



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Katedra silničních staveb

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Analýza složení asfaltového R-materiálu
a jeho využití v asfaltové směsi**

Analysis of Reclaimed Material and its Use in Asphalt
Mixes

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: Ing. Petr Mondschein, Ph.D.

Filip Hlávka

Praha 2019



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hlávka Jméno: Filip Osobní číslo: 434805
Zadávající katedra: K136 - Katedra silničních staveb
Studijní program: SI - Stavební inženýrství
Studijní obor: K - Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Analýza složení asfaltového R-materiálu a jeho využití v asfaltové směsi

Název bakalářské práce anglicky: Analysis of Reclaimed material and its Use in Asphalt mixes

Pokyny pro vypracování:

Zpracování rešerše recyklace asfaltových směsí a asfaltových vrstev s důrazem na technologii za horka na obalovně, rejuvenace asfaltových směsí, praktická analýza R-materiálu, návrh asfaltové směsi s vyšším množstvím R-materiálu za využití konkrétního rejuvenátoru

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 13108-8 Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 8: R-materiál, ČSN 736121 Stavba vozovek - Hutněné asfaltové vrstvy - Provádění a kontrola shody, zkušební normy asfaltových směsí, odborné články z tuzemských a zahraničních konferencí, Technologie stavby vozovek, Ing. Jan Zajíček a kol.

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Petr Mondschein, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 18.2.2019 Termín odevzdání bakalářské práce: 26.5.2019
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

25-02-2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně, s výjimkou odborných konzultací s vedoucím mé práce p. Ing. Petrem Mondscheinem, Ph.D. a ostatními pracovníky silniční laboratoře Fakulty stavební ČVUT.

Dále prohlašuji, že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Praze dne

.....
Filip Hlávka



Poděkování

Tímto bych rád poděkoval především vedoucímu mé bakalářské práce p. Ing. Petrovi Mondsheinovi, Ph.D. za poskytnutí rad, trpělivé vedení a čas strávený při konzultacích. Dále děkuji všem ostatním členům silniční laboratoře Fakulty stavební ČVUT za odborné rady, výpomoc a ochotu, a to především p. Ing. Janovi Sudovi, Ph.D., p. Ing. Janovi Valentinovi, Ph.D. a pí. Ing. Pavle Vackové.



Abstrakt

Teoretická část se zabývá obecně R-materiálem, jeho získáním, použitím a uplatněním v asfaltových směsích. Dalším tématem jsou obalovny, které jsou rozlišeny dle způsobu výroby směsí s obsahem R-materiálu. Následně je popsáno stárnutí asfaltových pojiv a potřeba ožívování R-materiálů, přičemž je zde odkázáno na rejuvenátor *ANOVATM 1817*, který je v práci využit.

V praktické části je cílem zanalyzovat dostupný R-materiál, oživit ho pomocí rejuvenátoru, využít ho při návrhu asfaltové směsi ACL 16 S, zjistit vlastnosti směsi a porovnat je s vlastnostmi referenční směsi. Analýza R-materiálu spočívá v určení složení kameniva a vlastností obsaženého asfaltového pojiva. Zkoušené vlastnosti směsí jsou náchylnost k trvalým deformacím, odolnost vůči vodě a mrazu, moduly tuhosti a odolnost vůči šíření trhlin.

Klíčová slova

R-materiál, Recyklace, Asfaltové pojivo, Asfaltová směs, Rejuvenátor, Asfaltový beton

Abstract

The theoretical part is mainly about RAP (Reclaimed asphalt pavement), its acquisition, use and application in asphalt mixtures. Next topic describes types of asphalt plants which are differentiated according to the method of production of mixtures containing RAP. The following describes aging of asphalt binders and need to rejuvenate RAP. The same chapter also refers to rejuvenator *ANOVATM 1817* which is used in the thesis.

The practical part is devoted to analyzing the available RAP, to rejuvenate it using a rejuvenator, to use it in the design of asphalt mixture ACL 16 S, to determine the properties of the mixture and to compare them with properties of a reference mixture. The analysis of RAP consists in determining the aggregate composition and the properties of the asphalt binder contained. The tested properties of the mixtures are susceptibility to permanent deformations, water and frost sensitivity, stiffness modules and crack propagation resistance.

Key words

RAP (Reclaimed asphalt pavement), Recycling, Asphalt binder, Asphalt mixtures, Rejuvenator, Asphalt concrete



Obsah

1.	ÚVOD.....	- 8 -
1.1	Recyklace asfaltových vozovek	- 8 -
1.2	Cíle práce	- 9 -
2.	TEORETICKÁ ČÁST	- 10 -
2.1	R-materiál.....	- 10 -
2.1.1	Získání R-materiálu	- 10 -
2.1.2	Použití R-materiálu	- 11 -
2.1.3	R-materiál v asfaltových směsích	- 11 -
2.2	Obalovny a zpracování R-materiálu.....	- 13 -
2.2.1	Recyklace v mísícím centru za studena	- 13 -
2.2.2	Šaržová obalovna – dávkování studeného R-materiálu	- 14 -
2.2.3	Šaržová obalovna – dávkování přehřátého R-materiálu	- 15 -
2.2.4	Dvouplášť	- 15 -
2.2.5	Kontinuální obalovna – metoda Drum-mix	- 16 -
2.3	Stárnutí a ožívování asfaltových pojiv	- 17 -
2.3.1	Stárnutí asfaltových pojiv	- 17 -
2.3.2	Ožívování asfaltových pojiv	- 18 -
2.3.3	Oživovací přísada ANOVA™ 1817	- 18 -
3.	PRAKTICKÁ ČÁST	- 21 -
3.1	Kamenivo	- 21 -
3.2	Pojivo	- 23 -
3.2.1	Stanovení penetrace jehlou	- 23 -
3.2.2	Stanovení bodu měknutí	- 24 -
3.3	R-materiál.....	- 25 -
3.3.1	Stanovení zrnitosti	- 25 -
3.3.2	Extrakce asfaltového pojiva.....	- 28 -
3.3.3	Destilace asfaltového pojiva	- 29 -
3.3.4	Obsah asfaltového pojiva.....	- 29 -
3.3.5	Stanovení penetrace jehlou	- 30 -
3.3.6	Stanovení bodu měknutí	- 30 -
3.3.7	Oživení R-materiálu.....	- 31 -
3.4	Návrh a výroba směsí ACL 16 S.....	- 32 -
3.4.1	Požadavky na ACL 16 S.....	- 33 -
3.4.2	Laboratorní výroba směsi	- 35 -
3.4.3	Výroba válcových těles.....	- 35 -



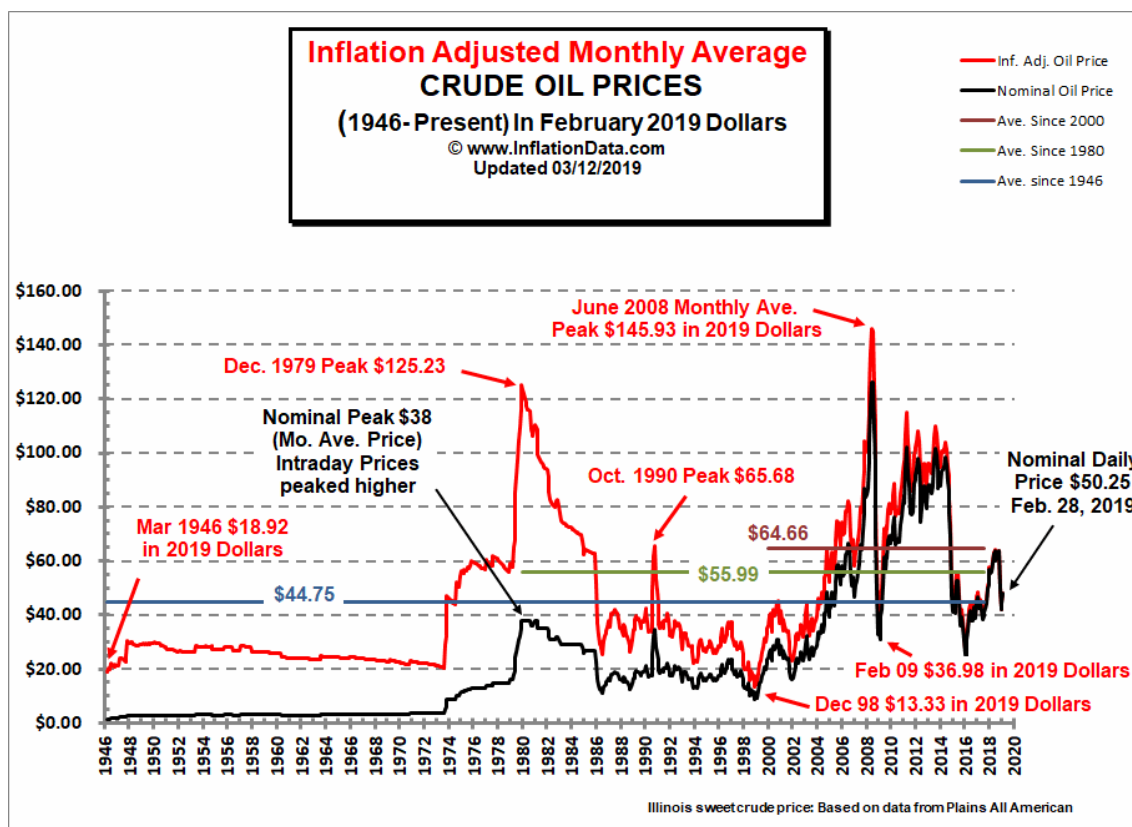
3.4.4	Výroba desek	- 36 -
3.4.5	Stanovení maximální objemové hmotnosti.....	- 37 -
3.4.6	Stanovení objemové hmotnosti.....	- 39 -
3.4.7	Stanovení mezerovitosti.....	- 40 -
3.4.8	První optimalizace	- 41 -
3.4.9	Druhá optimalizace	- 47 -
3.5	ACL 16 S s R-materiálem a bez R-materiálu.....	- 52 -
3.5.1	Složení směsí	- 52 -
3.5.2	Výroba směsí a zkušebních těles	- 55 -
3.5.3	Objemová hmotnost, rozměry a mezerovitost	- 55 -
3.5.4	Odolnost vůči vodě a mrazu	- 58 -
3.5.5	Zkouška pojíždění kolem.....	- 61 -
3.5.6	Tuhost	- 64 -
3.5.7	Šíření trhliny	- 67 -
4.	ZÁVĚR	- 71 -
5.	SEZNAM LITERATURY	- 72 -
6.	SEZNAM TABULEK	- 74 -
7.	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	- 75 -
8.	SEZNAM VZORCŮ.....	- 75 -
9.	SEZNAM GRAFŮ	- 76 -
10.	SEZNAM PŘÍLOH.....	- 76 -



1. ÚVOD

1.1 Recyklace asfaltových vozovek

S pojmem recyklace se v dnešní době setkáváme víceméně každodenně. Proces nakládání s odpadem tak, aby ho bylo možno znovu použít, je v dnešní době nutností, a proto není divu, že je velkým tématem ve stavitelství. Budeme-li se soustředit především na silniční stavby, v tomto oboru se již několik desetiletí celosvětově využívá recyklace asfaltových vrstev netuhých vozovek. K jejímu dřívějšímu rozvoji přispěla především ropná krize v průběhu 70. let 20. století (Obrázek 1), kdy se skokově zvýšila cena za barel ropy, která tvoří hlavní surovinu pro výrobu asfaltového pojiva. V dnešní době vede k rozvoji zejména snaha o snížení spotřeby přírodního kameniva a asfaltového pojiva, tedy snaha o udržitelný rozvoj silničního stavitelství. [1]



Obrázek 1: Vývoj cen ropy uvažující inflaci od roku 1946 do současnosti [2]

Recyklace asfaltových vozovek je progresivní technologií dopravního stavitelství. Ve srovnání s finančně náročnou klasickou technologií rekonstrukce totiž umožňuje opravit při stejném objemu investic více kilometrů vozovek a díky efektivnímu využití strojů výrazně zkrátit dobu oprav. Recyklace nám dovoluje zvládnout opravu během krátké doby, a přitom je šetrnější k životnímu prostředí. [3]



Důvody pro recyklaci jsou především následující:

- Zachování materiálových a energetických zdrojů
 - Materiálových (kamenivo, asfalt)
 - Energetických (pohonné hmoty, topná média atd.)
- Ochrana životního prostředí
 - Redukce skleníkových plynů, zejména CO₂
 - Snížení znečištění ovzduší (výfukové plyny, hluk)
 - Omezení skládek
- Ekonomický přínos
 - Snížení nákladů
 - Snížení zatížení komunikací, zkrácení doby výstavby [4]

Cíle recyklace:

- Přeměna poškozené a nehomogenní konstrukce vozovky vykazující zjevné známky postupné degradace
- Zlepšení proměnlivosti fyzikálně mechanických a reologických vlastností vrstev původní konstrukce vozovky
- Zvýšení celkové únosnosti a prodloužení životnosti konstrukce vozovky
- Zvýšení odolnosti obrusné vrstvy vůči mechanickému opotřebení
- Zlepšení protismykových vlastností a zajištění reprofilace krytu vozovky s vyrovnáním nerovností
- Ekologicky šetrné odstranění škodlivých složek konstrukcí vozovek, kde bylo jako pojivo využito dehtu (recyklace za studena) [5]

Současné trendy recyklace:

- Zvyšování podílu R-materiálu ve směsích pro konstrukční vrstvy vozovek
- Prezentace zejména asfaltové vozovky jako 100 % recyklovatelné (bezodpadová konstrukce)
- Šetrné znovupoužití materiálu ze směsí obsahujících jako pojivo dehet (je zaříděn jako karcinogenní)
- Prosazování recyklace prováděné za studena, pěnoasfaltových technologií a teplých asfaltových technologií [5]

Metody recyklace:

- Za studena na místě
- Za studena v míchacím centru
- Za horka na místě
- Za horka v obalovně

1.2 Cíle práce

Cílem bakalářské práce je seznámení se základními principy využití R-materiálu v asfaltových směsích, s nutností správného nakládání s R-materiálem, respektive zestárlým pojivem, které obsahuje a zpracování rešerše v těchto oblastech.

V praktické části je cílem navrhnout asfaltovou směs s vysokým obsahem R-materiálu a srovnat s referenční směsí, která R-materiál neobsahuje.



2. TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část bakalářské práce je rešerší v oblasti R-materiálu, kde je shrnuto jeho získání, použití a způsoby zpracování. Dále je zde vysvětlen princip ožívání tohoto recyklátu z důvodu procesu stárnutí asfaltových pojiv a zároveň jsou na závěr popsány vlastnosti konkrétního rejuvenátoru, který byl při bakalářské práci využit.

2.1 R-materiál

Pojem R-materiál (reclaimed asphalt – RA) definuje norma ČSN EN 13108-8 jako upravený materiál z asfaltové směsi znovuzískaný odfrézováním asfaltových vrstev nebo drcením desek vybouraných z asfaltových vozovek nebo velkých kusů asfaltové směsi a asfaltové směsi z neshodné nebo nadbytečné výroby. R-materiál musí být vhodný a připravený k použití jako stavební materiál pro asfaltovou směs po jeho odzkoušení, posouzení a klasifikaci podle této normy. [6]

Označení zrnitosti R-materiálu je $U_{RA} d/D$. Písmeno U udává maximální zrnitost R-materiálu jakožto nejmenší velikost síta v milimetrech, kterým propadne 100 % zrn asfaltové směsi, RA značí R-materiál a d/D je označení zrnitosti kameniva v milimetrech. D je velikost horního síta kameniva v R-materiálu, jedná se o větší z těchto dvou sít: nejmenší síto s propadem 100 % dělené 1,4 nebo nejmenší síto s propadem 85 %. [6]

Důležitými poznatky o R-materiálu jsou obsah a druh cizorodých látek, dále druh, vlastnosti (penetrace, bod měknutí a viskozita) a obsah pojiva, zrnitost kameniva a horní síto D a zrnitost R-materiálu. [6]

2.1.1 Získání R-materiálu

Recyklovatelný asfaltový materiál (RAM) je zrnitostně nestejnorodá směs kameniva stmelěného, kameniva částečně obalovaného nebo potaženého asfaltovým pojivem. Směs je získána buď vyfrézováním nebo vybouráním hutněných asfaltových vrstev. [5]

R-materiálem se rozumí RAM získaný frézováním dříve provedených hutněných asfaltových vrstev upravený následným tříděním s případným předdrcením a přetříděním přepadu a homogenizací nebo získaný vybouráním dříve provedených hutněných asfaltových vrstev upravený následným drcením a tříděním. [5]

Získat materiál ze starých vozovek se dá vybouráním celé konstrukce vozovky nebo jejích jednotlivých vrstev, přičemž v jednom záběru je možné vybourat vrstvy stmelěné asfaltovým pojivem a v dalším potom zbývající vrstvy. Separované vybourání umožňuje opětovné zabudování asfaltem stmelěných vrstev v asfaltových směsích. [5]

Při frézování lze asfaltový materiál získat studenou či teplou cestou. Je preferováno frézovat po jednotlivých vrstvách z důvodu různé kvality (oddělení vrstev s modifikovaným a nemodifikovaným pojivem) a různého zrnitostního složení. Touto metodou se získá kvalitnější materiál, který je vhodnější pro jeho další využití. [5]



Frézování se uplatní na vozovkách, u nichž skončila životnost vrstvy, na místních komunikacích, kde změna nivelety vozovky není možná (návaznost na chodníky a odvodnění) nebo na mostních objektech, kde nelze klást další asfaltové vrstvy s ohledem ke zvětšení stálého zatížení mostní konstrukce. Dále se využívá při úpravě příčného profilu po odstranění malých nerovností a deformací, které nepřevyšují 10 mm, a při provizorní obnově drsnosti povrchu vozovky. [5]

Silniční frézy rozlišujeme následovně:

- Malé – šířka frézovacího válce do 500 mm, záběrová hloubka do 100 mm
- Střední - šířka frézovacího válce 500-1000 mm, záběrová hloubka do 180 mm
- Velké – šířka frézovacího válce nad 1000 mm, záběrová hloubka do 350 mm
- Speciální – šířka frézovacího válce do 350 mm, záběrová hloubka až 100 mm
 - Využívají se pro sanační práce na odfrézování poškozených krytových vrstev v blízkosti kanalizačních poklopů, uličních vpustí, rigolů apod. [5]

2.1.2 Použití R-materiálu

Využitelnost R-materiálu při výstavbě a údržbě pozemních komunikací je široká. Využívá se zejména pro hutněné asfaltové vrstvy, provádění výsprav výtlučků za horka malým recyklérem a do asfaltových směsí obalovaných za studena. Užití R-materiálu je dáno především frakcí kusové zrnitosti. [5]

R-materiál se v dnešní době používá již pro všechny třídy dopravního zatížení pozemních komunikací, pro konstrukce jiných dopravních ploch, nemotoristických komunikací nebo pro zpevňování krajnic či konstrukcí polních a lesních cest. [5]

2.1.3 R-materiál v asfaltových směsích

Asfaltová směs je definována jako homogenní směs složená typicky z hrubého a drobného kameniva, fileru a asfaltového pojiva, která se použije při stavbě vozovky. Využití R-materiálu v asfaltových směsích je dlouhodobě velkým tématem. V České republice se asfaltový recyklát může v současné době používat jen při výrobě asfaltových betonů (AC), asfaltových koberců otevřených (AKO) a asfaltových směsí s vysokým modulem tuhosti (VMT). V posledních letech se řeší především použití R-materiálu ve směsích SMA (asfaltový koberec mastixový), u kterých se očekává vzrůst využívání z důvodu zákazu použití asfaltového betonu v obrusných vrstvách pro nejvyšší třídy dopravního zatížení. [7]

Přípustné množství R-materiálu v asfaltových směsích je uveden především v přílohách normy ČSN 73 6121 *Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody*. Norma udává požadavky na směsi pro asfaltové koberce otevřené (AKO), asfaltové betony (AC), asfaltové betony pro velmi tenké vrstvy (BBTM), asfaltové koberce mastixové (SMA) a asfaltové koberce drenážní (PA). Právě s výjimkou směsí typu AKO a AC je vždy v normě napsáno, že se R-materiál v daných směsích nesmí používat. Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT) v této normě obsažené nejsou, podmínky pro jejich použití obsahuje dokument *TP 151 Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT)*. [7] [8]



Do asfaltového koberce otevřeného lze R-materiál získaný z hutněných asfaltových vrstev v omezeném množství (maximálně 20 %) použít. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v *Tabulce 1*. [7]

Vrstva		
Obrusná	Ložní	Podkladní
10	20	20

Tabulka 1: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi AKO [7]

Co se týče klasického asfaltového betonu (nejčastěji používaného typu směsi), procentuální zastoupení R-materiálu ve směsi je benevolentnější. Z *Tabulky 2* je evidentní, že se může použít v jakémkoli druhu směsi. V obrusných vrstvách je přípustný obsah do 25 %, v ložných až 40 % a v podkladních dokonce 60 %. Dále je patrné, že větší procento R-materiálu je dovoleno ve směsích nepříliš náročných na kvalitu (bez označení, CH), naopak přísnější požadavky jsou na směsi s označením + a S. [7]

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⁾	ACP 16 S	50
ACO 8 CH	25	ACL 16 +	30	ACP 16 +	60
ACO 11 S	15	ACL 16	40	ACP 22 S	50
ACO 11 +	15	ACL 22 S	30/15 ¹⁾	ACP 22 +	60
ACO 11	25	ACL 22 +	30		
ACO 16 S	15	ACL 22	40		
ACO 16 +	15				
ACO 16	25				

¹⁾ Při výrobě asfaltových směsí s nemodifikovaným asfaltem je možné použít R-materiál v množství do 30 %, v případě použití polymerem modifikovaného asfaltu v množství do 15 %. Původ použitého R-materiálu musí být výhradně ze znovuzískané asfaltové směsi krytý asfaltových vozovek.

Tabulka 2: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi AC [7]

V *Tabulce 3* jsou převzaty hodnoty z *TP 151*, kde je uveden nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v asfaltových směsích s vysokým modulem tuhosti. Za splnění podmínek, které jsou v dokumentu sepsány, se může dávat až 25 % R-materiálu do ložních vrstev a až 30 % do podkladních. [8]

Směs	VMT 22	VMT 16
Podíl R-materiálu ²⁾	max. 25 % (15 %) pro ložní vrstvy max. 30 % pro podkladní vrstvy	
Pozn. ²⁾ : Hodnota v závorce platí v případě použití modifikovaných asfaltů. V případě výroby směsi v obalovacích soupravách s přerušovaným cyklem výroby a dávkováním nepředehtřivaného R-materiálu lze dávkovat max. 20 %. Pokud je hodnota bodu měknutí KK asfaltového pojiva přidávaného R-materiálu vyšší jak 70 °C, je nutno stanovit vlastnosti směsi za nízkých teplot.		

Tabulka 3: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi VMT [8]



Z tabulek vyplývá, že největší množství R-materiálu je možné přidávat do směsí asfaltového betonu, u kterých se zároveň nejvíce využívá. Do budoucna je snahou používat R-materiál i v dalších asfaltových směsích a jeho podíl v nich zvyšovat.

2.2 Obalovny a zpracování R-materiálu

Obalovna asfaltových směsí je komplexní strojní zařízení, které se skládá z několika celků, jež slouží ke krátkodobému skladování vstupních surovin, ohřevu a sušení kameniva, temperování a případnému ohřevu asfaltu, přesnému dávkování složek asfaltové směsi a jejich dokonalému promísení, krátkodobému skladování hotové směsi v izolovaných zásobnících, expedici hotových směsí a k zachycení a opětovnému použití prachu vzniklého výrobou směsí. [9]

Existují obalovny různého typu s odlišným způsobem dávkování a případným ohřevem R-materiálu. Recyklace za horka v mísícím centru můžeme rozlišit takto:

- Dávkování R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny (studená cesta)
- Předehřívání R-materiálu v paralelním bubnu šaržové obalovny
- Dvouplášť
- Metoda Drum-mix – kontinuální obalovny

V České republice jsou používány především šaržové obalovny vzhledem k různorodému použití asfaltových směsí a typu míchání. Kontinuální obalovny se využívají ve chvíli, kdy se jedná o výrobu velkého množství směsí. V provozu je u nás více než 100 obaloven, přičemž zhruba 75 % z nich umožňuje dávkování R-materiálu. Většinou jsou obalovny uzpůsobeny pouze pro dávkování R-materiálu za studena. V ČR najdeme pouze 5 obaloven, které umožňují dávkování R-materiálu za horka. Celkem se jedná o 4 šaržové obalovny doplněné paralelním sušícím bubnem a jednu kontinuální obalovnu typu Drum-mix s dvojítm pláštěm (informace k roku 2016). [1] [10]

2.2.1 Recyklace v mísícím centru za studena

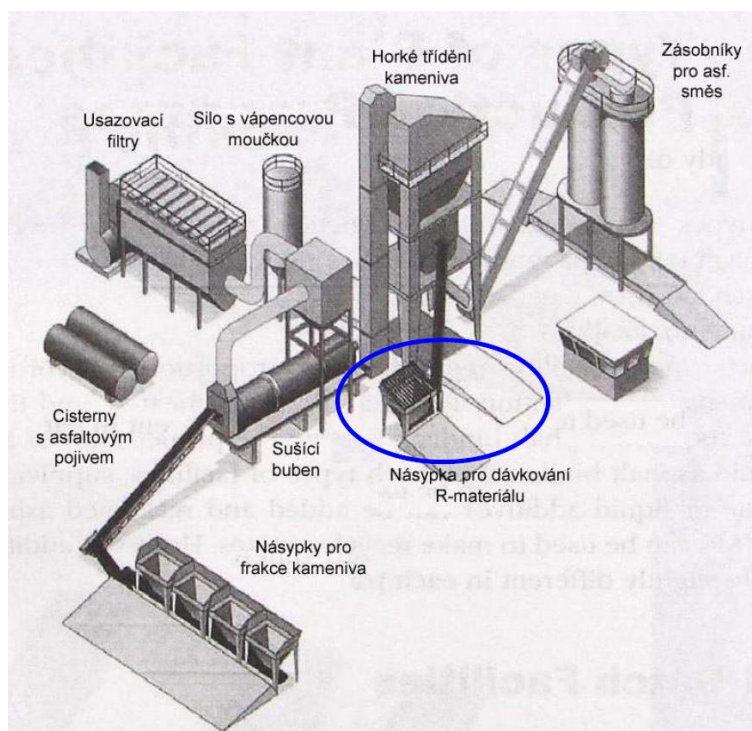
R-materiál, který se získal z vozovky vyfrézováním nebo vybouráním, se dopraví do míchacího centra, které se dle umístění mísící jednotky rozlišuje jako stacionární, semimobilní nebo mobilní. Zde probíhá míchání R-materiálu s asfaltovou emulzí nebo pěnou (a s případně dalším kamenivem). Kromě emulze se přidává cement, popřípadě vápenný hydrát. Pokládka takto vytvořené směsi probíhá běžnými finišery. Vrstva musí zrást, přičemž délka zrání závisí na vlhkosti vzduchu, množství vody ve směsi a její mezerovitosti. Na vyzrálou vrstvu se pokládá horká asfaltová směs nebo nátěr. [10]



Obrázek 2: Recyklace v míchacím centru za studena [10]

2.2.2 Šaržová obalovna – dávkování studeného R-materiálu

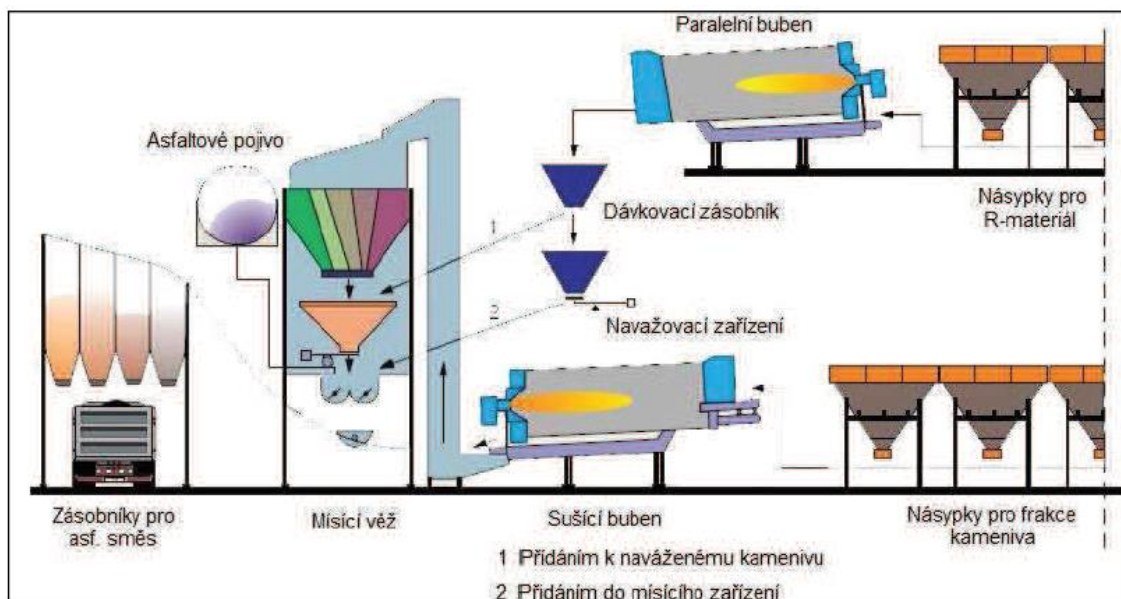
Upravený R-materiál (tříděním a drcením na frakce dle druhu směsi) se přidává přímo do míchačky šaržové obalovny. Takto dávkovaného R-materiálu se doporučuje přidávat maximální množství 25 % z celkové hmotnosti směsi, obvykle se uvažuje však 15 až 20 %. Toto omezení je dáno nutností předejít kamenivo na vyšší teplotu s ohledem na výslednou teplotu směsi a vlhkostí, kterou zpracováváný R-materiál obsahuje, jelikož se skládky R-materiálu ne vždy zastřešují. Během výroby vzniká vodní pára, kterou je nutno řádně odvětrat. Schéma dávkování R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny je znázorněno na *Obrázku 3*. [4]



Obrázek 3: Dávkování R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny [4]

2.2.3 Šaržová obalovna – dávkování předeřtého R-materiálu

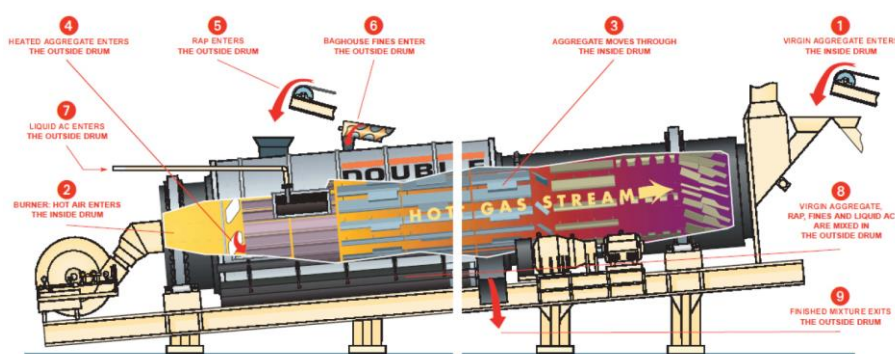
Další možností recyklace za horka na obalovně je metoda, při které se předeřtívá R-materiál v paralelním bubnu šaržové obalovny pomocí hořáků obvykle na 130 °C, což umožňuje výrazně vyšší procento dávkování R-materiálu (v České republice za ideálních podmínek se současným technologickým zázemím až 80 %). Schéma předeřtívání R-materiálu v paralelním bubnu je znázorněno na *Obrázku 4*. [4] V případě vyššího podílu R-materiálu je třeba použít modifikovaný asfalt se zvýšeným obsahem polymeru. [11]



Obrázek 4: Předeřtívání R-materiálu v paralelním bubnu [4]

2.2.4 Dvouplášť

Dalším druhem jsou obalovny využívající metodu se speciálně navrženým dvouplášťovým bubnem s nepřímým ohřevem R-materiálu. Buben je rozdělen na vnější a vnitřní část. Do vnitřní části se zavádí kamenivo, které po předeřtání horkým proudem plynu propadne do části vnější, kde byl mezitím ohříván R-materiál. Zde probíhá promísení složek společně s filerem a asfaltovým pojivem, což je jen jednou z variant využití této technologie. [1] [12]

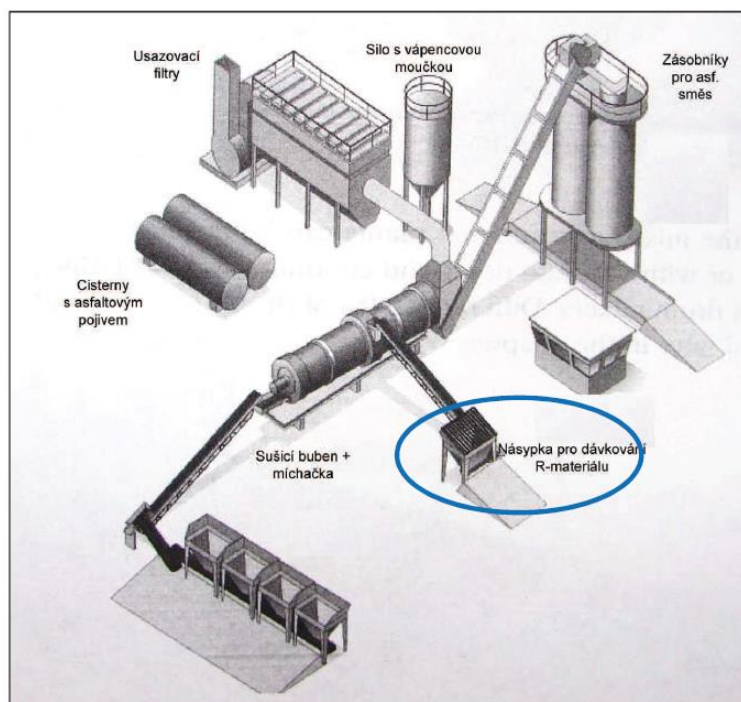


Obrázek 5: Princip dvouplášťového bubnu



2.2.5 Kontinuální obalovna – metoda Drum-mix

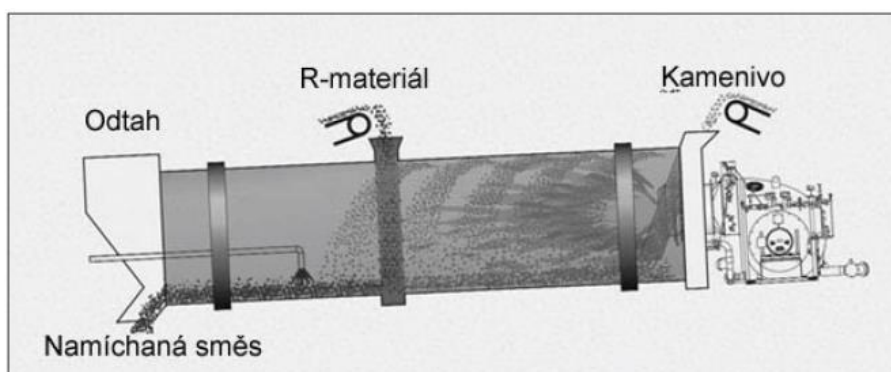
Recyklace za horka v kontinuální obalovně je nezastavující proces, který vyžaduje konstantní kvalitu vstupních materiálů. R-materiál se dávkuje ve střední části sušícího a ohřívacího bubnu průběžně. Následně se míchá kamenivo s asfaltovým pojivem. Tento typ se využívá především v USA, kde je takto tvořeno až 80 % směsí. [4]



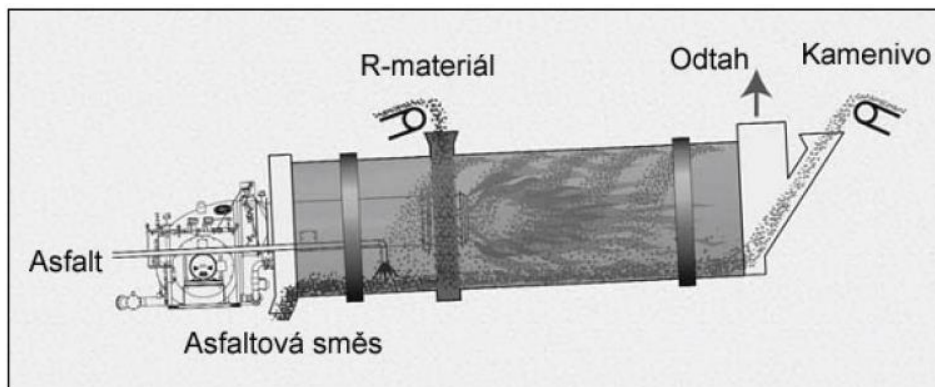
Obrázek 6: Schéma kontinuální obalovny [4]

Existují tři způsoby přidávání R-materiálu do asfaltové směsi:

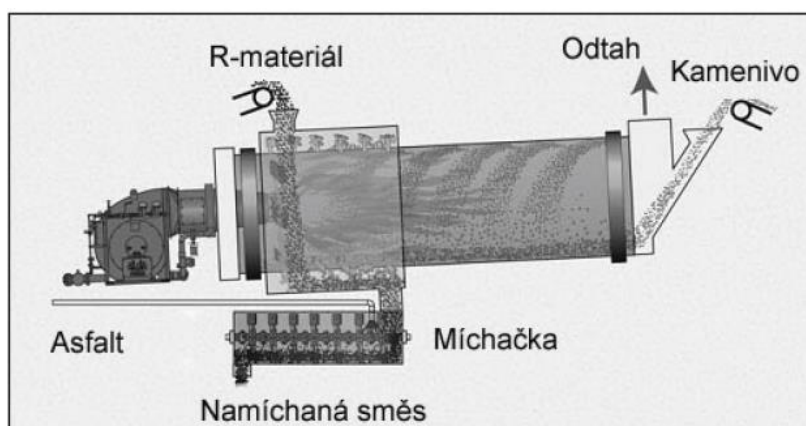
- R-materiál se přidává souběžně s proudem horkého vzduchu
- R-materiál se přidává proti proudu horkého vzduchu
- Separátní vysoušení R-materiálu, míchání v míchačce [4]



Obrázek 7: Přidávání R-materiálu souběžně s proudem horkého vzduchu [4]



Obrázek 8: Přidávání R-materiálu proti proudu horkého vzduchu [4]



Obrázek 9: Separátní vysoušení R-materiálu, míchání v míchačce [4]

2.3 Stárnutí a ožívování asfaltových pojiv

R-materiál obsahuje zestárlé pojivo, které nemá optimální vlastnosti. To se samozřejmě odráží do výsledné asfaltové směsi, u které se tento fakt projevuje rostoucí tuhostí a menší odolností proti únavovému a termálnímu namáhání. Z tohoto důvodu je nutné vliv pojiva v nově vyráběných směsích kompenzovat pojivem vyšší gradace nebo pomocí speciálních oživovacích přísad (tzv. rejuvenátorů), které mají za cíl obnovit reologické chování zestárlého asfaltového pojiva. [13]

2.3.1 Stárnutí asfaltových pojiv

Stárnutí asfaltových pojiv je jev, díky kterému dochází k degradaci zhoršující jejich vlastnosti. Negativní změna vlastností asfaltových pojiv ovlivňuje trvanlivost asfaltových směsí, které díky tomu méně odolávají účinkům zatížení. V konstrukčních vrstvách se pak (hlavně za nízkých teplot) mohou objevit poruchy. K těmto změnám vlastností dochází především za působení tepla, vzdušného kyslíku a ultrafialového záření. Obecně se rozeznává stárnutí termooxidační, destilační, exudační a strukturální. Ke stárnutí asfaltových pojiv dochází už na počátku jejich výroby, dále pak při jejich skladování, zpracování, dopravě, pokládce asfaltových směsí a během jejich předpokládané době životnosti. [14]



V průběhu času dochází hlavně ke změnám reologických vlastností asfaltových pojiv. Tyto změny se dají sledovat při empirických zkouškách jako je penetrace či bod měknutí. Díky laboratorním zkouškám je potvrzeno, že vlivem stárnutí dochází u asfaltových pojiv ke zvýšení komplexního smykového modulu a poklesu fázových úhlů, což má za následek zvýšení gradace asfaltového pojiva, které je pak schopno více odolávat tvorbě trvalých deformací. Na druhou stranu vlivem vytvrzení pojiva dochází k jeho křehnutí za nízkých teplot, zhoršují se únavové charakteristiky a tím se stává náchylnější k tvorbě trhlin. [14]

2.3.2 Oživování asfaltových pojiv

Při dávkování vyšším než 50 % R-materiálu z hmotnosti asfaltové směsi spočívá neefektivnější způsob oživení v použití oživovací přísady. Při aplikaci běžných pojiv vyšší gradace by totiž nebylo možné dosáhnout požadované výsledné penetrace pojiva. Použití oživovacích přísad v těchto případech může přinést výhody jako použití libovolného množství R-materiálu a jednoduché přidání přísady bez nutnosti použití dalšího skladovacího síla, jako v případě používání pojiv vyšší gradace. [13]

Existuje několik základních typů oživovacích přísad. Získávají se například zpracováním ropy, z bio-olejů, z odpadních produktů zpracování biomasy nebo z papírenské výroby. Jednotlivé oživovací přísady v ideálním případě obnoví nejenom chemickou strukturu pojiva, ale také mechanicko-fyzikální vlastnosti včetně odolnosti vůči termooxidačním změnám v čase. Použitá oživovací přísada musí splnit několik zásadních požadavků:

- Oživit zestárlé pojivo za účelem snížení jeho tuhosti a navrácení některých vlastností na hodnoty podobné silničnímu asfaltu požadované kategorie.
- Změnit vlastnosti asfaltového pojiva v R-materiálu tak, aby se nesnížila trvanlivost asfaltové směsi po dlouhodobém stárnutí.
- Zajistit přítomnost dostatečného množství asfaltového pojiva, aby došlo k řádnému obalení zrn kameniva v asfaltové směsi a zároveň, aby byly splněny požadavky na vlastnosti asfaltových směsí. [13]

Pod pojmem oživovací přísada lze na trhu objevit velké množství produktů s různou účinností, které se dají rozdělit do dvou kategorií:

- Změkčovadla – fluxační přísady
- Rejuvenátory – rejuvenační přísady [13]

Asfalty jsou tvořeny asfalteny, malteny a asfaltovými pryskyřicemi, přičemž asfalteny jsou nerozpustné, zatímco malteny rozpustné látky. Po přidání změkčovadel (např. fluxačních olejů) nedojde k rozptýlení shluků asfaltenů v asfaltovém pojivu, ale dojde pouze ke zředění maltenové fáze a tím ke snížení viskozity pojiva. Naopak použitím rejuvenátoru obnovíme chemickou strukturu pojiva a přerušíme proces shlukování asfaltenů. [11] [13]

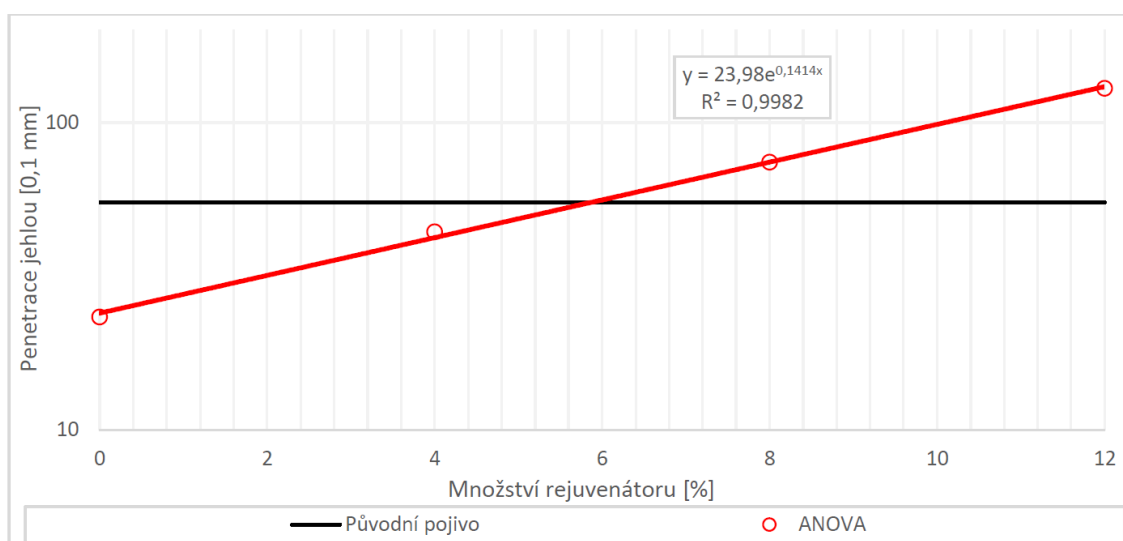
2.3.3 Oživovací přísada ANOVA™ 1817

ANOVA™ 1817 je rejuvenátor na přírodní bázi od společnosti Cargill. Produkt je vhodný pro dlouhodobé oživení asfaltového pojiva při použití 20 % a více R-materiálu. Má za úkol komplexně aktivovat a obnovovat vlastnosti zestárlého nebo i zoxidovaného

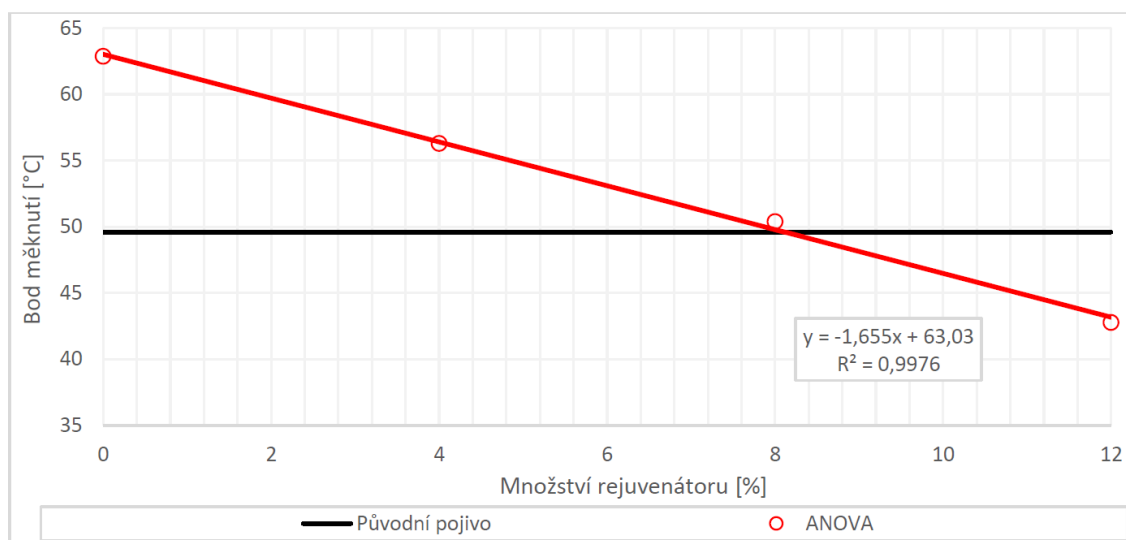


asfaltového pojiva. Doporučené dávkování firma uvažuje 0,25 – 6 % z hmotnosti pojiva v recyklátu. [15]

Konkrétní poznatky o přísadě byly získány ze zprávy pana Ing. Pavla Coufalíka, Ph.D. a Ing. Tomáše Koudelky z 1. 10. 2018. Ze zprávy byly nejzásadnější informace o závislosti hodnot penetrace a bodu měknutí zestárlého pojiva na množství přidané oživovací přísady. Tyto závislosti byly zjištěny ze zkoušek na laboratorně zestárlém pojivu gradace 50/70 metodou 3 x RTFOT a následném dávkování přísady v množství 4 %, 8 % a 12 % z hmotnosti pojiva. Přídavek oživovací přísady způsobuje zvýšení penetrace jehlou, které lze se vzrůstajícím množstvím charakterizovat pomocí exponenciální funkce. Naopak bod měknutí s vyšším množstvím přísady klesá a je možné ho popsat pomocí lineární funkce. Tyto závislosti jsou znázorněny na *Grafu 1* a *Grafu 2*. [16]



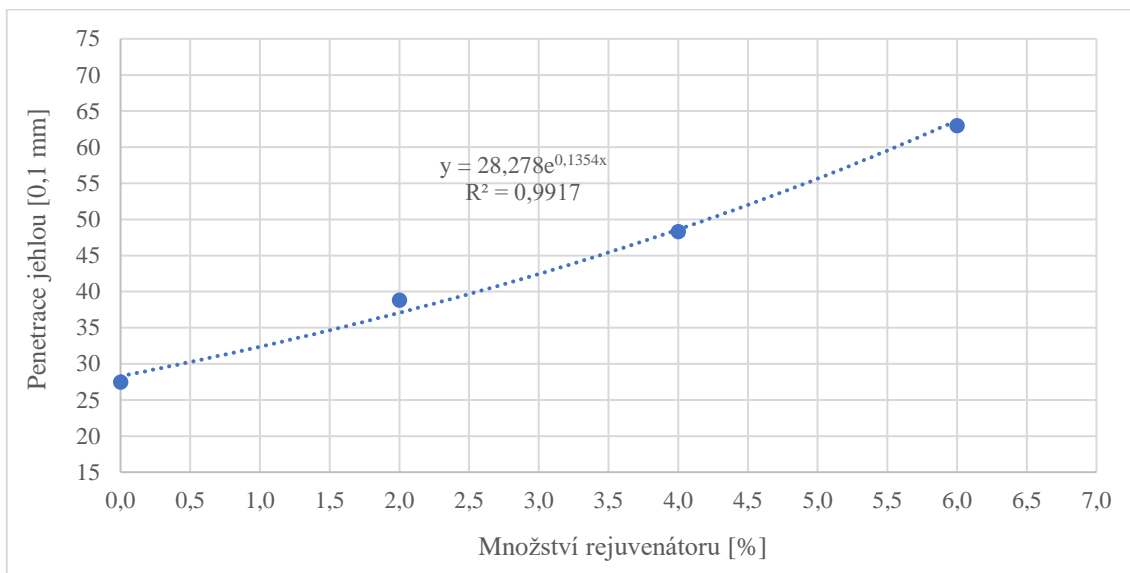
Graf 1: Závislost množství rejuvenátoru ANOVA™ 1817 na penetraci asfaltového pojiva – Coufalík, Koudelka [16]



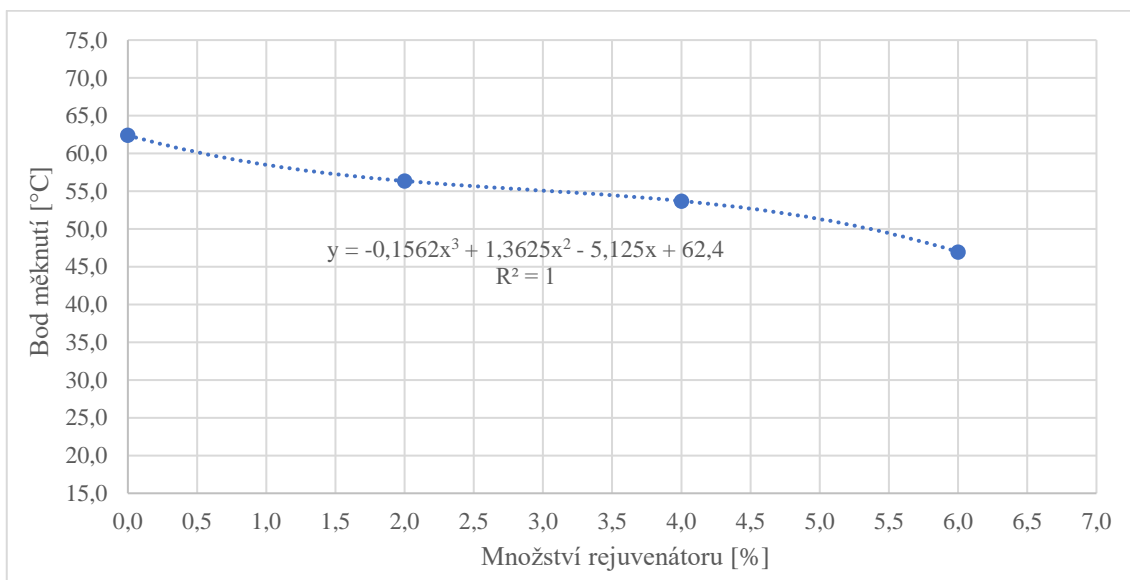
Graf 2: Závislost množství rejuvenátoru ANOVA™ 1817 na bodu měknutí asfaltového pojiva – Coufalík, Koudelka [16]



Další informace o rejuvenátoru zjistil Ing. Jan Valentin, Ph.D., který tuto oživovací přísadu použil při práci s R-materiálem. Při dávkování ANOVATM 1817 2 %, 4 % a 6 % z hmotnosti pojiva se penetrace opět zvyšovala exponenciálně v závislosti na vyšším množství pojiva. Bod měknutí opět klesal se zvyšujícím se množstvím rejuvenátoru, ale tentokrát byl popsán kubickou funkcí. Tyto závislosti jsou znázorněny na *Grafu 3* a *Grafu 4*.



Graf 3: Závislost množství rejuvenátoru ANOVATM 1817 na penetraci asfaltového pojiva – Valentin



Graf 4: Závislost množství rejuvenátoru ANOVATM 1817 na bodu měknutí asfaltového pojiva – Valentin



3. PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část bakalářské práce se zabývá analýzou R-materiálu a jeho následným využitím v asfaltové směsi ACL 16 S. R-materiál byl oživen pomocí přísady ANOVATM 1817 za účelem zlepšení jeho vlastností. Společně s touto asfaltovou směsí byla navržena referenční směs za použití stejných frakcí kameniva se shodnou výslednou čarou zrnitosti směsi kameniva a stejným hmotnostním podílem asfaltového pojiva 50/70, která R-materiál neobsahovala. Takto navržené a vyrobené směsi byly následně podrobeny zkouškám (odolnost vůči vodě a mrazu, šíření trhliny, náchylnost k trvalé deformaci a tuhost směsí), jejichž výsledky byly porovnány.

3.1 Kamenivo

Kamenivo pro návrh směsi bylo přivezeno z lomů Měrunice, Dobkovičky a vápencový filer z lokality Velké Hydčice. Při návrhu směsi byly využity frakce 4/8 a 0/4 z Měrunice, 8/16, 8/11 a 2/4 z Dobkoviček a filer z Velké Hydčice. Každá z frakcí byla podrobena zkoušce stanovení zrnitosti podle normy ČSN EN 933-1 *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor*. Výsledky zrnitosti těchto frakcí jsou uvedeny v *Tabulce 4* a *Tabulce 5*. Hodnoty zbytků na sítích a propadů jsou uvedeny v procentech hmotnosti. [17]

Frakce/síto [mm]	Dobkovičky		Dobkovičky		Měrunice	
	8/16		8/11		4/8	
	Zbytky	Propady	Zbytky	Propady	Zbytky	Propady
63	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
45	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
31,5	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
22,4	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
16	2,0	98,0	0,0	100,0	0,0	100,0
11,2	72,6	25,4	3,0	97,0	0,0	100,0
8	20,6	4,8	78,2	18,7	11,2	88,8
5,6	4,0	0,9	14,8	4,0	68,5	20,3
4	0,1	0,8	0,7	3,2	18,2	2,0
2	0,1	0,7	0,2	3,1	1,6	0,5
1	0,1	0,7	0,0	3,0	0,0	0,4
0,5	0,1	0,6	0,1	3,0	0,0	0,4
0,25	0,1	0,6	0,2	2,8	0,0	0,4
0,125	0,1	0,5	0,3	2,5	0,0	0,4
0,063	0,2	0,3	0,3	2,3	0,1	0,3
Dno	0,3		2,3		0,3	

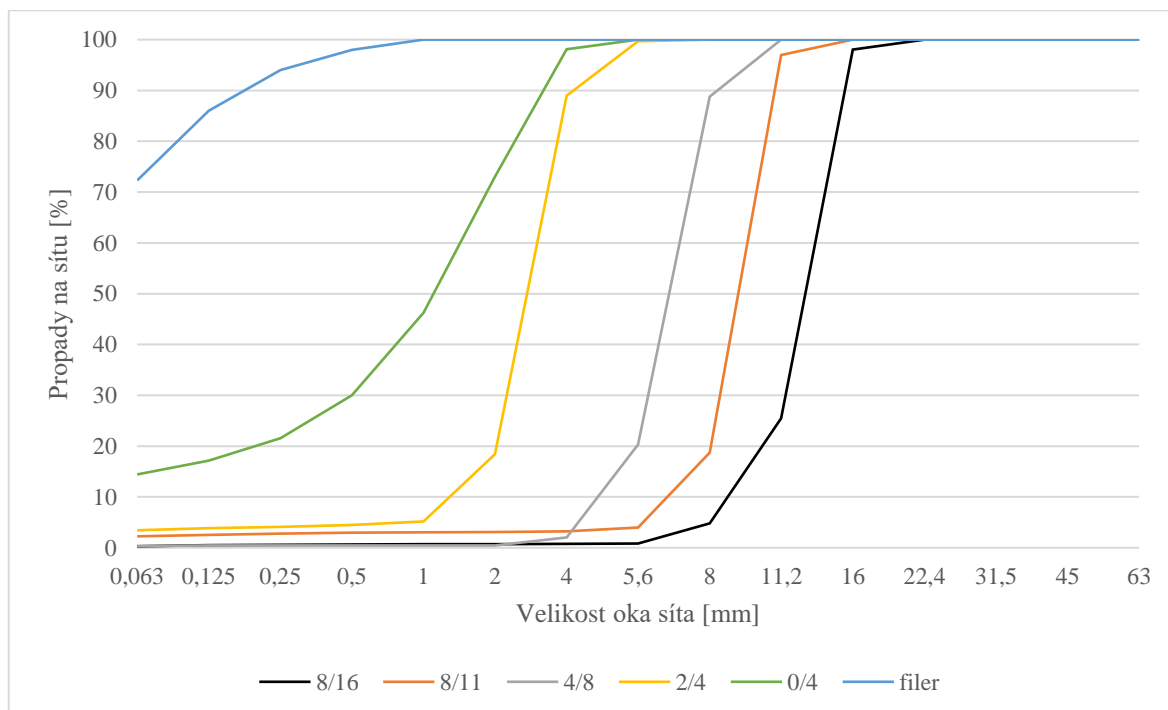
Tabulka 4: Zrnitosti kameniva 8/16, 8/11 a 4/8



Frakce/síto [mm]	Dobkovičky		Měřunice		JMV Velké Hydčice	
	2/4		0/4		filer	
	Zbytky	Propady	Zbytky	Propady	Zbytky	Propady
63	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
45	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
31,5	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
22,4	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
16	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
11,2	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
8	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0
5,6	0,3	99,7	0,0	100,0	0,0	100,0
4	10,8	88,9	1,9	98,1	0,0	100,0
2	70,5	18,4	25,1	73,0	0,0	100,0
1	13,2	5,2	26,8	46,3	0,0	100,0
0,5	0,7	4,5	16,3	30,0	2,0	98,0
0,25	0,4	4,1	8,4	21,6	4,0	94,0
0,125	0,2	3,9	4,4	17,1	8,0	86,0
0,063	0,4	3,4	2,7	14,4	13,7	72,3
Dno	3,4		14,4		72,3	

Tabulka 5: Zrnitost kameniva 2/4, 0/4 a fileru

Křivky zrnitostí těchto frakcí jsou znázorněny v Grafu 5.



Graf 5: Čáry zrnitostí frakcí kameniva



3.2 Pojivo

Při návrhu směsi bylo použito asfaltové silniční pojivo od firmy TOTAL s označením 50/70, jedná se o standardní typ silničního pojiva. Pro toto pojivo bylo třeba stanovit přesnou hodnotu penetrace a bodu měknutí, aby bylo možno určit správné dávkování rejuvenátoru pro oživení R-materiálu (viz. kapitola 3.3.7).

3.2.1 Stanovení penetrace jehlou

Stanovení konzistence asfaltového pojiva se provádí zkouškou penetrace jehlou, která je popsána v normě ČSN EN 1426 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou*. Tato metoda spočívá v průniku normalizované jehly do vytemperovaného vzorku, který je umístěn v kelímku. Přístroj uzpůsobený pro tuto zkoušku se nazývá penetrometr (Obrázek 10). Ve chvíli, kdy byl vzorek zcela ponořen do vodní lázně o teplotě 25 °C, opatrně se snižovala jehla přidělaná k penetrometru, dokud se její hrot nedotknul povrchu vzorku. Poté se na stanovenou dobu uvolnil držák jehly a zaznamenala se změřená penetrace. Při dalších stanoveních byl vzorek v lázni přesunut tak, aby byly penetrace provedeny v předepsaných vzdálenostech. Pro každé měření byla použita jiná jehla. [18]



Obrázek 10: Penetrometr s ponořeným vzorkem

Naměřené výsledky penetrace jehlou na analytickém vzorku jsou uvedeny v *Tabulce 6*. Dle normy byl výsledek vyjádřen aritmetickým průměrem akceptovatelných hodnot v desetínách milimetrů zaokrouhlený na nejbližší celé číslo. Výslednou hodnotou penetrace pro používané pojivo 50/70 je 53 penetračních jednotek. Výsledek splňuje požadavky pro pojivo 50/70.

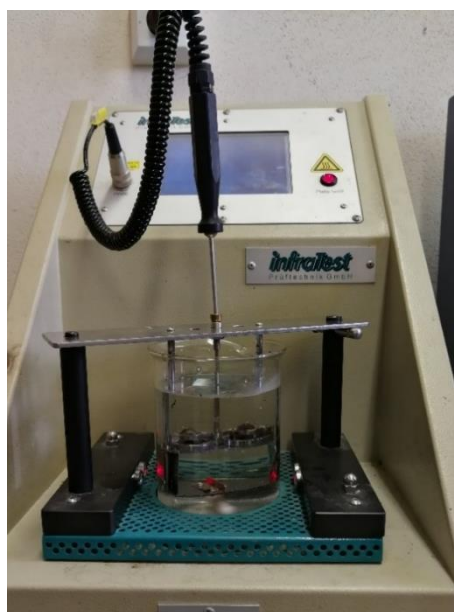
Měření	1	2	3	Průměr
Penetrace [mm*0,1]	52,3	54,3	53,4	53

Tabulka 6: Penetrace jehlou asfaltového pojiva 50/70



3.2.2 Stanovení bodu měknutí

Stanovit bod měknutí asfaltového pojiva je možné metodou tzv. kroužek a kulička, která je popsána v normě ČSN EN 1427 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička*. Při této metodě byly vzorky asfaltového pojiva odlity v mosazných kroužcích s osazením zahřívány řízenou rychlostí v kapalinové lázni (v tomto případě v destilované vodě s počáteční teplotou 5 °C, protože předpokládaný výsledek byl do 80 °C), přičemž na každém z nich byla umístěna ocelová kulička. Výsledný bod měknutí byl určen průměrem teplot, při kterých tyto vzorky změkly natolik, aby umožnily každé z kuliček, obalených v asfaltovém pojivu, propadnout o vzdálenost 25 mm. [19]



Obrázek 11: Přístroj na metodu kroužek a kulička

Bod měknutí opravdu vyšel menší než 80 °C, jak se předpokládalo, a proto ho bylo možné vyjádřit jako průměr zaznamenaných teplot zaokrouhlený na nejbližší 0,2 °C. Akceptovatelné hodnoty tohoto měření jsou zaznamenány v *Tabulce 7*. Výsledný bod měknutí pojiva byl zjištěn 48,8 °C, což splňuje požadavky pro pojivo 50/70.

Měření	1	2	Průměr
Bod měknutí [°C]	48,7	48,8	48,8

Tabulka 7: Bod měknutí asfaltového pojiva 50/70



3.3 R-materiál

R-materiál použitý v bakalářské práci byl odebrán na obalovně Chabařovice firmy VHS Teplice. Na tomto R-materiálu bylo potřeba zjistit jeho čáru zrnitosti před a po extrakci asfaltového pojiva, u kterého následně bylo nutno určit jeho obsah a vlastnosti. Pro účely těchto zkoušek byly využity tři pytle R-materiálu označeny R1, R2 a R3, ze kterých se pořídily řádně zhomogenizované zkušební navážky.

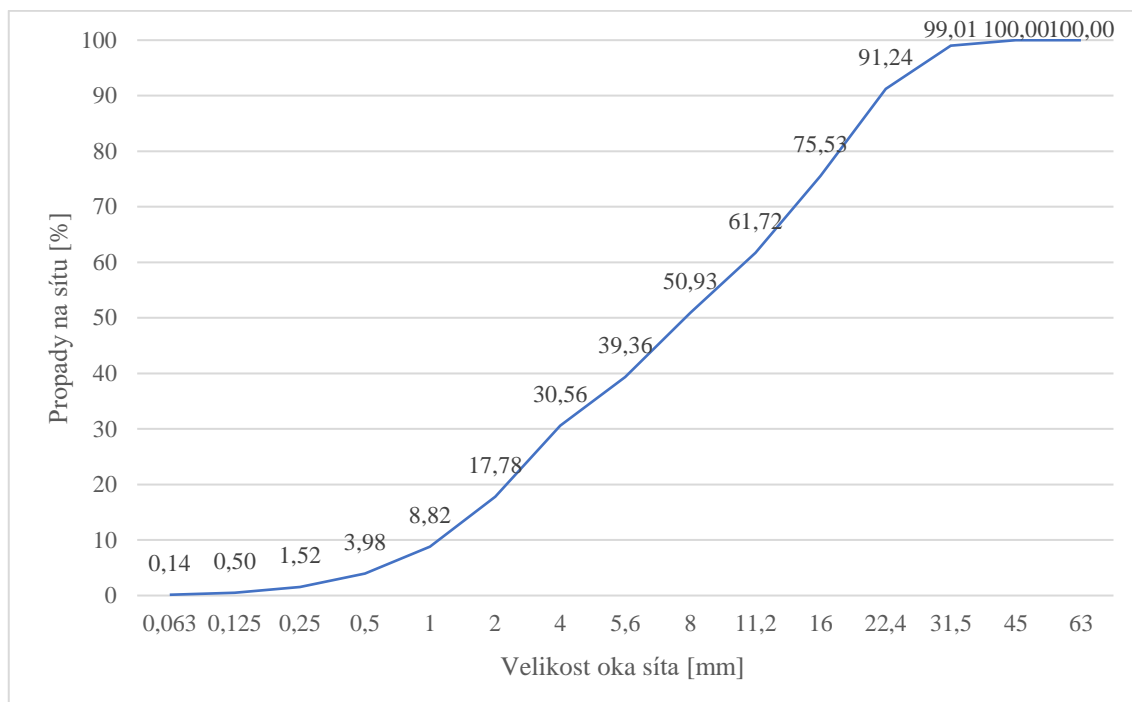
3.3.1 Stanovení zrnitosti

Zrnitost R-materiálu byla zjištěna před a po extrakci asfaltového pojiva (popsaná v kapitole 3.3.2). Stanovuje se dle normy ČSN EN 12697-2 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 2: Stanovení zrnitosti*, která odkazuje na normu ČSN EN 933-1 *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. [17] [20]

V Tabulce 8 jsou zapsány hodnoty stanovení zrnitosti R-materiálu před extrakcí, z nichž je možno určit maximální zrnitost R-materiálu U (viz. kapitola 2.1). Pro používaný R-materiál je U 45. Křivka zrnitosti R-materiálu je na Grafu 6.

Frakce/síto [mm]	R1		R2		R3		Průměr	
	Zbytky	Propady	Zbytky	Propady	Zbytky	Propady	Zbytky	Propady
63	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
45	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
31,5	0,00	100,00	2,97	97,03	0,00	100,00	0,99	99,01
22,4	15,13	84,87	1,93	95,10	6,26	93,74	7,77	91,24
16	13,96	70,92	14,88	80,22	18,29	75,45	15,71	75,53
11,2	14,77	56,15	13,25	66,97	13,40	62,05	13,81	61,72
8	10,83	45,31	11,58	55,39	9,95	52,10	10,79	50,93
5,6	10,63	34,68	11,86	43,53	12,25	39,85	11,58	39,36
4	8,08	26,60	9,55	33,98	8,74	31,11	8,79	30,56
2	11,07	15,53	14,48	19,51	12,81	18,29	12,79	17,78
1	7,72	7,81	9,81	9,70	9,34	8,95	8,96	8,82
0,5	4,13	3,68	5,23	4,47	5,17	3,79	4,84	3,98
0,25	2,14	1,54	2,70	1,77	2,55	1,24	2,46	1,52
0,125	0,99	0,55	1,17	0,59	0,89	0,35	1,02	0,50
0,063	0,40	0,15	0,43	0,16	0,24	0,12	0,36	0,14
Dno	0,15		0,16		0,12		0,14	

Tabulka 8: Zrnitost R-materiálu před extrakcí

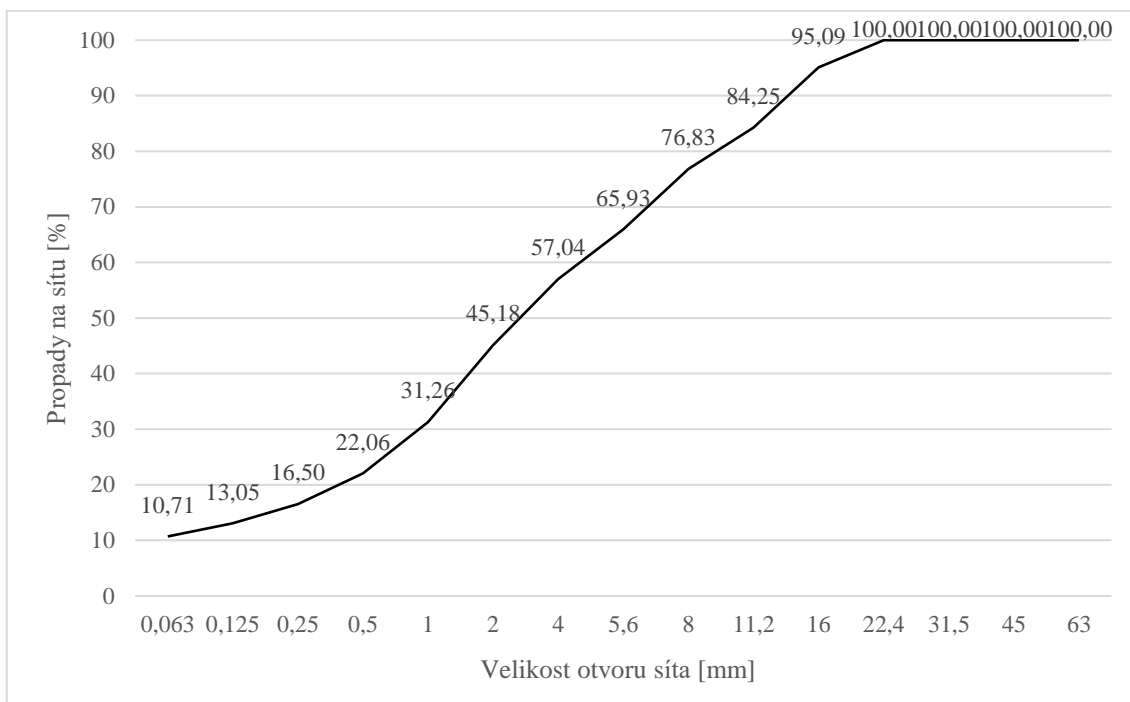


Graf 6: Křivka zrnitosti R-materiálu před extrakcí

Po extrakci asfaltového pojiva byla třeba zjistit zrnitost kameniva v R-materiálu. Zjištěné hodnoty v *Tabulce 9* byly následně využity při návrhu asfaltové směsi a udávají značení zrnitosti kameniva 0/16 (d/D). Křivka zrnitosti je na *Grafu 7*.

Frakce/síto [mm]	R1		R2		R3		Průměr	
	Zbytky	Propady	Zbytky	Propady	Zbytky	Propady	Zbytky	Propady
63	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
45	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
31,5	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
22,4	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
16	6,37	93,63	3,65	96,35	4,71	95,29	4,91	95,09
11,2	12,26	81,37	12,59	83,76	7,67	87,62	10,84	84,25
8	7,17	74,21	6,84	76,92	8,24	79,37	7,42	76,83
5,6	11,08	63,13	9,99	66,93	11,66	67,72	10,91	65,93
4	8,17	54,96	8,88	58,04	9,61	58,11	8,89	57,04
2	11,30	43,66	12,16	45,89	12,12	45,99	11,86	45,18
1	13,25	30,41	13,98	31,90	14,53	31,46	13,92	31,26
0,5	8,68	21,73	9,48	22,42	9,44	22,02	9,20	22,06
0,25	5,33	16,41	5,69	16,73	5,65	16,37	5,55	16,50
0,125	3,45	12,96	3,51	13,22	3,40	12,98	3,45	13,05
0,063	2,18	10,77	2,44	10,78	2,41	10,57	2,34	10,71
Dno	10,77		10,78		10,57		10,71	

Tabulka 9: Zrnitost kameniva v R-materiálu



Graf 7: Křivka zrnitosti kameniva v R-materiálu po extrakci asfaltového pojiva

Použitý R-materiálu je možné na základě zrnitostních zkoušek označit 45 RA 0/16.



3.3.2 Extrakce asfaltového pojiva

Oddělení asfaltového pojiva od kameniva v extraktoru za horka se provádí dle normy ČSN EN 12697-1 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 1: Obsah rozpustného pojiva*. Do drátěného koše se sítím o velikosti 0,063 mm se vložilo rozehřáté zvážené množství navážky R-materiálu a koš se následně umístil se do extraktoru. Další částí mechanismu je patrona, která se vyložila filtračním papírem. Zde se po extrakci usadily jemné částice, které propadly sítím drátěného koše. Během extrakce probíhalo promývání R-materiálu rozpouštědlem do uvolnění asfaltového pojiva. Použité rozpouštědlo bylo perchlorethylen (tzv. perchlor). Po dokončení extrakce se asfalt společně s rozpouštědlem odstředil do připravené nádoby. Očištěné kamenivo a jemné částice usazené na filtračním papíru byly zváženy a zaznamenány. [21]



Obrázek 12: Extraktor



3.3.3 Destilace asfaltového pojiva

Asfaltové pojivo vyextrahované z R-materiálu bylo nutno vydestilovat ze směsi odstředěné z extraktoru a oddělit tak od rozpouštědla. Tento proces je popsán v normě ČSN EN 12697-3 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení*. Zkouška funguje na principu vakuové destilace pomocí rotačního vakuového destilačního zařízení. Vhodná nádoba se vzorkem asfaltového pojiva společně s rozpouštědlem byla přidělána na rotační vakuové zařízení a z části ponořena do olejové lázně. Zatímco nádoba rotovala, rozpouštědlo se odpařovalo. Během celého procesu bylo nutno nechat protékat studenou vodu chladičem. Takto odseparované asfaltové pojivo bylo možno podrobit dalším zkouškám a zjistit jeho vlastnosti. [22]



Obrázek 13: Destilační zařízení

3.3.4 Obsah asfaltového pojiva

Obsah asfaltového pojiva se určí dle normy ČSN EN 12697-1 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 1: Obsah rozpustného pojiva*. Vztah (Vzorec 1) pro výpočet vychází z hodnot naměřených při extrakci asfaltového pojiva (kapitola 3.3.2). Od celkové hmotnosti navážky před extrakcí byla odečtena hmotnost kameniva očištěného od pojiva a hmotnost jemných částic zachycených na filtračním papíru. [21]

$$S = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{M_1} * 100$$

Vzorec 1: Výpočet obsahu asfaltového pojiva [21]



Kde je

S obsah asfaltového pojiva [%]

M_1 hmotnost navážky R-materiálu [g]

M_2 hmotnost kameniva po extrakci pojiva [g]

M_3 hmotnost zachycených jemných částic po extrakci [g]

Měření bylo provedeno na 3 vzorcích R-materiálu označených R1, R2 a R3. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v *Tabulce 10*. Průměrné množství asfaltového pojiva v použitém R-materiálu je 4,65 %.

Vzorek	M_1 [g]	M_2 [g]	M_3 [g]	S [%]
R1	2074,1	1767,4	211,6	4,59
R2	1263,0	1075,4	128,9	4,65
R3	1239,1	1057,0	123,6	4,72
			Průměr	4,65

Tabulka 10: Výsledky výpočtu obsahu asfaltového pojiva v R-materiálu

3.3.5 Stanovení penetrace jehlou

U vzorku asfaltového pojiva znovuzískaného destilací popsané v *kapitole 3.3.3* bylo třeba stanovit konzistenci pomocí zkoušky penetrace jehlou, která je popsaná v *kapitole 3.2.1*.

Naměřené výsledky penetrace jehlou na analytickém vzorku jsou uvedeny v *Tabulce 11*. Dle normy byl výsledek vyjádřen aritmetickým průměrem akceptovatelných hodnot v desetinách milimetrů zaokrouhlený na nejbližší celé číslo. Po provedení zkoušky bylo možné konstatovat, že pojivo v R-materiálu má konzistenci 19 penetračních jednotek.

Měření	1	2	3	4	Průměr
Penetrace [mm*0,1]	18,1	18,9	19,1	18,0	19

Tabulka 11: Penetrace jehlou asfaltového pojiva v R-materiálu

3.3.6 Stanovení bodu měknutí

Dále bylo potřeba stanovit bod měknutí znovuzískaného pojiva metodou kroužek a kulička, která je popsána v *kapitole 3.2.2*.

Podle předpokladů vyšel bod měknutí opět menší než 80 °C, a proto ho bylo možné vyjádřit jako průměr zaznamenaných teplot zaokrouhlený na nejbližší 0,2 °C. Akceptovatelné hodnoty měření jsou zaznamenány v *Tabulce 12* a výsledek bodu měknutí asfaltového pojiva v R-materiálu je 70,6 °C.

Měření	1	2	3	Průměr
Bod měknutí [°C]	70,5	70,5	70,9	70,6

Tabulka 12: Bod měknutí asfaltového pojiva v R-materiálu



3.3.7 Oživení R-materiálu

Jak je uvedeno v předcházejících kapitolách, asfaltové pojivo obsažené v R-materiálu má vlivem stárnutí výrazně odlišné hodnoty penetrace a bodu měknutí od standardního silničního pojiva 50/70. Pro zlepšení těchto vlastností byla využita oživovací přísada ANOVATM 1817 (viz. kapitola 2.3.3). Cílem bylo, aby výsledné hodnoty penetrace a bodu měknutí pro asfaltové pojivo ve směsi ACL 16 S s 30 % obsahem R-materiálu (silniční pojivo 50/70 + asfaltové pojivo v R-materiálu + rejuvenátor) splňovaly požadované hodnoty pro asfaltové pojivo 50/70. Tyto údaje jsou uvedeny v normě ČSN EN 12591 *Asfalty a asfaltová pojiva – Specifikace pro silniční asfalty*. Požadavek pro hodnotu penetrace je 50 až 70 penetračních jednotek a pro bod měknutí 46–54 °C. [23]

Nejzásadnějším krokem bylo určit množství rejuvenátoru, které by dostatečně oživilo R-materiál natolik, aby po smíchání směs splňovala požadavky výše. Na základě zkušeností s rejuvenátorem popsanych v kapitole 2.3.3, byly aplikovány závislosti množství oživovací přísady na zlepšení vlastností asfaltového pojiva. V *Tabulce 13* jsou vypočteny předpokládané hodnoty penetrace a bodu měknutí asfaltového pojiva v R-materiálu po přidání 6 % (z hmotnosti asfaltového pojiva v R-materiálu) oživovací přísady ANOVATM 1817. Tyto přibližné hodnoty byly získány za využití vzorců vyplývajících ze závislosti použitého množství rejuvenátoru. Procentuální podíl rejuvenátoru 6 % postačil ke snížení bodu měknutí a zároveň k dostatečnému zvýšení gradace natolik, aby při následném smíchání se silničním pojivem 50/70 byly splněny podmínky uvedené výše.

ANOVA TM 1817	Dávkování	Pojivo v R-materiálu		S rejuvenátorem	
	%	Penetrace	Bod měknutí	Penetrace	Bod měknutí
Coufalík, Koudelka	6	19	70,6 °C	46	60,8 °C
Valentín				45	55,2 °C

Tabulka 13: Dávkování ANOVATM 1817 k R-materiálu

Výpočet hodnoty penetrace a bodu měknutí pojiva v asfaltové směsi, do které byla použita recyklovaná asfaltová směs je uveden v *Příloze A* normy ČSN EN 13108-5 *Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 5: Asfaltový koberec mastixový*. Tato příloha obsahuje následující vzorce pro výpočet výsledných hodnot. [24]

$$a * \lg(\text{pen}_1) + b * \lg(\text{pen}_2) = (a + b) * \lg(\text{pen}_{\text{mix}})$$

Vzorec 2: Výpočet penetrace pojiva v asfaltové směsi [24]

Kde je

pen_{mix} vypočítaná hodnota penetrace pojiva ve směsi obsahující R-materiál [0,1*mm]

pen_1 hodnota penetrace pojiva znovuzískaného z R-materiálu (oživeného) [0,1*mm]

pen_2 hodnota penetrace přidávaného pojiva [0,1*mm]

a, b hmotnostní podíly pojiva v R-materiálu (a) a z přidávaného pojiva (b) ve směsi



$$T_{R\&B\ mix} = a * T_{R\&B\ 1} + b * T_{R\&B\ 2}$$

Vzorec 3: Výpočet penetrace pojiva v asfaltové směsi [24]

Kde je

$T_{R\&B\ mix}$ vypočítaná hodnota bodu měknutí pojiva ve směsi obsahující R-materiál [°C]

$T_{R\&B\ 1}$ hodnota bodu měknutí pojiva znovuzískaného z R-materiálu (oživeného) [°C]

$T_{R\&B\ 2}$ hodnota bodu měknutí přidávaného pojiva [°C]

a, b hmotnostní podíly pojiva v R-materiálu (a) a z přidávaného pojiva (b) ve směsi

Hmotnostní podíly asfaltového pojiva se měnily v závislosti na celkovém požadovaném obsahu pojiva ve směsi. V následující tabulce je uveden případ pro obsah pojiva 4,6 %. Hodnoty pro oživený R-materiál jsou průměrem hodnot z *Tabulky 13*.

	a	b	Oživený R-mat	Přidávané 50/70	Výsledek
Penetrace [0,1 mm]	30,33 %	69,67 %	46	53	51
Bod měknutí			58,0 °C	48,8 °C	51,6 °C

Tabulka 14: Hodnoty penetrace a bodu měknutí ve výsledné směsi ACL 16 S

Dle těchto výpočtů výsledná směs ACL 16 S s 30 % R-materiálu po přidání oživovací přísady ANOVATM 1817 v množství 6 % (z hmotnosti asfaltového pojiva v R-materiálu) splňovala požadavky pro standardní asfaltové pojivo 50/70. Hodnota penetrace vyšla 51 penetračních jednotek a bod měknutí 51,6 °C.

3.4 Návrh a výroba směsí ACL 16 S

V práci bylo úkolem navrhnout asfaltovou směs ACL 16 S bez R-materiálu a ACL 16 S, která R-materiál obsahuje. Obsah R-materiálu byl zvolen 30 % z celkové hmotnosti směsi na základě *Tabulky 2*, která udává jeho nejvyšší možné použití v dané směsi.

Pro návrh směsi bylo nutno vytvořit směs kameniva z dostupných frakcí, která by nejvíce vyhovovala požadavkům asfaltové směsi ACL 16 S. Návrh směsi kameniva byl tvořen různým procentuálním zastoupením dostupných frakcí. Stejně tak bylo třeba zvolit optimální množství asfaltového pojiva pro dosažení potřebných vlastností. K volbě finální podoby směsi byly potřeba provést 2 optimalizace, přičemž o jejím složení rozhodovala mezerovitost.

Každá optimalizace spočívala ve výrobě 6 kg ručně míchané asfaltové směsi, vyrobení 4 válcových těles a následném stanovení mezerovitosti. Po optimalizaci bylo třeba vyrobít 50 kg finální směsi s R-materiálem a směsi bez R-materiálu, které se umíchaly v laboratorní míchačce. Toto množství se spotřebovalo na 15 válcových těles, 2 desky a zbytek byl využit na určení maximální objemové hmotnosti.



3.4.1 Požadavky na ACL 16 S

Obecné požadavky pro hutněné asfaltové vrstvy jsou obsaženy v normě ČSN 73 6121 *Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody*, přičemž Příloha E je zaměřena na směsi typu AC. Jsou zde k nalezení doporučené typy pojiva nebo požadavky na kamenivo, přídatný filer a přípustné množství R-materiálu přidávaného do asfaltové směsi, které jsou již uvedeny v *Tabulce 2*. Návrh asfaltové směsi vychází především z *Tabulky 15* a *Tabulky 16*, které udávají požadovanou křivku zrnitosti směsi kameniva, výslednou mezerovitost směsi a další parametry. [7]

Ložní vrstvy ¹⁾					
Článek normy, tabulka	Typ		S	+	bez označení
	Označení směsi ACL		16 S, 22 S	16 +, 22 +	16, 22
Požadavky na drobné kamenivo a směr kameniva					
4.1.3, tabulka 2	Zrnitost DK ($D \leq 2$) G_F		G_F85		
4.1.3, tabulka 2	Zrnitost SK ($D \leq 5$ a $d = 0$) G_A		G_A85		
4.1.3.2, tabulka 4	Tolerance zrnitosti DK a SK ($D \leq 8$) G_{TC}		$G_{TC}10$		
4.1.4, tabulka 5	Obsah jemných částic f	těžené	–	f_3	f_{10}
		drcené	$f_{10}^{(2)}$		f_{16}
4.1.5, tabulka 6	Kvalita jemných částic ³⁾ MB_F		MB_F10		
Požadavky na hrubé kamenivo					
4.1.3, tabulka 2	Zrnitost HK ($D > 2$) G_C		$G_C90/15$ (85/15) ⁴⁾	$G_C85/15$	
4.1.3.1, tabulka 3	Tolerance zrnitosti G pro D/d	< 4	$G_{25/15}$	$G_{20/15}$	
		≥ 4	$G_{20/17,5}$		
4.1.4, tabulka 5	Obsah jemných částic f		f_2		
4.1.6, tabulka 8	Tvarový index SI pro horní mez zrnění	$D < 11,2$	SI_{30}	SI_{35}	
		$D \geq 11,2$	SI_{25}	SI_{30}	
4.2.2, tabulka 11	Odolnost proti drcení LA (zkouší se na frakci 10/14 nebo 8/11)		LA_{25}	LA_{30}	
4.2.9.1, tabulka 17	Nasákavost ⁵⁾ WA_{24}		$WA_{24}1$	$WA_{24}2$	
4.2.9.2, tabulka 20	Trvanlivost síranem hořečnatým ⁶⁾ MS		MS_{25}		
4.2.9.2, tabulka 19	Odolnost proti zmrazování a rozmrazování F		F_2	F_4	
4.2.12, tabulka 21	Odolnost proti rozpadavosti čediče ⁷⁾ SB		$SB_{LA \leq 8}$		
4.3.4.3, tabulka 23	Rozpínavost kameniva z ocelárenské strusky V		hodnoty se deklarují		

HK – hrubé kamenivo, DK – drobné kamenivo, SK – směs kameniva (např. 0/4), HDK – hrubé drcené kamenivo, DDK – drobné drcené kamenivo, DTK – drobné těžené kamenivo, SDK – směs drceného kameniva, STK – směs těženého kameniva.

¹⁾ Přílnavost pojiva ke kamenivu se stanoví podle ČSN 73 6161 a musí být pro vozovky s TDZ S, I, II dobrá, u ostatních TDZ musí být minimálně vyhovující.

²⁾ U kameniva vápencového nebo dolomitického původu je přípustná hodnota f_{16} , u kameniva z jiných hornin lze po dohodě s jejich výrobcem využít toleranci tabulky 4 a článku 4.1.5 ČSN EN 13043:2004.

³⁾ Při obsahu jemných částic větším než 3 % hmotnosti v DDK a/nebo ve SDK se jejich kvalita ověří metodou podle 4.1.5 ČSN EN 13043:2004.

⁴⁾ Požadavky na zrnitost uvedené v závorce platí pro frakci 8/11 a 11/16.

⁵⁾ Pokud nasákavost kameniva podle kapitol 7 a 8 ČSN EN 1097-6:2014 je menší než 1 % hmotnosti pro asfaltové směsi s označením „S“ a „+“ nebo 2 % pro směsi bez označení, lze kamenivo považovat za mrazuvzdorné a není nutné stanovovat trvanlivost nebo odolnost proti zmrazování a rozmrazování. V opačném případě se provede zkouška trvanlivosti síranem hořečnatým podle ČSN 1367-2 nebo zkouška odolnosti proti zmrazování a rozmrazování podle ČSN EN 1367-1.

⁶⁾ Pokud trvanlivost kameniva síranem hořečnatým podle ČSN EN 1367-2 splňuje uvedené požadavky, lze kamenivo považovat za mrazuvzdorné a není nutné stanovovat odolnost proti zmrazování a rozmrazování.

⁷⁾ Pokud jsou zjištěny známky výskytu rozpadavosti čediče, stanovuje se ztráta hmotnosti a odolnost proti drcení podle ČSN EN 1367-3 a ČSN EN 1097-2.

Tabulka 15: Požadavky na kamenivo do vrstev ACL [7]



Ložní vrstvy						
Typ	S		+		bez označení	
Označení směsi ACL	16 S, 22 S		16 +, 22 +		16, 22	
Počet úderů Marshallova pěchu	2 × 75		2 × 50		2 × 50	
Všeobecné požadavky						
Zrnitost / sito (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		–	
Maximální poměrná hloubka koleje PRD_{AIR} (%) ⁴⁾	3,0		4,0		–	
Maximální přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR} (mm/10 ³ cyklů) ⁴⁾	0,05		0,06		–	
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					
Maximální podíl STK v SK nebo DTK v DK (%)	jen drcené		50 %			
Empirické požadavky						
Minimální obsah rozpustného pojiva B_{min} (% hm.) ^{6) 8)}	4,2	4,0	4,2	4,0	viz ACL 16+	viz ACL 22+
Minimální obsah rozpustného pojiva B_{vol} (% obj.) ⁷⁾	9,8	9,2	9,8	9,2		
Minimální stupeň vyplnění mezer VFB_{min} (%) ^{2) 8)}	–		60	55		
Maximální stupeň vyplnění mezer VFB_{max} (%) ^{2) 8)}	–		74	71		
¹⁾ Při různé objemové hmotnosti HDK a DDK (SDK) lze čáru zrnitosti vyhodnocovat v % objemu. ²⁾ Mezerovitost ztuhlé asfaltové směsi a stupeň vyplnění mezer směsi se stanoví podle ČSN EN 13108-20 ed. 2:2018, tabulka B.1, řádek 3. Hodnoty v závorkách platí pro kontrolní zkoušky. V případě použití směsi typu ACL pod litý asfalt (MA) může být maximální mezerovitost takové směsi až $V_{max} = 7 \%$ (8,5 % obj.). ³⁾ Stanovení odolnosti vůči vodě se provede podle ČSN 13108-20 ed. 2:2018, tabulka B.1, řádek 7. ⁴⁾ Zkouška odolnosti proti tvorbě trvalých deformací se provede podle ČSN 13108-20 ed. 2:2018, tabulka D.1, řádek 4. ⁵⁾ Uvedené minimální a maximální teploty nesmí být překročeny na žádném místě obalovny. Teploty pro modifikované asfalty se řídí údaji výrobce pojiva. ⁶⁾ Minimální hodnota obsahu asfaltu se násobí korekčním faktorem $\alpha = 2,650/\rho_a$, kde ρ_a je objemová hmotnost kameniva v Mg/m ³ stanovená podle EN 1097-6. ⁷⁾ Obsah asfaltu v % objemu se vypočítá podle vzorce $B_{vol} = \rho_b \times B/1,020$ (%), kde ρ_b je objemová hmotnost ztuhlé směsi (Mg/m ³), B je obsah asfaltu v % hmotnosti, 1,020 je objemová hmotnost asfaltového pojiva (Mg/m ³). ⁸⁾ Doporučené hodnoty. ⁹⁾ Hodnota se deklaruje pouze pro TDZ II nebo pro pomalou a zastavující dopravu u TDZ III, v obou případech pouze při použití nemodifikovaného pojiva.						

Tabulka 16: Požadavky na asfaltové betony do ložních asfaltových vrstev [7]



3.4.2 Laboratorní výroba směsi

Laboratorní výroba směsi je popsána v normě ČSN EN 12697-35 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 35: Laboratorní výroba směsi*, ze které lze vyčíst požadavky na přípravu kameniva, pojiva, fileru a R-materiálu, a zjistit předepsanou teplotu a dobu, při které se směs má připravovat. Teplota míchání (referenční teplota) byla určena na základě typu asfaltové směsi a použitého silničního pojiva. Při použití silničního pojiva 50/70 byla tedy referenční teplota uvažována 150 °C. Vysušené množství požadovaného kameniva a fileru bylo před použitím uloženo do odvětrávané sušárny při referenční teplotě ± 5 °C na dobu minimálně 8 hodin spolu s připraveným pojivem v nádobě, které do ní bylo umístěno na dobu 3 až 5 hodin. Navážka R-materiálu byla ohřáta na teplotu 120 až 130 °C. Bylo potřeba nechat společně se všemi složkami směsi ohřát i všechny nástroje, které při výrobě byly využity (mísy, lopatky), aby směs neztratila při míchání předepsanou teplotu. To samé samozřejmě platilo i v případě míchání v laboratorní míchačce (Obrázek 14). Do vyhřáté nádoby byla nasypaná směs kameniva a následně přidáno pojivo. Složky se smísily, poté byl přidán filer a znovu se míchalo, dokud nedošlo k požadovanému obalení kameniva pojivem. V případě výroby směsi s R-materiálem byl přidán R-materiál společně s rejuvenátorem před pojivem, aby se směs správně promísila. Výsledná směs byla vizuálně posouzena, aby se zajistila její dostatečná homogenita. [25]



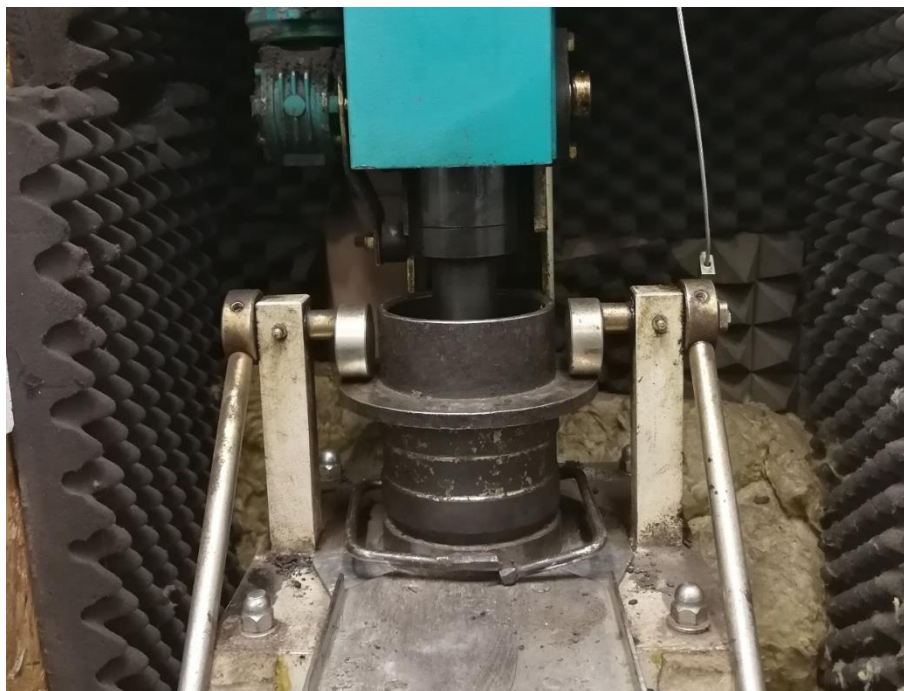
Obrázek 14: Laboratorní míchačka

3.4.3 Výroba válcových těles

Takto vytvořenou směs vytemperovanou na požadovanou teplotu (teplota hutnění byla stejná jako referenční teplota odpovídající normě ČSN EN 12697-35) bylo nutno zpracovat do zkušebních těles. Prvním použitým způsobem zpracování směsi bylo vytvoření těles ve tvaru válce (tzv. Marshallova tělesa) dle normy ČSN EN 12697-30 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava*



zkušebních těles rázovým zhutňovačem. Výroba spočívala v nasypání požadovaného množství směsi (zhruba 1240 g) do vyhřáté ocelové formy pro hutnění, která se zhutnila pomocí rázového zhutňovače (*Obrázek 15*) hutnicím beranem pěchu. Ten dopadal z předepsané výšky požadovaným počtem úderů v předepsaných intervalech na bicí hlavu pěchu uloženou na horním povrchu zkušebního tělesa. Zkušební těleso se poté nechalo vychladnout na laboratorní teplotu. Počet úderů se uvažoval 2 x 75 (viz. požadavek v *Tabulce 16* pro ACL 16 S) a 2 x 25 (požadavek pro zkoušku odolnosti vůči vodě), což znamená 75 (25) úderů z jedné strany, poté se těleso otočilo vzhůru nohama a provedlo se dalších 75 (25) úderů. [26]



Obrázek 15: Rázový zhutňovač pro výrobu zkušebních těles

3.4.4 Výroba desek

Dále bylo třeba vytvořit tělesa ve tvaru desky pomocí normy *ČSN EN 12697-33+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*, kdy se dané množství asfaltové směsi zhutnilo v plošné formě (forma pro požadované rozměry desky 320 mm x 260 mm x 60 mm) při zatížení vyvinutém hladkým ocelovým válcem, který působil na ocelové lamely způsobující hnětení směsi. Navážka asfaltové směsi (vypočtena na základě požadované mezerovitosti a rozměrech desky - *Vzorec 4*) se vložila do vyhřáté formy vystříkané separačním prostředkem, poté se směs opatrně a rovnoměrně rozprostřela pomocí lopatky, aby byly vyplněny rohy a bylo zabráněno segregaci směsi. Na vzniklou plochu se uložil ohřátý plech, na který se naskládaly lamely daných rozměrů. Pohyblivý stůl byl uveden do pohybu a válec se spustil na hutnicí lamely, čímž je zatlačoval konstantní silou. Válec pojížděl konstantní rychlostí podle zhutňovacího plánu. Válec se nechal pojíždět nejdříve tak, aby lamely byly zatlačeny do výšky zhruba 3 mm nad hranu pojížděné formy. Poté proběhla 5minutová technologická přestávka. Následovalo další pojíždění válcem až do úplného zatlačení lamel do formy. Znovu se provedla technologická



přestávka. Pro dokončení hutnění desky byla směs vystavena dalším 20 pojezdům válce. Hotová deska se po vyjmutí z formy nechala vychladnout na laboratorní teplotu. [27]

$$M = 10^{-6} * L * l * e * \rho_{mv} * \frac{100 - v}{100}$$

Vzorec 4: Hmotnost desky [27]

Kde je

M hmotnost desky [g]

L vnitřní délka formy [mm] ... $L = 320$ mm

l vnitřní šířka formy [mm] ... $l = 260$ mm

e konečná tloušťka desky [mm] ... $e = 60$ mm

ρ_{mv} maximální objemová hmotnost asfaltové směsi [kg/m^3]

v požadovaná mezerovitost v desce [%]



Obrázek 16: Lamelový zhutňovač desek

3.4.5 Stanovení maximální objemové hmotnosti

Pro výpočet obsahu mezer ve zhutněné asfaltové směsi bylo třeba zjistit její maximální objemovou hmotnost (hmotnost při dané teplotě připadající na jednotku objemu asfaltové směsi bez mezer), která se určí podle normy ČSN EN 12697-5 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Při bakalářské práci byl využit tzv. volumetrický postup. Vzorek asfaltové směsi se musel rozdrobit a rozdělit na hrubé částice a shluky. Takto upravený, vysušený vzorek byl umístěn do pyknometru o známé hmotnosti (m_1) a objemu (V_p), poté byla stanovena



hmotnost pyknometru s navážkou (m_2). Pyknometr se naplnil odvzdušněnou vodou a za použití částečného vakua se odstranil přebytečný vzduch. Po nasazení nástavce se pyknometr doplnil vodou po značku na nástavci a stanovila se jeho hmotnost (m_3). [28]

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{10^{-3} * V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w}}$$

Vzorec 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti [28]

Kde je

ρ_{mv} maximální objemová hmotnost vzorku [kg/m^3]

m_1 hmotnost pyknometru + nástavce [g]

V_p objem pyknometru s nástavcem po značku [cm^3]

m_2 hmotnost pyknometru + nástavce + navážky [g]

m_3 hmotnost pyknometru + nástavce + navážky + vody [g]

ρ_w hustota vody dané teploty určená ze Vzorce 6 [kg/m^3]

$$\rho_w = 10^{-3} * \left(1,00016584 + \frac{7,93 * t - 5,29 * t^2}{1000000} \right)$$

Vzorec 6: Hustota vody [28]

Kde je

ρ_w hustota vody dané teploty [kg/m^3]

t teplota vody [$^{\circ}\text{C}$]



Obrázek 17: Navážka v pyknometru pro stanovení maximální objemové hmotnosti



3.4.6 Stanovení objemové hmotnosti

Pro každé vyrobené zkušební těleso byla třeba stanovit jeho objemová hmotnost, která odpovídá hmotnosti při dané zkušební teplotě připadající na jednotku objemu zkušebního tělesa včetně mezer. Určení objemové hmotnosti se provádí dle normy ČSN EN 12697-6 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Během práce na bakalářské práci byly využity dva postupy, které jsou v normě popsány. Objemová hmotnost zhutněného vzorku byla stanovena z hmotnosti zkušebního tělesa a jeho objemu. [29]

U prvního postupu byla nejdříve určena hmotnost suchého vzorku na vzduchu (m_1). Poté bylo těleso ponořeno do vodní lázně udržované při známé teplotě po dobu alespoň 30 minut. Následně byla stanovena hmotnost ponořeného, nasyceného vzorku (m_2). Po zaznamenání bylo těleso vyjmulo z vody, povrchově usušeno a zváženo na vzduchu (m_3). Tento postup je pro tělesa s uzavřeným povrchem, proto byl použit pro válcová tělesa zhutněná 2 x 75 údery a pro desky. [29]

$$\rho_{b,ssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w$$

Vzorec 7: Stanovení objemové hmotnosti – nasycený suchý povrch SSD [29]

Kde je

ρ_{mv} objemová hmotnost SSD – nasycený suchý vzorek [kg/m^3]

m_1 hmotnost suchého zkušebního tělesa [g]

m_2 hmotnost zkušebního tělesa ve vodě [g]

m_3 hmotnost zkušebního tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného [g]

ρ_w hustota vody dané teploty určená ze Vzorce 6 [kg/m^3]

Druhý využitý způsob stanovení objemové hmotnosti je dle rozměrů zkušebních těles, které byly zjištěny podle normy ČSN EN 12697-29 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 29: Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles*. Tento postup byl použit pro válcová tělesa zhutněná 2 x 25 údery. [29] [30]

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} * v * d^2} * 10^6$$

Vzorec 8: Stanovení objemové hmotnosti podle rozměrů – pro válcové těleso [29]

Kde je

$\rho_{b,dim}$ objemová hmotnost podle rozměrů [kg/m^3]

m_1 hmotnost suchého zkušebního tělesa [g]

v výška zkušebního tělesa [mm]

d průměr zkušebního tělesa [mm]



3.4.7 Stanovení mezerovitosti

Mezerovitost (V_m) je pojem vyjadřující objem mezer (volný prostor mezi zrny kameniva obaleného asfaltem, který je vyplněn vzduchem) ve zkušebním tělese asfaltové směsi vyjádřený v % celkového objemu zkušebního tělesa. Tato definice a výpočet jsou uvedeny v normě ČSN EN 12697-8 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. Ke stanovení mezerovitosti byla využita znalost maximální objemové hmotnosti směsi (viz. kapitola 3.4.5) a objemové hmotnosti zkušebních těles (viz. kapitola 3.4.6). [31]

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

Vzorec 9: Stanovení mezerovitosti směsi [31]

Kde je

V_m *mezerovitost směsi [%]*

ρ_m *maximální objemová hmotnost směsi [kg/m^3]*

ρ_b *objemová hmotnost zkušebního tělesa [kg/m^3]*



3.4.8 První optimalizace

V prvním kroku bylo cílem navrhnout směs kameniva, která by nejvíce odpovídala Fullerově křivce pro optimální mezerovitost výsledné asfaltové směsi. Co se týče obsahu pojiva v asfaltové směsi, uvažovalo se 4,3 %, 4,6 % a 4,9 % z její celkové hmotnosti (*Tabulka 16* udává minimální hodnotu 4,2 %). Tímto způsobem byla navržena směs kameniva pro asfaltovou směs s R-materiálem a bez R-materiálu, přičemž obě byly ve třech variantách podle obsahu pojiva.

Fullerova křivka je jedna z doporučených čar zrnitosti pro získání plynulé zrnitosti směsi kameniva. Vztah pro výpočet je uveden ve *Vzorci 10*. [32]

$$y = \sqrt{\frac{d}{D}} * 100$$

Vzorec 10: Výpočet křivky zrnitosti podle Fullera [32]

Kde je

y váhové procento celkového propadu sítím o velikosti *d* [%]

d uvažovaná velikost zrna [mm]

D maximální velikost zrna [mm]

Fullerova křivka	
D	16
Síto	Propady
[mm]	[%]
63	100,00
45	100,00
31,5	100,00
22,4	100,00
16	100,00
11,2	83,67
8	70,71
5,6	59,16
4	50,00
2	35,36
1	25,00
0,5	17,68
0,25	12,50
0,125	8,84
0,063	6,27

Tabulka 17: Hodnoty pro Fullerovu křivku zrnitosti



V *Tabulce 18* a *Tabulce 19* je znázorněn postup při návrhu směsi kameniva složené z dostupných frakcí. Při návrhu se pracovalo se zbytky na jednotlivých sítích a upravovalo se procentuální zastoupení jednotlivých frakcí, aby výsledná čára zrnitosti směsi kameniva odpovídala požadavkům dle *Tabulky 16*. Ty jsou dány především dolní a horní mezní hodnotou propadů na jednotlivých sítích. Při návrhu bylo snahou dosáhnout co nejpodobnějších křivek zrnitosti ve směsi bez R-materiálu a s R-materiálem.

Bez R	Zbytky na sítích						Propady na sítích			
	8/16	8/11	4/8	2/4	0/4	filer	Celkové zbytky na sítích	Dolní mez	Návrh	Horní mez
Síto [mm]	%	%	%	%	%	%				
63	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
45	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	100,00	100
16	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	90	99,54	100
11,2	16,7	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	16,9		82,67	
8	4,7	4,7	2,1	0,0	0,0	0,0	11,6	52	71,11	72
5,6	0,9	0,9	13,0	0,0	0,0	0,0	14,8		56,28	
4	0,0	0,0	3,5	0,2	0,9	0,0	4,6	34	51,63	54
2	0,0	0,0	0,3	1,4	12,0	0,0	13,8	24	37,87	40
1	0,0	0,0	0,0	0,3	12,8	0,0	13,1		24,74	
0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	7,8	0,0	7,9		16,86	
0,25	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1	0,1	4,2		12,69	
0,125	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	0,2	2,3	5	10,38	13
0,063	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	0,3	1,7	4	8,71	10

Tabulka 18: Návrh křivky zrnitosti ACL 16 S bez R-materiálu – 1. optimalizace

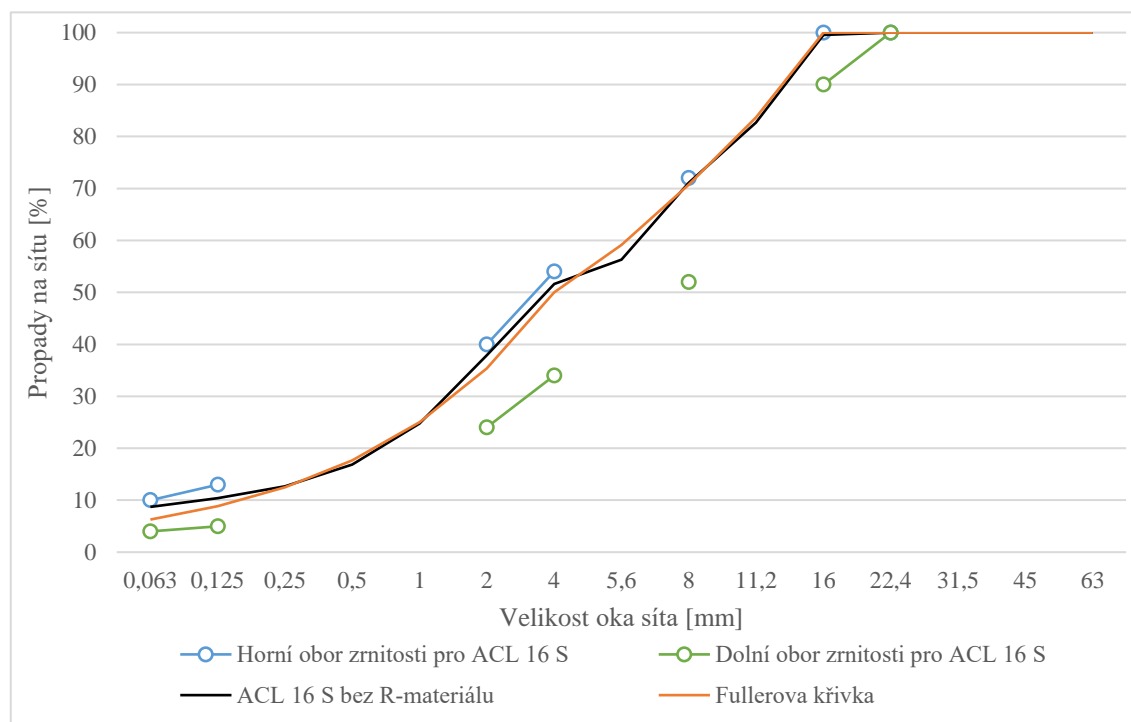
U směsi s R-materiálem bylo třeba vzít v potaz, že R-materiál obsahoval kamenivo i pojivo. Když tedy bylo nutné vytvořit směs o dané hmotnosti a předepsaném množství R-materiálu, procentuální podíl kameniva každé frakce (a R-materiálu) se u každé varianty mírně lišil. Bylo to dáno tím, že kamenivo v R-materiálu bylo zastoupeno stále ve stejném množství, zatímco celkové množství kameniva ve směsi se měnilo s požadovaným obsahem asfaltového pojiva. *Tabulka 19* znázorňuje případ pro variantu směsi ACL 16 S s R-materiálem a obsahem asfaltového pojiva 4,6 % („s R – 4,6“). Křivka zrnitosti byla pro všechny varianty však stejná.



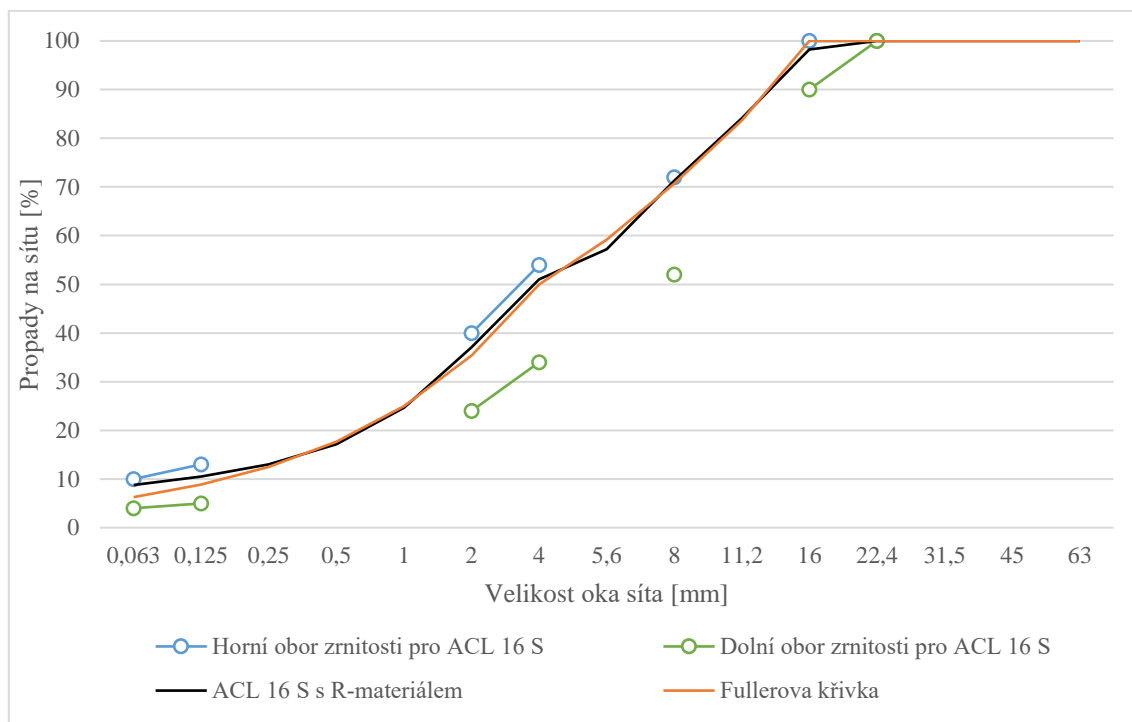
s R	Zbytky na sítích								Propady na sítích			
	Frakce	8/16	8/11	4/8	2/4	0/4	filer	R-mat	Celkové zbytky na sítích	Dolní mez	Návrh	Horní mez
Síto [mm]	%	%	%	%	%	%	%					
63	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
45	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	100,00	100
16	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	1,8	90	98,24	100
11,2	10,7	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	14,2		84,08	
8	3,0	6,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	12,8	52	71,31	72
5,6	0,6	1,1	9,1	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	14,1		57,19	
4	0,0	0,1	2,4	0,5	0,5	0,0	0,0	2,7	6,2	34	51,04	54
2	0,0	0,0	0,2	3,0	7,2	0,0	0,0	3,6	13,9	24	37,09	40
1	0,0	0,0	0,0	0,6	7,7	0,0	0,0	4,2	12,4		24,67	
0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	4,7	0,0	0,0	2,8	7,5		17,17	
0,25	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	0,1	1,7	4,2	4,2		12,98	
0,125	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	0,1	1,0	2,5	2,5	5	10,53	13
0,063	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,2	0,7	1,8	1,8	4	8,77	10

Tabulka 19: Návrh křivky zrnitosti ACL 16 S s R-materiálem – 1. optimalizace

V Grafu 8 a Grafu 9 je vykreslena křivka zrnitosti navržené směsi kameniva, její porovnání s Fullerovou křivkou (viz. Tabulka 17) a mezní hodnoty propadů.



Graf 8: Křivka zrnitosti ACL 16 S bez R-materiálu – 1. optimalizace



Graf 9: Křivka zrnitosti ACL 16 S s R-materiálem – 1. optimalizace

Jak je již výše uvedeno, při první optimalizaci byly uvažovány varianty s různým obsahem pojiva (4,3 %, 4,6 % a 4,9 %). Každé varianty bylo třeba ručně umíchat 6000 g (viz. kapitola 3.4.2), aby následně byla vyrobena 4 válcová tělesa (zhuťněná 2 x 75 údery), díky kterým se určila mezerovitost směsi. Ze znalosti hodnoty obsahu asfaltového pojiva v R-materiálu 4,65 % (viz. kapitola 3.3.4) bylo možno určit, jaké přesné množství dalšího pojiva gradace 50/70 se mělo do směsi přidat, aby bylo docíleno výsledné požadované hodnoty.

Varianta	Bez R - 4,3 %		Bez R - 4,6 %		Bez R - 4,9 %	
	%	g	%	g	%	g
ACL 16 S						
8/16	22,01	1320,7	21,94	1316,5	21,87	1312,4
8/11	5,74	344,5	5,72	343,4	5,71	342,4
4/8	18,18	1091,0	18,13	1087,6	18,07	1084,1
2/4	1,91	114,8	1,91	114,5	1,90	114,1
0/4	45,94	2756,2	45,79	2747,5	45,65	2738,9
filer	1,91	114,8	1,91	114,5	1,90	114,1
Pojivo 50/70	4,30	258,0	4,60	276,0	4,90	294,0
Celkem	100 %	6000 g	100 %	6000 g	100 %	6000 g

Tabulka 20: Složení 3 variant směsi ACL 16 S bez R-materiálu - 1. optimalizace



Varianta	s R - 4,3 %		s R - 4,6 %		s R - 4,9 %	
	%	g	%	g	%	g
8/16	14,09	845,4	14,03	841,6	13,96	837,8
8/11	7,38	442,8	7,35	440,8	7,31	438,9
4/8	12,75	764,9	12,69	761,5	12,63	758,0
2/4	4,03	241,5	4,01	240,5	3,99	239,4
0/2	27,51	1650,5	27,39	1643,2	27,26	1635,8
filer	1,34	80,5	1,34	80,2	1,33	79,8
R-mat	30,00	1800,0	30,00	1800,0	30,00	1800,0
Pojivo 50/70	2,90	174,3	3,20	192,3	3,50	210,3
Celkem	100 %	6000 g	100 %	6000 g	100 %	6000 g

Tabulka 21: Složení 3 variant směsi ACL 16 S s R-materiálem - 1. optimalizace

K určení mezerovitosti (viz. kapitola 3.4.7) jednotlivých variant byla zjištěna jejich maximální objemová hmotnost (viz. kapitola 3.4.5) a objemová hmotnost zkušebních těles (viz. kapitola 3.4.6). Vyrobená válcová tělesa jsou k vizuálnímu porovnání na Obrázku 18 a Obrázku 19.



Obrázek 18: Válcová tělesa 2 x 75 - ACL 16 S bez R-materiálu - 1. optimalizace



Obrázek 19: Válcová tělesa 2 x 75 - ACL 16 S s R-materiálem - 1. optimalizace

Tabulka 22 obsahuje shrnutí výsledných hodnot pro jednotlivé varianty. Dle předpokladů vyšla maximální objemová hmotnost (ρ_{mv}) nejvyšší ve variantách s nejmenším obsahem pojiva. Tento předpoklad vycházel z toho, že objemová hmotnost asfaltového pojiva je výrazně nižší než kameniva. U variant s R-materiálem může být tato skutečnost ovlivněna různými faktory jako například nehomogenním množstvím asfaltového pojiva nebo nehomogenní objemovou hmotností kameniva. Objemové hmotnosti (ρ_{bssd}) vytvořených válcových těles se v rámci daných variant příliš nelišily, a proto je jako výsledek uvedena vždy jejich průměrná hodnota. Podrobné výpočty jsou uvedeny v Příloze 1 a Příloze 2.

Varianta	ρ_{mv} [kg/m ³]	ρ_{bssd} [kg/m ³]	V_m [%]
bez R - 4,3	2793	2518	9,84
bez R - 4,6	2789	2510	10,00
bez R - 4,9	2779	2521	9,28
s R - 4,3	2779	2565	7,70
s R - 4,6	2767	2587	6,51
s R - 4,9	2775	2574	7,25

Tabulka 22: Mezerovitost - 1. optimalizace

K posouzení, zda byla varianta vhodná pro další zkoušky, posloužila její mezerovitost. Tabulka 16 udává minimální (V_{min}) a maximální (V_{max}) požadovanou mezerovitost, přičemž pro směs ACL 16 S je $V_{min} = 4 \%$ a $V_{max} = 6 \%$. Tuto podmínku nesplňovala žádná z vytvořených variant, avšak bylo evidentní, že použitý R-materiál snižoval mezerovitost směsi. S touto znalostí bylo nutno provést ještě jednu optimalizaci.



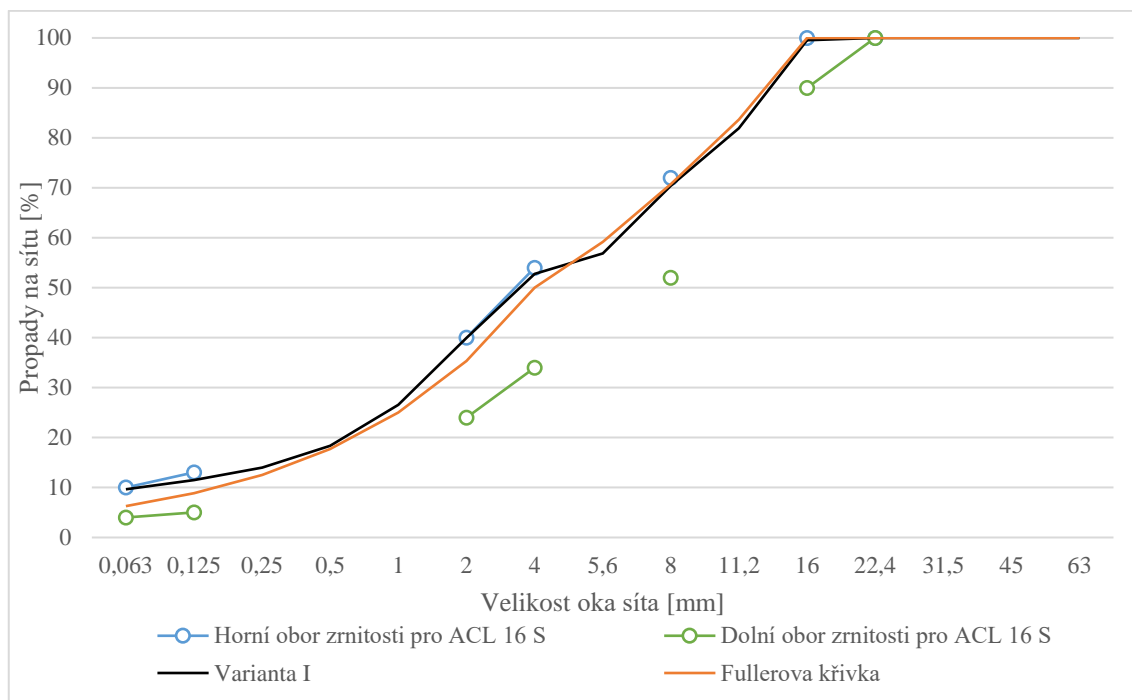
3.4.9 Druhá optimalizace

Po neuspokojivých výsledcích mezerovitostí z první optimalizace bylo třeba upravit křivku zrnitosti. Obsah pojiva byl od této chvíle uvažován ve všech variantách 4,6 %. S předpokladem, že směs s R-materiálem bude mít mezerovitost menší než směs bez R-materiálu, se v této optimalizaci pracovalo se třemi variantami směsi bez R-materiálu. Při návrhu těchto variant bylo třeba dát pozor, aby případnou směs s R-materiálem bylo možno, z hlediska co nejpodobnější křivky zrnitosti, vytvořit.

V první variantě (označené „I“) bylo snahou se co nejvíce přiblížit horním mezním hodnotám propadů na daných sítích. Zároveň zde byla zcela vyřazena frakce 2/4, která se při první optimalizaci vyskytovala ve směsi kameniva pouze ve 2 %. V *Tabulce 23* je návrh této varianty a v *Grafu 10* je její křivka zrnitosti v porovnání s Fullerovou křivkou.

I	Zbytky na sítích						Propady na sítích				
	Frakce	8/16	8/11	4/8	2/4	0/4	filer	Celkové zbytky na sítích	Dolní mez	Návrh	Horní mez
[mm]	%	%	%	%	%	%	%				
63	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
45	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	100,00	100
16	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	90	99,52	100
11,2	17,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,6		81,92	
8	4,9	4,7	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	11,5	52	70,38	72
5,6	1,0	0,9	11,6	0,0	0,0	0,0	0,0	13,5		56,89	
4	0,0	0,0	3,1	0,0	1,0	0,0	0,0	4,1	34	52,78	54
2	0,0	0,0	0,3	0,0	12,5	0,0	0,0	12,8	24	39,96	40
1	0,0	0,0	0,0	0,0	13,4	0,0	0,0	13,4		26,56	
0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	8,1	0,1	0,1	8,2		18,34	
0,25	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2	0,1	0,1	4,4		13,98	
0,125	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	0,2	0,2	2,5	5	11,50	13
0,063	0,1	0,0	0,0	0,0	1,4	0,4	0,4	1,9	4	9,65	10

Tabulka 23: Návrh křivky zrnitosti ACL 16 S bez R-materiálu – 2. optimalizace – varianta I

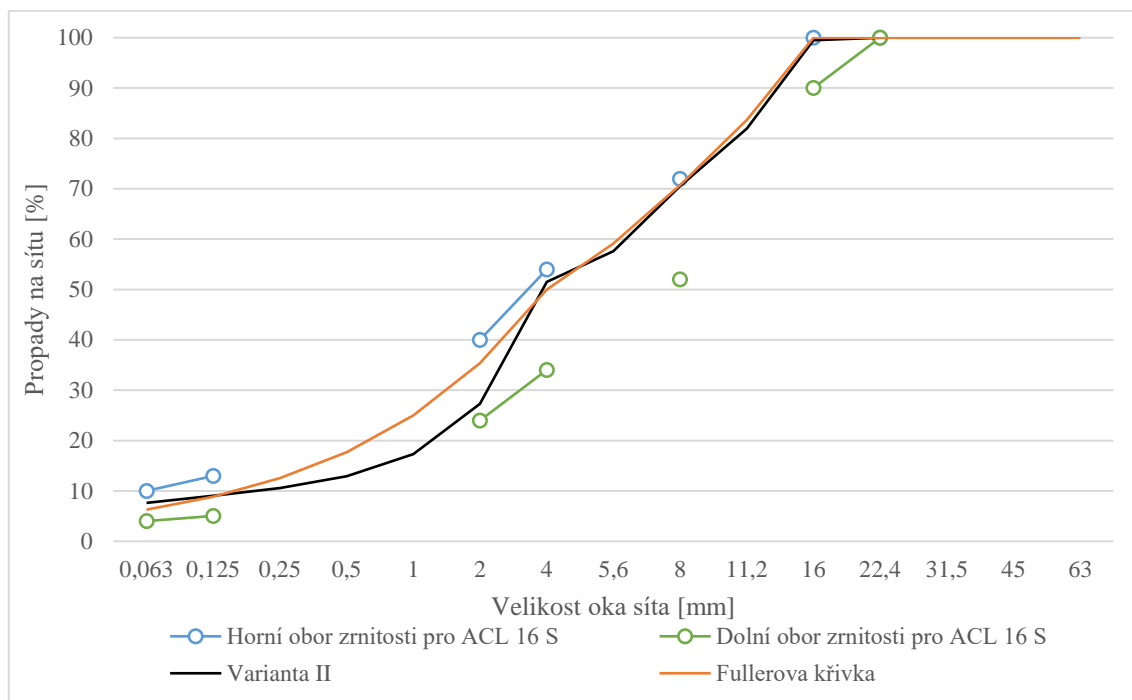


Graf 10: Křivka zrnitosti ACL 16 S bez R-materiálu – 2. optimalizace – varianta I

Druhá varianta se od první lišila především vyvážením obsahu frakcí 0/4 a 2/4, kdy každá byla zastoupena v 25 % hmotnosti kameniva. Podrobněji o návrhu je uvedeno v Tabulce 24. Jak je vidět z Grafu 11, rapidně se tím snižovaly propady především na sítích 2, 1, 0,5 a 0,25.

II	Zbytky na sítích						Propady na sítích				
	Frakce	8/16	8/11	4/8	2/4	0/4	filer	Celkové zbytky na sítích	Dolní mez	Návrh	Horní mez
	Síto [mm]	24,0 %	6,0 %	16,0 %	25,0 %	25,0 %					
63	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
45	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	100,00	100
16	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	90	99,52	100
11,2	17,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,6		81,92	
8	4,9	4,7	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	11,4	52	70,49	72
5,6	1,0	0,9	11,0	0,1	0,0	0,0	0,0	12,9		57,61	
4	0,0	0,0	2,9	2,7	0,5	0,0	0,0	6,1	34	51,47	54
2	0,0	0,0	0,3	17,6	6,3	0,0	0,0	24,2	24	27,30	40
1	0,0	0,0	0,0	3,3	6,7	0,0	0,0	10,0		17,28	
0,5	0,0	0,0	0,0	0,2	4,1	0,1	0,1	4,3		12,94	
0,25	0,0	0,0	0,0	0,1	2,1	0,2	0,2	2,4		10,54	
0,125	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,3	0,3	1,5	5	9,04	13
0,063	0,1	0,0	0,0	0,1	0,7	0,5	0,5	1,4	4	7,62	10

Tabulka 24: Návrh křivky zrnitosti ACL 16 S bez R-materiálu – 2. optimalizace – varianta II

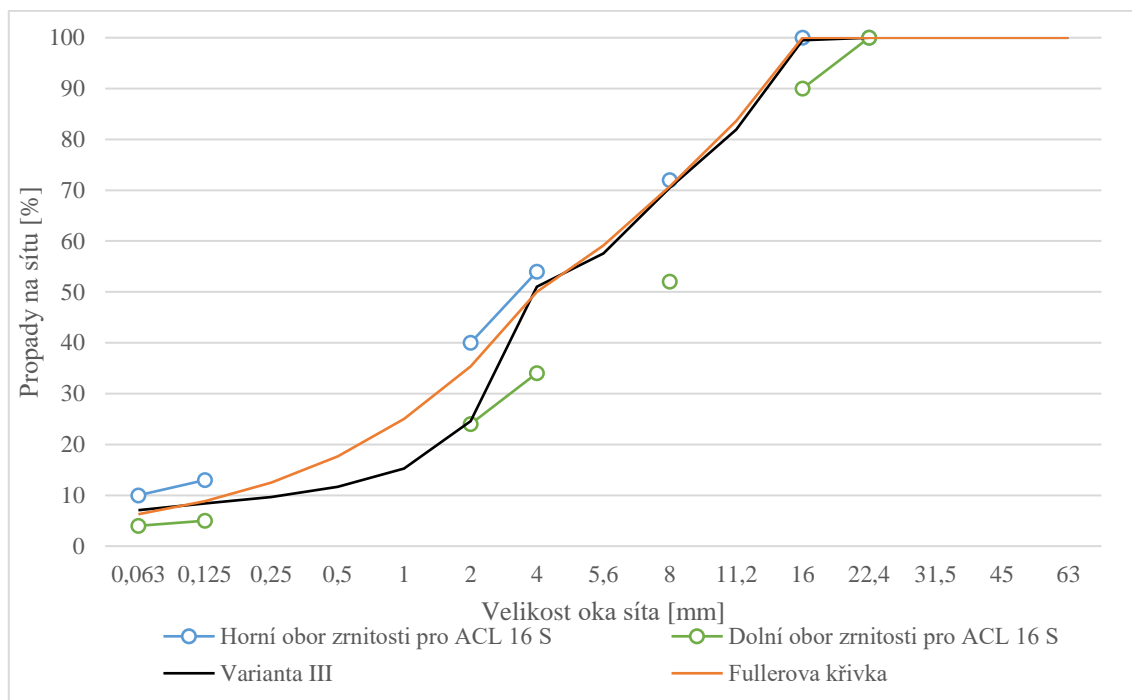


Graf 11: Křivka zrnitosti ACL 16 S bez R-materiálu – 2. optimalizace – varianta II

Ve třetí variantě bylo opět upraveno poměrné zastoupení frakcí 0/4 a 2/4, čímž se ještě více snížila hodnota propadu na sítích s otvorem menším než 2 mm a křivka se zde přiblížila dolním mezím. Tabulka 25 popisuje návrh směsi kameniva a na Grafu 12 je pak její křivka zrnitosti.

III Frakce Síto [mm]	Zbytky na sítích						Celkové zbytky na sítích	Propady na sítích		
	8/16	8/11	4/8	2/4	0/4	filer		Dolní mez	Návrh	Horní mez
	%	%	%	%	%	%				
63	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
45	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	100,00	100
16	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	90	99,52	100
11,2	17,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	17,6		81,92	
8	4,9	4,7	1,8	0,0	0,0	0,0	11,4	52	70,49	72
5,6	1,0	0,9	11,0	0,1	0,0	0,0	12,9		57,60	
4	0,0	0,0	2,9	3,2	0,4	0,0	6,6	34	51,01	54
2	0,0	0,0	0,3	21,2	5,0	0,0	26,4	24	24,57	40
1	0,0	0,0	0,0	4,0	5,4	0,0	9,3		15,23	
0,5	0,0	0,0	0,0	0,2	3,3	0,1	3,6		11,66	
0,25	0,0	0,0	0,0	0,1	1,7	0,2	2,0		9,67	
0,125	0,0	0,0	0,0	0,1	0,9	0,3	1,3	5	8,38	13
0,063	0,1	0,0	0,0	0,1	0,5	0,5	1,3	4	7,07	10

Tabulka 25: Návrh křivky zrnitosti ACL 16 S bez R-materiálu – 2. optimalizace – varianta III



Graf 12: Křivka zrnitosti ACL 16 S bez R-materiálu – 2. optimalizace – varianta III

Znovu bylo umícháno od každé varianty 6000 g směsi na výrobu válcových těles (viz. kapitola 3.4.4) a k určení maximální objemové hmotnosti (viz. kapitola 3.4.5). Na zkušebních tělesech byla stanovena jejich objemová hmotnost (viz. kapitola 3.4.6). Následně byly tyto informace využity při výpočtu mezerovitosti (viz. kapitola 3.4.7).

Varianta	I		II		III	
	%	g	%	g	%	g
8/16	22,90	1373,8	22,90	1373,8	22,90	1373,8
8/11	5,72	343,4	5,72	343,4	5,72	343,4
4/8	16,22	973,1	15,26	915,8	15,26	915,8
2/4	0,00	0,0	23,85	1431,0	28,62	1717,2
0/4	47,70	2862,0	23,85	1431,0	19,08	1144,8
filer	2,86	171,7	3,82	229,0	3,82	229,0
Pojivo 50/70	4,60	276,0	4,60	276,0	4,60	276,0
Celkem	100 %	6000 g	100 %	6000 g	100 %	6000 g

Tabulka 26: Složení 3 variant směsi ACL 16 S bez R-materiálu - 2. optimalizace



Obrázek 20: Válcová tělesa 2 x 75 - ACL 16 S bez R-materiálu - 2. optimalizace

Varianta	ρ_{mv} [kg/m ³]	ρ_{bssd} [kg/m ³]	V_m [%]
I	2776	2579	7,08
II	2787	2457	11,85
III	2741	2430	11,36

Tabulka 27: Mezerovitost - 2. optimalizace

Na *Obrázku 20* je vidět evidentní rozdíl ve zhuštění těles jednotlivých variant. Varianta I byla na první pohled oproti dalším dvěma více uzavřená, což odpovídalo navržené křivce zrnitosti s větším obsahem drobného kameniva. Toto vizuální posouzení se následně potvrdilo v *Tabulce 27*, kdy varianta I měla pro účely návrhu nejlepší mezerovitost. Hodnota $V_m = 7,08$ % sice nesplňovala základní podmínku mezerovitosti z *Tabulky 16*, ale splňovala podmínku pro kontrolní zkoušky ($V_{max} = 8$ %). Z časových důvodů bylo rozhodnuto pracovat dále s touto variantou s vědomím, že směs s R-materiálem by měla dosahovat ještě nižších hodnot. Podrobné výpočty maximální objemové hmotnosti (ρ_{mv}) a objemové hmotnosti těles (ρ_{bssd}) jsou uvedeny v *Příloze 3*.



3.5 ACL 16 S s R-materiálem a bez R-materiálu

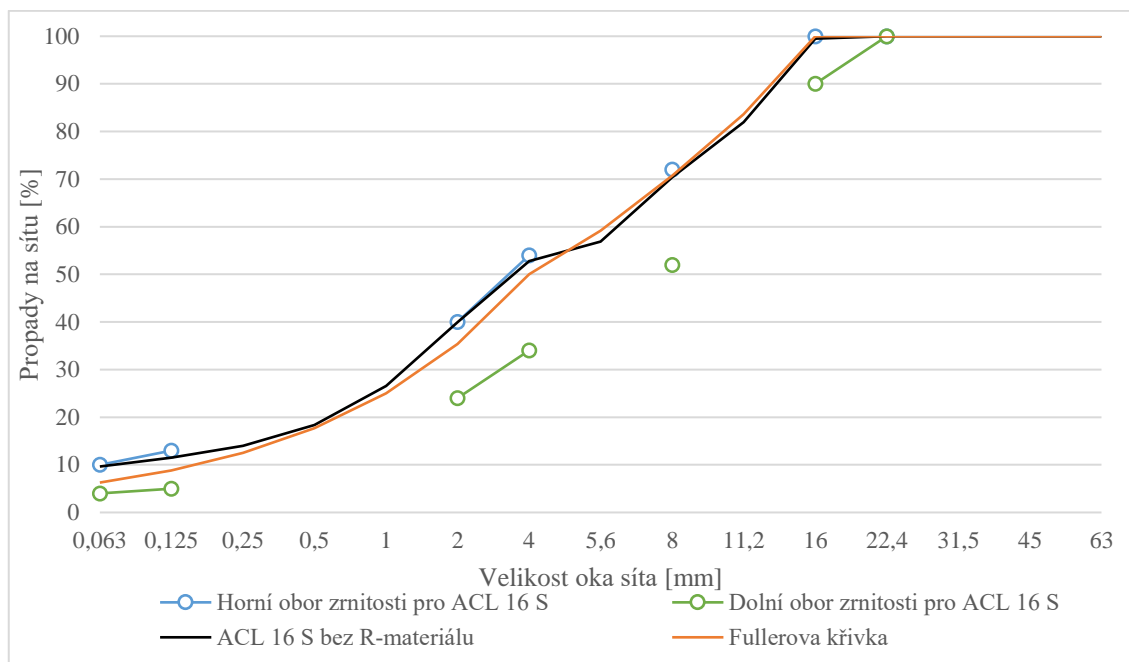
Po optimalizacích došlo na výrobu finální podoby směsí ACL 16 S a ACL 16 S s 30 % R-materiálu. Tělesa těchto směsí byla následně podrobena zkoušce na odolnost vůči vodě a mrazu, zjištěna se náchylnost na trvalé deformace zkouškou pojíždění kolem, byla určena jejich tuhost a odolnost vůči šíření trhliny. Výsledkem bylo porovnání vlastností těchto směsí, které mají podobnou křivkou zrnitosti.

3.5.1 Složení směsí

Finální směs bez R-materiálu měla složení stejné jako varianta I vytvořená při druhé optimalizaci (*Tabulka 28* a *Graf 13*). S frakcí 2/4 se již vůbec nepracovalo a nebyla použita ani při návrhu křivky zrnitosti u směsi s R-materiálem.

Bez R	Zbytky na sítích						Propady na sítích			
	8/16	8/11	4/8	2/4	0/4	filer	Celkové zbytky na sítích	Dolní mez	Návrh	Horní mez
	Síto [mm]	%	%	%	%	%				
63	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
45	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	100,00	100
16	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	90	99,52	100
11,2	17,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	17,6		81,92	
8	4,9	4,7	1,9	0,0	0,0	0,0	11,5	52	70,38	72
5,6	1,0	0,9	11,6	0,0	0,0	0,0	13,5		56,89	
4	0,0	0,0	3,1	0,0	1,0	0,0	4,1	34	52,78	54
2	0,0	0,0	0,3	0,0	12,5	0,0	12,8	24	39,96	40
1	0,0	0,0	0,0	0,0	13,4	0,0	13,4		26,56	
0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	8,1	0,1	8,2		18,34	
0,25	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2	0,1	4,4		13,98	
0,125	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	0,2	2,5	5	11,50	13
0,063	0,1	0,0	0,0	0,0	1,4	0,4	1,9	4	9,65	10

Tabulka 28: Návrh křivky zrnitosti směsi ACL 16 S bez R-materiálu

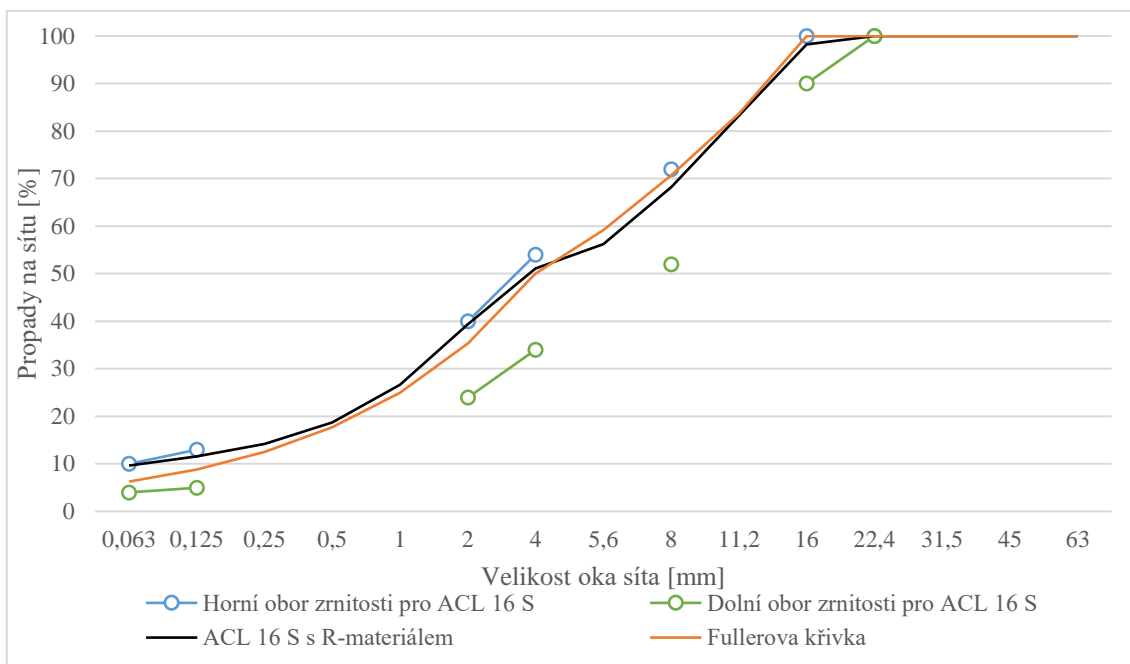


Graf 13: Křivka zrnitosti směsi ACL 16 S bez R-materiálu

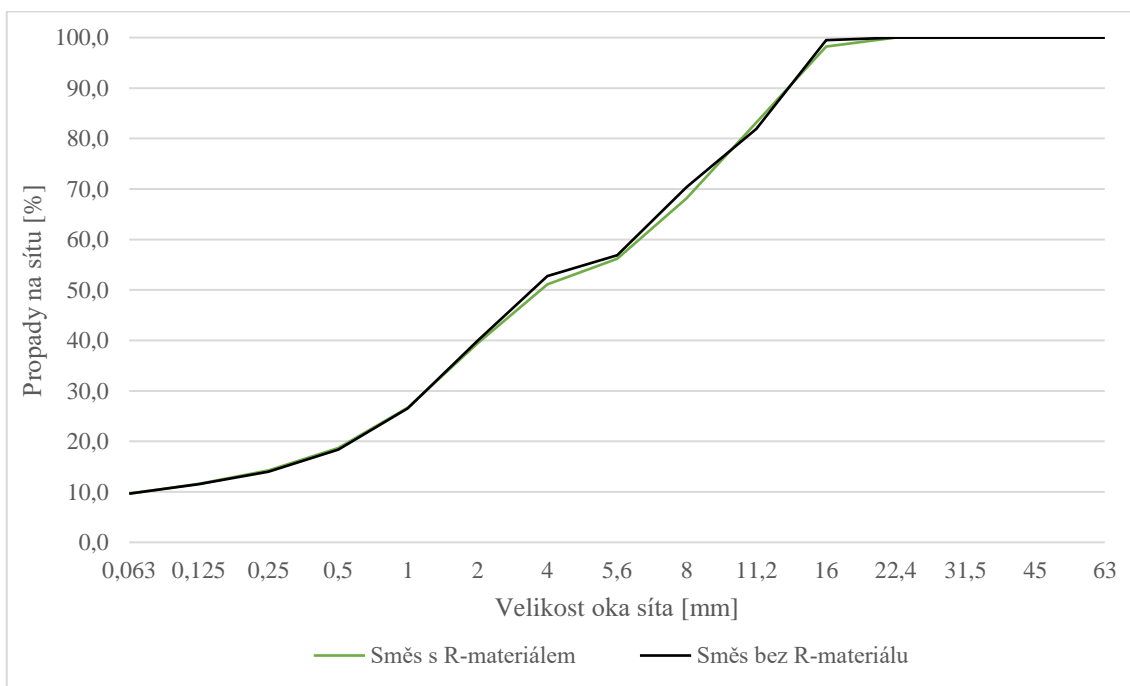
Při návrhu směsi s R-materiálem bylo opět snahou co nejvíce se přiblížit křivce zrnitosti směsi bez R-materiálu. Návrh je uveden v *Tabulce 29* a výsledná křivka zrnitosti v *Grafu 14*. Na *Grafu 15* je pak vidět porovnání těchto směsí.

S R	Zbytky na sítích							Celkové zbytky na sítích	Propady na sítích		
	8/16	8/11	4/8	2/4	0/4	filer	R-mat		Dolní mez	Návrh	Horní mez
Frakce	15,8	10,9	9,5	0,0	31,9	2,1	30,0				
Síto [mm]	%	%	%	%	%	%	%				
63	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
45	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		100,00	
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	100,00	100
16	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	1,8	90	98,22	100
11,2	11,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	15,0		83,20	
8	3,2	8,5	1,1	0,0	0,0	0,0	2,2	15,0	52	68,18	72
5,6	0,6	1,6	6,5	0,0	0,0	0,0	3,3	12,0		56,21	
4	0,0	0,1	1,7	0,0	0,6	0,0	2,7	5,1	34	51,12	54
2	0,0	0,0	0,1	0,0	8,0	0,0	3,6	11,7	24	39,41	40
1	0,0	0,0	0,0	0,0	8,5	0,0	4,2	12,7		26,69	
0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	5,2	0,0	2,8	8,0		18,69	
0,25	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	0,1	1,7	4,5		14,22	
0,125	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	0,2	1,0	2,6	5	11,58	13
0,063	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,3	0,7	1,9	4	9,65	10

Tabulka 29: Návrh křivky zrnitosti směsi ACL 16 S s R-materiálem



Graf 14: Křivka zrnitosti směsi ACL 16 S s R-materiálem



Graf 15: Porovnání křivek zrnitosti



3.5.2 Výroba směsí a zkušebních těles

Pro potřeby dalších zkoušek bylo nutné vyrobit celkem 15 válcových těles a 2 desky pro každou směs. Na základě předběžného odhadu hmotnosti desek, nutnosti zjištění maximální objemové hmotnosti a uvažované rezervě bylo umícháno 50 kg obou směsí (Tabulka 30).

Směs	ACL 16 S bez R-mat		ACL 16 S s R-mat	
	%	g	%	g
8/16	22,90	11448,0	15,03	7514,5
8/11	5,72	2862,0	10,35	5176,6
4/8	16,22	8109,0	9,02	4508,7
2/4	0,00	0,0	0,00	0,0
0/4	47,70	23850,0	30,39	15196,0
fíler	2,86	1431,0	2,00	1001,9
R-mat	0,00	0,0	30,00	15000,0
50/70	4,60	2300,0	3,20	1602,3
Celkem	100 %	50000 g	100 %	50000 g

Tabulka 30: Složení směsí ACL 16 S

K umícháání těchto směsí byla použita laboratorní míchačka (viz. kapitola 3.4.2). Následovalo vyrobení válcových těles (viz. kapitola 3.4.3), přičemž od každé směsi bylo potřeba vyrobit 6 těles zhuťněných 2 x 75 údery a 9 těles 2 x 25 údery. Zhruba 1 200 g směsi bylo vyhrazeno na stanovení maximální objemové hmotnosti a zbytek prozatím ponechán pro pozdější výrobu desek.

Výrobu desek bylo možno provést až po zjištění zhuťněné objemové hmotnosti, která je vypočtena v nadcházející kapitole. Potřebné množství směsi na výrobu desky bylo určeno z průměrné objemové hmotnosti těles (respektive mezerovitosti a maximální objemové hmotnosti směsi) a požadovaných rozměrů (viz. kapitola 3.4.4).

3.5.3 Objemová hmotnost, rozměry a mezerovitost

Mezerovitost směsi byla určena z objemové hmotnosti těles zhuťněných 2 x 75 údery a maximální objemové hmotnosti (viz. kapitola 3.4.7). Přestože byla již maximální objemová hmotnost (ρ_{mv}) pro směs bez R-materiálu zjištěna, zkouška byla provedena ještě jednou a dále se počítalo s nově získanou hodnotou. Na každém tělese byly kromě objemové hmotnosti (ρ_{bssd}) zjištěny i jeho rozměry. Tyto podrobné hodnoty jsou v Příloze 4.

ACL 16 S	ρ_{mv} [kg/m ³]	ρ_{bssd} [kg/m ³]	V_m [%]
bez R-mat	2802	2623	6,40
s R-mat	2785	2686	3,56

Tabulka 31: Mezerovitost



Mezerovitosti výsledných směsí (*Tabulka 31*) odpovídaly limitním hodnotám z *Tabulky 16* pro kontrolní zkoušky $V_{\min} = 3 \%$ a $V_{\max} = 8 \%$. Znovu se potvrdilo, že přidání R-materiálu směs výrazně uzavřelo, což lze i vizuálně posoudit z *Obrázku 21*.



*Obrázek 21: Válcová tělesa ACL 16 S zhutněná 2 x 75 úderů
(vlevo je směs bez R-materiálu a vpravo směs obsahující R-materiál)*

Stejným způsobem jako pro válcová tělesa zhutněná 2 x 75 úderů byla určena objemová hmotnost pro desky ($\rho_{\text{bssd,d}}$). Její výpočet společně se zjištěnými výškami desek je uveden v *Příloze 4*.



*Obrázek 22: Desky ACL 16 S
(vlevo je směs bez R-materiálu a vpravo směs obsahující R-materiál)*

Porovnáním objemové hmotnosti desky ($\rho_{\text{bssd,d}}$) a průměrné objemové hmotnosti zkušebních válcových těles ($\rho_{\text{bssd,m}}$) byla zjištěna míra zhutnění desek. Hodnoty jsou znázorněny v *Tabulce 32*. Zatímco u tří desek došlo k mírnému přehutnění, jedna deska nebyla zhutněna dostatečně.



Deska	$\rho_{\text{bssd,d}}$ [kg/m ³]	$\rho_{\text{bssd,m}}$ [kg/m ³]	Míra zhutnění
bez R-mat 1	2580	2623	98,39 %
bez R-mat 2	2631	2623	100,33 %
s R-mat 1	2703	2686	100,63 %
s R-mat 2	2718	2686	101,17 %

Tabulka 32: Míra zhutnění desek

Na válcových tělesech zhutněných 2 x 25 údery, která byla dále využita při zkoušce odolnosti vůči vodě a mrazu, byla určena objemová hmotnost podle Vzorce 8 za využití naměřených rozměrů a hmotností za sucha. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Příloze 5. Objemové hmotnosti vzorků s R-materiálem vycházely podobně, zatímco ve směsi bez R-materiálu vyšla objemová hmotnost těles poměrně rozdílně, což bylo potřeba při postupu ve zkoušce zohlednit (viz. kapitola 3.5.4).



Obrázek 23: Válcová tělesa ACL 16 S zhutněná 2 x 25 údery
(vlevo je směs bez R-materiálu a vpravo směs obsahující R-materiál)



3.5.4 Odolnost vůči vodě a mrazu

Tato zkouška spočívá v porovnání pevností zkušebních těles ve tvaru válce v příčném tahu, která byla vystavena třem různým podmínkám. Provádí se dle české normy ČSN EN 12697-12 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě* a americké normy AASHTO T-283-03, *Standard Method of Test for: Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*. Obě normy porovnávají pevnosti zkušebních těles nasycených vodou (mokrých) se suchými tělesy, která byla vystavena pouze vzduchu. Od každé směsi bylo vyrobeno 9 těles zhutněných 2 x 25 úderů, která byla následně rozdělena do 3 skupin po 3 tak, aby se průměrné objemové hmotnosti každé skupiny víceméně rovnaly. První a druhá skupina byla temperována podle ČSN EN 12697-12, třetí skupina pak dle AASHTO T-283-03. [33] [34]

První skupina zkušebních těles byla udržována na vzduchu při laboratorní teplotě. Druhá skupina byla uložena na podložku do vakuové komory naplněné destilovanou vodou o teplotě 20 °C do úrovně nejméně 20 mm nad horním povrchem zkušebních těles. V komoře se postupně snižoval tlak na hodnotu 6,7 kPa, který byl udržován po dobu 30 minut. Poté byl do komory pomalu vpouštěn atmosférický tlak a tělesa se ponechala ponořená po dobu dalších 30 minut. Po uplynutí této doby byla přemístěna skupina mokrých těles do vodní lázně o teplotě 40 °C na dobu 72 ± 2 hodin. [33]

U třetí skupiny těles se postupovalo obdobně jako podle české normy. Tělesa se nechala sytit v komoře, stejně tak i posléze odstat, pouze na 10 minut. Následně byly vzorky zváženy a umístěny do igelitového sáčku, do kterého bylo přidáno 10 ml vody injekční stříkačkou. Sáček byl uzavřen a zajištěn kolíčkem. Takto připravená tělesa byla umístěna do mrazáku, kde byla ponechána o teplotě -18 °C po dobu 16 hodin. Poté byla tělesa vyjmuta ze sáčku a uložena do vodní lázně nastavené na teplotu 60 °C. Zde byla tělesa ponechána 24 hodin. [34]



Obrázek 24: Vakuová komora



Takto připravená zkušební tělesa bylo potřeba vytemperovat na zkušební teplotu 15 °C. Skupina suchých těles byla tedy uložena na požadovanou teplotu do sušárny, zatímco mokrá tělesa byla temperována ve vodní lázni. [33]

Po temperaci těles na nich byla stanovena pevnost v příčném tahu podle normy ČSN EN 12697-23 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu při zkušební teplotě*. Těleso bylo umístěno (v případě temperování ve vodě bylo nejdříve povrchově usušeno) do tlačných čelistí hydraulického lisu tak, aby bylo zatěžováno uprostřed (Obrázek 25) konstantní rychlostí 50 mm/min, dokud nedošlo k porušení tělesa. Následně bylo zařízení zastaveno a zaznamenalo se naměřené maximální zatížení (P) a příčná deformace (Δ). [35]



Obrázek 25: Upevnění zkušebního tělesa pro zkoušku ITS

$$ITS = \frac{2 * P}{\pi * D * H} * 1000$$

Vzorec 11: Pevnost v příčném tahu – ITS [35]

Kde je

ITS pevnost v příčném tahu [kPa]

P maximální zatížení [kN]

D průměr zkušebního tělesa [mm]

H výška zkušebního tělesa [mm]



ACL 16 S bez R-materiálu							
Podmínky	Vzorek	$\rho_{b,dim}$ [kg/m ³]	H [mm]	D [mm]	P [kN]	Δ [mm]	ITS [kPa]
ITS _d	1	2366,95	64,0	101,9	17,72	3,06	1,730
	2	2469,48	61,8	101,7	25,32	2,55	2,562
	9	2342,63	63,7	102,9	16,47	2,71	1,599
ITS _w	3	2348,03	65,1	102,1	10,21	3,68	0,978
	6	2442,92	62,4	101,8	14,75	2,81	1,477
	8	2368,05	64,4	101,8	10,57	2,85	1,027
ITS _{w+f}	4	2428,34	63,0	102,0	14,21	2,74	1,408
	5	2363,61	64,2	101,9	11,20	2,66	1,090
	7	2383,12	64,4	101,6	10,29	2,85	1,001
ACL 16 S s R-materiálem							
Podmínky	Vzorek	$\rho_{b,dim}$ [kg/m ³]	H [mm]	D [mm]	P [kN]	Δ [mm]	ITS [kPa]
ITS _d	2	2481,90	61,7	101,5	26,84	2,37	2,729
	4	2473,17	61,1	102,3	23,58	3,17	2,402
	7	2468,43	61,9	101,7	24,50	2,83	2,478
ITS _w	3	2510,94	61,0	101,7	20,77	2,87	2,133
	5	2471,12	62,3	101,8	22,05	2,78	2,213
	6	2478,21	59,7	103,1	18,88	3,01	1,953
ITS _{w+f}	1	2484,21	61,3	101,8	18,58	3,16	1,896
	8	2467,96	61,7	101,8	18,37	3,33	1,861
	9	2481,60	61,5	101,8	17,91	3,93	1,820

Tabulka 33: Pevnost v příčném tahu – ITS

Kde je

ITS_d pevnost v příčném tahu 1. skupiny těles – suché (dry) [kPa]

ITS_w pevnost v příčném tahu 2. skupiny těles – mokré (wet) [kPa]

ITS_{w+f} pevnost v příčném tahu 3. skupiny těles – mokré + zmražené (wet + frozen) [kPa]

Z Tabulky 33 je vidět, že u směsi s R-materiálem vyšly hodnoty pevností v příčném tahu na válcových tělesech v rámci skupiny podobně. Směs bez R-materiálu naopak vykazovala hodnoty značně rozdílné, kdy v každé skupině vždy jedno těleso výslednou pevností výrazně převyšovalo ostatní. Dle normy ČSN EN 12697-23 nesmí být rozdíl pevností jednotlivých vzorků od průměrné hodnoty zkoušené skupiny těles větší než 17 %, což žádná skupina směsi bez R-materiálu nespĺňovala. Tato tělesa (vzorek 2, 4 a 6) byla vyhodnocena odděleně. [35]

Odolnost vůči vodě a mrazu je vyjádřena jako poměr pevnosti v příčném tahu stanovený na mokrých tělesech k tělesům udržovaným na vzduchu vyjádřený v procentech (ITS_R - Vzorec 12). [33]



$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} * 100$$

Vzorec 12: Poměr pevností v příčném tahu – ITSR [33]

Kde je

$ITSR$ poměr pevností v příčném tahu [%]

ITS_w průměrná pevnost v příčném tahu skupiny mokrých zkušebních těles (skupina 2 a 3) [kPa]

ITS_d průměrná pevnost v příčném tahu skupiny suchých zkušebních těles (skupina 1) [kPa]

Výsledné pevnosti v příčném tahu pro směs s R-materiálem byly u každé skupiny vyjádřeny jako průměrná hodnota pevností jednotlivých těles. Tělesa bez R-materiálu byla při vyhodnocení rozdělena označením „I“ (tělesa 1, 3, 5, 7, 8 a 9) a „II“ (tělesa 2, 4 a 6) z důvodu rozdílných výsledků.

ACL 16 S	ø ITS_d [kPa]	ø ITS_w [kPa]	ø ITS_{w+f} [kPa]	ITSR	ITSR _f
bez R-materiálu – I	1,665	1,002	1,045	60,2 %	62,8 %
bez R-materiálu – II	2,562	1,477	1,408	57,6 %	54,9 %
s R-materiálem	2,536	2,100	1,859	82,8 %	73,3 %

Tabulka 34: Poměr pevností v příčném tahu – ITSR

Pro směs ACL 16 S je v *Tabulce 16* minimální požadovaná hodnota pro poměr pevností v příčném tahu $ITSR_{min} = 80 \%$. Tato limitní hodnota platí pro postup dle ČSN EN 12697-12. Metoda podle AASHTO T-283-03 předepsanou minimální hodnotu nemá, avšak z dřívějších zkušeností a poznatků ČVUT v Praze lze tento požadavek stanovit na 70 %. Tyto podmínky splňovala pouze směs s R-materiálem. Hodnoty u směsi bez R-materiálu vyšly překvapivě nízké a pro další zhodnocení by bylo nutné dodatečně zjistit další vlastnosti, jako je například přilnavost asfaltového pojiva ke kamenivu. Čedičové kamenivo však obecně vykazuje horší přilnavost asfaltového pojiva, což by eventuálně vedlo k použití přilnavostních přísad.

3.5.5 Zkouška pojíždění kolem

Zkouška pojíždění kolem je popsána v normě ČSN EN 12697-22+A1 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 22: Zkouška pojíždění kolem*. Určuje stanovení náchylnosti asfaltových směsí k trvalé deformaci pod účinkem zatížení. Zkouška se provádí na tělesech ve tvaru desky, které jsou při zkoušce upevněny ve formě zkušebního zařízení tak, aby jejich povrch byl v jedné rovině s horním okrajem formy. Před začátkem zkoušky byly desky vytemperovány na teplotu 50 °C. Náchylnost asfaltových směsí k trvalé deformaci se usuzuje v závislosti na hloubce vyjeté koleje způsobené opakovaným pojížděním zatěžovacím kolem při stálé teplotě. Desky byly tedy vystaveny celkem 10 000 zatěžovacím cyklům, přičemž výsledkem zkoušky byla hloubka vyjeté koleje (d) při daném počtu cyklů, z čehož bylo možno vypočítat přírůstek hloubky vyjeté koleje (WTS_{AIR}) a průměrnou hloubku vyjeté koleje pro zkoušenou směs (PRD_{AIR}). Tento proces je zcela zautomatizovaný a byl proveden na přístroji, který je na *Obrázku 26*. [36]



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

Vzorec 13: Přírůstek hloubky vyjeté koleje na vzduchu [36]

Kde je

WTS_{AIR} přírůstek hloubky vyjeté koleje [mm]

$d_{10\ 000}$ hloubka vyjeté koleje po 10 000 cyklech [mm]

$d_{5\ 000}$ hloubka vyjeté koleje po 5 000 cyklech [mm]

$$PRD_{AIR} = \frac{d_{5\ 000}}{v} * 100$$

Vzorec 14: Průměrná hloubka vyjeté koleje [36]

Kde je

PRD_{AIR} průměrná hloubka vyjeté koleje [%]

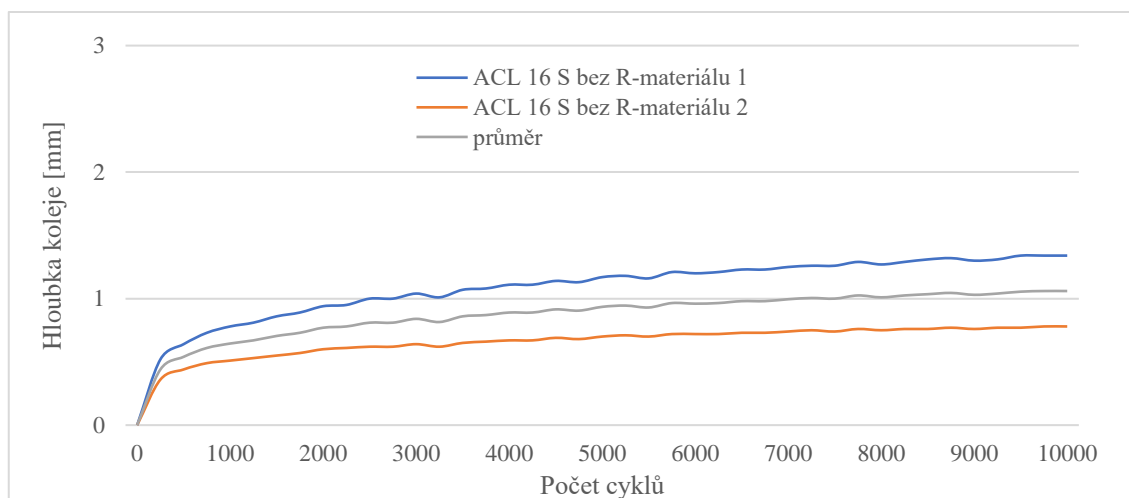
$d_{5\ 000}$ průměr hloubky vyjeté koleje po 5 000 cyklech ze dvou desek [mm]

v průměrná výška desek [mm]

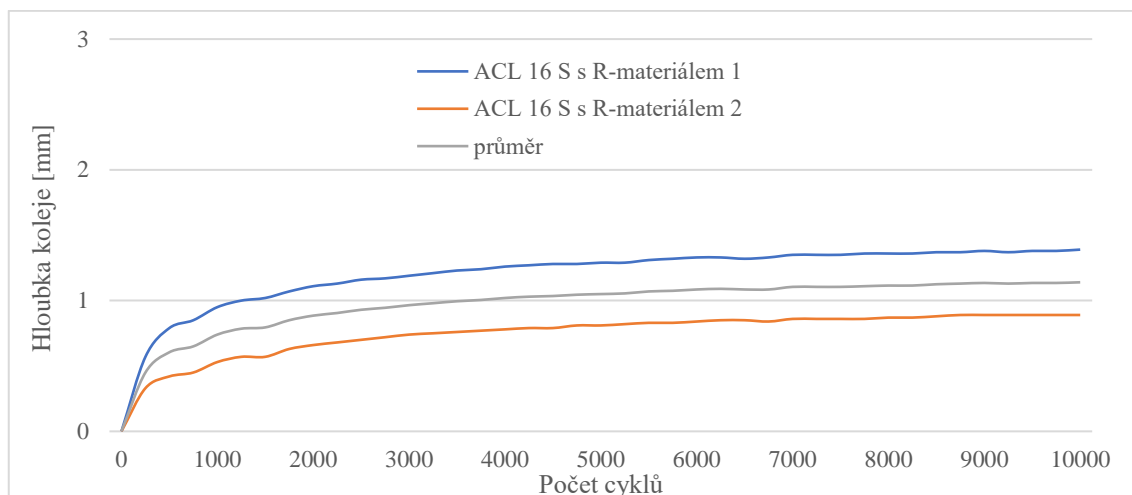
Hodnoty byly automaticky zaznamenány počítačem a výsledky zkoušky vypočteny podle vzorců uvedených výše. Tyto údaje jsou uvedeny v *Tabulce 35* a grafické znázornění závislosti počtu pojížděcích cyklů na hloubce vyjeté koleje obsahuje *Graf 16* a *Graf 17*.

ACL 16 S – deska	v [mm]	$d_{5\ 000}$ [mm]	$d_{10\ 000}$ [mm]	WTS_{AIR} [mm]	PRD_{AIR} [%]
bez R-mat 1	61,0	1,17	1,34	0,025	1,6 %
bez R-mat 2	59,4	0,70	0,78		
s R-mat 1	59,9	1,29	1,39	0,018	1,8 %
s R-mat 2	59,9	0,81	0,89		

Tabulka 35: Výsledky pojíždění kolem



Graf 16: Hloubka koleje v závislosti na počtu cyklů – ACL 16 S bez R-materiálu



Graf 17: Hloubka koleje v závislosti na počtu cyklů – ACL 16 S s R-materiálem

Z výsledků lze vypočítat, že mírně náchylnější na trvalé deformace byla směs obsahující R-materiál, avšak větší přírůstek hloubky vyjeté koleje vykazovala směs bez R-materiálu. Z grafů je evidentní, že největší přírůstek deformace nastával během prvního tisíce cyklů. Tabulka 16 udává požadované maximální hodnoty pro směs ACL 16 S $PRD_{AIR,max} = 3,0 \%$ a $WTS_{AIR,max} = 0,05 \text{ mm}/1000 \text{ cyklů}$. Tyto požadavky obě zkoušené směsi bezpečně splnily. Navržené směsi nebyly příliš náchylné na trvalé deformace.

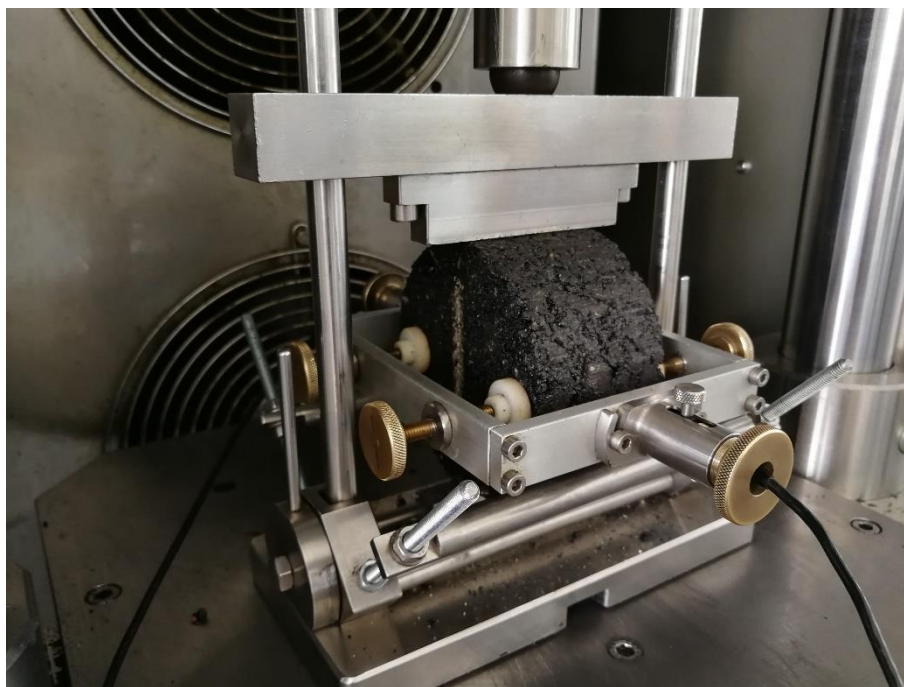


Obrázek 26: Přístroj na zkoušku poježdění kolem



3.5.6 Tuhost

Tuhost asfaltové směsi se využívá jako vodítko pro její přibližné chování ve vozovce. Různé metody pro zjištění tuhosti asfaltových směsí jsou popsány v normě ČSN EN 12697-26 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost*. Vzorky jsou při zkouškách deformovány v rozsahu lineárního přetvoření, a to buď při vyvozování stejného zatěžování, nebo při zatěžování konstantním přetvořením. Pro zjištění modulu tuhosti byla použita zkouška v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY), která je v této normě popsána v *Příloze C*. Na tělesech byla zkouška provedena při teplotách 0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C, přičemž pro každou bylo určeno Poissonovo číslo (ν). Vytemperované těleso na požadovanou teplotu bylo třeba osadit do zkušebního zařízení (*Obrázek 27*) a nastavit sondy pro měření horizontální deformace. Zatěžování bylo provedeno hydraulickým přístrojem propojeným s počítačem, kam bylo potřeba vyplnit informace o rozměrech tělesa a příslušné teplotě. Před měřením výsledné hodnoty bylo provedeno deset kontrolních zatěžovacích pulzů. [37]



Obrázek 27: Osazení tělesa pro měření modulu tuhosti

Po této kontrole následovalo dalších pět zatěžovacích pulzů, při kterých počítač zaznamenal průběh vyvozeného zatížení (F) v čase, horizontální deformaci zkušebního tělesa (z) a součinitel zatěžovací plochy (k) pro přepočet na výsledný modul tuhosti. Každé těleso bylo po prvním změření otočeno o 90° a měření se zopakovalo. Výsledná hodnota pro každé těleso byla zjištěna zprůměrováním těchto dvou hodnot. Používaný program automaticky vypočítal naměřené moduly tuhosti podle následujícího vzorce (*Vzorec 15*) a následně je upravil podle součinitele zatěžovací plochy. [37]

$$E = \frac{F * (\nu + 0,27)}{z * h}$$

Vzorec 15: Naměřený modul tuhosti [37]



Kde je

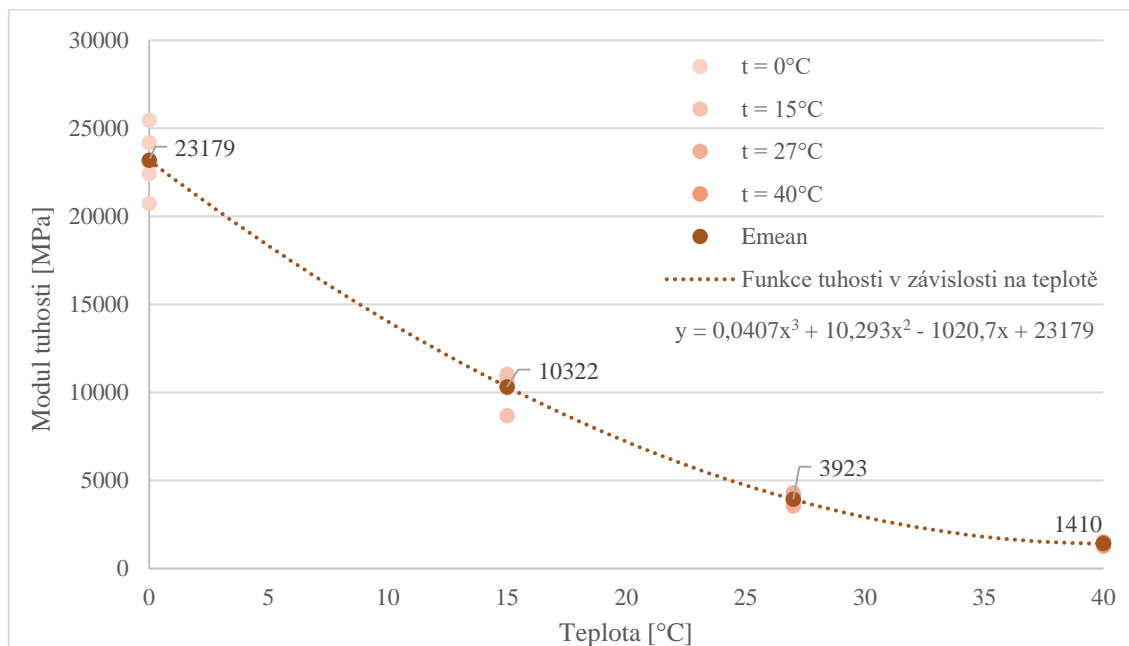
- E naměřený modul tuhosti [MPa]
 F maximální hodnota použitého svislého zatížení [N]
 z amplituda horizontální deformace zjištěná v průběhu zatěžovacího cyklu [mm]
 h průměrná tloušťka zkušební tělesa [mm]
 ν Poissonovo číslo [-]

V následující tabulce jsou shrnuty výsledky zkoušky jako průměr z přípustných hodnot pro příslušnou směs a teplotu, při které zkouška probíhala. Detailnější hodnoty jsou uvedeny v Příloze 6 a Příloze 7. Na základě podmínek uvedených v normě bylo vyřazeno jedno těleso (nebylo započítáno do průměrné hodnoty). Během měření došlo k poškození jednoho z těles, proto je jeho hodnota známá pouze pro teplotu 15 °C.

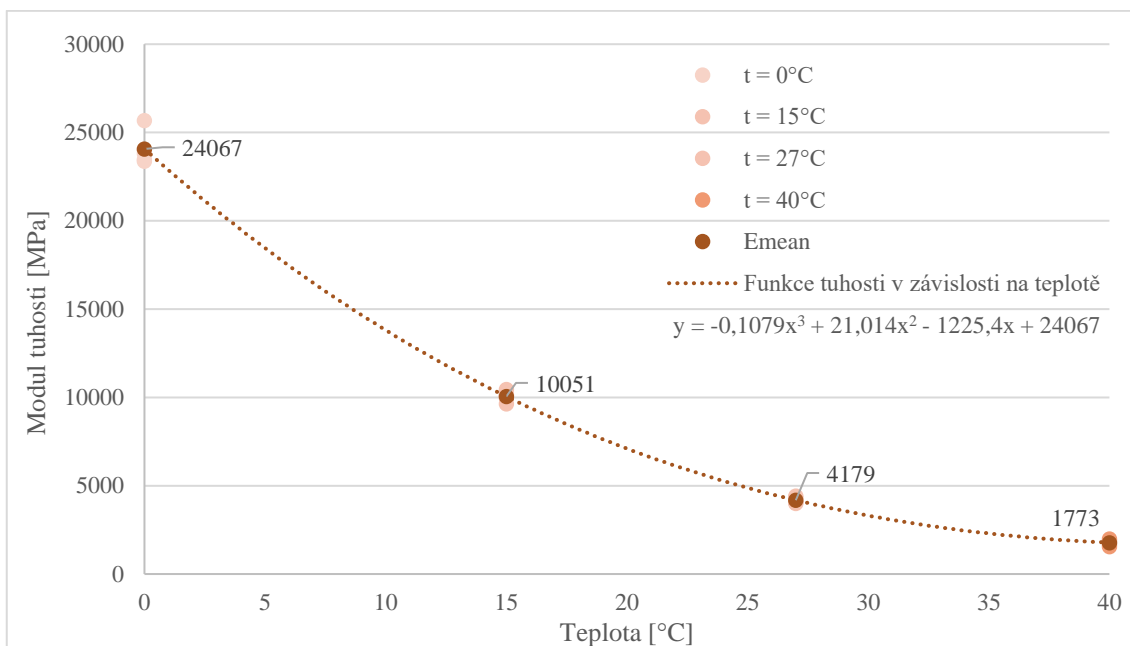
ACL 16 S	$E_{\text{mean},0}$ [MPa]	$E_{\text{mean},15}$ [MPa]	$E_{\text{mean},27}$ [MPa]	$E_{\text{mean},40}$ [MPa]
bez R-mat	23179	10322	3923	1410
s R-mat	24067	10051	4179	1773

Tabulka 36: Výsledné hodnoty modulů tuhosti

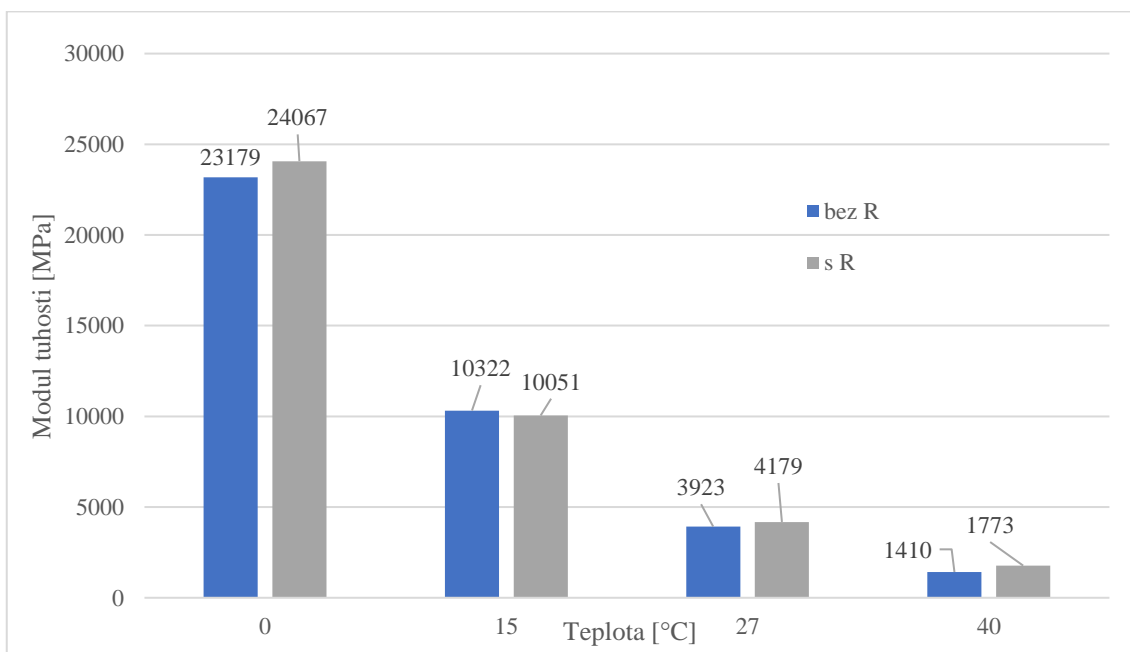
Z Tabulky 36 je evidentní, že při nízkých teplotách směs vykazovala výrazně vyšších tuhostí (bylo potřeba větší síly k dosažení požadované pružné deformace) než za teplot vysokých (graficky znázorněno na Grafu 18 a Grafu 19). Směs s R-materiálem dosahuje u většiny teplot mírně vyšších hodnot modulu tuhostí, což lze porovnat z Grafu 20. Moduly tuhosti však vycházely pro obě směsi velmi podobně a jejich chování v rámci lineárních deformací lze považovat za srovnatelné.



Graf 18: Modul tuhosti – ACL 16 S bez R-materiálu



Graf 19: Modul tuhosti – ACL 16 S s R-materiálem



Graf 20: Porovnání modulů tuhosti za jednotlivých teplot

Rozdílné hodnoty modulů tuhosti byly ovlivněny vlastnostmi asfaltového pojiva ve směsích (penetrace, bod měknutí). Z porovnání lze konstatovat, že rejuvenátor ANOVATM 1817 splnil svou funkci a dostatečně oživil vlastnosti zestárlého asfaltového pojiva.

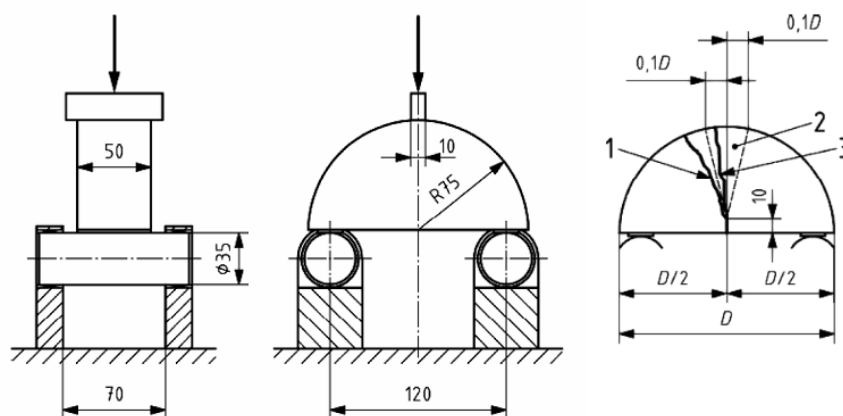


3.5.7 Šíření trhliny

Odolnost vůči šíření trhliny je popsána v normě ČSN EN 12697-44 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese*. Princip této zkoušky je třibodový tah za ohybu aplikovaný na půlválcové zkušební těleso s definovanou trhlinou na spodní hraně. Oproti normě však laboratoř ČVUT v Praze po mnoholeté praxi tuto zkušební metodu provádí s určitými změnami. [38] [39]

Zkouška byla provedena na válcových tělesech, u kterých byla předtím stanovena mezerovitost a modul tuhosti. Tato tělesa byla seříznuta na požadovanou výšku 50 mm a rozříznuta. Na spodní straně každé poloviny byla definována trhlina hloubky 10 mm (a) a šířky 0,9 mm. Řezací práce je nutné provádět precizně, jelikož jakékoliv nepřesnosti mohou negativně ovlivnit výsledky. [39]

Tělesa byla rozdělena na 2 skupiny. Vždy jedna z polovin tělesa byla vytemperována na 0 °C, druhá pak na 15 °C. Takto připravená tělesa byla umístěna do zkušebního zařízení (Obrázek 29) a postupně zatěžována rychlostí 2,5 mm/min. Důvodem snížení zatěžovací rychlosti (oproti normovým 5 mm/min) byla snaha o získání lepších korelací mezi naměřenými veličinami a závislosti měřené veličiny na teplotě. Měření při 0 °C odpovídá mrazové trhlině, zatímco při 15 °C jde spíše o trhlinu únavovou. Nižší rychlost zatížení lépe simuluje skutečný stav, kdy mezi jednotlivými cykly zatížení ve vozovce je vždy relaxační perioda. Průběh zkoušky (včetně odtěžování) byl snímán záznamovým zařízením a pomocí získaných dat byl vykreslen zatěžovací diagram. Zkouška byla považována za platnou, pokud se vzniklá trhlina vyskytovala v oblasti stanovené normou (určeno pomůckou na Obrázku 30). [38] [39]



Obrázek 28: Osazení tělesa pro zkoušku odolnosti vůči šíření trhlín [38]

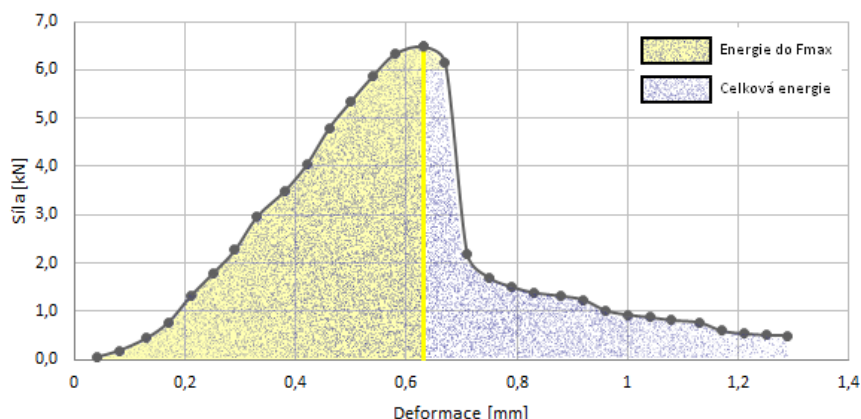


Obrázek 29: Zařízení pro zkoušku odolnosti vůči šíření trhlin



Obrázek 30: Oblast pro vznik trhlin

Výslednými normovými parametry byly přetvoření při maximální síle (ϵ_{\max}), maximální napětí (σ_{\max}) a odolnost vůči lomu (K_c), tzv. kritická hodnota lomové houževnatosti. Ze zatěžovacího diagramu byla dále vypočtena lomová/deformační energie, která odpovídá ploše pod křivkou od zahájení zkoušky do hodnoty maximální síly (E_{\max} , iniciace trhliny) a do hodnoty úplné propagace trhliny (E_{cel} , kdy napětí ve zkušebním tělese klesne na hodnotu 0,3 kN). V některých případech po dosažení maximální síly došlo ke křehkému lomu a odtěžování tak nemohlo být zaznamenáno. [38] [39]



Graf 21: Zatěžovací diagram – princip určení lomové energie [39]

Následující vzorce byly při výpočtech využity. *Tabulka 37* pak shrnuje výsledky. Všechny hodnoty a zatěžovací diagramy akceptovatelných vzorků jsou uvedeny v *Příloze 8*, *Příloze 9*, *Příloze 10* a *Příloze 11*. Vyřazené vzorky jsou označeny v tabulkách šedivou barvou.

$$\varepsilon_{max} = \frac{\Delta W}{W} * 100$$

Vzorec 16: Přetvoření při maximální síle [38]

Kde je

ε_{max} přetvoření při maximální síle [%]

ΔW svislý posun zkušebního tělesa při maximální síle [mm]

W výška zkušebního tělesa při maximální síle [mm]

$$\sigma_{max} = \frac{4,263 * F_{max}}{D * t}$$

Vzorec 17: Maximální napětí při porušení [38]

Kde je

σ_{max} maximální napětí při porušení [MPa]

F_{max} maximální síla [N]

D průměr zkušebního tělesa [mm]

t tloušťka zkušebního tělesa [mm]



$$K_c = \sigma_{max} * f\left(\frac{a}{W}\right)$$

Vzorec 18: Odolnost vůči lomu [38]

Kde je

K_c odolnost vůči lomu (kritická hodnota lomové houževnatosti) [N/mm^{3/2}]

σ_{max} maximální napětí při porušení [MPa]

$f(a/W)$ geometrický faktor zkušební tělesa podle Vzorec 19 [-]

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = -4,9965 + 155,58\left(\frac{a}{W}\right) - 799,94\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 2141,9\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 2709,1\left(\frac{a}{W}\right)^4 + 1398,6\left(\frac{a}{W}\right)^5$$

Vzorec 19: Geometrický faktor [38]

Kde je

$f(a/W)$ geometrický faktor zkušební tělesa [-]

a hloubka drážky zkušební tělesa [mm]

W výška zkušební tělesa při maximální síle [mm]

Teplota	ACL 16 S	ϵ_{max}	σ_{max} [MPa]	K_c [N/mm ^{3/2}]	E_{max} [J]	E_{cel} [J]
0 °C	bez R-mat	1,03 %	5,28	39,1	1,2	1,5
	s R-mat	1,05 %	5,51	41,0	1,3	1,8
15 °C	bez R-mat	2,03 %	4,44	32,9	2,7	4,7
	s R-mat	1,83 %	4,09	30,3	2,3	3,6

Tabulka 37: Výsledky odolnosti vůči šíření trhlin

Limitní hodnoty pro tuto zkoušku nejsou definovány. Z výsledků bylo možno vypořádat, že při teplotě 0 °C byla více odolná vůči šíření trhliny směs s R-materiálem, zatímco za teploty 15 °C tomu bylo naopak, čemuž odpovídaly spotřebované energie při zkoušce. Výrazně vyšší hodnoty spotřebované energie pro iniciaci i rozvoj trhlin za teploty 15 °C vypovídaly o vlastnosti těles více se deformovat a relaxovat. Naopak u těles testovaných při teplotě 0 °C nastal často křehký lom.



4. ZÁVĚR

V bakalářské práci bylo úkolem zanalyzovat dostupný R-materiál a porovnat jeho vliv na vlastnosti asfaltové směsi ACL 16 S. Podíl R-materiálu 30 % hmotnosti směsi byl zvolen jako maximální možný dle současných norem. Analýza R-materiálu spočívala ve zjištění jeho zrnitosti před a po extrakci asfaltového pojiva, které bylo podrobeno dalšímu rozboru. Po určení obsahu pojiva v R-materiálu byla zjištěna jeho gradace a bod měknutí. Pro zlepšení vlastností R-materiálu byla použita oživovací přísada *ANOVATM 1817*, u které bylo zvoleno dávkování 6 % z hmotnosti asfaltového pojiva v R-materiálu. Po dvou optimalizacích, při kterých se hledalo vhodné zastoupení frakcí kameniva, a následném navržení finální podoby směsi obsahující R-materiál a referenční směsi bez R-materiálu, byly na vyrobených zkušebních tělesech zjištěny a porovnány vlastnosti pro užití směsi ve vozovce.

Základním parametrem pro navržení asfaltové směsi byla její mezerovitost, která ve finální podobě nabývala hodnot 3,56 % pro ACL 16 S s R-materiálem a 6,40 % pro referenční směs. Přestože byla snaha o navržení co nejpodobnějších křivek zrnitosti, R-materiál navrženou směs výrazně uzavíral. Vyrobené desky byly podrobeny zkoušce pojíždění kolem za účelem zjištění náchylnosti směsi k trvalým deformacím. Směsi se při této zkoušce chovaly podobně a obě splňovaly limitní podmínky. Válcová tělesa zhutněná 2 x 25 údery byla vystavena nepříznivým podmínkám ve formě vody a mrazu, na kterých se určila pevnost v příčném tahu, čímž byla stanovena odolnost směsi proti těmto jevům. Směs s R-materiálem zde vykazovala výrazně lepší výsledky a splňovala podmínky, zatímco referenční směs měla výsledné hodnoty překvapivě nízké. Pro přesnější stanovení by byly potřeba udělat další zkoušky. Na válcových tělesech zhutněných 2 x 75 údery byly zjištěny moduly tuhosti v závislosti na teplotě, přičemž zde mírně vyšší hodnoty vycházely především u směsi obsahující R-materiál, a to za teplot 0 °C, 15 °C a 40 °C. Vyšší tuhost vykazovala referenční směs pouze za teploty 27 °C. Po určení modulů tuhosti byla na těchto tělesech určena odolnost vůči šíření trhlin za teplot 0 °C a 15 °C. Směsi vycházely obdobně a větší odolnost vůči šíření trhlin měla tělesa za teploty 15 °C (přestože stačila použít menší síla k iniciaci trhlin, celková spotřebovaná energie byla vyšší).

Asfaltová směs ACL 16 S obsahující oživený R-materiál vykazovala velmi podobné, někdy i lepší, výsledné parametry oproti referenční směsi bez R-materiálu. Na základě těchto zkušeností je patrné, že po důkladné analýze použitého R-materiálu a dostatečném oživení jeho vlastností lze docílit vytvoření směsi minimálně stejně kvalitní jako bez použití R-materiálu.

Recyklace asfaltových vozovek je jednoznačně jednou z hlavních cest, kterou by se silniční stavitelství mělo ubírat. V České republice jsou ve stavebním průmyslu stále hojně zastoupeny obavy z použití R-materiálu do asfaltových směsí, ať už jde o jeho množství nebo typ směsi. Tyto obavy bohužel často pramení z nedostatečného seznámení s problematikou a nejistoty správného použití R-materiálu. S užitím R-materiálu souvisí i nové technologie, s čímž jde ruku v ruce potřeba nových strojů. Dnešní společnost je však bohužel motivována především ekonomickou stránkou věci, a to mnohokrát na úkor stránky ekologické. Toto myšlení je z důvodu zachování trvale udržitelného rozvoje opustit.



5. SEZNAM LITERATURY

- [1] VARAUS, Michal a Tomáš KOUDELKA. *Asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu – dosavadní zkušenosti* [online]. b.r. [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://www.silnice-mosty.cz/615-asfaltove-smesi-s-vysokym-obsahem-r-materialu-dosavadni-zkusenosti/>
- [2] Inflation data. *Inflationdata.com* [online]. b.r. [cit. 2019-05-17].
- [3] Recyklace komunikací. *Silnice.com* [online]. b.r. [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <http://www.silnice.com/cinnost/velke-stavby/recyklace-komunikaci/2>
- [4] VARAUS, Michal. *Asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu* [online]. In: . 2015, s. 33 [cit. 2019-03-21].
- [5] VALENTIN, Jan. *Recyklace asfaltových vozovek* [online]. 2011 , 22 [cit. 2019-03-16].
- [6] ČSN EN 13108-8 ed. 2 *Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 8: R-materiál.*
- [7] ČSN 73 6121 *Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody.*
- [8] *TP 151 Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT).*
- [9] [Http://www.obalovna-ostrava.cz/?oo=jak-se-vyrabi-asfaltova-smes](http://www.obalovna-ostrava.cz/?oo=jak-se-vyrabi-asfaltova-smes) [online]. b.r. [cit. 2019-03-20].
- [10] VARAUS, Michal. *Recyklace netuhých vozovek.* In: : *prezentace* [online]. Brno, 2012 [cit. 2019-03-20].
- [11] MONDSCHNEIN, Petr. *Prezentace SS02* [online]. In: . ČVUT, b.r., s. 28 [cit. 2019-03-21].
- [12] *Astec Inc.* [online]. b.r. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.astecinc.com/products/drying-mixing/double-barrel-drum-dryer-mixer.html>
- [13] *Rejuvenátory* [online]. b.r. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <http://web.rejuvenator.eu/index.html>
- [14] STRAŠÁKOVÁ, Monika. *Stárnutí asfaltových pojiv.* Brno, 2016. Diplomová práce. VUT.
- [15] CIUR, . *Rejuvenátor na přírodní bázi ANOVA.*
- [16] COUFALÍK, Pavel a Tomáš KOUDELKA. *Zkoušení oživovacích přísad: ANOVA.* VUT, 2018.
- [17] ČSN EN 933-1 *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor.*
- [18] ČSN EN 1426 *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou.*
- [19] ČSN EN 1427 *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička.*
- [20] ČSN EN 12697-2 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 2: Stanovení zrnitosti.*
- [21] ČSN EN 12697-1 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 1: Obsah rozpustného pojiva.*



- [22] ČSN EN 12697-3 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení.*
- [23] ČSN EN 12591 *Asfalty a asfaltová pojiva – Specifikace pro silniční asfalty.*
- [24] ČSN EN 13108-5 *Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 5: Asfaltový koberec mastixový.*
- [25] ČSN EN 12697-35 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 35: Laboratorní výroba směsi.* 2007.
- [26] ČSN EN 12697-30 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem.*
- [27] ČSN EN 12697-33+A1 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek.*
- [28] ČSN EN 12697-5 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti.*
- [29] ČSN EN 12697-6 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa.*
- [30] ČSN EN 12697-29 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 29: Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles.*
- [31] ČSN EN 12697-8 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí.*
- [32] HELA, Rudolf a Radomír SOKOLÁŘ. *Zkušebnictví a technologie.* b.r.
- [33] ČSN EN 12697-12 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě.*
- [34] AASHTO T-283-03, *Standard Method of Test for: Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage.* Washington: American Association of State and Highway Transportation Officials, 2007
- [35] ČSN EN 12697-23 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu.*
- [36] ČSN EN 12697-22+A1 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 22: Zkouška poježdění kolem.*
- [37] ČSN EN 12697-26 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 26: Tuhost.*
- [38] ČSN EN 12697-44 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese.*
- [39] *Odolnost vůči šíření trhliny.* ČVUT v Praze, b.r.



6. SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi AKO [7]</i>	- 12 -
<i>Tabulka 2: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi AC [7]</i>	- 12 -
<i>Tabulka 3: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi VMT [8]</i>	- 12 -
<i>Tabulka 4: Zrnitosti kameniva 8/16, 8/11 a 4/8</i>	- 21 -
<i>Tabulka 5: Zrnitost kameniva 2/4, 0/4 a fileru</i>	- 22 -
<i>Tabulka 6: Penetrace jehlou asfaltového pojiva 50/70</i>	- 23 -
<i>Tabulka 7: Bod měknutí asfaltového pojiva 50/70</i>	- 24 -
<i>Tabulka 8: Zrnitost R-materiálu před extrakcí</i>	- 25 -
<i>Tabulka 9: Zrnitost kameniva v R-materiálu</i>	- 26 -
<i>Tabulka 10: Výsledky výpočtu obsahu asfaltového pojiva v R-materiálu</i>	- 30 -
<i>Tabulka 11: Penetrace jehlou asfaltového pojiva v R-materiálu</i>	- 30 -
<i>Tabulka 12: Bod měknutí asfaltového pojiva v R-materiálu</i>	- 30 -
<i>Tabulka 13: Dávkování ANOVATM 1817 k R-materiálu</i>	- 31 -
<i>Tabulka 14: Hodnoty penetrace a bodu měknutí ve výsledné směsi ACL 16 S</i>	- 32 -
<i>Tabulka 15: Požadavky na kamenivo do vrstev ACL [7]</i>	- 33 -
<i>Tabulka 16: Požadavky na asfaltové betony do ložních asfaltových vrstev [7]</i>	- 34 -
<i>Tabulka 17: Hodnoty pro Fullerovu křivku zrnitosti</i>	- 41 -
<i>Tabulka 18: Návrh křivky zrnitosti ACL 16 S bez R-materiálu – 1. optimalizace</i>	- 42 -
<i>Tabulka 19: Návrh křivky zrnitosti ACL 16 S s R-materiálem – 1. optimalizace</i>	- 43 -
<i>Tabulka 20: Složení 3 variant směsi ACL 16 S bez R-materiálu - 1. optimalizace</i>	- 44 -
<i>Tabulka 21: Složení 3 variant směsi ACL 16 S s R-materiálem - 1. optimalizace</i>	- 45 -
<i>Tabulka 22: Mezerovitost - 1. optimalizace</i>	- 46 -
<i>Tabulka 23: Návrh křivky zrnitosti ACL 16 S bez R-materiálu – 2. optimalizace – varianta I</i>	- 47 -
<i>Tabulka 24: Návrh křivky zrnitosti ACL 16 S bez R-materiálu – 2. optimalizace – varianta II</i>	- 48 -
<i>Tabulka 25: Návrh křivky zrnitosti ACL 16 S bez R-materiálu – 2. optimalizace – varianta III</i>	- 49 -
<i>Tabulka 26: Složení 3 variant směsi ACL 16 S bez R-materiálu - 2. optimalizace</i>	- 50 -
<i>Tabulka 27: Mezerovitost - 2. optimalizace</i>	- 51 -
<i>Tabulka 28: Návrh křivky zrnitosti směsi ACL 16 S bez R-materiálu</i>	- 52 -
<i>Tabulka 29: Návrh křivky zrnitosti směsi ACL 16 S s R-materiálem</i>	- 53 -
<i>Tabulka 30: Složení směsi ACL 16 S</i>	- 55 -
<i>Tabulka 31: Mezerovitost</i>	- 55 -
<i>Tabulka 32: Míra zhutnění desek</i>	- 57 -
<i>Tabulka 33: Pevnost v příčném tahu – ITS</i>	- 60 -
<i>Tabulka 34: Poměr pevností v příčném tahu – ITSR</i>	- 61 -
<i>Tabulka 35: Výsledky pojiždění kolem</i>	- 62 -
<i>Tabulka 36: Výsledné hodnoty modulů tuhosti</i>	- 65 -
<i>Tabulka 37: Výsledky odolnosti vůči šíření trhlin</i>	- 70 -



7. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Vývoj cen ropy uvažující inflaci od roku 1946 do současnosti [2]	- 8 -
Obrázek 2: Recyklace v míchacím centru za studena [10]	- 14 -
Obrázek 3: Dávkování R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny [4]	- 14 -
Obrázek 4: Předehřívání R-materiálu v paralelním bubnu [4]	- 15 -
Obrázek 5: Princip dvouplášťového bubnu	- 15 -
Obrázek 6: Schéma kontinuální obalovny [4]	- 16 -
Obrázek 7: Přidávání R-materiálu souběžně s proudem horkého vzduchu [4]	- 16 -
Obrázek 8: Přidávání R-materiálu proti proudu horkého vzduchu [4]	- 17 -
Obrázek 9: Separátní vysoušení R-materiálu, míchání v míchačce [4]	- 17 -
Obrázek 10: Penetrometr s ponořeným vzorkem	- 23 -
Obrázek 11: Přístroj na metodu kroužek a kulička	- 24 -
Obrázek 12: Extraktor	- 28 -
Obrázek 13: Destilační zařízení	- 29 -
Obrázek 14: Laboratorní míchačka	- 35 -
Obrázek 15: Rázový zhutňovač pro výrobu zkušebních těles	- 36 -
Obrázek 16: Lamelový zhutňovač desek	- 37 -
Obrázek 17: Navážka v pyknometru pro stanovení maximální objemové hmotnosti	- 38 -
Obrázek 18: Válcová tělesa 2 x 75 - ACL 16 S bez R-materiálu - 1. optimalizace	- 45 -
Obrázek 19: Válcová tělesa 2 x 75 - ACL 16 S s R-materiálem - 1. optimalizace	- 46 -
Obrázek 20: Válcová tělesa 2 x 75 - ACL 16 S bez R-materiálu - 2. optimalizace	- 51 -
Obrázek 21: Válcová tělesa ACL 16 S zhutněná 2 x 75 údery	- 56 -
Obrázek 22: Desky ACL 16 S	- 56 -
Obrázek 23: Válcová tělesa ACL 16 S zhutněná 2 x 25 údery	- 57 -
Obrázek 24: Vakuová komora	- 58 -
Obrázek 25: Upevnění zkušebního tělesa pro zkoušku ITS	- 59 -
Obrázek 26: Přístroj na zkoušku pojíždění kolem	- 63 -
Obrázek 27: Osazení tělesa pro měření modulu tuhosti	- 64 -
Obrázek 28: Osazení tělesa pro zkoušku odolnosti vůči šíření trhlin [33]	- 67 -
Obrázek 29: Zařízení pro zkoušku odolnosti vůči šíření trhlin	- 68 -
Obrázek 30: Oblast pro vznik trhlin	- 68 -

8. SEZNAM VZORCŮ

Vzorec 1: Výpočet obsahu asfaltového pojiva [18]	- 29 -
Vzorec 2: Výpočet penetrace pojiva v asfaltové směsi [20]	- 31 -
Vzorec 3: Výpočet penetrace pojiva v asfaltové směsi [20]	- 32 -
Vzorec 4: Hmotnost desky [23]	- 37 -
Vzorec 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti [24]	- 38 -
Vzorec 6: Hustota vody [24]	- 38 -
Vzorec 7: Stanovení objemové hmotnosti – nasycený suchý povrch SSD [25]	- 39 -
Vzorec 8: Stanovení objemové hmotnosti podle rozměrů – pro válcové těleso [25]	- 39 -
Vzorec 9: Stanovení mezerovitosti směsi [26]	- 40 -
Vzorec 10: Výpočet křivky zrnitosti podle Fullera [27]	- 41 -
Vzorec 11: Pevnost v příčném tahu – ITS [30]	- 59 -
Vzorec 12: Poměr pevností v příčném tahu – ITSR [28]	- 61 -
Vzorec 13: Přírůstek hloubky vyjeté koleje na vzduchu [31]	- 62 -
Vzorec 14: Průměrná hloubka vyjeté koleje [31]	- 62 -
Vzorec 15: Naměřený modul tuhosti [32]	- 64 -
Vzorec 16: Přetvoření při maximální síle [33]	- 69 -
Vzorec 17: Maximální napětí při porušení [33]	- 69 -
Vzorec 18: Odolnost vůči lomu [33]	- 70 -
Vzorec 19: Geometrický faktor [33]	- 70 -



9. SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1: Závislost množství rejuvenátoru ANOVA™ 1817 na penetraci asfaltového pojiva – Coufalík, Koudelka [15].....</i>	<i>- 19 -</i>
<i>Graf 2: Závislost množství rejuvenátoru ANOVA™ 1817 na bodu měknutí asfaltového pojiva – Coufalík, Koudelka [15].....</i>	<i>- 19 -</i>
<i>Graf 3: Závislost množství rejuvenátoru ANOVA™ 1817 na penetraci asfaltového pojiva – Valentin. - 20 -</i>	<i>- 20 -</i>
<i>Graf 4: Závislost množství rejuvenátoru ANOVA™ 1817 na bodu měknutí asfaltového pojiva – Valentin ..</i>	<i>- 20 -</i>
<i>Graf 5: Čáry zrnitosti frakcí kameniva</i>	<i>- 22 -</i>
<i>Graf 6: Křivka zrnitosti R-materiálu před extrakcí</i>	<i>- 26 -</i>
<i>Graf 7: Křivka zrnitosti kameniva v R-materiálu po extrakci asfaltového pojiva.....</i>	<i>- 27 -</i>
<i>Graf 8: Křivka zrnitosti ACL 16 S bez R-materiálu – 1. optimalizace.....</i>	<i>- 43 -</i>
<i>Graf 9: Křivka zrnitosti ACL 16 S s R-materiálem – 1. optimalizace.....</i>	<i>- 44 -</i>
<i>Graf 10: Křivka zrnitosti ACL 16 S bez R-materiálu – 2. optimalizace – varianta I.....</i>	<i>- 48 -</i>
<i>Graf 11: Křivka zrnitosti ACL 16 S bez R-materiálu – 2. optimalizace – varianta II.....</i>	<i>- 49 -</i>
<i>Graf 12: Křivka zrnitosti ACL 16 S bez R-materiálu – 2. optimalizace – varianta III</i>	<i>- 50 -</i>
<i>Graf 13: Křivka zrnitosti směsi ACL 16 S bez R-materiálu</i>	<i>- 53 -</i>
<i>Graf 14: Křivka zrnitosti směsi ACL 16 S s R-materiálem</i>	<i>- 54 -</i>
<i>Graf 15: Porovnání křivek zrnitosti</i>	<i>- 54 -</i>
<i>Graf 16: Hloubka koleje v závislosti na počtu cyklů – ACL 16 S bez R-materiálu.....</i>	<i>- 62 -</i>
<i>Graf 17: Hloubka koleje v závislosti na počtu cyklů – ACL 16 S s R-materiálem</i>	<i>- 63 -</i>
<i>Graf 18: Modul tuhosti – ACL 16 S bez R-materiálu.....</i>	<i>- 65 -</i>
<i>Graf 19: Modul tuhosti – ACL 16 S s R-materiálem.....</i>	<i>- 66 -</i>
<i>Graf 20: Porovnání modulů tuhosti za jednotlivých teplot.....</i>	<i>- 66 -</i>
<i>Graf 21: Zatěžovací diagram – princip určení lomové energie [34].....</i>	<i>- 69 -</i>

10. SEZNAM PŘÍLOH

<i>Příloha 1: Maximální objemová hmotnost - 1. optimalizace</i>	<i>- 77 -</i>
<i>Příloha 2: Objemová hmotnost zkušebních těles - 1. optimalizace.....</i>	<i>- 78 -</i>
<i>Příloha 3: 2. optimalizace</i>	<i>- 79 -</i>
<i>Příloha 4: Finální směs_1</i>	<i>- 80 -</i>
<i>Příloha 5: Finální směs_2</i>	<i>- 81 -</i>
<i>Příloha 6: Modul tuhosti 0 °C a 15 °C</i>	<i>- 82 -</i>
<i>Příloha 7: Modul tuhosti 27 °C a 40 °C</i>	<i>- 83 -</i>
<i>Příloha 8: Odolnost vůči šíření trhlin – ACL16 S bez R-materiálu (0 °C)</i>	<i>- 84 -</i>
<i>Příloha 9: Odolnost vůči šíření trhlin – ACL16 S s R-materiálem (0 °C)</i>	<i>- 85 -</i>
<i>Příloha 10: Odolnost vůči šíření trhlin – ACL16 S bez R-materiálu (15 °C)</i>	<i>- 86 -</i>
<i>Příloha 11: Odolnost vůči šíření trhlin – ACL16 S s R-materiálem (15 °C)</i>	<i>- 87 -</i>



Příloha 1: Maximální objemová hmotnost - 1. optimalizace

Varianta	t [°C]	ρ_w [kg/m ³]	m ₁ [g]	V _p [cm ³]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	ρ_{mv} [kg/m ³]
bez R - 4,3	23,7	997,382	700,1	1313,6	1623,6	2604,0	2793,26
bez R - 4,6	23,7	997,382	697,8	1314,1	1632,2	2608,7	2788,78
bez R - 4,9	23,7	997,382	707,4	1315,5	1609,5	2597,8	2778,89
s R - 4,3	22,3	997,712	699,8	1315,2	1651,4	2621,9	2778,60
s R - 4,6	22,3	997,712	699,6	1320,6	1589,7	2586,4	2767,26
s R - 4,9	22,3	997,712	701,9	1321,4	1628,5	2613,8	2775,41



Příloha 2: Objemová hmotnost zkušebních těles - 1. optimalizace

bez R - 4,3	t [°C]	ρ_w [kg/m³]	m₁ [g]	m₂ [g]	m₃ [g]	ρ_{bssd} [kg/m³]
1	20,9	998,021	1236,1	759,3	1250,3	2512,53
2	20,9	998,021	1241,8	766,0	1256,8	2525,15
3	20,9	998,021	1241,3	763,3	1254,9	2520,02
4	20,9	998,021	1244,7	766,7	1260,4	2516,18
					Průměr	2518,47
bez R - 4,6	t [°C]	ρ_w [kg/m³]	m₁ [g]	m₂ [g]	m₃ [g]	ρ_{bssd} [kg/m³]
1	20,9	998,021	1245,8	761,3	1259,2	2497,16
2	20,9	998,021	1225,5	755,0	1240,1	2521,28
3	20,9	998,021	1251,5	767,1	1264,6	2510,60
4	20,9	998,021	1248,0	763,7	1259,8	2510,64
					Průměr	2509,92
bez R - 4,9	t [°C]	ρ_w [kg/m³]	m₁ [g]	m₂ [g]	m₃ [g]	ρ_{bssd} [kg/m³]
1	20,7	998,063	1245,5	761,4	1252,8	2529,69
2	20,7	998,063	1254,8	764,8	1261,3	2522,40
3	20,7	998,063	1251,6	761,3	1259,8	2505,87
4	20,7	998,063	1252,5	766,0	1260,9	2525,91
					Průměr	2520,97
s R - 4,3	t [°C]	ρ_w [kg/m³]	m₁ [g]	m₂ [g]	m₃ [g]	ρ_{bssd} [kg/m³]
1	20,7	998,063	1239,4	765,1	1247,1	2566,39
2	20,7	998,063	1250,8	774,2	1260,9	2564,98
3	20,7	998,063	1233,9	764,5	1242,9	2574,23
4	20,7	998,063	1239,7	767,6	1252,2	2553,24
					Průměr	2564,71
s R - 4,6	t [°C]	ρ_w [kg/m³]	m₁ [g]	m₂ [g]	m₃ [g]	ρ_{bssd} [kg/m³]
1	19,5	998,309	1234,5	764,7	1242,4	2579,89
2	19,5	998,309	1243,2	766,2	1246,6	2583,47
3	19,5	998,309	1244,3	769,9	1248,8	2593,85
4	19,5	998,309	1239,7	766,1	1243,8	2590,75
					Průměr	2586,99
s R - 4,9	t [°C]	ρ_w [kg/m³]	m₁ [g]	m₂ [g]	m₃ [g]	ρ_{bssd} [kg/m³]
1	20,9	998,021	1254,2	774,0	1258,4	2584,06
2	20,9	998,021	1255,9	772,2	1259,1	2574,27
3	20,9	998,021	1245,5	766,0	1251,0	2562,96
4	20,9	998,021	1240,8	765,5	1246,3	2575,59
					Průměr	2574,22



Příloha 3: 2. optimalizace

Maximální objemová hmotnost

Varianta	t [°C]	ρ_w [kg/m ³]	m ₁ [g]	V _p [cm ³]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	ρ_{mv} [kg/m ³]
I	22,5	997,666	699,8	1315,2	1628,8	2607,0	2775,52
II	22,5	997,666	695,4	1315,9	1571,3	2570,6	2786,81
III	22,5	997,666	701,9	1321,4	1458,9	2501,7	2740,96

Objemová hmotnost těles

I	t [°C]	ρ_w [kg/m ³]	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	ρ_{bssd} [kg/m ³]
1	18,6	998,483	1238,6	762,7	1243,5	2572,22
2	18,6	998,483	1238,7	762,0	1242,2	2575,64
3	18,6	998,483	1242,4	766,2	1246,8	2581,18
4	18,6	998,483	1240,1	764,9	1243,5	2587,17
					Průměr	2579,05
II	t [°C]	ρ_w [kg/m ³]	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	ρ_{bssd} [kg/m ³]
1	18,6	998,483	1245,1	754,1	1261,3	2451,13
2	18,6	998,483	1242,8	754,8	1259,4	2459,21
3	18,6	998,483	1243,0	753,5	1259,3	2453,77
4	18,6	998,483	1246,3	757,7	1263,1	2462,23
					Průměr	2456,58
III	t [°C]	ρ_w [kg/m ³]	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	ρ_{bssd} [kg/m ³]
1	18,6	998,483	1238,4	756,3	1261,5	2447,59
2	18,6	998,483	1238,9	752,5	1263,3	2421,73
3	18,6	998,483	1235,7	751,3	1259,9	2425,93
4	18,6	998,483	1243,2	751,7	1264,0	2423,02
					Průměr	2429,57



Příloha 4: Finální směsi_1

Maximální objemová hmotnost

ACL 16 S	t [°C]	ρ_w [kg/m ³]	m ₁ [g]	V _p [cm ³]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	ρ_{mv} [kg/m ³]
bez R-materiálu	27,5	996,383	695,4	1315,9	1908,0	2788,0	2802,11
s R-materiálem	25,2	997,006	695,4	1315,9	1760,3	2691,1	2785,18

Objemová hmotnost a rozměry těles 2 x 75

bez R	v [mm]	d [mm]	t [°C]	ρ_w [kg/m ³]	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	ρ_{bssd} [kg/m ³]
1	58,6	102,0	20,0	998,208	1237,7	768,2	1239,9	2619,21
2	58,9	102,0	20,0	998,208	1244,7	775,2	1247,3	2631,79
3	59,2	101,7	20,0	998,208	1238,8	769,9	1242,1	2618,76
4	57,8	103,1	20,0	998,208	1247,8	776,5	1250,3	2628,88
5	58,4	102,4	20,0	998,208	1239,6	768,9	1242,1	2614,92
6	59,0	101,9	20,0	998,208	1240,5	770,6	1242,8	2622,36
							Průměr	2622,66
s R	v [mm]	d [mm]	t [°C]	ρ_w [kg/m ³]	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	ρ_{bssd} [kg/m ³]
1	57,1	102,0	21,9	997,802	1232,4	777,4	1233,6	2695,51
2	58,3	101,9	21,9	997,802	1245,0	783,6	1246,9	2681,34
3	57,0	102,3	21,9	997,802	1237,8	779,6	1239,3	2686,71
4	58,9	101,8	21,9	997,802	1259,1	792,5	1260,2	2686,19
5	58,1	101,9	21,9	997,802	1243,2	781,1	1244,3	2678,04
6	57,4	102,3	21,9	997,802	1239,5	780,9	1241,0	2688,06
							Průměr	2685,97

Objemová hmotnost a rozměry desek

Deska	v [mm]	t [°C]	ρ_w [kg/m ³]	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	ρ_{bssd} [kg/m ³]
bez R-mat 1	61,0	18,6	998,483	12868,2	7976,1	12955,4	2580,42
bez R-mat 2	59,4	18,6	998,483	12844,9	8020,5	12894,8	2631,23
s R-mat 1	59,9	22,7	997,620	13386,5	8464,0	13404,7	2702,99
s R-mat 2	59,9	22,7	997,620	13387,0	8491,2	13405,7	2717,50



Příloha 5: Finální směsi_2

Objemová hmotnost a rozměry těles 2 x 25

ACL 16 S, 2 x 25	Vzorek	m_1 [g]	v [mm]	d [mm]	$\rho_{b,dim}$ [kg/m ³]
bez R-materiálu	1	1235,0	64,0	101,9	2366,95
	2	1241,3	61,8	101,7	2469,48
	3	1250,8	65,1	102,1	2348,03
	4	1250,2	63,0	102,0	2428,34
	5	1237,1	64,2	101,9	2363,61
	6	1242,2	62,4	101,8	2442,92
	7	1245,4	64,4	101,6	2383,12
	8	1240,5	64,4	101,8	2368,05
	9	1241,6	63,7	102,9	2342,63
s R-materiálem	1	1239,1	61,3	101,8	2484,21
	2	1238,7	61,7	101,5	2481,90
	3	1242,6	61,0	101,7	2510,94
	4	1242,1	61,1	102,3	2473,17
	5	1253,3	62,3	101,8	2471,12
	6	1235,3	59,7	103,1	2478,21
	7	1241,2	61,9	101,7	2468,43
	8	1240,3	61,7	101,8	2467,96
	9	1243,1	61,5	101,8	2481,60



Příloha 6: Modul tuhosti 0 °C a 15 °C

t = 0 °C, v = 0,25							
ACL 16 S		E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	E [MPa]	0,8*E ₁ <E ₂	E ₂ <1,1*E ₁	E _{mean,0} [MPa]
bez R	1	24846	23530	24188	ano	ano	23179
	2	25016	25902	25459	ano	ano	
	3	23262	23158	23210	ano	ano	
	4	21194	20280	20737	ano	ano	
	5	23088	21750	22419	ano	ano	
	6	23131	22995	23063	ano	ano	
s R	1	23735	23183	23459	ano	ano	24067
	2	25952	25409	25681	ano	ano	
	3	24068	23551	23810	ano	ano	
	4	-	-	-	-	-	
	5	24241	23791	24016	ano	ano	
	6	23563	23181	23372	ano	ano	

t = 15 °C, v = 0,31							
ACL 16 S		E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	E [MPa]	0,8*E ₁ <E ₂	E ₂ <1,1*E ₁	E _{mean,15} [MPa]
bez R	1	10510	10716	10613	ano	ano	10322
	2	11172	10883	11028	ano	ano	
	3	9915	10581	10248	ano	ano	
	4	10796	10975	10886	ano	ano	
	5	8744	8624	8684	ano	ano	
	6	10846	10096	10471	ano	ano	
s R	1	10600	9629	10115	ano	ano	10051
	2	9966	9990	9978	ano	ano	
	3	10050	9932	9991	ano	ano	
	4	10375	10509	10442	ano	ano	
	5	10280	10013	10147	ano	ano	
	6	9564	9707	9636	ano	ano	



Příloha 7: Modul tuhosti 27 °C a 40 °C

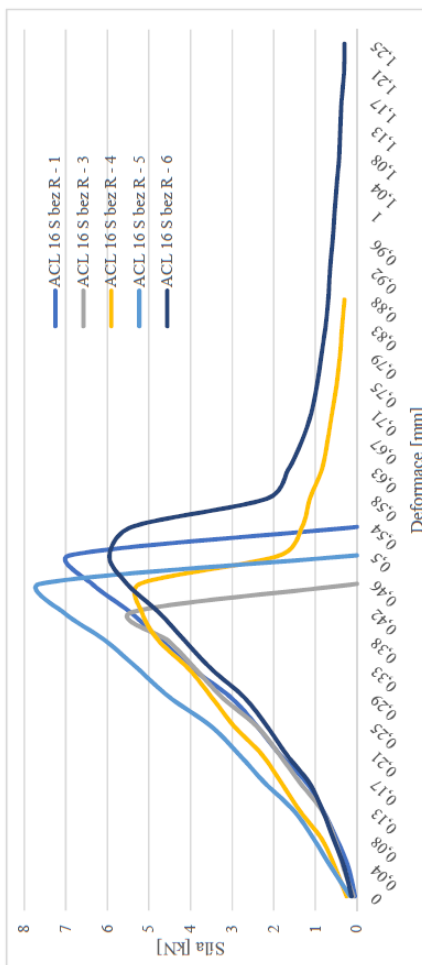
t = 27 °C, v = 0,38							
ACL 16 S		E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	E [MPa]	0,8*E ₁ <E ₂	E ₂ <1,1*E ₁	E _{mean,27} [MPa]
bez R	1	4079	3876	3978	ano	ano	3923
	2	4157	4026	4092	ano	ano	
	3	3711	3745	3728	ano	ano	
	4	4277	4307	4292	ano	ano	
	5	3497	3590	3544	ano	ano	
	6	4012	3803	3908	ano	ano	
s R	1	4099	4004	4052	ano	ano	4179
	2	4331	4509	4420	ano	ano	
	3	3979	4031	4005	ano	ano	
	4	-	-	-	-	-	
	5	4768	3878	4323	ano	ano	
	6	4045	4148	4097	ano	ano	

t = 40 °C, v = 0,45							
ACL 16 S		E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	E [MPa]	0,8*E ₁ <E ₂	E ₂ <1,1*E ₁	E _{mean,40} [MPa]
bez R	1	1442	1364	1403	ano	ano	1410
	2	1469	1516	1493	ano	ano	
	3	1348	1599	1474	ano	ne	
	4	1483	1436	1460	ano	ano	
	5	1342	1207	1275	ano	ano	
	6	1505	1336	1421	ano	ano	
s R	1	1750	1588	1669	ano	ano	1773
	2	1808	1751	1780	ano	ano	
	3	1564	1526	1545	ano	ano	
	4	-	-	-	-	-	
	5	1984	1777	1881	ano	ano	
	6	2073	1910	1992	ano	ano	



Příloha 8: Odolnost vůči šíření trhlin – ACL16 S bez R-materiálu (0 °C)

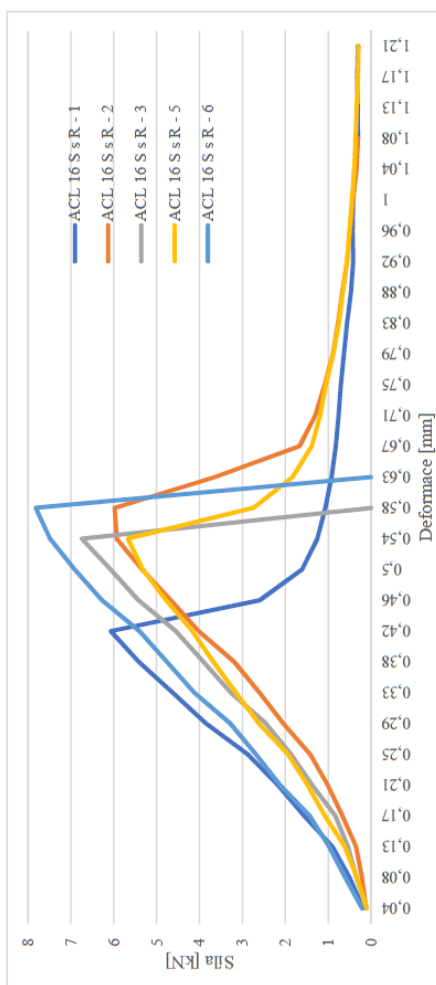
Těleso	Tloušťka (mm)	Průměr (mm)	Výška (mm)	Deformace (mm)	Síla (kN)	Hloubka drážky (mm)	Přetvoření (%)	Napětí při porušení (MPa)	Faktor f (-)	Kritická hodnota (N/mm ^{3/2})	Energie do max. hodnory (J)		Celková energie zkoušky (J)	
											1,4	3,3	1,4	3,5
Teplota = 0 °C														
ACL 16 S bez R - 1	49,38	102,01	52,85	0,52	6,97	10	0,98%	5,90	7,179	42,3	1,4	1,4	1,4	
ACL 16 S bez R - 2	49,20	101,98	51,55	1,27	8,63	10	2,46%	7,33	7,265	53,3	3,3	3,5	3,5	
ACL 16 S bez R - 3	48,67	101,68	46,46	0,47	5,44	10	1,01%	4,69	7,621	35,7	0,8	0,8	0,8	
ACL 16 S bez R - 4	49,27	103,13	46,60	0,49	5,24	10	1,05%	4,40	7,610	33,5	0,9	1,5	1,5	
ACL 16 S bez R - 5	49,23	102,36	52,46	0,50	7,59	10	0,95%	6,42	7,205	46,3	1,5	1,6	1,6	
ACL 16 S bez R - 6	49,70	101,92	47,38	0,54	5,93	10	1,14%	4,99	7,554	37,7	1,2	2,1	2,1	





Příloha 9: Odolnost vůči šíření trhlin – ACL16 S s R-materiálem (0 °C)

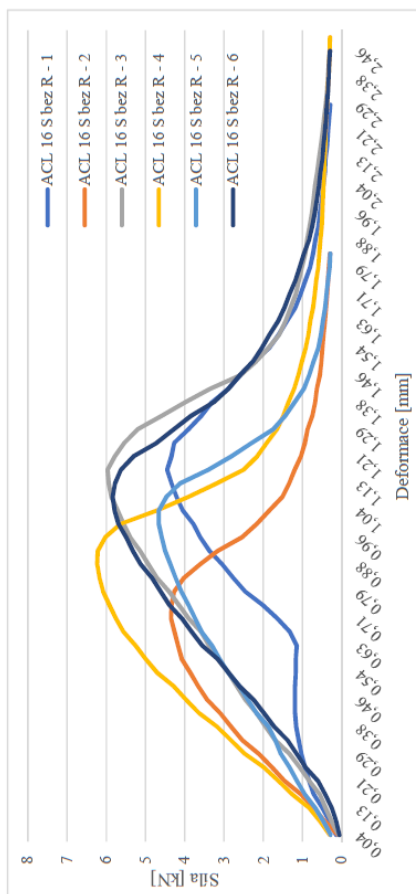
Těleso Teplota = 0 °C	Tloušťka (mm)	Průměr (mm)	Výška (mm)	Deformace (mm)	Síla (kN)	Hloubka drážky (mm)	Přetvoření (%)	Napětí při porušení (MPa)	Faktor f (-)	Kritická hodnota (N/mm ^{3/2})	Energie do max. hodnoty		Celková energie zkoušky	
											(J)	(J)	(J)	(J)
ACL16 S s R - 1	49,18	102,01	47,23	0,41	5,99	10	0,87%	5,09	7,565	38,5	0,9	1,8		
ACL16 S s R - 2	49,34	101,89	47,39	0,52	6,02	10	1,10%	5,10	7,553	38,6	1,3	2,0		
ACL16 S s R - 3	49,11	102,30	50,97	0,54	6,92	10	1,06%	5,87	7,304	42,9	1,3	1,3		
ACL16 S s R - 5	48,85	101,94	45,72	0,50	5,67	10	1,09%	4,85	7,676	37,3	1,2	1,9		
ACL16 S s R - 6	48,77	102,33	52,20	0,58	7,77	10	1,11%	6,64	7,222	47,9	1,7	1,9		





Příloha 10: Odolnost vůči šíření trhlin – ACL16 S bez R-materiálu (15 °C)

Těleso	Tloušťka (mm)	Průměr (mm)	Výška (mm)	Deformace (mm)	Síla (kN)	Hloubka drážky (mm)	Přetvoření (%)	Napětí při porušení (MPa)	Faktor f (-)	Kritická hodnota (N/mm ^{3/2})	Energie do max. hodnoty (J)	Celková energie zkoušky (J)
Teplota = 15 °C												
ACL 16 S bez R - 1	48,32	102,01	45,91	1,17	4,40	10	2,55%	3,81	7,661	29,2	2,2	4,1
ACL 16 S bez R - 2	49,30	101,98	46,97	0,71	4,29	10	1,51%	3,64	7,583	27,6	1,8	3,4
ACL 16 S bez R - 3	49,35	101,68	51,73	1,11	5,97	10	2,15%	5,07	7,253	36,8	3,6	5,9
ACL 16 S bez R - 4	48,21	103,13	52,98	0,89	6,19	10	1,68%	5,31	7,170	38,1	3,1	5,4
ACL 16 S bez R - 5	49,17	102,36	46,44	1,02	4,62	10	2,20%	3,91	7,622	29,8	2,6	3,8
ACL 16 S bez R - 6	49,53	101,92	51,20	1,06	5,80	10	2,07%	4,90	7,289	35,7	3,2	5,8
										32,9	2,7	4,7





Příloha 11: Odolnost vůči šíření trhlin – ACL16 S s R-materiálem (15 °C)

Těleso Teplota = 15 °C	Tloušťka (mm)	Průměr (mm)	Výška (mm)	Deformace (mm)	Síla (kN)	Hloubka drážky (mm)	Přetvoření (%)	Napětí při porušení (MPa)	Faktor f (-)	Kritická hodnota (N/mm ^{3/2})	Energie do max. hodnoty		Celková energie zkoušky	
											(J)	(J)	(J)	(J)
ACL 16 S s R - 1	49,26	102,01	51,41	1,11	6,40	10	2,16%	5,43	7,274	39,5	4,1	7,4		
ACL 16 S s R - 2	49,05	101,89	51,01	0,81	4,93	10	1,59%	4,20	7,302	30,7	2,3	3,6		
ACL 16 S s R - 3	49,47	102,30	47,77	0,73	4,32	10	1,53%	3,64	7,526	27,4	2,0	2,7		
ACL 16 S s R - 5	48,78	101,94	52,61	0,80	5,49	10	1,52%	4,71	7,194	33,9	2,1	3,9		
ACL 16 S s R - 6	48,81	102,33	46,24	1,24	4,48	10	2,68%	3,82	7,637	29,2	2,6	4,0		

