



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

**VYUŽITÍ VEDLEJŠÍCH MATERIÁLŮ Z VÝROBY
KAMENIVA DO VOZOVKY**

THE USE OF THE SECONDARY AGGREGATES TO PAVEMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Maroš Hurtiš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. DUŠAN STEHLÍK, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Maroš Hurtiš
Název	Využití vedlejších materiálů z výroby kameniva do vozovky
Vedoucí práce	doc. Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

ČSN EN 13285 Nestmelené směsi - Specifikace

ČSN 73 6133 Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací

ČSN EN 14227-1 Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 1: Směsi z kameniva stmelené cementem

ČSN EN 14227-5 Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 5: Směsi z kameniva stmelené hydraulickým silničním pojivem

veřejně přístupné články a literatura z internetu

diplomové práce 2010-2017

výzkumné zprávy, příspěvky z odborných konferencí, zprávy z výzkumných projektů (open sources) apod.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem práce je najít využití pro sekundární kameniva z produkce kamenolomů v ČR. Zvláštní zaměření do podkladních vrstev vozovek na směsi stmelené s cementem a hydraulickým pojivem. Využitím směsí drcených odpadních kameniv v podkladních vrstvách silnic mohou být výrazně uspořeny kvalitní kameniva do inženýrských konstrukcí.

Předpokládá se ověření laboratorně namíchaných směsí drceného kameniva ve frakci 0/32 (22) a 0/4 (8) pro stmelené směsi (SC C1,5/2; SC C3/4) s ověřením všech důležitých návrhových parametrů směsí podle příslušných normových předpisů.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

doc. Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá možnosťami využitia materiálu z vedľajšej výroby kameniva do zmesí stmelených hydraulickým spojivom, ktoré sú používané do podkladových vrstiev vozovky. Dôvodom je súčasné skládkovanie tohto a jemu podobnému materiálu. V teoretická časť popisuje podmienky použitia a vlastnosti stmelených zmesí ako aj vlastnosti kameniva a cementu. V praktickej časti je opísaný návrh týchto zmesí a skúšky k tomu potrebné. Stmelené zmesi sú podrobené skúškam za účelom zistenia ich pevnosti v tlaku, odolnosti proti mrazu a vode a zistenie modulu pružnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

stmelené podkladové vrstvy, drobné drvené kamenivo, cement, proctor modifikovaný, pevnosť v tlaku, odolnosť proti mrazu a vode, modul pružnosti

ABSTRACT

The master thesis deals with the possibilities of using waste aggregate from main rock production to hydraulically bound mixtures, which are used in base and sub base pavement. The theoretical part describes conditions and properties of bound mixtures, aggregates and cement. The practical part describes the process of design, mixture preparing and laboratory test carried out on them. The bound mixtures are testing in compressive strength, frost and water resistance and resilient modulus.

KEYWORDS

Mixtures bounded base layers, fine crushed aggregate, cement, Proctor modified, compressive resistance, resistance to frost and water, elastic modulus

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Maroš Hurtiš *Využití vedlejších materiálů z výroby kameniva do vozovky*. Brno, 2019. 68 s., 3 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

1. PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Využití vedlejších materiálů z výroby kameniva do vozovky* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 11. 1. 2019

Bc. Maroš Hurtiš
autor práce

2. PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Využití vedlejších materiálů z výroby kameniva do vozovky* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 1. 2019

Bc. Maroš Hurtiš
autor práce

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu práce Ing. Dušanovi Stehlíkovi, Ph.D. za poskytnuté podklady, cenné rady, pripomienky a odborné vedenie pri spracovaní diplomovej práce. Ďalej by som sa rád poďakoval Pavlovi Strakovi za pomoc pri realizácii laboratórnych skúšok.

Obsah

1. Úvod a ciele práce	11
Teoretická časť	12
2. Podkladové vrstvy vozovky	13
2.1. Nestmelené vrstvy	13
2.2. Stmelené vrstvy hydraulickými spojivami	14
2.3. Zmes z kameniva stmelená cementom	15
2.3.1. Vlhkosť zmesi	16
2.3.2. Zrnitosť kameniva	16
2.3.3. Obsah spojiva	17
2.3.4. Hrúbka vrstvy	18
2.3.5. Laboratórne mechanické vlastnosti	18
2.3.5.1. Pevnosť v tlaku R_c	18
2.4. Popisné, preukazné a kontrolné skúšky zmesí stmelených cementom	20
2.4.1. Stanovenie zrnitosti kameniva	20
2.4.2. Stanovenie zrovnávacej objemovej hmotnosti vlhkosti – Proctorova skúška	21
2.4.3. Skúška odolnosti proti mrazu a vode	24
2.4.4. Pevnosť v tlaku	25
2.4.5. Modul pružnosti pomocou triaxiálneho prístroja	28
3. Kamenivo	29
3.1. Rozdelenie kameniva	29
3.2. Výroba drveného kameniva	31

3.2.1.	Čelust'ový drvič	31
3.2.2.	Kužel'ový drvič	32
3.2.3.	Odrázové drviče	33
3.3.	Ťažené kamenivo	33
3.4.	Recyklované kamenivo	34
3.5.	Drobné kamenivo	35
3.6.	Zahraničné zdroje.....	37
	Praktická časť.....	38
4.	Charakteristika praktickej časti	39
4.1.	Použité materiály.....	39
4.1.1.	Kamenivo.....	39
4.1.2.	Cement.....	41
4.2.	Zrinitosť	41
4.3.	Návrh zmesi	44
4.4.	Optimálna vlhkosť	44
4.5.	Výroba skúšobných telies	49
4.6.	Pevnosť v tlaku	51
4.7.	Odolnosť proti mrazu a vode	54
4.8.	Modul pružnosti	56
4.9.	Súhrnné vyhodnotenie skúšok	59
	Záver.....	61
	Zoznam použitých zdrojov	63
	Zoznam obrázkov.....	65

Zoznam tabuliek.....	67
Zoznam grafov	68
Prílohy	69
Príloha A	69
Príloha B	70
Príloha C	71

1. Úvod a ciele práce

Dnešnej dobe je trendy používať druhotné alebo menej kvalitné materiály a nájsť pre nich zmysluplné použitie. Staviteľstvo toho nie je výnimkou.

K týmto materiálom je aj vedľajšie kamenivo pri výrobe drveného kameniva, toto kamenivo je pravažne drobnej frakcie. Drobné kamenivo ale môžeme nájsť aj u ťaženého ako aj u recyklovaného kameniva, kde tvorí väčšinu z jeho produkcie. Ich výhodou je finančná a často lokálna dostupnosť

Drobné kamenivo sa momentálne využíva do podsypov, zásypov, betónu, poterov, mált a inde. Toto uplatnenie však nie je dostatočné a vzniká veľký prebytok tohto materiálu, ktorý sa hromadí na skládkach.

Uplatnenie by mohol mať tento materiál v cestnom staviteľstve, kde sa už používa k napr. tvorbe násypov ale jeho ďalšie uplatnenie je v podkladových vrstvách ako zmes stmelená hydraulickým spojivom. V súčasnosti sa najviac uplatňujú podkladové vrstvy z nestmelených zmesí, ktoré sú robené z kvalitného kameniva s plynulou čiarou zrnitosti. Prípade stmelených podkladových vrstiev býva realizácie z frakcií 0/22 alebo 0/32, ktoré by mohli byť nahradené na komunikáciách s nižšou intenzitou dopravy stmelenými zmesami z drobného kameniva.

Cieľ práce je overiť všetky dôležité parametre navrhovaných zmesí stmelených hydraulickým spojivom podľa príslušných noriem.

Použitie kamenivo v zmesiach je výsivka z lomu, ktorá nemá pevne danú zrnitosť. Z tohto materiálu budú navrhnuté zmesi stmelené hydraulickým spojivom a to konkrétne cementom.

Dôležité je dosiahnuť u skúšobných telies pevnosť v tlaku 2 MPa, čo je podmienkou použitia týchto zmesí v podkladových vrstvách. Ak prekoná výsledná pevnosť 4 MPa, bude možné nahradiť aj kamenivo pevnostných triedach C_{3/4}.

Teoretická část

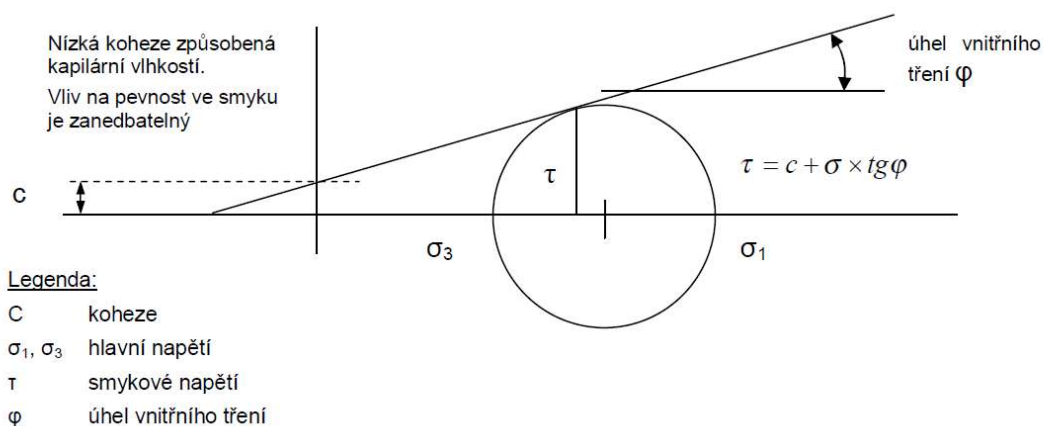
2. Podkladové vrstvy vozovky

Sú to spodné časti konštrukcie vozovky medzi krytom a zemnou pláňou. Plnia hlavnú nosnú funkciu vozovky, roznášajú zaťaženie a obmedzujú jeho účinok na zemné teleso. Poznáme tri hlavné druhy a to stmelené hydraulickým spojivom a nestmelené podkladové vrstvy a prelievané podkladové vrstvy

2.1. Nestmelené vrstvy

Je to zrnitý materiál s kontrolovanou zrnitosťou s $d=0$, je vyrobená bez použitia spojiva a vytvorená rozprestieraním a hutnením. Jeho vlastnosti závisia len na vnútornom trení kameniva.[1]

Pretože majú len malú odolnosť voči mechanickému poškodeniu, ich uplatnenie je predovšetkým v podkladových vrstvách. Ich výhoda je ľahká dostupnosť vhodného materiálu (Česká republika), jednoduchosť prevedenia a relatívne nízka cena oproti vrstvám stmeleným. V minulosti boli chybné označované za menej kvalitné s porovnaním so stmelenými vrstvami, z dôvodu nesprávneho prevedenia týchto vrstiev. [2]



Obrázok 1 Moohrova kružnica pre nestmelené zmesi [1]

Za nestmelené vrstvy sa označujú mechanicky spevnené kamenivo (MZK), štrkodrt' (ŠD), štrkopiesok (ŠP), vibrovaný štrk (VŠ) a mechanicky spevnená zemina (MZ).

Podľa ČSN EN 13285 je na základe zrnitosti v jednotlivých kategóriách z prepadu možné použiť podľa tabuľky 1.

Tabuľka 1používané nestmelené podľa zrnitosti [3]

0/8	0/10	0/11,2	0/12,5	0/14	0/14	0/20
0/22,4	0/31,5	0/40	0/45	0/56	0/63	0/125

Medzi základné požiadavky na nestmelené zmesi patrí:

- Dostatočná únosnosť, ktorá závisí na únosnosti podlažia
- Trvanlivosť – vrstvy by mali mať stabilné vlastnosti
- Čo najmenší obsah ílovitých materiálov, z vyšším obsahom ílových materiálov sa zhoršuje spracovateľnosť a sú citlivejšie na zmenu vlhkosti

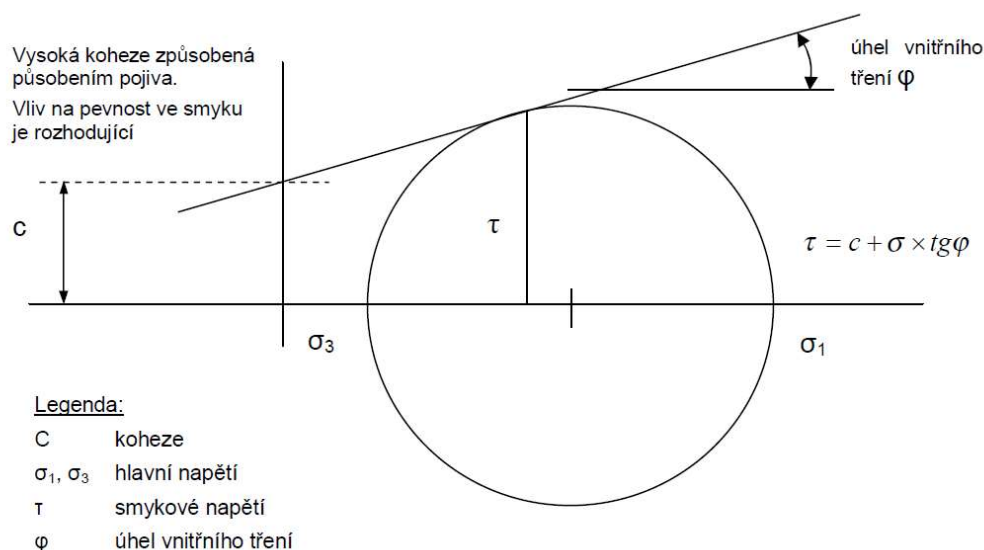
2.2.Stmelené vrstvy hydraulickými spojivami

Podľa ČSN EN 14227-1 sú zmesi stmelené hydraulickým spojivom definované ako zmesi obsahujúce kamenivo s určenou čiarou zrnitosti a jedným alebo viacerými hydraulickými spojivami. Tieto zmesi tuhnú a tvrdnú hydraulickou reakciou a ich klasifikácia je založená na mechanických vlastnostiach. Tieto zmesi sú vyrábané spôsobom zabezpečujúcim ich homogenitu [4]

Majú relatívne vysoký modul pružnosti a nízku pevnosť. Preto aj pri malej deformácii vznikajú veľké napätia, ktorým nie je vrstva schopná odolávať. Môžeme povedať, že zhutnená vrstva je krehká. Z tohto dôvodu vzniká vo vrstve množstvo mikrotrhliniek, už za malého pôsobenia zaťaženia[2]

Preto nemôžeme uvažovať únosnosť týchto vrstiev len na základe pevnosti v tlaku, ale aj zo spolupôsobenia z podkladom, ktorý obmedzuje jej priehyb a umožňuje uplatnenie

šmykových napätí. Mikrotrhliny nemajú praktický vplyv na šmykovú pevnosť, naopak spôsobujú že sa vrstvy chová čiastočne ako nestmelená.



Obrázok 2 Moohrova kružnica pre stmelené vrstvy [2]

Z porovnania obrázka č1 a č2 vyplýva, že odlišnosť nestmelených vrstiev a vrstiev stmelených hydraulickými spojivami je daná tým, či je dominantná koheze alebo vnútorné trenie. Behom doby životnosti sa vrstvia porušuje postupným rozvojom mikrotrhlín a vplyv kohoze sa znižuje. Postupne sa chovanie vrstvy začína približovať vrstve nestmelenej. Pevnosť vrstvy je dôležitá ale jej význam by sa nemal preceňovať. [2]

2.3.Zmes z kameniva stmelená cementom

Obecne je to zmes kameniva stmeleného cementom, ktorá musí byť vyrobená zo vstupných materiálov popísaných nižšie.

Ďalej musí byť zmes vybraná z piatich typov popísaných v ČSN EN 14227-1. Pre nás je podstatný hlavne typ 4, ktorý sa používa do konštrukčných vrstiev vozovky podľa normy ČSN EN 73 6124-1. [5]

Vstupné materiály

Kamenivo musí odpovedať požiadavkám EN 12620. Vlastnosti a vhodné kategórie kameniva sa musia zvoliť v závislosti na spôsobe použitia zmesi v konštrukcii vozovky

a na dopravnom zaťažení. Kamenivo musí byť objemovo stále. Pokiaľ tomu tak nie je, použitie je možné za predpokladu, že existujú spoľahlivé záznamy o funkčných vlastnostiach alebo laboratórnych hodnoteniach zmesi.

Cement musí spĺňať požiadavky EN 197-1 nebo Európske technické schválenie.

Voda nesmie obsahovať zložky, ktoré nepriaznivo ovplyvňujú tvrdnutie a chovanie zmesi z kameniva stmeleného cementom.

Spomalovače musia spĺňovať požiadavky platné v mieste použitia.

2.3.1. Vlhkosť zmesi

Vlhkosť ktorá je potrebná na dostatočné zhutnenie a dosiahnutie optimálnych mechanických vlastností je závislá od zrnitosti kameniva, obsahu spojiva, pri dodávaní zmesi je dobré zvážiť aj klimatické podmienky v mieste stavby, dopravnú vzdialenosť a iné. Najčastejšie sa optimálna vlhkosť určuje proctorovou skúškou modifikovanou.

Musia sa stanoviť medze intervalu vlhkosti vhodného pre spracovanie zmesi na stavbe v súlade s požiadavkami na hutnenie a mechanické chovanie zmesi.

2.3.2. Zrnitosť kameniva

Norma ČSN EN 14227 – 1 uvádza podmienky na zrnitosť zmesi kameniva pre stmelené vrstvy cementovým spojivom podľa typu vrstvy. Celkovo je ich 5 plus, niektoré majú viacero možností. Bližšie podmienky zrnitosti pre jednotlivé zmesi kameniva stanovuje norma ČSN EN 73 6124 – 1, kde zrnitosť zmesi závisí od triedy pevnosti v tlaku a maximálnej frakcie vo zmesi. Uvedené sú zrnitosti pre triedy pevnosti tlaku $C_{1,5/2}$ a $C_{3/4}$ a pre triedu pevnosti $C_{6/8}$.

Tabuľka 2 Zrnitosť zmesi pre triedu pevnosti $C_{6/8}$ a frakcie 0/32[4]

Sito [mm]	Prepad zrn v % hmotnosti	
	Minimum	Maximum
45	100	100
31.5	85	100
16	60	90
8	40	73
4	27	61
2	18	51

1	12	41
0.5	9	32
0.25	7	24
0.125	5	16
0.063	3	11

Tabuľka 3 Zrinitosť zmesi pre triedu pevnosti $C_{1,5/2}$ a $C_{3/4}$ [4]

Sito [mm]	Prepad zŕn v % hmotnosti	
	Minimum	Maximum ^a
45	100	100
31.5	80	100
16	40	100
8	28	100
4	20	100
2	15	100
1	11	88
0.5	8	75
0.25	5	60
0.125	2	40
0.063	0	15
a	Oblasť hornej polovice intervalu zrinitosti zahŕňa predovšetkým ťažené kamenivo, ktoré je možné podľa skúseností v niektorých lokalitách dostatočne zhutniť	

2.3.3. Obsah spojiva

V súčasnej norme ČSN EN 14277 – 1 nie je daný minimálny obsah spojiva na základe maximálnej veľkosti zrna ako tomu bolo v predchádzajúcej verzii. V súčasnosti sa pri počiatočnom návrhu zmesi vychádza zo skúseností.

Tabuľka 4 minimálny obsah spojiva podľa max. veľkosti kameniva

Maximálna menovitá veľkosť zrna kameniva mm	Minimálny obsah spojiva % hmotnosti
> 8,0 až 31,5	3
2,0 až 8,0	4
< 2,0	5

Táto podmienka mohla byť obmedzujúca pri používaní spojiva vyššej pevnosti ale môžeme ju použiť ako pomôcku pri novom návrhu zmesi.

2.3.4. Hrúbka vrstvy

Celková hrúbka vrstvy je určená návrhom vozovky, táto vrstva môže byť pokladaná po častiach, ale najmenšia hrúbka kladenej vrstvy byť minimálne 2,5 násobkom veľkosti horného sita zmesi D, najmenej to však môže byť 100 mm. [5]

2.3.5. Laboratórne mechanické vlastnosti

Pre kvalifikáciu sa používajú dve laboratórne skúšky a to skúška pevnosti v tlaku R_c a kombinácia pevnosti v ťahu R_t s modulom pružnosti E .

Medzi týmito metódami neexistuje žiadna korelácia. [4]

Skúšobné telesá na tieto skúšky môžu mať viacero rozmerov a môžu byť vyrobené viacerými metódami. Preto je dôležité pri interpretácii výsledkov brať do úvahy aj akou metódou bolo skúšobné teleso zhotovené.

Tvar skúšobných telies môže byť krychla alebo valec. Valcové skúšobné telesá sa môžu líšiť štíhlostným pomerom.

2.3.5.1. Pevnosť v tlaku R_c

Triedu pevnosti volíme podľa tab. 5. Pri voľbe pevnosti nesmieme zabudnúť zohľadniť spôsob výroby telesa.

Štíhlostný pomer 2 je v rozsahu $H/D=2$ a štíhlostný pomer 1 je v rozsahu $H/D= 0,80$ až 1,21.

Tabuľka 5 Zatriedenie stmelenej zmesi cementom podľa pevnosti v tlaku [4]

Stĺpec	1	2	3
Riadok	Minimálna hodnota Rc pre válnové skúšobné telesá, pre štíhlostný pomer 2 [Mpa]	Minimálna hodnota Rc pre válnové skúšobné telesá, pre štíhlostný pomer 1 a slúšobné telesá tvaru krychle [Mpa]	Trieda Rc
1	0,4	0,5	C _{0,4/0,5}
2	0,8	1	C _{0,8/1}
3	1,5	2	C _{1,5/2}
4	2,3	3	C _{2,3/3}
5	3	4	C _{3/4}
6	4	5	C _{4/5}
7	5	6	C _{5/6}
8	6	8	C _{6/8}
9	8	10	C _{8/10}
10	9	12	C _{9/12}
11	12	16	C _{12/16}
12	15	20	C _{15/20}
13	18	24	C _{18/24}
14	21	28	C _{21/28}
15	24	32	C _{24/32}
16	27	36	C _{27/36}
17	30	40	C _{30/40}
18	33	44	C _{33/44}
19	36	48	C _{36/48}
20	Deklarovaná hodnota	Deklarovaná hodnota	C _{DV}

Z pevnosti v tlaku vychádza aj použitie zmesi stmelených hydraulickými spojiva do konštrukčných vrstiev. Z tabuľky 6 je jasne vidieť, že aby sme mohli použiť stmelenú zmes hydraulickými spojivami do podkladovej vrstvy musí mať minimálnu pevnosť v tlaku 2 Mpa. [4]

Tabuľka 6 Použitie zmesí stmelých hydraulickými spojivami vo vozovke [5]

Trieda pevnosti v tlaku R_0^a	Doporučená trieda zaťaženia ^b		
	Krytová vrstva ^c	Horná podkladová vrstva	Spodná krytová vrstva
$< C_{1,5/2}^d$	-	-	-
$C_{1,5/2}$	-	III, IV, V a VI	bez obmedzenia
$C_{3/4}$	-	bez obmedzenia	bez obmedzenia
$C_{5/6}$	V, VI	bez obmedzenia	-
$C_{8/10}$	V, VI	bez obmedzenia	-
$C_{12/16}$	V, VI	bez obmedzenia	-
$C_{15/20}$ a vyššie ^d	-	-	-
a trieda pevnosti v tlaku podľa ČSN EN 14227-1 b trieda dopravného zaťaženia podľa ČSN 73 6114 c Pre miestne obslužné komunikácie sa povrch vrstvy musí opatriť náterom alebo emulznou kalovou vrstvou. Pre účelové komunikácie, spevnené povrchy a dočasné komunikácie sa prevedenie tohto opatrenia odporúča d zmesi pod alebo nad túto pevnosť sa neodporúča používať			

2.4. Popisné, preukazné a kontrolné skúšky zmesí stmelých cementom

Nasledujúca kapitola sa venuje postup jednotlivých skúšok, k popisu materiálu a k výrobe skúšobných telies.

2.4.1. Stanovenie zrnitosti kameniva

Podstatou tejto skúšky je roztriedenie a oddelenie materiálu pomocou sady sít do niekoľko zrnitostných podielov s klesajúcou veľkosťou častíc. Jedná sa o mechanické roztriedenie zŕn podľa veľkosti a stanovenie prepadu v percentách na jednotlivých sítach – stanovenie čiary zrnitosti. Veľkosti otvorov sít a počet sít sú volené podľa druhu vzorku a požadovanej presnosti. [16]

Skúška sa riadi pokynmi podľa normy ČSN EN 933-1 kde sú detailne popísané postupy.

Skúšku možno rozdeliť na niekoľko základných krokov:

- Pranie
- Presievanie
- Váženie
- Výpočet

Obrázok 3 Prístroj na presievanie [10]



2.4.2. Stanovenie zrovnávacej objemovej hmotnosti vlhkosti – Proctorova skúška

Táto skúška sa riadi podľa normy ČSN EN 13286-2.

Norma popisuje šesť podobných variácií skúšky zhutniteľnosti. Každý variant sa vzťahuje k maximálnej veľkosti častíc skúšanej zmesi a k požadovanému množstvu vzorky a veľkosti formy. [6]

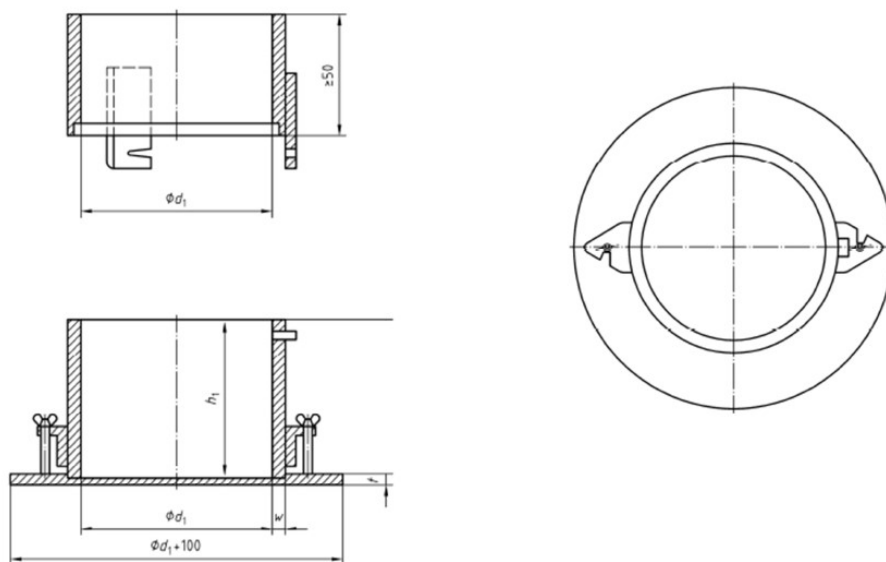
Používajú sa dva základné typy:

- Proctor Standard (PS)
- Proctor Modifikovaný (PM)

Najväčší rozdiel medzi týmito skúškami spočíva v hutniacej energii, ktorá v prípade proctor standard je približne $0,6 \text{ MJ/m}^3$ a pri Proctor modifikovaný približne $2,7 \text{ MJ/m}^3$. Tohto rozdielu je dosiahnuté použitím ťažšieho pechu a väčšej výške dopadu. [3]

Tabuľka 7 parametre Proctorovej skúšky podľa jej typu [6]

Druh skúšky	Charakteristiky skúšky	Symbol	Jednotky	Proctorov mažiar		
				A	B	C
Standartná Proctorova skúška	Hmotnosť pechu	m_R	kg	2,5	2,5	15,0
	Priemer pechu	d_2	mm	50	50	125
	Výška dopadu	h_2	mm	305	305	600
	Počet vrstiev	-	-	3	3	3
	Počet úderov na vrstvu	-	-	25	56	22
Modifikovaná Proctorova skúška	Hmotnosť pechu	m_R	kg	4,5	4,5	15,0
	Priemer pechu	d_2	mm	50	50	125
	Výška dopadu	h_2	mm	457	457	600
	Počet vrstiev	-	-	5	5	3
	Počet úderov na vrstvu	-	-	25	56	98



Obrázok 4 popis proctorového mažiaru [6]

Voľba typu mažiaru závisí od maximálnej frakcie kameniva vo zmesi. Najmenší typ A s priemerom 100 mm môžeme použiť u zmesi z maximálnou frakciou zrna menšou ako 16 mm. Pre typ B musí byť maximálna frakcia menšia ako 31,5 mm.

Stručný popis skúšky Proctor pre zistenie optimálnej vlhkosti a maximálnej suchej objemovej hmotnosti.

- Mažiar s pripevnenou základnom doskou sa odváži a zaznamená
- Z jednej pripravenej zmesi sa do mažiaru vloží približne také množstvo aby po zhutnení dosiahlo jednu pätinu alebo tretinu výšky mažiaru.
- Vrstva sa zhutní predpísaním počtom úderov a postup opakujeme
- Po odstránení nadstavca, odstránime prebytočný materiál kovovým rovnátkom a zarovnáme povrch
- Mažiar aj so základnom doskou odvážime a zaznamenáme

- So stredu odoberieme vzorku zhutnenej zmesi na stanovenie skutočnej vlhkosti zmesi
- Tento postup opakujem pre všetky skúšané vlhkosti



Obrázok 5 automatický stroj na hutnenie zmesi [11]

Za použitia rovníc vypočítame objemovú hmotnosť vlhkej zmesi, ktorú vďaka skutočnej hodnote vlhkosti prevedieme na suchú objemovú hmotnosť. Závislosť objemovej hmotnosti od vlhkosti vynesieme do grafu a jednotlivé body grafu preložíme krivkou. Vrchol krivky nám udáva maximálnu objemovú hmotnosť a optimálnu vlhkosť zmesi. Z každej strany od optimálnej vlhkosti nám musia ležať aspoň dva body patriace tejto krivke. Stanovená optimálna vlhkosť nám udáva, aké množstvo vody potrebuje zmes, aby došlo k ideálnemu zhutneniu. [6]

Rovnica pre výpočet objemovej hmotnosti vlhkej zmesi ρ : [6]

$$\rho = (m_2 - m_1) \cdot 1000 / V$$

ρ objemová hmotnosť zhutnenej vlhkej zeminy
[kg/m³]

m_1 hmotnosť formy a základovej dosky [g]

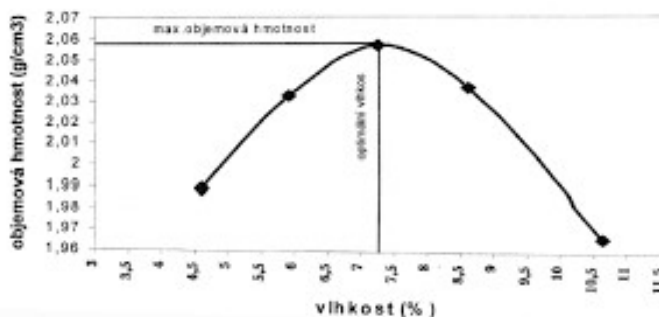
m_2 hmotnosť formy, základovej dosky a zhutnenej zeminy [g]

V objem formy [cm³]

Rovnica pre výpočet objemovej hmotnosti zhutnenej suchej zmesi ρ_d : [6]

$$\rho_d = (100 \cdot \rho) / (100 + w)$$

ρ_d	objemová hmotnosť zhutnenej suchej zeminy	[kg/m ³]
ρ	objemová hmotnosť zhutnenej vlhkej zeminy	[kg/m ³]
w	vlhkosť zmesi	[%]



graf Izávislost' suchej objemovej hmotnosti na vlhkosti [12]

2.4.3. Skúška odolnosti proti mrazu a vode

Je to funkčná skúška slúžiaca ako ukazovateľ dlhodobého zachovania charakteristík zmesi. Simuluje chovanie zmesi v konštrukčnej vrstve pozemných komunikácií pri striedaní kladných a záporných teplôt za spolupôsobenia kapilárnej vzliňavej vody z povrchu vozovky alebo z podložia. Vplyvom záporných teplôt mrznúca voda zväčšuje svoj objem, pričom narušuje konštrukčnú vrstvu, ktorej únosnosť sa týmto znižuje.

Skúška odolnosti zmesí stmelených hydraulickými spojivami proti mrazu a vode sa riadi požiadavkami normy ČSN EN 73 6124-1. Pomôcky a zariadenia sú rovnaké ako u skúšky pevnosti v tlaku podľa ČSN EN 13286-41, najviac je použitá skriňa, v ktorej je možné dosiahnuť teplotu aspoň $(-20 \pm 2) ^\circ\text{C}$. [5]

Po 28dennom zraníu telies sa skúšobné telesá umiestna na plstennú podložku nasiaknutú vodou a nechajú sa kapilárne nasýtiť do ustálenej hmotnosti tak, aby prírastok hmotnosti po dobu najmenej 1 hodiny neprekročil 1%. Pritom skúšobné telesá

nesmú prísť do priameho kontaktu s vodou. Potom sa uložia do mraziacej skrine na dobu $6 \pm 0,5$ hodín na teplotu $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po zmrazení sa skúšobné telesá z mraziacej skrine vytiahnu a uložia na dobu $18 \pm 0,5$ hodín znova na plstenú podložku čiastočne ponorenú vo vode, aby bolo umožnené kapilárne vztlínanie. Súčasne s tým prebieha rozmrazovanie pri teplote 20 až $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tieto kroky sa opakujú až do dosiahnutia potrebného počtu cyklov v závislosti na nadmorskej výške. Po ich dosiahnutí sa skúša pevnosť v tlaku. [5]

2.4.4. Pevnosť v tlaku

Skúška pevnosti v tlaku sa robí podľa normy ČSN EN 13286-41. Telesá vyrobené pre túto skúšku musia spĺňať predpísanú dobu zrenia pri požadovanej vlhkosti. Pre telesá stmelené cementovým spojivom je to 28 dní zrenia pri 90% až 100% vlhkosti ako uvádza norma ČSN EN 14227-1. Na telesá pôsobí jednoosý prostý tlak až do ich porušenia, z maximálneho zaťaženia sa vypočíta pevnosť v tlaku.

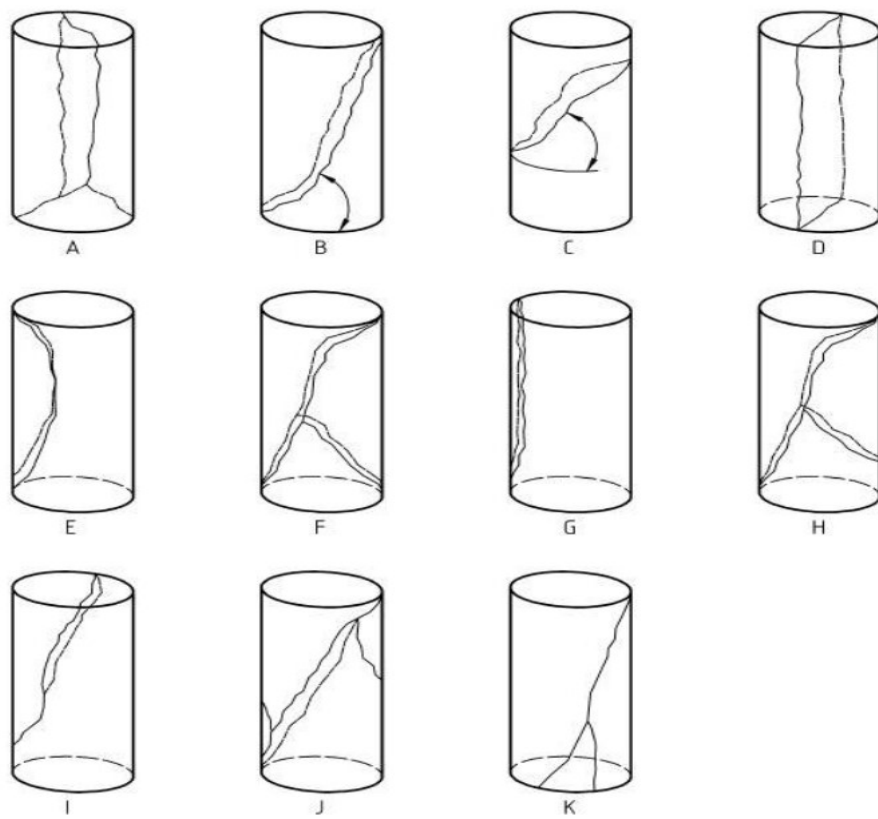
Skúšobné teleso môže byť tvaru krychle alebo valca. Musí sa po dobe zrenia zväžiť s presnosťou 0,25% a jeho strata hmotnosti nesmie presiahnuť 2% z hmotnosti. Ďalej teleso zmeriame s presnosťou 0,5%. Telesá musia spĺňať požiadavku na rovnobežnosť v tolerancii 2mm na 100mm, telesá ktoré túto požiadavku nespĺňajú sa môžu vybrúsiť alebo opatriť krycou vrstvou. [7]



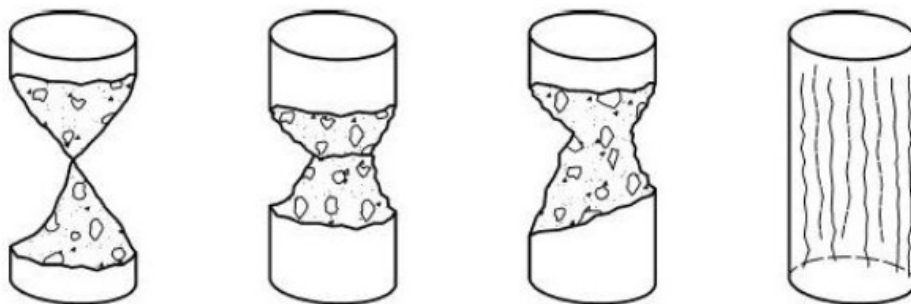
Obrázok 6 Hydraulický skúšobný lis [18]

Skúšobný lis musí mať tlačné dosky minimálne tak veľké, ako je tlačný povrch telesa, v lepšom prípade väčší. Dosky musia byť, vzhľadom k povrchu na ktorý dosadajú rovné. Pri náraste sily nesmie dochádzať k posunu telesa. Stred dosadajúcej plochy sa musí nachádzať v strede tlačnej dosky. Pred zahájením skúšky, sa musí očistiť povrch dosky aj telesa. Aby nedochádzalo ku skresleniu výsledkov. Samotný lis musí byť opatrený dvomi tlačnými ocelovými doskami s povrchom tvrdosti aspoň 55 HRC podľa rocwella do hĺbky približne 5 mm. [7]

Zaťažovanie prebieha plynulo, k porušeniu telesa by malo dôjsť po 30 až 60 sekundách. Zaznamenávajú sa maximálna sila a veľkosť pretvorenia. Na základe predpísaných typov porušenia sa určí, či je poškodenie uspokojivé alebo neuspokojivé. Hodnota sa musí zaznamenať aj keď poškodenia nevyhovuje. [7]



Obrázok 7 Neuspokojivé poškodenie valcových telies [7]



Obrázok 8 Uspokojivé poškodenie [7]

Táto skúška musí byť vykonaná prinajmenšom na troch skúšobných telesách, prípade odlišnosti výsledku o viac než 20% sa táto hodnota pevnosti vylúči. Priemer sa potom stanoví zo zostavajúcich hodnôt pevností. Samotná pevnosť v tlaku sa vypočíta pomocou rovnice uvedenej nižšie a určí sa s presnosťou 0,1 MPa pri pevnosti v tlaku do 5 MPa alebo s presnosťou 0,5 MPa pri pevnosti v tlaku nad 5 MPa.

Rovnica na výpočet pevnosti v tlaku:

$$R_c = \frac{F}{A_c}$$

- | | | |
|---------|---|-----------------|
| • R_c | pevnosť v tlaku skúšobného telesa | MPa |
| • F | maximálna sila pri porušení skúšobného telesa | N |
| • A_c | plocha prierezu skúšobného telesa | mm ² |

2.4.5. Modul pružnosti pomocou triaxiálneho prístroja

Jedná sa o funkčnú skúšku, ktorá sa riadi normou ČSN EN 13286-7. Pre nás je podstatná metóda B – zjednodušený režim napätia s cyklickým osovým deviátorom napätia a konštantným komorovým tlakom. [8]

Táto skúška simuluje chovanie konštrukčnej vrstvy pod dopravným zaťažením polnápravy ťažkého nákladného vozidla. Princíp skúšky pozostáva v zaťažovaní valcových teles cyklickým napätím, ktoré simuluje rôzne napätie pôsobiace na konštrukčnú vrstvu. Pružné chovanie, ktoré je predmetom merania je dosiahnuté vďaka kondicionaniu, to je pôsobenia predbežného cyklického zaťaženia telesa. Týmto je dosiahnutá simulácia dodatočného zhutnenia danej vrstvy pojazdom ťažkých nákladných vozidiel. Kvôli vysokému počtu zaťažovacích cyklov dôjde k ustáleniu trvalého pretvorenia materiálu.

Nasleduje zaťažovanie sériou cyklov, rôzneho napätia pri ktorých je meraná hodnota pružných deformácií a daných napätí. Výsledkom tejto skúšky je modul pružnosti E_r , ktorý odpovedá danému zaťaženiu. [8]

Modul pružnosti E_r je závislý na zvislom napätí σ_1 a s narastajúcim napätím sa jeho hodnota zvyšuje. Zvislé napätie sa zvyšuje s narastajúcim komorovým tlakom σ_3 . Komorový tlak simuluje tlak prostredia vo vozovke vyvedený vo vodorovnom smere, od zaťaženia dopravou. Tlak od kolies sa roznáša približne pod uhlom 45 stupňov. Tieto sily klesajú s narastajúcou hĺbkou.

Skúška začína nasadením membrány na skúšobné teleso, ktorá zabraňuje odlúpnutiu drobných častí v priebehu skúšky a umožňuje pôsobiť komorovému tlaku na celý povrch telesa. Takto pripravené teleso vložíme do triaxiálneho prístroja a po kontrole vstupných údajov, zahájime skúšku. Najprv prebieha kondicionovanie pri konštantnom komorovom tlaku. Pri tomto zaťažovaní meriame zvislú deformáciu. Namerané hodnoty vynesieme do pracovného diagramu a vypočítame príslušné hodnoty modulu pružnosti k daným zvislým napätiam. [8]

Tento typ skúšky je experimentálny pre zmesi stmelené hydraulickým spojivom. Dôvodom je meniaci sa tuhosť zrejúcich zmesí a vysoká tuhosť skúšobných telies.



Obrázok 9 triaxiálny prístroj [11]

3. Kamenivo

Je to zrnitý anorganický materiál prírodného alebo umelého pôvodu s veľkosťou zrna do 125 mm. Je to základný stavebný materiál. V pozemných komunikáciách sa používa do všetkých konštrukčných vrstiev, násypov. Kamenivo môžeme rozdeliť podľa viacerých kritérií.

3.1. Rozdelenie kameniva

Podľa pôvodu:

- Prírodné – Anorganické kamenivo, získané ťažením alebo drvením prírodných hornín.
- Umelé – kamenivo anorganického pôvodu, ktoré vzniklo za prispenia človeka najčastejšie tepelným procesom
- Recyklované – Kamenivo anorganického pôvodu, ktoré bolo najprv použité ako stavebný materiál v stavebných konštrukciách

Podľa spôsobu vzniku zŕn:

- Ťažené – Prírodné kamenivo najčastejšie fluviálneho, glacigenného, glacifluviálneho alebo eolického pôvodu. Vyznačuje sa zaoblenými tvarmi jednotlivých zŕn a ohľadeným povrchom. Najčastejšie horninu typu piesku, štrku a štrkopiesku.
- Drvené – najčastejšie prírodného pôvodu, ktoré vzniká „umelým“ drvením väčších kusov horniny a následným triedením. Ako materiál môže slúžiť aj vysokopecná struska alebo iný anorganický materiál. Má nepravidelný, ostrohranný tvar zŕn, s ostrými hranami a drsným lomovým povrchom
- Ťažené preddrvené – drvením zŕn ťaženého kameniva o veľkosti nad 2 mm s podielom drvených zŕn nad 40 % hmotnosti.

Podľa objemovej hmotnosti:

- Pórovité – s objemovou hmotnosťou do 2000 kg.m^{-3} . Môže byť prírodného, umelé alebo recyklovaného pôvodu. V súčasnosti nemá až také veľké uplatnenie. Väčšina pórovitého kameniva je nasiakavá.
- Hutné – s objemovou hmotnosťou v rozmedzí $2000 - 3000 \text{ kg.m}^{-3}$. Patrí sem väčšina s produkcie prírodného kameniva ale môže byť aj umelý (vysoko pecná struska), alebo recyklát.
- Ťažké – s objemovou hmotnosťou nad 3000 kg.m^{-3} . Môže byť prírodne (čadič, hematit), umelé (syntetický korund). Použitie hlavne do ťažkých betónov.

Podľa veľkosti zŕn:

- Jemné častice – kamenivo, ktoré prepadne sitom 0,063 mm.
- Drobné kamenivo – veľkosť zŕn medzi 0,063 mm – 2 mm.
- Hrubé kamenivo – veľkosť zŕn medzi 2 mm – 45 mm.
- zmes kameniva – hrubé a drobné kamenivo dokopy.
- Štrkopiesok – zmes ťaženého prírodného kameniva drobného a hrubého predpísanej zrnitosti, ktorá je omedzená horným sitom.
- Štrkodrt' – zmes drveného prírodného kameniva drobného a hrubého predpísanej zrnitosti, omedzená horným sitom.
- Výsivka – odpad z výroby drveného kameniva bez zaručenej akosti a veľkosti zŕn.

3.2. Výroba drveného kameniva

Prebieha v povrchových kameňolomoch, kde je hornina od lomovej steny rozpojovaná pomocou odstrelův. U kameňov, ktoré nie sú určené na dekoratívne účely, nie je potreba brať ohľad na neporušenosť lomových plôch, preto sa používajú brizantní trhaviny. Z dôvodov ekonomických aj ekologických boli nahradené pôvodné komorové odstrelы odstrelami clonovými. Pri tomto postupe je navrhovaná línia vrtov pomocou vrtnej súpravy umiestených ako v hlave steny, tak aj pri päte a vrty sú následne naládované trhavinou. [13]

Vzniknutý rozval je odťazený k drvení, ktoré je väčšinou viacstupňové, následne prebieha roztriedenie kameniva do frakcií ako je tomu aj pre ťaženom kamenive. Môže nasledovať aj pranie, kedy sa z kameniva odstráni ílovité prímеси, hlina a iné nečistoty.

Typy drvenia podľa veľkosti kameniva:

- Hrubé (primárne) drvenie – rozdrvené zrno je väčšie ako 125 mm.
- Stredné (sekundárne) – rozdrvené zrno je väčšie ako 25 mm.
- Jemné drvenie – rozdrvené zrno je menšie ako 25 mm.
- Mletie – rozdrvené zrno je menšie ako 1,25 mm.

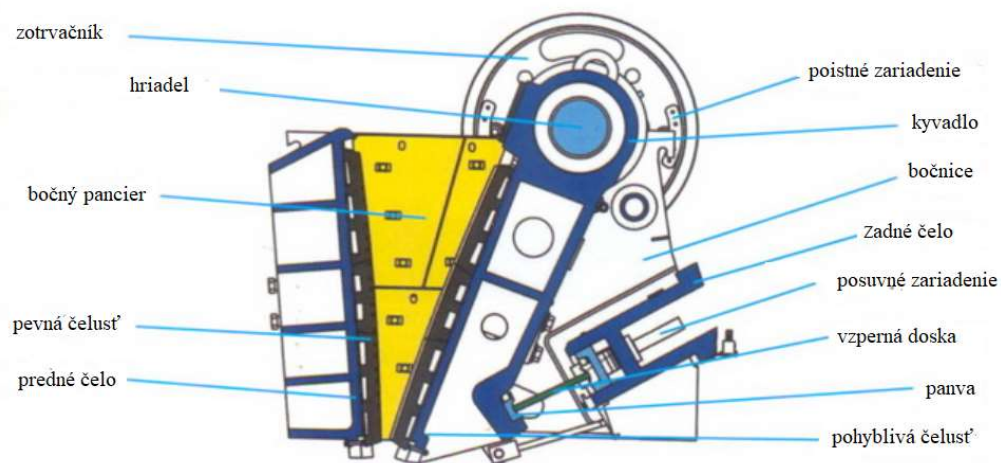


Obrázok 10- Kameňolom [18]

3.2.1. Čepust'ový drvič

Používajú sa na surovinu o počiatočnej veľkosti maximálne 12000 mm, prípade dvojsperného drviča až 1500 mm a slúžia k hrubému až strednému drveniu. Konečná veľkosť je okolo 300 mm ale dá sa meniť podľa šírky výpustnej štrbiny. Materiál je

drvený hlavne za pomoci tlaku ale aj čiastočne rozlámány priestore medzi pevnou a pohyblivou časťou drviča. [13]



Obrázok 11 rez čelust'ovým drvičom [13]

3.2.2. Kuželový drvič

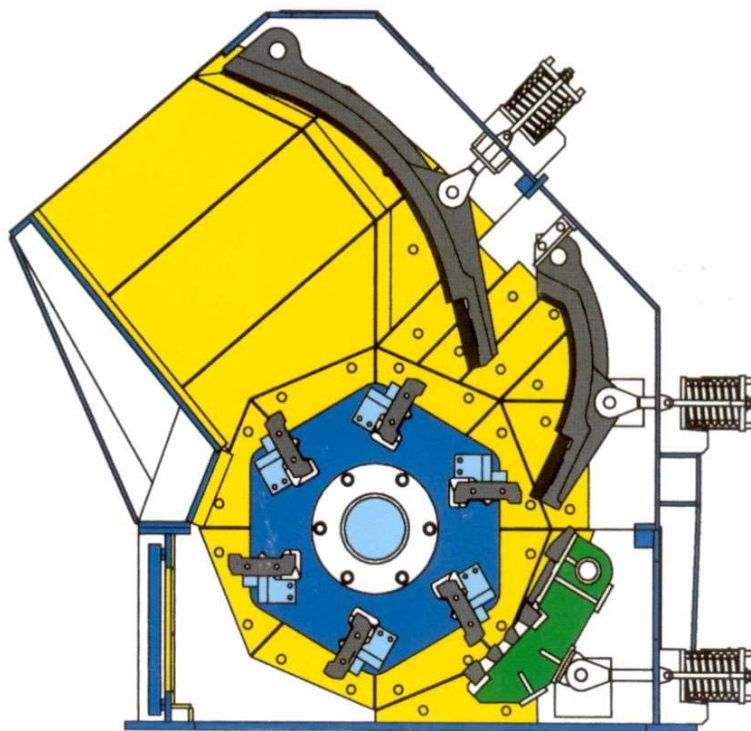
Používajú sa na sekundárne a terciálne drvenie, V tomto type drviča je materiál zmenšovaný medzi otáčajúcim sa kužeľom a nepohyblivým plášťom. [13]



Obrázok 12 rez kuželovým drvičom [20]

3.2.3. Odrázové drviče

Drvia materiál prudkými údermi kladív alebo drviacich lišt a nárazmi rýchlo sa pohybujúcich zŕn na nepohyblivé pancierové dosky. Materiál sa drví v mieste najmenej spoločnej súdržnosti. Používajú sa ako sekundárne, kedy vstupný materiál ma veľkosť približne 300 mm a podrvený okolo 25 mm. [13]



Obrázok 13- rez odrazovým drvičom [13]

3.3. Ťažené kamenivo

Technológia ťažby závisí od polohy ložiska štrkopiesku, keď sa nachádza pod vodou hovoríme o ťažbe z vody, naopak keď je ložisko na povrchu prebieha ťažba suchá. Pre ťažbu z vody sa používajú bágre drapákové, korečkové alebo sacie. Materiál sa následne prepraví loďou alebo pásom na breh. Pri ťažbe na povrchu sa materiál ťaží priamo zo steny bágrom alebo nakladačom. Následne pre obidva spôsoby prebieha triedenie materiálu na jednotlivé frakcie na triediacej linke. [13]

Oproti drvenému kamenivu je lacnejšie z dôvodu horších mechanických vlastností.



Obrázok 15 štrkovňa [18]

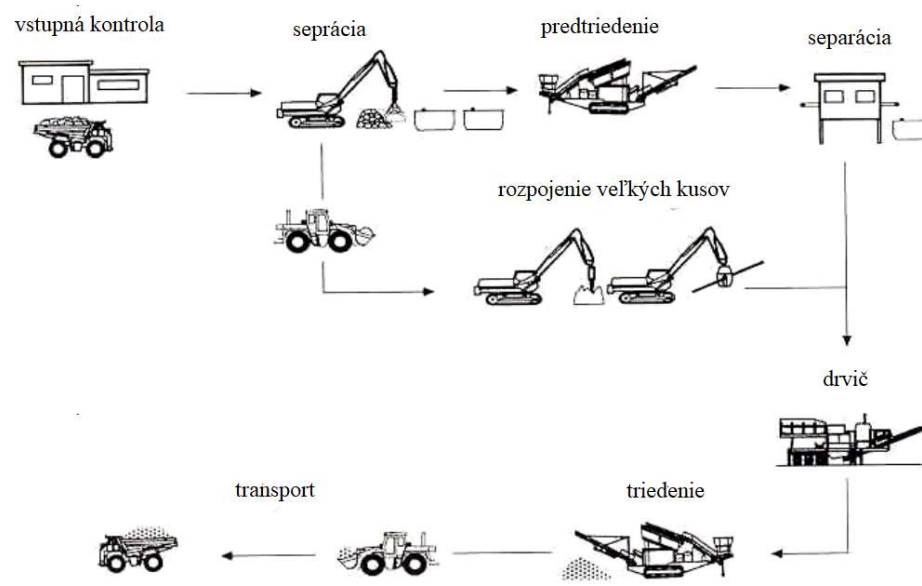


Obrázok 14 ťažené kamenivo [18]

3.4. Recyklované kamenivo

Recyklovanie stavebných a demoličných materiálov sa rozvinulo v ČR v priebehu 90 rokov. Pri používaní recyklovaných materiálov znižujeme objem odpadov a zároveň získavame cennú druhotnú surovinu – recyklované kamenivo (betónové, tehlové, asfaltové a iné). Najväčšie uplatnenie nachádza v líniových stavbách a to hlavne na stavbách cestných komunikácií. (14)

Z prvotného materiálu je potrebné oddeliť materiál ktorý sa už ďalej nedá zrecyklovať a ktorý je nebezpečný. Následne je tento materiál roztriedený na jednotlivé zložky a prevezený do recyklačného strediska. Tu prebieha skládkovanie a následná recyklácia.



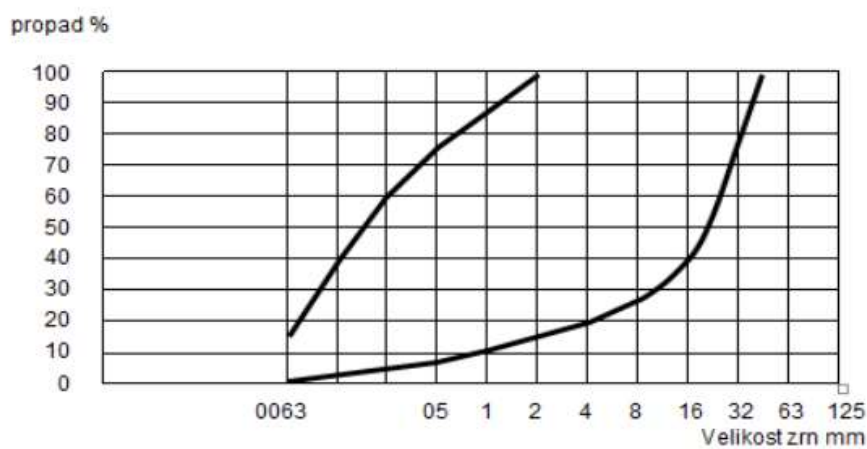
Obrázok 16- schéma recyklačnej linky [15]

3.5.Drobné kamenivo

Je to kamenivo, ktoré maximálna veľkosť zrna je 4 mm. Ako materiál pre tento typ kameniva môžeme použiť rôzne zdroje a to kamenivo drvené, ťažené, recyklované alebo umelé.

V stavebníctve tento materiál nachádza uplatnenie v betónoch asfaltových zmesiach, líniových stavbách atď. Pri líniových stavbách sa používa hlavne ako výplňový materiál, pri tom by sa dal vhodným spôsobom uplatniť aj v konštrukčných vrstvách komunikácií.

Podľa ČSN EN 73 6124-1 je možné tento materiál použiť do podkladových stmelených vrstiev nižšej pevnosti $C_{1,5/2}$ a $C_{3/4}$. Požiadavky na zrnitosť týchto zmesí sú veľmi mierny vid' graf č.2. [21]



graf 2 zrnitosť zmesi s pevnosťou $C_{1,5/2}$ a $C_{3/4}$ [21]

Drobné drvené kamenivo

Pri výrobe frakcií z drveného kameniva (0/2, 0/4, 0/8, 0/16, 0/22) vzniká odpad, ktorý je až zhruba 80 % tvorený drobným kamenivom (prosívkou), zvyšné percentá sú poväčšine ílovité prímеси.

Drobné lomové kamenivo

Toto kamenivo získavame ťažbou piesku alebo štrku. Ložiska tohto kameniva sú v povodí väčších riek.

Drobné recyklované kamenivo

Pri recyklácii stavebného a demoličného odpadu vzniká ako väčšinový produkt drobné kamenivo. Jeho kvalita a mechanického vlastnosti závisia od vstupnej suroviny. Kedy do podkladových stmelených vrstiev sa používa hlavne betónový recyklát, avšak je možné použiť aj iné druhy recyklátu. Ich použitie upravuje norma ČSN EN 13242+A1 a v TP 210 [12]

Tabuľka 8 možnosti použitia recyklátu do konštrukčnej vrstvy [14]

Typ RSM	Konštrukčné vrstvy pozemnej komunikácie									Podložie, Zemné teleso ⁴⁾
	AB	CB	Nestmelené podkladové vrstvy				Stmelené podkladové vrstvy	Prelievané podkladové vrstvy (PV) a VŠ		
			MZK	ŠD _A	ŠD _B	MZ		Kostra ¹⁾	Výplň ²⁾	
Recyklát z betónu	+	0/-	+	+	+	+0	+	+0	+0	+0
Recyklát z muriva	-	-	-	0/-	+	+0	+	0/-	+0	+
Recyklát zmesný	-	-	-	-	-	-	+	-	+	+
Recyklát z vozovky	+	+0 ⁵⁾	+	+	+	+0	+	+0	+0	+0
Recyklát asfaltový	+	-	+0	+	+	0/-	+	0/-	0/-	0/-

Vysvetlivky:

- + ... Odporúča sa používať
- ... Neodporúča sa používať
- 0 ... Podmienečne použiteľné (obmedzené napr. z technologických, ekonomických alebo ekologických dôvodov apod.)
- AB ... Asfaltové vrstvy vozoviek PK
- CB ... Cementobetónové kry vozoviek PK, po splnení požiadaviek ČSN EN 13877-1 možné použiť do spodnej vrstvy dvojvrstvového CB krytu
- ¹⁾ Kostra ... U prelievaných vrstiev napr. kamenivo frakcie 32/63, prípadne u vibrovaného štrku VŠ (podľa ČSN 73 6126-2)
- ²⁾ Výplň ... U prelievaných vrstiev ako súčasť výplňovej malty alebo vibrovaného štrku (VŠ) napr. kamenivo frakcie 8/11
- ⁴⁾ Zrnitý materiál do podložia vozoviek, vrstevnatých násypov. Prípadne nespevnených krajníc vozoviek PK
- ⁵⁾ Pre recyklované kamenivo do CB krytov sa po splnení požiadaviek ČSN EN 13877-1 môže použiť iba separovaný materiál drvený zo starého CB krytu

3.6. Zahraničné zdroje

Zahraničná štúdia publikovaná v roku 2015, ktorá vznikla spoluprácou univerzít zo Španielska a Portugalska sa zaoberá vlastnosťami stmelených zmesí z recyklovaného kameniva frakcie 0/8.

Predmetom výskumu je porovnanie vlastností stmelených zmesí vyrobených z kameniva frakcie 0/40 a zmesí vyrobených z drobného kameniva, resp. kameniva z frakcie 0/8. Celkom je testovaných 5 stmelených zmesí z líšiacim sa druhom použitého kameniva. Tri zmesi sú vyrobené z kameniva frakcie 0/8, dve z nich využívajú kamenivo zo zmesového recyklátu a jedna kamenivo z betónového recyklátu. Jedna zmes z kameniva frakcie 0/40 využíva recyklát zmesový a druhá betónový. Ako spojivo je použitý cement obsahujúci popolček, dávkovanie spojiva je 3 %.

Výskum sa zaoberá mechanickými vlastnosťami týchto zmesí to je pevnosť v tlaku, modul pružnosti a ich objemovou stálosťou. Tieto vlastnosti sú testované na skúšobných telesách vyrobených pomocou vibračného pechu.

Pevnosť v tlaku po 28 dňoch skúšobných telies, u ktorých bolo použité kamenivo frakcie 0/8 sa pohybuje medzi 3 – 4,5 MPa, modul pružnosti sa pohybuje medzi 610 a 650 MPa. Objemové zmeny boli merané po dobu 360 dní a max. zmrštenie bolo okolo 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ a max. bobtnanie bolo okolo 650 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Z porovnania vlastností vyplýva, že u stmelených zmesí z hrubého recyklovaného kameniva frakcie 0/40 je dosiahnutá pevnosť tlaku približne rovnaká ako u stmelených zmesí z drobného recyklovaného kameniva frakcie 0/8. Modul pružnosti je väčší u zmesí z drobného recyklovaného kameniva. [20]

Praktická část

4. Charakteristika praktickej časti

Náplňou praktickej časti bolo zistiť použiteľnosť zostatkového kameniva z lomov inak povedané výsivku do zmesí stmelených cementom a ich použitie v podkladových vrstvách vozovky. Vyhodnocuje výsledky jednotlivých skúšok a preukazuje nimi vhodnosť tohto materiálu do stmelených zmesí. Skúšky boli vykonané v laboratóriu Ústavu pozemných komunikácií, Fakulty stavebnej, Vysokého učení v Brně. Protokoly z jednotlivých skúšok sa nachádzajú v prílohách na konci práce.

4.1. Použité materiály

Na výrobu zmesí stmelených cementom boli použité dva druhy kameniva z rôznou zrnitosťou z toho istého kameňolomu a dva druhy zmesového cementu. Kombináciu týchto materiálov vznikli štyri rôzne zmesi.

4.1.1. Kamenivo

Použité kamenivo je drvené a pochádza z lomu.. Jedná sa o výsivku, prvá výsivka je z primárneho drvenia, kde maximálne zrno vyskytujúce sa v takýchto zmesiach býva okolo 16 mm, druhá výsivka je zo sekundárneho drvenia už na pohľad sa jedná o oveľa jemnejšiu frakciu.



Obrázok 17 výsivka z primárneho drvenia



Obrázok 18 výsivka zo sekundárneho drvenia

4.1.2. Cement

V práci boli použité dva druhy cementu a to

- Cement II 32,5 R – Portlandský cement zmesový, pevnostnej triedy 32,5 s vysokou počiatočnou pevnosťou
- Cement II 42,5 R – Portlandský cement zmesový, pevnostnej triedy 42,5 s vysokou počiatočnou pevnosťou

4.2. Zrinitosť

Zrinitosť materiálov bola stanovená podľa normy ČSN EN 933-1: Skúšanie geometrických vlastností kameniva – časť 1: stanovenie zrinitosti – Sitový rozbor a s ohľadom na zmenu A1 tejto normy. Bola zvolená metóda presievania za sucha, pretože v kamenivo nebolo znečistené napr. ílmi.

Pred samotnou skúškou bola vizuálne skontrolovaná sada sít a dôkladne očistená.

Pre obe vzorky kameniva bola použitá rovnaká sada normalizovaných sít, veľkosť ôk vid' tabuľka 9. Ako posledná bola umiestnená nádoba s pevným dnom na zachytenie jemných častíc.

Tabuľka 9 - Veľkosť a poradie sít

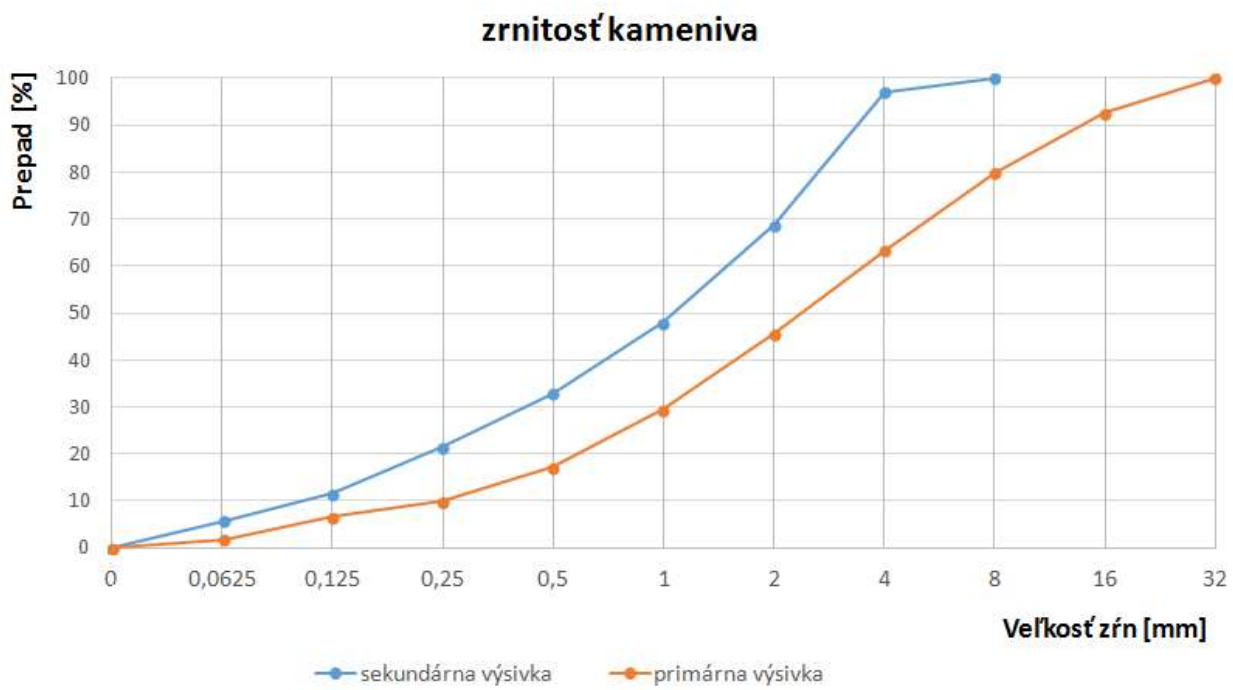
Poradie sít	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
veľkosť ôk [mm]	32	16	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063

Kamenivo z ktorého bola odobratá navážka bolo dopredu zmohogenizované a vysušené pri teplote 110 °C. Hmotnosť skúšobnej navážky bola zvolená podľa ČSN EN 933-1 tab. 1. Pre obe kameniva 0,6 kg.

Vysušená navážka sa nasypala na sítá, ktoré boli zostavené zostupne a končili dnom. Najprv bolo kamenivo presiate za pomoci presievacieho prístroja a následne každé sito dokončené ručným presiatím. Každý zostatok na site bol odvážený a zapísaný s presnosťou na 0,1 g. Hodnoty sa zapísali do protokolu a vyhodnotili sa zostatky a prepady na jednotlivých sítach. Výsledky boli vyhodnotené aj graficky a to čiarou zrinitosti.



Obrázok 19 presievací prístroj



graf 3zrnitosť kameniva

Tabuľka 10 Sitový rozbor- Výsivka z primárneho drvenia

Výsivka z primárneho drvenia			Hmotnosť navážky $M_i = 680,5 \text{ g}$		
Veľkosť ôk na site	Hmotnosť sita	Hmotnosť sita + zostatku na site	Hmotnosť zostatku na site R_i	Percento zostatku na site $100-R_i/M_i$	Súhrnné percento prepadu $100-(100-R_i/M_i)$
[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
32	1295,8	1295,8	0,0	0,0	100,0
16	1289,9	1339,4	49,5	7,3	92,7
8	1120,8	1208,1	87,3	12,8	79,9
4	1031,6	1143,8	112,2	16,5	63,4
2	1011,2	1132,3	121,1	17,8	45,6
1	915,1	1024,8	109,7	16,1	29,5
0,5	840,5	923,7	83,2	12,2	17,2
0,25	797,8	847,9	50,1	7,4	9,9
0,125	766,6	789,5	22,9	3,4	6,5
0,063	1117,9	1150	32,1	4,7	1,8
0	1761,5	1773,9	12,4	1,8	0,0
		SUMA	680,5	100,0	

Tabuľka 11 Sitový rozbor - Výsivka zo sekundárneho drvenia

Výsivka zo sekundárneho drvenia			Hmotnosť navážky $M_i = 600,4 \text{ g}$		
Veľkosť ôk na site	Hmotnosť sita	Hmotnosť sita + zostatku na site	Hmotnosť zostatku na site R_i	Percento zostatku na site $100-R_i/M_i$	Súhrnné percento prepadu $100-(100-R_i/M_i)$
[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
32	1295,8	1295,8	0,0	0,0	100,0
16	1289,9	1289,9	0,0	0,0	100,0
8	1120,8	1120,8	0,0	0,0	100,0
4	1031,6	1048,9	17,3	2,9	97,1
2	1011,2	1181,7	170,5	28,4	68,7
1	915,1	1040	124,9	20,8	47,9
0,5	840,5	930,6	90,1	15,0	32,9
0,25	797,8	866,6	68,8	11,5	21,5
0,125	766,6	826,4	59,8	10,0	11,5
0,063	1117,9	1151,9	34,0	5,7	5,8
0	1761,5	1796,5	35,0	5,8	0,0
		SUMA	600,4	100,0	

Pri porovnaní výsledkov sitového rozboru s tabuľkou 3 z normy ČSN EN 73 6124 – 1, kde sú požiadavky na zrnitosť kameniva stmelených hydraulických spojivami pre triedu pevnosti $C_{1,5/2}$ a $C_{3/4}$, vidíme že obe dve kameniva spĺňajú požiadavku na zrnitosť a preto ich môžeme použiť bez ďalšej úpravy zrnitosti.

4.3. Návrh zmesi

Z výsledkov sitového rozboru a vynesenej čiary zrnitosti boli navrhnuté 4 zmesi stmelené cementom.

Tabuľka 12 Popis navrhnutých zmesí

Zmes	Kamenivo	Cement	Množstvo cementu [%]
1	Výsivka primárna	32,5	3
2	Výsivka primárna	32,5	5
3	Výsivka primárna	32,5	7
4	Výsivka sekundárna	42,5	3

4.4. Optimálna vlhkosť

Ďalším krokom bola proctorova skúška, ktorou zistíme maximálnu objemovú hmotnosť a optimálnu vlhkosť. Skúška bola vyhotovená podľa normy ČSN EN 13286 – 2 Nestmelené zmesi a zmesi stmelené hydraulickými spojivami. Skúška by mala byť vykonaná na všetkých zmesiach, avšak bola vykonaná iba na zmesiach 1 a 4 z dôvodu nedostatku skúšobného materiálu. Pre zmes 2 a 4 bola optimálna vlhkosť a maximálna objemová hmotnosť odvodená zo zmesi 1.

K zhutneniu zmesí bol použitý Proctor modifikovaný a forma typu A, ktorá sa používa pre zmesi s maximálnou veľkosťou zrna 16 mm. V závislosti na tejto kombinácii boli podľa normy určené ďalšie charakteristiky skúšky.

Tabuľka 13 špecifikácie skúšky Proctor modifikovaný

Proctor modifikovaný	forma typ A
Vnútorý priemer formy [mm]	100
Výška formy [mm]	120
Hmotnosť pechu [kg]	4,5
Priemer pechu [mm]	50
Výška dopadu [mm]	457
Počet vrstiev	5
Počet úderov na vrstvu	25

Na skúšku bolo pripravené cca 15 kg materiálu z každej zmesi. Obsah spojiva bol počítaný k objemovej hmotnosti vysušeného materiálu. Následne sa materiál rozdelil na 5 častí a ku každej pridané príslušné množstvo vody aby bola dosiahnutá potrebná vlhkosť. Zmes sa dôkladne premiešala a nechala 10 až 15 minút odstáť, aby vlhkosť bola rovnomerná v celom objeme zmesi.

Do formy bol materiál vkladáný v takom množstve aby po hutnení 25 údermi vyplnil približne jednu pätinu formy. Tento postup bol opakovaný 5krát. Po hutnení sa odobrala horná násada z formy, teleso sa zarovnalo pomocou oceľového rovnátka a odvážilo sa aj s formou. Po odvážení bola zo stredu odobratá vzorka na zistenie skutočnej vlhkosti zmesi.

Tento postup bol opakovaný pre všetky vzorky.

Z hmotnosti a objemu telesa bola vypočítaná objemová hmotnosť vlhkej zmesi, ktorá sa pomocou skutočnej hodnoty vlhkosti prepočítala na objemovú hmotnosť suchej zmesi. Následne bol vytvorený bodový graf závislosti skutočnej vlhkosti a objemovej hmotnosti suchej zmesi a jednotlivé vody boli preložené krivkou. Z vrcholu krivky bola určená optimálna vlhkosť zmesi.



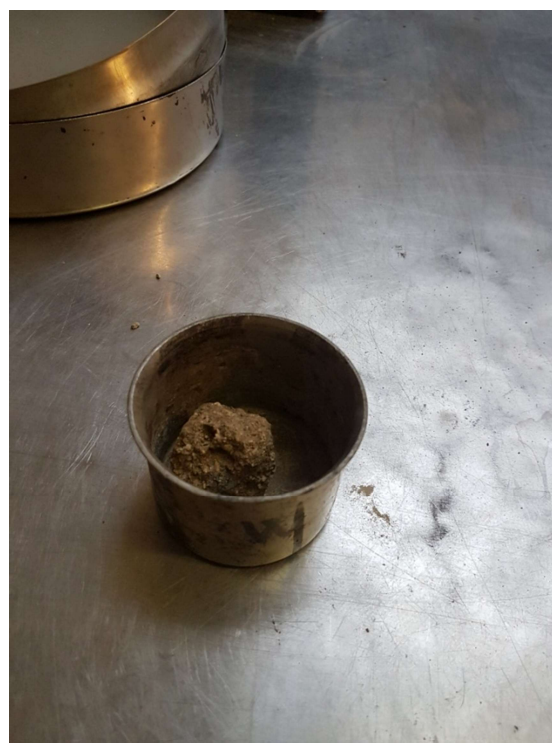
Obrázok 22 hutnenie zmesi



Obrázok 23 pripravená zmes na hutnenie s vlhkosťou 10%



Obrázok 21 váženie zhutnenej zmesi



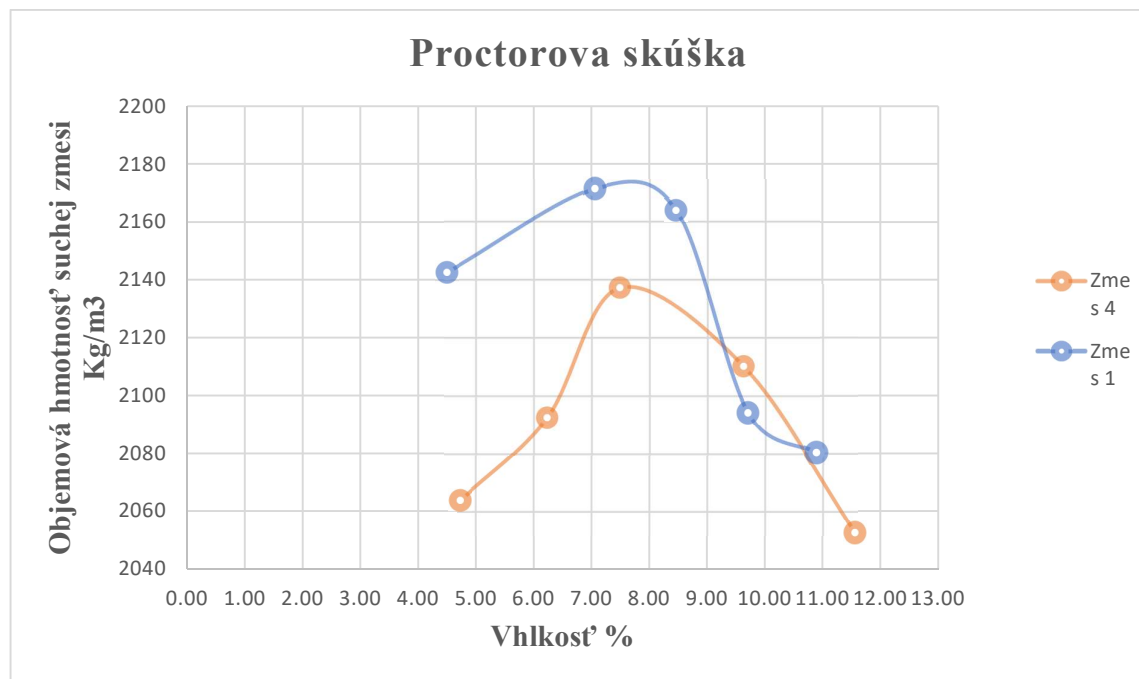
Obrázok 20 odobratie vzorky na zistenie skutočnej vlhkosti

Tabuľka 14 Proctorova skúška - Zmes 1

Zmes 1 - kamenivo 0/16 + 3 % cement 32,5						
Hmotnosť formy $m_1 = 6394$ g				Objem formy $V = 942,5$ cm³		
Zmes	Počiatočná vlhkosť	Hmotnosť formy so zmesou	Hmotnosť suchého vzorku	Skutočná vlhkosť	Objemová hmotnosť vlhkej zmesi	Objemová hmotnosť suchej zmesi
n	w [%]	m₂ [g]	m_w [g]	w [%]	ρ [Kg /m³]	ρ_d [Kg /m³]
1	4,0	8503	2109	4,5	2239	2142
2	6,0	8584	2190	7,1	2325	2171
3	8,0	8605	2211	8,5	2347	2164
4	10,0	8558	2164	9,7	2297	2094
5	12,0	8567	2173	10,9	2306	2080

Tabuľka 15 Proctorova skúška - Zmes 4

Zmes 4 - kamenivo 0/4 + 3 % cement 42,5						
Hmotnosť formy $m_1 = 6394$ g				Objem formy $V = 942,5$ cm³		
Zmes	Počiatočná vlhkosť	Hmotnosť formy so zmesou	Hmotnosť suchého vzorku	Skutočná vlhkosť	Objemová hmotnosť vlhkej zmesi	Objemová hmotnosť suchej zmesi
n	w [%]	m₂ [g]	m_w [g]	w [%]	ρ [Kg /m³]	ρ_d [Kg /m³]
1	4,0	8430	2036	4,7	2161	2064
2	6,0	8488	2094	6,24	2223	2092
3	8,0	8558	2164	7,49	2297	2137
4	10,0	8573	2179	9,63	2313	2110
5	12,0	8551	2157	11,59	2290	2052



Graf 4 Proctorova skúška - optimálna vlhkosť

Z výsledkov proctorovej skúšky som určil optimálnu vlhkosť a maximálnu objemovú hmotnosť. Pre zmes 2 a 3 boli výsledky určené na základe podobnosti zo zmesou 1. Kvôli vyššiemu obsahu cementu bola uvažovaná vyššia vlhkosť o 0,5 % oproti zmesi 1. Výsledný návrh optimálnej vlhkosti pre každú zmes môžete vidieť v tabuľke 16.

Tabuľka 16 návrh optimálnej vlhkosti zmesí

	Frakcia kameniva	Druh cementu	Množstvo cementu [%]	Optimálna vlhkosť vzorku [%]
Zmes 1	0/8	32,5	3	8,0
Zmes 2	0/8	32,5	5	8,5
Zmes 3	0/8	32,5	7	8,5
Zmes 4	0/4	42,5	3	7,5

4.5. Výroba skúšobných telies

Výroba skúšobných telies sa riadila normou ČSN EN 13286 – 50 Nestmelené zmesi a zmesi stmelené hydraulickými spojivami – časť 50: Metódy pre výrobu skúšobných telies pomocou Proctorova zariadenia, alebo vibračného lisu.

Zvolený bol valcový tvar telies, vyrobený pomocou Proctorova prístroja. Od každej zmesi 6 skúšobných telies, tri telesá boli určené na skúšku pevnosti v tlaku a tri telesá na skúšku odolnosť proti vode a mrazu. V priebehu práce nastala zmena a bola pridaná skúška na zistenie modulu pružnosti, na ktorú sa použilo z každej zmesi jedno skúšobné teleso, tým pádom zostali z každej zmesi iba dve telesá na skúšku odolnosti proti vode a mrazu.

Zloženie jednotlivých zmesí pre skúšobné telesá je možné vidieť v tabuľke 16 alebo 12.

K výrobe boli použité nasledujúce pomôcky a zariadenia:

- Automatický hutniaci prístroj
- Forma A ($h=120$ mm a $d=100$ mm)
- Ručný hydraul. Lis
- Váha
- Nádoba na miešanie
- Zarovnávacie pravítko

Materiál použitý na výrobu telies bol dopredu vysušený. Zmes na výrobu telies bola vždy namiešaná maximálne na tri skúšobné telesá, jednalo sa približne o 6kg kameniva, po 2 kg na každé teleso. Po presnom zvážení navážky bol pridaný cement a zmes premiešaná. Následne sa pridalo optimálne množstvo vody a zmes sa dôkladne premiešala. Pred hutnením sa nechala zmes oddýchnuť na 10 až 15 minút.

Hutnenie malo rovnaké parametre ako proctorova skúška, tak že sa jednalo o Proctor modifikovaný. Hutnilo sa 25 údermi na každú z piatich vrstiev pechom s priemerom 50 mm, hmotnosťou 4,5 kg a z výšky 457 mm. Po zhutnení poslednej vrstvy sa dal dole nadstavec a povrch sa zarovnal rovnítkom.

Všetky zhutnené telesá boli vytlačené z formy pomocou ručného hydraulického lisu a označené. Všetky šli vytlačiť bez problémov. Telesá sa nedrolili a držali pevne pokope.

Všetky skúšobné telesá boli uskladnené v hrubých plastových vreciach a v uzavretom vlhkom prostredí aby sa zabránilo strate vlhkosti. Potom nasledovalo zranie po dobu najmenej 28 dní.



Obrázok 24 uskladnené skúšobné telesá v igelite



Obrázok 25 vytlačené skúšobné teleso zmes 2

4.6. Pevnosť v tlaku

Skúška na pevnosť v tlaku prebiehal podľa normy ČSN EN 13286 – 41 nestmelené a stmelené zmesi hydraulickými spojivami – Časť 41: Skúšobná metóda pre stanovenie pevnosti v tlaku zmesí stmelenými hydraulickými spojivami.

Všetky telesá boli staršie ako 28 dní.

Pred samotnou skúškou bolo potrebné všetky telesá odvážiť a porovnať s výsledkami váženia v dobe vzniku týchto telies. Strata hmotnosti by nemala presiahnuť 2 % z hmotnosti v dobe vzniku. Toto kritérium bolo splnené u všetkých telies. Ďalšie kritérium sa týka rozmerov telies, kedy skutočná veľkosť telesa musí byť v rozmedzí 0,5 % od určenej veľkosti. Aj toto kritérium bolo splnené u všetkých telies.

Spodný a horný povrch telesa bol ešte dodatočne zarovnaný a bolo na neho položený tlačný nadstavec a pohyblivé ložisko, na zaistenie rovnomerného účinku tlačnej sily.

Telesá boli uložené do stredu automatického hydraulického lisu a zaťažované konštantnou rýchlosťou 1,27 mm/min. Lis ukončil zaťažovanie automaticky keď došlo k porušeniu skúšobného telesa, zaznamenal maximálnu pôsobiacu silu a maximálne pretvorenie telesa. Namerané hodnoty môžete vidieť v tabuľke nižšie.

Tabuľka 17 Výsledky pretvorenia a pôsobiacej sily

	Teleso	Max. síla [kN]	Pretvorenie [mm]
Zmes 1	1.1	16,75	3,15
	1.2	14,79	3,31
	1.3	19,32	2,88
Zmes 2	2.1	34,28	2,83
	2.2	31,31	2,75
	2.3	30,20	2,61
Zmes 3	3.1	38,77	3,5
	3.2	33,34	3,39
	3.3	36,92	2,54
Zmes 4	4.1	33,50	3,41
	4.2	33,61	2,66
	4.4	29,25	2,62

U všetkých skúšobných telies došlo k uspokojivému porušeniu



Obrázok 25 - skúšobné teleso v hydraulickom lisom



Obrázok 26 - porušenie skúšobného telesa 1.1 hydraulickým lisom



Obrázok 27 - porušenie skúšobného telesa 3.1 hydraulickým lisom



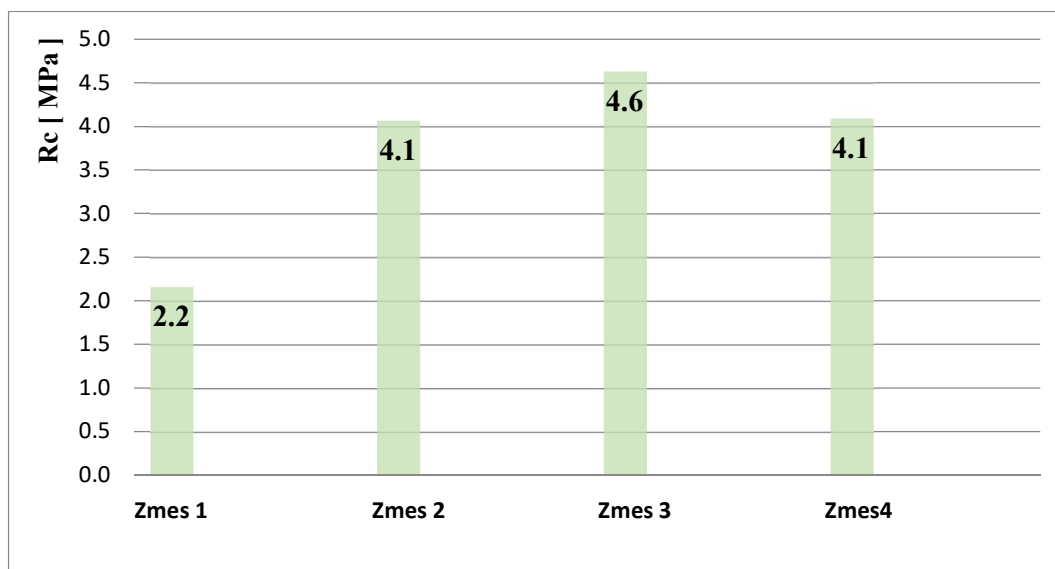
Obrázok 28 - skúšobné teleso po odstránení uvoľnených častí

Výsledné pevnosti v tlaku sú uvedené v tabuľke 18. Kedy ani jedna z výsledných pevností sa oproti vypočítaného priemeru nelíšila o viac ako 15 % a preto všetky namerané hodnoty sú platné. Hodnoty boli zaokrúhlené s presnosťou 0,1 MPa, keď že ani jedna skúšaná zmes neprekročila pevnosť 5 MPa.

Tabuľka 18 výsledné hodnoty pevnosti v tlaku

Teleso	Maximálna tlaková sila F_i [kN]	Plocha $A_c = 7854 \text{ mm}^2$		
		Priemerná tlaková sila F [kN]	Pevnosť tlaku $R_{c,i} = F_i/A_c$ [MPa]	Priemerná pevnosť tlaku $R_c = F/A_c$ [MPa]
1.1	16,75	16,95	2,1	2,2
1.2	14,79		1,9	
1.3	19,32		2,5	
2.1	34,28	31,93	4,4	4,1
2.2	31,31		4,0	
2.3	30,20		3,8	
3.1	38,77	36,34	4,9	4,6
3.2	33,34		4,2	
3.3	36,92		4,7	
4.1	33,50	32,12	4,3	4,1
4.2	33,61		4,3	
4.3	29,25		3,7	

Graf 5 Porovnanie výsledných pevnosti v tlaku



Všetky zmesi vyhoveli na požiadavkám normy ČSN EN 73 6124 – 1 na minimálnu pevnosť v tlaku 2 Mpa a mohli by byť použité v podkladových vrstvách stmelených hydraulickými spojivami. Jedine u zmesi 1 telesa 1.2 bola pevnosť v tlaku iba 1,9 Mpa ale priemer z troch telies vyšiel 2,2 Mpa tak na použitie tejto zmesi by to nemalo vplyv.

Zaujímavo vyzerá porovnanie výsledkov medzi zmesmi 1, 2 a 3, kde sa jedná o totožné kamenivo iba s rozdielnym obsahom cementu. U zmesi číslo 2 spôsobilo 2 % pridanie cementu skoro dvojnásobnú pevnosť v tlaku. Naopak u zmesi číslo 3 už pridanie cementu neprinieslo výrazné zvýšenie pevnosti v tlaku.

U zmesi číslo 4 sa prejavilo použitie cementu s vyššou pevnosťou kedy aj pri obsahu 3 % a maximálnej frakcii kameniva 4 mm vyšla pevnosť v tlaku 4,1 Mpa.

4.7. Odolnosť proti mrazu a vode

Skúška odolnosti voči mrazu a vode prebiehala podľa ČSN EN 73 6124 – 1, Príloha A. Parametre skúšky boli zvolené z tabuľky A.1 a to pre hornú podkladovú vrstvu s indexom mrazu do 350 °C x deň.

Skúšobné telesá boli pred začatím skúšky uložené na plstenú podložku, ktorá bola čiastočne ponorená vo vode. Takto sa nechali kapilárne nasýtiť až prírastok hmotnosti do jednej hodiny neprekročil 1 %. Potom boli vložené do mraziacej skrine kde bola teplota -20 ± 2 °C po dobu 6 hodín. Nasledovalo vybratie telies a premiestnenie na plstenú podložku kde sa nechali po dobu 18 hodín pri teplote 20 až 25 °C. Tento 24 hodinový cyklus bol opakovaný 10 krát.

Po prevedení cyklov nasledovala skúška pevnosti v tlaku. Táto skúška prebieha za rovnakých kritérií ako skúška pevnosti v tlaku opísaná v kapitole 3.6 . Telesá po zmrazovacích cykloch musia dosahovať aspoň 85 % pevnosť v tlaku oproti telesám ktoré zmrazovaniu vystavené neboli.



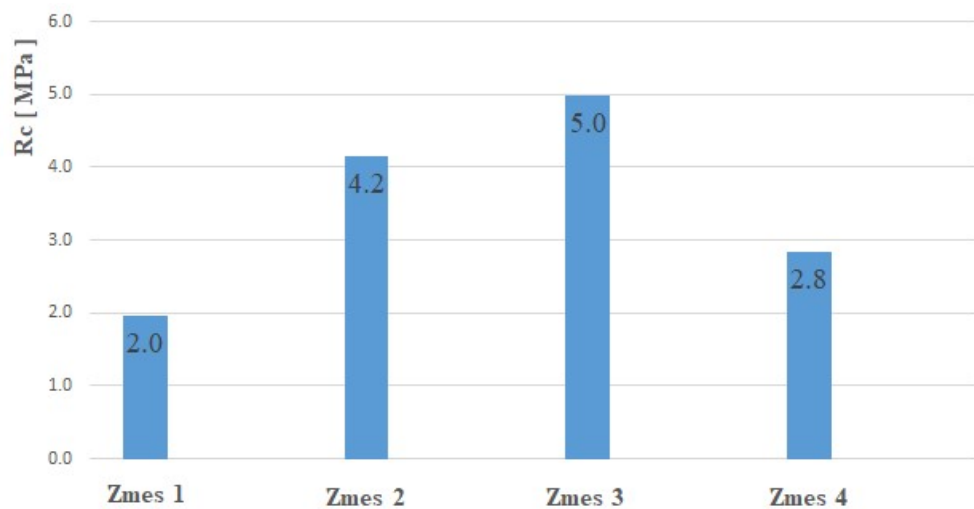
Obrázok 31- skúšobné telesá na plstenej podložke



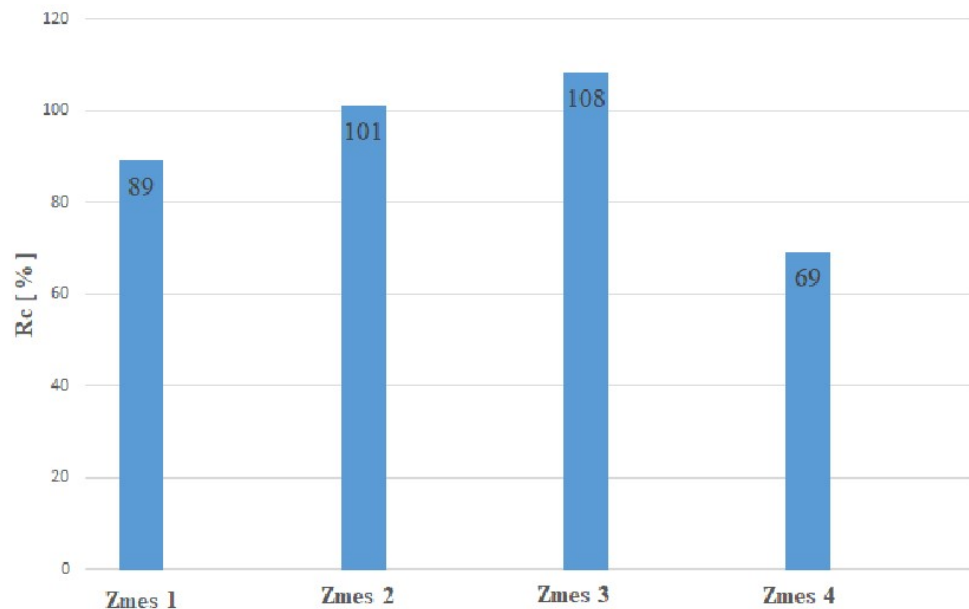
Obrázok 30- skúšobné teleso v mraziacej skrini

Tabuľka 19- Výsledky skúšky odolnosti proti mrazu a vode

Plocha $A_c = 7854 \text{ mm}^2$						
Teleso	Maximálna tlaková sila	Priemerná tlaková sila	Pevnosť v tlaku po zmrazovacích cykloch $R_{cf,i} = F_{i,f}/A_c$ [Mpa]	Priemerná pevnosť v tlaku po zmrazovacích cykloch $R_{cf} = F/A_c$ [Mpa]	Zrovnávací pevnosť v tlaku $R_c = F/A_c$ [Mpa]	porovnanie pevností v tlaku $100/R_c * R_{cf}$ [%]
	F_i [kN]	F [kN]				
1.4	15,09	15,42	1,9	2,0	2,2	89
1.5	15,75		2,0			
2.4	30,11	32,61	3,8	4,2	4,1	101
2.5	35,11		4,5			
3.4	43,07	39,09	5,5	5,0	4,6	108
3.5	35,11		4,5			
4.4	24,61	22,28	3,1	2,8	4,1	69
4.5	19,94		2,5			



graf 6- pevnosť zmesi po skúške odolnosti proti mrazu a vode



graf 7- Výsledky skúšky odolnosti proti mrazu a vode s porovnaním ku normálnej pevnosti

Na výsledkoch skúšky vidíme, že tri zo štyroch zmesí skúske odolnosti proti mrazu a vode vyhoveľi, ich pevnosť po zmrazovacích cykloch dosiahla aspoň 85 % pevnosti v tlaku. Jedine zmes štyri nevyhovela keď dosiahla iba 69 % pevnosti v tlaku čo odpovedá pevnosti 2,8 Mpa, tak že ešte stále spĺňa požadovanú minimálnu pevnosť 2 Mpa na použitie v podkladových stmelených vrstvách.

Skúška prebiehala iba na dvoch skúšobných telesách z každej zmesi tak že výsledky nemôžeme brať ako preukazné ale dávajú nám pohľad na chovanie zmesi po účinkoch mrazu a vody. Je zaujímavé, že pevnosť zmesi dva a tri dokonca mierne narástla, ale nepovedal by som že to bolo zapríčinené ďalším zraním telies. Prípade zmesi štyri, mohol byť výsledok zníženej pevnosti spôsobený poškodením telies alebo chybou pri ich výrobe. Odporučil by som skúšku zopakovať na viac skúšobných telesách a výsledky znova prehodnotiť.

4.8.Modul pružnosti

Stanovenie modulu pružnosti sa riadilo požiadavkami normy ČSN EN 12286 – 7 Nestmelené zmesi a zmesi stmelené hydraulickými spojivami . Časť ý: Skúška nestmelených zmesí cyklickým zaťažovaním v triaxiálnom prístroji.

Použitá bola skúšobná metóda B – zjednodušený režim napätí s cyklickým osovým deviatorom napätia a konštantným komorovým tlakom (variant s úrovňou vysokého napätia).

Bohužiaľ triaxiál určený na tento typ skúšok a materiálov bol v čase konania nefunkčný a tak skúška prebiehala na triaxiály určenom pre asfaltové zmesi, ktorý má mierne iné parametre ale na skúšku bol postačujúci.

Maximálny deviator napätia σ_d bol nastavený na 340 kPa. Táto hodnota simuluje napätie, ktorému je bežne vystavený materiál v teréne. Počas skúšky bol konštantný komorový tlak σ_3 na hodnote 70 kPa. Aj keď norma uvádza 20 000 cyklov na prípravu vzorku, ktorý je určený pre nestmelené zmesi, bolo na prípravu vzorkou použitých 5000 cyklov. Dôvod tejto zmeny je v chovaní zmesí stmelených hydraulickými spojivami, ktoré majú omnoho skorej ustálené

pružné deformácie ako je to u zmesí nestmelených.



Obrázok 32- Príprava telesa na skúšku a triaxiálny prístroj

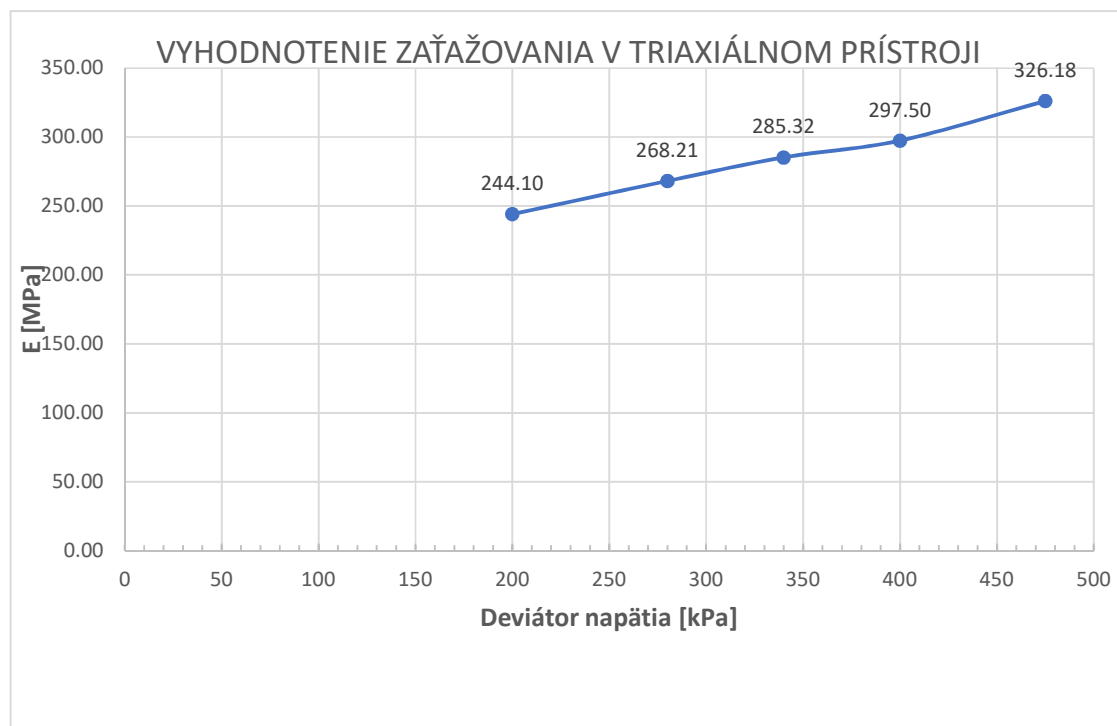
Skúšobné telesá boli testované iba na najvyšší komorový tlak 150 kPa. Pre každý rozsah deviátoru napätia ako sú uvedené v norme tabuľke 5, bolo vykonaných 100 cyklov.

Kompletný záznam skúšky je možné nájsť prílohe.

Počas skúšky sa vyskytlo niekoľko problémov a preto jediné výsledky, ktoré sú práci uvedené sú pre zmes 1.

Tabuľka 20 - výsledky triaxiálnej skúšky pre zmes 1

Cyklus	komorový tlak konštantný σ_3 [kPa]	deviátor napätia σ_{dmax} [kPa]		zvislé napätie σ_{1max} [kPa]	Modul pružnosti E		
		min	max		priemer	smer.od	var.koef.
					[MPa]	[MPa]	%
1	150	0	200	350	244.10	27.45	11.25
2	150	0	280	430	268.21	11.51	4.29
3	150	0	340	490	285.32	9.89	3.47
4	150	0	400	550	297.50	10.42	3.50
5	150	0	475	625	326.18	13.79	4.23



graf 8 výsledok zaťažovania triaxiálnom prístroji

Je veľká škoda, že pre ostatné zmesi sa táto experimentálna skúška nepodarila, bolo by zaujímavé porovnať výsledky zmesi 1 a zmesi 4 a porovnať modul pružnosti zmesí kde sú rozdielne frakcie kameniva.

Výsledok tejto skúšky nám dáva obraz o module pružnosti tejto stmelenej zmesi cementom a je možné ho porovnať s modulom pružnosti nestmelených vrstiev a to by mohlo mať budúcnosti pozitívny vplyv pri návrhu vozoviek so stmelenými vrstvami a uľahčiť ich návrh. Modul pružnosti sa nachádza na medzi návrhovým modulom pružnosti štrkodrti a spevnenej zeminy.

Tabuľka 21 návrhový modul pružnosti nestmelených zmesí z TP 170

Konštrukčná vrstva	Modul pružnosti [MPa]	Minimálna hrúbka vrstvy [mm]
MZK	600	150
ŠD	400	150
MZ	150	150
ŠP	120	150

4.9. Súhrnné vyhodnotenie skúšok

V tabuľke 22 sa nachádzajú súhrnné výsledky všetkých charakteristík zmesí, ktoré boli vykonané v praktickej časti diplomovej práce.

Tabuľka 22- Súhrn charakteristických vlastností navrhnutých zmesí

	Frakcia	obsah spojiva	Pd [Kg /m3]	w _{opt} [%]	Pevnosť v tlaku Rc [MPa]	Pevnosť tlaku Rcf [MPa]	Porovnanie pevností v tlaku [%]	Modul pružnosti Er [Mpa]
Zmes 1	0/16	3 % 32,5 R	2180	8,0	2,2	2,0	89	300
Zmes 2	0/16	5 % 32,5 R	-	8,5	4,1	4,2	101	-
Zmes 3	0/16	7 % 32,5 R	-	8,5	4,6	5,0	101	-
Zmes 4	0/8	3 % 42,5 R	2137	7,5	4,1	2,8	69	-

Záver

Hlavným cieľom tejto diplomovej práce bolo zistiť reálne možnosti použitia vedľajších materiálov z výroby kameniva do konštrukčných vrstiev vozovky. Toto kamenivo bolo použité do zmesí stmelených cementom.

Najdôležitejším kritériom pre tieto zmesi bolo splniť minimálnu pevnosť v tlaku pre triedu $C_{1,5/2}$ a to sú 2 MPa. Po splnení tohto požiadavku môžu byť použité ako spodné podkladové vrstvy pre asfaltové komunikácie s malým dopravným zaťažením. Ďalšou možnosťou použitia je ako podkladových vrstiev chodníkov, ale môžu sa použiť aj do podkladových vrstiev parkovísk rôzne iné odstavné plochy pre dopravu.

V teoretickej časti práce boli popísané ako nestmelené tak aj stmelené konštrukčné vrstvy, spôsob akým fungujú. Pri vrstvách stmelených hydraulickými spojivami sú podrobne popísané vrstvy stmelené cementom. Je opísaná ich klasifikácia, postup jednotlivých skúšok pre lepšie opísanie týchto zmesí ale aj skúšky kontrolné a preukazné. Ďalej sú opísané vlastnosti použitého kameniva jeho rozdelenie a technológie, ktoré sa používajú pri jeho získaní.

Z výsledkov skúšky pevnosti v tlaku vyplýva, že všetky navrhnuté zmesi stmelené cementom dosiahli minimálnu pevnosť 2 Mpa. Najväčšia dosiahnutú pevnosť mala zmes tri a to 4,6 Mpa a aj zmesi dva a tri mierne presiahli hranicu 4 MPa a to konkrétne 4,1 MPa a je ich možné zaradiť do triedy $C_{3/4}$. To výrazne zvyšuje možnosť ich použitia a dajú sa bez väčších obmedzení používať aj do horných podkladových vrstiev.

Vplyv obsahu spojiva na pevnosť zmesí je vidieť na porovnaní výsledkov zmesí jeden, dva a tri, ktoré tvorí rovnaké kamenivo. Kedy zvýšenie obsahu cementu o 2 % a to z troch percent na päť, viedlo zdvojnásobeniu pevnosti v tlaku. Porovnanie zmesí dva a tri ďalej ukazuje, že pridávanie ďalšieho cementu výslednú pevnosť výrazne nezvyšuje. U zmesi štyri kde bol použitý cement vyššej pevnosti 42,5 R bolo dosiahnuté pevnosti 4,1 Mpa aj bez zastúpenia zín väčších frakcií. Tento návrh zmesi by však nemusel byť ideálny, lebo pri skúške odolnosti proti mrazu a vode dosiahol iba 69 % pôvodnej pevnosti, čo nesplňuje kritérium normy 85 % pôvodnej pevnosti. Ostatné tri zmesi kde bol použitý zmesový cement 32,5 vykazujú pomerne identické hodnoty pevnosti oproti pôvodnej. Nemyslím si, že prípade zmesi číslo štyri treba vyvodzovať nepriaznivé závery a do budúcnosti podobný návrh nepoužívať, nakoľko skúška bola

robená iba dvoch skúšobných telesách z každej zmesi a mohlo dôjsť aj k poškodeniu telies a skresleniu pevnosti.

Praktická časť končila experimentálnym zistením modulu pružnosti pomocou triaxiálneho prístroja. Zistenie modulu pružnosti je veľmi prínosné do budúcnosti, ak budú stmelené zmesi z drobného, druhotného alebo recyklovaného kameniva použité ako ekvivalent k zmesiam nestmeleným v podkladových vrstvách. Modul pružnosti by uľahčil návrh vrstiev s použitím stmelených zmesí. Bohužiaľ zo štyroch skúšaných zmesí sa podarilo určiť iba modul pružnosti pre zmes 1. Kde výsledný modul pružnosti sa nachádzal medzi hodnotami štrkodrtie a mechanicky spevnenej zeminy.

Pri interpretácii výsledkov skúšok treba byť opatrný pretože, všetky prebiehali v laboratórnom prostredí a výsledky by mohli byť mierne nadhodnotené.

Ekonomický prínos používania drobného kameniva alebo vedľajších materiálov z výroby kameniva do vrstiev stmelených hydraulickými spojivami pre triedu pevnosti $C_{1,5/2}$ a $C_{3/4}$ oproti dnešným preferovaným frakciám 0/22 a 0/32, je skoro polovičná cena tohto materiálu. Pri zrovnaní s vrstvami nestmelenými je cena podobná štrkodrti. Samozrejme záleží od regiónu a konkrétneho dodávateľa, nakoľko sa ceny môžu líšiť.

Ekologický prínos by bol šetrení kvalitného kameniva a zároveň by klesol objem skládok tohto materiálu.

Zoznam použitých zdrojov

- [1] VARAUS, M: *Pozemní komunikace II – Modul I*. Brno 2005
- [2] ZAJIČEK, Jan. *Technologie stavby vozovek*. Praha: ČKAIT, 2014. 392 s. ISBN 978-80-87438-59-6.
- [3] PODKLADNÍ VRSTVY A NAVRHOVÁNÍ VOZOVEK: *Realizace stave pozemních komunikací* [online]. In: KUDRNA, Jan. Brno, 2011 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: <http://www.vzdelavanimkekvalite.cz/PDFs/Podkladn%C3%AD%20vrstvy.pdf>
- [4] ČSN EN 14227 – 1: *Směsi stmelené hydraulickými pojivy – Specifikace - Část 1: směs z kameniva stmelené cementem*. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [5] ČSN EN 73 6124 – 1: *Stavba vozovek – Vrstvy ze směsí stmelěných hydraulickými pojivy – Část 1: Provádění kontrola shody*. Praha, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [6] ČSN EN 13286 – 2: *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška*. Praha, Český normalizační institut, 2011.
- [7] ČSN EN 13286 – 41: *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsí stmelěných hydraulickými pojivy* Praha, Český normalizační institut, 2004.
- [8] ČSN EN 13286 – 7: *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 7: Zkouška nestmelených směsí cyklickým zatěžováním v triaxiálním přístroji*. Praha, Český
- [9] *Magnetická prosévačka* [online]. 2018 [cit. 2018-12-14]. Dostupné z <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/elektro-magneticka-prosevaccka.html>
- [10] *Testovanie zmesí* [online]. 2018 [cit. 2018-12-15]. Dostupné z <http://www.haridarshan.co.in/soil-testing-instruments.html>
- [11] *Triaxiál prístroj* [online]. 2018 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z <https://www.gdsinstruments.com/gds-products/gds-enterprise-level-dynamic-triaxial-testing-system>
- [12] *Technické podmínky TP 210 – Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací*
- [13] *Technologie využití a zpracování surovin – Kamenivo*, citace 16.12.2016. Dostupné z <http://geologie.vsb.cz>

- [14] *Současne perspektivy a potenciál recyklace stavebních a demoličních materialu*, citace 21.12.2018. Dostupné z <http://lomyatezba.cz/>
- [15] Recykláty ze stavebních materiálů jako alternativa k přírodnímu kamenivu, 2012. *TOP EXPO* [online]. [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: http://www.top-expo.cz/domain/top-expo/files/spsb-2012/prednasky/skopan_miroslav.pdf.
- [16] ČSN EN 933 – 1: *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část I: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. Praha, Český normalizační institut, 2012
- [17] *Zkušební lis* [online].2018 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/hydraulicke-zkusebni-lisy-pro-zkousky-betonu-tlakem.html>
- [18] *Lomový kámen* [online].2018 [cit. 2018-11-24]. Dostupné z <http://www.ornoxinvest.sk/>
- [19] *Technicke podminky TP 170 – Navrhování vozovek pozemních komunikací*
- [20] Feasibility study of cement treated 0 – 8 mm recycled aggregates from construction and demolition waste as road base layer, 2016. *Road Materials and Pavement Design* [online]. 678-692 [cit. 2019-01-11]. Dostupné z: www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/14680629.2015.1108221?scroll=top&needAccess=true
- [21] Aktuální stav u provádění podkladních vrstev [online].2018 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z http://silniciseminar.cz/files/14_Stehlik_Aktualni-stav-u-provad-ni-pokladnich-vrstev.pdf
- [22] *Ceník drceného kameniva*[online].2019 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z <http://www.rosa.cz>

Zoznam obrázkov

Obrázok 1 Moohrova kružnica pre nestmelené zmesi [1].....	13
Obrázok 2 Moohrova kružnica pre stmelené vrstvy [2].....	15
Obrázok 3 Prístroj na presievanie [10].....	21
Obrázok 4 popis proctorového mažiara [3].....	22
Obrázok 5 automatický stroj na hutnenie zmesi [11].....	23
Obrázok 6 Hydraulický skúšobný lis [18].....	25
Obrázok 7 Neuspokojivé poškodenie valcových telies [7].....	26
Obrázok 8 Uspokojivé poškodenie [7].....	27
Obrázok 9 triaxiálny prístroj [11]	29
Obrázok 10- Kameňolom [18].....	31
Obrázok 11 rez čeľust'ovým drvičom [13].....	32
Obrázok 12 rez kužeľovým drvičom [20]	32
Obrázok 13- rez odrazovým drvičom [13]	33
Obrázok 14 ťažené kamenivo [18].....	34
Obrázok 15 štrkovňa [18]	34
Obrázok 16- schéma recyklačnej linky [15].....	34
Obrázok 18 výsivka z primárneho drevenia.....	40
Obrázok 17 výsivka zo sekundárneho drevenia	40
Obrázok 19 presievací prístroj	42
Obrázok 21 odobratie vzorky na zistenie skutočnej vlhkosti	46
Obrázok 20 váženie zhutnenej zmesi	46

Obrázok 23hutnenie zmesi	46
Obrázok 22pripravená zmes na hutnenie s vlhkosťou 10%	46
Obrázok 24 uskladnené skúšobné telesá v igelite	50
Obrázok 25vytlačené skúšobné teleso zmes 2	50
Obrázok 26 porušenie skúšobného telesa 1.1 hydraulickým lisom	52
Obrázok 28-porušenie skúšobného telesa 3.1 hydraulickým lisom	52
Obrázok 27skúšobné teleso po odstránení uvoľnených častí	52
Obrázok 29-Stlačenie skúšobného telesa 2.3 v hydraulickom lise	52
Obrázok 30- skúšobné teleso v mraziacej skrini.....	54
Obrázok 31- skúšobné telesá na plstenej podložke.....	54
Obrázok 32- Príprava telesa na skúšku a triaxiálny prístroj	57

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 používané nestmelené podľa zrnitosti [3].....	14
Tabuľka 2 Zrnitosť zmesi pre triedu pevnosti $C_{6/8}$ a frakcie 0/32[4]	16
<i>Tabuľka 3 Zrnitosť zmesi pre triedu pevnosti $C_{1,5/2}$ a $C_{3/4}$ [4].....</i>	<i>17</i>
Tabuľka 4 minimálny obsah spojiva podľa max. veľkosti kameniva	17
Tabuľka 5 Zatriedenie stmelenej zmesi cementom podľa pevnosti v tlaku [4].....	19
Tabuľka 6 Použitie zmesí stmelených hydraulickými spojivami vo vozovke [5]	20
Tabuľka 7 parametre Proctorovej skúšky podľa jej typu [3].....	21
Tabuľka 8 možnosti použitia recyklátu do konštrukčnej vrstvy [14].....	36
Tabuľka 9 - Veľkosť a poradie sít.....	41
Tabuľka 10 Sitový rozbor- Výsivka z primárneho drevenia	43
Tabuľka 11 Sitový rozbor - Výsivka zo sekundárneho drevenia	43
Tabuľka 12 Popis navrhnutých zmesí	44
Tabuľka 13 špecifikácie skúšky Proctor modifikovaný	45
Tabuľka 14 Proctorova skúška - Zmes 1	47
Tabuľka 15 Proctorova skúška - Zmes 4	47
Tabuľka 16 návrh optimálnej vlhkosti zmesí	48
Tabuľka 17 Výsledky pretvorenia a pôsobiacej sily	51
Tabuľka 18 výsledné hodnoty pevnosti v tlaku	53
Tabuľka 19- Výsledky skúšky odolnosti proti mrazu a vode	55
Tabuľka 20 - výsledky triaxiálnej skúšky pre zmes 1	58
Tabuľka 21 návrhový modul pružnosti nestmelených zmesí z TP 170	59
Tabuľka 22- Súhrn charakteristických vlastností navrhnutých zmesí	60

Zoznam grafov

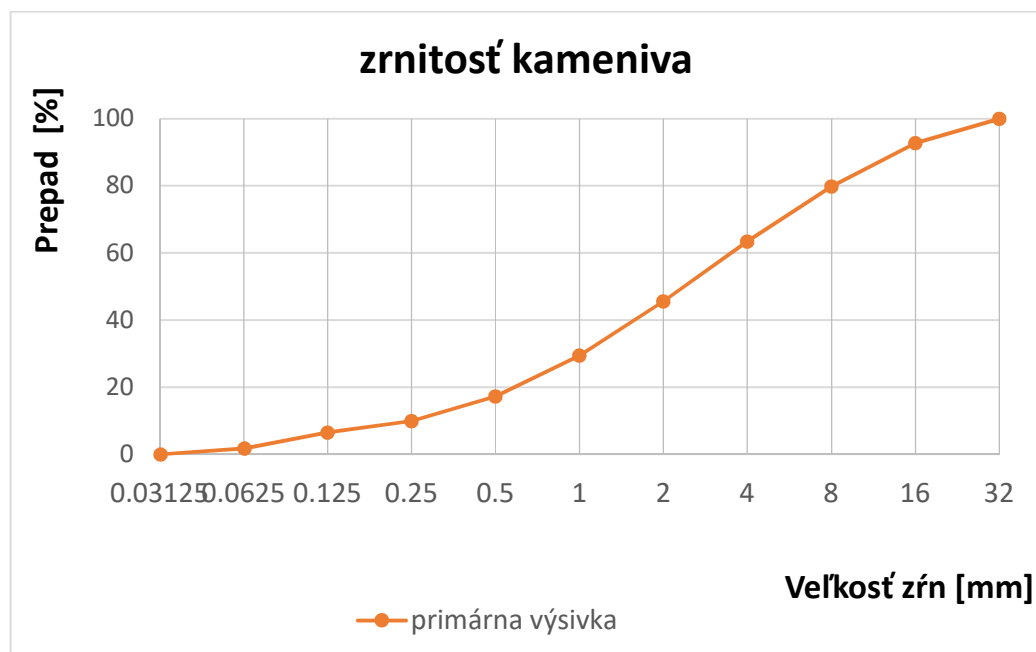
Graf 1 závislosť suchej objemovej hmotnosti na vlhkosti [12]	24
Graf 2 zrnitosť zmesi s pevnosťou C1,5/2 a C3/4 [21]	35
Graf 3 zrnitosť kameniva.....	42
Graf 4 Proctorova skúška - optimálna vlhkosť	48
Graf 5 Porovnanie výsledných pevností v tlaku	53
Graf 6- pevnosť zmesí po skúške odolnosti proti mrazu a vode.....	55
Graf 7- Výsledky skúšky odolnosti proti mrazu a vode s porovnaním ku normálnej pevnosti.....	56
Graf 8 výsledok zaťažovania triaxiálnom prístroji	58

Prílohy

Príloha A

Sitový rozbor – výsivka z primárneho drvenia

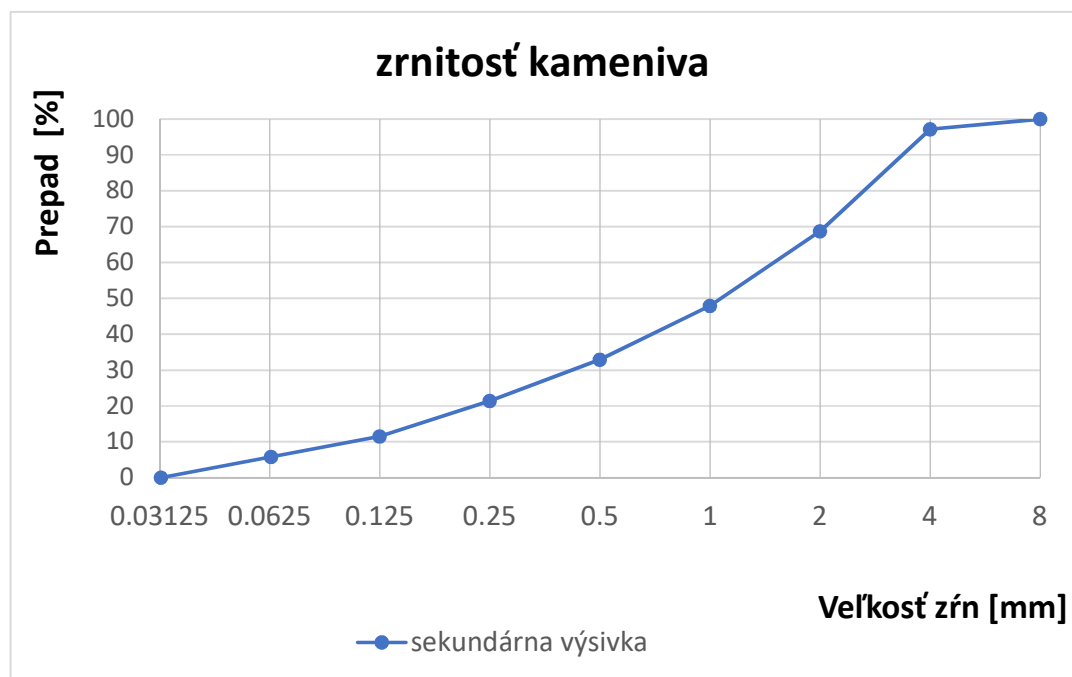
Výsivka z primárneho drvenia			Hmotnosť navážky $M_i = 680,5 \text{ g}$		
Veľkosť ôk na site	Hmotnosť sita	Hmotnosť sita + zostatku na site	Hmotnosť zostatku na site R_i	Percento zostatku na site $100 - R_i / M_i$	Súhrnné percento prepadu $100 - (100 - R_i / M_i)$
[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
32	1295,8	1295,8	0	0	100
16	1289,9	1339,4	49,5	7,3	92,7
8	1120,8	1208,1	87,3	12,8	79,9
4	1031,6	1143,8	112,2	16,5	63,4
2	1011,2	1132,3	121,1	17,8	45,6
1	915,1	1024,8	109,7	16,1	29,5
0,5	840,5	923,7	83,2	12,2	17,2
0,25	797,8	847,9	50,1	7,4	9,9
0,125	766,6	789,5	22,9	3,4	6,5
0,063	1117,9	1150	32,1	4,7	1,8
0	1761,5	1773,9	12,4	1,8	0
		SUMA	680,5	100	



Príloha B

Sitový rozbor – výsivka zo sekundárneho drvenia

Výsivka zo sekundárneho drvenia			Hmotnosť navážky $M_i = 600,4 \text{ g}$		
Veľkosť ôk na site	Hmotnosť sita	Hmotnosť sita + zostatku na site	Hmotnosť zostatku na site R_i	Percento zostatku na site $100-R_i/M_i$	Súhrnné percento prepadu $100-(100-R_i/M_i)$
[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
32	1295,8	1295,8	0	0	100
16	1289,9	1289,9	0	0	100
8	1120,8	1120,8	0	0	100
4	1031,6	1048,9	17,3	2,9	97,1
2	1011,2	1181,7	170,5	28,4	68,7
1	915,1	1040	124,9	20,8	47,9
0,5	840,5	930,6	90,1	15	32,9
0,25	797,8	866,6	68,8	11,5	21,5
0,125	766,6	826,4	59,8	10	11,5
0,063	1117,9	1151,9	34	5,7	5,8
0	1761,5	1796,5	35	5,8	0
		SUMA	600,4	100	



Príloha C

Modul Pružnosti

riadok	Normované hodnoty			Namerané hodnoty				
	komorový tlak	deviátor napätia σ_{dmax}	zvislé napätie	komorový tlak	deviátor napätia	zvislé napätie	Pomerné pretvorenie	Modul pružnosti
	σ_3	σ_{dmax}	σ_{1max}	σ_3	σ_{dmax}	σ_{1max}	ϵ	E
	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[mm]	[MPa]
1	150	200	150	150,67	204,15	354,82	0,0013	244,10
2	150	280	150	149,95	288,57	438,52	0,0016	268,21
3	150	340	150	149,82	351,06	500,88	0,0018	285,32
4	150	400	150	149,74	412,10	561,84	0,0019	297,50
5	150	475	150	150,28	489,68	639,96	0,0020	326,18

