

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA STAVEBNÍ
Katedra technologie staveb**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
Směsi stmelené hydraulickými pojivy
na bázi sulfátovápenatých popílků pro
pozemní komunikaci**

**Marek Polák
2017**

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.

České vysoké učení technické

Fakulta stavební

Katedra technologie staveb

Směsi stmelené hydraulickými pojivy na bázi sulfátovápenatých popílků pro pozemní komunikaci

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předkládanou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze 25. 5. 2017

.....

Marek Polák

České vysoké učení technické

Fakulta stavební

Katedra technologie staveb

Směsi stmelené hydraulickými pojivy na bázi sulfátovápenatých popílků pro pozemní komunikaci

Poděkování

Tímto bych velice rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Rostislavu Šulcovi, Ph.D. za veškeré rady a vedení. Dále pak také všem z laboratoře katedry silničních staveb, pod vedením Ing. Petra Mondscheina, Ph.D., za ochotu a pomoc při provádění veškerých zkoušek, včetně obsluhy některých strojů.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Polák</u>	Jméno: <u>Marek</u>	Osobní číslo: <u>424391</u>
Zadávající katedra: <u>K122 - Katedra technologie staveb</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Příprava, realizace a provoz staveb</u>		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Směsi stmelené hydraulickými pojivy na bázi sulfátovápenatých popílků pro pozemní komunikaci</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Proposal hydraulically bound mixtures from sulfocalcic for use in road construction</u>	
Pokyny pro vypracování: 1) Rešerše k směsím stmelnými hydraulickými pojivy (vstupní materiály, okruh použití). 2) Návrh podkladní vrstvy vozovky na základě sulfáto vápenatých popílků a jejich úprav. 3) Návrh složení směsi stmelené hydraulickým pojivem na bázi sulfátovápenatého popílku, sloužící k záměně směsi stmelené cementem. 4) Ověření základních mechanických vlastností (pevnost v tlaku, index mrazuvzdornosti) u navržených směsí. 5) Vyhodnocení experimentu vzhledem k možnému použití v konstrukci podkladních vrstev vozovky.	
Seznam doporučené literatury: 1) ČSN EN 14 227-5 Směsi stmelené hydraulickými pojivy – Specifikace – Část 5: Směsi stmelené hydraulickými silničními pojivy 2) BENSCHIEDT, N., R. HELA a Asociace pro využití energetických produktů. Příručka Popílek V Betonu: Příručka: Základy Výroby a Použití. 2.přepřac. vyd. Hostivice: ČEZ Energetické produkty vydává pro ASVEP, 2013. 3) FEČKO, Peter. Fly Ash. Ostrava: VŠB, 2005 4) SMOLA, M.: Návrh směsi stmelené hydraulickými pojivy pro pozemní komunikaci, 2015	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>24. 02. 2017</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>28. 05. 2017</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
_____	_____
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
_____	_____
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem směsi stmelené hydraulickými pojivy na bázi sulfátovápenatých popílků pro podkladní vrstvu pozemní komunikace. V práci jsou uvedeny všechny vstupní materiály, které do těchto směsí vstupují, včetně jejich vlastností a množství. Součástí práce je i výroba zkušebních těles, na kterých je dále prováděna zkouška pevnosti v tlaku a zkouška odolnosti vůči mrazu. Vše dle příslušných norem. Na závěr jsou pak shrnuty výsledky celé práce a diskuse.

Klíčová slova: pojiva na bázi sulfátovápenatých popílků, podkladní vrstva pozemní komunikace, fluidní popílků, výroba zkušebních těles, pevnost v tlaku, odolnost vůči mrazu

Annotation

This bachelor thesis describes a design of a mixture of hydraulic binders based on sulfated fly ashes for the base layer of the road construction. All input materials entering these mixtures, including their qualities and quantities, are listed in the text. Another part of my work is also the production of testing samples on which compressive strength and frost resistance tests are carried out, which is done in correspondence with. In conclusion, the results of the whole work and the discussion are summarized.

Key words: binders based on sulfated fly ashes, base layer of the road, fluid ash, production of testing samples, compressive strength, frost resistance test

Obsah

Úvod	8
1 Teoretická část	10
1.1 Dělení směsí.....	10
1.1.1 Směsi stmelené.....	10
1.1.1.1 Směsi stmelené cementem.....	10
1.1.1.2 Směsi stmelené struskou.....	10
1.1.1.3 Směsi stmelené popílkem.....	11
1.1.2 Směsi nestmelené.....	11
1.2 Pojivo na bázi sulfátovápenatých popílků	12
1.2.1 Sorfis starší generace z roku 2015 [3].....	12
1.2.2 Sorfis z roku 2017 [4]	14
1.3 Požadavky na směsi stmelené hydraulickými pojivy.....	16
1.3.1 Zrnitost kameniva	16
1.3.1.1 Zkouška zrnitosti.....	17
1.3.2 Vlhkost směsi	19
1.3.2.1 Proctorova zkouška	19
1.3.3 Klasifikace podle pevnosti v tlaku.....	22
1.3.3.1 Zkouška pevnosti v tlaku	22
1.3.4 Odolnost vůči mrazu.....	23
Použitá literatura	25
Seznam obrázků	28
Seznam tabulek	28

Úvod

V dnešní době, vzhledem k poloze naší republiky, se stále nejvíce elektrické energie vyrábí v teplených elektrárnách, a to nejčastěji spalováním hnědého uhlí. Důvodem, proč tomu tak je, jsou především dostatečné zásoby těchto paliv na našem území. Při spalování fosilních paliv, však vznikají i tzv. VEP neboli Vedlejší energetické produkty. Tyto produkty, i přes jejich značný potenciál, bohužel často končí jen na složištích, a pouze zhruba jedna třetina z celého objemu těchto VEP pokračuje k dalšímu zpracování. Mezi tzv. VEP se mimo jiné řadí i sulfátovápenaté popílků.

Smyslem této práce je tedy využití pojiv na bázi sulfátovápenatých popílků při výrobě směsi pro podkladní vrstvy vozovky, jako plnohodnotné náhrady za energeticky náročnější cement.

V našem případě se jedná o hydraulická pojiva s pracovními názvy Sorfix IV a Sorfix VI na bázi sulfátovápenatých popílků z elektrárny Ledvice, vznikající, jako vedlejší energetické produkty při spalování hnědého uhlí, které jsou následně upravovány pro dosažení požadovaných fyzikálních a chemických vlastností.

Tato bakalářská práce se tedy zabývá návrhem ideální směsi pro podkladní vrstvy vozovky stmelené těmito pojivy. Výslednou směs, která bude odpovídat požadované pevnostní třídě a odolnosti vůči mrazu, bude pak možné použít pro část zkušebního úseku. Dnes je nejpoužívanějším hydraulickým pojivem cement čili toto pojivo bylo použito pro základní směs, která bude následně porovnána s dalšími materiály na bázi fluidních popílků.

V této práci, budu navazovat na diplomovou práci Návrh směsi stmelené hydraulickými pojivy pro pozemní komunikaci od autora Smoly [2], ve které se zabýval návrhem podobných směsí, avšak s pojivem Sorfix starší generace. Od té doby došlo k značnému vylepšení a optimalizaci pojiva Sorfix, pro dosažení lepších vlastností.

Cíle práce:

- Rešerše k směsím stmelenými hydraulickými pojivy
- Vstupní materiály, okruh použití
- Návrh podkladní vrstvy vozovky na základě sulfátovápenatého popílku, sloužící k záměně směsi stmelené cementem
- Návrh receptury stmelené pojivy Sorfix IV a Sorfix VI pro podkladní vrstvu vozovky
- Zjištění optimální vlhkosti směsi
- Výroba navržených směsí
- Zkoušky pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání
- Zkoušky na odolnost vůči mrazu
- Určení indexu mrazuvzdornosti
- Vyhodnocení experimentu vzhledem k možnému použití v konstrukci podkladních vrstev vozovky

1 Teoretická část

1.1 Dělení směsí

V této práci se budeme zabývat takovými typy směsí, které lze především využívat v podkladních vrstvách vozovky. Tyto směsi se tedy rozdělují podle toho, zda je přítomno nějaké pojivo, či nikoliv. A to na směsi stmelené a směsi nestmelené.

1.1.1 Směsi stmelené

Směsi stmelené nějakým druhem určitého pojiva mají vůči směsím nestmeleným hned několik výhod. Není tedy žádným překvapením, že se tyto směsi začali v podkladních vrstvách vozovek využívat mnohem častěji než směsi nestmelené.

Tyto směsi mají mnohem vyšší modul pružnosti. To je však vykoupeno nižší pevností a křehkostí. Při menších deformacích vznikají velká napětí a dochází k porušením. Při tomto porušení vzniká velké množství malých trhlinek, které však mají směr jiný, než je směr smykové síly, a tak nemají na smykovou pevnost téměř žádný vliv.

Stmelené směsi je vhodné používat ve vrstvách spolupůsobících s podkladem. Podklad pod touto vrstvou umožní uplatnění smykových napětí. Největším problémem stmelených směsí v podkladních vrstvách je nutné vytváření pravidelných reflexních trhlin.

1.1.1.1 Směsi stmelené cementem

Jedná se o směsi kameniva s řízenou zrnitostí, cementu nebo hydraulického silničního pojiva a případně dalších vstupních materiálů, navržených tak aby se dosáhlo požadovaných vlastností.

1.1.1.2 Směsi stmelené struskou

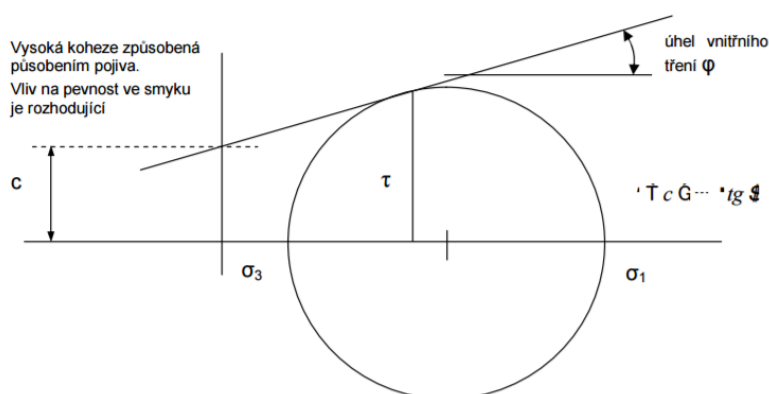
Jsou směsi obsahující jednu nebo více struskových hmot (kamenivo tvořené krystalickými křemičitany, hlinitokřemičitany vápníku a hořčíku, které se získává pomalým chlazením roztavené vysokopecní strusky), směs zeminy a vodu, která tvrdne při hydraulické reakci karbonatů. Případně se pak ještě mohou přidávat další vstupní materiály, pro dosažení požadovaných vlastností.

1.1.1.3 Směsi stmelené popílkem

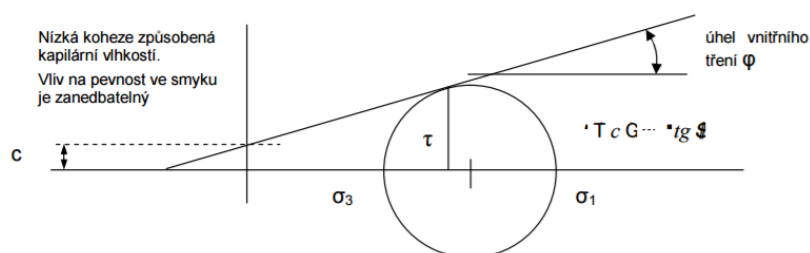
Tyto směsi jsou stmeleny hydraulickými pojivy, ve kterých jsou hlavními složkami křemičité nebo vápenaté popílky. Vše se smíchá se směsí zeminy a vodou, která stejně jako u směsí stmelených struskou tvrdne při hydraulickou reakcí.

1.1.2 Směsi nestmelené

Směsi nestmelené neobsahují žádné stmelovací hmoty. A tak u těchto směsí je rozhodující složkou pevnosti ve smyku vnitřní tření. Soudržnost těchto materiálů je způsobena pouze kapilárními silami, způsobenými vlivem vlhkosti, a tak lze velikost této síly zanedbat. Zde je tedy situace naprosto odlišná od směsí stmelených, kde se soudržnost stává významným faktorem ovlivňující výslednou pevnost.



Obr. 2: Mohrova kružnice – stmelené směsi [1]



Obr. 1: Mohrova kružnice – nestmelené směsi [1]

- c koheze (soudržnost)
- σ_1, σ_3 hlavní napětí
- τ smykové napětí
- φ úhel vnitřního tření

1.2 Pojivo na bázi sulfátovápenatých popílků

Jak již bylo řečeno v úvodu, tato práce se zabývá návrhem složení ideální směsi, za použití hydraulických pojiv na bázi sulfátovápenatých popílků, pro podkladní vrstvu konstrukce vozovky zkušebního úseku.

Cílem je navrhnout směs tak, abychom dosáhli co možná nejvíce podobných vlastností a odpovídajících pevností v tlaku, jako mají směsi, ve kterých je pojivem běžně používaný cement. Čili zjistit ideální množství pojiva a vody vůči kamenivu.

V této práci, budu navazovat na diplomovou práci Návrh směsi stmelené hydraulickými pojivy pro pozemní komunikaci od autora Smoly [2], ve které se zabýval návrhem podobných směsí, avšak s pojivem Sorfix starší generace [3].

Od té doby došlo k značnému vylepšení a optimalizaci pojiva Sorfix, a tak by mělo být dosaženo lepšího poměru množství použitého pojiva ku výsledné pevnosti v tlaku.

1.2.1 Sorfix starší generace z roku 2015 [3]

Jednalo se o fluidní popílek z procesu fluidního spalování uhlí s mletým vápencem, který obsahuje kromě hlinitokřemičité látky také nejméně 2 % hmotn. volného CaO a nejméně 2 % hmotn. CaSO₄, a který se smísí s vodou, obsahující plastifikátor pro zlepšení reologických vlastností v koncentraci 0,2 až 3 % hmotn., vztaženo na hmotnost fluidního popílku, a k této směsi přidá 2 až 30 % hmotn. vápenného hydrátu, vztaženo na hmotnost fluidního popílku, přičemž poměr voda/fluidní popílek je 0,5 až 1,5, a připravená směs se vloží do formy a uloží se po dobu 0,5 až 4 hod. při teplotě 15 až 25 °C a poté se propaří v horké vodní páře při atmosférickém tlaku v uzavřeném prostoru při teplotě 40 až 95 °C po dobu 2 až 36 hodin.

Tab. 1: Návrh komunikace ke zkoušení [2]

Staničení	km 0.000 – 0.300	km 0.300 – 0.600	km 0.600 – 0.900	km 0.900 – 1.200	km 1.200 – 1.500	km 1.500 – 1.900	
Konstrukce	ACO 11 50/70; 40 mm						
	ACP 16 + 50/70; 70 mm			EAC 16 (standard) 70 mm	EAC 16 Sorfix 70 mm	ACP 16 + 50/70; 70 mm	
	SC C _{8/10} ; 130 mm pojivo: cement	SP C _{8/10} ; 130 mm Sorfix	SP C _{8/10} ; 130 mm HVFAC		SP C _{3/4} ; 150 mm Sorfix		REC C _{3/4} ; 150 mm Sorfix
	SD _k 200 mm						
Tloušťka konstrukce:	440 mm			460 mm			
Aktivní zóna (max. 500 mm)	Cement (variantně Dorosol, Doroport)	Sorfix			Sorfix II		

Autor se ve své práci [2] zabýval návrhem směsi pro zvýrazněné části podkladní vrstvy pozemní komunikace zkušebního úseku v Pruněřově. V podkladní vrstvě byly navrženy směsi kameniva stabilizované cementem (SC) o požadované pevnosti C_{8/10} a směsi kameniva stabilizované hydraulickým pojivem Sorfix starší generace (SP) o požadovaných pevnostech C_{3/4} a C_{8/10}.

Tab. 2: Výsledky směsi Sorfix I-IV 6% [2]

SMĚS	Označení vzorku	Zkouška	Vlhkost směsi při výrobě [%]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Průměrná objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]
Sorfix I-IV 6%	6 - 3	Tlak 7 dní	5,9	2275	2293	3,53	3,53
	6 - 4	Tlak 7 dní	6,7	2311		3,52	
	6 - 1	Tlak 28 dní	5,9	2313	2296	6,05	5,84
	6 - 6	Tlak 28 dní	6,7	2278		5,63	
	6 - 2	Mráz	5,9	2304	2318	1,11	1,76
	6 - 5	Mráz	6,7	2331		2,40	
	Součinitel mrazuvzdornosti						0,30

V práci Smoly [2] byla směs s označením Sorfix I-IV 6% s obsahem Sorfixu 6 %, zvolena jako optimální pro návrh směsi odpovídající pevnostní třídě C_{3/4}. Směs se Sorfixem starší generace vykazovala značně nižší pevnosti po zmrazování oproti pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání.

Tab. 3: Výsledky směsi Sorfix I-IV 12% [2]

SMĚS	Označení vzorku	Zkouška	Vlhkost směsi při výrobě [%]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Průměrná objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]
Sorfix I-IV 12%	12 - 3	Tlak 7 dní	5,3	2310	2326	9,37	8,77
	12 - 4	Tlak 7 dní	6,7	2342		8,17	
	12 - 1	Tlak 28 dní	6,7	x	x	15,20	13,44
	12 - 6	Tlak 28 dní	6,7	x		11,68	
	12 - 2	Mráz	6,7	2298	2290	12,75	12,80
	12 - 5	Mráz	6,7	2281		12,84	
	Součinitel mrazuvzdornosti						0,95

Směs s označením Sorfix I-IV 12% s obsahem Sorfixu 12 %, byla zvolena jako optimální pro návrh směsi odpovídající pevnostní třídě C_{8/10}. Směs se Sorfixem starší generace s takto vysokým obsahem pojiva vykazovala dostatečnou pevnost i odolnost vůči mrazu.

1.2.2 Sorfix z roku 2017 [4]

Má práce se budu zabývat návrhem směsi stmelené pojivy Sorfix IV a Sorfix IV na bázi sulfátovápenatých popílků z elektrárny Ledvice.

Je to bezslínkové hydraulické pojivo, které vznikne smísením fluidního popílku ze spalování uhlí s mletým vápencem, který obsahuje kromě hlinitokřemičité látky také nejméně 2 % hmotn. volného CaO a nejméně 2 % hmotn. CaSO₄, nebo jeho směsi s látkami vybranými ze skupiny tvořené křemičitým úletovým popílkem a Ca(OH)₂, se záměsovou vodou obsahující plastifikátor pro zlepšení reologických vlastností v koncentraci 0,2 až 3 % hmotn., vztaženo na hmotnost fluidního popílku, spočívá podle vynálezu v tom, že se fluidní popílek ze spalování uhlí s mletým vápencem umele na měrný povrch 350 až 650 m²/kg. Záměsová voda se mísí s umletým fluidním popílkem nebo s jeho směsí v hmotnostním poměru 0,2 až 0,65. Fluidní popílek se před smísením s Ca(OH)₂ a/nebo křemičitým úletovým popílkem umele, nebo se umele společně s Ca(OH)₂ a/nebo křemičitým úletovým popílkem.

Tab. 4: Návrh komunikace ke zkoušení

Staničení	km 0.000 – 0.300	km 0.300 – 0.600	km 0.600 – 0.900	km 0.900 – 1.200	km 1.200 – 1.500	km 1.500 – 1.900
Konstrukce	ACO 11 50/70; 40 mm					
	ACP 16 + 50/70; 70 mm					
	SC C _{8/10} ; 130 mm pojivo: cement	SP C _{8/10} ; 130 mm Sorfix	SP C _{8/10} ; 130 mm HVFAC	SP C _{3/4} 150 mm Sorfix	SC C _{3/4} ; 150 mm pojivo: cement	
	ŠD _A , 200 mm					
Tloušťka konstrukce:	440 mm			460 mm		

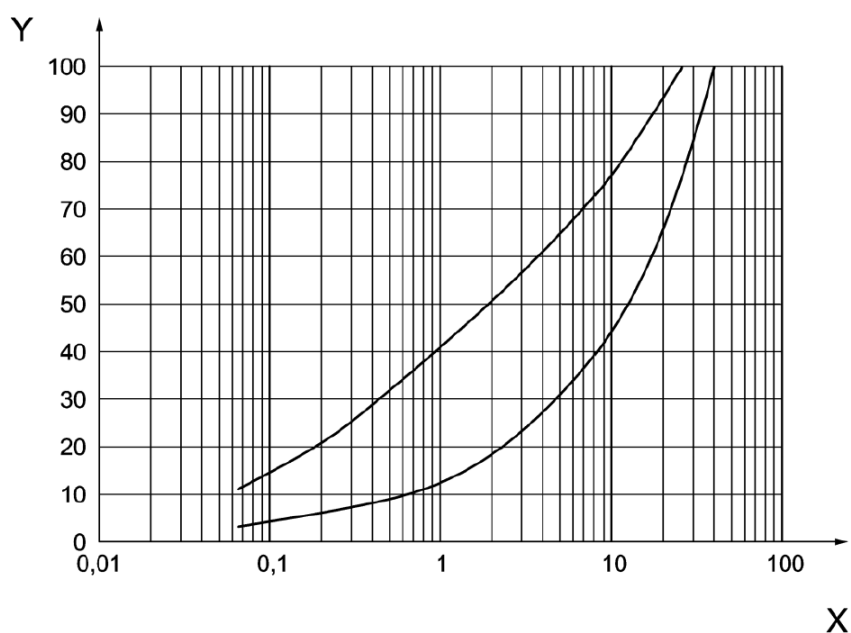
Obrázek představuje nový návrh skladby zkušební úseku pozemní komunikace v Prunéřově, s využitím směsí s pojivy Sorfix IV a Sorfix VI na bázi sulfátovápenatých popílků z elektrárny Ledvice. Pro zvýrazněné části v podkladní vrstvě vozovky byly navrženy směsi kameniva stabilizované cementem (SC) o požadované pevnosti C_{8/10} a směsi kameniva stabilizované hydraulickými pojivy Sorfix IV a Sorfix VI (SP) o požadovaných pevnostech C_{3/4} a C_{8/10}. Součástí požadavků na pevnost v tlaku po 28 dnech, je i požadavek na odolnost vůči mrazu po 13 zmrazovacích cyklech. Ostatní vstupní materiály, které byly pro návrh směsi využity, jsou popsány v dalších kapitolách.

1.3 Požadavky na směsi stmelené hydraulickými pojivy

Směsi stmelené hydraulickými pojivy na bázi sulfátovápenatých popílků musí splňovat požadavky, uvedené v následujících kapitolách. Jedná se o normové požadavky, a to včetně popisů provádění normových zkoušek vycházejících z normy ČSN EN 14 227 – Směsi stmelené hydraulickými pojivy.

1.3.1 Zrnitost kameniva

Pro směsi v naší práci jsme zvolili kamenivo Zbraslav 0/32. Kamenivo pro směsi stmelené hydraulickými pojivy na bázi sulfátovápenatých popílků musí splňovat požadavky dle následujících obrázků, vycházejících z normy ČSN EN 13242 [V].



Legenda

X velikost síta v mm

Y propad zrn v % hmotnosti

Obr. 3: Oboru zrnitosti, pro směsi s kam. 0/31,5 stmelené hydraulickými pojivy [1]

Tab. 5: Povolný rozsah propad zrn sítím v hmotnostních % [I]

Síť ^{NP2)} mm	Propad zrn v % hmotnosti	
	minimum	maximum
40	100	
31,5	85	100
25	75	100
20	65	94
10	44	78
4	26	61
2	18	50
0,5	8	30
0,25	6	22
0,063	3	11

1.3.1.1 Zkouška zrnitosti

Stanovení zrnitosti kameniva probíhá pomocí síťového rozboru, dle ČSN EN 933-1 [II]. Pomocí normované sady sítí, se kamenivo rozdělí na jednotlivé frakce, podle velikosti jednotlivých zrn od největších až po ty nejmenější částice prachu.

Stroje a zařízení potřebná pro zkoušku [II]:

- Prosévací přístroj
- Normová sada zkušebních sítí předepsané velikosti
- Dno, víko, případně nástavec na síta
- Váha
- Sušárna s odpovídající teplotou
- Štětce, kartáče
- Nádoby

Tab. 6: Minimální hmotnost zkušebních navážek

Velikost zrna kameniva D (největší) mm	Hmotnost zkušební navážky (nejmenší) kg
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤ 4	0,2

Postup [II]:

- 1) Nejprve provedeme přípravu zkušební navážky kameniva o minimální hmotnosti dle Tab. 2. Zkušební navážka se poté vysuší v sušárně při teplotě 110 ± 5 °C do ustálené hmotnosti, následně se vzorek zváží a zaznamená jeho hmotnost (m_1).
- 2) Po vysušení dochází k uvolnění jemných částic. Dále se vzorek umístí na síto 0,063mm nebo na sestavu sít různých velikostí, abychom předešli případnému poškození sít, a promývá se vodou, dokud voda odtékající ze síta není čistá. Zbytky na sítích se poté znovu vysuší do ustálené hmotnosti při teplotě 110 ± 5 °C a tato hmotnost se poté zaznamená (m_2).
- 3) Takto upravený vzorek se vysype na sadu normovaných sít, umístěných na prosévacím stroji. Sloupec sít mimo jiné obsahuje i víko, dno a předepsaný počet sít. Síta jsou poskládána od těch s největšími otvory až po ty úplně nejjemnější.
- 4) Sloupec sít se poté třese pomocí prosévacího přístroje, popřípadě je možné prosévat ručně.
- 5) Po dostatečném prosévání se odendávají jednotlivá síta, a zváží se postupně všechny zbytky na sítích (R_i). Během zkoušky nesmí dojít ke ztrátě vzorku, síta je nutno důkladně vyčistit.
- 6) Materiál, který zbyl na dně se zváží a zaznamená – zbytek (P)
- 7) Jestliže se $\sum R_i + P$ liší od hmotnosti m_2 o více než 1 %, je nutné celou zkoušku opakovat.

Jednotlivé hmotnosti zaznamenané na sítích se vynesou do grafu

Dále vypočítáme procento jemných částic f [%] [III]:

$$f = \frac{(m_1 + m_2) + P}{m_1} \times 100$$

- f procento jemných částic [%]
- m_1 hmotnost suché navážky [kg]
- m_2 hmotnost suché navážky po praní [kg]
- P hmotnost zbytku na dně sestavy [kg]

1.3.2 Vlhkost směsi

Vlhkost směsi se zvolí tak, aby bylo dosaženo optimálních mechanických vlastností směsí, ale také a bylo možné bez větších problémů směs hutnit na stavbě. Během míchání musí být zajištěno rovnoměrné a důkladné rozmíchání pojiva v celém objemu směsi. Optimální vlhkost stanovujeme dle EN 13286-2 [III] pomocí Proctorovi zkoušky.

1.3.2.1 Proctorova zkouška

Zkouška se používá pro stanovení vzájemného vztahu mezi vlhkostí a objemovou hmotností směsi. Zkouška je vhodná pro směsi s velikostí síta do 63 mm. Podle velikosti zrn se nadále odvíjí postup Proctorovi zkoušky.

Tab. 8: Typy moždířů [III]

Proctorův moždíř	Průměr d_1 mm	Výška h_1 mm	Tloušťka	
			Stěna t_w mm	Základní deska t mm
A	100,0 ± 1,0	120,0 ± 1,0	7,5 ± 0,5	11,0 ± 0,5
B	150,0 ± 1,0	120,0 ± 1,0	9,0 ± 0,5	14,0 ± 0,5
C	250,0 ± 1,0	200,0 ± 1,0	14,0 ± 0,5	20,0 ± 0,5

Tab. 7: Typy pěchů [III]

Pěch	Hlavní požadavky		
	Hmotnost pěchu m_R kg	Průměr základu d_2 mm	Výška dopadu h_2 mm
A	2,50 ± 0,02	50,0 ± 0,5	305 ± 3
B	4,50 ± 0,04	50,0 ± 0,5	457 ± 3
C	15,00 ± 0,04	125,0 ± 0,5	600 ± 3

V našem případě použijeme moždíř typu B o průměru 150 mm a pěch typu B o hmotnosti 4,5 kg, dopadající z výšky 457 mm.

Další stroje a zařízení potřebná pro zkoušku:

- Sušárna
- Nádoby
- Lopatka
- Váha
- Metla na promíchání
- Ocelové pravítko

Postup [III]:

- 1) Materiál zachycený na zkušební síti 31,5 mm se odstraní a stanoví se jeho vlhkost a objemová hmotnost.
- 2) Materiál, který propadne sítí se rozdělí na 4 a více vzorků o hmotnosti přibližně 6 kg.
- 3) Poté provedeme navážení jednotlivých složek. U každé směsi použijeme jiné množství vody, abychom poté mohli sestavit křivku zhutnitelnosti a určit tak optimální vlhkost směsi.
- 4) Po navážení promícháme všechny složky pomocí vrtačky a míchací metly.
- 5) Následuje hutnění směsi pomocí pěchu
 - Hmotnost pěchu: 4,5 kg
 - Pěch padající z výšky: 457 mm
 - Počet hutněných vrstev: 5
 - Počet úderů v jedné vrstvě: 56
 - Moždík třídy B: $\varnothing 150 \pm 1$ mm, $h = 120 \pm 1$ mm o hmotnosti m_1
- 6) Moždík plníme tak, aby povrch směsi nebyl více jak 10 mm nad horním okrajem.
- 7) Po vyndání vzorku z Proctorova pěchu odstraníme přebytečnou směs a důkladně zarovnáme horní povrch vzorku s okrajem moždíře pomocí pravítka.
- 8) Moždík se směsí zvážíme a zaznamenáme jeho hmotnost m_2 .
- 9) Zhutněnou směs poté vyjmeme z formy a vložíme do sušárny.
- 10) Vzorek sušíme do ustálené hmotnosti při teplotě 110 ± 5 °C a následně zvážíme jeho hmotnost m_3
- 11) Zkoušku opakujeme s každým se zbývajících vzorků.

Výpočet:

Objemová hmotnost vlhké směsi

$$\rho = \frac{(m_2 - m_1) \times 1000}{V}$$

- ρ objemová hmotnost zhutněné vlhké směsi [kg/m^3]
- m_1 hmotnost moždíře [g]
- m_2 hmotnost moždíře se směsí [g]
- V objem moždíře [cm^3]

Objemová hmotnost vlhké směsi

$$w = \frac{m_4 - m_3}{m_3} \times 100 [\%]$$

- w vlhkost směsi [%]
- m_3 hmotnost suché směsi [g]
- m_4 hmotnost vlhké směsi [g]

Objemová hmotnost vlhké směsi

$$\rho_d = \frac{(100 \times \rho)}{(100 + w)}$$

- ρ_d objemová hmotnost zhutněné suché směsi [kg/m^3]
- ρ objemová hmotnost zhutněné vlhké směsi [kg/m^3]
- w vlhkost směsi

Výsledky poté vyneseme do grafu křivky zhutnitelnosti. Hodnoty objemové hmotnosti suché směsi vyneseme na osu y a vlhkosti na osu x. Těmito body proložíme křivku a zjistíme polohu maximální hodnoty. Výsledné maximální hodnoty odečteme z grafu.

1.3.3 Klasifikace podle pevnosti v tlaku

Směsi stmelené hydraulickými pojivy na bázi sulfátovápenatých popílků se klasifikují do pevnostních tříd dle normy ČSN EN 14 227 [I] viz Tab. 5 níže.

Tab. 9: Klasifikace podle pevnosti v tlaku [I]

Sloupec	1	2	3
Řádek	Minimální hodnoty R_c pro válcová zkušební tělesa pro štíhlostní poměr 2 ^a MPa	Minimální hodnoty R_c pro válcová zkušební tělesa pro štíhlostní poměr 1 ^a a zkušební tělesa tvaru krychle MPa	Třída R_c
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}

^a Pokud se použijí válcová zkušební tělesa se štíhlostním poměrem jiným než 1 nebo 2, musí se před použitím stanovit korelace s válcovými tělesy o štíhlostním poměru 1 nebo 2.

1.3.3.1 Zkouška pevnosti v tlaku

Tato zkouška se provádí dle normy ČSN EN 13286-41 [VI]. Pomocí zkušebního lisu zjistíme, jak velké tlakové síle zkušební těleso odolá, než dojde k jeho porušení. Tuto hodnotu v kN poté zaznameneáme.

Další stroje a zařízení potřebná pro zkoušku:

- Zkušební list (laboratoř katedry silničních staveb)
- Nádoby, posuvné měřítko
- Sádra, špachtle, nádoby

Postup:

- 1) Nejprve je třeba změřit rozměry zkušebních těles s přesností 0,5 %, zvážit a následně zaznamenat tyto hodnoty.
- 2) Poté zkontrolujeme rovinnost horní i spodní plochy zkušebních těles. Tolerance rovnoběžnosti je 2 mm na 100 mm. Tělesa, která nevyhoví této podmínce musí být upravena broušením, nebo krycí vrstvou ze sádry.
- 3) Následně vložíme těleso do zkušebního listu. Zatěžování by se mělo zvyšovat, pokud možno co nejvíce lineárně bez větších rázů. K porušení zkušebního tělesa by mělo docházet v rozmezí 30–60 s po zahájení zatěžování. Výslednou sílu v kN zaznamenáme.

Výpočet:

Výsledná pevnost v tlaku

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

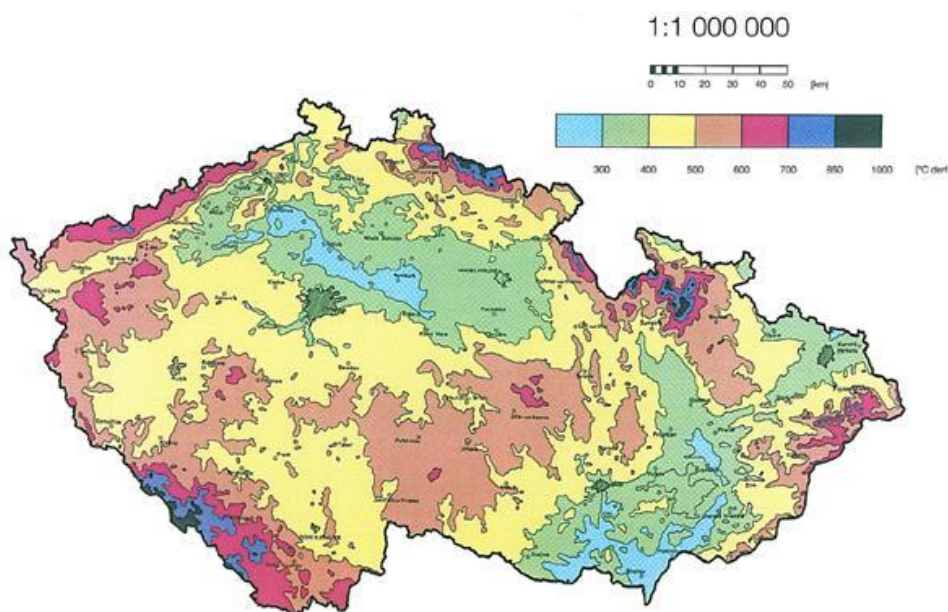
- R_c pevnost v tlaku [MPa]
- A_c plocha průřezu tělesa [mm²]
- F maximální síla při porušení [N]

1.3.4 Odolnost vůči mrazu

Zkouška se provádí dle normy ČSN 73 6124-1 [VII]. Podle typu směsi, oblasti použití a lokality, ve které daná směs bude použita, se zvolí počet cyklů. Snížení pevnosti by nemělo být větší než 15 % oproti výsledku pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání.

Další stroje a zařízení potřebná pro zkoušku:

- Mrazicí skříň
- Nádoby, plstěná podpoložka
- Sádra, špachtle
- Vodováha



Obr. 4: Mapa charakteristických hodnot indexu mrazu [VII]

Tab. 10: Počet cyklů podle dané oblasti [VII]

Vrstva vozovky	Teplota zmrazování (°C)	Počet cyklů podle návrhového indexu mrazu dané oblasti (°C × den) ^a		
		do 350	350 až 600	nad 600
horní podkladní vrstva	-20 ± 2	10	13	16
spodní podkladní vrstva ^b	-15 ± 2	7	10	13

^a Index mrazu podle ČSN 73 6114.
^b Platí i pro ochrannou vrstvu, je-li použita.

Postup [IV]:

- 1) Příprava zkušebního tělesa probíhá naprosto stejným způsobem jako příprava tělesa pro zkoušku pevnosti v tlaku. Včetně způsobu a dob zrání.
- 2) Po uplynutí 28 dní zrání, bez ztráty vlhkosti, se zkušební tělesa umístí na plstěnou podložku tak, aby podložka byla zhruba ze dvou třetin ponořená ve vodě.
- 3) Vzorky necháme dostatečně nasytit vodou.
- 4) Poté vzorky vyndáme z nádoby s plstěnou podložkou a vložíme je do mrazicí skříně na dobu 6 ± 0,5h.
- 5) Následně vzorky opět uložíme do nádoby s plstěnou podložkou, částečně ponořenou ve vodě a necháme vzorky opět kapilárně nasytit a zároveň rozmraznout. Doba nasycení by měla trvat 18 ± 0,5h.
- 6) Vše opakujeme, až do dosažení požadovaného počtu cyklů.

České vysoké učení technické

Fakulta stavební

Katedra technologie staveb

Směsi stmelené hydraulickými pojivy na bázi sulfátovápenatých popílků pro pozemní komunikaci

----- **Konec zveřejněné části** -----

Použitá literatura

- [1] ZAJÍČEK, Jan. Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro vrstvy vozovek [online]. 2008 [cit. 2017-05-10]
- [2] SMOLA, Martin. Návrh směsi stmelené hydraulickými pojivy pro pozemní komunikaci. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.
- [3] ŠKVÁRA, František. Způsob zpracování energetických produktů. Česká republika. 2013-155. Uděleno 28.02.2013. Zapsáno 08.10.2014.
- [4] ŠKVÁRA, František. Způsob přípravy bezslínkového hydraulického pojiva. Česká republika. 306484. Uděleno 28.12.2016. Zapsáno 08.02.2017.
- [5] MOŽÍŠ, Zdeněk. FPC betony na bázi upravených sulfátovápenatých popílků. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.

Normy

- [I] ČSN EN 14 227-5 Směsi stmelené hydraulickými pojivy – Specifikace – Část 5: Směsi stmelené hydraulickými silničními pojivy
- [II] ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor
- [III] 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
- [IV] ČSN 73 6114 Vozovky pozemních komunikací. Základní ustanovení pro navrhování
- [V] ČSN EN 13242 Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace

- [VI] ČSN EN 13286-41 Nestmelené a hydraulicky stmelené směsi – Část 41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti hydraulicky stmelených směsí v tlaku
- [VII] ČSN 73 6124-1 Stavba vozovek – Vrstvy ze směsí stmelených hydraulickými pojivy – Část 1: Provádění a kontrola shody

Seznam obrázků

Obr. 1: Moohrova kružnice – nestmelené směsi [1]	11
Obr. 2: Moohrova kružnice – stmelené směsi [1]	11
Obr. 3: Oboru zrnitosti, pro směsi s kam. 0/31,5 stmelené hydraulickými pojivy [I] 16	
Obr. 4: Mapa charakteristických hodnot indexu mrazu [VII]	24

Seznam tabulek

Tab. 1: Návrh komunikace ke zkoušení [2]	13
Tab. 2: Výsledky směsi Sorfix I-IV 6% [2]	13
Tab. 3: Výsledky směsi Sorfix I-IV 12% [2]	14
Tab. 4: Návrh komunikace ke zkoušení	15
Tab. 5: Povolovaný rozsah propad zrn sítím v hmotnostních % [I]	17
Tab. 6: Minimální hmotnost zkušebních navážek	17
Tab. 7: Typy pěchů [III]	19
Tab. 8: Typy moždířů [III]	19
Tab. 9: Klasifikace podle pevnosti v tlaku [I]	22
Tab. 10: Počet cyklů podle dané oblasti [VII]	24