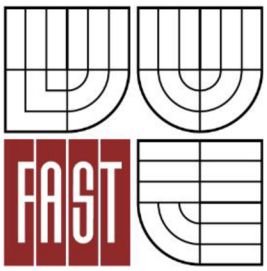
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

NÁVRH STMELENÝCH ZMESÍ DO VOZOVIEK

DESIGN OF THE BOUND MIXTURES TO PAVEMENTS

BAKALÁRSKA PRÁCA
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — URBAN HEPNER
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. DUŠAN STEHLÍK, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Urban Hepner
Název	Návrh stmelených směsí do vozovek
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2015
Datum odevzdání bakalářské práce	27. 5. 2016

V Brně dne 30. 11. 2015

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ fakulta stavební DĚKANÁT -1-

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

v.z.

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

ČSN EN 13286-2 Nestmelené směsi - Proctorova zkouška
ČSN EN 14227-1 Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 1: Směsi stmelené cementem
ČSN EN 14227-5 Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 5: Směsi stmelené hydraulickými silničními pojivy
veřejně přístupné články a literatura z internetu
výzkumné zprávy zabývající se danou problematikou
diplomové práce z minulých let zabývající se podobnou problematikou
sborníky českých a zahraničních technických konferencí
apod.

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Cílem práce je sledování vlivu tvaru zkušebních těles při zkoušení pevností v prostém tlaku a příčném tahu. Tato práce vychází z aktuálních požadavků praxe, kdy se neustále diskutuje o tom, jestli na zkoušení pevnosti v prostém tlaku použít krychle nebo válce a jakých rozměrů a poměrů průměru a výšky těles. Při určitých hodnotách pevností se již výsledky značně liší. Poměr teoretické a praktické části práce 40:60%

Struktura bakalářské/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).

.....

Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa venuje sledovaniu vlyvu tvaru skúšobného telesa stmelených zmesí pri skúšaní pevnosti v prostom tlaku. Teoretická časť práce sa venuje stmeleným zmesiam hydraulickým spojivom, skuške pevnosti v prostom tlaku a rozoberá zahraničné výskumy vedené na tému pomeru pevností medzi skúšobným telesom valca a kocky. Praktická časť bakalárskej práce opisuje prípravu zmesy pre výrobu skúšobných telies, laboratórne skúšky vedené na pripravenej zmesy, výrobu skúšobných telies a následnému testovaniu pripravených telies pevnosti v tlaku. Na záver sú výsledky zo skúšok pevnosti v prostom tlaku vyhodnocované a porovnané s výskumami v zahraničí.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Stmelené zmesy hydraulickým pojivom, válcová a kocková pevnosť, pevnosť v prostom tlaku, Proctor modifikovaný, sitový rozbor.

ABSTRACT

The bachelor thesis focuses on the monitoring of the impact of the shape on the tested bound mixture solid during the strength tests in an uniaxial stress. The theoretical part is devoted to the hydraulic binders bound mixtures, strength test in the uniaxial stress and furthemore discusses the foreign research concerning the topic of the strength ratio between a cylinder solid and a cubical solid. Practical part of the thesis describes the act of preparation of a mixture for the production of the test solids, laboratory tests provided on the prepared mixture, the production of the test solids and finally the following tests of the prepared solids strength in the uniaxial stress. All the results from the tests of the strenght in the uniaxial stress are in the end evaluated and compared to the foreign research.

KEYWORDS

Hydraulically bound mixtures, cube and cylinder compressive strength, strength in pure compression, Proctor modified, sieve analysis.

Bibliografická citácia VŠKP

Urban Hepner *Návrh stmelených zmesí do vozoviek.* Brno, 2016. 50 s., Bakalárská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedúci práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

ČESTNÉ VYHLÁSENIE:

Vyhlasujem, že som bakalársku prácu spracoval samostatne a že som uviedol všetky použité informačné zdroje.

V Brne dňa 20.5.2016

.....

podpis autora
Urban Hepner

PREHLÁSENIE O ZHODE LISTINNEJ A ELEKTRONICKEJ FORMY VŠKP

Prehlasujem

Prehlasujem, že elektronická forma odevzdaná bakalárskej práce je zhodná s odovzdanou listinnou formou.

V Brně dne 20.5.2016

.....

podpis autora
Urban Hepner

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 prevádzaní laboratorných skúšok.

OBSAH

1 Úvod a ciel práce 11

2 Teoretická časť 12

2.1 Zmesi stmelené hydraulickým spojivom 12

2.2 Zmes stmelená cementom 12

2.3 Cement 13

2.3.1 Výroba cementu 13

2.3.2 Druhy cementov 14

2.4 Požiadavky na materiál stmelenej zmesi 16

2.4.1 Kamenivo 16

2.4.2 Spojivo 17

2.4.3 Prímesi 17

2.4.4 Zámesová voda 17

2.4.5 Prísady 17

2.5 Klasifikácia zmesí stmelených cementom 17

2.5.1 Obsah spojiva 18

2.5.2 Vlhkosť 18

2.5.3 Zrnitosť zmesi 18

2.5.4 Pevnosť a modul pružnosti 18

2.5 Pevnosť v tlaku stmelenej zmesi cementom 20

2.5.1 Podstata skúšky 20

2.5.2 Skúšobný lis 21

2.5.3 Priebeh skúšky 21

2.5.4 Posúdenie typu porušenia 22

2.6 Pomer pevností v tlaku valca a kocky 25

2.6.1 Vplyv geometrie skúšobného telesa 25

2.6.2 Účinky pevnosti zmesi na pomer pevností telies v tlaku 26
2.6.3 Smer zaťaženia a charakteristiky skúšobného lisu 27
2.6.4 Druh kameniva 27
2.6.5 Metóda výroby skúšobných telies 28
3 Praktická časť 29
3.1 Príprava zmesi 29
3.2 Skúška zrnitosti 30
3.3 Proctor modifikovaný 33
3.4 Výroba skúšobných telies 37
3.4.1 Výroba telies v tvare valca 37
3.4.2 Výroba telies v tvare kocky 38
3.5 Skúška pevnosti v tlaku 39
3.5.1 Skúšanie pevnosti v tlaku kociek 41
3.5.2 Skúšanie pevnosti v tlaku valcov 42
3.5.3 Vyhodnotenie skúšky pevnosti v tlaku 43
4 Záver 44
5 Zoznam použitých zdrojov 45
6 Zoznam tabuliek 47
7 Zoznam obrázkov 48
8 Zoznam grafov 50

1 Úvod a ciel práce

V praxi sa neustále diskutuje o tom, či na skúšanie pevnosti v prostom tlaku použiť skúšobné teleso v tvare kocky alebo valca. Pre odbor pozemných komunikácií je typické používanie telesa v tvare valca, na rozdiel od odborníkov z oblasti betónových konštrukcií, ktorí dávajú prednosť kocke. Problém nastáva aj pri pomere pevností v tlaku, pretože pri určitých hodnotách sa tieto údaje značne líšia.

Bakalárska práca si kladie za cieľ porovnať pomery pevností stmelených zmesí v prostom tlaku a priečnom ťahu medzi skúšobným telesom valca a kocky, popísať problematiku výroby skúšobných telies ako aj samotnej skúšky, popísať výhody a nevýhody použitia jednotlivých skúšobných telies a nakoniec vyhodnotiť vlastné výsledky.

2 Teoretická časť

2.1 Zmesi stmelené hydraulickým spojivom

Zmesi stmelené hydraulickým spojivom sú podľa ČSN EN 14227-1 definované ako zmesi obsahujúce kamenivo s určenou zrnitosťou a jedným alebo viacerými hydraulickými spojivami. Sú vyrábané spôsobom, ktorý zaisťuje homogenitu zmesi. Tieto zmesi tuhnú a tvrdnú hydraulickou reakciou a ich klasifikácia je založená na mechanických vlastnostiach. [1]

Medzi hydraulické spojivá patrí cement, popolček a struska. Niektoré spojivá vyžadujú aktivátor, ako napríklad vápno alebo oceliarska struska. Ostatné vyžadujú len pridanie dostatočného množstva vody. Rýchlosť nárastu pevnosti, medze pevnosti a celkového správania zmesi stmelených hydraulickým spojivom závisí na kvalite spojiva, podmienkach prostredia a na jednotlivých častiach, z ktorých sú utvorené. [2]

Zmesi môžu byť navrhnuté tak, aby poskytovali širokú škálu vlastností, rôznu rýchlosť vývinu pevnosti alebo tuhosti, a tým môžu byť upravené potrebám danej stavby. Môžu rýchlo naberať pevnosť v čase ako v prípade cementom stmelených vrstiev alebo pomaly v prípade popolčeka alebo strusky. [3]

2.2 Zmes stmelená cementom

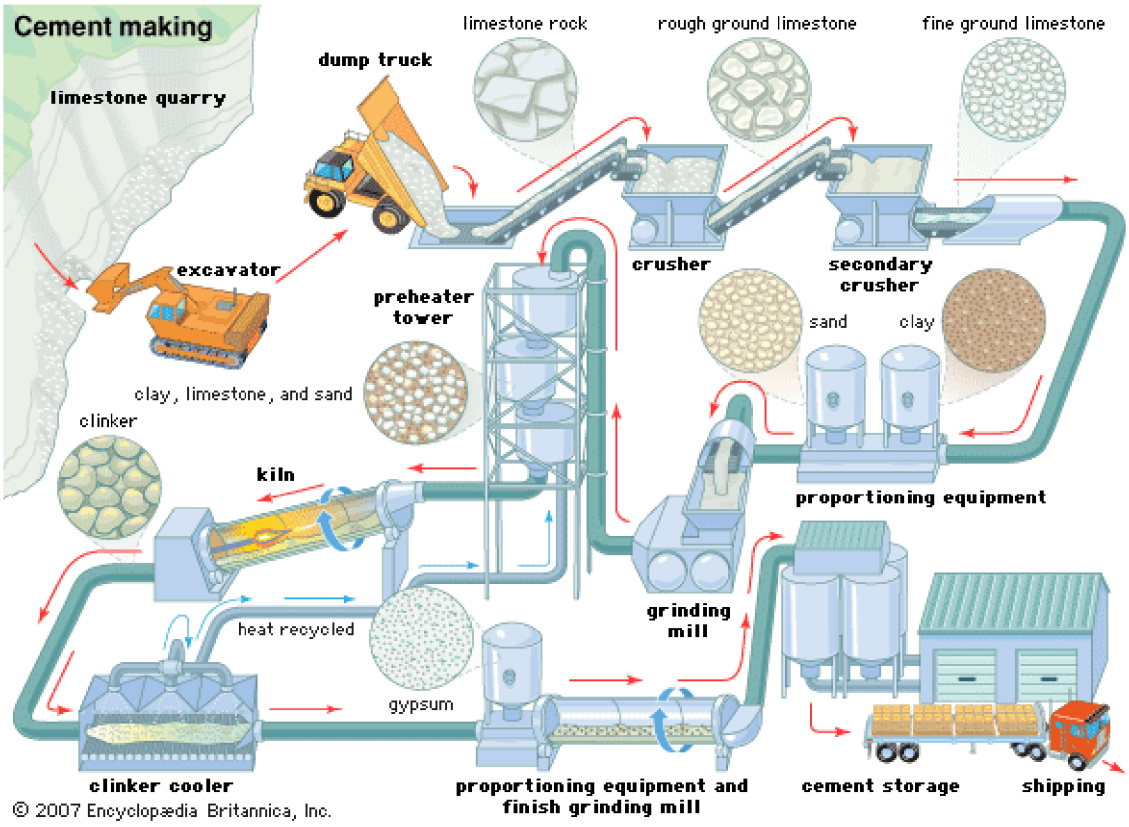
Zmes stmelená cementom (v európskej norme označovaná ako CBGM) je hydraulicky stmelená zmes kameniva s riadenou zrnitosťou a cementom. Vrstvy zmesí stmelenými hydraulickými pojivami majú relatívne vysoký modul pružnosti a nízku pevnosť. Preto aj pri malej deformácii vzniká veľké napätie, ktorému vrstva nie je schopná odolať. Je krehká. Z tohto dôvodu sa pod vplyvom aj malého zaťaženia každá položená vrstva porušuje a veľmi rýchlo sa v nej vytvárajú malé trhlinky. Tieto trhlinky ešte viac znižujú pevnosť vrstvy. Hlavne v ťahu ohybom. Vylepšuje sa však poddajnosť tejto vrstvy. V netuhej vozovke sa vrstva nespráva ako tuhá doska. [4]

2.3 Cement

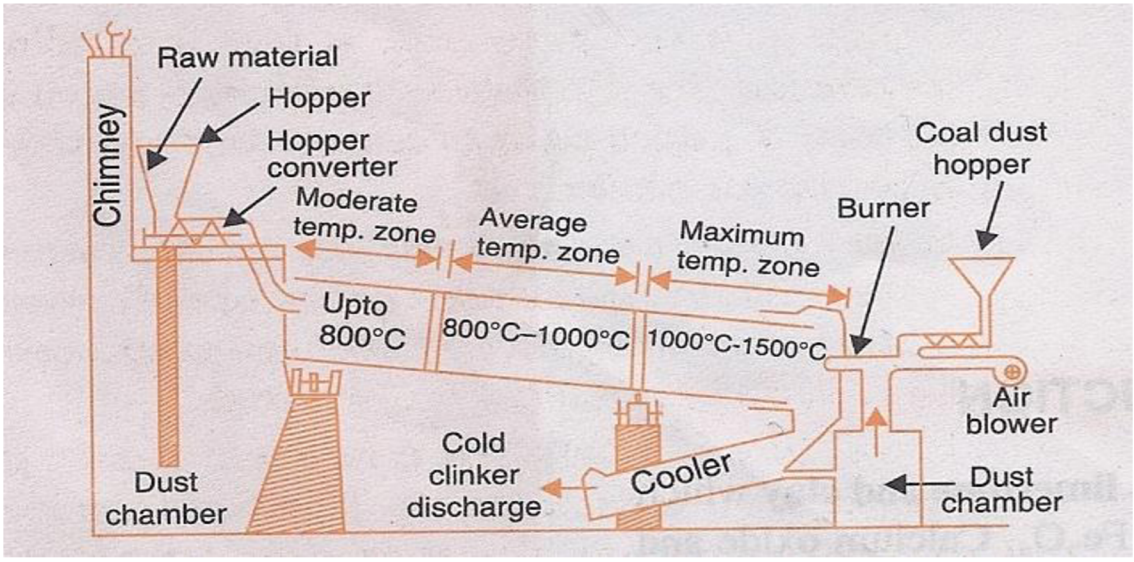
Ide o jemný mletý anorganický materiál, ktorý po zmiešaní s vodou vytvára hustú hmotu, ktorá v dôsledku chemickej hydraulickej reakcie tuhne a tvrdne. Po predchádzajúcom zatuhnutí na vzduchu ďalej tuhne a tvrdne aj pod vodou, pri zachovaní pevnosti a stability. [5]

2.3.1 Výroba cementu

Cement sa vyrába spoločným vypaľovaním vápenca a ílu pri teplotách okolo 1450 °C. Vyrobený slinok sa potom rozmelie, niekedy aj s prímesou (vysokopecnou struskou, prírodným pucolánom, popolčekom). Vzniknutý šedý prášok sa nazýva cement. Zmiešaný s vodou vytvára spojivovú (hydraulickú) zložku betónu, ktorá tvrdne na vzduchu aj pod vodou. Počas prebiehajúcich chemichkých reakcí vznikajú rôzne jemné kryštály, ktoré vzájomne prerastajú a majú vplyv na pevnosť. Vzniknutý material si zachováva pevnosť aj objemovú stálosť. [5]



Obrázok 1: Výroba cementu [10]



Obrázok 2: Pec na výrobu cementu [11]

2.3.2 Druhy cementov

Norma ČSN EN 197-1 uvádza pre všeobecne použitie nasledovných päť skupín podľa zloženia :

- CEM I portlandský cement
- CEM II portlandský cement zmesový
- CEM III vysokopecný cement
- CEM IV pucolánový cement
- CEM V zmesový cement [5]

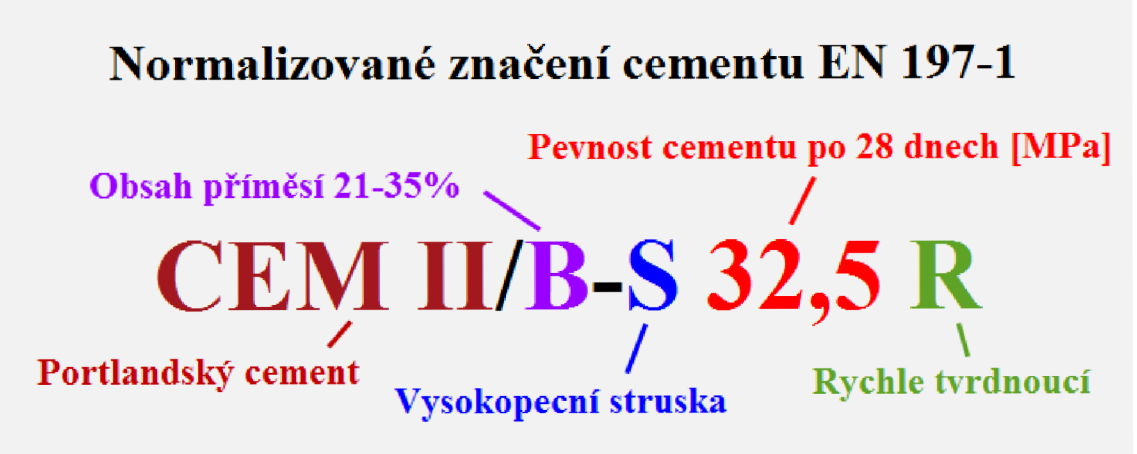
Tabuľka 1: Druhy cementov [12]

Druh cementu	**Názov cementu**	**Označenie**	**Obsah zložiek v % hmotnosti**		
			slinok	**zložka**	**plnivo**
I.	portlandský	I	95-100	-	0-5
II.	portlandský	II / A – X	80-94	6-20	0-5
	zmesový	II / B – X	65-79	21-35	0-5
III.	vysokopecný	III / A	33-64	36-65	0-5
		III / B	20-34	66-80	0-5
		III / C	5-195	81-95	0-5
IV.	pucolánový	IV / A	65-89	11-35	0-5
		IV / B	45-64	36-55	0-5
V.	zmesový	V / A	40-64	18-30	0-5
		V / B	20-39	30-50	0-5

Označenie zložiek X (miesto X sa uvedie písmeno):
CEM II.: S = struska, D = kremičitý úlet (max 10%), P = prírodný a Q = priemyselný pucolán, V = kremičitý a W = vápenatý popolček, T = kalcinovaná bridlica, L = vápenec.
CEM IV.: zložky tvorí kremičitý úlet D, prírodný a priemyselný pucolán P, Q a kremičitý popolček V.
CEM V.: zložka je z polovice tvorená vysokopecnou struskou S a z polovice P,Q a V.

Cementy a ich označenia popisuje norma ČSN EN 197-1 (Obrázok 3). Cementy sa z niekoľkých hľadísk delia nasledovne:

- **Podľa zloženia:** viď viššie
- **Podľa množstva prímesí:**
  - A-> 6 % - 21 %
  - B-> 21 % - 35 % .
- **Podľa konkrétnych druhov prímesí:**
  - K – portlandský slinok
  - S – vysokopecná struska
  - D – kremičitý úlet
  - P – prírodný pucolán
  - V – kremičitý popolček
  - W – vápenatý popolček
  - T – kalcinovaná bridlica
  - LL,L – vápenec
- **Podľa pevnosti (po 28 dňoch):**
  - 32,5 Mpa
  - 42,5 Mpa
  - 52.5 Mpa
- **Podľa rýchlosti vývoja počiatočnej pevnosti:**
  - N – normálny
  - R – rýchly [5]



Obrázok 3: Normalizované označenie cementu podľa EN 197-1 [13]

2.4 Požiadavky na materiál stmelenej zmesi

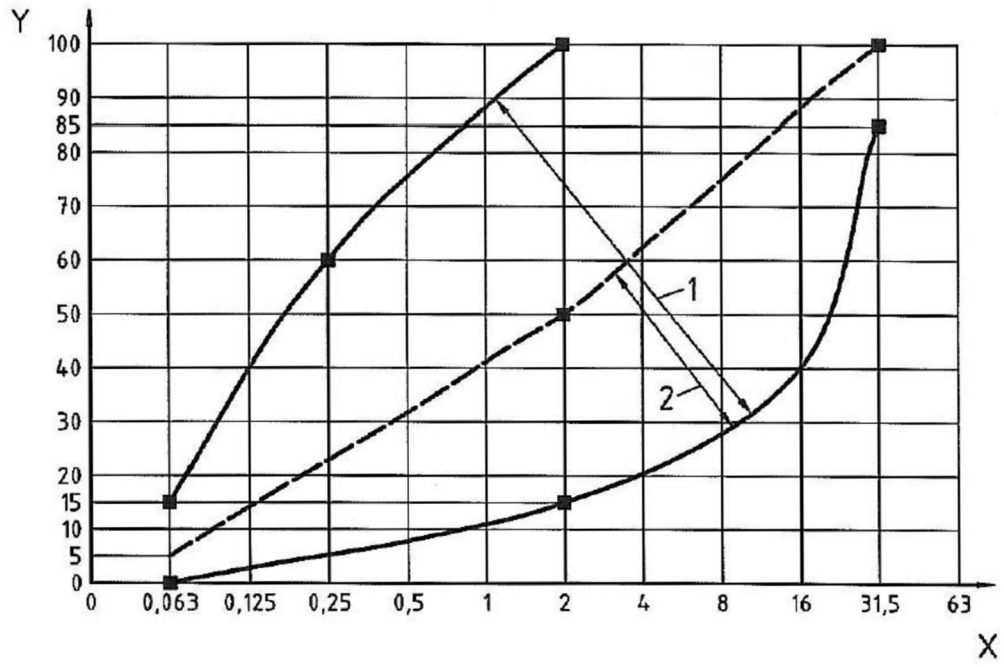
2.4.1 Kamenivo

Kamenivo musí odpovedať požiadavkám ČSN EN 13242 a nesmie obsahovať škodlivé jemné častice v množstve ovplyvňujúcom tvrdnutie, pevnosť alebo trvanlivosť zmesi. Musí byť drvené alebo ťažené alebo musí byť zostavené z kombinácie obidvoch.

Druh kameniva môže byť nasledovný:

- Prírodné alebo umelé kamenivo
- Recyklované kamenivo
- Kombinácia

Zrnitosť kameniva pre špecifickú zmes musí byť zvolená vo vnútri oboru zrnitosti.(Graf 1). Táto zrnitosť sa používa pri určení receptúry zmesi. Počas doby výroby musí byť požadovaná zrnitosť kameniva dostatočne stála, aby spĺňala toleranciu zrnitosti zmesi stmelených cementom. [4]



Legenda

Y Propad zrn v % hmotnosti

X Velikost síta v mm

1 Obor zrnitosti A

2 Obor zrnitosti B

Graf 1: Obor zrnitosti [1]

2.4.2 Spojivo

Cement musí spĺňať požiadavky ČSN EN 197-1. Hydraulické spojivá používané pre zmesi stmelenej cementom musia spĺňať požiadavky ČSN EN 13282, pre triedy pevností HRB 22,5 E alebo HBR 32,5 E. Predpokladá sa použitie cementu splňujúceho požiadavky ČSN EN 197-1 CEM I, cement triedy 32,5N; 42.5N alebo 52.5N. [4]

2.4.3 Prímesi

Ak sa používa mletá granulovaná vysokopecná struska, musí odpovedať požiadavkám európskych technických noriem a národným predpisom. Ak sa má použiť popolček, musí byť súčasťou zmesového cementu podľa ČSN EN 197-1. Zmes obsahujúca zmesový cement, ktorý je pridávaný na mieste behom miešania alebo tesne pred miešaním s kamenivom , musí spĺňať požiadavky ČSN EN 14227-3.[4]

2.4.4 Zámesová voda

Zámesová voda musí spĺňať požiadavky ČSN EN 1008. [4]

2.4.5 Prísady

Prísady musia spĺňať požiadavky ČSN EN 934-2. Ak sa používa urýchľovač alebo spomaľovač tuhnutia, musí byť ich použitie zohľadnené v návrhu. [4]

2.5 Klasifikácia zmesí stmelených cementom

Systém pre klasifikáciu zmesi stmelenej cementom musí byť definovaný požiadavkami na čerstvé a zatvrdnuté zmesi stmelené cementom. Musí byť určený z hľadiska ich obsahu cementu, obsahu vody, pevnosti a modulu pružnosti zatvrdnutej zmesi. Požiadavky na pevnosť a modul pružnosti musia byť definované aj rozmermi skúšobného telesa a metódami jeho výroby, zrenia a skúšania. Obsah cementu a vody v zmesi sa musí vzťahovať k celej hmotnosti vysušeného materiálu -> KAMENIVO + CEMENT + PRÍMES = 100 %. [4]

2.5.1 Obsah spojiva

Obsah spojiva musí byť určený návrhom zmesi a na základe praktických skúseností. Postupy návrhu musia spĺňať požiadavky národných predpisov alebo opatrení platných v mieste užívania. Obsah spojiva nesmie byť menší ako minimum podľa tabuľky 2. [4]

Tabuľka 2: Minimálny obsah spojiva [1]

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

2.5.2 Vlhkosť

Vlhkosť zmesi musí byť určená návrhom zmesi a na základe praktických skúseností. Vlhkosť zmesi, ktorá je potrebná na dostatočné zhutnenie, závisí na zrnitosti kameniva, obsahu spojiva, klimatických podmienkach v mieste stavby, dopravnej vzdialenosti, použitom hutniacom zariadený a podobne. [4]

2.5.3 Zrnitosť zmesi

Zrnitosť zmesi sa musí vypočítať zo zrnitosti kameniva (stanovenej v 2.2.2) a obsahu spojiva vrátane prímesi mletej granulovanej vysokopecnej strusky, ak je použitá. Ku kontrole zrnitosti zmesi sa používa skúšobný postup podľa ČSN EN 933-1. [4]

2.5.4 Pevnosť a modul pružnosti

Pre stanovenie pevnosti a modulu pružnosti sa musí vykonať skúška na skúšobných telesách v tvare kocky a valca. Kocka musí mať dĺžku hrany 100 mm alebo 150 mm a priemer valca musí byť 100 mm, 150 mm alebo 160 mm. CBGM sa klasifikuje podľa pevnostných charakteristík danej receptúry jedným z dvoch spôsobov:

- Charakteristická pevnosť v tlaku R_{ck} skúšobného telesa podľa tabuľky 3 a podľa Systému I (skúšobné teleso je staršie ako 28 dní)

- Charakteristická pevnosť v prostom ťahu R_{tk} alebo pevností v priečnom ťahu R_{itk} a modulom pružnosti E skúšobného telesa podľa tabuľky 4 a podľa Systému II (najmenej 3 skúšobné telesa staré aspoň 28 dní)

V ČR sa využíva Systém I [4]

Tabuľka 3: Charakteristická pevnosť v tlaku zmesí stmelených cementom po dobe zrenia 28 dní [1]

	28 denná pevnosť [Mpa]		**Trieda pevnosti**
	Charakteristická pevnosť Rck		
	Valec	**Valec alebo kocka**	
	H/D=2,0	**H/D=1,0**	
1	Bez požiadaviek		**C0**
2	1,5	2,0	**C1,5/2**
3	3,0	4,0	**C3/4**
4	5,0	6,0	**C5/6**
5	8,0	10,0	**C8/10**
6	12,0	15,0	**C12/15**
7	16,0	20,0	**C16/20**
8	20,0	25,0	**C20/25**

Tabuľka 4: Charakteristická pevnosť v ťahu a modulu pružnosti zmesí stmelených cementom po dobe zrenia 28 dní [1]

Kategória	**Rt (Mpa) pre krivku kategórie**					
E	1600	2000	5000	10 000	20 000	40 000
Mpa						
Kategória	**Rt**					
	Mpa					
T5	0,64	0,7	1	1,23	1,46	1,59
T4	0,45	0,49	0,68	0,83	0,97	1,09
T3	0,33	0,36	0,48	0,58	0,68	0,75
T2	0,21	0,23	0,32	0,38	0,44	0,49
T1	0,12	0,13	0,18	0,22	0,26	0,29

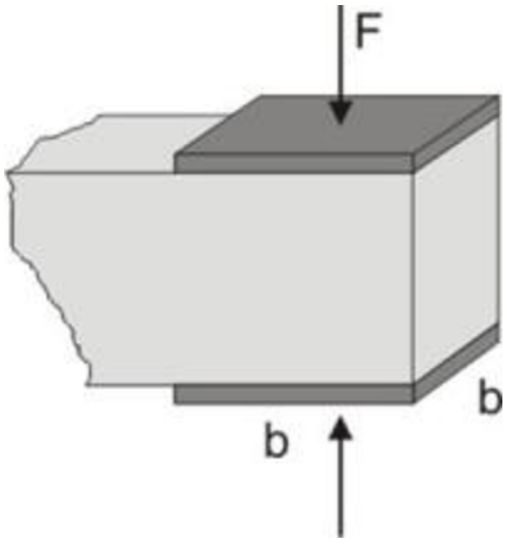
2.5 Pevnosť v tlaku stmelenej zmesi cementom

2.5.1 Podstata skúšky

Skúška sa vykonáva na telese v tvare valca alebo kocky a prebieha podľa požiadaviek normy *ČSN EN 13286 – 41 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 41 : Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsí stmelených hydraulickými pojivy.* Skúšobné teleso sa vystaví tlakovej sile až do jeho porušenia. Zaznamená sa maximálne zaťaženie skúšobné telesa pri porušení a vypočíta sa pevnosť v tlaku R_c. [6]

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

- R_c – pevnosť v tlaku skúšobného telesa zmesi stmelenej hydraulickým spojivom [MPa]
- F – maximálna sila pri porušení skúšobného telesa [N]
- A_c – plocha prierezu skúšobného telesa zmesi stmelenej hydraulickým spojivom [mm^2]



Obrázok 4: Podstata skúšky pevnosti v tlaku. [14]

Ak sú skutočné rozmery skúšobného telesa v rozmedzí ±0,5 % určenej veľkosti, R_c musí byť vypočítané pomocou určenej veľkosti. Ak nie, musí byť výpočet pevnosti založený na skutočných rozmeroch telesa. [6]

2.5.2 Skúšobný lis

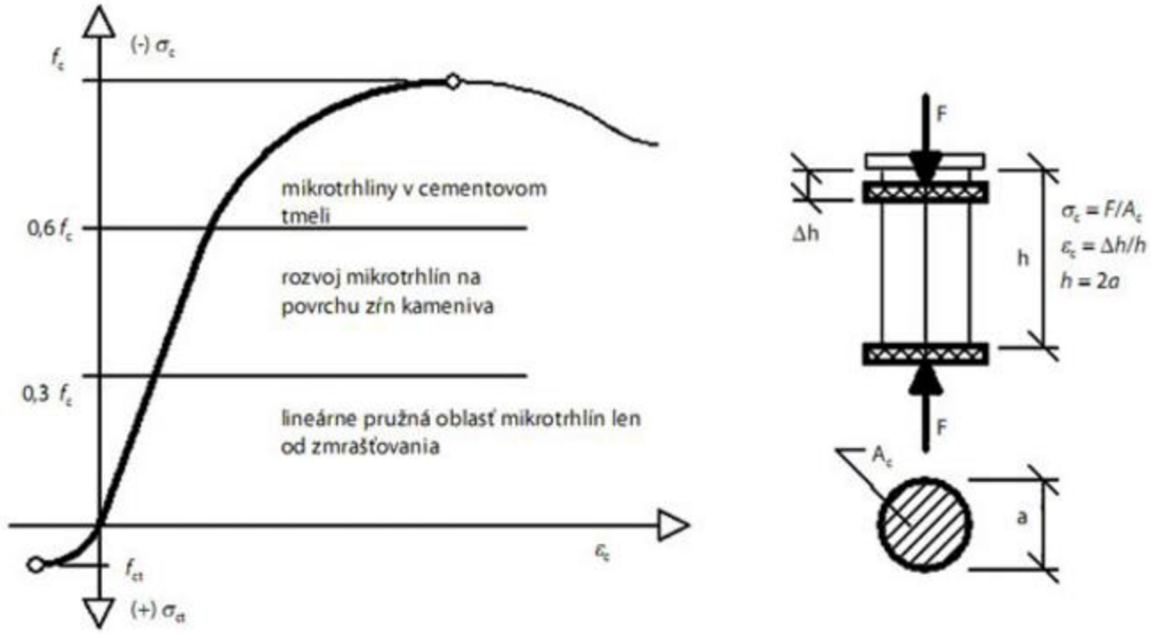
Podľa požiadaviek normy ČSN EN 13286-41 by mal mať skúšobný lis dve oceľové tlačené dosky s povrchmi, ktoré majú tvrdosť podľa Rockwella najmenej 55 HRC do hĺbky približne 5 mm. Tlačené dosky by mali byť minimálne tak veľké, ako sú povrchy skúšobných telies, na ktoré má byť zaťaženie použité. Presnosť lisu a indikácia zaťaženia musí umožňovať zaťažovanie a meranie s presnosťou ± 1%. [6]

Obrázok 5: Skúšobný lis of firmy LABORTECH s.r.o.

2.5.3 Priebeh skúšky

Skúšané telesá sa po uplynutí doby zrenia umiestnia do prístroja vo vertikálnej roviny a sú postupne zaťažované osovým tlakom. Je potrebné, aby skúšobné telesá boli uložené presne v strede spodných dosiek, nesmie sa použiť vizuálne nastavenie. Zaťaženie sa musí zvyšovať stálym a plynulým spôsobom bez rázov tak, aby k porušeniu došlo v priebehu 30 s až 60 s po zahájení zaťažovania. V prípade užitia ručne riadeného skúšobného lisu a pri dosiahnutí porušenia skúšobného telesa musí byť akákoľvek tendencia k zníženiu rýchlosti zaťaženia opravená vhodným nastavením ovládania. V prípade automaticky riadených skúšobných prístrojov musí byť rýchlosť

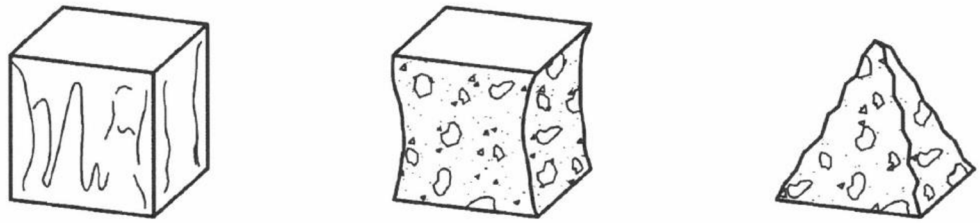
zaťažovania periodicky kontrolovaná, aby rýchlosť zaťaženia bola konštantná. Výsledkom skúšky sú pevnosti v tlaku aspoň u troch telies. Ak je ale jedna pevnosť skúšobného telesa v tlaku rozdielna oproti ďalším dvom telesám o viac ako 20 %, je táto hodnota pevnosti vylúčená a priemer sa vypočíta zo zostávajúcich telies. [6]



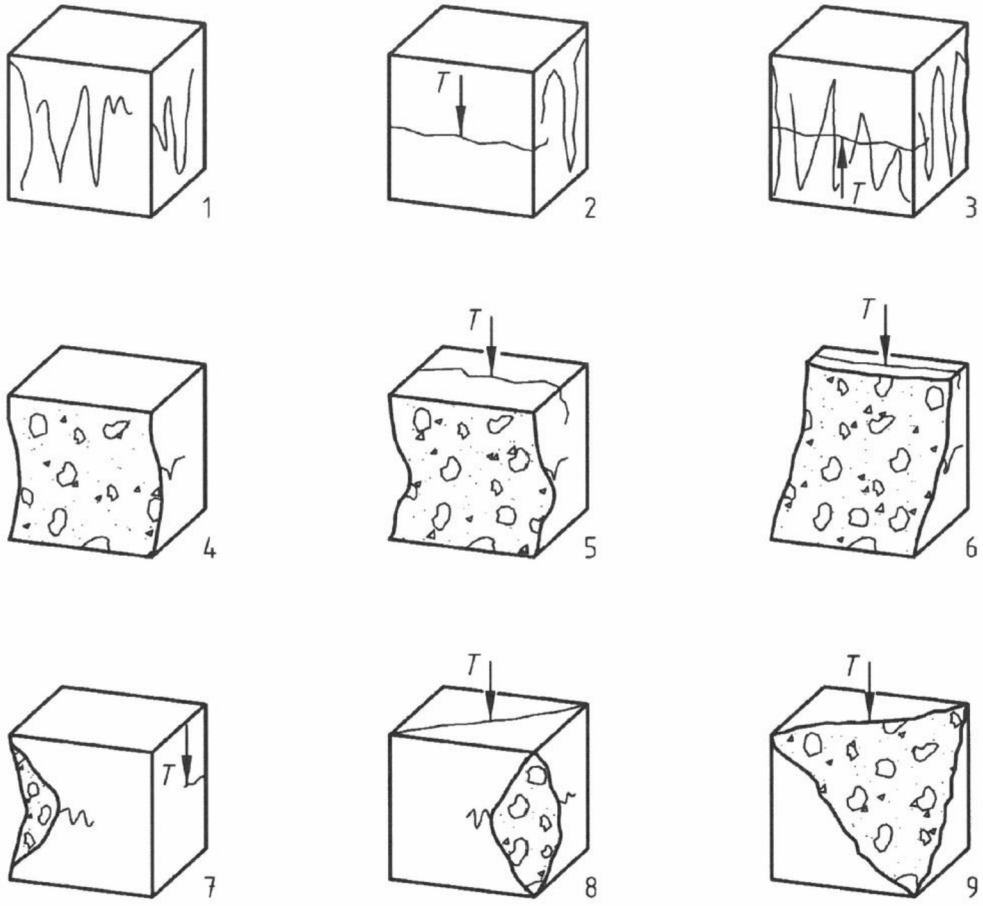
Obrázok 6: Typický pracovný diagram skúšky pevnosti v tlaku [15]

2.5.4 Posúdenie typu porušenia

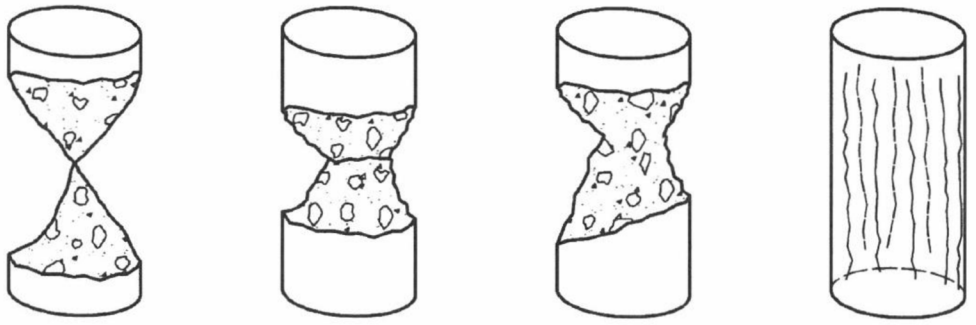
Podľa normy ČSN EN 13286-41 sa porušenie telesa zatriedi podľa obrázkov 7 až 10 na uspokojivé a neuspokojivé porušenie. Uspokojivé porušenie nastáva pri rovnomernom porušení všetkých obnažených povrchov. V obidvoch prípadoch to treba zaznamenať a v prípade neuspokojivého porušenia treba zaznamenať tiež aj typ porušenia. Na označenie porušenia u telies v tvare kocky sa používajú číslice od 1 po 9. A v prípade telies v tvare valcov sú to písmená od A po K. [6]



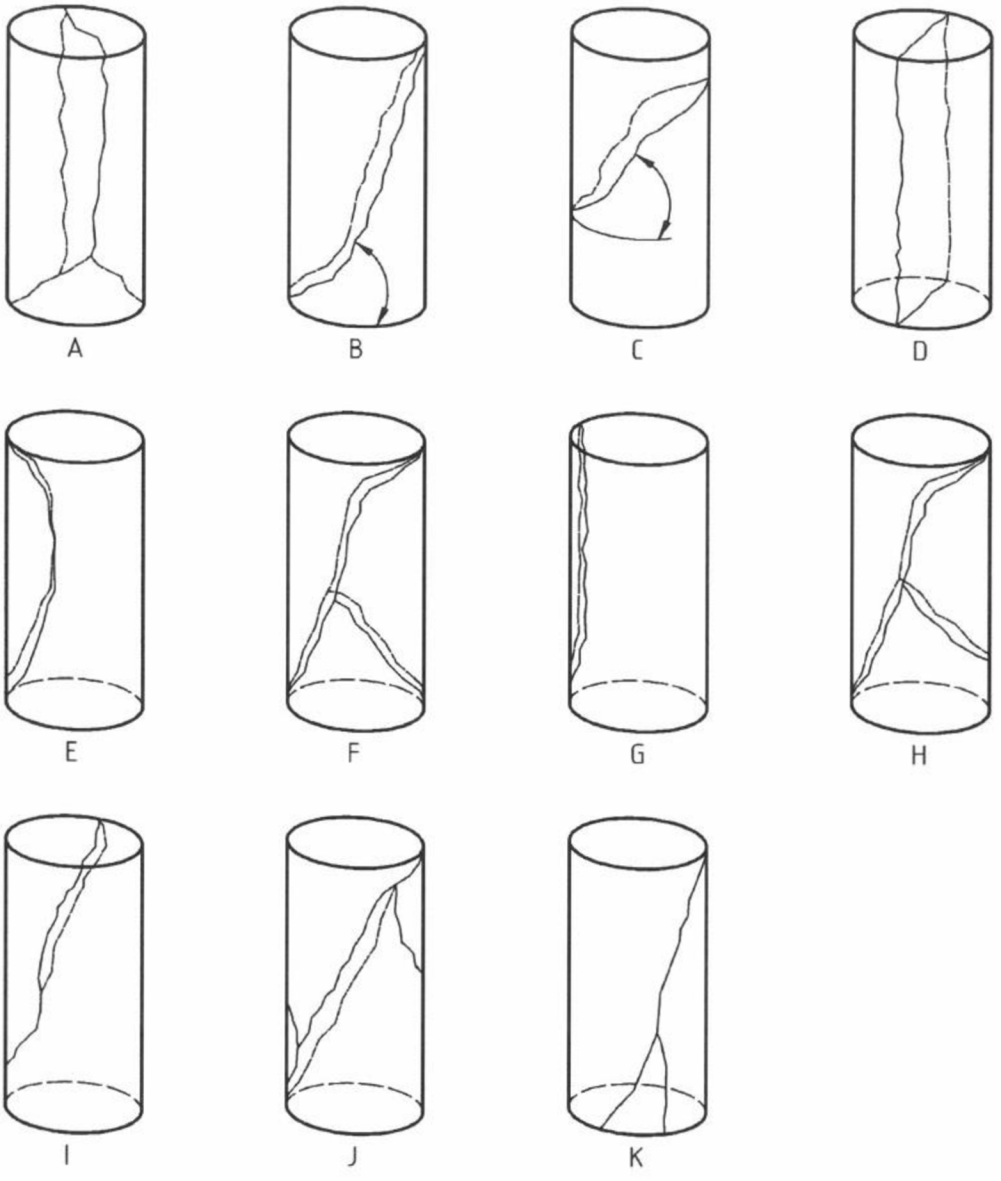
Obrázok 7: Príklad uspokojivého porušenia skúšobných telies v tvare kocky. [6]



Obrázok 8: Príklad neuspokojivého porušenia skúšobných telies v tvare kocky..T predstavuje ťahovú trhlinu [6]



Obrázok 9: Príklad uspokojivého porušenia skúšobných telies v tvare valca [6]



Obrázok 10: Príklad neuspokojivého porušenia skúšobných telies v tvare valca [6]

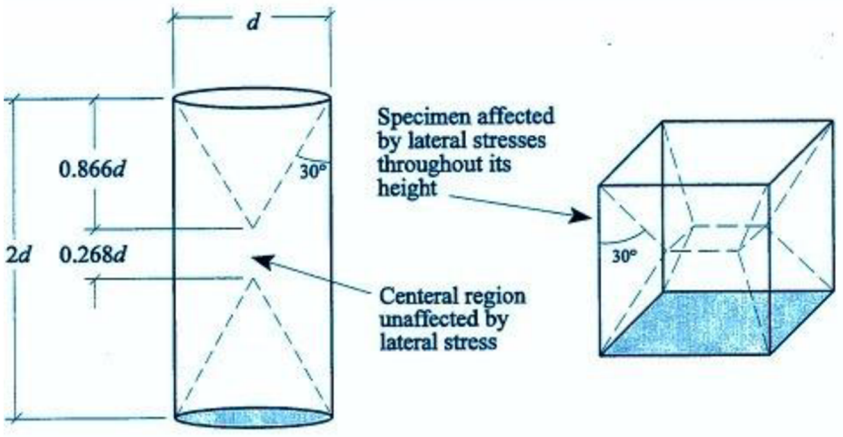
2.6 Pomer pevností v tlaku valca a kocky

Vzťah medzi pevnosťou v tlaku medzi telesom tvaru valca a kocky je pomerne zložitý. Existuje množstvo faktorov, ktoré spôsobujú rozdiely v pomere pevnosti v tlaku valca a kocky. Výskum Rowlanda Hilla Evansa, ktorý zostavil 5 faktorov ovplyvňujúcich pomer pevností v tlaku valca a kocky:

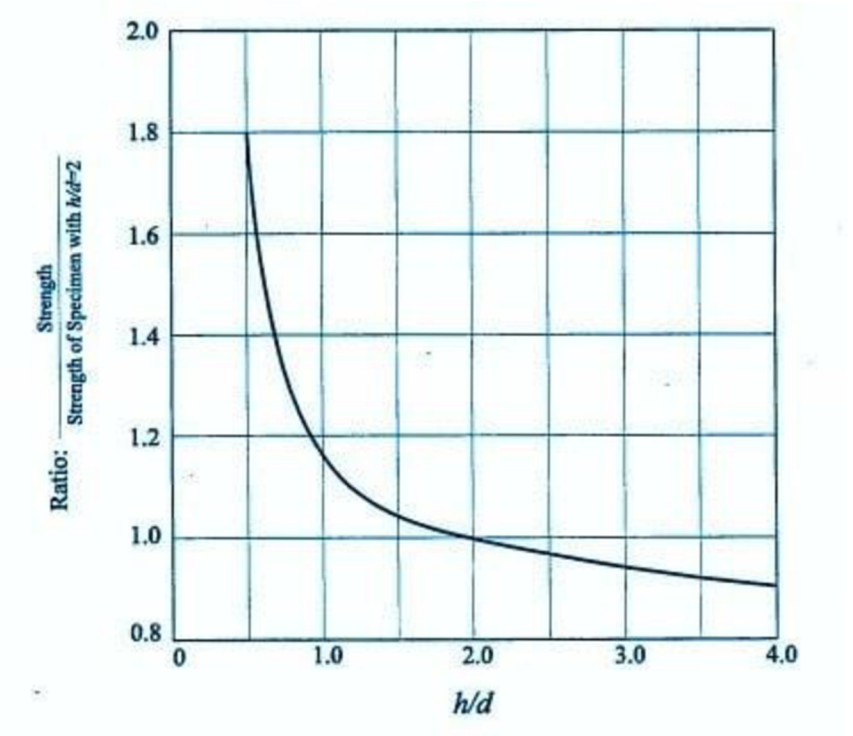
- Vplyv geometrie skúšobného telesa
- Účinky pevnosti zmesi na pomer pevností telies v tlaku
- Smer zaťaženia a charakteristiky skúšobného lisu
- Druh kameniva
- Metóda výroby skúšobných telies [7]

2.6.1 Vplyv geometrie skúšobného telesa

Výrazný vplyv na pomer pevností medzi týmito dvomi telesami má určite aj ich geometria, a to hlavne pomer výšky a priemeru (šírky). Ak sú napríklad testované dve kocky z rozdielnymi rozmermi, ktoré majú ale rovnako pevnú zmes, tak vykazujú rozdielne výsledky. Napríklad kocka so šírkou 10 cm vykazuje o 10 % menšiu pevnosť ako kocka, ktorej hrana má dĺžku 15 cm, pričom obidve sú vyrobené z rovnako pevnej zmesi. A ak porovnáme valec s výškou 30 cm a s priemerom širokým 15 cm, tak bude dosahovať 80 % pevnosti v tlaku z kocky s hranou dlhou 15 cm. Obrázok 11 a Graf 2 znázorňuje vzťah medzi geometrickými vlastnosťami telesa a pevnosťou v tlaku. [8]



Obrázok 11: Znázornenie rozdielov v geometrii valca a kocky [8]



Graf 2: Vzťah medzi pevnosťou telesa a jeho geometriou [8]

2.6.2 Účinky pevnosti zmesi na pomer pevností telies v tlaku

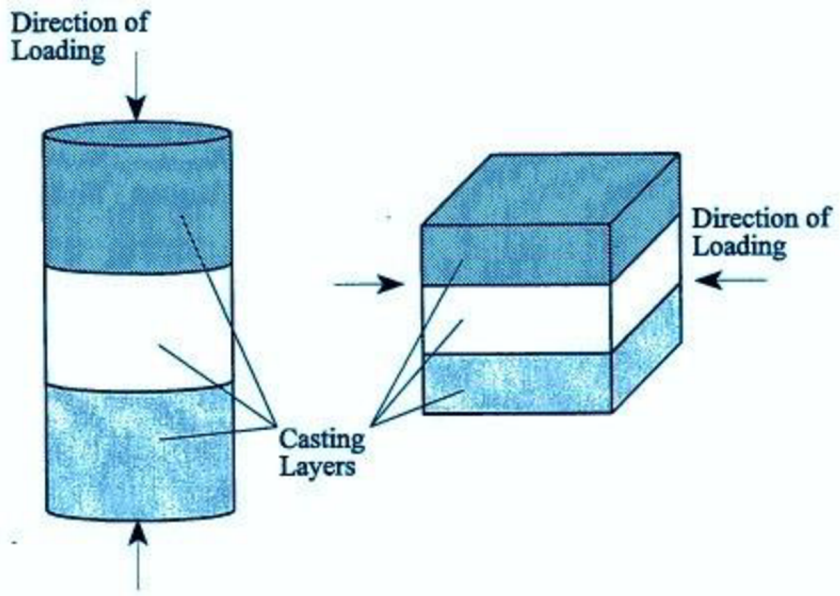
Viacerými výskumami v zahraničí bolo potvrdené, že pomer pevností v tlaku medzi kockou a valcom je ovplyvnený triedou pevnosti zmesi. Už spomínaný výskum Rowlanda Hilla Evansa zisťuje, že pomer medzi pevnosťami v tlaku telesa v tvare kocky a valca sa mení v rozsahu od 0,77 po 0,96 a závisí na triede betónu. [8]

Tabuľka 5 : Dáta R. H. Evansa, pomer pevností v tlaku vzhľadom na triedu betónu [9]

Strength, MPa (ksi)		Cylinder/Cube Ratio
Cubes	Cylinders	
9.0 (1.3)	6.9 (1.0)	0.77
15.2 (2.2)	11.7 (1.7)	0.77
20.0 (2.9)	15.2 (2.2)	0.76
24.8 (3.6)	20.0 (2.9)	0.81
27.6 (4.0)	24.1 (3.5)	0.87
29.0 (4.2)	26.2 (3.8)	0.91
29.6 (4.3)	26.9 (3.9)	0.91
35.8 (5.0)	31.7 (4.6)	0.98
36.5 (5.3)	34.5 (5.0)	0.94
42.1 (6.1)	36.5 (5.3)	0.87
44.1 (6.4)	40.7 (5.9)	0.92
48.3 (7.0)	44.1 (6.4)	0.91
52.4 (7.6)	50.3 (7.3)	0.96

2.6.3 Smer zaťaženia a charakteristiky skúšobného lisu

Skúšobné teleso v tvare kocky môže byť zaťažované aj v smere kolmom na hutnenie, zatiaľ čo teleso valca je vždy zaťažované v smere hutnenia. Pretože obidve tieto telesá sú vyrábané v podstate po vrstvách, určite bude závisieť, v akom smere bude zaťaženie pôsobiť. Ako možno vidieť na Obrázku 13, keď je zaťažovaný valec, každá vrstva je cez celý prierez telesa, tým pádom je každá vrstva zaťažovaná plným zaťažením od skúšobného lisu. Pri valci, vrstvy prechádzajú celou výškou telesa a dostávajú časť celkového zaťaženia. Ich pevnosti budú teda určite ovplyvnené aj smerom zaťaženia. [8]

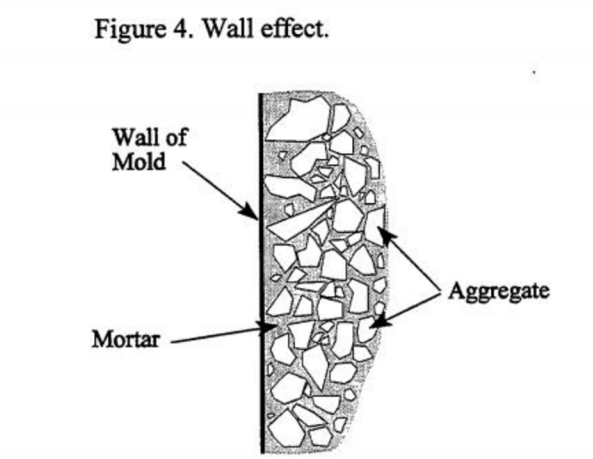


Obrázok 12: Porovnanie pôsobenia zaťaženia rôznymi smermi [8]

2.6.4 Druh kameniva

Za nežiaduce zrno kameniva sa pokladá také ktoré má tvarový index väčší ako 3 – ploché a podlhovasté zrno. Segregácia kameniva počas výroby spôsobuje tzv. "stenový efekt" (Obrázok 14). Kamenivo vo vzorke segreguje tak, že popri stenách zostane navyše malta, ktorá zvyšuje pevnosť skúšobného telesa v tlaku. Vzniká skôr v betónových vzorkách s väčším objemom pretože tento efekt kameniva vzniká pri stene

formy. Keďže tento efekt je závislý od povrchu. Teleso bude mať nárast pevnosti v tlaku podľa pomeru povrchu k objemu. [9]



Obrázok 13: Segregácia kameniva pri výrobe skúšobného telesa [9]

2.6.5 Metóda výroby skúšobných telies

Medzi ďalšie faktory ovplyvňujúce testovanie pevnosti skúšobných telies patrí aj spôsob výroby skúšobného telesa. Tá je závislá od typu formy. Podľa typu formy vyberáme spôsoby výroby, ktoré môžu negatívne ovplyvniť výsledok skúšky. Môže dochádzať napríklad k segregácii kameniva alebo je narušená aj rovinnosť povrchu. [7]

3 Praktická časť

Praktická časť bakalárskej práce sa venuje postupom a skúškam zisťujúcim stav optimálnych vlastností pripravovanej zmesi ako i následnej výrobe skúšobných vzoriek. Na záver sa bude zaoberať pevnostným skúškam vyrobených telies ktoré bude na záver porovnávať a hodnotiť. Vyrobených bude 9 vzoriek v tvare valca a 6 vzoriek v tvare kocky. Obidva druhy telies budú vytvorené v troch pevnostných kategóriách. Rozmery skúšaných telies valca majú výšku 10 cm s priemerom 10 cm. Na výrobu telies v tvare kocky však boli použité formy s hranou 15 cm. Formami kocky s hranou 10 cm laboratórium nedisponuje. Stále však platí pomer výšky a šírky pri obidvoch telesách 1:1. Všetky nižšie uvedené skúšky a práce boli realizované v Ústave pozemných komunikácii, Fakulty stavebnej, Vysokého učení technického v Brne.

3.1 Príprava zmesi

Pre prípravu kvalitnej zmesi som si pripravil 3 rôzne frakcie kameniva. 50 kg štrkodrte s frakciou kameniva 0/4, 40 kg štrkodrte s frakciou kameniva 4/8 a 20 kg štrkodrte s frakciou kameniva 8/16. Materiál bol poskytnutý laboratóriom Ústavu pozemných komunikácií, Fakulty stavebnej, Vysokého. Kamenivo vyhovovalo norme ČSN EN 13242 a nachádzalo sa vo vysušenom stave. Všetky 3 druhy kameniva som premiešal dohromady. Urobil som tak na čistej betónovej podlahe pomocou lopaty, a to rozdeľovaním na malé kôpky a následným premiešavaním do jednej veľkej kôpky. Tento postup som opakoval až kým zmes nebola úplne homogénna. Rovnomernosť kameniva sa overila pomocou skúšky zrnitosti. Na skúšku zhutniteľnosti som potreboval 12,5 kg hotovej zmesi. Zmes som teda rozdelil do piatich misiek po 2,5kg. Do každej misky som pridal rozdielne množstvo vody, aby v každej miske bola iná vlhkosť zmesi. Misky som dôkladne premiešal a obalil nepriepustnou fóliou. Nechal som ich 24 hodín odstáť aby boli rovnomerne vlhké. Po zistení optimálnej vlhkosti zhutnenia som zvyšok zmesi použil na výrobu skúšobných telies.

Obrázok 14: Jednotlivé frakcie potrebné na hotovú zmes kameniva [17]

Obrázok 15: Homogenizovaná zmes pripravená na ďalšie použitie [17]

3.2 Skúška zrnitosti

Skúšku zrnitosti som vykonal podľa *ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. Norma uvádza pre kamenivo o maximálnej veľkosti zrna D_{max} = 16 mm hmotnosť skúšobného vzorku 2,6 kg. Po konzultácii s vedúcim bakalárskej práce som túto hodnotu obmedzil na 1 kg. Vysušený materiál som nasypal na sitá, ktoré sú zoradené v stĺpci od najväčších otvorov

až po najmenšie s dnom. Po upevnení sít do triediča som začal kamenivo preosievať. Prístroju som pomáhal mechanickým trasením zo strany na stranu. Po dôkladnom preosiatí kameniva som sitá postupne odoberal a ručne som dokončil preosievanie každého sita. Zachytené častice na každom site som zvážil na digitálnej vodováhe s presnosťou na 0,1 g. Hodnoty som postupne zapisoval do tabuľky a vyniesol do grafu. Vyhodnotenie a dopočítanie zostatkov a prepadov sa nachádza v tabuľke č.6 a výsledná krivka je zobrazená v grafe č.3.

Obrázok 16: Sada preosievacích sít [17]

Tabuľka 6: Skúška zrnitosti [17]

ZRNITOSŤ - SITOVÝ ROZBOR podľa **ČSN EN 933-1**			
Celková suchá hmotnosť M1 [g]			1000
Suchá hmotnosť po skúške M2 [g]			999,8
Veľkosť otvorov sita [mm]	Hmotnosť zachyteného materiálu R_i [g]	Percento zostatku na sitách	Súhrnné percento prepadu
		100 x R_i/M_1 [%]	100 - Σ(100 x Ri/M1) [%]
16	0	0	100
11,2	84,4	8,44	91,6
8	34,7	3,47	88,1
5,6	171,2	17,12	71,0
4	179,5	17,95	53,0
2	162,7	16,27	36,8
1	116,9	11,69	25,1
0,5	78,5	7,85	17,2
0,25	62,5	6,25	11,0
0,125	58,4	5,84	5,1
0,063	41,2	4,12	1,0
P (zostatok na dne)	9,8	-	-
Kontrola:	$[M_2-(\Sigma R_i+P))x100]/M_2$= . . . <1%		0,02

Graf 3: Graf výslednej krivky zrnitosti [17]

3.3 Proctor modifikovaný

Pomocou skúšky zhutniteľnosti som mal zistiť, pri akej vlhkosti danej zmesi dosiahneme maximálnu objemovú hmotnosť suchej zmesi. Pôvodne bolo v pláne vykonať skúšku pre každú pevnostnú kategóriu skúšaných vzoriek. Konkrétne po pridaní 3%,6% a 9% hmotnostného podielu cementu. Po dohode s vedúcim bakalárskej práce a vzhľadom na obmedzené možnosti laboratória v čase merania som pristúpil k strednej hodnote a skúšku som vykonal len pre zmesi s pridaním 6% hmotnostného podielu cementu.

Obrázok 17: Misky s navlhčenými zmesami [17]

Obrázok 18: Hutnenie Proctorom [17]

Skúšku Proctor modifikovaný som vykonal podľa *ČSN EN 13286 – 2* . Do zostavenej formy s priemerom 100 mm vysokej 120 mm a hmotnosti 6520 g, som ukladal pripravenú zmes v troch vrstvách. Každá vrstva bola zhutňovaná 42 údermi z výšky 457 mm. Po zhutnení všetkých troch vrstiev som z formy odobral vrchnú obruč, prebytočný materiál som odstránil a zarovnal po hornú hranu. Celú formu som aj s materiálom zvážil. Po rozobraní formy som zhutnenú zmes rozrýpal pomocou lopatky a približne zo stredu zmesi som odobral vlhkú vzorku ktorú som následne odvážil v miske. Misku s vlhkou zmesou som dal vysušiť do sušiarne. Po 12 hodinách v sušiarni som odvážil suchú vzorku s miskou a zistil presnú vlhkosť zhutňovanej zmesi. Tento postup som opakoval štyrikrát v rôznych vlhkostiach. Posledný štvrtý pokus som už zaznamenával, že zmes je príliš mokrá a objemová hmotnosť zmesi vo forme bude menšia. Z toho dôvodu som už plánovaný piaty pokus skúšky pri 10% vlhkosti nevykonal. Všetky hodnoty som zaznamenával do tabuľky, kde som dopočítal jednotlivé vlhkosti a objemové hmotnosti. Výsledky sú zaznamenané v grafe, pomocou ktorého som odčítal optimálnu vlhkosť.

$$\boldsymbol{E = \frac{m*h*x*n*g}{V}}$$

$$\boldsymbol{x = \frac{E * V}{m * h * n * g}}$$

$$\boldsymbol{x = \frac{2.7 * 942}{4.5 * 457 * 3 * 9.81} \cong 42}$$

E – hutniaca energia [MJ/m^3]
m – hmotnosť závažia [kg]
h – výška dopadu [m]
x – počet úderov na jednu vrstvu
n – počet vrstiev
g – tiažové zrýchlenie [m/s^2]

Obrázok 19: Proctorov hutniaci stroj [16]

Tabuľka 7: Hodnoty Proctorovej skúšky Modifikovanej [17]

3% H2O, 6% CEM				
mc=	8639g	m=	2119	g
mm=	189,3g	**w=**	2,96	%
ms=	184,7g	ϱ=	2249,47	kg/m3
mmis=	29,2g	**ϱ_{d1}=**	2184,837	kg/m3
5% H2O, 6% CEM		m=	2201	g
mc=	8721g	**w=**	4,87	%
mm=	192,7g	ϱ=	2336,52	kg/m3
ms=	185,1g	**ϱ_{d2}=**	2227,98	kg/m3
mmis=	29,1g			
7% H2O, 6% CEM		m=	2262	g
mc=	8782g	**w=**	6,67	%
mm=	186,9g	ϱ=	2401,27	kg/m3
ms=	177g	**ϱ_{d3}=**	2251,19	kg/m3
mmis=	28,5g			
9% H2O, 6% CEM		m=	2301	g
mc=	8821g	**w=**	8,97	%
mm=	223g	ϱ=	2442,68	kg/m3
ms=	207g	**ϱ_{d4}=**	2241,63	kg/m3
mmis=	28,6g			

Vysvetlivky :

mc = hmotnosť celej formy vrátane zmesi [g]

mm = hmotnosť vzorky vo vlhkom stave vrátane hmotnosti misky [g]

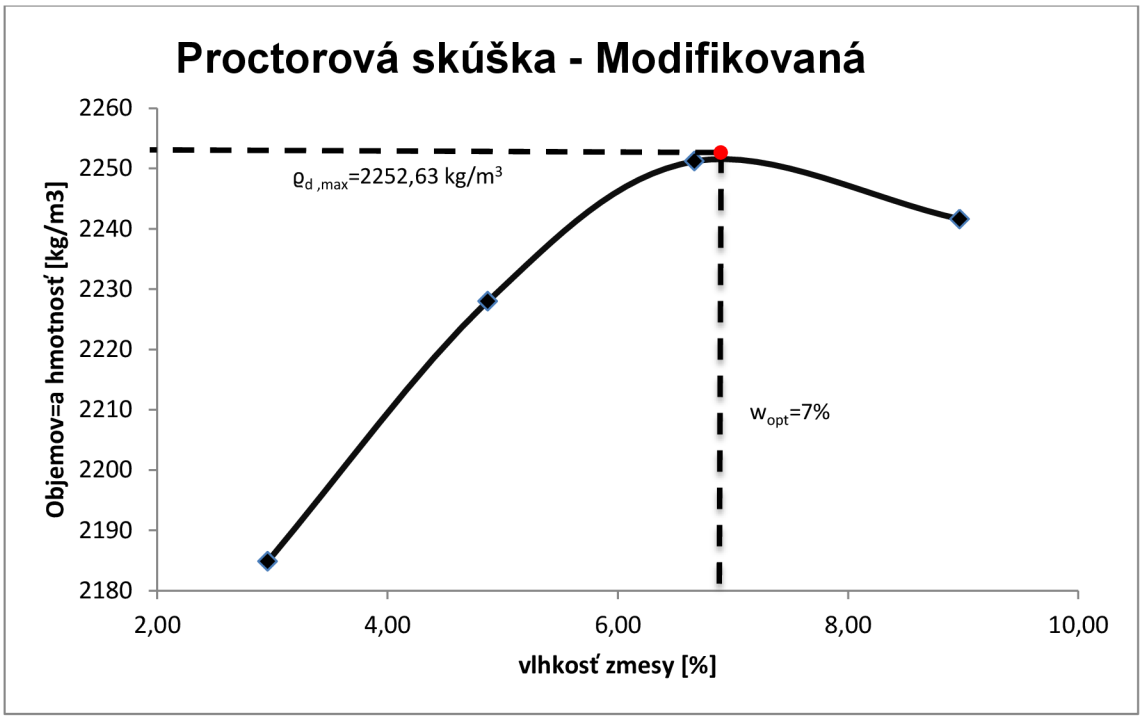
ms = hmotnosť vzorky po vysušení vrátane hmotnosti misky [g]

mmis = hmotnosť misky [g]

w = vypočítaná presná vlhkosť vzorky [%]

m = hmotnosť hutnenej zmesi bez formy [g]

ϱd = objemová hmotnosť suchej zmesi [kg/m^3]



Graf 4: Výsledný graf modifikovanej Proctorovej skúšky [17]

Obrázok 20:Váženie zmesi spolu s formou po hutnení Proctorovým mechanizmom [17]

3.4 Výroba skúšobných telies

3.4.1 Výroba telies v tvare valca

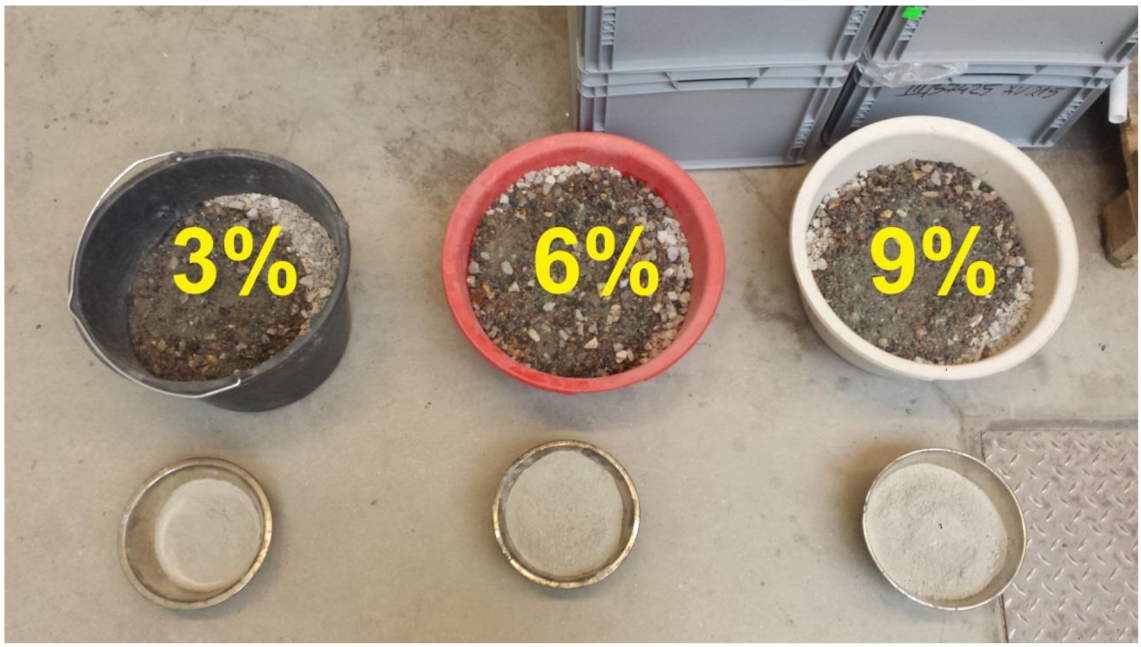
Po predchádzajúcich laboratórnych skúškach vyplýva, že zmes pre prípravu skúšobných telies by mala mať optimálnu vlhkosť 7 %. Pripravenú zmes som si rozdelil do troch nádob s rôznym podielom cementu a to 3%, 6% a 9%. Každá z nich predstavuje inú pevnostnú kategóriu. Bezprostredne po zamiešaní nasledovalo hutnenie. Hutnenie prebiehalo rovnako ako u skúšky Proctor modifikovaný. Pomocou Proctorovho hutniaceho prístroja postupom už vyššie uvedeným som si vyrobil deväť vzoriek. Výslednú vzorku som vytlačil z formy pomocou ručného hydraulického lisu. Každú z nich som postupne označil dvomi číslami. Prvá číslica reprezentovala hmotnostný podiel cementu v zmesi a druhá číslica znamenala poradie skúšobného telesa pri výrobe. Všetky skúšobné telesa boli uložené na 30 dní do klimatizovanej komory aby betónová zmes dostatočne dozrela. Po 30 dňoch nasledovala skúška pevnosti v prosom tlaku.

Obrázok 21: Vytláčanie vzorky z formy pomocou hydraulického zdviháka [17]

Obrázok 22: Valcové skúšobné vzorky hneď po výrobe [17]

3.4.2 Výroba telies v tvare kocky

Rovnako ako aj pri výrobe skúšobných vzoriek valca som si musel nachystať vyrobenú zmes s vlhkosťou 7 % s tromi rôznymi hmotnostnými podielmi cementu. Prvú kategóriu predstavovali vzorky s pridaním 3 % hmotnostného podielu cementu. Druhá 6 % a posledná najpevnejšia 9 %. Vzhľadom na nedostatok materiálu budú vyrobené len dve skúšobné telesá z každej pevnostnej kategórie. Zásadný rozdiel pri výrobe kociek nastal až pri hutnení. Proctorov hutniaci prístroj nie je prispôsobený na hutnenie zmesi vo forme kocky. Preto som použil klasický vibračný stôl. Hutnenie som vykonával v troch vrstvách po 20 s až kým nebola forma úplne plná. Po zarovnaní som formu uzavrel pomocou plastového veka. Po 30 dňoch v klimatizovanom priestore bola forma vytlačená pomocou kompresoru. Pri niektorých vzorkách bola viditeľná segregácia kameniva, ktorá môže negatívne ovplyvniť výsledky.



Obrázok 23: Pripravená zmes s rôznymi hmotnostnými podielmi cementu [17]

Obrázok 24: Výroba skúšobných vzoriek pomocou vibračného stola [17]

3.5 Skúška pevnosti v tlaku

Skúška bola vykonaná podľa požiadaviek normy ČSN EN 13286-41. Prvá časť skúšky prebiehala na lise od firmy Infratest (Obrázok 27) s maximálnou tlakovou silou 100 kN, čo sa neskôr ukázalo, že je dostatočné iba na prvé dve pevnostné kategórie skúšobných telies valcov. Zvyšných 9 telies sa teda podrobilo skúške pevnosti v tlaku

na zariadení ALPHA 4 od firmy Formtest. Maximálna tlaková sila ktorú dokáže zariadenie vyvodiť je 3000 kN. Obidve zariadenia zaznamenávali maximálnu tlakovú silu pri porušení a pretvorenie.

Obrázok 25: Skúšobný lis od firmy Infratest, maximalna sila 100 kN [17]

Obrázok 26: Skúšobný lis od firmy Formtest [17]

Tabuľka 8: Označenie a charakteristika skúšobných vzoriek [17]

VALEC									
Označenie	3.1	3.2	3.3	6.1	6.2	6.3	9.1	9.2	9.3
Cement [%]	3	3	3	6	6	6	9	9	9
KOCKA									
Označenie	3.1	3.2	6.1	6.2	9.1	9.2			
Cement [%]	3	3	6	6	9	9			

3.5.1 Skúšanie pevnosti v tlaku kociek

Obrázok 27: Skúšobné vzork v tvare kocky pripravené na stláčanie [17]

Obrázok 28: Teleso kocky po porušení [17]

Tabulka 9: Hodnoty skúšky pevnosti v tlaku telies v tvare valcov[17]

Označenie vzoriek	Plocha [m2]	Max. sila [kN]	Pevnosť v tlaku [Mpa]	Priemer [Mpa]
3.1	0,0225	48,6	2,16	**2,20**
3.2		50,2	2,23	
6.1		205,2	9,12	**8,82**
6.2		191,6	8,52	
9.1		286,4	12,73	**12,26**
9.2		265,1	11,78	

Zaradenie stmelených zmesí podľa tried pevností:

- 3 % cementu – $C_{1,5/2,0}$
- 6 % cementu – $C_{5/6}$
- 9 % cementu – $C_{8/10}$

3.5.2 Skúšanie pevnosti v tlaku valcov

Obrázok 29: Stláčanie skúšobného telesa valca [17]

Tabuľka 10: Hodnoty skúšky pevnosti v tlaku telies v tvare kociek [17]

Označenie vzoriek	Plocha [m2]	Max. sila [kN]	Pevnosť v tlaku [Mpa]	Priemer[Mpa]
3.1	0,0079	60,29	7,68	**6,98**
3.2		54,50	6,94	
3.3		49,73	6,33	
6.1		92,66	11,80	**12,04**
6.2		93,29	11,88	
6.3		97,69	12,44	
9.1		154,80	19,71	**18,19**
9.2		131,00	16,68	

Zaradenie stmelených zmesí podľa tried pevností:

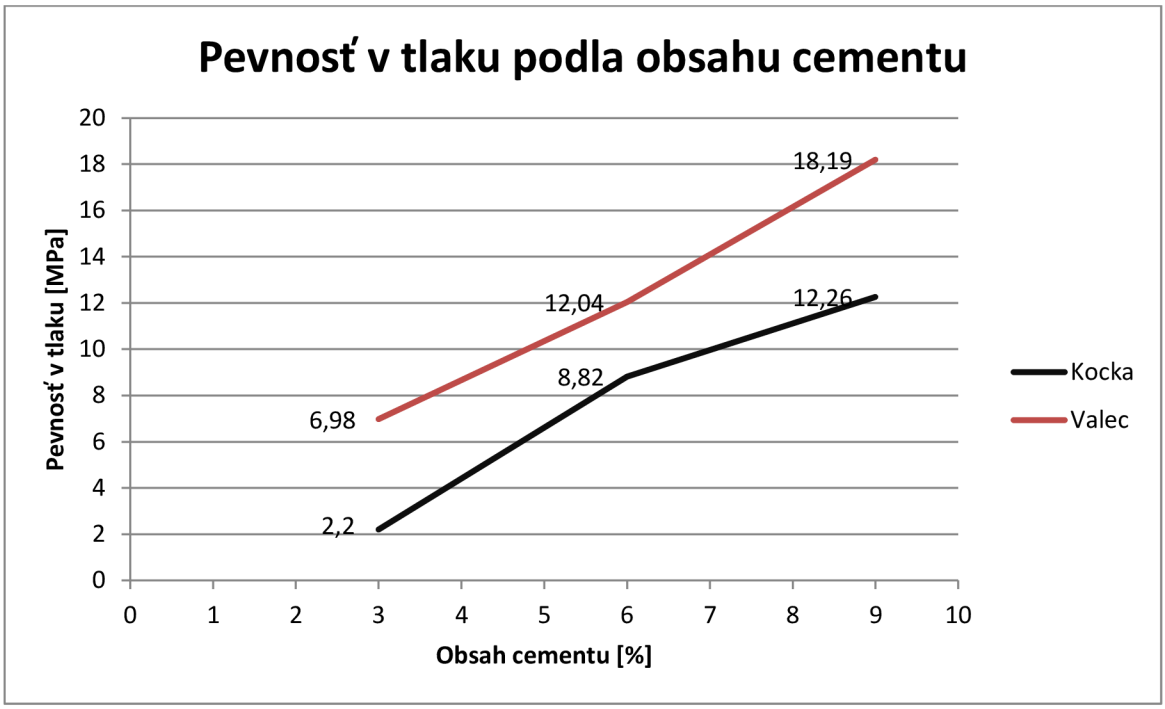
- 3 % cementu – $C_{5/6}$
- 6 % cementu – $C_{8/10}$
- 9 % cementu – $C_{12/15}$

3.5.3 Vyhodnotenie skúšky pevnosti v tlaku

Hodnoty zo skúšok pevnosti v tlaku som zapísal do tabuliek. Pomocou plochy som zistil pevnosť každej vzorky. Žiaden z výsledkov som nemusel odstraňovať keďže bola splnená podmienka, že výsledný tlak pôsobiaci na jednotlivé telesa sa nesmie líšiť o viac ako 20 %. Pevnosti pre kategórie s rovnakým podielom cementu som spriemeroval. Porovnanie pomerov výsledkov pevností sa nachádza v Tabuľke 11.

Tabuľka 11: Porovnanie výsledkov pevností v tlaku[17]

Trieda pevnosti	Tvar telesa		Pomer pevností
	Valec	Kocka	
C1,5/2,0	-	2,2	**-**
C5/6	6,98	8,82	**0,79**
C8/10	12,04	12,26	**0,98**
C12/15	18,19	-	**-**



Graf 5: Graf vzťahu medzi množstvom cementu a pevnosti v tlaku kocky[17]

4 Záver

Predložená diplomová práca sa v súlade so zadaním venovala sledovaniu vplyvu tvaru skúšobného telesa pri skúšaní pevnosti v prostom tlaku. Vzhľadom na časovú náročnosť niektorých skúšok a nedostatok materiálu v laboratóriu došlo po dohode s vedúcim bakalárskej práci k upusteniu skúšania v priečnom ťahu. Po vytvorení skúšobných telies došlo nasledovne k ich skúšaniu pevnosti v prostom tlaku. Po zosumarizovaní (SUMARIZÁCII?) a porovnaní výsledkov sa zistilo, že pevnosti v prostom tlaku pri valci s pomerom výšky a priemeru 1:1 sú vyššie ako pevnosti kocky pri tom istom hmotnostnom podiele cementu. To, samozrejme, nesúhlasí s predpokladmi. Dôvodov rozdielnych výsledkov je niekoľko.

Rozdiel voči očakávaniam výsledkov pevnosti v prostom tlaku medzi telesami kocky a valca bol spôsobený hlavne metódou výroby skúšobných telies. Pri valcových telesách bola zmes hutnená Proctorovým hutniacim strojom, pri kockových telesách to bol vzhľadom na ich tvar vibračný stôl. Veľkou nevýhodou pri vibračnom stole bola hlavne segregácia kameniva ktorá negatívne ovplyvnila výsledky. Segregácia vznikala hlavne kvôli krivke zrnitosti, ktorá nie je pri stmelených zmesiach, hlavne kvôli ekonomickým dôvodom, navrhovaná ako pri betónových zmesiach. Druhým dôvodom mohla byť aj optimálna vlhkosť, ktorá bola zisťovaná len pre strednú hodnotu hmotnostného podielu cementu, a to 6%.

Výsledky bakalárskej práce nedokážu dostatočne posúdiť vplyv tvaru skúšobného telesa na pomer pevností v tlaku valca a kocky. A to hlavne z dôvodu potreby väčšieho množstva skúšobných vzoriek, ktoré z časových a kapacitných dôvodov nebolo možné vykonať. Napriek výsledku, práca poskytuje dobrý základ a uvedenie do problematiky pre ďalší výskum.

5 Zoznam použitých zdrojov

[1] ČSN EN 14227 – 1:*Směsy stmelené hydraulickými pojivy-Specifikace-Část 1:Směsi stmelené cementem.* Praha: Český normalizační inštitút, 2008.

[2] SCOTT WILSON LIMITED :*The use of quarry fines in hydraulically bound mixtures for construction applications :Technical Report.* 2008 http://www.sustainableaggregates.com/library/docs/mist/10069?ma_6_4_003.pdf

[3] REID,J.M;EDWARDS,P;CHANDLER,J.W.E;HASSAN,K.E,*Hydraulically bound mixtures incorporating recycled and secondary aggregates .Banbury:Waste&Resources Action Programme*, 2008, 27s ISBN 1–84405-375-XDostupné z : http://www.sustainableaggregates.com/library/docs/wrap/L0336_agg79_004_005.pdf

[4] ČSN EN 14227-1 *Směsi stmelené hydraulickými pojivy-Specifikace-Část 1-Směsi stmelené cementem* Praha: Český normalizační inštitút, 2004

[5] *Základní charakteristika cementu*, citácia 11.5.2016. Dostupné z: http://www.ebeton.cz/pojmy/cement

[6] ČSN EN 13286-41:*Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy-Část 41:Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsi stmelených hydraulickými pojivy,* Praha: Český normalizační inštitút, 2004

[7] *Factors affecting concrete cube & cylinder strength ratio,* citácia 12.5.2016. Dostupné z http://theconstructor.org/concrete/factors-affecting-concrete-cube-cylinder-strength-ratio/8419/

[8] ELWELL J. DAVID;FU GONGKANG : *Compression testing of concrete : Cylinders vs. Cubes. Special Report 119.* 1995 Dostupné z : http://ntl.bts.gov/lib/21000/21100/21121/PB99100182.pdf

[9] EVANS, R.H. *The Plastic Theories for the Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams.* 1944 London : Journal of the Institution of Civil Engineers

[10] *Cement making process*, citácia 12.5.2016. Dostupné z : http://kids.britannica.com/comptons/art-114024/To-make-cement-limestone-is-crushed-mixed-with-other-materials

[11] *Production of cement.* Citácia 12.5.2016 Dostupné z : http://www.chemistry-assignment.com/55-3-production-of-cement

[12] *Druhy cementu,* citácia 15.5.2016 Dostupné z : http://www.ebeton.cz/pojmy/druhy-cementu

[13] *Jaký použít cement na výrobu betonu?,* citácia 15.5.2016 Dostupné z : http://www.stavebni-vzdelani.cz/cement-na-beton/

[14] *Cement – základní vlastnosti, citácia* 14.5.2016 Dostupné z : http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=malty_cement_zk

[15] *Konštrukčný hutný betón, jeho vlastnosti a technické parameter, citácia 14.5.2016* Dostupné z: http://www.asb.sk/stavebnictvo/stavebne-materialy/beton/konstrukcny-hutny-beton-jeho-vlastnosti-atechnicke-parametre

[16] *Proctor,* citácia 20.5.2016 dostupné z : http://silap.cz/?p=160&lang=en

[17] HEPNER, Urban. Vlastne vytvorené fotografie, vlastne vytvorené tabulky a grafy, 2016

6 Zoznam tabuliek

Tabuľka 1: Druhy cementov [12].....14
Tabuľka 2: Minimálny obsah spojiva [1].....18
Tabuľka3:Charakteristická pevnosť v [1].....19
Tabuľka 4: Charakteristická pevnosť v ťahu 19
Tabuľka 5 : Dáta R. H. Evansa, pomer pevností v tlaku vzhľadom na triedu betónu [9].....26
Tabuľka 6: Skúška zrnitosti [17].....32
Tabuľka 7: Hodnoty Proctorovej skúšky 35
Tabuľka 8: Označenie a charakteristika skúšobných vzoriek [17].....40
Tabulka 9: Hodnoty skúšky pevnosti v tlaku telies v tvare valcov[17].....41
Tabuľka 10: Hodnoty skúšky pevnosti v tlaku telies v tvare kociek [17].....42
Tabuľka 11: Porovnanie výsledkov pevností v tlaku[17].....43

7 Zoznam obrázkov

Obrázok 1: Výroba cementu [10]..... 13
Obrázok 2: Pec na výrobu cementu [11].....14
Obrázok 3: Normalizované označenie cementu podľa EN 197-1 [13].....15
Obrázok 4: Podstata skúšky pevnosti v tlaku. [14].....20
Obrázok 5: Skúšobný lis od firmy LABORTECH s.r.o.....21
Obrázok 6: Typický pracovný diagram skúšky pevnosti v tlaku [15].....22
Obrázok 7: Príklad uspokojivého porušenia skúšobných telies v tvare kocky. [6].....23
Obrázok 8: Príklad neuspokojivého porušenia skúšobných telies [6] 23
Obrázok 9: Príklad uspokojivého porušenia skúšobných telies v tvare valca [6].....24
Obrázok 10: Príklad neuspokojivého porušenia skúšobných telies v tvare valca [6].....24
Obrázok 11: Znázornenie rozdielov v geometrii valca a kocky [8].....25
Obrázok 12: Porovnanie pôsobenia zaťaženia rôznymi smermi [8].....27
Obrázok 13: Segregácia kameniva pri výrobe skúšobného telesa [9].....28
Obrázok 14: Jednotlivé frakcie potrebné na hotovú zmes kameniva [17].....30
Obrázok 15: Homogenizovaná zmes pripravená na ďalšie použitie [17].....30
Obrázok 16: Sada preosievacích sít [17].....31
Obrázok 17: Misky s navlhčenými zmesami [17].....33
Obrázok 18: Hutnenie Proctorom [17].....33
Obrázok 19: Proctorov hutniaci stroj [16].....34
Obrázok 20:Váženie zmesi spolu s formou po hutnení Proctorovým mechanizmom [17].……36
Obrázok 21: Vytláčanie vzorky z formy pomocou hydraulického zdviháka [17].....37
Obrázok 22: Valcové skúšobné vzorky hneď po výrobe [17].....38
Obrázok 23: Pripravená zmes s rôznymi hmotnostnými podielmi cementu [17].....39
Obrázok 24: Výroba skúšobných vzoriek pomocou vibračného stola [17].....39
Obrázok 25: Skúšobný lis od firmy Infratest, maximalna sila 100 kN[17].....40
Obrázok 26: Skúšobný lis od firmy Formtest[17].....40
Obrázok 27: Skúšobné vzork v tvare kocky pripravené na stláčanie[17] 41
Obrázok 28: Teleso kocky po porušení[17] 41
Obrázok 29: Stláčanie skúšobného telesa valca[17].....42

Tabuľka 1: Druhy cementov [12].....14

Tabuľka 2: Minimálny obsah spojiva [1].....18

Tabuľka3:Charakteristická pevnosť v [1].....19

Tabuľka 4: Charakteristická pevnosť v ťahu 19

Tabuľka 5 : Dáta R. H. Evansa, pomer pevností v tlaku vzhľadom na triedu betónu [9].....26

Tabuľka 6: Skúška zrnitosti [17].....32

Tabuľka 7: Hodnoty Proctorovej skúšky 35

Tabuľka 8: Označenie a charakteristika skúšobných vzoriek [17].....40

Tabulka 9: Hodnoty skúšky pevnosti v tlaku telies v tvare valcov[17].....41

Tabuľka 10: Hodnoty skúšky pevnosti v tlaku telies v tvare kociek [17].....42

Tabuľka 11: Porovnanie výsledkov pevností v tlaku[17].....43

8 Zoznam grafov

Graf 1: Obor zrnitosti [1].....16
Graf 2: Vzťah medzi pevnosťou telesa a jeho geometriou [8].....26
Graf 3: Graf výslednej krivky zrnitosti [17].....32
Graf 4: Výsledný graf modifikovanej Proctorovej skúšky [17].....36
Graf 5: Graf vzťahu medzi množstvom cementu a pevnosti v tlaku kocky[17].....43