



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

HRUBOZRNNÉ ASFALTOVÉ SMĚSI

COARSE-GRAINED ASPHALT MIXTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Peter Brida

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ONDŘEJ DAŠEK, Ph.D.

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N0732A260026 Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Peter Brida
Název	Hrubozrnné asfaltové směsi
Vedoucí práce	doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2021
Datum odevzdání	13. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Předané vzorky materiálů

Specifikační norma ČSN EN 13108-1 a ČSN 73 6121

Zkušební normy pro asfaltová pojiva

Zkušební normy řady ČSN EN 12697

Literatura z internetu

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V rámci diplomové práce bude věnována pozornost asfaltovým směsím, které budou obsahovat hrubozrnnější kamenivo, než umožňují v současnosti platné technické předpisy. Bude proveden návrh takovéto asfaltové směsi a pomocí vhodných laboratorních zkoušek budou ověřeny její vlastnosti a porovnány s vlastnostmi konvenční asfaltové směsi.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřená na zhodnocení vlivu hrubozrnnějšího kameniva na vlastnosti asfaltové směsi. V teoretické části práce je rozebrána problematika výroby a použití asfaltových směsí. Praktická část spočívá v posouzení různých receptur asfaltových směsí a posouzení jejich vlastností. Pro hodnocení vlastností směsí byla využita tuhost dvoubodovou zkouškou ohybem, zkouška pojíždění kolem a nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfaltová směs, kamenivo, hrubozrnné kamenivo, asfalt, návrh asfaltové směsi, tuhost, zkouška pojíždění kolem, nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on the comparison of the influence coarse-grained aggregate on the properties of asphalt concrete. The theoretical part describes issue of production and usage of asphalt mixtures. The practical part evaluates multiple types of asphalt mixtures and describing their properties. Stiffness by a two-point bending test, a wheel tracking test and low-temperature cracking and properties by uniaxial tension test were used to evaluate the properties of the mixtures.

KEYWORDS

Asphalt mixture, aggregate, coarse aggregate, bitumen, asphalt mixture design, stiffness, wheel tracking, low-temperature cracking and properties test

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Peter Brida *Hrubozrnné asfaltové směsi*. Brno, 2022. 141 s., 14 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Hrubozrnné asfaltové směsi* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 10. 1. 2022

Bc. Peter Brida

autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Hrubozrnné asfaltové směsi* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2022

Bc. Peter Brida

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce, Ing. Ondřejovi Daškovi za vedení a pomoc při zpracování mé práce. Dále děkuji všem zaměstnancům laboratoře Ústavu pozemních komunikací VUT FAST v Brně, především Pavlovi Strakovi za ochotu a rady. V neposlední řadě bych rád poděkoval celé své rodině, která mi byla oporou po dobu celého studia.

Obsah

1. ÚVOD	11
2. REŠERŠE LITERATURY	12
2.1. Základní pojmy a zkratky	12
2.2. Složky asfaltové směsi.....	14
2.2.1. Kamenivo	14
2.2.2. Filer.....	21
2.2.3. Asfaltová pojiva.....	22
2.3. Historie asfaltových směsí	34
2.4. Rozdělení asfaltových směsí.....	44
2.4.1. Typ beton (AC – Asphalt Concrete).....	44
2.4.2. Typ makadam	46
2.4.3. Asfaltový koberec mastixový (SMA – Stone Matrix Asphalt)	46
2.4.4. Asfaltový koberec drenážní (PA – Porous Asphalt).....	47
2.4.5. Litý asfalt (MA – Mastic Asphalt)	48
2.4.6. Použití R-materiálu v asfaltových směsích a požadavky na směsi	48
3. VÝROBA, POKLÁDKA A HUTNĚNÍ ASFALTOVÝCH SMĚSÍ.....	50
3.1. Výroba asfaltových směsí.....	50
3.1.1. Šaržová obalovna.....	51
3.1.2. Kontinuální obalovna	52
3.1.3. Výroba litého asfaltu	54
3.2. Doprava asfaltových směsí	54
3.3. Pokládka asfaltových vrstev	55
3.3.1. Pokládka hutněných asfaltových vrstev finišerem	56
3.3.2. Pokládka litého asfaltu	58
3.4. Hutnění asfaltových vrstev	60
3.4.1. Druhy válců	60
3.4.2. Fáze hutnění.....	62

3.4.3. Zásady při hutnění	64
3.4.4. Závady při hutnění.....	65
4. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	66
5. POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY	67
5.1. Síťový rozbor.....	67
5.1.1. Použité přístroje a pomůcky	67
5.1.2. Zkušební postup.....	67
5.2. Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením	70
5.2.1. Použité přístroje a pomůcky	70
5.2.2. Zkušební postup.....	70
5.3. Stanovení maximální objemové hmotnosti volumetrickým postupem.....	71
5.3.1. Použité přístroje a pomůcky	72
5.3.2. Zkušební postup.....	72
5.4. Stanovení mezerovitosti.....	74
5.5. Zkouška pojíždění kolem.....	75
5.5.1. Použité přístroje a pomůcky	75
5.5.2. Zkušební postup.....	76
5.6. Stanovení modulu tuhosti	77
5.6.1. Použité přístroje a pomůcky	78
5.6.2. Zkušební postup.....	78
5.7. Stanovení nízkoteplotních charakteristik.....	80
5.7.1. Použité přístroje a pomůcky	81
5.7.2. Zkušební postup.....	81
6. POUŽITÉ MATERIÁLY	83
7. VÝSLEDKY PROVEDENÝCH ZKOUŠEK.....	84
7.1. Zrnitost frakcí kameniva.....	84
7.2. Návrh směsi ACP 22.....	85
7.2.1. Návrh čáry zrnitosti za pomoci Fullerovy paraboly	85

7.2.2. Návrh teoretického optimálního množství pojiva	87
7.2.3. Výpočet navážek	88
7.2.4. Výroba asfaltové směsi.....	89
7.2.5. Hutnění asfaltové směsi.....	91
7.3. Návrh směsi ACP 32.....	93
7.3.1. Návrh čáry zrnitosti	94
7.3.1. Návrh teoretického optimálního množství pojiva	95
7.3.2. Výpočet navážek	96
7.3.1. Výroba asfaltové směsi.....	97
7.3.2. Hutnění asfaltové směsi.....	98
7.4. Stanovení objemové hmotnosti.....	98
7.5. Maximální objemová hmotnost	99
7.6. Mezerovitost	100
7.7. Výroba desek	102
7.7.1. Výpočet navážky	102
7.7.2. Výroba směsi na zhotovení desek	105
7.8. Hutnění desek	107
7.9. Zkouška pojíždění kolem.....	109
7.10. Stanovení nízkoteplotních charakteristik	111
7.11. Modul tuhosti.....	115
7.11.1. Příprava vzorku	115
7.11.2. Měření modulu tuhosti	118
8. POROVNÁNÍ Z EKONOMICKÉHO HLEDISKA.....	122
8.1. Navržení čár zrnitosti.....	122
8.2. Cena kameniva na 1t směsi.....	126
9. ZÁVĚR.....	129
10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	130
11. SEZNAM OBRÁZKŮ.....	137
12. SEZNAM TABULEK	140
13. SEZNAM GRAFŮ.....	141

1. ÚVOD

V posledních letech se na vozovkách s vysokým dopravním zatížením začal projevovat zvýšený výskyt předčasného vyjetí kolejí. Jedním z možných řešení tohoto problému by mohlo být přidání hrubozrnných zrn kameniva (frakce větší než 16/22 mm) do podkladních vrstev netuhých vozovek, což bude mít za následek eliminaci nebo minimalizaci vyjetí kolejí u vozovek s vysokým dopravním zatížením. Tomuto však brání zažité metodiky navrhování asfaltových směsí, a taktéž používání klasických Marshallových těles o průměru 100 mm, které nejsou příliš vhodné pro směsi se zrnem kameniva nad 22 mm. Řešením tohoto problému je využití modifikovaných Marshallových těles (průměr 150 mm), nebo použití gyrátoru. Dalším velkým problémem, který by mohl být užíváním hrubozrnnějších směsí eliminován, je nedostatek kameniva fr. 5/8 a fr. 8/11, zejména v hlavní sezóně. [1]



Obrázek č. 1: Vyjeté koleje [2]

2. REŠERŠE LITERATURY

2.1. Základní pojmy a zkratky

V následujícím textu jsou uvedeny základní pojmy a zkratky, nutné pro důkladné pochopení problematiky.

- **Vozovka**

je konstrukce složená z jedné nebo více vrstev, sloužící k přepravě dopravy po terénu.

- **Vrstva**

je prvek vozovky položený při jedné pracovní operaci.

- **Konstrukční vrstva**

je konstrukční prvek vozovky z jednoho druhu směsi.

- **Obrusná vrstva**

je horní konstrukční vrstva vozovky, která je v kontaktu s dopravou.

- **Ložní vrstva**

je konstrukční vrstva vozovky, která je mezi obrusnou a podkladní vrstvou.

- **Podkladní vrstva**

je hlavní konstrukční prvek vozovky. Může být položena v jedné nebo více vrstvách, označovaných jako horní podkladní vrstva a spodní podkladní vrstva.

- **Asfaltová směs**

je homogenní směs složená typicky z hrubého a drobného kameniva, fileru a asfaltového pojiva, která se použije při stavbě vozovky. Asfaltovým pojivem může být asfalt, asfaltová emulze nebo ředěný asfalt. Asfaltová směs může obsahovat jednu nebo více přísad ke zlepšení vlastností. [3] [4]

- **Praní kameniva**

je proces, při kterém se z kameniva odstraňují jemné částice, jílu nebo hlína.

- **Frakce kameniva**

je směs zrn kameniva v rozmezí dvou sít, kde zrna propadávají přes horní síto s většími otvory (D) a zachytávají se na spodním sítu s menšími otvory (d).

- **Široká frakce $D > 2d$**

je frakce kameniva v rozmezí dvou kontrolních sít, kde horní síto má velikost oka větší než dvojnásobek velikosti oka spodního síta (např. 8 -32)

- **Úzká frakce $D \leq 2d$**

je frakce kameniva v rozmezí dvou kontrolních sít, kde horní síto má velikost oka menší nebo rovnou než dvojnásobek velikosti oka spodního síta (např. 4 -8)

- **Nadsítné (Podsítné)**

je % podíl všech zrn zadržovaných (propadlých) horním (dolním) sítem.

- **Zrnitost kameniva**

je označení velikosti kameniva hodnotami velikosti spodního (d) a horního (D) síta, vyjádřená jako d/D.

- **Dávka**

je množství vyrobeného nebo dodaného materiálu v jednom dopravním prostředku, nebo objem materiálu, který byl vyroben najednou za stejných podmínek ze stejných surovin.

- **Dílčí vzorek**

je množství materiálu odebraného z dávky při jedné operaci zařízení na odběr vzorků.

- **Souhrnný vzorek**

je vzorek získaný z dílčích vzorků.

- **Laboratorní vzorek**

je zmenšený vzorek pro laboratorní zkoušení získaný ze souhrnného vzorku.

- **Směs kameniva**

je směs drobného a hrubého kameniva

- **Filer**

je kamenivo, jehož většina zrn propadne sítem 0,063 mm.

- **Přídavný filer**

je filer minerálního původu, vyrobený samostatně.

- **Vratný filer**

je filer, který se vrací zpět do procesu výroby asfaltové směsi po odsátí v sušicím bubnu na obalovně.

- **Štěrkopísek**

je směs hrubého i jemného přírodního kameniva omezená horním sítem.(např. 0-32 mm).

- **Štěrkodrt'**

je směs hrubého i jemného drceného kameniva omezená horním sítem. (např. 0-45 mm)

- **Výsivka**

je odpad z výroby drceného kameniva, bez zaručení velikosti a jakosti zrn.

- **Mazut**

je neodpařený zbytek při frakční destilaci ropy za atmosférického tlaku.

obj. - objemově

hm. - hmotnostně

fr. - frakce

2.2. Složky asfaltové směsi

Asfaltové směsi se skládají ze 3 hlavních složek. Těmito složkami jsou kamenivo, asfaltové pojivo a filer. Asfaltové směsi mohou také obsahovat různé přísady pro úpravu vlastností.

2.2.1. Kamenivo

Kamenivo, popřípadě minerální kamenivo, je tvrdý inertní a anorganický materiál přírodního nebo umělého charakteru, například drcený kámen, šterk, struska nebo písek, který se mísí s pojivem (asfaltem) při výrobě asfaltové směsi. Kamenivo je hlavní nosnou složkou hutněných asfaltových směsí, obvykle tvoří 90% - 95% hm. (75% - 85% obj.) asfaltové směsi. Výběr vhodného kameniva do asfaltové směsi by měl zohledňovat vlastnosti asfaltového pojiva, a také podmínky, kterým bude vozovka během a po dokončení výstavby odolávat. Jedná se například o povětrnostní a klimatické podmínky, dopravní zatížení a také požadovanou životnost vozovky. Důležité je taky zohlednit dostupnost kameniva, cenu jednotlivých frakcí a kvalitu kameniva. [12]





Obrázek č. 2: Frakce kameniva [44]

2.2.1.1. Rozdělení kameniva

Kamenivo lze rozdělit podle vícero kategorií.

Podle původu:

- **Přírodní** - kamenivo získané těžbou nebo drcením přírodních hornin.
- **Umělé** - kamenivo, které vzniklo za přispění člověka. Nejčastější jsou tepelné procesy jako tavba kovů, termická expandace nebo spalování.
- **Recyklované** - kamenivo, které vzniklo recyklací již dříve použitých stavebních materiálů.

Další rozdělení kameniva je podle **způsobu vzniku zrn**:

- **Těžené** - kamenivo říčního, ledovcového nebo navátého charakteru. Jedná se o usazené horniny jako písky, šterky a šterkopísky, které vznikly zvětráním starších hornin. Těžené kamenivo se vyznačuje zpravidla zaobleným tvarem zrn a ohlazeným povrchem. Podíl drcených zrn je pod 40 %.
- **Drcené** - kamenivo, které vzniká umělým drcením větších kusů horniny a následným tříděním. Nemusí se jednat o přírodní horniny, může vznikat drcením

jiných anorganických materiálů, jako je například vysokopecní struska. Drcené kamenivo se vyznačuje ostrými, nepravidelnými hranami a drsným povrchem zrn kameniva. Jedná se o nejvíce používaný druh kameniva do asfaltových směsí.

- **Těžené předrcené** - kamenivo získané drcením zrn těženého kameniva o velikosti nad 2 mm s podílem drcených zrn nad 40 % hmotnosti.

Tvary jednotlivých zrn jsou zobrazeny na obr. č. 3.



Obrázek č. 3: Tvary zrn [45]

Dále lze kamenivo dělit podle **objemové hmotnosti**:

- **Pórovité** - kamenivo s objemovou hmotností do $2\,000\text{ kg/m}^3$. Někdy se také definuje sypanou hmotností, která nesmí přesáhnout $1\,200\text{ kg/m}^3$. Z přírodních kameniv se jedná například o pemzu nebo vulkanické tufy. Ze skupiny umělých kameniv sem patří keramzit, expandovaný perlit nebo struska. Pórovitým kamenivem recyklovaným je například cihelný recyklát. Většina pórovitých kameniv je nasákavá, s čímž je nutno počítat při návrhu.
- **Hutné** - kamenivo s objemovou hmotností $2\,000 - 3\,000\text{ kg/m}^3$. Z přírodních kameniv patří mezi hutné většina přírodních nebo drcených kameniv. Ze skupiny umělých kameniv sem patří vysokopecní struska. Pórovitým kamenivem recyklovaným je betonový recyklát. Z drtivé většiny

se do asfaltových směsí určených do asfaltových vrstev vozovek používají právě hutná kameniva

- **Těžké** - kamenivo s objemovou hmotností nad $3\,000\text{ kg/m}^3$. Z přírodních hornin se jedná o některé vyvřelé nebo přeměněné horniny, jako například čediče nebo amfibolity. Jejich objemová hmotnost je však jen těsně nad hranicí definující těžké kamenivo, zpravidla nepřesahuje $3\,100\text{ kg/m}^3$. Jako umělé těžké kamenivo lze použít odpady z obrábění železa, ocelové broky nebo litinovou drť. Využití těžkého kameniva je zejména pro výrobu těžkých betonů, které se používají jako ochrana proti radioaktivnímu nebo rentgenovému záření. Lze je však také použít do vozovek kde je požadována velmi nízká hodnota ohrusu.

Poslední kategorie dělí kamenivo podle **velikosti zrn**:

- **Jemné částice** - kamenivo o velikosti zrn do $0,063\text{ mm}$.
- **Drobné** - kamenivo o velikosti zrna do 4 mm včetně.
- **Hrubé** - kamenivo o velikosti zrna $4\text{ až }125\text{ mm}$. [13] [14]

2.2.1.2. Zkoušky kameniva

Základní rozdělení zkoušek kameniva z časového hlediska je na:

- **Počáteční zkoušky typu (ITT – Initial Type Testing)**
- **Kontrolní zkoušky**
- **Vstupní kontrolní zkoušky**

Počáteční zkoušky typu (ITT) zajišťuje výrobce kameniva pro předpokládaný účel použití. Cílem těchto zkoušek je ověření shody se stanovenými požadavky. Provádí se při zahájení výroby kameniva, výrazné změně vlastností těžené horniny nebo při změně technologie výroby.

Pomocí zkoušek ITT se zjišťuje:

- Chemické složení s ohledem na škodlivé látky
- Objemová, měrná a sypná hmotnost
- Nasákavost, pórovitost
- Zrnitost
- Odolnost vůči zmrazování a rozmrazování
- Ohladielnost

- Přílnavost asfaltu ke kamenivu
- Petrografický rozbor
- Případné další potřebné vlastnosti kameniva

Kontrolní zkoušky ověřují vlastnosti kameniva v průběhu výroby asfaltových směsí. Pro tento typ zkoušek jsou předepsány četnosti, jejichž interval závisí na druhu zkoušky, např. zrnitost 1x týdně. Každá dodávka kameniva by měla obsahovat prohlášení o shodě a certifikát CE (Conformité Européenne). CE certifikát je nezávislým ověřením posouzení shody výrobku s požadavky příslušných nařízení vlády, které provádí výrobce. [13]

Zkoušky kameniva se dělí do 4 kategorií. Budou zde vypsány všechny důležité zkoušky, avšak popsány jen ty nejpoužívanější.

I. Zkoušení geometrických vlastností kameniva:

a. Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor dle ČSN EN 933-1

Zkouška spočívá v roztřídění zrn podle velikosti a následnému určení % propadu zrn na jednotlivých sítích. Z % propadu se stanoví **čára zrnitosti**, z které se poté odvodí obsah jemných částic a nadsítných/podsítných frakcí. Požadavky na síta jsou uvedeny v normě ČSN EN 933-2 (721184) Stanovení zrnitosti - Zkušební síta, jmenovité velikosti otvorů.

b. Stanovení tvaru zrn - Index plochosti dle ČSN EN 933-3

Zkouška sestává z dvou prosévacích operací. V první se vzorek roztřídí na potřebné frakce. Následuje prosévání na tyčových sítích s rovnoběžnými mezerami. Z hmotnosti zrn propadlých na tyčových sítích a celkové vysušené hmotnosti zrn se určí **celkový index plochosti**.

c. Stanovení tvaru zrn - Tvarový index dle ČSN EN 933-4

Podstatou zkoušky je roztřídění jednotlivých zrn kameniva na základě poměru jejich délky k tloušťce, obvykle pomocí dvoučelistového posuvného měřidla. Tvarový index se poté vypočítá jako hmotnostní podíl zrn, jejichž poměr rozměrů je větší než 3 a vyjádří se jako % v celkové hmotnosti zkoušených zrn.

d. Stanovení podílu drcených zrn v hrubém kamenivu dle ČSN EN 933-5

Stanovuje se podíl drcených zrn ve vzorku hrubého těženého kameniva. Proveďte se ruční třídění a vizuální hodnocení lomových ploch. Výsledkem zkoušky je % zastoupení drcených, ostrohranných, zaoblených a oblých zrn.

e. Posouzení jemných částic - Zkouška ekvivalentu písku dle ČSN EN 933-8+A1

Pomocí této zkoušky se stanoví podíl jílovitých částic ve fr. kameniva 0 - 2 mm nebo 0 - 4 mm sedimentací rozplaveného roztoku v normovém válci. Odměrný válec se naplní rozplavovacím roztokem po spodní rysku. Poté se do válce nasype navážka požadované frakce. Po uplynutí 10 minut se válec zazátkuje a umístí do zařízení, které protřepává roztok s kamenivem, čímž uvolňuje jemné částice. Následuje sedimentace, která trvá 20 minut. Jemné částice ve válci se uvolní a usadí se na hrubších frakcích. Poměr výšky spodní hrubší části k výšce celkového vzorku se poté vyjádří v %. Tento poměr se nazývá **ekvivalentem písku** (pro asfaltové směsi je požadována hodnota min. 70 %).

f. Posouzení jemných částic - Zkouška methylenovou modří dle ČSN EN 933-9+A

Methylenová modř se používá pro frakci 0/2 drobného kameniva a štěrkopísku. Do suspenze zkušební navážky s vodou se přidává roztok methylenové modře (10g/l). Absorpce barevného roztoku zkušební navážkou je po každém přidání roztoku kontrolována zkouškou zbarvení filtračního papíru k zjištění přítomnosti nevázaného barviva. Pokud je přítomnost nevázaného barviva prokázána, vypočte se hodnota methylenové modře (MB nebo MBF) a vyjádří se v gramech barviva absorbovaných jedním kilogramem zkoušené frakce.

g. Posouzení jemných částic - Zrnitost fileru (prosévání proudem vzduchu) dle ČSN EN 933-10

h. Posouzení povrchových charakteristik - Součinitel tekutosti kameniva dle ČSN EN 933-6

i. Stanovení obsahu schránek živočichů - podíl schránek živočichů v hrubém kamenivu dle ČSN EN 933-7

II. Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností

a. Metody pro stanovení odolnosti proti drcení dle ČSN EN 1097-2

Tato zkouška je také nazývaná zkouška **Los Angeles**. Úzká frakce vysušeného kameniva, která je zbavena nadsítného a podsítného kameniva, se vloží do otlukového bubnu. Poté se do bubnu vloží ocelové koule a buben se nastaví na předepsaný počet otáček. Po dokončení otluku zrn se navážka proseje skrz síto o velikosti oka 1,6 mm. Propad sítem se vztáhne k původní navážce a vyjádří v %.

b. Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva dle ČSN EN 1097-3

Vysušené kamenivo se nasype do odměrné nádoby známých rozměrů a hmotnosti. Poté se urovná povrch, aby byl zarovnan s horním okrajem nádoby, a obsah se zváží. Z odměřených hmotností a rozměrů odměrné nádoby se určí **sypná objemová hmotnost**.

c. Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti dle ČSN EN 1097-6

Nasákavostí kameniva rozumíme množství vody, které je vysušené kamenivo schopné pojmout při plném ponoření do vody na dobu 24 hodin. Udává se v % hmotnosti vysušeného kameniva. **Nasákavost kameniva** je důležitý parametr, z kterého můžeme usuzovat mrazuvzdornost kameniva.

d. Stanovení hodnoty ohladitelnosti dle ČSN EN 1097-8

Poskytuje relativní měřítko pro ztrátu protismykových vlastností povrchu vozovky, způsobenou ohlazováním mikrotextury kameniva, tj. jemných nepravidelností na povrchu zrn kameniva pneumatikami silničních vozidel.

e. Stanovení odolnosti proti otěru (mikro-Deval) dle ČSN EN 1097-1

f. Stanovení mezerovitosti suchého zhutněného fileru dle ČSN EN 1097-4

g. Stanovení vlhkosti sušením v sušárně dle ČSN EN 1097-5

h. Stanovení měrné hmotnosti fileru - Pyknometrická zkouška dle ČSN EN 1097-7

i. Stanovení odolnosti proti ohrusu pneumatikami s hroty - Nordická zkouška dle ČSN EN 1097-9

j. Stanovení výšky vzlínavosti vody dle ČSN EN 1097-10

k. Stanovení stlačitelnosti a pevnosti v tlaku pórovitého kameniva dle ČSN EN 1097-11

III. Zkoušení odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání

a. Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování dle ČSN EN 1367-1

Zkušební navážka, která musí být úzké frakce, se po nasáknutí vodou vystaví 10 cyklům zmrazování na teplotu $-17,5^{\circ}\text{C}$ a rozmrazování ve vodní lázni na teplotu 20°C . Po těchto 10 cyklech se provede prosátí přes síto o poloviční velikosti oka, jako spodní síto frakce (např. pro fr. 8 - 32 se použije síto o velikosti oka 4 mm). Propad sítem se vztáhne k původní navážce a vyjádří v %.

b. Zkouška síranem hořečnatým dle ČSN EN 1367-2

Zkušební navážka kameniva fr. 10 – 14 mm se vystaví 5 cyklům střídavého nasáknutí po dobu 17 h v roztoku síranu hořečnatého a následného vysoušení v sušárně při 110°C. Nasáknutá zrna kameniva se porušují opakovanou krystalizací a rehydratací síranu hořečnatého. Po těchto 5 cyklech se provede prosátí na síť o velikosti oka 10 mm. Propad sítím se vztáhne k původní navážce a vyjádří v %. [13][16][17][18][19]

c. Zkouška varem pro rozpadavý čedič dle ČSN EN 1367-3

d. Stanovení smršťování dle ČSN EN 1367-4

e. Stanovení odolnosti vůči tepelnému šoku dle ČSN EN 1367-5

f. Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování za přítomnosti soli (NaCl) dle ČSN EN 1367-6

g. Stanovení odolnosti pórovitého kameniva proti zmrazování a rozmrazování dle ČSN EN 1367-7

h. Stanovení odolnosti pórovitého kameniva proti rozpadu dle ČSN EN 1367-8

IV. Zkoušení chemických vlastností kameniva

a. Chemický rozbor dle ČSN EN 1744-1+A1

2.2.2. Filer

Filer je kamenná moučka fr. 0 - 2 mm, přičemž min. 70 % zrn propadne sítím o velikosti oka 0,063 mm (obr. č. 4). Filer se nachází v každé frakci kameniva, avšak jeho podíl stoupá se zmenšující se hodnotou maximálního zrna. Po asfaltovém pojivu ovlivňuje chování celé směsi nejvíce právě filer. Vlastnosti fileru závisí na matiční hornině, z které byl filer získán. V silničním stavitelství rozlišujeme dva druhy fileru.



Obrázek č. 4: Kamenná moučka [46]

2.2.2.1. Rozdělení fileru

Přídavný filer, též nazývaný vápencová moučka, je na obalovnu dodáván rovnou ve formě filerové frakce jemně drcené vápencové moučky pomocí návěsných automobilových sil. Do stacionárního sila obalovny se přesouvá za pomoci stlačeného vzduchu. Jedná se o silně zásaditý materiál, který pozitivně ovlivňuje vlastnosti asfaltových směsí. Zlepšuje přilnavost pojiva ke kamenivu a také zvyšuje odolnost asfaltové směsi vůči působení vody.

Při výrobě asfaltové směsi (zejména při sušení kameniva) se produkuje malé množství prachu. Tento prach je zachytáván za pomoci filtru po dobu celého výrobního procesu, tj. od vstupu materiálu do sušicího bubnu až po výdej hotové směsi. Takto zachycený prach se nazývá **vratný filer**, a je uskladněn v samostatném síle, odkud ho lze v souladu s recepturou použít. [20][21]

2.2.2.2. Zkoušky fileru

Zkoušky fileru nejsou tak časté a nesouvisí s touto diplomovou prací, proto jsou zde jen vypsány.

- a. **Objemová hmotnost fileru v petroleji dle ČSN EN 1097-3, příloha A**
- b. **Mezerovitost zhutněného fileru dle ČSN EN 1097-4**
- c. **Měrná hmotnost fileru pyknometricky dle ČSN EN 1097-7**

2.2.3. Asfaltová pojiva

Asfalt je v moderním světě široce používaným materiálem. Vyrábí se rafinací surové ropy, ačkoli existují i přírodní asfalty (obr. č. 5). Největší výhodou pro použití asfaltu v inženýrských stavbách je jeho univerzálnost, stejně jako to, že je vysoce odolný vůči působení většiny kyselin, zásad a solí. Asfalt je při okolní teplotě obvykle polotuhá až tuhá látka, do tekutého stavu se dostane působením tepla, rozpouštěním v rozpouštědlech nebo emulgací s vodou. Dále je to také velmi dobré pojivo, které je vysoce přilnavé, vodotěsné a trvanlivé, díky čemu našel vysoké uplatnění v moderních vozovkách silničních komunikací. Více jak 90 % z celé evropské silniční sítě je tvořeno silnicemi s asfaltovým krytem. Používání asfaltu však není novou technologií a je tu s námi už tisíciletí. [23][24]



Obrázek č. 5: Těžba přírodního asfaltu [47]

2.2.3.1. Historie asfaltu

Asfalt je jedním z nejstarších technických materiálů, které lidstvo zná, používá se již od počátku civilizace. Asfalt používaný prvními civilizacemi vznikl zvětráváním ropy, která prosakovala trhlinami na povrch, po úniku těkavých složek. Takto vzniklý asfalt se vyskytoval ve dvou formách, buď jako měkká zpracovatelná hmota, nebo jako tvrdé černé žíly ve skalních útvech, které se dnes označují jako „asfaltové uhlí“.

Důkazy o používání asfaltu sahají až do starověku, nejstarší nález se datuje až do antiky. Jednalo se o kamenné nástroje nalezené v Sýrii (obr. č. 6), které se datují do období před 40 000 lety. V období 5 000 – 6 000 let př.n.l. ho Sumerové používali na výrobu lodí, těsnění a hydroizolace. Kolem roku 4 000 př.n.l. byl asfalt také použit na stavbu zikkuratu.



Obrázek č. 6: Kamenné nástroje s asfaltem [48]

Antický historik Hérodotos také tvrdil, že na výstavbu budov v Babylonu byl použit asfalt. Asfalt se měl v tomto období těžit v Arderice (neznáme přesné místo, údajně poblíž Babylonu). Hérodotos také popisuje stavbu zdí okolo města Babylonu za použití horkého asfaltu, kde po každé 30. vrstvě z cihel vytvořili vrstvu z rákosu a horkého asfaltu. Kolem roku 625 př.n.l. za vlády krále Nabopolassara byl asfalt použit na výstavbu první cesty. Dochovaný zápis (obr. č. 7) zaznamenává dláždění ulice v Babylonu, která vedla od paláce k severní zdi města. Na dláždění použili horký asfalt a pálené cihly. [22,32]



Obrázek č. 7: První zmínka o použití asfaltu [49]

Další velkou civilizací, která používala asfalt, byli Egypťané. Okolo roku 2 600 př.n.l. ho používali jako hydroizolační nátěr, ale také jako impregnační nátěr při mumifikaci.

Ostatní civilizace používaly často asfalt jako pojivo při stavbách budov, dláždění chodeb v chrámech, na zavlažovací systémy, vodní nádrže nebo významné cesty.

V 16. století se Sir Walter Raleigh vylodil na jihozápadní část poloostrova Trinidad, kde zpozoroval obrovské asfaltové jezero (Trinidadské asfaltové jezero). Asfalt z tohoto jezera poté použil k utěsnění své lodi.

V průběhu 18. století španělští osadníci poprvé objevili na úpatí hory Santa Monica plochu, kde asfalt vytékal z četných průduchů a vytvářel černé louže. Hustý a viskózní asfalt tvořil kopečky ve tvaru sopky, které obvykle vyčnívaly několik centimetrů nad úroveň okolní půdy. Asfalt byl užitečnou látkou pro indiány v této oblasti, kteří jej používali k utěsňování svých kánoí, k impregnaci košů a k upevňování dřevěných rukojetí na kamenné čepele. V roce 1828 se bývalý portugalský podnikatel (Antonio de Rocha) stal majitelem dehtových pramenů, a to tak, že od mexické vlády dostal pozemek o rozloze jedné „square league“ (španělská jednotka, přibližně 17,96 km²). Tento pozemek začal nazývat Rancho La Brea (Dehtový ranč, obr. č. 8). Jednou z podmínek užívání pozemku však bylo to, že Rocha povolí místním obyvatelům, aby na ranč přicházeli a nabrali si tolik asfaltu, kolik potřebovali. Tento asfalt většinou používali na hydroizolaci střech domů z nepálených cihel.



Obrázek č. 8: Dehtová jezera na ranči La Brea [50]

S rozvojem kultur se asfalt často používal ve stavebnictví a při okrasných pracích.

Významným faktem je, že rané použití asfaltu mělo povahu cementu k upevňování nebo spojování různých předmětů. Historie používání asfaltu je přehledně zobrazena v tab. č. 1.[22][32]

Tabulka č. 1: Historie používání asfaltu [22]

3 800 pr.n.l.	Důkaz o používání asfaltu k utěšňování rákosových lodí
3 500 pr.n.l.	Použití asfaltu jako lepidla pro výrobu šperků
3 000 pr.n.l.	Sumerové jej používali jako stavební cement; předpokládá se, že také byl používán jako silniční materiál; asfalt se používal k utěšňování bazénů a také vodní nádrže v Mohendžo Daro
2 500 pr.n.l.	Použití v procesu balzamování; předpokládá se, že asfalt byl široce používán k utěšňování lodí
1 500 pr.n.l.	Použití k léčebným účelům a (ve směsi s pivem); jako sedativum na žaludek; pokračující zmínky o používání kapalného asfaltu (oleje) jako osvětlovacího prostředku v lampách
1 000 pr.n.l.	Použití jako hydroizolační prostředek obyvateli ve Švýcarsku
650 pr.n.l.	Použití asfaltu jako materiálu pro stavbu silnic v Babylonu
500 pr.n.l.	Použití (ve směsi se sírou) jako zápalná látka v řeckých válkách; také použití kapalného asfaltu (oleje) ve válce
250 pr.n.l.	Výskyt v několika oblastech Úrodného půlměsíce (Mezopotámie); opakované použití kapalného asfaltu (oleje) jako osvětlovacího prostředku v lampách
40 n.l.	Asfalt plovoucí na hladině Mrtvého moře popsal Dioskoridés jako židovský asfalt
750 n.l.	Použití v Itálii jako barva v malířství
950 n.l.	Zpráva o destruktivní destilaci za účelem získání ropy
1 500 n.l.	Objev v Americe; první pokus o dokumentaci vztahu asfaltu a ropy
1 600 n.l.	Používání asfaltu k různým účelům; studování vztahu mezi uhelným a dřevěným dehtem; používá se k pokládání dlažby
1 859 n.l.	Objev ropy v Severní Americe; zrod moderního ropného průmyslu, vědy o ropě a rafinace pro výrobu derivátů ropy, jako je asfalt

Na počátku devatenáctého století došlo k nárůstu zájmu a asfalt se začal hojně používat na chodníky, ploché střechy a těsnění cisteren. Objev ropy a následná komercializace ropy v Pensylvánii v roce 1859 vedly k dalším inovacím a rozvoji v oblasti rafinace ropy. Např. moderní rafinace začala v roce 1862, kdy se poprvé objevila destilace ropy. Na tom se nemalou mírou podílelo úsilí Benjamína Sillimana, který se zajímal o geologické jevy (z nichž ropa byla takovým jevem) a tento zájem předal svému synovi (Benjaminu Sillimanovi mladšímu).

Když Benjaminův otec odešel v roce 1853 do důchodu, jeho syn se ujal práce jako profesor obecné a aplikované chemie na Yaleově univerzitě. Poté, co napsal řadu chemických knih a byl zvolen do Národní akademie věd, Benjamin, stejně jako jeho otec, nastoupil na lukrativní poradenské pozice ve společnosti Boston City Water Company a v různých důlních podnicích. V roce 1855 byl požádán, aby prozkoumal některé vzorky minerálů a podal o nich zprávu nové společnosti, Pennsylvania Rock Oil Company. Po několika měsících práce Benjamin mladší oznámil, že asi 50 % černé dehtovité látky lze vydestilovat na prvotřídní hořlavé oleje (které se dnes nazývají petrolej a parafín) a dalších 40 % toho co zbylo, by se dalo destilovat pro jiné účely, například pro mazání nebo svícení plynem. Na základě této jediné zprávy byla založena společnost, která měla

financovat vrt v Oil Creek v Pensylvánii, a v roce 1857 se stala prvním vrtem, z něhož se začala těžit ropa. Trvalo dalších 50 let než Sillimanova zmínka o dalších frakcích, které se dají získat z ropy prostřednictvím destilace, poskytla benzín pro první spalovací motor automobilu. Sillimanova zpráva změnila svět, protože umožnila zcela novou formu dopravy a pomohla změnit Spojené státy v průmyslovou velmoc. Po dokončení prvního vrtu (Edwinem Drakem, obr. č. 9), byly okolní oblasti okamžitě pronajaty a probíhaly rozsáhlé vrty.



Obrázek č. 9: První vrt na těžbu ropy [51]

Těžba ropy ve Spojených státech se zvýšila z přibližně 2 000 barelů (1 barel, bbl = 158,8 litru) v roce 1859 na téměř 3 000 000 bbl. v roce 1863 a přibližně 10 000 000 barelů v roce 1874. V roce 1861 byl přepraven první náklad ropy v dřevěných sudech přes Atlantik do Londýna (Velká Británie) a v 70. letech 19. století se rafinerie, cisterny a ropovody staly charakteristickými rysy průmyslu, především díky vedení společnosti Standard Oil, kterou založil John D. Rockefeller (Johnson, 1997). Po zbytek devatenáctého století byly Spojené státy a Rusko dvě oblasti, v nichž došlo k nejvýraznějšímu vývoji (Yergin, 1991). [22,25,26,27,32]

V roce 1891 společnost New York-Bermudez Company zahájila vývoj bermudezského asfaltu ve Venezuele, který následně převzala společnost Barber Asphalt Paving Company. Asfalt Bermudez byl poprvé použit v Detroitu v Michiganu v roce 1892 a v následujícím roce byl použit na chodníky ve Washingtonu D.C. Rychle získal na popularitě a dodnes se používá jako silniční pojivo a také pro výrobu asfaltových desek pro střechy.[30]

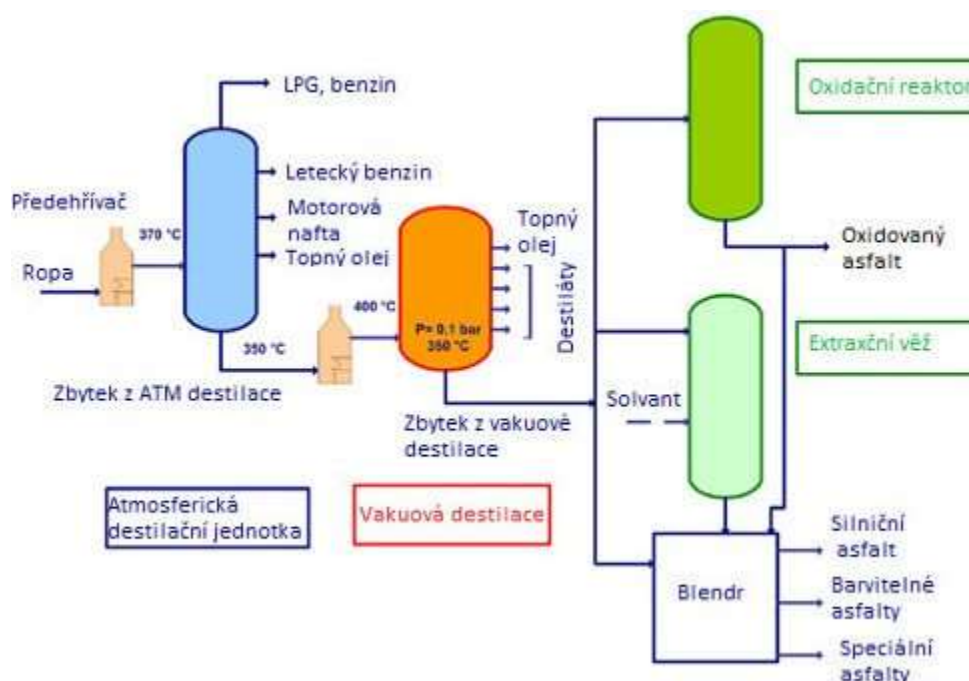
Po roce 1945 začal velmi růst význam zemí Blízkého východu, díky novým objevům obrovských zásob ropy. Spojené státy, ačkoli byly i nadále největším producentem, byly také největším spotřebitelem, a tedy nebyly významným vývozcem ropy. V této době začaly ropné společnosti hledat ropu mnohem dál a významné objevy se začaly objevovat i v zahraničí. V Evropě, Africe a Kanadě vedly k dalšímu rozvoji těžby zdrojů ropy a zvýšené produkci asfaltu (Yergin, 1991). [22,32]

2.2.3.2. Výroba asfaltu

Technologie na výrobu asfaltu se v průběhu století vyvinuly, až do bodu, kde asfalt z devatenáctého a dvacátého století se stal složitější a účinnější, pokud jde o životnost vozovek. Použití asfaltu se již neomezuje pouze na vozovky silnic a hydroizolaci. Ve skutečnosti je to právě všestrannost asfaltu, která z něj dělá tak široce používaný materiál. Mimo jiné jej lze použít v následujících odvětvích:

- doprava - v oblastech, jako jsou silnice, železniční tratě nebo letiště
- rekreace - na plochách, jako jsou dětská hřiště, cyklistické stezky, běžecké dráhy a tenisové kurty
- zemědělství - na plochách, jako jsou podlahy stodol a chlévů
- v průmyslu - jako jsou přístavy, skládky odpadů a pracoviště
- stavebnictví - v oblastech, jako jsou hydroizolace a podlahy

Pro tato použití lze asfalt vyrábět v stacionárních (obr. č. 10) nebo i v mobilních zařízeních. Asfalt používaný na vozovkách se někdy označuje jako netuhá (pružná) vozovka, díky své schopnosti odolávat namáhání způsobenému mírným zatížením, sedání podloží vozovky, aniž by došlo k praskání. [22,25,26]



Obrázek č. 10: Destilace asfaltu [52]

Asfalt se dá získat buď výrobou z ropy, nebo těžením přírodního asfaltu, který se volně vyskytuje v přírodě. Další dělení je **podle způsobu výroby**:

- I. **Destilační asfalty** - jsou zbytky z destilace mazutu.
- II. **Polofoukané asfalty** - vyrábějí se oxidací (polofoukáním) zbytků z vakuové destilace a směsí těchto zbytků s těžkými olejovými frakcemi a kyslíkem.
- III. **Oxidované asfalty** - vyrábějí se podobně jako polofoukané, s tím rozdílem, že oxidace se provádí při vyšší teplotě a trvá delší dobu, takže se získají tvrdší asfalty.
- IV. **Asfalty z odasfaltování** - jsou zbytkové frakce z deasfaltizace těžkých ropných frakcí.
- V. **Multigrádové asfalty** - jsou speciální silniční asfalty s vylepšenými vlastnostmi při vysokých a nízkých teplotách v poměru k silničním asfaltům. Odráží se to v dosahování vyšších modulů tuhosti a větší odolnosti vůči trvalým deformacím směsí zhotovených s použitím tohoto druhu asfaltů.
- VI. **Krakové asfalty** - jsou zbytky z termického krakování těžkých ropných frakcí a zbytků.

- VII. Přírodní asfalty** - jsou asfalty, které se těží z povrchových nalezišť (jezer) nacházejících se v přírodě (např. Trinidad). Jedná se většinou o poměrně tvrdý asfalt, který často obsahuje jemné minerální látky.
- VIII. Smíšené asfalty** - jsou asfalty, které vzniknou smíšením výše uvedených druhů asfaltu, případně s přidavkem vhodných olejových frakcí.

Asfalty se dále dělí **podle způsobu použití na:**

- I. Silniční** - jsou asfalty používané pro výstavbu a údržbu silnic, letišť apod.
- II. Průmyslové** - jsou asfalty používané k izolacím staveb, střech, k výrobě střešních a hydroizolačních pásů apod.
- III. Modifikované** - jsou ropné asfalty modifikované různými organickými polymery, používají se jak v silničním stavitelství, tak jako průmyslné asfalty. (Nejčastěji se jako modifikátor používá **SBS – Styren-Butadien-Styren**)
- IV. Ředěné** - jsou roztoky asfaltů v lehkých (těkavých) ropných frakcích, používají se jako nátěrové hmoty např. k nátěrům střech, ocelových předmětů, kanalizačních trub a k izolaci stěn proti vodě.
- V. Fluxované** - jsou asfalty, jejichž viskozita je snížena fluxovadlem, např. fluxačními oleji, což jsou vysokovroucí ropné olejové frakce.
- VI. Asfaltové emulze** - emulze asfaltu ve vodě, používají se v silničním stavitelství například k opravám silnic za studena. [28]

2.2.3.3. Zkoušky silničních asfaltů

Silniční asfalty jsou využívány převážně na výstavbu a údržbu netuhých asfaltových vozovek. Na tento účel se spotřebuje přibližně 75 % zpracovávaných asfaltů. Vlastnosti asfaltů používaných v silničním stavitelství a údržbě jsou definované Českou technickou normou. Požadavky jsou uvedeny v **ČSN 65 7204 Asfalty a asfaltová pojiva - Silniční asfalty**. Pro modifikované asfalty v normě **ČSN 65 7222-1 Asfalty a asfaltová pojiva - Silniční modifikované asfalty**, resp. v normě **ČSN EN 14023 Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty**. Mezi nejčastější zkušební metody silničních asfaltů patří stanovení bodu měknutí, stanovení bodu lámavosti, stanovení penetrace, stanovení obsahu asfaltenů nebo stanovení přilnavosti asfaltových pojiv ke kamenivu. [29]

Zkoušky silničních asfaltů jsou:

I. Empirické zkoušky

a) Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426

Zkouška je založená na měření hloubky proniknutí jehly do zkoušeného vzorku asfaltu vytemperovaného na požadovanou teplotu (nejčastěji 25°C). Jehla je zatížena 100 g a do vzorku vniká po dobu 5 s. Hloubka proniknutí se měří s přesností na 0,01 mm, penetrace se vyjadřuje v 0,1 mm. Penetrace je nepřímo úměrná viskozitě vzorku, čím je asfalt viskóznější, tím má menší penetraci. [36][45]

b) Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička dle ČSN EN 1427

Bod měknutí je teplota, při které se asfalt nacházející v ocelovém kroužku předepsaných rozměrů protáhne pod váhou ocelové kuličky předepsané hmotnosti o požadovanou vzdálenost. Teplota ohřívání je 5°C za minutu. Čím je bod měknutí vyšší, tím méně je asfalt náchylný na vytlačování ze směsi během letních měsíců. [37][45]

c) Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse dle ČSN EN 12593

Následující zkouška určuje křehkost pojiva za nízkých teplot. Před začátkem zkoušky si připravíme zkušební očištěné plíšky, na které se nanese 410 mg $\pm$ 10 mg pojiva. Plíšek poté umístíme na vyhřívaný magnetický blok. Až se pojivo dostatečně zahřeje, rovnoměrně ho rozprostřeme po plíšku. Po vychladnutí na okolní teplotu se plíšek mírně ohne a upevní do ohýbacího zařízení, které se poté vloží do zkumavky chladicího zařízení. Chlazení se provádí prostřednictvím tuhého oxidu uhličitého (suchého ledu) rychlostí cca 1 °C/min. Při teplotě 10 °C $\pm$ 2 °C nad očekávanou teplotou lámavosti, započne ohýbání plíšku, pomocí klíčky ohýbacího zařízení (1 otáčka/s). Sleduje se, kdy dojde na ohýbaném plíšku k první prasklině asfaltového filmu. [38][45]

d) Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů dle ČSN EN 13398

Ke zkoušce je třeba tří zkušebních tělísek. Do nahřáté odlévací formy potřené separačním prostředkem se nalije zahřáté pojivo s malým přesahem. Po jedné hodině při laboratorní teplotě se odřízne přesahující část pojiva. Vzorek se poté vloží do vodní lázně protahovacího zařízení (duktilometru) o teplotě obvykle 25 °C nebo 10 °C na dobu 90 minut. Zkoušku je možno provádět i při jiné teplotě. Po 90 minutách se vzorek sejme z podkladních destiček a odstraní se boční části formy. Asfaltové tělísko se upevní na vodící desky a začíná protahování rychlostí 50 mm/min až do 200 mm délky. Do 10 s po

zastavení se vzorek přestřihne a sleduje se zkrácení. Po 30 min. se změří délka vzorku pravítkem.

Vratná duktilita R_E se spočítá jako:

$$R_E = \frac{d}{L} * 100[\%]$$

kde **d** je vzdálenost mezi konci vzorku, **L** je délka protažení (200 mm). Vyjadřuje se v procentech a zaokrouhluje se na celá procenta. Pokud se 2 vzorky neliší o více než 5 %, určí se aritmetický průměr z těchto dvou vzorků. Pokud překročí 5 %, ozkouší se ještě jedno tělísko. Výsledek zkoušky třetího tělíska se porovná s výsledkem jemu bližším, a pokud je mezi nimi rozdíl menší než 5 %, tak aritmetický průměr z nich vypočítaný je výsledkem zkoušky. Jinak je třeba zkoušku opakovat. Výsledek se zaokrouhlí na celá %. [39][45]

e) Stanovení tažných vlastností modifikovaných asfaltů metodou silové duktility dle ČSN EN 13589

Kromě odlišné formy se příprava vzorku neliší od zkoušky vratné duktility.

Standardní teplotou lázně je 5 °C. V případě měkkých asfaltových pojiv se však zkouška provádí za teploty 0 °C a tvrdá polymerem modifikovaná pojiva při teplotě 10 °C. Těleso je temperováno při této teplotě 90 minut. Po této době se odstraní boční části formy a tělísko je upevněno v duktilometru vybaveném snímačem tahové síly. Po zahájení zkoušky dochází k natahování tělíska konstantní rychlostí 50 mm/min až do dosažení protažení 1333 %, tj. 400 mm. Po celou dobu natahování je zaznamenávána hodnota protažení a hodnota působící síly. Pokud dojde ke křehkému lomu při protažení menším než 400 mm, zkouška se opakuje. V případě porušení i druhého vzorku se zvyšuje teplota lázně o 5 °C.

Kvalita polymerem modifikovaných asfaltů se vyjadřuje pomocí tzv. smluvní energie. Hodnoty zkoušky silové duktility se vyjadřují jako rozdíl smluvní energie příslušné ke dvěma bodům protažení (0,2 m a 0,4 m).

Hodnota smluvní energie se vypočte ze vzorce:

$$E'_s = E'_{0,4} - E'_{0,2}$$

kde

E'_s - hodnota smluvní energie uvedené v tabulkách specifikací PmB

$E'_{0,4}$ - smluvní energie odpovídající protažení 0,4 m

$E'_{0,2}$ - smluvní energie odpovídající protažení 0,2 m

Výsledná hodnota smluvní energie je stanovena aritmetickým průměrem 3 platných měření. [40][45]

II. Funkční zkoušky

a) Stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv rotačním vřetenovým viskozimetrem dle ČSN EN 13302

K měření viskozity asfaltových pojiv je nejčastěji používán Brookfieldův rotační viskozimetr, jenž využívá vřeteno tvaru kuželu, které je ponořeno do pojiva rozehřátého na teplotu 135 °C. Podstatou je měření míry odporu kapaliny při otáčení kuželu v pojivu. [45]

b) Dynamický smykový reometr (DSR) dle ČSN EN 14770

Podstatou zkoušky je namáhání vzorku pojiva mezi dvěma destičkami, z nichž jedna je pevná a druhá osciluje. Vzorek je namáhán oscilací řízené deformace, či řízeného napětí. Zatížení rotací odpovídá harmonicky proměnné (sinusové) funkci namáhání, která nejvíce odpovídá simulaci zatížení ve vozovce od jedoucích vozidel. Frekvenci lze měnit, dle rychlosti vozidel. [45]

c) Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR) dle ČSN EN 14771

Používá se k určení chování asfaltových pojiv za nízkých teplot. Princip zkoušky je založen na provedení průhybu a výpočtu modulu tuhosti, dotvarování a ohybové tuhosti na vzorku asfaltového pojiva před a po stárnutí při nízkých teplotách. [45]

d) Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Metoda RTFOT dle ČSN EN 12607-1

Zkouška probíhá následovně. Do skleněné nádoby se nalije $35 \pm 0,5$ g pojiva a nádoba se vloží do sušárny vytemperované na 163 °C. Zkouší se naráz 8 vzorků. Během zkoušky, která trvá 75 minut, je nádobkami otáčeno, což zabraňuje vytvoření povrchové vrstvičky, a zároveň je přímo do nádobek vháněn horký vzduch. Po zkoušce je změřen úbytek hmotnosti po umělém stárnutí, bod měknutí, penetrace při 25 °C a dynamická viskozita při 60 °C. Hodnoty jsou porovnány s parametry nezestárlého pojiva. [45]

2.2.3.4. Značení asfaltů

Silniční asfalty se značí rozsahem hodnoty penetrace jehlou, například silniční asfalt o penetraci 50 (0,1 mm) až 70 (0,1 mm) bude označen jako **50/70**. Polymerem modifikované asfalty se značí za pomoci zkratky **PMB (Polymer Modified Bitumen)** před hodnotu rozsahu penetrace jehlou, za kterou se ještě přidává dolní hranice teploty bodu měknutí v °C. Označení polymerem modifikovaného asfaltu je například **PMB 45/80-65**.

2.3. Historie asfaltových směsí

Asfalt se používal už v Mojžíšově době, a to nesčetnými způsoby. Po staletí se používal nejen jako lék a ochrana lodí před bouřemi, ale v počátcích se používal i jako dlažba pro silnice. Historici zjistili, že již v roce 1500 n. l. vybudovali Inkové v Peru propracovaný systém silnic, z nichž některé byly dlážděny složením podobným modernímu asfaltovému makadamu.

V 19. století byla nalezena velká ložiska asfaltu ve Francii a Švýcarsku a obchodníci v těchto zemích začali uvádět na trh asfaltové výrobky pro různá použití.

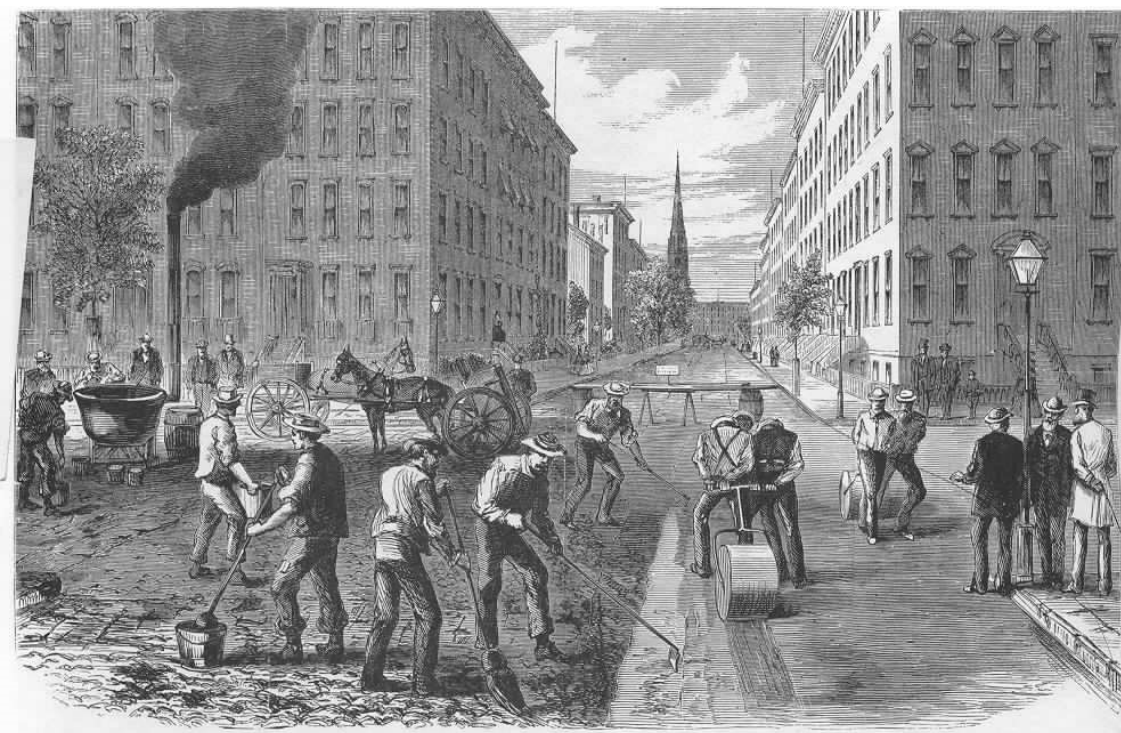
Jedním z významných nálezů bylo naleziště asfaltu Seyssel objevené v roce 1735 v údolí řeky Rhône ve Francii. Seysselský asfalt se ve Francii prodával pod názvem „kamenný asfaltový tmel“ („rock asphalt mastic“) a používal se k povrchové úpravě podlah, mostů a chodníků.

V roce 1829 byla položena asfaltová vrstva složená z 93 % směsí Seysselova asfaltu a 7 % kameniva jako chodník u Pont Morand v Lyonu ve Francii. Tato směs se také používala jako povrch schodů. V červnu 1835 byla na pařížském mostě Pont Royal položena první asfaltová dlažba z litého asfaltu. Byla složena z asfaltu Seyssel. Později, v roce 1836, byl Seysselův asfalt zaveden v Londýně pro stavbu pěších cest.

Nejstarší zaznamenaný případ použití asfaltové směsi na chodníky v USA je z roku 1838, kde byla použita na chodník u staré budovy Merchant's Exchange Building ve Filadelfii. Byl použit Seysselův asfalt.

První zmínka o stavbě asfaltové silnice v 19. století pochází z Paříže (obr. č. 11). Silnice byla postavena z Paříže do Perpignanu ve Francii v roce 1852. Zde byla poprvé použita moderní makadamová konstrukce s asfaltem Val de Travers. Ložisko asfaltu

Val de Travers bylo objeveno v roce 1712 ve švýcarském pohoří Jura. Omezený prodej asfaltu z tohoto ložiska začal už na přelomu 17. a 18. století.



Obrázek č. 11: Pokládka asfaltové silnice v Paříži [53]

V roce 1849 si švýcarský inženýr M. Merian všiml, že úlomky tvrdého asfaltu, které vypadávaly z vozíků převážejících asfalt z dolu ve Val de Travers, se v letních měsících pod koly vozíků stlačovaly do surové asfaltové vrstvy. Merianova pozorování vedla k vybudování úseku vozovky, zhutňované válcem v ulici Bergere v Paříži. V dobrém stavu se tato vozovka udržovala šedesát let. První úsek asfaltové vozovky v Londýně byl položen na Threadneedle Street poblíž Finch Lane v květnu 1869. Byla složena z asfaltové směsi Val de Travers.

Zásluhu za první položení asfaltovou vozovku v USA historici připisují belgickému lékárníkovi E. J. DeSmedtovi. V roce 1870 vybudoval malý experimentální pás s evropským asfaltem naproti radnici v Newarku ve státě New Jersey (obr č. 12). O rok později, v roce 1871, bylo položeno několik vozovek tvořených z podobných asfaltů ve Washingtonu D.C. Vozovky byly složeny ze směsi drceného kamene a písku s dehtovou smolou a kreozotovým olejem. Tyto dlažby poskytovaly dobrou službu po dobu více než 15 let. V roce 1871 byl také položen malý úsek asfaltového chodníku v Battery Parku v

New Yorku. V roce 1872 pak byl na náměstí Union Square položen větší úsek z asfaltové směsi Val de Travers.



Obrázek č. 12: Příklad asfaltových vozovek do USA [54]

První asfaltová vrstva z asfaltu vytěženého z asfaltového jezera v Trinidadu byla položena v USA na Pennsylvania Avenue ve Washingtonu v roce 1876 (průběh vyobrazen na obr. č. 13,14,15). Zde byl použit asfalt Val de Travers od budovy Kapitolu po Šestou ulici. Na zbývajících částech vozovky byl použit asfalt z Trinidadského jezera. Chodci a motoristé považovali asfaltovou směs za příliš kluzkou, ale úsek z asfaltu z jezera Trinidad měl odolnost proti smyku a byl považován za úspěšný. Doteď se však jednalo jen o ojedinělé projekty.[22][30][32]



Obrázek č. 13: Těžba asfaltu na jezeře Trinidad [55]



Obrázek č. 14: Přeprava asfaltu v dřevěných barelech [55]



Obrázek č. 15: Provádění asfaltové vrstvy na Pennsylvania Ave., Washington [55]

Před rokem 1890 byli stavitelé dálnic při stavbě silnic závislí na kamení, šterku a písku. Silnice se stabilizovaly přidáním vody, která podporovala dopravu taženou koňmi. Když se na silnice dostaly automobily, bláto a prach se staly vážným problémem.

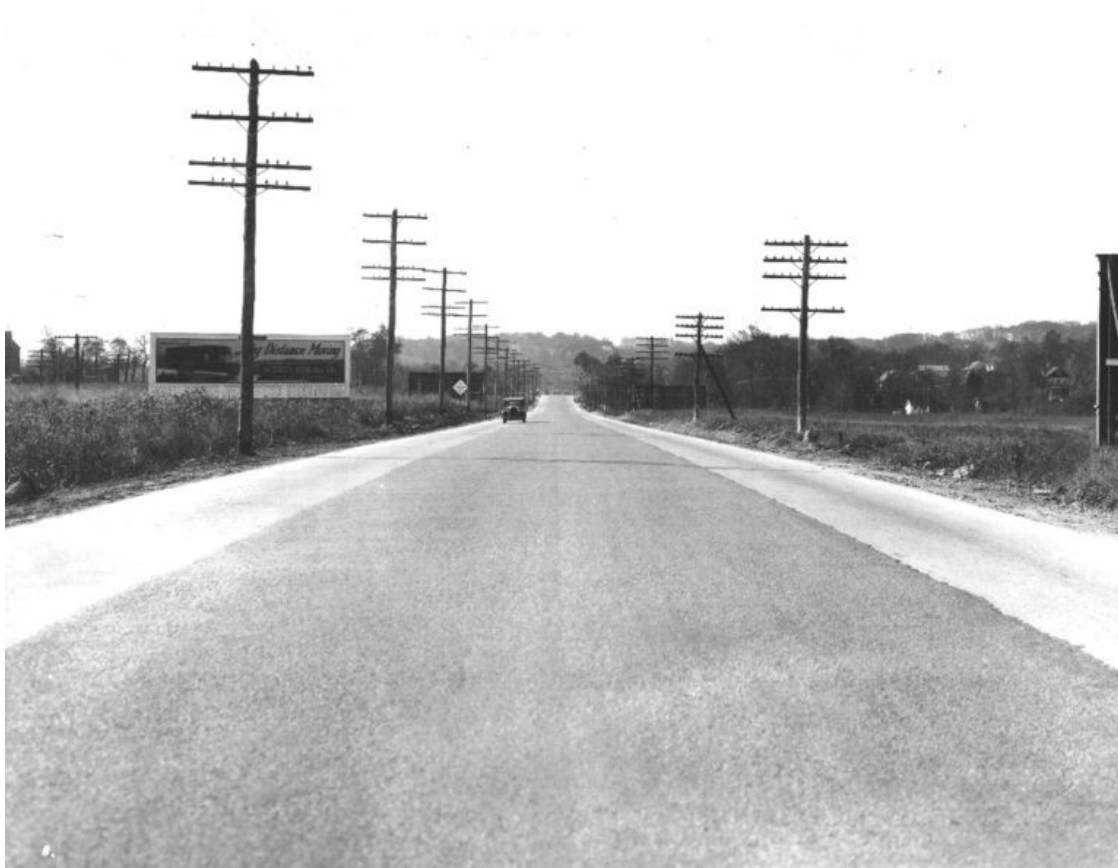
V roce 1904 využívalo stávající silnice v USA více než 55 000 automobilů a do roku 1910 se počet nákladních a osobních automobilů zvýšil na téměř 470 000, z toho byl počet nákladních automobilů téměř 100 000. Spojené státy najednou stály před vážným problémem - zachováním kvalitních neupravených prašných a šterkových cest. Velká otázka pro silniční inženýry zněla: „Jak postavit silnici, aby vydržela extrémní opotřebení nákladními a osobními automobily?“.

Odpovědí se staly silniční oleje a penetrační makadam. Byly nejúčinnějším prostředkem proti prachu a destrukci vozovek. Silničáři začali experimentovat s mícháním asfaltu a těžkých silničních olejů s různými frakcemi kameniva.

První osvědčenou asfaltovou směsí byla směs „Topeka Mix“. Směs „Topeka Mix“ používala kámen o maximální velikosti 1/2 palce a otevřela pole pro asfaltové směsi, které poskytovaly dostatečné parametry pro první meziměstské dálnice. Díky úspěchu „Topeka Mix“ a volání cestářů po celé zemi si asfaltérský průmysl uvědomil, že potřebuje jednotný hlas, který by zastupoval všechny společnosti vyrábějící asfalt - hlas, který by vysvětloval a obhajoval jejich produkt, a který by mohl úzce spolupracovat s uživatelskými agenturami. V důsledku této potřeby se v květnu 1919 sešlo v Union

League Clubu v New Yorku jedenáct asfaltérských společností, aby založily Asociaci asfaltérů (Asphalt Association), později pojmenovanou Asfaltový institut (The Asphalt Institute).

S nárůstem automobilové dopravy rostla i poptávka po asfaltových povrchových úpravách, penetračním makadamu a různých asfaltových směsích. Na počátku 20. let 20. století vznikla velká potřeba informací o správném použití asfaltu pro různé typy výstavby silnic a ulic. Ke konci dvacátých let se Asfaltový institut a Americká federace farmářů (American Farm Bureau Federation) spojily v celonárodní kampani, jejímž cílem bylo informovat Američany o výhodách modernizace národních silnic z farem na trh pomocí místního kameniva a ředěného asfaltu. Zároveň financovali výstavbu dalších silnic (obr. č. 16).



Obrázek č. 16: Příklad komunikace vybudované v roce 1929 [56]

Léta krize přinesla řadu problémů, ale také rozsáhlý program veřejných prací, včetně výstavby silnic a letišť. Ropný průmysl vyvíjel silniční oleje, ředěné asfalty a asfaltové emulze, které uspokojovaly potřeby státu při pokládání vozovek. V desetiletí 30. let 20.

století se počet nízkonákladových silnic, které byly pokryty asfaltem, zvýšil z 50 000 na 210 000. Současně se zvýšilo použití asfaltů z 500 000 na 1 800 000 tun ročně.

Ve 30. letech 20. století byla také založena Asociace civilního letectví (CAA – Civil Aeronautics Association). Zahájila rozsáhlý program výstavby letišť a požádala Asfaltový institut o školení na pokládku asfaltových vrstev pro pracovníky CAA. Výstavba lepší silniční sítě a letišť odstartovala v USA velký nárůst nákladní dopravy a leteckých společností.

V letech 1931 až 1937 se používání ředěného asfaltu nesmírně rozšířilo. Byl ekonomický a umožňoval rychlé opravy, které byly ve 30. letech nezbytné. Téměř u všech komodit došlo v letech krize k drastickému poklesu výroby - s výjimkou ředěného asfaltu. Mezi lety 1929 a 1936 vykázala celková spotřeba silničních olejů a ředěného asfaltu nárůst o 160 %, zatímco celkové použití asfaltových betonů pro stavbu silnic výrazně pokleslo.

Během druhé světové války se technologie asfaltování a stroje na pokládku velmi rychle zdokonalovaly (obr. č. 17), zčásti to podpořila potřeba vojenských letadel mít povrchy, které by vydržely nápory většího zatížení.



Obrázek č. 17: Stroj na pokládku asfaltových vrstev, 1939 [57]

Po skončení války a přestěhování rodin na předměstí se stavba silnic stala mimořádně rozsáhlým průmyslovým odvětvím. Aby bylo možné vyhovět, potřebovali dodavatelé větší a lepší vybavení. Za účelem uspokojit rostoucí poptávku po asfaltových vozovkách,

inženýři v padesátých letech 20. století přidali elektronické nivelační přístroje a na počátku 60. let přístroje na automatické pokládání. Mimořádně široké finišery, schopné pokládat dva jízdní pruhy najednou, se objevily v roce 1971 (obr. č. 18). Kromě toho byly představeny sběrače, které umožnily navážení materiálu přímo před finišer, takže mohl pracovat nepřetržitě.



Obrázek č. 18: První finišer pro pokládku více jízdních pruhů najednou [57]

Součástí asfaltáren z počátku 50. let 20. století byla obvykle sušička a věž s míchačkou (obr. č. 19). V polovině šedesátých let, kdy se znečištění ovzduší stalo vážným problémem v celé zemi, byly mnohé z nich doplněny o zařízení na praní kameniva a některé i o čističky. Další významnou změnou v polovině a na konci 60. let 20. století bylo přidání zásobníků a skladovacích hal (obr. č. 20, předtím se vše nakládalo přímo z továrny do nákladního automobilu). Poté obalovny začaly používat zásobníky pro krátkodobé skladování směsi, aby se přizpůsobily potřebám zákazníků a zvýšily výrobní kapacity. Výstavbu lepších obaloven také podpořil zvýšený zájem o životní prostředí. Kromě toho se trend neustále zlepšoval, a umožnil také průmyslu přijmout první recyklaci.



Obrázek č. 19: Obalovna 1948 [58]



Obrázek č. 20: Obalovna 1967 [59]

Recyklace byla běžná počátkem dvacátého století, ale tato praxe se přestala používat, protože se začal vyrábět nový asfalt, stavěly nové rafinerie, zvyšovaly se dodávky a klesala cena asfaltu a ropy. Energetická krize v sedmdesátých letech 20. století však ukázala, že je třeba šetřit přírodní zdroje, a v důsledku toho se jak podkladové, tak i obrusné vrstvy vozovek začaly budovat se stále větším obsahem recyklovaného asfaltu. Kromě toho toto odvětví vedlo ke snaze o inovaci a kvalitu při navrhování a výstavbě asfaltových vozovek.

Asociace pro asfaltové povrchy byla založena v roce 1955 a jednou z prvních aktivit, které tato nově vznikající organizace podnikla, bylo zlepšení kvality asfaltových povrchů. Sponzorovala testování asfaltu a asfaltových směsí na univerzitách a v soukromých zkušebnách a následně sdílela výsledky s členy organizace. Kromě toho se od poloviny 80. let 20. století vyvinulo odvětví pro pokročilé asfaltové materiály. Toto odvětví vyvinulo drenážní koberec (OGFC – Open Graded Friction Courses), a asfaltový koberec mastixový (SMA – Stone Matrix Asphalt). Vyvinula se také nová metoda navrhování asfaltových směsí, Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements).

Systémy technické kontroly umístěné na asfaltových vozovkách počínaje rokem 1997 zlepšily podmínky pro pracovníky na místě pokládky.[22][30][31][32]



Obrázek č. 21: Finišer s 3D nivelací [57]

2.4. Rozdělení asfaltových směsí

Hlavní dělení asfaltových směsí je na směsi hutněné a nehutněné. Mezi v ČR nejčastěji používané asfaltové směsi hutněné patří asfaltový beton (AC), asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy (**BBTM – Bétons Bitumineux très minces**), asfaltový koberec mastixový (SMA) a drenážní koberec (PA). Do nehutněných asfaltových směsí zařadíme pouze litý asfalt. Hutněné asfaltové směsi se dále dělí na dva typy. Typ beton a typ makadam.

2.4.1. Typ beton (AC – Asphalt Concrete)

Tento typ je charakteristický plynulou čarou zrnitosti, využívá se Fullerova parabola. Kostra směsi je tvořená všemi použitými frakcemi kameniva, které se do sebe po zhutnění zaklíní. Asfaltový beton se využívá jako kryt silničních a dálničních vozovek nebo letištních a jiných ploch. Výroba směsi probíhá na obalovnách, směs po zhutnění nepropouští vodu. Tento typ směsi je hutněn nejčastěji 2x50 údery Marshallova pěchu. [4]

2.4.1.1. Pojivo

Pojivem musí být silniční asfalt (ČSN EN 12591), polymerem modifikovaný asfalt (ČSN EN 14023), tvrdý silniční asfalt (ČSN EN 13924-1), multigrádový asfalt (ČSN EN 13924-2) nebo směs jednotlivých uvedených pojiv s přírodním asfaltem (ČSN EN 13108-4:2016, příloha B).

2.4.1.2. Minimální obsah pojiva

Minimální obsah pojiva může být definován v dokumentech souvisejících s použitím výrobku a musí se zaokrouhlit na nejbližších 0,1 %, a to mezi hodnotami 3,0 % a 8,0 % pro směs, u které se předpokládá objemová hmotnost kameniva rovna 2,65 Mg/m³. Vybraný minimální obsah pojiva se musí vyjádřit jako $B_{\min x}$, kde x je minimální obsah pojiva v procentech.

Minimální obsah pojiva ve směsi se musí upravit vynásobením součinitelem:

$$\alpha = \frac{2,650}{\rho}$$

kde ρ je zdánlivá objemová hmotnost kameniva v megagramech na metr krychlový (Mg/m^3), stanovená podle ČSN EN 1097-6 ($\text{Mg/m}^3 = \text{t/m}^3$).

Příslušná objemová hmotnost podle EN 1097-6 musí být deklarována ve zkoušce typu. Na základě zkušeností v místě užití může být pro určité druhy kameniva s jednotlivými zrnitostními charakteristikami korigovaný minimální obsah pojiva vhodně upraven. Taková úprava musí být definována v dokumentech souvisejících s použitím výrobku.

2.4.1.3. Kamenivo

Kamenivo musí odpovídat požadavkům uvedeným v ČSN EN 13043. Požadavky na přídatný filer jsou také uvedeny v této normě. Přídatný filer může zahrnovat materiály jako je cement, vápenný hydrát nebo vápenec.

2.4.1.4. Značení asfaltového betonu

Všeobecné označení pro asfaltový beton je **AC**, což vychází z anglického názvu pro asfaltový beton **Asphalt Concrete**. Podle toho, v jaké konstrukční vrstvě se asfaltový beton nachází, je mu dále přiděleno písmeno podle formátu **ACx**, kde **x** je:

O pro obrušní vrstvu (**ACO**)

L pro ložní vrstvu (**ACL**)

P pro podkladní vrstvu (**ACP**)

Dalším parametrem v značení je **ACx D**, kde „**D**“ představuje velikost oka horního síta nejhrubší použité frakce kameniva (v mm) pro daný druh asfaltové směsi, také označovaného jako nominální síto.

Dále se značí kvalita směsi. To se v označení směsi zapisuje jako **ACx D Y**, kde „**Y**“ označuje kvalitativní třídu směsi:

S pro směsi se zvýšenou odolností proti tvorbě trvalých deformací.

+ pro směsi nahrazující kvalitativní třídu směsí I podle ČSN 73 6121.

Bez označení pro směsi nahrazující kvalitativní třídu směsí II a III podle ČSN 73 6121.

CH pro směsi pro nemotoristické komunikace a chodníkové úpravy.
[7][10][3][37]

Možné značení vrstev:

Obrusné vrstvy: S; +; Bez značení; CH

Ložní vrstvy: S; +; Bez značení;

Podkladní vrstvy: S; +;

Posledním je označení použitého druhu asfaltu. To se v označení směsi zapisuje jako ACx D Y P, kde “P” označuje **druh použitého pojiva**.

Příklad značení:

ACP 22 S 20/30; 70mm; ČSN EN 13108-1

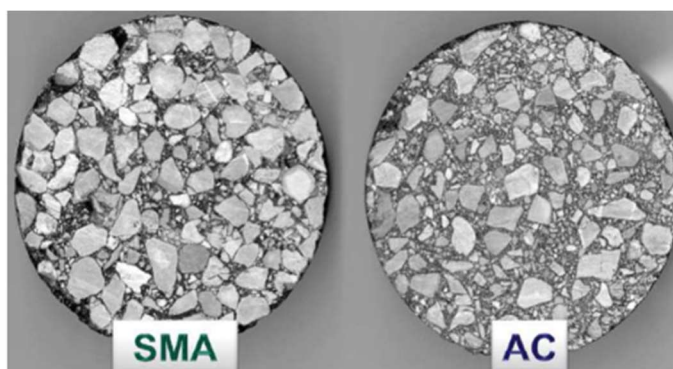
Asfaltový beton pro podkladní vrstvu vozovky dopravního zatížení I, s velikostí max. zrna 22 mm, v směsi byl použit silniční asfalt se zvýšenou odolností proti tvorbě trvalých deformací a s penetrací 20/30, tloušťka vrstvy 70 mm, navržen dle ČSN EN 13108-1. [37]

2.4.2. Typ makadam

Typ makadam je charakteristický přerušenou čarou zrnitosti, velkou mezerovitostí kostry kameniva a otevřenou texturou povrchu.

2.4.3. Asfaltový koberec mastixový (SMA – Stone Matrix Asphalt)

Asfaltový koberec mastixový je tvořen kostrou s přerušenou čarou zrnitosti, kde jsou zastoupeny hlavně dvě největší frakce kameniva. Zbývající frakce kameniva jsou výplňové. Společně s asfaltovým pojivem a kamennou moučkou tvoří asfaltovou maltu (mastix), která slouží jako tmel zrn nosné kostry.



Obrázek č. 22: SMA a AC [8]

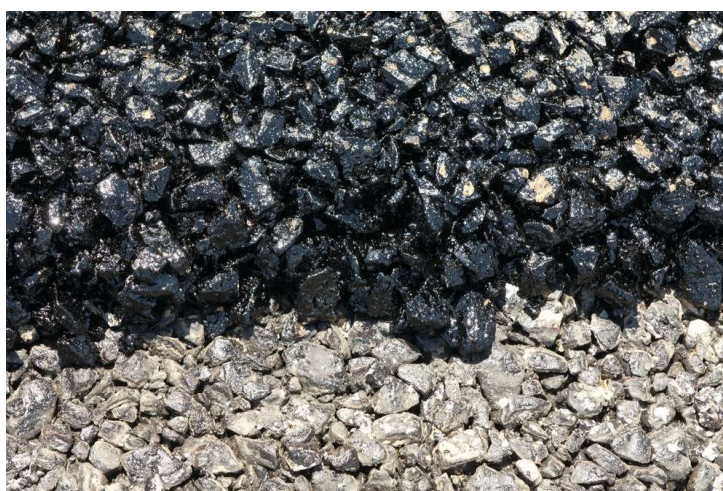
SMA byla vyvinuta v 70. letech v Německu. Sloužila pro vozovky, kde se používaly pneumatiky s hřeby. Kostra celé směsi je založena na dotyku velkých zrn kameniva, z toho důvodu je potřebné použít vysoce kvalitní kamenivo, zejména kamenivo s nízkou otlukovostí. Obsah pojiva v SMA je oproti AC vyšší (4,6 % - 7,6 %). Do SMA se téměř výhradně používají modifikované asfalty, velmi časté jsou také stabilizační přísady jako například celulózní vlákna. [4] [7] [10]

Správně zhotovená vrstva s SMA je charakteristická:

- Pomalým procesem stárnutí
- Vysokou odolností vůči tvorbě mrazových trhlin
- Příznivou makrotexturou, která má za následek útlum hluku z dopravy
- Vysokou odolností vůči tvorbě trvalých deformací
- Dobrou přilnavostí k podkladu

2.4.4. Asfaltový koberec drenážní (PA – Porous Asphalt)

Jedná se o asfaltovou směs s velmi vysokou mezerovitostí (15% - 20% oproti běžným 3% - 6%). Je určena do obrusných vrstev silničních a dálničních vozovek. Čára zrnitosti je opět přerušená, stejně jako při SMA. Kostra je tvořena z více jako 70 % kamenivem nejhrubší zastoupené frakce. Z tohoto důvodu jsou pokládány vysoké nároky na odladitelnost, otlukovost a tvarový index kameniva. Jako pojivo se používá modifikovaný asfalt s celulózními vlákny, stejně jako v případě SMA. Druhou možností je tvrdší nemodifikovaný asfalt s přídavkem drcené gumy.



Obrázek č. 23: Drenážní koberec [9]

Drenážní koberec je nutno pokládat na nepropustný podklad. Hutnění se provádí za pomoci pouze statických válců, vibrace by mohly způsobit rozdrčení kostry.

Pro zajištění správné funkce vyžaduje tato vrstva pravidelnou údržbu, jakou je například čištění tlakovou vodou. V zimním období je nutno odhrnout sníh za pomoci radlice s gumovým břitem.

Správně zhotovená vrstva s PA je charakteristická:

- Odvádí srážkovou vodu vlastní směsí, a po nepropustném podkladě stéká na okraj vozovky. Zlepšení protismykových vlastností.
- Snižuje hlučnost jízdy vozidel – hluk z motoru a hluk na kontaktu pneumatika vozovka. Vhodné u komunikací obytných zón. [4] [7] [9] [10]

2.4.5. Litý asfalt (MA – Mastic Asphalt)

Jedná se o první používanou asfaltovou směs. Litý asfalt je směs kameniva, asfaltového pojiva a případných dalších přísad. Na rozdíl od hutněných asfaltových směsí obsahuje vyšší obsah asfaltového pojiva (6 % – 9,5 %). Kamenivo zde slouží jen jako výplň, nevytváří kostru, která by přenášela zatížení. Směs litého asfaltu je bez vzduchových mezer. Protože všechno zatížení přenáší asfalt, používají se do těchto směsí tvrdší asfalty. Asfalt se navíc ještě ztuzuje vyšším obsahem vápencové moučky (fileru, 20 % - 35 %). Do vrstev z litého asfaltu lze použít R materiál (obvykle limitován 10 %).

2.4.6. Použití R-materiálu v asfaltových směsích a požadavky na směsi

2.4.6.1. Použití R-materiálu

Vlastnosti R-materiálu musí odpovídat požadavkům uvedeným v ČSN EN 13108-8. Velikost horního síta D pro kamenivo v R-materiálu nesmí být větší než velikost horního síta D u dané směsi. Pokud R-materiál obsahuje modifikovaný asfalt nebo přísadu, anebo je modifikovaný asfalt použit v samotné asfaltové směsi, je množství přidaného R-materiálu omezeno na 10 % hmotnosti celkové směsi pro obrusné vrstvy. Pro vyrovnávací, podkladní a ložní vrstvy je tato hodnota 20 %. Množství R-materiálu ve směsi, druh směsi a/nebo konstrukční vrstvy, ze kterých se R-materiál získal nebo získá,

se deklaruje v protokolu o zkoušce typu. Maximální množství R-materiálu je uvedeno v příslušné příloze normy ČSN 73 6121.

2.4.6.2. Požadavky na směs

Návrhové složení směsi musí být deklarováno v protokolu o zkoušce typu podle ČSN EN 13108-20, včetně:

- návrhových procent propadů stanovenými sítí. Návrhová zrnitost musí být deklarována pro síto 1,4 D a charakteristická síta.
- návrhového obsahu pojiva a případně obsahu pojiva z R-materiálu a/nebo obsahu pojiva z přírodního asfaltu.
- procenta (procent) přísady (přísad).

Návrhový obsah pojiva zahrnuje celkové přidané pojivo (včetně všech přísad v roztoku v pojivu), pojivo v R-materiálu a pojivo v přírodním asfaltu.

Při návrhovém složení směsi musí asfaltová směs splňovat příslušné požadavky v souladu s touto evropskou normou.

Musí být také k dispozici výsledky zkoušek podle ČSN EN 13108-20:2016, 7.5

3. VÝROBA, POKLÁDKA A HUTNĚNÍ ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

Pro výrobu neporuchové asfaltové vrstvy vozovky s vysokou životností je potřebný správný návrh asfaltové směsi, kterému jsme se věnovali v předchozí kapitole. Avšak způsob výroby, pokládky a zhutnění asfaltové směsi je stejně důležitý. V následující kapitole se budeme věnovat podrobněji těmto technologickým procesům.

3.1. Výroba asfaltových směsí

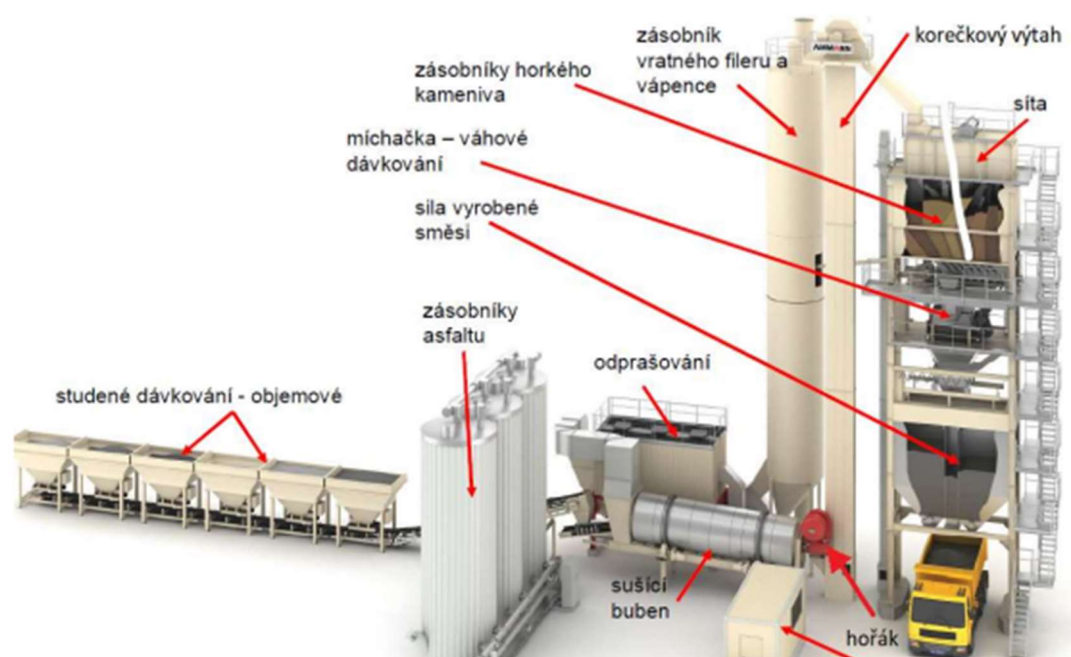
Výroba hutněných asfaltových směsí se provádí na obalovnách. Rozlišujeme dva základní typy obaloven, a to obalovny šaržové a obalovny kontinuální. Způsob výroby litého asfaltu se liší od výroby hutněných asfaltových směsí, i když se většinou taky vyrábí na obalovnách nebo v míchacích stanicích. Mezní teploty uvedené v tab. č. 2 nesmějí být překročeny.

Tabulka č. 2: Mezní teploty asfaltových směsí

Druh asfaltu	Specifikace	Mezní teploty (°C) podle druhu vyráběné směsi ¹⁾		
		AC, BBTM, SMA	PA	AKO
100/150	ČSN EN 12591	130 až 170 ²⁾	–	120 až 150
50/70; 70/100		140 až 180	140 až 175	130 až 165
30/45		155 až 195	–	–
¹⁾ Pracovní teploty při použití nízkoteplotního asfaltu, modifikovaného asfaltu a při použití dalších přísad stanovuje výrobce asfaltové směsi podle doporučení výrobce asfaltu nebo přísady.				
²⁾ Platí pouze pro ACO 8CH a AC pro ložní a podkladní vrstvy, kde se používá vyšší obsah R materiálu.				

3.1.1. Šaržová obalovna

V šaržových obalovnách probíhá výroba asfaltové směsi přerušovaně (diskontinuálně). Všechny složky jsou nejdříve upraveny podle potřeby (nahřátí, sušení) a poté přesně dávkovány. Velkou výhodou tohoto procesu je možnost změny receptury pro každou šarži. Další výhodou je vysoká kvalita namíchané směsi, protože každá složka směsi je přesně nadávkovaná. Šaržové obalovny jsou nejvíce používaným typem obaloven v ČR (obr. č. 24).



Obrázek č. 24: Šaržová obalovna [60]

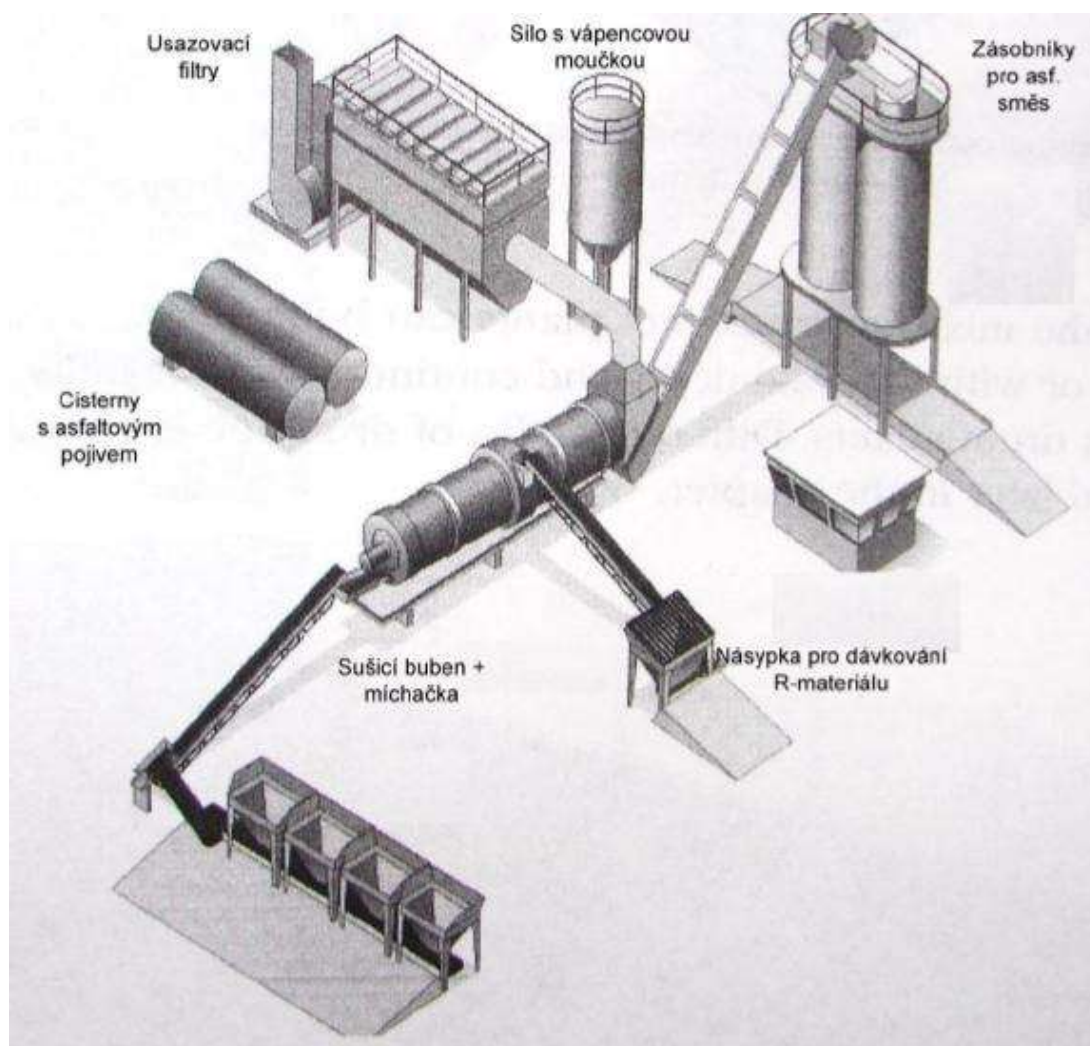
3.1.1.1. Postup výroby

Prvním krokem je dávkování kameniva. Kamenivo požadovaných frakcí se pomocí nakladače nasype do násypek. Odtud se pásovým dopravníkem přesune do sušicího bubnu, kde se kamenivo vysuší a zároveň se odfiltruje kamenný prach, také nazývaný vratný filer. Sušení probíhá při teplotě 160°C – 200°C a trvá 4 - 6 minut. Takto ohřáté kamenivo se dále přesune korečkovým výtahem do věže obalovny, kde proběhne horké třídění. To se provádí za pomoci sady vibračních sít. Roztříděné kamenivo se uskládá v tepelně izolovaných zásobnících. Tyto zásobníky mají monitorovací zařízení, která podávají velkou úroveň údajů o teplotě a množství kameniva v zásobníku. Dalším krokem je samotný proces míchání. Roztříděné frakce kameniva jsou přesně naváženy do míchačky podle výrobní receptury. Teplota kameniva je limitována na

250°C. Poté začne proces míchání. Kamenivo se nejdříve míchá na sucho. Míchání na sucho trvá obvykle 5 – 10 s. Jako další se přidá filer, a nakonec se vstříkuje horký asfalt. Dávkování asfaltu je zajištěno za pomoci průtokoměru. Míchání s asfaltovým pojivem musí být co nejrychlejší, protože asfalt působením horkého vzduchu rychle stárne, ale zároveň dostatečně dlouhé, aby se stihla obalit všechna zrna kameniva. Míchání jedné šarže trvá v průměru 50 – 60 s. Teplota míchání se pohybuje okolo 160°C. Pokud se do směsi přidává předehřátý R-materiál, jeho teplota se pohybuje okolo 110°C. Pokud není R-materiál předehřátý, prodlužuje se proces míchání o dobu potřebnou na zahřátí R-materiálu. Hotová směs se vysype do vozíku, který ji přepraví do skladovacího zásobníku. Skladovací zásobníky jsou izolovány a často bývají předehřívány, aby v nich směs nechladla. Mohou být vybaveny roštem, který zabraňuje segregaci u hrubozrnných směsí. Výkon takové obalovny se pohybuje v rozmezí 60 – 300 t/h. [36][4]

3.1.2. Kontinuální obalovna

Největší výhodou kontinuální obalovny je její nepřetržitý provoz. Tento typ obaloven je vhodný pro velké liniové stavby, u kterých nedochází ke změně požadované receptury. Nejčastěji používaným systémem je systém drum-mix. V ČR se tento typ obalovny skoro vůbec nepoužívá, ale v USA tvoří kontinuální obalovny až 80 % všech obaloven (obr. č. 25).



Obrázek č. 25: Kontinuální obalovna [61]

3.1.2.1. Postup výroby

Jako první krok se naváží všechny suroviny, jako je kamenivo, asfaltové pojivo a filer. Poté se studené kamenivo dopraví do přední části sušícího bubnu, kde probíhá jeho sušení. Je důležité, aby mělo kamenivo konstantní parametry. Ohřáté kamenivo poté proudí po obvodu pláště a tím se promíchá. Na konci sušícího bubnu je umístěn přívod fileru, popřípadě recyklovaného materiálu. Odtud se směs dostane do míchací části bubnu, kde je vstříkováno horké pojivo. [36]

3.1.3. Výroba litého asfaltu

Výroba litého asfaltu nejčastěji probíhá na obalovnách a míchacích stanicích. Asfaltové pojivo se zpracovává při teplotě 200°C – 250°C.

3.2. Doprava asfaltových směsí

Doprava směsi na stavbu je další důležitou částí pokládky a neměla by být podceňována. Ovlivňuje totiž teplotu směsi, která má přímý vliv na zhutnitelnost směsi, a tedy i výslednou kvalitu vozovky. Vozidla přepravující asfaltovou směs by měla mít těsnou, hladkou a lehce umývatelnou ocelovou korbu, která se tence postříká mýdlovým roztokem, rostlinným olejem (popř. emulzí) nebo vápenným roztokem k zabránění nalepování směsi na korbu. Použití parafinového oleje, petroleje, nafty, benzínu a jiných rozpouštědel je zakázáno. Každé vozidlo musí být vybaveno plachtou nebo jiným vhodným zařízením pro ochranu směsi před povětrnostními vlivy, prachem a ztrátou tepla (obr. č. 26).



Obrázek č. 26: Vozidlo na přepravu asfaltové směsi [62]

Maximální doba dopravy jsou 2 hodiny. Tato doba se zkracuje vzhledem ke klimatickým a povětrnostním podmínkám, typu použité korby dopravního prostředku a technickému

vybavení stavby (homogenizátory). Při době dopravy je třeba také počítat s prostoji při pokládce a s provozem na trase. Maximální doba dopravy dle TKP 7 závisí hlavně na teplotě vzduchu. Při teplotě rovné nebo menší 15°C je maximální doba 1h. Při teplotě nad 15°C se tato doba prodlužuje o půl hodiny na 1,5h. Při použití homogenizátoru se může tato hodnota zvýšit až na 2h. Tyto časy jsou pouze orientační, nejdůležitějším parametrem je teplota dopravované směsi. Pokud je teplota dodané směsi nižší než 150°C, neměla by být převzata. [36][37][38]

3.3. Pokládka asfaltových vrstev

Nejdůležitějším faktorem pro pokládku asfaltových směsí je teplota směsi. Tato teplota se liší v závislosti na druhu použitého asfaltu. Před začátkem pokládky asfaltových vrstev se musí **upravit podklad**:

- Podklad musí být dostatečně únosný a čistý. V případě starého povrchu musí být opraveny výtluky, spáry a trhliny.
- Nerovnosti starých povrchů nesmí být v podélném ani v příčném směru větší než 20 mm (měří se 4 m latí v podélném směru a 2 m latí v příčném směru). Větší nerovnosti je nutno odstranit frézováním nebo vyrovnávací vrstvou.
- Je-li dokumentací stavby požadován spojovací postřík, nebo požaduje-li postřík objednatel stavby z důvodu zabezpečení spolupůsobení vrstev, provede se podle ČSN 73 6129. Není-li dokumentací stavby spojovací postřík předepsán, nemusí se provádět před pokládkou vrstvy za předpokladu, že kladená vrstva má tloušťku větší než 40 mm a klade se na čerstvě zhotovenou asfaltovou vrstvu.
- Pokládku nelze provádět za mokra nebo mrazu - min. teplota při pokládce je 5°C.
- Na očištěný, resp. postříkem opatřený povrch nesmí být vpuštěn žádný provoz.

Hutněné asfaltové vrstvy lze pokládat finišerem, grejdrem nebo ve výjimečných případech ručně. Finišery se dělí na 2 základní druhy, a to finišery s pásovým podvozkem a finišery s kolovým podvozkem. Většina finišerů je vybavena automatickým nivelačním zařízením nebo klouzající lištou. Grejdry lze použít pro rozprostírání větší plochy, avšak

pouze do úrovně podkladních vrstev. Pro kryty vozovek dálnic, rychlostních silnic a rychlostních místních komunikací se musí použít finišery s automatickým nivelačním zařízením (obr. č. 27). Ruční pokládka se využívá jen ve velmi výjimečných případech a na malé plochy tam, kde nelze použít strojní pokládku.[4,37,38]

Tabulka č. 3: Míra předhutnění směsi a koeficient nadvýšení v závislosti na použité mechanizaci [4]

Rozprostírání	Míra předhutnění směsi	Koeficient nadvýšení
Ruční, grejdry	75%	1,33
finišery (bez předhutnění)	80%	1,25
finišery (s vibrací a dusáním)	85 - 90%	1,11 - 1,18



Obrázek č. 27: Moderní finišer s infračervenou kamerou na měření teploty [57]

3.3.1. Pokládka hutněných asfaltových vrstev finišerem

Rozprostírání směsi se provádí za pomoci řídicí linie. Jako řídicí linii lze použít vodící drát, vlečnou ližinu, ale také laser nebo bezkontaktní laserovou nivelaci. Moderní finišery jsou vybaveny automatickým nivelačním zařízením. Toto zařízení provádí podélnou a příčnou nivelaci, zabraňuje kopírování nerovnosti zcela automaticky. Různé metody pokládky dosahují různé míry předhutnění (tab.č.3). Nejlepšího předhutnění je dosaženo při použití finišeru. Finišer bez použití vibrací a dusání dosahuje míry zhutnění 80 %. Při použití dohutňovacích zařízení lze dosáhnout až 95% míru zhutnění.

Výhody takto vysoké míry zhutnění jsou:

- Možnost odpadnutí počáteční fáze hutnění.
- Dřívější najíždění válců při vyšších teplotách.
- Lze dosáhnout lepší výsledky i za horších povětrnostních podmínek.
- Dosažení vyšší tuhosti vrstvy a rovnosti povrchu.
- Lze pokládat směsi o větších tloušťkách a sklonech, nebo směsi méně stabilní a obtížně zhutnitelné

S narůstající rychlostí pokládky však klesá dosažená míra zhutnění. Rychlost pokládky se obvykle pohybuje v rozmezí 1 – 12m/min. Je výhodné provádět vícevrstvou pokládku, protože se dosáhne lepší rovinatosti povrchu. Směr pokládky je lepší provádět do kopce než z kopce (lepší kontakt nákladní vozidlo - finišer, brzdící válec z kopce může tlačit směs před sebou). Finišer se nesmí zastavit na více jak 5 minut (při nižších teplotách nebo vysoké rychlosti větru méně) a jeho násypka musí mít dostatečnou kapacitu, aby nedošlo k zastavení pokládky. Asfaltové vrstvy se nesmí pokládat při teplotách nižších než dovozuje tab. č. 4.

Tabulka č. 4: Minimální teploty při pokládce [38]

Asfaltová vrstva	Při pokládce (°C)	Průměrné za posledních 24 hod. (°C)
Podkladní	±0	–
Ložní s nemodifikovaným pojivem	+3	–
Obrusná; ložní s modifikovaným pojivem	+5	+3
Obrusná do 30 mm včetně; vrstvy PA	+10	+5

Rozprostírání je třeba organizovat tak, aby podélný pracovní spoj v obrusné vrstvě byl v ose vozovky u dvoupruhových a na styku jízdních pruhů v případě vícepruhových vozovek. Pracovní spára by neměla být nikdy v jízdní stopě. Pokud se provádí pokládka po pruzích, musí se vrstvy nad sebou překrývat nejméně o 20 cm. Také se nesmí zapomenout na nadvýšení vrstvy uvedené v tab. č.3. Pokládka další vrstvy po ochlazení předešlé položené vrstvy pod 60°C. Při pokládce více finišery najednou nesmí být jejich vzdálenost větší než 20 m, ideálně co nejmenší, aby byly dodrženy teploty při hutnění spoje. Asfaltové směsi, zejména pak pro obrusné vrstvy, by měly být vždy pokládány současně v několika pruzích najednou (několika finišery, obr. č. 29) na celou šířku pokládané plochy. Pokud to nelze provést, je nutné směs postupně rozprostírat s vrácením finišeru tak, aby vzniklý podélný spoj byl zhutněn ještě za horka (tzv. horký spoj). Délku

dílčích pokládaných pruhů a vracení finišeru je nutné volit tak, aby teplota pokládané směsi na okrajích dříve položeného pruhu v okamžiku rozprostírání nové směsi dalšího pruhu odpovídala požadavkům uvedeným v tab. č. 5. [4,37,38]

Tabulka č. 5: Minimální teplota v místě spoje dříve položené směsi [38]

Druh asfaltu	Vrstva obrusná	Vrstva ložní, podkladní
70/100	min. 80°C (100)	min. 70°C (90)
50/70	min. 90°C (110)	min. 80°C (100)
100/150	min. 70°C (90)	min. 60°C (80)

POZNÁMKA: 1.) Údaje v závorkách platí pro pokládání více finišery najednou



Obrázek č. 28: Pokládka více finišery najednou [57]

3.3.2. Pokládka litého asfaltu

Úprava povrchu je skoro stejná jako u hutněných asfaltových vrstev. Provádí se navíc jenom opatření styčných ploch armatur, dešťových vpustí a ocel. konstrukcí, sousedních asfaltových nebo betonových vrstev, a konstrukcí silnou a rovnoměrnou vrstvou asfaltového pojiva, popřípadě asfaltovou zálivkou nebo jinou vhodnou úpravou.

Pokládka se provádí na čistý povrch zbavený nečistot. Teplota ovzduší nesmí být nižší než 5°C. Maximální výsledný sklon podkladu, na který se pokládá vrstva z litého asfaltu, je 7 % (u chodníku 10 %). Při pokládce se jako první pokládá mezivrstva na rozptýlení tlaku páry. Maximální tloušťka litého asfaltu na vozovkách je 80 mm. Okraje pokládané plochy se podle potřeby omezí kovovými lištami tak, aby se vytvořily přímé spoje a svislé hrany. Pro napojování dalších pruhů lze vytvářet i hrany mírně zkosené 70° až 80°. Podélné spáry (spoje) nesmí být provedeny v místech jízdních stop těžkých vozidel. Umístění podélných spojů na vozovkách musí být schváleno předem stavebním dozorem. Zařízení, která mají nepříznivý tepelný vliv na lité asfalty, musí být vhodně izolována. Teplota litého asfaltu při pokládce má být v rozmezí 200°C – 250°C.



Obrázek č. 29: Pokládka litého asfaltu [63]

Litý asfalt se zdrsňuje ještě v horkém stavu. Při zdrsňování se na horký povrch litého asfaltu rovnoměrně rozprostře předepsané množství kameniva, které se do povrchu zatlačí ručními válci, silničními válci nebo jiným vhodným způsobem. Drobné kamenivo frakce 0 - 2 a 0 - 4 (na chodnicích apod.) není nutné zatlačovat. Po vychladnutí litého asfaltu se přebytečné a nedostatečně přilnuté kamenivo z povrchu musí odstranit. [4,37,38]

3.4. Hutnění asfaltových vrstev

Na hutnění se používají různé typy válců. V ČR jsou nejvíce používané statické hladké válce a vibrační válce, ale svoje uplatnění najdou i válce pneumatikové.

3.4.1. Druhy válců

I. Statické hladké válce

Jedná se o motorové válce s vlastním motorovým pohonem. V ČR se nejčastěji jedná o tandemové dvouosé válce. Provozní hmotnost se pohybuje v rozmezí 1t – 15t. Mají nízký hloubkový hutnící efekt, plné zhutnění nastává do hloubky 80 mm – 100 mm. Dají se použít do maximálního sklonu 15 %. Doporučená rychlost hutnění pro tento typ válců je max. 5km/h. Ocelové bandáže se kropí vodou.



Obrázek č. 30: Statický válec [64]

Účinnost běhounu C_w :

$$C_w = \frac{P}{l * d}$$

kde P je zatížení běhounem

l je šířka běhounu

d je průměr běhounu

II. Pneumatikové válce

Používají se v hmotnostech 5t – 35t, s počtem kol až 11. Důležité pro hutnění je, aby ve všech pneumatikách byl stejný tlak. Oproti statickým válcům působí stálým tlakem, hloubkový účinek závisí na tlaku a pracovní rychlosti. Pracovní rychlost je 3 – 4 km/h při hutnění vrstev a 7 – 8 km/h při uzavírání povrchu. Hutnicí účinek nastává až do hloubky 200 mm (pro těžké válce). Zatížení na kola je 5kN – 25kN, optimální tlak v pneumatikách se pohybuje v rozmezí 0,4 – 0,6MPa. Pro zamezení lepení čerstvě položené asfaltové vrstvy na kola pneumatikového válce se musí kola před zahájením hutnění zahřát. Pro ohřátí se doporučuje co nejpomalejší jízda za finišerem do dosažení provozní teploty (60°C). Hutnění lze provádět i ve sklonech větších jak 15 %. Za větrného počasí a při nižších teplotách vzduchu se chrání nápravy ochrannými plachtovými kryty. Při včasné nasazení dokáže pneumatikový válec uzavřít příčné trhliny od hladkých válců. [4,37,38]



Obrázek č. 31: Pneumatikový válec [64]

III. Vibrační válce

Tvoří až 90 % všech používaných válců na hutnění asfaltových vrstev. Dokážou mít stejný hutnicí účinek jako statické válce, při 3x nižší hmotnosti. Nejčastěji jsou tandemové dvouosé s pohonem na obě nápravy. Asfaltové vrstvy hutní pomocí kombinace vibrace a tlaku, kde vibrace snižují vnitřní tření ve směsi, a zlepšují tak podmínky pro hutnění. Amplituda a frekvence vibrací jsou měnitelné, pro hutnění asfaltových vrstev se používají nižší amplitudy a vyšší frekvence. Hutnicí účinek těchto typů válců je až do hloubky 30 cm (pro těžké válce), avšak při vypnutých vibracích mají

stejný hutnicí účinek jako válce statické. Pro vibrační válce se doporučuje používání automatického vypnutí vibrací při změně směru jízdy, kvůli zamezení vytváření nerovností. Vibrační účinek působí příznivě, je-li potřebné uzavřít povrch („vytáhnout“ maltu). Na příliš horké směsi by mohlo dojít až k nežádoucímu vzniku hladkých - kluzkých míst. Pracovní rychlost je 3 až 6 km/h u tenkých vrstev do 4cm, u silnějších vrstev 1,5 až 2,5 km/h. Vhodný podélný sklon pro vibrační válce je do 14 %.



Obrázek č. 32: Vibrační válec [64]

Účinnost běhounu C_w :

$$C_w = k_0 * \frac{P}{l * d}$$

kde k_0 je dynamický faktor (účinnost běhounu)

P je zatížení běhounem

L je šířka běhounu

D je průměr běhounu [4,37,38]

3.4.2. Fáze hutnění

I. fáze

Jedná se o počáteční fázi hutnění, s cílem stlačit rozprostíranou směs při vysokých teplotách.

- 0 – 50 m za finišerem
- 2 – 4 pojezdy

Vibrační válce – 2 pojezdy bez vibrace, 2 s vibrací

Pneumatikové válce – nízký kontaktní tlak

Statické tandemové válce – použití zvláště u velkých tloušťek

II.fáze

Hlavní fáze hutnění, cílem je zhutnění na požadovanou míru zhutnění.

- 50 – 150 m za finišerem
- 4 – 8 pojezdů

Vibrační válce – použití u těžce zhutnitelných směsí

Pneumatikové válce – použití u lehce zhutnitelných směsí

Statické tandemové válce – zřídka

III.fáze

Finální fáze hutnění, má za úkol odstranění případných nerovností.

- Nedochází k téměř žádnému dalšímu zhutňování vrstvy.
- Teplota vrstvy v této fázi by stále měla být nad 80°C.

V případě dosažení vysoké míry předhutnění směsi lze fáze hutnění sloučit, budou-li splněny požadavky na rovnost povrchu, příčný sklon, rovnoměrnost dosažené míry zhutnění apod. Dvě fáze hutnění musí být ale vždy dodrženy. Použití válců ve fázích hutnění ukazuje tab. č. 6. a schéma hutnění obr. č. 33. [4,37,38]

Tabulka č. 6: Možné použití typu válců v jednotlivých fázích hutnění [4]

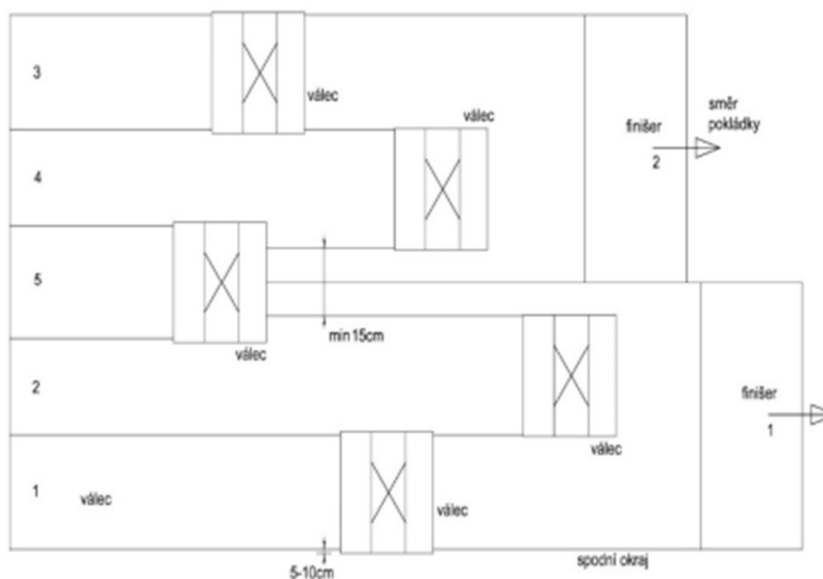
Typy válců	1.fáze	2.fáze	3.fáze
statické	+ ¹⁾	+ ²⁾	+
pneumatikové	+ ³⁾	+	
vibrační	+ ⁴⁾	+	+ ⁴⁾

¹⁾ při nízkém stupni předhutnění finišerem a tloušťkách větších než 50 mm válce nižších hmotností.

²⁾ válce vyšších hmotností.

³⁾ při vysokém předhutnění finišerem; nelze použít u obrušných vrstev typu AK a při smluvních požadavcích na protismykové vlastnosti.

⁴⁾ s vypnutou vibrací.



Obrázek č. 33: Schéma hutnění [38]

3.4.3. Zásady při hutnění

Při hutnění je důležité dodržet:

- Začít s hutněním co nejdříve
- Pokud je to možné mít v rezervě jeden válec navíc
- Poháněná náprava má být orientována k finišeru (nevznikají prohlubně a trhliny), pouze u velkých sklonů naopak
- Kropit běhouny
- Nevibrovat na místě, vibraci pouštět až za jízdy
- Nezůstat stát nikdy s válcem na čerstvé směsi (v nouzovém případě šikmo k ose)
- Volné okraje hutnit až nakonec
- Měnit stopu pojezdu pomalu již na zhutněné a částečně vychladlé směsi
- V příčném řezu vozovky začít na nižším okraji a postupovat směrem nahoru
- počet přejezdů kontrolovat izotopovou sondou (Troxler) [4]

3.4.4. Závady při hutnění

Nejčastější závady vzniklé při hutnění jsou:

I. Hrnutí hutněné směsi před válcem

Nejčastější příčinou bývá příliš vysoká teplota položené směsi, nevhodný typ použitého válce, posouvání hutněné směsi po znečištěném podkladu.

II. Nalepování směsi na běhouny a kola válců

Nejčastější příčinou bývá nedostatečné skrápění běhounu (pneumatik), příliš vysoká teplota položené směsi, nedostatečná teplota povrchu pneumatik.

III. Zabořování běhounů (kol) do hutněné směsi a její boční vytlačování

Nejčastější příčinou bývá příliš vysoká teplota směsi a nevhodné složení směsi, nevhodný typ použitého válce, malé předhutnění a velká tloušťka vrstvy, zastavování válce.

IV. Příčné trhliny

Nejčastější vznikají u nedostatečného předhutnění a použitím příliš těžkých válců, u nerovnoměrného ochlazování hutněné vrstvy (povrch je příliš chladný) vlivem větru, vody apod., posouváním hutněné směsi na podkladu vlivem jeho znečištění apod.

V. Podélné trhliny

Nejčastější příčinou bývá nevhodný podklad, použití příliš těžkých zhutňovacích prostředků a podhuštění pneumatik. Další závady mohou vznikat vlivem prudkého otáčení a změny směru jízdy válce, zastavováním vibračního válce apod. [4][36][37]

4. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

V rámci diplomové práce bude hodnocen vliv maximální použité frakce kameniva a také vliv vynechání určitých frakcí kameniva na vlastnosti asfaltové směsi. Hlavním cílem práce je ověřit možnosti laboratorní přípravy hrubozrnnější asfaltové směsi, než umožňují současné platné předpisy, a zároveň stanovit její vybrané laboratorní parametry. Z toho důvodu budou porovnány 2 asfaltové směsi typu asfaltový beton pro podkladní vrstvy vozovek, a to běžně používaná asfaltová směs ACP 22 a nově navržená hrubozrnnější směs ACP 32.

Jako první se určí čára zrnitosti jednotlivých použitých frakcí kameniva dle ČSN EN 933-1 *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – síťový rozbor*. Dále bude proveden návrh čáry zrnitosti asfaltových směsí dle Fullerovy paraboly a výpočet teoretického optimálního množství pojiva. Následně se zhotoví 12 Marshallových těles, na kterých se provede měření objemové hmotnosti dle ČSN EN 12697-6 *Asfaltové směsi – zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušební tělesa* a maximální objemové hmotnosti dle ČSN EN 12697-5 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Na základě těchto zkoušek se provede určení mezerovitosti. Z hodnot mezerovitosti se interpolací určí požadované množství pojiva pro zhotovení desek, které odpovídá mezerovitosti 6,9 % (maximální přípustná hodnota mezerovitosti pro směsi ACP 22). 1 deska z každé sady se poté použije na zkoušku pojíždění kolem dle ČSN EN 12697-22 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 22: Zkouška pojíždění kolem*. Po této zkoušce se z okrajových částí desek vyříznou trámečky o rozměrech 50x50x200 mm, které budou zkoušeny na nízkoteplotní vlastnosti dle *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem*. Ze zbylých desek se vyříznou komolé klíny (trapezoidy), na kterých se stanoví modul tuhosti dle ČSN EN 12697-26 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 26: Tuhost*.

5. POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

V této kapitole budou podrobněji popsány postupy a laboratorní zkoušky, které jsem provedl pro určení vlastností směsi ACP 22 a ACP 32.

5.1. Sítový rozbor

Vykonání této zkoušky se provádí dle *ČSN EN 12697-2 +A1 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 2: Stanovení zrnitosti*. Principem této zkoušky je zjištění čáry zrnitosti vzorku kameniva (získaného kvartací). To je provedeno za pomoci kalibrované sady sít. Velikost otvoru a počet sít závisí na druhu vzorku a požadované přesnosti.

5.1.1. Použité přístroje a pomůcky

Zkušební síta, pevně lícující víko a dno sady sít, sušárna pro vysušení kameniva, laboratorní váhy s přesností na $\pm 0,1$ % hmotnosti zkušební navážky, nádoby, štětec, kartáč, prosévací přístroj.

5.1.2. Zkušební postup

5.1.2.1. Prosévání

Nejdříve se odplaví jemné částice přes síto 0,063 mm (obr. č. 34). Poté se vzorek vysuší a suchý vzorek se vysype na sloupec sít (obr. č. 35). Sloupec obsahuje určitý počet sít, který závisí na maximální velikosti zrn vzorku a požadovaném rozsahu frakcí. Síta jsou umístěná od síta s největší velikostí otvorů navrchu a postupně se velikosti otvorů zmenšují. Vespod se nachází dno, které zachytává jemné částice $f < 0,063$ mm. Po vsypání požadovaného vzorku se na sloupec umístí víko a ručně nebo mechanicky se s ním zatřepe. V prosévání se pokračuje, dokud všechen materiál, který může propadnout daným sítem, nepropadne. Musí se však zabránit přetěžování sít.



Obrázek č. 34: Odplavení jemných částic



Obrázek č. 35: Sloupec sít

„Aby se zabránilo přetěžování sít, zachycený podíl kameniva by neměl po ukončení prosévání na žádném síti přesáhnout:

$$\frac{A * \sqrt{d}}{200} \text{ [g]}$$

kde

A je plocha síta, v mm^2 ;

d je velikost otvorů síta, v mm .“

Pokud dojde k přetížení síta:

- Vzorek se musí rozdělit na menší podíly, které se prosévají jeden po druhém
- Vzorek se rozdělí za pomoci děliče vzorku nebo kvartací, a v prosévání se pokračuje se zmenšeným vzorkem.

V mém případě jsem použil variantu b) a vzorky jsem ještě před přesíváním zmenšil za pomoci kvartace na přibližně 1000g vzorky.

„Prosévání se musí považovat za ukončené, když další prosévání nevede ke změně hmotnosti zachyceného materiálu na jednotlivém síti větší než 1 % hmotnosti.“

5.1.2.2. Vážení

Zachycený materiál na síti s největšími otvory se zváží a jeho hmotnost se zaznamená do tabulky jako R_1 . Postupně se tento proces zopakuje se všemi síti a hmotnost jednotlivých propadů se zaznačí jako R_2, R_3, R_n . Zbylý materiál na dně se taky zváží a označí v tabulce jako P .

5.1.2.3. Vyjádření výsledku

Jednotlivé hmotnosti se zaznamenají do záznamu o zkoušce. Vypočítá se zachycená hmotnost na každém síti jako procento původní suché hmotnosti

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

Vypočítá se souhrnné procento propadu každým sítem z původní hmotnosti až k síti 0,063 mm.

$$100 - \sum (100 * \frac{R_i}{M_1}) \text{ [%]}$$

Vypočítá se procento jemných částic f propadlých sítem 0,063 mm spolu s odplavenými částicemi.

$$f = \frac{100 * P}{M_1} [\%]$$

Pokud se součet hmotnosti R_i a P liší o víc jak 1 % od hmotnosti M_1 , zkouška se musí opakovat. Tento postup jsem vykonal pro kamenivo fr. 0/2; 2/5; 5/8; 8/11; 11/16; 16/22; 16/32 a 22/32.

5.2. Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením

Vykonání této zkoušky se provádí dle ČSN EN 12697-6 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Principem této zkoušky je stanovení objemové hmotnosti zhutněného asfaltového zkušebního tělesa na základě jeho hmotnosti a rozměrů. Objem zkoušeného tělesa se získá na základě jeho hmotnosti na vzduchu a ve vodě.

5.2.1. Použité přístroje a pomůcky

Váhy s dostatečnou váživostí a s přesností vážení 0,1 g (uzpůsobené na vážení tělesa na vzduchu a pod vodou), vodní lázeň s konstantní teplotou, teploměr, drátěný koš, látka pro povrchové osušení vzorků.

5.2.2. Zkušební postup

5.2.2.1. Vážení vzorků

Na stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením musím nejdříve stanovit hmotnost suchého tělesa vážením na vzduchu (m_1). Poté se těleso ponoří do vody a nechá saturovat po dobu 30 minut. Následně se váha vytáruje a těleso se přesune do drátěného koše bez toho, aby se vynořilo nad hladinu. Počká se do ustálení hladiny a hodnota se zapíše (m_2). Těleso se po zapsání hmotnosti pod vodou vytáhne z vodní lázně, povrchově usuší a znovu zváží (m_3). Tento postup se opakuje pro všechna zkušební tělesa.

5.2.2.2. Vyjádření výsledků

Ze stanovených hmotností se následně vypočte objemová hmotnost nasyceného tělesa dle vztahu:

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

kde ρ je objemová hmotnost tělesa v kg/m^3

m_1 je hmotnost suchého tělesa v kg

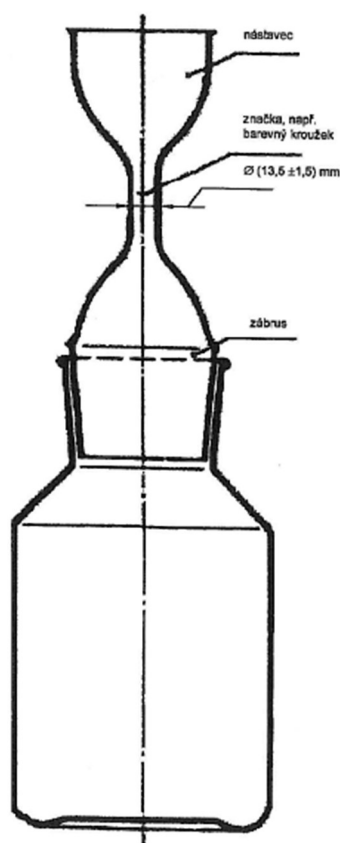
m_2 je hmotnost nasyceného tělesa váženého pod vodou v kg

m_3 je hm. nasyceného tělesa po vyjmutí z lázně a povrchovém usušení v kg

ρ_w je hustota vody při odpovídající teplotě v kg/m^3

5.3. Stanovení maximální objemové hmotnosti volumetrickým postupem

Vykonání této zkoušky se provádí dle ČSN EN 12697-6 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Stanovení objemové hmotnosti zhutněného asfaltového zkušebního tělesa probíhá na základě jeho objemu bez mezer a suché hmotnosti. Objem zkoušeného tělesa se získá za použití pyknometru. Maximální objemová hmotnost společně s objemovou hodnotností jsou nezbytné k výpočtu obsahu mezer ve zhutněném vzorku.



Obrázek č. 36: Pyknometr [40]

5.3.1. Použité přístroje a pomůcky

Odvzdušněná voda, dispergační činidlo, sušárna, špachtle, váhy s přesností 0,1 g, teploměr, temperovaná vodní lázeň, vibrační stůl, pyknometr, kalibrovaný vakuometr.

5.3.2. Zkušební postup

5.3.2.1. Příprava vzorků

Vzorek se nejdříve očistí a poté vloží do laboratorní sušárny a vysuší při teplotě, která nepřesáhne $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Poté se vzorek rozdrobí na hrubé částice a shluky. Pokud není materiál dostatečně měkký, aby se dal rozdělit ručně, může se znovu zahřát na misce v sušárně. Maximální teplota je $150^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, avšak ideální je zahřívat jenom do doby, kdy je rozdělení možné.

5.3.2.2. Stanovení maximální objemové hmotnosti.

Prvním krokem je zvážení prázdného pyknometru. Poté se do něj nasype drť ze vzorku a pyknometr se znovu zváží. Pyknometr se poté naplní médiem (destilovaná voda) s přídavkem dispergačního činidla. Následně musíme ze vzorku odstranit vzduchové bubliny. Ty se odstraní tak, že se pyknometr vloží do vakuové nádoby (obr. č. 37), která je umístěná na vibračním stole, kde se nechá půl hodiny. Dalším krokem je temperace vzorku. Ta se provádí ve vodní lázni nastavené na 25°C (obr. č. 38). Poté co je vzorek vytemperován se pyknometr dolije stejným médiem až po referenční značku nástavce, které je také vytemperované na stejnou teplotu. Jako poslední krok se provede vážení vytemperovaného plného pyknometru.



Obrázek č. 37: Vakuová nádoba



Obrázek č. 38: Temperování

5.3.2.3. Vyjádření výsledku

Maximální objemová hmotnost se poté vypočte jako:

$$\rho_{mw} = \frac{m_2 - m_1}{V_p - \left(\frac{m_3 - m_2}{\rho_w} \right)}$$

kde ρ_{mw} je maximální objemová hmotnost tělesa v kg/m^3

m_1 je hmotnost pyknometru v kg

m_2 je hmotnost pyknometru se zkušebním vzorkem v kg

m_3 je hmotnost pyknometru se zkušebním vzorkem a médiem v kg

V_p je objem pyknometru po referenční značce nastavce v m^3

ρ_w je hustota média při dané teplotě v kg/m^3 [40]

5.4. Stanovení mezerovitosti

Vykonání této zkoušky se provádí dle ČSN EN 12697-8 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. Mezerovitost se vypočte na základě objemové hmotnosti tělesa a maximální objemové hmotnosti. Postup zkoušek na

určení těchto dvou veličin je popsán v kapitole 5.2 a 5.3. Mezerovitost se vypočte za pomoci vzorce:

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

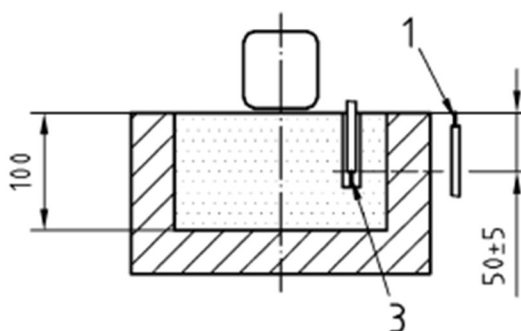
kde V_m je mezerovitost stanovená výpočtem z objemové hmotnosti v %

ρ_m je maximální objemová hmotnost (stanovená pyknometricky) v kg/m³

ρ_b je objemová hmotnost tělesa (stanovená hydrostaticky) v kg/m³

5.5. Zkouška poježdění kolem

Vykonání této zkoušky se provádí dle ČSN EN 12697-22 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 22: Zkouška poježdění kolem*. Tato zkouška ověřuje náchylnost asfaltové směsi k deformaci na základě měření hloubky vyjeté koleje vzniklé opakovaným pojezdem zatíženého kola při stálé teplotě (obr. č. 39).



Obrázek č. 39: Schéma poježdění kolem [41]

Legenda

1 teplota vzduchu, snímač teploty

2 zkušební teplota, snímač teploty

3 citlivý prvek zkoušky, snímač měřící teplotu

5.5.1. Použité přístroje a pomůcky

Zařízení simulující poježdění kolem, zkušební formy, hloubkoměr, temperovací komora, snímače teploty, kontrolní přístroj pro měření teploty, ocelová podkladní deska a nepřilnavá folie.

5.5.2. Zkušební postup

5.5.2.1. Příprava vzorků

Zkušební těleso se umístí do formy (260x320x60 mm). Forma se zkušebním tělesem se upevní na podkladní desku. Pokud se rozměry desky liší o více než 0,5 mm, vyplní se mezera sádrou. Poté se dá vzorek vytemperovat na požadovanou teplotu $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Temperace trvá nejméně 4 hodiny pro tělesa s jmenovitou tloušťkou ≤ 60 mm, a pro tělesa s tloušťkou větší jako 60 mm nejméně 6 h. Maximální doba temperace je 24 hodin.

5.5.2.2. Pojízďení kolem

K zamezení nepatřičného zahřívání se zajistí, aby pneumatika kola byla čistá a aby nedocházelo během zkoušky k přilepování materiálu zkušebního tělesa na kolo pneumatiky. Tlak v pneumatice se během zkoušky udržuje na (600 ± 30) kPa vhodným zařízením. Nastaví se temperovací teplota na zkušební teplotu a kontroluje se teplota vzduchu. Teplota vzduchu v komoře nesmí překročit zkušební teplotu o více jak 1°C . Poté se do zkušebního zařízení upne zkušební těleso pomoci upínacího zařízení a uchyťí se nepřilnavá folie (obr. č. 40), aby zabránila nalepování materiálu z tělesa na kolo. Snímač teploty se osadí přibližně 20 mm pod povrch zkušebního tělesa. Zkušební zařízení se poté uvede do pohybu s frekvencí 1 Hz. Prvních 5 zatěžovacích cyklů je určených pro záběh. Po záběhu se změří počáteční vertikální deformace na středu tělesa (v rozmezí 10mm), která se poté měří každých (25 ± 1) cyklu. Zkouška je ukončena po dosažení 10 000 cyklů.



Obrázek č. 40: Příklad upnutí nepřilnavé folie

5.5.2.3. Vyjádření výsledků

Ze stanovených hloubek koleje se následně vypočte poměrná hloubka vyjeté koleje dle vztahu:

$$P_i = 100 * \sum_{j=1}^{15} \frac{(m_{ij} - m_{0j})}{15 * h}$$

kde P_i je měřená poměrná hloubka vyjeté koleje v %

m_{ij} je místní deformace v mm

m_{0j} je počáteční měření

h je tloušťka zkušebního tělesa v mm [41]

Z výsledků se dále zjišťovala hodnota WTS_{air} , což je přírůstek hloubky vyjeté koleje vypočítaný jako průměrná hodnota, o kterou narůstá hloubka koleje opakovanými pojezdy zatěžovacího kola na vzduchu a PRD_{air} , což je poměrná hloubka vyjeté koleje zkoušené asfaltové směsi po n zatěžových cyklech na vzduchu.

$$PRD_{air} = \frac{Y_{S,10\,000}}{t} * 100$$

kde PRD_{air} je poměrná hloubka vyjeté koleje asfaltové směsi na vzduchu po 10 000 cyklech v %.

$Y_{S,10\,000}$ je průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm

t je průměrná tloušťka zkušebních těles

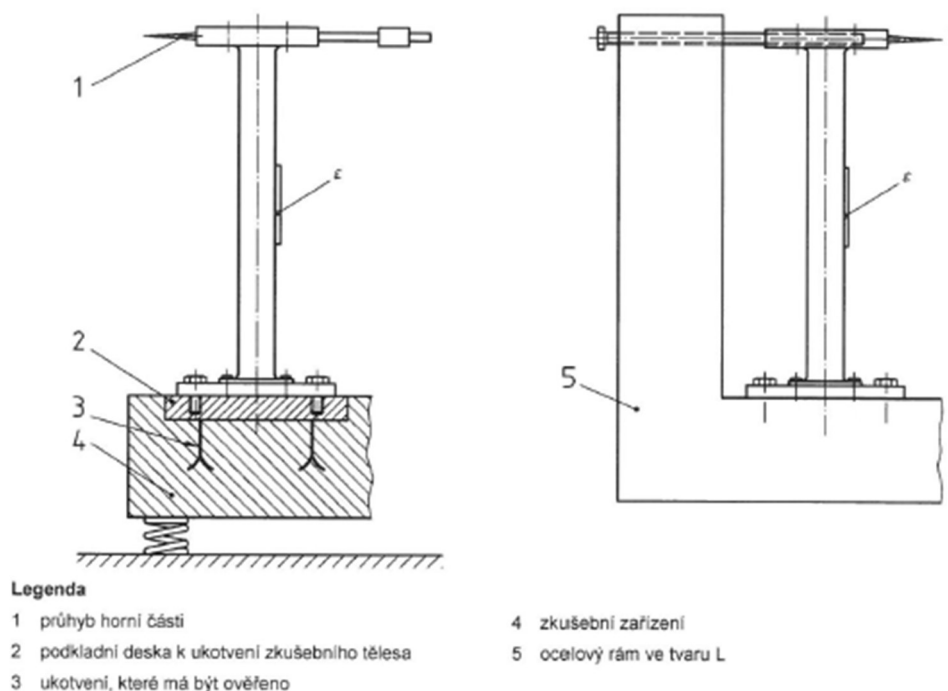
$$WTS_{air} = \frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$$

Kde WTS_{air} je přírůstek hloubky vyjeté koleje v $mm * 10^{-3}$

$d_{10\,000}, d_{5\,000}$ je hloubka vyjeté koleje po 10 000 a 5 000 cyklech v mm [65]

5.6. Stanovení modulu tuhosti

Vykonání této zkoušky se provádí dle ČSN EN 12697-26 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 26: Tuhost*. Stanovení modulu tuhosti se provádí prostřednictvím zatěžovacího zařízení (obr. č. 41) v lineárně-deformačním režimu, přičemž je odečítána amplituda napětí a poměrného přetvoření, a současně jejich fázový úhel při stanovených frekvencích 5, 10, 15, 20 a 25 Hz odpovídajících různým vibračním dynamického zatížení vozovky.



Obrázek č. 41: Schéma zatěžovacího zařízení [42]

5.6.1. Použité přístroje a pomůcky

Odvětrávaná termostatická komora, měřicí zařízení (snímače pro měření dynamické síly, snímače pro měření průhybu a zařízení měřící fázový uhel).

5.6.2. Zkušební postup

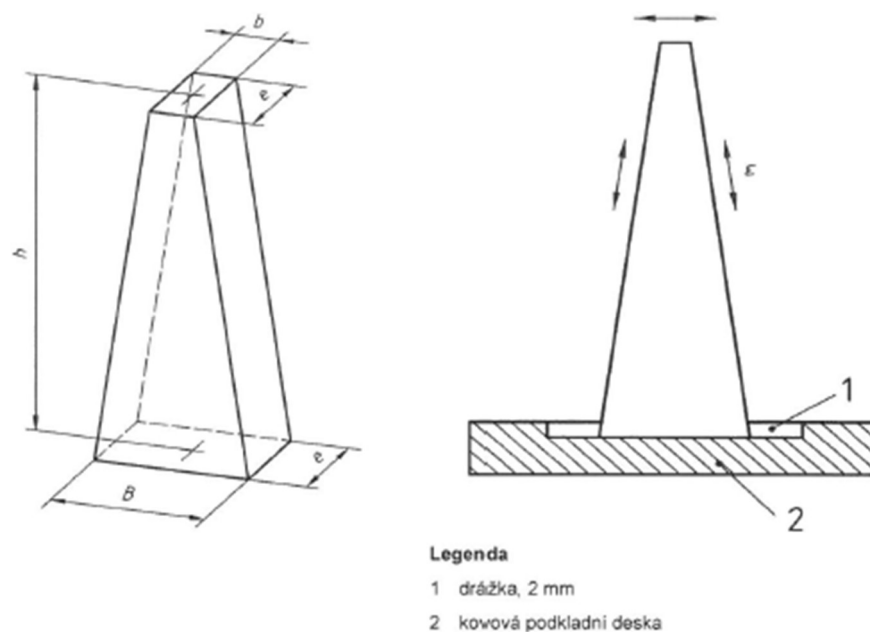
5.6.2.1. Příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa musí mít tvar komolého klínu nebo trámečku s konstantní tloušťkou. Rozměry jsou uvedeny v tab. č. 7, a vyobrazeny na obrázku č. 42. Zkušební tělesa se získají vyřezáním ze zkušebních desek vyrobených v laboratoři dle ČSN EN 12697-33 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*, nebo z desek odebraných z krytu vozovek o tloušťce většinou 60 mm. Podélná osa desky musí být rovnoběžná s horizontální osou hutnění směsi. Každé zkušební těleso se po vyřezání nalepí spodní částí ke kovové podkladní desce takovým způsobem, aby bylo zaručeno dobré geometrické uložení tělesa k jeho podstavci.

Příchytka upevňující zkušební těleso k zatěžovacímu zařízení pro měnění napětí se nalepí k horní části zkušebního tělesa. Podkladní deska musí mít minimální tloušťku 10 mm. Poté se temperují na $15^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Temperace trvá nejméně 4 hodiny.

Tabulka č. 7: Rozměry těles [42]

Rozměry zkušebních těles mm	Zkušební tělesa tvaru trámečku mm		Zkušební tělesa tvaru komolého klínu mm		
	$D \leq 22 \text{ mm}$	$D > 22 \text{ mm}$	$D \leq 14 \text{ mm}$	$14 < D \leq 20 \text{ mm}$	$20 < D \leq 40 \text{ mm}$
B			56 ± 1	70 ± 1	70 ± 1
b	40 ± 1	80 ± 1	25 ± 1	25 ± 1	25 ± 1
e	40 ± 1	80 ± 1	25 ± 1	25 ± 1	25 ± 1
h	120 ± 1	240 ± 1	250 ± 1	250 ± 1	250 ± 1



Obrázek č. 42: Schéma tvaru zkušební vzorku [42]

5.6.2.2. Měření modulu tuhosti

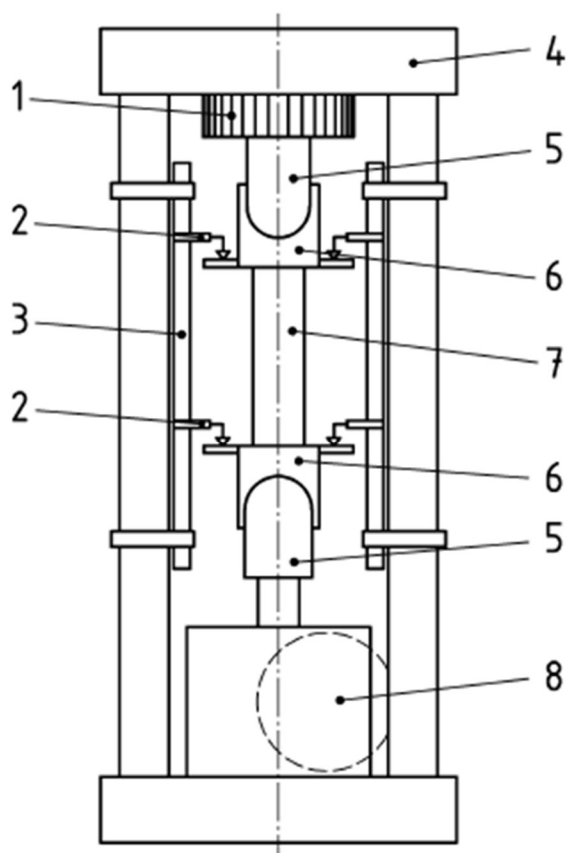
Zkušební těleso se pevně upne do termostatické komory nastavené na 15°C . Poté se vystaví harmonické (sinusové) síle požadované frekvence $\pm 5\%$. Tato síla působí na jejich volný konec minimálně 30 s a maximálně 2 minuty při průhybu odpovídajícímu přetvoření menšímu než 50 mikrostrain. Po dobu zkoušky se zaznamenává síla, průhyb a fázový uhel.

5.6.2.3. Vyjádření výsledků

Naměřené hodnoty se poté uvedou do tabulky a porovnájí. [42]

5.7. Stanovení nízkoteplotních charakteristik

Vykonání této zkoušky se provádí dle *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem*. Při zkoušce nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty (TSRST) je vzorek s udržovanou konstantní délkou vystaven poklesu teploty s konstantní rychlostí. Vlivem zamezovaného tepelného smršťování se ve zkušebním tělese vytváří kryogenní napětí. Výsledkem je šíření kryogenního napětí při teplotě $\sigma_{cry(T)}$ a napětí při porušení $\sigma_{cry, failure}$ při teplotě $T_{failure}$, při které dojde k porušení. Zařízení je zobrazeno na obr. č. 43.



Obrázek č. 43: Schéma zatěžovacího zařízení [43]

Legenda

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

5.7.1. Použité přístroje a pomůcky

Termostatická komora, záznamové zařízení, systém měření zatížení, systém měření deformace, zařízení na měření teploty tělesa a komory.

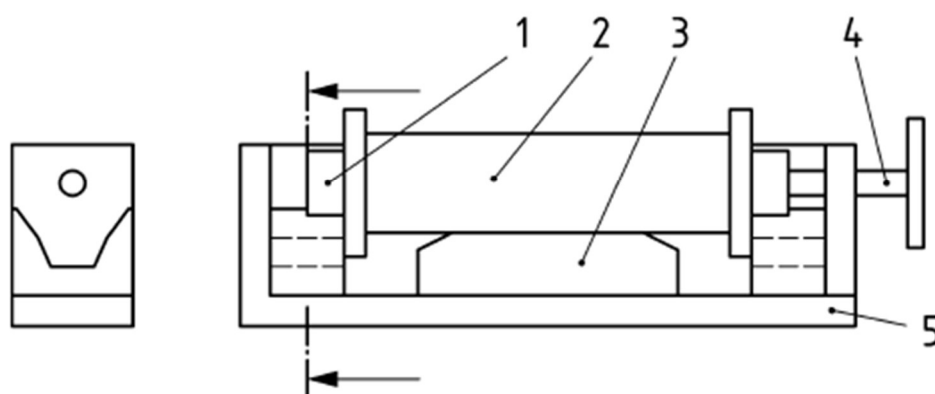
5.7.2. Zkušební postup

5.7.2.1. Příprava zkušebních těles

V závislosti na jmenovité velikosti zrna kameniva asfaltové směsi D musí mít zkušební těleso tvar hranolu nebo válce se jmenovitými rozměry podle tab. č. 8. Jestliže zkušební zařízení umožňuje používat zkušební tělesa delší než 160 mm, musí být jejich délka čtyřnásobkem šířky/výšky nebo průměru. Zkušební tělesa se získávají vyřezáním z desek vyrobených v laboratoři podle EN 12697-33 nebo se odebírají z vrstev vozovky podle EN 12697-27. K zajištění přesného průřezu u zkušebního tělesa tvaru hranolu musí být všechny 4 strany upraveny řezáním. Po řezání se zkušební těleso suší do dosažení konstantní hmotnosti na vzduchu při relativní vlhkosti vzduchu nižší než 80 % a při teplotě 15 °C až 25 °C. Zkušební těleso se považuje za suché, pokud se hodnoty ze dvou vážení provedených v intervalech 24 h liší o méně než 0,25 %. Zkušební těleso se poté nalepí do čelistí a umístí do centrovacího rámu (obr. č. 44).

Tabulka č. 8: Rozměry těles [42]

Rozměry zkušebních těles mm	Zkušební tělesa tvaru trámečku mm		Zkušební tělesa tvaru komolého klínu mm		
	$D \leq 22 \text{ mm}$	$D > 22 \text{ mm}$	$D \leq 14 \text{ mm}$	$14 < D \leq 20 \text{ mm}$	$20 < D \leq 40 \text{ mm}$
B			56 ± 1	70 ± 1	70 ± 1
b	40 ± 1	80 ± 1	25 ± 1	25 ± 1	25 ± 1
e	40 ± 1	80 ± 1	25 ± 1	25 ± 1	25 ± 1
h	120 ± 1	240 ± 1	250 ± 1	250 ± 1	250 ± 1



Obrázek č. 44: Schéma centrovacího rámu [43]

Legenda

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

5.7.2.2. Měření nízkoteplotních vlastností

Zkušební těleso se umístí do zkušebního zařízení připojením čelistí k zatěžovacímu zařízení. Před zahájením zkoušky se zkušební těleso po adekvátně dlouhou dobu stabilizuje při počáteční teplotě T_0 bez zatěžování. Během fáze kondicionování musí řízení zkušebního zařízení v uzavřené smyčce zajistit, aby zkušební těleso nebylo vystaveno žádným zatížením. Tepelná deformace se musí vyrovnat. Doba trvání fáze kondicionování závisí na velikosti zkušebního tělesa a zkoušeném materiálu. Teplota ve zkušebním tělese musí být konstantní v rozsahu ± 1 °C zkušební teploty po minimální dobu 10 min (teplotu ve zkušebním tělese lze měřit pomocí slepého tělesa umístěného v blízkosti zkušebního tělesa). Poté se udržuje konstantní délka zkušebního tělesa, zatímco se jeho teplota v čase snižuje. V důsledku zamezovaného tepelného smršťování je zkušební těleso vystaveno (kryogennímu) tahovému napětí. Doporučuje se zahájit zkoušku při teplotě $T_0 = +20$ °C a teplotu měnit rychlostí $d_T = -10$ °C/h. Zaznamenaná se teplotně závislé kryogenní napětí $\sigma_{\text{cry}}(T)$.

5.7.2.3. Vyjádření výsledků

Z naměřených dat se napětí při porušení $\sigma_{\text{cry, failure}}$ stanoví jako maximální naměřené napětí během zkoušky a teplota při porušení T_{failure} jako odpovídající teplota. [43]

6. POUŽITÉ MATERIÁLY

V diplomové práci jsem použil celkem dvě rozdílné asfaltové směsi, a to ACP 22 a ACP 32. Z každé směsi jsem potom zhotovil Marshallova tělesa s rozdílným obsahem pojiva. Následně jsem zhotovil dvě desky o rozměru 260x320x60 pro každou směs. Celkový druh a počet zhotovených těles je zobrazen v tabulce č. 9. Použito bylo kamenivo z lomu Brant u Rakovníka frakcí 0/2, 2/5, 5/8, 8/11, 11/16, 16/22, 16/32 a 22/32. Jako pojivo byl použit silniční asfalt třídy 50/70 od výrobce OMV s penetrací 59 (0,1 mm) a bodem měknutí 49°C.

Tabulka č. 9: Přehled použitých těles

Typ	Marshallova tělesa						Desky	
Název směsi	ACP 22			ACP 32			ACP 22	ACP 32
Obsah pojiva	3,80%	4,30%	4,80%	3,80%	4,30%	4,80%	4,50%	4,50%
Počet těles [ks]	4	4	4	4	4	4	2	2

7. VÝSLEDKY PROVEDENÝCH ZKOUŠEK

V následující kapitole jsou uvedeny výsledky všech zkoušek, které jsem provedl dle postupů popsaných v kapitole 5. Použité zkušební metody.

7.1. Zrnitost frakcí kameniva

Jako první zkouška byla provedena zrnitost všech frakcí navezeného kameniva dle normy ČSN EN 933-1 *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. Zkouška byla provedena za předepsaných podmínek této normy. Výsledkem této zkoušky jsou čáry zrnitosti, které jsou vyobrazeny v následujících tabulkách a grafech. Průběh je vyobrazen v příloze č. 1.



Obrázek č. 45: Sítový rozbor



Obrázek č. 46: Vážení propadů

Následující tabulka zobrazuje souhrnný propad všech frakcí sítím.

Tabulka č. 10: Souhrnný propad všech frakcí sítí

Souhrnný propad sítím [%]														
Frakce	45	32	22,4	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
22/32	100,0	69,0	5,8	1,2	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3
16/32	100,0	75,8	27,9	7,2	4,5	3,7	3,2	2,9	2,5	2,3	2,1	2,0	1,7	1,3
16/22	100,0	100,0	93,0	10,7	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
11/16	100,0	100,0	100,0	97,0	52,6	5,1	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
8/11	100,0	100,0	100,0	99,6	91,5	7,1	1,1	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
5/8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	93,9	13,9	2,0	1,2	1,0	1,0	0,9	0,9	0,7
2/5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,6	94,4	50,9	3,6	1,9	1,0	0,6	0,4	0,2
0/2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,7	64,7	25,4	12,1	6,7	4,0	2,5
filer	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,5	87,2	72,3

Na základě těchto zrnitostí byla navržena receptura pro směs ACP 22 a ACP 32.

7.2. Návrh směsi ACP 22

Jako první byla navržena referenční směs ACP 22. Byl použit návrh dle Fullerovy paraboly.

7.2.1. Návrh čáry zrnitosti za pomoci Fullerovy paraboly

Prvním krokem návrhu směsi za pomoci Fullerovy paraboly je samotný výpočet Fullerovy paraboly. Ta se vypočte jako:

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

kde y je procentuální propad sítím o průměru oka d [%]

d je průměr oka síta [mm]

D je maximální velikost oka v soustavě sítí [mm]

Poté jsem sestavil tabulku s procentuálním zastoupením frakcí kameniva ve směsi (tab. č. 11).

Tabulka č. 11: Procentuální zastoupení jednotlivých frakcí pro směs ACP 22

Skladba kameniva			
Frakce	Návrh	Součet	Podíl
22/32	0	0	0
16/32	0	0	0
16/22	17	17	0,17
11/16	20	37	0,2
8/11	0	37	0
5/8	0	37	0
2/5	20	57	0,2
0/2	35	92	0,35
filer	8	100	0,08
suma [%]	100	100	1

Následně byla tato data přenesena do tabulky č. 12. Zde byla propočtena jednotlivá síta a navržena čára zrnitosti. Pro ACP 22 byla čára zrnitosti navržena na základě přiblížení v čáře zrnitosti. Pro ACP 32 bylo cílem se co nejvíc přiblížit k ACP 22.

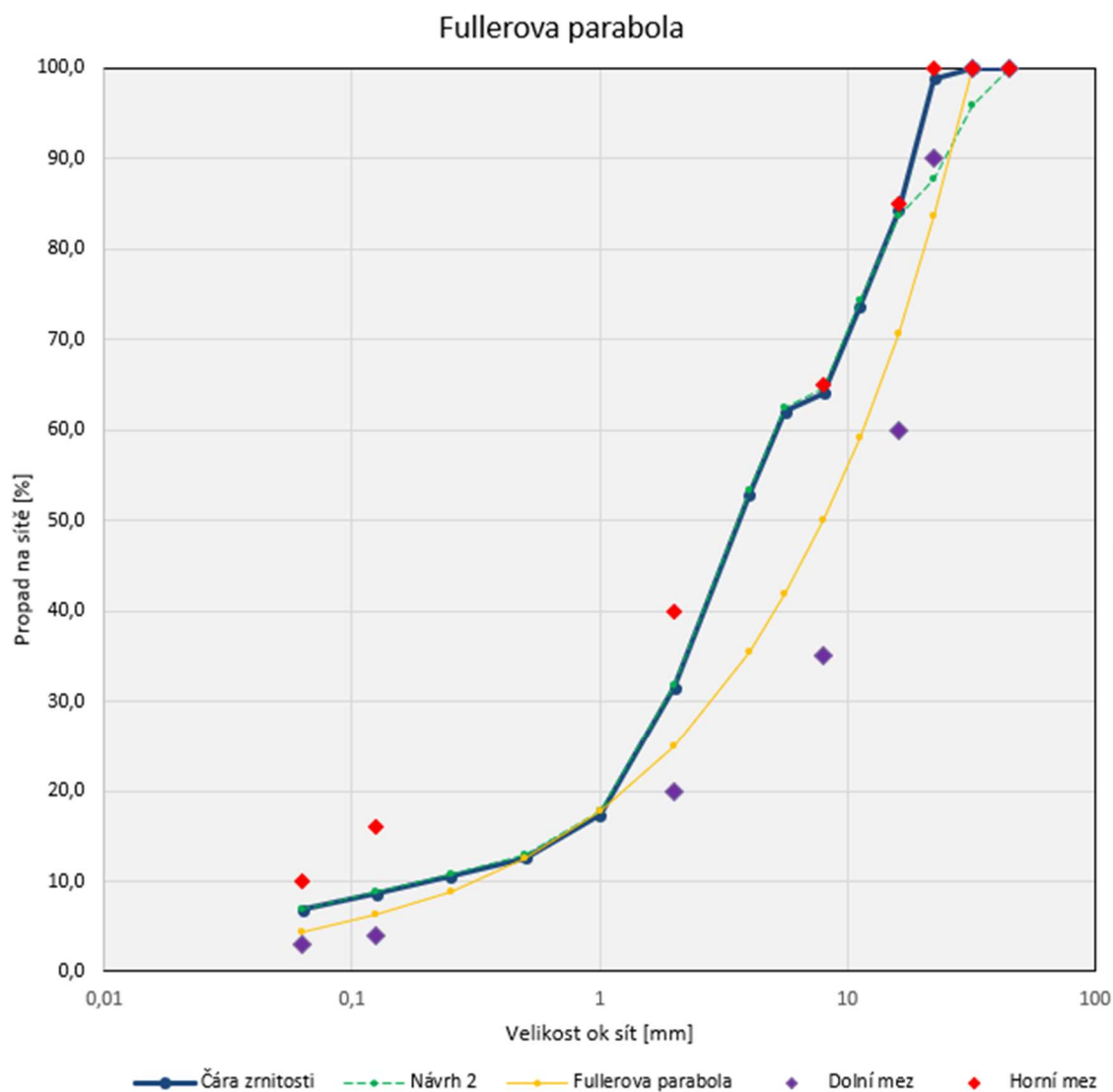
Tabulka č. 12: Přiblížení k Fullerově parabole pro směs ACP 22

Síto	Čára zrnitosti					
	Návrh	Návrh 2	Rozdíl	Fuller	Mez d.	Mez h.
45	100,0	100,0	0,0	118,6	100	100
32	100,0	95,9	-4,1	100,0	100	100
22,4	98,8	87,7	-11,1	83,7	90	100
16	84,2	83,6	-0,6	70,7	60	85
11,2	73,7	74,3	0,6	59,2		
8	64,0	64,6	0,5	50,0	35	65
5,6	62,1	62,5	0,5	41,8		
4	52,8	53,3	0,4	35,4		
2	31,5	31,8	0,3	25,0	20	40
1	17,4	17,7	0,3	17,7		
0,5	12,6	12,8	0,3	12,5		
0,25	10,5	10,8	0,3	8,8		
0,125	8,5	8,8	0,2	6,3	4	16
0,063	6,8	6,9	0,1	4,4	3	10

Max. velikost zrna **22** mm (dle druhu směsi)

Graf č. 1 zobrazuje čáru zrnitosti navržené směsi a její porovnání k směsi ACP 32.

Návrh 2 zde zobrazuje navrženou směs ACP 32 pro porovnání.



Graf č. 1: Čára zrnitosti navržené směsi ACP 22 a Fullerova parabola

Jak je vidno z předcházejícího grafu, čára zrnitosti byla navržena s ohledem na horní a dolní mez, což byl limitující faktor. Mírný odskok je způsoben absencí kameniva fr. 5/8 a 8/11. Tyto frakce byly úmyslně vynechány, protože se jedná o nedostatkové frakce obzvlášť v hlavní stavební sezóně.

7.2.2. Návrh teoretického optimálního množství pojiva

Dalším krokem po návrhu čáry zrnitosti je navržení množství pojiva. Teoretické optimální množství pojiva lze stanovit dle vzorce:

$$p = n * \sqrt[5]{\varepsilon}$$

kde p je teoretické optimální množství pojiva

n je součinitel sytosti (pro obrusné vrstvy $n = 3,4$, pro ostatní vrstvy $n = 3,1$)

ε je měrný povrch kameniva v m^2/kg

Měrný povrch kameniva ε se vypočte jako:

$$\varepsilon = 0,01 * (0,174G + 0,4g + 2,3S + 15,33s + 140f)$$

kde G je podíl kameniva v % hm., které zadrží síto 8

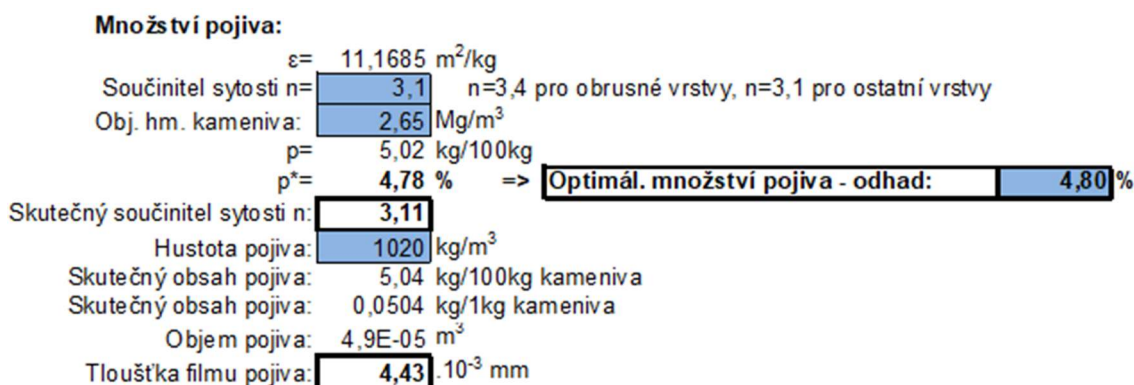
g je podíl kameniva v % hm., které propadne sítem 8 a je zadrženo sítem 4

S je podíl kameniva v % hm., které propadne sítem 4 a je zadrženo sítem 0,25

s je podíl kameniva v % hm., které propadne sítem 0,25 a je zadrženo sítem 0,06

f je podíl kameniva v % hm., které propadne sítem 0,063

Návrh optimálního množství pojiva je zobrazen na obrázku č. 47.



Obrázek č. 47: Návrh optimálního množství pojiva pro směs ACP 22

7.2.3. Výpočet navážek

Dále je potřeba spočítat navážky pro potřebný počet Marshallových těles. Zhotoveno bylo celkem 12 Marshallových těles ze směsi ACP 22. Průběh výpočtu navážek je zobrazen na obrázku č. 48. Navrženy byly 3 varianty s rozdílným obsahem pojiva, a z každé varianty následně zhotovena 4 Marshallova tělesa.

ACP 22 Břida			
navážka na vysuš. kameniva:		15000 g	pro: 12 Marshallových těles
míchání při:	160 °C		
hutnění:	2x50, 150 °C	Navážka na 1 těleso:	1200 g
přesná navážka:		1148 g	kameniva
frakce	podíl [%]	podíl	hm. [g]
filer	8,0	0,080	91,8
0-2	35,0	0,350	401,8
2-5	20,0	0,200	229,6
11-16	20,0	0,200	229,6
16-22	17,0	0,170	195,2
Suma:	100	1	1148
předpokládané optimum:		4,3	%
odstupňováno:		0,5	%
1) optimum - 1 * odstupňováno			
obsah pojiva z hmotnosti směsi:		3,8	%
obsah pojiva z hmotnosti kameniva:		3,95	%
hmotnost pojiva:		45	g
hmotnost směsi:		1193	g
2) optimum pojiva			
obsah pojiva z hmotnosti směsi:		4,3	%
obsah pojiva z hmotnosti kameniva:		4,49	%
hmotnost pojiva:		52	g
hmotnost směsi:		1200	g
3) optimum + 1 * odstupňováno			
obsah pojiva z hmotnosti směsi:		4,8	%
obsah pojiva z hmotnosti kameniva:		5,04	%
hmotnost pojiva:		58	g
hmotnost směsi:		1206	g

Obrázek č. 48: Výpočet navážek pro směs ACP 22

7.2.4. Výroba asfaltové směsi

Výroba proběhla dle ČSN EN 12697-35 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 35: Laboratorní výroba směsi*. Prvním krokem bylo ohřátí kameniva a asfaltu na teplotu, která byla recepturou stanovena na 160°C. Ohřátí probíhalo v laboratorní sušárně po dobu 4 hodin (obr. č. 49).



Obrázek č. 49: Ohřátí kameniva

Po nahřátí kameniva a asfaltu na dostatečnou teplotu byly jednotlivé navážky postupně vybrány z laboratorní sušárny a nadávkovalo se do nich potřebné množství pojiva. Po dávkování pojiva se směs zamíchala špachtlí na vařiči, který zamezoval chladnutí směsi. Míchání probíhalo až do dosažení úplného obalení všech zrn kameniva (obr. č. 50).

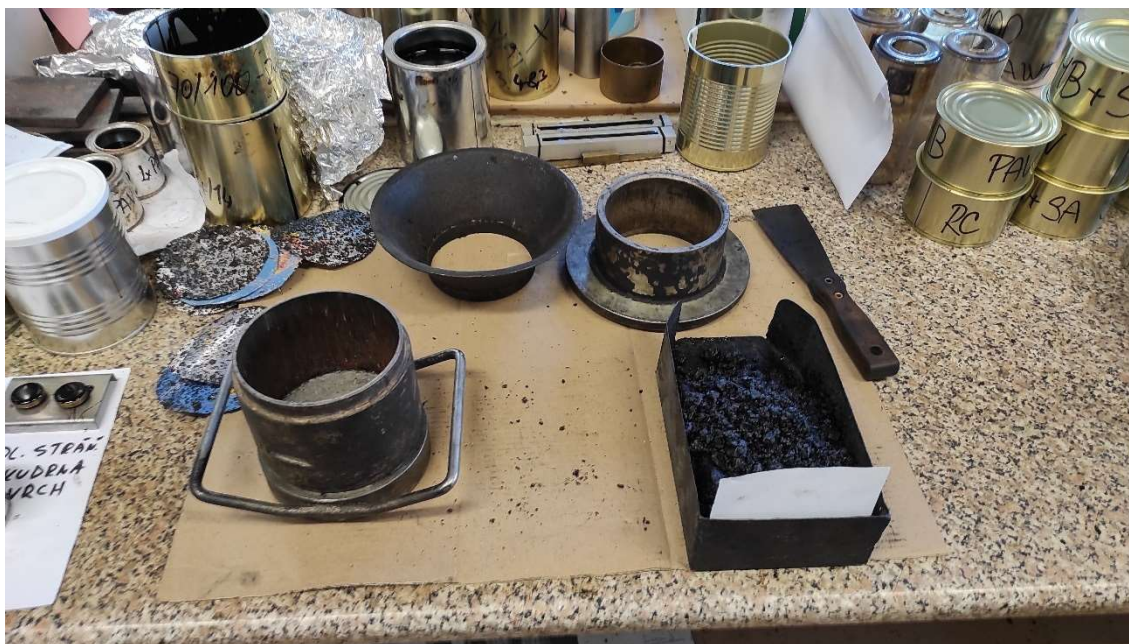


Obrázek č. 50: Míchání asfaltové směsi

Směs byla po namíchání vložena zpátky do laboratorní sušárny, aby se nahřála na teplotu požadovanou k hutnění (150°C). Do laboratorní sušárny se daly také nahřát formy na Marshallova tělesa.

7.2.5. Hutnění asfaltové směsi

Poté co směs dosáhla požadovanou teplotu hutnění (150°C), byla vytažena z laboratorní sušárny. Dalším krokem bylo nasypání směsi do forem na Marshallova tělesa (obr. č. 51). Marshallovo těleso má tvar válce o průměru $101,5 \pm 0,1$ mm a výšku $63,5 \pm 2,5$ mm. Hutnění Marshallových těles proběhlo na Marshallově rázovém zhutňovači (obr. č. 52) dle normy *ČSN EN 12697-30 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. Marshallova tělesa pro zkoušky objemových vlastností směsi byla hutněna pomocí 50 rázů z každé strany. Pro zvolení optimálního množství směsi na výrobu desek bylo vytvořeno jedno zkušební těleso, podle kterého byla poté upravena navážka pro desky.



Obrázek č. 51: Příprava formy na hutnění



Obrázek č. 52: Rázový zhutňovač

Po zhutnění se tělesa nechala ochladnout (obr. č. 53) a poté byla vytlačena a popsána (obr. č. 54).



Obrázek č. 53: Chladnutí Marshallových těles



Obrázek č. 54: Popis těles

7.3. Návrh směsi ACP 32

Další byl na řadě návrh směsi ACP 32. Postup návrhu byl téměř stejný, jediným rozdílem bylo maximální zrno kameniva, které se změnilo z 22 na 32 mm. Při návrhu této směsi byla využita Švýcarská norma *EN 13108-1:2006 Asphaltmischgut Mischgutanforderungen – Teil 1: Asphaltbeton* (ekvivalent ČSN *EN 13108-1 ED.2 Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 1: Asfaltový beton*), protože

ČSN nepoznává asfaltové směsi se zrnem kameniva větším než 22 mm. V této směsi bylo také vynecháno kamenivo frakce 5/8 a 8/11.

7.3.1. Návrh čáry zrnitosti

Postup byl mírně odlišný než při směsi ACP 22 (kap. 7.2.). Přiblížení bylo vykonáno pomocí iterace k čáře zrnitosti ACP 22, protože pro směs s maximálním zrnem kameniva 32 mm nejsou českými předpisy stanoveny meze zrnitosti.

Tabulka č. 13: Procentuální zastoupení jednotlivých frakcí pro směs ACP 32

Skladba kameniva			
Frakce	Návrh	Součet	Podíl
22/32	0	0	0
16/32	17	17	0,17
16/22	0	17	0
11/16	20	37	0,2
8/11	0	37	0
5/8	0	37	0
2/5	20	57	0,2
0/2	35	92	0,35
filer	8	100	0,08
suma [%]	100	100	1

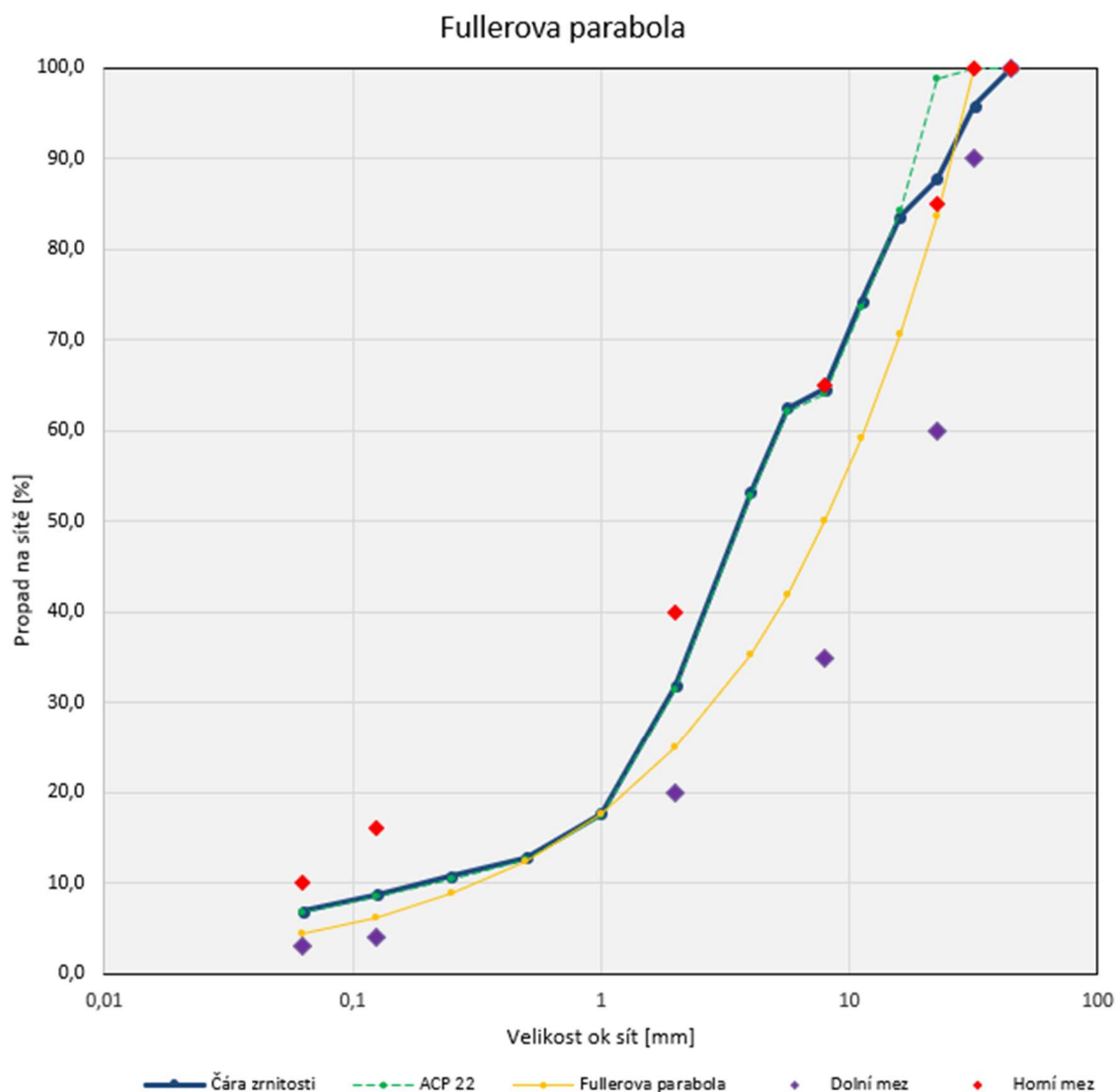
Následně byla tato data přenesena do tabulky č. 14. Zde byla propočtena jednotlivá síta a za pomoci iterace přiblížena k čáře zrnitosti ACP 22.

Tabulka č. 14: Přiblížení k Fullerově parabole pro směs ACP 32

Síto	Čára zrnitosti					
	Návrh	ACP 22	Rozdíl	Fuller	Mez d.	Mez h.
45	100,0	100,0	0,0	118,6	100	100
32	95,9	100,0	4,1	100,0	90	100
22,4	87,7	98,8	11,1	83,7	60	85
16	83,6	84,2	0,6	70,7		
11,2	74,3	73,7	-0,6	59,2		
8	64,6	64,0	-0,5	50,0	35	65
5,6	62,5	62,1	-0,5	41,8		
4	53,3	52,8	-0,4	35,4		
2	31,8	31,5	-0,3	25,0	20	40
1	17,7	17,4	-0,3	17,7		
0,5	12,8	12,6	-0,3	12,5		
0,25	10,8	10,5	-0,3	8,8		
0,125	8,8	8,5	-0,2	6,3	4	16
0,063	6,9	6,8	-0,1	4,4	3	10

Max. velikost zrna **32** mm (dle druhu směsi)

Graf č. 2 zobrazuje čáru zrnitosti navržené směsi a jej porovnání k ACP 22.



Graf č. 2: Čára zrnitosti navržené směsi ACP 32 a Fullerova parabola

Jak je vidno z předcházejícího grafu, čára zrnitosti zde také ovlivňuje horní a dolní mez. ACP 22 zde zobrazuje navrženou čáru zrnitosti předcházející směsi pro porovnání. I zde se vyskytuje mírný odskok a je zase způsoben absencí kameniva fr. 5/8 a 8/11. Tyto frakce byly vynechány, protože se jedná o nedostatkové frakce obzvlášť v hlavní sezóně.

7.3.1. Návrh teoretického optimálního množství pojiva

Postup odpovídá postupu v kap. 7.2.2. Výsledky jsou uvedeny na obr. č. 55.

Množství pojiva:	
$\varepsilon =$	11,3943 m ² /kg
Součinitel sytosti n=	3,1 n=3,4 pro ohrusné vrstvy, n=3,1 pro ostatní vrstvy
Obj. hm. kameniva:	2,65 Mg/m ³
p=	5,04 kg/100kg
p*=	4,80 % => Optimál. množství pojiva - odhad: 4,80 %
Skutečný součinitel sytosti n:	3,10
Hustota pojiva:	1020 kg/m ³
Skutečný obsah pojiva:	5,04 kg/100kg kameniva
Skutečný obsah pojiva:	0,0504 kg/1kg kameniva
Objem pojiva:	4,9E-05 m ³
Tloušťka filmu pojiva:	4,34 .10 ⁻³ mm

Obrázek č. 55: Návrh optimálního množství pojiva pro směs ACP 32

7.3.2. Výpočet navážek

Dále je potřeba spočítat navážky pro potřebný počet Marshallových těles. Zhotoveno bylo znovu celkem 12 Marshallových těles ze směsi ACP 32. Průběh výpočtu navážek je zobrazen na obrázku č. 56. Navrženy byly 3 varianty s rozdílným obsahem pojiva, a z každé varianty následně zhotovena 4 Marshallova tělesa.

ACP 32 Břida			
navážka na vysuš. kameniva:		15000 g	pro: 12 Marshallových těles
míchání při:	160 °C		
hutnění:	2x50, 150 °C	Navážka na 1 těleso:	1200 g
přesná navážka:		1148 g	kameniva
frakce	podíl [%]	podíl	hm. [g]
filer	8,0	0,080	91,8
0-2	35,0	0,350	401,8
2-5	20,0	0,200	229,6
11-16	20,0	0,200	229,6
16-22	17,0	0,170	195,2
Suma:	100	1	1148
předpokládané optimum: 4,3 % odstupňováno: 0,5 %			
1) optimum - 1 * odstupňováno obsah pojiva z hmotnosti směsi: 3,8 % obsah pojiva z hmotnosti kameniva: 3,95 % hmotnost pojiva: 45 g hmotnost směsi: 1193 g			
2) optimum pojiva obsah pojiva z hmotnosti směsi: 4,3 % obsah pojiva z hmotnosti kameniva: 4,49 % hmotnost pojiva: 52 g hmotnost směsi: 1200 g			
3) optimum + 1 * odstupňováno obsah pojiva z hmotnosti směsi: 4,8 % obsah pojiva z hmotnosti kameniva: 5,04 % hmotnost pojiva: 58 g hmotnost směsi: 1206 g			

Obrázek č. 56: Výpočet navážek pro směs ACP 22

7.3.1. Výroba asfaltové směsi

Výroba proběhla dle ČSN EN 12697-35 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 35: Laboratorní výroba směsi*. Prvním krokem bylo zase ohřátí kameniva a asfaltu na teplotu, která byla recepturou stanovena na 160°C. Ohřátí probíhalo v laboratorní sušárně po dobu 4 hodin.

Po nahřátí kameniva a asfaltu na dostatečnou teplotu byly jednotlivé navážky postupně vybrány z laboratorní sušárny a nadávkovalo se do nich potřebné množství pojiva. Poté co bylo nadávkováno správné množství pojiva, se směs zamíchala na vařiči, který

zamezoval chladnutí směsi. Míchání probíhalo až do dosažení úplného obalení všech zrn kameniva.

Směs byla po namíchání vložena zpátky do laboratorní sušárny, aby se nahřála na teplotu požadovanou k hutnění (150°C). Do laboratorní sušárny se také daly nahřát formy na Marshallova tělesa.

7.3.2. Hutnění asfaltové směsi

Po dosažení potřebné teploty hutnění (150°C) se směs vytáhla z laboratorní sušárny. Dalším krokem bylo nasypání směsi do forem na Marshallova tělesa. I zde byla použita nemodifikovaná Marshallova tělesa tvaru válce o průměru $101,5 \pm 0,1$ mm a výšku $63,5 \pm 2,5$ mm. Hutnění Marshallových těles proběhlo na Marshallově rázovém zhutňovači dle normy *ČSN EN 12697-30 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. Marshallova tělesa pro zkoušky objemových vlastností směsi byla hutněna pomocí 50 rázů z každé strany. Pro zvolení optimálního množství směsi na výrobu desek bylo vytvořeno jedno zkušební těleso, podle kterého byla poté upravena navážka pro desky.

Po zhutnění se tělesa nechala ochladnout a poté byla vytlačena a popsána.

7.4. Stanovení objemové hmotnosti

Objemové hmotnosti byly určeny postupem uvedeným v kap. 5.2.

Objemové hmotnosti Marshallových těles byly měřeny vždy na všech 4 tělesech se stejným množstvím asfaltového pojiva. Následně byla určena průměrná objemová hmotnost pro Marshallova tělesa zhotovená ze směsi ACP 22 (tab. č. 15) a Marshallova tělesa zhotovená ze směsi ACP 32 (tab. č. 16).

Tabulka č. 15: Objemová hmotnost Marshallových těles ACP 22

Objemová hmotnost [kg/m ³]			
ACP 22	Obsah pojiva [%]		
	3,8	4,3	4,8
$\rho_{Z,1}$	2 318,66	2 336,33	2 348,09
$\rho_{Z,2}$	2 326,63	2 341,13	2 354,68
$\rho_{Z,3}$	2 315,28	2 359,07	2 357,09
$\rho_{Z,4}$	2 309,32	2 347,65	2 392,56
$\rho_{Z,C}$	2 317,47	2 346,04	2 363,11

Tabulka č. 16: Objemová hmotnost Marshallových těles ACP 32

Objemová hmotnost [kg/m ³]			
ACP 32	Obsah pojiva [%]		
	3,8	4,3	4,8
$\rho_{Z,1}$	2 333,27	2 341,20	2 377,33
$\rho_{Z,2}$	2 315,74	2 332,03	2 374,11
$\rho_{Z,3}$	2 309,00	2 348,07	2 357,99
$\rho_{Z,4}$	2 334,12	2 353,92	2 347,06
$\rho_{Z,C}$	2 323,03	2 343,81	2 364,12

V předchozích tabulkách lze vidět, že objemové hmotnosti obou směsí jsou téměř identické.

7.5. Maximální objemová hmotnost

Z každé sady Marshallových těles bylo vybráno jedno těleso, na kterém bylo provedeno měření maximální objemové hmotnosti postupem uvedeným v kap. 5.2. Výsledky jsou uvedeny v tab. č. 17 pro směs ACP 22 a v tab. č. 18 pro směs ACP 32.

Tabulka č. 17: Maximální objemová hmotnost Marshallova tělesa ze směsi ACP 22

Max. objemová hmotnost [kg/m ³]			
ACP 22	Obsah pojiva [%]		
	3,8	4,3	4,8
m ₁	703,1	693,0	687,8
m ₂	1 723,9	1 740,3	1 734,2
m ₃	2 641,7	2 650,5	2 615,1
m ₄	2 020,1	2 012,7	1 982,9
ρ _M	2 547,77	2 535,00	2 517,09

Tabulka č. 18: Maximální objemová hmotnost Marshallova tělesa ze směsi ACP 32

Max. objemová hmotnost [kg/m ³]			
ACP 32	Obsah pojiva [%]		
	3,8	4,3	4,8
m ₁	685,0	703,1	687,7
m ₂	1 829,2	1 804,4	1 782,8
m ₃	2 687,8	2 687,0	2 644,5
m ₄	1 989,7	2 020,1	1 982,9
ρ _M	2 555,44	2 525,95	2 516,95

Z výsledku lze vidět, že maximální objemová hmotnost je také téměř stejná.

7.6. Mezerovitost

Mezerovitost byla stanovena postupem uvedeným v kap. 5.4. Z hodnoty mezerovitosti bylo dále upraveno množství pojiva na zhotovení desek.

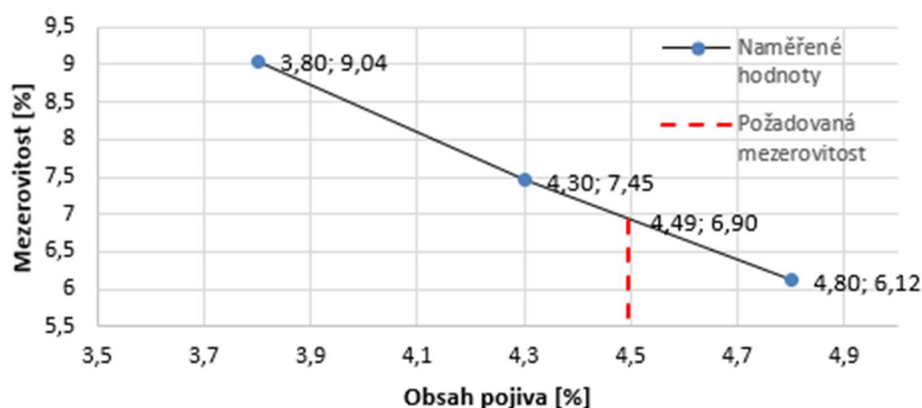
Z hodnot objemové hmotnosti (tab. č. 15, 16) a maximální objemové hmotnosti (tab. č. 17, 18) byla vypočtena mezerovitost. Výsledky jsou uvedeny v tabulce č. 18.

Tabulka č. 19: Mezerovitost směsi

Mezerovitost [%]			
Směs	M _{3,8}	M _{4,3}	M _{4,8}
ACP 22	9,04	7,45	6,12
ACP 32	9,09	7,21	6,07

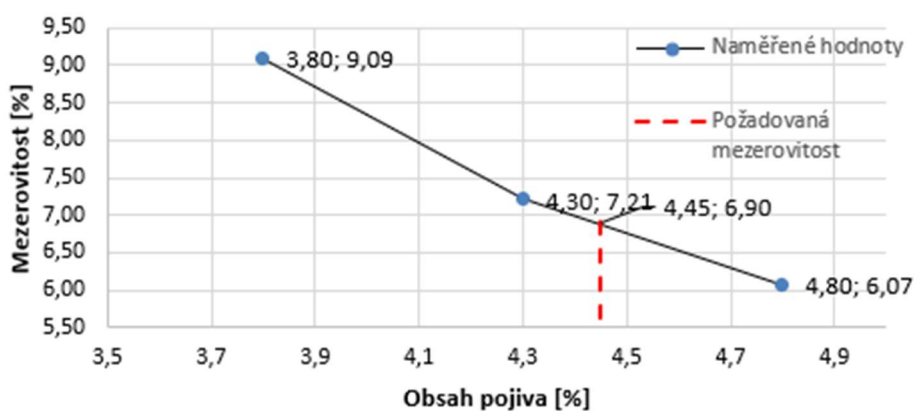
Na základě těchto hodnot byl zhotoven graf č. 3 a graf č. 4. Na těchto grafech je zobrazena závislost mezerovitosti směsi na obsahu pojiva. Také byly využity k určení množství pojiva pro desky, kde byla zvolená požadovaná mezerovitost 6,9 %.

**Graf závislosti mezerovitosti na obsahu pojiva
pro ACP 22**



Graf č. 3: Závislost mezerovitosti na obsahu pojiva pro ACP 22

**Graf závislosti mezerovitosti na obsahu pojiva
pro ACP 32**



Graf č. 4: Závislost mezerovitosti na obsahu pojiva pro ACP 32

Z grafu lze vyčíst, že mezerovitost těchto dvou směsí je mírně odlišná, kde trochu větší mezerovitost má směs ACP 32. Dále také byl určen optimální obsah pojiva pro zhotovení zkušebních desek s požadovanou mezerovitostí 6,9 %, a to na hodnotu 4,5 %.

Tato hodnota byla poté ověřena matematickou iterací podle vzorce:

$$p = a * \ln(M) - b$$

kde p je obsah pojiva v %

a je koeficient rovnice zjištěn iterací

b je druhý koeficient rovnice zjištěn iterací

M je požadovaná mezerovitost v %

Pro směs ACP 22 byly koeficienty určeny na ***a* = -2,5622** a ***b* = -9,4427** s přesností **$2,5 \cdot 10^{-5}$** . **Obsah pojiva** byl poté vypočten na ***p* = 4,49377%**.

Pro směs ACP 32 byly koeficienty určeny na ***a* = -2,4569** a ***b* = -9,2031** s přesností **$3,7 \cdot 10^{-3}$** . **Obsah pojiva** byl poté vypočten na ***p* = 4,45754%**.

Výsledný obsah pojiva pro desky byl určen na 4,5%, což odpovídá hodnotě určené z grafu.

7.7. Výroba desek

Na základě mezerovitosti zjištěné na Marshallových tělesech bylo množství pojiva do desek upraveno tak, aby odpovídalo mezerovitosti 6,9 %. Tato hodnota byla vybrána na základě maximální dovolené mezerovitosti 7,0 %. Čára zrnitosti kameniva zůstává stejná. Kvůli ACP 32 se zvolila tloušťka desky 60 mm, protože tloušťka 50 mm není dostačující pro zrna kameniva 32 mm.

7.7.1. Výpočet navážky

Výpočet navážky je uveden v tab. č. 20 pro směs ACP 22 a v tab. č. 21 pro směs ACP 32.

Tabulka č. 20: Vypočet navážky pro desku ze směsi ACP 22

Název směsi	ACP 22
Označení desky:	ACP 22
Použití desky na zkoušku:	tuhost
Teplota míchání směsi:	160 °C
Teplota hutnění desky:	150 °C
rozměry desky:	a= 0,26 m
	b= 0,32 m
	v= 0,06 m
	plech= 0 m
objem desky:	V= 0,004992 m ³
žádaná obj. hm. desky:	ρ_z = 2 346 kg/m ³
korekce: přidat+/ubrat- z hmotnosti:	-0,5 %
teor. hm. směsi na desku:	m= 11 653 g
hm. směsi bez korekce:	m= 11 711 g
navážka směsi na míchání:	m= 12 500 g
obsah asfaltu:	A= 4,50 %
hmotnost asfaltu:	m_A = 563 g
hmotnost kameniva:	m_K = 11 938 g

frakce	podíly v %	podíly	hmotnosti
filer	8	0,08	955 g
0-2	35	0,35	4 178 g
2-5	20	0,2	2 388 g
11-16	20	0,2	2 388 g
16-22	17	0,17	2 029 g
suma	100	1	11 938 g

Rozměry desky byly zvoleny na 260x320x60 mm. Teplota míchání a hutnění zůstala stejná, a to 160°C pro míchání a 150°C pro hutnění.

Tabulka č. 21: Vypočet navážky pro desku ze směsi ACP 32

Název směsi	ACP 32
Označení desky:	ACP 32
Použití desky na zkoušku:	tuhost
Teplota míchání směsi:	160 °C
Teplota hutnění desky:	150 °C
rozměry desky:	a= 0,26 m
	b= 0,32 m
	v= 0,06 m
	plech= 0 m
objem desky:	V= 0,004992 m ³
žádaná obj. hm. desky:	ρ_z = 2 352 kg/m ³
korekce: přidat+/ubrat- z hmotnosti:	-0,5 %
teor. hm. směsi na desku:	m= 11 682 g
hm. směsi bez korekce:	m= 11 741 g
navážka směsi na míchání:	m= 12 500 g
obsah asfaltu:	A= 4,50 %
hmotnost asfaltu:	m_A = 563 g
hmotnost kameniva:	m_K = 11 938 g

frakce	podíly v %	podíly	hmotnosti
filer	8	0,08	955 g
0-2	35	0,35	4 178 g
2-5	20	0,2	2 388 g
11-16	20	0,2	2 388 g
16-32	17	0,17	2 029 g
suma	100	1	11 938 g

Pro desku ze směsi ACP 32 byly zvoleny stejné parametry jak pro desku ze směsi ACP 22.

Následně byly na základě těchto dvou tabulek zhotoveny navážky z vysušeného kameniva, které byly poté vloženy do laboratorní sušárny a nechaly se zahřát na teplotu 160°C (obr. č. 57).



Obrázek č. 57: Nahřívání kameniva a asfaltu

7.7.2. Výroba směsi na zhotovení desek

Míchání směsi probíhalo v míchačce s ohřevem (obr. č. 58). Podle normy ČSN EN 12697-35 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 35: Laboratorní výroba směsi* byla doba míchání stanovena na 5 minut, následně byla směs promíchána ještě manuálně.



Obrázek č. 58: Míchání směsi pro výrobu desek

Po dostatečném zamíchání a zhomogenizování byla směs navážena na hmotnosti potřebné k výrobě desky. Následně bylo potřebné směs znovu zahřát na teplotu požadovanou k hutnění, proto byla znovu vrácena do laboratorní sušárny (obr. č. 59).



Obrázek č. 59: Zahřívání směsi

7.8. Hutnění desek

Směs byla hutněna pomocí hutnicího zařízení s ocelovou válcovou hutnicí plochou (obr. č. 60). Tento tvar hutnicí plochy simuluje pojezd hutnicího válce při pokládce asfaltové směsi. Pro účely práce byly zhutněny 4 desky o rozměrech 260x320 mm. Výška desky byla zvolena na 60 mm.



Obrázek č. 60: Hutnění desek

Po zhutnění se desky nechaly vychladnout (obr. č. 61) a poté byly z formy vybrány. Následně na nich byla vykonána zkouška na zjištění objemové hmotnosti dle kap. 5.2. Na základě objemové hmotnosti byla určena míra zhutnění, která je uvedena v tab. č. 22.



Obrázek č. 61: Chladnutí zhutněné desky

Tabulka č. 22: Míra zhutnění desek

Stanovení míry zhutnění					
Vzorek	Hm. suchého vzorku [g]	Hm. mokrého vzorku [g]	Hm. vysušeného vzorku [g]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Míra zhutnění [%]
ACP 22/1	11 713	6 891	11 748	2 411,57	102,80
ACP 22/2	11 717	6 872	11 776	2 389,27	101,84
ACP 32/1	11 680	6 826	11 765	2 364,85	100,55
ACP 32/2	11 724	6 897	11 766	2 407,89	102,38

Pro stanovení modulu tuhosti byly na základě míry zhutnění vybrány desky ACP 22/2 a ACP 32/1. Desky ACP 22/1 a ACP 32/2 budou použity na zkoušku pojíždění kolem. Objemová hmotnost desky byla změřena pro obě desky se stejným množstvím asfaltového pojiva. Následně byla určena průměrná objemová hmotnost desky zhotovené se směsí ACP 22 a desky zhotovené se směsí ACP 32 (tab. č. 23).

Tabulka č. 23: Objemové hmotnosti desek

Objemová hmotnost [kg/m ³]		
	Směs [4,5% pojiva]	
	ACP 22	ACP 32
$P_{Z,1}$	2 411,57	2 364,85
$P_{Z,2}$	2 389,27	2 407,89
$P_{Z,C}$	2 400,42	2 386,37

Rozdíl objemových hmotností na deskách je také téměř identický.

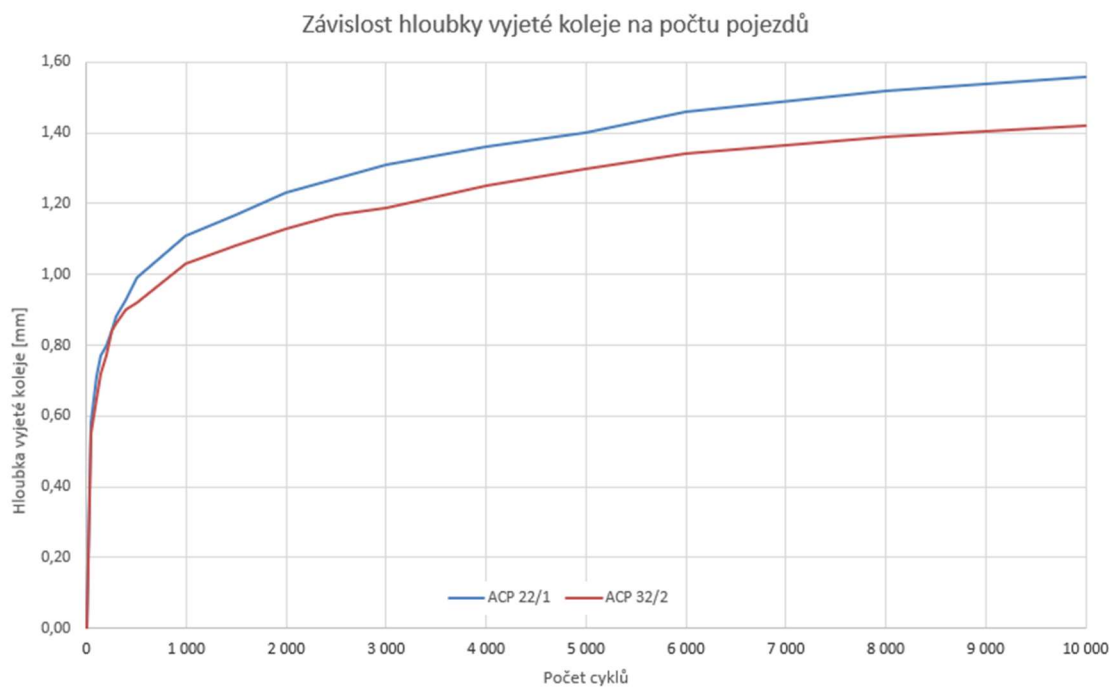
7.9. Zkouška pojíždění kolem

Zkouška byla provedena na základě postupu uvedeného v kap. 5.5. Výsledné hodnoty hloubky vyjeté koleje jsou uvedeny v tab. č. 24 a závislost hloubky koleje na počtu pojezdů je zobrazena na grafu č. 5. Upevnění vzorku do přístroje je zobrazeno na obr. č. 62 a vyjeté koleje na obr. č. 63.

Tabulka č. 24: Hloubka vyjeté koleje

Hloubka vyjeté koleje [mm]		
Pojezd	ACP 22/1	ACP 32/2
0	0,00	0,00
50	0,58	0,55
100	0,71	0,65
150	0,77	0,72
200	0,80	0,77
250	0,84	0,84
300	0,88	0,86
400	0,93	0,90
500	0,99	0,92
1 000	1,11	1,03
1 500	1,17	1,08
2 000	1,23	1,13
2 500	1,27	1,17
3 000	1,31	1,19
4 000	1,36	1,25
5 000	1,40	1,30
6 000	1,46	1,34
8 000	1,52	1,39
10 000	1,56	1,42

Hrubozrnné asfaltové směsi



Graf č. 5: Závislost hloubky vyjeté koleje na počtu pojezdů



Obrázek č. 62: Vyjetá kolej ACP 22/1

Obrázek č. 63: Vyjetá kolej ACP 32/2

Hloubka vyjeté koleje je na obou vzorcích téměř stejná a pohybuje se kolem 1,5 mm, což je velmi malá hodnota. V další tabulce jsou vyobrazeny výsledky WTS_{air} a PRD_{air} , které jsou porovnány s limitními hodnotami pro směsi ACL 22 S.

Tabulka č. 25: Výsledky WTS_{air} a PRD_{air}

Výsledky		
	WTS _{air}	PRD _{air}
ACP 22/1	0,032	2,6
ACP 32/2	0,024	2,4
Limit	0,050	3,0

Na výsledcích je vidět, že obě směsi vyhověly i těm nejprísnějším požadavkům dle ČSN EN 73 6121. Mírně lepší odolnost vůči deformaci prokázala hrubozrnější směs ACP 32.

7.10. Stanovení nízkoteplotních charakteristik

Stanovení nízkoteplotních charakteristik bylo vykonáno postupem uvedeným v kap. č. 5.7. Zkušební tělíska kvádrového tvaru o rozměrech 50x50x200 mm byla vyřezána z bočních částí desek použitých pro zkoušku pojíždění kolem. Poté co byla zkušební tělesa vyřezána (obr. č. 64), vysušena (obr. č. 65) a nalepena, (obr. č. 66) byla uchycena do centrovacího rámu (obr. č. 67).



Obrázek č. 64: Pila na řezání vzorků



Obrázek č. 65: Sušení vzorku



Obrázek č. 66: Lepení vzorku



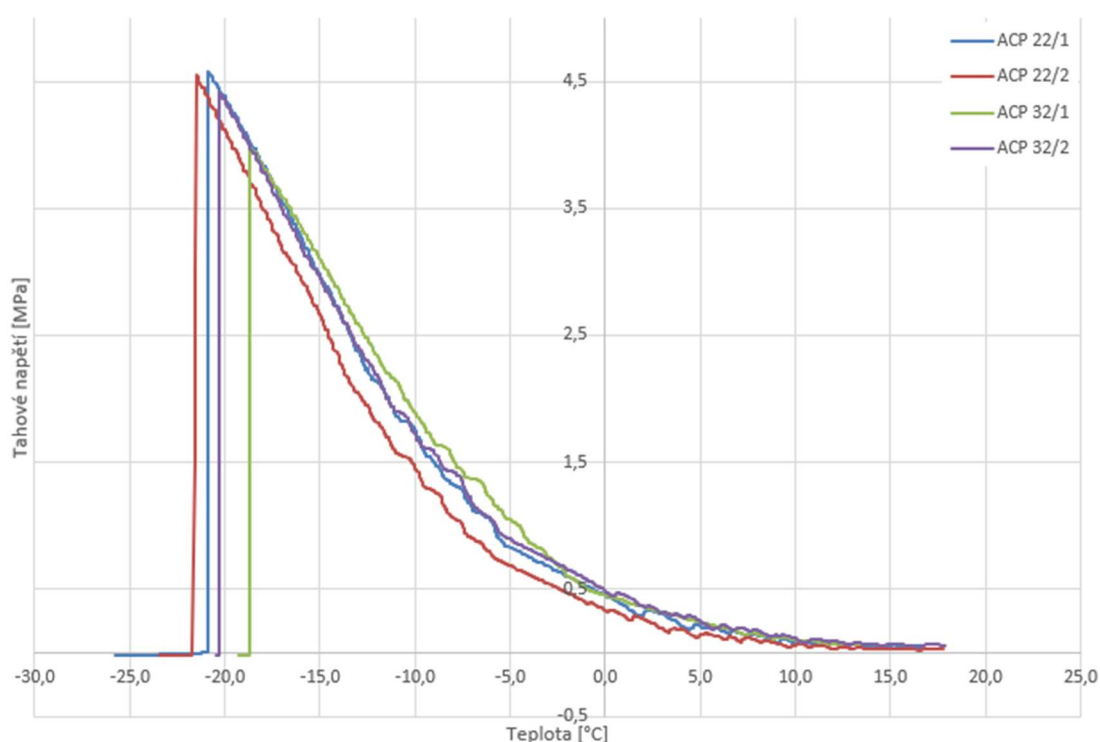
Obrázek č. 67: Umístění do centrovacího rámu

V centrovacím rámu se vzorek nechal nejméně 48 hodin. Poté se vzorek umístil do testovací komory, kde byla provedena zkouška. Výsledky ze zkoušky jsou zobrazeny v příloze č. 2 a přehledně shrnuty v tab. č. 26 a grafu č. 6.

Tabulka č. 26: Přehled nízkoteplotních vlastností

Směs	Maximální tahová síla [kN]	Maximální tahové napětí	Kritická teplota [°C]
ACP 22/1	11,43	4,57	20,90
ACP 22/2	11,37	4,55	21,50
Průměr	11,40	4,56	21,20
ACP 32/1	9,95	3,98	18,70
ACP 32/2	11,02	4,41	20,30
Průměr	10,49	4,20	19,50

Závislost tahového napětí na teplotě



Graf č. 6: Závislost tahového napětí na teplotě

Vzniklá mrazová trhlina je zobrazena na obr. č. 68 a lomová plocha na obrázku č. 69. Mírně lepší nízkoteplotní vlastnosti vykazovala jemnozrnější asfaltová směs ACP 22, protože kritická teplota byla nižší (lepší) o přibližně 1,7 °C oproti kritické teplotě směsi ACP 32. Rovněž maximální tahové napětí bylo mírně vyšší v případě směsi ACP 22.



Obrázek č. 68: Mrazová trhлина



Obrázek č. 69: Lomová plocha

7.11. Modul tuhosti

Modul tuhosti byl změřen podle postupu uvedeného v kap. 5.6.

7.11.1. Příprava vzorku

Tělesa byla neřezána z desky ACP 22/2 a ACP 32/1. Tvar zkušebních těles byl zvolen jako komolý klín. Nejdříve se deska rozřízla na požadovaný tvar (obr. č. 70). Z každé desky bylo získáno 5 těles klínů.



Obrázek č. 70: Řezání klínků

Následně, jelikož byla tloušťka desky 60 mm, se musela tělesa zbrousit na tloušťku 50 mm (obr. č. 71).



Obrázek č. 71: Broušení klínů

Po zbroušení na tloušťku 50 mm byla tělesa opláchnuta, vysušena (obr. č. 72) a popsána.



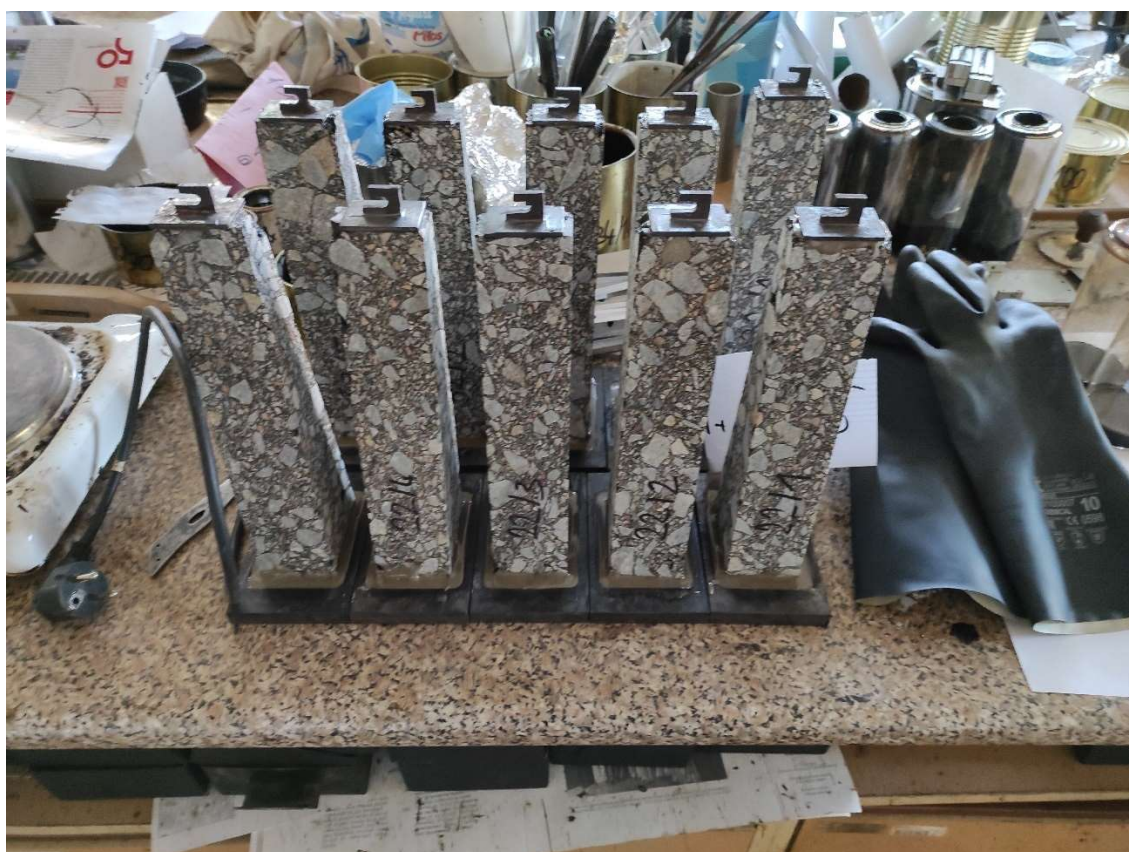
Obrázek č. 72: Vysoušení klínů

Následovalo měření rozměru a vážení těles. Skutečné rozměry jsou uvedeny v tab. č. 27.

Tabulka č. 27: Rozměry klínů

Rozměry klínů					
Vzorek	h_1 [mm]	h_2 [mm]	c [mm]	l [mm]	m [g]
22/1	70,5	25,0	49,9	250,5	1 439,9
22/2	70,5	25,5	50,0	250,5	1 440,9
22/3	70,5	25,5	49,9	250,5	1 450,2
22/4	70,5	25,0	49,9	250,5	1 438,9
22/5	70,5	25,0	49,9	250,0	1 423,5
32/1	70,5	24,8	49,8	249,7	1 388,2
32/2	71,0	25,5	49,8	251,0	1 430,7
32/3	70,8	25,5	50,0	249,5	1 419,1
32/4	70,5	25,5	49,8	250,5	1 436,7
32/5	70,5	25,5	49,8	250,5	1 423,9

Po změření byla tělesa nalepena k podkladní desce a navrch jim byla nalepena příchytka (obr. č. 73).



Obrázek č. 73: Nalepená zkušební tělesa

7.11.2. Měření modulu tuhosti

Před samotným měřením byla tělesa temperována na 15°C (obr. č. 74).



Obrázek č. 74: Temperování těles

Následně byla tělesa uchycena do zkušebního přístroje (obr. č. 75), a při konstantní teplotě 15°C byl na nich měřen modul tuhosti při frekvenci 5, 10, 15, 20 a 25 Hz.



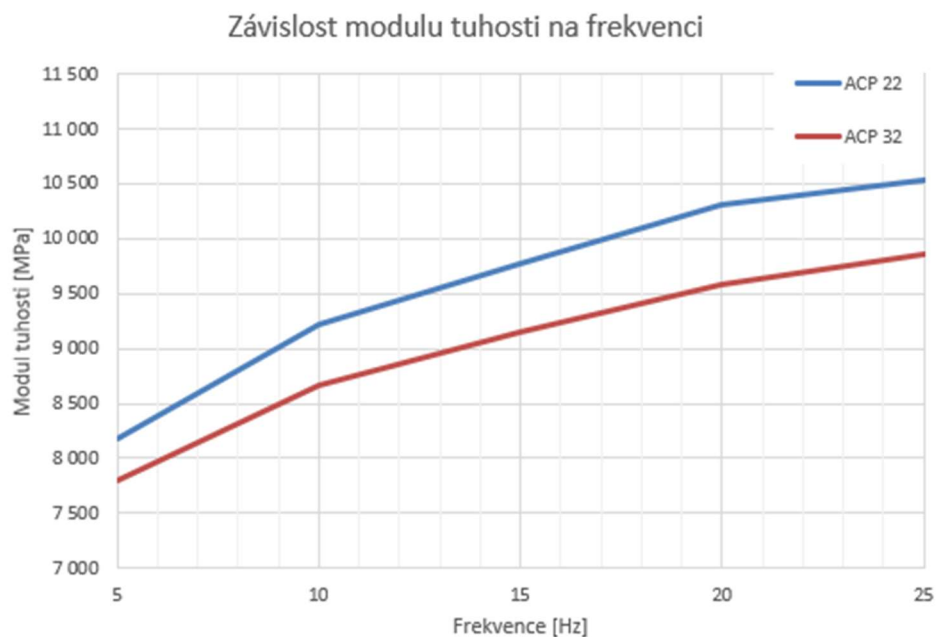
Obrázek č. 75: Uchycení tělesa do měřicího zařízení

Výsledky z měření jsou uvedeny v tab. č. 28. Dále je vyobrazena závislost modulu tuhosti (graf č. 7) a fázového úhlu (graf č. 8) na frekvenci.

Tabulka č. 28: Výsledky ze zkoušky

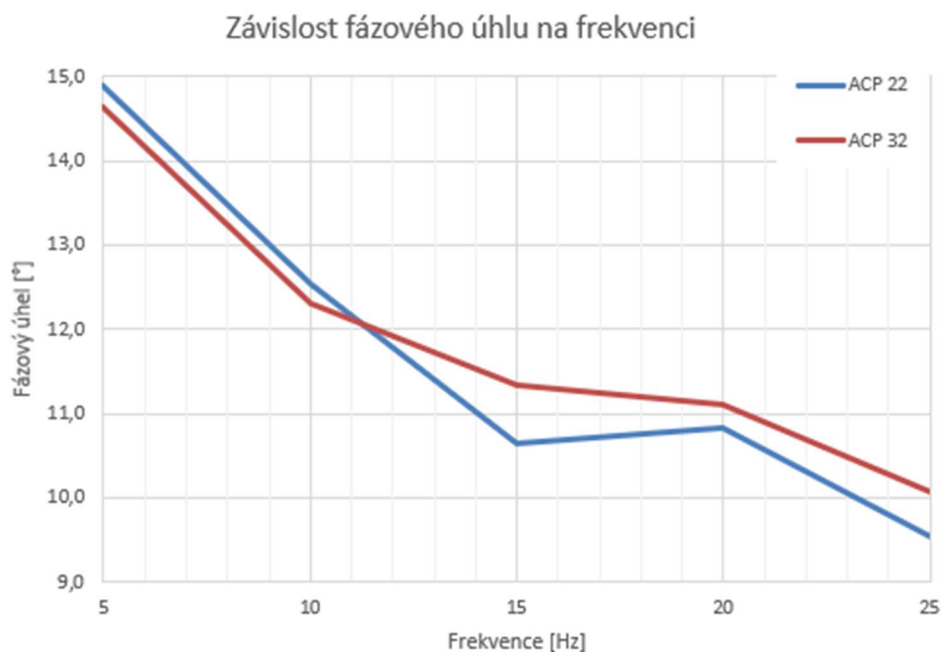
Modul tuhosti						
Směs	Parametr	Frekvence				
		5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
ACP 22/1	S [Mpa]	8 626	9 577	10 143	10 701	10 895
	φ [°]	15,1	11,7	10,4	11,0	9,2
ACP 22/2	S [Mpa]	8 179	9 248	9 799	10 257	10 546
	φ [°]	15,5	13,2	11,0	10,4	10,3
ACP 22/3	S [Mpa]	7 909	8 941	9 501	10 163	10 353
	φ [°]	13,7	12,3	10,0	10,9	8,7
ACP 22/4	S [Mpa]	8 319	9 322	9 779	10 160	10 483
	φ [°]	14,7	12,8	10,4	10,9	9,5
ACP 22/5	S [Mpa]	7 899	9 024	9 616	10 303	10 382
	φ [°]	15,4	12,7	11,4	10,9	10,0
Průměr	S [Mpa]	8 186	9 222	9 768	10 317	10 532
	φ [°]	14,9	12,5	10,6	10,8	9,5
ACP 32/1	S [Mpa]	7 635	8 213	8 708	9 097	9 361
	φ [°]	12,2	10,4	9,6	8,7	8,2
ACP 32/2	S [Mpa]	7 721	8 569	8 986	9 449	9 767
	φ [°]	13,6	11,6	10,4	10,8	10,8
ACP 32/3	S [Mpa]	7 690	8 651	9 101	9 430	9 737
	φ [°]	15,6	14,2	12,4	10,9	10,8
ACP 32/4	S [Mpa]	8 020	9 089	9 657	10 203	10 439
	φ [°]	16,2	12,8	13,1	14,3	9,8
ACP 32/5	S [Mpa]	7 920	8 784	9 321	9 710	10 037
	φ [°]	15,6	12,5	11,2	10,8	10,7
Průměr	S [Mpa]	7 797	8 661	9 155	9 578	9 868
	φ [°]	14,6	12,3	11,3	11,1	10,1

Na výsledcích je vidět, že sledované parametry, což jsou modul tuhosti a fázový úhel, jsou velice podobné pro obě směsi. Zatímco modul tuhosti má tendenci stoupat se zvýšením frekvence, fázový úhel naopak klesá.



Graf č. 7: Závislost modulu tuhosti na frekvenci

Na grafu je vidět závislost modulu tuhosti na frekvenci. Tvar křivky mají obě směsi stejný, avšak směs ACP 32 vykazuje mírně nižší modul tuhosti, a zároveň stoupá pomaleji se zvyšující se frekvencí.



Graf č. 8: Závislost fázového úhlu na frekvenci

Závislost fázového úhlu na frekvenci je zobrazena na horním grafu. Zde je vidět mírně rozdílné průběhy, kde směs ACP 32 se pohybuje v menším rozmezí.

8. POROVNÁNÍ Z EKONOMICKÉHO HLEDISKA

Tato kapitola se bude věnovat porovnání navržené směsi ACP 22 a ACP 32 bez frakce kameniva 5/8 a 8/11 s běžnou směsí ACP 22 a ACP 32, které obsahují všechny frakce kameniva.

8.1. Navržení čár zrnitosti

Navržení čáry zrnitosti bude provedeno stejným postupem jako v kap. 7.2. a 7.3. Návrh směsi ACP 22 VFK (všechny frakce kameniva) je zobrazen v tab. č. 29 a 30. Čára zrnitosti je poté zobrazena na grafu č. 9.

Tabulka č. 29: Skladba kameniva směsi ACP 22 VFK

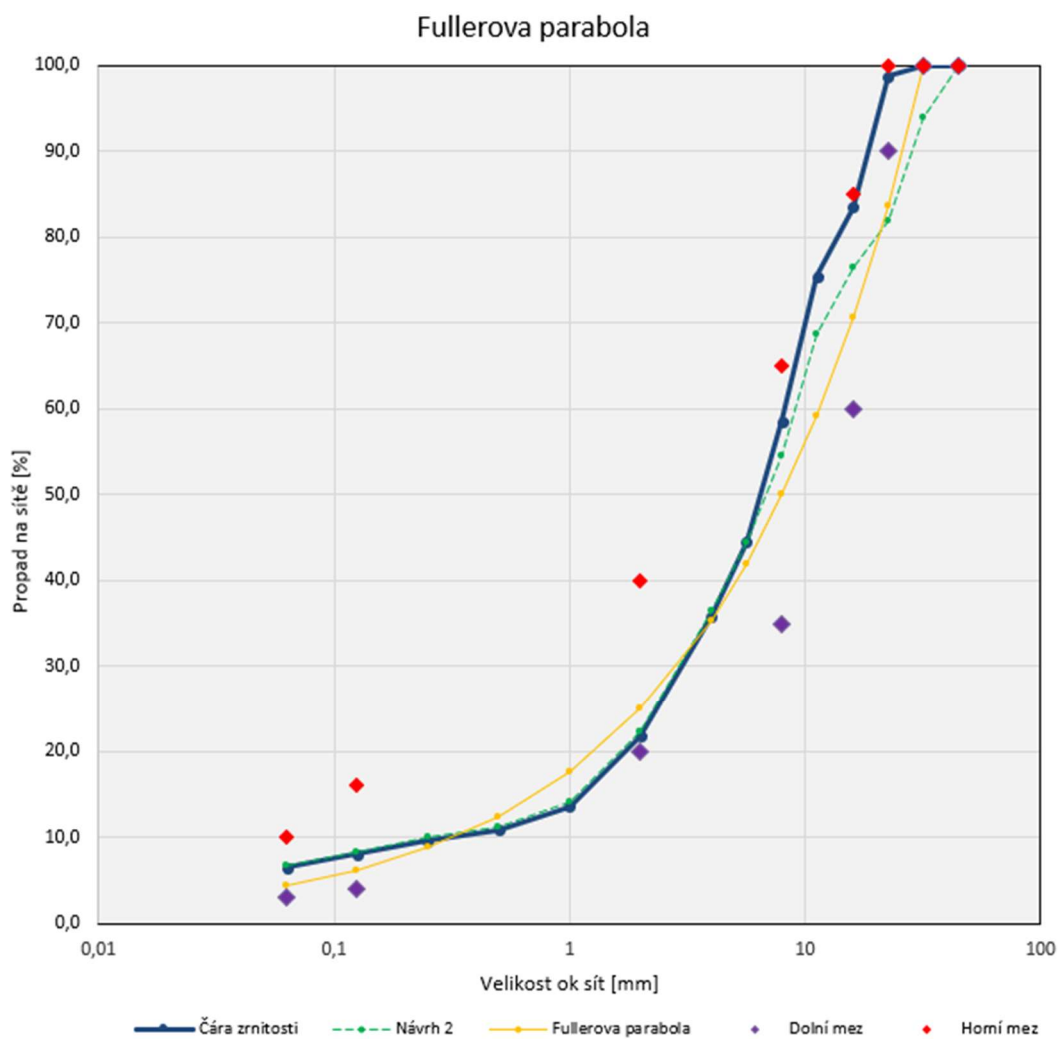
Skladba kameniva			
Frakce	Návrh	Součet	Podíl
22/32	0	0	0
16/32	0	0	0
16/22	18	18	0,18
11/16	12	30	0,12
8/11	12	42	0,12
5/8	15	57	0,15
2/5	15	72	0,15
0/2	20	92	0,2
filer	8	100	0,08
suma [%]	0	100	1

Tabulka č. 30: Čára zrnitosti směsi ACP 22 VFK

Síto	Čára zrnitosti					
	Návrh	Návrh 2	Rozdíl	Fuller	Mez d.	Mez h.
45	100,0	100,0	0,0	118,6	100	100
32	100,0	93,9	-6,1	100,0	100	100
22,4	98,7	82,0	-16,7	83,7	90	100
16	83,5	76,4	-7,1	70,7	60	85
11,2	75,4	68,8	-6,6	59,2		
8	58,6	54,5	-4,1	50,0	35	65
5,6	44,5	44,5	0,0	41,8		
4	35,8	36,4	0,6	35,4		
2	21,8	22,3	0,5	25,0	20	40
1	13,6	14,1	0,5	17,7		
0,5	10,9	11,2	0,3	12,5		
0,25	9,7	10,0	0,3	8,8		
0,125	8,1	8,4	0,3	6,3	4	16
0,063	6,5	6,7	0,2	4,4	3	10

Max. velikost zrna **22** mm (dle druhu směsi)

Návrh 2 zde zobrazuje čáru zrnitosti ACP 32 VFK pro porovnání.



Graf č. 9: Čára zrnitosti směsi ACP 22 VFK

Návrh směsi ACP 32 VFK je zobrazen v tab. č. 31 a 32. Čára zrnitosti na grafu č. 10.

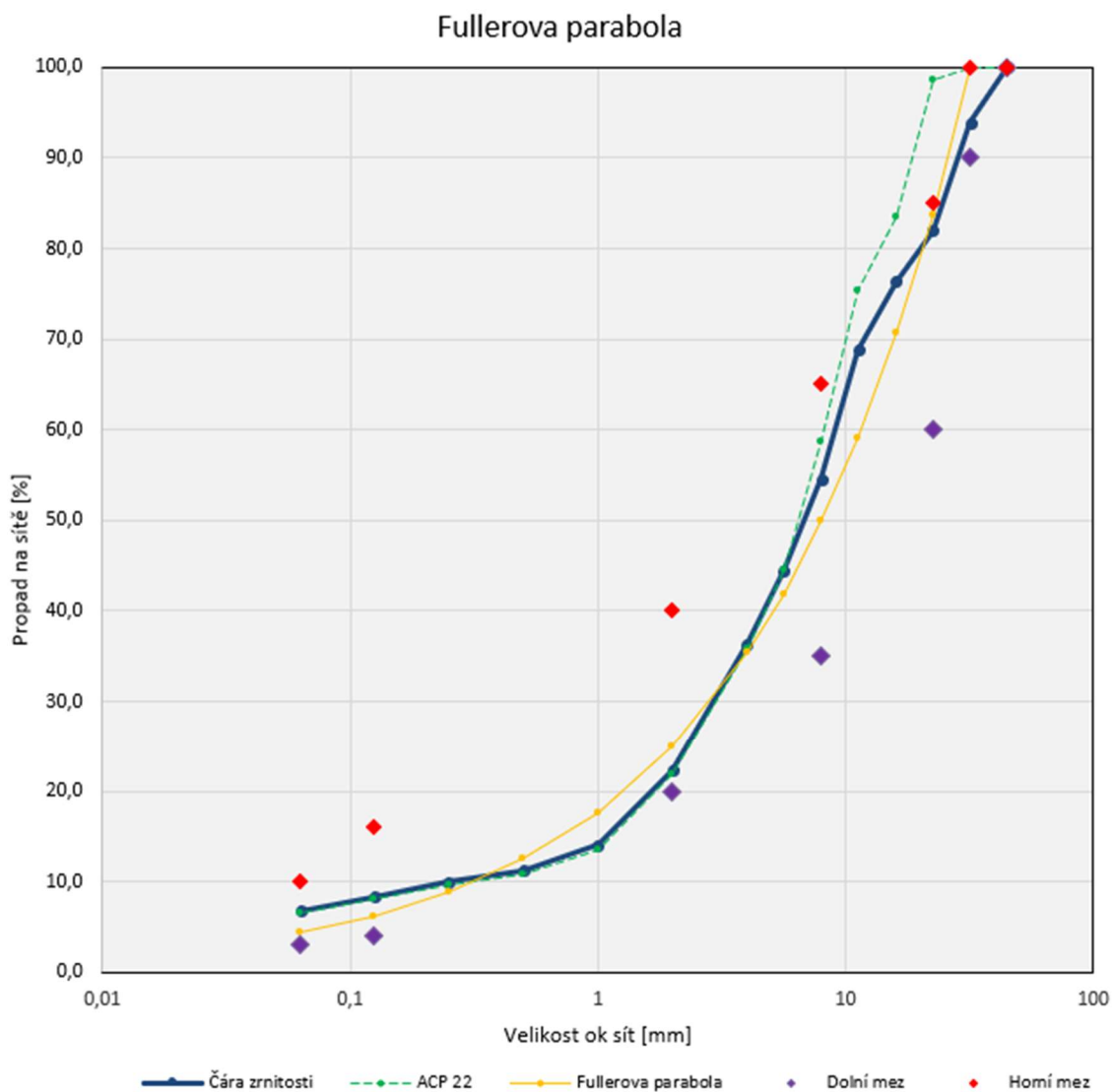
Tabulka č. 31: Skladba kameniva směsi ACP 32 VFK

Skladba kameniva			
Frakce	Návrh	Součet	Podíl
22/32	0	0	0
16/32	25	25	0,25
16/22	0	25	0
11/16	14	39	0,14
8/11	8	47	0,08
5/8	10	57	0,1
2/5	15	72	0,15
0/2	20	92	0,2
filer	8	100	0,08
suma [%]	100	100	1

Tabulka č. 32: Čára zrnitosti směsi ACP 32 VFK

Síto	Čára zrnitosti					
	Návrh	ACP 22	Rozdíl	Fuller	Mez d.	Mez h.
45	100,0	100,0	0,0	118,6	100	100
32	93,9	100,0	6,1	100,0	90	100
22,4	82,0	98,7	16,7	83,7	60	85
16	76,4	83,5	7,1	70,7		
11,2	68,8	75,4	6,6	59,2		
8	54,5	58,6	4,1	50,0	35	65
5,6	44,5	44,5	0,0	41,8		
4	36,4	35,8	-0,6	35,4		
2	22,3	21,8	-0,5	25,0	20	40
1	14,1	13,6	-0,5	17,7		
0,5	11,2	10,9	-0,3	12,5		
0,25	10,0	9,7	-0,3	8,8		
0,125	8,4	8,1	-0,3	6,3	4	16
0,063	6,7	6,5	-0,2	4,4	3	10

Max. velikost zrna **32** mm (dle druhu směsi)



Graf č. 10: Čára zrnitosti směsi ACP 22 VFK

8.2. Cena kameniva na 1t směsi

Podle čar zrnitosti byly zpracovány navážky na 1t směsi. V následujících tabulkách je vyobrazeno množství potřebných frakcí kameniva a jeho cena. Cena asfaltu byla zanedbána, protože se jedná o konstantu.

Tabulka č. 33: Cena kameniva směsi ACP 22

Název směsi	ACP 22
Označení směsi:	ACP 22
navážka směsi na míchání:	$m =$ 1 000 kg
obsah asfaltu:	$A =$ 4,50 %
hmotnost asfaltu:	$m_A =$ 45 kg
hmotnost kameniva:	$m_K =$ 955 kg

frakce	podíly v %	podíly	hm. [kg]	Kč/t	Cena [Kč]
filer	8	0,08	76	50	4
0-2	35	0,35	334	60	20
2-5	20	0,2	191	260	50
11-16	20	0,2	191	255	49
16-22	17	0,17	162	280	45
suma	100		955		168

Tabulka č. 34: Cena kameniva směsi ACP 22 VFK

Název směsi	ACP 22
Označení směsi:	ACP 22VFK
navážka směsi na míchání:	$m =$ 1 000 kg
obsah asfaltu:	$A =$ 4,50 %
hmotnost asfaltu:	$m_A =$ 45 kg
hmotnost kameniva:	$m_K =$ 955 kg

frakce	podíly v %	podíly	hm. [kg]	Kč/t	Cena [Kč]
filer	8	0,08	76	50	4
0-2	20	0,2	191	60	11
2-5	15	0,15	143	260	37
5-8	15	0,15	143	340	49
8-11	12	0,12	115	320	37
11-16	12	0,12	115	255	29
16-22	18	0,18	172	280	48
suma	100		955		215

Z výše uvedených tabulek vyplývá, že cena kameniva do směsi ACP 22 bez frakcí 5/8 a 8/11 je o 28 % nižší než cena kameniva standardní směsi ACP 22, obsahující frakce 5/8 a 8/11.

Tabulka č. 35: Cena kameniva směsi ACP 32

Název směsi	ACP 32
Označení směsi:	ACP 32
navážka směsi na míchání:	$m =$ 1 000 kg
obsah asfaltu:	$A =$ 4,50 %
hmotnost asfaltu:	$m_A =$ 45 kg
hmotnost kameniva:	$m_K =$ 955 kg

frakce	podíly v %	podíly	hm. [kg]	Kč/t	Cena [Kč]
filer	8	0,08	76	50	4
0-2	35	0,35	334	60	20
2-5	20	0,2	191	260	50
11-16	20	0,2	191	255	49
16-32	17	0,17	162	230	37
suma	100		955		160

Tabulka č. 36: Cena kameniva směsi ACP 32 VFK

Název směsi	ACP 32
Označení směsi:	ACP 32VFK
navážka směsi na míchání:	$m =$ 1 000 kg
obsah asfaltu:	$A =$ 4,50 %
hmotnost asfaltu:	$m_A =$ 45 kg
hmotnost kameniva:	$m_K =$ 955 kg

frakce	podíly v %	podíly	hm. [kg]	Kč/t	Cena [Kč]
filer	8	0,08	76	50	4
0-2	20	0,2	191	60	11
2-5	15	0,15	143	260	37
5-8	10	0,1	96	340	32
8-11	8	0,08	76	320	24
11-16	14	0,14	134	255	34
16-32	25	0,25	239	230	55
suma	100		955		198

Rozdíl cen směsi ACP32 je menší, ale stále dosahuje hodnoty 24 %.

9. ZÁVĚR

Zkouškami provedenými v této diplomové práci bylo prokázáno, že asfaltová směs s maximální velikostí zrna 32 mm, která není aktuálními normami povolena, má téměř identické vlastnosti jako asfaltová směs s maximálním zrnem kameniva 22 mm. Z ekonomického hlediska je také výhodnější použití hrubozrnnějších asfaltových směsí do podkladních vrstev ACP 32, jelikož v porovnání se směsí ACP 22 dojde k 5% úspoře nákladů na kamenivo.

Dalším problémem, kterým jsem se v rámci diplomové práce zabýval, bylo vynechání frakcí kameniva 5/8 a 8/11, které jsou těžko dostupné v době hlavní stavební sezóny, v asfaltové směsi. Směsi zhotovené bez těchto frakcí kameniva neprojevovaly žádnou negativní změnu vlastností. Po ekonomické stránce se dokonce jednalo až o 28% úsporu nákladů na kamenivo. Tato úspora může být ještě vyšší v době hlavní sezóny, kde cena těchto frakcí ještě poroste směrem nahoru, popřípadě se nebudou dát vůbec sehnat. Při použití směsi s maximální velikostí zrna 32 mm s vynechanými frakcemi 5/8 a 8/11 oproti klasické směsi s maximální velikostí zrna 22 mm se jedná o úsporu až 33 % z ceny kameniva. Celková úspora po započtení ceny asfaltu, která se pohybuje na úrovni cca 12 000 Kč/t je celková úspora 8 %, což je stále znatelná hodnota.

10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Comparative Evaluation of 4-Inch and 6-Inch Diameter Specimens for Testing Large Stone Asphalt Mixes
DOI : <https://doi.org/10.21949/1404492>
- [2] Příspěvatelé Wikipedie, Vyjeté koleje [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2021, Datum poslední revize 31. 05. 2021, 12:49 UTC, [citováno 13.12.2021]
<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Vyjet%C3%A9_koleje&oldid=19981944>
- [3] ČSN EN 13108- 6 ED. 2 73 6140, 2017. Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály - Část 1: Asfaltový beton. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [4] *PRAKTICKÉ APLIKACE V POZEMNÍCH KOMUNIKACÍCH: ASFALTOVÉ SMĚSI*, 2006. Brno. Studijní opory. Vysoké učení technické v Brně - Fakulta stavební. Autor ING. PETR HÝZL, PH.D.
- [5] Příspěvatelé Wikipedie, Asfaltový beton [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2021, Datum poslední revize 18. 07. 2021, 17:30 UTC, [citováno 13. 12. 2021]
<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Asfaltov%C3%BD_beton&oldid=20177827>
- [6] ČESKÁ REPUBLIKA, 2008. TECHNICKÉ KVALITATIVNÍ PODMÍNKY STAVEB POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ: Kapitola 7 HUTNĚNÉ ASFALTOVÉ VRSTVY. In: . Praha: Ministerstvo dopravy Odbor infrastruktury, ročník 2008, Kapitola 7. Dostupné také z: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_6_TKP/TKP_7.pdf
- [7] Silniční stavby 2: Asfaltové směsi 1/2 [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://adoc.pub/silnini-stavby-2-pednaka-4.html>
- [8] PFEIFEROVÁ, Magdaléna. Nové směry v oblasti asfaltových koberců mastixových. Brno, 2011. 77 s., 16 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Michal Varaus.

- [9] Innovative Porous Warm Mix Asphalt Minus the Fibers [online]. In: . [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://www.forconstructionpros.com/asphalt/article/10476015/innovative-porous-warm-mix-asphalt-minus-the-fibers>
- [10] Three Hot Mix Asphalt Types [online]. [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://www.thebalancesmb.com/hot-mix-asphalt-types-844575>
- [11] Studené asfaltové směsi s R-materiálem; Ing. Jan Ševc (2015 - 95684) – VUT v Brně. Vysoké učení technické v Brně [online]. Copyright © 2020 VUT v Brně [cit. 20.03.2020]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/95684?fbclid=IwAR2MGw2AdpESicfOHQTowAkjj_1YN_UBBdBNUlxwLxnYdl48SP4_5Dcl5kQ
- [12] SPEIGHT, James G., 2016. Asphalt Materials Science and Technology: Chapter 1 - Nomenclature and Terminology. online: Butterworth-Heinemann. ISBN 9780128002735. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800273-5.00001-5>
- [13] Kamenivo: Rozdělení, výroba, normy pro kamenivo, zkoušení [online]. In: . [cit. 2021-12-17]. Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/-%20-%20P%C5%99edm%C4%9Bty%20dle%20semestru%20-%20-/6-semester/-%20BM02%20-%20Pozemni%20komunikace%20II/Prednasky/T%C3%A9ma%20-%20prezentace%20-%20Kamenivo.pdf>
- [14] Adámek, J. et al.: Stavební materiály. Brno: skripta FAST VUT v Brně, Akademické nakladatelství CERM, 1997. 205 s.
- [15] VÍTKOVÁ, Kateřina. Kvalita drobného drceného přírodního kameniva do pozemních komunikací. Brno, 2011. 56 s., 17 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D..
- [16] VARAUS, Dr. Ing. Michal, 2005. POZEMNÍ KOMUNIKACE II: KAMENIVO. Brno. Dostupné také z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/-%20-%20P%C5%99edm%C4%9Bty%20dle%20semestru%20-%20-/6-semester/-%20BM02%20-%20Pozemni%20komunikace%20II/Prednasky/T%C3%A9ma%20-%20prezentace%20-%20Kamenivo.pdf>

- %20Pozemni%20komunikace%20II/Prednasky/T%C3%A9ma%20%20prezentace%20-%20Kamenivo.pdf.
- Studijní opory. Vysoké učení technické v Brně - Fakulta stavební.
- [17] TECHNICKÝ A ZKUŠEBNÍ ÚSTAV STAVEBNÍ PRAHA, S.P. [online]. [cit. 2021-12-17]. Dostupné z: <https://www.tzus.cz/>
- [18] LABORATOŘ COLAS [online]. [cit. 2021-12-17]. Dostupné z: <https://laborator.colas.cz/> [21] [online]. Copyright © 2020 [cit. 20.03.2020]. Dostupné z: <https://www.dernaseer.com/>
- [19] Technické normy ČSN [online]. [cit. 2021-12-17]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/>
- [20] Kristýna Indráková. Interakce mezi asfaltovým pojivem a filerem. Brno, 2018. 52 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
- [21] Silasfalt [online]. [cit. 2021-12-17]. Dostupné z: <http://www.silasfalt.cz/>
- [22] SPEIGHT, James G., 2016. Asphalt Materials Science and Technology: Chapter 2 - History, Use, and Production. online: Butterworth-Heinemann. ISBN 9780128002735. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800273-5.00001-5>
- [23] JEŠUTA, Jiří. Kyvadlo čelistového drtiče 1 600 x 1 250 [online]. Brno, 2016 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/60740>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Jiří Malášek.
- [24] European Asphalt Pavement Association [online]. [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://www.eccredi.org/portfolio-items/european-asphalt-pavement-association/>
- [25] ASFALT OK GROUP: Stručná historie asfaltu [online]. [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://asfaltokgroup.cz/strucna-historie-asfaltu/>
- [26] O ENERGETICE: Zpracování ropy [online]. [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/ropa-prumysl/zpracovani-ropy-1-cast-zakladni-zpracovani-ropy>
- [27] Ropný průmysl: Terminologie - Část 4: Rafinace, 2001. Praha: Český normalizační institut.

- [28] Blažek J., Rábl V.: Základy zpracování a využití ropy. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-619-2
- [29] ZKOUŠENÍ STAVEBNÍCH HMAT A VÝROBKŮ: Asfalty [online]. [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=asfalty>
- [30] Asphalt magazine: The asphalt industry from the 1800s to World War II [online]. [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: http://asphaltmagazine.com/asphalthistory_two/
- [31] What is Superpave? [online]. [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://www.globalgilson.com/blog/superpave-mix-design-method-resource>
- [32] McNichol, Dan. Paving the Way: Asphalt in America. Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association, 2005.
- [33] ČSN EN 13108- 6 ED. 2 73 6140, 2017. Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 6: Litý asfalt. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [34] ČSN EN 13108-5 ED. 2 73 6140, 2018. Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 5: Asfaltový koberec mastixový. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [35] ČSN EN 13108-7 ED. 2 73 6140, 2017. Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály - Část 7: Asfaltový koberec drenážní. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [36] KOVÁČOVÁ, Aneta, 2019. Separace asfaltových směsí při výrobě a dopravě. Praha. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Petr Mondschein, Ph.D.
- [37] ČSN 73 6121, 2019. Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [38] Školení STEPS 7 – Pokládka hutněných asfaltových směsí [online]. [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.sdruzeni-silnice.cz/>
- [39] ČSN 1426, 2007. Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

- [40] ČSN EN 12697- 6, 2021. Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [41] ČSN EN 12697- 22, 2021. Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 22: Zkouška pojíždění kolem. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [42] ČSN EN 12697-26, 2019. Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 26: Tuhost. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [43] ČSN EN 12697- 46, 2021. Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomoci jednoosé zkoušky tahem. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [44] Českomoravský štěrk, a.s. [online]. [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/kontakty/cms>
- [45] EBETON [online]. [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/kamenivo/>
- [46] Amazon [online]. [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: <https://www.amazon.com/Pounds-Carbonate-Limestone-Amendment-Fertilizer/dp/B00AL1E4H8>
- [47] DoSmart General Trading LLC: NATURAL BITUMEN [online]. In: . [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: <http://dosmartint.com/bitumen/natural-bitumen/>
- [48] ResearchGate [online]. In: . [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Levallois-point-no-2023-square-AJ-154-banquette-with-imprint-of-bitumen-deposited-on_fig6_261178002
- [49] James Kurpiel Inc: A Short History of Asphalt [online]. In: . [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: <https://kurpiel.com/the-history-of-asphalt/>
- [50] Earth facts: Rancho La Brea Tar Pits [online]. In: . [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: <https://www.earthfacts.com/evolution-and-life/rancholabreatarpits/>
- [51] The New York Times: Oil Makes a Comeback in Pennsylvania [online]. In: . [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: <https://www.nytimes.com/2015/04/23/business/energy-environment/oil-makes-a-comeback-in-pennsylvania.html>

- [52] Total Energies: Co je to asfalt [online]. In: . [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: <https://totalenergies.cz/bitumen/co-je-asfalt>
- [53] ELIZABETH GAFFNEY. Streets and street paving: Co je to asfalt [online]. In: . [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: <http://www.elizabethgaffney.net/paving.html>
- [54] SIMI VALLEY ASPHALT. Asphalt history [online]. In: . [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: <http://www.simivalleyasphalt.com/id15.html>
- [55] D&G MACHINERY. History of asphalt concrete [online]. In: . [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: <https://www.dgmachinery.net/n1857704/History-of-asphalt-concrete.htm>
- [56] ASPHALT INSTITUTE. Asphalt Institute History [online]. In: . [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: <https://www.asphaltinstitute.org/about-us/asphalt-institute-history/>
- [57] WIRTGEN GROUP. History [online]. In: . [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: <https://www.wirtgen-group.com/en-us/company/voegele/history/1980s/>
- [58] PIXEL HORIZONS. Asphalt Hot Mix Plant for Roads [online]. In: . [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: <http://www.pixelhorizons.com/2013/03/asphalt-hot-mix-plant-for-roads-nov-6-1948-002/>
- [59] E&B PAVING INC. History [online]. In: . [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: <https://ebpaving.com/about-us/history/>
- [60] Tereza Brtníková Vliv výrobních teplot na obalovně na vlastnosti kameniva. Brno, 2018. 57 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [61] Bc. Patrik Zítka Problematika použití R -materiálu do asfaltových směsí. Brno, 2015. 108 s., 12s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [62] STAVEBNÍ TECHNIKA. Fliegl Asphaltprofi Thermo [online]. In: . [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: <https://www.stavebni-technika.cz/clanky/fliegl-asphaltprofi-thermo>
- [63] TVSTAV. Litý asfalt [online]. In: . [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: <https://tvstav.cz/clanek/6166-lity-asfalt>

- [64] BIG RENTZ. Types of Rollers Commonly Used in Construction Projects [online]. In: . [cit. 2021-12-24]. Dostupné z: <https://www.bigrentz.com/blog/types-of-rollers>
- [65] Bc. Luis Carlos Acuna Subia Vlastnosti asfaltových směsí typu SMA s R-materiálem. Brno, 2018. 78 s., 31 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Michal Varaus

11. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek č. 1: Vyjeté koleje [2]	11
Obrázek č. 2: Frakce kameniva [44]	15
Obrázek č. 3: Tvary zrn [45]	16
Obrázek č. 4: Kamenná moučka [46]	21
Obrázek č. 5: Těžba přírodního asfaltu [47]	23
Obrázek č. 6: Kamenné nástroje s asfaltem [48]	24
Obrázek č. 7: První zmínka o použití asfaltu [49]	24
Obrázek č. 8: Dehtová jezera na ranči La Brea [50]	25
Obrázek č. 9: První vrt na těžbu ropy [51]	27
Obrázek č. 10: Destilace asfaltu [52]	29
Obrázek č. 11: Pokládka asfaltové silnice v Paříži [53]	35
Obrázek č. 12: Příklad komunikace vybudované v roce 1929 [54]	36
Obrázek č. 13: Těžba asfaltu na jezeře Trinidad [55]	37
Obrázek č. 14: Přeprava asfaltu v dřevěných barelech [55]	37
Obrázek č. 15: Provádění asfaltové vrstvy na Pennsylvania Ave., Washington [55]	38
Obrázek č. 16: Příklad komunikace vybudované v roce 1929 [56]	39
Obrázek č. 17: Stroj na pokládku asfaltových vrstev, 1939 [57]	40
Obrázek č. 18: První finišer pro pokládku více jízdních pruhů najednou [57]	41
Obrázek č. 19: Obalovna 1948 [58]	42
Obrázek č. 20: Obalovna 1967 [59]	42
Obrázek č. 21: Finišer s 3D nivelací [57]	43
Obrázek č. 22: SMA a AC [8]	46
Obrázek č. 23: Drenážní koberec [9]	47
Obrázek č. 24: Šaržová obalovna [60]	51
Obrázek č. 25: Kontinuální obalovna [61]	53
Obrázek č. 26: Vozidlo na přepravu asfaltové směsi [62]	54
Obrázek č. 27: Moderní finišer s infračervenou kamerou na měření teploty [57]	56
Obrázek č. 28: Pokládka více finišery najednou [57]	58
Obrázek č. 29: Pokládka litého asfaltu [63]	59
Obrázek č. 30: Statický válec [64]	60

Obrázek č. 31: Pneumatikový válec [64].....	61
Obrázek č. 32: Vibrační válec [64].....	62
Obrázek č. 33: Schéma hutnění [38].....	64
Obrázek č. 34: Odplavení jemných částic	68
Obrázek č. 35: Sloupec sít	68
Obrázek č. 36: Pyknometr [40].....	71
Obrázek č. 37: Vakuová nádoba	73
Obrázek č. 38: Temperování.....	74
Obrázek č. 39: Schéma pojíždění kolem [41].....	75
Obrázek č. 40: Příklad upnutí nepřilnavé folie	76
Obrázek č. 41: Schéma zatěžovacího zařízení [42]	78
Obrázek č. 42: Schéma tvaru zkušební vzorku [42]	79
Obrázek č. 43: Schéma zatěžovacího zařízení [43]	80
Obrázek č. 44: Schéma centrovacího rámu [43].....	82
Obrázek č. 45: Sítový rozbor	84
Obrázek č. 46: Vážení propadů.....	84
Obrázek č. 47: Návrh optimálního množství pojiva pro směs ACP 22.....	88
Obrázek č. 48: Výpočet navážek pro směs ACP 22	89
Obrázek č. 49: Ohřátí kameniva	90
Obrázek č. 50: Míchání asfaltové směsi	91
Obrázek č. 51: Příprava formy na hutnění.....	92
Obrázek č. 52: Rázový zhutňovač	92
Obrázek č. 53: Chladnutí Marshallových těles	93
Obrázek č. 54: Popis těles.....	93
Obrázek č. 55: Návrh optimálního množství pojiva pro směs ACP 32.....	96
Obrázek č. 56: Výpočet navážek pro směs ACP 22	97
Obrázek č. 57: Nahřívání kameniva a asfaltu	105
Obrázek č. 58: Míchání směsi pro výrobu desek.....	106
Obrázek č. 59: Zahřívání směsi	106
Obrázek č. 60: Hutnění desek	107
Obrázek č. 61: Chladnutí zhutněné desky	108
Obrázek č. 62: Vyjetá kolej ACP 22/1.....	111

Obrázek č. 63: Vyjetá kolej ACP 32/2.....	110
Obrázek č. 64: Pila na řezání vzorků	111
Obrázek č. 65: Sušení vzorku.....	112
Obrázek č. 66: Lepení vzorku.....	112
Obrázek č. 67: Umístění do centrovacího rámu	112
Obrázek č. 68: Mrazová trhлина	114
Obrázek č. 69: Lomová plocha	114
Obrázek č. 70: Řezání klínků.....	115
Obrázek č. 71: Broušení klínů	116
Obrázek č. 72: Vysoušení klínů.....	116
Obrázek č. 73: Nalepená zkušební tělesa.....	117
Obrázek č. 74: Temperování těles	118
Obrázek č. 75: Uchycení tělesa do měřicího zařízení.....	119

12. SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1: Historie používání asfaltu [22]	26
Tabulka č. 2: Mezní teploty asfaltových směsí.....	50
Tabulka č. 3: Míra předhutnění směsi a koeficient nadvýšení v závislosti na použité mechanizaci [4].....	56
Tabulka č. 4: Minimální teploty při pokládce [38]	57
Tabulka č. 5: Minimální teplota v místě spoje dříve položené směsi [38]	58
Tabulka č. 6: Možné použití typu válců v jednotlivých fázích hutnění [4]	63
Tabulka č. 7: Rozměry těles [42].....	79
Tabulka č. 8: Rozměry těles [42].....	81
Tabulka č. 9: Přehled použitých těles	83
Tabulka č. 10: Souhrnný propad všech frakcí síty.....	85
Tabulka č. 11: Procentuální zastoupení jednotlivých frakcí pro směs ACP 22.....	86
Tabulka č. 12: Přiblížení k Fullerově parabole pro směs ACP 22.....	86
Tabulka č. 13: Procentuální zastoupení jednotlivých frakcí pro směs ACP 32.....	94
Tabulka č. 14: Přiblížení k Fullerově parabole pro směs ACP 32.....	94
Tabulka č. 15: Objemová hmotnost Marshallových těles ACP 22.....	99
Tabulka č. 16: Objemová hmotnost Marshallových těles ACP 32.....	99
Tabulka č. 17: Maximální objemová hmotnost Marshallova tělesa ze směsi ACP 22.	100
Tabulka č. 18: Maximální objemová hmotnost Marshallova tělesa ze směsi ACP 32.	100
Tabulka č. 19: Mezerovitost směsi	100
Tabulka č. 20: Vypočet navážky pro desku ze směsi ACP 22	103
Tabulka č. 21: Vypočet navážky pro desku ze směsi ACP 32	104
Tabulka č. 22: Míra zhutnění desek.....	108
Tabulka č. 23: Objemové hmotnosti desek.....	109
Tabulka č. 24: Hloubka vyjeté koleje	109
Tabulka č. 25: Výsledky WTS_{air} a PRD_{air}	111
Tabulka č. 26: Přehled nízkoteplotních vlastností	113
Tabulka č. 27: Rozměry klínů.....	117
Tabulka č. 28: Výsledky ze zkoušky	120
Tabulka č. 29: Skladba kameniva směsi ACP 22 VFK	122

Tabulka č. 30: čára zrnitosti směsi ACP 22 VFK.....	123
Tabulka č. 31: Skladba kameniva směsi ACP 32 VFK	124
Tabulka č. 32: čára zrnitosti směsi ACP 32 VFK.....	125
Tabulka č. 33: Cena kameniva směsi ACP 22.....	127
Tabulka č. 34: Cena kameniva směsi ACP 22 VFK.....	127
Tabulka č. 35: Cena kameniva směsi ACP 32.....	128
Tabulka č. 36: Cena kameniva směsi ACP 32 VFK.....	128

13. SEZNAM GRAFŮ

Graf č. 1: Čára zrnitosti navržené směsi ACP 22 a Fullerova parabola	87
Graf č. 2: Čára zrnitosti navržené směsi ACP 32 a Fullerova parabola	95
Graf č. 3: Závislost mezerovitosti na obsahu pojiva pro ACP 22.....	101
Graf č. 4: Závislost mezerovitosti na obsahu pojiva pro ACP 32.....	101
Graf č. 5: Závislost hloubky vyjeté koleje na počtu pojezdů.....	110
Graf č. 6: Závislost tahového napětí na teplotě	113
Graf č. 7: Závislost modulu tuhosti na frekvenci.....	121
Graf č. 8: Závislost fázového úhlu na frekvenci	121
Graf č. 9: Čára zrnitosti směsi ACP 22 VFK.....	124
Graf č. 10: Čára zrnitosti směsi ACP 22 VFK.....	126