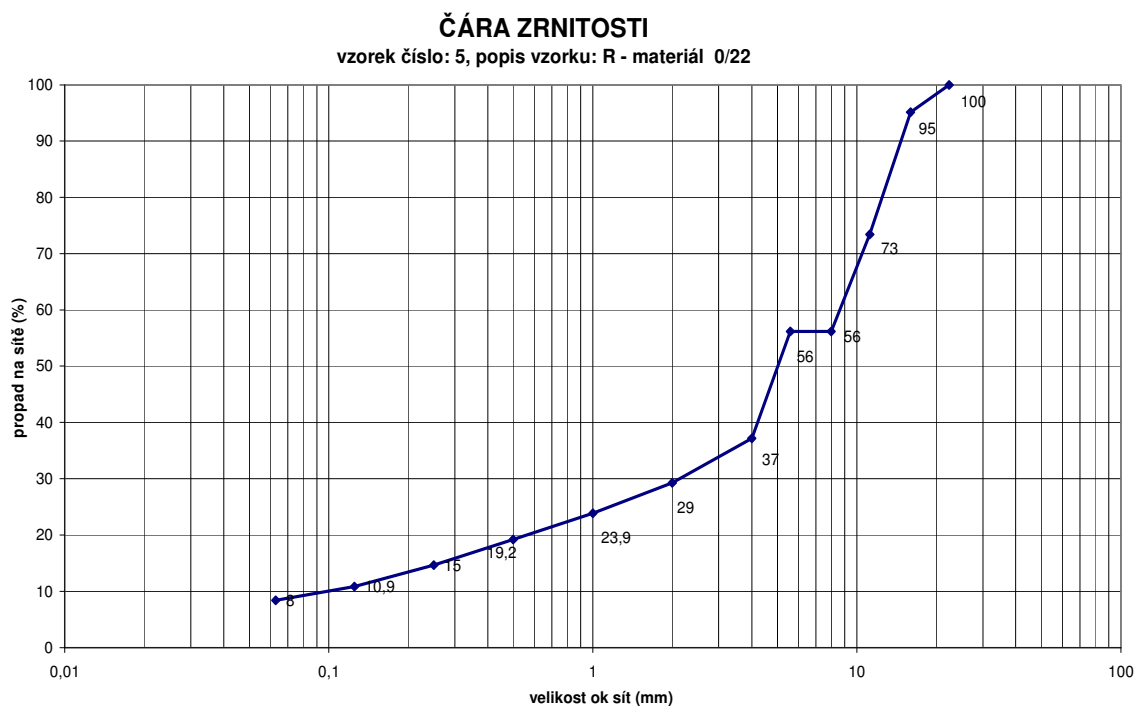
Tabulka 11 – Obsah asfaltového pojiva v R-materiálu

Stanovení zrnitosti – síťový rozbor

Zrnitost R-materiálu byla stanovena stejným způsobem jako zrnitost kameniva podle postupu v kapitole 5.2

Frakce	Velikost otvoru na síť [mm]												
	22,4	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	
R-materiál 0/22	100	95	73	56	56	37	29	24	19	15	11	8,4	

Tabulka 12 – Zrnitost R-materiálu frakce 0/22



Graf 8 – Stanovená čára zrnitosti R-materiálu

Zpětná destilace asfaltového pojiva

Z uschované směsi asfaltového pojiva a rozpouštědla (trichlorethylen) z extrakce za studena se pomocí zpětné destilace oddělí rozpouštědlo a získá se čisté asfaltové pojivo z R-materiálu, na kterém je možné provádět kontrolní zkoušky pojiva.



Obrázek 21 – Příklad přístroje pro zpětnou destilaci asfaltového pojiva

Zpětná destilace se provádí na destilačním přístroji při teplotě olejové lázně 115 °C a otáčkách 75 ot./minutu. Uzavíracím ventilem se nastaví tlak na 85 kPa a směs asfaltového pojiva s trichlorethylenem se nasává po částech do skleněné baňky, která je ponořena v olejové lázni. Pomocí vysoké teploty a podtlaku v baňce se trichlorethylen postupně odpařuje, v chladícím válci ochlazuje, kondenzuje a stéká do skleněné baňky umístěné pod chladícím válcem. Když se trichlorethylen přestane odpařovat, musí se zvýšit teplota olejové lázně na 160 °C a snížit tlak na 2 kPa. Pokud se po uplynutí 60 minut trichlorethylen nadále odpařuje, zvýší se teplota na 185 °C a destilace pokračuje do úplného odpaření trichlorethylenu a zaznamená se doba, po kterou se destilovalo s teplotou olejové lázně 185 °C.

- **Penetrace**

Penetrace na znovuzískaném asfaltovém pojivu se stanovuje podle postupu uvedeného v kapitole 5.1 Zkoušky provedené na asfaltových pojivech.

Pojivo	Znovuzískané pojivo
Penetrace [0,1 mm]	17

Tabulka 13 – Naměřená hodnota penetrace na znovuzískaném asfaltovém pojivu

- **Bod měknutí**

Bod měknutí ze znovuzískaného asfaltového pojiva z R-materiálu se stanoví stejným způsobem, jaký je uvedený v kapitole 5.1 Zkoušky provedené na asfaltových pojivech.

Pojivo	Znovuzískané pojivo
Bod měknutí [°C]	68,8

Tabulka 14 – Naměřená hodnota bodu měknutí asfaltového pojiva

5.4 Výroba zkušebních těles

Po provedení kontrolních zkoušek asfaltových pojiv, zkoušek kameniva a R-materiálu bylo možné navrhnout dvě asfaltové směsi ACL 22S, které se liší pouze použitím jiného asfaltového pojiva, ale obsah přidávaného pojiva (3,6 %) je pro obě směsi stejný a zároveň i procentuální zastoupení jednotlivých frakcí kameniva, které udává následující tabulka vycházející ze zjištěných čar zrnitosti v kapitole 3 – Navrhování asfaltových směsí a daných požadavků pro tento typ směsi uvedených v kapitole 2 – Asfaltové směsi.

Dávkování [%]	Frakce	22	16	11	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
20	R-mat.	100	95	73	56	37	29	24	19	15	11	8,4
24,4	11-22	93	14	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5
13	8-16	100	95	18	2	1	1	1	1	1	1	0,7
13	4-8	100	100	100	92	11	4	3	2	2	2	1,4
29	0-4 D	100	100	100	99	95	71	49	33	19	7	3,1
1,5	Filer	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	72,8
100,9		98	77	60	53	38	29	21	15	11	6	4

Tabulka 15 – Dávkování frakcí kameniva pro výrobu zkušebních těles

Pro návrh asfaltových směsí byla předem určena hodnota obsahu R-materiálu na 20 % hmotnosti směsi, ve kterém je však část (tedy 20 % z hodnoty znovuzískaného asfaltového pojiva zjištěného extrakcí za studena), tj. 0,9 % asfaltového pojiva a o tuto hodnotu musí být navýšeno celkové dávkování frakcí kameniva.

Postup výroby směsi

Kamenivo všech potřebných frakcí se vysouší v peci do ustálené hmotnosti při teplotě 105 °C. R-materiál se vysouší dle požadavků pouze při teplotě 50 °C, aby nedocházelo k degradaci asfaltového pojiva v R-materiálu. Po vysušení a zchladnutí se naváží potřebné množství všech složek směsi a opět se zahřívá, nyní na teplotu míchání 165 °C tak, že R- materiál se zahřívá na teplotu 110 °C a zbylé kamenivo na takovou teplotu (cca 175 °C), aby po smíchání měla směs teplotu požadovanou pro míchání. Poté se směs ještě ručně domíchá a přihřeje se na teplotu hutnění 155°C.

Pro zjištění objemových hmotností navržených směsí byla nehotněna 3 Marshallova tělesa pro každou směs. Hutnění se provádí pro směsi ACL 22S (odolné proti tvorbě trvalých deformací) 2x75 údery Marshallova pěchu.



Obrázek 22 – Marshallův zhutňovač v silniční laboratoři

- **Výpočet navážky a dávkování na Marshallova tělesa:**

Frakce kameniva	Dávkování [%]	Podíl [g]
Celkem	100,9	8072
R-mat.	20	1600
11-22	24,4	1952
8-16	13	1040
4-8	13	1040
0-4 D	29	2320
Filer	1,5	120
Pojivo	3,6 přidávané	299
Hmotnost navážky ze vzorce		8371

Tabulka 16 – Dávkování kameniva a pojiva na Marshallova tělesa

Objemová hmotnost vzorků byla zjištěna podle normy ČSN EN 12 697-6 nasycený suchý povrch (SSD).

1. Zjištění objemových hmotností na Marshallových tělesech

PmB 45/80-65	Vzorek I	Vzorek II	Vzorek III
m ₁ [kg]	1199,3	1199,9	1197,3
m ₂ [kg]	696,8	697,8	696,6
m ₃ [kg]	1201,6	1202,7	1200,7

PmB 45/80-65 RC	Vzorek I	Vzorek II	Vzorek III
m ₁ [kg]	1194,6	1199,7	1191,2
m ₂ [kg]	694,7	697,8	692,3
m ₃ [kg]	1199,1	1202,6	1194,2

Tabulka 17 a 18 – Naměřené hmotnosti zkušebních těles, nasycený suchý povrch (SSD)

- **Objemové hmotnosti asfaltových směsí:**

Objemové hmotnosti těles	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	Průměr
ACL 22S (PmB 45/80-65)	2372	2372	2371	2372
ACL 22S (PmB 45/80-65 RC)	2364	2373	2369	2369

Tabulka 19 – Zjištěné objemové hmotnosti Marshallových těles asfaltových směsí

Dále byla stanovena maximální objemová hmotnost asfaltových směsí v pyknometru a vypočtena mezerovitost směsí, která se dle požadavků měla pohybovat do 5 %. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následujících tabulkách.

- **Maximální objemové hmotnosti asfaltových směsí:**

Maximální objemové hmotnosti těles	ve vodě		v rozpouštědle (kontrolní)	Průměr
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	
ACL 22S (PmB 45/80-65)	2489	2484	2499	2487
ACL 22S (PmB 45/80-65 RC)	2476	2489	2494	2483

Tabulka 20 – Zjištěné maximální objemové hmotnosti v pyknometru

- **Mezerovitost asfaltových směsí:**

Mezerovitost asfaltových směsí	voda	rozpouštědlo
ACL 22S (PmB 45/80-65)	4,6%	5,1%
ACL 22S (PmB 45/80-65 RC)	4,6%	5,0%

Tabulka 21 – Výsledná mezerovitost asfaltových směsí

Protože zjištěné objemové hmotnosti se prakticky neliší a mezerovitosti směsí jsou totožné, byly použity pro výpočet navážky, která by se pro druhou směs v procentuálním dávkování kameniva lišila v řádu gramů, hodnoty pouze směsí ACL 22S s pojivem PmB 45/80-65 RC. Navážky se vypočítají ze vztahu uvedeného níže:

$$m = \rho_{zht} - 70) \times 0,32 \times 0,26 \times (\text{tl. desky} - 0,0008) \times 0,995 \quad [\text{kg}]$$

m – hmotnost navážky včetně asfaltového pojiva [kg]

ρ_{zht} - objemová hmotnost zhutněné směsi [kg/m³]

0,0008 – tloušťka plechu

0,995 – koeficient přepočtu

- Výpočet navážky a dávkování na 6 – ti centimetrovou desku:

Frakce kameniva	Dávkování [%]	Podíl [g]
Celkem	100,9	10867
R-mat.	20	2154
11-22	24,4	2628
8-16	13	1400
4-8	13	1400
0-4 D	29	3123
Filer	1,5	162
Pojivo	3,6 přidávané	406
Hmotnost navážky ze vzorce		11267

Tabulka 22 – Dávkování kameniva a pojiva na desku 6 cm

- Výpočet navážky a dávkování na 5 – ti centimetrovou desku:

Frakce kameniva	Dávkování [%]	Podíl [g]
Celkem	100,9	9027
R-mat.	20	1789
11-22	24,4	2183
8-16	13	1163
4-8	13	1163
0-4 D	29	2594
Filer	1,5	134
Pojivo	3,6 přidávané	337
Hmotnost navážky ze vzorce		9363

Tabulka 23 – Dávkování kameniva a pojiva na desku 5 cm

Pro provedení funkčních zkoušek asfaltových směsí je třeba vyrobit dvě 6 - ti centimetrové desky pro každou směs pro zkoušení tvorby trvalých deformací, dále tři 6 - ti centimetrové desky od každé směsi pro zkoušku stanovení modulu tuhosti a stanovení únavových charakteristik a jednu 5 - ti centimetrovou desku opět pro obě směsi pro zkoušku nízkoteplotních

vlastností. Celkově je třeba vyrobit deset 6 – ti centimetrových a dvě 5 – ti centimetrové desky, jejichž půdorysné rozměry jsou 26x32 centimetrů a vyrábí se v lamelovém zhutňovači dle normy ČSN EN 12 697-33.



Obrázek 23 – Lamelový zhutňovač pro hutnění desek

U každé vyrobené desky se stanoví objemová hmotnost, která by se neměla lišit o více než 1 % od objemové hmotnosti stanovené z Marshallových těles. Objemová hmotnost se stanoví opět metodou nasycený suchý povrch dle příslušné normy.

2. Zjištění objemových hmotností a míry zhutnění na 6 – ti centimetrových deskách

PmB 45/80-65	Vzorek I	Vzorek II	Vzorek III	Vzorek IV	Vzorek V
m ₁ [kg]	11,266	11,230	11,238	11,223	11,241
m ₂ [kg]	6,585	6,547	6,544	6,528	6,549
m ₃ [kg]	11,314	11,285	11,321	11,287	11,306

PmB 45/80-65 RC	Vzorek I	Vzorek II	Vzorek III	Vzorek IV	Vzorek V
m ₁ [kg]	11,188	11,242	11,226	11,223	11,236
m ₂ [kg]	6,531	6,552	6,540	6,543	6,544
m ₃ [kg]	11,245	11,303	11,273	11,278	11,300

Tabulka 24 a 25 - Hmotnosti desek 6 cm, nasycený suchý povrch (SSD)

- **Objemové hmotnosti desek a míra zhutnění:**

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	Průměr
ACL 22S (PmB 45/80-65)	2378	2366	2349	2354	2359	2361
Zhutnění	100,3%	99,8%	99,0%	99,3%	99,5%	99,68%
ACL 22S (PmB 45/80-65 RC)	2369	2362	2368	2366	2358	2365
Zhutnění	100,0%	99,7%	100,0%	99,9%	99,6%	99,83%

Tabulka 26 – Zjištěné objemové hmotnosti desek a míra zhutnění v závislosti na objemových hmotnostech Marshallových těles

3. Zjištění objemových hmotností a míry zhutnění na 5 – ti centimetrových deskách

PmB 45/80-65	Vzorek I
m ₁	9,335
m ₂	5,417
m ₃	9,385

PmB 45/80-65 RC	Vzorek I
m ₁	9,354
m ₂	5,443
m ₃	9,396

Tabulky 27 a 28 – Hmotnosti desek 5 cm, nasycený suchý povrch (SSD)

- **Objemové hmotnosti desek a míra zhutnění:**

	vzorek 1
ACL 22S (PmB 45/80-65)	2349
Zhutnění	99,02%

	vzorek 1
ACL 22S (PmB 45/80-65 RC)	2362
Zhutnění	99,7%

Tabulky 29 a 30 – Zjištěné objemové hmotnosti desek a míra zhutnění v závislosti na objemových vlastnostech Marshallových těles

4. Postup výroby zkušebních těles, jejich tvary a použití

- Po zjištění objemových hmotností všech desek byly jednotlivé desky rozděleny pro použití k funkčním zkouškám. Čtyři 6 – ti centimetrové desky, dvě od každé směsi, byly bez nutnosti úpravy připraveny na zkoušku odolnosti proti tvorbě trvalých deformací, jejíž průběh je blíže popsán v kapitole 4.1.



Obrázek 24 – Deska upevněná ve formě umístěné ve zkušebním zařízení [15]

- Zbylé desky této tloušťky bylo třeba rozřezat na kotoučové pile. Tím vzniklo 5 zkušebních těles (trapezoidů), z každé desky, o přibližných rozměrech 70x25x60x250mm. Všechny takto vyřezané trapezoidy o šířce 6 cm (rozměr e dle obrázku v kapitole 4.2) musely být dodatečně oříznuty z obou stran o 0,5 cm na $e = 5$ cm, což je správný postup vyžadovaný pro zkoušení modulů tuhosti a únavových charakteristik asfaltových směsí s velikostí kameniva $D \geq 16$ mm.



Obrázek 25 – Kotoučová pila k rozřezání desek na trapezoidy a trámečky

- Skutečné rozměry zkušebních těles

ACL 22S (PmB 45/80-65)	h1 [mm]	h2 [mm]	e [mm]	v [mm]	m [g]
P1 II	70,2	25,7	50,9	249,7	1426,4
P2 II	70,1	25,1	50,1	249,7	1420,8
P3 II	70,0	26,9	50,7	249,6	1443,2
P4 II	69,9	25,6	51,0	249,3	1438,1
P5 II	70,0	25,5	51,3	249,2	1445,9
P1 III	69,7	27,2	51,1	251,2	1466,7
P2 III	69,9	24,1	51,3	251,2	1423,0
P3 III	79,5	25,1	50,7	251,0	1412,8
P4 III	70,3	25,8	51,7	250,7	1465,4
P5 III	70,0	26,1	50,8	250,6	1446,9
P1 V	69,3	24,5	51,0	250,5	1404,6
P2 V	70,1	25,2	51,2	250,8	1435,6
P3 V	69,8	25,3	50,8	250,9	1405,1
P4 V	70,4	24,3	50,8	250,8	1423,1
P5 V	68,8	23,7	50,9	250,7	1392,4

Tabulka 31 – Naměřené rozměry a hmotnosti směsi ACL PmB 45/80-65

ACL 22S (PmB 45/80-65 RC)	h1 [mm]	h2 [mm]	e [mm]	v [mm]	m [g]
RC1 II	69,8	25,1	52,1	251,9	1453,0
RC2 II	69,3	25,5	51,1	252,2	1452,2
RC3 II	70,1	25,3	51,2	252,4	1463,7
RC4 II	69,4	25,5	51,1	252,3	1465,2
RC5 II	70,9	27,0	51,1	252,3	1506,9
RC1 IV	69,4	25,1	50,9	251,9	1397,5
RC2 IV	70,1	25,9	50,3	251,9	1440,2
RC3 IV	69,7	26,2	51,4	251,9	1453,8
RC4 IV	70,5	26,3	51,2	251,6	1481,1
RC5 IV	70,2	26,1	51,2	251,5	1471,7
RC1 V	70,1	25,7	51,1	250,1	1415,3
RC2 V	69,9	24,8	51,4	250,2	1424,4
RC3 V	70,1	26,6	51,3	250,1	1451,6
RC4 V	69,9	24,8	50,7	250,1	1420,0
RC5 V	69,9	25,6	51,0	250,1	1436,1

Tabulka 32 – Naměřené rozměry a hmotnosti směsi ACL PmB 45/80-65 RC

Očištěné a suché vzorky se následně nalepily pomocí směsi tvrdidla, pryskyřice a fileru na podkladní desky a k horním povrchům těles byly přilepeny příchytky umožňující uchycení do zkušebního zařízení. Aby došlo ke splnění normy ČSN EN 12 697 – 26, byla takto připravená tělesa z důvodu stabilizace uskladněna v laboratoři po dobu dvou týdnů.



Obrázek 26 – Sady 2x15 vzorků



Obrázek 27 – Detail trapezoidu připraveného ke zkoušení

- c) Poslední dvě 5 – ti centimetrové desky se rozřezaly na hranoly o rozměrech 50x50x200 mm. Z každé desky tak vzniklo 5 hranolů s tím, že pro zkoušení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí se použijí 3 hranoly z prostřední části desky. Další dva se uskladní v laboratoři pro případ rozdílných výsledků, které popisuje norma ČSN EN 12 697 – 46. Postup přípravy a lepení zkušebních těles je obdobný jako v předchozím kroku a důkladně popsán v kapitole 4.4 - Zkouška stanovení nízkoteplotních vlastností.



Obrázek 28 – Příklad zkušebního tělesa přilepeného k čelistem a upnutého v centrovacím zařízení [15]

5.5 Výsledky zkoušek asfaltových směsí

5.5.1 Odolnost proti tvorbě trvalých deformací

Průběh zkoušky je blíže specifikován v kapitole 4.1. Tabulky znázorňují protokoly získané ze záznamového zařízení, ze kterých se odečtou výsledné hodnoty průměrného přírůstku hloubky koleje WTS_{AIR} a průměrné hloubky vyjeté koleje PRD_{AIR} .

kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	$d_{10\,000} - d_{5\,000}$ (mm)
1	0,95	1,01	0,06
2	1,00	1,11	0,11
průměr	0,98	1,06	0,09
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$		0,017 mm
PRD_{AIR}		1,6	%

Tabulka 33 – Protokol s výsledky směsi ACL 22S PmB 45/80-65 z vyjížděče kolejí

kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	$d_{10\,000} - d_{5\,000}$ (mm)
1	0,90	0,97	0,07
2	0,92	0,97	0,05
průměr	0,91	0,97	0,06
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$	0,012	mm
PRD_{AIR}		1,5	%

Tabulka 34 – Protokol s výsledky směsi ACL 22S PmB 45/80-65 RC z vyjížděče kolejí

Z uvedených hodnot vyplývá, že odolnost proti tvorbě trvalých deformací vychází u asfaltové směsi s pojivem PmB 45/80-65 RC o něco vyšší, ale rozdíl není příliš znatelný.

5.5.2 Stanovení modulu tuhosti

Modul tuhosti asfaltových směsí byl stanoven podle postupu uvedeného v kapitole 4.2. Celkem bylo zkoušeno 30 vzorků při základní teplotě 15 °C a frekvencích 5, 10, 15, 20 a 25 Hz.

Směs ACL 22S Pmb 45/80 - 65	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
P1 II	7366	8118	8592	9071	9339
P2 II	7588	8405	8911	9381	9666
P3 II	6983	7705	8200	8616	8997
P4 II	7392	8154	8563	8938	9310
P5 II	7819	8517	8937	9302	9581
Průměr	7429,6	8179,8	8640,6	9061,6	9378,6
P1 III	7365	8104	8528	8971	9271
P2 III	7253	8014	8494	8929	9092
P3 III	6986	7745	8177	8567	8883
P4 III	6683	7355	7827	8117	8341
P5 III	7247	7899	8295	8623	8941
Průměr	7070,25	7775,75	8206,75	8569,5	8859
P1 V	7303	8033	8467	8866	9128
P2 V	6994	7680	8135	8496	8769
P3 V	7224	7860	8241	8578	8769
P4 V	7409	8192	8577	8927	9245
P5 V	7462	8217	8727	9167	9382
Průměr	7278,4	7996,4	8429,4	8806,8	9058,6
Celkový průměr	7272,9	7998,9	8441,2	8830,0	9115,9

Tabulka 35 – Výsledné naměřené moduly tuhosti směsi ACL 22S s pojivem PmB 45/80-65

Směs ACL 22S Pmb 45/80 - 65 RC	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
RC1 II	7333	8072	8541	8854	9224
RC2 II	7819	8512	9002	9308	9605
RC3 II	7954	8847	9205	9710	9874
RC4 II	7921	8660	9176	9503	9728
RC5 II	7984	8818	9236	9727	9912
Průměr	7802,2	8581,8	9032	9420,4	9668,6
RC1 IV	6402	7159	7662	8063	8329
RC2 IV	7210	7999	8505	8900	9169
RC3 IV	7120	7803	8197	8674	8922
RC4 IV	7792	8593	9151	9576	9836
RC5 IV	7468	8144	8591	9059	9237
Průměr	7198,4	7939,6	8421,2	8854,4	9098,6
RC1 V	6895	7535	7963	8256	8465
RC2 V	7334	8019	8536	8893	9196
RC3 V	6823	7600	8009	8427	8666
RC4 V	7159	7895	8368	8797	9118
RC5 V	6733	7391	7866	8275	8541
Průměr	6988,8	7688	8148,4	8529,6	8797,2
Celkový průměr	7329,8	8069,8	8533,867	8934,8	9188,133

Tabulka 36 – Výsledné naměřené moduly tuhosti směsi ACL 22S s pojivem PmB 45/80-65 RC

Rozdíl	0,8%	0,9%	1,1%	1,2%	0,8%
--------	------	------	------	------	------

Tabulka 37 – Rozdíl modulů tuhosti v % stanovený z celkových průměrů směsí

Po vyčíslení rozdílu stanoveného z celkového průměru obou asfaltových směsí pro dané frekvence bylo zjištěno, že modul tuhosti vychází přibližně o 1 % vyšší u směsi s asfaltovým pojivem PmB 45/80-65 RC, avšak rozptyl výsledků jednotlivých zkušebních těles u obou směsí je značný, hodnoty se hodně prolínají a nemůžeme říci, že vypočtený rozdíl má vypovídající hodnotu.

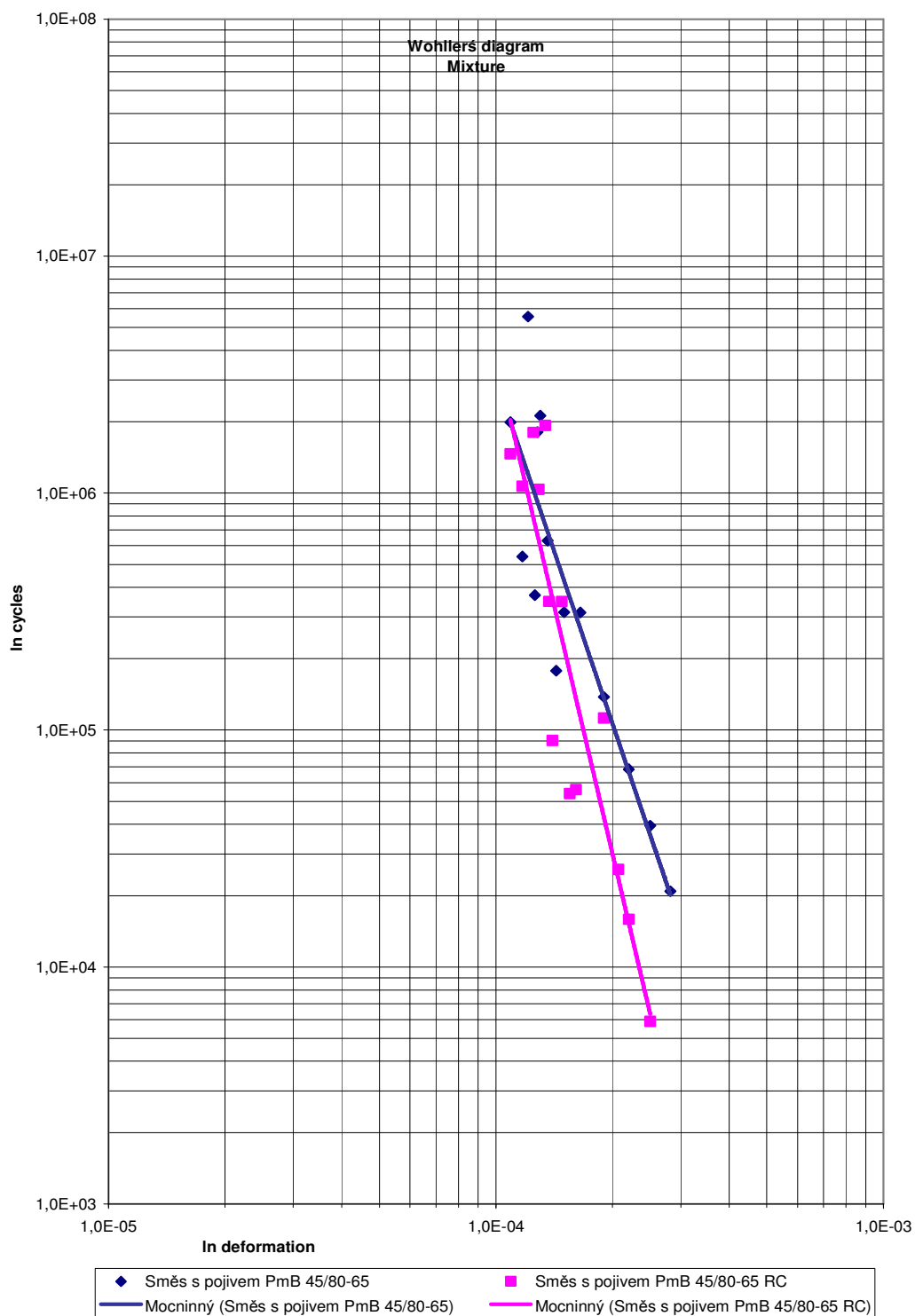
5.5.3 Stanovení únavových charakteristik

Způsob zkoušení únavových charakteristik je popsán v kapitole 4.3. Tato zkouška se provádí ve stejném zařízení a na stejných zkušebních tělesech, na

kterých byl již modul tuhosti stanoven, jako zkouška stanovení modulu tuhosti s tím rozdílem, že se zkouší při teplotě 10 °C a frekvenci 25 Hz do porušení vzorku nebo snížení modulu tuhosti na poloviční hodnotu.

Druh směsi	ϵ_6
ACL 22S – PmB 45/80-65	$125,7 * 10^{-6}$
ACL 22S – PmB 45/80-65 RC	$120,7 * 10^{-6}$

Tabulka 38 – Výsledné hodnoty únavových charakteristik [15]



Graf 9 – Wöhlerův diagram obou asfaltových směsí

Jako výsledek této zkoušky se bere hodnota přetvoření ε_6 odečtená z Wöhlerova diagramu, která odpovídá jednomu milionu cyklů zatížení. Z přiložené tabulky i diagramu je patrné, že u asfaltové směsi ACL 22S s pojivem PmB 45/80-65 vycházejí únavové charakteristiky lépe. Dle příslušné normy ČSN EN 12 697 – 24 je hodnota ε_6 jediným výsledkem zkoušky, což může být škoda, protože například parametr b udávající sklon únavové přímky diagramu vychází pro

asfaltovou směs s pojivem PmB 45/80-65 RC téměř dvojnásobný a značí, že tato směs se pomaleji unavuje.

5.5.4 Stanovení nízkoteplotních vlastností

Stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí bylo provedeno podle postupu z kapitoly 4.4. Následující tabulka obsahuje výchozí a naměřené hodnoty celkem šesti zkušebních těles zatěžovaných cyklickým snižováním teploty bez možnosti podélné deformace.

Asfaltová směs ACL 22S	PmB 45/80-65			PmB 45/80-RC		
	P2	P3	P4	RC2	RC3	RC4
Rozměry vzorku - mm :	50 x 50 x 200			50 x 50 x 200		
Výchozí teplota °C :	10	10	10	10	10	10
Teplotní spád °C/hod :	10	10	10	10	10	10
Síla při porušení kN :	7,18	7,19	7,77	8,91	8,01	8,36
Napětí při porušení MPa :	2,87	2,88	3,11	3,57	3,2	3,34
Teplota při porušení - komora °C :	-25,2	-24,2	-25,2	-24,9	-25,3	-26,5
Teplota při porušení - vzorek °C :	-21,2	-22,0	-23,4	-23,0	-21,2	-22,7
Průměrná teplota porušení - vzorek °C :	-22,2			-22,3		

Tabulka 39 – Protokoly s výsledky zkoušky nízkoteplotních vlastností [15]

Z uvedených hodnot vyplývá, že teploty při porušení vzorku jsou velmi podobné a průměrná teplota vzorku při porušení je pak prakticky stejná. To neplatí pro napětí při porušení vzorku, které vychází vyšší u asfaltové směsi s pojivem PmB 45/80-65 RC.

6 Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout, vyrobit a následně posoudit vlastnosti dvou asfaltových směsí, obsahující dané množství R-materiálu, pro ložné vrstvy ACL 22S s použitím běžného modifikovaného asfaltového pojiva pro jednu a speciálního modifikovaného asfaltového pojiva pro druhou směs, pomocí vybraných funkčních zkoušek, které by měly simulovat reálné zatížení a namáhání asfaltových směsí.

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole 5.5, je možné říci, že asfaltové směsi ACL 22 S, ať už s běžným modifikovaným asfaltovým pojivem PmB 45/80-65 nebo speciálním modifikovaným asfaltovým pojivem PmB 45/80-65 RC, mají velmi podobné nízkoteplotní vlastnosti a lze je tím pádem označit v této oblasti jako srovnatelné. Stejně tak lze chápat i výsledky zkoušení modulů tuhosti, kde bylo prokázáno, že u asfaltové směsi s asfaltovým pojivem PmB 45/80-65 RC vychází průměrný modul tuhosti přibližně o 1% vyšší, než u asfaltové směsi s pojivem PmB 45/80-65, avšak výsledky jednotlivých měření jsou natolik rozdílné, což je přisuzováno například tvarovým nepřesnostem vzorků nebo obsahu velkých zrn kameniva ve směsi a jejich případným shlukům v kritických průřezích, že výsledek není relevantní.

Zkouška odolnosti proti tvorbě trvalých deformací dokládá, že asfaltová směs se speciálním pojivem PmB 45/80-65 RC má mírně lepší odolnost proti tvorbě trvalých deformací, i když se tyto hodnoty pohybují v řádu desetin procent a tisícín milimetrů.

Naproti tomu hodnota ε_6 , která je podle příslušné normy výsledkem zkoušky únavových charakteristik, vychází lépe pro směs s běžným modifikovaným asfaltovým pojivem. Norma ale nebere v úvahu parametr b , který odpovídá sklonu přímky Wöhlerova diagramu a značí rychlost únavy směsi. Tento parametr vychází téměř dvojnásobný u asfaltové směsi se speciálním modifikovaným pojivem, což znamená, že se pomaleji unavuje, avšak důležitější je hodnota přetvoření při milionu cyklů, která vychází u dané směsi o něco hůře.

Provedenými funkčními zkouškami nelze potvrdit, že by použitím speciálního modifikovaného asfaltového pojiva došlo k výraznému zlepšení nebo naopak zhoršení zjišťovaných vlastností asfaltových směsí.

7 Seznam použité literatury

- [1] ČSN 73 6177 Měření a hodnocení protismykových vlastností povrchů vozovek
- [2] ČSN 73 6175 Měření a hodnocení nerovností povrchů vozovek
- [3] BM02 Pozemní komunikace II – Přednášky text 11 – Údržba a poruchy netuhých vozovek
- [4] ČSN EN 12 697 – 22 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 22: Zkouška poježdění kolem
- [5] (http://www.mogul.eu/cs/sd/novinky/firemni-novinky-2011/25_11_2011_silnice.html)
- [6] BM02 Pozemní komunikace II – Přednášky text 10 – Cementobetonové kryty
- [7] BM02 Pozemní komunikace II – Přednášky text 3 – Nestmelené podkladní vrstvy
- [8] BM02 Pozemní komunikace II – Přednášky prezentace 3 – Nestmelené podkladní vrstvy
- [9] BM02 Pozemní komunikace II – Přednášky prezentace 4 – Stmelené podkladní vrstvy
- [10] ČSN EN 13 108 – 1 Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton
- [11] Přednáška 4 asfaltové směsi - <http://files.mondy.webnode.cz/200000384-3e50c3f4a9/p%C5%99edn%C3%A1%C5%A1ka%20%20-%20ASFALTOV%C3%89%20SM%C4%9ASI%20student%20podklady.pdf>
- [12] BM02 Pozemní komunikace II – Přednášky prezentace, text, poznámky 7 – Asfaltové směsi
- [13] Prezentace – Funkční zkoušky asfaltových směsí 2
- [14] ČSN EN 12 697 – 46 Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem
- [15] Zpráva – VUT – OMV 2.část – Zkoušky asfaltových směsí
- [16] ČSN 73 6160 Zkoušení asfaltových směsí
- [17] ČSN EN 12 697 – 26 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost

- [18] (http://www.casopisstavbnictvi.cz/funkcni-zkousky-asfaltovych-smesi_N278, Ing. Petr Hýzl, Ph.D.)
- [19] ČSN EN 12 697 – 6 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa
- [20] ČSN EN 12 697 – 33 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek
- [21] ČSN EN 12 697 – 34 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 34: Marshallova zkouška
- [22] ČSN EN 12 697 – 35 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 35: Laboratorní výroba směsi
- [23] ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou
- [24] ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí- Metoda kroužek a kulička
- [25] ČSN EN 933 – 1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor
- [26] PĚCH, P. *Vliv přípravy vzorků na modul tuhosti asfaltových směsí*, Bc.práce

8 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Specifikace makrotextury a mikrotextury [1]	11
Obrázek 2 – Názvosloví z hlediska délky vlny [2].....	11
Obrázek 3 – Podélná nerovnost [2].....	12
Obrázek 4 – Postup měření podélné nerovnosti povrchu vozovky latí [2].....	12
Obrázek 5 – Příčný profil vozovky vykazující výšku hřbetu I_R , hrboleu I_B a poklesu I_D [2].....	12
Obrázek 6 – Rozdělení vrstev vozovky [7].....	15
Obrázek 7 – Kritérium filtrace a propustnosti [7].....	16
Obrázek 8 – Příklad grafu závislosti objemové hmotnosti zhutněné asfaltové směsi a maximální objemové hmotnosti na obsahu pojiva v % hmotnosti [16] .	26
Obrázek 9 – Zkušební zařízení – vyjížděč kolejí [13].....	29
Obrázek 10 - Kontrola (ověření) uložení (ukotvení).....	32
Obrázek 11 – Rozměry zkušebních těles	33
Obrázek 12 – Upevnění zkušebního tělesa [17].....	33
Obrázek 13 – Příklad Wöhlerova diagramu [18]	35
Obrázek 14 – Podstata zkoušky TSRST [14].....	36
Obrázek 15 – Příklad zkušebního zařízení pro provádění zkoušek jednoosým tahem při nízkých teplotách [14]	37
Obrázek 16 – Příklad centrovacího rámu pro přípravu zkušebního tělesa [14] .	38
Obrázek 17 – Zařízení pro měření penetrace (penetrometr)	40
Obrázek 18 – Zkušební zařízení pro zkoušení bodu měknutí asfaltových pojiv	41
Obrázek 19 – Zařízení pro stanovení zrnitosti kameniva	42
Obrázek 20 – Extrakční zařízení.....	44
Obrázek 21 – Přístroj pro zpětnou destilaci asfaltového pojiva	46
Obrázek 22 – Marshallův zhutňovač v silniční laboratoři	48
Obrázek 23 – Lamelový zhutňovač pro hutnění desek	52
Obrázek 24 – Deska upevněná ve formě umístěné ve zkušebním zařízení [15].	54

Obrázek 25 – Kotoučová pila k rozřezání desek na trapezoidy a trámečky	55
Obrázek 26 – Sady 2x15 vzorků.....	56
Obrázek 27 – Detail trapezoidu připraveného ke zkoušení	56
Obrázek 28 – Příklad zkušebního tělesa přilepeného k čelistem a upnutého v centrovacím zařízení [15].....	57

9 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Propustnost asfaltových směsí v závislosti na mezerovitosti [11] ..	14
Tabulka 2 – Označení asfaltového betonu dle normy ČSN EN 13 108 – 1 [10]...	18
Tabulka 3 – Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu dle normy ČSN EN 13 10 – 1 [10].....	18
Tabulka 4 – Požadavky na asfaltové směsi ložných vrstev dle ČSN EN 13108-1 [10].....	19
Tabulka 5 – Tabulka propadů na sítích pro použité frakce kameniva (Sítový rozbor).....	23
Tabulka 6 – Minimální rozměry zkušebních těles.....	33
Tabulka 7 – Rozměry hranolových a válcových zkušebních těles (mm) [14]	37
Tabulka 7 – Naměřené hodnoty penetrace asfaltových pojiv	39
Tabulka 8 – Naměřené hodnoty bodu měknutí asfaltových pojiv	41
Tabulka 9 – Sítový rozbor frakcí kameniva.....	43
Tabulka 11 – Obsah asfaltového pojiva v R-materiálu	45
Tabulka 12 – Zrnitost R-materiálu frakce 0/22.....	45
Tabulka 13 – Naměřená hodnota penetrace na znovuzískaném asfaltovém pojivu	46
Tabulka 14 – Naměřená hodnota bodu měknutí asfaltového pojiva	47
Tabulka 15 – Dávkování frakcí kameniva pro výrobu zkušebních těles	47
Tabulka 16 – Dávkování kameniva a pojiva na Marshallova tělesa.....	49
Tabulka 17 a 18 – Naměřené hmotnosti zkušebních těles, nasycený suchý povrch (SSD)	49
Tabulka 19 – Zjištěné objemové hmotnosti Marshallových těles asfaltových směsí.....	49
Tabulka 20 – Zjištěné maximální objemové hmotnosti v pyknometru.....	50
Tabulka 21 – Výsledná mezerovitost asfaltových směsí	50
Tabulka 22 – Dávkování kameniva a pojiva na desku 6 cm	51
Tabulka 23 – Dávkování kameniva a pojiva na desku 5 cm	51

Tabulka 24 a 25 - Hmotnosti desek 6 cm, nasycený suchý povrch (SSD).....	53
Tabulka 26 – Zjištěné objemové hmotnosti desek a míra zhutnění v závislosti na objemových hmotnostech Marshallových těles.....	53
Tabulky 27 a 28 – Hmotnosti desek 5 cm, nasycený suchý povrch (SSD).....	53
Tabulka 31 – Naměřené rozměry a hmotnosti směsi ACL PmB 45/80-65	55
Tabulka 32 – Naměřené rozměry a hmotnosti směsi ACL PmB 45/80-65 RC.....	56
Tabulka 33 – Protokol s výsledky směsi ACL 22S PmB 45/80-65 z vyjížděče kolejí.....	57
Tabulka 34 – Protokol s výsledky směsi ACL 22S PmB 45/80-65 RC z vyjížděče kolejí.....	58
Tabulka 35 – Výsledné naměřené moduly tuhosti směsi ACL 22S s pojivem PmB 45/80-65.....	59
Tabulka 36 – Výsledné naměřené moduly tuhosti směsi ACL 22S s pojivem PmB 45/80-65 RC	60
Tabulka 37 – Rozdíl modulů tuhosti v % stanovený z celkových průměrů směsí	60
Tabulka 38 – Výsledné hodnoty únavových charakteristik [15].....	61
Tabulka 39 – Protokoly s výsledky zkoušky nízkoteplotních vlastností [15]	63

10 Seznam grafů

Graf 1 – Čára zrnitosti fileru	21
Graf 2 – Čára zrnitosti kameniva frakce 0/4	21
Graf 3 – Čára zrnitosti kameniva frakce 4/8	21
Graf 4 – Čára zrnitosti kameniva frakce 8/16	22
Graf 5 – Čára zrnitosti kameniva frakce 11/22	22
Graf 6 – Čára zrnitosti R-materiálu.....	24
Graf 7 – Výsledná čára zrnitosti směsi ACL 22S.....	25
Graf 8 – Stanovená čára zrnitosti R-materiálu	45
Graf 9 – Wöhlerův diagram obou asfaltových směsí.....	62