



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební

Katedra silničních staveb

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

***Zhutňování asfaltových směsí***

*Compaction of Asphalt Mixes*

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: **Ing. Petr Mondchein, Ph.D.**

**Nikola Tancošová**

Praha 2016



#### Prohlášení

Prohlašuji, že zadanou bakalářskou práci na téma „Zhutňování asfaltových směsí“ jsem vypracovala samostatně, bez cizí pomoci s jedinou výjimkou a to poskytnutou konzultací s vedoucím bakalářské práce. Uvedla jsem veškerý seznam použité literatury a informačních zdrojů. Vše bylo provedeno v souladu s metodickým pokynem č. 1/2009 O dodržení etických principů v případě vysokoškolských státních závěrečných prací. Dále prohlašuji, že nemám žádné námítky pro užití této bakalářské práce, či její části.

V Praze dne .....

.....

Nikola Tancošová



#### Poděkování

Děkuji panu Ing. Petru Mondcheinovi Ph.D., za vedení mé bakalářské práce, rady připomínky, trpělivost a pomoc při jejím zpracování. V další řadě bych chtěla poděkovat všem pracovníkům silniční laboratoře Českého vysokého učení technického v Praze a to především Ing. Tereze Valentové, Bc. Adrianě Kotoušové, Bc. Janu Mastnému a Bc. Aleně Dočkalové.



## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou zhutnitelnosti asfaltových směsí a technologií pokládky tj. rozprostření a zhutnění. Úvodní kapitoly jsou věnovány procesu pokládky a zhutňování asfaltových směsí na stavbě za pomoci finišerů a válců. V praktické části jsou popsány vstupní materiály, návrh asfaltové směsi a výroba zkušebních těles a následné laboratorní zkoušky zkušebních těles. V závěru je provedeno porovnání výsledků třech vyrobených směsí a stanovení jejich zhutnitelnosti. Cílem této práce je ověřit metodiku stanovení indexu zhutnitelnosti asfaltové směsi a ukázat na vybraných vlastnostech směsi (objemová hmotnost, modul tuhosti, Marshallova zkouška) vliv hutnící energie na její chování.

## **Klíčová slova**

Zhutnitelnost asfaltové směsi, míra zhutnění, finišer, válec, moduly tuhosti, Marschallův pěch.



## Abstract

This bachelor thesis deals with the problems compactibility of asphalt mixes and technologies of laying ie. spreading and compacting. The first chapters are devoted to the process of laying and compaction of asphalt mixes on site with the help of finishers and rollers. The practical parts are described input materials, design and production of asphalt mix test specimens and subsequent laboratory tests of specimens. In the conclusion a comparison is made of results produced three mixes and determination of their compactibility. The aim of this work is to verify the methodology for determining the index compactibility asphalt mix and show a mixture of selected properties (density, modulus of rigidity, Marshall test) effects of compaction energy on their behavior.

## Key words

Compactions of Asphalt Mixes, rate of compaction, finisher, machine roller, modulus of rigidity, Marshalls' tamper.



## Obsah

1	Úvod .....	9
2	Míra zhutnění.....	9
3	Doprava směsi na stavbu .....	10
4	Rozprostírání asfaltových směsí.....	12
4.1	Podklad a klima při pokládce směsi .....	12
4.2	Ruční rozprostírání .....	13
4.3	Strojní rozprostírání .....	13
4.3.1	Finišery .....	13
4.3.1.1	Podvozek .....	14
4.3.1.2	Součásti finišeru .....	14
4.3.1.3	Předhutnění směsi finišerem.....	15
5	Hutnící prostředky.....	16
5.1	Statické válce s hladkými ocelovými běhouny .....	16
5.1.1	Základní charakteristiky statických válců s hladkými ocelovými běhouny.....	16
5.1.2	Druhy statických válců s hladkými ocelovými běhouny a jejich použití.....	18
5.2	Pneumatikové válce .....	18
5.2.1	Základní údaje a charakteristiky pneumatikových válců.....	18
5.2.2	Použití pneumatikových válců.....	20
5.3	Válce hutnící s dynamickými účinky.....	20
5.3.1	Vibrační válce .....	21
5.3.1.1	Základní údaje a charakteristiky.....	21
5.3.1.2	Druhy vibračních válců .....	23
5.3.1.3	Použití vibračních válců .....	24
5.3.2	Oscilační válce .....	25
5.3.3	Válce s kombinovanými dynamickými účinky .....	27
6	Vstupní materiály praktické části.....	28
6.1	Kamenivo.....	28
6.2	Asfaltová pojiva.....	29
7	Návrh asfaltové směsi .....	30
7.1	Množství kameniva a pojiva.....	30
8	Výroba zkušebních těles.....	31



8.1	Příprava .....	31
8.2	Hutnění Marschallovým pěchem .....	33
8.3	Hutnění Gyrátorem .....	34
8.3.1	Gyrátor .....	34
8.3.2	Zkušební tělesa .....	34
8.3.3	Míra zhutnění gyrátorem a požadavky .....	35
9	Zkoušky asfaltových směsí .....	35
9.1	Objemová hmotnost .....	35
9.1.1	Postup .....	35
9.1.2	Výpočet .....	36
9.2	Maximální objemová hmotnost .....	37
9.2.1	Postup .....	37
9.2.2	Výpočet .....	38
9.3	Mezerovitost .....	39
9.3.1	Výpočet .....	39
9.4	Tuhost .....	39
9.4.1	Postup .....	39
9.5	Stabilita podle Marshalla .....	42
9.5.1	Postup .....	42
9.5.1	Výpočet .....	43
10	Výsledky .....	45
10.1	Zhutnitelnost .....	46
10.2	Moduly tuhosti .....	47
10.3	Stabilita podle Marshalla .....	49
11	Závěr .....	50
	Použité zdroje .....	51
	Seznam obrázků .....	53
	Seznam tabulek .....	54
	Přílohy .....	55



## **1 Úvod**

Tato bakalářská práce nesoucí název *Zhutňování asfaltových směsí* se zabývá rozprostíráním a zhutněním asfaltových směsí. Každá vozovka má svojí životnost, správným návrhem směsi a následně jejím zhutněním lze kvalitu a životnost vozovky prodloužit.

Teoretická část patří řešerši v oblasti dopravy asfaltové směsi na stavbu, rozprostíráním asfaltové směsi za pomoci finišerů, které směs dokážou zhutnit až na 97% a následném dohutnění směsi za pomoci válců. Popsány jsou válce jak statické, pneumatikové tak i hutnicí s dynamickými účinky. Pro praktickou část se připravily tři směsi, které byly rozdílné v množství pojiva nebo v přidání těžného kameniva. Z každé směsi se vyrobilo 12 těles, rozdělené po dvojicích a každá dvojice byla zhutněná jinou hutnicí energií a to 5, 15, 25, 35, 50, 100 úderů z každé strany. Na zkušebních tělesech se provedly potřebné zkoušky a to objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost, mezerovitost, zhutnitelnost, moduly tuhosti a zkouška Marshallovi stability.

Cílem práce je zjistit, jaký vliv na zhutnitelnost bude mít větší množství asfaltového pojiva a přidání těžného kameniva.

## **2 Míra zhutnění**

Hutněním se snažíme docílit optimálních vlastností pokládané asfaltové směsi převážně z hlediska velikosti dopravního zatížení a klimatických podmínek. S přibývajícím mírou zhutnění se výrazně zvyšuje pevnost, tuhost, životnost asfaltové vrstvy či odolnost proti únavě. Zhutněním vrstvy je také ovlivněn povrch krytu vozovky a to především drsnost, rovinatost a odolnost proti ztrátě protismykových vlastností [1].

Konečné zhutnění směsi ovlivňuje:

Čára zrnitosti - čím je čára zrnitosti plynulejší, tím je zhutnitelnost snadnější,

Druh kameniva - drcené kamenivo vykazuje větší odpor k hutnění než kamenivo těžné,

Velikost max. zrna – hrubozrnné směsi jsou stabilní, avšak hůře zhutnitelné, u jemnozrnných směsí je tomu naopak,





Obsah pojiva – zhutnitelnost se zlepšuje se zvyšujícím množstvím pojiva, pouze však do určité hranice. Jakmile je většina vzduchovým mezer v kostře zaplněna není možné dál zhutňovat a může docházet ke snižování objemové hmotnosti zhutněné směsi.

Teplota směsi při hutnění – pokud se na stavbu směs dostane příliš vychladlá, nelze ji zhutňovat.

Špatnou zhutnitelností dochází k nedostatečné míře zhutnění. Závisí na ní kvalita a zároveň i životnost položené vrstvy vozovky. Jestliže je směs nedohutněná (vykazuje vysokou mezerovitost nebo nedostatečnou míru zhutnění), dochází v ní k předčasnému výskytu poruch, jako jsou trhliny, výtluky či hloubková koroze. Pak je vrstva náchylná na vnikání vody do struktury a rychleji degraduje, tudíž její životnost se razantně snižuje. Toto především platí u obrusných vrstev, které nesmí propouštět vodu (výjimkou je například asfaltový koberec drenážní) [2].

### **3 Doprava směsi na stavbu**

Z výroby na stavenišť se asfaltová směs dopravuje pomocí vozidel, jež mají kovové nebo vylechované bočnice a ložnou plochu. Dno i vnitřní stěny se musí postříkat prostředky, které brání nalepování směsi k podkladu. Používá se mýdlo nebo speciální roztoky nikoliv však nafta či benzín. Vozidlo musí směs chránit před znečištěním a vlivům klimatu a to plachtami, speciálními zákryty apod. Na ochlazení asfaltové směsi má vliv teplota okolního prostředí, vítr, déšť, vzdálenost nutná k přepravě směsi z obalovny na stavenišť a rychlost dopravy. Pokud tyto faktory neomezíme, dochází k nežádoucím změnám vlastností pojiva.



Obr. 3. 1 Tepelně izolovaný sklápěč MEILLER pro výstavbu silnic [3]



Není vhodné směs dopravovat do vzdáleností, kdy doba jízdy je delší než 2 hodiny. Používají se buď běžná nákladní vozidla, nebo speciální izolované korby. Běžná vozidla se používají do vzdáleností 50 km a uvažuje se u nich průměrná teplota ochlazení cca 10°C za hodinu. Dopravní vzdálenost u izolovaných vozidel může být větší než 50 km a ochlazení směsi je asi 5°C za hodinu. V důsledku nerovnoměrného ochlazení dochází na povrchu směsi do hloubky 30 až 50 cm ke vzniku ochlazené kůry, která je problematická při rozprostírání a hutnění směsi [4].

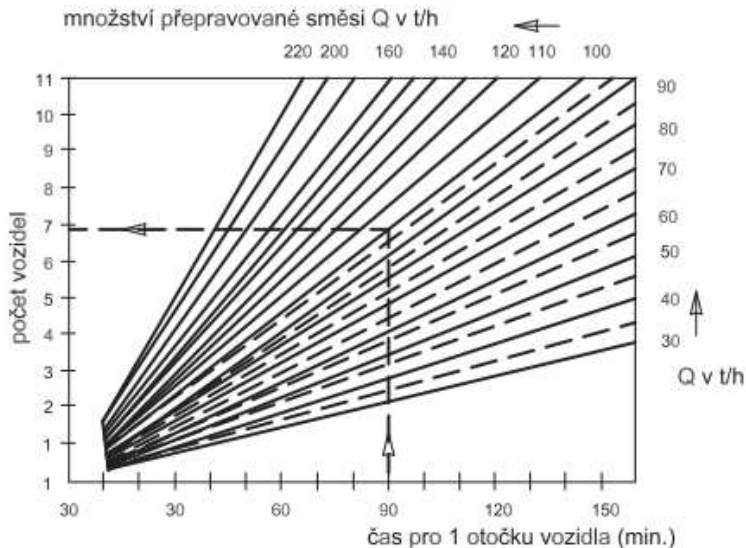
Je nutné předem stanovit počet dopravních prostředků, tak aby byla možná souvislá doprava směsi na stavbu a její pokládka. Počet vozidel  $n$  se stanoví pomocí tohoto vzorce [5]

$$n = \frac{t \cdot Q}{60 \cdot o} \quad (1)$$

kde

- Q množství přepravované směsi (t/h);
- t čas nutný pro jednu otočku dopravního prostředku (min);
- o kapacita dopravních prostředků (t)

nebo pomocí nomogramu (obr. 3. 2).



Obr. 3. 2 Nomogram pro stanovení počtu dopravních prostředků stejné kapacity (příklad) [7]

Dnes se používají vozidla s kapacitou větší než 20 tun, menší vozidla by se měla používat jen na malých staveništích nebo při krátkých dopravních vzdálenostech.



Dováženou směs musíme před rozprostřením vizuálně zkontrolovat, jestli odpovídá dané kvalitě. U použití nemodifikovaného asfaltu by měl ze směsi vycházet slabě modrý kouř a její barva by měla být zbarvená do černa. Pokud je kouř silně modrý až žlutý naznačuje to překročení přípustných teplot ve směsi a směs nemá dostatečnou soudržnost.

## 4 Rozprostírání asfaltových směsí

### 4.1 Podklad a klima při pokládce směsí

Podklad musí být dostatečně pevný a rovný. Zároveň musí být čistý a suchý popřípadě zavlhlý. Vlhkost podkladu způsobuje vznik páry a ta má za následek nedokonalé spojení vrstev. Je nutné, aby podklad byl s pokládanou směsí dobře spojený a nedocházelo k posunům a poruchám ve vrstvě. Asfaltové betony v podkladní vrstvě lze pokládat na jakýkoliv podklad. U krytu mají být asfaltové betony pokládány pouze na vrstvy stmelené asfaltem. Rovnost vrstvy musí odpovídat daným normám, nerovnosti by neměli být větší než 20 mm pod podkladními vrstvami a pod vrstvami krytů maximálně 10 mm dtto. Bližší údaje jsou v ČSN 73 6121 v kapitole 6. 4. 4 a TKP. Pokud je nerovnost větší, musí se před pokládkou nebo v jejím průběhu vyrovnat.

Směs se pokládá tehdy, když povětrnostní podmínky umožní řádné rozprostření, zhutnění a spojení s podkladem. Asfaltové směsi vyráběné za horka se nesmí pokládat za deště, sněžení a ani je-li na podkladu stojící voda či led nebo sníh. Teploty ve stínu by měli být v rozmezí 0 °C až 10 °C. Podle ČSN 73 6121 musí minimální teploty vzduchu odpovídat hodnotám v tabulce 4. 1 [6].

Tabulka 4. 1 Minimální teploty vzduchu (ČSN 73 6121)

Vrstva	při pokládce (°C)	Průměrná teplota za posledních 24 hod (°C)
Podkladní	±0	-
Ložní s nemodifikovaným pojivem	+3	-
Obrusná; ložní s modifikovaným pojivem	+5	+3
Obrusná do 30 mm; vrstva PA	+10	+5



Žádná směs by se neměla pokládat při rychlosti větru vyšší než 15 m/s (prudký vítr) [7]. Pokládat směs za účinků přímého slunečního záření je výhodné z hlediska zpomalení procesu ochlazování, avšak při pokládání tlustých vrstev je tento jev nežádoucí, proto je nutné hotovou vrstvu po zhutnění skrápět studenou vodou. Za chladného počasí je nutné, aby byla směs vyrobena a položena s nejvyšší přípustnou teplotou ve větší tloušťce a chránit ji při dopravě a následně při pokládce před ochlazováním. Použít finišer jedině ten, který umožňuje vysokou míru předhutnění.

## **4.2 Ruční rozprostírání**

Ruční rozprostírání se provádí tam, kde není možné použít strojní techniku. Mezi nevýhody tohoto rozprostírání patří nedokonalost zajištění stejného předhutnění, rovnoměrné teploty a rovnosti povrchu zpracovávané směsi. Směs by se měla z přepravníků vysypávat na podklad v menších hromadách a co nejrychleji rovnoměrně rozprostřít lopatami, které jsou namočené v mýdlovém roztoku nebo olejové emulzi, kvůli nalepování jemných částic. K rozhrabování použít dřevěná nebo kovová hrabla. Používat by se měla směs jemně až střednězrnná, aby se zamezilo segregaci. Po položení směsí je vhodné ji uzavřít nátěrem nebo kalovým zákrytem a poté použít lehké válce v první fázi hutnění [7]

## **4.3 Strojní rozprostírání**

Strojně se směsí rozprostírají převážně finišery s automatickým nivelačním zařízením. Je možné použít i dozery, grejdry a rozhrnovače, ale těmito stroji se v této práci nebudeme zabývat.

### **4.3.1 Finišery**

Technologicky se finišer dělí na [8]:

- rozprostírací a hutnicí část
- pohonnou a jízdnou část



Obr. 4. 1 Kolový finišer AFW 350 E/G



Obr. 4. 2 Pásový finišer AFT 350 E/G

#### 4. 3. 1. 1 Podvozek

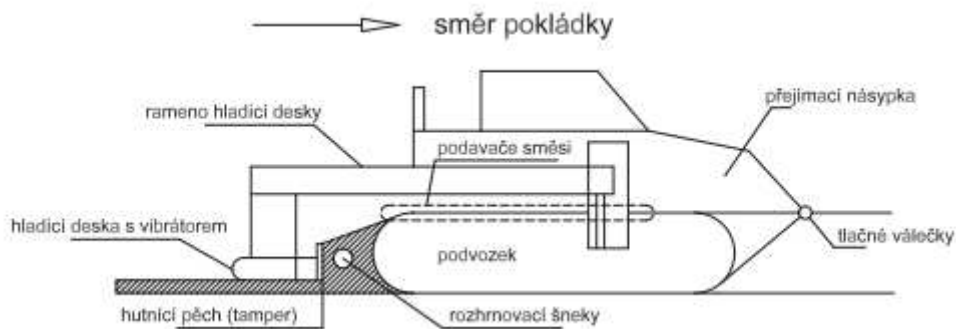
Podvozek finišeru je buď kolový, nebo pásový. Kolový podvozek je vhodný pro pracovní šířky do 8 m, pásový pro větší [8]. Pásový podvozek, má tlak pásů přibližně 0,05 – 0,15 MPa tudíž se hodí pro použití na málo únosné podklady, rychlost takového finišeru je do 5 km/h. [9]. Výhodou pásů je větší stabilita finišeru avšak menší pohyblivost, u kolového podvozku je tomu naopak, jeho velkou nevýhodou je však nutnost pevného podkladu. Rychlost finišeru s koly je až do 20 km/h.

#### 4. 3. 1. 2 Součásti finišeru

Finišer musí mít dostatečně silný motor (převážně diesellový), aby mohl i ve stoupání tlačít vozidlo dopravující směs a to přes konstruované válečkové nárazníky, které jsou součástí přijímací násypky. Ta musí mít dostatečnou kapacitu, aby pokryla přestávky v dodávce směsí,



aniž by se přerušila pokládka. Finišer je opatřen podavačem směsi z kovového pásu. Před hladící deskou je umístěn šnekový rozhrnovač s automaticky ovládanou rychlostí pro regulaci množství dodávané směsi. Hladící deska je se zbytkem finišeru spojena buď pevně, což vede k přenášení nerovností ze stroje na podklad nebo kloubově. Hladící deska je opatřena hutnicím zařízením, které pokládanou směs předhutňuje. Velikost předhutnění závisí na dynamickém účinku, hmotnosti, sklonu a velikosti hladící desky a také na rychlosti pokládky, tloušťce vrstvy a na vlastnostech směsi. Hutnicí zařízení je obvykle tvořeno vibračním zařízením desky nebo hutnicími pěchy či kombinací těchto zařízení [7].



Obr. 4. 3 Hlavní části finišeru pro pokládku hutněných asphaltových úprav

Finišer s automatickým nivelačním zařízením je složen ze snímače podélné nivelace, jenž se pohybuje po předem dané linii. Když finišer najede na nerovnost, tato informace se vyšle do snímače a z něj do ovládacího zařízení. To způsobí pohyb ramen hladící desky a tím se změní nájezdový úhel desky. Dojde k vychýlení rovnováhy a tím se změní výška povrchu pokládané vrstvy, případně i změna tloušťky pokládané vrstvy a tak nedochází ke kopírování nerovnosti.

#### 4. 3. 1. 3 Předhutnění směsi finišerem

S předhutněním směsi úzce souvisí kvalita hotového díla. Finišery pokládající směs bez vibrace dosahují míry předhutnění cca 80 – 85 % zatímco finišery používající dohutňovací zařízení dosahují až 85 – 95 % někdy až 97 %. Je velice vhodné dosáhnout při pokládání asphaltové směsi vysoké míry zhutnění a to z těchto důvodů:

- snižují se zhutňovací práce pomocí válců, může odpadnout počáteční fáze hutnění;
- snížení poruch způsobené válcováním, válce mohou na položenou směs najíždět dříve za vyšších teplot;
- zlepšení tuhosti a rovnosti vrstvy.



Dále je důležité, aby nenarůstala rychlost finišeru, jelikož tak dochází ke snížení míry předhutnění. Při vyšší frekvenci vibrace hladící desky dochází ke zvýšení odstředivého momentu a tak se zvyšuje míra předhutnění totéž platí i pro hutnicí pěch.

## 5 Hutnicí prostředky

### 5.1 Statické válce s hladkými ocelovými běhouny

Při použití těchto válců pro hutnění, dochází v hutněné vrstvě působením běhounů ke vzniku smykovému napětí. Jestliže velikost těchto napětí je přibližně stejná jako smyková pevnost pokládané směsi, dochází tak k pohybu jednotlivých zrn a společně za pomoci tlaku k jejich těsnějšímu uspořádání.

Tlak běhounů je závislý na tuhosti a míře stlačení hutněné vrstvy. Tlak lze spočítat ze vzorce [5]:

$$p = \frac{SLZ}{\sqrt{\Delta h * d}} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

kde je

SLZ statické lineární zatížení běhounem (N/mm);

$\Delta h$  stlačení vrstvy běhounem (mm);

d vnější průměr běhounu (mm).

Při hutnění těmito válci vznikají jak svislé síly tak i vodorovné. Ty mohou být příznivé nebo nepříznivé, podle toho jestli je běhoun poháněný nebo nepoháněný. U poháněného běhounu vodorovná síla působí proti směru jízdy a tak dochází k tlačení směsi dozadu pod běhounem což je z hlediska kvality velice příznivé. Ovšem u nepoháněného běhounu působí vodorovná síla ve směru jízdy a směs je hrnuta před sebou. Statické válce lze použít pouze do tloušťek 80 až 100 mm, poněvadž jejich hloubkový hutnicí účinek je malý [10].

#### 5.1.1 Základní charakteristiky statických válců s hladkými ocelovými běhouny

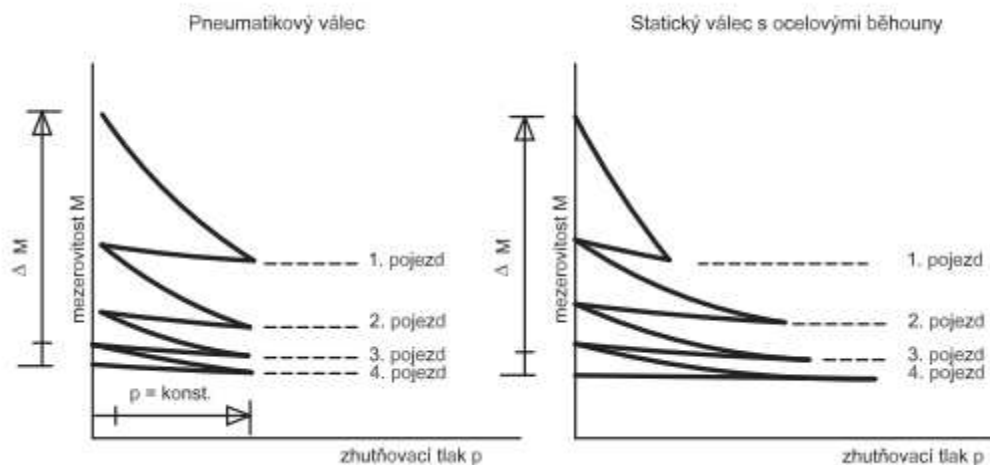
Podle celkové hmotnosti válce lze posoudit jeho kapacitní a technické možnosti.

Tyto válce jezdí obvykle rychlostí 5 km/h, při hlazení může být jejich rychlost vyšší. Jejich využití je možné do sklonů až 15%.

Mezi důležité faktory výběru válce patří jeho rozměry (šířka, průměr) ty ovlivňují jeho vhodnost a účinnost. Běhouny s menším průměrem dosahují větší míry zhutnění, při použití běhounů



s větším průměrem jsou splněny požadavky na rovnost povrchu hutněné vrstvy. Úzké běhouny tvoří podélné trhliny a rýhy a širokými běhouny vzniká nestejná míra zhutnění v hutněném pruhu.



Obr. 5. 1 Vliv stlačení vrstvy na velikost zhutňovacího tlaku

Mezi další základní charakteristiky patří statické lineární zatížení (N/mm), které poukazuje na zhutňovací účinnost válce. Vypočítá se jako podíl zatížení běhounem (N) a šířky běhounu (mm). Pomocí koeficientu účinnosti běhounu  $C_w$ , který vyjadřuje zhutňovací účinnost, se stanoví přesněji i vhodnost běhounu z hlediska poruch na hutněné ploše. Hodnota  $C_w$  se vypočítá:

$$C_w = \frac{P}{l \cdot d} = \frac{SLZ}{d} \quad [N/mm^2] \quad (3)$$

kde

P zatížení běhounem (N);

l šířka běhounu (mm);

d vnější průměr běhounu (mm);

SLZ statické lineární zatížení běhounem (N/mm).

S rostoucí hodnotou  $C_w$  se zvětšuje zhutňovací účinnost, avšak větší je také možnost hrnutí směsi běhounem. Proto by tato hodnota u tandemových válců neměla být větší než 0,025 [11].

Na kvalitu hutnění má vliv konstrukční uspořádání válce z hlediska možnosti řízení stroje (pevný - kloubová rám, řízení vpředu – vzadu) převážně ve směrových obloucích.





### 5. 1. 2 Druhy statických válců s hladkými ocelovými běhouny a jejich použití

Tříběhounové dvouosé válce dosahují obvykle celkové hmotnosti 10 t až 16 t, jejich hlavním znakem je statické lineární zatížení velkých zadních běhounů (cca 40 N/mm až 80 N/mm) a menší zatížení předního běhounu který je obvykle nepoháněný, zadní osa má cca 60% hmotnosti válce a přední cca 40% hmotnosti válce. Průměry běhounů jsou v rozmezí 1 400 mm až 1 800 mm u zadních běhounů, jejich šířka dosahuje 400 mm až 600 mm, koeficient účinnosti  $C_w$  je od 0,025 N/mm<sup>2</sup> až 0,050 N/mm<sup>2</sup>. Zatímco přední běhouny dosahují průměru 800 mm až 1 250 mm, šířky 1 000 mm až 1 400 mm a koeficientu účinnosti  $C_w$  0,018 N/mm<sup>2</sup> až 0,036 N/mm<sup>2</sup> [9]. Nevýhodou těchto válců je velká přepravní hmotnost, proto se v současnosti málo využívají. Je obtížné s nimi dosáhnout rovnoměrného zhutnění po celé ploše.

Tandemové dvouosé válce bez vibračního zařízení se používají jen zřídka. Jejich hmotnost se pohybuje převážně okolo 8 t někdy až 15 t. Rozměry a zatížení předního a zadního běhounu jsou přibližně stejné. Průměr bývá 800 mm až 1 600 mm, nejčastěji 1 000 mm až 1 600 mm o šířce 1 000 mm až 2 000 mm a zatížení cca 20 N/mm až 50 N/mm [9].

Tříosé válce se hlavně používaly v závěrečné fázi hutnění. Jejich výhodou bylo vyrovnaní nerovností.

## 5. 2 Pneumatikové válce

### 5. 2. 1 Základní údaje a charakteristiky pneumatikových válců

Tyto válce působí vždy stejně velkými nízkými tlaky, jejichž velikost je dána typem pneumatiky, velikostí kola a tlakem v pneumatice. Při hutnění nedochází k hrnutí směsi a netvoří se trhliny, jelikož vznikají vodorovné síly. Pokud dojde ke vzniku trhliny, lze ji tímto typem válců vyhladit. Povrchová pevnost pokládané vrstvy a odolnost proti vodě je zvýšena vlivem hnětacího účinku, který příznivě působí na uspořádání jednotlivých složek asfaltové směsi na povrchu hutněné vrstvy.

Mezi největší výhody pneumatikových válců je možnost změny tlaku vzduchu v pneumatikách (0,2 MPa až 0,9 MPa) čímž dochází ke stejnoměrnému zhutnění plochy. Těžké pneumatikové válce dokážou hutnit vrstvy o tloušťce až 200 mm, jejich hloubkový účinek se odvíjí od dotykového tlaku, ale i od velikosti dosedací plochy pneumatiky. Pro hutnění asfaltových vrstev se používají válce o celkové hmotnosti 5 t až 35 t s 5 koly až 11 koly. Optimální pracovní



rychlost je cca do 6 km/h, při hlazení až 10 km/h. Pneumatikové válce se používají ve větších sklonech než statické válce s hladkými ocelovými běhouny [7].



Obr. 5. 2 Pneumatikový válec Dynapac CP274

Základní kapacitní možnosti a zhutňovací účinnost je možno obvykle posoudit z celkové hmotnosti. Se zvyšujícím zatížením kola obvykle narůstá i zhutňovací efekt nejen mírou zhutnění, ale především hloubkovou účinností. Toto je závislé na použitém typu pneumatiky. Běžně používané typy pneumatik o velikosti 11,00 x 20 lze doporučit zatížení kola od 15 kN až 25 kN, pro hlavní fázi hutnění až 30kN [7].

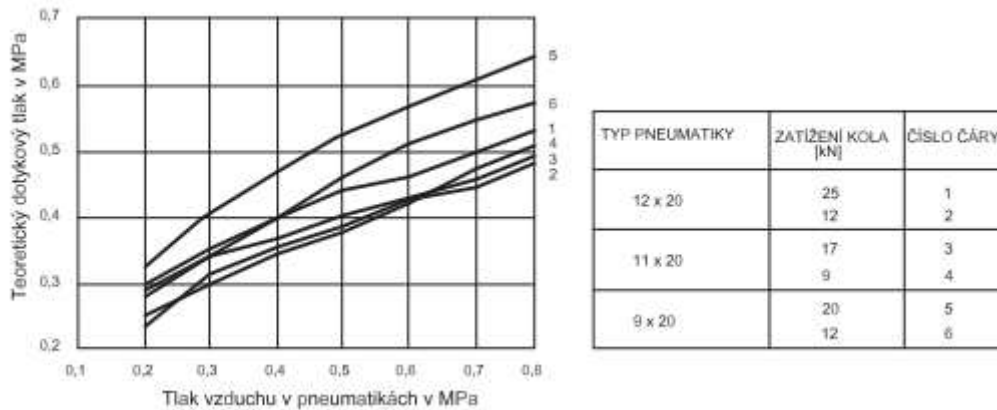
Na míru zhutnění a rovnost pokládané vrstvy má vliv i způsob zavěšení kol, nejvhodnější je tzv. izostatické zavěšení kol, které zaručuje rovnoměrné zatížení všech kol. Takto zavěšené pneumatikové válce se hodí na soudržné zeminy.

Pracovní šířka pneumatikového válce ovlivňuje jeho výkon, je v rozmezí 1,0 m až 2,7 m. Šířka pneumatiky ovlivňuje hloubkovou účinnost válce, čím širší pneumatika tím větší tloušťku lze zhutňovat. Optimální pracovní rychlost by měla být v rozmezí 3 km/h až 5 km/h, u hlavní fáze hutnění 4 km/h až 6km/h a pro hlazení 5km/h až 10 km/h. V praxi se obvykle díky narůstající tuhosti hutněné vrstvy rychlost zvyšuje [7].

Další faktor ovlivňující míru zhutnění a tudíž i kvalitu položené vrstvy je tlak v pneumatikách. Čím je tlak v pneumatikách vyšší, tím je vyšší i teoretický dotykový tlak a také míra zhutnění. Avšak pokud je tlak v pneumatice moc velký, dochází k boulení pneumatiky a vzniká možnost bočního vytlačování hutněné směsi a tvoření vln. Optimální tlak v pneumatikách je závislý i na jejich typu, na druhu hutněné směsi, na teplotě a na tloušťce vrstvy. Pro nejčastěji používaný typ pneumatik, jejichž rozměry jsou 11,00 x 20 je tlak v rozmezí od 0,4 MPa až 0,6 MPa.



Teoretický dotykový tlak se vypočítá jako podíl zatížení kola a odpovídající velikosti dosedací plochy pneumatiky na tuhém podkladu (lze určit z návrhových grafů výrobce). Optimální velikost teoretických dotykových tlaků jsou pro hutnění tenkých vrstev krytu od 0,3 MPa až 0,5 MPa a pro tlusté a dostatečně stabilní vrstvy v rozmezí 0,4 MPa až 0,7 MPa [9].



Obr. 5. 3 Závislost teoretického dotykového tlaku na tlaku vzduchu a typu pneumatiky

### 5. 2. 2 Použití pneumatikových válců

Tyto válce je velmi vhodné použít při počáteční fázi hutnění, kdy teplota převyšuje obvykle 100 °C a viskozita směsi je nízká, především to platí u směsí, které nejsou příliš předhutněny finišerem. Pneumatikové válce mohou najíždět hned za finišer (tzv. metoda „hot and dry“) bez ohledu na teplotu, aniž by vznikaly trhliny a docházelo k hrnutí hutněné směsi. V praxi se ukázalo, že je vhodné pneumatiky ohřívat infrazářiči, aby nedocházelo k ulpívání asfaltové směsi na povrchu pneumatik. Hodí se i na závěrečnou fázi hutnění (uhlazování povrchu), je však nutné je nasadit včas a mít správně nahuštěné pneumatiky [12], [13].

U směsí obtížně zhutnitelných není přínosné, aby byly pneumatikové válce použity v hlavní fázi hutnění kvůli špatnému dosažení vysoké míry zhutnění.

S těmito válci se doporučuje kombinovat válce vibrační (oscilační). Nehodí se na hutnění spojů.

### 5. 3 Válce hutnicí s dynamickými účinky

Do této kategorie patří válce vibrační, oscilační nebo hutnicí kombinovanými dynamickými účinky. Jsou efektivnější než válce statické a jejich využití v praxi převyšuje 90%. V pokládání vrstev dochází díky kmitání ke snížení vnitřního tření směsi a tak může dojít k lepšímu uložení i



při menším zatížení běhounu, tudíž je celková hmotnost válce snížena až 3x při zachování stejného zhutňovacího efektu, zvětší se i hloubkový účinek a rychleji se dosáhne vysoké míry zhutnění. Je důležité upozornit, že dynamické hutnění je náročné jak technologicky tak i odborností obsluhy.

### 5. 3. 1 Vibrační válce

#### 5. 3. 1. 1 Základní údaje a charakteristiky

Hlavním prvkem je vibrační běhoun, který kmitá nahoru a dolů a tak dochází ke snižování vnitřního tření směsi a zlepšují se podmínky pro zhutňování díky působení měnícího se tlaku. Proto vibrační válce mají statické lineární zatížení běhounu jen asi 20 N/mm až 35 N/mm, pro dobře zpracovatelné směsi dokonce jen 15 N/mm až 30 N/mm [7]. Jednou z hlavních výhod je hloubkový účinek, který umožňuje hutnit vrstvy o tloušťce až 300 mm a i směsi obtížně zhutnitelné. Oproti statickým válcům je požadovaná míra zhutnění dosažena při menším počtu pojezdů, výhodou je i možnost použití těchto válců ve velkých sklonech a široký rozsah optimálních teplot hutnění. Pokud dojde k nasazení vibračních válců v nevhodnou dobu, dochází tak jednodušeji k závadám na hutněné ploše v porovnání se statickými válci.



Obr. 5. 4 Kloubový vibrační válec AV 130 X Ammann

Základní charakteristiky jsou stejné jako u statických válců s hladkými ocelovými běhouny doplněny o koeficient účinnosti běhounů  $C_w$  ( $N/mm^2$ ), jímž se vypočítá potřebná zhutňovací účinnost a to takto [7]:



$$C_w = k_0 * \frac{P}{l*d} \quad (4)$$

kde

P      zatížení běhounu (N);

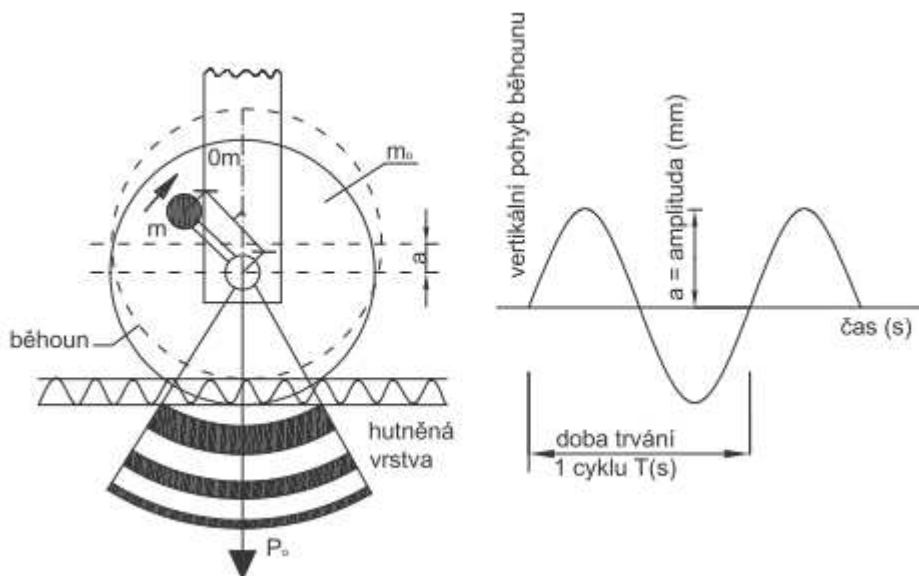
l      šířka běhounu (mm);

d      vnější průměr běhounu (mm);

k<sub>0</sub>    dynamický faktor; pro běžné typy válců je podle dřívějších údajů Viziho [14] [15],

k<sub>0</sub> = 1,5 až 1,8 může dosahovat i hodnoty vyšší a to až 3 (vibrační běhouny tahačových válců). Takové hodnoty uvádějí i výrobci [15].

Dále se udává optimální rychlost hutnění a to obvykle v rozmezí 3km/h až 6 km/h. Frekvence vibrace n, jedná se o počet vibračních cyklů za časovou jednotku udáván v Hz (obrázek). Frekvenci u vibračních běhounů lze měnit, nejčastěji dosahuje hodnot 25 Hz až 60 Hz, může být i vyšší [10]. Nejvhodnější je pro hutnění taková frekvence, která vyvoluje rezonanční efekt v hutněné vrstvě. Nejčastěji to bývá hodnota vyšší než 40 Hz až 45 Hz. Frekvence může být i menší v souvislosti s velikostí amplitudy a jízdní rychlostí válce, ale menší než 30 Hz se nedoporučuje. U vibračních válců je důležitá amplituda vibrace, jež je definována jako polovina svislého pohybu vibrujících běhounů (obrázek). Větší hutnicí síly dosáhne válec s větší amplitudou. Velikost musí být optimální, aby při hutnění nedocházelo k tvoření nežádoucích vln, trhlin i dalších poruch. Obvykle dosahuje hodnoty v rozmezí 0,2 mm až 0,8 mm (výjimečně až 1,0 mm). Její velikost může usnadnit či zhoršit jízdu válce ve stoupání vpřed a vzad. Na velikosti frekvence vibrace (Hz), rotující hmoty (kg) a excentricity (m) závisí odstředivá síla běhounu (N) – (obr 5. 4)



- $m$  nevýstředná rotující hmota (kg)
- $r$  excentricita (m)
- $n$  frekvence vibrace,  $n = 1/T$  (Hz)
- $m_0$  vibrující hmota běhounu (kg)
- $a$  amplituda vibrace (m nebo mm)
- $o_m$  moment nevýstředně rotující hmoty;  $o_m = m \cdot r$  (kg\*m)
- $P_0$  odstředivá síla;  $P_0 = m \cdot r \cdot 4 \cdot \pi \cdot n^2$  (N)

Obr. 5. 5 Základní údaje a principiální schéma k běhounům s klasickou – neřízenou vibrací

### 5. 3. 1. 2 Druhy vibračních válců

Nejčastěji se používají válce tandemové dvouosé vibrační s hmotností 2 t až 14 t s velikostí lineárního statického zatížení 10 N/mm až 35 N/mm. Mají přibližně stejně velký přední i zadní běhoun. Koeficient účinnosti běhounu  $C_w$  (statický, bez dynamického faktoru) je obvykle 0,015 N/mm<sup>2</sup> až 0,030 N/mm<sup>2</sup>. Tyto válce patří k nevhodnějším zhutňovacím prostředkům asfaltových úprav, výhodné jsou s oběma vibrujícími a poháněnými běhouny [7].

Dále nejčastěji používané jsou vibrační válce ručně vedené o hmotnosti do 1,5 t s pracovní šířkou do 1,0 m. Pro snazší řízení jsou někdy opatřeny pomocným řídicím kolem. Mohou mít jeden vibrující běhoun nebo dva, válce se dvěma vibrujícími běhouny dosahují větší zhutňovací účinnosti spřažením dvou souběžně rotujících hřídelí s budiči vibrace, a to s fázově posunutým



účinkem. V praxi se nejvíce hodí na práce malého rozsahu nebo tam, kde nelze použít větší válce. Běhouny je nutné skrápět, aby nedocházelo k nalepování směsi.

Méně často se pracuje s vibračními motorovými tahačovými válci, jež se skládají vpředu ze širokého vibračního běhounu a vzadu z dvou tažných kol buď z pneumatik (výjimečně používané, jen pro podkladní vrstvy) nebo hladkých ocelových běhounů.

### 5. 3. 1. 3 Použití vibračních válců

Jelikož u vibračních válců je více charakteristik (frekvence vibrace, amplituda) oproti válcům statickým, jejich použití je složitější. Doporučené údaje jsou uvedeny v tabulce 5. 1.

Tabulka 5. 1 Souhrnné doporučené údaje pro hutnění vibračními válci [7]

Zhutnitelnost směsi	Velmi lehce, lehce a středně těžce zhutnitelné směsi			Polotěžce, těžce a velmi těžce zhutnitelné směsi		
Tloušťka vrstvy (mm)	>60	40 - 60	20 - 40	>60	40 - 60	20 - 40
Statické lineární zatížení (N/mm)	10 - 25			20 - 35		
Frekvence (Hz)	>40			>40 (30)		>40
Amplituda (mm)	0,4 - 0,8	0,3 - 0,5	(0,2) 0,3 - 0,5	0,4 - 0,8 (1,0)	0,4 - 0,8	0,4 - 0,8 (0,3 - 0,5)
Rychlost válce při hutnění (km/h) <sup>1)</sup>	4 - 6			3 - 5		
Max. počet pojezdů s vibrací	8	6	6	10	8	6

**Poznámka:**

1) Maximální přípustnou rychlost pojezdu nutno upřesnit s ohledem na frekvenci vibrace a tloušťku hutněné vrstvy (obr.)

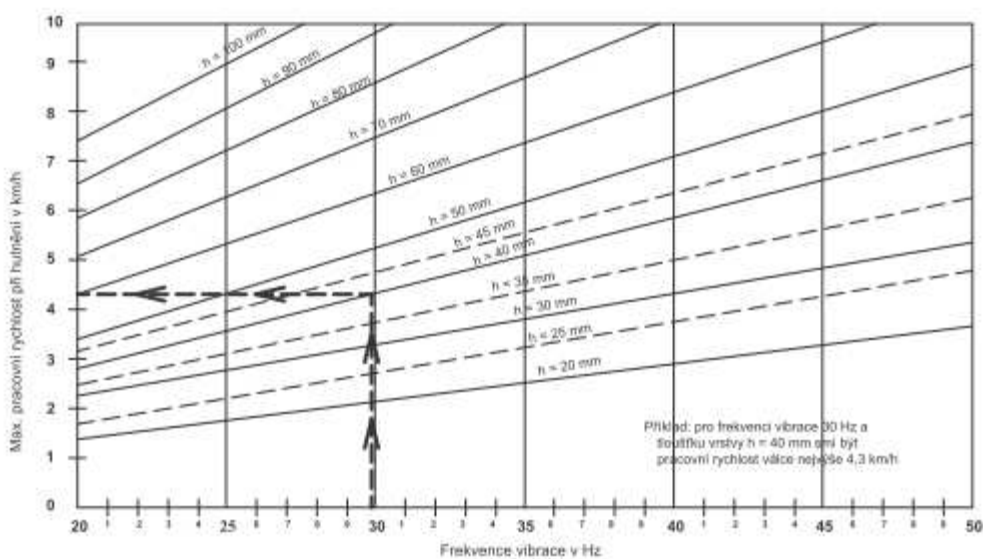
2) Počet pojezdů s vibrací u směsi s vysokým obsahem hrubého drceného kameniva (směsi SMA apod.) bývá v praxi někdy nutné více omezit, aby nedocházelo k poškození zrn. Např. u směsi SMA 11 se doporučují jen 3 pojezdy.

V průběhu hutnění je nutné dodržet pár zásad a to především tyto:

Při hutnění lehce zhutnitelných a tenkých vrstev použít vyšší frekvenci s malou amplitudou a u obtížně zhutnitelných a tlustých vrstev naopak amplitudu zvýšit (u takovýchto vrstev je možné frekvenci vibrace zmenšit). Vibraci je nutné zapnout, až po rozjezdu válce, nikoliv když válec stojí na místě. Na začátku hutnění, když pokládána směs má vysokou teplotu je možné zvýšit amplitudu a snížit frekvenci tak, aby se přiblížila rezonanční frekvenci hutněné směsi, avšak



nesmí docházet ke vzniku trhlin. Postupně dochází ke zhutňování a ochlazování směsi, proto by se měla frekvence zvyšovat a amplituda zmenšovat. Tohoto je možné dosáhnout při použití automatické regulaci frekvence a amplitudy. Dochází tak i ke snížení poškození hutněné vrstvy. Rychlost válce musí být konstantní v souladu s frekvencí vibrace a tloušťkou pokládané vrstvy, obvykle to bývá 3 km/h až 6 km/h [10]. Pro zjištění maximální přípustné rychlosti je možné použít nomogram na obr. 5. 5



Obr. 5. 6 Nomogram pro určení max. pracovní rychlosti při hutnění vibračním válcem (h = tloušťka vrstvy pro zhutnění)

Jelikož textura vrstvy se uzavírá, poslední jízdy by měly být bez použití vibrace, doporučují se i první pojezdy po rozprostřené směsi bez vibrace. Není vhodné použít vibrační válec se zapnutou vibrací na tenké vrstvy pokládané na tvrdé podklady, jelikož dochází k odražení vlny vibrace a vzniká tu možnost poruch v hutněné vrstvě, pak u otevřených typů směsí, drenážních koberců a pro vlačování zdrsňovacího kameniva.

### 5. 3. 2 Oscilační válec

Je to takový válec, který má alespoň jeden běhoun s oscilací. Do hutněné vrstvy jsou vnášeny tangenciální síly, jež vyvozují smyková napětí (obr. 5. 6). Dochází tak k pohybu dotkových bodů vpřed a vzad (tzv. tangenciální amplituda). Běhoun zůstává stále v kontaktu s hutněnou vrstvou oproti vibračnímu válci. Hutnící účinek je veliký, jelikož hutnící síla má stejný směr a velikost a míra zhutnění a objemová hmotnost stále narůstá. Nevznikají nežádoucí účinky na

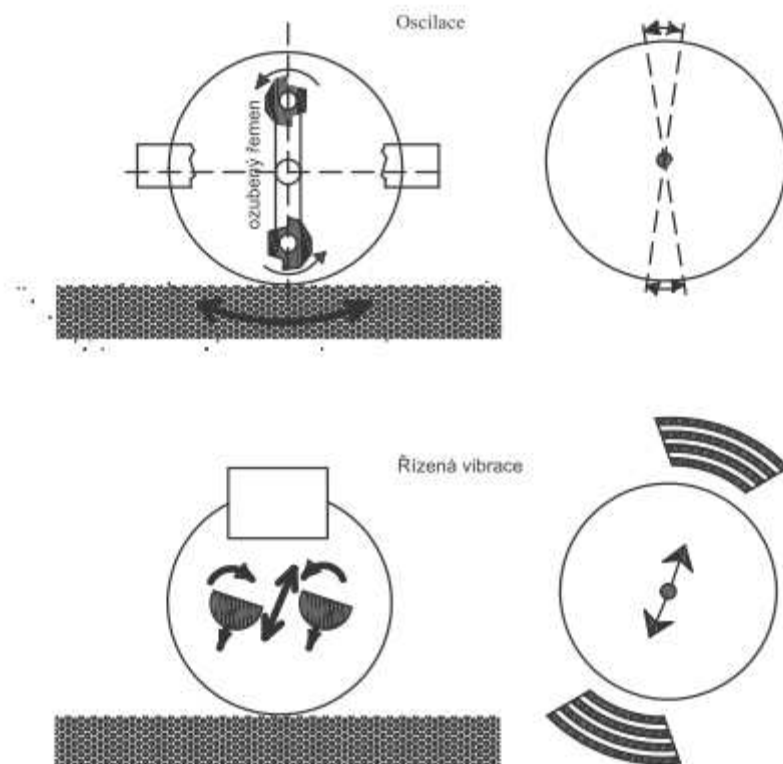




okolí jako přehutnění směsi spojené s „nakypřením“. Oproti vibračním válcům je počet pojezdů nižší. Může se hutnit i za nižších teplot, aniž by docházelo k poškození povrchu jako u použití vibrace.

Obvykle bývají součástí tandemových válců. U oscilačních válců jsou charakteristiky stejné jako u vibračních rozšířené o vysokou tangenciální amplitudu (nad 1 mm), nižší frekvenci a vysokou odstředivou sílu [54]. Příznivě působí možnost regulace velikosti amplitudy, která se mění podle tuhosti podkladu, otáčivý úhel oscilace se s rostoucí tuhostí též zmenšuje.

Mezi další výhody oscilačních válců patří delší životnost, a pohodlnější prostředí pro obsluhu (kmitání, hlučnost), jsou vhodné k aplikaci pro všechny druhy směsí (běžně používané směsi i těžce zhutnitelné), tenké vrstvy pro hutnění spojů, hutněné na mostech či v místech výskytu inženýrských sítí. Hodí se při hutnění v hlavní i v závěrečné fázi. Oproti vibračním válcům, kdy doporučená dolní hranice teplot je okolo 90 °C až 100 °C, u oscilačních válců je to cca 80 °C. Nevýhodou je větší opotřebení běhounu, menší hloubkový účinek a jsou citlivější na druh a teplotu hutněné směsi v porovnání s vibračním běhounem.



Obr. 5. 7 Konstrukční a funkční princip oscilace a řízení vibrace [7]



### 5. 3. 3 Válce s kombinovanými dynamickými účinky

Jedná se o tandemové válce, které používají jak vibraci (svislé účinky) tak i oscilaci (vodorovné účinky). Dělí se na dvě skupiny podle konstrukce pracovního ústrojí:

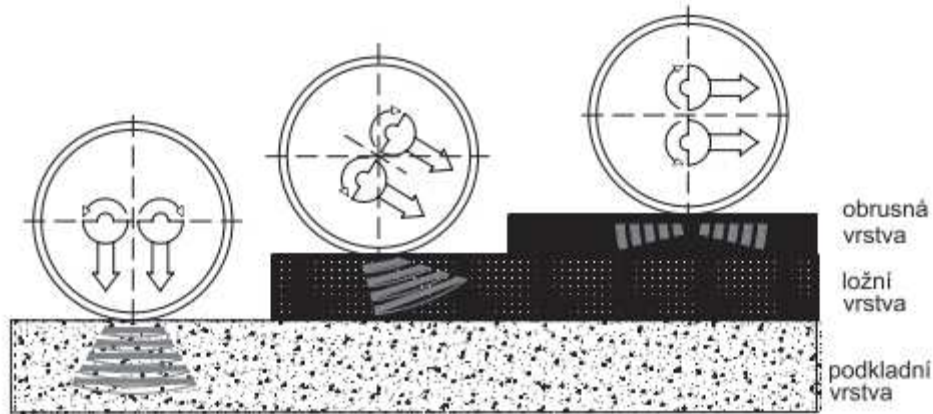
- válce s jedním vibračním a jedním oscilačním běhounem;
- válce s jedním vibračním běhounem a s jedním speciálním, který umožňuje excentrický vibrační účinek tak i změnu směru vibrace.

Válce patřící do první skupiny mohou hutnit jak vibrační válce nebo jak oscilační a využívat tak jejich přednosti. Lze u nich zapnout současně vibraci i oscilaci (obr. 5. 7)



Obr. 5. 8 Schéma válce první skupiny s kombinovaným dynamickým účinkem

Do druhé skupiny patří válce nebo běhouny umožňující řízené kmitání, pokud je hutnicí síla konstantní lze měnit její směr v rozmezí od 0° až po 90° a následně působit vertikálními i horizontálními účinky (obr. 5. 8). Téměř ve všech případech je toto řízeno automaticky podle zhutnitelnosti materiálu, tuhosti a tloušťky hutněné vrstvy a podle vlastností podkladu, ruční nastavování je vhodné na mostech atd. Vertikální účinky se hodí do ložných a podkladních vrstev a horizontální u méně tuhých a tenkých obrusných vrstev [7].



Obr. 5. 9 Princip a použití usměrněné vibrace v rámci systému Asphalt Manager [53]

Dále se mohou k hutnění použít válce kombinované nebo vibrační desky a pěchy.

Válce kombinované využívají výhody pneumatikových, hladkých statických i vibračních válců, avšak horší je u nich najít optimální rozmezí teplot hutnění. Vibrační desky a pěchy se používají při hutnění asphaltových úprav malého rozsahu a jen doplňují zhutňovací sestavy válců.

## **6 Vstupní materiály praktické části**

### **6.1 Kamenivo**

Asfaltová směs je vyplněna kamenivem, jež tvoří kostru a přenáší namáhání. Směs je tvořena zrny různých frakcí, jejichž roztřídění probíhá pomocí sít s čtvercovými otvory o daných rozměrech. Směs se přes síta prosévá a tím se stanovuje velikost kameniva (obr. 6. 1). Kamenivo může být rozděleno podle původu na přírodní, umělé nebo recyklované. Dle vzniku se dělí na drcené, těžené, předrcené či drcené těžené. Patří sem i filer, jedná se o kamennou moučku, která zlepšuje přilnavost pojiva ke kamenivu.

V této práci bylo použito kamenivo především ze společnosti Kámen Zbraslav. Tato společnost byla založena v roce 1994, dnes má v provozu pět lomů a tři štěrkopískovny, od roku 1997 rozšířila svůj obor působnosti i do dopravy betonových směsí a provozuje 6 betonáren.

Pro tuto práci byla použita velikost kameniva 0/4, 0/8, 4/8, 8/11, filer.



Obr. 6. 1 Sestava sít určená k roztřídění kameniva dle velikosti zrna

## 6. 2 Asfaltová pojiva

Pro spojení kameniva slouží pojivo, které obalí povrch kameniva a umožní tak jejich soudržnost. V silničním stavitelství se používají silniční, polymerem modifikované asfalty, ředěné a fluxované asfalty a kationaktivní asfaltové emulze. Největší zastoupení mají silniční asfalty označované např. 50/70 a modifikované asfalty označené např. PmB 25/55 – 60. Modifikované asfalty jsou vhodnější pro svoje vlastnosti, modifikace zvyšuje přilnavost asfaltu ke kamenivu, bod měknutí a rozšiřuje obor plasticity, je sníženo stárnutí a zlepšuje se odolnost proti vzniku trvalých deformací atd. Tyto asfalty se používají z důvodu možnosti zvýšení intenzity dopravy a zatížení komunikací. Pro tuto práci se použilo modifikované pojivo PmB 25/55 – 60, vyrábějící firmou Total. Tato firma vznikla ve Francii v roce 1924, je nadnárodní společností s pobočkami po celém světě. Zabývá se zpracováním ropy a výrobou nejen asfaltových pojiv pro silniční aplikaci, ale i pro průmyslovou aplikaci.



## 7 Návrh asfaltové směsi

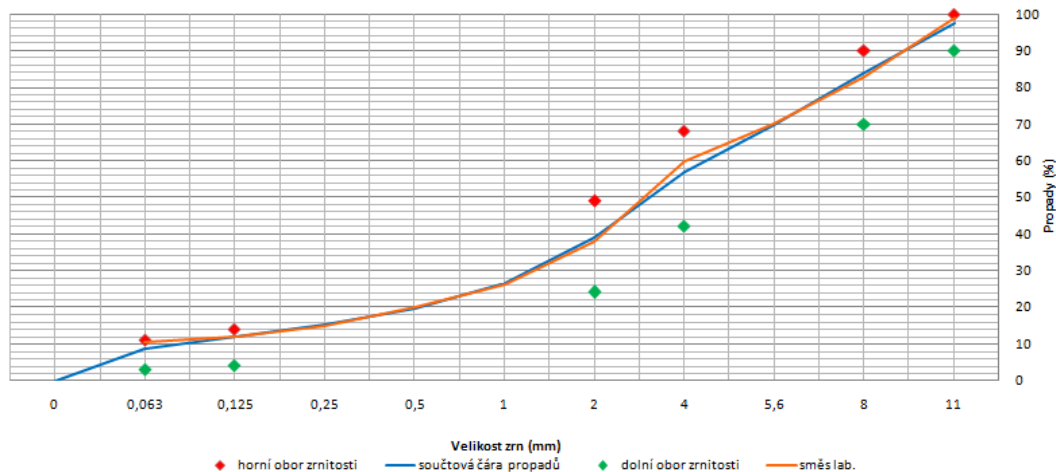
### 7.1 Množství kameniva a pojiva

Pro tuto práci se vyráběly tři směsi ACO 11+. První směs byla vyrobena z frakcí 0/4, 4/8, 8/11 a z fileru s použitím asfaltového pojiva PmB 25/55 - 65 o množství 5,6 %. Druhá směs byla ze stejného kameniva, jen množství pojiva bylo navýšeno o 0,5 %, tzn. na 6,1 %. Třetí směs byla vyrobena ze stejného kameniva jako první s přidáním těžšího kameniva 0/8 STK a o stejném množství pojiva s požadavkem na shodnost zrnitosti směsi kameniva. Viz tabulky.

Tabulka 6. 1 Procentuální množství kameniva - Varianta 1 a 2

Název frakce / Síto	%
Filer Velké Hydčice	5
Mořina 0/4	24
Zbraslav 0/4	27
STK 0/8	0
Zbraslav 4/8	27
Zbraslav 8/11	17
Asfalt PmB 25/55 - 65	5,6 6,1 <sup>1)</sup>

Poznámka: <sup>1)</sup> směs 2

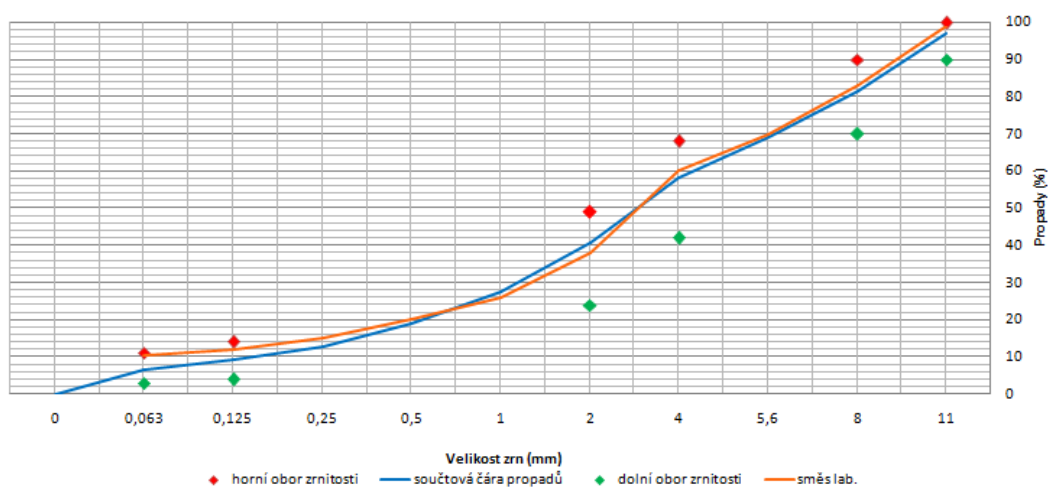


Obr. 7. 1 Čára zrnitosti - směs 1 a 2



Tabulka 6. 2 Procentuální množství kameniva - Varianta 3

Název frakce / Síto	%
Filer Velké Hydčice	2
Mořina 0/4	14
Zbraslav 0/4	12
STK 0/8	10
Zbraslav 4/8	32
Zbraslav 8/11	20
Asfalt PmB 25/55 - 65	5,6



Obr. 7. 2 Čára zrnitosti - směs 3

Poznámka: V grafech je oranžově označená zrnitost směsi kameniva, ke které se nově navržená směs měla blížit.

## 8 Výroba zkušebních těles

### 8.1 Příprava

V normě ČSN EN 12697 -10 OPRAVA 1 je stanoven počet úderů pěstem na 5, 15, 25, 35, 50 a 100, které jsou potřebné k vyhodnocení zhutnitelnosti [16]. Proto bylo vyrobeno pro každý počet úderů dvě tělesa. Celkový počet těles pro každou směs tedy byl roven 12.

Podle směsi se navázilo potřebné množství kameniva s 20 % rezervou. Kamenivo a filer se vložily do plechových nádob a dalo se ohřát do výhřevné sušárny na 160 °C, tam se též umístilo asfaltové pojivo v plechové nádobě.



Ke smísení byla použita laboratorní míchačka, která se ohřála také na požadovanou teplotu 160 °C. Když bylo vše připravené a vyhřáté, kamenivo se vložilo do míchačky a byl spouštěn první cyklus (180 sekund) míchacího programu, aby došlo k zahřátí kameniva zpět na 160 °C. Po ukončení programu se vlilo požadované množství pojiva a spustilo se další 180 sekundové míšení. Poté se přidal filer a program se opět spustil. Nakonec se do předem vyhřátých zednických fanek odměřilo potřebné množství hotové směsi na jedno těleso, což odpovídalo 1000 g ± 3 g. Fanky se opět vložily do sušárny na 160 °C, teplota se kontrolovala digitálním teploměrem se snímačem na kabelu, dokud směs nedosáhla požadované teploty. Přebytek směsi (cca 800 g) se uložil do papírového pytlíku a označil, aby se poté mohla stanovit maximální objemová hmotnost.



Obr. 8. 1 Laboratorní míchačka





## 8.2 Hutnění Marschallovým pěchem

Před vyrobením těles bylo nutné nahřát na 160 °C další potřebné věci, jako špachtle nástavec s podložkou, trychtýř a dostatečný počet válcových forem o vnitřním průměru  $101,5 \pm 0,1$  mm.



Obr. 8. 2 Zleva nahoře: trychtýř, válcová forma, zednická fanka, nástavec podložka špachtle

Po nahřátí se vyndala ze sušárny podložka, umístila se na ní válcová forma a na dno se vložilo papírové kolečko, které brání přilnutí směsi ke kovové podložce či povrchu pěchu. Na válcovou formu se usadil nástavec, jenž pomáhá držet formu nehybně při hutnění. Z jedné fanky se směs přesypala pomocí trychtýře a špachtle do formy, urovnala se a nahoru se opět vložilo papírové kolečko. Poté se připravená forma vložila pod hutnicí zařízení a zajistila se excentrickou vačkou upínacího zařízení. Nastavil se požadovaný počet hutních úderů a zapnul se motorový pohon, který ovládá zvedací zařízení hutnicího beranu a ten hutní směs vlastní vahou. Po zhutnění jedné strany se odjistila vačka upínacího zařízení, sundal se nástavec a válcová forma se otočila, aby byla zhutněna i druhá strana. A proces se opakoval. Bylo nutné směs zhutnit co nejrychleji a to během 4 minut od doby, kdy byla směs vyjmuta ze sušárny. Když se zhutnila i druhá strana, z tělesa se odejmul nástavec a podložka, opatrně se odstranila papírová kolečka a těleso ve formě se odložil na dřevěný či kovový váleček a označilo se.





Obr. 8. 3 Marschallův pěk

Takto se vyrobilo dalších 11 těles a až tělesa vychladla cca na 40 °C, mohla se vytlačit z válcové formy pomocí hydraulického zařízení.

### 8. 3 Hutnění Gyrátorem

V následujícím textu je popsán princip hutnění gyrátorem, avšak pro tvorbu této práce se na něm nepracovalo.

#### 8. 3. 1 Gyrátor

Mezi hlavní charakteristiky gyrátoru a podmínky zkoušení patří úhel rotace  $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$ , počet otáček za minutu dosahuje  $30,0 \pm 0,5$ , kolmý tlak je  $600 \pm 18$  kPa, forma zkušebních těles má vnitřní rozměr 150 mm výšku 250 mm a tloušťku stěny 8,5 mm. Nutná je přesnost čidla měřícího výšku tělesa na 0,05 mm, gyrátor musí být opatřen i počítačem se softwarem.

#### 8. 3. 2 Zkušební tělesa

Kamenivo s pojivem se míchá v takovém množství, aby výška zkušebního tělesa byla  $100 \pm 1$  mm. Hutnicí výkon gyrátoru je omezen nejvyšší průměrnou sedmidenní teplotou vzduchu a



dopravním zatížením a je stanoven počtem požadovaných otáček gyrátoru. Dostatečné množství asfaltové směsi se vystaví krátkodobému stárnutí a to tak, že se rozprostře 21 – 22 kg/m<sup>2</sup> do mělké mísy a temperuje se při teplotě 135 ± 1 °C po dobu 4 hodin ± 5 minut v sušárně s nuceným oběhem vzduchu a jednou za hodinu se vzorek zamíchá. Poté se směs vytemperuje na požadovanou teplotu hutnění vloží a do zkušební nádoby a ihned se zhutní. V průběhu hutnění se výška tělesa průběžně automaticky měří s přesností na 0,05 mm [17].

### 8. 3. 3 Míra zhutnění gyrátorem a požadavky

Každý vzorek asfaltové směsi má dán svojí charakteristickou křivku zhutnění, z níž je pro měření volumetrických vlastností důležitá počáteční, návrhová a koncová míra zhutnění. Upravené míry zhutnění se vypočítají pomocí výšky zkušebního tělesa a počtem otáček gyrátoru (počáteční, návrhové a koncové). Navrhovaná receptura určená na stavbu musí splňovat:

Počáteční míra zhutnění, jež je dosaženo po počátečních otáčkách gyrátoru nesmí přesahovat hodnotu 89%, to znamená, že každá asfaltová směs dosahuje mezerovitosti minimálně 11%. Návrhová míra zhutnění, která je dosažena při návrhovém počtu otáček gyrátoru je pro všechny asfaltové směsi 96% a mezerovitost má hodnotu 4%. A koncová míra zhutnění, které se dosáhlo po koncových otáčkách gyrátoru, nesmí být větší než 98%, to znamená, že po maximálním hutnícím výkonu musí mezerovitost zkušebního tělesa dosahovat ještě alespoň 2% [17].

## 9 Zkoušky asfaltových směsí

### 9. 1 Objemová hmotnost

Jako první se musela stanovit objemová hmotnost. Podle Normy ČSN EN 12697 – 6 + A1 se tak mohlo docílit pomocí více postupů.

V tomto případě se zvolil postup B: Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD) a postup D: Objemová hmotnost podle rozměrů [18].

#### 9. 1. 1 Postup

U postupu B: Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD) se nejdříve zjistila hmotnost suchého zkušebního tělesa ( $m_1$ ), následně se těleso ponořilo na cca 30 minut do vodní lázně.



Změřila se teplota vody pomocí teploměru a z toho byla stanovena hustota vody ( $\rho_w$ ) dle tabulky. V následujícím kroku se zvážilo nasycené a stále ponořené těleso ve vodě ( $m_2$ ). Poté se těleso vyndalo, osušilo vlhkou jelenicí a opět zvážilo ( $m_3$ ).



Obr. 9. 1 Vážení nasycených těles ve vodě

Postup D: Objemová hmotnost podle rozměrů se stanovila tak, že u těles se změřila výška a průměr pomocí posuvného měřítka s přesností na 0,1 mm. A bylo nutné znát i hmotnost suchého tělesa ( $m_1$ ).

Pro měření rozměrů je sepsána samostatná norma ČSN EN 12697 – 29. V této práci se jednalo o válcová zkušební tělesa. Výška se měřila ve čtyřech místech rovnoměrně od sebe vzdálených a z hodnot se stanovil aritmetický průměr. Průměr tělesa se měřil dvakrát v horní a dvakrát ve spodní části ve směrech na sebe kolmých a opět se určil aritmetický průměr [19].

### 9. 1. 2 Výpočet

Objemová hmotnost SSD ( $\rho_{bssd}$ ) se vypočítá podle následujícího vzorce:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad [\text{kg/m}^3] \quad (5)$$

- kde:  $m_1$  hmotnost suchého tělesa (g);  
 $m_2$  hmotnost tělesa ve vodě (g);  
 $m_3$  hmotnost tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného (g);  
 $\rho_w$  hustota vody při zkušební teplotě stanovaná s přesností na 0,1 kg/m<sup>3</sup>.



Objemová hmotnost podle rozměrů válcového tělesa ( $\rho_{b, \text{dim}}$ ) se vypočítá podle vzorce:

$$\rho_{b, \text{dim}} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^6 \quad [\text{kg/m}^3] \quad (6)$$

kde:  $m_1$  hmotnost suchého tělesa (g);  
 $h$  výška zkušební tělesa (mm);  
 $d$  průměr zkušební tělesa (mm).

## 9.2 Maximální objemová hmotnost

Maximální objemová hmotnost nezapočítává do objemu mezery mezi kamenivem. Podle normy ČSN EN 12697 – 5 + A1 lze stanovit i mezerovitost směsi. Dle této normy byl použit postup A: Volumetrický postup [20].

### 9.2.1 Postup

Jak již bylo zmíněno, při výrobě zkušebních těles byl označen a uchován zbytek nezhutněné asfaltové směsi do papírového pytlíku. Nejdříve bylo nutné zbytek směsi ohřát na takovou teplotu (cca 80 °C), při které bylo možné směs rozdělit na jednotlivá zrna. Směs se vysypala a rozprostřela. Zrna se od sebe začala oddělovat až poté, co se směs trochu ochladila, aby bylo možné na ní sahat holýma rukama a došlo tak k důkladnějšímu rozdělení shluků zrn. Když směs zcela vychladla, byla pomalu nasypána do prázdného pyknometru, jehož hmotnost ( $m_1$ ) a objem ( $V_p$ ) byl stanoven při kalibraci pyknometru v laboratoři 7. 7. 2014. Nasadil se nástavec a zaznamenala se hmotnost pyknometru se směsí ( $m_2$ ). Do pyknometru se nalila cca 4 cm nad směs destilovaná voda a opatrně se pomocí kovové tyčky směs zamíchala, aby unikl přebytečný vzduch. Poté se pyknometr vložil do vakuové nádoby, díky níž se odsál všechny vzduch a vznikl tlak 4 kPa na dobu cca 15 minut. Nakonec se pyknometr opatrně dolil destilovanou vodou po referenční rysku na nástavci, ke které je stanoven objem pyknometru, a zaznamenala se jeho hmotnost ( $m_3$ ).



Obr. 9. 2 Vakuová nádoba

### 9. 2. 2 Výpočet

Maximální objemová hmotnost ( $\rho_{mv}$ ) se zjistí z vzorce:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{10^3 \times V_p - (m_3 - m_2) / \rho_w} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (7)$$

- kde:
- $m_1$  hmotnost pyknometru a nástavce (g);
  - $m_2$  hmotnost pyknometru a zkušební vzorku (g);
  - $m_3$  hmotnost pyknometru, zkušební vzorku a vody (g);
  - $V_p$  objem pyknometru při naplnění po referenční značce (m<sup>3</sup>);
  - $\rho_w$  hustota vody při zkušební teplotě stanovaná s přesností na 0,1 kg/m<sup>3</sup>.



### 9.3 Mezerovitost

K vypočtení mezerovitosti je potřeba znát maximální objemovou hmotnost (kapitola 9. 2) a objemovou hmotnost (kapitola 9. 1). V ČSN EN 12697 – 8 je popsán postup výpočtu [21].

#### 9.3.1 Výpočet

Mezerovitost se stanoví ze vzorce:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \quad [\%] \quad (8)$$

kde:  $\rho_m$  maximální objemová hmotnost směsi ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  
 $\rho_b$  objemová hmotnost zkušební tělesa ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

### 9.4 Tuhost

Norma ČSN EN 12697 – 26 popisuje několik postupů jak stanovit modul tuhosti. V této práci se provedly zkoušky podle přílohy C Zkouška s opakovaným namáháním v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT – CY) této normy. Pomocí zkoušky v příčném tahu se měřily pružné tuhosti asfaltové směsi. Bylo zapotřebí využít zkušební zařízení, které je schopno vyvinout zatěžovací pulz síly na těleso a změřit při něm příčnou horizontální deformaci v rozsahu  $\pm 50 \mu\text{m}$  [22].

#### 9.4.1 Postup

Bylo nutné nejprve tělesa vytemperovat na potřebnou teplotu v komoře s nastavitelnou teplotou a to po dobu alespoň 4 hodin. Měřící zařízení je spojené s počítačem, na kterém se spustil program určený k tomuto měření. Nastavila se měřící teplota, která se shodovala s teplotou, při které se temperovala tělesa, Poissonův součinitel závislý na teplotě měření, výška a průměr zkušební tělesa, požadovaná hodnota příčné deformace a zatěžovací pulz. Zkušební těleso se umístilo do sestavy pro měření vodorovné deformace, poloha se zajistila upínacími šrouby a snímače na styk s tělesem se nastavily do daného rozpětí (na obrazovce monitoru se dalo sledovat rozpětí snímání a bylo možno je upravovat). Nejprve proběhla série kontrolních pulzů, při kterých se zařízení nastavilo na velikost a dobu pulzu potřebné k požadované horizontální deformaci. Následně se spustilo samotné měření, které se skládalo z 5 pulzů zatížení. U těles zhutněnými 5 údery z každé strany se měření skládalo jen z 3 pulzů, jelikož při větším zatížení pulzů došlo k znehodnocení tělesa. Po skončení měření se těleso



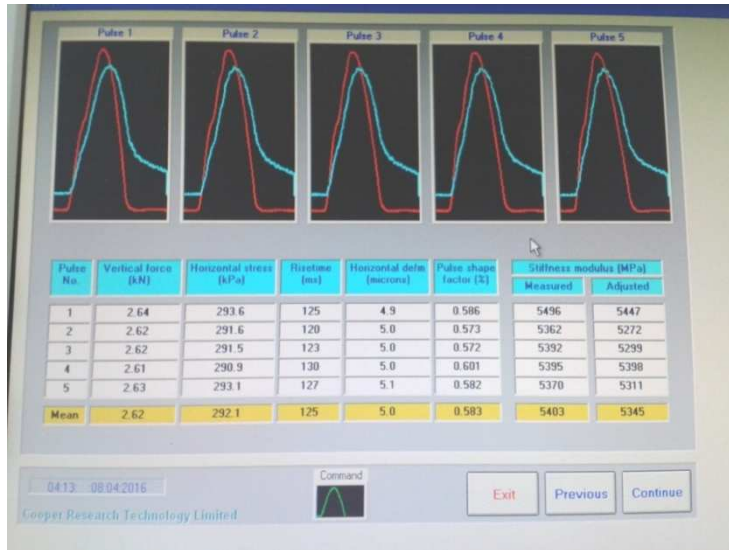
muselo otočit o 90° a celý postup se zopakoval. Program spočítal výslednou hodnotu modulu tuhosti dle zadaných parametrů a využil k tomu následující rovnici:

$$E = \frac{F \times (v+0,27)}{z \times h} \quad [\text{MPa}] \quad (9)$$

- kde: E      naměřený modul tuhosti (MPa);  
F      maximální hodnota použitého svislého zatížení (N);  
z      amplituda horizontální deformace zjištěná v průběhu zatěžovacího cyklu (mm);  
h      průměrná tloušťka zkušebního tělesa (mm);  
v      Poissonovo číslo



Obr. 9.3 Těleso ve zkušebním zařízení NAT



Obr. 9. 4 Příklad výsledku měření z počítače

Stanovily se také moduly tuhosti nasycených těles. Nasycení bylo provedeno pomocí ČSN EN 12697 – 12 [23]. Nejprve se tělesa položila do vakuové nádoby naplněné destilovanou vodou, tak aby hladina vody byla nejméně 2 cm nad povrchem těles. V nádobě se postupně zvyšoval tlak až na hodnotu 6,7 kPa. Tento tlak se udržoval po dobu 30 minut a následně se tělesa nechala odstát v destilované vodě při běžném atmosférickém tlaku po dobu dalších 30 minut. Nakonec se tělesa přesunula do vodní lázně ohřáté na 40 °C a zde se nechala sytit 72 ± 4 hodiny.



Obr. 9. 5 Vakuová sytící nádoba





Obr. 9. 6 Lázeň s nastavitelnou teplotou

## 9. 5 Stabilita podle Marshalla

### 9. 5. 1 Postup

Nejprve se vodní lázeň umožňující regulovat teplotu pomocí termostatu s nepřetržitým oběhem vody ohřála na 60°C, poté se vložila zkušební tělesa a po dobu cca 30 minut se nechala sytit. Po uplynutí této doby se těleso vyjmul z vodní lázně a vložilo se svou boční hranou do středu zkušební čelisti, tak aby byl zajištěn dobrý kontakt mezi povrchem tělesa a tlačnou čelistí a celý zkušební celek se uložil do zkušebního lisu [24].



Obr. 9. 7 Syčení těles ve vodní lázni s termostatem



Obr. 9. 8 Zkoušení tělesa

Těleso bylo zatěžováno konstantní rychlostí posunu ( $50 \pm 2$ ) mm za minutu. Zatížení probíhalo do chvíle, než byla dosažena hodnota maximální síly a ta se zaznamenala do počítačového programu. Takto se postupovalo i s dalšími zkušebními tělesy, avšak zkouška musela být provedena v rozmezí 40 sekund po vyjmutí tělesa z vodní lázně.

#### 9. 5. 1 Výpočet

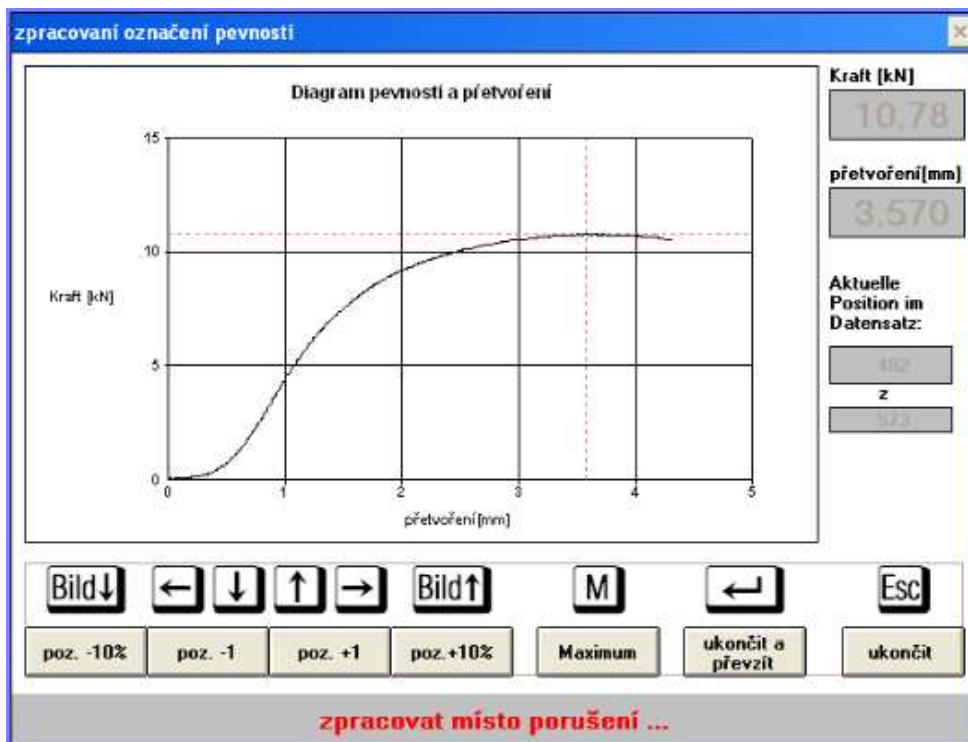
Dosažená maximální síla představuje stabilitu směsi pouze v případě, je-li výška tělesa rovna 63,5 mm. Proto se počítá s korigovanou stabilitou. Ta se vypočítá vynásobením hodnoty maximální síly korekčním faktorem podle následujícího vzorce za pomoci výšky nebo objemu tělesa:

$$c = 5,2e^{-0,0259 \cdot h} = 5,2e^{-3,2 \cdot 10^{-6}} * V \quad (10)$$

kde

- c korekční faktor;
- h výšky zkušebního tělesa (mm);
- V objem zkušebního tělesa (mm<sup>3</sup>).

Stabilita směsi S je s přesností na 0,1 kN.



Obr. 9. 9 Diagram pevnosti a přetvoření



## 10 Výsledky

V rámci této bakalářské práce se vyrobily 3 směsi. Z každé směsi se zhotovilo 12 těles, rozdělené po dvojicích a každá dvojice byla zhutněná jiným počtem úderů a to 5, 15, 25, 35, 50, 100 úderů z každé strany. Varianta 1 a varianta 3 měly stejnou čáru zrnitosti, avšak varianta 3 obsahovala těžené kamenivo, obě směsi obsahovaly 5,6 % asfaltového pojiva. U druhé směsi byl navýšen obsah pojiva o 0,5 % a to na 6,1 %.

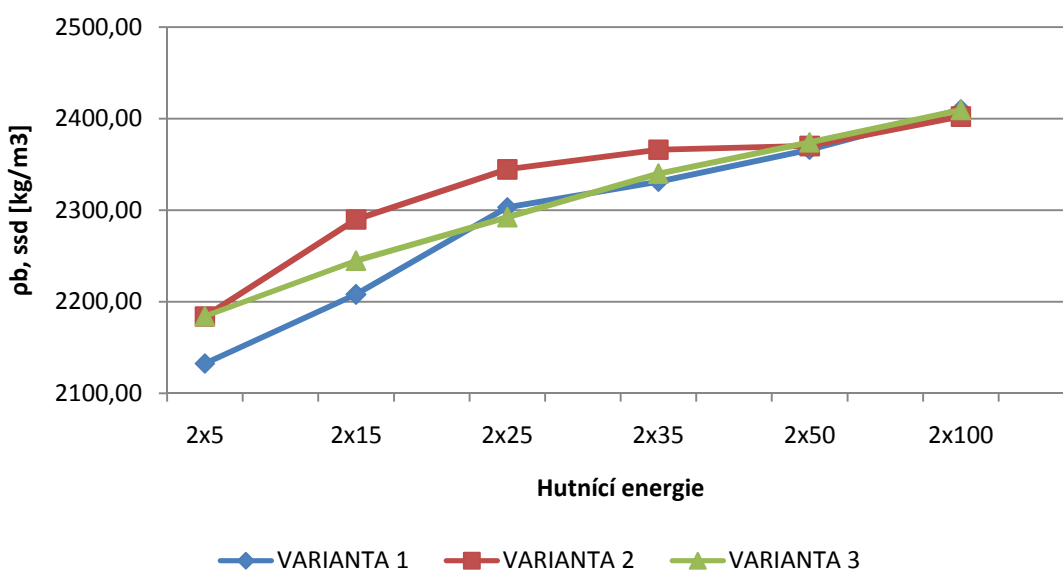
V tabulce 10. 1 jsou znázorněné charakteristiky pro 2x50 úderů z každé strany. Rozpis jednotlivých variant a zkušebních těles se nachází v příloze (tab. 9. 10 až 9. 12).

Jednotlivé zkoušky jsou popsány v kapitolách 9. 1 až 9. 3.

Tabulka 10. 1 Přehled základních charakteristik vyrobených směsí (tělesa 2x50)

Směs ACO 11+	Množství pojiva	Objemová hmotnost	Maximální obj. hmotnost	Mezerovitost
	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]
Varianta 1	5,6	2366,11	2456,70	3,69
Varianta 2	6,1	2370,00	2448,97	3,22
Varianta 3	5,6	2374,11	2483,80	4,42

### Objemová hmotnost



Obr. 10. 1 Objemová hmotnost



Z obrázku 10. 1 je patrné, že s rostoucím počtem úderů potřebných ke zhutnění, se zvyšuje i objemová hmotnost. Největší objemové hmotnosti dosahuje druhá varianta. Je známo, že větší obsah asfaltového pojiva zvyšuje objemovou hmotnost, neboť dochází ke snížení tření v kostře kameniva a zrna se k sobě navzájem přibližují. Tento předpoklad se tedy potvrdil.

Tabulka 10. 2 Stanovení mezerovitosti

Mezerovitost	
< 3%	nepropustné
3% až 5%	prakticky nepropustné
> 5%	propustné

Zvyšujícím počtem úderů nutných pro zhutnění se zmenšuje i mezerovitost, jelikož se zmenšuje objem mezer ve zkušebním tělese. U obrusných vrstev by se měla mezerovitost pohybovat v rozmezí cca 2 až 5%. V tabulce 10. 1 je patrné, že nejmenší mezerovitosti (pro tělesa 2x50) dosahuje druhá varianta. Z tabulky 10. 2 tuto variantu označujeme jako prakticky nepropustnou, totéž lze říci o variantě 1 a 3.

## 10. 1 Zhutnitelnost

Zhutnitelností se zabývá celé tato práce. V kapitole 2, jež se věnuje míře zhutnění, je napsáno, že špatným zhutněním se snižuje kvalita a především životnost vozovky.

Tabulka 10. 3 Stanovení zhutnitelnosti pomocí parametru C

C	Zhutnitelnost
< 12	lehce zhutnitelné
12 až 28	normálně zhutnitelné
> 28	těžce zhutnitelné

Tabulka 10. 4 Parametr zhutnitelnosti u vyrobených směsí

Směs ACO 11+	C	Zhutnitelnost
	-	
Varianta 1	14,2	normálně zhutnitelné
Varianta 2	10,5	lehce zhutnitelné
Varianta 3	24,5	normálně zhutnitelné

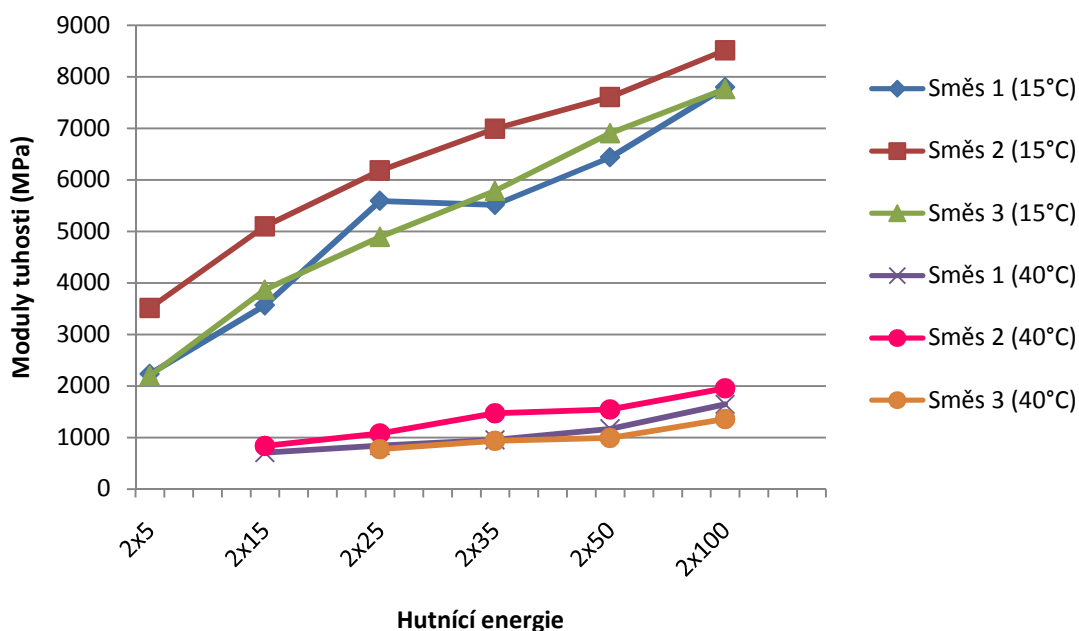


Varianty 1 a 3 vyšly jako normálně zhutnitelné i když je mezi těmito variantami velký rozdíl v parametru C. Je to dáno tím, že varianta 1 má plynulejší čáru zrnitosti (obr.). Varianta 2 se stanovila jako lehce zhutnitelná a to protože větší obsah pojiva zlepšuje zhutnitelnost.

## 10.2 Moduly tuhosti

Moduly tuhosti se stanovovaly při teplotě 15 °C a 40 °C na suché a na nasycené směsi podle zkoušky IT-CY (kapitola 9. 4). Výsledky jednotlivých variant jsou v příloze (tab. 9. 18 až 9. 20).

### Moduly tuhosti u suché směsi



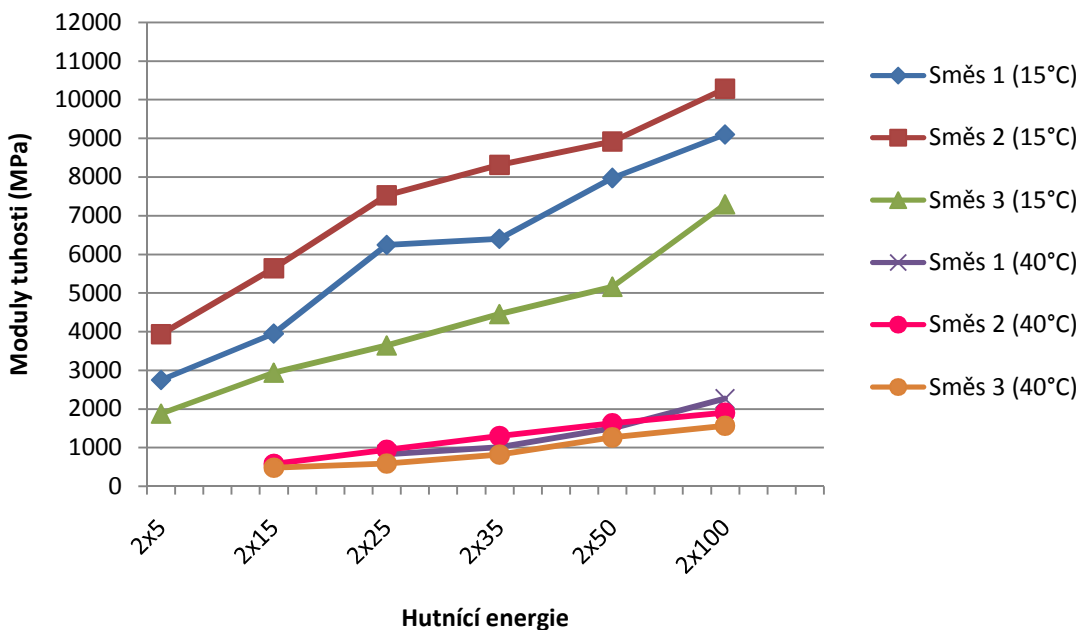
Obr. 10. 2 Moduly tuhosti stanovené na suché směsi

Při zkoušení modulů tuhosti u suché směsi při teplotě 15 °C vyšly varianty 1 a 3 přibližně stejně, avšak varianta 2 se zvýšila (obr. 10. 2).

Moduly tuhosti stanovené při 40 °C byly výrazně nižší, neboť asfaltové pojivo při vyšší teplotě měkne. Tuhosti u varianty 1 a 3 při 40 °C byly téměř stejné, největší hodnoty byly naměřeny u druhé varianty.



## Moduly tuhosti u nasycené směsi



Obr. 10. 3 Moduly tuhosti stanovené na nasycené směsi

Rozdíl mezi tuhostí u suché směsi a u nasycené není tak velký (tab. 9. 18 až 9. 21).

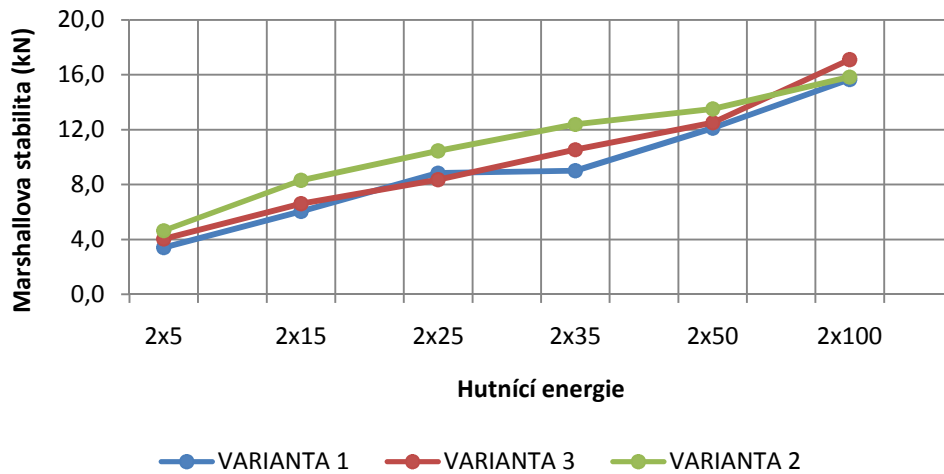
Tuhosti naměřené při 15 °C dosahovaly o něco málo větších či menších hodnot (podle tělesa), než tuhost u suché směsi. Opět nejvyšší tuhosti dosahovala druhá varianta.

Moduly tuhosti při 40 °C vykazují hodnoty přibližně stejné, i když největších hodnot dosahovala varianta 2, jež obsahuje více pojiva. U těles zhutněných větší hutnící energií byly moduly vyšší, jelikož mezerovitost byla menší (tab. 9. 14), tudíž se v tělesech nacházelo málo póru a voda se hlouběji do struktury nemohla dostávat a narušit tak těleso.



### 10.3 Stabilita podle Marshalla

#### Porovnání



Obr. 10.4 Porovnání stability podle Marshalla

Při porovnání stability podle Marshalla, jež se zkoušela u všech těles všech směsí, vycházely všechny tři varianty přibližně stejně. U první směsi byla v rozmezí 3,4 až 15,7 kN, druhá směs vycházela 4,7 až 15,9 kN a třetí 4,1 až 17,1 kN. Největších hodnot ovšem dosahovala druhá varianta.





## 11 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala zhutňováním asfaltových směsí. Snažila se zjistit, která směs je lépe zpracovatelná a zhutnitelná, jestli lepších výsledků dosáhne směs s větším obsahem asfaltového pojiva či směs s určitým množstvím těžného kameniva. Byly navrženy tři směsi typu ACO 11+. První a druhá směs měla stejnou čáru zrnitosti, avšak v druhé směsi bylo použito o 0,5% více asfaltového pojiva. Ve třetí směsi bylo použito těžné kamenivo STK a množství pojiva bylo stejné jako pro první směs.

Pro porovnání charakteristik všech variant bylo zapotřebí provést zkoušky a to zkoušky pro určení objemové hmotnosti, maximální objemové hmotnosti, modulů tuhosti či stability podle Marshalla. Stanovila se též mezerovitost a zhutnitelnost. Při vyhodnocení zhutnitelnosti, parametr zhutnitelnosti C vyšel u druhé směsi nejmenší, což značí, že směs je lehce zhutnitelná. Jelikož v této směsi bylo více pojiva, lepší zhutnitelnost jsme předpokládali. Aby míra zhutnění dosáhla nutných minimálních 96 %, jež je stanovena v kontrolním zkušebním plánu t.z. KZP (pro ACO D +), stačí 14 úderů z každé strany, u první a třetí směsi by jí bylo dosaženo 22 úderů (tab. 9. 22 až 9. 24). Nejvyšší parametr zhutnitelnosti vyšel u třetí směsi, předpokládalo se, že přimícháním těžného kameniva do směsi vyjde zhutnitelnost lépe, nicméně toto se neprokázalo. Bylo by zapotřebí se tomuto problému věnovat více a vyzkoušet směs s větším množstvím těžného kameniva. Avšak v této práci se navrhovaná čára zrnitosti musela přibližovat k předem dané čáře a přidáním většího množství STK by tento požadavek nebyl splněn.

Jak je již napsané v kapitole 10, nejlepší výsledky byly dosaženy u druhé směsi (více asfaltového pojiva). V praxi by bylo výhodné pokládat směsi, které obsahují větší množství asfaltového pojiva, směs je lépe zpracovatelná a požadované zhutnitelnosti dosáhneme při menší hutnicí energii. Mezerovitost směsi je menší, proto se voda hůře dostává do struktury vrstvy a životnost se prodlužuje. Avšak díky vysoké ceně asfaltového pojiva, se tyto směsi prodraží.



## Použité zdroje

1. **MONDSCHNEIN, P.**, Hutnění asfaltových směsí v laboratoři: vliv hutnění na chování asfaltových směsí. . [online]. 19.6.2014 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z:<http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/hutneni-asfaltovych-smesi-v-laboratori-vliv-hutneni-na-chovani-asfaltovych-smesi/>
2. **ZAJÍČEK, J.**, Technologie stavby vozovek. Praha: ČKAIT, 2014.
3. <http://www.meiller.com/cz.html>. . [online]. 29.06.2015 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.meiller.com/cz/o-spolecnosti/aktuality/podrobnosti/tepelne-izolovany-sklapec-meiller-pro-vystavbu-silnic.html>
4. Asphaltstrassenbau – Einbauen und Verdichten von Asphaltmischgut. Heft 31, Arbeitsgemeinschaft der Bitumenindustrie e. V., Hamburg, 1979.
5. **HOLL, A.**, Bituminöse Strassen. Bauverlag GmH Wiesbaden und Berlin, 1971.
6. ČSN 73 6121 Stavba vozovek – Hutnění asfaltové vrstvy. ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA. Praha: Český normalizační institut, březen 2008
7. **HANZÍK, V., Klapka, P., MONDSCHNEIN, P., LUXEMBURK, F., OTTA, M., SOVA, D.**, Pokládka hutněných asfaltových směsí: revidované a rozšířené vydání s počítačovým programem. Praha: Sdružení pro výstavbu silnic Praha, 2015.
8. **HUTSCHENREUTHER, J., WÖRNER, T.** Asphalt im Strassenbau. Kirschbaum Verlag, Bonn, 2010 (2. Vydání).
9. **HANZLÍK, V.**, Pokládka hutněných asfaltových směsí. Sdružení pro výstavbu silnic v ČR, Praha, 1986.
10. Firemní literatura a prospekty firmy Dynapac (válce).
11. Handbuch der Asphalttechnologie für den Strassenbau; příručka fy Bomag, 1982.
12. **HANZLÍK, V., PASLER, A.**, Zhutňování živičných vozovek pneumatickými válci. Inženýrské stavby 10/70
13. Compaction of Asphalt Road Pavement; Proefskript University Twente (Nizozemsko), 2004.
14. **VIZI, L., BÜTTNER, CH.**, Verdichten von Asphalt im Strassenbau. Werner – Verlag GmbH, Düsseldorf, 1981.
15. **VIZI, L.**, Neueste Erkenntnisse in der Verdichtung bituminöser Gemische. Bitumen – Teere – Asphalte – Peche u. v. S., září 1971
16. ČSN EN 12697 – 10 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 10: Zhutnitelnost. ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA. Praha: Český normalizační institut, září 2007.



17. **VALENTIN, J.**, Užité vlastnosti a reologie asfaltových pojiv a směsí – charakteristiky, nové zkušební metody, vývojové trendy. Praha: autor neznámí, 2003.
18. ČSN EN 12697 – 6 + A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního těles. ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA. Praha: Český normalizační institut, prosinec 2007.
19. ČSN EN 12697 – 29 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 29: Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles. ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA. Praha: Český normalizační institut, červenec 2003.
20. ČSN EN 12697 – 5 +A1 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti. ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA. Praha: Český normalizační institut, prosinec 2007.
21. ČSN EN 12697 – 8 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí. ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA. Praha: Český normalizační institut, květen 2004.
22. ČSN EN 12697 - 44 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost. ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA. Praha: Český normalizační institut, říjen 2012.
23. ČSN EN 12697 – 12 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě. ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA. Praha: Český normalizační institut, říjen 2012.
24. ČSN EN 12697 – 34 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 34: Marshallova stabilita. ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA. Praha: Český normalizační institut, říjen 2012.



## Seznam obrázků

Obr. 3. 1 Tepelně izolovaný sklápěč MEILLER pro výstavbu silnic .....	10
Obr. 3. 2 Nomogram pro stanovení počtu dopravních prostředků stejné kapacity (příklad).....	11
Obr. 4. 1 Kolový finišer AFW 350 E/G .....	14
Obr. 4. 2 Pásový finišer AFT 350 E/G.....	14
Obr. 4. 3 Hlavní části finišeru pro pokládku hutněných asfaltových úprav .....	15
Obr. 5. 1 Vliv stlačení vrstvy na velikost zhutňovacího tlaku .....	17
Obr. 5. 2 Pneumatikový válec Dynapac CP274 .....	19
Obr. 5. 3 Závislost teoretického dotykového tlaku na tlaku vzduchu a typu pneumatiky.....	20
Obr. 5. 4 Kloubový vibrační válec AV 130 X Ammann.....	21
Obr. 5. 5 Základní údaje a principiální schéma k běhounům s klasickou – neřízenou vibrací ....	23
Obr. 5. 6 Nomogram pro určení max. pracovní rychlosti při hutnění vibračním válcem (h= tloušťka vrstvy pro zhutnění) .....	25
Obr. 5. 7 Konstrukční a funkční princip oscilace a řízení vibrace [7].....	26
Obr. 5. 8 Schéma válce první skupiny s kombinovaným dynamickým účinkem .....	27
Obr. 5. 9 Princip a použití usměrněné vibrace v rámci systému Asphalt Manager [53].....	28
Obr. 6. 1 Sestava sít určená k roztřídění kameniva dle velikosti zrna .....	29
Obr. 8. 1 Laboratorní míchačka.....	32
Obr. 8. 2 Zleva nahoře: trychtýř, válcová forma, zednická fanka, nástavec podložka špachtle .	33
Obr. 8. 3 Marschallův pěch .....	34
Obr. 7. 1 Čára zrnitosti - směs 1 a 2 .....	30
Obr. 7. 2 Čára zrnitosti - směs 3 .....	31
Obr. 9. 1 Vážení nasycených těles ve vodě .....	36
Obr. 9. 2 Vakuová nádoba.....	38
Obr. 9. 3 Těleso ve zkušebním zařízení NAT .....	40
Obr. 9. 4 Příklad výsledku měření z počítače .....	41
Obr. 9. 5 Vakuová sytící nádoba.....	41
Obr. 9. 6 Lázeň s nastavitelnou teplotou .....	42
Obr. 9. 7 Sycení těles ve vodní lázni s termostatem .....	42
Obr. 9. 8 Zkoušení tělesa.....	43
Obr. 9. 9 Diamgram pevnosti a přetvoření .....	44
Obr. 10. 1 Objemová hmotnost .....	45
Obr. 10. 2 Moduly tuhosti stanovené na suché směsi .....	47
Obr. 10. 3 Moduly tuhosti stanovené na nasycené směsi .....	48
Obr. 10. 4 Porovnání stability podle Marshalla.....	49



## Seznam tabulek

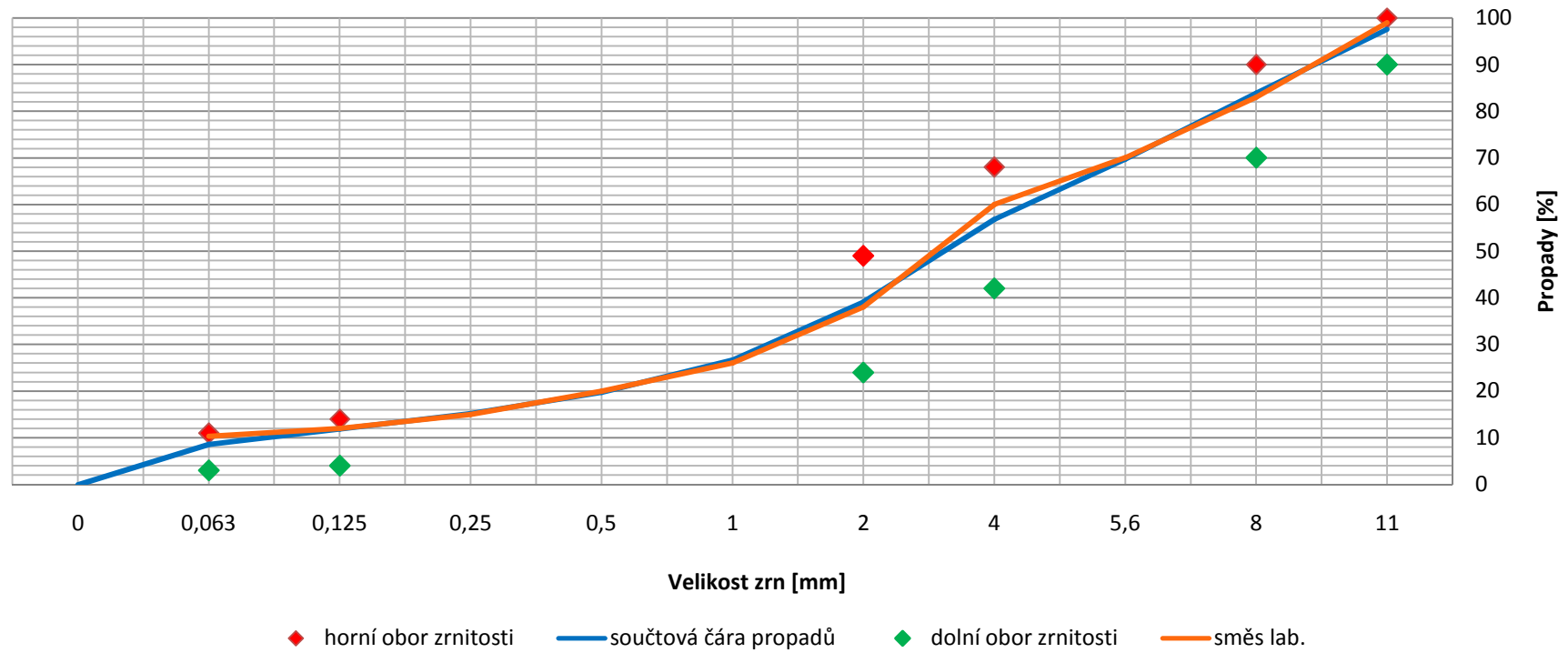
Tabulka 4. 1 Minimální teploty vzduchu (ČSN 73 6121) .....	12
Tabulka 5. 1 Souhrnné doporučené údaje pro hutnění vibračními válci [7].....	24
Tabulka 6. 1 Procentuální množství kameniva - Varianta 1 a 2 .....	30
Tabulka 6. 2 Procentuální množství kameniva - Varianta 3 .....	31
Tabulka 7. 1 Varianta 1 – Propady na sítěch.....	55
Tabulka 7. 2 Varianta 1 – Čára zrnitosti .....	56
Tabulka 7. 3 Varianta 2 – Propady na sítěch.....	57
Tabulka 7. 4 Varianta 2 – Čára zrnitosti .....	58
Tabulka 7. 5 Varianta 3 – Propady na sítěch.....	59
Tabulka 7. 6 Varianta 3 – Propady na sítěch.....	60
Tabulka 9. 1 Varianta 1 – Objemová hmotnost stanovená z rozměrů.....	61
Tabulka 9. 2 Varianta 1 - Objemová hmotnost stanovená z hmotnosti .....	62
Tabulka 9. 3 Varianta 1 – Porovnání objemových hmotností.....	63
Tabulka 9. 4 Varianta 2 – Objemová hmotnost stanovená z rozměrů.....	64
Tabulka 9. 5 Varianta 2 – Objemová hmotnost stanovená z hmotnosti.....	65
Tabulka 9. 6 Varianta 2 – Porovnání objemových hmotností.....	66
Tabulka 9. 7 Varianta 3 – Objemová hmotnost stanovená z rozměrů.....	67
Tabulka 9. 8 Varianta 3 – Objemová hmotnost stanovená z hmotnosti.....	68
Tabulka 9. 9 Varianta 3 – Porovnání objemových hmotností.....	69
Tabulka 9. 10 Varianta 1 – Shrnutí výsledků .....	70
Tabulka 9. 11 Varianta 2 – Shrnutí výsledků .....	71
Tabulka 9. 12 Varianta 3 – Shrnutí výsledků .....	72
Tabulka 9. 13 Mezerovitost stanovená z rozměrů .....	73
Tabulka 9. 14 Mezerovitost stanovená z hmotnosti.....	74
Tabulka 9. 15 Varianta 1 – Míra zhutnění .....	75
Tabulka 9. 16 Varianta 2 – Míra zhutnění .....	76
Tabulka 9. 17 Varianta 3 – Míra zhutnění .....	77
Tabulka 9. 18 Moduly tuhosti stanovené na suché směsi při teplotě 15 °C.....	78
Tabulka 9. 19 Moduly tuhosti stanovené na suché směsi při 40 °C.....	79
Tabulka 9. 20 Moduly tuhosti stanovené na nasycené směsi při teplotě 15 °C .....	80
Tabulka 9. 21 Moduly tuhosti stanovené na nasycené směsi při teplotě 40 °C .....	81
Tabulka 9. 22 Varianta 1 - Marshallova stabilita.....	82
Tabulka 9. 23 Varianta 2 – Marshallova stabilita .....	83
Tabulka 9. 24 Varianta 3 – Marshallova stabilita .....	84
Tabulka 10. 1 Přehled základních charakteristik vyrobených směsí (tělesa 2x50) .....	45
Tabulka 10. 2 Stanovení mezerovitosti .....	46
Tabulka 10. 3 Stanovení zhutnitelnosti pomocí parametru C.....	46
Tabulka 10. 4 Parametr zhutnitelnosti u vyrobených směsí.....	46

## Přílohy

Tabulka 7. 1 Varianta 1 – Propady na sítích

Název frakce / Síto	%	11	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	0
V. Hydčice filer		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,9	18,9	72,4
Mořina 0/4		0,0	0,0	1,0	8,6	22,3	18,5	13,1	9,8	7,2	6,2	13,2
Zbraslav 0/4		0,0	0,0	0,0	3,0	34,0	27,9	13,8	7,7	3,9	2,9	6,9
STK 0/8		0,0	0,1	1,6	4,6	9,7	13,2	21,2	23,5	11,5	4,4	10,2
Zbraslav 4/8		0,0	4,8	43,9	36,9	11,9	1,6	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1
Zbraslav 8/11		14,362	72,815	12,322	0,307	0,029	0,004	0,007	0,512	0,394	0,197	0,014
V. Hydčice filer	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,44	0,95	3,62
Mořina 0/4	24	0,00	0,00	0,23	2,05	5,34	4,45	3,15	2,35	1,72	1,49	3,18
Zbraslav 0/4	27	0,00	0,00	0,00	0,82	9,18	7,54	3,73	2,07	1,06	0,78	1,85
STK 0/8	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zbraslav 4/8	27	0,00	1,31	11,86	9,97	3,21	0,43	0,05	0,03	0,03	0,05	0,02
Zbraslav 8/11	17	2,44	12,38	2,09	0,05	0,00	0,00	0,00	0,09	0,07	0,03	0,00
součtová čára zbytků	100	2,44	13,69	14,19	12,90	17,74	12,42	6,93	4,54	3,32	3,30	8,67
horní obor zrnitosti		100	90		68	49				14	11	
součtová čára propadů		97,55838	83,87071	69,68517	56,78985	39,05164	26,62922	19,69745	15,16231	11,83886	8,536274	-0,14
dolní obor zrnitosti		90	70		42	24				4	3	

Tabulka 7. 2 Varianta 1 – Čára zrnitosti

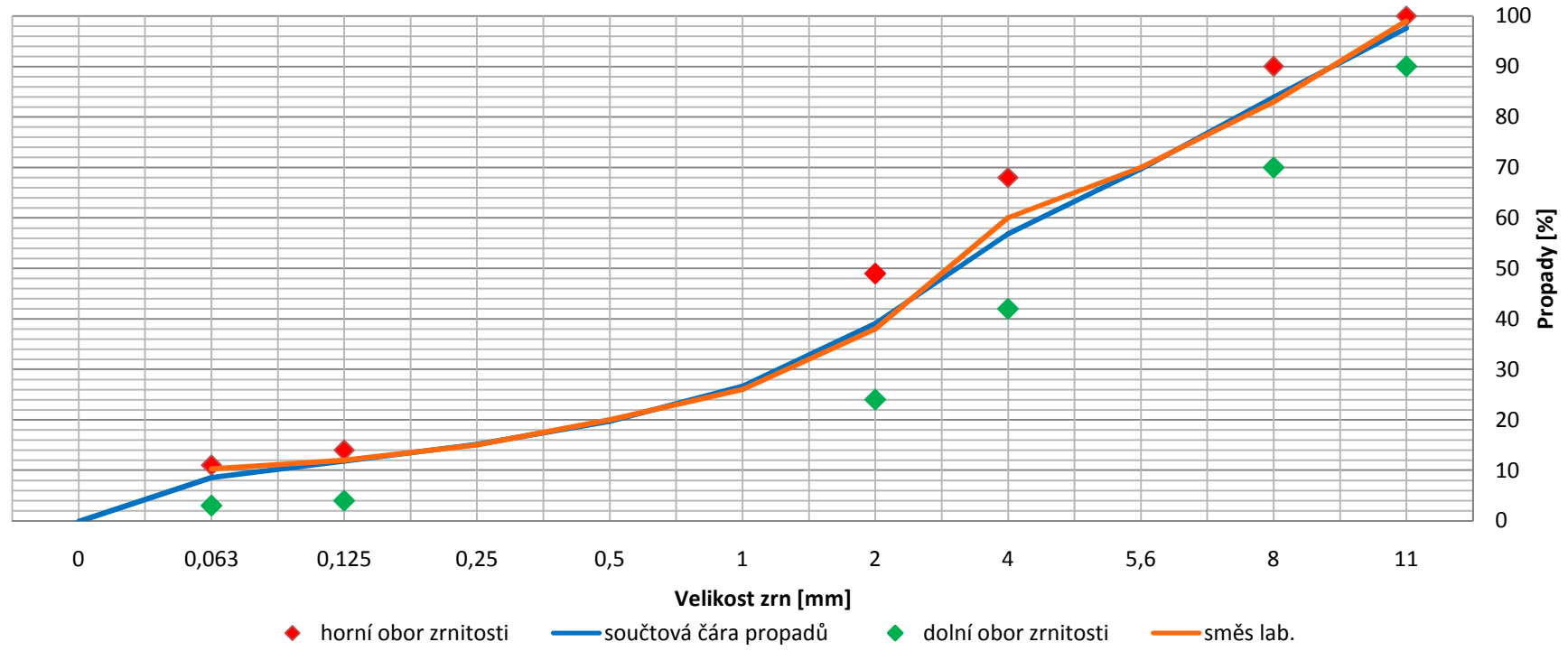


Tabulka 7. 3 Varianta 2 – Propady na sítích

Název frakce / Síto	%	11	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	0
V. Hydřice filer		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,9	18,9	72,4
Mořina 0/4		0,0	0,0	1,0	8,6	22,3	18,5	13,1	9,8	7,2	6,2	13,2
Zbraslav 0/4		0,0	0,0	0,0	3,0	34,0	27,9	13,8	7,7	3,9	2,9	6,9
STK 0/8		0,0	0,1	1,6	4,6	9,7	13,2	21,2	23,5	11,5	4,4	10,2
Zbraslav 4/8		0,0	4,8	43,9	36,9	11,9	1,6	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1
Zbraslav 8/11		14,362	72,815	12,322	0,307	0,029	0,004	0,007	0,512	0,394	0,197	0,014
V. Hydřice filer	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,44	0,95	3,62
Mořina 0/4	24	0,00	0,00	0,23	2,05	5,34	4,45	3,15	2,35	1,72	1,49	3,18
Zbraslav 0/4	27	0,00	0,00	0,00	0,82	9,18	7,54	3,73	2,07	1,06	0,78	1,85
STK 0/8	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zbraslav 4/8	27	0,00	1,31	11,86	9,97	3,21	0,43	0,05	0,03	0,03	0,05	0,02
Zbraslav 8/11	17	2,44	12,38	2,09	0,05	0,00	0,00	0,00	0,09	0,07	0,03	0,00
součtová čára zbytků	100	2,44	13,69	14,19	12,90	17,74	12,42	6,93	4,54	3,32	3,30	8,67
horní obor zrnitosti		100	90		68	49				14	11	
součtová čára propadů		97,55838	83,87071	69,68517	56,78985	39,05164	26,62922	19,69745	15,16231	11,83886	8,536274	-0,14
dolní obor zrnitosti		90	70		42	24				4	3	



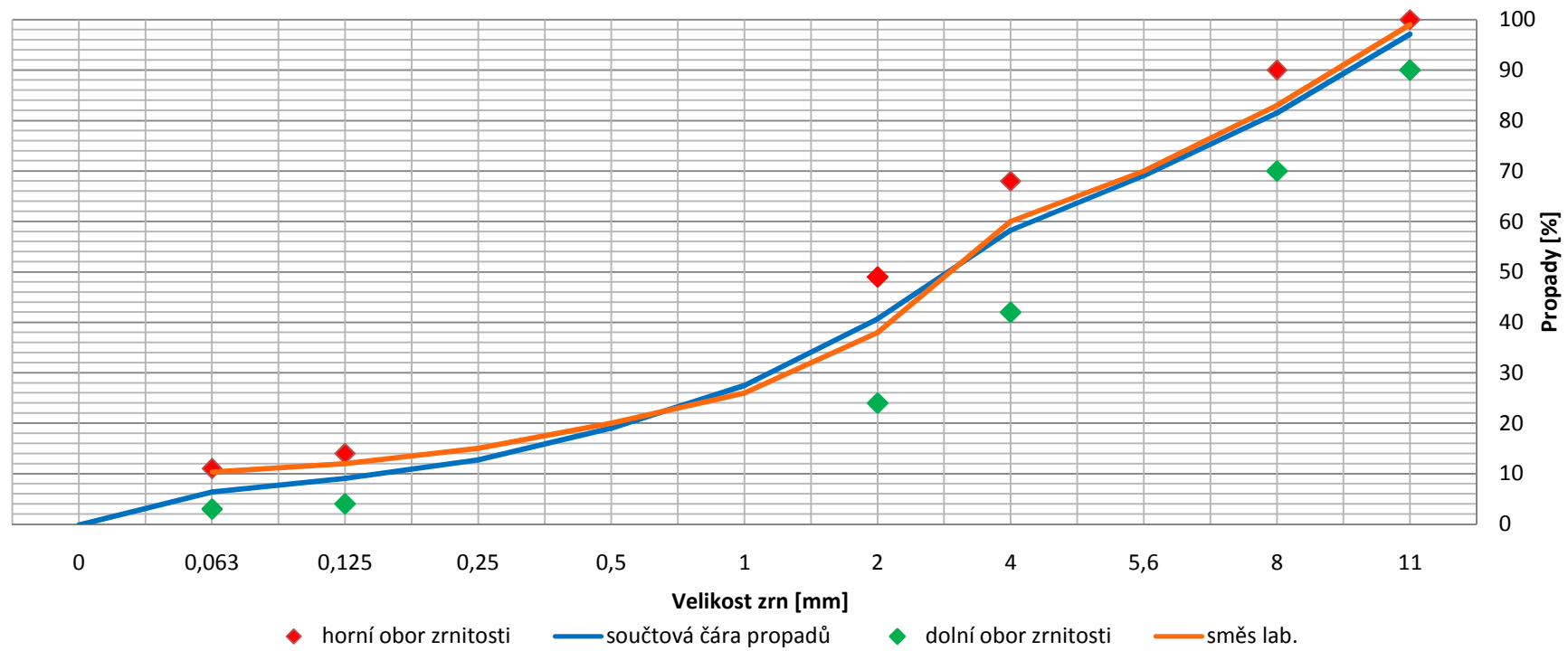
Tabulka 7. 4 Varianta 2 – Čára zrnitosti



Tabulka 7. 5 Varianta 3 – Propady na sítích

Název frakce / Síto	%	11	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	0
V. Hydčice filer		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,9	18,9	72,4
Mořina 0/4		0,0	0,0	1,0	8,6	22,3	18,5	13,1	9,8	7,2	6,2	13,2
Zbraslav 0/4		0,0	0,0	0,0	3,0	34,0	27,9	13,8	7,7	3,9	2,9	6,9
STK 0/8		0,0	0,1	1,6	4,6	9,7	13,2	21,2	23,5	11,5	4,4	10,2
Zbraslav 4/8		0,0	4,8	43,9	36,9	11,9	1,6	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1
Zbraslav 8/11		14,362	72,815	12,322	0,307	0,029	0,004	0,007	0,512	0,394	0,197	0,014
V. Hydčice filer	2,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,38	1,45
Mořina 0/4	14,0	0,00	0,00	0,14	1,20	3,12	2,60	1,84	1,37	1,00	0,87	1,85
Zbraslav 0/4	32,0	0,00	0,00	0,00	0,97	10,88	8,93	4,42	2,45	1,26	0,93	2,20
STK 0/8	10,0	0,00	0,01	0,16	0,46	0,97	1,32	2,12	2,35	1,15	0,44	1,02
Zbraslav 4/8	22,0	0,00	1,07	9,66	8,12	2,62	0,35	0,04	0,02	0,03	0,04	0,02
Zbraslav 8/11	20,0	2,87	14,56	2,46	0,06	0,01	0,00	0,00	0,10	0,08	0,04	0,00
součtová čára zbytků	100,0	2,87	15,64	12,43	10,82	17,59	13,20	8,42	6,30	3,69	2,69	6,53
horní obor zrnitosti		100	90		68	49				14	11	
součtová čára propadů		97,12751	81,48808	69,06279	58,24567	40,65465	27,45335	19,03473	12,738	9,050233	6,356258	-0,18
dolní obor zrnitosti		90	70		42	24				4	3	

Tabulka 7. 6 Varianta 3 – Propady na sítích



Tabulka 9. 1 Varianta 1 – Objemová hmotnost stanovená z rozměrů

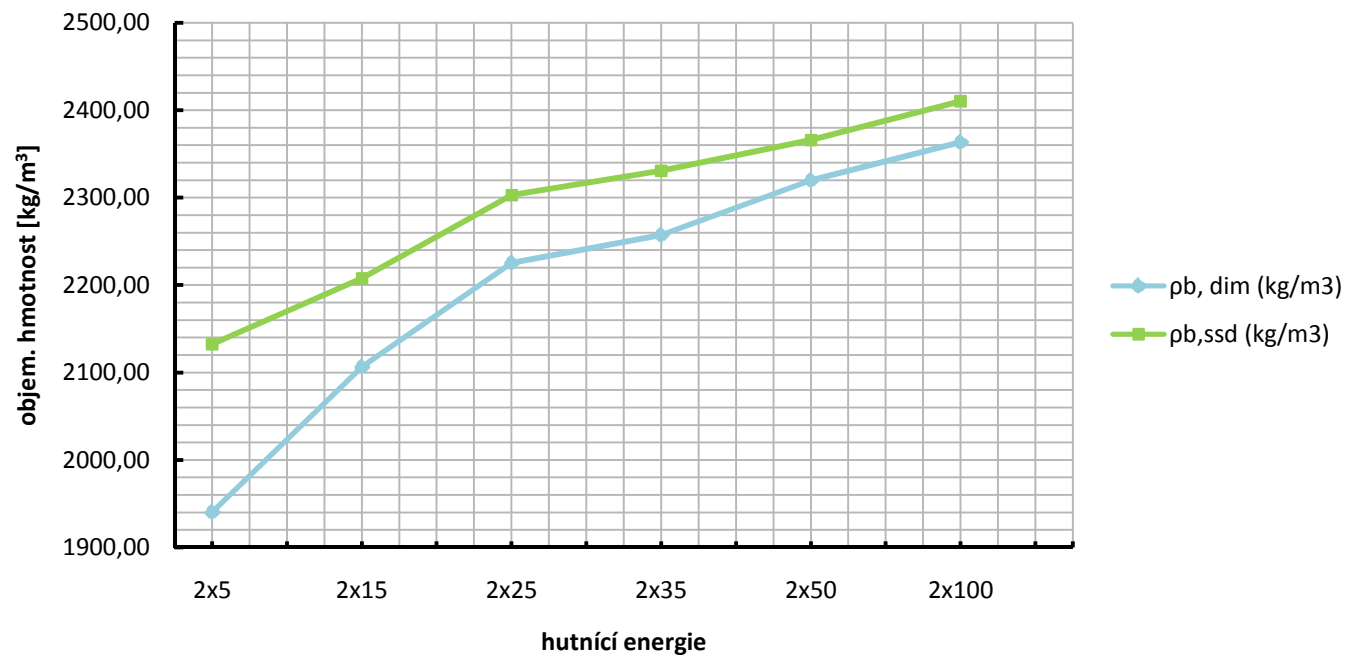
Směs	Hutnění	Pojivo	Těleso	Průměr					Výška					Objemová hmotnost	
				Ø [mm]					h [mm]						$\rho_{b, \text{dim}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
ACO 11+	2x5	PmB 25-55/60 5,6%	5_	101,0	101,7	101,7	101,2	<b>101,4</b>	63,2	63,1	63,4	63,8	<b>63,4</b>	1944,33	<b>1940,29</b>
			5	101,7	101,8	102,0	102,3	<b>101,9</b>	57,7	56,5	57,2	58,0	<b>57,3</b>	1936,26	
	2x15		15_	101,7	101,7	101,8	101,7	<b>101,7</b>	57,1	58,2	57,5	57,1	<b>57,4</b>	2095,96	<b>2106,36</b>
			15	101,8	101,8	101,8	101,9	<b>101,8</b>	57,7	57,8	57,8	58,3	<b>57,9</b>	2116,77	
	2x25		25_	101,7	101,5	101,5	101,5	<b>101,6</b>	55,1	55,1	56,0	55,1	<b>55,3</b>	2225,63	<b>2225,30</b>
			25	101,4	101,7	101,6	101,7	<b>101,6</b>	55,7	55,2	54,3	55,1	<b>55,1</b>	2224,98	
	2x35		35_	101,7	101,4	101,2	101,3	<b>101,4</b>	56,4	55,5	55,7	55,7	<b>55,8</b>	2301,36	<b>2257,33</b>
			35	101,3	101,4	101,6	101,7	<b>101,5</b>	54,9	54,5	55,0	54,2	<b>54,7</b>	2213,31	
	2x50		50_	101,0	101,5	101,6	101,7	<b>101,4</b>	52,3	53,1	54,4	53,7	<b>53,4</b>	2314,46	<b>2319,86</b>
			50	101,9	101,8	101,8	101,9	<b>101,8</b>	53,2	53,1	53,5	53,8	<b>53,4</b>	2325,27	
	2x100		100_	101,7	101,6	101,6	101,7	<b>101,6</b>	51,8	52,1	51,0	51,5	<b>51,6</b>	2375,47	<b>2363,47</b>
			100	101,8	101,8	101,8	101,8	<b>101,8</b>	51,7	52,2	52,4	51,9	<b>52,1</b>	2351,48	

Tabulka 9. 2 Varianta 1 - Objemová hmotnost stanovená z hmotnosti

Směs	Hutnění	Pojivo	Těleso	Hmotnost			Objemová hmotnost	
				m <sub>1</sub> [g]	m <sub>2</sub> [g]	m <sub>3</sub> [g]		ρ <sub>b,ssd</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]
ACO 11+	2x5	PmB 25- 55/60 5,6%	5_	995,1	566,6	1020,9	2187,37	<b>2132,54</b>
			5	906,1	505,4	940,9	2077,72	
	2x15		15_	978,3	553,6	1000,5	2186,05	<b>2207,84</b>
			15	998,1	565,8	1012,6	2229,64	
	2x25		25_	996,9	568,5	999,9	2307,65	<b>2303,06</b>
			25	993,4	564,3	995,9	2298,48	
	2x35		35_	1037,5	598	1038,5	2352,02	<b>2330,99</b>
			35	978,7	561,5	984,6	2309,96	
	2x50		50_	998,2	577,6	999,7	2361,57	<b>2366,11</b>
			50	1011,3	586	1012	2370,66	
	2x100		100_	994	583,8	994,3	2418,08	<b>2410,07</b>
			100	996,1	583,2	997,1	2402,05	

Tabulka 9. 3 Varianta 1 – Porovnání objemových hmotností

### Varianta 1



Tabulka 9. 4 Varianta 2 – Objemová hmotnost stanovená z rozměrů

Směs	Hutnění	Pojivo	Těleso	Průměr					Výška					Obj. hmotnost	
				Ø [mm]					h [mm]						$\rho_{b, dim}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
ACO 11+	2x5	PmB 25- 55/60 6,1 %	5_	101,8	101,7	101,7	101,7	<b>101,7</b>	61,7	61,9	61,9	61,8	<b>61,8</b>	1988,00	1987,38
			5	101,6	101,8	101,8	101,7	<b>101,7</b>	62,2	61,8	62,0	62,3	<b>62,1</b>	1986,77	
	2x15		15_	101,5	101,5	101,5	101,5	<b>101,5</b>	56,2	56,8	56,4	56,7	<b>56,5</b>	2186,17	2185,98
			15	101,8	101,7	101,7	101,8	<b>101,7</b>	55,6	57,2	56,0	56,1	<b>56,2</b>	2185,79	
	2x25		25_	102,1	102,2	102,3	102,3	<b>102,2</b>	53,9	54,0	53,8	53,8	<b>53,9</b>	2269,03	2265,74
			25	102,2	102,2	102,2	102,3	<b>102,2</b>	53,5	54,2	53,5	54,0	<b>53,8</b>	2262,44	
	2x35		35_	102,4	101,7	101,7	101,8	<b>101,9</b>	54,4	54,6	54,5	54,4	<b>54,5</b>	2247,50	2289,47
			35	102,1	101,8	101,8	101,6	<b>101,9</b>	52,0	52,8	51,9	52,9	<b>52,4</b>	2331,44	
	2x50		50_	101,7	101,7	101,7	101,8	<b>101,7</b>	53,2	52,6	53,5	52,8	<b>53,0</b>	2316,07	2311,36
			50	101,8	101,8	101,8	101,7	<b>101,8</b>	53,0	53,6	53,0	53,3	<b>53,2</b>	2306,65	
	2x100		100_	102,3	102,3	102,3	102,4	<b>102,3</b>	51,4	51,2	50,9	51,4	<b>51,2</b>	2336,28	2351,10
			100	102,1	102,2	102,1	102,0	<b>102,1</b>	51,7	51,7	51,2	51,7	<b>51,5</b>	2365,91	

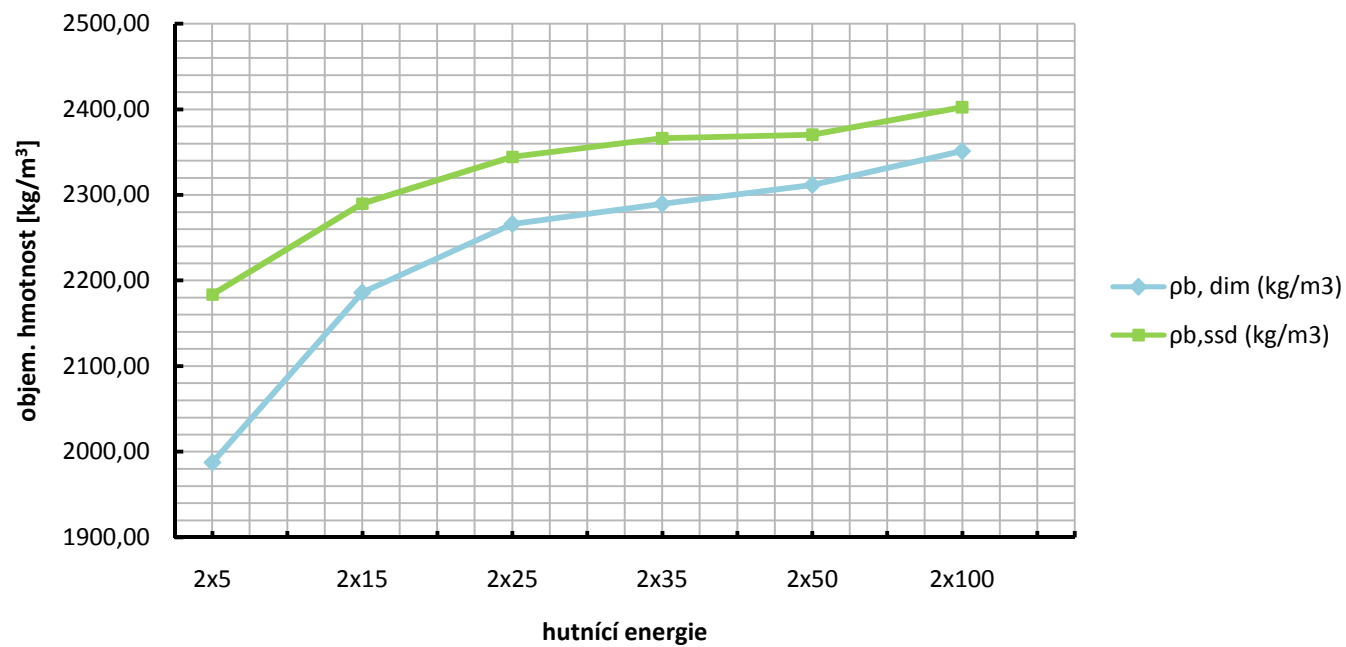
Tabulka 9. 5 Varianta 2 – Objemová hmotnost stanovená z hmotnosti

Směs	Hutnění	Pojivo	Těleso	Hmotnost			Objemová hmotnost	
				m <sub>1</sub> [g]	m <sub>2</sub> [g]	m <sub>3</sub> [g]		ρ <sub>b,ssd</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]
ACO 11+	2x5	PmB 25- 55/60 6,1%	5_	998,6	566,1	1019,9	2196,79	2183,79
			5	1002	565,6	1026,4	2170,78	
	2x15		15_	1000,7	569,2	1005,1	2291,81	2289,88
			15	998,1	568,8	1004,3	2287,95	
	2x25		25_	1002,1	579	1004	2353,87	2344,51
			25	998,1	573,5	1000,2	2335,14	
	2x35		35_	998,7	574,3	1001,2	2335,45	2365,92
			35	995	581,7	996,2	2396,40	
	2x50		50_	998,1	580,8	999,6	2379,19	2370,00
			50	998,2	577,6	999,7	2360,82	
	2x100		100_	984,1	574,2	985,8	2387,60	2402,22
			100	998,4	586,8	999,2	2416,83	



Tabulka 9. 6 Varianta 2 – Porovnání objemových hmotností

### Varianta 2



Tabulka 9. 7 Varianta 3 – Objemová hmotnost stanovená z rozměrů

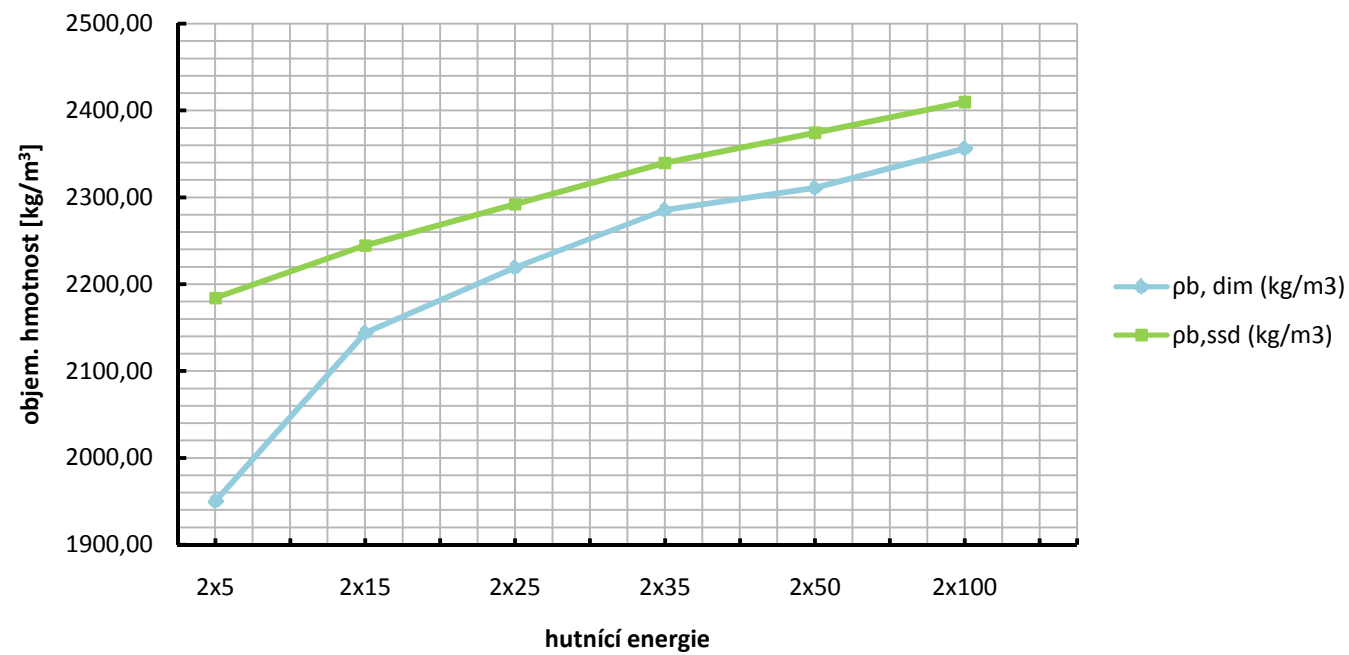
Směs	Hutnění	Pojivo	Těleso	Průměr					Výška					Obj. hmotnost	
				Ø [mm]					h [mm]					ρ <sub>b, dim</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	
ACO 11+	2x5	PmB 25- 55/60 5,6 %	5_	101,83	101,77	101,93	101,76	<b>101,82</b>	61,61	61,84	62,39	61,90	<b>61,94</b>	1984,82	<b>1950,08</b>
			5	101,80	101,83	101,84	101,79	<b>101,82</b>	64,75	64,28	63,90	63,86	<b>64,20</b>	1915,34	
	2x15		15_	101,70	101,75	101,70	101,78	<b>101,73</b>	57,01	57,68	57,84	57,53	<b>57,52</b>	2151,19	<b>2143,76</b>
			15	101,85	101,84	101,81	101,92	<b>101,86</b>	57,89	57,35	57,51	57,80	<b>57,64</b>	2136,34	
	2x25		25_	101,72	101,73	101,91	101,85	<b>101,80</b>	54,88	54,91	54,97	55,44	<b>55,05</b>	2228,13	<b>2219,17</b>
			25	103,19	103,13	102,90	103,17	<b>103,10</b>	56,34	56,54	57,39	56,32	<b>56,65</b>	2210,20	
	2x35		35_	101,60	101,64	101,77	101,60	<b>101,65</b>	53,15	53,08	53,63	53,61	<b>53,37</b>	2309,78	<b>2285,31</b>
			35	102,43	102,37	102,27	102,19	<b>102,32</b>	53,92	54,21	54,27	53,78	<b>54,05</b>	2260,84	
	2x50		50_	101,74	101,85	101,82	102,25	<b>101,92</b>	53,11	52,31	52,78	53,01	<b>52,80</b>	2308,79	<b>2310,72</b>
			50	101,75	101,77	101,79	101,76	<b>101,77</b>	52,97	52,82	53,11	53,61	<b>53,13</b>	2312,66	
	2x100		100_	101,87	101,88	101,88	101,91	<b>101,89</b>	48,63	49,21	48,84	48,80	<b>48,87</b>	2360,01	<b>2356,19</b>
			100	102,25	102,21	102,18	102,58	<b>102,31</b>	51,38	51,70	52,06	51,82	<b>51,74</b>	2352,38	

Tabulka 9. 8 Varianta 3 – Objemová hmotnost stanovená z hmotnosti

Směs	Hutnění	Pojivo	Těleso	Hmotnost			Objemová hmotnost	
				m <sub>1</sub> [g]	m <sub>2</sub> [g]	m <sub>3</sub> [g]		ρ <sub>b,ssd</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]
ACO 11+	2x5	PmB 25- 55/60 5,6%	5_	1001	573,3	1023,7	2217,31	2184,23
			5	1001,1	561,5	1025,8	2151,14	
	2x15		15_	1005,7	569,9	1016,8	2245,17	2244,50
			15	1003,3	569,9	1016	2243,83	
	2x25		25_	998,4	570,7	1002,5	2306,81	2292,05
			25	1045,2	595,5	1053,4	2277,29	
	2x35		35_	1000,4	579,1	1006,6	2334,68	2339,58
			35	1004,6	579,1	1006,6	2344,48	
	2x50		50_	994,5	579,1	996,6	2378,74	2374,11
			50	999,4	579,6	1000,4	2369,49	
	2x100		100_	940,3	552,1	941,4	2412,02	2409,50
			100	1000,5	586,7	1001,4	2406,99	

Tabulka 9. 9 Varianta 3 – Porovnání objemových hmotností

### Varianta 3



Tabulka 9. 10 Varianta 1 – Shrnutí výsledků

	Směs	Pojivo	Hutnění	Těleso	Rozměry		Hmotnost	Objemová hmotnost			Mezerovitost		C	
					Ø	h	m <sub>1</sub>	ρ <sub>b, dim</sub>	ρ <sub>b, ssd</sub>	ρ <sub>mv</sub>	V <sub>m (pb, dim)</sub>	V <sub>m (pb, ssd)</sub>		
					mm	mm	g	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	%		-
<b>VARIANTA 1</b>	ACO 11+	PmB 25- 55/60 5,6 %	2x5	5_	101,41	63,37	995,10	1940,29	2132,54	2456,70	21,02	13,19	14,2	<b>NORMÁLNĚ ZHUTNITELNÉ</b>
				5	101,94	57,34	906,10							
			2x15	15_	101,71	57,45	978,30	2106,36	2207,84		14,26	10,13		
				15	101,83	57,90	998,10							
			2x25	25_	101,56	55,30	996,90	2225,30	2303,06		9,42	6,25		
				25	101,58	55,09	993,40							
			2x35	35_	101,41	55,81	1037,50	2257,33	2330,99		8,12	5,12		
				35	101,49	54,66	978,70							
			2x50	50_	101,45	53,36	998,20	2319,86	2366,11		5,57	3,69		
				50	101,84	53,39	1011,30							
			2x100	100_	101,63	51,58	994,00	2363,47	2410,07		3,79	1,90		
				100	101,79	52,06	996,10							

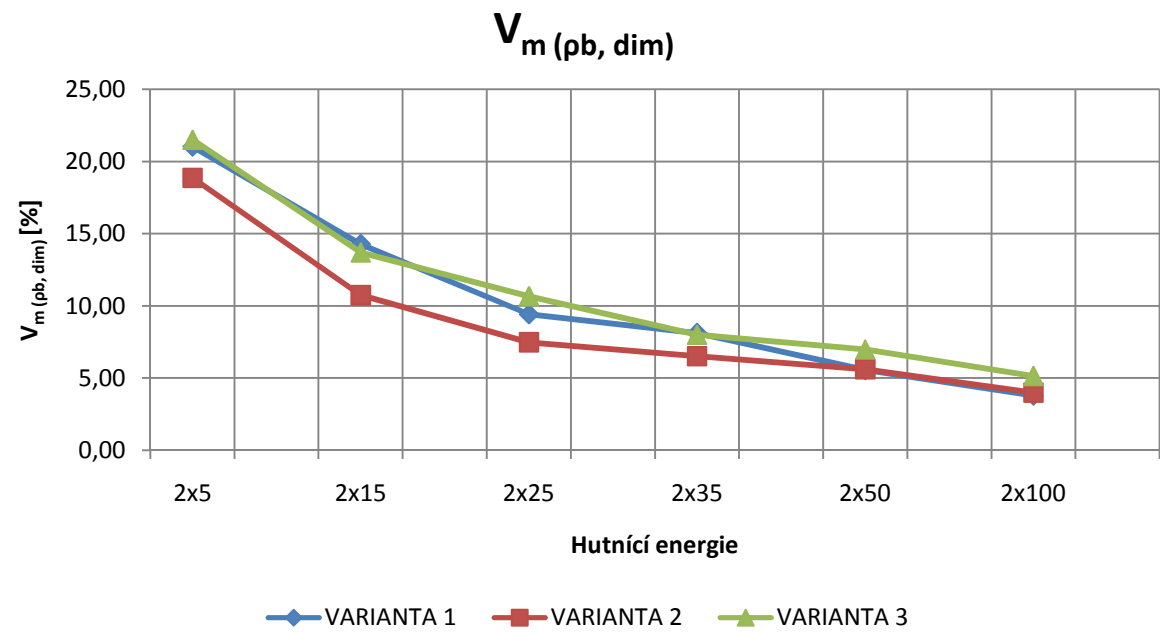
Tabulka 9. 11 Varianta 2 – Shrnutí výsledků

	Směs	Pojivo	Hutnění	Těleso	Rozměry		Hmotnost	Objemová hmotnost			Mezerovitost		C	
					Ø	h	m <sub>1</sub>	ρ <sub>b, dim</sub>	ρ <sub>b, ssd</sub>	ρ <sub>mv</sub>	V <sub>m (pb, dim)</sub>	V <sub>m (pb, ssd)</sub>		
					mm	mm	g	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	%	-	
<b>VARIANTA 2</b>	ACO 11+	PmB 25- 55/60 6,1 %	2x5	5_	101,72	61,82	998,6	1987,38	2183,79	2448,97	18,85	10,83	10,5	<b>LEHCE ZHUTNITELNÉ</b>
				5	101,71	62,07	1002							
			2x15	15_	101,54	56,53	1000,7	2185,98	2289,88		10,74	6,50		
				15	101,73	56,19	998,1							
			2x25	25_	102,19	53,85	1002,1	2265,74	2344,51		7,48	4,27		
				25	102,21	53,77	998,1							
			2x35	35_	101,90	54,49	998,7	2289,47	2365,92		6,51	3,39		
				35	101,85	52,38	995							
			2x50	50_	101,71	53,04	998,1	2311,36	2370,00		5,62	3,22		
				50	101,76	53,21	998,2							
			2x100	100_	102,32	51,23	984,1	2351,10	2402,22		4,00	1,91		
				100	102,10	51,55	998,4							

Tabulka 9. 12 Varianta 3 – Shrnutí výsledků

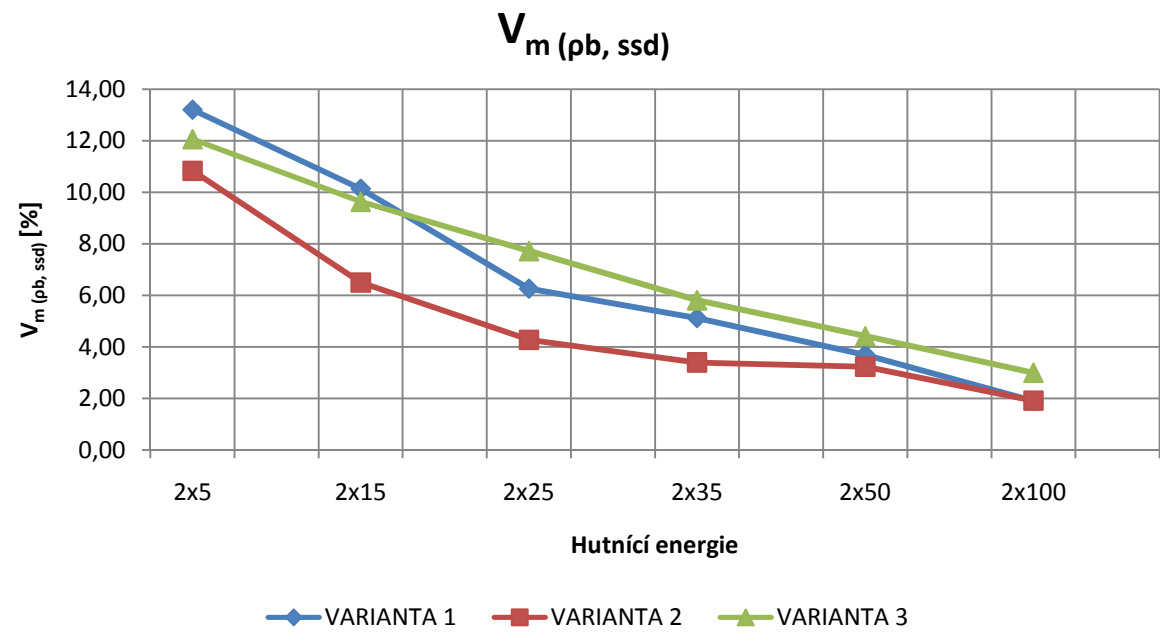
	Směs	Pojivo	Hutnění	Těleso	Rozměry		Hmotnost	Objemová hmotnost			Mezerovitost		C	
					Ø	h	m <sub>1</sub>	ρ <sub>b, dim</sub>	ρ <sub>b, ssd</sub>	ρ <sub>mv</sub>	V <sub>m (pb, dim)</sub>	V <sub>m (pb, ssd)</sub>		
					mm	mm	g	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	%	-	
<b>VARIANTA 3</b>	ACO 11+	PmB 25- 55/60 5,6 %	2x5	5_	101,82	61,94	1001	1950,08	2184,23	2483,80	21,49	12,06	24,5	<b>NORMÁLNĚ ZHUTNITELNÉ</b>
				5	101,82	64,20	1001,1							
			2x15	15_	101,73	57,52	1005,7	2143,76	2244,50		13,69	9,63		
				15	101,86	57,64	1003,3							
			2x25	25_	101,80	55,05	998,4	2219,17	2292,05		10,65	7,72		
				25	103,10	56,65	1045,2							
			2x35	35_	101,65	53,37	1000,4	2285,31	2339,58		7,99	5,81		
				35	102,32	54,05	1004,6							
			2x50	50_	101,92	52,80	994,5	2310,72	2374,11		6,97	4,42		
				50	101,77	53,13	999,4							
			2x100	100_	101,89	48,87	940,3	2356,19	2409,50		5,14	2,99		
				100	102,31	51,74	1000,5							

Tabulka 9. 13 Mezerovitost stanovená z rozměrů



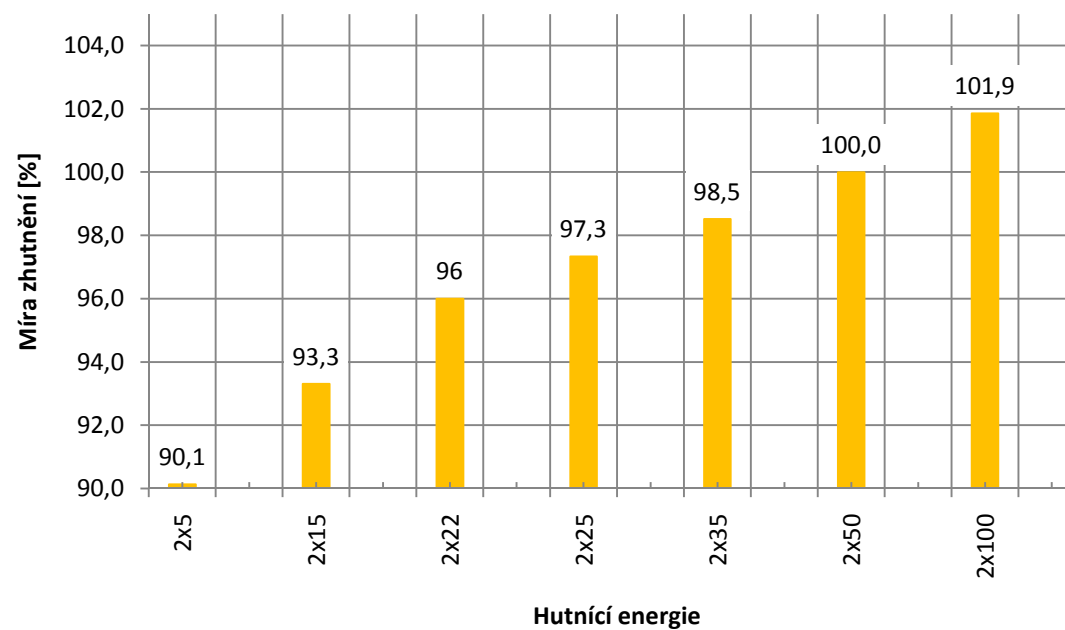


Tabulka 9. 14 Mezerovitost stanovená z hmotnosti



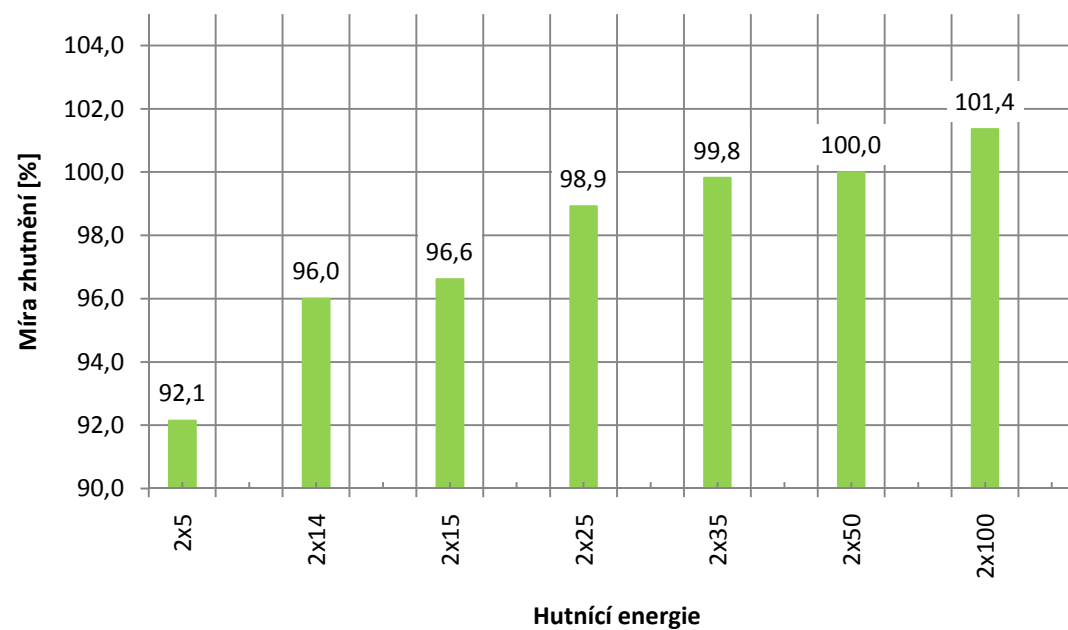
Tabulka 9. 15 Varianta 1 – Míra zhutnění

	Hutnění	Míra zhutnění [%]
<b>VARIANTA 1</b>	2x5	90,1
	2x15	93,3
	2x22	96
	2x25	97,3
	2x35	98,5
	2x50	100,0
	2x100	101,9



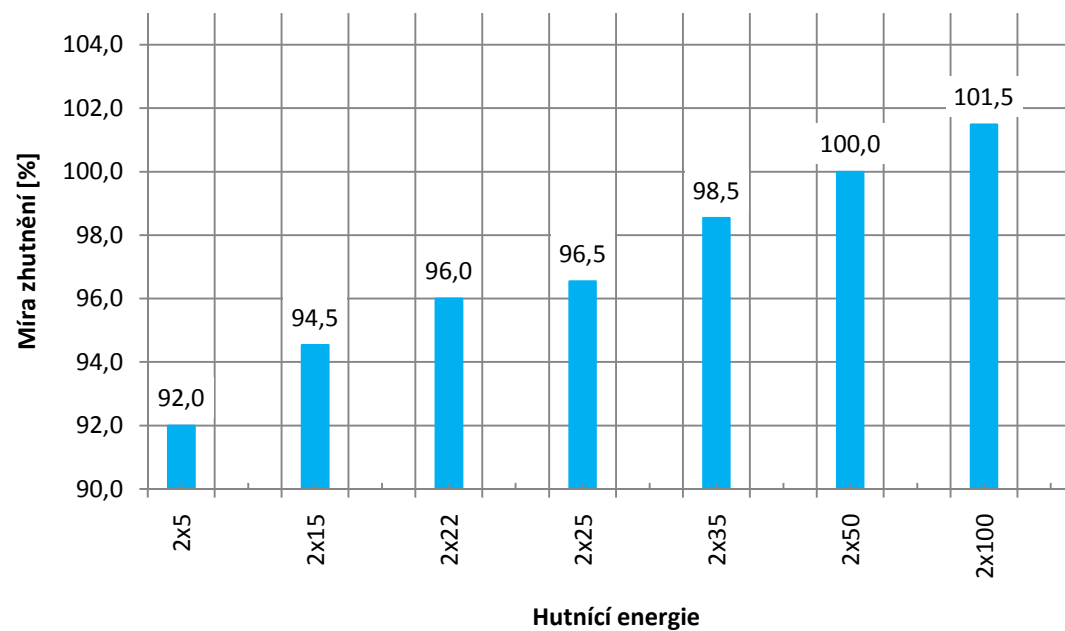
Tabulka 9. 16 Varianta 2 – Míra zhutnění

	Hutnění	Míra zhutnění [%]
<b>VARIANTA 2</b>	2x5	92,1
	2x14	96,0
	2x15	96,6
	2x25	98,9
	2x35	99,8
	2x50	100,0
	2x100	101,4



Tabulka 9. 17 Varianta 3 – Míra zhutnění

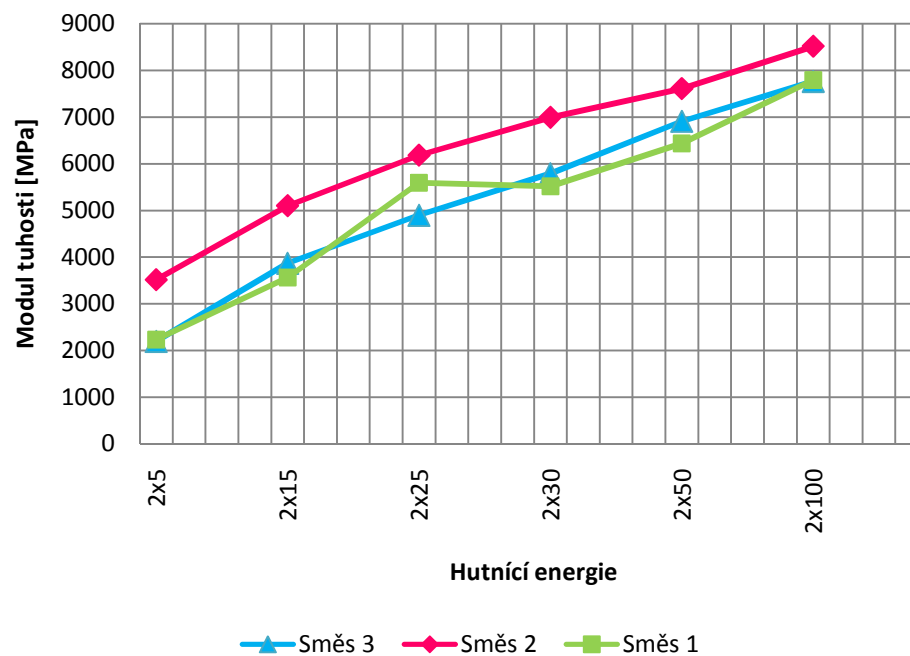
	Hutnění	Míra zhutnění [%]
<b>VARIANTA 3</b>	2x5	92,0
	2x15	94,5
	2x22	96,0
	2x25	96,5
	2x35	98,5
	2x50	100,0
	2x100	101,5



Tabulka 9. 18 Moduly tuhosti stanovené na suché směsi při teplotě 15 °C

Modul tuhosti [MPa] SUCHÁ SMĚS				
	Těleso	Směs 1	Směs 2	Směs 3
Teplota zkoušení 15 °C	2x5	2235	3516	2196
	2x15	3567	5100	3868
	2x25	5593	6182	4895
	2x35	5516	6993	5787
	2x50	6437	7609	6908
	2x100	7795	8514	7762

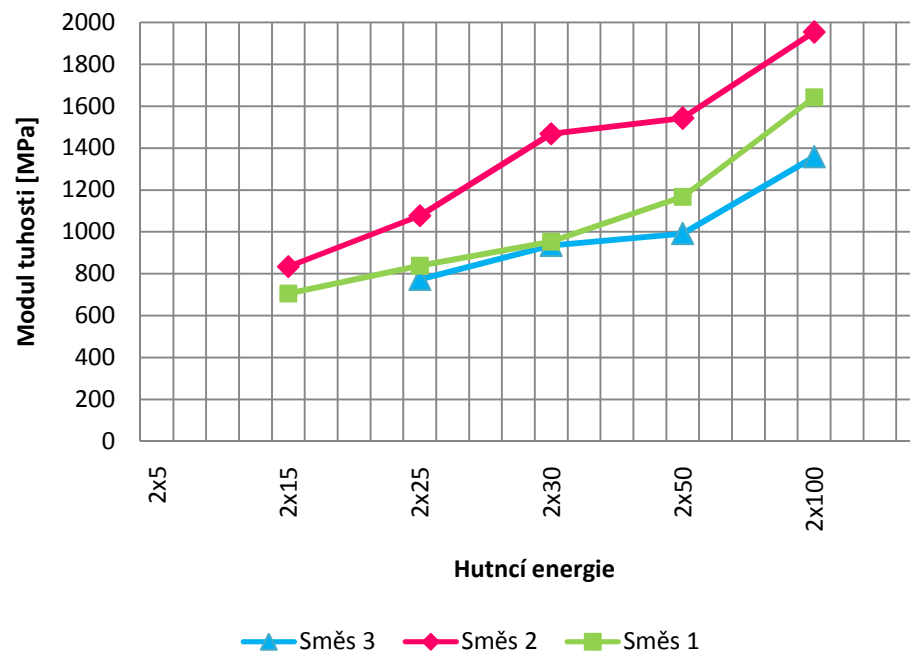
Srovnání modulů tuhosti při teplotě  
15 °C



Tabulka 9. 19 Moduly tuhosti stanovené na suché směsi při 40 °C

Modul tuhosti [MPa] SUCHÁ SMĚS				
	Těleso	Směs 1	Směs 2	Směs 3
Teplota zkoušení 40 °C	2x5			
	2x15	706	835	
	2x25	839	1078	774
	2x35	953	1469	935
	2x50	1168	1543	991
	2x100	1643	1954	1358

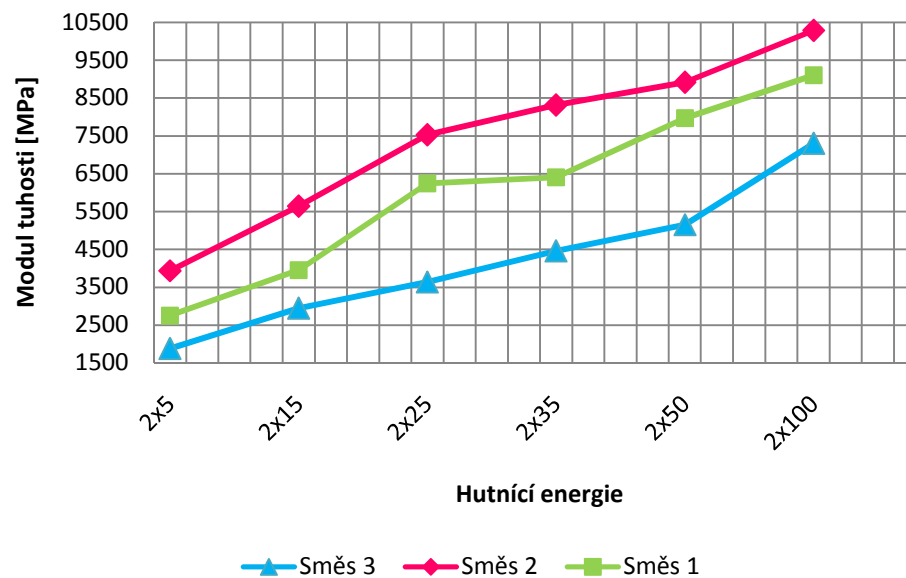
### Srovnání modulů tuhosti při teplotě 40 °C



Tabulka 9. 20 Moduly tuhosti stanovené na nasycené směsi při teplotě 15 °C

<b>Modul tuhosti [MPa] NASYCENÉ SMĚŠ</b>				
	<b>Těleso</b>	<b>Směs 1</b>	<b>Směs 2</b>	<b>Směs 3</b>
<b>Teplota zkoušení 15 °C</b>	2x5	2746	3935	1877
	2x15	3949	5638	2940
	2x25	6240	7525	3640
	2x35	6400	8313	4455
	2x50	7970	8917	5155
	2x100	9102	10285	7297

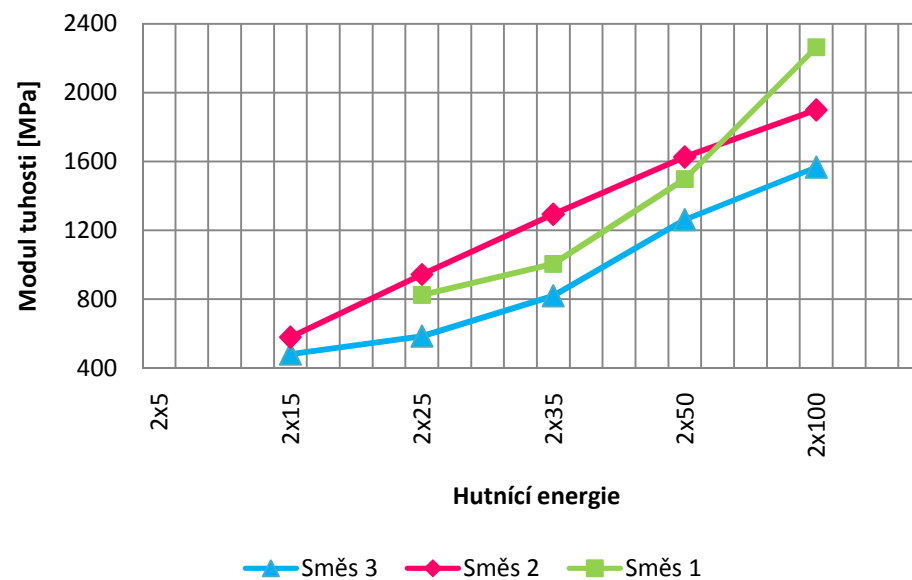
### Srovnání modulů tuhosti při teplotě 15 °C



Tabulka 9. 21 Moduly tuhosti stanovené na nasycené směsi při teplotě 40 °C

<b>Modul tuhosti [MPa] NASYCENÁ SMĚS</b>				
	<b>Těleso</b>	<b>Směs 1</b>	<b>Směs 2</b>	<b>Směs 3</b>
<b>Teplota zkoušení 40 °C</b>	2x5			
	2x15		579	480
	2x25	825	945	585
	2x35	1004	1293	819
	2x50	1498	1626	1261
	2x100	2263	1899	1566

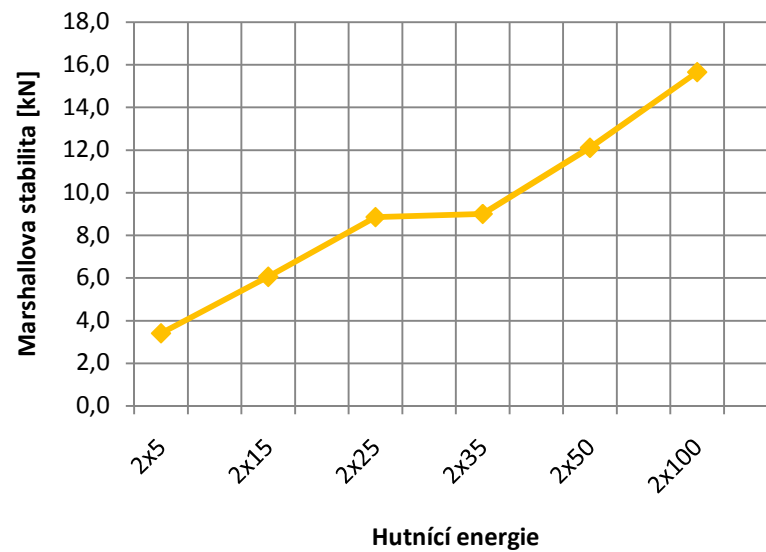
**Srovnání modulů tuhosti při teplotě 40 °C**





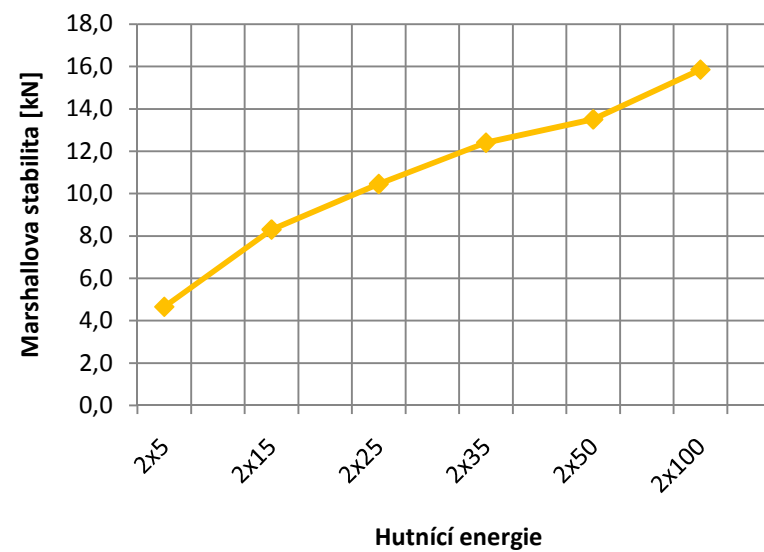
Tabulka 9. 22 Varianta 1 - Marshallova stabilita

	Směs	Hutnění	Pojivo	Těleso	Marshallova stabilita	
						[kN]
<b>VARIANTA 1</b>	ACO 11+	2x5	PmB 25- 55/60 5,6 %	5_	3,4	3,4
				5	3,4	
		2x15		15_	5,5	6,1
				15	6,6	
		2x25		25_	9	8,9
				25	8,7	
		2x35		35_	10,3	9,0
				35	7,7	
		2x50		50_	11,6	12,1
				50	12,6	
		2x100		100_	16,2	15,7
				100	15,1	



Tabulka 9. 23 Varianta 2 – Marshallova stabilita

	Směs	Hutnění	Pojivo	Těleso	Marshallova stabilita	
						[kN]
<b>VARIANTA 2</b>	ACO 11+	2x5	PmB 25- 55/60 6,1 %	5_	4,7	4,7
				5	4,6	
		2x15		15_	8,3	8,3
				15	8,3	
		2x25		25_	10,7	10,5
				25	10,2	
		2x35		35_	10,5	12,4
				35	14,3	
		2x50		50_	13,6	13,5
				50	13,4	
		2x100		100_	15,1	15,9
				100	16,6	



Tabulka 9. 24 Varianta 3 – Marshallova stabilita

	Směs	Hutnění	Pojivo	Těleso	Marshallova stabilita		
						[kN]	
<b>VARIANTA 3</b>	ACO 11+	2x5	PmB 25- 55/60 5,6%	5_	4,5	4,1	
				5	3,6		
				2x15	15_	6,8	6,6
					15	6,4	
				2x25	25_	8,7	8,4
					25	8	
		2x35		35_	11,8	10,6	
				35	9,3		
		2x50		50_	13,5	12,5	
				50	11,5		
		2x100		100_	18,4	17,1	
				100	15,8		

