ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Katedra silničních staveb

Bakalářská práce

Zhutňování a zhutnitelnost asfaltových směsí

Compaction and compactibility of asphalt mixes

Josef Prášek

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: Ing. Petr Mondschein Ph.D.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Prášek Jméno: Josef Osobní číslo:

Zadávající katedra: katedra silničních staveb

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a doprava

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Zhutňování asfaltových směsí a jejich zhutnitelnost

Název bakalářské práce anglicky: Compaction and Compactability of Asphalt Mixes

Pokyny pro vypracování:
Rešerše problematiky zhutňování asfaltových směsí, problematika ochlozování asfaltových směsí, rešerše zhutňovacích prostředků, v praktické části bude stanoven parametr zhutnitelnosti asfaltové směsi za pomocí rozšířené Marshallovy zkoušky a gyrátoru.

Seznam doporučené literatury:
Pokládka asfaltových hutněných směsí - Doc. Ing. Václav Hanzík, CSc.
ČSN 73 6121, zkušební normy ČSN EN 12697

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

Datum zadání bakalářské práce: 20.2.2017 Termín odevzdání bakalářské práce: 28.5.2017
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

20. 2. 2017

Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že zadanou bakalářskou práci na téma „Zhutňování a zhutnitelnost asfaltových směsí“ jsem vypracoval samostatně, bez cizí pomoci s jedinou výjimkou, a to poskytnutou konzultací s vedoucím bakalářské práce. Uvedl jsem veškerý seznam použitých 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 námitky pro užití této bakalářské práce, či její části.

V Praze dne ....

Josef Prášek

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Petru Mondscheinovi Ph.D. za odborné vedení mé práce, za pomoc, veškeré rady a trpělivost při zpracování této práce. Také bych rád poděkoval za pomoc pracovníkům silniční laboratoře fakulty stavební a to především Ing. Adrianě Kotoušové, Ing. Janu Sudovi a Jaroslavu Kasalickému.

Anotace

Tato bakalářská práce nese název Zhutňování asfaltových směsí a jejich zhutnitelnost. Zhutňováním se zabývá teoretická část této práce, která se podrobně zabývá stroji pro rozprostírání asfaltových směsí, zhutňovacími prostředky a jejich základními charakteristikami, využitím a konstrukcí. Poslední kapitolou teoretické části jsou faktory ovlivňující zhutňování. Cílem praktické části je zjištění parametrů zhutnitelnosti dvěma různými metodami při porovnávání třech asfaltových směsí. A dále na provedených zkouškách stanovit rozdílné výsledky vzorků s rozdílnou energii zhutnění. Je v ní popsána výroba zkušebních těles, provedené zkoušky a vyhodnocení výsledků.

Klíčová slova

Zhutňování, zhutnitelnost, parametr zhutnitelnosti, zhutňovací prostředky, Marshallův pěch, gyrátor

Abstract

The name of this bachleor thesis is Compaction and compactibility of asphalt mixes. The theoretical part deals with the compaction, machines for spreading asphalt mixtures, compaction machines and their basic characteristics, usage and construction. The last chapter of the theoretical part is the factors influencing compaction. The aim of the practical part is to find the parameters of compactibility by two different methods when comparing the three asphalt mixtures. And on the tests determine different results of samples with different compaction energy. It describes the production of test bodies, the tests performed and the evaluation of the results.

Key words

Compaction, compactibilty, parameter of compactibility, compaction machines, Marshall´s tamper, gyratory

Obsah

1. Úvod ... 9
2. Stroje pro rozprostírání asfaltových směsí ... 10
2.1 Dozery ... 10
2.2 Grejdry ... 10
2.3 Rozhrnovače ... 10
2.4 Finišery ... 10
3. Doplňkové zhutňovací prostředky ... 11
3.1 Vibrační pěchy ... 11
3.2 Vibrační desky ... 12
4. Silniční válce ... 12
4.1 Statické válce s hladkými ocelovými běhouny ... 13
4.1.1 Charakteristiky statických válců s ocelovými běhouny ... 13
4.2 Pneumatikové válce ... 15
4.2.1 Charakteristiky pneumatikových válců ... 15
4.3 Vibrační válce ... 18
4.3.1 Charakteristiky vibračních válců ... 19
4.4 Oscilační válce ... 23
4.4.1 Konstrukce oscilačních válců ... 23
4.4.2 Použití oscilačních válců ... 24
4.5 Kombinované válce ... 25
5. Důležité faktory ovlivňující zhutňování ... 26
5.1 Materiálové charakteristiky ... 27
5.2 Tloušťka vrstvy ... 28
5.3 Charakteristiky válců ... 28
5.4 Počet pojezdů ... 29
6. Praktická část ... 30
6.1 Kamenivo ... 30
6.2 Určení zrnitosti ... 32
6.3 Asfaltové pojivo ... 33
6.4 Návrh složení směsi ... 34
6.5 Příprava směsi ... 34
6.6 Hutnění Marshallovým pěchem ... 36
6.7 Hutnění gyrátorem ... 38
6.8 Stanovení objemové hmotnosti ... 39

6.8.1 Objemová hmotnost podle rozměrů ... 39
6.8.2 Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch ... 40
6.9 Stanovení maximální objemové hmotnosti ... 41
6.10 Stanovení mezerovitosti ... 42
6.11 Modul tuhosti ... 43
6.12 Marshallova zkouška ... 44
6.13 Stanovení zhutnitelnosti ... 46
6.13.1 Zhutňování Marshallovým pěchem ... 46
6.13.2 Zhutňování gyrátorem ... 47
7. Výsledky praktické části ... 48
7.1 Zrnitost ... 48
7.2 Objemová hmotnost ... 48
7.3 Modul tuhosti ... 49
7.4 Marshallova zkouška ... 50
7.5 Zhutnitelnost ... 51
8. Závěr ... 53
9. Zdroje ... 54
10. Seznam obrázků a tabulek ... 57
10.1 Seznam obrázků ... 57
10.2 Seznam tabulek ... 57
11. Přílohy ... 60

1. Úvod

Celá tato bakalářská práce se zabývá zhutňováním a zhutnitelností asfaltových směsí vyráběných za horka. Způsob zhutňování a dosažená míra zhutnění mají zásadní vliv na kvalitu a životnost pokládané vrstvy a poté i celého souvrství vozovky.

Teoretická část se zabývala stroji pro rozprostírání asfaltových směsí především z hlediska míry předhutnění. V části zhutňovacích prostředků se práce věnovala nejprve jejich doplňkovým možnostem, které jsou dnes v těžce přístupných místech stále používány. Největší pozornost se však v teoretické části věnovalo konvenčním zhutňovacím prostředkům, tedy silničním válcům. Ty jsou dnes i přes snahu nahradit je finišery s dostatečnou mírou předhutnění stále nedílnou součástí hutnícího procesu. Zmíněny byly válce statické, pneumatikové, válce hutnící dynamickými účinky a válce kombinované. V závěru teoretické části se práce zabývá důležitými faktory ovlivňující zhutňování vycházející z Nijboerova vzorce zhutňovacího faktoru.

V praktické části se porovnávaly 3 asfaltové směsi z hlediska zhutnitelnosti. Šlo o porovnání směsí ACO 11 S, ACO 11 + a SMA 11 S. Bylo vyrobeno 63 zkušebních vzorků, tedy 21 od každé směsi. Pro porovnání byly vyrobeny směsi na Marshallově pěchu a na gyrátoru. Poté se na všech vzorcích stanovovala objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost, mezerovitost, zhutnitelnost, modul tuhosti a stabilita podle Marshalla.

Na těchto vzorcích se zjišťoval vliv na zhutnitelnost u stejných typů směsí s rozdílnými kvalitativními požadavky a směsí s rozdílným průběhem čáry zrnitosti kameniva.

2. Stroje pro rozprostírání asfaltových směsí

Hutněné asfaltové směsi se po dopravě z výrobny na staveniště rozprostírají tak, aby byla dodržena tloušťka, projektované výšky a příčný sklon vrstvy. Pro rozprostření směsi existují dvě možnosti, a to ruční rozprostírání a pokládka pomocí strojů. Pří ručním rozprostírání je problém v dodržování předepsaných příčných sklonů, rovnosti povrchu a homogenním předhutnění vrstvy. Proto se používá pouze v případech, kdy nelze použít strojní pokládku, například při rozprostírání na chodnících a ve stísněných poměrech na místních komunikacích. Ale i tam je tendence se ručnímu rozprostírání vyhnout – například chodníkovými finišery.

Existuje hned několik mechanizačních strojů pro strojní pokládku.

2.1 Dozery

Dozery jsou pásové či kolové rozprostírací stroje, jež je možné použít především pro pokládku podkladních vrstev, není-li podklad dostatečně stabilní pro použití jiného stroje – např. finišeru. Směs rozprostírají pouze pomocí přední radlice, a tak dochází k nadměrnému ochlazování a nestejnoměrnému předhutnění směsi.

2.2 Grejdry

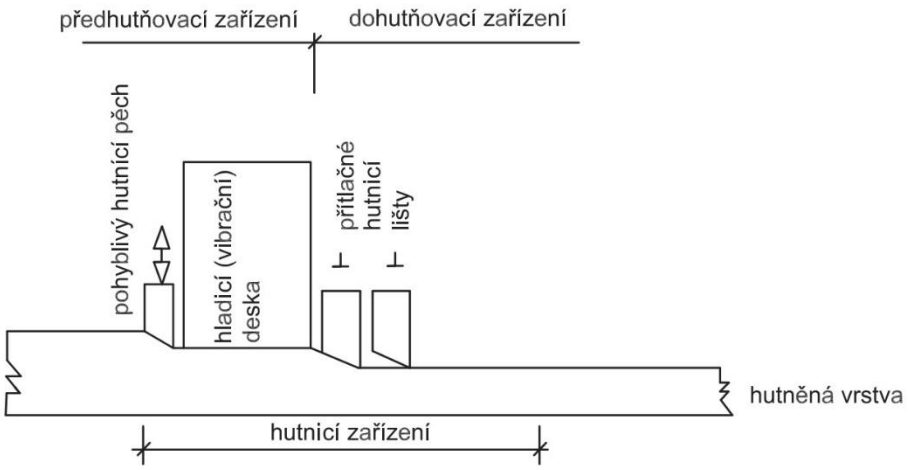
Jejich použití je obvykle u rozprostírání nestmelených směsí, nicméně dají se využít i pro pokládku podkladních vrstev hutněných asfaltových směsí. Oproti dozerům dokážou zajistit větší rovnost povrchu a přesnější příčný sklon, zejména jsou-li vybaveny nivelačním zařízením.

2.3 Rozhrnovače

Jde převážně o menší stroje, a proto se používají především na staveništích malých rozměrů. Díky svému nízkému výkonu se dnes prakticky nepoužívají.

2.4 Finišery

Výše zmíněné stroje a metody jsou používány, nicméně nejběžnější a nejpoužívanější mechanizační stroje jsou jednoznačně finišery. Dopravovaná asfaltová směs se nejprve nasype do přejímací násypky v přední části finišeru, odkud se přesouvá nejčastěji pomocí článkového kovového pásu do zadní části k hutnícímu zařízení s hladící deskou. To obvykle tvoří vibrační zařízení hladící desky, hutnící pěchy, nebo obě zařízení zároveň. V dnešní době se k této předhutňovací části přidává i část dohutňovací tvořená dalšími zhutňovacími elementy, zejména přítlačnými hutnícími lištami.



Obrázek 2. 1 – Hutnící zařízení finišeru [1]

Jedním z nejdůležitějších parametrů při volbě technologie rozprostírání hutněných směsí je míra předhutnění. V tabulce jsou uvedeny obvyklé hodnoty. U mechanizačních strojů je hodnota ovlivněna jejich výkonem, velikostí a hmotností konkrétního stroje.

Tabulka 2. 1 – Obvyklá míra zhutnění jednotlivých strojů pro rozprostírání [2]

Technologie pokládky	Míra předhutnění
Ruční	70 %
Dozery	80 %
Grejdry	75 %
Rozhrnovače	70 %
Finišery bez dohutňovacího zařízení	80–85 %
Finišery s dohutňovacím zařízením	85–95 %

3. Doplňkové zhutňovací prostředky

Ačkoliv dnešní finišery dokáží v některých případech dosáhnout míry předhutnění až 97 %, je stále potřeba využití standardních zhutňovacích prostředků.

3.1 Vibrační pěchy

Ruční vibrační pěchy jsou nejjednodušším zhutňovacím prostředkem používané obvykle pro zhutnění zemin, nicméně je lze využít i u asfaltových směsí. Ve spodní části je umístěna ocelové deska nazývaná hutnící patka s malou plochou obvykle okolo 0,1 m^2. Ta má díky rázovému účinku o frekvencích 9 Hz až 13 Hz a nízké hmotnosti (60 až 120 kg) poměrně vysoký hloubkový

účinek. Jejich použití je minimální, a to na těžce přístupných místech, v blízkosti povrchových znaků inženýrských sítí a na místech, kde nelze použít vibrační desky, ani válce. Jejich velkou nevýhodou je výsledná rovinnost povrchu.

3.2 Vibrační desky

Vibrační desky se dělí na jednosměrné, které mají pouze jeden směr pojezdu a obousměrné s dvěma protiběžnými budiči vibrace. Plocha ocelové desky je větší, než u vibračního pěchu a pohybuje se od 0,3 do 0,6 m^2. Mají také vyšší frekvenci rázů i vyšší hmotnost (okolo 200 kg), ale jde také pouze o doplněk k větším hutnícím strojům. Proti nalepování asfaltové směsi na pracovní část desky by se mělo používat skrápěcí zařízení [5].

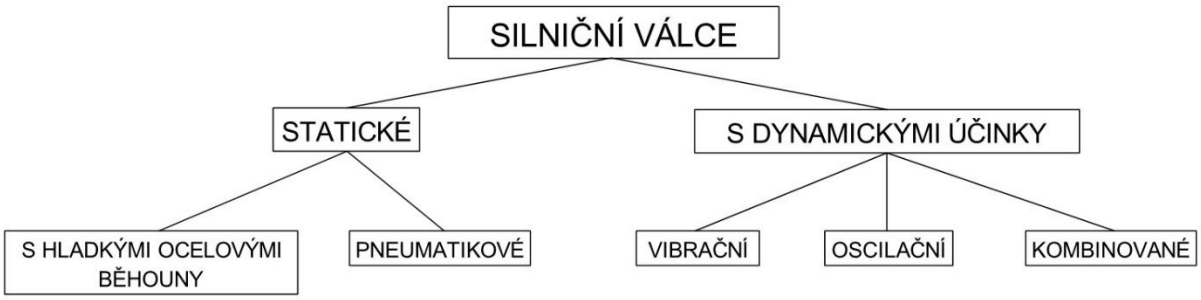
Pokud bychom tyto dva typy malých doplňkových zhutňovacích strojů měli porovnat, tak nejlepším kritériem srovnání bude vyvozovaná odstředivá síla v kN, jež má zásadní vliv na míru zhutnění a plošný výkon v m^2/h.

Tabulka 3. 1 – Porovnání doplňkových zhutňovacích prostředků [3]

Zhutňovací prostředek	Vibrační pěch	Vibrační deska jednosměrná	Vibrační deska obousměrná
Odstředivá síla [kN]	10–15	10–20	15–100
Plošný výkon [m^2/h]	110–140	400–750	750 - 1500

4. Silniční válce

Silniční válce lze dělit dle několika kritérií. Je možné je dělit např. podle typu zhutňovaného materiálu, dle uspořádání běhounů, ale nejtypičtější dělení je dle konstrukčního typu. V tomto rozdělení ještě chybí válce s ježkovými běhouny, ale jelikož se v této práci zabýváme hutněním pouze asfaltových směsí, nebudeme se těmito typy zeminových válců zabývat.



Obrázek 4. 1 – Schéma rozdělení silničních válců

4.1 Statické válce s hladkými ocelovými běhouny

Statické válce hutní asfaltovou směs pouze svou provozní hmotností, která se skládá z konstrukční hmotnosti a přídavné zátěže do 50 % hmotnosti. Tlak ocelových běhounů je závislý na míře stlačení zhutňované vrstvy a okamžité tuhosti. Hloubkový účinek statických válců s ocelovými běhouny je poměrně malý, zhutňovat lze asi jen do tloušťky 80 mm až 100 mm. Dříve se vyráběly i válce vlečné, nicméně dnes je většina z nich s vlastním pohonem. Ten dnes obvykle pohání všechny běhouny, aby nedocházelo k vodorovné síle ve směru jízdy válce. Ta by měla tendenci hrnout hutněnou směs před sebou. Při pohonu všech běhounů je vodorovná síla opačná, a tak k tomuto jevu nedochází.

Mezi výhody patří jednoduchost válce a rovinnost hutněného povrchu. Nevýhodou tohoto typu strojů je především malá hloubka zhutnění a nehomogenní míra zhutnění. Velká část výrobců má statické válce s hladkými ocelovými běhouny stále ve svém výrobním programu jako doplňkovou možnost při zhutňovaní, nicméně dnes se obvykle místo pojezdu statického válce používá pojezdu vibračních válců bez zapnuté vibrace.

4.1.1 Charakteristiky statických válců s ocelovými běhouny

1. **Celková hmotnost** je základním parametrem statických válců. Tato hodnota se dá u některých typů válců měnit pomocí přidávání, nebo odebírání zátěže až do 50 % jejich provozní hmotnosti. Jako zátěž se obvykle používá písek, voda, či ocel.
2. **Základní rozměry běhounů** jsou vnější průměr D a šířka B. Tyto parametry mají velký vliv na účinnost zhutňovaní válce. Průměr D se obvykle volí co největší k rozměrům stroje a šířka B jako 0,7 až 0,8násobek vnějšího průměru D. Větší rozměry běhounu zaručují větší rovnost hutněného pruhu, ale může dojít k rozdílné míře zhutnění uprostřed a na krajích pruhu. Při menší šířce běhounu může naopak docházet k vytváření podélných trhlin.

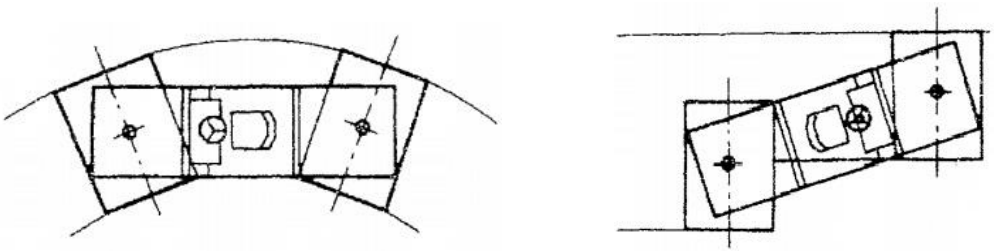
3. **Statické lineární zatížení válce** (zkratka SLZ) je základní hodnota udávající zhutňovací účinnost. Je vyjádřena jako zatížení běhounu vlastní hmotností stroje P vztažená na šířku běhounu B. Je udáváno v jednotkách N/mm, nebo v praxi také kg/cm.

$$SLZ = \frac{\mathrm{P}}{\mathrm{B}} \text{ [N/mm]}$$

4. **Koeficient účinnosti běhounu** (C_W) označován také jako Nijboerovo zhutňovací číslo je hodnota zpřesňující zhutňovací účinnost a vhodnost statického lineárního zatížení zohledněním také vnějšího rozměru běhounu válce D.

$$C_w = \frac{SLZ}{D}$$

5. **Konstrukční uspořádání** válce je dalším důležitým kritériem. To je dáno především konstrukčním typem rámu. První možností je rám kloubový, kdy je u tandemového válce kloub umístěn uprostřed mezi předním a zadním běhounem. Toto řešení je dnes používanější než starší konstrukce s tuhým rámem. U této možnosti jsou klouby umístěny nad oběma běhouny. Tento typ umožňuje využít na jeden přejezd širší pruh, než je šířka běhounu. V praxi je ale využití tohoto způsobu poměrně malé, nejčastěji pro dokončovací fázi hutnění.



Obrázek 4. 2 – Konstrukce tandemového válce s tuhým rámem a dvěma klouby [4]

V menších směrových obloucích však mohou vznikat větší smyková napětí, jež můžou vést až ke vzniku trhlin, či hrnutí směsi.

6. **Optimální pracovní rychlost** bývá u statických válců v rozmezí 3-6 km/h. Nejdůležitější kritéria pro určení optimální pracovní rychlosti jsou tloušťka zhutňované vrstvy a zhutnitelnost směsi. Pro středně až polotěžce zhutnitelné vrstvy s větší tloušťkou bude rychlost nejnižší. Dalšími důležitými aspekty jsou fáze hutnění, počet pojezdů a v neposlední řadě také hmotnost válce. Maximální rychlost statických válců s hladkými ocelovými běhouny mimo hutnící proces bývá okolo 12 km/h.

Statické válce s hladkými ocelovými běhouny se dnes vyrábějí prakticky jen jako dvouosé. V nabídce dnešních výrobců se už starší typ tříosých válců prakticky nevyskytuje. Dvouosé válce můžeme rozdělit na dvouběhounové – takzvané tandemové a tříběhounové. Jejich koeficient účinnosti C_W bývá obvykle okolo 0,025 N/mm^2 [1].

4.2 Pneumatikové válce

Pneumatikové statické válce hutní asfaltovou směs dvojicí os s pneumatikami. Pneumatikové běhouny jsou široké obvykle od 200 do 300 mm podle velikosti stroje. Mezi běhouny na jedné ose vznikají rozteče, a tak je jejich uspořádání takové, aby stopy předních i zadních kol pokryly celou zhutňovanou plochu. Z toho vyplývá i obvykle lichý počet pneumatik, nejčastěji 5 až 11. Na zhutňovanou vrstvu působí nižším tlakem a vlivem své poddajnosti mohou často zahladit trhliny vzniklé válci s ocelovými běhouny. U pneumatikových válců také nedochází pouze ke zhutňování tlakem, ale díky tvarované pneumatice také k hnětení, kde dochází k horizontálním i vertikálním posunům hutněného materiálu.

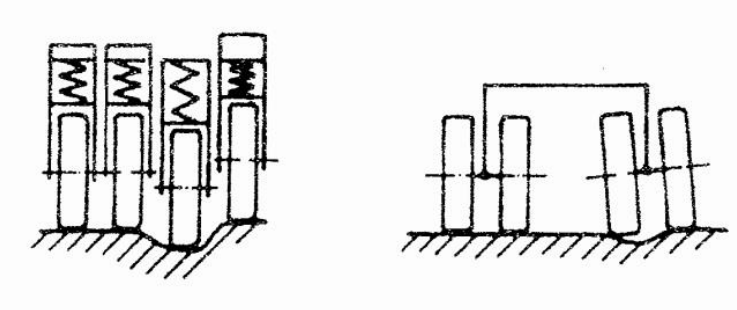
Obrázek 4. 3 – Tandemový pneumatikový válec Hamm HD 14 TT [6]

4.2.1 Charakteristiky pneumatikových válců

1. Jako u statických válců s ocelovými běhouny, je i u pneumatikových statických válců **celková hmotnost** základním parametrem. Ta se u běžných válců pohybuje od 5 do

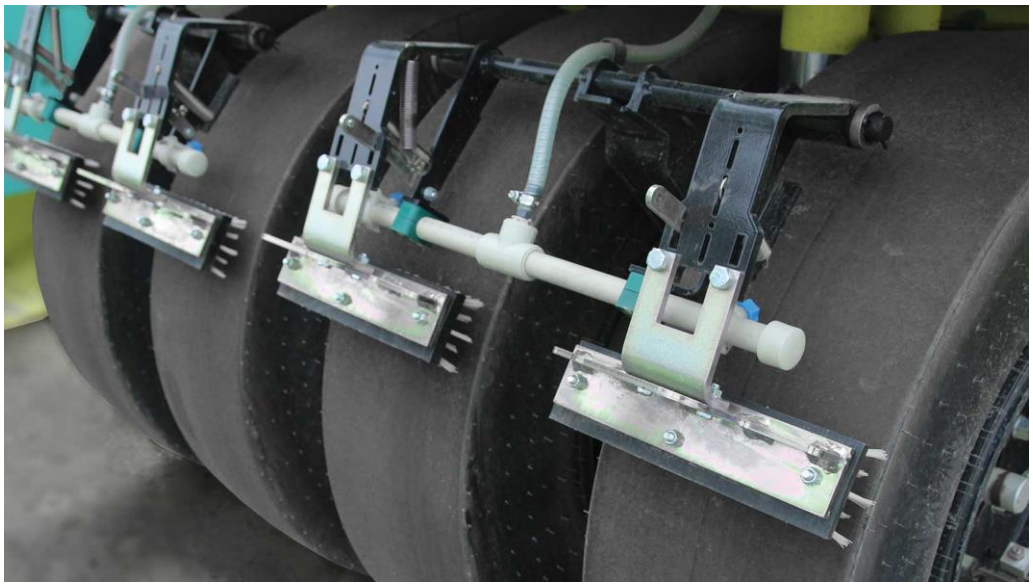
35 t. Dá se měnit přídavným zatížením, a to až na 2–3násobek základní hmotnosti. Důležitější je však hmotnost připadající na jedno kolo, která se doporučuje v rozmezí od 15 až do 30 kN.

2. Další charakteristikou je **typ zavěšení kol**. To by mělo zajišťovat, aby na nerovném terénu působil na všechny pneumatikové běhouny stejný tlak – tzv. izostatické působení. Toho se dociluje nejčastěji pomocí nezávislého zavěšení odpružených kol, nebo zavěšením páru kol na kyvnou osu [4].



Obrázek 4. 4 – Nezávislé odpružení běhounů (vlevo) a kyvná osa dvojice běhounů [4]

3. **Tlak vzduchu** v pneumatikách musí být ve všech kolech stejný. Moderní stroje mají obvykle možnost tlak vzduchu měnit přímo z kabiny stroje, a to v rozmezí od 0,2 do 0,9 MPa. Pro nejběžnější rozměr pneumatik 11,00 x 20 v rozmezí od 0,4 do 0,6 MPa. Vyšší tlaky vzduchu se využívají pro hutnění směsí s vyšší tuhostí, nižší tlak naopak při počáteční fázi hutnění, kdy je ještě viskozita směsi nízká. Tlak určuje také deformaci pneumatiky. U prvního pojezdu dochází k největší deformaci hutněné vrstvy a nejmenší deformaci pneumatiky, při posledním je tomu naopak. Mezi tlakem a mírou hutnění existuje přímá úměra. Příliš vysoký tlak však může způsobovat velké deformace pneumatiky a tím i příčné vlny.
4. **Šířka pneumatik** je první hodnota v označení pneumatik a udává se v palcích. Nejčastěji v rozměrech 7,5; 10,5; 11 a 12 palců. Čím se zvyšuje šířka, tím větší tloušťky můžeme zhutňovat. S rostoucí šířkou ale také roste vyboulení pneumatiky a klesá velikost dosedací plochy. Důležitá je také mezera mezi pneumatikami, která se pohybuje mez 0,3 až 0,4násobku její šířky. Při větší hodnotě by mohlo dojít k vytlačování směsi mezi pneumatiky. Často také bývají pneumatiky kvůli udržování tepla oplachtováním zakryté a na celou šířku jedné pneumatiky také umístěno zařízení proti ulpívání směsi na pneumatice. To sestává z kartáčů a kropícího zařízení.



Obrázek 4. 5 – Zařízení proti ulpívání směsi na pneumatikách [7]

5. **Optimální pracovní rychlost** se odvíjí od fáze hutnění. Pro hlavní fázi se pohybuje od 4 km/h do 6 km /h, ale pouze při použití těžkých pneumatikových válců se zatížením na jedno kolo minimálně 20 kN. V závěrečné fázi se zvyšující se tuhostí vrstvy optimální rychlost stoupá na hodnoty od 5 km/h do 10 km/h. Vyšší rychlost oproti válcům s ocelovými běhouny je ale vyvážena nutným větším počtem pojezdů. Díky pneumatikám je poměrně vysoká jejich maximální rychlost pohybu, a to obvykle kolem 20 km/h.
6. **Teoretický dotykový tlak** je podíl zatížení kola a velikosti dosedací plochy pneumatiky, který je výrobcem obvykle vyjádřen jako funkce závislá na tlaku vzduchu v pneumatikách. Nižší hodnoty od 0,3 MPa do 0,5 MPa jsou vhodné k hutnění menších tlouštěk a k počátečním fázím hutnění. Vyšší hodnoty od 0,4 MPa do 0,7 MPa pro tloušťky vrstev až 100 mm.

V současné době jsou poměrně málo využívány, a to také díky rozvoji nových skeletových asfaltových směsí, např. směsí SMA pro které jsou pneumatikové válce vysloveně nevhodné. Jsou sice obsaženy ve zhutňovacích sestavách A a C pro hlavní fázi zhutnění asfaltových betonů, jde ale spíše o starší typy sestav. V sestavě A hlavně kvůli použití dnes již neobvyklých tříběhounových válců v počáteční fázi hutnění. V obou případech jde o těžké pneumatikové válce a jejich použití je v dnešní době okrajové, např. při nízkém předhutnění při rozprostírání.

V současnosti jsou používány především menší verze s nižším zatížením. A to pro předhutnění některých typů směsí, pro poslední fázi hutnění – tzv. hlazení. a pro odstranění vzniklých trhlin.

Mezi největší výrobce těchto typů válců patří společnosti Catterpillar, Ammann Group a Hamm. V tabulce bylo vytvořeno srovnání nejdůležitějších parametrů 8kolových pneumatikových válců podobné modelové řady jednotlivých výrobců.

Tabulka 4. 1 – Srovnání nejdůležitějších parametrů pneumatikových válců [8], [9], [10]

Parametr	CAT CW34	Ammann ART 240	Hamm GRW 280-20
Provozní hmotnost [kg]	10 000	9 700	8 785
Maximální hmotnost [kg]	27 000	24 000	23 000
Hutnící šířka [mm]	2 090	1 986	2 084
Typ pneumatik	11,00 x 20	11,00 x 20	11,00 x 20

4.3 Vibrační válce

Vibrační válce nehutní asfaltovou směs pouze staticky svojí hmotností, ale také dynamickými účinky. Ty se vyvozují nejčastěji hydraulicky pomocí budiče vibrací. Ten je obvykle umístěn přímo na běhounu a skládá se z jedné, nebo více excentricky uložených hmot (tzv. nevývažků). Ta je definovaná svojí hmotností a excentricitou, tj. ramenem na kterém se vůči středu pohybuje. Hmota se ve vibrujícím běhounu pohybuje na vlastní hřídeli, díky čemuž se může pohybovat nezávisle na rychlosti běhounu. Excentry jsou uloženy pomocí gumokovů, jež mají za úkol zachytit vibrace a nepřenášet je tak do konstrukce stroje.

Dynamickými účinky dojde k rozkmitání zrn, jejichž rychlost závisí na jejich hmotnosti. Tím dochází ke snižování vnitřního tření, posouvání zrn a snižování objemové hmotnosti. Díky těmto účinkům se může oproti statickým válcům výrazně snížit hmotnost stroje pří stejné míře zhutnění a také zvýšit hloubkový účinek válce. Jsou asi nejvhodnějším řešením pro počáteční a hlavní fázi hutnění, naopak vysloveně nevhodné pro závěrečnou fázi, kde se mohou používat pouze bez zapnuté vibrace.

4.3.1 Charakteristiky vibračních válců

1. **Koeficient účinnosti běhounu** ($C_{w,dyn}$) je obdoba Nijboerova zhutňovacího čísla u statických válců pouze s koeficientem zahrnujícím dynamické účinky, který se u obvyklých strojů pohybuje od 1,5 do 1,8, čímž nahrazuje často nižší hodnotu statického lineárního zatížení.

$$C_{w,dyn} = \frac{SLZ}{D} \cdot K_0$$

2. **Optimální pracovní rychlost** bývá v rozmezí 3 km/h až 6 km/h. Důležité je, aby byla konstantní a v souladu s frekvencí vibrace. Ke stanovení maximální rychlosti slouží nomogram pro jednotlivé tloušťky vrstev. S vyšší tloušťkou vrstvy stoupá i rychlost pojezdu. Pro těžce až velmi těžce zhutnitelné směsi jsou pracovní rychlosti nejnižší.

3. **Frekvence vibrace** vyjadřuje počet otáček (cyklů) excentru za 1 sekundu a udává se v jednotkách Hz. Volí se takové frekvence, aby v hutněné vrstvě došlo k rezonanci a tím co největšímu rozkmitu zrn, což v praxi znamená vysoké frekvence pro tenké vrstvy. S narůstajícím počtem pojezdů, tuhostí vrstvy a klesající teplotou by měla frekvence stoupat. Obvykle používané frekvence jsou v rozmezí 30 Hz až 60 Hz. Vyšší frekvence pozitivně ovlivňují rovinnost vrstvy, ale může při nich docházet ke vzniku trhlin, a proto je v určitých případech vhodné vibrační válce doplnit válci pneumatikovými. Válce obvykle nemají možnost plynulé změny frekvence, ale je nastavitelná pouze v několika (nejčastěji dvou) velikostech. Spuštění vibrace by mělo proběhnout až při jízdě válce, většina má automatické ukončení vibrací při zastavení.

Obrázek 4. 6 – Vibrační systém tandemového dvouosého válce Caterpillar CB68B [11]

4. **Amplituda vibrace** je polovina velikosti maximální svislé dráhy při odskoku běhounu válce a udává se v mm. Zvýšenou velikostí amplitudy se zvyšuje jak hutnící síla, tak hloubkový účinek, ale také zvyšuje riziko tvorby trhlin a drcení zrn. K tomu dochází především u směsí s vysokým obsahem hrubého drceného kameniva, např. u směsí SMA. Na začátku hutnění bývá amplituda nejvyšší a postupně se se zvyšující frekvencí snižuje. Pokud by při vysokých amplitudách byla hodnota frekvence také vysoká, docházelo by k výraznému zkrácení životnosti stroje. Proto jsou ve válcích nejčastěji přednastaveny programy se správně synchronizovanými velikostmi amplitud a vibrace. Hodnota amplitudy bývá obvykle od 0,2 mm až do hodnot do 0,8 mm pro těžce zhutnitelné směsi. Amplituda je přímo závislá na hmotnosti nevývažku a vzdálenosti od hřídele, jejíž změnou se amplituda často reguluje. Další možností je použití dalšího doplňkového excentru, nebo změna směru otáčení.

5. **Odstředivá síla** (P_0) je závislá na hmotnosti nevývažku m, jeho vzdálenosti od středu otáčení r a frekvenci vibrace n. Uvádí se obvykle v kN.

$$P_0 = 4.m.r.\pi^2 n^2$$

Hodnota odstředivé síly vychází z velikosti vibrace a amplitudy, s nimiž je i svázaná v přednastavených programech. Její hodnota se pohybuje od 30 kN u malých strojů až po hodnoty okolo 350 kN u největších válců.

Mezi další důležité charakteristiky patří také celková hmotnost, rozměry běhounů, statické lineární zatížení a konstrukční uspořádání. Ty ale byly již zmíněny v kapitole o statických válcích s hladkými ocelovými běhouny a tyto charakteristiky se pro vibrační válce nemění.

U velkých vibračních válců bývá součástí příslušenství kompaktometr, který průběžně vyhodnocuje míru zhutnění. Dokáže rozpoznat nedostatečně zhutněná místa, nebo naopak místa, kde by bylo další hutnění neúčinné. Kompaktometr sleduje hodnotu dynamické tuhosti a funguje na principu snímání odrazu vibrací od zhutňované vrstvy. Tyto hodnoty zaznamenává a spolu s informacemi o poloze se systému GPS zaznamenává. To je velká výhoda oproti válcům statickým a pneumatikovým [12].

Konstrukčně lze vibrační válce rozdělit do několika kategorií. Tou první jsou a nejčastěji používanou jsou válce dvouosé tandemové. Jejich statické lineární zatížení se pohybuje od 15 N/mm do 35 N/mm. Oba běhouny bývají stejně široké od 0,8 m do 2,1 m a nejvýhodnější je, pokud jsou oba poháněny a oba vybaveny vibrací.

Obrázek 4. 7 – Tandemový vibrační válec Ammann ARX 40 [13]

Dalším konstrukčním typem jsou vibrační válce tahačové. Mívají vyšší hmotnost, někdy až 20 t a skládají se z velkého předního běhounu s šířkou až 2,5 m a zadní poháněnou nápravou složenou buď z ocelových běhounů, nebo častěji z pneumatik s dezénem. Pro hutnění asfaltových směsí nejsou příliš vhodné, a to kvůli profilovanému povrchu pneumatik a také vysokou hodnotou amplitudy vibrace, která se pohybuje od 0,5 mm až do 1 mm. Jejich využití je především pro hutnění zemin.

Obrázek 4. 8 – Tahačový vibrační válec Caterpillar CS 44 [14]

Posledním typem jsou vibrační válce ručně vedené. Mají obvykle dva ocelové běhouny a jejich hmotnosti se pohybují od 0,5 t do 1,5 t. Účinek hutnění se zvyšuje spřažením obou hřídelí s fázovým posunem. Otáčení excentrů i pojezd válce zajišťuje hydraulický pohon. Odstředivá síla bývá v rozmezí od 10 do 20 kN. Jsou také vybaveny nádrží s na vodu a zařízením proti ulpívání směsi na ocelovém běhounu. Využívají se ve stísněných poměrech, nebo při pracích malého rozsahu. Díky prostoru po stranách běhounu se využívá v těsné blízkosti obrubníků, opěrných zdí a jiných překážek.

V následující tabulce je porovnání nejdůležitějších parametrů vibračních tandemových válců různých výrobců stejného typu. Válce jsou vybaveny dvěma přednastavenými programy pro rozdílné hutnící účinky, a tak u parametrů frekvence, amplitudy a odstředivé síly jsou uvedeny dvě hodnoty.

Tabulka 4. 2 - Srovnání nejdůležitějších parametrů vibračních válců [15], [16], [17]

Parametr	Caterpillar CD 10	AMMANN 90 C	HAMM HD 90i + VV
Hmotnost [kg]	10 120	9 560	9 320
Hutnící šířka [mm]	1 700	1 680	1 680
Frekvence [Hz]	42/53,3	42/54	42/50
Amplituda [mm]	0,61/0,33	0,7/0,34	0,62/0,34
Odstředivá síla [kN]	86,7/75,5	84/68	75/60

4.4 Oscilační válce

4.4.1 Konstrukce oscilačních válců

Oscilační válce zhutňují také dynamickými účinky, ale jiným způsobem než válce vibrační. U vibračních válců je excentr pevně spojen s osou běhounu a otáčí se kolem ní. U oscilačních válců je z hřídele na ose běhounu veden ozubený řemen, nebo řetěz, který pohání nejčastěji dvě hřídele mimo osu běhounu. Teprve na nich jsou umístěny excentry, které rotují jak kolem hřídele, na které jsou umístěny, tak kolem osy běhounu.

Výsledkem je, že jsou stejným smyslem rotující nevývažky výsledně vyrovnány navzájem o 180°. Tím vzniká rychle se měnící pohyb běhounu vpřed a vzad, tzv. tangenciální amplituda. Ta se dá regulovat nejčastěji plynule, a tak se při tuhnutí vrstvy postupně snižovat. Pokud však hřídele nevývažků rotují vůči sobě opačným směrem, jedná se o takzvanou řízenou vibraci a nikoliv oscilaci. Konstrukčním typem jsou oscilační válce podobné vibračním, ačkoliv v praxi se vyskytují obvykle jen jako válce tandemové.

Obrázek 4. 9 – Princip fungování oscilačního běhounu [18]

4.4.2 Použití oscilačních válců

Svislá síla způsobená statickým lineárním zatížením tedy při oscilačním procesu nemění ani směr, ani velikost. Tím dochází na rozdíl od vibračních válců k neustálému kontaktu mezi oscilačním běhounem a povrchem hutněné vrstvy. Tím vzniká daleko menší hluk a téměř žádné rázy do okolí. Díky tomu se oscilační válce častou využívají například na mostních objektech, nebo v blízkosti stavebních objektů citlivých na vibrace. Také se zvyšuje životnost stroje a větší komfort pro obsluhu válce a snižuje potřebný počet pojezdů. Nevýhoda je však v poměrně složité konstrukci oscilačního systému a většího opotřebení běhounu díky neustálému kontaktu a tření s povrchem hutněné vrstvy.

Při použití oscilace je možné hutnit asfaltové směsi i při nižších teplotách a to až 80 °C. To by u použití vibračních válců znamenalo poruchy na povrchu vrstvy jako je drcení kameniva, či vznik trhlin. Tento širší teplotní rozsah je výhodou především pro rychle se ochlazující povrchy, což mohou být vrstvy s velmi malou tloušťkou, mosty, nebo také pro podélné spojení s již hotovou vrstvou. Oscilační válce mívají poměrně vysokou hodnotu tangenciální amplitudy a odstředivé síly, a naopak používají nižší frekvence. Jejich použití je jak pro hlavní fázi hutnění, tak i pro dokončovací fázi, kde svými vodorovnými účinky dokáží uzavírat texturu povrchu vrstvy. V této fázi mohou také nahradit pneumatikové válce a válce statické s hladkými ocelovými běhouny. Oscilační technologie je vhodná pro všechny druhy směsí, a to i pro těžce až velmi těžce

zhutnitelné. Doporučuje se pro asfaltové směsi modifikované polymerem. Vodorovným kmitem nejlépe redistribuuje polymer ve vrstvě. Oproti vibračním válcům mají však o trochu nižší hloubkový účinek.

4.5 Kombinované válce

Tyto válce kombinují výhody svislých účinků vibračních válců a vodorovných účinků válců oscilačních. V praxi se válce pouze s oscilačními běhouny téměř nevyskytují a pokud válec uveden jako oscilační má obvykle běhoun vybaven oscilací pouze jeden. Využívání dynamických účinků pak může být zapnuto buď pouze v jednom z běhounů, nebo také najednou využívat výhody obou řešení. Ty jsou v hloubkovém účinku vibračního běhounu, který je obvykle umístěn vpředu a zadního oscilačního běhounu, který způsobuje lepší povrchové vlastnosti vrstvy.

Obrázek 4. 10 – Kombinovaný válec Hamm HD+i s předním běhounem vibračním a zadním oscilačním [19]

Druhou možností je kombinace vibračního běhounu s běhounem, kde excentrické hmoty vykonávají protisměrný pohyb. U tohoto typu lze měnit směr působení ze svislých účinků až na vodorovné. Často bývá směr řízen automaticky v závislosti na vyhodnocování dat řídící jednotky z kompaktometru. Výhodou je homogenita směsi a nižší počet pojezdů. Nevýhodou naopak velmi složitý systém a velké opotřebení ocelových běhounů.

Kombinací jednotlivých typů technologií najdeme více, ale poslední více využívanou možností je kombinace předního vibračního běhounu a zadní statického běhounu složeného z pneumatik. Ty spojují výhody velkého hloubkového účinku a pneumatik zajišťující správnou texturu povrchu. Díky dvěma kloubům se také vyznačují minimálními poloměry otáčení.

Obrázek 4. 11 – Kombinovaný válec Dynapac CC324 s předním vibračním běhounem a pneumatikami [20]

5. Důležité faktory ovlivňující zhutňování

Pokud jako kritérium výsledku zhutnění budeme uvažovat objemovou hmotnost, respektive míru zhutnění je zhutňovací práce vyjádřena Nijboerovým zhutňovacím faktorem R_f [-], který se dá vyjádřit empirickým vzorcem.

$$R_f = 10^4 . \frac{C_w - c \,.\, \tau_{cb}}{\eta_m} \,.\, n \,.\, \left(\frac{h}{v_v}\right)^{0,4}$$

C_w – koeficient účinnosti běhounu [N/mm^2]

C – charakteristická konstanta typu běhounu [-]

τ_{cb} – Nijboerova počáteční tuhost asfaltové směsi [N/mm^2]

η_m – Viskozita asfaltové směsi podle Nijboera [Pa.s]

n – Počet pojezdů válce [-]

h – Tloušťka vrstvy [m]

v_v – Rychlost pojezdu válce [km/h]

Z této rovnice vyplývají nejdůležitější faktory ovlivňující zhutňování.

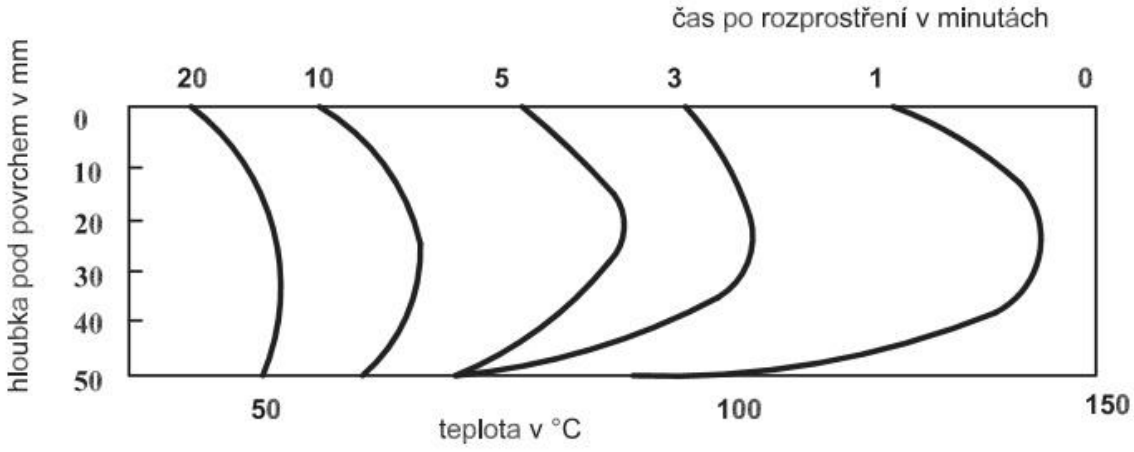
5.1 Materiálové charakteristiky

Ty jsou v Nijboerově zhutňovacím faktoru vyjádřeny Nijboerovou počáteční tuhostí asfaltové směsi a viskozitou směsi podle Nijboera. Ty jsou závislé na parametrech vstupních materiálů, složení a teplotě.

Největší z vlivů vstupních materiálů má druh použitého pojiva, zvlášť pokud jde o modifikované asfalty a jeho viskozitní vlastnosti. Vliv mají také fyzikální vlastnosti drobného i hrubého kameniva, nebo účinky fileru. Důležitý je také tvarový index zrn.

Složení směsi ovlivňuje zhutnitelnost především množstvím asfaltového pojiva. Čím vyšší je ve směsi obsaženo asfaltu, tím menší hutnící energie je třeba vyvodit. Dále také množstvím hrubého drceného kameniva, poměrem pojiva a fileru, nebo podílem těženého kameniva. To sice pozitivně ovlivňuje míru zhutnění, jelikož těžené kamenivo klade při hutnění menší odpor, nicméně díky oblému tvaru může docházet k poškozování vrstvy například příčnými trhlinami.

Zcela zásadní vliv na výsledek zhutňování má teplota při pokládce a průběh ochlazování. Z horního povrchu směs ochlazuje nižší teplota ovzduší, případně vítr a z dolního povrchu nižší teplota podkladu. Z toho vyplývá, že průběh ochlazování není rovnoměrný. Nejvyšší teploty jsou uprostřed vrstvy a nejnižší na okrajích, z čehož vyplývá důležitost tloušťky vrstvy a částečně i jejího složení a mezerovitosti.



Obrázek 5. 1 – Příklad průběhu ochlazování pokládané vrstvy [1]

Čím vyšší je teplota směsi, tím dochází k lepšímu zhutnění. Každá směs má ale doporučené rozmezí teplot, při kterých by se měla hutnit v závislosti na složení, především typu pojiva a tloušťce vrstvy. Pro pokládku menších tlouštěk vrstev je spodní hranice doporučeného rozmezí teplot výše než u vrstev s větší tloušťkou. U asfaltových pojiv s vyšší hodnotou penetrace je teplota pro jejich rozprostírání nižší. Horní hranice rozmezí zaručuje, aby nedocházelo k hrnutí před válci a tvorbě nerovností. Při teplotě na spodní hranice musí ještě docházet k navyšování míry zhutnění, ale nesmí docházet k tvorbě trhlin [1].

5.2 Tloušťka vrstvy

Tloušťka vrstvy je dalším z členů pro výpočet Nijboerova zhutňovacího čísla a je důležitým faktorem při procesu hutnění. Při pokládce je snaha o co nejpomalejší ochlazování vrstvy z důvodu většího časového intervalu pro zhutnění a menším velikostem vznikajícího napětí. Při pokládání dvojnásobné tloušťky vrstvy se časový interval pro zhutňování zvětšuje na trojnásobek. Při pokládce malých tlouštěk je ochlazení ještě výraznější. Z tohoto hlediska je nejpříznivější zvětšování tlouštěk vrstvy. Na druhou stranu je potřeba vzít v úvahu požadavky na rovnost povrchu a použití jen určitých typů válců.

5.3 Charakteristiky válců

Tyto charakteristiky mají zásadní vliv na účinnost hutnění, jelikož určují, jakým způsobem bude asfaltová úprava hutněna. Jednotlivé charakteristiky a jejich velikosti u jednotlivých typů zhutňovacích prostředků byly popsány v kapitole 2 a 3. Zhutňovacími prostředky lze docílit těchto zhutňovacích účinků.

- Tlak
- Hnětení
- Vibrace (Oscilace)
- Ráz

První dva způsoby lze označit jako statické a druhé dva jako dynamické. Obvykle ale nedochází k oddělenému účinku jednoho z nich, ale jako kombinace několika těchto způsobů. U každého zhutňovacího stroje ale jeden z nich převládá. Tlakové zhutňování zvyšuje napětí do té míry, dokud nepřekoná vnitřní odpor směsi a dojde ke snižování mezerovitosti. Hnětení vzniká při určitém vytvarování nástroje hutnícího prostředku, u asfaltových směsí převážně u pneumatikových válců. To zajišťuje posuny materiálu nejen ve svislé rovině. Při použití vibračních či oscilačních účinů dochází k působení setrvačných sil zrn a jejich vzájemným

posunům. Hutnění rázem není u asfaltových úprav příliš časté a lze se s ním setkat převážně při hutnění zemin. Typickým příkladem rázového účinku je vibrační pěch.

Pro proces zhutňování je charakteristické cyklické zatěžování. Parametry tohoto zatěžování jsou maximální hodnota vyvolaného napětí v hutněné vrstvě, rychlost změny tohoto napětí a čas po který toto napětí ve vrstvě působí. Právě tyto parametry rozdělují zhutňování na statické a dynamické. Statické zhutňování spočívá ve velké hodnotě maximálního vyvolaného napětí, ale poměrně nízké rychlosti změny tohoto napětí. U dynamického zhutňování je tomu přesně naopak. Maximální napětí může být u dynamicky hutnících prostředků také vysoké, které ale působí velmi krátkou dobu [4].

5.4 Počet pojezdů

Tento faktor je důležitý především pro sestavení optimální zhutňovací sestavy. Počet pojezdů lze stanovit několika způsoby. Tím prvním je vytvořit zkušební úsek a provést experimentální měření, což je poměrně nákladná varianta. Druhou možností je vycházet ze zkušeností a při pokládce ověřovat míru zhutnění a popřípadě počet pojezdů optimalizovat. Tento způsob je často používán převážně s použitím nedestruktivních metod zjištění míry zhutnění. Poslední možností je kombinace odborného odhadu s výpočtovou metodou podle Nijboera a Viziho, jehož základem je právě Nijboerův zhutňovací faktor [1].

Počet pojezdů je dán především fází zhutňovacího procesu a zhutňovacím prostředkem.

Tabulka 5. 1 – Doporučený počet pojezdů pro hlavní fázi hutnění [1]

Druh zhutňovacího prostředku	Počet pojezdů [-]
Tříběhounový statický válec	6-8
Tandemový statický válec	6-10
Tandemový válec s vibrací jednoho běhounu	2-8
Tandemový válec s vibrací obou běhounů	2-6
Pneumatikový válec	10-14
Kombinovaný válec – pneumatikový + statický hladký běhoun	6-12
Kombinovaný válec – pneumatikový + vibrační hladký běhoun	2-8

6. Praktická část

Pro následné zkoušky zhutnitelnosti asfaltových směsí bylo nejprve nutné vytvořit zkušební vzorky. Celkem se vyráběly 3 směsi s rozdílnými parametry. Prvním cílem bylo zjistit rozdíly ve směsích s přerušenou čárou zrnitosti u asfaltového koberce mastixového do obrusných vrstev a spojitou čárou zrnitosti u asfaltového betonu do obrusných vrstev. A druhým cílem bylo zjištění rozdílů při odlišných kvalitativních požadavcích směsi. A to mezi kvalitou S se zvýšenou odolností proti tvorbě trvalých deformací a kvalitou + nahrazující kvalitativní třídu I podle ČSN 73 6121. K tomuto účelu byly vybrány směsi:

- ACO 11 S
- ACO 11 +
- SMA 11 S

6.1 Kamenivo

Pro praktickou část a výrobu zkušebních těles bylo použito celkem 5 druhů pouze drceného kameniva. Jejich dodavatelem byla společnost POZEMNÍ KOMUNIKACE BOHEMIA a.s., konkrétně obalovna asfaltových směsí – PKB vývojové centrum Kladno.

Obrázek 6. 1 – Vyzvednutí kameniva ve společnosti PKB a.s.

V areálu se nachází skládkové hospodářství, obalovna, laboratoř i zkušební polygon pro pokládku asfaltových směsí [21]. Na skládkách kameniva byly vyzvednuty jednotlivé druhy kameniva a to:

- Hrubé drcené kamenivo Zbraslav 8/11
- Hrubé drcené kamenivo Zbraslav 4/8
- Směs drceného kameniva Zbraslav 0/4
- Směs drceného kameniva Lašovice 0/4
- Velké Hydčice filer

Použité kamenivo pochází ze tří zdrojů. Tím hlavním je kamenolom společnosti KÁMEN Zbraslav a.s., jež je jedním z největších producentů drceného kameniva v celé České Republice. Těžená hornina z tohoto lomu je převážně spilit, tufit a břidlice. Dalším dodavatelem je kamenolom Lašovice společnosti Kamenolomy ČR s.r.o. v okrese Písek s geologickým složením z rohovce a ruly. Poslední použitou složkou je vápencový filer od HASIT, Šumavské vápenice a omítkárny s.r.o. v Plzeňském kraji.

Obrázek 6. 2 – Použité druhy kameniva

6.2 Určení zrnitosti

Postupovalo se podle normy ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor [23]. Podstata zkoušky spočívá v oddělení materiálu pomocí sady sít do několika zrnitostních podílů s klesající velikostí částic.

Prvním krokem zkušebního postupu je příprava zkušebních navážek. Ta se vytvoří o předem ne přesně určené hodnotě, ale její minimální velikost závisí na velikosti největšího zrna frakce kameniva. Dalším krokem je praní. V této části se přes poslední síto velikosti 0,063 a ochranná síta nechá protékat voda, která má za úkol odstranit z navážky veškeré odplavitelné částice. Praní se může ukončit ve chvíli, kdy posledním sítem odtéká čistá voda.

Poté následuje vysoušení v sušárně s ventilací při teplotě 110 ± 5 °C a samotné prosévání. To probíhá mechanickým třesením ve sloupci sít uspořádaných od horního síta k dolnímu sítu podle zmenšující se velikosti otvorů. Poté se zbytky na sítech zváží a hmotnost částic zachycených na jednotlivých sítech se uvádí v procentech ve vztahu k počáteční hmotnosti navážky.

Obrázek 6. 3 – Sestava sít pro praní kameniva

Tabulka 6. 1 – Zbytky na sítech vyjádřeny v procentech ve vztahu k navážce

Síto	11	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	0
8/11 Zbraslav	10,5	78,2	10,5	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
4/8 Zbraslav	0,0	3,7	37,9	40,5	15,6	0,9	0,1	0,0	0,1	0,1	1,1
0/4 Zbraslav	0,0	0,0	0,0	2,6	34,8	27,4	8,9	9,3	5,0	3,7	8,3
0/4 Lašovice	0,0	0,0	0,5	14,2	42,0	16,9	9,3	5,2	3,3	2,6	5,8
Filer V. Hydčice	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,8	1,1	3,3	8,8	22,7	63,1

V protokolu zkoušky typu jednotlivých směsí je také uvedeno maximální zastoupení podílu drobného těženého kameniva a hrubého těženého kameniva. Pro první směs ACO 11 S je tato požadovaná hodnota dle ČSN EN 13108-1 maximálně 10 %. Pro druhou směs ACO 11 + s nižší kvalitativní třídou je tato hodnota 15 % a pro poslední směs SMA 11 S je podle normy ČSN EN 13108-5 stanoven podíl těženého kameniva dokonce 0 %.

6.3 Asfaltové pojivo

Dalším důležitým vstupním parametrem je typ použitého asfaltového pojiva. Asfaltová pojiva rozdělujeme na silniční asfaltová pojiva, polymerem modifikovaná asfaltová pojiva, tvrdé silniční asfalty a ředěná a fluxovaná asfaltová pojiva. V praktické části této práce byly použity první dva typy.

Pro výrobu směsi ACO byl použit silniční asfalt 50/70. Toto označení uvádí hloubku penetrace jehlou v rozmezí 5 mm až 7 mm při 25 °C. Do směsi SMA bylo dle protokolu použito modifikované pojivo s označením PmB 45/85–65, kde poslední číslo vyjadřuje minimální hodnotu bodu měknutí. Tato hodnota se stanovuje metodou kroužek a kulička, kde se měří teplota při poklesu kuličky položené na zahřívané vrstvě asfaltového pojiva. Bod měknutí bývá u modifikovaných pojiv vyšší a tím zvyšuje horní hranici oboru plasticity, kde přechází do tekutého stavu. Žádná z těchto zkoušek asfaltových pojiv však v praktické části této práce nebyla použita a vycházelo se z hodnot stanovených v protokolech o zkoušce typu.

U směsi ACO 11 S bylo dle předpisu použito 5,6 %, respektive 5,7 % u směsi ACO 11 + obsahu asfaltového pojiva 50/70 ve směsi. Nejvíce pojiva obsahovala směs SMA 11 S. Tento typ směsi je charakterizován vyšším obsahem modifikovaného pojiva, dle předpisu bylo použito 6,4 %. Zvýšením obsahu pojiva dochází ke zlepšení vlastností, nicméně také zvyšuje cenu směsi.

6.4 Návrh složení směsi

Po určení zrnitosti zkušebních navážek bylo zjištěno rozdílné zrnitostní složení oproti zkoušce typu a na základě této zkoušky bylo zadáno optimální složení jednotlivých směsí. Proto bylo nutné vstupní složení směsi optimalizovat pro co největší podobnost specifikaci z protokolu o zkoušce typu. Výsledkem změn procentuálního zastoupení jednotlivých druhů kameniv bylo přiblížení se křivce zrnitosti ze zkoušky typu a vyhovění oběma oborům zrnitosti.

Tabulka 6. 2 – Procentuální množství kameniva jednotlivých směsí

Druh kameniva	Procenta hmotnosti [%]		
	ACO 11 S	**ACO 11 +**	**SMA 11 S**
8/11 Zbraslav	25,0	25,0	50,8
4/8 Zbraslav	19,1	19,0	16,3
0/4 Zbraslav	26,0	26,1	11,8
0/4 Lašovice	26,0	26,1	9,0
Filer V. Hydčice	3,9	3,9	9,3

U asfaltových betonů s plynulou křivkou zrnitosti se na přenášení zatížení podílí veškeré frakce vzájemným dotykem. U směsi asfaltového koberce mastixového tvoří nosnou kostru hrubé drcené kamenivo a ostatní frakce této směsi jsou pouze výplní mezi největšími zrny přenášející zatížení. Je v ní také velký obsah fileru, která společně s vyšším obsahem pojiva vytváří kamennou moučku, tzv. mastix. Ten má za úkol stmelit zrna největší frakce [2].

6.5 Příprava směsi

Postupovalo se dle normy ČSN EN 12697-10 - Zhutnitelnost pro přípravu zkušebních těles [24]. Nejprve bylo nutné určit potřebné množství směsi, které vycházelo z počtu vzorků na jednotlivé zkoušky:

- 3 vzorky pro hutnění gyrátorem
- 3 vzorky pro hutnění Marshallovým pěchem 2 x 5 úderů
- 3 vzorky pro hutnění Marshallovým pěchem 2 x 15 úderů
- 3 vzorky pro hutnění Marshallovým pěchem 2 x 25 úderů
- 3 vzorky pro hutnění Marshallovým pěchem 2 x 35 úderů
- 3 vzorky pro hutnění Marshallovým pěchem 2 x 50 úderů
- 3 vzorky pro hutnění Marshallovým pěchem 2 x 100 úderů

Celkem bylo tedy potřeba vyrobit 21 zkušebních těles. Hmotnost směsi jednotlivých vzorků vycházela z velikosti formy pro Marshallův pěch a byla stanovena na hodnotu 1050 g. Po připočítání rezervy vycházela hmotnost potřebného množství směsi na 26,0 kg.

Obrázek 6. 4 – Navážení směsi pro výrobu jednoho zkušebního tělesa

Nejdříve se na digitální váze navážilo kamenivo a poté se s plechovými nádobami s asfaltovým pojivem vložilo do sušárny s ventilací na teplotu 160 °C. Ke smísení směsi došlo v automatické laboratorní míchačce InfraTest 20-0160 nahřáté taktéž na tuto teplotu. Tato míchačka je složena z ocelové nádoby s topným zařízením na dně i ve stěnách, vertikální míchací hřídele, ocelových lopatek a elektricky sklopného víka. Je také vybavena teploměrem, který hlídá nastavenou teplotu. Po smísení je také možné míchací nádobu pomocí elektromotoru naklonit do vodorovné polohy pro vysypání hotové směsi [22]. Dle ČSN EN 12697-35 musí být schopna zcela obalit všechna zrna maximálně do 5 minut. Nejprve se do ní však vložily jednotlivé frakce kameniva a nechaly se smísit bez pojiva v programu trvajícím 180 sekund. Poté se do ní v požadovaném množství vylilo pojivo a opakoval se stejný program. Ten byl spuštěn i v poslední fázi při přidání fileru, který se nejlépe rozmísí v již obalených zrnech.

Obrázek 6. 5 – Výsledná směs v laboratorní míchačce

Z míchačky se po smíchání směs vysypala a zvážené množství 1050 g odsypalo do fanek, které se opět do okamžiku hutnění uložily do sušárny.

6.6 Hutnění Marshallovým pěchem

Při hutnění Marshallovým pěchem se vycházelo z normy ČSN EN 12697-30 Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem [25]. Byl použit laboratorní Marshallův pěch InfraTest 20-1475 s ocelovým dolním podstavcem. Podstata zhutňování spočívá v pádu hutnícího beranu pěchu na bicí hlavu pěchu, která je uložena na horním povrchu zkušebního tělesa. Pěch je zvedán řetězovým pohonem pomocí elektromotoru a poté padá z předepsané výšky, která je v tomto případě 460 ± 3 mm. Předepsán je také interval mezi údery a jejich počet, jež byl stanoven v kapitole 6.5.

Teplota hutnění byla u směsí ACO 11 150 °C a u směsi SMA 11 165 °C. Ta se udržovala v sušárnách s termostatem, aby maximální odchylka teploty byla 5 °C.

Obrázek 6. 6 – Laboratorní Marshallův pěch InfraTest 20-1475

Nejprve se připravila ocelová podložka pro formu, na níž se umístil papírový filtr kvůli nalepování směsi na ocelový povrch, válcová forma s vnitřním průměrem 101,6 mm (4”) a nástavec pro hutnění. Připravená navážená směs ve fance se se nasypala do nahřáté ocelové formy, urovnal se povrch směsí ve formě a opět umístil separační papírový filtr. Poté se celá sestava co nejrychleji vložila do hutnícího zařízení a byla upnuta. Následoval automatický proces hutnění daným počtem úderů nejdříve z jedné strany, potom se ocelová forma otočila a celý proces se opakoval. Po zhutnění se odstranily separační papírky a nechaly vychladnout. Pak už se zkušební tělesa mohla odformovat pomocí hydraulického zařízení, tak aby nedošlo k jejich deformaci a označit pro identifikaci.

Obrázek 6. 7 – Označená zkušební tělesa vyrobená Marshallovým pěchem

6.7 Hutnění gyrátorem

V tomto případě se postupovalo podle normy ČSN EN 12697-31 – Příprava zkušebních těles gyrátorem [26]. Byl použit laboratorní gyrátor Troxler model 4140. Podstata zhutňování spočívá v kombinaci působení svislé statické síly a smykové síly vyvozené otáčením formy kolem své šikmé osy. Horní část je odkloněna o úhel natočení a spodní část zůstává kolmá ke svislé ose, čímž se vytváří kuželovitá rotační plocha otáčení. Tento přístroj má rozmezí natočení od 0,5° do 2,0°, ale v této práci byl úhel rotace nastaven na hodnotu 1,25° ± 0,02°. Dalším důležitým parametrem je konsolidační tlak, což je tlak vyvozený svislou silou na otáčející se vzorek. Ten byl v tomto případě nastaven na hodnotu 600 kPa ± 18 kPa. Rychlost otáčení byla nastavena na 30 ot./min. Gyrátor byl vybaven řídící jednotkou, která průběžně snímala a regulovala rychlost otáčení a úhel natočení.

Gyrátor může pracovat ve dvou programech. Tím prvním je měření počtu otáček pro dosažení určité objemové hmotnosti. Druhou možností, která byla použita v této práci pro vyhodnocení zhutnitelnosti, je předem daný počet otáček a měří se průběh změny výšky vzorku a tím změny objemové hmotnosti. Z průběhu změny výšky tělesa a objemové hmotnosti se určí průběh mezerovitosti směsi. Důležitý je průběh výsledné křivky a počáteční a koncové hodnoty mezerovitosti. Hutnění tímto způsobem je vhodné především pro směsi s vyšším obsahem hrubého kameniva, kde může při hutnění údery Marshallova pěchu docházet k drcení zrn kameniva na vrchní straně vzorku.

Obrázek 6. 8 – Gyrátor Troxler 4140

Navážené vzorky s hmotností 1050 g se společně s formou pro gyrátor uložily do sušárny s nastavenou teplotou hutnění, která se nelišila od teploty hutnění Marshallovým pěchem. Poté se pomocí trychtýře nasypala do formy s vnitřním průměrem 100 mm ± 0,1 mm a tloušťkou stěny 7,5 mm a forma se vložila do gyrátoru. Nejprve řídící jednotka seřídila kónickou hutnící hlavu tak, aby její spodní povrch byl v kontaktu s horním povrchem zkušebního vzorku. Pak byl nastaven úhel rotace a mohl začít zhutňovací proces. Byl nastaven počet otáček na 200 a v průběhu hutnění se zaznamenávala výška vzorku s přesností na desetinu milimetru. Při prvních 100 otáčkách každých 10 otáček a v druhé stovce poté už jen každou 20. otáčku.

6.8 Stanovení objemové hmotnosti

6.8.1 Objemová hmotnost podle rozměrů

Tento postup je dle ČSN EN 12697–6 označován jako postup D [27]. Pro stanovení objemové hmotnosti tímto způsobem je nejprve nutné získat rozměry zkušebních těles dle ČSN EN 12697–29 – Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles. Pomocí posuvného měřítka byly u každého vzorku provedeny 4 měření průměru a výšky válcového tělesa. Z nich se stanovil aritmetický průměr měření s přesností na 0,1 mm.

Poté se už jen pomocí laboratorní váhy určila hmotnost tělesa m_1 a objemová hmotnost se určila pomocí vzorce:

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4}.h.d^2}.10^3$$

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

m_1 hmotnost suchého zkušebního tělesa [g]

h výška zkušebního tělesa [mm]

d průměr zkušebního tělesa [mm]

6.8.2 Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch

Tento způsob je v normě uveden jako postup B. Je také označován zkratkou SSD (saturated surface dry). Pomocí laboratorních vah se stanovila hmotnost suchého tělesa m_1 a poté se ponořilo do vodní lázně.

Obrázek 6. 9 – Sycení zkušebních těles ve vodní lázni

V té se pomocí teploměru změřila teplota vody a s přesností na 0,0001 Mg/m^3 se stanovila hustota vody ρ_w. Ve vodní lázni se tělesa nechala sytit asi 45 minut, aby se jejich hmotnost ustálila na konstantní hodnotu. Po nasycení se stanovila hmotnost ponořeného tělesa m_2 tak aby se na povrchu tělesa nevyskytovaly žádné vzduchové bubliny. Poté se vnější povrch osušil a stanovila se hmotnost nasyceného tělesa na vzduchu m_3.

Z těchto hodnot se stanovila objemová hmotnost SSD takto:

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

kde je ρ_{bssd} objemová hmotnost SSD [kg/m^3]

m_1 hmotnost suchého zkušebního těles [g]

m_2 hmotnost zkušebního tělesa ve vodě [g]

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

ρ_w hustota vody při zkušební teplotě [Mg/m^3]

6.9 Stanovení maximální objemové hmotnosti

Při stanovování maximální objemové hmotnosti se postupovalo podle postupu A – Volumetrický postup dle normy ČSN EN 12697–5 [28].

Vzorky pro stanovení maximální objemové hmotnosti se odebrali z nezhutněné asfaltové směsi. Ty se umístili do sušárny, aby došlo k nahřátí a oddělilo se množství nutné ke zkoušce přibližně 800 g. To se vložilo a rozprostřelo na papírovou podložku a nechalo se vychladnout. Po vychladnutí se vzorky musely rozdělit na co nejmenší částice a shluky, jejichž největší rozměr mohl být 6 mm. Ty se poté vložily do připraveného pyknometru, jež měl známou hmotnost i s nástavcem m_1 a známý objem V_p. Vzorky se nechaly temperovat na okolní teplotu a stanovila se hmotnost pyknometru s nástavcem a vzorkem m_2. Pyknometr se naplnil destilovanou vodou a vložil se na otáčecí válce pro uniknutí vzduchových bublin.

Obrázek 6. 10 – Pyknometry se směsí a destilovanou vodou na otáčecích válcích

Poté se vložil do vakuové nádoby, kde byl nastaven maximální tlak 4 kPa pro odstranění zachyceného vzduchu ve vzorku. Po vyjmutí z vakuové nádoby se na pyknometr nasadil nástavec a naplnil se destilovanou vodou po referenční značku nástavce. Dál už jen zbývalo zaznamenat hmotnost takto naplněných pyknometrů.

Obrázek 6. 11 – Pyknometry po vyjmutí z vakuové nádoby

6.10 Stanovení mezerovitosti

Po stanovení objemové hmotnosti zkušebních těles a maximální objemové hmotnosti směsí se dle normy ČSN EN 12697–8 mohla stanovit mezerovitost všech vyrobených vzorků s přesností na 0,01 % [29]. Stanovily se vždy dvě hodnoty mezerovitostí, jedna pro objemovou hmotnost stanovenou z rozměrů a druhá pro metodu SSD. Určila se následujícím způsobem:

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

Kde je V_m Mezerovitost zkušebního tělesa [%]

ρ_m Maximální objemová hmotnost směsi [kg/m^3]

ρ_b Objemová hmotnost zkušebního tělesa [kg/m^3]

6.11 Modul tuhosti

Pro vyjádření modulů tuhosti se pracovalo podle normy ČSN EN 12697–26 – Tuhost [30]. Ta popisuje několik metod pro zjištění charakteristik tuhosti. V této práci se prováděla pouze zkouška v příčném tahu, a to metodou IT-CY: Zkouška v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech. Tato nedestruktivní zkouška působí proměnlivou silou formou pulzů kolmo na osu válcových těles a senzory měří požadovanou hodnotu pružné deformace v kolmém směru.

Před zahájením samotné zkoušky bylo nutné nejprve netemperovat zkušební tělesa na požadovanou teplotu. To probíhalo po dobu minimálně 4 hodin v komoře s nastavitelnou teplotou s přesností na 0,1 °C. Těleso se umístilo do rámečku na nastavovací podpěře a upevnilo upínacími šrouby.

Obrázek 6. 12 – Upevnění tělesa do zkušebního rámečku při měření tuhosti

Pomocí nastavovacích šroubů se vytvořil kontakt mezi dvěma vodorovnými lineárními snímači pohybu a povrchem zkušebního tělesa. Poté pneumatický zdroj mohl zatížit horní zatěžovací pás a tím zkušební vzorek. Celý přístroj byl připojen k počítači se softwarem řídící jednotky. V ní se nastavily parametry měření. Bylo nutné zadat rozměry vzorku, teplotu měření, Poissonovo číslo, počet zkušebních pulzů, počet zatěžovacích pulzů, hodnotu požadované příčné

deformace a dobu náběhu zatěžovacího pulzu. Poté už mohlo přijít zatěžování. Nejprve proběhlo 10 zkušebních pulzů pro nastavení a vytvoření požadované deformace a pak už série 5 zkušebních pulzů. Z nich už software vypočítal 5 hodnot modulů tuhosti a vytvořil z nich aritmetický průměr. Modul tuhosti stanovil dle normy takto:

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

Kde je E naměřený modul tuhosti [MPa]

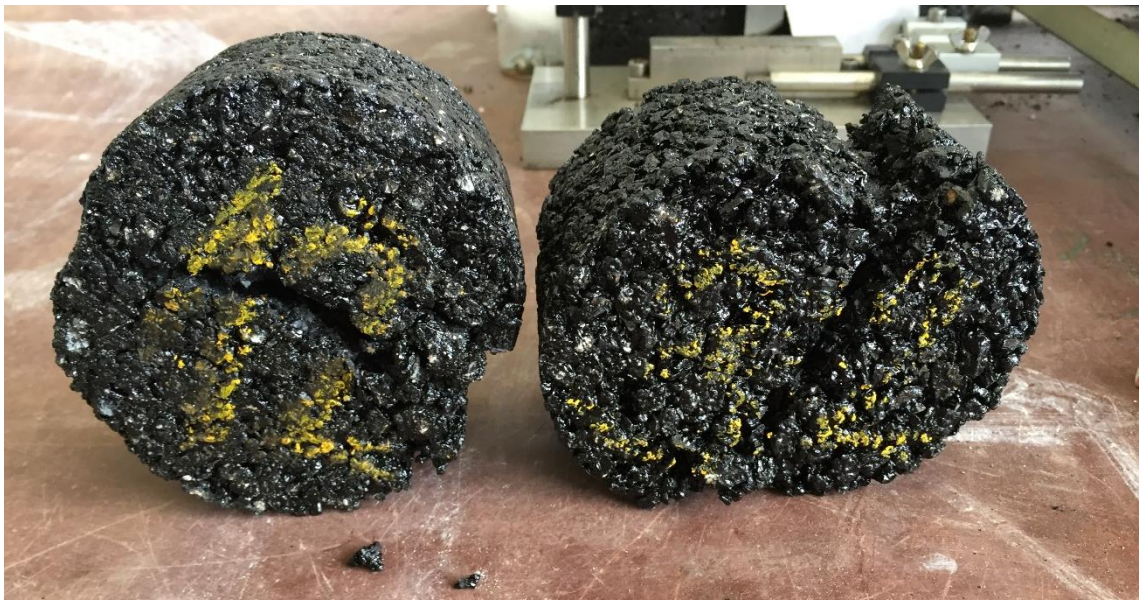
F maximální hodnota použitého svislého zatížení [N]

z amplituda horizontální deformace [mm]

h průměrná tloušťka zkušebního tělesa [mm]

v Poissonovo číslo [-]

Tento proces se pro každé těleso opakoval po otočení o 90°. Zkouška se prováděla při teplotách 0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C, a to na všech vyrobených tělesech. Při nejvyšší teplotě nedokázaly nejméně zhutněná tělesa odolávat tak velkému zatížení pro potřebnou deformaci a došlo k jejich zničení.



Obrázek 6. 13 – Zničení zkušebních těles při měření tuhosti

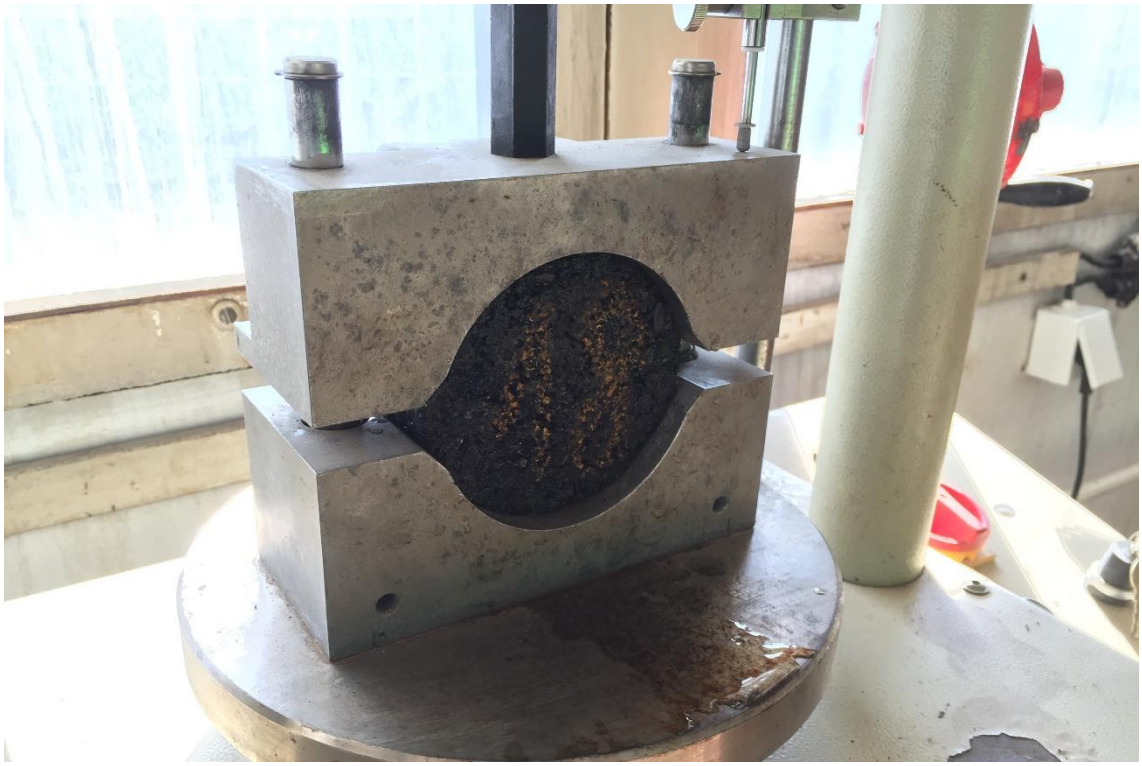
6.12 Marshallova zkouška

Pomocí Marshallovy zkoušky se dle ČSN EN 12697–34 se stanovovala Marshallova stabilita a přetvoření [31]. Měření probíhalo ve stroji pro zkoušky tlakem.

Nejprve se těleso svým plochým povrchem umístilo do vodní lázně na perforovanou vložku tak, aby bylo nad dnem lázně minimálně 25 mm. Lázeň byla předehřátá na teplotu 60 °C s přesností na 1,0 °C. Tam se nechalo 40 minut sytit.

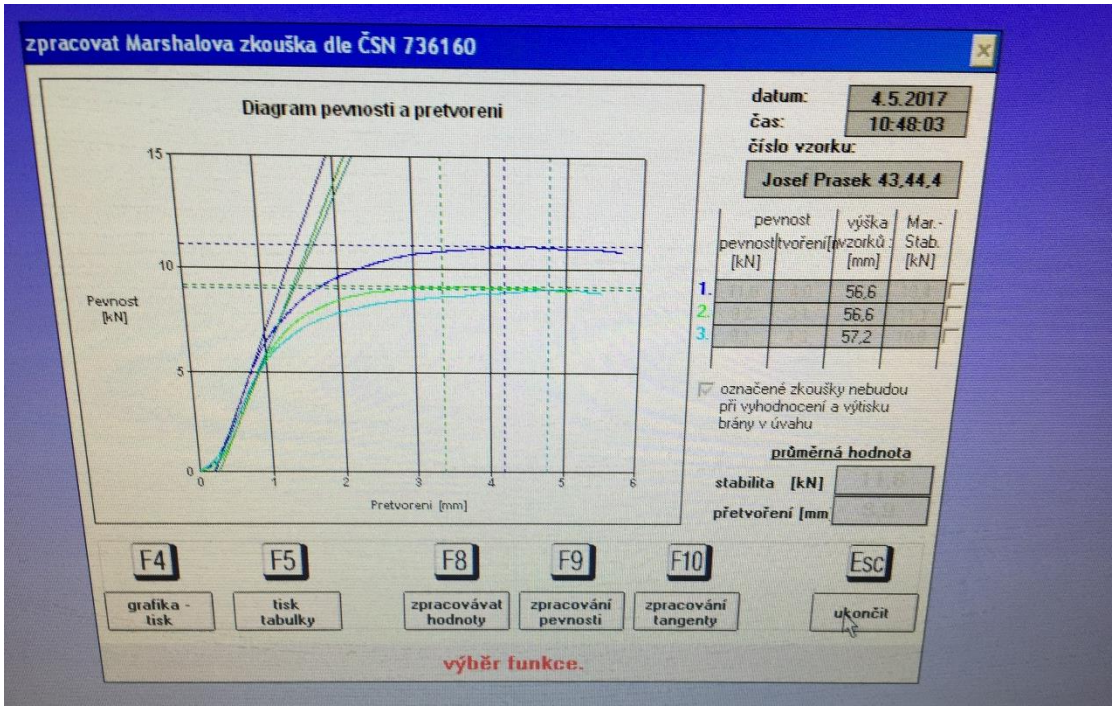
Obrázek 6. 14 – Sycení těles ve vodní lázni o teplotě 60 °C

Poté se umístilo do tlačných čelistí tak aby bylo přibližně v jejich středu a vznikl dobrý kontakt mezi čelistmi a povrchem tělesa.



Obrázek 6. 15 – Uložení zkušebního tělesa do tlačných čelistí

Poté už mohlo přijít zatěžování konstantním posunem spodní tlačné čelisti na čelist vrchní. Rychlost posunu byla stanovena na 50 mm/min. Na čelistech je umístěno zařízení měřící přetvoření, které deformace tělesa určuje s přesností na ± 0,1 mm. Spodní čelist těleso stlačuje až do té doby, dokud nedosáhne maximální síly, která se zaznamená do řídícího softwaru. Tato síla je poté vyjádřena jako Marshallova stabilita. Byly zkoušeny všechny vzorky, přičemž rozdíl hodnot stability od jednoho typu zhutnění mohl být maximálně 15 % a u měření přetvoření 20 %. Software vždy pro trojici jednoho typu vzorků vykreslil graf závislosti maximální síly na přetvoření. Jednalo se o závěrečnou destruktivní zkoušku, po níž už tělesa nemohla být podrobena dalšímu zkoumání.



Obrázek 6. 16 – Diagram pevnosti a přetvoření třech těles jednoho typu zhutnění

6.13 Stanovení zhutnitelnosti

6.13.1 Zhutňování Marshallovým pěchem

Dle ČSN EN 12697–10 lze zhutnitelnost směsi připravenou rázovým zhutňovačem stanovit dvěma způsoby [24]. První možností je stanovení zhutnitelnosti pouze na jednom tělese. Tato metoda spočívá v zaznamenávání výšky vzorku v Marshallově pěchu po každém úderu zhutňovače do dosažení 100 úderů z obou stran. Tím vznikne křivka vyjadřující průběh změny objemové hmotnosti a z ní vyjádřený zhutňovací odpor značený T.

Tímto způsobem stanovení zhutnitelnosti se však práce nezabývala. V této práci se postupovalo druhou metodou, a to vytvořením 3 vzorků pro každý zadaný počet úderů. Po

stanovení objemové hmotnosti všech vzorků bylo možné vytvořit křivku vyjadřující změnu objemové hmotnosti a podle normy ji vyjádřit jako funkci zhutňovací energie takto:

$$\rho(E_1) = \rho_\infty - (\rho_\infty - \rho_0) \cdot \exp[-\frac{E_1}{C}]$$

kde je: $\rho(E_1)$ objemová hmotnost zkušebních těles zhutněných při zhutňovací energii E_1 [kg/m^3]

ρ_∞ matematicky vyjádřená maximální dosažitelná objemová hmotnost [kg/m^3]

ρ_0 matematicky vyjádřená počáteční objemová hmotnost [kg/m^3]

E_1 zhutňovací energie představující počet úderů pěchu na každou stranu [Nm]

C zhutňovací odpor vyjádřený hodnotou 42 Nm [-].

V této rovnici vznikají tři neznáme parametry ρ_∞, ρ_0 a C. Ty se matematicky vypočítají tak, aby došlo k minimálnímu součtu čtverců rozdílu mezi vypočítanými a experimentálně zjištěnými objemovými hmotnostmi.

6.13.2 Zhutňování gyrátorem

Pro určení zhutnitelnosti směsi, jež byla vyráběna na gyrátoru bylo nutné zaznamenávat změnu výšky zkušebních těles v závislosti na počtu otáček, jež muselo být nejméně 200. Z výšky vzorku h, známém průměru d a hmotnosti suchého tělesa m_1 se dala stanovit objemová hmotnost a mezerovitost. Změna mezerovitosti se poté vyjádřila jako funkce zhutňovací energie pomocí této rovnice:

$$\upsilon\,(ng) = \upsilon\,(1) - (K \cdot \ln ng\,)$$

kde je: v (ng) mezerovitost pro provedený počet otáček gyrátoru [%]

v (1) vypočtená mezerovitost na jednu otáčku gyrátoru [-]

K zhutnitelnost [-]

ng provedený počet otáček gyrátoru [-].

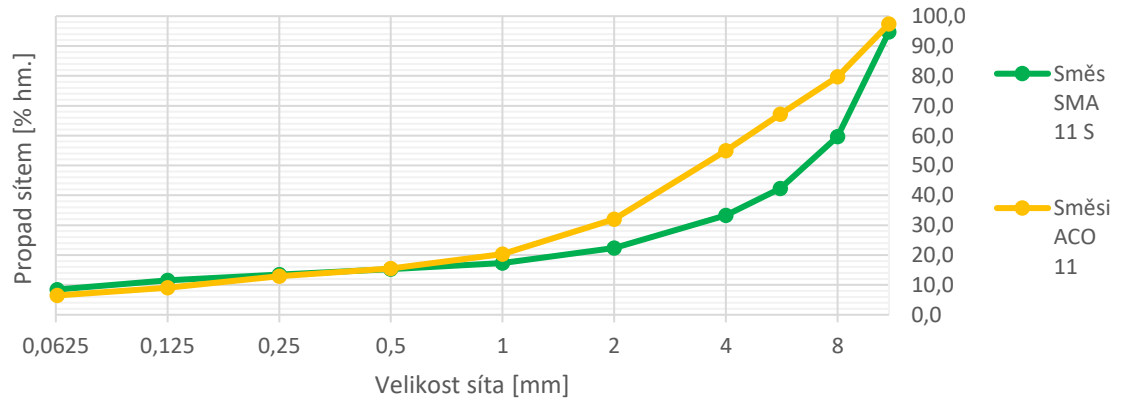
Z této rovnice vycházejí dva neznámé parametry v (1) a K. Ty se získají matematicky využitím lineární regresní analýzy pro minimální rozdíl ve vypočtených a naměřených hodnotách. Ze třech zkušebních těles jedné směsi se stanovil aritmetický průměr těchto hodnot.

7. Výsledky praktické části

7.1 Zrnitost

Pro výrobu zkušebních těles bylo nejprve nutné určit zrnitost jednotlivých frakcí kameniva. Po tomto určení došlo k úpravě podílu jednotlivých frakcí pro dosažení správně křivky zrnitosti vyráběných směsí. Asfaltové betony s maximálním zrnem 11 mm se lišily pouze kvalitativními požadavky, a tak křivka jejich zrnitosti byla téměř totožná. Rozdíl byl poté v porovnání s přerušenou křivkou zrnitosti směsi SMA 11 S.

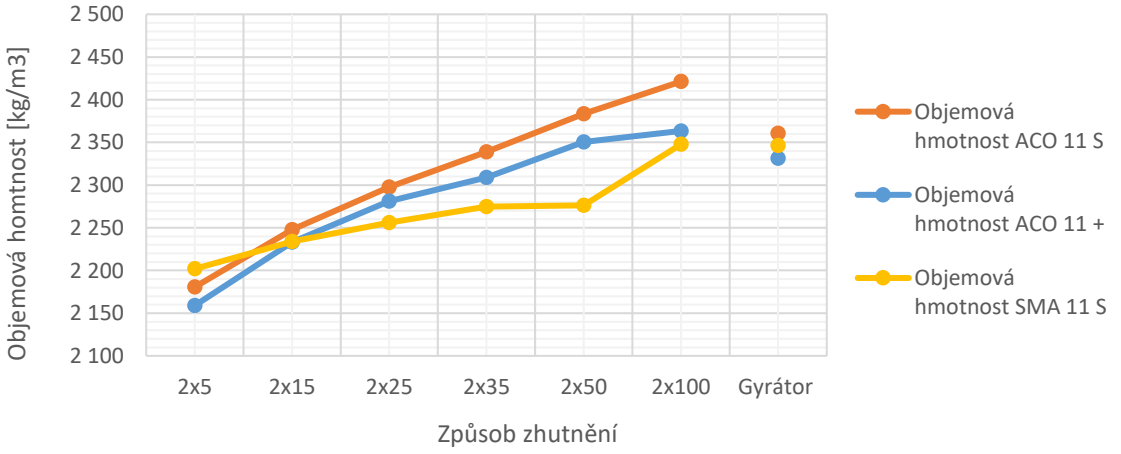
Tabulka 7. 1 – Porovnání zrnitosti směsí ACO 11 a SMA 11 S



7.2 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost byla stanovena dvěma způsoby. Objemová hmotnost stanovená z hmotností metodou SSD – nasycený suchý povrch vyšla zhruba o 10 % vyšší než její stanovení pomocí rozměrů. Nejvyšší objemová hmotnost vyšla oběma metodami u směsi ACO 11 S.

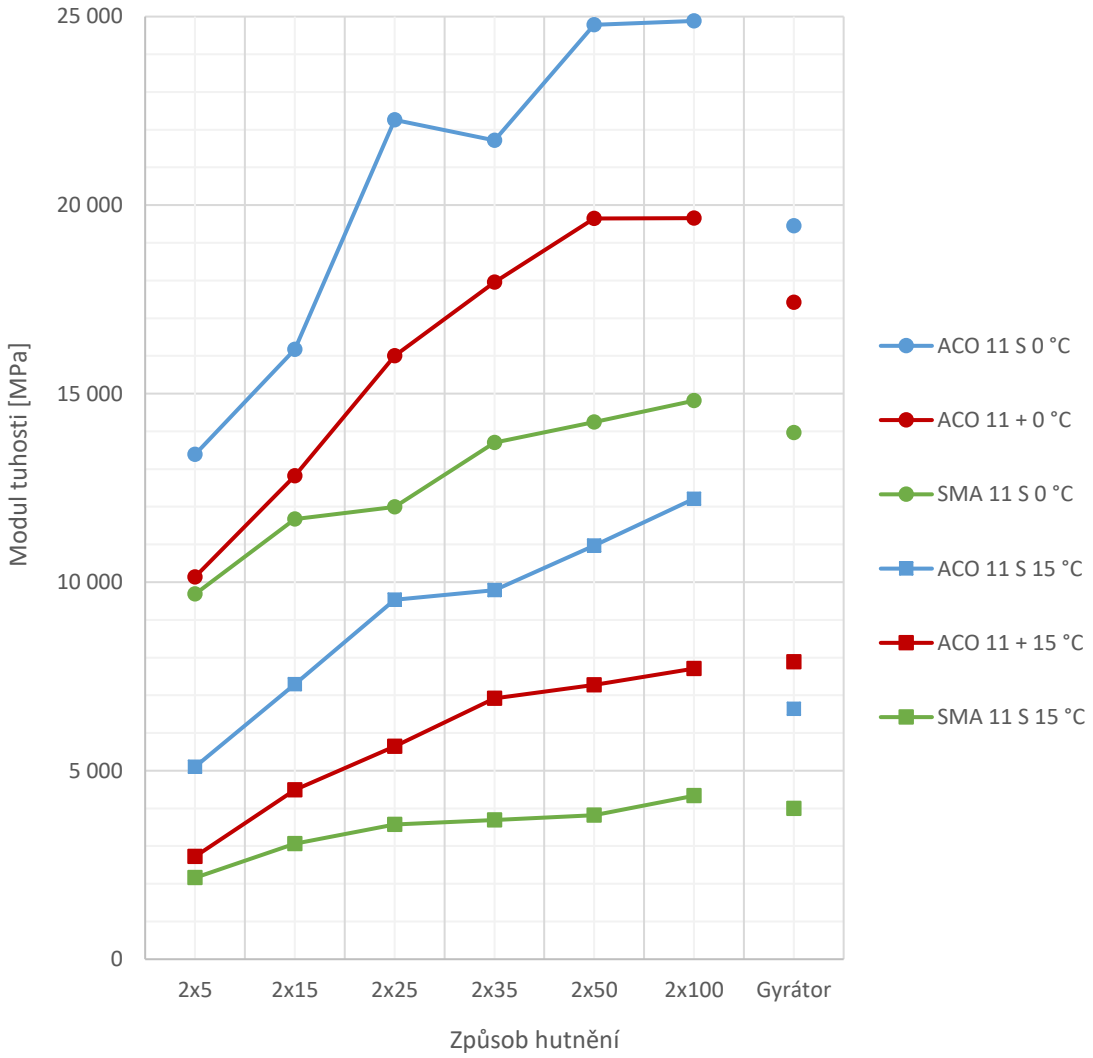
Tabulka 7. 2 – Porovnání objemových hmotností stanovených metodou SSD



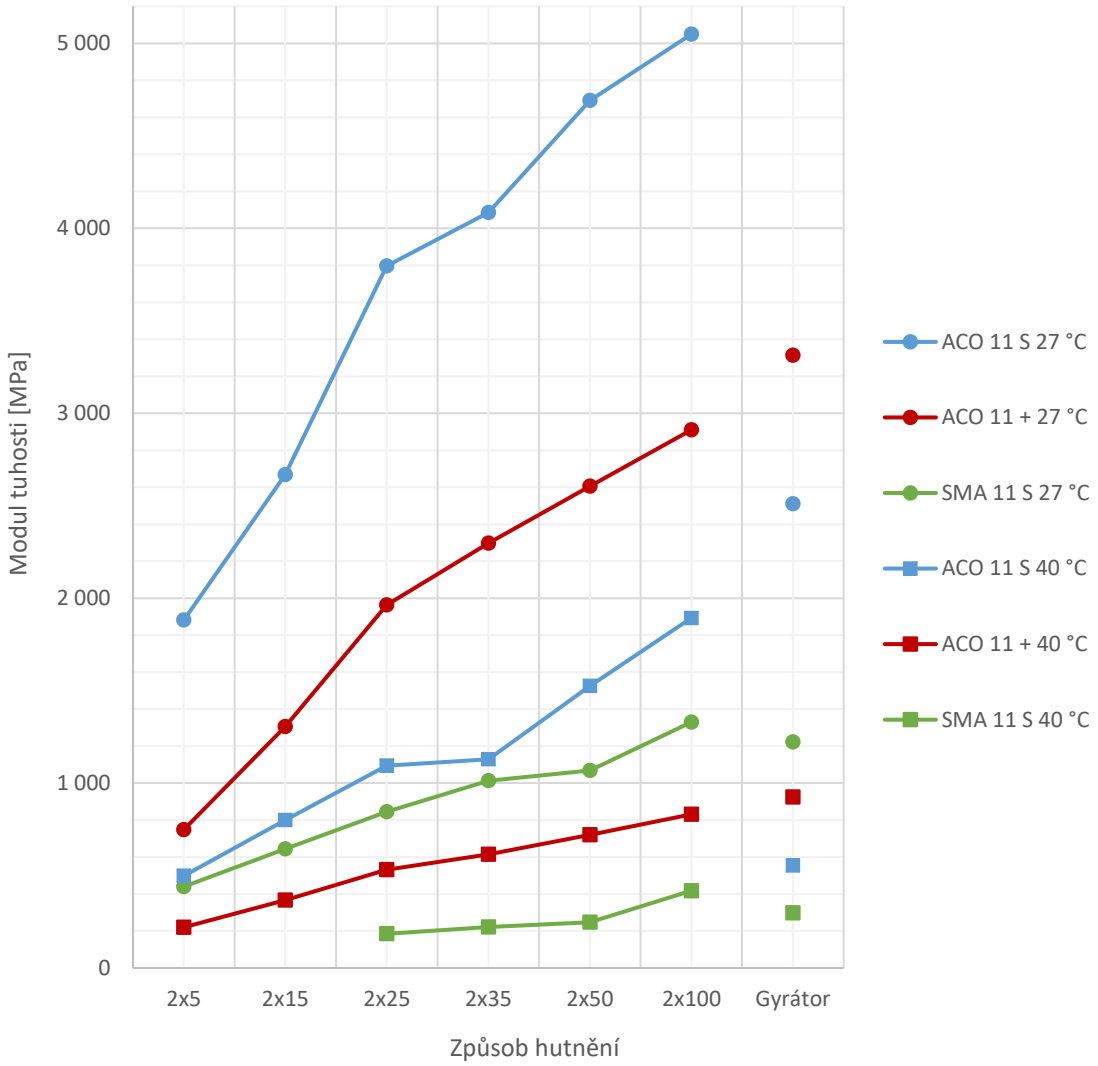
7.3 Modul tuhosti

Moduly tuhosti byly měřeny při teplotách 0 °C, 15 °C, 27 °C, 40 °C zkouškou v příčném tahu metodou IT-CY. Viskozita asfaltového pojiva se zvyšováním zkušební teploty snižovala, což mělo za následek snižování naměřených modulů tuhosti. U všech zkoušených teplot vycházel nejvyšší modul tuhosti u směsi ACO 11 S. Také je z průběhů modulů tuhosti zřejmé, že u směsí ACO 11 docházelo k výraznějšímu navyšování při zvyšování hutnící energie. Naopak u směsi SMA 11 S k tak velkému rozdílu nedocházelo. U směsí ACO 11 je to dáno nižším obsahem pojiva. Pokud totiž snížíme jeho obsah ve směsi, je nutné zvýšit hutnící energii. Modul tuhosti u zkušebních těles vytvořených na gyrátoru odpovídal přibližně modulu tuhosti těles zhutněných energií 2x50 úderů na Marshallově pěchu.

Tabulka 7. 3 – Porovnání modulů tuhosti při teplotách 0 °C a 15 °C



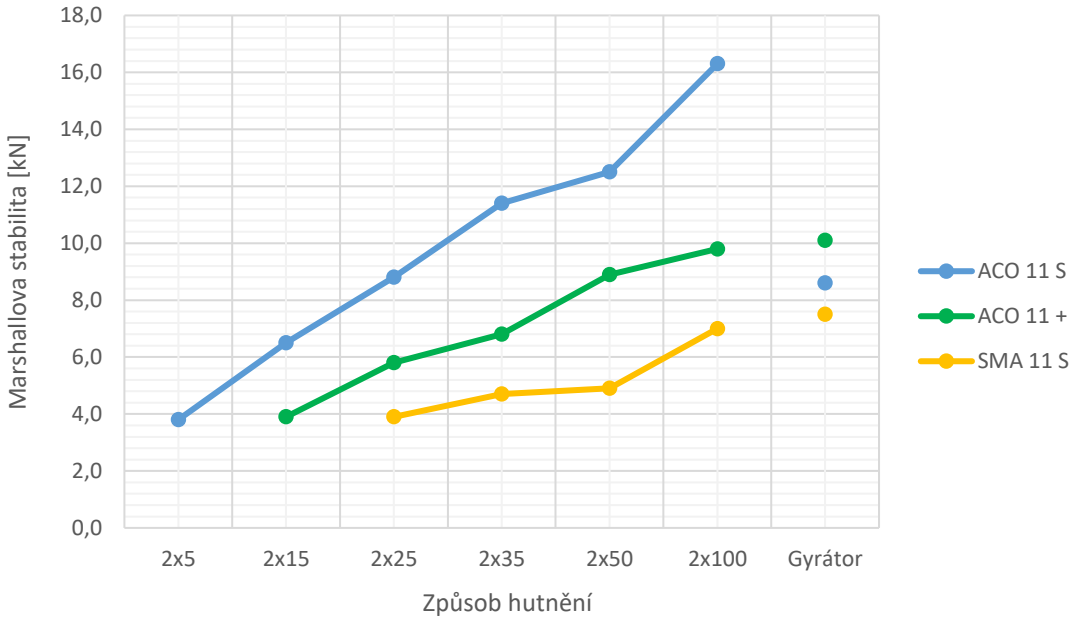
Tabulka 7. 4 – Porovnání modulů tuhosti při teplotách 27 °C a 40 °C



7.4 Marshallova zkouška

Marshallova zkouška pro zjištění Marshallovy stability probíhala až po měření modulů tuhosti a prováděla se na všech zkušebních tělesech kromě poničených vzorků při měření tuhosti v příčném tahu. Nejvyšší Marshallova stabilita vyšla u vzorků směsi ACO 11 S, která u vzorku zhutněného 100 údery z obou stran vyšla 16,2 kN. Vzorky zhutněné gyrátorem vyšly v tomto případě 8,6 kN, což odpovídalo přibližně energii 2x25 úderů rázového zhutňovače. V případě dvou zbývajících směsí vyšla Marshallova stabilita vzorků vyrobených na gyrátoru vyšší než nejvíce zhutněné vzorky vyrobené Marshallovým pěchem.

Tabulka 7. 5 – Porovnání výsledků Marshallovy zkoušky



7.5 Zhutnitelnost

Při určování zhutnitelnosti pomocí Marshallova pěchu se matematicky vyjádřily 3 hodnoty.

Tabulka 7.6 – Matematicky zjištěné parametry zhutnitelnosti Marshallovým pěchem

Parametr	Jednotka	ACO 11 S	ACO 11 +	SMA 11 S
ρ_o	[kg/m^3]	2132,58	2105,67	2192,63
ρ_∞	[kg/m^3]	2435,62	2370,25	2358,44
C	[-]	30,6	22,7	57,3

Nejdůležitějším byl parametr C – zhutňovací odpor, označován také jako parametr zhutnitelnosti. Ten vyšel nejnižší u směsi ACO 11 +, naopak velmi vysoká hodnota vyšla u směsi SMA 11 S. Díky této hodnotě můžeme směsi zatřídit podle jejich zhutnitelnosti. Pokud má parametr zhutnitelnosti hodnotu menší než 12, jde o lehce zhutnitelné směsi. Když se parametr nachází v intervalu $12 \leq C \leq 28$, jedná se o normálně zhutnitelné směsi a při hodnotách vyšších než 28, hovoříme o těžce zhutnitelných směsích.

Tabulka 7.7 – Určení zhutnitelnosti

ACO 11 S	30,6	těžce zhutnitelné
ACO 11 +	22,7	normálně zhutnitelné
SMA 11 S	57,3	velmi těžce zhutnitelné

Druhou metodou pro určení zhutnitelnosti bylo zhutňování gyrátorem, kde se vypočítali dva parametry.

Tabulka 7.8 – Matematicky zjištěné parametry zhutnitelnosti pomocí gyrátoru

	v (1)	K	Průměr K
ACO 11 S	23,16	3,31	3,23
	23,32	3,27	
	24,35	3,11	
ACO 11 +	28,25	4,75	3,70
	21,62	3,21	
	21,70	3,14	
SMA 11 S	26,95	2,83	2,91
	20,08	3,21	
	20,80	2,70	

V této metodě byl rozhodující parametr K závislý na průběhu mezerovitosti. Ten se stanovil pro každé zkušební těleso vyráběné gyrátorem s přesností na dvě desetinná místa a výsledné hodnoty se dosáhlo aritmetickým průměrem. Parametr K vyšel nejnižší u směsi SMA 11 S a nejvyšší hodnota byla u směsi ACO 11 +, a to 3,70.

8. Závěr

V praktické části této práce bylo cílem zjistit rozdíly ve zhutnitelnosti na třech typech asfaltových směsí do obrusných vrstev. Šlo o asfaltové betony ACO 11 S a ACO 11 + a asfaltový koberec mastixový SMA 11 S. V případě porovnávání asfaltových betonů byl rozdíl z hlediska rozdílných kvalitativních požadavků + a S. Druhé porovnání bylo mezi plynulou křivkou zrnitosti u asfaltových betonů a přerušenou křivkou zrnitosti u skeletového typu směsi SMA. U asfaltových betonů bylo použito asfaltové pojivo 50/70 a ve směsi SMA se použil modifikovaný asfalt PmB 45/85–65.

Aby toto porovnání bylo možné vyrobily se na Marshallově pěchu 3 tělesa od každé směsi s 6 různými velikostmi zhutňovací energie. Nejvyšší objemové hmotnosti dosáhla směs ACO 11 S a spolu se směsí ACO 11 + také jejího nejplynulejšího průběhu v závislosti na počtu úderů Marshallova pěchu a tím zhutňovací energii. Naopak nejnižší objemovou hmotnost dosáhla směs SMA 11 S a také velmi malé změny při zvyšování hutnící energie. To bylo v souladu s předpokladem. Při nižším obsahu pojiva, jak tomu bylo u asfaltových betonů je nutné zvýšit hutnící energii.

Průběh objemových hmotností byl základem pro určení parametru zhutnitelnosti C. Směs ACO 11 + vyšla jako lehce zhutnitelná a parametr C u směsi ACO 11 S vyšel velmi blízko spodní hranici intervalu pro již těžce zhutnitelné směsi. Podle očekávání vyšla nejhůře směs SMA 11 S, která vyšla jako velmi těžce zhutnitelná.

Paralelně se výrobou těles na rázovém zhutňovači probíhalo také zhutňování 3 vzorků od každé směsi gyrátorem. Pomocí něj se dokázal stanovit druhý nezávislý parametr zhutnitelnosti značený K. Ten vycházel z průběhu mezerovitosti, a tak vysoké hodnoty tohoto parametru naopak značily snadnou zhutnitelnost. Jako u Marshallova pěchu vyšla nejsnadněji zhutnitelná směs ACO 11 + a naopak nejhůře zhutnitelná směs SMA 11 S.

9. Zdroje

[1] HANZÍK, Václav a Pavel KLAPKA. Pokládka hutněných asfaltových směsí. Revidované a rozšířené vydání. Praha: Sdružení pro výstavbu silnic, 2015. ISBN 978-80-903925-6-4.

[2] HÝZL, Petr. Praktické aplikace v pozemních komunikacích: Modul 6 - asfaltové směsi. Brno, 2006. Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební.

[3] Hutnící výrobky. Wacker Neuson [online]. Praha, 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: http://www.wackerneuson.cz/cs/vyrobky/hutneni/

[4] 16. Stroje a zařízení pro zhutňování zemin a hornin. JEŘÁBEK, Karel, František HELEBRANT, Josef JURMAN a Věra VOŠTOVÁ. Stroje pro zemní práce, silniční stroje. Ostrava, 1996, s. 265-328

[5] Zemní a stavební stroje [online]. In: . 2002, s. 1-9 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: http://techstroj.g6.cz/S/S05.pdf

[6] Hamm – válec s pryžovými koly. In: HAMM [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: https://www.hamm.eu/cs/products~1/pneumatic-tire-rollers/series-hd-compactline/hd-14-tt.173437.php

[7] Pneumatikový válec Ammann AP 240 Tier 4i [online]. In: . Langenthal, Switzerland, 2016 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: https://www.ammann-group.com/cz-cz/machines/soil-and-asphalt-compactors/pneumatic-rollers/ap-240-tier-4i

[8] Pneumatikový válec Ammann ART 240 Tier 4f [online]. In: . Langenthal, Switzerland, 2016 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: https://www.ammann-group.com/cz-cz/machines/soil-and-asphalt-compactors/pneumatic-rollers/art-240-tier-4f

[9] Válec s pryžovými koly – GRW 280i-20. In: HAMM [online]. 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: https://www.hamm.eu/cs/products~1/pneumatic-tire-rollers/series-grw-180-280-tier-4i/grw-280i-20.176154.php

[10] Pneumatic roller Cat CW34. In: Cat – North America [online]. 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: http://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/compactors/pneumatic-rollers/18350755.html

[11] HILL, Chris. Caterpillar CB68B [online]. 2016 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: http://www.equipmentworld.com/caterpillar-intros-84-inch-drum-cb68b-tandem-vibratory-asphalt-roller/

[12] REMEK, Branko. Stroje pro zemní stavební práce. Stavebnictví [online]. Fakulta strojní ČVUT v Praze, 2008 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: http://www.casopisstavebnictvi.cz/stroje-pro-zemni-stavebni-prace_N841

[13] KOMBINOVANÝ TANDEMOVÝ VÁLEC – ARX 40 K Tier 4i [online]. In: . Langenthal, Switzerland, 2016 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: https://www.ammann-group.com/cz-cz/machines/soil-and-asphalt-compactors/tandem-rollers/arx-40-k-tier-4i

[14] Caterpillar CS44 [online]. In: . 2009 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: http://zeppelin.cz/blob.php?idProduct=22571895&type=pdf&dbPrefixTable=katalog&lng=cs

[15] Drum steel vibratory roller Cat CD10 [online]. In: . 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: http://zeppelin.cz/blob.php?idProduct=56142817&type=pdf&dbPrefixTable=katalog&lng=cs

[16] KLOUBOVÝ TANDEMOVÝ VÁLEC – ARX 90 C Tier 4f [online]. In: . Langenthal, Switzerland, 2016 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: https://www.ammann-group.com/cz-cz/machines/soil-and-asphalt-compactors/tandem-rollers/arx-90-c-tier-4f

[17] Tandemový válec s kloubovým řízením se 2 vibračními běhouny. In: HAMM [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: https://www.hamm.eu/cs/products~1/tandem-rollers/series-hd-tier-4/hd-90i-vv.169994.php

[18] Hamm (WIRTGEN Group). Three Decades of Experience Makes HAMM the World Leader in Oscillation Compaction. Lectura press [online]. 2017 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: https://lectura.press/en/article/three-decades-of-experience-makes-hamm-the-world-leader-in-oscillation-compaction/36660

[19] Tandemový válec s kloubovým řízením se 2 vibračními běhouny Hamm HD+ 80i VO-S. In: HAMM [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: https://www.hamm.eu/cs/products~1/tandem-rollers/series-hd-tier-4/hd-90i-vv.169994.php

[20] Combination roller Dynapac CC 324 HF. In: Lectura specs: Heavy Machinery & Equipment Encyclopedia [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: https://www.lectura-

specs.com/en/model/construction-machinery/combination-rollers-dynapac/cc-324-c-hf-1136651

[21] Pozemní komunikace Bohemia, a.s. [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: http://www.pkb.cz/obalovna_asfaltovych_smesi.htm

[22] Laboratroy mixer Infratest 20-0160. Brackenheim-Botenheim.

[23] Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor: ČSN EN 933-1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2012.

[24] Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 10: Zhutnitelnost: ČSN EN 12697-10. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2003.

[25] Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem: ČSN EN 12697-30. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2012.

[26] Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 31: Příprava zkušebních těles gyrátorem: ČSN EN 12697-31. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2007.

[27] Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa: ČSN EN 12697-6. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2012.

[28] Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti: ČSN EN 12697-5. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2010.

[29] Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí: ČSN EN 12697-8. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2004.

[30] Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost: ČSN EN 12697-26. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2012.

[31] Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 34: Marshallova zkouška: ČSN EN 12697-34. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2012.

10. Seznam obrázků a tabulek

10.1 Seznam obrázků

Obrázek 2. 1 – Hutnící zařízení finišeru..... 11
Obrázek 4. 1 – Schéma rozdělené silničních válců..... 13
Obrázek 4. 2 – Konstrukce tandemového válce s tuhým rámem a dvěma klouby..... 14
Obrázek 4. 3 – Tandemový pneumatikový válec Hamm HD 14..... 15
Obrázek 4. 4 – Nezávislé odpružení běhounů (vlevo) a kyvná osa dvojice běhounů.... 16
Obrázek 4. 5 – Zařízení proti ulpívání směsi na pneumatikách..... 17
Obrázek 4. 6 – Vibrační systém tandemového dvouosého válce Caterpillar CB68B..... 20
Obrázek 4. 7 – Tandemový vibrační válec Ammann ARX 40..... 21
Obrázek 4. 8 – Tahačový vibrační válec Caterpillar CS 44..... 22
Obrázek 4. 9 – Princip fungování oscilačního běhounu..... 24
Obrázek 4. 10 – Kombinovaný válec Hamm HD+i s předním běhounem vibračním a zadním oscilačním..... 25
Obrázek 4. 11 – Kombinovaný válec Dynapac CC324 s předním vibračním běhounem a pneumatikami..... 26
Obrázek 5. 1 – Příklad průběhu ochlazování pokládané vrstvy..... 27
Obrázek 6. 1 – Vyzvednutí kameniva ve společnosti PKB a.s..... 30
Obrázek 6. 2 – Použité druhy kameniva..... 31
Obrázek 6. 3 – Sestava sít pro praní kameniva..... 32
Obrázek 6. 4 – Navážení směsi pro výrobu jednoho zkušebního tělesa..... 35
Obrázek 6. 5 – Výsledná směs v laboratorní míchačce..... 36
Obrázek 6. 6 – Laboratorní Marshallův pěch InfraTest 20-1475..... 37
Obrázek 6. 7 – Označená zkušební tělesa vyrobená Marshallovým pěchem..... 38
Obrázek 6. 8 – Gyrátor Troxler 4140..... 39
Obrázek 6. 9 – Sycení zkušebních těles ve vodní lázni..... 40
Obrázek 6. 10 – Pyknometry se směsí a destilovanou vodou na otáčecích válcích..... 41
Obrázek 6. 11 – Pyknometry po vyjmutí z vakuové nádoby..... 42
Obrázek 6. 12 – Upevnění tělesa do zkušebního rámečku při měření tuhosti..... 43
Obrázek 6. 13 – Zničení zkušebních těles při měření tuhosti..... 44
Obrázek 6. 14 – Sycení těles ve vodní lázni o teplotě 60 °C..... 45
Obrázek 6. 15 – Uložení zkušebního tělesa do tlačných čelistí..... 45
Obrázek 6. 16 – Diagram pevnosti a přetvoření třech těles jednoho typu zhutnění.... 46

10.2 Seznam tabulek

Tabulka 2. 1 – Obvyklá míra zhutnění jednotlivých strojů pro rozprostírání..... 11
Tabulka 3. 1 – Porovnání doplňkových zhutňovacích prostředků..... 12
Tabulka 4. 1 – Srovnání nejdůležitějších parametrů pneumatikových válců..... 18

Tabulka 4. 2 - Srovnání nejdůležitějších parametrů vibračních válců..... 23
Tabulka 5. 1 – Doporučený počet pojezdů pro hlavní fázi hutnění..... 29
Tabulka 6. 1 – Zbytky na sítech vyjádřeny v procentech ve vztahu k navážce..... 33
Tabulka 6. 2 – Procentuální množství kameniva jednotlivých směsí..... 34
Tabulka 7. 1 – Porovnání zrnitosti směsí ACO 11 a SMA 11 S..... 48
Tabulka 7. 2 – Porovnání objemových hmotností stanovených metodou SSD..... 48
Tabulka 7. 3 – Porovnání modulů tuhosti při teplotách 0 °C a 15 °C..... 49
Tabulka 7. 4 – Porovnání modulů tuhosti při teplotách 27 °C a 40 °C..... 50
Tabulka 7. 5 – Porovnání výsledků Marshallovy zkoušky..... 51
Tabulka 7.6 – Matematicky zjištěné parametry zhutnitelnosti Marshallovým pěchem. 51
Tabulka 7.7 – Určení zhutnitelnosti..... 51
Tabulka 7.8 – Matematicky zjištěné parametry zhutnitelnosti pomocí gyrátoru..... 41
Tabulka 11. 1 – Zbytky na sítech [g]..... 60
Tabulka 11. 2 – Zbytky na sítech [%]..... 60
Tabulka 11. 3 – Propady na sítech – směs ACO 11 S..... 61
Tabulka 11. 4 – Čára zrnitosti – směs ACO 11 S..... 62
Tabulka 11. 5 – Propady na sítech – směs ACO 11 +..... 63
Tabulka 11. 6 – Čára zrnitosti – směs ACO 11 +..... 64
Tabulka 11. 7 – Propady na sítech – směs SMA 11 S..... 65
Tabulka 11. 8 – Čára zrnitosti – směs SMA 11 S..... 66
Tabulka 11. 9 – Rozměry vzorků – směs ACO 11 S..... 67
Tabulka 11. 10 – Rozměry vzorků – směs ACO 11 +..... 68
Tabulka 11. 11 – Rozměry vzorků – směs SMA 11 S..... 69
Tabulka 11. 12 – Objemová hmotnost stanovená z rozměrů – směs ACO 11 S..... 70
Tabulka 11. 13 – Objemová hmotnost stanovená z rozměrů – směs ACO 11 +..... 71
Tabulka 11. 14 – Objemová hmotnost stanovená z rozměrů – směs SMA 11 S..... 72
Tabulka 11. 15 – Objemová hmotnost stanovená z hmotnosti – směs ACO 11 S..... 73
Tabulka 11. 16 – Objemová hmotnost stanovená z hmotnosti – směs ACO 11 +..... 74
Tabulka 11. 17 – Objemová hmotnost stanovená z hmotnosti – směs SMA 11 S..... 75
Tabulka 11. 18 – Srovnání objemových hmotnosti – směs ACO 11 S..... 76
Tabulka 11. 19 – Srovnání objemových hmotnosti – směs ACO 11 +..... 77
Tabulka 11. 20 – Srovnání objemových hmotnosti – směs SMA 11 S..... 78
Tabulka 11. 21 – Stanovení mezerovitostí – směs ACO 11 S..... 79
Tabulka 11. 22 – Stanovení mezerovitostí – směs ACO 11 +..... 80
Tabulka 11. 23 – Stanovení mezerovitostí – směs SMA 11 S..... 81
Tabulka 11. 24 – Porovnání mezerovitostí stanovených z rozměrů..... 82
Tabulka 11. 25 – Porovnání mezerovitostí stanovených z hmotností..... 83
Tabulka 11. 26 – Průběh hutnění gyrátorem – směs ACO 11 S..... 84
Tabulka 11. 27 – Průběh zhutňování gyrátorem – směs ACO 11 S..... 85
Tabulka 11. 28 – Průběh hutnění gyrátorem – směs ACO 11 +..... 86

Tabulka 11. 29 – Průběh zhutňování gyrátorem – směs ACO 11 +..... 87
Tabulka 11. 30 – Průběh hutnění gyrátorem – směs SMA 11 S..... 88
Tabulka 11. 31 – Průběh zhutňování gyrátorem – směs SMA 11 S..... 89
Tabulka 11. 32 – Moduly tuhosti při teplotě 0 °C..... 90
Tabulka 11. 33 – Porovnání modulů tuhosti při teplotě 0 °C..... 91
Tabulka 11. 34 - Moduly tuhosti při teplotě 15 °C..... 92
Tabulka 11. 35 – Porovnání modulů tuhosti při teplotě 15 °C..... 93
Tabulka 11. 36 - Moduly tuhosti při teplotě 27 °C..... 94
Tabulka 11. 37 – Porovnání modulů tuhosti při teplotě 27 °C..... 95
Tabulka 11. 38 – Moduly tuhosti při teplotě 40 °C..... 96
Tabulka 11. 39 – Porovnání modulů tuhosti při teplotě 40 °C..... 97
Tabulka 11. 40 – Marshallova zkouška..... 98
Tabulka 11. 41 – Porovnání výsledků Marshallovy zkoušky..... 99

11. Přílohy

Tabulka 11. 1 – Zbytky na sítech [g]

Síto	Jednotky	11	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	Dno	Navážka
8/11 Zbraslav	[g]	274,6	2053,6	274,6	7,6	2,0	1,5	0,9	0,7	0,8	0,9	0,3	2627,3
4/8 Zbraslav	[g]	0,0	22,4	229,0	244,7	94,3	5,5	0,5	0,3	0,4	0,7	0,5	604,6
0/4 Zbraslav	[g]	0,0	0,0	0,0	5,5	74,5	58,6	19,0	20,0	10,8	7,9	1,0	214,1
0/4 Lašovice	[g]	0,0	0,0	1,2	32,6	96,3	38,8	21,3	12,0	7,6	6,0	1,4	229,2
Filer V. Hydčice	[g]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,7	2,4	7,0	19,0	48,8	0,8	214,8

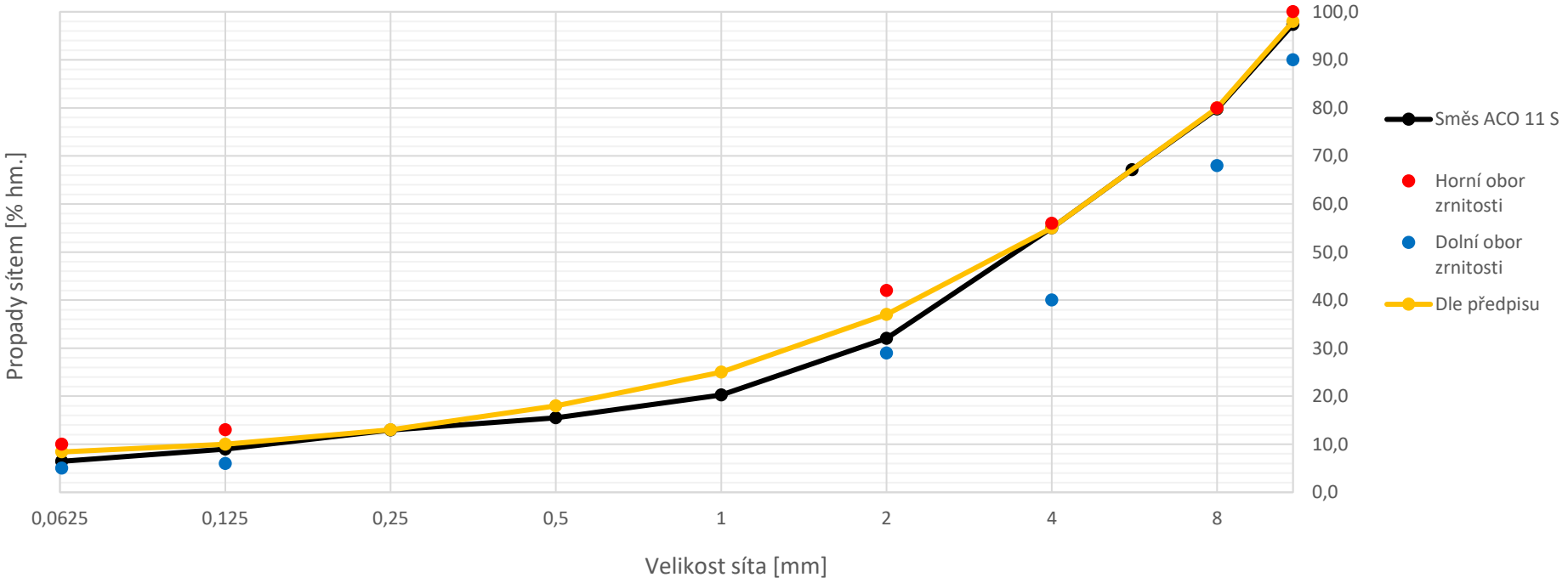
Tabulka 11. 2 – Zbytky na sítech [%]

Síto	Jednotky	11	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	0	Navážka
8/11 Zbraslav	[%]	10,5	78,2	10,5	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	100,0
4/8 Zbraslav	[%]	0,0	3,7	37,9	40,5	15,6	0,9	0,1	0,0	0,1	0,1	1,1	100,0
0/4 Zbraslav	[%]	0,0	0,0	0,0	2,6	34,8	27,4	8,9	9,3	5,0	3,7	8,3	100,0
0/4 Lašovice	[%]	0,0	0,0	0,5	14,2	42,0	16,9	9,3	5,2	3,3	2,6	5,8	100,0
Filer V. Hydčice	[%]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,8	1,1	3,3	8,8	22,7	63,1	100,0

Tabulka 11. 3 – Propady na sítech – směs ACO 11 S

Síto	[%]	11	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	0
8/11 Zbraslav	25,0	2,6	19,5	2,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
4/8 Zbraslav	19,1	0,0	0,7	7,2	7,7	3,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
0/4 Zbraslav	26,0	0,0	0,0	0,0	0,7	9,0	7,1	2,3	2,4	1,3	1,0	2,2
0/4 Lašovice	26,0	0,0	0,0	0,1	3,7	10,9	4,4	2,4	1,4	0,9	0,7	1,5
Filer V. Hydčice	3,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,9	2,5
Součtová čára zbytků	100,0	2,6	20,2	10,0	12,2	23,0	11,7	4,8	3,9	2,5	2,6	6,5
Horní obor zrnitosti	-	100	80	-	56	42	-	-	-	13	10	-
Součtová čára propadů	-	97,4	79,8	67,2	55,0	32,0	20,3	15,5	12,9	9,0	6,5	0,0
Dle předpisu	-	98,0	80,0	-	55,0	37,0	25,0	18,0	13,0	10,0	8,4	0,0
Dolní obor zrnitosti	-	90	68	-	40	29	-	-	-	6	5	-

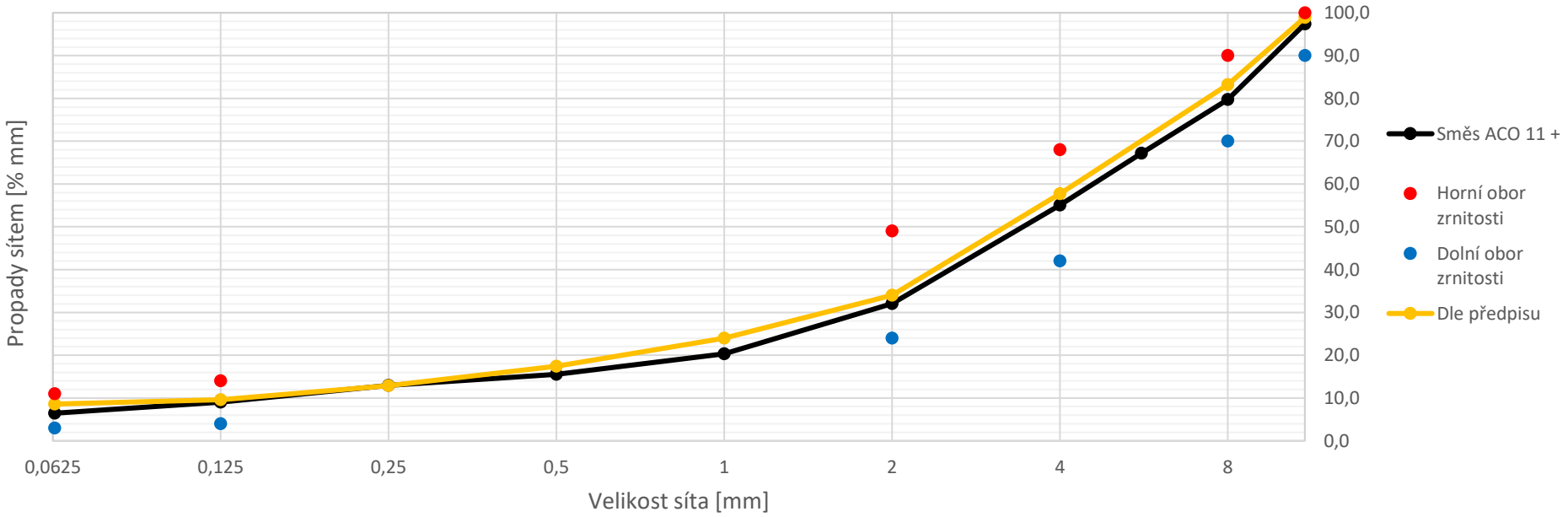
Tabulka 11. 4 – Čára zrnitosti – směs ACO 11 S



Tabulka 11. 5 – Propady na sítech – směs ACO 11 +

Síto	[%]	11	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	0
8/11 Zbraslav	25,0	2,6	19,5	2,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
4/8 Zbraslav	19,0	0,0	0,7	7,2	7,7	3,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
0/4 Zbraslav	26,1	0,0	0,0	0,0	0,7	9,1	7,1	2,3	2,4	1,3	1,0	2,2
0/4 Lašovice	26,1	0,0	0,0	0,1	3,7	10,9	4,4	2,4	1,4	0,9	0,7	1,5
Filer V. Hydčice	3,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,9	2,5
Součtová čára zbytků	100,0	2,6	20,2	9,9	12,1	23,0	11,8	4,8	3,9	2,5	2,6	6,5
Horní obor zrnitosti	-	100	90	-	68	49	-	-	-	14	11	-
Součtová čára propadů	-	97,4	79,8	67,2	55,1	32,1	20,3	15,5	13,0	9,0	6,5	0,0
Dle předpisu	-	98,9	83,2		57,7	34,0	24,0	17,4	12,9	9,6	8,6	0,0
Dolní obor zrnitosti	-	90	70	-	42	24	-	-	-	4	3	-

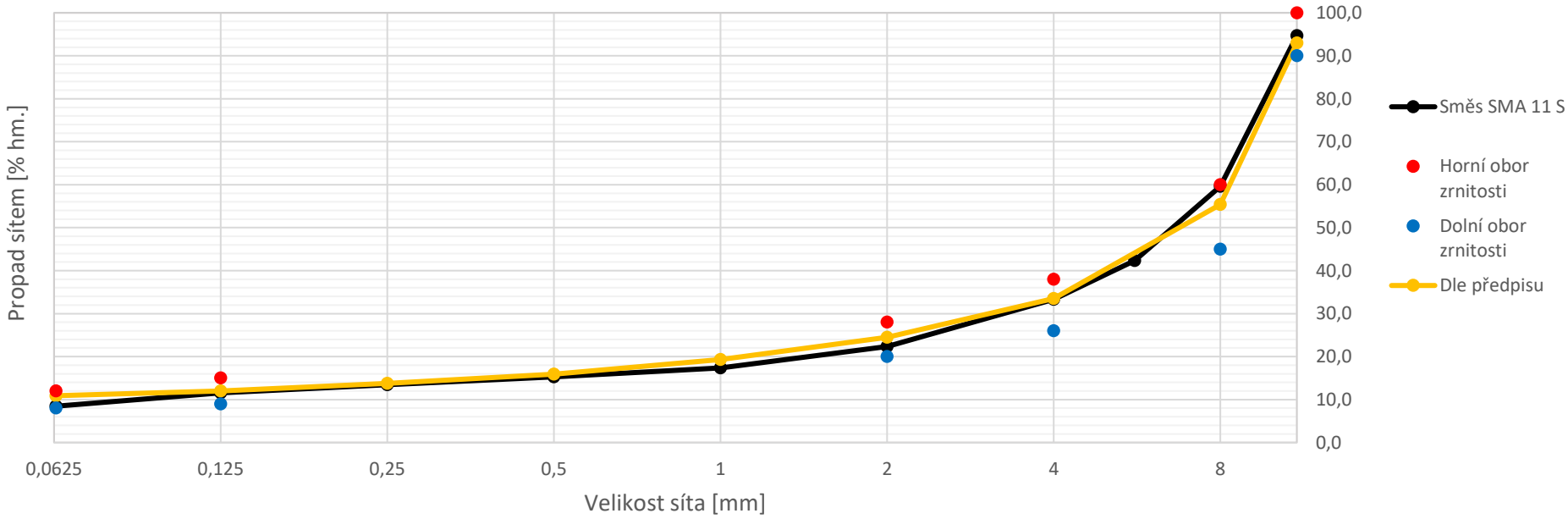
Tabulka 11. 6 – Čára zrnitosti – směs ACO 11 +



Tabulka 11. 7 – Propady na sítech – směs SMA 11 S

Síto	[%]	11	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	0
8/11 Zbraslav	50,8	5,3	39,7	5,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
4/8 Zbraslav	17,5	0,0	0,6	6,6	7,1	2,7	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
0/4 Zbraslav	10,5	0,0	0,0	0,0	0,3	3,7	2,9	0,9	1,0	0,5	0,4	0,9
0/4 Lašovice	10,8	0,0	0,0	0,1	1,5	4,5	1,8	1,0	0,6	0,4	0,3	0,6
Filer V. Hydčice	10,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,9	2,4	6,6
Součtová čára zbytků	100,0	5,3	40,4	12,0	9,0	11,0	5,0	2,1	1,9	1,8	3,1	8,5
Horní obor zrnitosti	-	100	60	-	38	28	-	-	-	15	12	-
Součtová čára propadů	-	94,7	59,6	42,3	33,3	22,3	17,4	15,3	13,4	11,5	8,5	0,0
Dle předpisu	-	93,0	55,4		33,5	24,5	19,3	15,9	13,8	12,0	10,9	0,0
Dolní obor zrnitosti	-	90	45	-	26	20	-	-	-	9	8	-

Tabulka 11. 8 – Čára zrnitosti – směs SMA 11 S



Tabulka 11. 9 – Rozměry vzorků – směs ACO 11 S

	Průměr – měření				Průměr	Výška – měření				Výška
Vzorek	1	2	3	4		1	2	3	4	
1	99,8	99,4	99,7	99,7	99,7	59,0	59,0	58,4	58,4	58,7
2	99,8	99,7	99,7	99,6	99,7	59,3	59,4	59,6	59,6	59,5
3	99,7	99,6	99,7	99,7	99,7	58,3	58,5	58,6	58,4	58,5
4	101,7	101,6	101,6	101,5	101,6	65,3	65,6	65,2	65,2	65,3
5	102,0	102,2	102,3	102,0	102,1	65,7	65,6	65,0	65,1	65,4
6	101,6	101,5	101,7	101,8	101,7	67,6	66,9	67,7	67,1	67,3
7	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	61,4	61,7	61,5	61,8	61,6
8	103,0	103,1	103,2	102,8	103,0	58,7	58,9	58,4	58,5	58,6
9	101,6	101,6	101,2	101,3	101,4	60,2	60,0	60,2	60,6	60,3
10	101,7	101,6	101,4	101,2	101,5	59,2	58,9	58,4	58,4	58,7
11	102,1	102,1	102,2	102,1	102,1	57,8	57,6	57,5	57,7	57,7
12	102,2	102,2	102,2	102,2	102,2	57,7	57,3	57,5	57,9	57,6
13	101,8	101,5	101,8	101,8	101,7	56,9	56,6	57,2	56,9	56,9
14	101,5	101,6	101,8	101,2	101,5	54,8	54,4	54,3	54,7	54,6
15	101,8	101,8	101,8	101,4	101,7	56,6	57,4	56,8	56,6	56,9
16	101,6	101,6	101,8	101,7	101,7	54,3	55,6	55,2	54,8	55,0
17	101,9	101,6	101,9	101,9	101,8	54,9	54,9	54,7	54,6	54,8
18	101,7	101,5	101,7	101,6	101,6	55,2	55,7	55,2	55,7	55,5
19	103,1	103,3	103,1	103,0	103,1	52,3	53,0	53,0	52,6	52,7
20	101,6	101,4	101,7	101,7	101,6	53,8	54,1	52,5	54,2	53,7
21	101,6	101,7	101,3	100,8	101,4	53,5	53,5	54,9	53,9	54,0

Tabulka 11. 10 – Rozměry vzorků – směs ACO 11 +

	Průměr – měření				Průměr	Výška – měření				Výška
Vzorek	1	2	3	4		1	2	3	4	
31	102,8	102,7	102,8	102,9	102,8	65,3	65,1	64,9	65,1	65,1
32	101,1	100,8	101,4	101,2	101,1	67,6	67,4	67,8	67,9	67,7
33	101,5	101,4	101,3	101,4	101,4	66,1	66,4	66,0	65,9	66,1
34	102,2	101,8	102,0	102,1	102,0	61,2	61,5	61,8	61,9	61,6
35	101,7	101,5	101,7	101,5	101,6	61,2	61,5	61,6	61,7	61,5
36	101,6	101,5	101,7	101,5	101,6	60,6	60,0	60,5	60,9	60,5
37	102,2	101,5	102,1	102,0	102,0	58,2	58,3	58,2	58,4	58,3
38	101,6	101,0	101,5	101,4	101,4	59,4	58,2	58,9	60,2	59,2
39	101,7	101,5	101,6	102,1	101,7	59,1	57,7	57,2	58,9	58,2
40	101,4	101,5	101,5	101,7	101,5	59,4	58,0	57,9	59,0	58,6
41	101,5	101,6	101,4	101,5	101,5	57,1	57,1	58,0	58,8	57,8
42	103,1	103,1	103,0	102,7	103,0	56,3	54,6	54,8	57,8	55,9
43	101,4	101,5	101,4	101,6	101,5	55,7	56,0	58,1	56,8	56,7
44	101,9	101,6	102,1	101,9	101,9	55,6	56,0	57,5	57,1	56,6
45	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	58,0	58,1	56,2	56,5	57,2
46	101,6	101,7	101,5	101,7	101,6	54,4	55,2	56,4	56,0	55,5
47	102,1	102,3	102,2	102,1	102,2	54,6	53,9	55,2	56,0	54,9
48	102,4	101,8	102,0	102,1	102,1	54,6	53,8	54,8	56,1	54,8
49	99,8	99,5	99,6	99,5	99,6	58,1	58,1	58,6	58,4	58,3
50	99,7	99,6	99,8	99,4	99,6	58,4	58,4	58,3	58,5	58,4
51	99,6	99,4	99,5	99,6	99,5	58,7	58,2	58,8	58,7	58,6

Tabulka 11. 11 – Rozměry vzorků – směs SMA 11 S

	Průměr – měření				Průměr	Výška – měření				Výška
Vzorek	1	2	3	4		1	2	3	4	
61	101,6	101,2	101,7	101,5	101,5	69,0	69,3	68,2	67,8	68,6
62	101,1	101,0	100,9	101,6	101,2	70,1	69,3	69,8	70,2	69,9
63	101,2	101,0	101,3	101,5	101,3	65,9	67,8	68,4	67,0	67,3
64	101,6	101,5	101,6	101,5	101,6	70,2	70,6	70,4	70,8	70,5
65	101,6	101,3	101,1	101,3	101,3	63,5	63,5	63,5	63,9	63,6
66	101,3	101,5	101,7	101,4	101,5	64,2	64,0	64,0	64,6	64,2
67	101,1	101,3	101,5	101,2	101,3	62,5	62,6	62,8	63,0	62,7
68	101,6	101,9	101,9	101,8	101,8	60,5	61,0	61,2	61,2	61,0
69	101,8	101,8	101,8	101,3	101,7	60,6	60,3	61,0	61,5	60,9
70	101,6	101,2	101,6	101,2	101,4	61,3	61,0	61,6	61,2	61,3
71	101,5	101,2	101,3	101,5	101,4	56,1	56,1	56,7	56,6	56,4
72	102,9	103,1	102,9	102,6	102,9	61,9	61,9	62,5	63,0	62,3
73	101,5	101,6	101,5	101,3	101,5	60,2	59,9	60,8	60,1	60,3
74	103,0	103,3	103,1	103,1	103,1	61,0	60,4	60,2	60,2	60,5
75	102,1	101,1	101,7	101,2	101,5	60,3	59,6	59,6	60,5	60,0
76	101,6	101,5	102,0	100,9	101,5	55,1	55,2	55,3	55,4	55,3
77	102,0	102,2	102,1	101,9	102,1	57,0	56,6	57,7	57,3	57,2
78	101,5	101,7	101,6	101,6	101,6	53,9	53,9	53,8	53,5	53,8
79	99,8	99,5	99,6	99,8	99,7	63,3	63,1	63,0	63,0	63,1
80	99,6	99,2	99,5	99,6	99,5	58,3	58,1	58,2	58,4	58,3
81	99,6	99,5	99,2	99,3	99,4	60,7	60,4	60,4	60,4	60,5

Tabulka 11. 12 – Objemová hmotnost stanovená z rozměrů – směs ACO 11 S

Vzorek	Způsob hutnění	Průměr [mm]	Výška [mm]	Hmotnost m_1 [g]	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Průměrná objemová hmotnost [kg/m^3]
1	Gyrátor	99,7	58,7	1048,4	2290,05	2280,55
2		99,7	59,5	1048,3	2257,73	
3		99,7	58,5	1046,2	2293,87	
4	2x5	101,6	65,3	1041,7	1966,92	1945,65
5		102,1	65,4	1047,3	1956,46	
6		101,7	67,3	1045,5	1913,57	
7	2x15	101,6	61,6	1050,5	2103,48	2126,97
8		103,0	58,6	1039,8	2127,61	
9		101,4	60,3	1046,5	2149,82	
10	2x25	101,5	58,7	1045,2	2200,74	2212,08
11		102,1	57,7	1048,1	2219,47	
12		102,2	57,6	1047,1	2216,02	
13	2x35	101,7	56,9	1045,6	2261,04	2271,44
14		101,5	54,6	1008,3	2283,28	
15		101,7	56,9	1048,3	2269,99	
16	2x50	101,7	55,0	1042,6	2335,79	2336,95
17		101,8	54,8	1043,5	2339,44	
18		101,6	55,5	1050,5	2335,63	
19	2x100	103,1	52,7	1044,3	2371,33	2390,77
20		101,6	53,7	1045,6	2403,91	
21		101,4	54,0	1043,3	2397,07	

Tabulka 11. 13 – Objemová hmotnost stanovená z rozměrů – směs ACO 11 +

Vzorek	Způsob hutnění	Průměr [mm]	Výška [mm]	Hmotnost m_1 [g]	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Průměrná objemová hmotnost [kg/m^3]
49	Gyrátor	99,6	58,3	1044,7	2299,93	2289,53
50		99,6	58,4	1041,2	2287,15	
51		99,5	58,6	1040,1	2281,52	
31	2x5	102,8	65,1	1049,0	1941,42	1940,97
32		101,1	67,7	1047,7	1927,53	
33		101,4	66,1	1043,0	1953,97	
34	2x15	102,0	61,6	1044,6	2074,28	2094,93
35		101,6	61,5	1044,4	2094,67	
36		101,6	60,5	1037,3	2115,85	
37	2x25	102,0	58,3	1043,9	2194,38	2201,42
38		101,4	59,2	1048,2	2194,60	
39		101,7	58,2	1048,3	2215,29	
40	2x35	101,5	58,6	1063,9	2243,64	2238,01
41		101,5	57,8	1049,4	2245,78	
42		103,0	55,9	1035,2	2224,61	
43	2x50	101,5	56,7	1038,6	2266,94	2270,32
44		101,9	56,6	1048,5	2274,63	
45		101,6	57,2	1052,4	2269,38	
46	2x100	101,6	55,5	1040,8	2311,98	2320,53
47		102,2	54,9	1047,3	2325,53	
48		102,1	54,8	1042,7	2324,09	

Tabulka 11. 14 – Objemová hmotnost stanovená z rozměrů – směs SMA 11 S

Vzorek	Způsob hutnění	Průměr [mm]	Výška [mm]	Hmotnost m_1 [g]	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Průměrná objemová hmotnost [kg/m^3]
79	Gyrátor	99,7	63,1	1034,5	2101,06	2206,22
80		99,5	58,3	1038,8	2294,66	
81		99,4	60,5	1043,2	2222,95	
61	2x5	101,5	68,6	1026,5	1850,00	1849,69
62		101,2	69,9	1033,7	1841,65	
63		101,3	67,3	1006,1	1857,41	
64	2x15	101,6	70,5	1136,5	1990,36	1972,44
65		101,3	63,6	998,8	1947,60	
66		101,5	64,2	1027,7	1979,36	
67	2x25	101,3	62,7	1033,8	2045,98	2013,84
68		101,8	61,0	992,5	1999,83	
69		101,7	60,9	986,0	1995,71	
70	2x35	101,4	61,3	1019,0	2059,33	2048,14
71		101,4	56,4	929,8	2043,39	
72		102,9	62,3	1057,7	2041,70	
73	2x50	101,5	60,3	993,9	2039,75	2072,85
74		103,1	60,5	1057,0	2093,44	
75		101,5	60,0	1012,9	2085,35	
76	2x100	101,5	55,3	975,1	2181,20	2214,67
77		102,1	57,2	1021,0	2184,21	
78		101,6	53,8	993,4	2278,59	

Tabulka 11. 15 – Objemová hmotnost stanovená z hmotnosti – směs ACO 11 S

Vzorek	Způsob hutnění	Hmotnost m_1 [g]	Hmotnost m_2 [g]	Hmotnost m_3 [g]	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Průměrná objemová hmotnost [kg/m^3]
1	Gyrátor	1048,4	612,8	1055,0	2368,03	2360,69
2		1048,3	612,2	1059,4	2341,33	
3		1046,2	611,2	1051,6	2372,72	
4	2x5	1041,7	589,5	1072,7	2153,25	2180,62
5		1047,3	601,2	1078,4	2192,04	
6		1045,5	603,2	1078,6	2196,56	
7	2x15	1050,5	603,6	1070,9	2245,32	2247,79
8		1039,8	593,9	1052,5	2264,61	
9		1046,5	597,2	1065,2	2233,43	
10	2x25	1045,2	596,0	1053,2	2283,35	2297,77
11		1048,1	599,3	1053,7	2303,79	
12		1047,1	601,3	1054,8	2306,16	
13	2x35	1045,6	602,3	1049,0	2337,91	2338,85
14		1008,3	581,4	1011,6	2340,98	
15		1048,3	604,3	1052,2	2337,67	
16	2x50	1042,6	608,1	1045,3	2381,86	2383,66
17		1043,5	608,9	1045,3	2388,29	
18		1050,5	611,9	1052,6	2380,85	
19	2x100	1044,3	614,4	1045,8	2417,82	2421,23
20		1045,6	616,5	1047,3	2424,20	
21		1043,3	615,3	1045,6	2421,68	

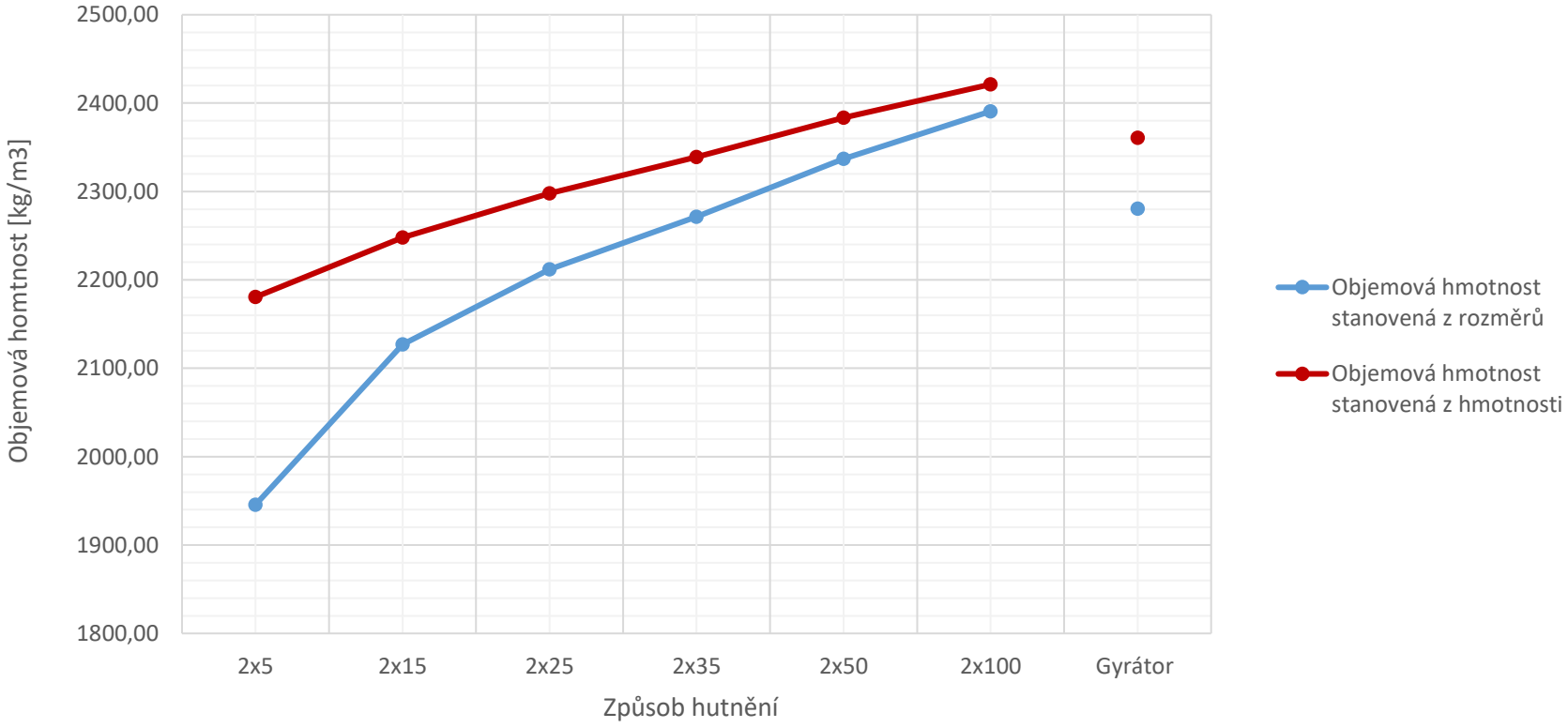
Tabulka 11. 16 – Objemová hmotnost stanovená z hmotnosti – směs ACO 11 +

Vzorek	Způsob hutnění	Hmotnost m_1 [g]	Hmotnost m_2 [g]	Hmotnost m_3 [g]	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Průměrná objemová hmotnost [kg/m^3]
49	Gyrátor	1044,7	605,1	1048,7	2347,51	2331,49
50		1041,2	601,3	1047,9	2323,93	
51		1040,1	603,1	1049,4	2323,04	
31	2x5	1049,0	596,1	1080,5	2158,64	2158,98
32		1047,7	597,0	1079,3	2165,35	
33		1043,0	591,5	1074,4	2152,96	
34	2x15	1044,6	586,0	1057,9	2206,52	2233,14
35		1044,4	592,0	1059,7	2225,91	
36		1037,3	590,5	1046,6	2267,00	
37	2x25	1043,9	591,0	1049,3	2270,48	2281,13
38		1048,2	596,0	1054,9	2276,85	
39		1048,3	597,3	1052,4	2296,08	
40	2x35	1063,9	609,5	1068,6	2309,94	2309,01
41		1049,4	602,1	1055,0	2309,65	
42		1035,2	592,8	1040,0	2307,44	
43	2x50	1038,6	601,7	1042,4	2349,16	2350,36
44		1048,5	609,6	1052,3	2360,84	
45		1052,4	607,5	1055,6	2341,07	
46	2x100	1040,8	606,1	1049,1	2341,92	2363,41
47		1047,3	610,2	1050,3	2372,07	
48		1042,7	607,8	1045,2	2376,23	

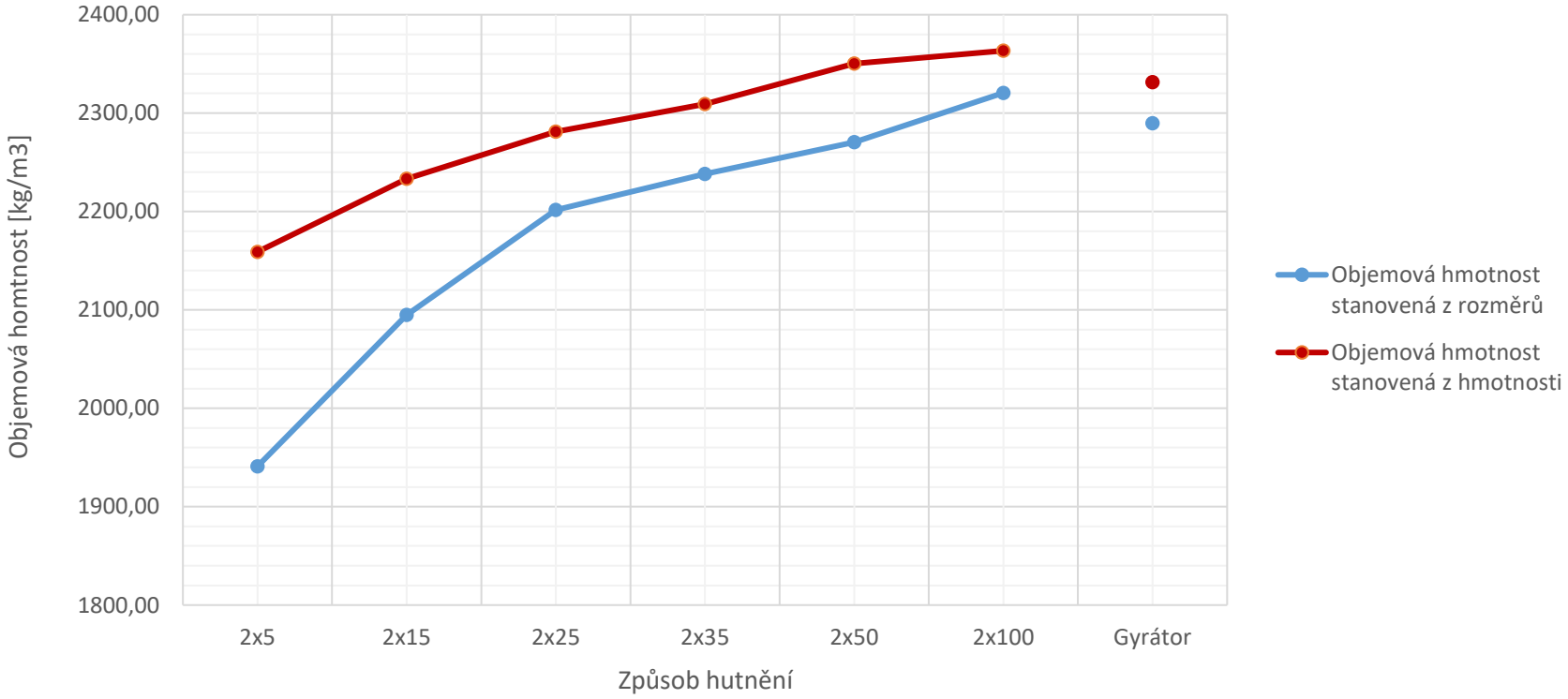
Tabulka 11. 17 – Objemová hmotnost stanovená z hmotnosti – směs SMA 11 S

Vzorek	Způsob hutnění	Hmotnost m_1 [g]	Hmotnost m_2 [g]	Hmotnost m_3 [g]	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Průměrná objemová hmotnost [kg/m^3]
79	Gyrátor	1034,5	600,4	1048,2	2307,87	2346,27
80		1038,8	606,2	1043,5	2373,11	
81		1043,2	608,7	1050,7	2357,82	
61	2x5	1026,5	578,8	1046,6	2192,12	2201,94
62		1033,7	581,0	1053,7	2184,61	
63		1006,1	572,9	1023,8	2229,08	
64	2x15	1136,5	645,0	1152,6	2236,73	2233,89
65		998,8	567,9	1016,1	2226,24	
66		1027,7	583,7	1042,3	2238,71	
67	2x25	1033,8	588,4	1041,5	2279,33	2255,95
68		992,5	560,5	1002,1	2245,26	
69		986,0	558,7	997,8	2243,26	
70	2x35	1019,0	578,2	1021,4	2296,89	2274,96
71		929,8	527,4	938,4	2260,02	
72		1057,7	607,3	1073,2	2267,96	
73	2x50	993,9	568,7	1008,0	2260,20	2276,23
74		1057,0	605,5	1066,1	2292,54	
75		1012,9	580,3	1024,9	2275,95	
76	2x100	975,1	565,5	980,5	2347,29	2347,72
77		1021,0	588,7	1026,0	2332,45	
78		993,4	577,1	997,0	2363,44	

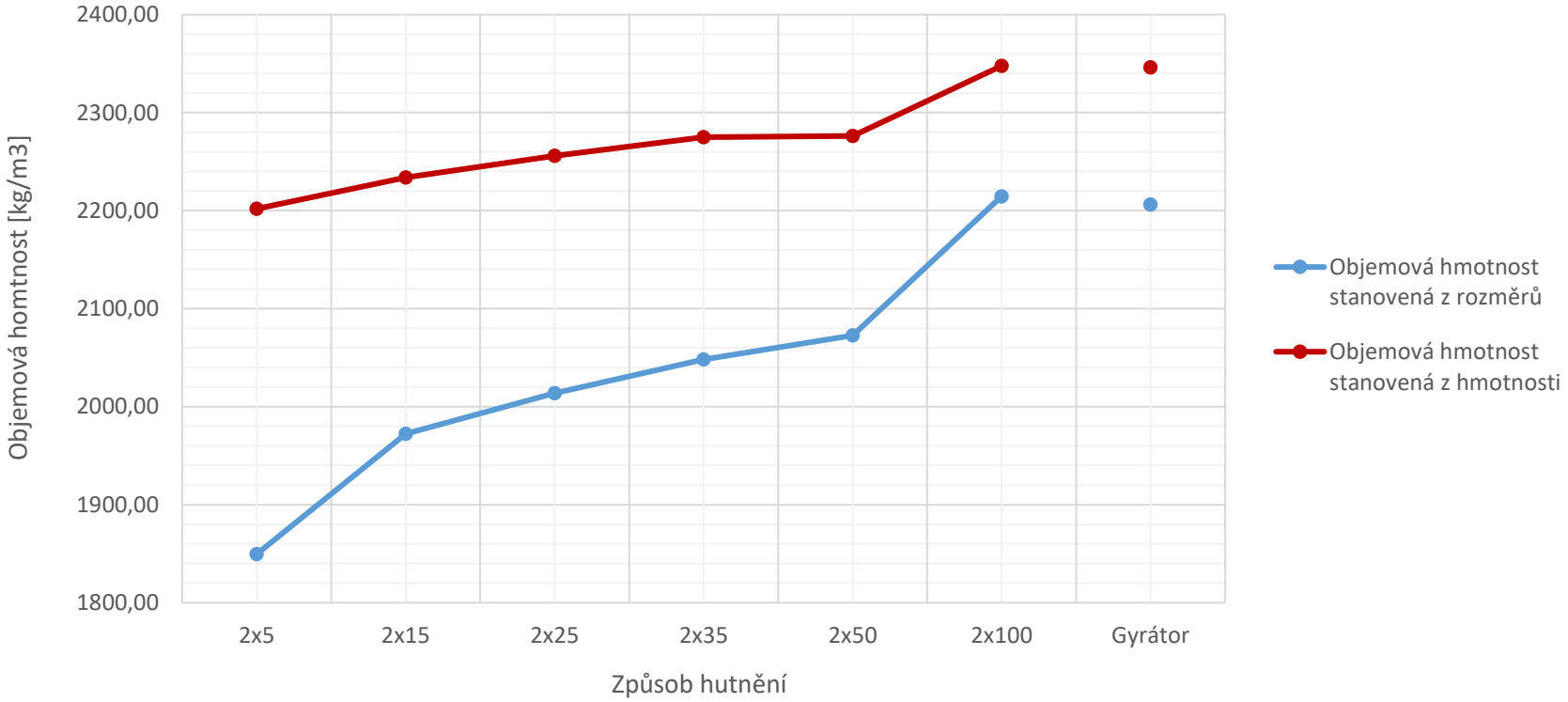
Tabulka 11. 18 – Srovnání objemových hmotnosti – směs ACO 11 S



Tabulka 11. 19 – Srovnání objemových hmotnosti – směs ACO 11 +



Tabulka 11. 20 – Srovnání objemových hmotnosti – směs SMA 11 S



Tabulka 11. 21 – Stanovení mezerovitostí – směs ACO 11 S

Vzorek	Způsob hutnění	Objemová hmotnost			Mezerovitost	
		Z rozměrů [kg/m3]	Z hmotností [kg/m3]	Maximální [kg/m3]	Z rozměrů [%]	Z hmotností [%]
1	Gyrátor	2280,55	2360,69	2457,97	7,22	3,96
2						
3						
4	2x5 úderů	1945,65	2180,62		20,84	11,28
5						
6						
7	2x15 úderů	2126,97	2247,79		13,47	8,55
8						
9						
10	2x25 úderů	2212,08	2297,77		10,00	6,52
11						
12						
13	2x35 úderů	2271,44	2338,85		7,59	4,85
14						
15						
16	2x50 úderů	2336,95	2383,66		4,92	3,02
17						
18						
19	2x100 úderů	2390,77	2421,23		2,73	1,49
20						
21						

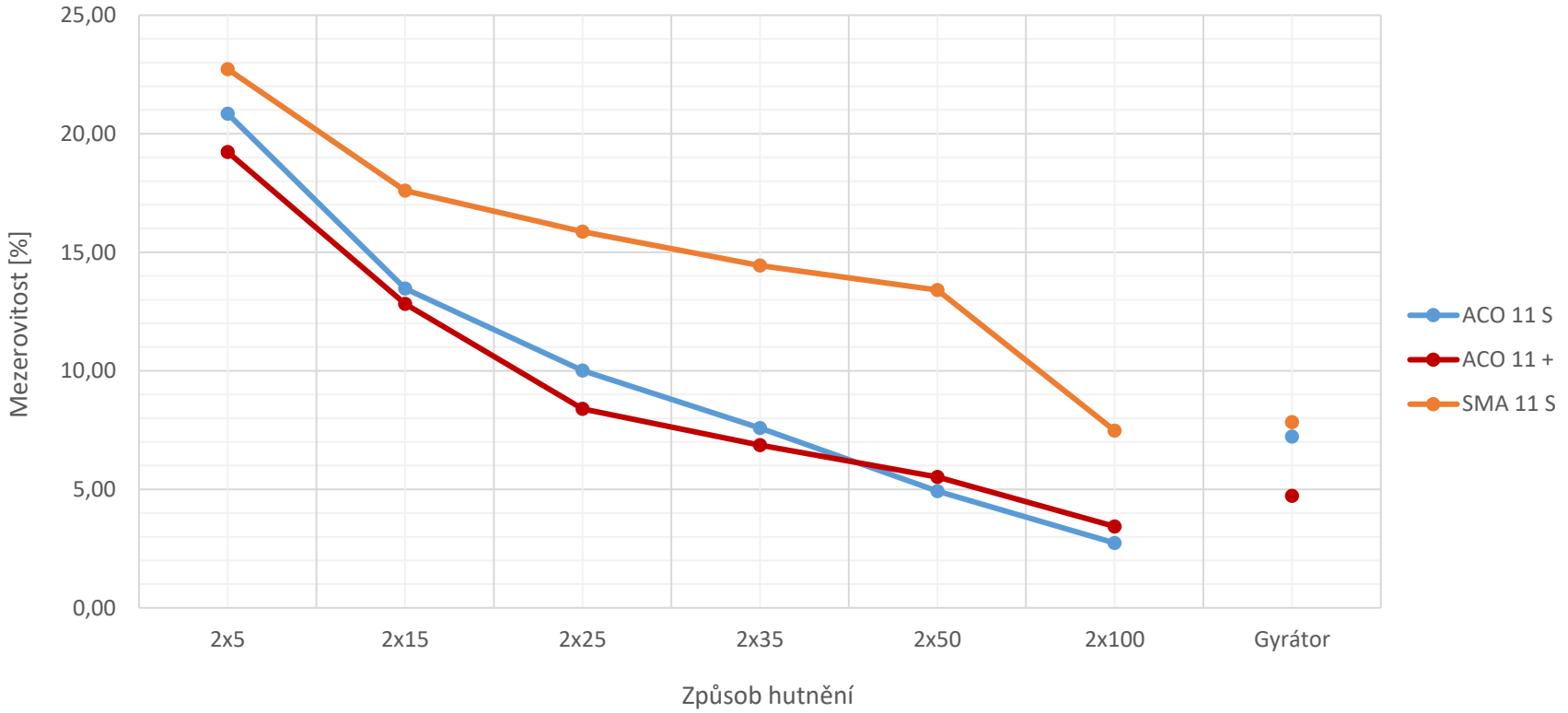
Tabulka 11. 22 – Stanovení mezerovitostí – směs ACO 11 +

Vzorek	Způsob hutnění	Objemová hmotnost			Mezerovitost	
		Z rozměrů [kg/m3]	Z hmotností [kg/m3]	Maximální [kg/m3]	Z rozměrů [%]	Z hmotností [%]
49	Gyrátor	2289,53	2331,49	2403,05	4,72	2,98
50						
51						
31	2x5 úderů	1940,97	2158,98		19,23	10,16
32						
33						
34	2x15 úderů	2094,93	2233,14		12,82	7,07
35						
36						
37	2x25 úderů	2201,42	2281,13		8,39	5,07
38						
39						
40	2x35 úderů	2238,01	2309,01		6,87	3,91
41						
42						
43	2x50 úderů	2270,32	2350,36		5,52	2,19
44						
45						
46	2x100 úderů	2320,53	2363,41		3,43	1,65
47						
48						

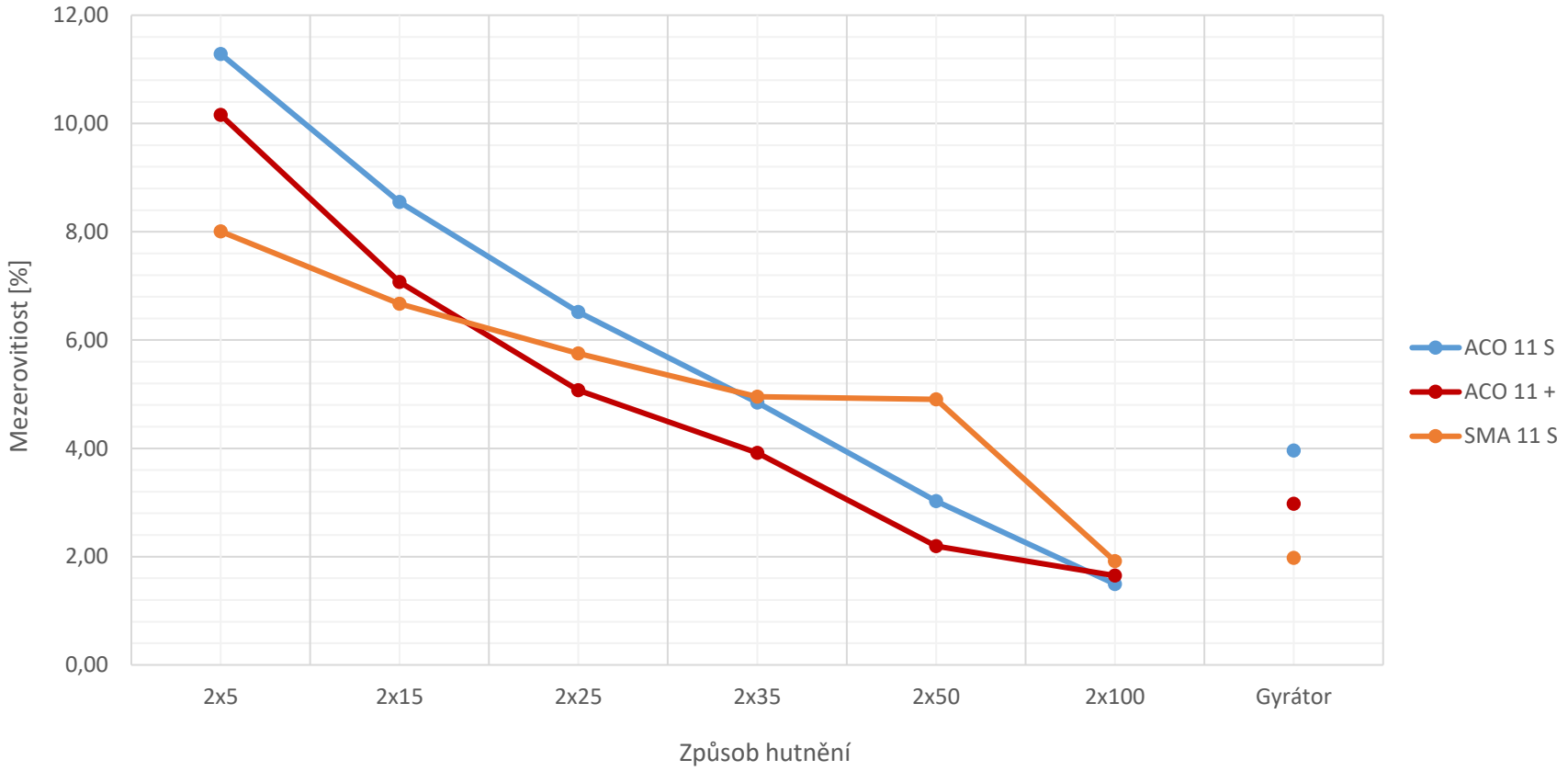
Tabulka 11. 23 – Stanovení mezerovitostí – směs SMA 11 S

Vzorek	Způsob hutnění	Objemová hmotnost			Mezerovitost	
		Z rozměrů [kg/m3]	Z hmotností [kg/m3]	Maximální [kg/m3]	Z rozměrů [%]	Z hmotností [%]
79	Gyrátor	2206,22	2346,27	2393,58	7,83	1,98
80						
81						
61	2x5 úderů	1849,69	2201,94		22,72	8,01
62						
63						
64	2x15 úderů	1972,44	2233,89		17,59	6,67
65						
66						
67	2x25 úderů	2013,84	2255,95		15,86	5,75
68						
69						
70	2x35 úderů	2048,14	2274,96		14,43	4,96
71						
72						
73	2x50 úderů	2072,85	2276,23		13,40	4,90
74						
75						
76	2x100 úderů	2214,67	2347,72		7,47	1,92
77						
78						

Tabulka 11. 24 – Porovnání mezerovitostí stanovených z rozměrů



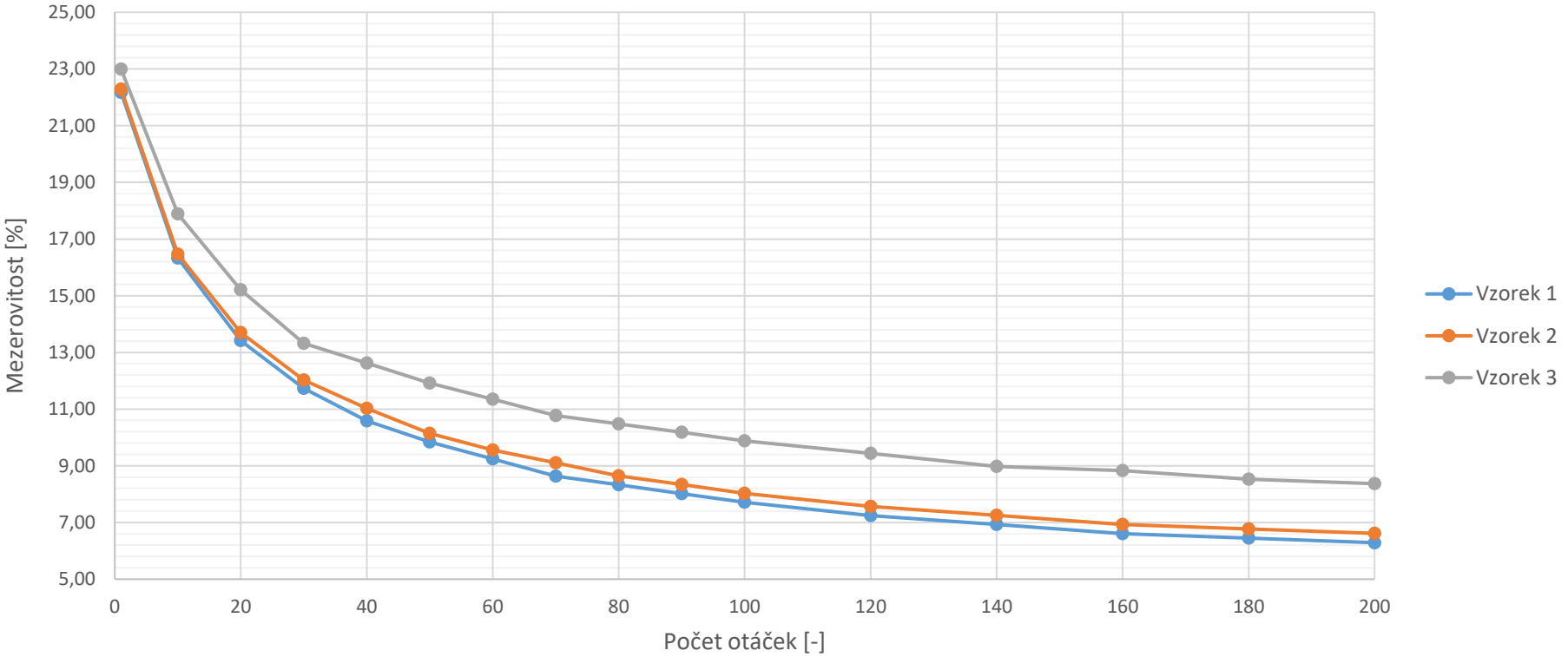
Tabulka 11. 25 – Porovnání mezerovitostí stanovených z hmotností



Tabulka 11. 26 – Průběh hutnění gyrátorem – směs ACO 11 S

Počet otáček	Výška 1	Objem. Hmotnost	Mezerovitost	Výška 2	Objem. Hmotnost	Mezerovitost	Výška 3	Objem. Hmotnost	Mezerovitost
	[mm]	[kg/m3]	[%]	[mm]	[kg/m3]	[%]	[mm]	[kg/m3]	[%]
1	70,2	1913,0	22,17	70,3	1910,1	22,29	70,8	1892,8	22,99
10	65,3	2056,5	16,33	65,4	2053,2	16,47	66,4	2018,2	17,89
20	63,1	2128,2	13,42	63,3	2121,3	13,70	64,3	2084,1	15,21
30	61,9	2169,5	11,74	62,1	2162,3	12,03	62,9	2130,5	13,32
40	61,1	2197,9	10,58	61,4	2186,9	11,03	62,4	2147,6	12,63
50	60,6	2216,0	9,84	60,8	2208,5	10,15	61,9	2164,9	11,92
60	60,2	2230,7	9,24	60,4	2223,2	9,55	61,5	2179,0	11,35
70	59,8	2245,7	8,64	60,1	2234,2	9,10	61,1	2193,3	10,77
80	59,6	2253,2	8,33	59,8	2245,5	8,65	60,9	2200,5	10,48
90	59,4	2260,8	8,02	59,6	2253,0	8,34	60,7	2207,7	10,18
100	59,2	2268,4	7,71	59,4	2260,6	8,03	60,5	2215,0	9,88
120	58,9	2280,0	7,24	59,1	2272,1	7,56	60,2	2226,1	9,43
140	58,7	2287,8	6,93	58,9	2279,8	7,25	59,9	2237,2	8,98
160	58,5	2295,6	6,61	58,7	2287,5	6,93	59,8	2241,0	8,83
180	58,4	2299,5	6,45	58,6	2291,4	6,78	59,6	2248,5	8,52
200	58,3	2303,4	6,29	58,5	2295,4	6,62	59,5	2252,3	8,37

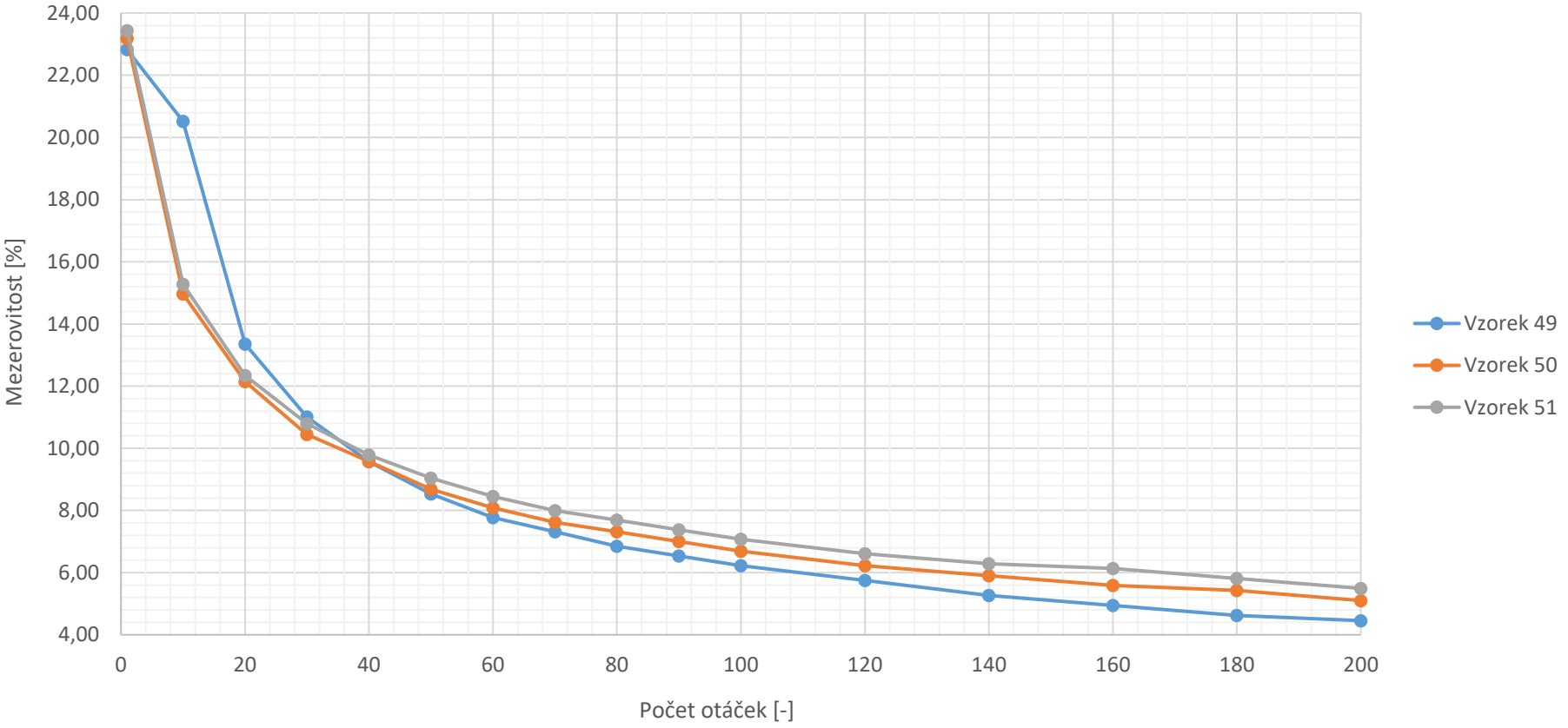
Tabulka 11. 27 – Průběh zhutňování gyrátorem – směs ACO 11 S



Tabulka 11. 28 – Průběh hutnění gyrátorem – směs ACO 11 +

Počet otáček	Výška 49	Objem. Hmotnost	Mezerovitost	Výška 50	Objem. Hmotnost	Mezerovitost	Výška 51	Objem. Hmotnost	Mezerovitost
	[mm]	[kg/m3]	[%]	[mm]	[kg/m3]	[%]	[mm]	[kg/m3]	[%]
1	72,3	1854,6	22,82	72,4	1845,8	23,19	72,7	1839,9	23,43
10	70,2	1910,1	20,52	65,4	2043,4	14,97	65,7	2036,0	15,28
20	64,4	2082,1	13,36	63,3	2111,2	12,15	63,5	2106,5	12,34
30	62,7	2138,5	11,01	62,1	2152,0	10,45	62,4	2143,7	10,79
40	61,7	2173,2	9,57	61,5	2173,0	9,58	61,7	2168,0	9,78
50	61,0	2198,1	8,53	60,9	2194,4	8,68	61,2	2185,7	9,05
60	60,5	2216,3	7,77	60,5	2208,9	8,08	60,8	2200,1	8,45
70	60,2	2227,3	7,31	60,2	2219,9	7,62	60,5	2211,0	7,99
80	59,9	2238,5	6,85	60,0	2227,3	7,31	60,3	2218,3	7,69
90	59,7	2246,0	6,54	59,8	2234,7	7,00	60,1	2225,7	7,38
100	59,5	2253,5	6,22	59,6	2242,2	6,69	59,9	2233,1	7,07
120	59,2	2265,0	5,75	59,3	2253,6	6,22	59,6	2244,4	6,60
140	58,9	2276,5	5,27	59,1	2261,2	5,90	59,4	2251,9	6,29
160	58,7	2284,3	4,94	58,9	2268,9	5,58	59,3	2255,7	6,13
180	58,5	2292,1	4,62	58,8	2272,7	5,42	59,1	2263,4	5,81
200	58,4	2296,0	4,46	58,6	2280,5	5,10	58,9	2271,0	5,49

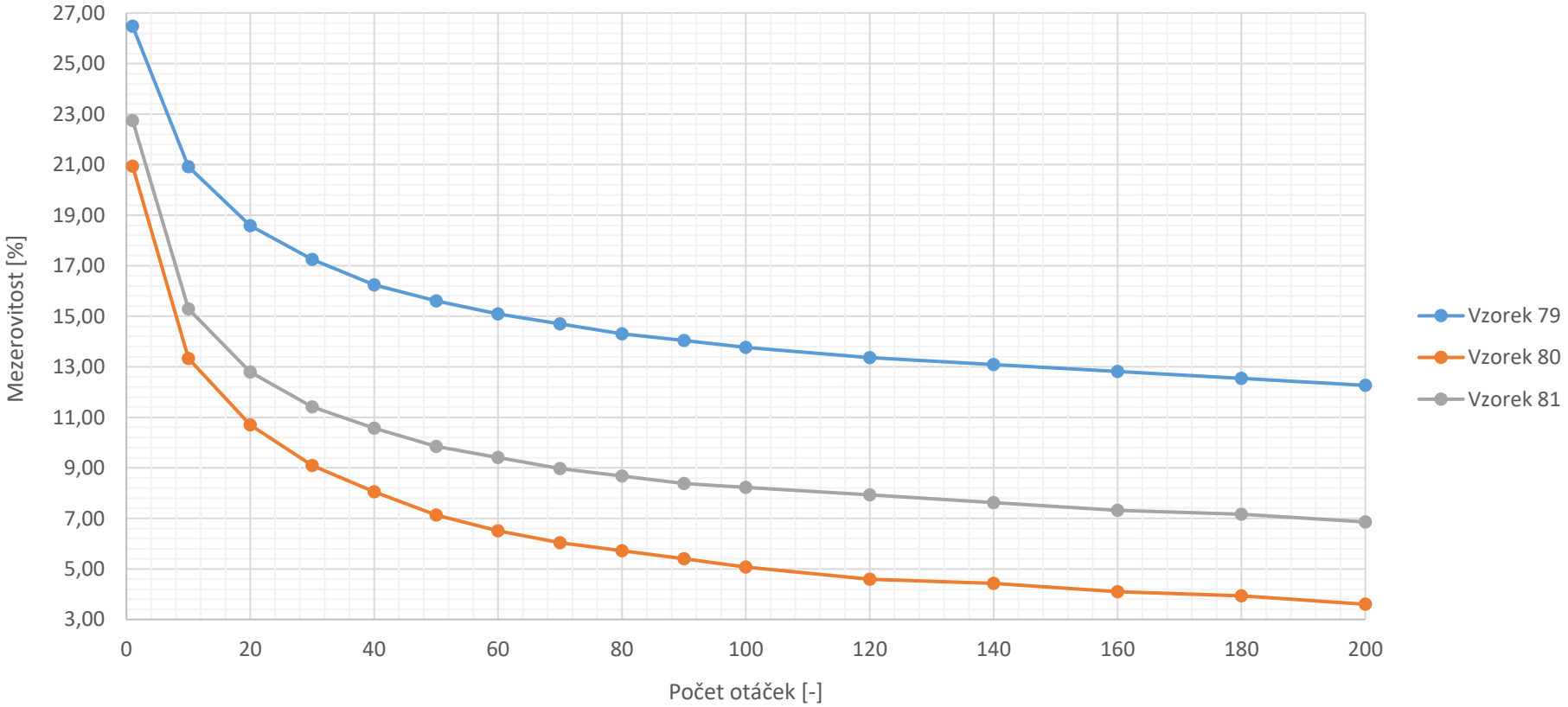
Tabulka 11. 29 – Průběh zhutňování gyrátorem – směs ACO 11 +



Tabulka 11. 30 – Průběh hutnění gyrátorem – směs SMA 11 S

Počet otáček	Výška 79	Objem. Hmotnost	Mezerovitost	Výška 80	Objem. Hmotnost	Mezerovitost	Výška 81	Objem. Hmotnost	Mezerovitost
	[mm]	[kg/m3]	[%]	[mm]	[kg/m3]	[%]	[mm]	[kg/m3]	[%]
1	75,3	1759,8	26,48	70,6	1892,3	20,94	72,7	1849,1	22,75
10	70,0	1893,0	20,91	64,4	2074,5	13,33	66,3	2027,6	15,29
20	68,0	1948,7	18,59	62,5	2137,5	10,70	64,4	2087,5	12,79
30	66,9	1980,7	17,25	61,4	2175,8	9,10	63,4	2120,4	11,41
40	66,1	2004,7	16,25	60,7	2200,9	8,05	62,8	2140,6	10,57
50	65,6	2020,0	15,61	60,1	2222,9	7,13	62,3	2157,8	9,85
60	65,2	2032,4	15,09	59,7	2237,8	6,51	62,0	2168,3	9,41
70	64,9	2041,8	14,70	59,4	2249,1	6,04	61,7	2178,8	8,97
80	64,6	2051,2	14,30	59,2	2256,7	5,72	61,5	2185,9	8,68
90	64,4	2057,6	14,04	59,0	2264,4	5,40	61,3	2193,0	8,38
100	64,2	2064,0	13,77	58,8	2272,1	5,08	61,2	2196,6	8,23
120	63,9	2073,7	13,36	58,5	2283,7	4,59	61,0	2203,8	7,93
140	63,7	2080,2	13,09	58,4	2287,6	4,43	60,8	2211,1	7,63
160	63,5	2086,8	12,82	58,2	2295,5	4,10	60,6	2218,4	7,32
180	63,3	2093,4	12,54	58,1	2299,4	3,93	60,5	2222,0	7,17
200	63,1	2100,0	12,26	57,9	2307,4	3,60	60,3	2229,4	6,86

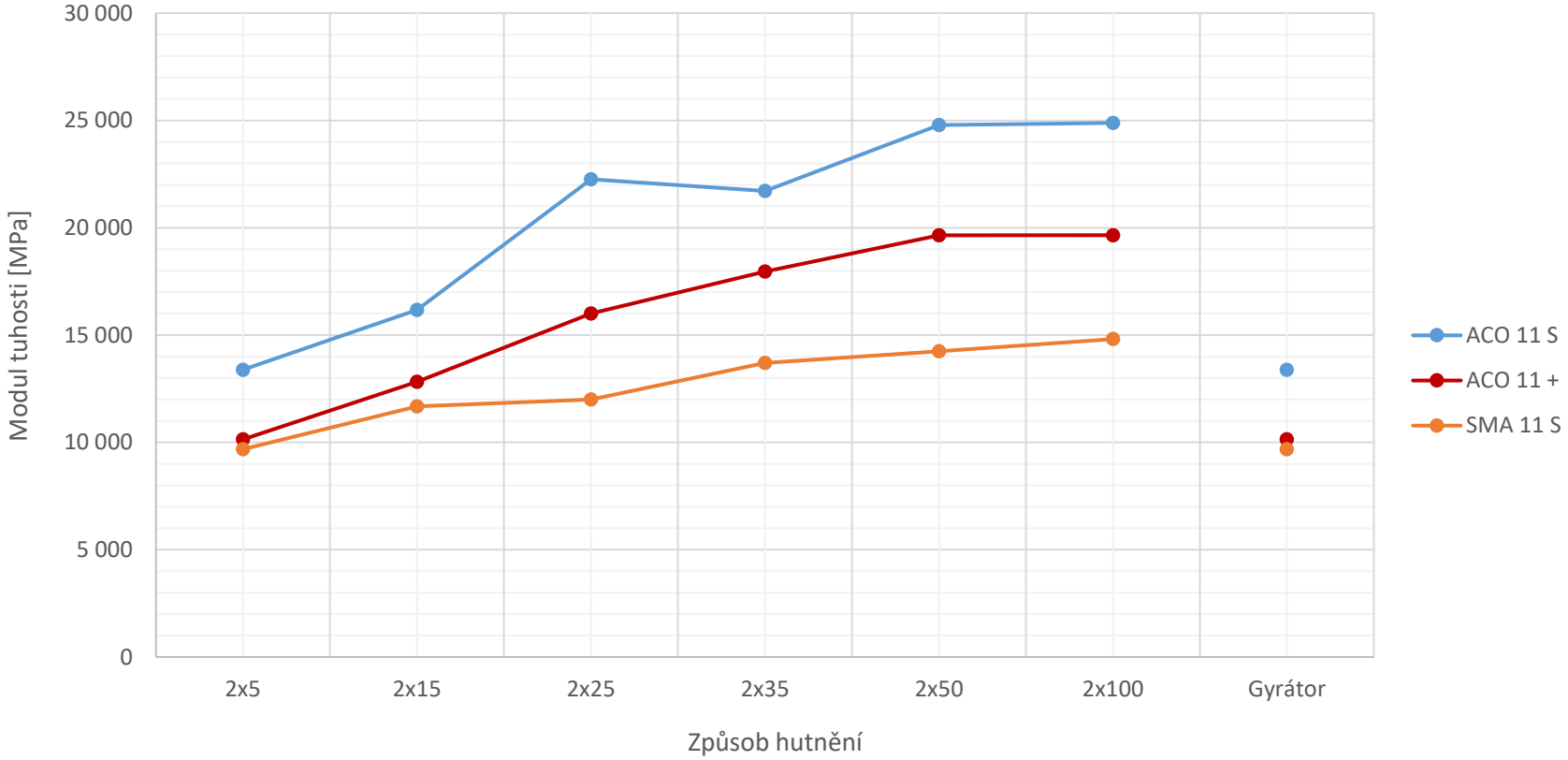
Tabulka 11. 31 – Průběh zhutňování gyrátorem – směs SMA 11 S



Tabulka 11. 32 – Moduly tuhosti při teplotě 0 °C

ACO 11 S					**ACO 11 +**					**SMA 11 S**				
Způsob hutnění	Tuhost – měření [MPa]			Tuhost [MPa]	Způsob hutnění	Tuhost – měření [MPa]			Tuhost [MPa]	Způsob hutnění	Tuhost – měření [MPa]			Tuhost [MPa]
	1	2	Průměr			1	2	Průměr			1	2	Průměr	
Gyrátor	20 241	19 661	19 951	19 448	Gyrátor	18 306	18 194	18 250	17 421	Gyrátor	12 362	11 236	11 799	13 963
	18 763	17 626	18 195			16 736	16 551	16 644			16 277	15 204	15 741	
	19 074	21 322	20 198			16 853	17 883	17 368			14 166	14 531	14 349	
2x5	14 618	12 350	13 484	13 386	2x5	8 771	8 625	8 698	10 140	2x5	8 733	8 670	8 702	9 682
	12 803	12 395	12 599			9 280	10 824	10 052			10 027	9 067	9 547	
	13 263	14 889	14 076			12 197	11 141	11 669			10 891	10 703	10 797	
2x15	14 002	15 330	14 666	16 171	2x15	12 860	12 295	12 578	12 821	2x15	12 075	11 695	11 885	11 672
	17 328	16 914	17 121			12 227	12 319	12 273			9 895	10 155	10 025	
	16 677	16 775	16 726			13 658	13 569	13 614			12 554	13 659	13 107	
2x25	20 123	20 656	20 390	22 256	2x25	16 132	15 057	15 595	16 000	2x25	12 760	13 693	13 227	11 995
	21 766	24 087	22 927			16 016	15 707	15 862			11 271	10 750	11 011	
	22 359	24 544	23 452			16 110	16 976	16 543			11 771	11 722	11 747	
2x35	21 537	23 025	22 281	21 719	2x35	19 284	18 302	18 793	17 955	2x35	15 052	14 685	14 869	13 700
	21 717	22 999	22 358			17 457	17 173	17 315			12 659	13 092	12 876	
	20 133	20 904	20 519			17 920	17 595	17 758			12 617	14 092	13 355	
2x50	23 661	23 072	23 367	24 780	2x50	19 487	19 044	19 266	19 649	2x50	14 522	13 412	13 967	14 249
	24 933	25 555	25 244			20 874	21 803	21 339			15 061	16 549	15 805	
	25 650	25 811	25 731			18 394	18 289	18 342			12 560	13 387	12 974	
2x100	25 863	24 562	25 213	24 884	2x100	19 408	19 241	19 325	19 654	2x100	12 362	11 236	11 799	14 813
	23 535	24 037	23 786			19 929	19 945	19 937			16 277	15 204	15 741	
	25 841	25 468	25 655			19 626	19 777	19 702			16 510	17 287	16 899	

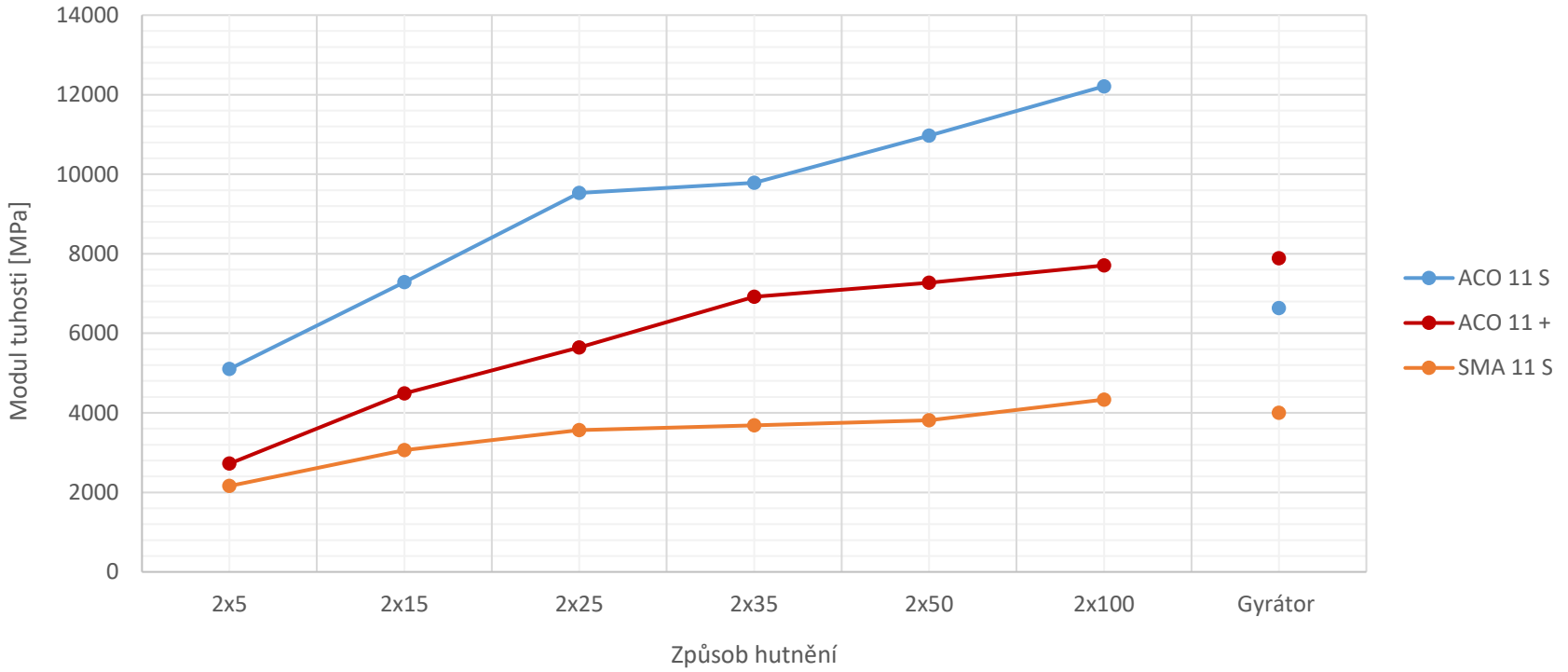
Tabulka 11. 33 – Porovnání modulů tuhosti při teplotě 0 °C



Tabulka 11. 34 - Moduly tuhosti při teplotě 15 °C

ACO 11 S					**ACO 11 +**					**SMA 11 S**				
Způsob hutnění	Tuhost – měření [MPa]			Tuhost [MPa]	Způsob hutnění	Tuhost – měření [MPa]			Tuhost [MPa]	Způsob hutnění	Tuhost – měření [MPa]			Tuhost [MPa]
	1	2	Průměr			1	2	Průměr			1	2	Průměr	
Gyrátor	7 088	7 080	7 084	6636	Gyrátor	7 482	7 305	7 394	7 889	Gyrátor	3 262	3 265	3 264	3 998
	6 449	6 419	6 434			7 789	7 249	7 519			4 348	4 341	4 345	
	6 465	6 312	6 389			8 868	8 642	8 755			4 313	4 460	4 387	
2x5	5 147	5 383	5 265	5102	2x5	2 652	2 645	2 649	2 722	2x5	2 134	2 398	2 266	2 160
	5 082	5 171	5 127			2 654	2 414	2 534			1 942	1 958	1 950	
	5 198	4 632	4 915			3 078	2 889	2 984			2 243	2 283	2 263	
2x15	6 427	6 669	6 548	7288	2x15	4 226	4 088	4 157	4 486	2x15	3 108	2 941	3 025	3 062
	8 027	8 047	8 037			4 343	4 481	4 412			2 843	2 848	2 846	
	7 388	7 167	7 278			5 083	4 693	4 888			3 559	3 072	3 316	
2x25	8 836	8 881	8 859	9531	2x25	5 925	5 278	5 602	5 642	2x25	3 953	3 365	3 659	3 569
	10 331	9 613	9 972			5 945	5 757	5 851			3 181	3 071	3 126	
	9 794	9 733	9 764			5 920	5 029	5 475			3 966	3 877	3 922	
2x35	10 455	9 722	10 089	9785	2x35	6 974	6 730	6 852	6 921	2x35	3 431	3 552	3 492	3 688
	9 356	9 400	9 378			6 865	6 367	6 616			3 677	3 367	3 522	
	9 608	10 167	9 888			7 559	7 030	7 295			4 271	3 831	4 051	
2x50	10 712	11 188	10 950	10969	2x50	7 457	8 378	7 918	7 272	2x50	4 656	3 581	4 119	3 817
	10 390	10 006	10 198			7 487	7 495	7 491			3 500	3 439	3 470	
	11 839	11 677	11 758			6 405	6 407	6 406			4 075	3 648	3 862	
2x100	11 728	11 791	11 760	12211	2x100	6 924	6 882	6 903	7 707	2x100	4 617	4 606	4 612	4 334
	12 356	12 162	12 259			8 124	8 255	8 190			3 956	4 254	4 105	
	12 795	12 436	12 616			7 845	8 210	8 028			4 481	4 088	4 285	

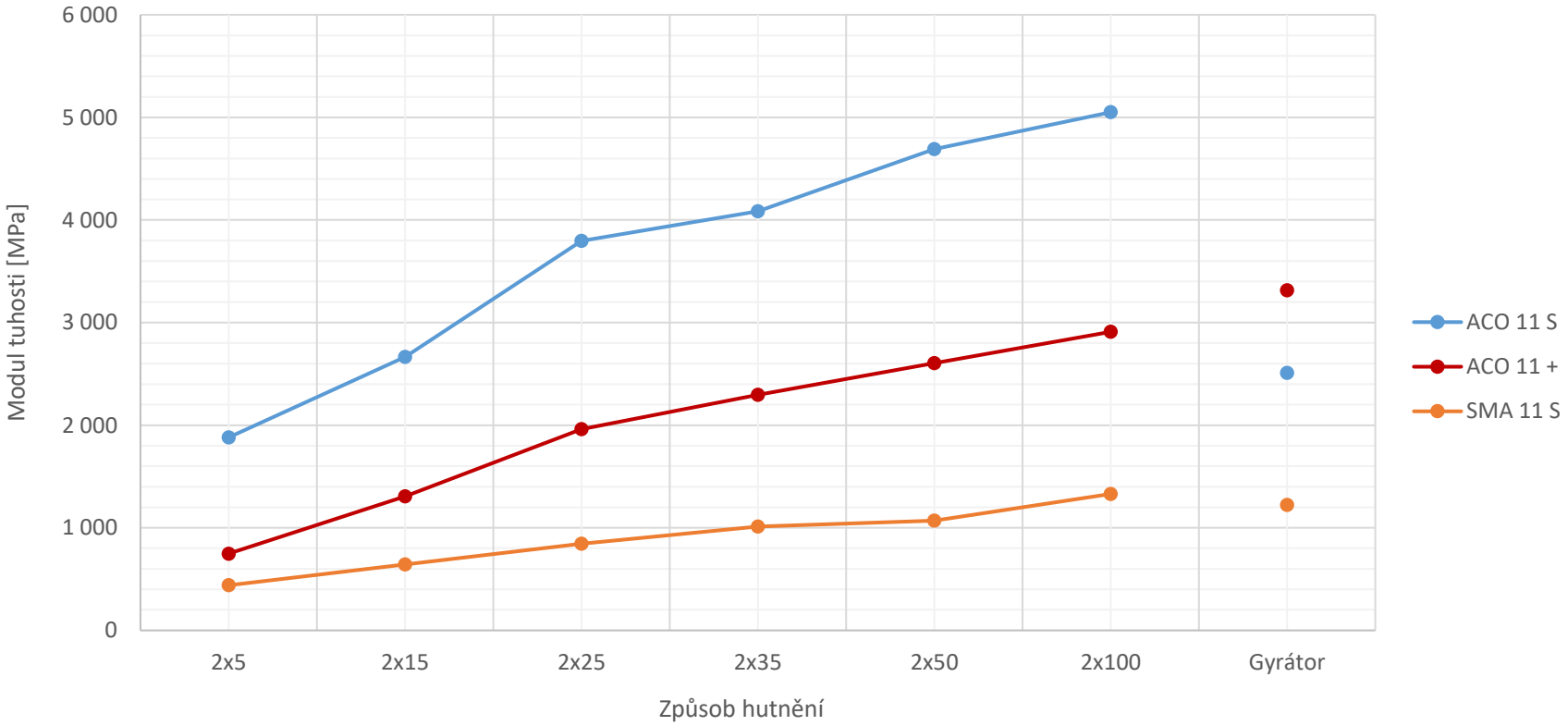
Tabulka 11. 35 – Porovnání modulů tuhosti při teplotě 15 °C



Tabulka 11. 36 - Moduly tuhosti při teplotě 27 °C

ACO 11 S					**ACO 11 +**					**SMA 11 S**				
Způsob hutnění	Tuhost – měření [MPa]			Tuhost [MPa]	Způsob hutnění	Tuhost – měření [MPa]			Tuhost [MPa]	Způsob hutnění	Tuhost – měření [MPa]			Tuhost [MPa]
	1	2	Průměr			1	2	Průměr			1	2	Průměr	
Gyrátor	2 742	2 473	2 608	2 510	Gyrátor	3 415	3 057	3 236	3 314	Gyrátor	996	1 061	1 029	1 223
	2 664	2 565	2 615			3 108	3 199	3 154			1 318	1 474	1 396	
	2 337	2 278	2 308			3 677	3 425	3 551			1 241	1 246	1 244	
2x5	1 839	1 818	1 829	1 881	2x5	694	639	667	748	2x5	452	422	437	440
	2 048	1 813	1 931			805	763	784			504	522	513	
	1 940	1 827	1 884			837	750	794			360	379	370	
2x15	2 577	2 442	2 510	2 667	2x15	1 211	1 123	1 167	1 306	2x15	624	717	671	644
	2 822	2 839	2 831			1 235	1 332	1 284			631	570	601	
	2 646	2 673	2 660			1 432	1 500	1 466			647	673	660	
2x25	3 342	3 464	3 403	3 796	2x25	1 977	1 910	1 944	1 963	2x25	874	820	847	844
	4 053	4 105	4 079			1 910	1 938	1 924			788	808	798	
	3 961	3 853	3 907			2 088	1 952	2 020			878	897	888	
2x35	4 402	4 011	4 207	4 085	2x35	2 454	2 216	2 335	2 297	2x35	1 027	938	983	1 012
	4 043	3 906	3 975			2 243	2 028	2 136			1 053	980	1 017	
	4 135	4 014	4 075			2 417	2 424	2 421			1 085	989	1 037	
2x50	4 364	4 340	4 352	4 692	2x50	2 565	2 810	2 688	2 606	2x50	1 259	1 250	1 255	1 069
	4 445	4 573	4 509			2 818	2 948	2 883			970	877	924	
	5 303	5 125	5 214			2 272	2 224	2 248			1 078	978	1 028	
2x100	4 696	4 556	4 626	5 050	2x100	2 410	2 423	2 417	2 910	2x100	1 289	1 254	1 272	1 330
	4 929	5 233	5 081			3 234	3 115	3 175			1 463	1 329	1 396	
	5 549	5 339	5 444			3 102	3 176	3 139			1 377	1 266	1 322	

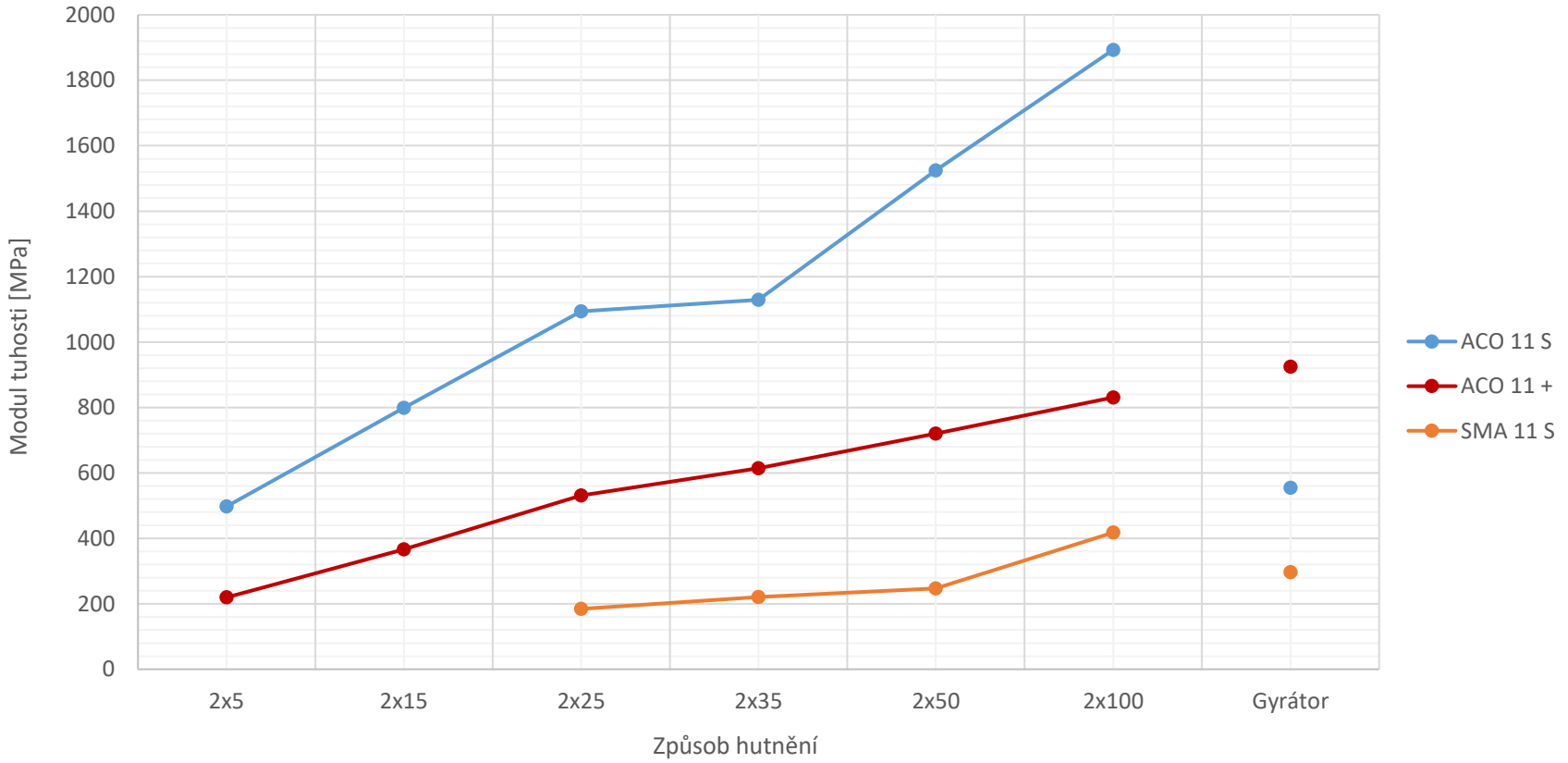
Tabulka 11. 37 – Porovnání modulů tuhosti při teplotě 27 °C



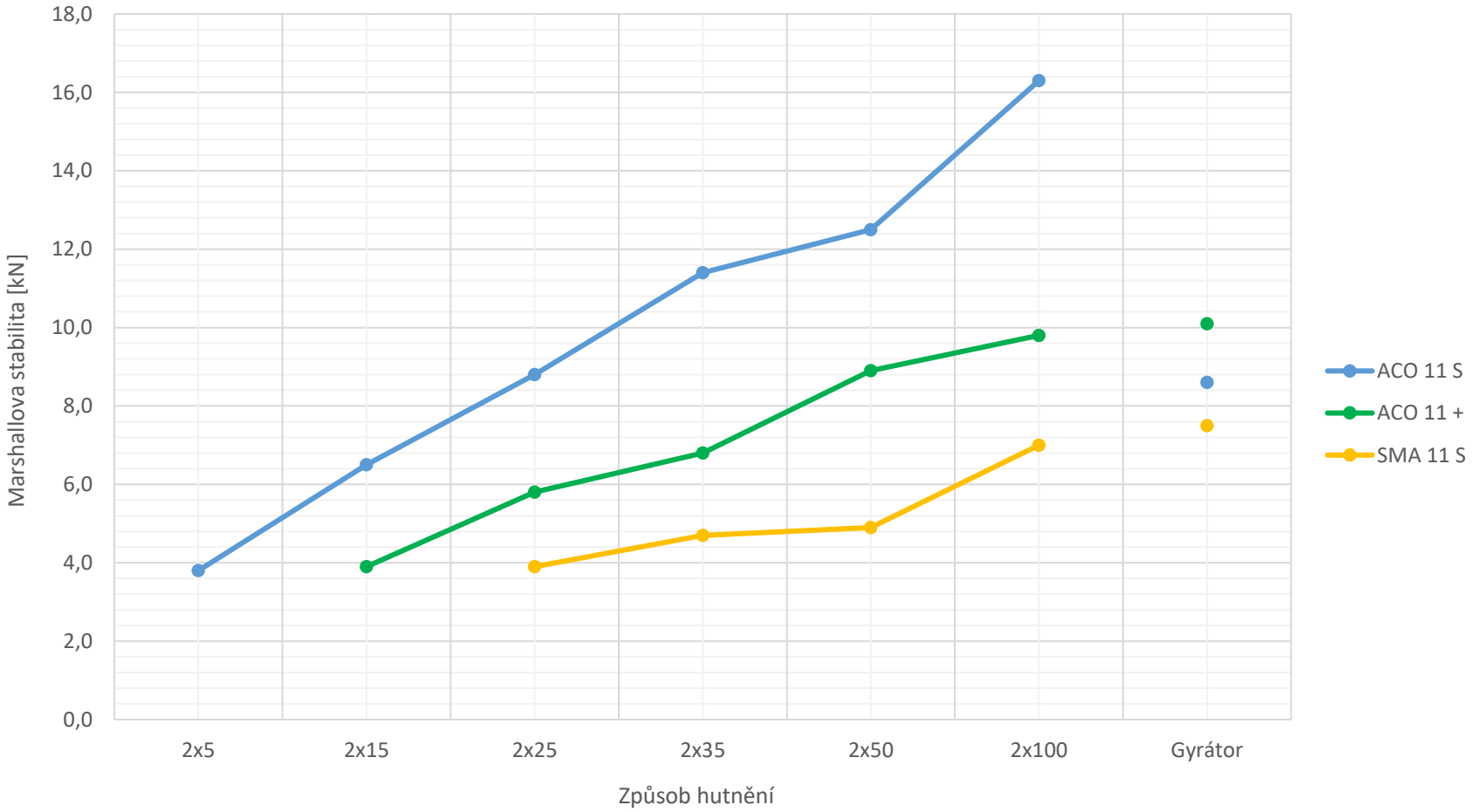
Tabulka 11. 38 – Moduly tuhosti při teplotě 40 °C

ACO 11 S					**ACO 11 +**					**SMA 11 S**				
Způsob hutnění	Tuhost – měření [MPa]			Tuhost [MPa]	Způsob hutnění	Tuhost – měření [MPa]			Tuhost [MPa]	Způsob hutnění	Tuhost – měření [MPa]			Tuhost [MPa]
	1	2	Průměr			1	2	Průměr			1	2	Průměr	
Gyrátor	565	550	558	554	Gyrátor	910	916	913	924	Gyrátor	225	167	196	297
	574	547	561			853	836	845			347	389	368	
	530	559	545			1040	991	1016			339	313	326	
2x5	440	411	426	498	2x5	207	179	193	220	2x5	-	-	-	-
	491	541	516			-	-	-			-	-	-	
	565	537	551			246	246	246			-	-	-	
2x15	706	655	681	799	2x15	336	314	325	367	2x15	-	-	-	-
	1030	932	981			299	273	286			-	-	-	
	764	707	736			518	459	489			-	-	-	
2x25	1101	983	1042	1094	2x25	511	546	529	531	2x25	237	163	200	185
	1196	1097	1147			524	550	537			174	153	164	
	-	-	-			541	512	527			177	203	190	
2x35	1286	1159	1223	1129	2x35	707	564	636	614	2x35	294	322	308	221
	961	1068	1015			509	552	531			174	153	164	
	1186	1115	1151			696	656	676			177	203	190	
2x50	1320	1359	1340	1525	2x50	848	769	809	720	2x50	232	185	209	247
	1493	1467	1480			719	829	774			244	244	244	
	1776	1732	1754			598	556	577			312	265	289	
2x100	1764	1689	1727	1893	2x100	709	775	742	831	2x100	465	488	477	418
	1793	1834	1814			912	844	878			396	328	362	
	2205	2073	2139			879	865	872			406	423	415	

Tabulka 11. 39 – Porovnání modulů tuhosti při teplotě 40 °C



Tabulka 11. 40 – Marshallova zkouška

	ACO 11 S		**ACO 11 +**		**SMA 11 S**	
Způsob hutnění	Číslo vzorku	Marshallova stabilita [kN]	Číslo vzorku	Marshallova stabilita [kN]	Číslo vzorku	Marshallova stabilita [kN]
Gyrátor	1	8,6	49	10,1	79	7,5
	2		50		80	
	3		51		81	
2x5	4	3,8	31	-	61	-
	5		32		62	
	6		33		63	
2x15	7	6,5	34	3,9	64	-
	8		35		65	
	9		36		66	
2x25	10	8,8	37	5,8	67	3,9
	11		38		68	
	12		39		69	
2x35	13	11,4	40	6,8	70	4,7
	14		41		71	
	15		42		72	
2x50	16	12,5	43	8,9	73	4,9
	17		44		74	
	18		45		75	
2x100	19	16,3	46	9,8	76	7,0
	20		47		77	
	21		48		78	

Tabulka 11. 41 – Porovnání výsledků Marshallovy zkoušky